

Riskante Kalküle – Über Paradigmen und Kontexte informatischen Handelns

**Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
am Fachbereich Informatik
der Universität Hamburg**

**vorgelegt von
Brigitte Clasen**

Hittfeld 2007

Gutachter:

Prof. Dr. Klaus Brunnstein

Prof. Dr. Christiane Floyd

Tag der mündlichen Prüfung:

10.02.2009

Inhalt

1	Einleitung	7
1.1	Intention	8
1.2	Grundbegriffe	17
1.2.1	Paradigma	17
1.2.2	Kontext	20
1.2.3	Risiko	21
1.2.4	Kalkül	27
1.3	Abfolge der Kapitel	29
2	Riskante Kalküle	33
2.1	Ein Fallbeispiel: AEGIS	37
2.1.1	Sachverhalt	38
2.1.2	Politische Voraussetzungen	39
2.1.3	Strategische Situation	41
2.1.4	Taktische Situation	42
2.1.5	Situation auf der Vincennes	46
2.1.6	Interpretation der Daten	50
2.1.7	AEGIS-Design	54
2.1.8	Entscheidungsmacht	56
2.2	Paradigmen und Kontexte	61
2.2.1	System	63
2.2.2	Modell	67
2.2.3	Softwaretechnik	83
2.2.4	(Relationen-)Logik als Basis für Datenmodellierung	86
2.2.5	Zeitunabhängigkeit	94
2.2.6	Formalisierbarkeit durch Satzanalyse	100
2.2.7	Definition und Definitionsmacht	104
2.2.8	Ökonomieprinzip	107
2.2.9	Funktionenmodellierung	117
2.2.10	Hierarchien für den statischen Aspekt	118
2.2.11	Netzstrukturen für den dynamischen Aspekt	123
2.2.12	Hierarchien und Netze für den kommunikativen Aspekt	127
2.2.13	Handlungsorientierung und Machbarkeit	132
2.2.14	Sprachliche Beschreibung und maschinelle Ausführung	134

2.2.15	Sequentielles und iteratives Vorgehen	137
2.2.16	Kontextfreiheit von Modellen	140
2.2.17	Korrektheit und Verifizierbarkeit	141
2.2.18	Analyse und Synthese	148
2.2.19	Unabhängigkeit der Elemente	150
2.2.20	Trennung von Daten und Funktionen	150
2.2.21	Notationen und Konventionen	151
2.2.22	Kalkülvorstellung	156
3	Paradigmen aus dem Vorfeld der Informatik	159
3.1	Der Weg zur Universalmaschine	164
3.1.1	Die Hollerithmaschine	165
3.1.2	Analogrechner und Netze	174
3.1.3	Erste Digitalrechner	183
3.1.4	ENIAC	189
3.1.5	EDVAC und Von-Neumann-Architektur	200
3.1.6	Die Analogie von Rechenmaschine und Gehirn	205
3.1.7	Von der »Bombe« zum Colossus und nicht weiter	208
3.1.8	Der Übergang in die Informatik	222
3.2	Systematisierung der Paradigmen	228
3.2.1	Industrialisierte Forschung: Arbeitsteilung und Interdisziplinarität	228
3.2.2	Ökonomie und Rationalität	230
3.2.3	Modularität, Wiederverwendbarkeit und Standardisierung	232
3.2.4	Genauigkeit und Korrektheit	233
3.2.5	Von-Neumann-Architektur und Informationstheorie	237
3.2.6	Kalkül: Formalismus und Kybernetik	239
3.2.7	Universalität	241
4	Einflüsse aus anderen Wissenschaften	245
4.1	Philosophie	247
4.1.1	Der Logische Empirismus	247
4.1.2	Das Konstitutionssystem	254
4.1.3	Die Einheitswissenschaft	269
4.1.4	Das Verifikationsprinzip und seine Kritik	274
4.1.5	Wittgensteins »Welt«-Vorstellung	281
4.2	Mathematik	292
4.2.1	Der Verlust der Anschaulichkeit	292

4.2.2	Die logizistische Begründung der Mathematik	298
4.2.3	Die intuitionistische Kritik	310
4.2.4	Das Hilbertprogramm	318
4.2.5	Die drei Positionen der Grundlagendebatte im Überblick	325
4.2.6	Gödels Unvollständigkeitsbeweise	327
4.2.7	Turings maschinentheoretische Wende	335
5	Leibniz' Kalkülvorstellung	345
5.1	Leibniz und die Moderne	348
5.2	Der historische Kontext	352
5.2.1	Wirtschaft und Politik	352
5.2.2	Naturphilosophie und Technik	358
5.2.3	Logik und Erkenntnis	366
5.3	Die Kalkülvorstellung	372
5.3.1	Analyse und Synthese	372
5.3.2	Nominal- und Realdefinition	375
5.3.3	Wahrheit	378
5.3.4	»Characteristica universalis«	379
5.3.5	Der allgemeine Kalkül	383
5.3.6	Leibniz' Kalkül und moderner Kalkül	391
5.3.7	Kalkül und Monade	398
5.4	»Theoria cum praxi«	404
5.4.1	Rechenmaschine und Dualzahlensystem	404
5.4.2	Pumpmaschine	409
5.4.3	Eine statistische Untersuchung zur Sterblichkeitsrate	414
5.5	Zusammenfassung	419
6	Zusammenfassung der Paradigmen	421
6.1	Semantisch-kognitive Paradigmen	424
6.2	Situativ-praktische Paradigmen	431
6.3	Sozial-interaktive Paradigmen	434
6.4	Informationssysteme als Risikosysteme	440
7	Handlungsorientierungen	445
7.1	Die semantisch-kognitive Ebene	454
7.1.1	Wissen und Kenntnisse erwerben (Kontexte erkennen)	454
7.1.2	Methoden entwickeln (kontextualisieren)	456
7.1.3	Erwartungen und Möglichkeiten reflektieren	457

7.1.4	Eine mögliche Modifikation des Paradigmas »Kalkül«	460
7.2	Die situativ-praktische Ebene	474
7.2.1	Paradigmen und Risiken explizit machen	474
7.2.2	Modelle kontextualisieren	477
7.2.3	Alternativen entwickeln	479
7.2.4	Vielfalt erhalten (Flexibilität und Stabilität)	481
7.2.5	Ein Ansatz für IT-Risikomanagement	486
7.3	Schlußbemerkung	499
8	Literaturverzeichnis	501
9	Personenregister	529

1 Einleitung

1.1 Intention

Offensichtlich sind größer und größer werdende Gebiete des Lebens von technisch realisierten formalisierten Verfahren und Abläufen durchdrungen. Formulierungen wie die von der »Informationsgesellschaft« sind hierauf ein Reflex. Das im Mittelpunkt dieser Entwicklung stehende Artefakt, der Computer, begleitet uns in den hochentwickelten Industriegesellschaften inzwischen von Kindesbeinen an. Seine Allgegenwart als Spielzeug, Unterhaltungsmedium, Kommunikations- und Arbeitsmittel läßt sein Vorhandensein allmählich so selbstverständlich werden wie das einer Waschmaschine oder eines Kühlschranks. Ihm wird deshalb auch mit der gleichen Einstellung begegnet.

Dies kann nicht nur als Erfolgsgeschichte wahrgenommen werden. Erfahrungen mit Endbenutzern und Informatikern sprechen dafür, daß der Glaube nicht abgenommen hat, mit dem Computer dank Formalisierung ein sicheres Mittel zur Untersuchung, Abbildung und Steuerung, mithin zur Beherrschung vielfältigster Vorgänge zu haben. Mit diesem Glauben geht seit einiger Zeit eine weitere Erscheinung einher: Gleichgültigkeit zufolge Vertrautheit. Beides ist beunruhigend, denn es ist dem informatischen Handeln von seinen Grundlagen aus gesehen unangemessen. Worauf die Informatik basiert und womit sie arbeitet, sind – das behauptet der Beginn des Titels – *riskante Kalküle*. Seine Fortsetzung sagt, wo ihre Risiken aufgespürt und festgemacht werden sollen, in *Paradigmen und Kontexten informatischen Handelns*.

Es ist nicht neu, daß sich Beunruhigung einstellt, wenn von der Informatik die Rede ist. Dem Plädoyer Joseph Weizenbaums (1923-2008) für den rationalen, das hieß für ihn, ethisch eingebundenen und sachlich begrenzten Einsatz von Naturwissenschaft und Technik und gegen den »Imperialismus der instrumentellen Vernunft« (Weizenbaum 1976) aus der Mitte der siebziger Jahre, folgte Anfang der achtziger die Warnung des Club of Rome vor gesellschaftlichen Auswirkungen der Mikroelektronik (Friedrichs / Schaff 1982). Zu Beginn der neunziger Jahre hielten Informatiker der Informatik ihre geringe Bereitschaft vor, ihr eigenes Tun unter geschichtlichen und gesellschaftlichen Hinsichten zu theoretisieren, ohne daß dem hiermit eingeleiteten Versuch, »Sichtweisen der Informatik« (Coy u.a. 1992) zu entwickeln, die deren Grundlagen in den Blick nehmen, eine große Wirkung beschieden gewesen wäre. So hat nicht nur der »Arbeitskreis Theorie der Informatik im Fachbereich Informatik und Gesellschaft der Gesellschaft für

Informatik« in den folgenden Jahren ein Kümmerdasein geführt, sondern auch die Ergebnisse des von 1993 bis 1997 an der Technischen Universität Berlin durchgeführten interdisziplinären Forschungsprojektes »Sozialgeschichte der Informatik« (Siefkes u.a. 1998) machen deutlich, daß zwar von Seiten der Informatik Kenntnisse über diverse sozialwissenschaftliche Methodenansätze erworben werden und eine »Soziologisierung« des Problemfeldes stattfindet, daß dann aber kaum entlang des Materials argumentiert wird, das die informatische Praxis samt ihrer historischen und gesellschaftlichen Situierung ausmacht.¹ Vielmehr entsteht der Eindruck, daß unter dem Einfluß sozialwissenschaftlicher Ansätze mehr *über* informatische Praxis gesprochen wird als *von* ihr. Dies ist insofern problematisch, als dadurch die Standortgebundenheit des Blicks verschwimmt. Anders als der Sozialwissenschaftler kann der »arbeitende Informatiker«² schlecht handlungsentlastet argumentieren. Für ihn sollte – das ist zumindest die hier eingenommene Position – die Auseinandersetzung mit Informatik Selbstaufklärung über die eigene Tätigkeit sein. Zu ihr gehören pragmatische, normative und propositionale Elemente, von denen nicht abgesehen werden kann und die sich nicht gegeneinander ausspielen lassen. Die Analyse informatischer Praxis wird, das machen die angeführten Arbeiten deutlich, semantisch-kognitive, situativ-praktische und sozial-interaktive Aspekte in ihrer jeweiligen Eigenart und in ihrem Wechselspiel einbeziehen müssen. Daß hierfür ein einheitliches Verfahren vorhanden sein könnte, zeichnet sich jedoch nicht ab.

Von sozialwissenschaftlicher Seite ist der Informatik mit ihren Grundlagen ebenfalls eine vergleichsweise geringe Aufmerksamkeit zuteil geworden. Paradigmatische Gegenstände der Wissenschaftsforschung und sozialwissenschaftlicher Untersuchungen, die die sogenannten harten Wissenschaften thematisieren, waren traditionell die Physik, die Technik einschließlich der Technikfolgenabschätzung und der Wissenschaftssteuerung, sowie seit etwas mehr als einem Jahrzehnt die Biotechnologien. Erst in den letzten Jahren haben die digitalen Informationstechnologien ein größeres Gewicht gewonnen. Dies aber vor allem vor dem Hintergrund von Theorien, die einen radikalen gesellschaftlichen Wandel verkündigen und im Kern Behaup-

¹ Die Kritik gilt selbstverständlich nicht für jeden Beitrag des Bandes in gleicher Weise. So nehme ich den Aufsatz von Franco Furger und Bettina Heintz über den Zürcher Computer ERMETH ebenso von dieser Kritik aus wie die Arbeiten von Mechthild Koreuber und Martin Groß-Rhode über die Algebra von Emmy Noether und Saunders MacLane oder Katharine Schmidt-Brücken zum Einfluß der Neurophysiologie auf frühe Computerentwürfe.

² Dies ist als eine analoge Bildung zu dem in der Literatur gebräuchlichen »working mathematician« zu nehmen.

tungen über den technologischen Wandel und seine soziale Wirkung enthalten. Nach Judy Wajcman gilt dies sowohl für die zur Erklärung des Wandels der westlichen Gesellschaften paradigmatischen Theorien der Informationsgesellschaft, des Postfordismus und der Postmoderne als auch für Globalisierungstheorien. Zur Debatte steht mit ihnen unter anderem, ob gesellschaftlicher Wandel technologisch determiniert sei. Gegen die Behauptungen eines naiven technologischen Determinismus werden vielfältige Ergebnisse sozialwissenschaftlicher und historischer Wissenschafts- und Technikforschung angeführt. (Vgl. Wajcman 2002) In ihrer Summe wird deutlich, daß erfolgreiche Technologien erfolgreich sind, weil es sich bei ihnen um Objekte handelt, die sich in einem dynamischen Netzwerk als brauchbar erweisen, indem sie in besonderem Umfang technische und soziale Beziehungen auf sich bündeln. Ein einfaches Beispiel kann dies illustrieren:

Take something you rarely think twice about – the electric refrigerator. We know from historians of technology that once you could choose between an electric refrigerator and a gas refrigerator, both equally effective (Cowan 1983).^[3] General Electric had the financial resources to invest in the development of the electric model, while the manufacturers of gas refrigerators, although they had a product with real advantages from the consumer's point of view, lacked the resources to develop and market their machine. Economic power, not technical superiority, gave the electric refrigerator the edge over its competitor. However, the design of this kitchen »white good« was also shaped by the post-Second World War spread of single-family houses with correspondingly small-scale appliances. This built environment in turn sustains the cultural ideal of the separation of the public and private domestic spheres.^[4] Gender roles and sexual divisions are part of the socio-technical system or network. (Wajcman 2002, 352)

Das technisch wie sozial konstruierte Artefakt steht darüberhinaus in einem historischen Kontinuitätszusammenhang. Da technische Entwicklungen in der Regel an erfolgreiche Vorläufer anknüpfen, bilden sich Entwicklungspfade heraus, auf die nicht unbedingt die Qualität des technischen Ent-

³ Wajcman verweist hier auf: R.S. Cowan. *More Work for Mother: The Ironies of Household Technology from the Open Hearth to the Microwave*, New York 1983.

⁴ Wajcman verweist hier in einer Anmerkung auf: Wajcman, *Feminism Confronts Technology*, Pennsylvania und Cambridge 1991, Kapitel 5.

wurfs, sondern der schon vorhandene Erfolg des Vorläufers lenkend und verstärkend wirken. Erweist sich solchermassen schon der Kühlschrank, eine Spezialmaschine, als ein Objekt, dem größere Aufmerksamkeit angemessen ist, so kann dies für das zentrale Artefakt der Informatik, den Computer, der im Ruf steht, *die* Universalmaschine zu sein, nur umso mehr gelten. Für die Analyse informatischer Praxis scheint es erforderlich zu sein, einen Kontext zu berücksichtigen, in dem die Artefakte, ihre konzeptionelle und technische Herkunft sowie ihr Gebrauch ebenso Platz haben wie Theorien, Verfahrensweisen oder Weltansichten von Informatikern. Die Untersuchung eines so umschriebenen Kontextes erfordert historische und systematische Fragestellungen, die einerseits darauf abzielen, das ganze »Netzwerk« in den Blick zu nehmen, und die andererseits darum bemüht sind, einzelne »Knoten« und »Beziehungen« zu erfassen. In der Folge ergeben sich für die Darstellung von Aspekten informatischer Praxis Argumentationen unterschiedlicher Detaillierung und Reichweite.

Von den sozialwissenschaftlichen Untersuchungen über die Informatik ist hier besonders Bettina Heintz' Arbeit über den Zusammenhang von Rationalisierung, Mathematik und Mechanisierung »Die Herrschaft der Regel. Zur Grundlagengeschichte des Computers« (Heintz 1993) zu erwähnen, da die Kapitel 3 und 4 dieser Arbeit Berührungspunkte mit jener aufweisen. Heintz ordnet die Entwicklung des Computers in den Kontext des Erfolgs der formalistischen Mathematik ein. Das Schwergewicht ihrer Argumentation liegt daher bei ihr nicht auf der Geschichte der technischen Konstruktion von Computern, sondern auf deren »kultureller Konstruktion«. Dementsprechend untersucht und interpretiert sie besonders den Weg von David Hilbert ((1862-1943) zu Alan Turing (1912-1954). Turings Argumentation bewege sich »im Kontext der »modernen« Mathematik, so wie sie von David Hilbert begründet worden ist. [...] Mit seiner Arbeit hat Turing die formalistische Auffassung der Mathematik zu Ende gedacht und sie gleichzeitig radikalisiert: Formalisierung und Mechanisierung sind bedeutungsäquivalente Prozesse.« (Heintz 1993, 10f.) Die Turingmaschine als »Papiermaschine« und der Computer als Realisierung sind für Heintz im Anschluß an die Philosophin Sybille Krämer »symbolische Maschinen«. Heintz führt aus:

Operativ eingesetzte Kalküle sind »symbolische Maschinen«. [...] Im Rahmen eines Kalküls erfolgt die Manipulation der Zeichen ohne Bezugnahme auf ihre mögliche Bedeutung. Das Operieren mit den

Symbolen vollzieht sich losgelöst von ihrer Interpretation. Diese Entkoppelung von Manipulation und Interpretation, von Syntax und Semantik, macht den Umgang mit geistigen Objekten zu einem objektivierbaren und rein mechanischen Prozeß (vgl. Krämer 1991)⁵. Geistige Tätigkeiten, rechnen z.B. oder logisch folgern, werden damit auf ein Verfahren reduziert, auf eine Technik, die im Prinzip allen zugänglich ist, sogar, wie Turing später bewies, einer Maschine. (Heintz 1993, 54f.)

Heintz' Ziel ist, »die Grundlagen bereitzustellen für die Entwicklung einer Soziologie des Computers, oder besser: einer Soziologie der Computerisierung.« (Heintz 1993, 10) Sie fragt, inwieweit die Mathematik einer wissenssoziologischen Betrachtung zugänglich ist. Inhaltlich klären sich dabei manche kulturgeschichtlichen und sozialen Bedingungen für die Durchsetzung des kalkülgemäßen Denkens und Handelns im 20. Jahrhundert. Die informatische Praxis und Theoriebildung erreicht diese Untersuchung aber nur insofern, als sie auf das Konzept der Turingmaschine als Konzept der Berechenbarkeit eingeht. Sie endet damit, die Maschinenhaftigkeit menschlichen Verhaltens unter bestimmten gesellschaftlichen Bedingungen als Voraussetzung für die Entwicklung von technischen Artefakten, die anscheinend intelligent sind, zu identifizieren. (Heintz 1993, 294-299) Nicht gegen diesen Schluß läßt sich ein Einwand vorbringen, sondern zum einen gegen die Behauptung, daß der »innerwissenschaftliche Entstehungsort« des Computers die »moderne« Mathematik sei, und zum anderen gegen das Gewicht, das der Identifikation von kalküliertem Denken und Turingmaschine beigelegt wird. Gegen die Annahme *eines* »innerwissenschaftlichen Entstehungsortes« sprechen die rein ingenieurwissenschaftlichen Züge der realen Entwicklungsgeschichte des technischen Artefakts. Ihnen messe ich einen anderen Stellenwert zu als Heintz, da sich bei einem Ansatz, der von einem netzartigen Kontext ausgeht, eine methodisch begründete Bevorzugung der »theoretischen Erfindung« des Computers ebensowenig ergibt wie die eines anderen Aspekts. Gegen die Gewichtung des Turingschen Konzepts bei Heintz spricht nach meiner Auffassung in erster Linie, daß damit Probleme angesprochen sind, die für die informatische Praxis nahezu ausschließlich in einem Teilbereich der Informatik, nämlich der Künstlichen Intelligenz, Belang ha-

⁵ Heintz verweist hier auf: Sybille Krämer, Die Säkularisierung der Symbole: Ein Projekt der Neuzeit und seine (post)modernen Folgen. In: Bernward Joerges (Hg.). Wissenschaft – Technik – Modernisierung. WZB-Papers, Berlin 1991, S. 19-30.

ben. Die Bedeutung dieses Teilbereichs für das gesamte Feld der Informatik halte ich für zu gering, als daß man davon ausgehen könnte, hiermit die in ihr anzutreffenden Kalkülvorstellungen, den Kalkülgebrauch oder das Spektrum ihrer Probleme paradigmatisch erfaßt zu haben. Darüberhinaus ist das von Krämer (1988) zuerst eingeführte und von Heintz übernommene Konzept der »symbolischen Maschine« mit der Identifikation von Kalkül, Turingmaschine und Computer problematisch. Es ist dies zum einen, weil in ihm naturwissenschaftliche Schwierigkeiten der Turingschen Maschinentheorie⁶ überdeckt werden, und es ist dies zum anderen, weil es über das realisierte Artefakt eine Behauptung aufstellt, die gerade nicht beweisbar ist. Ein dritter Punkt der Kritik richtet sich schließlich gegen die Verknüpfung mit der Thematik von »Moderne« und »Gegenmoderne«. Hier schließt Heintz an eine Problematisierung des Mathematikhistorikers Herbert Mehrtens an, deren Übertragbarkeit von der Mathematik auf die Informatik mit mehr als einem Fragezeichen versehen werden muß. Mehrtens (1990) hat eine Rekonstruktion der Grundlagendebatte in der Mathematik vorgelegt, die diese auf den Gegensatz von Formalismus und Intuitionismus bringt. Für Mehrtens ist der Formalismus Ausdruck der (mathematischen) Moderne, der Intuitionismus Ausdruck der Gegenmoderne. Dieses Schema macht sich Heintz zu eigen, sie schreibt:

Die formalistische Auffassung der Mathematik steht für die mathematische Moderne.^[...] Als »modern« mochte die neue Mathematik den Zeitgenossen aus verschiedenen Gründen erscheinen, modern war aber vor allem der radikale Verzicht auf Repräsentation. Im Formalismus sind die Zeichen »autark« geworden, sie haben keine Referenzfunktion, keine Bedeutung mehr, und der Mathematiker, der mit ihnen operiert, ist im Prinzip frei in ihrer Setzung. In der formalistischen Mathematik gibt es keinen Verweis mehr auf irgend etwas außerhalb des mathematischen Systems, heiße das nun Anschauung, Evidenz, sinnliche Erfahrung oder Intuition. Die Mathematik erzeugt die Objekte, mit denen sie operiert, und die Regeln, nach denen sie vorgeht, selbst und findet sie nicht irgendwo vor, weder im platonischen Reich der Ideen noch in der empirischen Erfahrung – und ge-

⁶ Zur Diskussion, ob Formalisierung und Mechanisierung so gleichzusetzen sind, sowie zu den angesprochenen Schwierigkeiten vgl. die Ausführungen zur Hertzschen Mechanik in den Abschnitten 2.2.2 und 4.2.7.

nau gegen diese Loslösung der Mathematik von der ›Welt‹ richtete sich denn auch die Reaktion der Gegenmoderne. (Heintz 1993, 16)

Eine solche Entgegensetzung von Moderne und Gegenmoderne ist entweder eine reine Stilisierung oder eine unangemessene Vereinfachung. Bei Mehrtens entsteht sie dadurch, daß er die Teilnehmer und Grenzen der Grundlagendebatte so wählt, daß er die dritte Position, den Logizismus, als Position auslassen kann. Dadurch umgeht er die Auseinandersetzung mit denjenigen, die wie die formalistischen Mathematiker vom kalkülmäßigen Funktionieren der Mathematik sprachen und die, anders als sie, Begriffe und Formeln ohne Bedeutung nicht für möglich erachteten. So wird zum Beispiel der zum Wiener Kreis zählende Mathematiker Hans Hahn (1879-1934) – dessen Argumente in dieser Arbeit noch mehrmals zur Sprache kommen werden –, ein entschiedener Kritiker Hilberts, von Mehrtens nicht einmal namentlich erwähnt. Ob für Mehrtens' Vorgehen im Rahmen seiner auf die Mathematik gerichteten Untersuchung auch gute Gründe sprechen, kann hier offen bleiben.⁷ Im Hinblick auf die Informatik ist es unbrauchbar, weil sich die Frage nach Moderne oder Gegenmoderne gar nicht stellt, die nach den Argumenten der dritten Position aber deutlich: Der Computer als reine »Syntaxmaschine« wäre nichts als ein unnützer Kasten, der in der Ecke stünde und Strom verbrauchte. Bloß wegen des bei seinem Gebrauch immer schon gegebenen Zusammenhangs von Pragmatik, Semantik und Syntax ist mit ihm etwas anzufangen. Die Kalküle der Informatik sind nie ohne Bedeutung. Gerade die Einbindung der Informatik in die Welt erzeugt Probleme und Risiken und von hier aus wären auch die Fragen nach Grundlagen zu stellen.

Im folgenden geht es in dieser Arbeit um eine Auseinandersetzung mit der Informatik als Wissens-, als Sach- und als Handlungssystem. Die Argumentation ist eine inhaltliche Auseinandersetzung mit Aussagen und Sach-

⁷ Mehrtens kündigt sein Programm so an: »In mathematikhistorischer Tradition gesehen, gebe ich eine neue Interpretation der sogenannten ›Grundlagenkrise‹ der Mathematik, die nicht Krise der ›Grundlagen‹ war, sondern die Erschütterung der Begriffe von Wahrheit, Sinn, Gegenstand, Existenz der Mathematik. Diese Begriffe bezeichnen weniger epistemologische Grundfesten der Wissenschaft als die großen Orientierungsmarken, an denen sich das Selbstverständnis einer Wissenschaft, ihre Identität bestimmt. Zu beschreiben sind Wandel und Krise der Identität der Mathematik, an die die Identität der Mathematiker geknüpft ist. Mathematik ist eine Sprache und die Arbeit an ihr, darum kann sich die Identität nicht an einem ›Gegenstand‹ herstellen, und darum auch bleiben die ›Grundlagen‹ so unklar und umstritten. Der Diskurs der Mathematik um die ›reine‹ Sprache strikt geregelten Bezeichnens als Teil der kulturellen Produktion und die in ihm hergestellten Identitäten bedürfen einer theoretischen Erörterung« (Mehrtens 1990, 8)

verhalten der Informatik. Es wird in ihr davon ausgegangen, daß die »Einflußgrößen«, nach denen sich Informatiker richten und die die Entwicklung des informatischen Handelns samt der Theoriebildung bestimmen, nur zu einem Teil aus der rationalen Rekonstruktion ihrer kognitiven Inhalte ersichtlich werden. Die in den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts eingeleitete und namentlich seit den Arbeiten Thomas S. Kuhns (1922-1996) intensivierte Auseinandersetzung mit den Vertretern des Logischen Empirismus und des Kritischen Rationalismus hat als ein Ergebnis zu Tage gefördert, daß die Entwicklung der Wissenschaften in der Moderne von René Descartes (1596-1650) bis in die Gegenwart von Vorgehensweisen und Zielvorstellungen geprägt wurde, die unter dem Stichwort »Dekontextualisierung« gefaßt werden. (Vgl. Toulmin 1990; Bonß / Hohlfeld / Kollek 1993) Diese Untersuchungen machen zugleich deutlich, daß vor dem Hintergrund der bekannten, von Groß- und Hochtechnologien ausgehenden Risiken und Gefahren eine Beschäftigung mit der Wissenschaft und ihren technischen Anwendungen gerade nach den Kontexten fragen sollte. Eine solche Beschäftigung kann sich deshalb nicht auf Beschränkungen einlassen, wie sie sich aus der Reichenbachschen Unterscheidung zwischen »context of discovery« und »context of justification« ergeben. (Reichenbach 1938) Sie bewegt sich auch jenseits der unfruchtbaren Polarisierung, die es in der Wissenschaftsgeschichtsschreibung und Wissenschaftssoziologie zwischen den Vertretern internalistischer und externalistischer Ansätze gab. Das in Rechnung gestellt, ist diese Untersuchung eine Arbeit *der* Informatik und keine wissenschaftstheoretische, -soziologische oder -historische Arbeit *über* die Informatik.

Es liegt nahe, daß es nun eher um die Informatik als eine gesellschaftliche Praxis geht und weniger um die universitäre Wissenschaft. Informatik als Wissenschaft hat sich sowieso erst zu einem Zeitpunkt etabliert, als es informatisches Handeln schon gab, und als institutioneller Rahmen für Forschung und Entwicklung war die Hochschule von Anfang an nur eine Einrichtung unter anderen. Damit korrespondiert, daß Informatik bis heute keineswegs vorwiegend von universitär ausgebildeten Informatikern ausgeübt wird; in außeruniversitären Bereichen, wie zum Beispiel Beratungsfirmen, stellen solche Informatiker sogar eine Minderheit dar. Die Berufs- und die Tätigkeitsbezeichnungen werden hier deshalb in einem weiten Sinn gebraucht. Auch ist die »informatische Gemeinschaft« aus diesem Grund keine typische »scientific community«, die über definierte Zugänge, eine weitgehend übereinstimmende wissenschaftliche Sozialisation, letztlich über ei-

ne gemeinsame Identität verfügt.⁸ Mit dem Akzent auf der informatischen Tätigkeit treten zudem Unterscheidungen zurück, die im akademischen Bereich traditionell sind, so die von theoretischer und angewandter Wissenschaft sowie Anwendung, oder die sich primär um den Charakter der Wissenschaft drehen, wie Definitionsversuche der Informatik als »Ingenieurwissenschaft«, »Gestaltungswissenschaft« usw. Stattdessen wird deutlich, daß in informatischem Handeln gleichzeitig semantisch-kognitive, situativ-praktische und sozial-interaktive Paradigmen zum Tragen kommen.

Allerdings kann sich kein Einzelner guten Mutes vornehmen, die informatische Praxis als Wissens-, Sach- und Handlungssystem auch nur halbwegs vollständig zu untersuchen und darzustellen. Was allenfalls als möglich erscheint, ist die Auseinandersetzung mit Ausschnitten, die so gewählt sind, daß an ihnen Züge des Ganzen erkannt werden können, von denen plausibel gesagt werden kann, sie seien wesentlich. Anhand von Paradigmen und Kontexten kann deutlich gemacht werden, inwiefern die Informatik mit risikanten Kalkülen zu tun hat. Eine der anfänglichen Orientierung dienende Erläuterung von vier in dieser Arbeit wichtigen Begriffen: »Paradigma«, »Kontext«, »Risiko« und »Kalkül« sei vorangestellt.

⁸ Die Identitätsfrage wird jedoch auch von universitären Informatikern, die an die kritischen Absichten der genannten Publikationen von Wolfgang Coy und Dirk Siefkes anknüpfen, diskutiert. Vgl. Nake / Rolf / Siefkes 2004, besonders die Beiträge des Teils »Arbeitsgruppe »Informatik im interdisziplinären Kontext. Wie wird Identität konstruiert?«, S. 11-80.

1.2 Grundbegriffe

1.2.1 Paradigma

»Paradigmen der Informatik« läßt sich in einem doppelten Sinn verstehen. »Paradigmen der Informatik« kann einmal bedeuten, daß es um diejenigen Paradigmen geht, die der Informatik und informatischem Handeln zu Grunde liegen; »Paradigmen der Informatik« kann aber auch heißen, daß es um diejenigen Paradigmen geht, die für andere Bereiche von Wissenschaft und Alltagsleben gesetzt werden. Beiden Interpretationen wird in dieser Arbeit Raum geboten, denn erst dadurch wird die Informatik mit ihren inneren Strukturen und Handlungen und mit ihrer über die konkrete Anwendung hinausgehenden Wirkung erklärlich.

Der Begriff Paradigma wurde bekanntlich von Kuhn (1962) in Anknüpfung an die Arbeit über »Denkstil« und »Denkkollektiv« von Ludwik Fleck (1896-1961) (1935) in die wissenschaftstheoretische Debatte eingeführt und im weiteren präzisiert und modifiziert. (Kuhn 1978) Kuhns Ansatz ordnet sich in die Kritik an der logisch-empiristischen und der hypothetico-deduktivistischen Wissenschaftstheorie ein.⁹ Für Rudolf Carnap (1891-1970), Carl G. Hempel (1905-1997), Karl R. Popper (1902-1994) und andere hatten Beobachtungssätze einen unabhängigen Status. Für die einen waren sie der Ausgangspunkt einer induktiven Verifikation, für die anderen der der Falsifikation. Beide Seiten waren sich auch insofern einig, als sie davon ausgingen, daß »richtig« betriebene Wissenschaft festen methodologischen Regeln folgen müsse. Weitere Hypothesen, besonders bezüglich der Naturwissenschaften, besagten, daß Wissenschaft kumulativ und prognostisch sei sowie wahrheits- oder einheitsähnlich. Gegen diese Positionen richteten sich aus unterschiedlichen Blickwinkeln die Kritiken von Stephen Toulmin (Prognostizismus, Unabhängigkeit der Beobachtungen), W.V.O. Quine (1908-2000) (Unabhängigkeit der Beobachtungen, Unmöglichkeit des »experimentum crucis«), Paul Feyerabend (1924-1994) (Inkommensurabilität, Einheitsähnlichkeit, Kumulation), Kuhn und anderen. Eine gewisse Übereinstimmung bestand darin, daß die Theoriegeladenheit von Beobachtungen

⁹ Vgl. zur angesprochenen wissenschaftstheoretischen Diskussion vor allem: Feyerabend (1976; 1978a; 1978b; 1983a; 1983b), Hanson (1958), Kuhn (1962; 1970; 1977), Lakatos (1970a; 1970b), Lakatos / Musgrave (1970), Quine (1953) und Toulmin (1953; 1961).

und die empirische Unterdeterminiertheit von Theorien nachgewiesen werden konnten. Der geschichtliche Kontext, in dem Forscher arbeiten und in dem Theorien angesiedelt sind, begrenzt, welche Problemlösungen eine Wissenschaft findet und akzeptiert. Vom Gebrauch der Theorien wird abhängen, welche Erfahrungen mit ihnen gemacht werden. Lothar Schäfer hat darauf hingewiesen, daß bereits Pierre Duhem (1861-1916) die These von der Theoriegeladenheit der Beobachtungen entwickelte, und Philipp Frank (1884-1966), daß Duhem zu den Inspiratoren des frühen Wiener Kreises gehörte. (Vgl. Schäfer 1978, XIII*; Frank 1949, 15)

In der Folge wurde gezeigt, daß die Wahl zwischen Theorien nicht allein von deren empirischer Bestätigung oder Bewährung abhängt, sondern von vorgefundenen Konzepten und Orientierungen. Theorien und Tatsachenbehauptungen lassen sich somit weder säuberlich voneinander trennen, noch haben sie eine unveränderliche Bedeutung. Es bildete sich die Vorstellung von einerseits der Inkommensurabilität von Theorien und andererseits von Theorienetzen heraus, die historisch und gesellschaftlich situiert sind. Erkenntnis und Wissenschaft blieben in dieser Perspektive nicht länger überzeitlich, universell und objektiv, sondern erschienen als kulturell eingebunden und kontingent.

Thomas S. Kuhns Ansatz richtet sich also gegen die Wissenschaftstheorie in der Tradition der analytischen Philosophie, die die formalen Aspekte der Wissenschaft untersucht und die vor allem Fragen nach logischen und methodologischen Aspekten stellt. Ihren Vertretern geht es darum, Kriterien festzulegen, die jedes Aussagensystem erfüllen muß, das als wissenschaftliche Theorie Anspruch auf intersubjektive Gültigkeit haben will. Untersucht werden im wesentlichen die formalen Beziehungen zwischen wissenschaftlichen Aussagen, das heißt ihr Begründungszusammenhang. Der »context of justification« wird von dieser Position als unabhängig von sozialen oder historischen Zusammenhängen begriffen. Die analytische Wissenschaftstheorie analysiert die Wissenschaft mit Hilfe der von der formalen Logik bereitgestellten Methoden, die als universell angesehen werden. Andere Aspekte, wie der Entstehungszusammenhang werden demgegenüber als nicht relevant ausgeblendet. (Vgl. Reichenbach 1938) Zuverlässiges Wissen zeichnet sich in dieser Sichtweise gerade dadurch aus, daß es vom »context of discovery« abgelöst werden kann. So bleibt für Soziales nur der Raum des Falschen, das die Wissenschaft kontaminiert. In diesem Sinn spricht Karin D. Knorr-Cetina geradezu von einem »Modell der ›Kontamination« des Wissenschaftlichen durch das Soziale« (Knorr-Cetina 1988, 85).

Kuhn historisiert stattdessen die Wissenschaft und nimmt dem Anspruch nach alles das in den Blick, was eine wissenschaftliche Gemeinschaft verbindet, wobei die Gemeinsamkeiten sowohl kognitiver als auch sozialer Natur sind. Die von ihm vorgestellten Paradigmen waren vielfältiger Art. (Vgl. Kuhn 1962) Margaret Masterman (1910-1986) führt 21 unterschiedliche Weisen auf, wie Kuhn »Paradigma« verwendete und kritisierte den unklaren Begriff. (Masterman 1970) Kuhn reagierte auf den Vorwurf, »Paradigma« vieldeutig und unklar zu gebrauchen, mit der Formulierung der »disziplinären Matrix«. Mit ihr sollen die jeweils besonderen Gemeinsamkeiten einer Forschergemeinschaft spezifiziert werden.

Nehmen wir nun an, wir hätten mit irgendwelchen Methoden eine solche Gemeinschaft bestimmt. Welche Gemeinsamkeiten erklären die verhältnismäßig unproblematische fachliche Kommunikation und die verhältnismäßig einhelligen fachlichen Urteile? Auf diese Frage ermöglicht mein Buch *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen* die Antwort ein »Paradigma« oder »eine Reihe von Paradigmen«. Das ist eine der beiden Hauptbedeutungen, in denen der Ausdruck in dem Buch gebraucht wird. Dafür möchte ich jetzt die Bezeichnung »Paradigma₁« einführen, doch es dürfte weniger Verwirrung stiften, wenn ich statt dessen »disziplinäre Matrix« sage. »Disziplinär«, weil sie der gemeinsame Besitz der Vertreter einer Fachdisziplin ist; »Matrix«, weil sie aus Elementen verschiedener Art besteht, die alle genauer angegeben werden müssen. Zu den Bestandteilen der disziplinären Matrix gehören alle oder die meisten Gegenstände von Gruppenfestlegungen, die im Buch als Paradigmen, Teile von Paradigmen oder als paradigmatisch bezeichnet werden [Anmerkung 8: Vgl. *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, zweite Hälfte von Kap. 4, dt. ab S. 62, engl. ab S. 38.]. Im Augenblick möchte ich nicht einmal versuchen, eine vollständige Liste anzugeben, sondern statt dessen diejenigen kurz nennen, die den Wissenschaftstheoretiker am meisten interessieren müssen, weil sie für die Erkenntnisfunktion der Gruppe von besonderer Bedeutung sind. Ich möchte sie als symbolische Verallgemeinerungen, Modelle und Musterbeispiele bezeichnen. (Kuhn 1974, 392)

An anderer Stelle hat Kuhn den ihn interessierenden Elementen noch die »gemeinsamen Werte« hinzugefügt. Er vermeidet aber, die »scientific community« in einen weiter gefaßten historisch-sozialen Kontext zu stellen. Dies hat zur Folge, daß Kuhn trotz der Betonung von Gruppenprozessen

und der Historisierung von Wissenschaft letztlich internalistisch argumentiert. Die historischen Ausführungen bleiben dementsprechend ideengeschichtlich orientiert und lassen eine gesellschaftstheoretische Absicht nirgends erkennen. Die zitierte Passage macht aber auch deutlich, daß solche Beschränkungen nicht zwangsläufig mit dem paradigmentheoretischen Ansatz einhergehen. Wie eine Gemeinschaft zu umgrenzen ist, wie die disziplinäre Matrix aufzubauen ist, das sind Fragen, über die sich strittig verhandeln läßt. Evident gibt es hier keine Ableitungsregeln, sondern es sind empirisch plausibilisierte Argumentationen erforderlich, denen man folgen oder die man ablehnen kann.

Die Elemente der Kuhnschen Matrix werden in dieser Arbeit zum einen erweitert, indem aus Arbeiten Stephen Toulmins Nutzen gezogen wird. (1953; 1972; 1990). Dadurch wird zum Beispiel der Begriff des metaphysischen Paradigmas durch den des Ideals der Naturerklärung präzisiert. Dies macht es möglich, auch allgemeine Annahmen und Erwartungen über die »Welt« aufzugreifen, die nicht einer spezifischen Theorie oder Gemeinschaft zuzuordnen sind, sondern die als natürlich oder selbstverständlich gelten und unbefragt zu Ausgangspunkten der Erklärung anderer Dinge werden. (Vgl. Toulmin 1961, 52) Zum anderen wird dabei die Paradigmentheorie mit einem Konzept der Moderne in Verbindung gebracht, in das real- und ideengeschichtliche Aspekte eingegangen sind. Die Dichotomie von »internalistischer« und »externalistischer« Betrachtungsweise wird mit der genügend weit gefaßten Paradigmentheorie aufgelöst. Der rationale Gehalt von Wissenschaft bleibt im Blick und wird nicht zugunsten einer Soziologie der Forschung preisgegeben, die die Intersubjektivität wissenschaftlicher Erkenntnisse nur noch auf die jeweilige fachliche Sozialisation zurückführt und den Gegenstandsbezug verliert. (Vgl. Bonß / Hohlfeld / Kollek 1993)

1.2.2 Kontext

Wenn Informatiker handeln, dann tun sie dies zu einem bestimmten Zeitpunkt, an einem bestimmten Ort, mit bestimmten (materiellen) Ressourcen, mit bestimmten Zielen und Verfahren. Die konkreten Ausprägungen solcher »Arbeitsbeschreibungen« machen jeweils den Kontext des Handelns aus. Die Paradigmen, die dabei jeweils eine Rolle spielen, lassen sich in drei Kategorien unterteilen:

- Semantisch-kognitive Paradigmen. Soweit die Paradigmen die Informatik

als Wissenssystem anbelangen, sind sie als semantisch-kognitive Paradigmen gekennzeichnet.

- Situativ-praktische Paradigmen. Betrachtet man die Informatik als Sachsystem, so lassen sich Paradigmen auch auf dieser Ebene finden. Die situativ-praktischen Paradigmen betreffen die Art und Weise, wie Informatiker ihre technischen Artefakte (Computer, Programme,...) herstellen.
- Sozial-interaktive Paradigmen. Die Informatik ist auch ein Handlungssystem. Informatiker handeln und beziehen sich auf andere Menschen und Institutionen. In diesem Zusammenhang sind sozial-interaktive Paradigmen angesiedelt.

Hinzu tritt die Einbeziehung des historischen Kontextes in doppeltem Sinn. Zum einen mit einem weiteren Horizont als eine Entwicklung, in die die Informatik seit der Vorphase ihrer Entstehung unmittelbar eingebunden ist, zum anderen mit engerem Horizont als kontingente Umstände einer jeweils konkreten Gebrauchssituation informatischer Artefakte. Über die Einbeziehung dieser Aspekte wird es sowohl möglich, die formierenden Einflüsse zu benennen, als auch Risikobetrachtungen zu konkretisieren.

1.2.3 Risiko

Über die Risiken der Informatik wird im Anschluß an Wolfgang Bonß eingegangen. Bonß (1995) hat eine soziologische Theorie des Risikos vorgelegt, die gleichermaßen historisch wie systematisch orientiert ist. In ihr untersucht er drei Komplexe. Erstens übergreifende begriffliche Konzepte von Unsicherheit und Ungewißheit, die den Gehalt des neuzeitlichen Risikobegriffs umreißen, die Begriffe der Zurechenbarkeit, Verantwortbarkeit und Kalkulierbarkeit, sowie eine Abgrenzung von Risikohandlungen und Risikosystemen. Zweitens die Einübung der neuzeitlichen Risikopraxis seit dem Übergang von der Vormoderne zur Moderne. Drittens die Verknüpfung von Fortschrittskonzept und Sicherheitserwartung als Hintergrund der Risikoorientierung und die Annahme, über eine Verwissenschaftlichung von Unsicherheit Risiken beherrschen und in Sicherheit verwandeln zu können.

Die Arbeit von Bonß thematisiert nicht explizit die Informatik, ihre Analyse von wissenschaftsinduzierten Risiken, die sich in »Gefahren zweiter Ordnung« verwandeln, weil sie nicht als Risiken handhabbar sind, ist jedoch für die Informatik fruchtbar zu machen.

Erst wissenschaftserfahrenen Gesellschaften wird deutlich, daß Wissenschaft keineswegs so eindeutig, exakt und fehlerfrei ist, wie oftmals unterstellt wird. Es wird dann deutlich, daß zwar wissenschaftliche Konstruktionen für sich genommen präzise sein mögen, daß aber unerwartete Konsequenzen mit eventuell katastrophalen Folgen dennoch nicht ausgeschlossen werden können. Das um so weniger, je mehr man weiß. Es wird Wissenschaftskritik möglich und erforderlich, die die immanente Kritik überschreitet und auf das Gesamtsystem von Theorie der Wissenschaft, theoretischer und angewandter Wissenschaft sowie Anwendung zielt, um das System zu rekontextualisieren. Wissenschaftskritik als eine Absage an Wissenschaft überhaupt oder als Empfehlung für den Ausstieg aus der Dynamik der Verwissenschaftlichung bleibt hingegen ohne Konsequenzen.

In einer wissenschaftsabhängigen Gesellschaft, in der alle Formen der Konstitution und Aneignung von Wirklichkeit potentiell verwissenschaftlicht sind, gibt es keine Alternativen zur Wissenschaft. Denn die seit der Romantik lieb gewonnenen und seither in zahlreichen Varianten auftretenden Gegensätze von Wissenschaft und Lebenswelt oder Verstand und Gefühl greifen nicht mehr oder verändern ihre bisherige Bedeutung. Sofern die Wissenschaft ihren Absolutheitsanspruch verliert und umgekehrt die Lebenswelt verwissenschaftlicht wird, lassen sich die verschiedenen Aspekte nicht länger gegeneinander ausspielen. Statt dessen ist eine Irreversibilität des Verwissenschaftlichungsprozesses zu konstatieren, die umgekehrt eine nachhaltige und offensichtlich ebenso irreversible Relativierung traditioneller Wissenschaftsideale nach sich zieht. (Bonß / Hohlfeld / Kollek 1993, 9)

Der Begriff des Risikos hängt eng zusammen mit »Ungewißheit« und »Unsicherheit«. Während Ungewißheit im Sinne einer fehlenden Gewißheit zukünftiger Ereignisse eher auf eine Erkenntnisperspektive verweist, bezieht sich Unsicherheit vor allem auf die Handlungsperspektive. Unsicherheit, die in jedem Handeln enthalten ist, zu beherrschen und Ungewißheit in Sicherheit zu überführen, wird von vielen Soziologen als ein elementares Ziel des Menschen verstanden. (Vgl. Bonß 1995, 35ff.) Was allerdings als Unsicherheit interpretiert wird, ist nicht objektiv, sondern gesellschaftlich bedingt. So ist auch die Konzeption des Risikos nicht universell, sondern ein Sonderfall von Unsicherheitshandeln, das sich erst am Beginn der Moderne vollständig durchsetzte. Kennzeichnend für Risiken ist, daß sie nicht einfach existieren,

sondern daß sie intersubjektiv konstituiert sind und sich nur unter bestimmten gesellschaftlichen Voraussetzungen als Risiken herstellen lassen. Wenn heute von Risiken die Rede ist, wird darunter meistens eine »Gefahr«, das heißt eine Ungewißheit, die unabhängig vom Handelnden und von der Situation besteht, verstanden. Ursprünglich wurde der Begriff »Risiko« aber nicht unabhängig vom Handelnden gedeutet, sondern als ihm zukommende »Chance«. Der Begriff tauchte im 12. und 13. Jahrhundert im Zusammenhang mit dem Fern- und Seehandel in italienischen Städten auf. Dieser Handel wurde als planvolle, aber zugleich höchst unsichere Angelegenheit aufgefaßt. Die Unsicherheiten, die zum Beispiel in Überfällen von Transporten oder im Untergang von Schiffen liegen konnten, wurden nicht als Gefahren, sondern als Risiken bezeichnet. »Der Kaufmann, der sie einging, war jemand, der etwas »riskierte«, d.h. »wagte« (ital. rischiare = wagen); er unterwarf sich nicht den Unsicherheiten, sondern forderte sie kalkulierend heraus und spekulierte gleichzeitig auf ein Quentchen Glück.« (Bonß 1995, 50) In diesem Sinn war der rationale Umgang mit Risiken von Anfang an ein Charakteristikum des modernen Unternehmers. Neben der Handlungs- und Entscheidungsbezogenheit sind Risiken auch durch Zurechenbarkeit und Verantwortung gekennzeichnet. Gefahren dagegen sind subjektunabhängig und können demnach auch nicht verantwortet werden. Allerdings kann ein und derselbe Sachverhalt sowohl Risiko als auch Gefahr bedeuten, wie das Beispiel des Geisterfahrers auf der Autobahn zeigt. Für den Geisterfahrer selbst ist sein Verhalten ein Risiko, für andere dagegen stellt sein Handeln eine Gefahr dar. (Vgl. Bonß 1995, 55ff.) Eine Abgrenzung von Risiko zu Gefahr ist nicht immer klar herzustellen, vor allem dann nicht, wenn die Folgen einer Handlung von der Handlung abgekoppelt werden und die Herstellung von Zurechenbarkeit nicht funktioniert. Eine derartige Entkopplung kann in dreifacher Hinsicht erfolgen:

- Zeitlich: Handlungsfolgen machen sich sehr viel später erst bemerkbar. (Grundwassergefährdung aufgrund jahrelanger Düngung.)
 - Sachlich: Handlungsfolgen betreffen einen ganz anderen Bereich. (Selektionsmöglichkeiten auf dem Arbeitsmarkt aufgrund des Einsatzes von Chipkarten für die Krankenversicherung; Säuglinge erhalten keine Muttermilch mehr wegen Überdosierung von Pestiziden.)
 - Sozial: Es ist kein Entscheidungsträger zu finden oder alle sind gleichermaßen betroffen. (Mehrtägiger Ausfall eines Rechenzentrums einer Bank oder Versicherung; AKW-Unfälle.)
- (Vgl. Bonß 1995, 62f.)

Derartige Entkopplungen finden besonders bei komplexen Systemen, zu denen Informationssysteme zählen, statt. In komplexen Systemen treten nicht einzelne »Risikohandlungen« auf, sondern solche Systeme stellen »unsichere Handlungsnetze« oder »Risikosysteme« dar. Insofern die meisten Handlungszusammenhänge als Abfolge von Entscheidungen unter Unsicherheit beschreibbar sind, kann nicht nur ein Kernkraftwerk, sondern ebenso eine Ehe als Risikosystem verstanden werden. Um problematische von unproblematischen Fällen unterscheiden zu können, ist es demnach sinnvoll, Risikosysteme zu differenzieren. Dafür schlägt Bonß vor, die Binnenorganisation mit den Parametern »Komplexität« und »Kopplung«, sowie die Umweltbeziehungen mit den Parametern »Öffnungsgrad gegenüber der Umwelt« und »Output des Systems« zu untersuchen. Es ergeben sich nach Bonß (1995, 76) zwei Tabellen mit jeweils vier Feldern¹⁰:

	niedrige Komplexität	hohe Komplexität
enge Koppelung	• relativ kleine Systeme • lineare Interaktionen mit begrenzter Reichweite, auch bei Krise begrenzt • Kausalität: stark / eindeutig <i>Beispiel: Verbrennungsmotor</i>	• relativ große Systeme • lineare Interaktionen mit begrenzter Reichweite, im Krisenfall potentiell unbegrenzt • Kausalität: stark / uneindeutig <i>Beispiel: Kernkraftwerk</i>
lose Koppelung	• relativ kleine Systeme • reflexive Interaktion, im Prinzip begrenzt, im Krisenfall relativ begrenzt • Kausalität: schwach / eindeutig <i>Beispiel: Ehe</i>	• relativ große Systeme • reflexive Interaktion, im Prinzip unbegrenzt, im Krisenfall relativ unbegrenzt • Kausalität: schwach / uneindeutig <i>Beispiel: (Groß-)Unternehmen</i>

Tabelle 1. Risikosysteme und ihre Binnenorganisation

¹⁰ Bei der Nutzung der Tabelle ist zu beachten, daß Ehen und Kernkraftwerke zwar beide als Risikosysteme beschreibbar sind, aber nicht miteinander verwechselt werden dürfen, da sie unterschiedlichen Systemtypen angehören. (Vgl. Bonß 1995, 64f.)

	geringe negative externe Effekte	hohe negative externe Effekte
geschlossene Grenze	• rigides Containment¹¹ • definierte Umweltbeziehung auch bei Krise kaum zu durchbrechen • Folgen kalkulierbar <i>Beispiel: Verbrennungsmotor</i>	• rigides Containment • definierte Umweltbeziehung bei Krise unvorhergesehen durchbrechbar • Folgen unkalkulierbar <i>Beispiel: Kernkraftwerk</i>
offene Grenze	• Grenzziehung prinzipiell kontextsensibel • Umwelten relativ variabel definiert • Schäden potentiell begrenzt <i>Beispiel: Ehe</i>	• Grenzziehung schwach kontextsensibel • Umwelten relativ variabel definiert • Schäden potentiell unbegrenzt <i>Beispiel: (Groß-)Unternehmen</i>

Tabelle 2. Risikosysteme und ihre Umweltbeziehung

Risiken, die in Systemen mit hoher Komplexität enthalten sind und deren Folgen bei einem »Unfall« unkalkulierbar sind, sind »wissenschaftsinduziert«. Die Systeme wären ohne die bestehende Wissenschaft nicht möglich und diese Wissenschaft verhindert nicht, daß nicht intendierte Folgen größer als intendierte Folgen sein können. Solche nicht intendierten Folgen lassen sich als »Gefahren 2. Ordnung« bezeichnen. (Vgl. Bonß 1995)

Hinsichtlich der Beschäftigung mit Risiken lassen sich weiterhin zwei Perspektiven unterscheiden. Die öffentliche Risikodebatte befaßt sich heute vor allem mit der »ex-post-Perspektive«, das heißt, die Analyse von Risiken findet statt, nachdem ein Schaden entstanden ist. Dabei geht es nur um die Folgen einer Entscheidung oder Anwendung, zum Beispiel Computer eingesetzt zu haben, oder um »Risiken und Nebenwirkungen« von Medikamenten. Risiken können aber bereits vor der Durchführung der Handlung analysiert werden. Für die Informatik bedeutet das, eine Risikoanalyse vor dem Einsatz von Informationssystemen, also bereits im Planungs- und Entwurfsstadium vorzunehmen. Die »ex-ante-Perspektive« ist geeignet, die Handlungsebene und die Risikoentscheidung zu betrachten und in systematische Entscheidungsprozesse einzubeziehen.

¹¹ »Containment« war ursprünglich ein technischer Begriff für ein völlig von der Umwelt abgeschottetes Labor und die Sicherheitseinrichtungen um einen Versuch herum. Inzwischen wird der Begriff mit weiterer Bedeutung benutzt und bezeichnet hier die bewußte und radikale Abschottung eines beliebigen Systems gegenüber der Umwelt. (Vgl. Bonß / Hohlfeld / Kollek 1993)

In der Praxis – zumindest im mir bekannten kommerziellen Bereich – werden Computerrisiken nicht ex ante dargestellt. Allenfalls werden bei Angeboten zur Erstellung von Softwaresystemen Projektrisiken aufgeführt, die primär als finanzielle Risiken mit dem Ziel beschrieben werden, hierfür einen rechtlich gültigen Haftungsausschluß zu vereinbaren.¹² Bezogen auf die »ex-post-Perspektive« existiert für Risiken von Computersystemen seit etwa zehn Jahren das »Forum on Risks to the Public in Computer Systems«¹³, welches regelmäßig das »Risk Forum Digest« (vgl. Risks Forum) herausgibt, in dem Fälle von Computerfehlern, Computerunfällen und Computerrisiken aus verschiedensten Bereichen veröffentlicht werden. Es ist festzustellen, daß in vielen Texten dieser und anderer Quellen nicht nach der Verursachung durch das Computersystem, sondern nach dem »Fehlverhalten« des Benutzers gefragt wird.¹⁴ Hinsichtlich der »ex-ante-Perspektive« und hinsichtlich der Frage, inwieweit Paradigmen für die Risiken relevant oder verantwortlich sind, waren in dem Forum bisher keine Beiträge zu finden. In dieser Arbeit interessiert aber gerade die »ex-ante-Perspektive«, und zwar werden Parameter für »Entscheidungen unter Unsicherheit«, das heißt für die Eingehung eines Risikos gesucht. Einige dieser Parameter sind Grundannahmen, die üblicherweise nicht hinterfragt werden. Beim Einsatz von Computern ist es zum Beispiel die Erwartungssicherheit, die sozial und

¹² Mir sind in meiner Tätigkeit als Beraterin mehrfach Formulierungen begegnet, die genau diesen Zweck hatten, wobei üblicherweise eine Einteilung von Risiken in solche, die den Zeitplan, das Budget und die Qualität betreffen, vorgenommen wird. Aus Gründen der Vertraulichkeit ist es nicht möglich, solche Schriftstücke zu zitieren oder die betroffenen Firmen namentlich zu nennen.

¹³ Dieses Forum wurde vom ACM Committee on Computers and Public Policy gegründet.

¹⁴ So schreibt Dietrich Reister in Bezug auf die »Fahrerassistenz im Luftverkehr« »Der Pilot übergibt im Normalfall die Flugführung an den Autopiloten. Unbeschadet der nachweislichen Beiträge zur Minderung der Arbeitslast der Piloten und zur Erhöhung der Flugsicherheit treten dabei allerdings eine Reihe von Problemen auf wie eine verminderte Aufmerksamkeit bei der Situationserfassung bis hin zur Ermüdung wegen Unterbeschäftigung, weil die Besatzung nicht in den Regelkreis eingebunden wird [...] Schließlich kann es Konflikte geben auf Grund einer mangelhaften Mensch-Maschine-Schnittstelle (Control and Display Unit). Die Folgen hiervon sind, daß keine schnelle Reaktion auf veränderte, insbesondere zeitkritische Situationen erfolgt. Im Konfliktfalle besteht nur die Möglichkeit der Abschaltung, d.h. das System wird oftmals ausgerechnet dort ausgeschaltet, wo es gebraucht würde bzw. zusätzliche Sicherheit bieten könnte.« (Reister 1997, 181) Gerade im Bereich des Luftverkehrs gibt es aber auch einen anderen Ansatz: So empfiehlt die Federal Aviation Administration (FAA), in kritischen Situationen die elektronischen Systeme auszuschalten und den Piloten von Hand steuern zu lassen. (FAA 1995) Auf dieses Beispiel der Deautomatisierung wird in Kapitel 7 noch eingegangen. Daß ein solcher Konflikt bei unterschiedlichen, nicht aufeinander abgestimmten Verfahrensweisen im Nu unübersichtlich werden kann, führt der Luftzusammenstoß über Überlingen vom 1./2. Juli 2002 vor Augen, an dem zwei Flugzeuge und die Schweizer Flugsicherung beteiligt waren.

nicht naturwissenschaftlich-technisch bedingt ist, daß der Computer so funktioniert, wie es von ihm erwartet wird. Der Begriff »Erwartungssicherheit« benennt »die Umdefinition von (nicht handhabbarer) Kontingenz in (handhabbare) Komplexität« (Bonß 1995, 90). Als Beispiel kann die Sicherheit, daß die Sonne morgen wieder aufgehen werde, angeführt werden. Diese Sicherheit ist keine Tatsache, da der Sonnenaufgang in der Zukunft liegt. Aber die Erwartung, daß der Sonnenaufgang stattfinden werde, ist – wie andere Induktionsschlüsse – historisch und pragmatisch gerechtfertigt und stellt insofern eine »Erwartungssicherheit« dar. Ohne solche Erwartungssicherheiten wäre Handeln nicht möglich. Man würde immer und überall Unsicherheiten und Gefahren wahrnehmen und »wird sich irgendwann nicht mehr aus dem Bett trauen (obwohl man selbst dort von einstürzenden Wänden oder von einem Blitz erschlagen werden kann)« (Bonß 1995, 86). Anders als biologische oder sozialpsychologische Sicherheitskonzepte ist die Vorstellung eines Sicherheitsstrebens im Sinn von Erwartungssicherheiten etwas Relatives. Bei Nachfragen wird allerdings in der Regel versucht, die auf den Computer gerichtete Erwartungssicherheit mit Prinzipien der Technik zu begründen, zu ihnen gehören einige der in dieser Arbeit untersuchten Paradigmen.¹⁵

1.2.4 Kalkül

Gemäß Gottfried Wilhelm von Leibniz' (1646-1716) allgemein formulierter Kalkülvorstellung besteht ein Kalkül aus Elementen und aus Regeln, die auf diese Elemente angewandt werden.¹⁶

Der Kalkül als philosophisches System zur Erklärung der Welt verspricht seit seiner Formulierung durch Leibniz Sicherheit. Jedes Modell der Welt (oder eines Ausschnittes) ist demnach ein in sich geschlossenes, ein endliches Modell, in dem die Regeln der Logik, also nachvollziehbare, au-

¹⁵ Vgl. die Kapitel zu den Einflüssen aus der Mathematik und über Verifikations- und Falsifikationsverfahren in den Wissenschaften, um zu verstehen, daß die soziale Sicherheitserwartung viel höher ist, als rational aus den mathematisch-naturwissenschaftlichen Grundlagen hergeleitet werden kann.

¹⁶ Auf Leibniz und seine Kalkülvorstellung wird in Kapitel 5 ausführlich eingegangen. Leibniz ist nicht nur in Hinblick auf die Erfindung des Dualzahlensystems oder die Rechenmaschine ein »Urahn« der Informatik, sondern vor allem in Hinblick auf die Kalkülvorstellung. Dieser Aspekt ist ein kognitives »Kern«-Paradigma der Informatik, das allerdings »verschüttet« ist und mit dieser Arbeit wieder »ans Tageslicht geholt« werden soll.

tomatisierbare Regeln gelten. Wenn nur einmal die Grundbegriffe und Beziehungen des Abzubildenden gefunden sein werden, wenn also die Analyse stattgefunden haben wird, kann das von Leibniz geforderte »Calculus« durchgeführt werden und zwar mit Hilfe einer Maschine. Diese Maschine soll heute in Form des Computers existieren.¹⁷

Die angesprochene Sicherheit basiert auf der Kalkülvorstellung, indem angenommen wird, daß die Analyse zu den »richtigen« Grundbegriffen führe und daß die logischen Regeln Ableitungen aus den Grundbegriffen ermöglichen oder garantieren würden, die etwas mit der Welt zu tun haben. Die Grenzen dieser Annahmen waren schon Leibniz bekannt, zum Beispiel, daß eine derartige Analyse ins Unendliche geht. Deshalb negierte er die Angemessenheit und Nützlichkeit von Nominaldefinitionen. Andererseits betonte er immer wieder die Einfachheit seines Systems, zum Beispiel die Rückführung der Elemente seines Systems auf 1 und 0, auf »Einheit« und »Nichts«. Obwohl seit Gottlob Frege (1848-1925) und durch Ludwig Wittgenstein (1889-1951) gezeigt wurde, daß Logik umfangreicher ist, als dies von Leibniz angenommen wurde, und daß über die Wahrheit oder Falschheit von Begriffen nichts gesagt werden kann, sondern daß immer Sätze oder sogar Satzsysteme betrachtet werden müssen, weil auch Sätze voneinander abhängig sein können, was Wittgenstein an Hand von Gradaussagen nachwies, hält die Informatik an der »engen« Interpretation der Leibnizschen Vorstellung fest. Dies wird in den weiteren Kapiteln der Arbeit sichtbar gemacht. Dabei wird auch deutlich, inwiefern die Kalküle der Informatik riskante Kalküle sind.

¹⁷ Die Frage, ob Formalisierung und Mechanisierung so gleichzusetzen sind, wird in Abschnitt 4.2.7 angerissen.

1.3 Abfolge der Kapitel

In Kapitel 2 wird zunächst anhand eines komplexen Fallbeispiels, dem Abschuß eines iranischen Passagierflugzeuges über dem Persischen Golf, gezeigt, inwiefern informatisches Handeln in weite Kontexte eingebettet ist. Wie weit ein solcher Kontext zu fassen ist, wird anhand eines Ablaufs deutlich gemacht, zu dessen Erklärung berücksichtigt werden muß, daß das AEGIS-System nur zusammen mit dem Schiff, auf dem es installiert ist, in dessen Position – im Persischen Golf –, in der konkreten politischen Lage, unter Einsatzbedingungen, für die es ursprünglich gar nicht vorgesehen war, mit Personal, dessen Verhalten eine Rolle spielt, usw. verstanden werden kann. Dabei wird deutlich, daß der reale Kontext, seine Elemente und der Handlungsablauf, in dem das Informationssystem benutzt wurde, für keinen Informatiker antizipierbar, geschweige denn beeinflußbar waren, sondern daß kontingente Bedingungen für die Charakterisierung der Situation wesentlich sind. Die Analyse des Flugzeugabschusses bleibt allerdings fragmentarisch, weil bis heute keineswegs alle Informationen über das Geschehen der Öffentlichkeit zugänglich sind.

Dem Fallbeispiel folgend werden einige grundlegende Verfahrensweisen der Softwaretechnik vorgestellt. Solche elementaren, als »klassisch« geltenden Komponenten sind das Rüstzeug, mit dem eine große Anzahl von Informatikern arbeitet. Eine Reihe dieser im kommerziellen Bereich verbreiteten Verfahren, stammen ursprünglich aus der von der NATO initiierten Zusammenarbeit ziviler und militärischer Interessenten an Softwareentwicklung seit dem Ende der sechziger Jahre. Für sie geltende Paradigmen und Kontextabhängigkeiten werden untersucht. Die hier getroffene Auswahl von Verfahrensweisen bedarf einer Erläuterung, denn sie ist nicht unbedingt mit den gegenwärtig im universitären Umfeld aktuellen Entwicklungen deckungsgleich. Die Auswahl beruht auf Erfahrungen und Beobachtungen. Worauf Bezug genommen wird, wenn in dieser Arbeit von den Erfahrungen der Autorin gesprochen wird, läßt sich qualifizieren. Sie stammen aus einer seit 1989 ausgeübten Tätigkeit als Systemanalytikerin und -architektin, als Beraterin, Projektleiterin und Angebotsmanagerin. Die bei diesen Tätigkeiten gewonnenen Projekterfahrungen umfassen das Datenmanagement und die Datenmodellierung bei einer Luftfahrtgesellschaft, einem Mineralölkonzern und einer Sparkasse, Systemanalyse und -konzeption für das Reengineering eines Abrechnungssystems (Elektrizität, Gas, Wasser, Abwasser) bei einem Energieversorgungsunternehmen, mehrere Migrati-

onsprojekte zur Ablösung komplexer (IBM-)Mainframe- durch Client-Server-Applikationen für Schweizer Banken und Versicherungen im Kontext der Schweizerischen Altersvorsorge (»Betriebliches Vorsorgegesetz«), ein Migrationsprojekt für eine deutsche Leasingfirma im Zusammenhang mit der Ablösung einer Individualentwicklung auf UNISYS durch eine Client-Server-Standardsoftware. Diese Projekte dauerten jeweils zwischen zwei und vier Jahren mit jeweils zwischen zehn und dreißig Projektmitarbeitern, wobei Fachbereichsmitarbeiter, die in die Analyse- und Konzeptions-tätigkeiten sowie Datenbereinigungsaktivitäten und diverse Tests eingebunden wurden, hier nicht eingeschlossen sind. Die Projektmitarbeiter waren einige Male verteilt tätig, in einem Fall auf die Schweiz, die Bundesrepublik, Großbritannien und Indien. Es handelte sich um Projekte, deren finanzielles Volumen in der Größenordnung von zweistelligen Millionenbeträgen lag, und Produkte, deren Lebenszyklus in einigen Fällen mit zehn bis fünfzehn Jahren angesetzt war. Des weiteren beziehe ich mich auf die Tätigkeit als Methodenberaterin in Projekten zur Einführung von Softwaretechniken nach ISOTEC (EDV Studio Ploenzke 1989) und CATALYST (CSC 1991) sowie als Projektkoordinatorin für die Zertifizierung einer Organisation nach CMMI Level 3.¹⁸ Zusammengenommen heißt das, daß vor dem Hintergrund von Erfahrungen mit großen Systemen in Großprojekten und mit dem Interesse an Paradigmen, Risiken und Kontexten, die bei der Softwareentwicklung in einem so dimensionierten Bereich der informatischen Tätigkeit festgestellt werden können, argumentiert wird. Das Leitbild der Softwareentwicklung ist bei solchen Projekten nicht nur nach wie vor stark an industriellen Produktionsprozessen orientiert, sondern die Globalisierungstendenzen der letzten Jahre haben sogar dazu beigetragen, daß eine im Schwinden gewesene Arbeitsteilung, Arbeitszerlegung und Hierarchisierung wieder zunimmt. Für die Strukturierung und Durchführung von derartigen Projekten spielen zum Beispiel Überlegungen einer von Siefkes (1996) vor-

¹⁸ Die Erarbeitung der Capability Maturity Model Integrated Standards wurde unterstützt vom US Department of Defense (DoD), im speziellen vom Office of the Under Secretary of Defense, Acquisition, Technology, and Logistics (OUSD/AT&L). Unterstützung durch die Industrie erfolgte durch das Systems Engineering Committee und die National Defense Industrial Association (NDIA). Organisationen der Industrie, staatliche Institutionen sowie das Software Engineering Institute (SEI) stellten die Standards zusammen und entwickelten ein Verfahren zur Zertifizierung von Organisationen. Die Zertifizierung erfolgt nur, wenn die Organisation in einem umfangreichen »Assessment« nachweist, daß die Mitarbeiter die Prozesse nicht nur theoretisch kennen, sondern sie praktisch anwenden. Viele IT-Firmen lassen sich zur Zeit nach CMMI zertifizieren, um zeigen zu können, daß sie ihre Software nach ingenieurmäßigen, festgeschriebenen Softwaretechniken entwickeln.

geschlagenen »ökologisch orientierten Informatik«, die sich auf kleine Systeme festlegt, keine Rolle. Besonders im Client-Server-Umfeld ist jedoch zu beobachten, daß kooperative Entwicklungsprozesse mit Benutzern, iterative Verfahren wie Prototyping und allgemein das von Christiane Floyd vertretene Paradigma der Softwareentwicklung als Design, bei dem die Verständigung zwischen Beteiligten und die Variabilität von Gebrauchskontexten Schwerpunkte bilden, in einem gewissen Umfang Fuß gefaßt haben. (Vgl. Floyd 1984; 1989) Prototyping und Benutzerbeteiligung werden allerdings auch in Kontexten, die von der Produktionssicht dominiert sind, aufgegriffen. Dort jedoch instrumentell als Techniken, ohne daß das Leitbild gewechselt würde.

In Kapitel 3 wird eine historische Erweiterung des Kontextes informatischer Praxis vorgenommen. In ihr wird auf die aus verschiedenen Gründen in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gestiegenen Anforderungen an Rechenmaschinen und Rechenkapazität eingegangen. Die Lösungen, die einerseits in der Tradition mechanischer Rechenmaschinen standen, andererseits aber auch neue technische Möglichkeiten nutzten, werden umrissen. Dabei geht es nicht um eine Technikgeschichte der Rechner- und Computertypen oder deren Leistungssteigerungen. Es wird vielmehr zum einen gezeigt, wie überhaupt aus zwei von Gebrauchsanforderungen stark bestimmten Spuren – der Hollerithmaschine und dem Analogrechner – der Digitalrechner entstand, und zum anderen, daß mit der Konstitution des Gegenstandsbereichs »Informatik« zwei grundsätzlich verschiedene »Denkannahmen« in Konkurrenz traten: deren eine, der Formalismus, ist mit dem Namen John von Neumann (1903-1957) verbunden, deren andere, die Kybernetik, mit dem Namen Norbert Wiener (1894-1957). Aber auch in dieser Hinsicht geht es um keine vollständige Geschichte der Informatik: In der weiteren Entwicklung setzte sich von Neumanns Ansatz weitgehend durch, während die Kybernetik mit ihrem »dynamischen« Ansatz heute in den Hintergrund getreten ist. Unter der Maßgabe, daß es in dieser Arbeit wesentlich um in der Gegenwart wirksame Paradigmen, Kontexte und Risiken der informatischen Praxis geht, wurde deshalb eine thematische Beschränkung vorgenommen und auf eine Untersuchung der weiteren Rolle des kybernetischen Ansatzes in der Informatik verzichtet.

In Kapitel 4, in dem es um Einflüsse aus anderen und in andere Wissenschaften geht, wird aus dieser Beschränkung heraus nicht auf die der Kybernetik nahestehende Systemvorstellung Ludwig von Bertalanffys (1901-1972) eingegangen. Aber es wird gezeigt, daß die Erfindungen der Informa-

tik nicht singular und unabhängig sind, sondern daß sie in ein Netz aus Theorie, Technik, gesellschaftlicher und historischer Situation eingebunden sind. In diesem Kapitel wird speziell die Einbindung in Philosophie und Mathematik untersucht.

Kapitel 5 weitet den Kontext dann sowohl zeitlich als auch inhaltlich bis zu Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716) aus. Leibniz' allgemeiner Kalkülbegriff kann als Ideal der Welterklärung im Toulminschen Sinn für die Informatik gesehen werden. Allerdings geht Leibniz' Konzept über die reduzierte Form, wie sie von der Informatik übernommen wurde, hinaus.

Nach diesen vier der Vorstellung und Aufarbeitung von Material verpflichteten Kapiteln folgt Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung und Klassifizierung der Paradigmen in drei Kategorien: Die Paradigmen werden als semantisch-kognitive, situativ-praktische und sozial-interaktiv aufgeschlüsselt. In diesem Zusammenhang werden auch Gefahren und Chancen der Paradigmen angesprochen sowie erste Hinweise auf Handlungsvorschläge für eine dies berücksichtigende informatische Tätigkeit gegeben.

Das abschließende Kapitel 7 stellt dann einige der im vorherigen Kapitel angesprochenen Handlungsvorschläge genauer vor und versucht dabei an diesen Beispielen konstruktiv auszuführen, was veränderte Zugänge zu den jeweiligen Feldern sein könnten. Dabei geht es weder um Rezepte noch um Lösungen, sondern nur um bescheidene Denkanregungen, nicht mehr und nicht weniger.

2 Riskante Kalküle

Informationssysteme sind komplexe Gebilde, die mit anderen komplexen technischen Gebilden mindestens eine Eigenschaft teilen: sie sind Risikosysteme. Diese Eigenschaft von Informationssystemen ist in der Informatik bisher nicht systematisch in den Blick genommen worden. »Informatikspezifische Risikoforschung« ist aber erforderlich, denn Gefährdungspotentiale, mit denen Informationssysteme in Verbindung stehen oder die von ihnen beeinflußt sind, wurden zunehmend deutlich. (Vgl. Carr / Konda / Monarch / Ulrich / Walker 1993; Zboray 1995; Price / Zboray 1996) Auch im Rahmen dieser Arbeit ist der Sachverhalt zu thematisieren, denn er fällt in das Raster kontextorientierter Erforschung von Paradigmen. Mit der Fragestellung, welchen Zusammenhang es zwischen Risiken der Informatik und Paradigmen der Informatik gibt und inwiefern die Paradigmen Risiken generieren und determinieren, sucht die Arbeit auch Anschluß an die aktuelle Risikodebatte.

Die hier vertretene These lautet, daß Computerunfälle oft in Verbindung zu Paradigmen stehen. Denn diese sind für die Entstehung mancher Risiken und Unfälle aufgrund angebbarer Eigenarten präformierend. Die These wird nach der Darstellung eines Fallbeispiels ausgeführt, indem Paradigmen, die die Modellbildung leiten, herausgearbeitet werden. Schwerpunkt ist die Softwaretechnik mit Daten- und Funktionenmodellierung als wichtigen Ergebnistypen.

Wenn in der Untersuchung auf beide Aspekte Wert gelegt wird: auf die Theorie, also die auf Exaktheit, Nachvollziehbarkeit und formale Stimmigkeit zielende Umsetzung der von Informatikern gehegten Vorstellung, sie könnten die Welt modellieren und sie damit handhabbar und beherrschbar machen, und auf die Praxis, also das Handeln der Informatiker im Sinne von Modellieren und Benutzen von Modellen, mit dem sie tatsächlich etwas handhabbar und beherrschbar machen, dann bedeutet das, zu fragen: Was tun Informatiker? und: Wie sprechen sie davon?

Zunächst wird nun anhand einer Untersuchung des Ereignisses, das am 3. Juli 1988 fast 300 Menschen das Leben kostete und das mit dem Namen AEGIS, einem militärischen Expertensystem, verbunden ist, vorgeführt, daß auch bei fehlerfreier Funktion eines Computersystems eine Fehllhandlung resultieren kann, hier der Abschuß eines zivilen Airbusses, die in der konkreten Situation zwar von Menschen getätigt wurde, bei der aber das menschliche Handeln überwiegend durch die vom System gelieferte Darstellung der Situation bestimmt wurde. Auch wenn ein Mensch die finale Handlung auslöste, bleibt, daß Entscheidungsmacht schon lange vorher

dem Informationssystem überlassen worden war. In diesem Zusammenhang wird ein weiteres Problem deutlich. Die »Verantwortung« für den Abschuß des Airbus scheint ein namentlich angegebbarer Offizier zu tragen. Aber nicht er war es, der seine Entscheidungsmacht individuell an das System übertragen hatte, sondern diese Übertragung hatte unter den Bedingungen einer zeitversetzten Arbeitsteilung schon viel früher stattgefunden, so daß dieser Offizier von Anfang an in einer Situation ohne wirkliche Entscheidungsfreiheit agierte. Hier ist also durchaus Raum für die Frage, ob und in welcher Weise solche Ergebnisse persönlich zurechenbar sind. Sowohl Informatiker als auch Anwender sind gleichermaßen »Detailarbeiter«. Informatiker leisten ihre »Detailarbeit« – wie andere Wissenschaftler auch – in industriellen Wissenschaftsbetrieben. (Vgl. Bonß / Hohlfeld / Kollek 1993; Knorr-Cetina 1984; Bonß 1995) Damit geht einher, daß die von ihnen verwandten Verfahren ingenieurmäßige Verfahren sind, die einem Effizienzkriterium folgen. Im Rahmen dieser hocheffizienten Arbeit sind Paradigmen dem Informatiker oft nur noch auf den Ebenen der Musterbeispiele und Notationen oder als Verfahrensregeln bekannt, und Folgen treten vielfach in ganz anderen Lebensbereichen auf, ohne daß dem Anwender ein Bezug zu Paradigmen überhaupt noch deutlich würde. Aus dieser Dekontextualisierung ergibt sich, daß die Tätigkeiten des Informatikers und des genannten Offiziers für das Bewußtsein beider vermutlich weit auseinander liegen, während sie tatsächlich miteinander dicht verbunden sind. Der tatsächliche Zusammenhang anscheinend auseinanderliegender Tätigkeiten oder Tätigkeitsbereiche ist ein Gesichtspunkt, wenn es darum geht, zu fragen, wie weit die Grenzen informatischer Kontexte zu ziehen sind. Ein anderer Gesichtspunkt dieser Grenzziehung folgt aus der Frage nach »dem System«. Hier ist nicht nur an die Einbettung der eingangs neben dem Kühlschranks erwähnten Waschmaschine in das technische System von Elektrizitäts- und Wasserversorgung sowie Kanalisation zu denken, sondern ebenso daran, daß das Expertensystem AEGIS nicht für sich steht. In seiner Funktion ist es nur als Teil eines Ganzen möglich, nämlich des AEGIS-Schiffes einschließlich der Besatzung, das mit einem militärischen Auftrag aufgrund politischer Entscheidungen eingesetzt wird. Ohne sich auf das hier erörterte Fallbeispiel zu beziehen, schreibt Judy Wajcman:

A missile [...] is itself part of an ordered system of component parts – warhead, guidance, control, propulsion – and also part of a wider system of launch equipment and command and control networks.

The need for a part to integrate into the whole imposes major constraints on how that part should be designed. A technological system is never merely technical: its realworld functioning has technical, economic, organizational, political, and even cultural elements. (Wajcman 2002, 351f.)

2.1 Ein Fallbeispiel: AEGIS

Im Fall AEGIS¹⁹ geht es um den Abschluß eines zivilen iranischen Airbus A300B2, den Flug IR655, durch den US-Raketenkreuzer »Vincennes« im Persischen Golf am 3. Juli 1988. Dabei kamen 290 Menschen ums Leben.

Der Fall kann nur in einem »weiten« Kontext erklärt werden, das heißt, daß die Beschränkung auf die technischen Aspekte, die zum Abschluß des Flugzeugs geführt haben, nicht ausreicht, um das Geschehen zu verstehen. Denn das AEGIS-System im engen technischen Sinn hat nachweislich korrekt funktioniert, demnach bliebe als Einsicht allein, daß die Personen »nicht funktioniert« haben können. Erst der Kontext, der die Entscheidung und die Handlung in der konkreten Situation an Bord des Schiffes, in den taktischen Gegebenheiten und in den politischen Umständen des US-amerikanischen Militäreinsatzes während des Iran-Irak-Krieges ansiedelt, ist weit genug, um »die Logik des Mißlingens«²⁰ aufzuspüren und den »organisatorischen Aufbau eines Unglücks«²¹ auszumachen. Es ist hingegen nicht angestrebt, diesen Vorfall auf der Grundlage aller inzwischen zur Verfügung stehenden Quellen mit jedem Detail zu rekonstruieren und dabei die Zweckbehauptungen Beteiligter einschließlich der Untersuchungsoffiziere der US-Navy darzustellen, also hier die Geschichte des Flugzeugabschlusses zu schreiben, sondern darum, nachvollziehbar werden zu lassen, daß es hochkomplexe Systeme gibt, deren sicherer Einsatz nicht möglich ist.

¹⁹ Aegis (griech. aigis) ist der Schild des Zeus und der Minerva und wird allegorisch für jede schützende Bedeckung verwendet. Der Name wird vom griechischen »Ziege« abgeleitet, da bei einfacher Bewaffnung Ziegenfelle zum Schutz verwendet wurden, alternativ wird die Herkunft von einem ähnlich klingenden Wort, das »stürmische Bewegung« bedeutet, vorgeschlagen. (Vgl. Vollmer 1874, 17)

²⁰ Dietrich Dörner hat 1989 unter diesem Titel Ergebnisse der Kognitiven Psychologie vorgestellt, die Merkmale des Planens und Entscheidens in komplexen Handlungssituationen betreffen. Solche Situationen zeichnen sich durch Intransparenz, Dynamik, Vernetztheit aus, sie erfordern und erzwingen Handeln in Unvollständigkeit oder Falschheit der Kenntnisse über das jeweilige System (vgl. Dörner 1989, 59) – alles Bedingungen, die im Fall AEGIS zutreffen. Katastrophale Folgen, so eine These des Autors, ergeben sich vor allem, wenn durch Sachkenntnis und Zweckrationalität begründbarer Erfolgsoptimismus in komplexen Situationen zu Handlungen führt, in denen sich kleine Fehler, Unstimmigkeiten und Vergeßlichkeiten reihen.

²¹ Alexander Kluge hat 1964/1978 seinem dokumentarischen Montageroman aus unter anderem Berichten der militärischen Führung, Pressemeldungen und Vorschriften über den Untergang der 6. Armee in Stalingrad, »Schlachtbeschreibung«, diesen Untertitel gegeben. (Kluge 1964/1978; vgl. besonders die Erläuterung auf Seite 8.)

2.1.1 Sachverhalt

Der Ablauf der Ereignisse, die mit dem Abschluß des Flugzeugs enden, dauerte etwa sieben Minuten. Er läßt sich aus den »Hearings before the Defense Policy Panel« (House Committee 1989, 134-146)²² wie folgt rekonstruieren:

Uhrzeit	Ereignis
10:17	Start Iran Air Flug 655 in Bandar-e' Abbas in Richtung Dubai (18 Minuten nach dem geplanten Abflug um 09:59 Uhr) Flug 655 wird vom Radar auf der »Vincennes« entdeckt, es wird die Funkkennung IFF-Mode III (= ziviles Flugzeug) festgestellt und die Spur des Flugzeugs erhält die Track Number TN 4131.
10:18	Der Identification Supervisor auf der »Vincennes« prüft den zivilen Flugplan, erkennt jedoch nicht, daß es sich bei TN 4131 um den verspäteten Flug IR655 handelt. Erste Meldungen, daß das Flugzeug auch IFF-Mode II (= militärisches Flugzeug) sendet.
10:20	»Vincennes« sendet die ersten Warnungen, auf die sie keine Antwort von Flug IR655 erhält. Das Flugzeug wird von verschiedenen Personen auf der »Vincennes« nun als F-14 (wegen IFF-Mode II) interpretiert.
10:21	Die »Vincennes« informiert den Commander Joint Task Force Middle East über ein sich näherndes F-14-Flugzeug, das sie, falls es seinen Kurs nicht ändern würde, bei einer Entfernung von 20 Seemeilen angreifen wolle. Der CJTFM stimmt dem zu, mit dem Hinweis, das Flugzeug vor dem Angriff zu warnen. Weitere Warnungen erfolgen, jedoch ohne Antwort und ohne Kursänderungen des Airbus. Information des Combat Information Officer an den Commanding Officer, daß es sich wahrscheinlich um ein kommerzielles Flugzeug handelt.
10:22	Weitere Warnungen an Flug IR655, die nicht beantwortet werden. Meldungen über abnehmende Höhe des Flugzeugs, obwohl AEGIS die korrekte, das heißt zunehmende Höhe festhält.
10:23	Unterschiedliche Meldungen über die Höhe des Flugzeugs. (Vgl. Tabelle unten.)
10:24	Die »Vincennes« befindet sich circa eine Seemeile westlich der Mittellinie der zivilen Flugroute, die von Flug IR655 benutzt wird. Der

²² Diese Quelle muß im Übrigen mit Vorsicht benutzt werden. Wie spätere Untersuchungen erwiesen, hat das US-Militär manches bewußt im Unklaren gelassen, um im Hearing genauere Fragen nach den Umständen und der Berechtigung des Abschusses nicht aufkommen zu lassen. Die US-Regierung und das Militär behaupteten schon vor jeder Untersuchung, daß es sich eindeutig um einen Akt der Selbstverteidigung gehandelt hätte. Dabei wurden unliebsame Tatsachen wie die wirkliche Position des Schiffes zu Beginn des zur gleichen Zeit stattfindenden Gefechts mit iranischen Motorbooten mit Nachdruck falsch behauptet. Vgl. zum Beispiel »Defense Department Briefing on Current Developments in the Persian Gulf July 3 1988«.

Uhrzeit	Ereignis
	Airbus-Pilot setzt einen Routinefunkspruch an Bandar-e' Abbas ab. Der Commanding Officer der »Vincennes« löst den Abschluß von zwei SM-2-Blk-II-Raketen aus, die den Airbus nach AEGIS-Angaben in 13.500 Fuß Höhe, bei einer Geschwindigkeit von 383 Knoten und in einer Entfernung von acht Seemeilen von der »Vincennes« treffen.

Tabelle 3. AEGIS: Ablauf der Ereignisse am 3. Juli 1988 zwischen 10:17 und 10:24 Uhr auf der »Vincennes«.²³

2.1.2 Politische Voraussetzungen

Wie konnte es zu diesem »Unglück« kommen? Wieso war die Vincennes überhaupt an dem Ort? Welche Rolle spielte das Informationssystem AEGIS? Welche Paradigmen sind in diesem »riskanten Kalkül« enthalten?

Zur Beantwortung der Fragen ist es nötig, in einem weiten Kontext auch die politischen Voraussetzungen anzusprechen, die Admiral William J. Crowe (1925-2007), der Vorsitzende der Joint Chiefs of Staff, in einem prägnanten Satz zusammenfaßte: »Once you start to escalate and once you start expanding, that's a problem.« (House Committee 1993, 54). Diese liegen offenbar vor allem im Interesse der USA an den Ölvorkommen in der Region um den Persischen Golf. Dieses Interesse wurde zum Beispiel von Ronald Reagan (1911-2004) in den »President's Remarks« vom 29. Mai 1987 – also etwa ein Jahr vor dem AEGIS-Vorfall, nämlich in Reaktion auf den Beschuß der US-Fregatte »Stark« mit zwei Exocet-Raketen durch eine irakische Mirage F 1 am 17. Mai, bei dem 37 US-amerikanische Soldaten ums Leben kamen (vgl. Koppel 1992, 18) – deutlich mitgeteilt:

I want to speak directly this afternoon on the vital interests of the American people - - vital interests that are at stake in the Persian Gulf area. It may be easy for some, after a near record 54-month economic recovery, to forget just how critical the Persian Gulf is to our national security. But I think everyone in this room and everyone hearing my voice now can remember the woeful impact of the Middle East oil crisis a few years ago - - the endless, demoralizing gas lines, the shortages, the rationing, the escalating energy prices, the doubledigit inflation, and the enormous dislocation that shook our economy to its foundations. [...]

²³ Angaben in Ortszeit = UTC+3h30m.

The principal forces of peace in the world - - the United States and other democratic nations - - were perceived as gravely weakened. Our economies and our people were viewed as the captives of oil-producing regimes in the Middle East. This could happen again if Iran and the Soviet Union were able to impose their will upon the friendly Arab states of the Persian Gulf and Iran was allowed to block the free passage of neutral shipping.

But this will not happen again, not while this President serves. I am determined our national economy will never again be held captive, that we will not return to the days of gaslines, shortages, inflation, economic dislocation, and international humiliation. Mark this point well: The use of the vital sealanes of the Persian Gulf will not be dictated by the Iranians. These lanes will not be allowed to come under control of the Soviet Union. The Persian Gulf will remain open to navigation by the nations of the world. [...] Freedom of navigation is not an empty cliché of international law. It is essential to the health and safety of America and the strength of our alliance.

Our presence in the Persian Gulf is also essential to preventing wider conflict in the Middle East, and it's a prerequisite to helping end the brutal and violent 6 ½-year war between Iran and Iraq. Diplomatically we are doing everything we can to obtain an end to this war, and this effort will continue.

In summary then, the United States and its allies maintain a presence in the gulf to assist in the free movement of petroleum, to reassure those of our friends and allies in the region of our commitment to their peace and welfare, to ensure that freedom of navigation and other principles of international accord are respected and observed - - in short, to promote the cause of peace.

Until peace is restored and there is no longer a risk to shipping in the region - - particularly shipping under American protection - - we must maintain an adequate presence to deter and, if necessary, to defend ourselves against any accidental attack or against any intentional attack. As Commander in Chief, it is my responsibility to make sure that we place forces in the area that are adequate to that purpose.

(US Department of State Bulletin 1987)

2.1.3 Strategische Situation

Eine der von Präsident Reagan angekündigten Maßnahmen der USA, war die »Operation Earnest Will«. Sie begann im Juli 1987 und endete im September 1988. Ihr hauptsächliches Ziel war der Schutz des Tankerverkehrs, besonders des kuweitischen, vor irakischen und iranischen Angriffen. Zu diesem Zweck wurden kuweitische Schiffe in US-amerikanische umgefloggt, da die US-Navy wegen rechtlicher Einschränkungen keine Schiffe unter fremder Flagge eskortieren durfte. Kurz nach dieser Operation der Navy begann das US Special Operations Command die »Operation Prime Chance« (August 1987 bis Juni 1989), die sich aggressiv gegen die marine Präsenz des Iran richtete. Ab dieser Zeit erfolgte trotz des Angriffs auf die USS Stark eine inoffizielle Zusammenarbeit mit dem Irak. So bemerkte der US Secretary of the Navy James H. Webb Jr. in einer Fernsehsendung: »Ironically, it probably brought us closer to Iraq, because after that Iraq allowed American teams to come in and talk about deconfliction and to share intelligence information and this sort of thing.« (Webb, zitiert nach Koppel 1992, 19) Aus dem offiziellen Auftrag des US-Militärs, die als US-amerikanisch geltende Handelsschifffahrt in den internationalen Gewässern des Persischen Golfs und seinen Zufahrten zu begleiten und zu sichern, wurde dadurch sukzessive eine verdeckte Parteinahme im Krieg zwischen dem Iran und dem Irak. Die politische Ermächtigung für den Einsatz deckte jedoch keine weitergehenden kriegерischen Akte gegen den Iran ab, besonders nicht die Verletzung seiner territorialen Integrität. Nachdem jedoch am 14. April 1988 an der US-Fregatte »Samuel B. Roberts« durch eine iranische Mine schwerer Sachschaden entstanden war, nutzte das US-Militär die Gelegenheit zu einer Vergeltungsmaßnahme, der »Operation Praying Mantis«. In ihrem Verlauf wurden am 18. April iranische Ölplattformen und etwa die Hälfte der iranischen Kriegsschiffe zerstört. (Vgl. Koppel 1992, 20ff.)²⁴

Wegen der fehlenden politischen Ermächtigung für die US-Regierung in den 1981 zwischen dem Irak und dem Iran begonnenen Krieg einzutreten oder einen Krieg zu beginnen, bemühte sich die US-Regierung, jeden Eindruck zu vermeiden, sie würde gegen diese Beschränkungen verstoßen. Für

²⁴ Im Jahr 2003 stellte der Internationale Gerichtshof in Den Haag fest, daß diese Operation sowie eine weitere nicht als erforderliche Maßnahmen zum Schutz des wesentlichen Sicherheitsinteresses der USA gerechtfertigt werden können. Vgl. International Court of Justice. Oil Platforms (Islamic Republic of Iran vs. United States of America).

die eingesetzten Marinestreitkräfte waren diese Restriktionen faktisch jedoch aufgrund der geringen Ausdehnung und der navigatorischen Verhältnisse im Persischen Golf und besonders in der Straße von Hormuz schwer einzuhalten. In taktischen Situationen wurde wiederholt in iranische Territorialgewässer eingedrungen, daß dieses nicht in jedem Fall notgedrungen erfolgte, erhöhte das Konfliktpotential und damit das Risiko, zu einer offenen Kriegspartei zu werden noch einmal. Der Sachverhalt wurde gleichermaßen von den Marinebefehlshabern wie von der US-Regierung geheimgehalten, da dieses Verhalten einen politischen Konflikt zwischen Exekutive und Parlament hervorgerufen hätte.

2.1.4 Taktische Situation

Für die konkrete Situation ist zu klären, wo die »Vincennes« sich befand, wohin sie sich bewegte und warum?

Mehrere US-amerikanischen Kriegsschiffe befanden sich 1987/88 im Persischen Golf, darunter ab April 1988 der Kreuzer »Vincennes«, ein Schiff von 173m Länge, 16,8m Breite, 10,2m Tiefgang und 9.750t Verdrängung. Das Gros der eingesetzten Einheiten war nicht für küstennahe Operationen in engen Gewässern konzipiert. In einem Artikel der Washington Post vom 4. Juli 1988 wird Admiral Crowe mit einem Kommentar zu dieser Situation zitiert: »In the Persian Gulf,« Crowe said, there is very little time or maneuver room when ships are put at risk. »We're fighting in a lake.« (Washington Post, 4. Juli 1988)

Ob ein Schiff wie die »Vincennes« überhaupt für dieses Gewässer ein geeignetes Mittel für die vorgesehenen Zwecke ist, ist fraglich. Denn nach der Dezimierung der iranischen Flotte verlegte sich der Iran vor allem auf eine Nadelstichtaktik, bei der leichtbewaffnete schnelle Boote, die von »Revolutionsgardisten« bemannt waren, provokativ eingesetzt wurden.

Über die Position der »Vincennes«, aber auch der anderen beteiligten Schiffe, die Fregatten »Elmer Montgomery« und »Sides«, gab es seit der Veröffentlichung des Untersuchungsberichts, der keine genaue Positionsangabe macht, diverse Spekulationen. Es heißt, daß sich die Schiffe bereits vor dem Vorfall in iranischen Gewässern befunden hätten und daß das Verhalten der iranischen Motorboote, mit denen sich die »Vincennes« im Gefecht befand, nicht als Angriff, sondern als Verteidigung hätte bewertet werden müssen. Die offiziellen Angaben besagen, daß die US-Schiffe sich zunächst

nicht in iranischen Gewässern befunden hätten, nach dem Angriff durch die iranischen Boote dann jedoch in diese gefahren seien. Auf Widersprüche in den Aussagen hat Ted Koppel (1992) hingewiesen, in dessen Fernsehsendung Crowe entgegen den offiziellen Feststellungen der US-Navy ausführte, das Schiff habe sich zum Zeitpunkt des Raketenabschusses auf den Airbus in iranischen Territorialgewässern befunden.

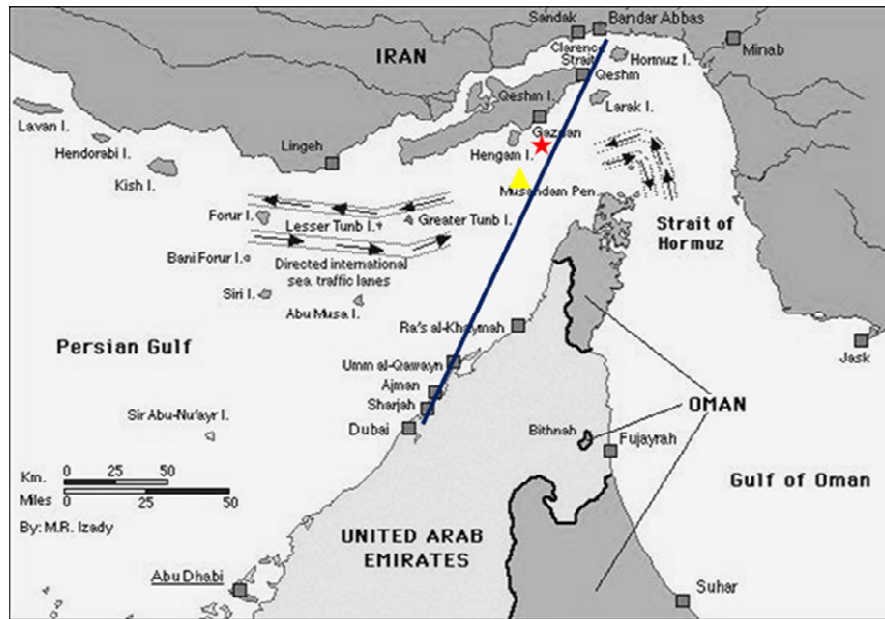


Abbildung 1. Karte der Straße von Hormuz mit den Schifffahrtswegen, dem Kurs des Flugzeugs und den angenäherten Orten seines Abschusses sowie der Vincennes

In den Tagen vor dem Ereignis gab es vermehrte Aktivitäten im Persischen Golf – in der Luft und an Land –, bei denen die Iraker gegen iranische Ölanlagen und die Iraner gegen Schiffe vorgingen. Die US-Streitkräfte im Persischen Golf hielten es für wahrscheinlich, daß die Iraner aufgrund vorheriger Erfolge der Iraker größere militärische Aktivitäten durchführen wollten. So positionierten die Iraner unter anderem am 3. Juli im Westen der Straße von Hormuz mehrere kleine bewaffnete Boote, von denen angenommen wurde, daß sie die Handelsschifffahrt bedrohen oder angreifen sollten.

Am 3. Juli um 07:41 Uhr (Ortszeit) beobachtete die Fregatte »Montgomery«, die sich im Norden der Straße von Hormuz aufhielt, eine Bedrohung eines pakistanischen Handelsschiffs durch iranische Boote und einige Explosionen.²⁵ Um 07:42 Uhr wurde die »Vincennes« nach Norden beordert,

²⁵ Die Existenz dieses Schiffes wurde in Zweifel gezogen.

um die Beobachtungen der »Montgomery« zu prüfen. Dies geschah durch den Bordhubschrauber »Ocean Lord 25« auf einem Routineflug. Um 09:45 Uhr wurde der Hubschrauber von einem der iranischen Boote aus beschossen. Daraufhin übernahm die »Vincennes« das taktische Kommando über die »Montgomery« und beide Schiffe nahmen mit hoher Geschwindigkeit Kurs auf in Richtung des Hubschraubers. Als die Schiffe das Gebiet erreichten, drehten zwei iranische Boote auf sie ein. Dies wurde als feindliche Absicht interpretiert. Die »Vincennes« bat um Erlaubnis, die Boote angreifen zu dürfen. Die Erlaubnis wurde gegeben. Um 10:13 Uhr eröffnete die »Vincennes« das Feuer auf die iranischen Boote. Um 10:20 Uhr, also während der Beobachtung des Airbusses (TN 4131), hatte eine Kanone der »Vincennes« eine Ladehemmung. Um ein anderes Geschütz einsetzen zu können, wurde bei einer Geschwindigkeit von 30 Knoten das Ruder um 30 Grad und damit hart gelegt. Eine solche Kursänderung wird im ganzen Schiff als ungewöhnlich wahrgenommen, sie führt bei dieser Geschwindigkeit zu einer starken Krängung des Schiffes. Es wird berichtet, auf der »Vincennes« seien Bücher und Tassen umhergeflogen. (vgl. US Department of Defense 1993, 100) Das Manöver ist damit für die Mannschaft ein Indikator für relevante, das heißt möglicherweise bedrohliche Vorgänge in der nicht sichtbaren Außenwelt.

Die folgende Tabelle enthält, welche Daten über den Airbus zu welchem Zeitpunkt registriert wurden und zur Entscheidung, das Flugzeug abzuschießen, beigetragen haben. Es sind hier nur die Angaben der Besatzung und des Systems der »Vincennes« übernommen, nicht die der »Sides«, die sich in der Nähe befand und deren Daten den AEGIS-Daten entsprechen, das heißt, die den Airbus kontinuierlich als Objekt ohne Angriffsanzeichen interpretierte. Es sind außerdem nur die Daten aufgeführt, die den Airbus (Track Number 4131) betreffen, weitere beobachtete Flugobjekte waren TN 4472 und TN 4474. Die Situation war entsprechend komplexer als es die nachstehende Tabelle nahelegen mag. Um die Übersicht zu behalten, findet hier – absichtlich – eine Reduktion statt. Die hervorgehobenen Daten sind die widersprüchlichen Daten, die auf der »Vincennes« von den beteiligten Personen oder Systemen registriert wurden.

Uhrzeit	Quelle	Peilung	Entfernung	Höhe	Kurs	Geschw.
10:20	AEGIS	25°	34	6160	-	334
10:21	GW (=FAAWC)	24°	28			

Uhrzeit	Quelle	Peilung	Entfernung	Höhe	Kurs	Geschw.
	AAWC		30	8000-9000		
	MAD + AEGIS			7000	210°	353
	IAD + AEGIS			7000	207°	350
	AEGIS		29	7000		
	OSDA			8000 desc.		
	AIC-3		30	9000		
	?			8000 - 9000 slowly rising		
10:22	MAD + AEGIS			9000	211°	360
	AAWC + AEGIS			9000		360-380
	ADT		25	12000		
	AEGIS		25	8400		
	CSC		22	10300		
	AEGIS		22	9200		
	LAD + AEGIS	(201°)	20	10000	210°	360
	MAD + AEGIS	(199°)	20			
	ADT			desc.		
	AEGIS			asc.		
	AIC-3 + AEGIS		20	9000		
10:23	AEGIS			10500		
	AEGIS	18°	16	11230		371
	TIC		15	11000		
	?			7800		450
	AIC-3		15	7700		
	AEGIS		15	11000		
	AEGIS		14	12000		382
	AEGIS		12	12370	211°	380
10:24	RSC		12	5000-6000		
	MAD + AEGIS				211°	385
	IDS			7800 desc.		445
	AEGIS			12000 asc.		380
	AAWC			6000-7000		
	AIC-3			7000-8000		
	AEGIS			12500		
	MSS		10			
	AEGIS	10°	10	12950		385
10:24	ADT		10	7800		
	TIC		10	10000 desc.		
	AEGIS			12900		
	AEGIS (Missile #1)	1°	8	13500		383
	MSS		7	7000		
	UBS		6	7000		
	?		6	7800		

Uhrzeit	Quelle	Peilung	Entfernung	Höhe	Kurs	Geschw.
	AEGIS (17 sec. after intercept)			12000		

Tabelle 4. AEGIS: Daten, die am 3. Juli 1988 zwischen 10:20 und 10:24 Uhr auf der »Vincennes« registriert wurden.²⁶

2.1.5 Situation auf der Vincennes

In den Hearings wird vorwiegend auf die Streßsituation, in der sich die »Vincennes«-Besatzung befunden hat, als Begründung für die Entscheidung hingewiesen. Es wird aber auch angeführt, daß die Ausbildung der Offiziere für ihre Gefechtsrolle im Einzelfall unvollständig war. So heißt es im Untersuchungsbericht: »The Commanding Officer USS Vincennes certified all officer watchstanders as qualified; however [...]»²⁷ had not completed PQS for AAWC (his 3 July 1988 GQ station).« (House Committee 1989, 127) Obwohl also anzunehmen ist, daß das Personal durchweg gut ausgebildet war, wurde in der konkreten Situation nicht fehlerfrei gehandelt. So wird in der 1992 freigegebenen Fassung des DoD-Untersuchungsberichts deutlich, daß der MSS (Missile System Supervisor) mehrfach eine Taste bediente, die erst nach der Freigabe einer bestimmten Funktion durch den AAWC (Anti-Air Warfare Coordinator) zu betätigen gewesen wäre.

(6) 0652Z

[...]

(l) [...] (MSS) recalled altitude decreasing at 20 NM. [...]

[...]

(p) [...] (MSS) continued to push »Request Radiation Assign« button (8 times). No authorization had been given by AAWC or IDS yet. [...]

(q) [...] (AAWC) pushed »Assign« button (which is the start of au-

²⁶ Abkürzungen:
AAWC = Anti-Air Warfare Coordinator
ADT = Air Detector Tracker
FAAWC = Force Anti-Air Warfare Coordinator
IAD = International Air Distress
IDS = Identification Supervisor
MAD = Military Air Distress
MSS = Missile System Supervisor
OSDA = Own Ship Display Assistant
TIC = Tactical Information Coordinator

²⁷ Auslassung im Originaltext.

thorization process). [...]

(r) [...] (MSS) continued to push ›Request Radiation Assign‹ button 4 more times. AAWC had not completed authorization sequence. [...]

[...]

(7) 0653Z

(b) [...] (MSS) pushed ›Request Radiation Assign‹ two more times. Authorization sequence not completed yet. [...]

[...]

(o) [...] (AAWC) pushed ›Engage‹ button in response to system tutorial message to ›Select Weapon‹ and received another ›Select Weapon‹ message. [...]

(p) [...] (MSS) again pushed ›Request Radiation Assign‹ button. Authorization sequence was still not completed by AAWC. [...]

(q) [...] (AAWC) pushed ›Assign‹ button in response to ›Select Weapon‹ message. Again he received a ›Select Weapon‹ message. He then pushed ›Engage‹ and got a ›Select Weapon‹ message. [...]

[...]

(t) [...] (MSS) pushed ›Request Radiation Assign‹ button 7 more times. Authorization sequence was still not completed by AAWC. [...]

(8) 0654Z

[...]

(c) [...] (AAWC) hit the ›Engage‹ button twice in response to ›Select Weapon‹ message and continued to receive ›Select Weapon‹ in response. [...]

[...]

(f) [...] At 0654:05 the firing key was turned and ›Forward/After Launcher Upgrade‹ alerts were sent. [...]

(g) [...] Three seconds later [...] (AAWC) (after receipt of a ›Select Weapon‹ message) correctly hit the ›Standard Missile‹ button. An ›Order Sent‹ message was received in response. [...]

[...]

(j) [...] (MSS) hit the ›Request Radiation Assign‹ button causing illumination #3 to be assigned to TN 4131. He then received a ›Launcher Assign‹ alert. [...]

(k) [...] (MSS) requested and received verbal confirmation of the ›Take‹ order from the AAWC. [...]

[..]

(n) [...] (MSS) hit the ›Firing Authorize‹ button. TN 4131 was at

10NM.

(o) [...] At 0654:22, a missile left the forward launcher, rail A. TN 4131 was at 10 NM, BRG 010, SPD 385 and ALT 12,950. One second later the second missile left the forward B rail.

(US Department of Defense 1993, 84-89)

Es kann angenommen werden, daß dieses Verhalten auf Streß zurückzuführen ist. Weitere Argumente für die Streßsituation ergeben sich aus dem »First Endorsement on Rear Admiral Fogarty's ltr of 28 July 1988«, dort heißt es:

The most reasonable explanation is contained in the report by [...] MC, USN and [...] MSC, USN that his behavior was induced by a combination of physiological fatigue, combat operations, stress and tension which can adversely affect performance and mission execution. As [...] states, »The concept of »scenario fulfillment« could seem as applying in this case.« Since [...] {the TIC} has no doubt that the aircraft is an Iranian F-14, heading toward the ship, and is not acknowledging repeated warnings, »the mind may reject incongruent data and facilitate misperception which promote internal consistency.«

[...] {His} mental agitation is reflected in his testimony that he took it upon himself to take »every open spot« he was getting on Circuit 15 to ensure »everyone up in the command decision area was informed, kept aware of what was going on in the case they got sidetracked by other events.« Towards the end it is reported he was yelling out loud.

(US Department of Defense 1993, 121f.)

Ein anderer Offizier, der AAW, den der Kapitän der »Vincennes« vorübergehend in die Position des FAAWC eingesetzt hatte und der deshalb den Platz neben ihm einnahm, akzeptierte die Nachricht über die abnehmende Höhe des Flugzeugs, die »yelling out loud« mitgeteilt wurde, ohne sie nachzuprüfen:

{Lieutenant Commander Scott Lustig, the FAAWC}, acting as the principal Anti-Air Warfare (AAW) advisor to the Commanding Officer, apparently accepted [...] {the TIC's} reports of descending altitude and increasing speed at face value without further evaluation on his part from the CRO at his position and, passed the assessment on to the Captain, which in-turn had a direct bearing on the decision to

fire. [...] {the AAW} {Lieutenant Scott Lustig, the FAAWC} states he

»came to the realization that data to me doesn't mean anything, because I reacted to people that I thought that ... I knew that I had operated with that were reliable ... and when they reported at short range they had a decreasing altitude, increasing speed, I had no reason to doubt them.«

(US Department of Defense 1993, 122)

Auf diese Information verließ sich auch der Kapitän:

Captain Rogers exercise of »command by negation« placed an even greater reliance on the information and recommendations received from [...] {the AAWC} {Lieutenant Commander Scott Lustig, the FAAWC}, as he did not as a practice deal with his CRO relying rather on the information from operators who, as he states, were trained better than he to read a CRO.

(US Department of Defense 1993 122f.)

Möglicherweise hat auch die Doppelfunktion, die das Personal auf der »Vincennes« hatte, zum Streß beigetragen. Das Schiff war nämlich nicht nur für seine eigene Sicherheit verantwortlich, sondern hatte als Stabsfunktion das Kommando über und damit die Verantwortung für den Flottenverband. Dies betraf zumindest den Kapitän und den AAWC. Und auch die relative Unerfahrenheit in Kampfhandlungen mag eine Rolle gespielt haben. So erläutert Crowe die Situation in einem Hearing im Juli 1992:

Admiral Crowe. [...] We never go into combat any more with people with combat experience. We fight so infrequently, that every time you go into combat it's always with a bunch of new people. Maybe the captain has seen some past combat or something like that [...]. Every time you're with inexperienced people, you're with people without combat experience, and now they're sitting on very, very high tech machinery and equipment that is extremely difficult to operate. Incidentally, young people do it very well, but you don't learn the limitations of it until you actually get in combat, and we don't get in combat enough. [...]

Mr. Hopkins. I think, Admiral, for the record, when you implied that we do not have enough combat, you were talking about combat experience, not certainly implying you're –

Admiral Crowe. I'm not advertising for war.
(House Committee 1993, 47f.)

Als weitere Streßfaktoren werden im Untersuchungsbericht angeführt:

The violent maneuvers of the ship, the noise of the guns firing, gear falling in CIC and the lights in the LSD's flickering, heightened the tension in CIC during the critical time TN 4131 was being evaluated.
(House Committee 1993, 100)

2.1.6 Interpretation der Daten

Bezogen auf die konkrete Situation ist festzuhalten, daß das Informationssystem AEGIS korrekt funktionierte, indem es den Flug des Airbus in Höhe, Entfernung, Geschwindigkeit usw. richtig erfaßte und auf den zum System gehörenden Monitoren richtig repräsentierte. Diese Repräsentation und vermutlich weitere Eigenschaften des Systems jedoch scheinen der Situation nicht angemessen gewesen zu sein.

Zu den Bestandteilen von AEGIS gehören zwei Arten von Bildschirmen. Zum einen gibt es das LSD (Large Screen Display), auf dem die Radarobjekte graphisch dargestellt sind. Jedes Objekt wird dort durch ein Symbol gekennzeichnet, das gleichzeitig angibt, ob das Objekt als freundlich oder feindlich identifiziert wird. Es enthält Angaben zur Richtung und zur relativen Geschwindigkeit gegenüber anderen angezeigten Objekten. Die Angabe der Höhe, in der ein Flugzeug sich befindet, ist nicht vorgesehen. Die zweite Art von Bildschirmen ist der CRO (Character Read Out). Wie der Name andeutet, werden auf diesem Schirm alphanumerische Daten angezeigt. Sie enthalten Richtung, Entfernung, Geschwindigkeit, Höhe und IFF-Kennungen, das heißt Werte, die vom AEGIS-System ermittelt wurden, zu den auf dem LSD registrierten Objekten. Es ist möglich, ein bestimmtes Objekt vom LSD auszuwählen und sich auf dem CRO weitere Informationen, zum Beispiel, woher die angezeigten Daten bezüglich Entfernung und Geschwindigkeit stammen, in mehreren Detaillierungsebenen anzeigen zu lassen. Es ist nicht möglich, sich für die Höhe einen Trend anzuzeigen, ob also das Objekt sich im Sink- oder Steigflug befindet. (Vgl. House Committee 1989, 109, 161, 174)



Abbildung 2. Bildschirmarbeitsplatz in der Kommandozentrale der Vincennes, Photographie der US Navy, Blickrichtungen des Bediener hinzugefügt

Die auf den Monitoren erscheinenden Daten zu Höhe und Geschwindigkeit mußten demnach von den Benutzern ausgewertet werden, indem sie aus aufeinanderfolgenden Werten zur Höhe den Trend der Daten selbst erschlossen. Das kann – nicht nur unter Streß – eine schwierige Aufgabe sein. Zu berücksichtigen ist auch, daß auf dem LSD nicht nur ein oder zwei Objekte sichtbar waren. Die oben aufgeführte Tabelle enthält – wie bereits angemerkt – nicht alle Daten, ist also selbst »aus dem Kontext gerissen«. Verwechslungen der Objekte und der zugehörigen Daten allein aufgrund der Datenmenge sind nicht auszuschließen.

Eine weitere Möglichkeit der »Fehlinterpretation« ergibt sich daraus, daß gleichzeitig mehrere Werte für ein Objekt angezeigt werden. Der an der Untersuchung beteiligte Admiral William Fogarty hält es für möglich, daß die Werte der Höhe und der Entfernung verwechselt wurden. Es gab eine Situation, in der die Höhe 12000 Fuß und die Entfernung 12 Seemeilen betrug. Ab dem Zeitpunkt wurde vielleicht die Höhenangabe – zum Beispiel bei einer Darstellung als »12k« – für die Entfernungsangabe »12nm« gehalten und umgekehrt. Da die Entfernung abnahm, würde das Flugzeug zu sinken scheinen.

Admiral Fogarty: Sir, we were unable to reconcile the fact that the operator saw a decreasing altitude. If you will notice on the graph that showed altitude versus range, everything that was being seen and reported was exactly as was on the tapes up to the 15-mile point. At that point this one person began to believe he saw a decrease in altitude.

In the investigation I was unable, as was my team, to determine exactly how he got that. One possibility – and it is only a possibility; I was not able to prove it – is that he was interchanging altitude and range from his CRO digital readout. There were some crossover points, 12 miles, 12,000 feet. He could have interchanged. But I was not able to prove that. (House Committee 1989, 177)

Egal, welche »Fehlinterpretation« zu der Annahme, das Flugzeug komme auf die »Vincennes« zu, geführt hat, die Darstellung auf den Bildschirmen war der komplexen, zeitkritischen Situation nicht angemessen. Dies wird in den Empfehlungen der an der Untersuchung Beteiligten deutlich. (Vgl. House Committee 1989, 159ff., 174f.)

Die Interpretation der Daten entsprach einem »scenario fulfillment«, das heißt, die Entscheidungen wurden entsprechend eines imaginierten, für real gehaltenen Szenarios getroffen, für das eine sichere Verhaltensroutine vorhanden ist, wobei empirische Daten, die das Szenario nicht bestätigen, ausgeblendet werden. So wurde beispielsweise das Nicht-Antworten des zivilen Flugzeugs auf die »Warnungen« der »Vincennes« nicht als: »Es handelt sich wahrscheinlich um ein ziviles Flugzeug, denn es reagiert nicht auf die Warnungen auf dem militärischen Kanal,« oder als: »Es fühlt sich als ziviles Flugzeug gar nicht angesprochen,« interpretiert, sondern als: »Es handelt sich wahrscheinlich um ein militärisches Flugzeug, denn es reagiert nicht, weil es nicht als Angreifer erkannt werden will,« verstanden. Gleichzeitig hatten die Hinweise auf ein harmloses Objekt keinen korrigierenden Einfluß. Offenbar wurden die Möglichkeiten, die das Nicht-Reagieren bedeuten konnte, auf nur eine Möglichkeit reduziert, nämlich auf die Bestätigung, daß es sich um eine feindliche F-14 handeln müsse.

Nach eigenen Angaben – so der Untersuchungsbericht – urteilte der Kapitän der »Vincennes« unter anderem nach folgenden Kriterien:

- F-14-Jagdflugzeuge waren vor kurzer Zeit nach Bandar-e' Abbas verlegt worden.
- Das Flugzeug antwortete nicht auf Warnungen über IAD und MAD.

- Es hatte Warnungen bezüglich einer zunehmenden Bedrohung durch die Iraner zum 4. Juli gegeben.
- Das Flugzeug flog nicht exakt auf der Mittellinie der zivilen Flugroute; es flog in einer geringeren Höhe als andere zivile Flugzeuge; die Geschwindigkeit wurde als zunehmend gemeldet; die Höhe wurde als abnehmend gemeldet.
- Es wurde gemeldet, daß das Flugzeug eine IFF-Kennung Mode II sandte, die einem F-14 zuzuordnen war.
- Eine visuelle Identifikation des Flugzeugs war nicht möglich.
- Das Flugzeug startete von einem zivil und militärisch genutzten Flugplatz.
- Die empfangenen Signale waren nicht eindeutig.
- Die Zeitspanne zwischen dem Bemerken des Flugzeugs und einer möglichen Reaktion betrug nur sieben bis acht Minuten.
- Die Bedrohung durch die Auseinandersetzung mit iranischen Kanonenbooten in den Tagen bis Minuten vor dem Ereignis.

(Vgl. House Committee 1989, 151f.)

Commander David R. Carlson, der Kapitän der Fregatte »Sides«, die sich in der Nähe der »Vincennes« befand und die ebenfalls den Airbus beobachtete, beschrieb in einem Aufsatz seinen Eindruck von der Situation auf der »Vincennes«. Seiner Erfahrung nach waren die Aktivitäten der Iraner in den vorhergehenden Monaten nicht bedrohlich, da sie keine Zweifel über ihre Absichten ließen. Carlsons Eindruck von der Atmosphäre auf der »Vincennes« war, daß die Aktivitäten der »Vincennes« gleichbleibend aggressiv waren. »My guess was that the crew of the *Vincennes* felt a need to prove the viability of AEGIS in the Persian Gulf, and that they hankered for an opportunity to show their stuff.« (Carlson 1989, 88)

Es stellt sich die Frage, ob eine Deautomatisierung, in diesem Fall die vollständig manuelle Bedienung von AEGIS – was möglich gewesen wäre – den Abschluß hätte verhindern können. Hier entsteht jedoch eine Zwickmühle, denn die Situation bedingte aufgrund des zeitkritischen Prozesses eine Automatisierung. Systeme dieser Komplexität sind nicht deautomatisierbar oder nur, wenn es sich nicht um zeitkritische Prozesse handelt. Ein Verzicht auf die die Sicherheit von Schiff und Besatzung suggerierende automatische Kampfkraft des Systems hätte zudem ein weiteres Streß und Unsicherheit erzeugendes Moment geschaffen und damit wohl keineswegs aus dem scenario fulfillment geführt. Ausgehend von diesem Kontext, der komplexen Situation, dem Streß und unter Einbeziehung seiner generell

»angriffslustigen« Stimmung, stand der Kapitän der »Vincennes« in jedem Fall auf der »sicheren Seite«.

2.1.7 AEGIS-Design

Um herauszuarbeiten, welche Rolle das System AEGIS bei diesem »Unglück« spielte, sei hier zunächst aus seiner Beschreibung in einem »Fact File« der United States Navy zitiert:

AEGIS Combat System

The AEGIS system was designed as a total weapon system, from detection to kill. The heart of the system is an advanced, automatic detect and track, multi-function phased-array radar, the AN/SPY-1. This high powered (four megawatt) radar is able to perform search, track and missile guidance functions simultaneously with a track capacity of over 100 targets. The first Engineering Development Model (EDM-1) was installed in the test ship, *USS Norton Sound* (AVM 1) in 1973.

The computer-based command and decision element is the core of the AEGIS combat system. This interface makes the AEGIS combat system capable of simultaneous operation against a multi-mission threat: anti-air, anti-surface and anti-submarine warfare.

(US Navy Fact File »Aegis Combat System«)

Hinsichtlich des System-Designs sind folgende Eigenschaften kritisch zu bewerten:

Erstens. AEGIS ist zum einen ein hochkomplexes System, zum anderen wurde es für spezifische Anwendungen entwickelt und optimiert: Es wurde nicht für Kämpfe mit kleinen Schiffen in begrenzten Seegebieten, sondern ursprünglich für den Einsatz gegen gleichzeitige Angriffe mit einer Vielzahl von Flugkörpern der sowjetischen Marine im Nordatlantik konzipiert.

Zweitens. Es besteht eine große Inhomogenität des Gesamtsystems, das heißt AEGIS in Kombination mit dem Schiff und dem Personal. So war beispielsweise die Ausstattung der »Vincennes« mit UKW-Funk auf dem Stand der Technik der fünfziger Jahre. Ohne Umbestückung des Geräts konnte die »Vincennes« mit zivilen Flugzeugen nur auf der Notfrequenz verkehren, aber nicht auf den normalen Kanälen des Flugfunks hören oder senden. »U.S. ships deployed to Persian Gulf area are limited to a single

VHF radio which is tuned to International Air Distress (IAD) frequency 121.5 mHz. It can take upwards of 1 hour to change pre-set radio VHF frequencies.» (US Department of Defense 1993, 24) Des weiteren ist das Track-Fenster manuell zu verschieben, wenn ein Objekt aus einem Bereich in einen anderen wechselt. Andererseits koppelt die Anzeige offenbar das IFF-Signal fest an das Objekt, obwohl diese Kopplung »historisch« ist, insofern sie bei der Feststellung des Objekts erfolgt und nicht erneut nach der manuellen Verschiebung des Fensters. Die Inhomogenität zeigt sich auch in der Darstellung der Daten auf den Bildschirmen, in der Trennung von LSD und CRO. Ebenso sind Radar- und Navigationssysteme getrennt, die Waffentechnologie ist dagegen integriert und Link-11 als Datenkommunikationsweg war so modern, daß das Kommandoschiff selbst keinen Zugriff darauf hatte.

Drittens. Das Gesamtsystem AEGIS-Schiff ist »veraltet«. Zwar ist es zum Zeitpunkt der Bestellung (für die »Vincennes« der August 1981) hinsichtlich der Spezifikation »aus einem Guß«, aber die Erfahrungen mit den einzelnen Systemkomponenten nach der Indienststellung (für die »Vincennes« der Juni 1985) gehen natürlich erst in folgende »Releases« der Software, Hardware usw. ein. In vielen Fällen behilft man sich mit »Workarounds«. In einem »AEGIS Baseline 4 CND Hotrecovery Processing-CND Operational Issue« aus dem Jahr 1994 heißt es:

1. This class advisory describes an AEGIS baseline 4 command and decision (CND) system logic problem that can cause a failure to properly engage a target. This advisory provides information necessary to determine when the problem occurs and describes workarounds pending delivery of the AEGIS weapon system baseline 5.0 computer programs which correct the problem.
2. Background. The symptoms of this problem were first observed in the USS Hue City [...]. If an operator performs a manual correlate or interchange action (each of which modify the control track storage locator (CTSL)/control group track number (CGTN) pairing), and a CND hot recovery occurs, the CTSL/CGTN pairing will be lost within central track stores. This pairing loss will prevent proper engagement processing.
[...]
3. Action. Follow the workaround steps for guidance regarding the manual correlate and interchange problems.

A. Correlate. As a temporary manual correlate solution, upon receipt of a not held by SPY-request sent tutorial, the operator should verify through the RSC that the track is, indeed, an active SPY track. If so, the problem can be alleviated by manually dropping the track in question. CND will not notify SPY of this drop track action since no CGTN is associated with the track. SPY will continue to report the track to CND, and CND will initiate a new track with the proper CGTN. The engagement may then proceed.

B. Interchange. The operator can resolve this with a second interchange (following the hot recovery). This forces CND to send a CTSL assignment message to WCS, which corrects the disparity between CND and WCS.

[...]

5. Cancellation. This class advisory will be cancelled upon delivery and installation of AWS baseline 5.0 computer program to ships having the AWS baseline 4.2.

(CG 47 Class Advisory Nr 15-94)

Der Anwender dieses hochkomplexen Systems wird sich gedulden und manuelle Schritte durchführen müssen, bis er ein neues Release der Software erhält. Es gibt also auch in dieser Hinsicht eine zeitliche Verzögerung: das Informationssystem »hinkt« immer nach. Und dieses Verfahren (unter Verwendung von »Konfigurationsmanagementansätzen«) ist notwendig, weil es sich um ein großes System handelt, bei dem Ad-hoc-Lösungen erst recht neue Fehler implizieren würden.

2.1.8 Entscheidungsmacht

Inwiefern und in welchen Dimensionen hatte das Informationssystem AEGIS die »Entscheidungsmacht«?

Erstens war durch den Einsatz von AEGIS der Zeitraum für eine Überprüfung der Werte durch den Menschen zu klein, und es wurde – aus zeitlichen Gründen und in diesem Fall sogar trotz widersprüchlicher Daten – zuviel »Vertrauen« in das System gesetzt. Insofern hat das Informationssystem entschieden.

Zweitens gab es nur bedingt die Möglichkeit, das Modell mit der Wirklichkeit zu vergleichen. »Die von der Umwelt abgeschlossenen militärischen

Entscheidungsträger im fensterlosen Kommandoraum des Kreuzers versuchten erst gar nicht, das bedrohliche Objekt mit eigenen Augen von der darüberliegenden Brücke wahrzunehmen, was mit einem Feldstecher wahrscheinlich möglich gewesen wäre.« (Der Spiegel 1988, Nr. 28, 113) Im Untersuchungsbericht von 1989 wird die visuelle Identifikation als eine »generelle Empfehlung« genannt. »Visual identification (VID) is the only positive means to distinguish between friendly or commercial aircraft from potentially hostile aircraft.« (House Committee 1989, 159) Insofern hat ebenfalls das Informationssystem entschieden, als es den Menschen keine Gelegenheit gab, sich zu vergewissern, um was es sich bei dem Flugzeug handelte. Zugleich liegt auf der Hand, welch hilfloser Anachronismus die empfohlenen Kombination von Inaugenscheinnahme und Lenkwaffe ist.

Drittens hat AEGIS entschieden, das Flugzeug zu treffen, denn die Daten für die Raketen basierten offensichtlich auf den AEGIS-Werten. Wären die Radardaten nicht automatisch übertragen worden, hätte also die »Vincennes«-Mannschaft auf ein Objekt in der von ihr behaupteten Höhe geschossen, wäre der Airbus vermutlich nicht getroffen worden, wenigstens nicht bei der Verwendung von Raketen ohne automatische Zielerfassungssysteme. Hier zeigt sich eine Gefahr, die in der Kopplung und damit der zunehmenden Komplexität der Informationssysteme besteht.

Das Problem der Entscheidungsmacht wird wie folgt von Günter Hellbardt diskutiert:

Wie sehr wir [...] die zuverlässige Ausführung des konstruktiv festgelegten Handlungsprogramms unserer maschinellen Mitarbeiter zum Maßstab nehmen, zeigt sich daran, wie leichtfertig wir von menschlichem Versagen sprechen, wenn der stets irrtumsfähige Mensch einen Fehler begangen hat, und wir der Feststellung des Fehlers sogleich das moralische Urteil hinzufügen. [...] Gleichzeitig geht aber zumindest ein Teil der Handlungsverantwortung vom Menschen an die Maschine über. Sie entscheidet, wie kürzlich geschehen, ob in einem gegebenen Moment des Landeanflugs die Schubumkehr der Triebwerke eines Großflugzeugs eingeschaltet werden darf oder nicht. Natürlich kann sie nicht für das daraus entstandene Unglück verantwortlich gemacht werden, denn da sie keine »auf sich selbst reflektierenden Bewußtseinsprozesse« kennt, fehlt ihr die »volle Bewußtseins- oder Willkürhandlungsverantwortlichkeit«, wie H. Lenk bei der Untersuchung der Verantwortlichkeit von Computersystemen festge-

stellt hat [...]. Aber ihr Konstrukteur hat sie mit der Entscheidungsvollmacht für diesen Fall versehen [...] und damit dem Piloten die Entscheidungsfreiheit genommen. Er hat die Irrtumsmöglichkeit des Piloten gefürchtet und ist dabei selber dem Irrtum einer fehlerfreien Voraussicht aller Handlungssituationen erlegen. [...] Eine entscheidende Frage für den Menschen, dessen Würde in seiner Freiheit liegt, wird daher sein, ob er die Autonomie seiner Entscheidungen gegenüber den maschinellen Agenten in seiner Umgebung wahren kann, wenn diese kraft ihrer größeren Verfügung über Fakten und einer für ihn unerreichbaren Verarbeitungskapazität auch die ihnen von ihren Konstrukteuren eingeprägten Werte, Überzeugungen und Ziele zur Wirkung bringen. (Hellbardt 1996, 88f.)

Hellbardt fordert dann, daß die Informatiker nicht ausschließlich nach immer höherer Effizienz suchen, sondern sich auch der sozialen Dimension ihrer Arbeit bewußt werden sollen, die auch ethische Aspekte beinhalten, und er verweist in diesem Zusammenhang auf die Ethischen Leitlinien der Gesellschaft für Informatik. (Hellbardt 1996, 90) In Kapitel 7 dieser Arbeit wird zu diskutieren sein, ob eine kontextualistische Informatik nicht geeignetere Regulative bieten könnte als eine beigeordnete Ethik. Vorgeschlagen werden informatikinterne Handlungsanweisungen, die den Kontext oder besser: die Kontexte der Gestaltung und Anwendung von Informationssystemen systematisch in die Arbeit des Informatikers einbeziehen.

Ähnlich wie bei der Definitionsmacht²⁸ ist auch mit der Entscheidungsmacht ein Problem der Verselbständigung gegeben. Dort, wo die Funktionen allein aufgrund ihrer Ausführungsgeschwindigkeit nicht mehr nachvollzogen werden können, kann nicht erwartet werden, daß Entscheidungen, die der Computer trifft, grundsätzlich jedesmal angezweifelt werden. Und es gibt zudem ja vielerlei Vorgänge, seien es Rechnungen der höheren Varianzanalyse oder die Steuerung komplexer technischer Systeme, die ohne Computer überhaupt nicht ausführbar sind. Wohl oder übel wird angenommen, der Rechner funktioniere richtig und im Sinne des Erfinders.

Das Fallbeispiel AEGIS hat deutlich gemacht, daß informatisches Handeln in Kontexte eingebettet ist, die kein Informatiker antizipieren oder einholen kann. Es hat ebenso deutlich gemacht, daß Informationssysteme Risiken mit sich bringen, das sie Risikosysteme sind.

²⁸ Vgl. Abschnitt 2.2.7.

Noch einmal sei daran erinnert, daß das Eingehen eines Risikos ein Handeln unter Unsicherheit ist. Ein Risiko ist ein Wagnis, das von einem Menschen eingegangen wird und für das er verantwortlich ist. Hiervon unterschieden werden Gefahren. Gefahr ist subjektunabhängig und kann demnach auch nicht verantwortet werden. Zu den Besonderheiten technischer Großsysteme gehört, daß mit ihnen unter Umständen ein wissenschaftsinduziertes Risikohandeln einhergeht, bei dem die nicht intendierten Folgen größer oder negativer sind als die intendierten Folgen. In diesem Fall spricht man von Gefahr 2. Ordnung. Wo wir Informationssysteme wiederfinden, hängt von ihrem Design und ihrer Mächtigkeit, aber auch von ihren Umweltbeziehungen ab. Deshalb ist die Frage nach wissenschafts- und technikinduzierten Risiken oder Gefahren von Fall zu Fall neu zu stellen und zu beantworten. Das Gesamtsystem AEGIS ist ein hochkomplexes System mit loser Kopplung und weist Umweltbeziehungen auf, die als Gefahr 2. Ordnung gelten können.

Die hier angesprochenen Probleme sind, das muß betont werden, längst alltäglich geworden und breiten sich weiter aus. Es sind nämlich nicht nur Systeme in der Größenordnung des dargestellten Beispiels oder auch aus anderen Gründen unkontrollierbare Systeme wie AKWs in Betracht zu nehmen, sondern solche vertrauten Gegenstände wie mein PKW.

Wenn PKWs der oberen Mittelklasse heute 120 bis 140 zum Teil vernetzte Computer aufweisen, die zum Beispiel Telemetriedaten erheben, hieraus ein virtuelles Bild der Fahrsituation entwerfen, das Bild auf Grund vorgegebener Vergleichsdaten und physikalischer Gesetze für ein zukünftiges Zeitintervall extrapolieren und gegebenenfalls zum Zweck der Korrektur selbsttätig in die Motorsteuerung, das Fahrwerk und das Bremssystem eingreifen, dann mag der Fahrer immer wieder auf dem Nürburgring einen Powerslide versuchen, er wird das Vergnügen während seiner teuer bezahlten Runde nicht haben, und es mag offen bleiben, ob dann durch ein umso riskanteres Fahrverhalten eine katastrophale Handlungsfolge einsetzt. (Vgl. Dörner 1989) Ein System wie der genannte Mittelklasse-PKW erreicht einen Komplexitätsgrad, der es unmöglich macht, hier noch von einem kleinen System im Sinne Siefkes (1993) zu sprechen. Tendenziell werden Gegenstände unseres Alltagslebens zu großen Systemen, ohne daß dies überhaupt bemerkt würde, denn sowenig sich ihr Äußeres ändert, sowenig müssen wir unsere uns vertrauten Handlungen in Standardsituationen ändern. Erst der Ausnahmefall wird uns vielleicht befremden. Oder um einen noch sehr viel banaleren Alltagszusammenhang anzuführen: Entscheidungsmacht

besteht auch darin, daß die Tintenpatrone meines Druckers einen Chip enthält, der nicht nur den Tintenverbrauch mißt, an den PC übermittelt und zur animierten Darstellung auf dem Bildschirm führt, sondern der auch verhindert, daß eine mit kostengünstiger Tinte nachgefüllte Patrone dieser Art noch funktioniert. Hat der Chip die Patrone einmal als leer definiert, bleibt diese Definition erhalten, auch wenn die Patrone physisch voll ist.

2.2 Paradigmen und Kontexte

Im folgenden soll nun gezeigt werden, daß das Beispiel AEGIS nicht – wie man vielleicht meinen mag – ein besonders »extremes« Beispiel ist, etwa weil AEGIS im militärischen Kontext im Rahmen eines Krieges eingesetzt wurde und – vermutlich nicht beabsichtigt – tödliche Folgen für Zivilisten hatte.

Im Gegenteil, die Paradigmen und Kontexte, die mit AEGIS verbunden sind, treffen auch auf viele »alltägliche« Informatikprodukte und Informatikprojekte zu. Abgesehen davon, daß es aus Geheimhaltungsgründen nicht möglich ist, AEGIS im Detail zu untersuchen, greife ich im folgenden auf meine eigene, eingangs angeführte berufliche Praxis zurück. Sie zeigt, daß die im universitären Bereich entwickelten Softwaretechniken nicht unbedingt im Sinne ihrer Erfinder angewandt werden. Es findet oftmals eine Anpassung an die in der Regel ökonomisch bestimmte Situation statt, die vielfach eine Reduzierung der Methoden auf das »Notwendigste« bedeutet.

In diesem Abschnitt werden nun anhand einiger elementarer Softwaretechnikverfahren verschiedene Paradigmen aufgezeigt, die möglicherweise nicht oder selten reflektiert oder artikuliert werden. Die angesprochenen Verfahren der Softwaretechnik sind seit langem bekannt und eingeführt. Deshalb ist die in diesem Zusammenhang ausgewertete Literatur zum großen Teil älteren Datums.

Hilfreich für die Ermittlung der hier aufgeführten Paradigmen war die Liste der von Masterman aufgefundenen Bedeutungen des Begriffs Paradigma in Kuhns Arbeit »The Structure of Scientific Revolutions« (1962) und ein daraus abgeleiteter Katalog, mit dem ich die Tätigkeiten in den mir bekannten Praxisfeldern befragt habe:

- Welche anerkannten wissenschaftlichen Leistungen lieferten und liefern den Informatikern maßgebende Probleme und Lösungen?
- Welche anerkannten Überzeugungen hatten und haben Informatiker (vor Beginn ihrer Forschungsarbeit) hinsichtlich der Frage nach den Grundbausteinen des Universums und deren Wirkungen aufeinander und auf die Sinne? Welche Fragen über die Bausteine werden für sinnvoll gehalten und welche Methoden werden bei der Suche nach Lösungen angewandt?
- Welche wissenschaftlichen Lehrbücher der Informatik legen deren anerkanntes Theoriengebäude dar und erläutern ihre Anwendung anhand von Beispielen?

- Welche wissenschaftlichen Theorien geben Vorbilder für die Informatik ab?
- Welche Analogien werden in der Informatik benutzt?
- Welche Theorien gab es zu Beginn der Informatik, die besser erschienen als ihre Konkurrenten und die deshalb als Paradigmen angenommen wurden, ohne daß sie für alle Probleme Lösungen boten?
- Welche Schulbeispiele oder Präzedenzfälle werden in der Informatik als Objekte für die weitere Artikulierung und Spezifizierung von wissenschaftlichen Aussagen benutzt?
- Welche Standardbeschreibungen, welche sich wiederholenden und maßgebenden Erläuterungen hinsichtlich der Begriffe und Theorien existieren in der Informatik?
- Unter welchen Bedingungen werden Anomalien in der Informatik erkannt? In welchen Situationen gab es plötzlich erkannte Anomalien?
- In welchen Situationen gab es einen Wechsel der Ausrüstung der Informatik, der darauf hindeuten könnte, daß die vom ursprünglichen Paradigma gelieferten Hilfsmittel nicht mehr ausreichen?
- Gibt es in der Informatik Paradigmenwechsel, die nach dem Modell des Gestaltwechsels (Vogel – Antilope) stattfinden?
- Welche Normen, die eine wissenschaftliche Lösung von einer metaphysischen Spekulation unterscheiden, gibt es in der Informatik und haben diese sich im Lauf der Zeit geändert? Gibt es solche, die inkommensurabel sind?
- Welche Rolle spielt die visuell-begriffliche Erfahrung der Informatiker bei der Wahrnehmung der Objekte? Welche Paradigmen existieren hier?

Nun ist nicht jede Frage in diesem Kapitel beantwortet oder beantwortbar. Zum Teil werden Paradigmen erst aus dem historischen oder anderen Kontexten deutlich (vgl. Kapitel 3 bis 5), so daß eine Zusammenfassung erst in Kapitel 6 erfolgen kann. Dies geschieht dann nach den Kategorien »semantisch-kognitiv«, »situativ-praktisch« und »sozial-interaktiv«.

Die Verfahren und Konzepte des Ausschnitts der Softwaretechnik, den ich untersucht habe, enthalten 22 Paradigmen. Unter funktionellen Gesichtspunkten erweisen sie sich

- teils als generalisierte Anforderungen an Modelle, etwa die Unabhängigkeit der Elemente oder die Zeitunabhängigkeit,
- teils als Prinzipien für das Modelldesign, wie die Formalisierung durch Satzanalyse oder das sequentielle und iterative Vorgehen,
- teils als Rahmenbedingungen, so das Ökonomieprinzip.

Eine solche Gruppenbildung wird jedoch nicht ausgeführt, da nicht jedes Paradigma eindeutig zugeordnet werden kann und es auch Überlappungen gibt.

2.2.1 System

Informatiker haben mit Systemen zu tun, genauer gesagt, mit Informationssystemen. Was ist das?

Informationssysteme sind Systeme, die neben einer syntaktischen und einer semantischen auch eine pragmatische Komponente enthalten. Der Bezug eines Systems zum Kontext besteht in zweierlei Hinsicht: Zum einen stellen Informationssysteme aktiv Kontexte her. Indem ihr Benutzer den von ihnen generierten Zeichenfolgen eine pragmatische Bedeutung zuordnet, erlangen sie Definitionsmacht. Zum anderen sind die Systeme kontextabhängig, weil sie sowohl auf der Seite des Anwenders als auch auf der Seite des Herstellers von Vorbedeutungen abhängen. Dabei ist allerdings zu beachten, daß zwischen Anwender und Hersteller nicht nur eine Zeitverschiebung besteht, sondern ein sachliches Ungleichgewicht. Das System enthält nur die Vorbedeutungen, die sein Modellierer für relevant hielt und deshalb implementierte. Dies hat zur Folge, daß von den Vorbedeutungen des Anwenders nur diejenigen zum Tragen kommen, die hiermit verträglich sind. Unter beiden Perspektiven entsteht somit eine nahezu gleichgerichtete Definitionsmacht und der Anwender wird seine nicht verträglichen Vorbedeutungen allenfalls »neben dem System« artikulieren können, also als nicht unmittelbar handlungsrelevante Bewertung der Qualität des Systems. In Alltagssituationen drückt sich dies zum Teil in so banalen Äußerungen aus wie: »Das alte System konnte das aber.«

Solche Systeme sind im übertragenen Sinn²⁹ immer offene Systeme. Unter diesem Gesichtspunkt ist hier ein Blick auf die klassische Systemtheorie zu werfen, weil der Begriff des Systems über sie seine weite Verbreitung fand und weil deutlich zu machen ist, daß bestimmte Auffassungen über das, was ein System ist, und über den Gebrauch des Begriffs sich an dieser Theorie orientieren. Es ist wichtig festzustellen, daß die klassische Systemtheorie aus heutiger Sicht sachlich einen Gegenpol zum kritischen Impetus des Kontextualismus darstellt. Wichtige Vertreter der Systemtheorie waren

²⁹ Sie sind es nur im übertragenen Sinn, weil die Beschreibbarkeit des Kontextes nicht physikalistisch, geschweige denn physikalisch ist.

neben Anatol Rapoport (1911-2007), Ludwig von Bertalanffy und Karl W. Deutsch (1912-1992) auch James G. Miller und Kenneth E. Boulding (1910-1993), der herausgearbeitet hat, was das Systemverständnis grundlegend kennzeichnet:

Jedes System wird zum einen definiert durch eine Reihe von Elementen, das heißt, von Größen, die in einem System auftreten, und zum anderen durch eine Reihe von Beziehungen zwischen diesen Elementen. Wenn es ausreichende Beziehungen gibt – und überdies Beziehungen der richtigen Art – so nennt man das System prädikativ, in dem Sinne, daß die Spezifizierung der Beziehungen gleichzeitig auch die Spezifizierung aller Charakteristika des Systems bedeutet. Wenn diese Beziehungen durch Gleichungen ausgedrückt werden können – Gleichungen, die Parameter haben, denen man wiederum numerische Werte zuordnen kann – so kann man das System als parametrisches System bezeichnen. Dieses hat also die Eigenschaft, daß, wenn die Beziehungen einmal spezifiziert sind, die Eigenschaften des Systems als Funktion der Parameter erscheinen, das heißt, sie hängen von den numerischen Werten der Konstanten der Gleichungen ab. (Boulding 1967, 362f.)

Zwei Behauptungen der Allgemeinen Systemtheorie sind die Universalität und die Gegenstandsunabhängigkeit des Systembegriffs und der systemtheoretischen Methoden. In diesem Sinne sind Konkretionen der allgemeinen Theorie, also zum Beispiel ihre Anwendungen in den Sozial- oder Humanwissenschaften oder in den Naturwissenschaften, von den jeweils notwendigen Spezifizierungen abgesehen äquivalent.³⁰ So haben sich die genannten Autoren zum Teil mit »Sozialkybernetik« und »Politische Kybernetik«³¹ beschäftigt und versucht, ein Verständnis sozialer Prozesse zu entwickeln, das von Wolf-Dieter Narr schon frühzeitig als »Parallelität zu einer

³⁰ Der Nachweis für diese Behauptung läßt sich unter anderem anhand des Werkes von Ludwig von Bertalanffy führen. In ihm wird die Aufweitung von spezifischen Fragestellungen in einer Naturwissenschaft, nämlich der Biologie, über die Formulierung einer allgemeinen Systemtheorie hin zu Anwendungen auf andere Wissenschaften deutlich, was bereits eine kleine Titelauswahl anzeigen mag: »Biophysik des Fließgleichgewichts. Einführung in die Physik offener Systeme« (1953), »General System Theory. Foundations, Development, Applications« (1969), »Allgemeine Systemtheorie. Wege zu einer neuen Mathesis universalis« (1957), »Organismic Psychology and System Theory« (1968).

³¹ So lautet auch der deutsche Titel eines bekannten Buches von Karl W. Deutsch »The Nerves of Government« (1963) »Politische Kybernetik. Modelle und Perspektiven« (1969).

funktionierenden Maschine« (Narr 1967, 400) und damit als Programm zur Reduzierung von Handlungsalternativen beschrieben wurde. Gleichzeitig weisen die Autoren auf die Allgemeingültigkeit hin und formulieren damit einen Einheitsgedanken. Mit Blick auf »System als wissenschaftliche Methode und gesellschaftliche Ideologie« stellt Narr fest, daß der Versuch, Gesellschaft nicht nur im Ganzen, sondern auch als Ganzes zu erklären, alt ist. Von den verschiedenen Typen der Gesellschaftserklärung durch Systemansätze seien hier genannt:

- Gesellschaft als Körper mit ontisch festgelegten Strukturen und Funktionen. (Platons »Politeia«)
- Gesellschaft als System mit logisch deduzierbaren Funktionen, dem ebenfalls eine ontologische Weltsicht (daß Wirklichkeit letztlich ein rationales System sei) zugrunde liegt. (Immanuel Kant (1724-1804), John Stuart Mill (1806-1873), Karl Popper)

Die kybernetische Systemtheorie stellt – so Narr – eine Kombination aus beiden Ansätzen dar: Sie hat einen »Hang zur schematischen Abstraktion«, das heißt: »Die Gesellschaft wird letztlich ohne sozial fundierte Kategorien erkannt, indem man versucht, mittels genereller Funktionen jenseits historischer Gesellschaften eben historische Gesellschaften zu erklären.« (Narr 1967, 403) Dieses Systemverständnis enthält – und das eben allgemein und nicht nur auf Gesellschaftserklärung bezogen – zwei Gefahren:

- Die erkenntnistheoretische Frage der Parallelität von System und Wirklichkeit wird unterschlagen.
- Das erkenntnispraktische Problem der Praxiswirkung der Systematisierung wird umgangen.

Bezogen auf diese Arbeit ergibt sich die Frage: Welches Systemverständnis hat die Informatik und inwiefern gelten die genannten Gefahren auch für Informationssysteme?

Wenn Systeme – gemäß der Systemtheorie – idealtypisch formale Systeme sind, dann sind sie bedeutungslos (wie Hilbert gezeigt hat) und damit kontextfrei. An dieser Stelle ist die Bezugnahme auf John R. Searle (1986) aufschlußreich, weil sich an dem von ihm vorgelegten Beispiel des »chinesischen Zimmers« die heute geläufige Differenzierung in Syntax, Semantik und Pragmatik explizieren läßt (wenngleich Searle selbst nur von Syntax und Semantik spricht).³² Searle beweist nämlich mit seinem »chinesischen Zim-

³² Auf die grundsätzlichen Schwierigkeiten, strikt formale Systeme zu formulieren, wird im Zusammenhang mit dem historischen Grundlagenstreit in der Mathematik eingegangen, der zeitlich vor der zeichentheoretischen Differenzierung liegt.

mer«, daß sich ein Computer intern und in Bezug auf seine Beziehung zur Außenwelt rein formal, also syntaktisch verhält, genauso, wie der Mensch, der in einem Zimmer chinesische Zeichen entgegennimmt und dafür gemäß vorhandener Regeln andere chinesische Zeichen hinausreicht, kein Chinesisch versteht oder lernt. Aber: Searle sieht das Problem nur aus »Sicht« des Computers beziehungsweise des Zimmers. Wir befinden uns aber nicht *im* Computer, sondern *vor* dem Computer. Unser Dilemma ist, daß wir genau das annehmen, was Searle als »Witz der Geschichte« vom chinesischen Zimmer so formuliert: »weil Sie ein formales Computerprogramm ausführen, verhalten Sie sich aus der Sicht eines Außenstehenden so, als verstünden Sie Chinesisch.« (Searle 1986, 31) Genau das denken oder glauben wir von einem Computer. Wir stellen dem Rechner eine »Frage«. Der Rechner gibt – nach einer gewissen Zeit – eine »Antwort«. Daß es sich dabei um eine »Frage« und um eine »Antwort« handelt, daß die Symbole also einmal die – semantische und pragmatische – Bedeutung »Frage«, ein andermal die Bedeutung »Antwort« haben, liegt nicht am Rechner, sondern an uns. Wir halten die »Antwort« nicht für sinnlos, was sie eigentlich ist, da sie rein syntaktisch ist, sondern für etwas Bedeutungsvolles.

Welche Folgen dies haben kann, zeigt Weizenbaum anhand seines Programms ELIZA. (Vgl. Weizenbaum 1966) ELIZA ist ein Sprachanalyseprogramm, das aus zwei Teilen besteht, einem Sprachanalysator und einem Skript. »Für mein erstes Experiment gab ich ELIZA ein Skript, das ihr ermöglichte, die Rolle eines [...] Psychotherapeuten zu spielen (oder besser: zu parodieren), der mit einem Patienten das erste Gespräch führt. Ein solcher Therapeut ist verhältnismäßig leicht zu imitieren, da ein Großteil seiner Technik darin besteht, den Patienten dadurch zum Sprechen zu bringen, daß diesem seine eigenen Äußerungen wie bei einem Echo zurückgegeben werden.« (Weizenbaum 1976, 15) Weizenbaum schreibt, drei Reaktionen hätten ihn sehr nachdenklich gemacht: Erstens nahmen einige Psychiater an, das Programm könne für eine fast automatische Psychotherapie genutzt werden. Zweitens stellten viele Personen, die sich mit ELIZA »unterhielten«, eine emotionale Beziehung zum Computer her, als sei er eine Person, mit der man vertrauliche Dinge bereden könne. Drittens wurde angenommen, daß ELIZA die allgemeine Lösung der Frage, wieweit Computer natürliche Sprache verstehen können, sei. (Vgl. Weizenbaum 1976, 17ff.) Weizenbaum hatte in seinem Aufsatz versucht, »zu zeigen, daß eine allgemeine Lösung des Problems unmöglich ist, d.h., daß Sprache nur innerhalb eines Kontextes verstanden wird, daß selbst dieser nur in begrenztem Umfang

denselben Personen zur Verfügung steht und daß infolgedessen auch Personen keine Verkörperung einer derartigen allgemeinen Lösung darstellen.« (Weizenbaum 1976, 20)

Problematisch ist insbesondere, daß aufgrund der »Antworten« eines Computers Entscheidungen getroffen werden, deren sachliche Berechtigung situativ nicht mehr nachvollzogen und deren Zustandekommen vielfach nicht rekonstruiert werden kann. Das Beispiel des Systems AEGIS, das die »Entscheidung«, den iranischen Airbus abzuschießen, lieferte, ist auch hierfür treffend. Es ist somit belanglos, ob oder daß der Computer intern nur syntaktisch vorgeht. Denn menschliches Sprechen und Handeln weist die drei Aspekte stets als gemeinsam gegeben auf. In der Herstellung und Verwendung von Informationssystemen haben diese eine pragmatische Komponente, sind also nicht bedeutungslos wie Searle annimmt. Insofern gelten die genannten Gefahren auch für Informationssysteme.

2.2.2 Modell

Der Begriff des Modells ist so vielfältig und so ausführlich diskutiert worden³³, daß es den Rahmen der Arbeit sprengen würde, diese Diskussion zu rekonstruieren. Es soll hier zunächst nur in Umrissen vorgestellt werden, was im wissenschaftlichen Sprachgebrauch unter einem Modell verstanden wird, um dann auf den Gebrauch von Modellen in der Informatik einzugehen. Wie andere Wissenschaften, so arbeitet auch die Informatik mit Modellen, die theoretischen Ansätzen folgen und Vorstellungen über das Verhältnis von »Welt« und »Abbild« zum Ausdruck bringen, die nicht immer unproblematisch sind. Auch in den von der Informatik benutzten Modellarten und Modellierungsverfahren treten Paradigmen zu Tage, und es ist zu fragen, ob sie zum Gefahren- und Risikopotential dieser Wissenschaft und ihrer Anwendungen beitragen.

Umgangssprachlich ist ein Modell ein Abbild oder Anzeichen *von* etwas, dem Original, oder ein Zeichen *für* etwas zufolge einer konventionellen Zuordnung von Zeichen und Bezeichnetem. Im *wissenschaftlichen Sprachgebrauch* bleiben beide Aspekte erhalten und werden einerseits erweitert, andererseits präzisiert. Dabei erlangt der Begriff nicht in allen Wissenschaften den glei-

³³ Vgl. zum Beispiel Achinstein 1964; Addison / Henkin / Tarski 1965; Apostel u.a. 1961; Hempel 1977; Minsky 1968; Nagel / Suppes / Tarski 1962; Potthoff 1981; Stachowiak 1957; Stachowiak 1973; Stegmüller 1969; Stegmüller 1970; Stegmüller 1973a.

chen Umfang. Besonders in der Mathematik ist sein Bedeutungsgehalt eingeschränkt, denn ihre formalen Abstraktionsmodelle werden oft nur durch die Bildung von Äquivalenzklassen gewonnen, während in den Sozialwissenschaften zum Teil selbst komplexe, empirisch begründete Konstrukte theoretischer Art als Modelle bezeichnet werden.

Die Leistungsfähigkeit der wissenschaftlich verwandten Modelle läßt sich hinsichtlich Struktur, Funktion und Verhalten beschreiben:

Der Begriff Modell wird für ein Objekt M benutzt, das zu einem Objekt O, dem Original, bestimmte Ähnlichkeiten aufweist. Die Objekte M und O können jeweils ein Gegenstand, Gegenstandssystem, Zeichensystem, Begriffssystem, Prozeß oder ähnliches sein. Die Ähnlichkeiten zwischen M und O haben die Eigenschaft, daß sie Analogieschlüsse von M auf O ermöglichen. Damit können Eigenschaften, Verhaltensweisen usw. von O aus M erschlossen werden. Eine Analogie kann in dreierlei Hinsicht bestehen:

- Die Strukturen von M und O können ähnlich sein. Im Extremfall sind sie isomorph.³⁴ Ein typisches Beispiel für diese Art von Modellen sind Schiffsmodelle.
- Die Funktionen von M und O können ähnlich sein. Als Beispiel für diese Art von Modellen seien Blockschaltbilder genannt.
- Das Verhalten von M und O kann ähnlich sein. Modelle dieser Art können sich auch auf Verfahren beziehen. So versucht zum Beispiel die Bionik mit ihren Methoden, den biologischen Evolutionsprozeß nachzubilden, um die Optimierung technischer Systeme zu erzielen, ohne auf mathematische Optimierungsverfahren zurückgreifen zu müssen. (Vgl. Rechenberg 1973)

Modelle, die auf Strukturähnlichkeit basieren, können unterschieden werden in skalare, das heißt maßstabsgerechte³⁵, und analoge Modelle, wie

³⁴ Wenn die Strukturen von zwei oder mehr Systemen verglichen werden sollen, dann wird versucht, eine Äquivalenzrelation im Sinne einer Abbildung von einem System auf das andere herzustellen. Ist die Abbildung »eineindeutig«, das heißt in beide Richtungen vollständig, dann wird sie als »Isomorphie« bezeichnet, ist sie »eindeutig«, das heißt nur in eine Richtung vollständig, dann wird sie als »Homomorphie« bezeichnet.

³⁵ Im Extremfall könnte eine 1:1-Abbildung gefordert werden. Die Frage ist aber, ob eine solche 1:1-Abbildung überhaupt möglich wäre, oder ob nicht die gleichen Schwierigkeiten auftreten würden, die Umberto Eco (1982) für die Erstellung einer »Weltkarte im Maßstab 1:1« beschrieben hat. Das Problem eines »Modells im Maßstab 1:1« ist nicht neu. Eco (1982, 73) bezieht sich in seinem Text »Die Karte des Reiches im Maßstab 1:1« auf Jorge Luis Borges (1899-1986).

In einem Aufsatz von Norbert Wiener und Arturo Rosenblueth (1900-1970) heißt es: »We have shown that scientific knowledge consists of a sequence of abstract models, preferably formal, occasionally material in nature. We shall now proceed to examine the results of carrying model-making to the limit. Consider first material models. They start

Max Black (1909-1988) in »Models and Archetypes« vorschlägt. Skalare Modelle basieren auf Identität, insofern als im Original und im Modell die gleichen Eigenschaften oder die gleichen Proportionen auftreten. Mit ihnen soll das Original imitiert werden, wenngleich in der Regel in kleineren Dimensionen (zum Beispiel Schiffsmodell). Die analogen Modelle dagegen sollen die Struktur des Originals nachbilden. Sie basieren auf Isomorphie, das heißt, sie enthalten die gleiche Struktur oder das gleiche Muster von Beziehungen wie das Original (zum Beispiel hydraulische Modelle für ökonomische Modelle). (Black 1960, 220ff.) Ob tatsächlich Analogieschlüsse aus den Strukturähnlichkeiten gezogen werden können, ist zu bezweifeln. So werden in der Praxis die mit Schiffsmodellen gewonnenen Daten umfangreichen Korrekturen unterzogen, indem Faktoren eingeführt werden, die sich nicht aus dem Versuch, sondern aus theoretischen Vorannahmen ergeben, um auf Eigenschaften oder Verhalten »richtiger« Schiffe zu schließen. In einem Film über die Herstellung der optischen Täuschungen in Peter Weirs Film »Master and Commander. The Far Side of the World« aus dem Jahr 2003 erläutert Richard Taylor, der Miniature Effects Supervisor, daß eine den Dimensionsunterschied berücksichtigende Darstellung von Wasser

by being rough approximations, surrogates for the real facts studied. Let the model approach asymptotically the complexity of the original situation. It will tend to become identical with that original system. As a limit it will become that system itself. That is, in a specific example, the best material model for a cat is another, or preferably the same cat. In other words, should a material model thoroughly realize its purpose, the original situation could be grasped in its entirety and a model would be unnecessary. Lewis Carroll fully expressed this notion in an episode in *Sylvie and Bruno*, when he showed that the only completely satisfactory map to scale of a given country was that country itself.« (Wiener / Rosenblueth 1945, 320).

Die erwähnte Stelle in »Sylvie and Bruno« lautet: »What a useful thing a pocket-map is!« I remarked. »That's another thing we've learned from *your* Nation,« said Mein Herr, »map-making. But we've carried it much further than *you*. What do you consider the *largest* map that would be really useful?« »About six inches to the mile.« »Only *six inches*!« exclaimed Mein Herr. »We very soon got to six *yards* to the mile. Then we tried a *hundred* yards to the mile. And then came the grandest idea of all! We actually made a map of the country, on the scale of *a mile to the mile*!« »Have you used it much?« I enquired. »It has never been spread out, yet,« said Mein Herr: »the farmers objected: they said it would cover the whole country, and shut out the sunlight! So we now use the country itself, as its own map, and I assure you it does nearly as well.« (Carroll 1889, 556f.)

Bei Wiener und Rosenblueth heißt es weiter: »The ideal formal model would be one which could cover the entire universe, which would agree with it in complexity, and which would have a one to one correspondence with it. Any one capable of elaborating and comprehending such a model in its entirety, would find the model unnecessary, because he could then grasp the universe directly as a whole. [...] This ideal theoretical model cannot probably be achieved. Partial models, imperfect as they may be, are the only means developed by science for understanding the universe. This statement does not imply an attitude of defeatism but the recognition that the main tool of science is the human mind and that the human mind is finite.« (Wiener / Rosenblueth 1945, 320f.)

im Zusammenhang mit den für den Film gebauten Modellschiffen erzeugt werden mußte, um visuelle Konsistenz zu erzielen. Anders gesagt, heißt das, daß bei dieser Art von Modellen eigentlich auch immer eine angemessene Umwelt erzeugt werden müßte. (Prior 2003) Erinnert sei in diesem Zusammenhang auch an die sogenannte Galileische Regel. Galileo Galilei (1564-1642) kritisierte 1638 die damals in der Malerei herrschende Konvention, Riesen mit den Proportionen normalwüchsiger Menschen darzustellen, mit der Begründung, daß eine mechanische Stützkonstruktion mit wachsender Größe mehr an Breite als an Länge zunehmen müsse, um ihre Festigkeit zu bewahren und um das eigene Körpergewicht tragen zu können. Um die Galileische Regel entwickelte sich in der Naturforschung eine bis in das 20. Jahrhundert nicht entschiedene Kontroverse. (Vgl. Kummer 1975) Wenn ein solches Problem über mehrere Jahrhunderte nicht entscheidbar ist, dann sollte es davor warnen, Modellen dieser Art leichtgläubig zu vertrauen. Solche Problematiken sind Informatikern nicht generell unbekannt. Edsger W. Dijkstra (1930-2002) schreibt in seinem Aufsatz über die Strukturierung großer Programmsysteme:

It would be very nice if I could illustrate the various techniques with small demonstration programs and could conclude with »...and when faced with a program a thousand times as large, you compose it in the same way.« This common educational device, however, would be self-defeating as one of my central themes will be that any two things that differ in some respect by a factor of already a hundred or more, are utterly incomparable. History has shown that this truth is very hard to believe. Apparently we are too much trained to disregard differences in scale, to treat them as »gradual differences that are not essential«. We tell ourselves that what we can do once, we can also do twice and by induction we fool ourselves into believing that we can do it as many times as needed, but this is just not true! (Dijkstra 1972, 2)

Ein Beispiel aus meiner Praxis zeigt, daß dies nicht nur ein theoretisches Argument ist: In dem von mir geleiteten Teilprojekt »Datenmigration« innerhalb eines Großprojekts, das die Ablösung einer Individual- durch eine Standardsoftware zum Ziel hatte, wurden 2,14 Tage pro Attribut oder Eigenschaftstyp aufgewandt. Das Teilprojekt wurde mit durchschnittlich sieben Personen in knapp zweieinhalb Jahren durchgeführt. Die Anzahl Tage pro Attribut ergibt sich aus der Division des Gesamtaufwands in Tagen

durch die Gesamtanzahl der im Zielsystem zu füllenden Attribute. Das scheint zunächst viel Zeit für ein einzelnes Attribut zu sein, dieses erklärt sich aber daraus, daß nicht nur die Konversionsregeln und –programme für die einzelnen Attribute, sondern auch Datenbereinigungsmaßnahmen, die Archivierung der Quelldaten, Abstimmungen mit anderen Teilprojekten zu verschiedenen Themen (zum Beispiel Geschäftsprozesse, Data Warehouse, Schnittstellen zu anderen Systemen, Infrastruktur), die Abnahme der Migration durch Wirtschaftsprüfer usw. zu konzipieren, zu implementieren, zu organisieren waren. In einem Beispielfall, der an der Universität gelehrt werden mag, wird diese Komplexität vermutlich schon aufgrund der zeitlichen Begrenzung von Veranstaltungen nicht berücksichtigt werden, ebenso wenig wie Randbedingungen, wie zum Beispiel rechtliche Erfordernisse. In einem wirklichen Unternehmen ist die Konzentration auf eine bestimmte Designmethode oder dergleichen nicht möglich, weil sichergestellt sein muß, daß alle Unternehmensabläufe vor, während und nach der Veränderung funktionieren.

Zu den bis jetzt mit Blick auf Struktur, Funktion und Verhalten eingeführten Unterscheidungen läßt sich für die Modelle, die Modellierungsverfahren und die Darstellung von Modellen in der Informatik eine weitere Unterscheidung heranziehen, nämlich die in Modellarten. Herbert Stachowiak (1989) unterscheidet primär vier Typen:

- Graphische Modelle sind wesentlich zweidimensionale, anschauliche Originalrepräsentationen, wie Bilder oder Darstellungsmodelle. Zu den Darstellungsmodellen gehören beispielsweise auch Flußdiagramme zur Darstellung zeitlicher Abläufe sowie Schaltbilder, beides Modelle, die in der Informatik benutzt werden.
- Technische Modelle sind wesentlich dreidimensionale, raum-zeitliche und materiell-energetische Repräsentationen. Dabei handelt es sich zum einen um physikalisch-technische Modelle, zum Beispiel den Globus als statisch-mechanisches Modell oder das Planetarium als dynamisch-mechanisches Modell; auch Computermodelle zur Simulation hochkomplexer Prozesse gehören hierzu. Zum anderen handelt es sich um bio-, psycho- und soziotechnische Modelle.
- Semantische Modelle sind »Zeichenmodelle«, die eine Übereinkunft erfordern, wofür die Zeichen stehen. Hier werden interne und externe Modelle unterschieden, wobei die internen Modelle innere Modellbildungen im Bereich des individuellen Wahrnehmens, Vorstellens und Denkens sind, während die externen Modelle sprech- und schriftsprach-

liche Gebilde sind, zu denen zum Beispiel auch Textmodelle in Binärcode gehören.³⁶

- Zu den semantisch-scientifischen Modellen zählt Stachowiak die formalwissenschaftlichen der Mathematik und Logik, die empirisch-theoretischen der Natur- und Sozialwissenschaften, die technologischen und die praxeologischen Modelle im Sinne der von ihm selbst vertretenen neopragmatischen Erkenntnistheorie.

Unterschiede ergeben sich also aus dem *sprachlichen, symbolischen, strukturellen* oder *materialen* Charakter von Modellen. Will man solche Unterschiede zulassen – und es gibt nicht erst seit Feyerabend, sondern schon seit Wittgenstein keine haltbaren Gründe, dies nicht zu tun, – und wählt deshalb eine ausreichend weite Beschreibung, um die verschiedensten Modelle abbildungstheoretisch und in ihren pragmatischen Bezügen einheitlich erfassen zu können, so handelt es sich bei Modellen um pragmatische Gebilde, die einem mindestens fünfstelligen Prädikat genügen: »X ist Modell des Originals Y für den Verwender k in der Zeitspanne t bezüglich der Intention Z.« (Stachowiak 1989, 219)³⁷

Unter semiotischen Gesichtspunkten sind Modelle demnach Theorien äquivalent, so daß die Einbeziehung der pragmatischen Komponenten k, t, Z in die Untersuchung von Modellen entsprechend der Vorschläge von Joseph D. Sneed (1971) und Wolfgang Stegmüller (1923-1991) (1969; 1970; 1973a) begründet werden kann. So versteht Sneed eine erfahrungswissenschaftliche Theorie »nicht mehr als Satzsystem mit freien Variablen für substituierbare Grundbegriffe, sondern als [...] mathematische Struktur E zuzüglich einer Klasse von intendierten (einem Auswahlprozeß unterliegenden) Anwendungen I, also $X = \langle E, I \rangle$ «, dabei gilt, daß die Struktur E ein bestimmtes mengentheoretisches Prädikat erfüllt. (Stachowiak 1983, 127)

³⁶ Stachowiak entwickelt ein Stufensystem von semantischen Modellen, die jeweils aufeinander aufbauen. (Stachowiak 1989, 222)

³⁷ Es liegt auf der Hand, daß sich die Stellenzahl des Prädikats vergrößert, wenn Ersteller und Verwender nicht identisch sind und deshalb oder aus anderen Gründen mehrere Zeitspannen der Originalrepräsentation auftreten oder wenn für diese unterschiedliche Intentionen zu unterscheiden sind. Vgl. Stachowiak 1989, 219. Auf die zeitliche Komponente gehen Brunnstein / Fischer-Hübner 1990 ein.

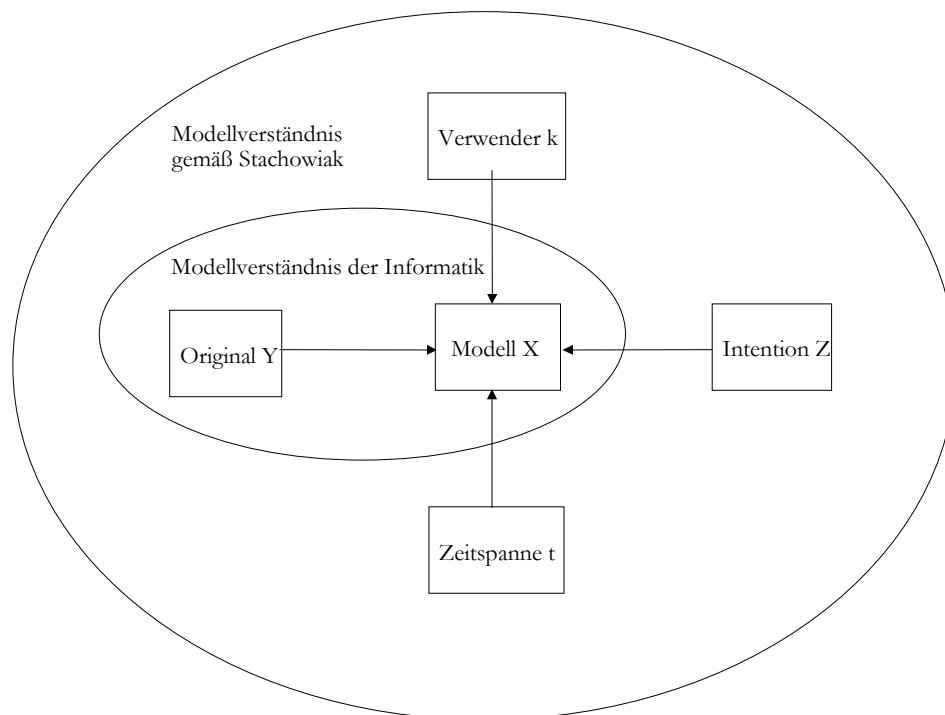


Abbildung 3. Modellverständnisse

Das Sneed-Stegmüllersche Theorienverständnis ist im Sinne eines prognostischen Technologiemodells interpretiert worden, das besonders dann, wenn die Kerntheorie viele deterministische und probabilistische Gesetzesaussagen enthält, geeignet ist, spezifische »Anwendungsfälle« zu erzeugen. (Vgl. Alisch / Rössner 1978) Ein solches Theorie- oder Modellverständnis ist erwähnenswert, weil es in Konzeptionen und Strategien für den Umgang mit Risiken Eingang findet, die aus dem Bereich der Technikfolgenabschätzung stammen. Nachdem viele Annahmen über den Verlauf der Weiterentwicklung von Techniken und Technologien sich als unzutreffend erwiesen haben und in der Folge Schätzungen ihrer Relevanz und Auswirkungen falsch waren³⁸, verspricht sich die Technikfolgenabschätzung von der Einbeziehung pragmatischer Komponenten in ihren Ansatz eine verbesserte Prognostizierbarkeit von Folgen und damit einen größeren therapeutischen

³⁸ Hans Dieter Hellige stellt fest: »Im Falle der Telematik-Dienste Telefax, Teletex (Bürofern schreiben), Electronic Mail und Computer Conferencing haben Hersteller, Diensteanbieter und Kritiker der neuen Medien die Zielgruppen und Anwendungsschwerpunkte sowie die sozialen Auswirkungen gleichermaßen falsch bewertet. Die Faxtechnik wurde vor allem aus Kostengründen als ein professioneller Bildkommunikationsdienst eingeschätzt und der Faxboom von nahezu keinem vorhergesehen. Der weitgehend gescheiterte Teletex-Dienst erschien dagegen als die künftige Basistechnik der Büroautomation und Promotor der Telearbeit.« (Hellige 1993, 193)

Nutzen (vgl. Hellige 1992), ohne ihre externe ex-post- oder bestenfalls nebenläufige Perspektive aufzugeben.

Demgegenüber ist der von Stachowiak vorgelegte Begriff des Modells weiter und für Modellarten offen, die nicht in der genannten Weise technologisch (oder technokratisch) vorbestimmt sind. Er ist geeignet, die heutigen Modell- und Modellierungsvorstellungen der Informatik zu klären, weil mit der fünfstelligen, erweiterbaren Relation die in Modelle eingehenden Aspekte wiedergegeben werden können, und er könnte geeignet sein, künftig kontextorientierte Gesichtspunkte in Modelle einzuführen.³⁹ Die philosophischen Implikationen des neopragmatischen Ansatzes von Stachowiak müssen dabei nicht geteilt werden, weil sein Modellbegriff, formal verstanden, ebenso unter den Gesichtspunkten der Paradigmentheorie und des hier verfolgten kontextualistischen Wissenschaftsverständnisses interpretiert werden kann.

Gegenüber anderen Modellbegriffen hat der von Stachowiak den Vorzug, Aspekte gleichwertig wiedergeben zu können, während sonst in der Regel bestimmte Aspekte ausgezeichnet werden. So verbindet der Logische Empirismus mit einem »Modell« nur die »rationale Rekonstruktion«. (Vgl. Carnap 1928a)⁴⁰ Für Popper ist das Kriterium der Falsifizierbarkeit in Bezug auf ein Modell (oder eine Theorie) der hervortretende Aspekt. (Vgl. Popper 1935) Wittgenstein legt ein Modellverständnis vor, welches das Verhältnis von Logik, Bild und Tatsachen erhellt. In ihm sind Tatsachen immer *mögliche* Tatsachen und »Bilder der Tatsachen« gehören selbst in den Bereich der Tatsachen. (Vgl. Stegmüller 1978a, 34, 39ff.) Wittgenstein greift die physikalische Bildvorstellung von Heinrich Hertz (1857-1894) auf und interpretiert sie. Hertz hatte in den »Prinzipien der Mechanik« (1894) die Herstellung von »Bildern« als grundlegend für die Erkenntnis und Theoriebildung genannt. »Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, daß die denknötwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände.« (Hertz 1894, 1) Hertz weist ausdrücklich darauf hin, daß es keine Festlegung auf ein Bild gibt, »[...] verschiedene Bilder derselben Gegenstände sind möglich, und diese Bilder können sich nach verschiedenen Richtungen unterscheiden.« (Hertz 1894,

³⁹ Vgl. die Handlungsvorschläge in Kapitel 7.

⁴⁰ Vgl. die Erörterung des Carnapschen Konstitutionssystems in Kapitel 4, aus der ersichtlich wird, daß der Logische Empirismus im Lauf der Zeit seine ursprünglich vorhandenen gewesene Offenheit und seinen kritischen Anspruch verlor.

2) Das jeweilige Bild ist dann ausschlaggebend für den Aufbau der jeweiligen Mechanik, so daß Theorien zwar auf die Erfahrung bezogen werden können, aber nichtsdestoweniger freie Schöpfungen des Physikers sind. Für die Qualifizierung der Bilder gelten nach Hertz nur folgende Überlegungen:

- *Unzulässig* sind Bilder, die »einen Widerspruch gegen die Gesetze unseres Denkens in sich tragen«;
- *Unrichtig* sind Bilder, deren »wesentlichen Beziehungen den Beziehungen der äußeren Dinge widersprechen«;
- *Zweckmäßig* von zwei zulässigen und richtigen Bildern ist dasjenige, welches zum einen »mehr wesentliche Beziehungen widerspiegelt als das andere« und zum anderen »die geringere Zahl überflüssiger oder leerer Beziehungen enthält, welches also das einfachere ist«. (Hertz 1894, 3f.)⁴¹

Nach diesen Maßgaben stellt Hertz dann drei Bilder der Mechanik dar, von denen das dritte sein eigener Entwurf einer Mechanik mit drei Grundbegriffen (Zeit, Raum, Masse) und nur einem Grundgesetz (»Jedes freie System beharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung in der geradesten Bahn.« (Hertz 1894, §309)) ist. Das Grundgesetz nimmt auf Erfahrung Bezug, die das Bild ja konstituiert, die Grundbegriffe werden mit dem Bild als erforderlich gesetzt, alles weitere ist Deduktion. Das Bild, dem Hertz' Mechanik folgt, ist, wie das Grundgesetz zum Ausdruck bringt, das einer Welt aus freien Systemen mit einem Verhalten, das durch Bewegungsgleichungen, die einem Minimalprinzip genügen, beschrieben werden kann. Um diese Mechanik auszuformulieren, kann der Physiker mit allem arbeiten, was »im Bild bleibt«. Er entwirft somit in diesem Rahmen axiomatisch Modelle, die wiederum unterschiedlich ausfallen können. Den Geltungsbereich solcher Modelle sieht Hertz genau auf das begrenzt, was die Modelleigenschaften ausmacht. So ist ein dynamisches Modell wie das von Hertz eben ausschließlich als Konstrukt dynamischer Eigenschaften gültig, es weist nicht über sich hinaus, und es verhält sich nicht additiv zu anders gearteten Modellen. »Wir können dann in der Tat keine Kenntnis haben, ob die Systeme, welche wir in der Mechanik betrachten, mit den wirklichen Systemen der Natur, welche wir zu betrachten meinen, in irgend etwas anderem übereinstimmen, als allein darin, daß die einen Modelle der anderen sind.« (Hertz 1894, §427) Dies meint die Übereinstimmung der denknöwendigen mit den naturnöwendigen Folgen von Bildern und Dingen.

⁴¹ Auf diese von Hertz eingeföhrten Bedingungen wird in Kapitel 4 bei der Erörterung der Turingmaschine zurückgekommen.

Bei Wittgenstein finden sich diese Vorstellungen wieder in den Formulierungen: »Bilder sind Modelle der Wirklichkeit« (TLP 2.12). »Die Form der Abbildung ist die Möglichkeit, daß sich die Dinge so zu einander verhalten, wie die Elemente des Bildes« (TLP 2.151). »Am Satz muß gerade soviel zu unterscheiden sein, als an der Sachlage, die er darstellt. Die beiden müssen die gleiche logische (mathematische) Mannigfaltigkeit besitzen. (vergleiche Hertz' »Mechanik«, über dynamische Modelle.)« (TLP 4.04). »Modell sein« ist für Wittgenstein also eine symmetrische und transitive Relation. Darüber hinaus enthält seine Modellvorstellung den Aspekt der von Sinnesdaten unabhängigen gedanklichen Konstruktion, anders als Bertrand Russells (1872-1970) Vorstellung, die auf der logischen Konstruktion aufgrund von Sinnesdaten basiert. (Vgl. Lampert 2000, 147) Allan Janik und Toulmin verstehen Wittgensteins Anknüpfung an Hertz als programmatisch. Sie fassen über Hertz' »Prinzipien der Mechanik« zusammen: »Wir müssen dementsprechend die innere Struktur oder Artikulation unserer mathematischen Bilder mechanischer Phänomene von ihrer Beziehung zu den empirisch gegebenen Tatsachen unterscheiden. Der erstere Aspekt, der die Schritte der mathematischen Deduktion (Konsistenz oder Zulässigkeit) sowie Systematik und Form der Darstellung (Einfachheit oder Angemessenheit) umfaßt, ist das grundlegende Element in Hertz' System [...]« (Janik / Toulmin 1984, 193) Wittgenstein habe nun impliziert, »daß es möglich sein sollte, ein logisches Gerüst zu schaffen – das heißt, ein apriorisches System, das in der Lage wäre, für die gesamte Welt abbildende Modelle zu ermöglichen und so die logische Struktur jeder Beschreibung festzuhalten. Damit wäre für die Sprache im ganzen erreicht, was der erste Teil von Hertz' »Prinzipien« für die Sprache der Mechanik erreicht hat.« (Janik / Toulmin 1984, 248)

Es liegt auf der Hand, daß Wittgensteins Modellvorstellung mit der neo-pragmatischen Vorstellung von Modellbildung nicht übereinstimmt. Die Logizität von Bildern, die Bildhaftigkeit des Denkens und die Vorgängigkeit der Bilder vor dem Modell kommt bei Stachowiak trotz der Reichhaltigkeit, die die Modellvorstellung als fünfstellige Relation bietet, nicht vor. Modellbildung bleibt bei ihm im Bereich einer instrumentellen Vernunft angesiedelt, die auch den unkritischen Naturalismus, von dem Stegmüller spricht, zuläßt. Bei Wittgenstein hingegen bleibt im »Tractatus« noch ungeklärt, wie von Modellen im gerade ausgeführten Sinn Gebrauch zu machen ist. Stegmüller interpretiert Wittgenstein dahingehend, daß er die Isomorphierelation hervorgehoben habe, und betont, daß bei Wittgenstein aber keineswegs

ein »naturalistischer« Sinn mit dem Bildbegriff verbunden werde. Es gehe nicht um eine Abbildtheorie der Erkenntnis, »wonach unser Denken mit der Wirklichkeit ganz oder teilweise übereinstimmt, sofern es wahr ist« (Stegmüller 1978a, 539).

Die Isomorphie als Grundbegriff der Modellierung nimmt auch in der Kybernetik einen besonderen Platz ein (vgl. Ashby 1956, 94ff.) und ist schließlich bis heute in der Informatik ein wichtiges Kriterium der Modellbildung geblieben. Zu einem Automaten lassen sich immer auch äquivalente Automaten mit mehr oder weniger Zuständen herstellen. Ein Automat A_1 wird als isomorph zu A_2 bezeichnet, wenn es eine bijektive Abbildung der Zustände der beiden Automaten gibt. Isomorphe Automaten unterscheiden sich nur durch die Benennung der Zustände. (Vgl. Herschel 1974, 36ff., 190; Hopcroft / Ullman 1979, 72) Es ist auch dies eine Isomorphie von Konstrukten, nicht eine von Modell und Welt.⁴² Ob diese Differenz von Informatikern stets bedacht wird, ist mehr als zweifelhaft, was die späteren Ausführungen zur Praxis der Modellierung belegen werden.

Das Modellverständnis in der Informatik hat seinen Ursprung in den Modellierungsweisen der Kybernetik und wurde zunächst vor allem in den sechziger Jahren geprägt. Dieser historische Gesichtspunkt soll nach dem obigen systematischen nun kurz dargestellt werden.

Ein Informationssystem ist ein Symbolsystem oder Modell, da es aus Symbolen und dazugehörigen »Gebrauchsanweisungen«, also Regeln für die Verwendung der Symbole, besteht. Deutsch unterschied zwischen formalen und materiellen Modellen: Ein formales Modell besteht aus abstrakten Zeichen und Gebrauchsanweisungen, während ein materielles Modell Gegenstände oder unsichtbare Vorgänge enthält und die Gebrauchsanweisung etwa den physikalischen Eigenschaften des Systems entspricht. (Deutsch 1963, 47f.) Interessanterweise ist ein materielles Modell nicht ohne formales Modell denkbar:

⁴² An dieser Stelle kann noch einmal auf zwei Paragraphen aus den »Prinzipien der Mechanik« (Hertz 1894) verwiesen werden. In § 401 betont Hertz: »Unendlich viele, physikalisch gänzlich verschiedene Systeme können Modelle eines und desselben Systems sein.« Und in § 406 stellt er klar: »Sind von einer Anzahl materieller Systeme, welche Modelle voneinander sind, dieselben Größen korrespondierende Koordinaten, und sind nur diese korrespondierenden Koordinaten der Beobachtung zugänglich, so sind alle diese Systeme in Hinsicht der beschränkten Beobachtung nicht voneinander verschieden, sondern erscheinen als gleiche Systeme, wie verschieden auch in Wahrheit in ihnen Zahl und Zusammenhang der materiellen Punkte sein mögen.«

A material model is the representation of a complex system by a system which is assumed simpler and which is also assumed to have some properties similar to those selected for study in the original complex system. A formal model is a symbolic assertion in logical terms of an idealized relatively simple situation sharing the structural properties of the original factual system. [...] A material model may enable the carrying out of experiments under more favorable conditions than would be available in the original system. This translation presume [sic!] that there are reasonable grounds for supposing a similarity between the two situations; it thus presupposes the possession of an adequate formal model, with a structure similar to that of the two material systems. (Wiener / Rosenblueth 1945, 317)

Im Sinne der Systemtheorie erfüllen Modelle mindestens vier Funktionen:

- eine organisatorische Funktion,
- eine heuristische Funktion,
- eine Funktion der Voraussage,
- eine Funktion der Messung. (Vgl. Deutsch 1963, 44ff.)

Mit der organisatorischen Funktion wird die Fähigkeit eines Modells bezeichnet, unzusammenhängende Fakten zu ordnen, zueinander in Beziehung zu setzen und dabei Ähnlichkeiten oder Zusammenhänge aufzuzeigen, die vorher nicht sichtbar waren. Mit der heuristischen Funktion ist die Fähigkeit eines Modells angesprochen, durch die Übertragung von Informationen oder Vorstellungen über einen bekannten Gegenstand oder Vorgang auf einen unbekannten Gegenstand oder Vorgang eine Erklärung zu liefern. Diese heuristische Funktion kann unabhängig sein von der organisatorischen Funktion und der Funktion der Voraussage. Voraussagen sollen durch physische Operationen verifizierbar sein. Als Messung werden die Daten bezeichnet, die das Modell eines Gegenstands liefert, dessen Aufbauprinzipien klar verstanden werden.

In den Erläuterungen zu den Funktionen wird deutlich, daß entgegen den formalistischen Ansprüchen und quantitativen Ansätzen im allgemeinen auch pragmatische Aspekte bei der Modellierung eine Rolle spielen.

Wem sich einzelne Informationssteinchen plötzlich zu einem sinnvollen Muster zusammenfügen, der genießt ein ästhetisches Erlebnis; Paul Lazarsfeld hat es einmal als das ›Aha!-Erlebnis‹ beschrieben, das den Psychologen geläufig ist. In solcher Weise ›organisiert‹, lassen sich Fakten leichter im Gedächtnis speichern und in die Erinnerung

zurückrufen. [...] Wenn sich [...] ein bekanntes Verhaltensmuster auf ein neues Problem übertragen läßt, dann erscheint uns die Erklärung als »befriedigend« und kann sogar (jedenfalls eine Zeitlang) unsere »Neugier befriedigen«. [...] Es hängt von den Erinnerungen und Gewohnheiten jedes einzelnen ab, ob sie ihn persönlich befriedigt oder nicht. (Deutsch 1963, 44f.)

Diese pragmatischen Aspekte bleiben allerdings aus der systematischen Betrachtung ausgeschlossen. Die personalen und zeitabhängigen Parameter eines zu modellierenden Gegenstands werden zwar gesehen, das hier vertretene Konzept verläßt aber nicht die Tradition und die Implikationen der Reichenbachschen Unterscheidung von »context of discovery« und »context of justification«. Ein Modell wird dementsprechend als ein Kalkül definiert, in dem diese Parameter nicht mehr auftreten, sondern in dem Symbole allgemeinen Anweisungscharakter haben sollen:

Ein *Symbol* ist eine Anweisung, sich irgendeines bestimmten Gegenstandes oder Vorganges oder einer bestimmten Menge von Gegenständen oder Vorgängen zu erinnern. Jede Tätigkeit, jeder Vorgang mit der Wirkung eines solchen Befehls hat daher die Wirkung eines Symbols. Wenn wir mehrere Symbole benutzen, um uns mehrere verschiedene Gegenstände in Erinnerung zurückzurufen, müssen wir unsere Symbole mit einer Art von Gebrauchsanleitung verbinden. Eine bestimmte Anzahl von Symbolen und die dazugehörige Gebrauchsanweisung bilden zusammen *ein Symbolsystem* oder *Modell*. (Deutsch 1963, 47, Hervorhebungen im Original)

Ersetzt man »Symbol« durch »Element«, »Gebrauchsanweisung« durch »Regel« und »Symbolsystem / Modell« durch »Kalkül«, so erhält man eine dem von Leibniz formulierten allgemeinen Kalkülbegriff analoge Definition. Dabei ist jedoch zu bedenken, das sei als Vorgriff auf Kapitel 5 gesagt, daß Leibniz' Kalkülvorstellung eine auf Handlungen orientierte Komponente, also eine Pragmatik, einschloß. Deutsch konnte sich von der Position einer »rationalen Rekonstruktion«, die den Anspruch hat, ohne Pragmatik auszukommen, nicht lösen, obwohl er immer wieder den Einfluß der Pragmatik beschrieb und sie letztlich auch nicht beseitigen wollte. Dies wird nicht nur deutlich im Hinblick auf das oben zitierte »Aha-Erlebnis«, sondern ebenso bei der Beschreibung der Auswahl von Modellen. Deutsch nannte zwei Auswahlkriterien: Relevanz und die Ökonomie der Darstellung.

Ein Modell ist *relevant* (oder »realistisch«), wenn es jenen Aspekten des empirischen Systems gleicht, mit denen wir uns befassen müssen, um das zu leisten, was wir leisten wollen. Ein Modell ist *ökonomisch*, wenn es in der einen oder anderen Beziehung »einfacher« ist als die Situation, welche dargestellt werden soll; [...]. (Deutsch 1963, 54f., Hervorhebungen im Original)

An anderer Stelle heißt es:

In jedem Fall müssen Modelle auf ihre *Relevanz* hin überprüft werden, das heißt, ob sie mit einer unseren Zwecken genügenden Genauigkeit den uns interessierenden Aspekten empirischer Vorgänge entsprechen. Die Feststellung, ob ein Modell der Wirklichkeit entspricht oder nicht, erfolgt in einem *kritischen Prozeß*, also in einem physischen Vorgang, der einfach oder auch kompliziert sein kann und der ein anderes Ergebnis zeitigt, wenn die Entsprechung genügt, als dann, wenn sie nicht genügt. (Deutsch 1963, 48f., Hervorhebungen im Original)

»Unsere Zwecke«, »uns interessierend«, »kritischer Prozeß« sind Ausdrücke, die die Pragmatik, aber auch die Reduktion, die mit der Modellierung verbunden ist, beschreiben. Denn ein weiteres Moment ist hervorzuheben, und zwar die Nähe der Argumentation Deutschs zu naturwissenschaftlich-experimentellem Vorgehen. Der von ihm erwähnte »kritische Prozeß« entspricht einem Experiment, an dessen Ende geprüft wird, ob sein Ergebnis der theoretisch begründeten Erwartung entspricht. Gerade diese Vorgehensweise ist aber in großen Bereichen informatischer Tätigkeit überhaupt nicht angemessen. Denn die Tätigkeit des praktischen Informatikers spielt sich nicht unter Laborbedingungen ab, sondern »in der wirklichen Welt«. Das heißt, der Prozeß der Datenmodellierung beispielsweise eines Unternehmens wird nicht mehrfach durchlaufen, es entstehen nicht mehrere verschiedene Datenmodelle, die implementiert und im Unternehmensalltag getestet werden können und die dabei das Unternehmen unangetastet lassen. Tatsächlich verändert das nach angebbaren Kriterien entwickelte Datenmodell mit seiner Implementierung das Unternehmen mit positiven oder negativen Auswirkungen. Die Rückkehr in den vorhergehenden Zustand gibt es jedenfalls nicht. Damit verbunden ist eine zweite Problematik dieser Argumentation. Relevanz und Einfachheit im oben genannten Verständnis setzen voraus, daß der zu modellierende Ausschnitt der Welt empirisch exakt

beschrieben werden kann und Kriterien der Vereinfachung begründet angegeben werden können. Auch diese Voraussetzungen sind naturwissenschaftsnah, sie orientieren sich daran, wie der experimentierende Naturwissenschaftler (zumindest der idealtypische in der Standardversion der Naturwissenschaftsgeschichte) von den Umständen, die hinsichtlich seines Erklärungsziels als kontingent erscheinen, absieht. Demgegenüber ist die Ausgangslage des Informatikers anders. Will man das Daten- und Funktionsmodell eines Unternehmens entwickeln, gibt es kein Analogon zum Massenpunkt der klassischen Mechanik, sondern um hier Erfolg haben zu können, ist es gerade notwendig, das situativ Gegebene zu erfassen, sonst sind die ein Unternehmen tatsächlich ausmachenden Daten und Funktionen nicht zu begreifen. Um im Bild zu bleiben: der Informatiker ähnelt eher Johannes Kepler (1571-1630), der in den nach ihm benannten Gesetzen mit wirklichen Himmelskörpern rechnete, als Isaac Newton (1643-1727), dessen Himmelsmechanik auf den idealen Konstrukten basierte; die ja eben nicht mit den tatsächlichen Schwerpunkten wirklicher bewegter Körper zusammenfallen müssen. Hält man sich zum Beispiel allein an Organigramme und vorliegende Daten- und Funktionsbeschreibungen, ohne Mitarbeiter hinsichtlich der tatsächlichen Abläufe und ihrer Erfordernisse zu befragen, geht man mit Sicherheit in die Falle, die sich aus der Diskrepanz zwischen »offizieller« und »inoffizieller« Sicht ergibt.

Systematischer gesprochen heißt dies, daß es sinnvoll ist, von einigen anderen Grundannahmen auszugehen, als dies in den sechziger Jahren in der Informatik üblich war. Zur damaligen, bis heute noch keineswegs aufgegebenen Sicht gehörte es, anzunehmen, daß Prozesse sequentiell strukturiert sind und sich komplexe Zusammenhänge quasi in einzelne Stränge auflösen lassen. Diese Sichtweise ist jedoch nicht immer adäquat. Es gibt Fälle, in denen die Annahme paralleler Prozesse sinnvoller oder sogar allein angemessen ist. Dazu gehören Aufgaben, bei denen sehr viele Aktionen auszuführen sind oder deren Bedarf an Zeit- und Betriebsmitteln sehr unterschiedlich ist. In diesen Fällen ist eine parallele Verarbeitung sinnvoll, die zum Beispiel den Vorteil hat, daß Fehler, die in einem Verarbeitungszweig auftreten, den parallelen Zweig nicht beeinflussen. Mit der Ausbreitung von Informationssystemen und der Beteiligung mehrerer Teilsysteme an einer Aufgabe nahmen die Bedeutung und die Notwendigkeit der Kommunikation der Teilsysteme untereinander zu, und es gibt allmählich Anzeichen einer

Verschiebung vom Paradigma der »Sequentialität« zum Paradigma der »Nichtsequentialität als Grundphänomen«. (Vgl. Brauer 1989, 20)⁴³

Die in den neunziger Jahren vorherrschende Konzeption von Modell ist von dieser Verschiebung allerdings nicht berührt. Lehrbücher diskutieren Grundlagenprobleme der Modellbildung kaum, sondern präsentieren Modelle in erster Linie als technisch funktionsfähige Instrumente. So heißt es bei Hartmut Bossel, der als Musterbeispiel genommen werden kann: »Modelle und Simulationen jeder Art sind Hilfsmittel zum Umgang mit der Realität« (Bossel 1992, 11). Er stellte vor allem die Modellierung und die (Computer-)Simulation dynamischer Systeme dar und ergänzte den Text mit vielen Beispielprogrammen, die in lauffähiger Version auf Diskette mitgeliefert wurden. Die Modellbildung dynamischer Systeme wird von ihm als »einheitlicher Ansatz« vorgestellt, der sich auf alle Fachgebiete anwenden lasse. (Bossel 1992, 12) Ähnlich wie im Programm des Logischen Empirismus wird ein paradigmatischer Einheitsgedanke formuliert.

Modelle sind, das wird von Bossel mehrfach explizit gesagt, immer vereinfachte Abbildungen eines interessierenden Realitätsausschnitts, und sie sind immer an einen Zweck gebunden. Dieser Zweck drückt sich in der Fragestellung aus, auf die das Modell eine Antwort geben soll. Da der Modellzweck als »wichtigste Vorgabe der Modellentwicklung« gesehen wird, lautet eine Regel, eben diesen Modellzweck möglichst präzise zu spezifizieren, da er einen großen Einfluß auf das Modell selbst hat. (Bossel 1992, 28) Hier wird der intentionale Aspekt von Modellen betont und zugleich strikt instrumentell umgrenzt.

Bossel bietet drei Möglichkeiten zur Simulation des Verhaltens dynamischer Systeme an: Erstens lasse sich das Verhalten nachahmen. Dazu wird das System als »Black Box« betrachtet, und es werden Verhaltensbeobachtungen (in einem bestimmten Zeitraum und unter bestimmten Umfeldeinwirkungen) gemacht, die auf Regelmäßigkeiten untersucht werden. Aufgrund der Regelmäßigkeiten wird dann induktiv auf ein entsprechendes Verhalten in der Zukunft geschlossen. Zweitens lasse sich die Systemstruktur im Modell nachbilden. In diesem Fall, so Bossel, werde das System als »Glass Box« verstanden. Hier interessiert nicht das Verhalten, sondern die Wirkungsstruktur. Aus der korrekt abgebildeten Struktur soll sich das grundsätzliche Verhalten des Systems ableiten lassen. Drittens gebe es die Möglichkeit, beide Ansätze in einer Mischform zu verbinden. Diese Misch-

⁴³ Vgl. hierzu auch Abschnitt 2.2.11 zu Petri-Netzen.

form, die das System als »Grey Box« oder »Opaque« betrachte, werde häufig in der Praxis angewandt. (Bossel 1992, 29f.)

Da dynamische Systeme behandelt werden, spielt der Zeitaspekt eine wichtige Rolle. (Bossel 1992, 37f.) Es wird gefordert, die Zeit als Parameter in den logischen Regeln (Implikationen), in welche die zu modellierenden Sachverhalte des Systems überführt werden, explizit zu berücksichtigen. (Bossel 1992, 52)

Es gab und gibt also – systematisch und historisch gesehen – umfassende Modellverständnisse. Im folgenden wird analysiert, inwiefern diese heute in der Informatik – speziell im Bereich der Softwaretechnik – genutzt werden und inwiefern Defizite bestehen, die als Risiken zu betrachten sind.

2.2.3 Softwaretechnik

Wie gehen Informatiker nun praktisch bei der Modellierung vor? Im folgenden wird vor allem der Bereich der Softwaretechnik (Software Engineering), der sich mit ingenieurmäßigen Verfahren zur Modellierung von Systemen beschäftigt, untersucht und mit meinen Erfahrungen in der Praxis der Informatik verknüpft und verglichen. Für den Vergleich und die Bewertung der Modelle und Modellierungsverfahren wird auf die eingangs erläuterten Mittel zurückgegriffen:

- Gesichtspunkte in der fünfstelligen Relation (Modell, Original, Verwender, Zeit, Intention),
- Klassifizierungsmöglichkeit der Modelle in verschiedene Arten,
- Leistungsfähigkeit der verschiedenen Modellarten,
- Theoretische Vorstellungen der Informatiker von Modell.

Die Softwaretechnik liefert ingenieurmäßige Techniken und Regeln, mit deren Hilfe vor allem große Softwaresysteme so entwickelbar sein sollen, daß sie bestimmten »Qualitätskriterien« entsprechen⁴⁴; zu ihnen gehören (vgl. Kimm 1979; Gewalt u.a. 1977):

⁴⁴ Knorr-Cetina schreibt: »In der untersuchten Künstlichen Intelligenz weigern sich die Teilnehmer, sich in den Programmcode eines anderen Teilnehmers einzuarbeiten, und ziehen es vor, den Code neu zu formulieren. [...] Die Qualität eines Programms wird hier an dessen Leistungen gemessen, und nicht durch Nachvollzug seines Inhalts überprüft: der Inhalt des Programms eines anderen Teilnehmers gilt praktisch als nicht nachvollziehbar, das verkörperte Archiv, das der Programmautor darstellt, wird als unzugängliches behandelt.« (Knorr-Cetina 1988, 99). Dieser Interpretation kann ich mich nicht anschließen. Die »Weigerung«, ein bestehendes Programm nachzuvollziehen und zu ändern, beruht vielmehr darauf, daß Programmcode oft unübersichtlich, unflexibel

- Funktionsumfang,
- Zuverlässigkeit: Korrektheit, Robustheit, Ausfallsicherheit,
- Lesbarkeit und leichte Erlernbarkeit,
- Flexibilität: Adaptabilität, Portabilität,
- Benutzungsfreundlichkeit: Verständlichkeit, Angemessenheit, vernünftiges Fehlerverhalten,
- Effizienz.

Nicht jedes dieser Kriterien ist wissenschafts- oder informatikintern. In vielen von ihnen werden Einflußgrößen aus den Alltagszusammenhängen deutlich: Anforderungen, die auf Gewohnheiten und Vorlieben der Anwender beruhen, allgemein gerade bevorzugte Prinzipien der Wirtschaft oder juristisch kodifizierte technische Standards. In der Praxis ist die Frage nach der Benutzungsfreundlichkeit eines Systems immer wieder ein Diskussionspunkt in Projekten. Dabei ist festzustellen, daß die Kriterien für Benutzungsfreundlichkeit stark kontextabhängig sind. Gerade hier treten weniger formale Kriterien hervor als vielmehr Gewohnheiten, die in Gesprächen zunächst entsprechend der mit solchen Gesprächssituationen verknüpften Sprachregelungen als Objektivierungen formuliert werden, die sich aber schließlich in unkontrollierten, beiläufig gesprochenen Sätzen ausdrücken, wie: »Das haben wir immer so gemacht.« oder: »Das war aber im alten System so.«

Zu den Regeln der Softwaretechnik gehören vor allem solche für die Modell*bildung*. So soll generell die Entwicklung eines Modells bestimmten »Prinzipien« genügen. Helmut Balzert formuliert in seinem sehr praxisbezogenen Lehrbuch die folgenden:

- (1) Prinzip der konstruktiven Voraussicht und methodischen Restriktion
- (2) Prinzip der Abstraktion
- (3) Prinzip der Strukturierung
- (4) Prinzip der Hierarchisierung
- (5) Prinzip der Lokalität
- (6) Prinzip der integrierten Dokumentation

und/oder schlecht dokumentiert ist. In der Praxis ist es tatsächlich oft einfacher und ökonomischer, ein altes, von verschiedenen Autoren schon oft erweitertes, geändertes und korrigiertes Programm nicht mehr zu ändern, sondern ein neues zu schreiben. Ob die Qualität von Programmen im Sinne der angesprochenen Kriterien bei nachvollziehbaren Programmen am Code besser zu überprüfen ist als an den Leistungen, ist eine Frage, die kaum generell zu beantworten ist.

- (7) Prinzip der Standardisierung
 - (8) Prinzip der Mehrfachverwendung
 - (9) Prinzip der operationalisierten Qualitäts-Eigenschaften und der produktabhängigen Qualitäts-Zielbestimmung
 - (10) Prinzip der maximalen konstruktiven Qualitätssicherung
 - (11) Prinzip der frühzeitigen Fehlerentdeckung
 - (12) Prinzip der entwicklungsbegleitenden, integrierten Qualitätssicherung
 - (13) Prinzip des definierten Organisationsmodells
 - (14) Prinzip der überprüfbaren und kurzfristigen Meilensteine
 - (15) Prinzip der reduzierten Kommunikation
- (Balzert 1985, 8)

Anhand dieser Liste ist unschwer zu erkennen, daß mit diesen Prinzipien paradigmatische Sachverhalte angesprochen sind. Auf sie wird im weiteren teilweise weiter eingegangen.

Die verschiedenen »Methoden«, die die Softwaretechnik – seit der »Softwarekrise« am Ende der sechziger Jahre (vgl. Naur / Randell 1969; Bauer 1993; Informatik Spektrum Band 17, Heft 1, Februar 1994) – zur Modellierung vorgestellt hat, sollen helfen, diese Prinzipien einzuhalten oder zu erfüllen. Dabei wird zwischen den »Vorgehensmodellen«, die den Ablauf der Modellierung betreffen und festlegen, mit welchen Schritten welche Ergebnisse zu erarbeiten sind, und den »Daten- und Funktionenmodellen«⁴⁵, die den zu modellierenden Teil der Welt repräsentieren und damit die inhaltlichen Ergebnisse der Arbeit bilden, unterschieden.

Auf die Ergebnistypen der Modellierung, die Datenmodelle und die Funktionenmodelle, sowie auf die Vorgehensmodelle wird in den folgenden Abschnitten im Detail eingegangen. Sie enthalten bei genauer Betrachtung eine Vielzahl von Paradigmen und mit diesen verknüpfte Risiken. Es wird auf die in jedem Modell, also auch in Modellen der Informatik vorhandene Reduktion hingewiesen und gefragt, welche Risiken damit einhergehen. Es wird geprüft, ob in der Modellbildung der Informatik Risiken ignoriert werden, die in anderen Gebieten bei Modellbildung bekannt sind und dort auch berücksichtigt werden. Es wird auch diskutiert, wie das Verhältnis zwischen Modell und Welt im Gebrauch beschaffen ist. Hier kommen Aspekte wie

⁴⁵ Dies sind die beiden elementaren »Modelle« eines Informationssystems. Die verschiedenen Aspekte von Funktionen (statische, dynamische, kommunikative) werden mit verschiedenen Mitteln (Diagrammtypen mit dem jeweiligen Zweck entsprechenden Metaobjekten) dargestellt.

Definitions- und Entscheidungsmacht zum Tragen. Schließlich wird der Aspekt der Komplexität der Informatikmodelle betrachtet, der dazu führt, daß Ergebnisse nicht mehr nachvollziehbar sind, sondern nur noch akzeptiert werden können. Denn die Möglichkeit, Ergebnisse zu verwerfen, wird selten reflektiert oder genutzt, sie würde einer skeptischen Haltung entsprechen, von der am Schluß dieser Arbeit noch die Rede sein wird.

Um die Aspekte zu analysieren, wird in den einzelnen Abschnitten eine vielleicht zunächst sehr umfangreich erscheinende Beschreibung des Untersuchungsgebietes und der Verfahren vorgenommen. Das ist notwendig, um den Kontext des Gebietes in die Untersuchung einzubeziehen, der – wie in Kapitel 1 behauptet – für die Risikodiskussion eine wichtige Rolle spielt. Ohne die hier vorgenommene umfassende Betrachtung kann die Vielfalt von Aspekten nicht herausgearbeitet werden.

2.2.4 (Relationen-)Logik als Basis für Datenmodellierung

Daten wurden bis in die siebziger Jahre überwiegend in sequentiellen oder in hierarchisch gegliederten Strukturen abgelegt. Diese Speicherungsformen waren adäquat, solange die Verarbeitung und die Auswertung der Daten im Batchbetrieb vorgenommen wurden. Mit der Einführung und Ausbreitung von Onlinesystemen ergab sich die Notwendigkeit, die Daten flexibler und schneller zugänglich und auswertbar zu machen. Die bis dahin üblichen Strukturen waren für diese Zwecke nicht gut geeignet, weil sie bei Strukturänderungen umständlich anzupassen waren und weil aufgrund redundanter Datenhaltung oft »Update-Anomalien« auftraten. Es wurde vorgeschlagen, die Daten in Form von Relationen abzulegen (Codd 1970) und die Datenstrukturen in der Syntax der Relationenlogik (Codd 1970) oder mit graphischen Elementen (Chen 1976) darzustellen. In diesem Zusammenhang wurde ein neues Feld in der Informatik, speziell der Softwaretechnik, eröffnet: die Datenmodellierung. Heute ist Datenmodellierung in der Praxis der Informatik »state of the art«, wenngleich nach wie vor unterschiedliche Schreibweisen und Begriffe verwendet werden, wie die folgende Rekonstruktion der wesentlichen Aspekte der Datenmodellierung zeigt.

Ein Datenmodell stellt eine Beschreibung eines Ausschnitts der Welt dar. Die Elemente eines Datenmodells werden einerseits als *Mengen* von Objekten, das heißt Gegenständen materieller oder nicht materieller Art, als Mengen von Beziehungen, die zwischen den Objekten bestehen, und als

Mengen von Eigenschaften der Objekte angesehen. Andererseits werden die Elemente eines Datenmodells auch als »Objekttypen«, »Beziehungstypen« und »Eigenschaftstypen« bezeichnet und als *Relationen*, das heißt als geordnete Tupel im mathematischen und logischen Sinn, aufgefaßt. (Codd 1970, 379)

Unter einer Relation werden mehrstellige Prädikate verstanden, wie sie zum Beispiel in dem Ausdruck » x_1 ist Schwester von x_2 « (zweistellig) oder » x_1 klagt gegen x_2 auf x_3 am Gericht x_4 aufgrund des Anspruchs aus x_5 « (fünfstellig) enthalten sind. Formal dargestellt werden diese Relationen in der Prädikatenschreibweise: $P_1(x_1, x_2)$ beziehungsweise $P_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$.

Bei der Datenmodellierung interessieren insofern nicht die konkreten Ausprägungen (Objekte, Beziehungen, Eigenschaften), sondern nur die Metaobjekte (Objekttypen, Beziehungstypen, Eigenschaftstypen). Die konkreten Ausprägungen werden zum einen als Beispiele zur Verdeutlichung von Sachverhalten verwendet, und sie werden zum anderen als konkrete Daten erfaßt, wenn auf der Basis eines solchen Modells eine relationale Datenbank gefüllt werden soll.

Der Zusammenhang zwischen Mengen und Relationen wird wie folgt hergestellt:

$W_1, W_2, \dots, W_n$ seien beliebige Mengen.

(1) Das *kartesische Produkt* $W_1 \times W_2 \times \dots \times W_n$ der Mengen $W_1, W_2, \dots, W_n$ ist die Menge aller *n-tupel* $(w_1, w_2, \dots, w_n)$ mit Komponenten $w_i \in W_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$): $W_1 \times W_2 \times \dots \times W_n = \{(w_1, w_2, \dots, w_n) \mid w_i \in W_i \text{ für } i = 1, 2, \dots, n\}$

(2) Eine Teilmenge $X \subseteq W_1 \times W_2 \times \dots \times W_n$ heißt (*n-stellige*) *Relation* über den *Bereichen* (*domains*) $W_1, W_2, \dots, W_n$. n ist der *Grad* der Relation.

(3) Ein n -tupel $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$ ($x_i \in W_i$ für $i = 1, 2, \dots, n$) wird auch als *Tupel der Relation X* bezeichnet.

(Schlageter / Stucky 1983, 81, Hervorhebungen im Original)

Einem Objekttyp entspricht eine Relation $R(a_1, a_2, \dots, a_n)$, wobei diese Relation zu einem bestimmten Zeitpunkt⁴⁶ folgenden Wert annimmt: $R^t \subseteq \text{dom}(a_1) \times \text{dom}(a_2) \times \dots \times \text{dom}(a_n)$ (Vgl. Schlageter / Stucky 1983, 82)

Als großer Vorteil der Modellierung in relationalen Strukturen (im Gegensatz zu sequentiellen oder hierarchischen Strukturen) wird in der Fachliteratur der Informatik immer wieder genannt, daß die Anwendung der

⁴⁶ Auf die zeitliche Komponente und ihre Bedeutung in der Praxis der Modellierung wird in Abschnitt 2.2.5 eingegangen.

mengentheoretischen Regeln auf die Relationen möglich ist und dadurch eine »flexible Handhabung« der in den Relationen abgelegten Informationen erreicht wird. (Vgl. Codd 1970) Diese Behauptung wird im folgenden erläutert:

Die mengentheoretischen Regeln können angewandt werden, sofern die Bestandteile eines Datenmodells als Mengen mit elementaren (skalaren) oder n-Tupeln als Elementen interpretiert werden. Wird statt der mengentheoretischen die prädikatenlogische Schreibweise verwandt, dann können die Regeln der Prädikatenlogik und für die Mengen mit n-Tupeln die Regeln der Relationenlogik angewandt werden.⁴⁷ (Codd 1970, 383) Diese Regeln lassen sich in mehrere Gruppen teilen:

Erstens gibt es Regeln für das *Einfügen*, *Verändern* und *Löschen* von n-Tupeln in Relationen oder von gesamten Relationen. Diese Regeln sind notwendig, weil es sich bei den Ausprägungen eines Datenmodells, das heißt einer Datenbank, um eine Sammlung von im Laufe der Zeit variierenden Relationen handelt. Den Objekten können zu verschiedenen Zeiten unterschiedliche Werte zugeordnet werden. (Vgl. Codd 1970, 379; Chen 1976, 24f.)

Zweitens gibt es Regeln, die die *Verknüpfung von Werten* in einem Datenmodell erlauben. Dazu gehören die *Mengenoperationen* Vereinigung ($\cup$), Durchschnitt ($\cap$), Differenz ($\setminus$), Element von ($\in$), nicht Element von ($\notin$), gleich ($=$), ungleich ($\neq$), Teilmenge ($\subset$), nicht Teilmenge ($\not\subset$). Vereinigung, Durchschnitt und Differenz allerdings sind nur auf »vereinigungskompatible« (unioncompatible) Relationen anwendbar, also auf solche Relationen, bei denen ein 1:1-Verhältnis zwischen den Eigenschaften besteht, das heißt, die korrespondierenden Eigenschaften müssen denselben Wertebereich haben. (Codd 1970, 382)

Drittens gibt es vier spezielle *Relationenoperationen*, die Permutation, die Projektion, die Bildung eines Verbunds sowie die Selektion:

⁴⁷ Zum Zusammenhang zwischen Mengen- und Prädikatenlogik sei folgendes gesagt: Jede Menge, die aus den drei Elementen a, b, c besteht, kann als Menge derjenigen Dinge erklärt werden, für die das Prädikat $x=a$ oder $x=b$ oder $x=c$ zutrifft. Jede Menge wird also durch ein Prädikat definiert. Eine Menge kann allerdings auf verschiedene Weise durch Prädikate definiert werden. So ist zum Beispiel die Menge der gleichseitigen Dreiecke gleich der Menge der gleichwinkligen Dreiecke. Die Äquivalenz zweier Prädikate läßt sich sowohl in Prädikatenlogik schreiben:

$$\text{Aeq}(P, Q) = \forall x (P(x) \leftrightarrow Q(x))$$
(P und Q sind Prädikate)
als auch in Mengenschreibweise notieren:

$$\{x / x \in P \leftrightarrow x \in Q\}$$
(P und Q sind Mengen, die durch die Prädikate P beziehungsweise Q definiert sind)
(vgl. Hilbert / Ackermann 1928, 153f.)

Die *Permutation* einer Relation besteht in einer Änderung der Ordnung der n-Tupel der Relation. Im Spezialfall $n = 2$, das heißt bei $R(a,b)$, wird diese Operation *Inversion* genannt.

$$R' = \{ (a_2, a_1) / (a_1, a_2) \in R \}$$

Diese Operation wird benötigt und ausgeführt, wenn die Relationen und ihre Permutationen gespeichert werden sollen. Dies ist oft zur Verkürzung der Zugriffszeit und damit aus ökonomischen Gründen nützlich.

Die *Projektion* ermöglicht es, beliebige Elemente einer Relation auszuwählen. Das Ergebnis einer Projektion ist wieder eine Relation. Gegeben sei eine Relation $R(A)$. Die Projektion der Relation R auf eine Liste von Eigenschaften L , also einen Teil des n-Tupels, ist definiert als:

$$R(L) = \{ r(L) / r \in R \} \text{ (L ist Teilmenge von A)}$$

Durch einen *Verbund* entsteht aus zwei Relationen, die bezüglich einer Eigenschaft einen gemeinsamen Wertebereich haben, eine neue Relation. Gegeben seien die Relationen $R(A, B)$ und $S(B, C)$, wobei A, B, C nicht nur eine einzelne Eigenschaft, sondern eine Liste von Eigenschaften sein kann. Ein Verbund $R * S$ ergibt eine Relation, die wie folgt definiert ist:

$$R * S = \{ r.s / r \in R, s \in S, r(b) = s(b) \}$$

Dabei ist $r.s$ die Aneinanderreihung (concatenation) von r und s , das heißt:

$$r.s = (b_1, \dots, b_n) \cdot (b_1, \dots, b_m) = (b_1, \dots, b_n, b_1, \dots, b_m)$$

Werden die redundanten, das heißt doppelt vorhandenen Tupel aus der Relation entfernt, so entsteht ein »natürlicher Verbund«.

Die *Selektion* dient dazu, aus einer Relation R diejenigen Tupel auszuwählen, die eine bestimmte Bedingung erfüllen.

Werden Relationen in Form von Tabellen dargestellt, wie es in der Praxis zum Beispiel in DB2-Tabellen realisiert ist, dann entspricht die Projektion der Auswahl einer oder mehrerer Spalten der Tabelle. Der Verbund entspricht der Verknüpfung von zwei Tabellen bezüglich solcher Spalten, die sich auf eine Eigenschaft beziehen. Zusammengesetzt werden die Zeilen, bei denen in den gewählten Spalten die gleichen Werte vorkommen. Die Selektion entspricht der Auswahl von Zeilen, für die eine bestimmte Bedingung erfüllt ist. (Schlageter / Stucky 1983, 87) In diesen »einfachen«, logischen Operationen liegt die Flexibilität und damit der Vorteil der Darstellung von Informationen in Form von Relationen.

The adoption of a relational model of data [...] permits the development of a universal data sublanguage based on an applied predicate

calculus. A first-order predicate calculus suffices if the collection of relations is in normal form. (Codd 1970, 381)

Die Anwendung der Quantoren der Prädikatenlogik auf die Elemente in der Datenbank ist allerdings nur mit einer Einschränkung möglich: Aufgrund der Endlichkeit des Rechners können die Quantoren nicht im ursprünglichen Sinn verwendet werden, sondern sie können sich nur auf eine endliche Menge von Objekten, nämlich die in der Datenbank vorhandenen Elemente beziehen. Auf diese Einschränkung weist Edgar F. Codd (1923-2003) in einer Fußnote (!) hin:

Because each relation in a practical data bank is a finite set at every instant of time, the existential and universal quantifiers can be expressed in terms of a function that counts the number of elements in any finite set. (Codd 1970, 382)

Die Fußnote macht deutlich, daß die Quantoren, also Elemente der Prädikatenlogik, in Funktionen, also Elemente der Mathematik, hier der Arithmetik, »übersetzt« werden. Zweitens werden die Quantoren mit anderer Bedeutung verwendet als in der Logik üblich. Der Allquantor wird neu definiert als Zählfunktion.⁴⁸ Es gibt demnach folgende »Quantoren« in der Datenbanksprache:

$$(1) \exists x P(x)$$

In der Datenbank existiert ein Element x , für das gilt: x hat die Eigenschaft P .

Wenn es mehrere Elemente in der Datenbank (zum Beispiel mit einer bestimmten Eigenschaft) gibt, läßt sich formulieren:

$$(2) \exists x P(x) \wedge \exists y P(y) \wedge \exists z P(z)$$

In der Datenbank existiert ein Element x , für das gilt: x hat die Eigenschaft P , und ein Element y , für das gilt: y hat die Eigenschaft P , und ein Element z , für das gilt: z hat die Eigenschaft P .

Wenn alle Elemente in der Datenbank eine bestimmte Eigenschaft haben, kann dies mit (2) ausgedrückt werden, indem jedes in der Datenbank vorhandene Element aufgeführt wird.

⁴⁸ Hans Julius Schneider führt aus, daß eine solche Verwendung der Quantoren schon bei Frege gegeben ist, der nur wertdefinite Aussagen in den Blick nimmt. »[...] der All-Quantor [sic!] läßt sich stets als Konjunktion einer überschaubaren Menge adjunktiv (mit »und«) verbundener Sätze lesen, der Existenzquantor entsprechend als Menge disjunktiv (mit »oder«) verbundener Sätze.« (Schneider 1992, 253)

Die Variante (2) mit dem Allquantor gleichzusetzen, zeigt die unpräzise Verwendung der logischen Operatoren in der Informatik. Die Umdefinition des Allquantors von der Unendlichkeit auf die Endlichkeit in einer Fußnote abzuhandeln, zeigt zudem die Bedeutung, die dieser Umdefinition beigegeben wird. Die »neue« Definition mag Codd noch bewußt gewesen sein, Datenbankbetreuer und -benutzer, selbst wenn sie Informatiker sind, reflektieren sie nicht.

Codd schreibt, daß die Abwesenheit von eigentlich zulässigen Elementen in der Datenbank auf zweierlei Weise interpretiert werden kann. Der Wahrheitswert einer solchen möglichen, aber nicht vorhandenen Aussage kann als »falsch« oder als »unbekannt« angenommen werden. Im ersten Fall spricht man von der »closed world interpretation«, im zweiten Fall von der »open world interpretation«⁴⁹ (Codd 1979, 409). In beiden Fällen wird davon ausgegangen, daß man einer Aussage einen Wahrheitswert zuordnen kann. Dies ist jedoch für viele Aussagen, zum Beispiel für mathematische Unendlichkeitsaussagen, nicht möglich. An dieser Stelle müßte der Universalitätsanspruch der Informatik insofern in Frage gestellt werden, als die Informatik ihre Verfahren nicht auf Gebiete anwenden sollte, für die diese Verfahren nicht geeignet sind.⁵⁰

Im Zusammenhang der Diskussion um »default reasoning« wurde von Raymond Reiter (1978) die These vertreten, daß entgegen einer verbreiteten Annahme »the reasoning components of many natural language understanding systems have default assumptions built into them. The representation of knowledge upon which the reasoner computes does not explicitly indicate certain default assumptions. Rather, these defaults are realized as part of the code of the reasoner, or, [...], as part of the reasoner's *process structure*. The most common such default corresponds to what has elsewhere been referred to as the closed world assumption« (Reiter 1978, 211, Hervorhebung im Original). Im folgenden beschreibt er als zwei häufig gebräuchliche »closed world defaults«, nämlich Hierarchien und ein von ihm explizit als »Closed World Default« bezeichnetes Schema, von dem er behauptet, daß bei dessen Geltung »for all predicates P of some domain, then reasoning is

⁴⁹ Codd ergänzt dazu: »[...] the closed world interpretation is usually the one adopted for commercial databases [...]« (Codd 1979, 409). Es ist anzunehmen, daß Codd als Mitarbeiter des IBM Research Laboratory in San Jose, Cal., einen engen Bezug zu kommerziellen Anwendungen hatte.

⁵⁰ Die Informatik ähnelt hier der formalistischen Mathematik. Vgl. hierzu in Kapitel 4 Hilberts Anspruch, sich nicht aus dem von Georg Cantor (1845-1918) geschaffenen Paradies (das zum Teil im Bereich des aktual Unendlichen liegt) vertreiben lassen zu wollen.

being done under the *closed world assumption*» (Reiter 1978, 213, Hervorhebung im Original) und er erläutert dies mit folgendem Beispiel:

Flugpläne enthalten nur »positive« Informationen, das heißt, nur Direktverbindungen einer Fluggesellschaft zwischen zwei Orten. Die »negative« Information, daß zwischen zwei Orten keine Direktverbindung angeboten wird, folgert der Leser automatisch. Dies ist nur möglich, wenn alle Direktverbindungen tatsächlich im Flugplan enthalten sind. Denn: »If it were not known, for example, whether Air Canada directly connects Vancouver and Chicago, we would no longer be justified in making the closed world assumption with respect to the flight schedule. For by the absence of this fact from the data base, we would conclude that Air Canada does *not* directly connect Vancouver and Chicago, violating our assumed state of ignorance about this fact.« (Reiter 1978, 213, Hervorhebung im Original)

Hieran läßt sich folgende Überlegung anschließen. Erstens: Wenn mir explizit versichert wird, ein Flugplan sei vollständig, handelt es sich bei den angegebenen Verbindungen um eine abgeschlossene Aufzählung. Hier ist es überflüssig, den Umkehrschluß zu machen, daß nicht genannte Verbindungen auch wirklich nicht vorhanden sind. Denn dies wird mir ja bereits mit dem Hinweis auf Vollständigkeit versichert. Weiterhin ist es unsinnig, hier von einer »assumption« zu sprechen, da ich von der Abgeschlossenheit der Welt Kenntnis habe. Zweitens: Wird mir nicht explizit versichert, daß der Flugplan vollständig sei, habe ich drei Handlungsmöglichkeiten:

- Ich kann die *closed world assumption* benutzen. In diesem Fall gehe ich das Risiko ein, real vorhandene Verbindungen, die nicht aufgeführt sind, mangels Kenntnis nicht verwenden zu können. Die *closed world assumption* führt zu keinem Verfahren der Überprüfung der Wirklichkeit.
- Ich kann die *state of ignorance assumption* benutzen. In diesem Fall werde ich mich mit den gegebenen Informationen begnügen, wenn sie eine befriedigende Antwort auf mein Auskunftsinteresse enthalten, und ich werde nachfragen, wenn dies nicht der Fall ist.
- Ich kann die *open world assumption* benutzen. In diesem Fall treten die gleichen Handlungsfolgen auf wie bei der *state of ignorance assumption*. Ich mache in den Voraussetzungen jedoch einen Unterschied, indem ich von vornherein gegenüber dem Flugplan skeptisch bin. Die *state of ignorance assumption* führt zu Überprüfungen von Fall zu Fall, die *open world assumption* prinzipiell.⁵¹

⁵¹ Vgl. auch die Entwicklung der Vorstellungen von offener und geschlossener Welt im Kontext von Philosophie und Naturforschung im 16. und 17. Jahrhundert bei Alexand-

Mit dem Einsatz des Prädikatenkalküls erster Stufe, eines universellen, vollständigen und entscheidbaren Kalküls, für die Beschreibung und Bearbeitung der Elemente des Systems wird dem Wunsch nach Formalisierbarkeit und damit auch Automatisierbarkeit der Welt entsprochen. Die Prädikatenlogik ist als universelle »Data-Sublanguage« geeignet, schreibt Codd (1970, 381). Mit dieser Annahme werden »Welt« und »Modell« scheinbar austauschbar, damit verwechselbar und in der Praxis tatsächlich verwechselt. So ist mir bekannt, daß in einem Projekt ein Modell erstellt wurde, in dem der »Kunde« einmal im Datenflußdiagramm als Lieferant oder Empfänger von Informationen oder Gegenständen im Sinne eines »externen Partners« und einmal im Datenmodell im Sinne eines »Objekttyps« auftrat. Einige Projektmitglieder waren überzeugt, daß es sich in beiden Fällen um dasselbe, nämlich um »den Kunden« handeln würde, das heißt, die Informationen über den Kunden im Objekttyp wurden mit der Abbildung im Datenflußmodell verwechselt und das eine wie das andere für eine Beschreibung realer Personen gehalten.

Weiterhin wird außer Acht gelassen, daß ein Modell nur eine Auswahl aus möglichen Aspekten ist. Es enthält genau die Aspekte, die nach inhaltlichen Vorentscheidungen modelliert werden sollen und die mit den gegebenen Mitteln formalisierbar sind. Weder die Vorentscheidungen und die Mittel noch die Verknüpfung beider Bedingungen werden in der Regel als kollektiver Prozeß mit Entscheidungs- und Handlungsalternativen angelegt, sondern unterliegen der betrieblichen Arbeitsteilung. Hier liegt das Risiko in der nur scheinbar rationalen Reduktion auf bestimmte Aspekte im zerlegten Arbeitsprozeß. Dies ist ein Risiko, das für den Modellierer kaum in Erscheinung tritt, da es in der jeweiligen Schlüssigkeit der Kriterien für beide Einzelaspekte verborgen bleibt.

Auch die Annahme, durch und wegen der Logik objektive Erkenntnisse zu erreichen oder – in der Informatik – objektive Entscheidungen zu treffen, birgt Risiken. Diese Entscheidungen wirken unabhängig von den ursprünglichen Aussagen und kontextfrei. Sie sind es aber nicht und in diesem Nichterkennen oder Nichtbeachten ist ein Risiko zu sehen, weil durch die Dekontextualisierung mögliche Gefahren verkannt werden und mögliche

re Koyré (1892-1964) (1957). Fast scheint es, als würden die Konsequenzen der Auflösung der mittelalterlichen Kosmologie in allen Bereichen noch immer nur ungern akzeptiert und immer wieder Verfahren gesucht, mittels derer doch noch alles an seinem Platz gefunden werden kann.

Maßnahmen zur Verhinderung oder Minimierung der Gefahren außer Betracht bleiben.

Inwiefern hiermit das vom Wiener Kreis vorgeschlagene Programm des Logischen Empirismus in der Interpretation, die besagt, er habe versucht, »mit seiner Reduktion auf das Beweisbare und Berechenbare sein Modell der Welt mit der Realität zu identifizieren« (Zemanek 1993, 91), durchgeführt werden soll, wird in Kapitel 4 erläutert.

2.2.5 Zeitunabhängigkeit

Datenmodelle sind statische Modelle, sie stellen eine Momentaufnahme einer Situation dar. Zeitaspekte werden in der Literatur zur Datenmodellierung zwar genannt, werden aber gleich als vernachlässigbar beurteilt. So heißt es in »Datenbanksysteme: Konzepte und Modelle« von Gunter Schlageter und Wolfried Stucky, einem gebräuchlichen Lehrbuch von insgesamt 368 Seiten Umfang, auf Seite 44, daß Aussagen über Objekte als Aussagen über Mengen M^t zu jedem Zeitpunkt t zu verstehen seien:

Wir schreiben:

e vom Typ E oder auch

$e \in E^t$ für einen bestimmten Zeitpunkt t oder auch

$e \in E$ falls dieser Zeitpunkt nicht interessiert.

(Schlageter / Stucky 1983, 44)

Im weiteren nehmen die Autoren $e \in E$ an. Damit ist das Thema »Zeit« ein für alle Mal erledigt.

Die problematische Annahme der Zeitunabhängigkeit von Modellen ist zunächst dadurch bedingt, daß inhaltliche Aussagen über die Welt in aussagen- oder prädikatenlogische Sätze überführt werden, denn anders als die Welt, kennt die Logik keine Zeit, die Logik ist – nach Wittgenstein – »vor der Welt«. (TLP 5.552) Zeit wird in der formalen Darstellung nur als eine Variable neben anderen gedeutet, die wahlfrei gehandhabt werden kann. Wenn in einem Informationssystem zeitliche Aspekte eine Rolle spielen, müssen diese also explizit modelliert werden. Folgende zeitliche Komponenten und auf sie bezogene Regeln, die zum Teil kontextabhängig sind, lassen sich unterscheiden:

- Zeitachsen (einfache Zeitachsen: 1 Jahr = 12 Monate, 1 Tag = 24 Stunden; komplexe Zeitachsen: zu welchem Monat gehört Woche 18/2002

(Montag 29.4.2002, Sonntag 5.5.2002); anwenderspezifische Zeitachsen: Semester, Tertial),

- Kalender (Julianischer, Chinesischer, Muslimischer),
- Definition von Intervallen (Monat im Julianischen Kalender, kaufmännischer Monat (fix 30 Tage)),
- Intervallbeginn (Wochenbeginn in Europa: Montag, in den USA: Sonntag),
- Zeitzonen (GMT, MESZ,...),
- Zeitfunktionen (Was ist Ergebnis von: (31.5.2002 12:00 + 1 Monat) – 1 Monat?),
- Integritätsregeln (Dürfen sich zwei Zeitintervalle überschneiden? Darf es Lücken geben?),
- Modellierungsmethoden für zeitsensitive Datenmodelle,
- unterschiedliche Sachverhalte zum gleichen Zeitpunkt (zum Beispiel: Sind alle Monatsendverarbeitungen relevant?).

Zur Darstellung von Zeitaspekten in den Modellen wurden in der Praxis der Datenmodellierung Ad-hoc-Lösungen entwickelt, die als »Historienkonzepte« bezeichnet werden.⁵² Als Beispiele für die Verwaltung von zeitlichen Komponenten in einem Datenmodell seien genannt:

- Erweiterung des Primärschlüssels einer Relation um Datum und Uhrzeit (»Timestamp«), so daß für historische Daten jeweils neue Objekte generiert werden.
- Einfügung eines Kennzeichnungsattributs im Objekttyp, dessen Bedeutung in einer Schlüsseltabelle abgelegt ist (zum Beispiel »G« für Gegenwart, »V« für Vergangenheit, »Z« für Zukunft, womit drei Zustände unterscheidbar sind).
- Einfügung von Wiederholungsgruppen (zum Beispiel »Umsatz-Januar«, »Umsatz-Februar«,..., »Umsatz-Dezember«) Dieses Verfahren ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn die Zahl der Ausprägungen feststeht.
- Auslagerung der zeitabhängigen Attribute in Subtypen des allgemeinen

⁵² Auch wurden für die Verwaltung zeitabhängiger Daten mehrere temporale Datenbanksprachen entworfen. Der erste umfassende Entwurf einer solchen Sprache ist TSQL2. Zwar ist dieser Entwurf kein offizieller Standard, aber es gab in den neunziger Jahren einen Konsens zwischen vielen in diesem Bereich Forschenden, die ein »TSQL2 Language Design Committee« gründeten. Diese Sprache ist eine Modifikation und Erweiterung von SQL-92 und enthält zusätzlich zu den darin vorhandenen Datentypen »Time« und »Timestamp« neue Datentypen wie »Interval« zur Angabe einer Zeitdauer, »Period« (»Datetime1«, »Datetime2«) zur Angabe einer Zeitperiode, »Intersect« (»Period1«, »Period2«) zur Darstellung der Schnittmenge zweier Perioden usw. (Vgl. Myrach 1997, 143-150; Snodgrass u.a. 1994a; Snodgrass u.a. 1994b; Snodgrass 1995)

Objekttyps (zum Beispiel »Mitarbeiter« mit allen zeitunabhängigen Informationen und »Referent«, »Berater« als Subtypen mit zeitbezogenen Informationen, wobei die Beziehungen zwischen Mitarbeiter und Referent beziehungsweise Berater mit »übt Tätigkeit aus als« bezeichnet werden kann).

(Vgl. Hildebrand / Müßig 1991, 238-243)

Diese Historienkonzepte sind pragmatisch begründete Konzepte, die aufgrund des ungenügenden Umgangs mit Zeitaspekten entstanden. Die Arbeit »Zeitstrukturen für Informationssysteme« von Andreas Oberweis (1990) gibt einen Überblick über Defizite in diesem Zusammenhang und entwickelt für den Bereich der Simulation und Steuerung von Abläufen ein Konzept, das die Modellierung zeitabhängiger Sachverhalte ermöglicht, so daß unter anderem die Berechnung optimaler Startzeitpunkte für Aktivitäten, das automatische Auslösen und die zeitliche Koordination von Aktivitäten sowie die Erkennung und Behandlung von Ausnahmesituationen unterstützt werden können.

Alle bisher genannten zeitlichen Aspekte betreffen nur die konkreten Ausprägungen der Relationen und ordnen diesen eine zeitliche Gültigkeit zu. Eine weitere, grundsätzliche Schwäche dieser Art der Modellierung liegt aber darin, daß zeitliche Aspekte bezogen auf das Modell (die Objekttypen usw.) nicht berücksichtigt werden. Diese grundsätzliche Schwäche ist von Klaus Brunnstein und Simone Fischer-Hübner in »Risk Analysis of ›Trusted Computer Systems« (1990) zwingend analysiert worden. Ihrer Darstellung wird hier gefolgt:

Die Modellierung erfolgt grundsätzlich in vier Schritten:

- Beschreibung der Anforderungen einer antizipierten Realität R für einen zukünftigen Zeitpunkt TF . Die Beschreibung ist das Modell

$$R_{TF}.$$

- Spezifikation des formalen Modells M eines automatischen Systems, das entsprechend der antizipierten Realität arbeiten soll, zum Zeitpunkt TS . Die Spezifikation ist das Modell

$$M_{TS}(R_{TF}).$$

- Implementation des formalen Modells als implementiertes Modell I zum Zeitpunkt der Implementation TI . Die Implementation ist das Modell

$$I_{TI}(M_{TS}(R_{TF})).$$

- Wenn für das implementierte Modell nachgewiesen werden kann, daß es sich so verhält wie das spezifizierte Modell, dann nehmen die Benutzer an, daß sich das implementierte Modell (nach der Zeit der Implementa-

tion, das heißt $T > T_I$) genau so verhalten wird wie die antizipierte Realität. Das kann, muß aber nicht so sein:

$$I_{T_I}(M_{T_S}(R_{T_I})) \sim R_{T_I}.$$

Allein aufgrund der zeitlichen Komponente existiert also immer eine Diskrepanz zwischen »Realität« und »Modell«.

Ein weiterer Aspekt der Zeitabhängigkeit wurde bereits von Frege im Zusammenhang mit der Erörterung von extensionalen Begriffen angeführt. Frege analysiert »Angehöriger des deutschen Reiches« und führt aus:

Man mag einwenden, dass ein Begriff wie z. B. »Angehöriger des deutschen Reiches,« obwohl seine Merkmale unverändert bleiben, eine von Jahr zu Jahr wechselnde Eigenschaft haben würde, wenn die Zahlangabe eine solche von ihm aussagte. Man kann dagegen geltend machen, dass auch Gegenstände ihre Eigenschaften ändern, was nicht verhindere, sie als dieselben anzuerkennen. Hier lässt sich aber der Grund noch genauer angeben. Der Begriff »Angehöriger des deutschen Reiches« enthält nämlich die Zeit als veränderlichen Bestandtheil, oder, um mich mathematisch auszudrücken, ist eine Function der Zeit. Für »a ist ein Angehöriger des deutschen Reiches« kann man sagen: »a gehört dem deutschen Reiche an« und dies bezieht sich auf den gerade gegenwärtigen Zeitpunkt. So ist also in dem Begriffe selbst schon etwas Fliessendes. Dagegen kommt dem Begriffe »Angehöriger des deutschen Reiches zu Jahresanfang 1883 berliner Zeit« in alle Ewigkeit dieselbe Zahl zu. (Frege 1884, 59f.)

Mit der Annahme, die Variable »Zeit« sei eliminierbar oder spiele gar keine Rolle, steht die Informatik in der ding- und nicht verlaufsorientierten Tradition des cartesianischen Welt- und Wissenschaftsverständnisses.⁵³ Descartes' Philosophie ist vor allem durch den Methodengedanken ausgezeichnet. Methode bedeutet »bei ihm und von nun an ein Universalverfahren für jegliche Erkenntnis, durch feste Regeln beschreibbar, von festen Prinzipien kontrollierbar und fähig, den Weg der Erkenntnis gegen Vorurteile, vorschnelle Annahmen und überhaupt gegen die Regellosigkeit der Ahnung und des Einfalls abzuschirmen.« (Gadamer 1967, 72) Descartes hatte durch

⁵³ Es steht außer Frage, daß das cartesianische Verständnis seinerseits zu einer langen Traditionslinie gehört. Für die Beurteilung der Genese der modernen wissenschaftlichen Weltanschauung ist aber auffällig, daß gerade im Zeitraum von 1650 bis 1725 unter dem Einfluß rationalistischer Ideen ein Umschwung von einer entwicklungsorientierten zu einer statischen Theorie der Materie stattfand. (Vgl. Toulmin / Goodfield 1966)

die Unterscheidung der »res cogitans« und der »res extensa« im Menschen sowie mit seiner Begründung, weshalb die res extensa wissenschaftlich analysierbar sei, den Menschen als Ebenbild Gottes beseitigt und es möglich gemacht, ihn als autonomes, der Natur zugehöriges Wesen zu interpretieren. (Moravia 1977, 18f.) Die menschliche Physis glich nun derjenigen der »Tiermaschinen«. Gleichzeitig erschienen seine Sinnesleistungen in ihrem Verhältnis zum Denken problematisch, wir sähen zwar die Sonne sehr klar, dürften aber deshalb nicht urteilen, sie sei so groß, wie wir sie sehen. Diesen Gedanken aus der »Abhandlung über die Methode des richtigen Vernunftgebrauchs« kommentiert Arno Baruzzi:

Wenn Denken also Wissen sein soll, das eine klare Vorstellung vermittelt, dann heißt dies offensichtlich, Angaben zu einer Sache zu gewinnen, mit denen sie in Maß- und Ordnungsverhältnisse gestellt wird. Dieses Hineinstellen in Maß und Ordnung bewirkt dann die Vorstellung einer Sache. Man geht hier offensichtlich von der Annahme aus, daß in der Sinnesvermittlung Wahrheit nur als Wahrscheinlichkeit vorkommt. Eine Sache erscheint uns so; sie ist also wahrscheinlich so. Für den Erkenntnisakt des bisherigen Denkens ist die Annahme einer Wahrscheinlichkeit nicht nur ein möglicher Anfang von Erkenntnis, vielmehr als Erfahrung die erste Form von Wissen überhaupt. Nunmehr kann aber die Wahrscheinlichkeit nicht mehr als Beginn der Erkenntnis angesetzt werden, nicht einmal als eine mögliche Vorform. Die Sinne und ihre Leistungen haben im Vergleich zum Denken und dessen möglichen Leistungen im Grunde nichts miteinander gemeinsam. Die Selbstbesinnung auf das Denken muß von den Sinnen ablenken. (Baruzzi 1973, 20f.)

Diese Selbstbesinnung auf das Denken führt bei Descartes bekanntlich zum methodischen Zweifel (Descartes 1644, I, §1), bei dem nur die Gewißheit des Denkens selbst im »cogito me cogitare« bleibt. Das Denken operiert mit drei Klassen von Vorstellungen:

- »ideae adventitiae«, die durch die Wirkung der Sinne hervorgerufen werden;
- »ideae a me ipso factae«, die willkürlich erfunden werden;
- »ideae innatae«, die unmittelbar vorhanden und potentiell eingeboren sind. Darunter vor allem mathematische Ideen und die Idee Gottes, die methodisch erforderlich ist, um angesichts der Trennung von »res cogitans« und »res extensa« ein Kriterium für die Gewißheit unseres Wissens

von der Außenwelt zu erlangen.

(Descartes 1641, III, 7; Descartes 1644, I, §§17, 20, 29, 30)

Aus dem Attribut Gottes, »im höchsten Grade wahrhaft und Geber allen Lichtes« zu sein, folgt, daß »das von Gott uns verliehene Erkenntnisvermögen niemals einen Gegenstand erfassen kann, der nicht, soweit er erfaßt wird, d.h. soweit er klar und deutlich [...] erkannt ist, wahr wäre.« (Descartes 1644, I, §§29, 30) Klarheit und Deutlichkeit sind nach Descartes Eigenschaften, die unmittelbar im Selbstbewußtsein gespürt werden können. (Descartes 1644, I, §45) Dieses in Gottgegebenheit, Selbstbewußtsein und Denkgesetzen verankerte Erkenntnis-Konzept formt den Zugang zur *res extensa*:

Da wir indes empfinden oder vielmehr auf Antrieb der Sinne klar und deutlich eine gewisse Materie wahrnehmen, die in der Länge, Breite und Tiefe sich ausdehnt, deren Teile verschiedene Gestalt haben, in verschiedener Weise sich bewegen und auch bewirken, daß wir mancherlei Empfindungen von Farben, Gerüchen, Schmerzen usw. haben, so würde, wenn Gott die Idee dieser ausgedehnten Materie unserer Seele unmittelbar durch sich selbst zuführte oder nur bewirkte, daß dies von einer Sache geschähe, welche nichts von Ausdehnung, Gestalt und Bewegung enthielte, sich kein Grund aufzeigen lassen, weshalb er nicht als Betrüger gelten müßte. Denn wir erkennen diese Sache klar als von Gott und von uns oder unserem Geiste verschieden, und wir meinen auch klar zu sehen, daß diese Idee sich uns bei Gelegenheit der außen befindlichen Körper bildet, denen sie ganz ähnlich ist. Schon früher aber ist bemerkt worden, daß es der Natur Gottes durchaus widerspricht, betrügerisch zu sein. Deshalb müssen wir hier unbedingt den Schluß ziehen, daß es eine solche Sache gibt, die nach Länge, Breite und Tiefe ausgedehnt ist und alle Eigenschaften hat, welche wir, als einem ausgedehnten Gegenstand zugehörig, klar erkennen. Und dies ist die ausgedehnte Sache, die wir Körper oder Materie nennen. (Descartes 1644, II, §1)

Nach Descartes sind also die allgemeinen Begriffe wie Ausdehnung oder Bewegung, die von der Vernunft erkannt werden, primäre Qualitäten. Die Sinneswahrnehmungen dagegen sind sekundäre, in Wirklichkeit nicht den Dingen eigene Qualitäten. Mit diesem Verständnis von Außenwelt erhalten Geometrie und Mechanik eine besondere Bedeutung: der Raum ist die Grundlage der mathematisch zu fassenden Welt. Zugleich ist die zeitliche

Dimension der Erfahrung nicht wichtig. Die mit John Locke (1632-1704) einsetzende Kritik am Rationalismus hat zwar in der Folge empiristischen Theorien Raum geschaffen, sie hat aber bis zu den Debatten des 20. Jahrhunderts in Physik und Wissenschaftstheorie weder den Gedanken der einheitlichen Methode noch die Hervorhebung des Raums über die Zeit gebrochen. Und dieser Bruch hat noch längst nicht alle Bereiche des wissenschaftlichen Denkens und der Alltagspraxis erreicht, wie das am Anfang dieses Kapitels beschriebene Paradigma der Zeitunabhängigkeit von Datenmodellen zeigt.

2.2.6 Formalisierbarkeit durch Satzanalyse

In den hier abgehandelten Praxisfeldern der Informatik beginnt die Datenmodellierung mit einer sprachlichen Beschreibung. Für den Aufbau eines Datenmodells werden Personen befragt, um herauszufinden, womit sie sich während ihrer Arbeitszeit beschäftigen (sollten) und welche Informationen sie über welche Gegenstände benötigen, um ihre Aufgaben erledigen zu können. Dabei stellt sich oft heraus, daß es »zwei Kulturen« im Unternehmen gibt, eine »offizielle« – wie etwas gemacht werden soll – und eine »inoffizielle« – wie etwas gemacht wird –. Die Antworten, die je nach befragter Person und Situation mehr die offizielle oder mehr die inoffizielle Kultur repräsentieren, werden – gemäß Lehrbuch – als Aussagen über Sachverhalte genommen und folgendermaßen analysiert:

Substantive in den Aussagen werden als Kandidaten für Objekttypen, Verben für Beziehungstypen, Adjektive für Eigenschaftstypen betrachtet. Zwischen den Elementen der Sprache und denen des Datenmodells werden jeweils 1:1-Beziehungen angenommen. Es wird versucht, die Bestandteile der natürlichen Sprache, jedenfalls der Aussagen, in eine formale Sprache der Datenmodellierung und insofern in prädikatenlogische Ausdrücke zu übersetzen. (Vgl. Vetter 1987, 117)

Max Vetter erklärt in seinem Lehrbuch »Aufbau betrieblicher Informationssysteme« anhand eines Beispiels die Konstruktionselemente eines Datenmodells und die Verfahren der Datenmodellierung. Ein Konstruktionselement ist die »Entität« als »ein individuelles und identifizierbares Exemplar von Dingen, Personen oder Begriffen der realen oder der Vorstellungswelt« (Vetter 1987, 24).

Eine Entität kann demzufolge sein [...]

Ein *Individuum* wie beispielsweise ein Einwohner, ein Mitarbeiter, ein Student, ein Dozent, usw.

Ein *reales Objekt* wie beispielsweise eine Maschine, ein Gebäude, ein Produkt, usw.

Ein *abstraktes Konzept* wie beispielsweise ein Fachgebiet, eine Vorlesung, usw.

Ein *Ereignis* wie beispielsweise die Immatrikulation eines Studenten, eine Rechnungsverbuchung, usw.

(Vetter 1987, 24, Hervorhebungen im Original)

Wenn man sich fragt, was diese Definition bedeutet, dann läßt sich zunächst feststellen: Es wird nicht zwischen konkreten Dingen, Begriffen und Personen unterschieden, das heißt, alle drei werden als gleichartige Merkmals- oder Eigenschaftskomplexe, nämlich als »Entitäten« behandelt. Eine solche Gleichsetzung hat mindestens zwei Konsequenzen:

Erstens wird verwischt, ob es zu den »Entitäten« überhaupt Referenzobjekte gibt und welchen Status sie haben. Allbegriffe wie »Materie« oder »Substanz« sind empirisch leer. Allgemeinbegriffe wie »Hund« und »Katze« stehen hingegen in irgendeinem Verhältnis zu einzelnen Hunden und Katzen.⁵⁴ Und Begriffe wie »Elektron« oder »Proton« sind lediglich als Begriffe einer Theorie verwendbar, sie stehen isoliert für nichts, sondern sie stehen erst durch ihre Stelle im Kontext bestimmt für etwas. Wird das alles nicht unterschieden, sondern angenommen, daß mit jedem Substantiv ein gegenständliches Stück Wirklichkeit benannt werde, ist hier zweierlei angelegt: Zum einen der Irrtum, Datenmodelle bezögen sich auf Gegenstände wie sie »in der Welt wirklich vorhanden sind« und nicht auf sprachliche Äußerungen; zum anderen, daß völlig willkürlich empirische Gegenstände, Intentionen, normative Vorgaben und irreale Bedingungen in Datenmodelle eingehen können, ohne daß dies erkennbar wird, da mit den Wörtern im Datenmodell regelkonform verfahren wurde. Datenmodelle sind damit in der Lage, beliebige Weltstrukturierungen (einschließlich metaphysischer Scheinwelten, Interessen und Herrschaft) als in Einzelteilen faktisch Gegebenes »abzubilden«. Datenmodelle dekontextualisieren damit, während sie die Repräsentation von Zusammenhängen suggerieren.

⁵⁴ In »irgendeinem« Verhältnis, weil die Frage in welchem als »Universalienproblem« von Platon (427-347 v.Chr.) über die Scholastik bis zu Quine letztlich keine befriedigende Antwort gefunden hat. (Vgl. Stegmüller 1978b) Vgl. auch Abschnitt 4.1.1.

Zweitens enthält die Gleichsetzung eine radikale Reduktion. Wie noch im Kapitel über Carnaps Konstitutionssystem zu zeigen sein wird, unterscheiden sich Menschen von Begriffen, Theorien, Gegenständen. Um diese Differenz zu erklären, ist es nicht einmal nötig, sich auf das abendländische Konzept von »Person« und damit auf »Autonomie« zu beziehen, sondern es reicht, das Subjektive anzuführen, welches als eigenpsychische Basis zu den systematischen Voraussetzungen einer logisch-empirischen Interpretation der Welt gehört, um zu sehen, daß eine solche Gleichsetzung nicht aufgeht. Gleichwohl ist die Reduktion von Personen auf das im Datenmodell Definierte, also auf ein Element im Kalkül, ein Angriff auf das Konzept von »Person« und damit zumindest ein Indiz dafür, daß die »Informationsgesellschaft« tendenziell an technokratischen Vorstellungen orientiert ist, nicht aber am Ideal der Kommunikationsgemeinschaft, das zum Selbstverständnis der aufgeklärten »bürgerlichen Gesellschaft« gehört.⁵⁵ Unter kommunikativen Gesichtspunkten wäre die erwähnte Verwechslung von »Kunde« und Kunde zum Beispiel kaum denkbar.

Problematische Begrenzungen des satzanalytischen Verfahrens zeigen sich in mehreren Aspekten:

Erstens wird bei der Satzanalyse die Annahme gemacht, daß es sich bei den Antworten um einfache Aussagen handle, bestehend aus Subjekt, Prädikat und Objekt, mit der Angabe, ob es sich um ein bestimmtes, ein beliebiges oder viele beliebige Objekte (oder Subjekte) handelt (»der«, »ein«, »einige«). Da die natürliche Sprache keine formale Sprache ist, ruft die Satzanalyse mit dem Ziel, Eindeutigkeit zu schaffen, immer eine Reduktion hervor, denn die Kontextoffenheit der Alltagssprache, ihre Plastizität kann im Wege der Bedeutungsfestlegung nicht erhalten bleiben. Damit besteht die Gefahr, im kritischen Fall eine konkrete Bedeutung zu verfehlen, also die Kontextabhängigkeit zu ignorieren.

⁵⁵ Die breite Debatte um den vernünftigen Aufbau und Gebrauch der Sprache in der französischen Aufklärung, ebenso das Projekt der »Encyclopédie« stehen in diesem Zusammenhang. Denn der »richtige« Gebrauch der Wörter gilt als Voraussetzung für die Einsicht in den *ordre naturel*, der in der Gesellschaft zur Geltung gebracht werden soll. Jürgen Habermas betont den physiokratischen Begriff der »öffentlichen Meinung« und schreibt: »L'opinion publique ist das aufgeklärte Ergebnis der gemeinsamen und öffentlichen, von den Philosophen und den Vertretern der modernen Wissenschaft angeleiteten Reflexion auf die Grundlagen der gesellschaftlichen Ordnung; sie resümiert deren natürliche Gesetze in Gestalt der praktischen Gewißheit handelnder Bürger; sie herrscht nicht, aber ihrer Einsicht wird der aufgeklärte Herrscher folgen müssen.« (Habermas 1963, 81) Unübersehbar ist die Nähe dieses Programms zum Impetus des Wiener Kreises bis hin zum Projekt der »Encyclopedia of Unified Science«. Vgl. Abschnitt 4.1.1.

Zweitens wird mit diesem Verfahren auf eine Grammatik der Wortarten abgehoben. Es wird nicht berücksichtigt, daß dieses Verfahren bei Sätzen, die Urteile enthalten, versagt. Jede Nachricht in einer Kommunikation enthält mehrere Aspekte. Nach Friedemann Schulz von Thun stecken mindestens vier Seiten in einer Nachricht: der Sachinhalt (»worüber ich informiere«), die Selbstoffenbarung (»was ich von mir selbst kundgebe«), die Beziehung (»was ich von dir halte und wie wir zueinander stehen«) und der Appell (»wozu ich dich veranlassen möchte«). (Vgl. Schulz von Thun 1981) Selbst wenn eine Nachricht »nur« sachlich gemeint ist, werden implizit immer auch die anderen Aspekte, inklusive der Beurteilungen des Absenders der Nachricht, transportiert.

Drittens werden in der Praxis verschiedene Hilfsmittel zur Aufnahme der Informationen angewandt, die kritisch zu hinterfragen sind. Es werden Interviews mit den »Experten« geführt. Es werden Workshops mit mehreren »Experten« durchgeführt, in denen über das zu modellierende Fachgebiet diskutiert wird. Es werden Formulare, Listen, Richtlinien und andere Aufzeichnungen, die für die Arbeit verwendet werden, untersucht, wobei die darin verwandten Begriffe Hinweise auf mögliche Objekte, Eigenschaften und Beziehungen des Datenmodells geben. Das Verfahren ist in der Praxis allerdings keineswegs so systematisch, wie es in der Literatur vorgestellt wird. In den Interviews oder Workshops werden nämlich ad hoc nach dem Vorwissen der Beteiligten (»Experten« und Informatiker) und mit »gesundem Menschenverstand« die Begriffe gesucht, die als mögliche Elemente in das Datenmodell aufgenommen werden. Dokumentiert werden dann nur die Ergebnisse, also das fertige Datenmodell. Problematisch ist, daß die ursprünglichen umgangssprachlichen Aussagen nicht festgehalten werden, allenfalls schreibt der Informatiker Erläuterungen nach seinem Vorverständnis in das Datenmodell. Dieses Vorgehen hat mehrere Konsequenzen: Erstens ist eine spätere Änderung des Modells schwierig, weil die umgangssprachliche Beschreibung nicht oder nur schlecht dokumentiert ist. In der Folge ist es später nur möglich, neue oder ergänzende umgangssprachliche Beschreibungen auf das Modell zu beziehen, aber nicht, sie mit den umgangssprachlichen Beschreibungen der Ausgangssituation zu vergleichen. Zweitens läßt sich der Prozeß der Modellierung nicht nachvollziehen, das heißt, eine rationale Überprüfung des Prozesses – wie sie zum Beispiel bei naturwissenschaftlichen Experimenten als selbstverständlich gilt – ist nicht möglich. Darüberhinaus wird in diesem kommunikativen Prozeß nur scheinbar gleichberechtigt gesprochen, da durch die Auswahl und Anwen-

dung von Frage- und Gesprächstechniken, sowie durch nicht allen Beteiligten bekannte Vorentscheidungen bereits Definitionsmacht in einer verzerrten Kommunikationssituation ausgeübt wird. Es liegen selten die Bedingungen vor, die eine rationale Kommunikation⁵⁶ erst ermöglichen würden.

2.2.7 Definition und Definitionsmacht

Die Elemente eines Datenmodells werden in der Praxis nicht nur benannt, sondern auch definiert. Wie schwierig es ist, eine »richtige« Definition zu geben, erläutert Toulmin:

Definitionen sind wie Hosengürtel. Je kürzer sie sind, um so elastischer müssen sie sein. Ein kurzer Gürtel sagt noch nichts über seinen Träger: wenn man ihn hinreichend dehnt, kann er fast jedem passen. Und eine kurze Definition, die auf eine heterogene Sammlung von Beispielen angewandt wird, muß gedehnt und zusammengezogen, qualifiziert und umgedeutet werden, bevor sie auf jeden Fall paßt. Aber trotz alledem stirbt die Hoffnung, eine Definition zu finden, die gleichzeitig kurz und erschöpfend ist, immer nur schwer; man kann viel lernen, wenn man sieht, wie viel Elastizität letzten Endes von solchen Definitionen verlangt werden muß. (Toulmin 1961, 21)

Im Bereich der Datenmodellierung werden als Definitionen häufig Beispiele angeführt, die jedoch nicht den Charakter von Gebrauchsdefinitionen haben, oder es werden Definitionen herangezogen, die in der Fachliteratur zur Datenmodellierung für die »Metaobjekte« eines Datenmodells vorliegen.

Derartige Definitionen lauten: »Objekte« sind »Personen, Orte, Gegenstände, Begriffe, Ereignisse, oder beliebige andere reale oder abstrakte Dinge, die für die Beschreibung eines Unternehmens für den Beobachter von Interesse sind.« (Schlageter / Stucky 1983, 13) Statt von »Objekt« wird auch von »Entität« oder »Entity« gesprochen: »Eine Entität ist ein individuelles und identifizierbares Exemplar von Dingen, Personen oder Begriffen der realen oder der Vorstellungswelt.« (Vetter 1987, 24) »Ein Entity kann beschreiben – Ein Individuum (Mitarbeiter, Firma, Vertreter, Bezirksleiter usw.) – Ein reales Objekt (Gebäude, Raum, Telefon, Produkt, Auto usw.) – Ein abstraktes Objekt (Seminartyp, Seminarpreis, Farbe usw.) – Ein Ereignis-

⁵⁶ Vgl. zum Beispiel Habermas (1976).

nis (Monatsabrechnung, Fakturierung, Seminar usw.)« (Denne 1988, 212) Der Erklärungswert solcher Bemühungen ist ersichtlich gering, und die Systematisierungen und Zuordnungen können keineswegs als zwingend angesehen werden. Eine Definition wie die folgende für »Beziehung« von Denne (1988, 213): »Die Entities stehen untereinander in Beziehung. Diese Beziehung wird als Relationship bezeichnet. Eine Relationship assoziiert wechselseitig zwei oder mehr Entities«, in der ein Begriff durch ein Synonym ersetzt wird, ist schlicht zirkulär. Diese Definition ist in der überarbeiteten sechsten Auflage aus dem Jahr 2000, hier auf Seite 384, immer noch enthalten. Dem Autor scheint die Zirkularität seiner Definition auch bei der Überarbeitung und Erweiterung seines Buches nicht aufgefallen zu sein. Ob eine solche Definition überhaupt einen Gebrauchswert hat, ist zu bezweifeln. Werden solche »Definitionen« für die Metaobjekte eines Datenmodells als Vorbild für die Definitionen der im Modell abzubildenden konkreten Sachverhalte verwandt, dann sieht das Ergebnis etwa so aus: »Eine Person ist eine natürliche Person oder eine juristische Person, über die Informationen gespeichert werden.«

Neben Beispielen und zirkulären Definitionen werden Nominaldefinitionen vorgelegt, die aus der Angabe des *genus proximum*, dem übergeordneten Gattungsbegriff, und der *differentia specifica*, dem spezifischen Artmerkmal, bestehen. Für diese läßt sich zeigen, daß sie ins Unendliche weitergeführt werden müßten, weil jeder in ihnen auftretende Begriff selbst definiert werden muß. Auf diese Problematik wies schon Leibniz hin, der zwei Arten von Definitionen unterscheidet, Nominal- und Realdefinitionen. Er beschreibt die Grenzen und Nachteile von Nominaldefinitionen und schlägt alternativ Realdefinitionen vor, das heißt solche, die die Entstehungsart oder die Möglichkeit des Objekts erkennen lassen.⁵⁷

Noch weniger als die Problematik von Definitionen ist Informatikern die Problematik der Definitionsmacht bewußt.

Welche Bedeutung eine Definition in Hinblick auf Macht haben kann, wurde von Lewis Carroll⁵⁸ in »Alice hinter den Spiegeln« prägnant formuliert. Darin gibt es eine Unterhaltung zwischen Alice und Goggelmoggel:

»Wenn ich ein Wort gebrauche«, sagte Goggelmoggel in recht hochmütigem Ton, »dann heißt es genau, was ich für richtig halte – nicht mehr und nicht weniger.« »Es fragt sich nur«, sagte Alice, »ob man

⁵⁷ Vgl. Kapitel 5.3.2.

⁵⁸ Pseudonym für den englischen Logiker Charles Dodgson.

Wörter einfach etwas anderes heißen lassen kann.« Es fragt sich nur, sagte Goggelmoggel, »wer der Stärkere ist, weiter nichts.« (Carroll 1872, 198)

Definitionsmacht erweist sich im Kontext von Datenmodellen in mehreren Hinsichten als problematisch:

Ein Datenmodell stellt – wie ein Foto – eine »Momentaufnahme« des Bildes der selbst konstruierten Welt dar. Was in dem Modell zu einem bestimmten Zeitpunkt definiert wurde, gilt. Einmal vorgenommene Definitionen werden »eingefroren«. Nachträgliche Änderungen gibt es meistens nur in Form von Ergänzungen, weil eine Änderung an den bestehenden Objekten möglicherweise zur Überarbeitung des gesamten Modells führen würde, und das wird im kommerziellen Bereich so gut wie nie gebilligt, geschweige denn gefordert. Es wird häufig gar nicht wahrgenommen, daß sich Begriffe und Gegenstände im Lauf der Zeit ändern, im Datenmodell jedoch starr und zeitlos festgeschrieben sind.⁵⁹

Hinzu kommt, daß die handelnden Personen in vielen Fällen primär Experten sind, die entscheiden, welche Definition als »richtig« zu gelten hat. Sie definieren damit nicht nur den Begriff, sondern auch den Umfang der Analyse und welche nicht explizit benannten pragmatischen Aspekte in die Definition einfließen. Diese Verengung auf wenige Akteure führt in die Modellierung ein zusätzliches Risiko ein. Denn mit ihr wird gefördert, daß die Kontextabhängigkeit der Modellierung und des Modells in den Hintergrund gedrängt wird, da in der Anwendung des Modells immer wieder auf die gleichen Definitionen, die aus nur einem Zusammenhang kommen, zurückgegriffen wird. Ist das Datenmodell erst einmal implementiert, liegt im Computer fest, welche Definition die »richtige« ist. In der Festschreibung zeigt sich ein Bestreben nach Stabilität, und zwar aus folgenden Gründen:

- Wenn eine Reformulierung des Modells notwendig wäre, wäre sie mit Arbeit und damit Kosten verbunden.⁶⁰
- Es würde deutlich werden, daß das Modell immer »hinter« der Wirklichkeit zurückbleibt.
- Grundlegende Strukturen werden als invariant betrachtet.⁶¹

⁵⁹ Zur Zeitabhängigkeit vgl. Abschnitt 2.2.5.

⁶⁰ In einem mir bekannten Projekt wurden selbst Modellierungsfehler mit dem Hinweis, das Datenmodell sei statisch und man solle »bloß nichts ändern«, nicht korrigiert. Stattdessen wurde und wird in Kauf genommen, daß die Programmierer den Designfehler in ihren Programmen jeweils explizit berücksichtigen müssen.

⁶¹ Dies muß kein Nachteil sein, wie in Abschnitt 7.2.4 noch gezeigt wird. (Vgl. auch die Überlegungen von Ortner / Rössner / Söllner (1990) zu standardisierten Datenelemen-

2.2.8 Ökonomieprinzip

Informationssysteme werden ökonomisch im Sinne des technischen Prinzips und des Kostengesichtspunkts hergestellt. So werden in jedem kommerziellen Informatikprojekt die Kosten dem wirtschaftlichen Nutzen gegenübergestellt. Gefordert wird beispielsweise die Maximierung der Verarbeitungsgeschwindigkeit oder die Minimierung von Übertragungsfehlern oder die Bearbeitung von mehr Geschäftsbeziehungen als bisher mit gleichbleibender Mitarbeiterzahl. Dieses Paradigma ist eines, das explizit in Angeboten, Verkaufsunterlagen, Fach- und DV-Konzepten formuliert wird.

Nachfolgend sind einige Kriterien genannt, die ein nach ökonomischen Gesichtspunkten »optimales« Datenmodell ausmachen und die in einem relationalen Datenmodell erfüllt sind:

- Redundanzfreiheit
- Nur inhaltliche, keine systemtechnischen Informationen in Datenbanksystemen
- Effizienz und Flexibilität der Auswertung von Daten
- Vollständigkeit und Notwendigkeit von Daten

Redundanzfreiheit. Redundanzfreiheit ist kein generelles Paradigma der Informatik. Es gibt sogar Bereiche, in denen Redundanzen nützlich sind und eingesetzt werden, zum Beispiel bei der Verschlüsselung von Daten. Im EBCDI-Code wird ein Zeichen in einem Byte, bestehend aus 8 Bits, verschlüsselt. Von den aus 8 Bits herstellbaren 256 Kombinationen aus 0 und 1 werden aber nur circa 150 Kombinationen zur Darstellung von Buchstaben, Ziffern und Sonderzeichen genutzt. Zusätzlich gibt es ein Prüf-Bit, das die Anzahl der Bits in einem Byte auf eine gerade Anzahl vervollständigt. Ist die Anzahl der Bits bereits gerade, dann wird das Prüf-Bit auf 0, anderenfalls auf 1 gesetzt. Mit Redundanzen dieser Art wird die Wahrscheinlichkeit der Erkennung von technischen Übertragungsfehlern erhöht, mit dem Ziel, die Übertragungssicherheit zu verbessern. Aber gleichwohl hat Datenmodellierung in vielen Fällen die Verhinderung oder die Vermeidung von Redundanzen zum Ziel. Ein Datum (eine Information) soll nur einmal, an einem bestimmten Ort (Speicherplatz) abgelegt werden. Dadurch soll verhindert werden, daß bei der Einfügung neuer Elemente (Zeilen) einer Tabelle »Update-Anomalien« auftreten. Für die Herstellung eines redundanzfreien Datenmodells werden »Normalisierungsregeln« angewandt. (Vgl. Date 1986,

ten.)

361ff.) Diese Normalisierungsregeln sehen vor, die Relationen wie folgt zu untersuchen respektive zu gestalten:

Wenn ein Eigenschaftstyp eines Objekttyps (einer Relation) für ein Element mehrere Werte gleichzeitig annimmt oder annehmen kann, dann wird von einer »Wiederholungsgruppe« gesprochen. Relationen, die solche Wiederholungsgruppen enthalten, werden als *unnormalisierte Relationen* bezeichnet.

Beispiel: Eine Menge von Flugzeugen mit – für den Anwendungsbereich relevanten – Eigenschaftstypen wird zunächst (unnormalisiert) wie folgt dargestellt:

Flugzeug
<i>Kennzeichen</i> ⁶²
Taufname
Typ
Reichweite
Strecke
Streckenbezeichnung
Flugzeit

Tabelle 5. Unnormalisierte Relation

Als Beispiele für die konkreten Einträge in einer Datenbanktabelle seien einige Daten aus einer Flottenübersicht der Lufthansa entnommen. (Vgl. Anonymus 1986, 203f.) Die Werte in den Spalten »Strecke«, »Streckenbezeichnung« und »Flugzeit« sind fiktiv. Jede Zeile wird durch das »Kennzeichen« eindeutig identifiziert, das heißt, das »Kennzeichen« ist der identifizierende Schlüssel der Relation.

⁶² Die *kursiven* Begriffe bezeichnen in diesem Zusammenhang *identifizierende* Eigenschaften.

Flugzeug						
Kennzeichen	Taufname	Typ	Reichweite	Strecke	Streckenbezeichnung	Flugzeit
D-ABFA	Regensburg	B737-230	2868 km	1, 2	Hamburg – London, Hamburg – Rom	60 min., 80 min.
D-ABHN	Trier	B737-230	2868 km	1	Hamburg – London	60 min.
D-ABYT	Hamburg	B747-230B	9400 km	2,3	Hamburg – Rom, Hamburg – Athen	80 min., 80 min.
D-ADGO	Bonn	DC10-30	9950 km	3,4	Hamburg – Athen, Hamburg – Kairo	80 min., 140 min.

Tabelle 6. Unnormalisierte Relation

»Strecke« und »Streckenbezeichnung« sind in diesem Beispiel Wiederholungsgruppen, da sie mehr als einen Eintrag pro Flugzeug enthalten. Wiederholungsgruppen sind gemäß den Normalisierungsregeln aufzulösen, indem neue Zeilen in die Tabelle eingefügt werden, so daß jede Zeile pro Eigenschaftstyp nur einen skalaren Wert erhält. Das Ergebnis sind dann Relationen in *erster Normalform*.

Flugzeug						
Kennzeichen	Taufname	Typ	Reichweite	Strecke	Streckenbezeichnung	Flugzeit
D-ABFA	Regensburg	B737-230	2868 km	1	Hamburg – London	60 min.
D-ABFA	Regensburg	B737-230	2868 km	2	Hamburg – Rom	80 min.
D-ABHN	Trier	B737-230	2868 km	1	Hamburg – London	60 min.
D-ABYT	Hamburg	B747-230B	9400 km	2	Hamburg – Rom	80 min.
D-ABYT	Hamburg	B747-230B	9400 km	3	Hamburg – Athen	80 min.
D-ADGO	Bonn	DC10-30	9950 km	3	Hamburg – Athen	80 min.
D-ADGO	Bonn	DC10-30	9950 km	4	Hamburg – Kairo	140 min.

Tabelle 7. Relation in erster Normalform

Offensichtlich enthält die neue Tabelle eine Vielzahl von Redundanzen. Zudem ist ein Flugzeug nun nicht mehr wie vorher nur durch sein »Kennzeichen« eindeutig identifizierbar, sondern als identifizierender Schlüssel sind zwei Eigenschaftstypen, »Kennzeichen« und »Strecke«, erforderlich. Fügt man neue Zeilen ein, dann können in dieser Konstellation Update-Anomalien auftreten:

Flugzeug						
<i>Kennzeichen</i>	Taufname	Typ	Reichweite	<i>Strecke</i>	Streckenbezeichnung	Flugzeit
D-ABFA	Regensburg	B737-230	2868 km	1	Hamburg – London	60 min.
D-ABFA	Regensburg	B737-230	2868 km	2	Hamburg – Rom	80 min.
D-ABHN	Trier	B737-230	2868 km	1	Hamburg – London	60 min.
D-ABYT	Hamburg	B747-230B	9400 km	2	Hamburg – Rom	80 min.
D-ABYT	Hamburg	B747-230B	9400 km	3	Hamburg – Athen	80 min.
D-ADGO	Bonn	DC10-30	9950 km	3	Hamburg – Athen	80 min.
D-ADGO	Bonn	DC10-30	9950 km	4	Hamburg – Kairo	140 min.
D-ADGO	Köln	B747-230B	9400 km	5	Hamburg – Lissabon	90 min.

Tabelle 8. Relation in erster Normalform (mit Update-Anomalie)

Da »D-ADGO« in der Kombination mit Strecke »5« noch nicht in der Tabelle vorhanden ist, würde diese neue Zeile akzeptiert werden. Der Einschub würde jedoch zu Inkonsistenzen führen, da der Name der Flugzeugs D-ADGO einmal »Bonn« und einmal »Köln« lautet. Um solche Inkonsistenzen zu verhindern, muß sichergestellt werden, daß die einzelnen Eigenschaftstypen, sofern sie nicht Teile des Schlüssels sind, immer vom gesamten Schlüssel abhängen. So ist im Beispiel der »Taufname« nur vom »Kennzeichen«, nicht aber von der »Strecke« abhängig. Die »Streckenbezeichnung« dagegen ist allein von der »Strecke« abhängig, nicht aber vom »Kennzeichen«. Die »Flugzeit« bezieht sich immer auf die Kombination eines »Flugzeugs« und einer »Strecke«. Die darzustellenden Informationen werden deshalb auf mehrere Relationen verteilt, deren Eigenschaftstypen jeweils vom Gesamtschlüssel abhängen. Neben dem »Flugzeug« gibt es nun »Strecke« und »Flugzeit« als eigene Relationen in *zweiter Normalform*:

Flugzeug			
<i>Kennzeichen</i>	Taufname	Typ	Reichweite
D-ABFA	Regensburg	B737-230	2868 km
D-ABHN	Trier	B737-230	2868 km
D-ABYT	Hamburg	B747-230B	9400 km
D-ADGO	Bonn	DC10-30	9950 km

Flugzeit		
<i>Kennzeichen</i>	<i>Strecke</i>	Flugzeit
D-ABFA	1	60 min.
D-ABFA	2	80 min.
D-ABHN	1	60 min.
D-ABYT	2	80 min.
D-ABYT	3	80 min.
D-ADGO	3	80 min.
D-ADGO	4	140 min.
D-ADGO	5	90 min.

Strecke	
<i>Strecke</i>	Streckenbezeichnung
1	Hamburg – London
2	Hamburg – Rom
3	Hamburg – Athen
4	Hamburg – Kairo
5	Hamburg – Lissabon

Tabelle 9. Relationen in zweiter Normalform

Weiterhin wird gefordert, daß es innerhalb der Relationen keine »funktionalen Abhängigkeiten« zwischen den Eigenschaftstypen, die nicht dem Schlüssel angehören, gibt. Relationen, in denen keine solchen »transitiven Abhängigkeiten« zwischen Eigenschaftstypen vorhanden sind, befinden sich in *dritter Normalform*.

Im Beispiel ist die »Reichweite« ein Eigenschaftstyp, der vom »Typ« abhängt. Das Modell ist wie folgt anzupassen:

Flugzeugtyp	
<i>Typ</i>	Reichweite
B737-230	2868 km
B747-230B	9400 km
DC10-30	9950 km
B747-230B	9400 km

Flugzeug		
<i>Kennzeichen</i>	Taufname	Typ
D-ABFA	Regensburg	B737-230
D-ABHN	Trier	B737-230
D-ABYT	Hamburg	B747-230B
D-ADGO	Bonn	DC10-30

Flugzeit		
<i>Kennzeichen</i>	<i>Strecke</i>	Flugzeit
D-ABFA	1	60 min.
D-ABFA	2	80 min.
D-ABHN	1	60 min.
D-ABYT	2	80 min.
D-ABYT	3	80 min.
D-ADGO	3	80 min.
D-ADGO	4	140 min.
D-ADGO	5	90 min.

Strecke	
<i>Strecke</i>	Streckenbezeichnung
1	Hamburg – London
2	Hamburg – Rom
3	Hamburg – Athen
4	Hamburg – Kairo
5	Hamburg – Lissabon

Tabelle 10. Relationen in dritter Normalform

Neben den genannten »funktionalen Abhängigkeiten« können im Normalisierungsprozeß auch »mehrwertige Abhängigkeiten« betrachtet werden. In einer Relation $R(a_1, a_2, a_3)$ ist die Eigenschaft a_3 mehrwertig abhängig von der Eigenschaft a_1 , wenn es zu einem a_1 -Wert für jede Kombination dieses a_1 -Wertes mit einem a_2 -Wert eine identische Menge von a_3 -Werten gibt. Auch diese mehrwertigen Abhängigkeiten werden durch die Bildung neuer Relationen »aufgelöst«. Allerdings wird dieses Verfahren zur Bildung der *vierten und fünften Normalform* in der Praxis nicht durchgeführt. Die dritte Normalform wird für die Lösung praktischer Probleme in Unternehmen als ausreichend angesehen. Für die Implementation im Computer kann es sogar sinnvoll sein, die normalisierten Relationen wieder zu »denormalisieren«, weil beispielsweise die Zugriffszeiten kürzer werden, wenn die Daten in einer statt in mehreren Tabellen abgelegt sind. Berücksichtigt werden an dieser Stelle pragmatische Kriterien wie Zugriffsmengen und -häufigkeiten auf Daten. (Vgl. Vetter 1987, 171)

Sämtliche Normalisierungsschritte sind nichts anderes als Zerlegungs- oder Analyseschritte. Gesucht wird nach den Elementarrelationen, die die Grundelemente des Datenmodells darstellen. Wie bei Leibniz, Carnap und Wittgenstein (vor 1929) findet sich im Bereich der Datenmodellierung die Suche nach den elementaren Ausdrücken und Aussagen über die Welt.

Für die Datenmodellierung lassen sich in dieser Hinsicht zwei Extreme formulieren. Der gewünschte Ausschnitt der Welt kann zum einen als ein Objekttyp mit sehr vielen Eigenschaftstypen modelliert werden. In diesem Fall handelt es sich um ein unnormalisiertes Datenmodell, also eine Tabelle mit allen interessierenden Eigenschaftstypen. Zum anderen kann die Zerlegung so weit getrieben werden, daß am Ende pro Eigenschaftstyp ein Objekttyp entstanden ist und damit ein vollständig normalisiertes Datenmodell, in dem ein Datum nur an einer Stelle vorkommt, allerdings mit entsprechend vielen Beziehungen zwischen den Objekttypen. Weder das eine noch das andere Modell sind praktikabel. Gesucht wird in der Praxis immer eine Zwischenform, die zwei Anforderungen an ein Modell, nämlich Übersicht und Ordnung zu schaffen, gerecht wird.

Diese Tatsache ist Datenmodellierern nicht durchgängig bekannt. Stattdessen taucht immer wieder die Frage auf, welches denn nun das »richtige« Modell sei. Es ist schwierig zu vermitteln, daß die Methode nicht zu einem einzigen, »richtigen« Modell führt, sondern daß die Ergebnisse immer abhängig von Absichten und Zwecken sind. So kann es kontextabhängig verschiedene »richtige« Modelle geben. Ein Beispiel für solche unterschiedlichen »Modellebenen« bietet das Konzept von Ulrich Himmler (1991), der zwischen dem »unternehmensweiten Bankendatenmodell« und den »lokalen Modellen« unterscheidet. Je nach Zielvorgabe sind die Modelle unterschiedlich detailliert. Ein unternehmensweites Modell enthält abstraktere Objekttypen als ein für ein spezielles Teilgebiet angemessenes Modell. Damit die Modelle der verschiedenen Ebenen zusammenpassen, muß das unternehmensweite Modell gleichermaßen stabil wie flexibel sein:

Ein einmal entwickeltes und verabschiedetes Bankendatenmodell (Unternehmensdatenmodell) muß stabil sein; d.h., später aufzunehmende Änderungen und Ergänzungen dürfen die einmal gefundene Struktur nicht in Frage stellen. Es muß demnach für die Entscheidungsträger möglich sein, neue, bisher unbearbeitete Geschäftsfelder zu betreten, ohne die bestehenden Strukturen und die darauf aufbauenden Anwendungen zu gefährden. Umgekehrt muß man sich auch von bestimmten Geschäften oder Sparten zurückziehen können, ohne daß die übrigen Strukturen davon berührt sind. Lokale Änderungen sollen sich nur lokal auswirken! Aus dieser Sichtweise heraus sind also die Begriffe »Stabilität« und »Flexibilität« keine Gegensätze, sondern sich ergänzende Anforderungen. An ihnen haben sich

die Modellierungsarbeiten zu orientieren. (Himmler 1991, 2)⁶³

Ein weiterer Aspekt, der in der Praxis häufig zu Fehlannahmen führt und damit ein Risiko für die Softwareerstellung darstellt, ist der, daß die Normalisierung eines Datenmodells nicht automatisch erfolgen kann, denn funktionale Abhängigkeiten sind eine besondere Art semantischer Integritätsbedingungen. (vgl. Schlageter / Stucky 1983, 175) Das ist vielen Datenmodellierern in der Praxis nicht klar, vielleicht weil einige Hersteller von CASE⁶⁴-Tools (zum Beispiel ADW und case/4/0) behaupten, ihre Tools könnten »normalisieren«. Was diese Programme können, ist folgendes:

- Wenn der Benutzer einen Eigenschaftstyp als Wiederholungsgruppe definiert hat, löst das Tool diesen Eigenschaftstyp aus der Relation heraus und erzeugt einen neuen Objekttyp mit dem Namen des Eigenschaftstyps sowie einen entsprechenden Beziehungstyp zwischen den beiden Objekttypen.
- Wenn der Benutzer einen M:N-Beziehungstyp angelegt hat, löst das Tool diesen auf, erzeugt einen neuen Objekttyp und legt zwei neue Beziehungstypen mit den korrekten Kardinalitäten an.

Diese und nur diese Schritte sind formal und damit von der Software durchführbar, alle anderen Modellierungsschritte bleiben dem Menschen vorbehalten, weil sie inhaltliche Deutungen erfordern.

Die mit Hilfe der Datenmodellierung zu erreichende Redundanzfreiheit ist ein Ausdruck des Ökonomieprinzips im technischen Sinn, das heißt möglichst wenig Speicherplatz verwenden⁶⁵, möglichst wenig Änderungen vornehmen müssen und möglichst wenig Anomalien erzeugen mit dem übergeordneten Ziel, Kosten zu minimieren. Die durch Denormalisierung eingeführten Redundanzen zur Erhöhung der »performance« werden »kontrollierte Redundanzen« genannt, weil sie bewußt hergestellt werden. Sofern diese tatsächlich kontrolliert werden, zeigen sich keine Probleme, anderenfalls kann das relationale Datenbanksystem wie andere Strukturen Inkonsistenzen enthalten und damit Fehler (zum Beispiel Update-Anomalien) im Informationssystem verursachen.

⁶³ Der Ansatz wird in Abschnitt 7.2.4 als eine mögliche Handlungsorientierung für die Datenmodellierung diskutiert.

⁶⁴ CASE steht für Computer Aided Software Engineering.

⁶⁵ Ein wesentlicher Grund für die Überlegungen zur Datenmodellierung war anfänglich die Tatsache, daß die gleichen Daten häufig an verschiedenen Stellen gespeichert wurden. Dieses führte zu erhöhtem Speicherplatzbedarf. Bei den zurückgegangenen Hardwarekosten ist dies heute kein wichtiges Argument mehr.

Der Anspruch, im technischen Sinn ökonomische Informationssysteme zu erstellen, hat zur Entwicklung der hier beschriebenen Methoden geführt, die versprechen, – quasi automatisch – »richtige«, »wahre« Modelle zu produzieren. Die Vorstellung ist riskant, weil sie von den Leerstellen vieler Modelle ablenkt: von den Zwecken des Modells, von den Interessen und Intentionen der Beteiligten, von Zeitabhängigkeit. Sie ist erfolgreich, weil den Modellierern Regeln an die Hand gegeben werden, die sie formal anwenden können, und weil die Modellierer nicht über die Vorbedingungen, den Inhalt des Modells und die Folgen seiner Implementierung nachdenken müssen.⁶⁶

Nur inhaltliche, keine systemtechnischen Informationen in Datenbanksystemen. In einer relationalen Datenbank sind die Verknüpfungen zwischen den Tabellen über »Fremdschlüssel« realisiert. Das bedeutet, die identifizierende Eigenschaft eines Objekts B ist in einem Objekt A hinterlegt, wenn zwischen A und B eine Beziehung besteht. Damit entfallen »Pointer«, das heißt Verweise von Daten auf andere Daten durch die Angabe der Speicheradresse, an der sich die anderen Daten befinden, wie es in hierarchischen Datenbanken üblich ist. Der Nachteil von Datenbanken mit Pointer-Strukturen ist, daß Änderungen in der Struktur der Beziehungen zwischen den Elementen Programmänderungen nach sich ziehen, da ein Programm in der Regel nur für eine Struktur ausgelegt ist. (Vgl. Codd 1970, 378f.) Die systemtechnisch bedingten »Pointer« sind in relationalen Datenbankstrukturen nicht nötig. Strukturänderungen haben also keine Programmänderungen zur Folge, so daß relationale Datenbanken – wieder im technischen Sinn – ökonomischer sind als andere.

Auch »Indizes«, das heißt Kennzeichen für solche Datenfelder, über die sehr häufig auf die Daten zugegriffen wird, sind in relationalen Datenbanken nicht erforderlich. In nicht relationalen Datenbanken dienen Indizes der Verbesserung von Zugriffszeiten und Zugriffswegen. Da bei Änderungen der Datenbankstruktur auch die Löschung von Indizes notwendig sein kann, müssen Programme, die diese Indizes verwenden, ebenfalls modifiziert werden. Auch hier sind relationale Datenbanken ökonomischer, weil in ihnen – zumindest gemäß der Theorie – keine Indizes verwendet werden. In der Praxis werden aus Gründen der »performance« auch hier Indizes (»Sekundärindizes«) vergeben, um einen gezielten und damit schnellen Zugriff auf die Daten zu ermöglichen.

⁶⁶ Manche der angesprochenen Probleme können mit dem von Himmler (1991) vorgeschlagenen Vorgehen entschärft werden. Vgl. hierzu Kapitel 7.

Das hier formulierte Paradigma, ein gemeinsamer Wert, besteht darin, das fachliche Modell ohne zusätzliche systemtechnischen Komponenten zu implementieren. Damit wird die Annahme gefördert, das fachliche Modell, das der Welt noch sehr nahe ist, und das technische Modell seien dasselbe, und es wird einer Verwechslung von Welt und Informationssystem Vorschub geleistet.

Effizienz und Flexibilität der Auswertung von Daten. Eng mit dem gerade erörterten ist die Annahme verbunden, mit der Datenmodellierung seien Daten leichter handhabbar. Bei Ergänzungen von Programmfunktionen, zum Beispiel bei Erweiterungen von Auswertungen, müssen die gewünschten Datenfelder in die vorhandenen Dateien eingefügt werden. Sind die Daten auf verschiedene Dateien verteilt, müssen die Programme um Zugriffe auf diese zusätzlich benötigten Dateien erweitert werden. Die Informationssysteme sind in diesem Fall unflexibel gegenüber Änderungen, die die Speicherung von Daten betreffen. (Vgl. Schlageter / Stucky 1983, 20) Mit einem Datenmodell und einer daraus abgeleiteten relationalen Datenbank, die sämtliche Daten enthält, werden diese Daten leichter zugänglich und leichter erweiterbar. Die Darstellung in Tabellen ermöglicht durch die oben genannten Operationen Auswertungen der Daten nach den verschiedensten Kriterien.

Mit diesem Zusammenhang ist die Verlagerung des Schwerpunktes von den Funktionen zu den Daten in der Softwareentwicklung angesprochen. Während in den Anfängen der Informatik die Systeme stark funktionsorientiert entwickelt wurden, hat sich seit etwa 1980 der Schwerpunkt auf die Datenseite verlagert. Die – schon immer vorhandene – Möglichkeit der Trennung der Daten von den Funktionen wurde nun genutzt, um eine Flexibilisierung hinsichtlich der Auswertbarkeit der Daten zu erreichen. Diese Trennung basiert nicht zuletzt auf dem Wunsch der Fachabteilungen und des Managements, von der Programmierabteilung unabhängig zu sein und individuelle Auswertungen nach unterschiedlichsten Kriterien selbst und sofort durchführen zu können. Diese Auswertungen sollten – so der Anspruch – mit Hilfe einfacher Abfragesprachen ermöglicht werden. Anders als bei prozeduralen Sprachen, bei denen die Kontrolllogik im Vordergrund steht (Wie ist ein Ergebnis zu ermitteln?), handelt es sich bei den damals entwickelten Abfragesprachen um deskriptive Sprachen (Was ist als Ergebnis gewünscht?). (Vgl. Vetter 1987, 105f.)

In der Praxis hat sich dieser Anspruch allerdings nicht durchgesetzt, zum einen, weil die Abfragesprachen relativ kompliziert sind, so daß sich die

Annahme der leichten Erlernbarkeit als falsch erwiesen hat, zum anderen, weil die von den Anwendern formulierten Abfragen technisch nicht unbedingt effizient waren und höhere Kosten als vorgesehen verursachten. Es hat sich herausgestellt, daß systemtechnische Bedingungen, von denen der Benutzer eigentlich nichts »merken« sollte, für eine ökonomische Nutzung von Informationssystemen eine größere Bedeutung als ursprünglich angenommen haben.

Vollständigkeit und Notwendigkeit von Daten. Der Begriff »Vollständigkeit« wird in der Praxis der Informatik selten reflektiert. Er verspricht mehr als er hält, wenn nicht klar und bewußt ist, daß die Frage nach Vollständigkeit lautet: Ist jede Anforderung, die in einem bestimmten Ergebnis des Softwareentwicklungsprozesses enthalten sein soll, erfüllt?

Noch weniger wird über den Aspekt der »Notwendigkeit« von Modellen oder Modellteilen reflektiert. Vielmehr wird implizit angenommen, das Modellerte sei auch das Notwendige. Um ein angemessenes Modell zu erhalten, sollte explizit auch die Frage nach der Notwendigkeit gestellt werden: Ist für jeden Bestandteil des (Softwareentwicklungs-)Ergebnisses eine Anforderung vorhanden?

Vollständigkeit und Notwendigkeit der Daten sind einfacher erkennbar, wenn das Modell der Welt übersichtlich ist. Übersichtlichkeit ist ein Paradigma, ein gemeinsamer Wert, im Zusammenhang der Datenmodellierung. Wenn kein Überblick vorhanden ist, ist die Gefahr, daß Informationen fehlen oder überflüssig sind, größer. Ein Datenmodell soll, da es alle Daten zusammenhängend darstellt, diese Übersicht schaffen und somit dafür sorgen, daß die Kriterien »Vollständigkeit« und »Notwendigkeit« erfüllt werden.

Beide Aspekte sind nicht nur in Bezug auf ein Datenmodell zu betrachten, sondern immer im Zusammenhang von Daten und Funktionen. Werden diese Zusammenhänge nicht berücksichtigt, dann sind Inkonsistenzen möglich, die zu Fehlern im Informationssystem führen können.

2.2.9 Funktionenmodellierung

Auf der Funktionenseite von Informationssystemen werden drei Aspekte unterschieden: der statische, der dynamische und der kommunikative Aspekt. Mit dem *statischen* Aspekt ist die Gliederung von Funktionen in ihre Teilfunktionen gemeint. Unter dem *dynamischen* Aspekt wird der Ablauf von

Funktionen⁶⁷ in einer bestimmten Reihenfolge, gegebenenfalls mit Iterationen und in Abhängigkeit von Bedingungen, verstanden. Der *kommunikative* Aspekt umfaßt die Beschreibung der Schnittstellen zu anderen Funktionen und zur Umgebung des Systems. Für jeden der drei Aspekte gibt es in der Informatik jeweils unterschiedliche Darstellungsmittel.

Neben diesen drei Paradigmen der Statik, der Dynamik und der Kommunikation lassen sich zwei Paradigmen, die sich auf die Herstellung von Funktionenmodellen beziehen, angeben: der Top-down-Ansatz und der Bottom-up-Ansatz. Der Top-down-Ansatz besagt, daß ausgehend von einem allgemeinen Begriff durch Zerlegung oder Gliederung spezifische Begriffe gesucht werden. Umgekehrt geht der Bottom-up-Ansatz davon aus, daß spezifische Begriffe durch Abstraktion zu einem allgemeinen Begriff zusammengefaßt werden können. Diese beiden Verfahren entsprechen den von Leibniz beschriebenen und in Kapitel 5 vorgestellten Verfahren der Analyse beziehungsweise der Synthese. Es handelt sich also um keine neuen Paradigmen in der Informatik, sondern um die Übernahme von Handlungsanweisungen zur Modellierung, die vor etwa 300 Jahren explizit formuliert wurden und die in philosophischen Kontexten tradiert worden sind.

Ebenso wie in Datenmodellierung gibt es auch hier auffällige Unterschiede zwischen theoretischen Vorgaben und praktischer Durchführung, die jeweils mit erläutert werden.

2.2.10 Hierarchien für den statischen Aspekt

Der statische Aspekt von Funktionen wird in der Gliederung einer Funktion in Teilfunktionen ausgedrückt, wobei das Ergebnis eine hierarchische Form hat und nach bestimmten Regeln zustandekommt. Eine Struktur wird als hierarchisch bezeichnet,

if a relation or predicate on pairs of the parts ($R(\alpha, \beta)$) allows us to define levels by saying that

- 1) Level 0 is the set of parts α such that there does not exist a β such that $R(\alpha, \beta)$, and
- 2) Level i is the set of parts α such that

⁶⁷ Die Begriffe »Funktion« und »Prozeß« werden oft synonym verwendet. Um Mißverständnisse zu vermeiden, verwende ich Funktion für eine einzelne Tätigkeit und Prozeß für eine Reihe von Funktionen.

- a) there exists a β on level $i-1$ such that $R(\alpha, \beta)$ and
- b) if $R(\alpha, \gamma)$ then γ is on level $i-1$ or lower.

This is possible with a relation R only if the directed graph representing R has no loops. (Parnas 1974, 336, Hervorhebung im Original)

Somit kann jedes System als hierarchisches System verstanden werden, im Minimalfall als eines mit einer Ebene und einem Teil. David L. Parnas nennt einige Relationen, die Hierarchien definieren: »uses«, »gives work to«, »allocates resources to«, »can be accessed by« und »part of«. Diese Relationen ergeben sich aus dem jeweiligen Anwendungsbereich, sind also kontextabhängig.

Die Form und die Regeln der Funktionenmodellierung in der Softwaretechnik basieren auf allgemeinen Konzepten der Betriebswirtschaftslehre für den Bereich der Organisation (vgl. Kosiol 1968, REFA 1981), die seit Frederick W. Taylor (1856-1915) (1919) diskutiert werden. So wird zur Bestimmung einer Aufbauorganisation eine Gliederung der Aufgaben (Funktionen) vorgeschlagen, bis schließlich unterste Teilaufgaben entstanden sind, die gedanklich einem Aufgabenträger, in der Regel einer Person, zugeordnet werden sollen. Eine weitere Untergliederung dieser letzten Teilaufgaben, auch Elementaraufgaben genannt, wird für aufbauorganisatorische Zwecke nicht benötigt. Die Gliederung kann nach folgenden Kriterien durchgeführt werden:

- nach Verrichtung,
- nach Objekt,
- nach Rang,
- nach Phase,
- nach Zweckbeziehung.

Die *Verrichtungsanalyse* führt zur Aufgliederung der Gesamtaufgabe nach einzelnen Verrichtungszielen.

Die *Objektanalyse* hebt die Objekte hervor und gliedert diese in Teilobjekte.

Die *Ranganalyse* geht davon aus, daß bei jeder Aufgabe zwischen Entscheidung und Ausführung unterschieden werden muß. Eine Aufgabengliederung nach diesem Kriterium erleichtert eine spätere Zuordnung der Entscheidungsaufgaben zu Leitungsaufgaben.

Bei der *Phasenanalyse* werden die Aufgaben nach den drei Phasen Planung, Realisation und Kontrolle gegliedert.

Eine Gliederung nach der *Zweckbeziehung* führt zur Unterscheidung in primäre und sekundäre Aufgaben. Primäraufgaben sind solche, die sich direkt aus dem Prozeß der Güterproduktion ableiten lassen. Sekundäraufgaben werden erst von den Primäraufgaben hervorgerufen und hängen sich an diese an. Damit ist eine Trennung von Produktionsaufgaben von Verwaltungsaufgaben möglich.

In den hier in Betracht genommenen Verfahren der Softwaretechnik zur Funktionenmodellierung werden nur die Kriterien Verrichtungsanalyse und Objektanalyse genannt. Das entspricht meinen Beobachtungen in Projekten, in denen mir an keiner Stelle bekannt geworden ist, daß anderes angewandt würde. Für diese Reduktion auf zwei Kriterien läßt sich keine Begründung feststellen, die anderen Analysemöglichkeiten werden einfach nicht genutzt.

Zusätzlich werden Gliederungsarten vorgeschlagen: Zerlegung und Klassifizierung.⁶⁸ Sowohl Verrichtungen als auch Objekte können zerlegt oder klassifiziert werden.

Zerlegung bedeutet, daß ein Element (Verrichtung oder Objekt) in seine Komponenten gegliedert wird. Die Komponenten zusammen (»und«-Verknüpfung) ergeben das ursprüngliche Objekt.

Klassifizierung bedeutet, daß Teilfunktionen oder Teilobjekte gebildet werden, die alternativ durchgeführt beziehungsweise bearbeitet werden (»oder«-Verknüpfung). Ein Objekt kann ein bestimmtes, genauer spezifizierbares Objekt sein.⁶⁹ Die Klassifizierung geht auf ein erkenntnistheoretisches Paradigma, nämlich auf die Unterscheidung in »Allgemeines« und »Besonderes«, zurück, wie es in Nominaldefinitionen, die bekanntlich aus der Angabe eines »genus proximum« und einer »differentia specifica« bestehen, auftritt.

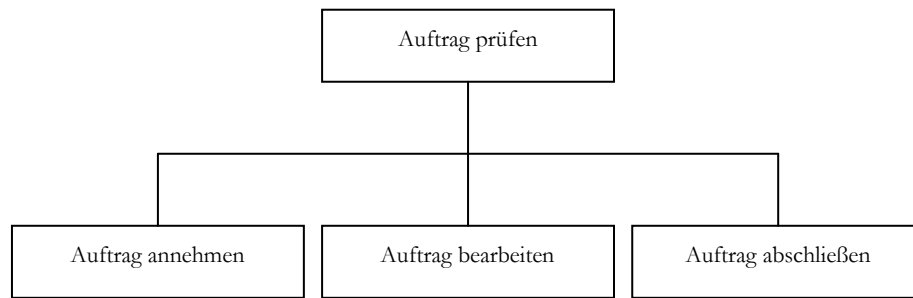
Nachfolgend sind einige Musterbeispiele für die verschiedenen Gliederungsarten aufgeführt:

— *Verrichtungszerlegung:*

»Auftrag prüfen« besteht aus »Auftrag annehmen« und »Auftrag bearbeiten« und »Auftrag abschließen«.

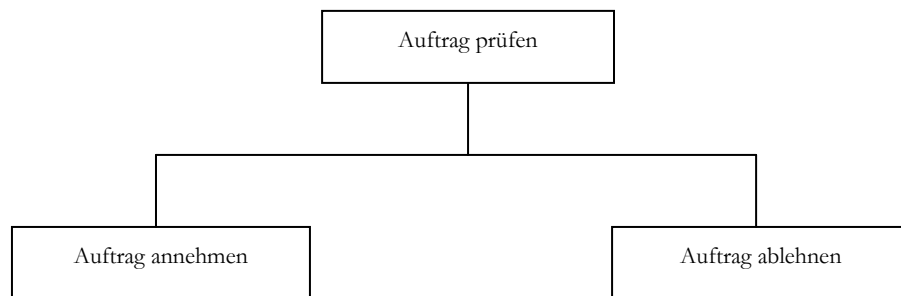
⁶⁸ Die beiden Gliederungsarten werden auch im Bereich der Datenmodellierung verwendet. Vgl. Abschnitt 2.2.18.

⁶⁹ Die Bezeichnung »kann sein« ist eine Konvention, die der Aussage nicht gerecht wird, denn es handelt sich nicht um einen modallogischen Ausdruck, sondern um eine aussagenlogische »Oder-Verknüpfung«.



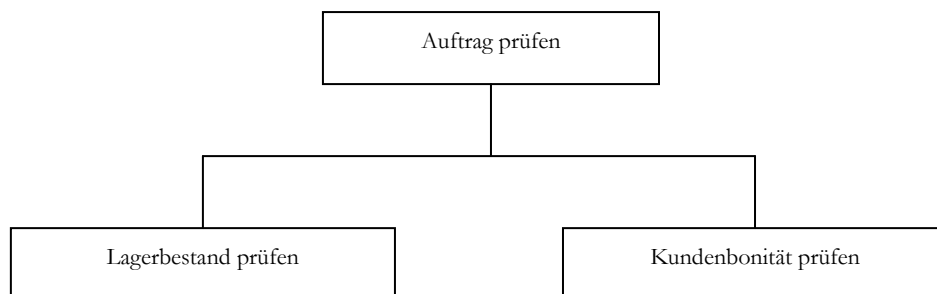
– *Verrichtungsklassifizierung:*

»Auftrag prüfen« kann sein »Auftrag annehmen« oder »Auftrag ablehnen«.



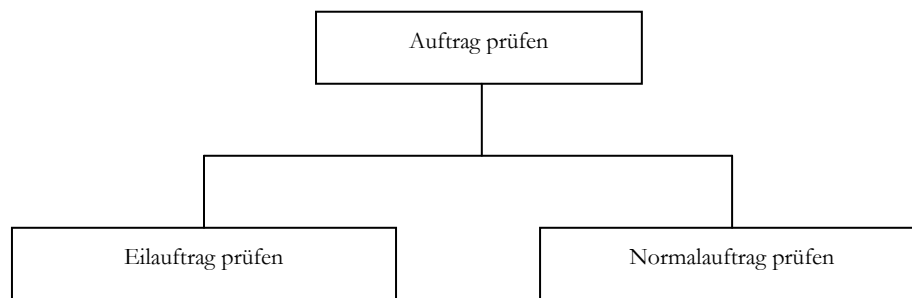
– *Objektzerlegung:*

»Auftrag prüfen« besteht aus »Lagerbestand prüfen« und »Kundenbonität prüfen«.



– *Objektklassifizierung:*

»Auftrag prüfen« kann sein »Eilauftrag prüfen« oder »Normalauftrag prüfen«.



In der Praxis benutzte Literatur (vgl. zum Beispiel EDV Studio Ploenzke 1989) enthält Handlungsanweisungen zur Softwareentwicklung, gemäß denen die Gliederung einer Funktion pro Schritt nur nach genau einem Gliederungskriterium erfolgen darf. Nach welchen der genannten Kriterien gegliedert wird, hängt vom Ziel ab:

Mit der Verrichtungsorientierung wird eine Aufteilung der Arbeit nach Funktionen vorgenommen, so daß diese Gliederungsformen für Fälle empfohlen werden, in denen die Spezialisierung eines Sachbearbeiters oder die Auslastung einer Spezialmaschine wichtig ist (Stichwort: Fließfertigung). Bei der Objektorientierung dagegen steht nicht die Funktion, sondern das Objekt im Vordergrund, so daß diese Gliederungsformen für Fälle empfohlen werden, in denen eine Spartenorientierung, eine Kundenorientierung oder eine umfassende Bearbeitung von Geschäftsvorfällen gewünscht werden (Stichwort: Integrierte Fertigung).

Die Gliederung nach den verschiedenen Kriterien hat bestimmte Konsequenzen: Bei einer starken Verfeinerung der Verrichtungen und einer schwachen Verfeinerung der Objekte erhält man Funktionen, die jeweils gleichartige Aktivitäten an verschiedenen Objekten vornehmen. Die Beschreibung der Elementarfunktionen enthalten dementsprechend umfangreiche Fallunterscheidungen zur Erkennung der verschiedenen Objekte. Umgekehrt führt eine starke Verfeinerung der Objekte und eine schwache Verfeinerung der Verrichtungen zu einer umfangreichen Beschreibung der verschiedenen Aktivitäten, die an dem Objekt vorgenommen werden.

Für die Entscheidung, welche Kriterien angewandt werden sollen, spielen pragmatische, in vielen Fällen ökonomische Aspekte eine wichtige Rolle, und es zeigt sich in der Praxis, inwiefern Managementmethoden, Organisationsvorstellungen usw. aus der Betriebswirtschaftslehre bestimmen, wel-

cher aktuelle Trend sich auch in der Entwicklung von Informationssystemen durchsetzt. Gestern war es das Fließband, heute ist es die Objektorientierung. Die Gestaltung von Informationssystemen in Form hierarchischer Strukturen ist also nicht kontextunabhängig.

Neben Einflüssen, die aus der Betriebswirtschaftslehre stammen, sind auch die anhaltenden Auswirkungen zu beachten, die Vorgaben des US-amerikanischen Militärs für die Gestaltung des Systems SAGE⁷⁰ hatten. Die Entwicklung von Informationssystemen und von Maßstäben für gute Informationssysteme orientierte sich in den späten vierziger und in den fünfziger Jahren an Leitbildern, die dem Central-Command-Konzept der US-Luftverteidigungs- und Nuklearstrategie entstammen. (Vgl. Jacobs 1986; Hellige 1992) Aus dem militärischen Bereich sind im folgenden neuere Standards für die Softwareentwicklung in den zivilen Bereich eingeflossen, wie zum Beispiel die im Capability Maturity Model Integrated (CMMI) definierten.

Das Paradigma der Hierarchie erweist sich nicht nur als abstraktes, theoretisches Konzept und damit als metaphysisches Paradigma, sondern ist auch in einer bestimmten Notation – wie die oben angeführten Beispiele zeigen – anzutreffen, das heißt als symbolische Verallgemeinerung.

2.2.11 Netzstrukturen für den dynamischen Aspekt

Der dynamische Aspekt von Funktionen, das heißt die Reihenfolge und die zeitliche Abhängigkeit, läßt sich mit »Petri-Netzen« darstellen.⁷¹ Der Namensgeber Carl Adam Petri begann mit seiner Dissertation »Kommunikation mit Automaten« im Jahr 1962 eine allgemeine Theorie diskreter Systeme zu entwickeln, die auf den Konzepten der Nebenläufigkeit, der Verteiltheit und der asynchronen Kommunikation aufbaut. Petris Überlegungen wurden ergänzt und verfeinert, so daß inzwischen eine breite Literatur zu diesem Thema existiert. (Vgl. Zuse 1980; Zuse 1982; Reisig 1982; Moldt 1996) So wie Norbert Wiener, Claude E. Shannon (1916-2001), John von

⁷⁰ SAGE ist die Abkürzung für Semi-Automated Ground Environment.

⁷¹ Eine andere Möglichkeit zur Darstellung von Funktionsabläufen bieten die Programmablaufpläne gemäß DIN 66001. Dieses Verfahren ist zwar verbreitet, führt aber bei größeren Systemen zu unübersichtlichen Darstellungen, weil die Syntax keine Möglichkeiten bietet, Verfeinerungen respektive Verallgemeinerungen abzubilden. Diese Darstellungsform ist eine innerhalb der Informatik entwickelte paradigmatische symbolische Verallgemeinerung.

Neumann und andere »frühe« Informatiker, die sich mit dem Thema Kommunikation befaßten, benutzt auch Petri Begriffe aus der technischen Kommunikationstheorie für seine Netztheorie, nämlich »Kanal (channel)«, »Instanz (office)«, »Dokument (document)« und »Fluß (usage)«. (Vgl. Petri 1977, C4). Die mit Hilfe dieser Elemente gebildeten Netze eignen sich allgemein für die Modellierung von Vorgängen, Organisationen⁷² und Geräten, bei denen geregelte Flüsse eine Rolle spielen.

Petri-Netze lassen sich in verschiedensten Anwendungsgebieten einsetzen und die Elemente sind für unterschiedliche Interpretationsebenen offen. So kann von einem Konkretum wie »Verkaufspreis« die Rede sein, aber auch von Begriffen wie »Prädikat«. Die Tabelle zeigt einige Beispiele:

Kanal (channel)	Instanz (office)
Bedingung	Ereignis
Stelle (State)	Transition
Prädikat	Ereignis
Zustand	Übergang
Aussage	Beweis
Reagenz	chemische Reaktion
Sprache	Übersetzer
Material	Produktionsaktivität
Informationskanal	Agentur
Speicher	Prozessor
Lagerbestand	Lagerbewegung
Verkaufspreis	Verkauf
Umsatzhöhe	Verkauf
Lieferbereitschaft	Lieferung
Kassenstand	Auszahlung

Tabelle 11. Beispiele für Elemente eines Petri-Netzes

Petri-Netze sind geeignet, unterschiedliche Arten von Systemen zu konstruieren, die jeweils aus einem Paar von Elementen bestehen:

- Systeme aus Kanälen und Instanzen,
- Systeme aus Bedingungen und Ereignissen,
- Systeme aus Stellen und Transitionen,
- Systeme aus Prädikaten und Ereignissen,
- usw.

⁷² Petri schreibt zum Entwurf einer Organisationstheorie: »Organisation ist wesentlich Kommunikation« (Petri 1977, A2) und stellt dementsprechend ein organisatorisches System in Form eines Kommunikationsgraphen dar.

Mit einem Petri-Netz lassen sich Ablauf und der jeweilige Zustand des Systems nachvollziehen. Zu diesem Zweck werden die Bedingungen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt erfüllt sind, mit einer »Marke« gekennzeichnet. Sind alle Vorbedingungen eines Ereignisses erfüllt, so findet das Ereignis statt und die Nachbedingung wird erfüllt, das heißt markiert.⁷³

Für die Erarbeitung von Petri-Netzen wird in der Praxis folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

Zunächst sind die Bedingungen und Ereignisse des Systems zu definieren und ihre jeweiligen kausalen Zusammenhänge zu fixieren. Das Ergebnis ist eine Liste der »elementaren Prozesse« (jeweils bestehend aus Ereignis und Bedingung). Anschließend sind die elementaren Prozesse zu einem zusammenhängenden Prozeßnetz zu verbinden. Schließlich ist mit Hilfe der »Marken«, unter Einführung der Schaltregel und der Ausgangsmarkierungen, das dynamische Systemverhalten abzubilden. Durch Variation der (Anfangs-) Markierungen kann ein repräsentatives Bild des relevanten oder zu erwartenden Systemverhaltens gewonnen werden. (Vgl. Rosenstengel / Winand 1982)

Da sich mit Petri-Netzen auch die kausalen (Un-)Abhängigkeiten innerhalb einer Menge von Ereignissen darstellen lassen, indem etwa zeitlich unabhängige Ereignisse mit der Relation »nebenläufig« (»parallel«) dargestellt werden, liegt das Hauptanwendungsgebiet der Petri-Netze in der Modellierung paralleler Prozesse oder Ereignisse, zum Beispiel von Informationsverarbeitungs-, Produktions- und Transportsystemen. Auch das dynamische Verhalten komplexer Systeme, zum Beispiel sozio-technischer Systeme wie Unternehmungen, kann mit Hilfe von Petri-Netzen modelliert werden.

⁷³ Ein Musterbeispiel für eine Aufgabe, die mit einem Petri-Netz dargestellt und gelöst werden kann, stellt das »Problem der drei Philosophen« dar: Jeder Philosoph ist entweder mit Essen oder mit Denken beschäftigt. Wenn ein Philosoph Hunger bekommt, dann geht er in einen Speisesaal, in dem ein Tisch und drei Stühle stehen. Auf dem Tisch befinden sich drei Teller und drei Gabeln sowie in der Mitte eine große Schüssel mit Spaghetti. Der Philosoph setzt sich auf einen Stuhl und nimmt die Gabel, die sich auf der linken Seite seines Tellers befindet, in die Hand. Um eine Portion Spaghetti aus der Schüssel auf seinen Teller füllen zu können, benötigt er allerdings eine zweite Gabel. Er versucht also, die rechts von seinem Teller liegende Gabel in die andere Hand zu nehmen. Gelingt ihm das, so kann er sich eine Portion Spaghetti nehmen, diese essen, die Gabeln zurücklegen und den Raum wieder verlassen. Wie unschwer zu erkennen ist, gibt es Konflikte, wenn zu einem Zeitpunkt mehr als ein Philosoph zu den Gabeln greifen will. Die Aufgabe ist, ein Modell zu entwickeln, welches das genannte Verhalten darstellt. Dies kann mit einem Prädikaten-Ereignis-Netz erfolgen. (Vgl. Horowitz 1983, 328ff.; Reisig 1982, 117ff.)

Als Vorteile von Petri-Netzen gelten ihre Einfachheit und ihre Anschaulichkeit. Sie können modular aufgebaut sein, so daß sich verschiedene Abstraktionsebenen darstellen lassen, ohne die Beschreibungssprache zu ändern. Sie sind leicht kommunizierbar und relativ einfach erlernbar. Zudem lassen sie sich hinsichtlich verschiedener Aspekte (Invarianten, Konflikte, Lebendigkeit, Sicherheit, Deadlocks) auswerten. (Vgl. Rosenstengel / Winand 1982)

Die Theorie der Petri-Netze wurde sehr verfeinert, wie die »Rollen-/Funktions-/Aktionsnetze« von Horst Oberquelle (1987)⁷⁴ und der Ansatz von Daniel Moldt (1996), der eine Umsetzung von Datenmodellen (Entity Relationship Diagrams) sowie von Elementen der strukturierten Analyse (Datenflußdiagramme und Funktionenhierarchien) in Petri-Netze vorschlägt, um damit die Vorteile dieser Netze für die Spezifikation von Informationssystemen nutzen zu können, zeigen.

Petri-Netze sind sehr leistungsfähig. Diese Leistungsfähigkeit ist für bestimmte Bereiche informatischen Handelns wichtig und wird genutzt. Denn im Vergleich zu Abbildungen in sequentieller Form ist eine Abbildung im Netz eher geeignet, flexibel und doch geordnet eine Mannigfaltigkeit von Aspekten der Wirklichkeit zu modellieren. (Brauer 1989; Brauer / Brauer 1992) Es zeigt sich jedoch, daß nicht alle Bereiche die Werkzeuge in gleicher Weise oder in gleichem Umfang einsetzen, sondern in dem hier erörterten, kommerziellen Bereich werden vereinfachte Versionen vorgeschlagen und Petri-Netze werden dort, wo sie auftreten, vor allem unter dem Kriterium der einfachen Anwendbarkeit behandelt, wie zum Beispiel die für eine »dynamische Funktionsstrukturanalyse« vorgesehene Notation zur Darstellung

74 Mit RFA-Netzen können drei Ebenen repräsentiert werden:

- a) die *Rollenebene*: in ihr werden Arbeitsaufgaben und ihr Zusammenspiel (einschließlich Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten) modelliert,
- b) die *Funktionsebene*: in ihr werden die Teilaufgaben (Tätigkeiten) und die eingesetzten Ressourcen erfaßt,
- c) die *Aktionsebene*: in ihr werden die dynamischen Aspekte, das heißt der Ablauf der Tätigkeiten, modelliert. Im Aktionsnetz werden sowohl die Kontrollflüsse (Zustandsübergänge), als auch die Datenflüsse (Zugriffe oder Änderungen der Attribute eines Objekts) und die Objektflüsse (Bewegen individueller Objekte von einer Position zur anderen) dargestellt.

Ziel der RFA-Netze ist, eine benutzerorientierte Modellierung zu erreichen. RFA-Netze sind vor allem ein Hilfsmittel zur Beschreibung interaktiver Systeme. Das Besondere an RFA-Netzen ist, daß zusätzlich zur statischen und dynamischen Funktions-sicht die handelnden Personen, ihre Aktionen und Reaktionen, erfaßt werden. Während die meisten anderen Methoden die verschiedenen Aspekte in getrennten Diagrammen darstellen, können diese in RFA-Netzen integriert werden. Da die RFA-Netze auf der Netztheorie basieren, können die Diagramme formal ausgewertet werden. (Vgl. Oberquelle 1987)

und Simulation von Abläufen, bestehend aus Bedingungen, Elementarfunktionen, Auslösern und Verteilern. (EDV Studio Ploenzke 1989) Damit wird von der Möglichkeit, dynamische Aspekte im möglichen Umfang zu modellieren, kein Gebrauch gemacht, sondern diese Möglichkeit wird verschenkt, weil man Unüberschaubarkeit, Unbeherrschbarkeit usw. fürchtet. Unbeherrschbarkeit ist für sich genommen sicherlich kein positiv konnotiertes Kriterium. Die Ambiguität wird deutlich, wenn man sich vor Augen führt, daß Unbeherrschbarkeit für Kommunikationsprozesse einer bürgerlichen Gesellschaft unabdingbar ist, daß sie jedoch gefährlich wird, wenn sachlich oder technisch Risikosysteme einbezogen werden oder betroffen sind.⁷⁵

2.2.12 Hierarchien und Netze für den kommunikativen Aspekt

Für die Darstellung des kommunikativen Aspekts von Funktionen werden sowohl hierarchische als auch netzartige Strukturen benutzt. So basiert die von Tom DeMarco entwickelte und publizierte Methode der »strukturierten Analyse« (SA) auf zwei Konzepten, nämlich der funktionalen Dekomposition (Top-down-Zergliederung) und den Datenflußdiagrammen. (De Marco 1978)

Die Dekomposition entspricht der oben genannten Funktionsstrukturanalyse, denn mit ihr wird eine hierarchische Gliederung der Funktionen vorgenommen. Das Datenflußdiagramm repräsentiert das System als Netzwerk, indem es die Funktionen sowie die Schnittstellen einerseits zwischen den Funktionen und andererseits zur Außenwelt darstellt. Datenflüsse sind die Kanäle für den Informationsfluß zwischen den Funktionen. Die Funktionen transformieren die eingehenden Datenflüsse in die ausgehenden Datenflüsse. Weitere Elemente eines Datenflußdiagramms sind Dateien, in denen vorübergehend Daten gespeichert werden, sowie Datenquellen und Datensinken, das heißt Personen oder Organisationen außerhalb des Systems, die Datenflüsse senden oder empfangen.

Die Funktionen auf unterster Ebene werden »Elementarfunktionen« genannt und mit Hilfe von strukturiertem Text⁷⁶, Entscheidungstabellen oder

⁷⁵ Vgl. die Ausführungen zu Kommunikation und »öffentlicher Meinung« in der entsprechenden Fußnote in Abschnitt 2.2.6.

⁷⁶ Zur Problematik der Verwendung von strukturiertem Text oder Pseudocode siehe Abschnitt 2.2.15.

Entscheidungsbäumen beschrieben. Der strukturierte Text muß Elemente für Sequenzen, Entscheidungen und Wiederholungen enthalten.

Das Vorgehensmodell der strukturierten Analyse sieht acht Schritte vor:

- Zunächst ist der Umfang (Kontext) des Systems zu bestimmen. Dazu gehört die Feststellung der Netzeingänge und der Netzausgänge, das heißt der Schnittstellen (Datenflüsse) zwischen dem System und der Außenwelt. Das Ergebnis dieses Schrittes ist das »Kontextdiagramm«.
- Ausgehend von den ermittelten Datenflüssen sind die Funktionen zu bestimmen. Wenn es innerhalb der Funktionen weitere Datenflüsse gibt, sind die Funktionen zu teilen und weitere Datenflüsse zu zeichnen. Für jeden Datenfluß ist zu fragen: Wie und womit wird dieses Datum erstellt? Damit werden weitere Funktionen erarbeitet.
- Die Datenflüsse sind zu benennen. Jeder Datenfluß sollte einen möglichst aussagekräftigen Namen bekommen. Eine übliche Konvention ist, Namen, die den Begriff »Daten« oder »Informationen« enthalten, wegen ihrer Allgemeingültigkeit zu vermeiden.
- Die Funktionen sind ebenfalls zu benennen. Auch hier sind möglichst aussagekräftige Namen zu verwenden. Es wird empfohlen, die Funktion mit einem Substantiv und einem Verb zu bezeichnen. Die Begriffe »Funktion« oder »Prozeß« sind zu vermeiden.
- Auslöser oder Endbedingungen des Systems sind nicht zu modellieren. Es wird davon ausgegangen, daß das System läuft.
- Auch die Behandlung von trivialen Fehlern wird im Modell nicht dargestellt. Das Modell soll übersichtlich sein und nicht mit Details überfrachtet werden.
- Es ist darauf zu achten, daß Datenflüsse, nicht Kontrollflüsse modelliert werden. Dargestellt werden die für die Verarbeitung, nicht die für die Steuerung des Prozesses benötigten Daten.
- Der letzte Schritt ist die Iteration aller vorangegangenen Schritte. Der erste Entwurf des Modells ist nicht unbedingt der »endgültige«. Die Datenflußdiagramme sind iterativ zu bearbeiten und zu verbessern.

Modellierung ist ein Prozeß, das zu sehen, ist eine Stärke der Methode. Die Datenflußdiagramme lassen sich top down verfeinern, indem – ausgehend vom Kontextdiagramm – »Subsysteme« gebildet werden. Dazu wird eine Funktion eines Datenflußdiagramms in Teilfunktionen gegliedert, wobei darauf zu achten ist, daß die ein- und ausgehenden Datenflüsse der übergeordneten Ebene in der untergeordneten Ebene wiederzufinden sind. Die Teilfunktionen können so numeriert werden, daß erkennbar ist, welche

Teilfunktionen zu welcher übergeordneten Funktion gehören. (Zum Beispiel: Teilfunktionen 1.1. und 1.2. gehören zu Funktion 1.) Lokal verwendete Dateien sind auf der entsprechenden Ebene im Datenflußdiagramm darzustellen. Die Quellen und Senken der Datenflüsse sind auf der detaillierteren Ebene nicht abzubilden, sie sind – um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten – nur im übergeordneten Diagramm dokumentiert.

Auf die Frage, wie weit eine Funktion gegliedert werden soll, läßt sich keine exakte Antwort geben. Eine in der Praxis übliche Empfehlung lautet, daß »sieben plus/minus zwei Teilfunktionen« gebildet werden sollten. Entsprechend dieser pragmatischen Vorgabe erlaubt das CASE-Tool case/4/0 zum Beispiel nur eine Gliederung in bis zu neun Teilfunktionen. Soll eine Funktion in zehn oder mehr Teilfunktionen gegliedert werden, muß eine – eigentlich nicht notwendige – Zwischenebene eingeführt werden. Über die Herkunft der Zahl sieben in diesem Zusammenhang wird in der Fachliteratur kein Wort verloren. Ob sie aus Märchen oder Kabbala stammt oder ob es sich um das psychologische Argument, sieben Elemente seien noch überschaubar, handelt (vgl. Miller 1956), bleibt offen. Auf die Untersuchung der Einflüsse aus diesen Bereichen wird hier verzichtet, obwohl es wahrscheinlich gerade solche Bereiche sind, aus denen viele unexplizierte Paradigmen stammen.

Die Verfeinerung der Datenflußdiagramme erfolgt bis zur Ebene der »Elementarfunktionen«. DeMarco gibt drei Kriterien an, die als Anhaltspunkte für den Grad der Verfeinerung verwendet werden können.

- Die Verfeinerung sollte beendet werden, wenn die Funktion auf circa einer Seite beschrieben werden kann.
- Die Verfeinerung sollte beendet werden, wenn eine Funktion nur noch einen eingehenden und einen ausgehenden Datenfluß besitzt.
- Die Verfeinerung kann beendet werden, wenn eine Funktion einen oder mehrere eingehenden, aber nur noch einen ausgehenden Datenfluß besitzt.

Das erste Kriterium entspricht dem Anspruch nach Übersichtlichkeit und ist als psychologisches interpretierbar. Das zweite und das dritte Kriterium sind technischer Art, sie geben eine Konvention an.

Die bisher beschriebenen Elemente der Methode reichen aus, um Modelle für den kommerziellen Bereich zu erarbeiten, in denen der Auslöser der Prozesse keine wesentliche Rolle spielt. Ein Prozeß wird entweder – implizit – durch das Eintreffen eines Datenflusses oder – explizit – durch

das Erreichen eines Zeitpunktes, der in der Beschreibung der Elementarfunktionen angegeben wird, ausgelöst.

Das Ziel der strukturierten Analyse ist, eine »strukturierte Spezifikation« des zu modellierenden Ausschnitts der Welt zu erzeugen. Das Besondere an diesem Verfahren ist die Betonung der Datenflüsse als Ausgangspunkt der Modellierung, an dem sich alles andere orientiert. Da die strukturierte Analyse eine Methode zur Zerlegung von Funktionen ist, wird in der Regel top down vorgegangen. Um die Anschaulichkeit des Modells zu erhöhen, enthält die Methode viele graphische Elemente. Die Sprachelemente sind allerdings weit von der Erfahrungswelt der Anwender von Informationssystemen entfernt, weil diese nicht in Datenflüssen, sondern in Abläufen (Prozessen) denken, das heißt, die Reihenfolge, in der Aktivitäten oder Funktionen ausgeführt werden, ist dem Benutzer »näher« als der Zusammenhang zwischen den Datenströmen und den Aktivitäten oder Funktionen, in die diese eingehen oder aus denen sie kommen. Bestimmte Aspekte von Aufgaben, die zum Teil subjektiv sind, zum Beispiel wie wichtig, wie zeitintensiv, wie angenehm sie sind oder wie häufig sie auftreten, können mit der Methode nicht dargestellt werden. Die Anwender abstrahieren oft von den Merkmalen, die zur Beschreibung von Anforderungen an Informationssysteme notwendig sind wie zum Beispiel Datenträger, Zeitaspekte, Quantitätsaspekte. Dies gilt generell, nicht nur im Zusammenhang mit der strukturierten Analyse.

Für technische Anwendungen, die nicht nur auf externe Ereignisse reagieren, sondern die ihre Umgebung kontrollieren, reicht der bisher vorgestellte Ansatz nicht aus, weil in ihm keine Funktionsabläufe vorkommen. Mit der Erweiterung um Kontrollflüsse und andere Komponenten, wie Zustandsdiagramme, Zustandsmatrizen, Prozeßaktivierungstabellen, werden aber auch Hilfsmittel formuliert, um den dynamischen Aspekt von Funktionen darzustellen. Diese erweiterte Fassung der strukturierten Analyse wird als Real-Time-Analyse (RT) bezeichnet. Kontrollflüsse dienen zur Darstellung von Mechanismen zur Auslösung von Prozessen. Sie enthalten Nachrichten über externe Ereignisse oder intern erkannte Bedingungen, die den Folgeprozeß aktivieren. In technischen Anwendungen hat der dynamische Aspekt Vorrang vor dem kommunikativen Aspekt von Funktionen.

Zum Vergleich von Daten- und Kontrollflüssen seien hier einige Eigenschaften gegenübergestellt:

	Datenflüsse	Kontrollflüsse
Zweck	werden verarbeitet	steuern die Verarbeitung
enthalten Informatio- nen für	Prozesse, Speicher, Terminatoren (externe Partner)	die Ablaufsteuerung
dargestellt in	Data Flow Diagrams (DFDs)	Control Flow Diagrams (CFDs)
Art der Verarbeitung	Berechnungen, Algorithmen	Entscheidungsprozesse auf höherer Ebene, Bestimmung der Betriebsart, Aktivierung / Deaktivierung

Tabelle 12. Eigenschaften von Daten- und Kontrollflüssen

Für die Modellierung des statischen, des dynamischen und des kommunikativen Aspekts von Funktionen werden also zwei Darstellungsformen verwendet: Hierarchie und Netz, wobei in der Praxis die hierarchische Gliederung oder Zerlegung von Funktionen eher als »akademisch« angesehen wird. Für Mitarbeiter von Abteilungen, die die fachlichen Inhalte für die Modellierung liefern sollen, ist diese Analyse schwieriger nachzuvollziehen als die Modellierung von Funktionen in reduzierten Netzen, zum Beispiel zur Darstellung der geschäftlichen Abläufe. Das Wiedergeben von Abläufen (»erst wird das gemacht, dann das, dann das«) ist den Vorstellungen der Handelnden offenbar näher als das vom Ablauf unabhängige Analysieren (Zerlegen oder Gliedern auf verschiedenen Detaillierungsstufen). Hier entsteht oft ein Kommunikationsproblem. Mitarbeiter aus Fachabteilungen und Analytiker reden aneinander vorbei, mit der Konsequenz, daß das Ergebnis der Modellierung immer von Neuem diskutiert wird. Inhalt solcher Diskussionen ist, bis zu welcher Ebene modelliert werden soll und ob das Modell wirklich schon »richtig« sei. Die Annahme, es gäbe ein und nur ein »richtiges« Modell, wird durch die Angabe der oben genannten Entwurfsgrundsätze, die ein formales Vorgehen bei der Modellierung versprechen, eher gefördert als in Frage gestellt.

Da die Analyse und damit das Zerlegen und Gliedern in hierarchische Strukturen ein wichtiger Schritt zur Schaffung eines Überblicks über das zu modellierende Gebiet ist, wird sie ebenso benötigt wie die Beschreibung der Abläufe (in netzartigen Strukturen). Ein Problem besteht darin, daß die beiden Modellformen nicht »auf einen Blick« in Verbindung zu bringen sind, was unter anderem daran liegt, daß einige Funktionen in den Netzen redundant vorkommen, während sie in den Hierarchien nur einmal dargestellt werden. In der Praxis wird ein »Abgleich der Modelle« gefordert, das heißt, folgende Prüfungen sollen durchgeführt werden: Sind die Funktionen des

Datenflusses im Funktionenbaum enthalten? Sind die Funktionen des Baumes in den Datenflüssen enthalten? Sind die Daten des Datenflusses im Datenmodell enthalten? Sind die Daten des Datenmodells in den Datenflüssen enthalten? Da es sich um syntaktische Prüfungen handelt, können sie durch CASE-Tools unterstützt werden.

2.2.13 Handlungsorientierung und Machbarkeit

Eine der Grundannahmen für die Modellierung ist – nicht nur in der Informatik – die Vorstellung, man könne einen Gegenstand durch die Modellierung handhabbar und damit beherrschbar machen. Diese Annahme basiert auf zwei Aspekten. Zum einen auf der »Abbildbarkeit«. Ein Modell als Abbild zu verstehen, geht auf die platonischen »Ideen« zurück. Sie sind Abbilder der Wirklichkeit, die selbst nicht erkannt werden kann, sondern nur mittels der Ideen. (Platon, Politeia 514a-517a) Heutige Abbildvorstellungen können sich allerdings nur naiv auf Platon beziehen, denn sie kommen nicht umhin, den Aspekt der »Machbarkeit« einzubeziehen. Dieser Aspekt wurde explizit von Thomas Hobbes (1588-1679) formuliert, der wissenschaftliches Denken als Erzeugen verstand und damit der platonischen Auffassung, daß die Ideen geschaut, nicht aber erzeugt würden, widersprach.

Diese Auffassung führt bei Hobbes zu einer Unterscheidung der in den Bereich der Wissenschaften fallenden Gegenstände und der aus ihnen ausgeschlossenen. Was Hobbes in »De Corpore« (1655) formuliert, ist nicht nur für die Frühe Neuzeit von Bedeutung. Der programmatische Charakter dieses Konzepts wirkt bis in die Gegenwart.⁷⁷ Bei Hobbes heißt es:

Gegenstand der Philosophie und Materie, mit der sie sich befaßt, ist ein jeder Körper, bei dem sich irgendeine Erzeugungsweise begreifen und mit dem sich, wenn man ihn unter einem bestimmten Gesichtspunkt betrachtet, eine Vergleichung vornehmen läßt; oder alles, bei dem Zusammensetzung und Zergliederung statthat, also jeder Körper, bei dem sich verstehen läßt, daß er erzeugt wird oder irgendwelche Eigenschaften hat.

Das läßt sich aber unmittelbar aus der Definition der Philosophie ableiten, deren Aufgabe es ist, entweder die Eigenschaften im Ausgang von ihrer Erzeugungsweise oder eine Erzeugungsweise im Ausgang

⁷⁷ Vergleiche Kapitel 4 über den Logischen Empirismus.

von den Eigenschaften zu ermitteln. Wo es also keine Erzeugungsweise oder keine Eigenschaften gibt, da ist auch keine Philosophie denkbar. Daher schließt die Philosophie die Theologie aus sich aus, ich meine die Lehre von der Natur und den Attributen Gottes, des Ewigen, keiner Entstehung Fähigen, Unbegreiflichen, an dem überdies keine Zusammensetzung und Teilung vornehmbar und keine Erzeugungsweise vorstellbar ist.

Sie schließt die Lehre von den Engeln aus sowie von allem, was weder als Körper noch als Beschaffenheit von Körpern angesehen wird. Denn darin findet weder Zusammensetzung noch Teilung statt, da es darin kein Mehr oder Weniger gibt, also kein Schlußfolgern dabei statthat.

Sie schließt sowohl die Natur- als auch die politische Geschichte aus, obwohl sie für die Philosophie höchst nützlich, ja unentbehrlich sind, weil diese Art von Erkenntnis entweder Erfahrung ist oder Autorität, nicht aber Schlußfolgerung.

Sie schließt jedes Wissen aus, das aus göttlicher Eingebung oder Offenbarung stammt, da es nicht mittels Vernunftgebrauch gewonnen, sondern durch göttliche Gnade und als Werk des Augenblicks (gewissermaßen als eine Art übernatürlicher Sinneswahrnehmung) gewährt wird.

Sie schließt nicht nur jede verkehrte, sondern auch jede schlecht begründete Lehre aus. Denn was man durch richtige Schlußfolgerung erkennt, kann nicht verkehrt oder unsicher sein. Daher ist jene Art von Astrologie ausgeschlossen, mit der man heutzutage großtut, und alles Sonstige dergleichen, das eher Wahrsagerei als Wissenschaft ist. Schließlich ist von der Philosophie die Lehre von der Verehrung Gottes ausgeschlossen, da man das diesbezügliche Wissen nicht aus der natürlichen Vernunft, sondern der Autorität der Kirche zu entnehmen hat, und sie nicht Sache der Wissenschaft, sondern des Glaubens ist. (Hobbes 1655, I, 8)

Der Anspruch des Erkennens durch Erzeugen wurde zu einem der Paradigmen der modernen Wissenschaft und wird von Ernst Bloch (1885-1977) wiedergegeben als: »Wir können nur insofern und insoweit einen Gegenstand erkennen, als wir ihn selbst erzeugt haben.« (Bloch 1972, 143) oder von Gotthard Günther (1900-1984) als: »Der Mensch versteht nur das, was

er macht.« (Günther 1957, 199)⁷⁸ Neben die – kontemplative – Abbildung tritt also die prozessuale Herstellung des Modells. Diese Vorstellung des Erzeugens bei Hobbes fällt zeitlich mit der protoindustriellen Produktion zusammen. Anders als in der Adelsgesellschaft wird die Arbeit, das Machen, das Produzieren in der bürgerlichen Gesellschaft anerkannt und wird auch für das Denken als Werkzeug, mit dem die Welt erschlossen werden kann, verstanden. (Vgl. Bloch 1972, 141ff.) Die heutige Vorstellung eines Modells als »Abbild« umfaßt die Vorstellung des »Erzeugens«. Sie ist dementsprechend nicht unmittelbar und ausschließlich auf die platonische Ideenlehre zurückzuführen, sondern enthält auch den Aspekt der »Handlungsorientierung«.

Eines der Paradigmen der Informatik ist die »Herstellbarkeit« oder die »Machbarkeit« eines Modells, wobei angenommen wird, daß mit der Herstellung nicht nur das Modell, sondern auch das Original »verstanden« werden könne. Wie im Fall der »Modelle im Maßstab 1:1«⁷⁹ wird allerdings auch hier unterschätzt, daß es sich bei einem Informationssystem um eine virtuelle Welt handelt, die dem Original nur nach Maßgabe der eingangs des Kapitels entwickelten Regeln und Limitationen von Modellen entspricht.

2.2.14 Sprachliche Beschreibung und maschinelle Ausführung

Die Modelle der Informatik haben eine Besonderheit. Sie sind nicht nur Beschreibungen von Weltausschnitten, sondern diese Beschreibungen werden als Vorlage für die Ausführung von Prozessen im Computer verwendet. Es stellt sich die Frage, warum eine solche Beschreibung als Vorlage für die

⁷⁸ Vgl. auch Kapitel 5. Erwähnt sei an dieser Stelle, daß Giambattista Vico (1668-1744) Hobbes' Grundsatz auf die Geschichte übertrug. In »Die neue Wissenschaft über die gemeinschaftliche Natur der Völker« kritisiert Vico die bisherige Geschichtsschreibung und schreibt, er wolle so beginnen, als ob es keine Bücher über die Geschichte gäbe. (Vergleiche Descartes' grundsätzlichen Zweifel.) Trotzdem erscheine »in dieser Nacht vollen Schatten [...] das ewige Licht, das nicht untergeht, von der Wahrheit, die man in keiner Weise in Zweifel ziehen kann: daß diese historische Welt ganz gewiß von Menschen gemacht worden ist; und darum können (denn sie müssen) in den Modifikationen unseres eigenen menschlichen Geistes ihre Prinzipien aufgefunden werden. Dieser Umstand muß jeden, der ihn bedenkt, mit Erstaunen erfüllen: wie alle Philosophen voll Ernst sich bemüht haben, die Wissenschaft von der Welt der Natur zu erringen; welche, da Gott sie geschaffen hat, von ihm allein erkannt wird; und vernachlässigt haben, nachzudenken über die Welt der Nationen, oder historische Welt, die die Menschen erkennen können, weil sie die Menschen geschaffen haben.« (Vico 1744, 51f.)

⁷⁹ Vergleiche die Fußnote zu »Modellen im Maßstab 1:1« in Kapitel 2.

Ausführung angesehen wird oder werden kann. Und es ist zu fragen, ob es aufgrund der Dualität eine Unschärfe gibt. Findet hier eine Verwechslung statt oder werden Beschreibung und Ausführung als parallel oder sogar als identisch betrachtet?

Die Annahme, es handele sich um ein und dasselbe, wird dadurch gefördert, daß beispielsweise im Bereich von Datenbanken nur inhaltliche Informationen in Datenbanksystemen abgelegt werden sollen. So scheint die Datenbank selbst frei von systemtechnischen Informationen (Pointer, Indizes) zu sein, was tatsächlich nicht der Fall ist, da Indizes und weitere, für die Zugriffsoptimierung nötige und sinnvolle Informationen in der Datenbank enthalten sind. Sie sind nur nicht für den Benutzer offensichtlich.⁸⁰

Dieser Punkt betrifft auch die Interpretation und die Leistungsfähigkeit von Modellen. Die Annahme, die Ausführung eines Prozesses (im Computer) entspräche 1:1 der Beschreibung des Prozesses, enthält zugleich die Annahme der Beherrschung des Prozesses, weil die Beschreibung von Menschen gemacht wurde und insofern beherrscht wird. Wenn hier nicht deutlich zwischen den Bereichen unterschieden wird, besteht das Risiko einer Verwechslung zwischen Beschreibung und Prozeß. Die Beherrschung der Beschreibung ist nicht identisch mit der Beherrschung des Prozesses. Es gilt das, was Brunnstein und Fischer-Hübner formuliert haben: Zu unterscheiden sind die Beschreibung der Anforderungen einer antizipierten Realität R_{TF} , die Spezifikation des formalen Modells $M_{TS}(R_{TF})$, die Implementation des formalen Modells $I_{TI}(M_{TS}(R_{TF}))$. Und kritisch zu hinterfragen ist die Annahme, daß sich das implementierte Modell (nach der Zeit der Implementation, das heißt $T > TI$) genau so verhalten wird wie die antizipierte Realität. $I_{TI}(M_{TS}(R_{TF})) \sim R_{TF}$. (Brunnstein / Fischer-Hübner, 1990)⁸¹

Eine Verwechslung ist weiterhin möglich zwischen der Beschreibung und den veränderlichen Tatsachen der empirischen Welt. Das, was in der »virtuellen Welt« passiert, läuft nicht unbedingt parallel zu dem, was in der »Realität« passiert. Selbst wenn der Prozeß beherrscht werden würde, was nach dem oben Gesagten nicht angenommen werden kann, so sichert dies nicht die Parallelität der Verläufe.

Ein Risiko besteht darin, das, was in der »virtuellen Welt« liegt, für »wahrer«, »echter«, »realer« zu halten als die »Realität«. Diese Verwechslung tritt augenscheinlich bereits in überschaubaren Situationen ein, wie das folgende Beispiel zeigt: Auf einem Segeltörn auf der Ostsee, in einem Fahrwasser der

⁸⁰ Vgl. Abschnitt 2.2.8 zum Ökonomieprinzip.

⁸¹ Vgl. Abschnitt 2.2.5 zur Zeitunabhängigkeit.

Wismarbucht, wurde der Rudergänger vom Navigator aufgefordert, den Kurs so zu ändern, daß das Schiff außerhalb des Fahrwassers und damit in flaches, nicht passierbares Wasser geraten wäre. Diese Aufforderung erfolgte, weil der Navigator, der sich ohne Außensicht unter Deck befand, aufgrund der Positionsanzeige eines GPS-Gerätes davon überzeugt war, daß sich das Schiff tatsächlich außerhalb des Fahrwassers befinden würde und deshalb eine Kurskorrektur notwendig sei. Die Ablehnung des Rudergängers, den Kurs zu ändern, da er mehrere Seezeichen in Sicht habe und sich ohne Zweifel innerhalb des Fahrwassers befinde, wurde erst akzeptiert, nachdem der Navigator schließlich an Deck gekommen war und die Situation in Augenschein genommen hatte. Die zutage getretene Diskrepanz wurde dann zunächst als fehlerhafte Satellitenposition bewertet, bis sich herausstellte, daß die Anzeige durchaus korrekt war, nicht aber ihre Interpretation. Der Navigator hatte kurz zuvor die Seekarte gewechselt. Bis dahin war es deren Maßstab angemessen, die beiden letzten der drei angezeigten Nachkommastellen nicht zu beachten, der Maßstab der neuen Karte hätte dies aber erfordert, was unberücksichtigt blieb. Fehler nach dem AEGIS-Muster scheinen nicht außergewöhnlich zu sein.

Erst recht gilt dies für unüberschaubare Situationen wie im Fall des durch AEGIS (mit)verursachten Abschusses des iranischen Airbus. Hier liegt die Verwechslung im System, das – schon wegen der Geschwindigkeit, mit der zu entscheiden ist – nicht mehr zuläßt, außerhalb des Systems zu entscheiden. Mit der Entwicklung solcher nicht mehr handhabbarer Systeme werden Risiken eingegangen, von denen angenommen wird, daß sie nicht eintreffen, weil der Benutzer sich auf die Entscheidungen des Rechners verläßt.

Die Annahme, man könne sich auf erhöhte Risiken einlassen, weil eine 1:1-Beziehung zwischen Realität und Rechner vorausgesetzt wird, ist kritisch zu betrachten, zumindest ist bei so komplexen (Computer-)Systemen wie AEGIS mit »Gefahren zweiter Ordnung« zu rechnen. Von Gefahren zweiter Ordnung ist dann zu sprechen, »wenn bestimmte Risikohandlungen und -systeme zeitlich, sozial und/oder sachlich versetzte Nebenfolgen haben, die den Rahmen der im System »zugelassenen« Ereignisse soweit transzendieren, daß das zugrundeliegende Risikokalkül gesprengt und gleichsam die »Geschäftsgrundlage« verändert wird. Gefahren zweiter Ordnung sind transformierte Risiken, die in dem Maße sichtbar werden, wie die Ergebnisse eines Risikosystems nicht nur die Grenzen dieses Systems außer Kraft

setzen, sondern zu einer neuen Ausgangslage führen, die nicht mehr als Risikolage beschreibbar ist.« (Bonß 1995, 80)

Risikohandlungen und -systeme wie AEGIS sind wegen ihrer Komplexität nicht mehr beherrschbar und ihre Folgen können in einer verselbständigten Form auf Entscheider und Betroffene zurückschlagen. Insofern sind solche unüberschaubaren Systeme wieder als Gefahr zu verstehen, und zwar im genannten Sinne einer Gefahr zweiter Ordnung.

2.2.15 Sequentielles und iteratives Vorgehen

In der Softwaretechnik wird für die Zeitspanne, in der ein Informationssystem entsteht, genutzt und schließlich ersetzt wird, der Begriff »Software-Lebenszyklus« verwendet. (Vgl. Nagl 1990) Für die Phase der Entstehung der Software werden zwei Vorgehensmodelle unterschieden. Zum einen gibt es das »Wasserfallmodell«, das davon ausgeht, daß die Phasen der Softwareentwicklung sequentiell, beginnend mit der Anforderungsanalyse über das Fachkonzept zum DV-Konzept und weiter zur Realisierung und zum Test, durchlaufen werden. (Die Begriffe und Abgrenzungen der Phasen unterscheiden sich je nach Verfasser leicht, was hierfür keine Rolle spielt.)

In der ersten Phase wird ein *Fachkonzept* erarbeitet, das aus einem Datenmodell und einem Funktionenmodell besteht, die beide graphisch dargestellt und um nicht formalisierte Texte ergänzt werden. Diese Modelle werden oft mit Hilfe von CASE-Tools, die intern formale Integritätsprüfungen durchführen und so bestimmte Redundanzen und Inkonsistenzen zu vermeiden helfen, dokumentiert. Da die Prüfungen nur auf formale Fehler stoßen und in den Beschreibungen jeder Text, so inkonsistent er auch sei, enthalten sein kann, ist eine inhaltliche Qualitätssicherung gemeinsam mit den zukünftigen Benutzern des Systems unabdingbar. Ziel ist, die fachlichen Inhalte des geplanten Informationssystems so zu beschreiben, daß der Benutzer die Modelle lesen, verstehen und gegebenenfalls korrigieren lassen kann. In der Praxis wird manchmal schon in dieser Phase eine so weitgehende Formalisierung (zum Beispiel durch Einsatz von Pseudocode) vorgenommen, daß das Modell von den Benutzern nicht verstanden wird. Die Kommunikation darüber, ob das Modell die fachlichen Anforderungen angemessen repräsentiert, endet so in Mißverständnissen und das ursprüngli-

che Ziel wird nicht erreicht.⁸² Getrennt von der Beantwortung der Frage, ob die Formalisierung verstanden wird oder nicht, ist die Formalisierung selbst dahingehend zu untersuchen, ob sie funktioniert oder nicht, das heißt, ob sie entsprechend den Intentionen angemessen ist oder nicht. Beide Fragen werden in Projekten selten diskutiert.

In der nächsten Phase der Entwicklung eines Informationssystems wird ein *DV-Konzept* mit Datenbank- und Modulentwurf erarbeitet. Auch diese Entwürfe werden oft graphisch dargestellt. Anstelle der Texte treten nun – öfter als im Fachkonzept – Angaben in Pseudocode, also in einer Sprache, die formale Strukturen nicht symbolisch, sondern verbal ausdrückt (zum Beispiel »Wenn a, dann b, sonst c«) und die natürlich-sprachliche Strukturen, also beliebige Prosatexte für die Variablen a, b, c enthält. Zusage der Vorgehensregeln für diese Stufe brauchen diese Konzepte nicht mehr mit dem späteren Benutzer abgestimmt zu werden, deshalb sei eine fortgeschrittene Formalisierung hier weniger problematisch.

In der dritten Phase, der *Realisierung*, werden die Daten- und Funktionsstrukturen in eine Programmiersprache umgesetzt, also in eine weitere Formalisierungsstufe. Da im DV-Konzept die Strukturierung der Programme im wesentlichen schon festgelegt wird, ist eventuell vorhandener Pseudocode nur noch mehr oder weniger 1:1 in Programmcode zu übertragen.

Zum anderen gibt es das »Spiralmodell«, das eine iterative oder evolutionäre Vorgehensweise darstellt und mit dem Aufkommen der Objektorientierung an Gewicht gewonnen hat. Eine klare Abgrenzung zwischen den Phasen ist nicht mehr vorhanden, vielmehr wird zunächst ein Prototyp des zukünftigen Systems erstellt, der den Benutzern präsentiert wird, die ihre Wünsche und Anforderungen äußern können. Diese Anforderungen werden wiederum in den Prototypen implementiert, so daß sich nach mehreren Durchgängen das Gesamtsystem ergibt.⁸³

⁸² Diese Ansicht vertritt auch Bettina Schewe (1996), die für ihre »objektorientierte Methode für den Entwurf datenintensiver Dialoganwendungen (OMEDA)« eine Syntax für formale Klassenbeschreibungen entwickelt. Sie schreibt, daß Datenmodelle mit Beschreibungen der Elemente sowie Maskenlayouts mit erläuternden Kommentaren, aber auch Entscheidungstabellen im allgemeinen verständlich seien, während stark strukturierte Texte »aber durchaus Probleme« (Schewe 1996, 85) machen, und äußert in einer Anmerkung zu einem Beispiel für einen solchen strukturierten Text: »Das Beispiel ist ziemlich kompliziert, [...]. Zur Kommunikation mit dem Benutzer eignet sich die mit Beispieldaten gefüllte Maske weit besser als die Operation selbst. Sie reicht zur Abstimmung der fachlichen Inhalte vollständig aus.« (Schewe 1996, 119)

⁸³ Vgl. Barry W. Boehm 1988. Boehm behauptet: »The major distinguishing feature of the spiral model is that it creates a *risk-driven* approach to the software process rather than a

Je nach Aufgabenstellung, Projektgröße, Erfahrung der Projektmitglieder usw. wird eine der Methoden gewählt. Beide enthalten eine Reihe von Risiken:

Das Wasserfallmodell weist mehrere Defizite auf: Erstens erhält die Fachkonzeptphase einen hohen Stellenwert. Paul Abrahams (1988, 480f.) hat festgestellt, daß dieses Vorgehensmodell, das aus dem militärischen Bereich stammt, in dem die Softwareerstellung stark in Einzelschritte zerlegt ist, dazu führt, »unrealistische« Anforderungen zu formulieren, und zwar in dem Sinne, daß auf die spätere Realisierung der Anforderungen keine Rücksicht genommen wird. Zweitens ist fraglich, ob der Zwischenschritt der Beschreibung in Pseudocode überhaupt sinnvoll ist. Für den Programmierer ist Pseudocode nicht nötig, während der Benutzer in der Fachabteilung umgekehrt nicht versteht, daß hier ein logisch strukturierter Vorgang, den er vielmehr als konventionell geregelten Vorgang begreift, natursprachennah präsentiert wird. Drittens kann aufgrund der Dauer der Modellierung eine erhebliche Diskrepanz zwischen dem zu Modellierenden und dem Modellierten entstehen. Das Modell bezieht sich dann nicht mehr auf die aktuelle Welt, sondern auf die Welt von gestern. Hier tritt das von Brunnstein und Fischer-Hübner (1990) formulierte Problem in der Praxis ein.⁸⁴ Oder die Modellierung endet nie, da immer wieder neue Aspekte, Gesetzesänderungen, betriebliche Änderungen in die Konzepte aufgenommen werden müssen. Da diese (gemäß der Theorie) erst abgeschlossen sein müssen, bevor die Programme realisiert werden, ist die Wahrscheinlichkeit, überhaupt fertig zu werden, umso geringer, je länger ein Projekt dauert.

Das iterative Vorgehensmodell birgt das Risiko, daß das System unübersichtlich wird, weil ausgehend von einem kleinen Ausschnitt des gesamten Modells, dem Prototypen, das gesamte System entwickelt wird. Wenn die Struktur des Prototypen für den Rest des Systems nicht mehr angemessen ist und dennoch, zum Beispiel, weil schon viel Geld für den Prototypen

primarily *document-driven* or *code-driven* process.« (Boehm 1988, 61, Hervorhebungen im Original.) In jeder Runde in der Spirale wird geprüft, welche Risiken auftreten und wie diese behoben werden können, zum Beispiel könnte, nachdem der Softwareentwicklungsplan aufgestellt wurde, festgestellt werden, daß das System benutzerunfreundlich sein könnte. Dieses Risiko könnte dann durch Benutzerbeteiligung verringert werden. In diesem Zusammenhang erweist sich die Komponente »Prototyping«, die im Spiralmodell mehrfach vorkommt, als vorteilhaft. (Boehm 1988, 68) Der »Streit« darüber, ob die Softwareentwicklung sequentiell (Wasserfallmodell) oder iterativ (Spiralmodell) erfolgen soll, ist eine Variation der seit der Antike und besonders seit der Renaissance immer neu diskutierten Frage nach dem Ablauf der Geschichte. Ist die Geschichte etwas Lineares oder etwas Kreisförmiges? (Vgl. Vico 1744)

⁸⁴ Vgl. Abschnitt 2.2.5.

ausgegeben wurde, auf diesem aufgebaut wird, entsteht ein unübersichtliches, mit Ad-hoc-Lösungen versehenes System. Unter den ökonomischen und personalpolitischen Restriktionen von Unternehmen ist der manchmal anzuratende »Mut zum Wegwerfen« wenig verbreitet. Andererseits enthält das iterative Vorgehen die Chance, daß das Modell näher an den Tatsachen bleibt, da es immer wieder an ihnen gemessen wird.

2.2.16 Kontextfreiheit von Modellen

Ein Informationssystem kann als Zeichensystem verstanden werden, das – allgemein betrachtet – aus Elementen und Regeln besteht. Die Regeln besagen, wie die Elemente miteinander verknüpft werden dürfen, das heißt in welchem Verhältnis die Zeichen untereinander stehen. Diese Regeln sind die *Syntax* des Zeichensystems. Jedes Zeichensystem enthält neben einer Syntax auch eine Semantik und eine Pragmatik. Die *Semantik* beschreibt den Zusammenhang zwischen den Zeichen und den Gegenständen, die diese Zeichen repräsentieren, indem sie den »Aussagen« im Zeichensystem Wahrheitswerte zuordnet. Die *Pragmatik* klärt darüber hinaus, welche Beziehung zwischen Zeichen und Interpreten besteht, und umfaßt damit den Kontext.⁸⁵

Historisch gesehen hat man sich zunächst mit der Syntax eines Zeichensystems beschäftigt. Später sind Aspekte der Semantik hinzugekommen. Schließlich wurde erkannt, daß Syntax und Semantik nicht ausreichen, sondern daß zu einem Zeichensystem immer auch Aspekte der Pragmatik gehören. (Vgl. Morris 1946; Austin 1962) Von dieser historischen Entwicklung ist jedoch das faktische Auftreten dieser Aspekte in wirklichen Sätzen zu unterscheiden. In diesem Zusammenhang zeigen die Sprechakttheorie und die konstruktivistische Wissenschaftstheorie, daß die Aspekte nicht in der genannten Abfolge erscheinen, sondern daß die Pragmatik immer als erstes vorhanden ist und daß dann gleichzeitig Syntax und Semantik auftreten. (Vgl. Stachowiak 1973; Stachowiak 1989)

⁸⁵ Diese drei Aspekte von Zeichensystemen wurden von Charles W. Morris (1903-1979) (1946) formuliert. In der Informatik wird allerdings weniger auf Morris als auf John L. Austin (1911-1960) Bezug genommen, der – wie Wittgenstein oder auch Searle – betont, daß jemand, der spricht, eine sprachliche Handlung vollführt. (Vgl. Austin 1962, Wittgenstein 1945, Searle 1969)

Trotz dieser Erkenntnisse und obwohl in der Literatur zur Modellierung auch auf pragmatische Aspekte (Intention, Zeit usw.) hingewiesen wird⁸⁶, beschränkt sich die Softwaretechnik bei der Modellierung auf Syntax und Semantik, während sie – im Sinne eines cartesianischen Rationalismus – den pragmatischen Aspekt mehr oder weniger ignoriert. In den Abschnitten zur Datenmodellierung und zur Funktionenmodellierung wurde gezeigt, daß Informationssysteme nie kontextfrei sind, die Modelle könnten in anderen Kontexten andere Bedingungen enthalten und sie können für viele Anwendungsfälle ausreichend sein, für andere nicht.

So ist es beispielsweise nicht möglich, eine vollautomatische Umsetzung von Datenstrukturen von sequentiellen oder hierarchischen Strukturen in relationale Strukturen vorzunehmen. Denn in vielen Fällen sind in den Datenamen oder Feldnamen Inhalte »verschlüsselt«, die von einem Programm nicht »erkannt« oder »übersetzt« werden können. Homonyme und Synonyme kommen häufig vor, so daß es unbedingt notwendig ist, die Strukturen vor einer Migration zu analysieren und individuelle Konvertierungsregeln aufzustellen. Diese Regeln können dann programmiert werden und mit einem solchen Programm kann eine Migration durchgeführt werden. (Vgl. Clasen 1992)⁸⁷

Ein Risiko, das mit der Annahme der Kontextfreiheit verbunden ist, liegt in der Reduktion, die in dreifacher Hinsicht stattfindet: erstens in der Annahme der Kontextfreiheit selbst, zweitens in der Beschränkung des Modells auf einen Kontext und drittens in der Übertragung der Ergebnisse dieses begrenzten Informationssystems auf die Welt, mit der Konsequenz, daß Modell und Welt gleichgesetzt werden.

2.2.17 Korrektheit und Verifizierbarkeit

Genauigkeitsprobleme bei Berechnungen waren bereits in der Entstehungsphase der Informatik ein Untersuchungsgegenstand, weil die technisch bedingten Fehler von Analogrechnern Korrekturen erforderten. Für das Problem eine allgemeine Lösung zu finden, war ein Thema, mit dem sich John von Neumann intensiv beschäftigte. Für ihn waren Fehler im

⁸⁶ Vgl. Abschnitt 2.2.2

⁸⁷ Meine Erfahrungen in zwei Migrationsprojekten (1995-1997 und 1999-2002) bei einer Tochtergesellschaft einer Schweizer Bank sowie in einem Migrationsprojekt bei einer deutschen Leasingfirma (2003-2005) haben dies bestätigt.

technischen System möglich (und oft genug vorhanden) und letztlich nur durch menschliche Intervention behebbar. Die Anforderung der Korrektheit war vor diesem Hintergrund auch im Hinblick auf das neue Artefakt Computer von Anfang an präsent. Wenn heute nach dem Paradigma der Korrektheit gehandelt wird, dann wird vergessen, daß aufgrund der jetzt vorhandenen Geschwindigkeiten der Computer und der Komplexität der Systeme die Fehlerfreiheit nicht mehr wie damals – durch »Nachrechnen« – feststellbar ist.⁸⁸ Die Entscheidungen, die das Informationssystem in der Zwischenzeit trifft und auf die Welt überträgt, sind nicht einholbar. Hier gilt für Informationssysteme dasselbe wie für andere Systeme einer bestimmten Größe und Komplexität: sie sind prinzipiell nicht mehr überschaubar aufgrund der Anzahl der Elemente, Beziehungen und Regeln in ihnen. Es ist ja gerade das Ziel, mit diesen Systemen mehr Elemente handhaben zu können, als ohne sie möglich wäre. Insofern gibt es einen qualitativen Wechsel zwischen den ursprünglichen Rechenmaschinen und den heutigen Computern. Das Paradigma der Korrektheit erweist sich dabei als nicht mehr angemessen, denn die damals damit verbundene Annahme, Korrektheit verifizieren zu können, läßt sich nicht halten.

1972 schrieb Dijkstra kritisch zum Thema »Korrektheit großer Programmsysteme«:

Recalling that our true concern is with really large programs, we observe as an aside that the size itself requires a high confidence level for the individual program components. If the chance of correctness of an individual component equals p , the chance of correctness of a whole program, composed of N such components, is something like $P = p^N$.

As N will be very large, p should be very, very close to 1 if we desire P to differ significantly from zero! (Dijkstra 1972, 5, Hervorhebungen im Original)

Manfred Nagl führt die Rechnung für die Werte $N = 10$ und 100 sowie $p = 0.9$ und 0.99 durch und bewertet die Ergebnisse:

⁸⁸ Zu bedenken ist auch, daß beim historischen Beispiel eher vor- als nachgerechnet wurde. Von Neumann setzte beim Los-Alamos-Projekt den Computer vor allem zur Überprüfung von Rechnungen ein, darüberhinaus besaß er bekanntlich eine geradezu erstaunliche Rechenfertigkeit.

N	p	$P = p^N$
10	0.99	0.9
10	0.9	0.35
100	0.99	0.37
100	0.9	0.000027

Die Ergebnisse sind erschreckend! Selbst bei der in der Praxis verhältnismäßig kleinen Zahl von 100 Modulen und der ziemlich hoch angesetzten Wahrscheinlichkeit der Korrektheit jedes Moduls mit 90% ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von 0,027 Promille. Die *Schlußfolgerung* hieraus kann nur lauten: *Kein größeres Programmsystem ist richtig!* (Nagl 1990, 41f., Hervorhebungen im Original)

Die von Dijkstra angegebene Formel ist allerdings noch zu optimistisch. Denn weder ist die Wahrscheinlichkeit der Korrektheit für alle Module gleich, noch sind die Module voneinander unabhängig, wie in der Formel angenommen, so daß sich die Wahrscheinlichkeit für die Korrektheit des Gesamtsystems reduziert. Daß dennoch die Systeme in der Praxis »funktionieren«, das heißt, über längere Zeit zuverlässig laufen, liegt daran, daß die Systeme in der Regel zur Laufzeit nur bestimmte Pfade benutzen, während andere Pfade nie erreicht werden. Sollte aber aufgrund veränderter Eingabedaten einmal ein anderer Pfad durchlaufen werden, tritt unerwartet der Fehler zu Tage.

Trotz oder vielleicht auch gerade wegen der genannten Erkenntnisse hat die Softwaretechnik die »Korrektheit« als ein Qualitätskriterium⁸⁹ formuliert. Was aber bedeutet hier »korrekt«? »Is a program correct when it does what we have instructed it to do? or what we wanted it to do? or what history would dispassionately say it should have done?« (Smith 1985a, 639) Nagl beantwortet die Frage im Sinne der ersten Möglichkeit, wenn er schreibt, Korrektheit bedeute, daß erstens die Implementation der Module den entsprechenden Teil der Entwurfsspezifikation erfüllt, daß zweitens die Module wie gewünscht zusammenarbeiten und daß drittens die Spezifikation den Anforderungen genügt. (Nagl 1990, 24)

Der Nachweis für diese Art von Korrektheit soll mit Hilfe einer »formalen Verifikation« erbracht werden. (Vgl. Wirth 1978, 24f.; DGLR 1984; Endres 1977; Loeckx / Sieber 1984) Er besteht darin, daß die Vor- und Nachbedingungen einer Anweisung oder einer Programmschleife explizit

⁸⁹ Zum Thema »Software-Qualitätssicherung« vgl. Informatik Spektrum Band 10, Heft 3, Juni 1987 und Band 11, Heft 6, Dezember 1988. Vgl. auch Abschnitt 2.2.3.

formuliert werden. Niklaus Wirth zeigt auf diese Weise anhand kleiner Programmteile oder Programme (Multiplikation zweier natürlicher Zahlen oder Berechnung des größten gemeinsamer Teilers zweier natürlicher Zahlen), wie deren Korrektheit nachzuweisen ist. (Wirth 1978, 30ff.)

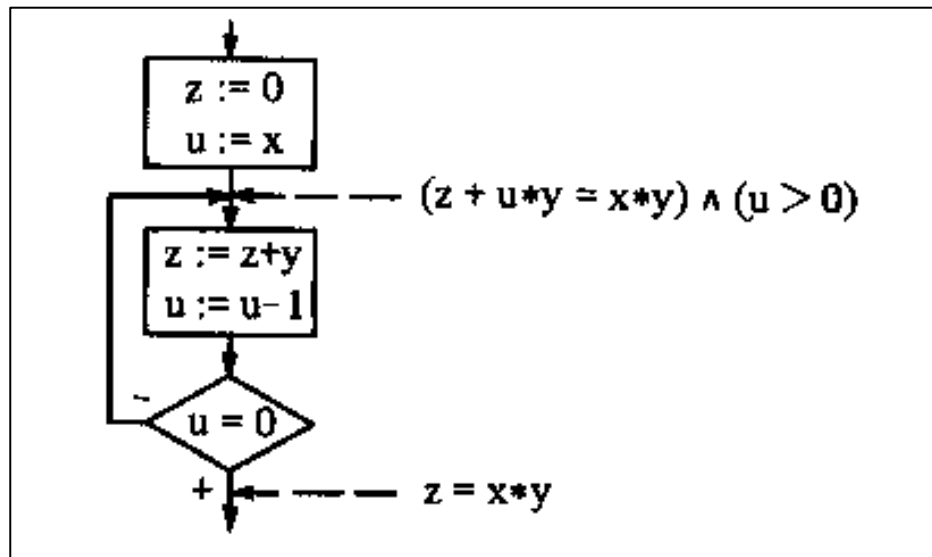


Abbildung 4. Multiplikation und ihre Verifikation (aus Wirth 1978, 30)

Dabei handelt es sich um eine rein formale Prüfung logischer Aussagen, die zu Tautologien führt. Andere Autoren schlagen vor, diese Prüfung in den Entwurfsprozeß der Programme zu integrieren, und entwickeln eine formale Spezifikationssprache. Eine solche Sprache ist »Z«, mit deren Hilfe – so ihre Entwickler – »Safer Software« herzustellen sei. Auch in diesem Fall wird ein relativ kleines System (ein Aufzug) genommen und gezeigt, wie dessen Funktionsweise in einer formalen Spezifikation zu dokumentieren ist. (Hörcher / Peleska 1992)

Die Multiplikation zweier natürlicher Zahlen oder die Beispiele »Programmschleife« und »Aufzug« können als Musterbeispiele angesehen werden, sind aber für die Praxis von geringem Wert. Denn in der Multiplikation zweier natürlicher Zahlen treten genau eine Vor- und eine Nachbedingung auf, also die kleinste überhaupt mögliche Anzahl. In der Praxis hat man es indessen mit Programmen zu tun, bei denen die Anzahl der Vor- und Nachbedingungen schon bei einfachsten Programmen erheblich größer ist. Ein PL1-Programm sei angeführt, das nichts weiter tut, als eine Kontrolliste

auszugeben, die es ermöglicht, den alten Stand von Postadressen mit einem Satz maschinell bereinigter Anschriften zu vergleichen. Schon dieses Programm bringt es auf rund 40 Vor- und 40 Nachbedingungen. Es liegt auf der Hand, daß ein solches Programm nicht allein steht, sondern Teil eines Informationssystems ist. Es geht also in der Praxis um viel größere Programme und Programmsysteme mit wesentlich höherer Komplexität. In kommerziellen Projekten würde ein solcher Nachweis schon allein wegen der dafür benötigten Zeit, das heißt der Produktionsverzögerung, und der durch den Arbeitsaufwand hervorgerufenen Kosten nicht unternommen werden.

Aber selbst wenn man, aus welchen Gründen auch immer, einen solchen Nachweis führen wollte, bleibt zu fragen, ob ab einer bestimmten Komplexität der Rechenaufwand überhaupt noch zu bewerkstelligen wäre.⁹⁰

Schon Dijkstra hielt in der Literatur genannte Beispiele mit den »richtigen« Systemen in der Praxis allein aufgrund ihrer unterschiedlichen Größe für nicht vergleichbar. (Dijkstra 1972, 2)⁹¹ Auch Jacques Loeckx und Kurt Sieber sehen einen Unterschied zwischen »kleinen« und »großen« Programmen:

The different principles of program verification that are introduced will be illustrated with some small programs. Their application to »real-life« programs is still disputed, and Perlis (1979)^[92] is a provocative paper on this issue. The main difficulty in applying the techniques of program verification to »real-life« programs is the combinatorial complexity of large proofs. Several verification systems have been proposed in hope of finding a way to overcome this difficulty. (Loeckx / Sieber 1984, 113)

Daß solche Verifikationen in der Praxis nicht durchgeführt werden, zeigt auch eine Umfrage zum Einsatz von Qualitätssicherungsmaßnahmen, die 1994 im »Informatik Spektrum« veröffentlicht wurde. Es wurde festgestellt,

⁹⁰ Wirth weist selbst darauf hin, daß der Test von Programmen nicht möglich ist und gibt ein Beispiel, wie schnell das Testen an die Grenze des Bereichs immenser Zahlen führt. (Wirth 1978, 24f.) »Unter der Annahme, daß ein bestimmter Computer zur Ausführung einer Multiplikation 1µs benötigt und daß er ganze Zahlen zu einer absoluten Größe von 2^{60} darstellen kann, wird zur vollständigen Prüfung des Multiplikationsbefehls die Zeit von $2^{2^{60}} * 10^{-6} = 3,2 * 10^{22}$ Jahre benötigt.« (Wirth 1978, 25) Weshalb Wirth keine ähnlichen Überlegungen hinsichtlich des Rechenaufwands bei der von ihm als Alternative empfohlenen Verifizierung anstellt, bleibt dunkel.

⁹¹ Vgl. Abschnitt 2.2.2.

⁹² Das in diesem Zitat angeführte Werk von Alan J. Perlis (1922-1990) ist 1979 erschienen und kritisiert die Annahme der Übertragbarkeit von Verifikationsverfahren auf große Programme. (De Millo / Lipton / Perlis 1979, 271-280)

daß formale Spezifikationen, außer im Bereich von Raumfahrt und Militär, kaum zu finden sind. Stattdessen sind umgangssprachliche Beschreibungen und semiformale, graphische Darstellungen verbreitet. Hierin wird eine deutliche Lücke zwischen Theorie und Praxis gesehen und der Einsatz formaler Methoden wird für wünschenswert gehalten. (Spillner / Liggesmeyer 1994) Auch Klaus Echtle und João Gabriel Silva (1998) plädieren für den Einsatz formaler Methoden zur Fehlererkennung in Programmen. Sie stellen aber gleichzeitig fest, daß diese Methoden an Aufwandsgrenzen stoßen, so daß man auf experimentelle Untersuchungen nicht verzichten könne, und sie schlagen vor, künstlich erzeugte Fehler in ein System einzubringen. Dies ist jedoch lediglich als eine Variante von Testverfahren zu bewerten. Und so wird das mehr oder weniger systematische Testen zur Verifikationsmethode:

Das *Testen* von Programmen, also das Ausführen des vorliegenden Programms mit echten Daten, ist die mit Abstand *gebräuchlichste* und, trotz vieler gegenteiliger Behauptungen, auch die *erfolgreichste* Verifikationsmethode. (Endres 1977, 331, Hervorhebungen im Original)

Diese Tests erfolgen, garantieren aber nie, daß alle Fehler gefunden werden, da sie jeweils nur eine Auswahl antizipierter und für wahrscheinlich gehaltener Fälle prüfen, nicht jedoch alle möglichen. Tests können – wie Dijkstra es formuliert – nur die Anwesenheit, nicht die Abwesenheit von Fehlern nachweisen: »Program testing can be used to show the presence of bugs, but never to show their absence.« (Dijkstra 1972, 6)

Neben dem Aspekt der Korrektheit im Sinne der formal richtigen Übertragung der Anforderungen von der Spezifikation in das Programm kann die Frage nach Korrektheit auch die unterschiedlichen Ebenen eines Informationssystems betreffen. So können Computer auf der Ebene der Hardware korrekt sein, auf der Ebene der Software jedoch fehlerhaft. Sie sollten jedoch auf jeder relevanten Ebene korrekt sein. (Vgl. Smith 1985a, 635) Für Brian C. Smith hängt die Frage nach Korrektheit mit den Intentionen zusammen, die zu einem Informationssystem führen.

Suppose the people want peace, and the president thinks that means having a strong defense, and the defense department thinks that means having nuclear weapon systems, and the weapons designers request control systems to monitor radar signals, and the computer companies are asked to respond to six particular kinds of radar pat-

tern, and the engineers are told to build signal amplifiers with certain circuit characteristics, and the technician is told to write a program to respond to the difference between a two-volt and a four-volt signal on a particular incoming wire. If being correct means *doing what was intended*, whose intent matters? The technician's? Or what, with twenty years of historical detachment, we would say *should have been intended*? (Smith 1985a, 635f., Hervorhebungen im Original)

Smith schlägt vor, Intentionen in die Spezifikation aufzunehmen, um prüfen zu können, ob das Programm korrekt, hier: den Intentionen gemäß, funktioniert. Denn es ist nicht ausgeschlossen, daß ein Programm zwar formal korrekt ist, aber den Erwartungen nicht entspricht. Der Anspruch an ein System, den Intentionen entsprechend zu funktionieren, ist eine Frage der Angemessenheit des Modells und sollte deshalb nicht als »Korrektheit«, sondern vielmehr als »relative Konsistenz« bezeichnet werden. Programme werden als akzeptabel bewertet, weil sie sich als relativ zuverlässig erwiesen haben, und zwar in ihrem Anwendungsbereich und über eine bestimmte Zeit. Das bedeutet die Durchführung eines Tests *in situ*, der allerdings in gewissen Fällen katastrophale Folgen hätte:

Certainly no one would ever accept a program without this *in situ* testing: a proof of correctness is at best added insurance, not a replacement, for real life experience. Unfortunately, for the ten million lines of code that is supposed to control and coordinate the Star Wars Defense System, there will never, God willing, be an *in situ* test. (Smith 1985a, 645, Hervorhebungen im Original)

Manche Informationssysteme sind eingebunden in Systeme, die aufgrund materieller Eigenschaften weder getestet noch beherrscht werden können. Informatik erweist sich zum einen als Großtechnologie und ermöglicht zum anderen Großtechnologien. Sie hat damit die Eigenschaften, die Risikosystemen aufgrund ihrer Binnenorganisation (Kopplung/Komplexität) und ihrer Umweltbeziehungen (Grenzen/negative externe Effekte) zukommen. (Vgl. Bonß 1995, 76)

2.2.18 Analyse und Synthese

Sowohl mit der Datenmodellierung als auch mit der Funktionenmodellierung wird versucht, die Welt oder das, was davon modelliert werden soll, zu analysieren, das heißt zu zerlegen oder zu gliedern, so daß am Ende die komplexe Welt in einfache, nicht-komplexe Elemente zerfällt. Dementsprechend werden die Funktionen der letzten Ebene in einem Funktionenbaum als »Elementarfunktionen« bezeichnet. Eine Funktionszerlegung oder Funktionsgliederung kann nie abgeschlossen sein, das Ende der Analyse wird immer vom Analysierenden definiert. Ein ähnliches Verfahren wird bei der Datenmodellierung angewandt. Hier werden alle Informationen, die für den zu modellierenden Weltausschnitt für relevant gehalten werden, analysiert, zerlegt und geordnet, bis am Ende eine »Elementarinformation« nur an einer Stelle im Modell erscheint, womit die Forderung nach Redundanzfreiheit erfüllt ist. Gleichzeitig liegt aber auch eine Reduktion vor, denn in der Welt sind die Dinge nicht redundanzfrei; dies ist eine der Stellen, an denen ein Übergang vom Ökonomieprinzip als technischem Paradigma zu ihm als metaphysischem Paradigma erfolgt.

In vielen Fällen wird top down analysiert, also vom Groben zum Feinen, vom Komplexen zum Elementaren. In der Praxis gibt es immer wieder Zwischenschritte, in denen – meist nicht explizit benannt – eine zusammenfassende (Bottom-up-)Modellierung (Synthese) stattfindet. Insgesamt hat jedoch das Top-down-Vorgehen Vorrang; denn, so heißt es: »Bottom-up-Vorgehen führt nicht zur geforderten Datenintegration und Qualitätsverbesserung. Reines unternehmensweites Top-Down-Vorgehen ist gescheitert.« (Schwinn 1998)

Für die Modellierung der Funktionenseite und – wenn eine Verfeinerung vorgenommen werden soll – auch auf der Datenseite werden zwei Entwurfsgrundsätze vorgeschlagen⁹³:

- Zerlegung (»besteht aus«) – Gegensatz: Aggregation (»ist Teil von«). Ein Objekt oder eine Funktion wird in Einzelteile zerlegt und umgekehrt aus Einzelteilen zusammengesetzt. Alle Teilobjekte oder Teilfunktionen zusammengenommen ergeben das gesamte Objekt oder die gesamte Funktion. Man spricht auch von Und-Verknüpfung: Wenn das Objekt Motor aus den Teilobjekten Gehäuse, Zylinder, Kolben usw. besteht, dann ergeben Gehäuse, Zylinder, Kolben, usw. zusammen das Objekt Motor.

⁹³ Vgl. Abschnitt 2.2.10.

- Klassifizierung/Spezialisierung (»kann sein«) – Gegensatz: Generalisierung (»ist ein«). Ein Objekt oder eine Funktion wird klassifiziert oder spezialisiert, indem es einer speziellen Teilmenge von Objekten oder Funktionen zugeordnet wird. Für jedes Element dieser neuen Gruppe gilt, daß es ein Element der ursprünglichen Objekte ist. In diesem Fall spricht man auch von Oder-Verknüpfung: Wenn das Objekt Motor ein Elektromotor oder ein Benzinmotor sein kann, dann ist ein Elektromotor ein Motor, ebenso wie ein Benzinmotor ein Motor ist.

Die möglichen Fälle sind der Tabelle zu entnehmen:

Entwurfsgrundsatz (Anmerkung: A ist übergeordnetes, B und C sind untergeordnete Elemente in der Hierarchie)	Daten	Funktionen	
<i>Zerlegung</i> »A besteht aus B und C« »B ist Teil von A und C ist Teil von A«	Objektzerlegung	Objektzerlegung	Verrichtungszerlegung
<i>Klassifizierung</i> »A kann sein B oder C« »B ist ein A oder C ist ein A«	Objektklassifizierung	Objektklassifizierung	Verrichtungsklassifizierung

Tabelle 13. Entwurfsgrundsätze »Zerlegung« und »Klassifizierung«

Für Funktionen ergeben sich jeweils zwei Gliederungsmöglichkeiten, weil eine Funktion durch ein Objekt und eine Verrichtung definiert wird, so daß also entweder nach dem Objekt oder nach der Verrichtung gegliedert werden kann.

Die Gliederung der Elemente des Informationssystems ist beendet, wenn die gewünschte Verfeinerung erreicht ist. Auf der Funktionenseite wird bis zu »Elementarfunktionen«, das heißt, bis zu einzelnen, in sich abgeschlossenen Vorgängen, die als nicht weiter sinnvoll teilbar gelten, verfeinert. Auch hier stellt sich die Frage der Entscheidungsmacht, das heißt, wer entscheidet, was »in sich abgeschlossen« ist, was »nicht weiter sinnvoll teilbar ist«, mit anderen Worten: wann die Verfeinerung und damit die Modellierung beendet ist.

Hinter dieser Methode steht die Annahme, daß die Welt durch Analyse von Begriffen und Aussagen in elementare Begriffe beziehungsweise elementare Aussagen zu beschreiben sei. Es geht um die Suche nach elementaren Ausdrücken, die in einem Informationssystem repräsentiert werden und aus denen durch Anwendung von Regeln neue Verknüpfungen gebildet

werden können, also eine Synthese stattfinden kann. Dieses Paradigma läßt sich auf das Konzept der Analyse und Synthese von Leibniz zurückführen.⁹⁴ Leibniz hielt bereits fest, daß dieses Verfahren kein rein formales Verfahren sein könne, da die Zerlegung und Gliederung von Begriffen letztlich endlos ist und das Ende der Analyse immer vom Analysierenden definiert wird, weshalb er Nominaldefinitionen von Begriffen für ungeeignet hielt. Obwohl die Fragwürdigkeit dieser Grundannahme seit Leibniz bekannt ist, ist es in der informatischen Praxis gebräuchlich, daran zu arbeiten, die Welt mit diesem Verfahren in Elemente eindeutig zu zerlegen und zu klassifizieren.

2.2.19 Unabhängigkeit der Elemente

In den eben beschriebenen Zusammenhang gehört auch die in der Daten- und Funktionenmodellierung übliche Vorstellung, daß die analysierten, elementaren Begriffe oder Aussagen voneinander unabhängig seien. In der Funktionenmodellierung zeigt es sich daran, daß die Teilfunktionen durch die Anwendung der genannten Entwurfsgrundsätze redundanzfrei zu halten seien.

Diese nicht für die Informatik spezifische Vorstellung der Unabhängigkeit der Elemente findet sich unter anderem in Carnaps »Konstitutionssystem«, aber auch bei Wittgenstein, auf beides wird in Kapitel 4 eingegangen.

Die Annahme ist jedoch widerlegt. Wittgensteins Überlegungen aus dem Jahr 1929 zeigen nämlich, daß Elementaraussagen nicht immer voneinander unabhängig sind, sondern daß es auch Elementaraussagen gibt, die nur zusammen mit anderen Aussagen derselben Art verstanden werden können. Als Beispiel führt er »Gradaussagen«, unter ihnen Aussagen über Farben, an. (Wittgenstein 1929a)⁹⁵

2.2.20 Trennung von Daten und Funktionen

Ein in der Softwareentwicklung übliches Verfahren ist, Daten und Funktionen getrennt zu modellieren, mit dem Ziel, das Modell übersichtlicher und redundanzfrei zu gestalten. Dieses Verfahren birgt jedoch das Risiko, Funktionen zu modellieren, für die keine Daten vorhanden sind, oder Da-

⁹⁴ Vgl. Kapitel 5.

⁹⁵ Vgl. Kapitel 4 und 7.

ten zu modellieren, für die keine Funktionen existieren. Ein Datenmodell ohne Funktionen, die besagen, was mit den Daten zu tun ist, ist sinnlos. Und umgekehrt sind Funktionen, für die keine Daten vorhanden sind, ebenfalls sinnlos. Diese Aufteilung von Informationssystemen findet sich in jedem Modell in jeder Phase der Softwareentwicklung: in Modellen des Fachkonzepts und des DV-Konzepts sowie in der implementierten Software in Form von Datenstrukturen und Programmcode. Daß es zwischen den Elementen einen untrennbaren Zusammenhang gibt, wurde in der Softwaretechnik lange vernachlässigt. So werden Daten in Datenmodellen und Funktionen in Funktionenmodellen verpackt, um anschließend mit hohem Aufwand, zum Beispiel mit Hilfe von Kommunikationsdiagrammen, beide Elemente abzugleichen. In Kommunikationsdiagrammen werden die Funktionen den Daten in Tabellen gegenübergestellt. An den Schnittpunkten wird vermerkt, ob die Funktion die Daten liest, schreibt, ändert oder löscht. Mit diesem Hilfsmittel kann festgestellt werden, ob Daten überhaupt von einer Funktion erzeugt, gelesen und gelöscht werden, und umgekehrt, ob Funktionen vorhanden sind, die die Daten bearbeiten. Damit sollen die Vollständigkeit und die Konsistenz des Modells geprüft werden. Diese Methoden können – in Analogie zu »Ad-hoc-Hypothesen« – als »Ad-hoc-Methoden« bezeichnet werden.

In der Praxis zeigt sich allerdings, daß diese Verfahren aus zwei Gründen nur partiell angewendet werden: Zum einen werden bei der Modellierung intuitiv beide Aspekte berücksichtigt, so daß selten größere Probleme mit der Trennung auftreten. Der Widerspruch liegt darin, daß explizit eine Trennung gefordert wird, während implizit keine Trennung erfolgt. Zum anderen sind die Verfahren für den Abgleich recht aufwendig und lassen das gesamte Modell unübersichtlicher werden. Damit wird ein anderes Paradigma, das der Ökonomie im Sinne der Einfachtheit nicht erfüllt. Erst dank der Objektorientierung wurde explizit deutlich, daß beide Elemente zusammengehören, und es wird von der Methode her möglich, sie zusammen zu modellieren.

2.2.21 Notationen und Konventionen

Unter symbolischen Verallgemeinerungen werden in dieser Arbeit nicht nur die von Kuhn genannten »Formeln«, wie $I=U/R$ für Strom gleich Spannung durch Widerstand (vgl. Kuhn 1962, 195), verstanden, sondern

auch Notationen, wie graphische Elemente zur Darstellung von Modellen, auf die sich Informatiker mehr oder weniger explizit geeinigt haben.

Die bisher genannten logischen Symbole für die Darstellung von Daten und die Regeln, wie mit den Daten umgegangen werden soll, stammen aus der Prädikaten- und Relationenlogik sowie der Mengenlehre. Sie stellen paradigmentheoretisch eine symbolische Verallgemeinerung in der Informatik dar. Festzuhalten ist allerdings, daß diese »Begriffsschrift« zwar von Informatikern in der Wissenschaft benutzt wird, daß sie in der Praxis aber kaum zu finden ist.

Dort werden vor allem graphische Elemente wie Kästchen und Pfeile für die Darstellung der Objekttypen eines Datenmodells benutzt, während für die Darstellung der Regeln, wie mit den Daten umzugehen ist, Elemente aus formalen (Abfrage-)Sprachen wie SQL⁹⁶ verwendet werden. In der Informatik haben sich unter anderem mit dem Anspruch der Benutzungsfreundlichkeit neue symbolische Verallgemeinerungen entwickelt und etabliert, die im Sinne Wittgensteins freilich dieselben Hypothesen verwenden. (Vgl. Wittgenstein 1929b, 159ff.)

Um den Anspruch der Benutzungsfreundlichkeit, die sich unter anderem in Verständlichkeit, Angemessenheit, vernünftigem Fehlerverhalten, Flexibilität und Lesbarkeit ausdrücken soll, einzulösen, hat sich in vielen Fällen die Darstellung von Modellen mit einfachen graphischen Mitteln eingebürgert.

So wird ein Objekttyp als Kästchen dargestellt, in das der Name – meistens, durch Konvention bestimmt, im Singular – eingetragen wird.

Ein Beziehungstyp wird als Pfeil gezeichnet, an dessen Enden die Komplexität der Beziehung angegeben wird, das heißt mit wievielen Elementen der einer Menge ein Element der anderen Menge in Beziehung steht oder stehen kann.

- Bei einer 1:1-Beziehung zwischen den Objekttypen A und B steht jedes Element von A mit genau einem Element von B in Beziehung.
- Bei einer 1:C-Beziehung steht ein Element von A mit keinem oder einem Element von B in Beziehung. Umgekehrt gehört zu jedem Element von B genau ein Element von A.
- Bei einer 1:M-Beziehung steht ein Element von A mit einem oder mehreren Elementen von B in Beziehung. Umgekehrt gehört zu jedem Element von B genau ein Element von A.
- Bei einer 1:CM-Beziehung steht ein Element von A keinem, einem oder

⁹⁶ SQL steht für Structured Query Language.

mehreren Elementen von B in Beziehung. Umgekehrt gehört zu jedem Element von B genau ein Element von A.

Alle anderen Beziehungen (C:C, C:M, M:M, CM:N, CM:CN) lassen sich entsprechend ableiten. Es sind auch rekursive Beziehungen, das heißt Beziehungen zwischen Elementen einer Menge A möglich. Beziehungen, die zwischen mehr als zwei Objekttypen bestehen, lassen sich mit den Pfeilen nicht mehr repräsentieren. Eine hierfür geeignete Form ist das von Peter Chen entwickelte Entity Relationship Model (ERM), in dem die Beziehungen durch Rauten dargestellt werden, zu denen mehrere Objekttypen wiederum in Beziehung treten können. (Chen 1976, 19)

Ein Beispiel für ein Datenmodell:

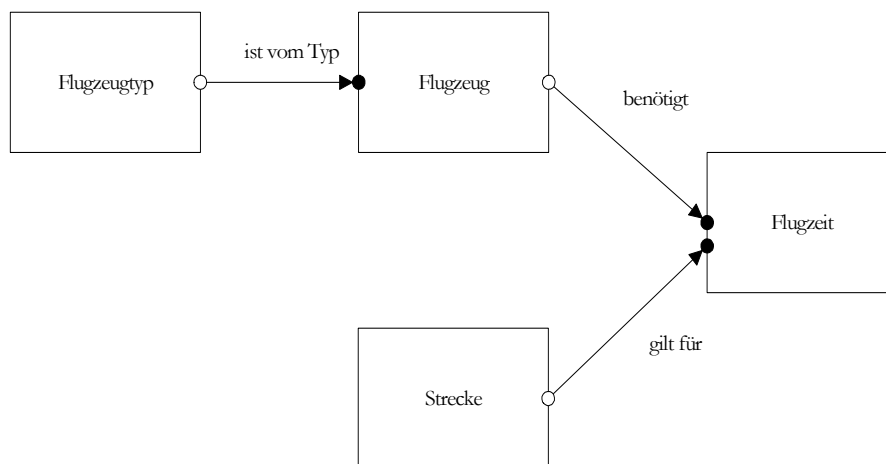


Abbildung 5. Datenmodell

Die Eigenschaftstypen werden in den Graphiken meistens nicht dargestellt. Sie werden stattdessen als Attributliste »hinter« den Objekttypen abgelegt, so daß sie nicht auf den ersten Blick zu sehen sind und deshalb in der Praxis oft für weniger wichtig gehalten werden. Es wird bei dieser Art der Darstellung nicht deutlich, daß es sich um eine intensionale Beschreibung, das heißt um eine Beschreibung einer Menge durch deren Eigenschaften, handelt. (Carnap 1928a, 57ff.) So wird in der Praxis der Definition des Objekttyps in Textform, deren Problematik bereits erörtert wurde, mehr Bedeutung zugemessen als der Definition durch die Angabe der Eigenschaften.

Auffällig ist, daß den graphischen Darstellungen in der Praxis, trotz ihres eingeschränkten Erklärungswerts, eine große Bedeutung beigemessen wird. Die in vielen Lebensbereichen zu bemerkende Bevorzugung visueller Elemente vor Texten nimmt auch hier deutlich zu.

Symbolische Verallgemeinerungen können – nach Kuhn – als Gesetz und als Definition wirksam sein. Notationen in der Informatik haben definitorischen Charakter. Im Datenmodell stehen Rechtecke für Objekttypen, Pfeile für Beziehungstypen usw. Zur Veranschaulichung der Modellbildung überhaupt wird das Original, die »Welt« oder »Realität«, oft als amöbenartiges Gebilde dargestellt. Das Modell dagegen wird als Rechteck gezeichnet. Diese Darstellungen erwecken den Eindruck, daß die Rundungen, Ausbuchtungen, Unregelmäßigkeiten der »Amöbe« abgeschnitten werden. Da Umfang und Flächeninhalt eines Rechtecks einfacher zu ermitteln sind als die einer Amöbe, wird suggeriert, es werde ein einfach zu berechnendes und damit einfach handhabbares Modell hergestellt. Dabei wird nicht reflektiert, daß hier eine Reduktion stattfindet und worin sie besteht.

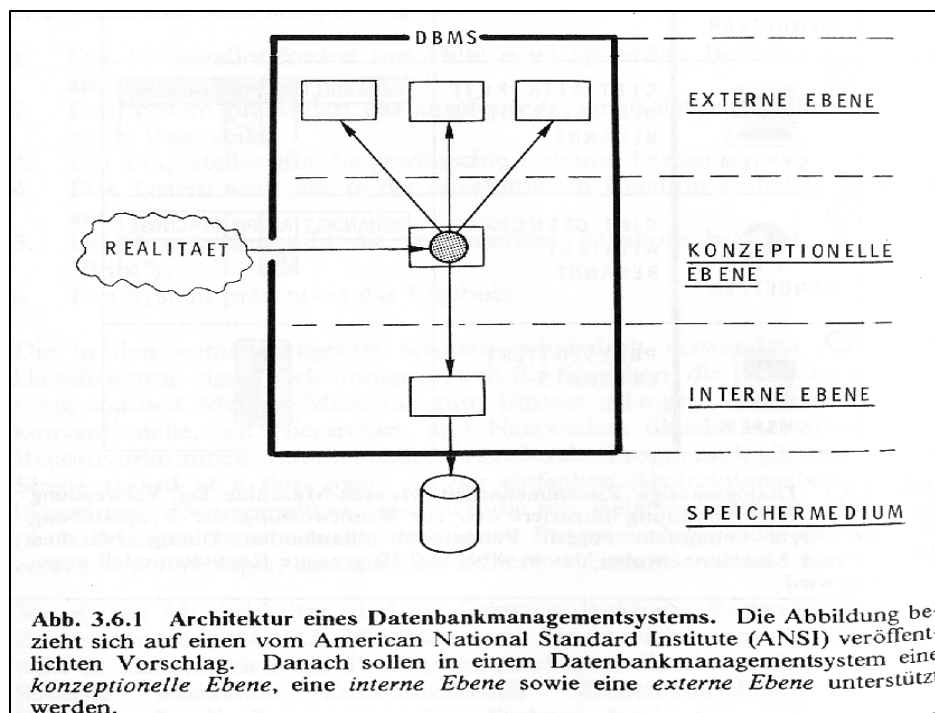


Abbildung 6. Die Welt als Amöbe I (aus Vetter 1987, 110)

ner Änderung der optischen Perspektive). Bestimmte Arten von Programmierfehlern können in dieser Weise verstanden werden.⁹⁸

- Die implizit oder explizit gegebene Semantik einer Notation wird nie ohne Begriffe aufgenommen. Die Konsequenzen dieser »Begriffsübernahme« für die Modellbildung lassen sich wie folgt kennzeichnen: Einerseits können sie dem Modellentwickler neue Erkenntnismöglichkeiten erschließen, andererseits können Begriffe nur schwer wieder aufgegeben und durch möglicherweise adäquatere Begriffe ersetzt werden.⁹⁹

Notationen sind nicht nur nicht kontextfrei, sondern auch konventionell. So wird für die Benennung von Elementen eines Datenmodells oder Datenflusses usw. zum Beispiel empfohlen, möglichst aussagekräftige Bezeichnungen zu wählen, die nicht den Begriff »Daten« oder »Information« enthalten, da diese Begriffe zu allgemein seien.

2.2.22 Kalkülvorstellung

Eines der grundlegenden Paradigmen der Informatik ist die Kalkülvorstellung, die seit Leibniz – wie in Kapitel 5 ausführlich beschrieben wird – davon ausgeht, daß die Welt aus *Elementen* sowie *Regeln*, die auf diese Elemente angewandt werden, besteht. Diese Vorstellung – wenngleich in einer reduzierten Interpretation – findet sich in der heutigen Informatik in verschiedenen Bereichen.

In »frühen« Phasen der Softwareentwicklung, das heißt in der Konzeptionsphase wird zwischen *Daten* und *Funktionen* unterschieden, wobei in der Modellbildung der Informatik in diesem Zusammenhang eine reduzierte Kalkülvorstellung zum Tragen kommt. An dieser Stelle sei zum Beispiel nochmal auf die Grenzen von Definitionen, insbesondere Nominaldefinitionen, und auf die reduzierte Modellvorstellung der Informatik hingewiesen. Diese und weitere Beispiele sind in vorhergehenden Abschnitten beschrieben.

In der Programmierung gibt es die Trennung von *Elementen* und *Regeln* ebenfalls. Wirth schreibt in seinem Lehrbuch »Systematisches Programmieren« zu den Grundbegriffen der Programmierung:

⁹⁸ Neben den hier genannten Fehlern, die auf Täuschungen basieren, gibt es auch Fehler, die auf Interpretationen basieren. Vgl. Abschnitt 7.2.2, in dem auf verschiedene Fehlerarten eingegangen wird.

⁹⁹ Vgl. die empirische Untersuchung zur Verständlichkeit visueller Notationen für Simulationsmodelle von Lorenz M. Hilty (1988).

Im Zentrum steht der Begriff der *Handlung*. Eine Handlung sei ein Vorgang, der in einer endlichen Zeitspanne abläuft und eine beabsichtigte und wohldefinierte Auswirkung – einen *Effekt* – hat. Jede Handlung bedingt das Vorhandensein von *Objekten*, an denen die Handlung ausgeübt wird und an deren *Zustandsänderung* die Auswirkung der Handlung feststellbar ist. (Wirth 1978, 13, Hervorhebung im Original)

Elemente des Programmkalküls sind die *Objekte*, während die Regeln als *Handlungen* bezeichnet werden. Die Trennung in Elemente und Regeln ist auch in den Programmiersprachen selbst zu finden. So bestehen beispielsweise COBOL-Programme aus einer *Data Division*, in der die Datenstrukturen definiert sind, und einer *Procedure Division*, welche die Anweisungen enthält, was mit den Daten zu tun ist. Und diese Trennung besteht auch in »modernen«, objektorientierten Sprachen: Klassen enthält neben den *Datenstrukturen* die *Methoden*, das heißt die Regeln, die angeben, was mit den Daten passieren soll.

Neben dem Aspekt der *Elemente* und *Regeln* ist in der Informatik der Aspekt der *Berechenbarkeit* zu finden.

Die »Theoretische Informatik« vermittelt Informatikstudenten, daß das theoretische Fundament der Algorithmenbegriff sei. Der Algorithmenbegriff wird dabei als Theorie der Automaten gefaßt. Dies erscheint gerechtfertigt, weil die Arbeiten von Alan Turing, Alonzo Church (1903-1995), Emil Post (1897-1954) und anderen das Ergebnis hatten, die Turingmaschine und die Klasse der allgemein rekursiven Funktionen seien äquivalent. Für den Algorithmenbegriff steht damit die Frage nach der Berechenbarkeit im Mittelpunkt. In »Algorithmen, rekursive Funktionen und formale Sprachen« (Brauer / Indermark 1968) zum Beispiel wird der Algorithmenbegriff über einen historischen Abriß eingeführt. Hier wird zwar auch auf die Grenzen der Berechenbarkeit hingewiesen, aber das Thema geht in der Behandlung der Klasse der rekursiven Funktionen auf. Dies entwirft ein Bild von Wissenschaft, das dem älteren Wissenschaftsverständnis mit »Fortschrittsglauben« nahesteht. Solche historischen Darstellungen korrespondieren in gewisser Weise mit Arbeiten wie der im deutschsprachigen Raum einflußreichen von Krämer (1988), die die Entwicklung des formalistischen Denkens, welches seinen Endpunkt in der Turingmaschine haben soll, als eine lange, in der Antike beginnende Linie formuliert.

Hinsichtlich der praktischen Bedeutung der Grenzen der Berechenbarkeit sei auf Wilfried Brauers Artikel »Grenzen maschineller Berechenbarkeit« aus dem Jahr 1990 hingewiesen, in dem gezeigt wird, daß bereits einfache Funktionen wie die »Busy-Beaver-Funktion« nicht berechenbar sind und als praktische Konsequenz dieser Tatsache angegeben wird, daß Betriebssysteme eines Computers – da sie nicht entscheiden können, ob ein Programm, das auf dem Computer läuft, jemals hält (egal, ob aufgrund des »Halteproblems« oder eines Programmierfehlers) – Programme abbrechen, wenn diese nicht innerhalb einer bestimmten Zeitspanne von selbst enden. (Brauer 1990, 66) Für den praktisch tätigen Informatiker ist dies allerdings kein Gegenstand alltäglicher Reflektion. Stattdessen wird in einem solchen Abbruchfall nach der Ursache im Programm gesucht, und sie wird meistens in Form einer versehentlich programmierten Endlosschleife gefunden. Dahinter stehen die Annahme und die Wahrnehmung, daß die als Programme realisierten Algorithmen endlich und entscheidbar seien. In der praktischen Tätigkeit werden damit die Funktionsweise und die Grenzen des Automaten – noch mehr als im Fall der Korrektheit und Genauigkeit – nicht thematisiert. Computer werden bei der täglichen Arbeit als vorgegebene technische Hilfsmittel hingenommen und nicht »hinterfragt«. Hier kommt der in der Einleitung bereits formulierte Aspekt der Gleichgültigkeit zufolge Vertrautheit zum Tragen.

3 Paradigmen aus dem Vorfeld der Informatik

In das Vorfeld der Informatik gehören Probleme und Lösungsansätze, die die Frage nach effektivem automatisiertem Rechnen aufwarfen. Das Problem, große Zahlenmengen zu verarbeiten, trat im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts zum einen mit der rasanten Ausweitung der Versicherungswirtschaft (vgl. u.a. Lindner / Wohak / Zeltwanger 1984; Bonß 1995) und dann vor allem bei der Auswertung von Volkszählungen auf. Ab der Jahrhundertmitte wurden in den USA und in Kontinentaleuropa im Zusammenhang mit der sich beschleunigenden Industrialisierung »als Grundlage für die staatlichen Verwaltungen und als Planungsinstrument für die Unternehmungen von eigens eingerichteten statistischen Ämtern einheitliche Daten ermittelt.« (Kaiser 1992, 355) Beide Aspekte sind in der versicherungswissenschaftlichen und statistischen Fachliteratur vielfach belegt. Besonders die Auswertung der bei Volkszählungen erhobenen Daten durch das Hollerith-Verfahren ist Gegenstand kritischer (vgl. u.a. Aly / Roth 1984) wie apologetischer Darstellungen (vgl. zahlreiche IBM-Publikationen). Unzusammenhängender ist die Literatur, wenn es um Probleme jenseits der Leistungsfähigkeit der Hollerithmaschinen geht. Das Verfahren von Hermann Hollerith (1860-1929) funktionierte nämlich vor allem da gut, wo es um die numerische Auswertung von Zählenden ging. Das Verfahren war aber aufgrund des technischen Rahmens ungeeignet, analytische Probleme zu lösen. Solche Probleme tauchten im 19. Jahrhundert zuerst bei der Berechnung von Gezeitentafeln für die Schifffahrt auf; seit der Jahrhundertwende dann mit der Elektrifizierung der Großstädte in den USA. Bei der Elektrifizierung entstanden Leitungsnetze, die wegen der ungenügenden Berechenbarkeit der Lastverteilung immer wieder zusammenbrachen. Noch am Ende der zwanziger Jahre war das Problem der Netzstabilität bei dynamischen Lastwechseln nicht gelöst, an ihm arbeiteten manche der Wissenschaftler und Laboratorien, die später an den ersten Computerprojekten teilnahmen. (Vgl. Dyson 1981) Analytische Probleme tauchten später vor allem in zwei militärischen Bereichen auf: Ab den frühen dreißiger Jahren bei der Berechnung der Tragflächenkonstruktion für schnelle Flugzeuge und bei der Aufstellung von ballistischen Tafeln.¹⁰⁰ Diese Zusammenhänge sind unter verschiede-

¹⁰⁰ In diesem Zusammenhang sind unter anderem Arbeiten Norbert Wiens zu nennen, deren Erstveröffentlichung am Anfang der vierziger Jahre im Rahmen der zivil-militärischen Zusammenarbeit zum Beispiel in den »Yellow Books« erfolgte. Die Datierung der Arbeiten ist zum Teil bis heute verwirrend, weil die maßgeblichen, von Pesl Masani herausgegebenen »Collected Works« (1976-1979) sie unter dem Datum ihrer späteren zivilen Veröffentlichung aufführen. Masani gibt im Apparat immerhin Hinweise auf ihren ursprünglichen Zusammenhang und das wirkliche Alter, worauf viele Einzelausgaben ganz verzichten. Die historische Aufarbeitung wissenschaftlicher De-

nen Fragestellungen untersucht worden. Vor allem existieren technikgeschichtliche Arbeiten und Beiträge in Festschriften für Institutionen (zum Beispiel das Massachusetts Institute of Technology (MIT)) oder Personen (zum Beispiel Vannevar Bush (1890-1974)). Bei beiden Arten von Arbeiten gibt es solche, die sich mit dem Mittel für die geforderten Berechnungen – mechanischen Analogrechnern, die damals vorherrschten – beschäftigen. Dabei sind nicht nur die technischen Möglichkeiten und Grenzen dieser Maschinen für die hier verfolgte Fragestellung interessant, sondern mindestens ebenso die seit spätestens der zweiten Hälfte der dreißiger Jahre sich entwickelnde institutionalisierte Kooperation zwischen universitären und militärischen Einrichtungen. Diese Kooperation und die Einbeziehung der Industrie ist unter politisch-ökonomischen Gesichtspunkten als These vom »militärisch-industriellen Komplex« geläufig. (Vgl. Koistinen 1980; Schiller 1970; Leslie 1993) Der Begriff »militärisch-industrieller Komplex« wurde 1961 vom US-Präsidenten Dwight D. Eisenhower (1890-1969) geprägt. Eisenhower hatte in seiner »Farewell Address« an die Nation mit Bezug auf den Korea-Krieg und den Kalten Krieg hervorgehoben, daß Hochrüstung erforderlich sei, und weiter ausgeführt:

[...] we can no longer risk emergency improvisation of national defense; we have been compelled to create a permanent armaments industry of vast proportions. Added to this, three and a half million men and women are directly engaged in the defense establishment. We annually spend on military security more than the net income of all United States corporations.

This conjunction of an immense military establishment and a large arms industry is new in the American experience. The total influence – economic, political, even spiritual – is felt in every city, every State house, every office of the Federal government. We recognize the imperative need for this development. Yet we must not fail to compre-

batten unter Kriegsbedingungen und das Wechselverhältnis von theoretischer und praktischer Arbeit sind wegen solcher ursprünglich von militärischer Geheimhaltung geprägten Praxis lange erschwert gewesen, ohne daß sich für ihre Beibehaltung bis in die zurückliegenden Jahre noch plausible Gründe einstellen. Besonders durch Beiträge zur »Conference on the History of Scientific and Numeric Computation« in Princeton 1987 (Nash 1990) lassen sich heute anscheinend abstrakte mathematische und physikalische Fragestellungen zuordnen. Auf historiographische Schwierigkeiten für die Darstellung der frühen Computerentwicklung aus Gründen der militärischen Geheimhaltung haben schon Lindner / Wohak / Zeltwanger (1984, 77) hingewiesen. Wenn sich die Situation inzwischen geändert hat, dann zum Teil nur noch wegen Zufallsfunden wie im Zusammenhang mit dem Colossus dargestellt.

hend its grave implications. Our toil, resources and livelihood are all involved; so is the very structure of our society.

In the councils of government, we must guard against the acquisition of unwarranted influence, whether sought or unsought, by the military-industrial complex. The potential for the disastrous rise of misplaced power exists and will persist.

We must never let the weight of this combination endanger our liberties or democratic processes. We should take nothing for granted. Only an alert and knowledgeable citizenry can compel the proper meshing of the huge industrial and military machinery of defense with our peaceful methods and goals, so that security and liberty may prosper together. (Eisenhower 1961)

Der militärisch-industrielle Komplex ist im Grund genommen dreigliedrig. Er besteht nicht nur aus Militär und Wirtschaft, sondern diese sind mit universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen verbunden. Stark schematisierend läßt sich feststellen, daß Anforderungen an neue Produkte vom Militär definiert werden, die konzeptionelle Entwicklung in wissenschaftlichen Institutionen erfolgt und die technische Umsetzung in der Wirtschaft vorgenommen wird, ohne daß dies ein striktes Nacheinander ist. Die dafür erforderliche Abstimmung und Lenkung erfolgt teils unmittelbar zwischen jeweils Beteiligten über die Aushandlung, Anpassung und Fortschreibung von Projektaufträgen, aber auch über institutionalisierte Gremien. Stuart W. Leslie (1993) spricht deshalb auch vom »Military-Industrial-Academic Complex«, womit er eine Formulierung aufgreift, die wohl zuerst von dem US-Senator J. William Fulbright (1905-1995) (1970) präzisierend benutzt wurde.

Besonders über solche Institutionen gewann Vannevar Bush mit dem Einsetzen der Kriegsvorbereitungen für den Zweiten Weltkrieg seinen Einfluß. Bush hatte besonderen Anteil an der Etablierung der akademischen Forschung in diesem Komplex. Bushs Karriere begann am MIT als »dean of engineering«, er wurde Vizepräsident des Instituts und stand ab 1938 der Carnegie Institution und dem National Advisory Committee on Aeronautics (NACA) vor. Seine Tätigkeit im NACA brachte Bush die Einsicht, daß die eigenen Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen des Militärs nicht in der Lage seien, einen kommenden Krieg ausreichend vorzubereiten. Hierauf folgte der Vorschlag an Präsident Franklin D. Roosevelt (1882-1945), zur Koordination der wissenschaftlichen Ressourcen der USA eine spezielle In-

stitution zu schaffen. Im Juni 1940 richtete Roosevelt das National Defense Research Committee (NDRC) ein, dessen Vorsitzender Bush wurde. Bush konnte nun mit dem NDRC die militärische Bürokratie umgehen und Forschungsaufträge vergeben. 1941 reagierte Roosevelt auf Bushs Unzufriedenheit wegen zu geringer Kompetenzen hinsichtlich der Entwicklungsphase von Waffen und schuf das Office of Scientific Research and Development (OSRD), dem von da an bis zu seiner Auflösung durch Bush am Kriegsende die ganze Forschungs- und Entwicklungslenkung einschließlich der Vertragsvergabe oblag. (Leslie 1993, 6f.)

Im Hinblick auf die Entstehung der Informatik in den USA sind das MIT, die Moore School of Electrical Engineering und das Ballistic Research Laboratory der US-Army in Aberdeen besonders zu nennende Einrichtungen. Dabei wird deutlich, daß der institutionelle Einfluß keine wissenschaftsexterne Größe ist, sondern mit den Denk- und Verfahrensweisen der Forscher sowie mit den Ergebnissen der Forschung unmittelbar zusammenwirkt. Für die späten vierziger und die fünfziger Jahre hat Hans Dieter Hellige ein ähnliches Ergebnis in seiner Arbeit über »Militärische Einflüsse auf Leitbilder, Lösungsmuster und Entwicklungsrichtungen der Computerkommunikation« (Hellige 1992) vorgelegt. Und ebenso zu nennen ist der Beitrag von Thomas Misa (1985) über »Military Needs, Commercial Realities, and the Development of the Transistor, 1948-1958« in dem thematisch breiter angelegten Sammelband »Military Enterprise and Technological Change. Perspectives on the American Experience«. (Smith 1985b) Wenn gleich die Kriegsvorbereitungen und der Krieg die Entwicklung leistungsfähiger Rechner in den USA und in Großbritannien beschleunigten, ist die Entstehungsgeschichte breiter und um einige Jahrzehnte länger.

3.1 Der Weg zur Universalmaschine

Für das Herausarbeiten der Paradigmen der Informatik in ihrer Entstehungsphase sind zwei »Spuren«, die zum Computer im heutigen Verständnis, nämlich als Universalmaschine führten, wichtig.

Die eine Spur auf dem Weg zum Computer bilden ab etwa 1890 die Entwicklung und der Einsatz der Hollerithmaschine für Zähl- und Sortierarbeiten in der staatlichen und privatwirtschaftlichen Verwaltung.

Die andere Spur beginnt in der Mitte des 19. Jahrhunderts mit dem Bau der ersten Planimeter und erhält ab 1928 mit den Analogrechnern, die Vannevar Bush am MIT für die Berechnung komplizierter mathematischer Formeln entwickelte, ihre größte Prägnanz.

Die Kombination der in den genannten Rechnern jeweils verwirklichten Konzepte zusammen mit der von Charles Babbage (1791¹⁰¹-1871) vorgeschlagenen Architektur läßt die Universalmaschine entstehen, wobei die Bedeutung der Hollerithmaschine insofern höher veranschlagt werden kann, als dies üblich ist, da fortgeschrittene Modelle bereits in der Lage waren, bestimmte Boolesche Operationen auszuführen.

Der erste Plan für eine Universalmaschine, der in den USA unter Experten aller Art breiter kommuniziert wurde, ist der »First Draft of a Report on the EDVAC« von John von Neumann aus dem Jahr 1945. Mit der in dem Entwurf von Neumanns vorgestellten Maschine ist es möglich, sowohl einfache Zählstatistiken und Sortierarbeiten als auch die Berechnung umfangreicher mathematischer Formeln durchzuführen. Sie ist nicht nur im militärischen Bereich – für Flugabwehr, Wetterberechnungen, usw. –, sondern auch für den zivilen Bereich wie die Verwaltung großer Datenmengen in Banken, Versicherungen und Industrie einsetzbar. Ob die Universalität des Electronic Discrete Variable Automatic Computer (EDVAC) damals bereits erkannt wurde, läßt sich nicht definitiv beantworten. Es ist aber anzunehmen, daß von Neumann und auch einige Mitarbeiter im Umgang mit dem älteren Electronic Numerical Integrator And Computer (ENIAC) den Aspekt der Universalität erkannt haben, und zwar als Design-Defizite, die am Folgeprojekt behoben werden sollten. Der »First Draft of a Report on the EDVAC« ist jedenfalls als Plan für eine Universalmaschine zu verstehen. Eine größere Anzahl von Entwicklern am MIT wird die Universalität beim Bau des Whirlwind zwischen 1945 und 1952 erkannt haben. Hierauf deutet,

¹⁰¹ Babbage wurde am 26.12.1791 geboren, die in der Literatur immer wieder anzutreffende Angabe 1792 ist falsch.

daß der Whirlwind zunächst als Flugsimulator mit angeschlossenem Rechner – also als Spezialmaschine – ausgelegt werden sollte, dann als Rechner mit angeschlossenem Flugsimulator und im nächsten Schritt schließlich »nur« als Rechner – also als verwendungsoffen. (Vgl. Redmond / Smith 1980; Everett 1980)

3.1.1 Die Hollerithmaschine

Der Ingenieur Hermann Hollerith erhielt vom US Bureau of the Census den Auftrag, die 1890 bevorstehende elfte Volkszählung mit Hilfe einer Zählmaschine auszuwerten. Diese Zählmaschine entsprach in ihrem Aufbau einem Konzept, für das er im Jahr zuvor ein Patent mit dem Titel »Art of Compiling Statistics« erworben hatte. (Oberliesen 1982, 212)¹⁰² Die US-amerikanische Bundesbehörde, der die Durchführung und Auswertung der alle zehn Jahre stattfindenden Volkszählungen oblag, hatte die Ergebnisse der Volkszählung des Jahres 1880 erst 1887 präsentieren können. Ein solcher zeitlicher Abstand zwischen der Erhebung der Daten und ihrer Verfügbarkeit entwertete naheliegenderweise die Ergebnisse für viele Interessenten erheblich. Das bisher angewandte Verfahren bestand darin, die Angaben von den Erhebungsbogen zunächst auf Zählblätter zu übertragen, die für jede Möglichkeit ein Feld enthielten. In einem weiteren Arbeitsgang wurden dann die gekennzeichneten Felder gezählt und damit die Merkmalshäufigkeiten ermittelt. (Aly / Roth 1984, 16)

Während bei der ersten Volkszählung in den USA lediglich sechs Fragen gestellt worden waren, bei der siebten immerhin schon dreißig, wurde gegen Ende des Jahrhunderts ein so umfassendes Bild der Bevölkerung gefordert, wie es mit den bisher gebräuchlichen Verfahren innerhalb eines Zensuszeitraumes gar nicht mehr herstellbar gewesen wäre. Die Bedeutung der Volkszählungen wuchs in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wegen der höheren Mobilität der Bevölkerung, steigender Bevölkerungszahlen, vermehrter Planung seitens der Industrie und des Staates sowie der Verallgemeinerung der Versicherung. »Die erhobenen Massendaten umfaßten einfache Personenmerkmale wie Geschlecht, Beruf, Einkommen, Sozialdaten, Kriminalität, Daten spezieller gesellschaftlicher Klassen, Sterblichkeit wie auch

¹⁰² Hollerith hatte im September 1884 drei Patente angemeldet, die seine »Census-Machine« zum Gegenstand hatten. Die Patente wurden ihm am 8. Januar 1889 erteilt. (Vgl. Oberliesen 1982, 227)

Daten zur Erziehung und Kirche, Besteuerung, Landwirtschaft, Bergbau, Handwerk, Industrie, Fischerei, Verkehr, Versicherung, sortiert nach geographischen Regionen und anderen Merkmalen.« (Oberliesen 1982, 225) Aber nicht nur die Anzahl der erhobenen Merkmale stieg rasant an, sondern auch die Dichte und Differenziertheit der Auswertung. Dies spiegelt sich im Umfang der Ergebnisberichte des Bureau of the Census wider. Während die Ergebnisse der Volkszählung von 1880 auf 196 Seiten vorgestellt werden konnten, nahmen die von 1890 bereits 2378 Seiten ein. (Oberliesen 1982, 225f.)

Für seine Maschinen verwandte Hollerith bereits vorhandene Bauprinzipien. Zum einen nutzte er das Konzept, Lochkarten als Datenträger zu verwenden.¹⁰³ Dieses Konzept war erstmals im dritten Jahrzehnt des 18. Jahrhunderts zur Steuerung von Maschinen benutzt und seit dem ersten Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts in den Jacquard-Webstühlen regelmäßig angewandt worden. Mit Lochkarten experimentierte dann Babbage für die Steuerung der »Analytical Engine« und Lochstreifen wurden bei Musikautomaten und Glockenspielen eingesetzt. Zum anderen orientierte sich Hollerith an Bauelementen des elektrischen Klaviers, indem er Schaltwalzen zur Betätigung von Zählern und Sortiermechanismen einsetzte. (Brödner / Krüger / Senf 1981, 33; Oberliesen 1982, 213f.)¹⁰⁴

Mit Hilfe von Hollerithmaschinen konnten 56 Millionen Fragebogen (für 63 Millionen Personen) in einem Sechstel der sonst erforderlichen Zeit bearbeitet werden. (Brödner / Krüger / Senf 1981, 37; Porter 1891, 321) Damit wurden dem Zensus fünf Millionen Dollar Tabulierkosten erspart. (Taeger 1983, 162) Rolf Oberliesen nennt etwas abweichende Zahlen: »Annähernd 63 Millionen Lochkarten [...] waren zu bearbeiten [...]. Dennoch reduzierte sich der Gesamtzeitaufwand um 60 Prozent bei zunehmend differenzierterer Auswertung. Die Fehlerquote erwies sich als äußerst gering, die Gesamtkosten der statistischen Auswertung reduzierten sich um mehrere 100000 Dollar.« (Oberliesen 1982, 219)

In Österreich wurden für die ebenfalls 1890 durchgeführte Volkszählung Hollerithmaschinen eingesetzt. Dagegen war man in Deutschland nicht nur wegen der hohen Kosten (1000 Dollar Miete pro Jahr und Maschine) und

¹⁰³ Eine Anekdote besagt, Hollerith habe diesen Gedanken während einer Tramfahrt oder Bahnreise bekommen, als er sah, wie der Schaffner die Fahrkarten mit einer Lochzange kennzeichnete.

¹⁰⁴ Eine Beschreibung der Funktionsweise der frühen Hollerithmaschinen gibt Oberliesen zum Teil durch ausführliche Zitate aus einer Arbeit des Leiters des österreichischen Volkszählungsbüros von 1890, Heinrich Rauchberg. (Oberliesen 1982, 216ff.)

wegen der möglichen Fehlerquellen, sondern auch aus sozialpolitischen Gründen zunächst gegen den Einsatz der Maschinen. In einem Diskussionsbeitrag zu einem Vortrag mit dem Titel »Die Hollerith'sche elektrische Zählmaschine für Volkszählungen« in der Polytechnischen Gesellschaft zu Berlin äußerte der Geheime Ober-Regierungsrath Blenck:

Der *wichtigste* und *letzte Grund* aber, weshalb ich bisher die Zählmaschine in Preussen nicht eingeführt habe, ist ein sozialpolitischer. Bei den jetzigen beiden grossen ausserordentlichen Zählungen, die wir im Reiche und in Preussen haben, der Berufs- und Gewerbezahlung sowie Volkszählung, beschäftige ich für Preussen zum Theil 1 bis 2, zum Theil 3 Jahre lang insgesamt über 1000 Personen, sage 1000 Personen [Anmerkung: Wenn man die mithelfenden Angehörigen der häuslichen Accorderbeiter einrechnet, erhöht sich diese Zahl sogar auf das Doppelte. Von jenen 1000 Extrakräften kommen übrigens gegen 800 auf die Volkszählung, die übrigen auf die Berufszählung.], in verschiedenen Stellungen, als Revisoren, Auszähler und Arbeiter, neben den etatsmässigen Beamten und den sonstigen Hilfskräften für ausserordentliche und laufende, d. h. stets wiederkehrende Arbeiten. Jenes Hilfspersonal setzt sich meist aus Leuten zusammen, die oft durch besondere Umstände, durch Unglücksfälle u. s. w. dahin gekommen sind, sich nicht erhalten zu können. Wenn unsere Reichsregierung heut zu Tage mit allen Kräften darauf denkt und dahin zu wirken sucht, dass man nach Möglichkeit derartigen Opfern der Arbeitslosigkeit hilft – wir haben Arbeiterversicherung, wir haben alles mögliche – dann scheint es mir auch unserer Pflicht entgegen zu sein, eine mechanische Maschine Menschen vorzuziehen und vielleicht eines entbehrlichen Mehrgewinnes an gewissen Einzelheiten und Kombinationen wegen, eine sehr bedeutende Summe jährlich nicht in der Weise zu verwenden, wie sie von jenen sozialpolitischen Gesichtspunkten aus verwendet werden müsste. Das, meine Herren, ist der Hauptgrund, warum ich die elektrische Zählmaschine bisher noch nicht angeschafft habe, abgesehen von jener Fehlerquelle, die in der Durchlochungsarbeit liegt, und der mangelnden Gewissheit darüber, ob denn nicht doch die Sicherheit der Maschine hinter derjenigen meines menschlichen, denkenden Materials zurückbleibt und für alle Arbeiten, bei welchen ein Denkprozess erforderlich ist, zurückbleiben muss. Außerdem, was die Zeit anbelangt, bin ich oder ist das

von mir geleitete Bureau so ziemlich immer das erste gewesen, welches die vorläufigen und endgültigen Ergebnisse großer Erhebungen hat vorlegen können [...] Eine so hohe Jahresmiethe, wie die Amerikaner, kann und will ich nicht bezahlen; mit etwas über eine halbe Million Mark mache ich ja in Preussen die ganze Volkszählung mit allem, was darum und daran hängt, fix und fertig. (Polytechnisches Centralblatt 1896, 124f., Hervorhebungen im Original)

Diese Haltung hielt nicht lange an. 1911 – in diesem Jahr wurden auch in Großbritannien zum ersten Mal bei einer Volkszählung Lochkarten eingesetzt – wurde das Hollerith-System auf Wunsch einiger Reichstagsabgeordneter und Ministerien im Reichstagsgebäude präsentiert. In einem Bericht der »Berliner Börsenzeitung« vom 8. Februar 1911 heißt es nach einer kurzen Beschreibung der Maschine:

Im allgemeinen kann man behaupten, daß mit Hülfe dieser Maschinen die Statistik in einem Zehntel der Zeit und mit einem Drittel der Kosten durchgeführt wird. Besonders wichtig ist dabei die absolute Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Maschine. [...] Schon in aller kürzester Zeit sollen die Versuche zur Aufnahme der Handelstatistik mit Hilfe dieser Maschine begonnen werden. Bereits jetzt werden in Württemberg, Baden, Elsaß-Lothringen, Sachsen und teilweise in der Stadt Berlin die Ergebnisse der letzten Volkszählung auf diese Weise festgestellt. Von besonderer Bedeutung ist die Maschine für die umfangreichen Statistiken der Industrie und hat z.B. bereits Eingang gefunden in den Elberfelder Farbenfabriken und in den Berliner Elektrizitätswerken [...]. (Berliner Börsenzeitung 1911, zitiert nach Oberliesen 1982, 231)

Damit sind auch die ersten Kunden¹⁰⁵ der 1910 gegründeten Deutschen Hollerith Maschinen Gesellschaft mbH (DEHOMAG) genannt, auf sie folgten bald die Reichsversicherungsanstalt für Angestellte und Krankenkassen. (Kaiser 1992, 355) Die DEHOMAG war eine Tochterfirma der 1896 von Hollerith gegründeten Tabulating Machine Company, die 1911 zusammen mit der Computing Scale Company und der International Time Recording Company die Firma Computing Tabulating Recording Company (CTR) bildete. 1924 wurde diese Firma dann in International Business Ma-

¹⁰⁵ Die erste privat genutzte Lochkartenmaschine wurde 1910 bei den Farbenwerken Friedrich Bayer und Co. eingesetzt. (Lindner / Wohak / Zeltwanger 1984, 67)

chines Corporation (IBM) umbenannt. Die DEHOMAG stellte die Maschinen in Lizenz her. (IBM 1987, 13; Oberliesen 1982, 228; Petzold 1992, 118ff.)

Den ersten Höhepunkt der Verarbeitung großer Datenmengen gab es in Deutschland während des Ersten Weltkrieges. Die von dem Industriellen Walther Rathenau (1867-1922) initiierte und anfangs geleitete Kriegsrohstoffabteilung des Preußischen Kriegsministeriums arbeitete in zentralen Lochkartenstellen an der Erfassung und Bewirtschaftung von im Inland vorhandenen und in den besetzten Gebieten beschlagnahmten Rohstoffen. (Kaiser 1992, 355) Insgesamt handelte es sich zunächst um rund 300 als kriegswichtig eingestufte Rohstoffe und später um die Kontrolle von etwa 200 Kriegsrohstoffgesellschaften für die Bewirtschaftung der Ressourcen einzelner Wirtschaftsbereiche.

Die Hollerithmaschine war zunächst eine Tabelliermaschine für statistische Zwecke. 1924 wurde die erste Tabelliermaschine mit Postenschreibung (aus Lochkarten) und Summenschreibung (aus Zählern) entwickelt. (IBM 1987, 25; Petzold 1992, 126) Ab 1926 wurden auswechselbare Typenstan-gen eingeführt, mit denen eine Alphabetschreibung möglich wurde (IBM 1987, 27) und zwei Jahre später wurden zusätzlich zu den bisher vorhandenen 45-spaltigen Lochkarten mit runden Löchern nun auch 60- und 80-spaltige Lochkarten mit eckigen Löchern benutzt.

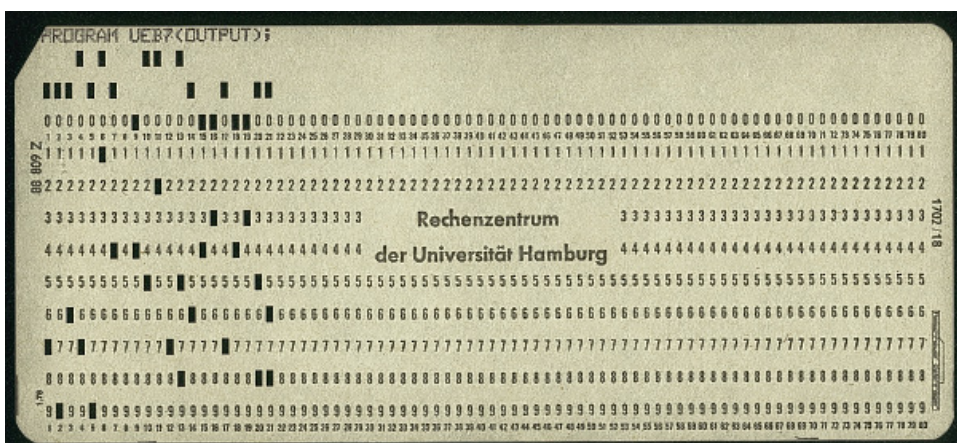


Abbildung 8. 80-spaltige Lochkarte

Ab 1928 konnten Hollerithmaschinen für Saldierung, Steuerung und Summenlochung eingesetzt werden, so daß nicht nur Aufgaben aus dem

Bereich der Zählstatistik, sondern auch aus dem betrieblichen Rechnungswesen gelöst werden konnten. 1929 schrieb der Geschäftsführer der DEHOMAG, Hermann Rottke, die erste Anwendungsbroschüre mit dem Titel: »Die Buchhaltung von Industriebetrieben und Handelsgeschäften lückenlos durchgeführt mit Hollerith-Lochkarten-Maschinen«. In der Kundenzeitschrift »Hollerith-Nachrichten« wurden Artikel veröffentlicht, die die Anwendungsbereiche der Maschinen verdeutlichen: Prof. Lengyel, Wien: »Die Hollerith-Organisation der Gemeinde Wien – Städt. Versicherungsanstalt« (1932); Gobbers und Schiess-Defries: »Die maschinelle Kostenrechnung« (1932); Schausten: »Die Nettolohn-Abrechnung beim Bochumer Verein« (1933); Behrmann: »Das Lochkarten-Verfahren in den Versorgungsbetrieben der Stadt Bielefeld« (1933); Dr. Gammert: »Das Lochkarten-Verfahren in der Buchhaltung eines Verkaufs-Syndikats (Kunstseide, Berlin)« (1935); Steinhaus: »Die Zahlen der Fabrik« (1937). (Vgl. IBM 1987, 40)

Zu den DEHOMAG-Kunden zählten sowohl staatliche Stellen als auch Industrie- und Handelsunternehmen, zum Beispiel das Statistische Reichsamt, Stadtverwaltungen (Köln, Berlin, Frankfurt am Main), die Württembergische Staatseisenbahn, Sozialversicherungs-, Fürsorge- und Wohlfahrtsunternehmen, städtische Betriebe wie Gas-, Wasser- und Elektrizitätswerke, die Kaiserliche Oberpostdirektion in Berlin, die Farbwerke Hoechst in Frankfurt, die BASF in Ludwigshafen, AEG, Siemens-Schuckert und Osram aus Berlin, Brown-Boveri aus Mannheim, die HAPAG-Reederei und alle deutschen Großbanken. Die Aufgaben, die die Hollerithmaschinen zu lösen hatten, waren vielfältig, zu ihnen gehörten: Statistiken, Gehalts- und Lohnabrechnungen, Steuererhebung und -verrechnung, Buchhaltung und Rentenrechnungsdienst. (IBM 1985, 4; Petzold 1992, 121, 140f.)

Als die DEHOMAG am 8. Januar 1934 ihre Hauptverwaltung und ein neues Werk in Berlin-Lichterfelde eröffnete, umfaßte das Produktionsprogramm Locher, Prüfer, Sortiermaschinen, Tabelliermaschinen und Lochkarten. (IBM 1987, 45) Aus der Eröffnungsrede des Generaldirektors Willy Heidinger wird klar, welche Bedeutung deskriptive Statistiken unter der Herrschaft des Nationalsozialismus erhalten sollten:

Der Arzt untersucht den Körper des Menschen, stellt fest, ob seine Organe in einer harmonischen Schwingung, d.h. gesund miteinander arbeiten im Interesse des Ganzen. Wir hier sezieren den deutschen Volkskörper weitgehend wie der Arzt bis auf die einzelnen Körperzellen zurück. Wir legen die individuellen Eigenschaften jedes einzel-

nen Volksgenossen auf einem Kärtchen fest. Diese Kärtchen sind nicht tot, beweisen vielmehr später ein unheimliches Leben, wenn sie in einer Geschwindigkeit von etwa 25000 Karten die Stunde in unserer Sortiermaschine nach bestimmten Gesichtspunkten gewissermaßen zu Organen unseres Volkskörpers gruppiert und die diesbezüglichen Werte in unserer Tabelliermaschine errechnet und festgelegt werden.

Wir sind stolz, an einer derartigen Arbeit mitwirken zu dürfen, an einer Arbeit, die dem Arzte unseres deutschen Volkskörpers das Material für seine Untersuchung bietet, damit unser Arzt feststellen kann, ob die auf diese Weise errechneten Werte vom Standpunkt der Volksgesundheit aus gesehen in einem harmonischen, d.h. gesunden Verhältnis zueinander stehen, oder ob durch Eingriffe krankhafte Verhältnisse heilend korrigiert werden müssen. (Denkschrift 1934, zitiert nach Petzold 1992, 145)

Die Eignung der Hollerithmaschinen für Zwecke der Bevölkerungskontrolle und -planung war allerdings schon früher dargestellt worden. In den Hollerith-Mitteilungen Nr. 3 aus dem Jahr 1913 wird unter dem Stichwort »Absonderung der Abnormalen« ausgeführt:

In dem Statistischen Bureau in Kopenhagen unter Leitung des Herrn Direktors Koefoed wurde von dem Dezenten der Hollerith-Abteilung Herrn Elberling eine sehr sinnreiche Vorkehrung getroffen, durch welche das Sortieren von 4,7 Millionen Karten gespart wurde. Es gab etwa 100000 abnormale Menschen in Dänemark, die in dreierlei Weise abnormal sein konnten, nämlich bezüglich Gebrechen, der Religion und des Militärverhältnisses. Bei der gewöhnlichen Sortierungsmethode hätte man die sämtlichen Karten dreimal sortieren müssen, um die drei Abnormalitäten abzusondern, und da Dänemark etwa 2 ½ Millionen Einwohner hat, etwa 7 ½ Millionen Karten durch die Sortiermaschine schicken müssen.

Es wurde nun ein Sortiermaschinenbürstenhalter angefertigt, welcher anstatt einer Bürste drei Bürsten enthielt, und zwar in solcher Stellung, daß die drei Spalten der Abnormalen berührt wurden. Da nun die Sortiermaschine immer nach demjenigen Loch sortiert, welches zuerst den Strom schließt, war die Folge dieser Anordnung, daß bei der einmaligen Sortierung der 2 ½ Millionen Karten diejenigen, welche keine Abnormalitäten hatten, also in den drei Reihen nicht ge-

locht waren, in das R-Loch fielen, während die anderen je nachdem in das eine oder andere Fach sortiert wurden. (Hollerith-Mitteilungen 1913, zitiert nach Aly / Roth 1984, 18)

Die Hollerithmaschine bot die Möglichkeit der »Massenbeobachtung«. Diese Beobachtungen sollten im nationalsozialistischen Deutschland zu biologischen, wirtschaftlichen, sozialen und kulturellen Erkenntnissen führen. Untersucht werden sollten Heeresergänzungen, Wehrkraft, Wehrfähigkeit, Wehrtüchtigkeit, Rekrutenstatistik, militärisches Gesundheitswesen, geistige Bildung der Rekruten, deren Werdegang durch HJ und SA. (Petzold 1992, 145) Aber nicht nur das Militär, sondern viele andere Organisationen, wie zum Beispiel die Deutsche Arbeitsfront (DAF), die Organisation der gewerblichen Wirtschaft, der Reichsbund deutscher Beamten oder der Verwaltungsapparat der NSDAP, sollten beobachtet und untersucht werden. Wie umfangreich die »Beobachtungen« waren, an denen im übrigen nicht nur der nationalsozialistische Staat interessiert ist, zeigt allein die Anzahl der Lochungen, die auf einer Karte vorgenommen werden konnten. Während die Lochkarte der US-Zensusbehörde von 1900 für die Speicherung personenbezogener Eigenschaften 288 Lochpositionen hatte, wurden 1933 für die Volks-, Berufs- und Betriebszählung im nationalsozialistischen Deutschland 600 Lochungen vorgesehen. Für die Volks- und Berufszählung in der Bundesrepublik 1961 waren es dann sogar 960 Lochungen. (Oberliesen 1982, 235)

1937 wurde eine Lochkartenstelle für das Heereswaffenamt (HWA) eingerichtet, in der bis zum Kriegsbeginn unter anderem die Rohstoffbewirtschaftung, die Material- und Geräteaufträge und die als »Sanitätsstatistik« bezeichneten Musterungsergebnisse sowie »psychotechnische Untersuchungsbefunde« erfaßt wurden. Beschaffung, Vorratshaltung, Geräte- und Rohstoffverwaltung und die Lenkung des Arbeitskräfteeinsatzes sollten mit Hilfe des Lochkartenverfahrens organisiert werden. 1942 wurde diese Lochkartenstelle in die »Dienststelle Maschinelles Berichtswesen des Reichsministers für Rüstung und Kriegsproduktion« umbenannt, die »den Verbrauch von Gütern und Menschen in der Rüstungswirtschaft einerseits und der Schlachtfelder andererseits transparenter machen« sollte. (Petzold 1992, 154f.)

Um die Daten und Meldungen der verschiedenen Institutionen und Unternehmen einheitlich ablocken zu können, war eine eindeutige Definition der zu erfassenden Gegenstände erforderlich. Zu diesem Zweck wurden ei-

ne einheitliche »Reichsbetriebskarte« sowie Nummernsysteme (Reichsbetriebs-, Bedarfsgruppen-, Auftrags- und Reichswarennummerung) entworfen. Die Reichswarennummerung sollte nicht nur für Gegenstände, die in der Wehrmacht vorkamen, sondern für sämtliche Waren eingeführt werden. Mit ihr sollte eine hierarchische, in sich sinnvolle Ordnung aufgebaut werden. (Petzold 1992, 156) Das Ordnungsprinzip der Hierarchie unterstützt – auch heute noch – Macht und Herrschaft von Institutionen wie Militär und Staat.

In den dreißiger Jahren wurden von der DEHOMAG einige Maschinen selbst entwickelt, um Lizenzgebühren zu sparen. Diese Maschinen wurden ebenso wie ihre US-amerikanischen Parallelentwicklungen zunehmend leistungsfähig. So wurde 1936 die D11, eine schalttafelgesteuerte Tabelliermaschine eingeführt, die die vier Grundrechenarten, Querrechnungen und gruppenabhängige Speicherungen durchführen konnte. Sie besaß einen Summenlocher, der Summen stanzen konnte. Parallel dazu wurde ein Rechenlocher gebaut, der Multiplikationen durch fortgesetzte Additionen ausführte. 1938 entstand der Rechenlocher 2, der nach dem Multiplikationsverfahren multiplizierte. (IBM 1987, 51ff.) Die D11 wurde auf Anregung des Statistischen Reichsamtes weiterentwickelt. Für die Volkszählung 1939 war die Maschine in der Lage, bis zu dreizehn Zählbegriffe in einem Kartendurchgang zu errechnen. (Aly / Roth 1984, 20)

Die Entwicklung der Tabelliermaschine und ihrer Anwendungen zeigt, daß in Deutschland die quantitative Erfassung und Auswertung statistischer Daten im Vordergrund stand, und zwar in einer solchen Fülle und Komplexität, daß die deutsche IBM-Tochter dementsprechende Eigenentwicklungen betrieb. Es wurden deskriptive Statistiken erstellt, wobei zwei Anforderungen kontinuierlich entwickelt und erweitert wurden, nämlich die Beschleunigung und der Umfang möglicher Rechnungen.

Es wurde erwartet, durch die Einlösung dieser Anforderungen im politisch-sozialen und im wirtschaftlichen Bereich ein besseres Instrumentarium zur Erfassung, Planung und Steuerung von Vorgängen an die Hand zu bekommen. Das Stichwort hierzu lautet »Rationalisierung« und in diesem Sinne ist Rationalisierung nicht nur in der heute zunächst erscheinenden Bedeutung einer betriebswirtschaftlichen Kosteneinsparung gemeint, sondern mit dem hinzutretenden Sinn, eine – vorgeblich – höhere Rationalität in den genannten gesellschaftlichen Bereichen zu schaffen. Dieser Zusammenhang ist in den führenden Industriegesellschaften jener Zeit ein Kennzeichen für die mit unterschiedlichsten Ideologien und Staatsformen verknüpften Mo-

dernisierungsbestrebungen. Dies macht es möglich, die Beschreibung hier auf Deutschland zu beschränken, auch wenn im weiteren vor allem von den USA und dann von Großbritannien die Rede sein wird. Denn die Einsatzfelder und Erwartungen an diese Form der Rationalisierung sind vergleichbar.¹⁰⁶

3.1.2 Analogrechner und Netze

Die Entwicklung von Analogrechnern bildet die zweite Spur in Richtung auf die Universalmaschine. Analogrechner sind Spezialrechner, deren Prinzip darauf beruht, daß Probleme mit Hilfe physikalischer Vorgänge, die den gleichen mathematischen Formeln oder Gleichungen entsprechen wie das Problem, gelöst werden. Bei einer Analogmaschine müssen also die physikalischen Vorgänge jeweils neu eingerichtet werden, wenn nicht sogar eine ganz neue Maschine erforderlich ist, damit neue Probleme oder Klassen von Problemen gelöst werden können. Dies ist eine sehr umständliche Art der »Programmierung«. Dennoch sind in diesen Maschinen Elemente realisiert, die zum Konzept der Universalmaschine beitrugen.

Die Entwicklung von Analogrechnern für komplexe Aufgaben setzte um die Mitte des 19. Jahrhunderts ein. Eines der ersten Geräte war das Polarplanimeter von Jakob Amsler (1823-1912) aus dem Jahr 1854. Mit diesem Gerät war es möglich, eine Maßzahl für den Flächeninhalt einer ebenen endlichen Fläche zu gewinnen. In seiner einfachsten Form besteht das Gerät aus einem Polarm und einem Fahrstab, die über ein Gelenk verbunden sind. Der Pol wird auf einer Unterlage fixiert, so daß alle Bewegungen des Gelenks auf einer kreisförmigen Leitkurve um ihn verlaufen. An der Spitze des Fahrstabs befindet sich ein Fahrstift, mit dem die auszumessende Flä-

¹⁰⁶ Das soll und kann natürlich keineswegs heißen, daß die Konzepte von Erfassung und Planung im Nationalsozialismus denen des New Deal entsprächen. Hinter den unüberbrückbaren politisch-historischen Inhaltsdifferenzen gibt es aber auf der Ebene dieser Rationalitätsansprüche vergleichbare Methoden. Solche Methoden sind auch in der industriellen Produktion zu finden, etwa wenn man daran denkt, daß Arbeitszerlegung und Fließbandproduktion nicht nur in den USA zum Tragen kamen. »Taylorismus« und »Fordismus«, um zeitgenössische Begriffe zu verwenden, waren ebenso in Teilen der deutschen Industrie oder im faschistischen Italien anzutreffen. Es muß aber auch festgehalten werden, daß in Deutschland der Schritt von der Gruppen- zur Fließproduktion in Bereichen mit hoher zivil-militärischer Integration, zum Beispiel im Panzerbau, erst in der zweiten Hälfte des Krieges eingeleitet wurde. Es ist eine Mutmaßung, daß gerade die Ausrichtung der industriellen Produktion in Deutschland auf hochqualifizierte Facharbeiter mit dazu beigetragen hat, daß Methoden der Zerlegung und Formalisierung von Arbeitsabläufen langsamer eingeführt wurden.

che umfahren wird. Mit dem Fahrstab ist ein Reibrad als Meßrolle verbunden. Die Bewegungen des Fahrstabs werden in eine Längs- und eine Querkomponente zerlegt, wobei die Querkomponente auf das Reibrad übertragen wird. Die Summation dieser seitlichen Verschiebungen liefert nach vollständiger Umfahrung der Fläche einen Wert, der sich proportional zum Inhalt der Fläche verhält und mit einer Gerätekosten multipliziert den Flächeninhalt ergibt. Auf der Basis dieses Gerätes entwickelte Amsler schon 1856 ein Potenzplanimeter mit mehreren Meßrollen. Das von ihm »Integrator« genannte Gerät bildet gleichzeitig das Integral über $f(x)$, $(f(x))^2$, ... Einen schon erheblich komplexeren Analogrechner baute 1876 William T. Kelvin (1824-1907) mit dem ersten »Harmonischen Analysator«, dem weitere Geräte anderer Konstrukteure mit unterschiedlichen Realisationen der Getriebe- und Meßrollen folgten. Sie integrieren über $f(x)$, $f(x) * \cos(x)$, $f(x) * \cos(2x)$, ..., $f(x) * \sin(x)$, $f(x) * \sin(2x)$, ..., das heißt, sie liefern die Koeffizienten für die Fourierentwicklung der Funktion $f(x)$.¹⁰⁷

Neben der Entwicklung von Einzelgeräten für verschiedene Aufgaben der Integralrechnung, bestand ein weiterer Entwicklungsschritt in der Verkopplung von Integrier- und Rechengetrieben sowie in der Hintereinanderschaltung von Integriergetrieben, womit eine mehrstufige Integration nachgebildet wurde.

Kelvin sah bereits in den siebziger Jahren des 19. Jahrhunderts, daß die Schließung des Kopplungskreises, indem der Ausgang eines Integriergetriebes auf den Eingang eines anderen gelegt wird, die Nachbildung einer Differentialgleichung ist. Die erste universelle mechanische Integrieranlage wurde jedoch erst 50 Jahre später unabhängig von den Überlegungen Kelvins von Bush mit dem »Differential Analyzer« realisiert. Eine solche universelle Integrieranlage besteht aus frei koppelbaren Bauteilen, nämlich:

- Integriergetriebe,
- Funktionsgetriebe,
- Multipliziergetriebe,
- Addiergetriebe,
- Proportionalgetriebe.

Um eine bestimmte Aufgabe lösen zu können, wird die Anordnung der Bauteile jeweils in einem »Koppelplan« festgelegt. Solche Koppelpläne sind für Bushs Differential Analyzer erhalten, sie lassen sich als eine teils verbale,

¹⁰⁷ Instruktive Exemplare dieser Geräte und auch späterer Analogrechner finden sich unter den Exponaten des Deutschen Museums, München. Anders als bei Digitalrechnern bleibt bei Analogrechnern der Vorgang anschaulich.

teils diagrammatische Darstellungsform für feste Programmierung verstehen.

Eine frühe Anwendung von Analogrechnern gab es in Deutschland ab 1914 bei der Eisenbahn. Mit Hilfe von »Fahrgraphen« konnten Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeit längs einer Fahrstrecke in Abhängigkeit vom Streckenprofil, der Zugkraft der Lokomotive und dem gezogenen Gewicht ermittelt werden. Hiermit stand ein Planungsinstrument für die effiziente Ausnutzung von Schienennetz und Material zur Verfügung, das ermöglichte, genaue Fahrpläne zu entwickeln. Netze anderer Art bildeten auch in den USA den Ausgangspunkt der Beschäftigung mit Analogrechnern. Zwischen 1907 und 1935 war eine der Hauptaufgaben des Electrical Engineering Department am MIT, eine Lösung für die Netzwerkinstabilitäten in der Elektrizitätsversorgung zu finden. Für die immer komplexer gewordenen elektrischen Netzwerke gab es zu Beginn dieses Zeitraums keine passende Theorie. (Wildes / Lindgren 1985, 32f.) Um praktische Lösungen zu finden, wurde zum Beispiel für das akademische Jahr 1916/17 am Electrical Engineering Department das Curriculum geändert. Auf dem Stundenplan standen jetzt vor allem Themen, die sich mit Problemen von elektrischen Netzwerken, mit Beleuchtungsproblemen und mit Telefonnetzen befaßten. (Wildes / Lindgren 1985, 54ff.)

Als 1930 der Physiker Karl T. Compton (1887-1954) Präsident des MIT wurde, hatte er die Aufgabe, aus dem MIT als anerkannter Ingenieurschule eine ebenso anerkannte wissenschaftliche Institution zu machen. (Wildes / Lindgren 1985, 33) Der grundlegende Wandel in der Physik (Quanten- und Relativitätstheorie) sollte in der Praxis berücksichtigt werden. Infolge der neuen physikalischen Theorien wurde auch der mathematische Apparat der Ingenieurwissenschaften größer.

Viele technische Probleme konnten nun gelöst werden, indem die höhere Analysis oder analytische statistische Methoden eingesetzt wurden. Zu diesen Problemen gehörten nicht nur die bereits genannten Elektrizitäts- und Telefonnetze, sondern auch die Konstruktion von Flugzeugen, für die zum Beispiel Druck, Dichte und Temperatur der Luft an jedem Punkt auf und in der Nähe einer Tragfläche berechnet werden mußten. Für die Berechnung und Simulation von Netzen wurden gewöhnliche Differentialgleichungen benötigt, während für die Berechnungen am Flugzeug partielle Differentialgleichungen angewandt wurden. (Goldstine 1972, 100f.)

Vannevar Bush entwickelte am MIT mehrere Analogrechner, einer davon war der schon erwähnte »Differential Analyzer«, den er zusammen mit

Harold L. Hazen (1901-1980) entwarf. Die Maschine, an der von 1928 bis 1930 gebaut wurde, enthielt sechs Integratoren und konnte Differentialgleichungen sechster Ordnung lösen. Ihre Genauigkeit erreichte ein Tausendstel, während der vorher gebaute »continuous integrator« nur bis zu einem Hundertstel genau war. Die neue Maschine war so erfolgreich, daß ähnliche Rechner am Ballistic Research Laboratory und an der Universität von Pennsylvania, aber auch in Großbritannien, Irland, Norwegen und der Sowjetunion konstruiert wurden. (Wildes / Lindgren 1985, 90, 92) Unter den Institutionen, die an dieser Art von Rechnern Interesse zeigten, sind für den weiteren Verlauf dieser Spur zur Universalmaschine das Ballistic Research Laboratory und die Moore School of Electrical Engineering besonders zu nennen. Das Ballistic Research Laboratory benötigte eine Maschine für die Berechnung von Differentialgleichungen für ballistische Zwecke, während die Moore School of Electrical Engineering an der Universität von Pennsylvania elektrotechnische Berechnungen durchführen wollte. (Goldstine 1972, 96)

Ab 1935 wurde dann ein Programm für den Bau einer noch komplexeren Maschine begonnen, die in der Mitte des Jahres 1942 fertig wurde. Sie wog 100 Tonnen, enthielt 2.000 Elektronenröhren, 200 Meilen Kabel, 150 Motoren und mehrere Tausend Relais. Bei dieser Maschine wurden die Instruktionen über drei Lochbänder eingegeben. Mit diesem Verfahren wurde vor allem die Programmierzeit verkürzt. (Wildes / Lindgren 1985, 92)

Die Konstruktion und der Bau der genannten Maschinen erfolgten am MIT in einer ganz besonderen Konstellation. Im Ersten Weltkrieg war das MIT an der Entwicklung von Waffen beteiligt und in das staatliche Autarkieprogramm integriert gewesen. Es entstand eine bis dahin unbekannte Zusammenarbeit zwischen Technikern und dem Militär: »For example, Lieutenant Jerome C. Hunsaker, who had established MIT's course – the first in the country – in aeronautical engineering, withdrew to take up responsibilities in the design of aircraft for the Navy.« (Wildes / Lindgren 1985, 57) Und: »The Navy Aviation School, the only one of its kind in the country, was set up in the summer of 1917 at the request of the secretary of the Navy. It was placed under the command of a naval lieutenant, with Professor H. W. Smith of the Electrical Engineering Department as dean.« (Wildes / Lindgren 1985, 60) Die Zusammenarbeit zwischen Militär und Forschern sowie die Beratung des Präsidenten Thomas Woodrow Wilson (1856-1924) war bereits im Ersten Weltkrieg mit dem National Research Council im Ansatz institutionalisiert worden, indem damals bekannte Na-

turwissenschaftler wie Robert Millikan (1868-1953) arbeiteten. Nach dem Ende des Krieges waren die »moguls of mobilisation«, unter ihnen der legendäre Bankier Bernard Baruch (1870-1965), dann bemüht, die geknüpften Verbindungen beizubehalten und in einem für ein solches Vorhaben ungünstigen gesellschaftlichen Klima erste Schritte in Richtung auf den militärisch-industriellen Komplex zu gehen. In dieser Zeit spielte die Verbindung von Militär und Universitäten noch keine große Rolle, jedoch bildete die Luftfahrttechnik eine Ausnahme. Wichtiger waren in den Zwischenkriegsjahren die Verbindungen zu Stiftungen wie der Rockefeller Foundation oder zu firmeneigenen Forschungseinrichtungen wie den Laboren von Bell und General Electric. (Vgl. Leslie 1993) Somit war die von Bush Ende der dreißiger Jahre im Vorfeld des Zweiten Weltkriegs initiierte und ab 1940 tätige Einrichtung des National Defense Research Committee als zentrales Steuerungsgremium der Kriegsforschung nicht völlig neu. Als Instanz einer rationalen Kräftenmobilisierung und –koordinierung paßte es zudem gut in die planerisch-administrative Landschaft des New Deal.¹⁰⁸ In Deutschland dagegen blieb eine vergleichbar effektive Integration von wissenschaftlichen, ingenieurwissenschaftlichen und industriell-technischen Lösungsansätzen aus.¹⁰⁹

Ein Unterschied zu den europäischen Ländern war ferner, daß die Studenten am MIT ihre Ausbildung abschließen konnten, bevor sie zum Militär mußten. Das heißt nicht, daß sie nicht auch militärisch ausgebildet worden wären. »The National Defense Act created the Reserve Officers Training Corps in 1916, and during the academic year 1917 - 1918, MIT established Coast Artillery and Signal Corps (limited to EE students) units, with plans

¹⁰⁸ Mit dem Musterbeispiel der Tennessee Valley Authority und dann mit der Atomic Energy Commission hatte sich die Roosevelt-Administration durchaus vergleichbare Instanzen außerhalb des herkömmlichen Verwaltungs- und Zuständigkeitsaufbaus geschaffen. Bush, politisch ein Konservativer, bestand allerdings auf der zeitlichen Begrenzung der von ihm geleiteten Einrichtungen auf die Kriegsdauer.

¹⁰⁹ Noch am ehesten gab es eine Steuerung ab 1939 in der Zusammenarbeit von Reichsforschungsamt und Heereswaffenamt beim Atomprogramm. Das Heereswaffenamt, ein Amt des Reichskriegsministeriums, war auf militärischer Seite für die Beschaffung von Waffen zuständig und hatte zugleich die Aufgabe der Entwicklung und Prüfung neuer Waffen. Hierfür unterhielt es eigene Forschungs- und Erprobungsstellen, deren Zuständigkeit und Kompetenz gegenüber industriellen oder akademischen Einrichtungen, die gleiche Sachzusammenhänge bearbeiteten, verteidigt wurden. Umgekehrt gilt dies auch für jene, so daß Kooperationsgremien häufig keine Synergieeffekte weckten, sondern Interessen in einer Konkurrenzsituation aushandelten oder wahrten. So verteidigte die führende Gruppe um Werner Heisenberg (1901-1976) im Atomprogramm zugleich die »Autonomie« des Berliner Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik gegen den Projektverantwortlichen Erich Bagge (1912-1996) im Heereswaffenamt. (Vgl. Bagge / Diebner 1957; Radkau 1983, 34-39)

for Ordnance and Engineering Corps units to follow.« (Wildes / Lindgren 1985, 57) In den USA hatte man die Bedeutung des hochqualifizierten technischen Personals für den – modernen – Krieg frühzeitig erkannt. Diese Erfahrungen aus dem Ersten Weltkrieg wirkten für die Entwicklung der zivil-militärischen Zusammenarbeit fort und im Zweiten Weltkrieg waren viele damals junge Wissenschaftler und Ingenieure »able in their mature years during World War II to build on that experience and attain much greater effectiveness« (Wildes / Lindgren 1985, 57).

Der Gedanke der Verwissenschaftlichung bestimmter militärischer Aufgaben und damit einer Arbeitsteilung und Spezialisierung im militärischen Bereich zeigt sich auch darin, daß zum Beispiel Forest Ray Moulton (1872-1952), seit 1918 der Leiter des »Ballistic Branch of the Office of the Chief Ordnance« in Washington, Armee und Marine überzeugte, junge Offiziere zur Universität nach Chicago zu schicken, damit sie dort ihren Dokortitel in Mathematik mit besonderer Berücksichtigung ballistischer Themen erlangten. »This is probably the genesis of the idea that not every officer has to be an all-purpose individual, as capable of commanding troops in the field as of understanding the requirements for a supersonic wind tunnel.« (Goldstine 1972, 80)

Es läßt sich noch ein weiteres Element für den Erfolg der Amerikaner gegenüber den Europäern ausmachen: Bis zur Mitte der dreißiger Jahre lag das Zentrum der modernen Mathematik und Physik in Europa. Mit der Machtergreifung des Nationalsozialismus in Deutschland und der darauffolgenden Emigration vieler bedeutender Wissenschaftler verlagerte sich dieses Zentrum jedoch in die USA. Bedingt durch die Emigration wurden vorhandene Wissenschaftlergemeinschaften aufgelöst und ihre Mitglieder in neuer »Mischung« wieder zusammengeführt. Dies und die damit verbundene Begegnung mit den wissenschaftlichen Arbeitsweisen an den US-amerikanischen Hochschulen steigerten allgemein die Mobilität von Wissenschaftlern, von denen aufgrund ihrer vorherigen Karriere eher zu erwarten gewesen wäre, daß sie die bereits erreichten, wohldotierten Lehrstühle nicht mehr aufgegeben hätten. Zu den neuen Erfahrungen gehörte auch, daß die Statusdifferenz zwischen Naturwissenschaftlern und Ingenieuren in den USA kleiner war als in Europa, was die Zusammenarbeit zwischen beiden Bereichen mit geringeren Hürden versah.¹¹⁰

¹¹⁰ Ein bekanntes Beispiel für ein solches interdisziplinäres Treffen von Ingenieuren, Physiologen und Mathematikern ist die Begegnung von Warren S. McCulloch (1898-1969), Rafael Lorente de Nó (1902-1990), Herman H. Goldstine (1913-2004), John von

Wie eng Wissenschaft, Technik und Militär zusammenhingen, zeigt der Fortgang der Rechnerentwicklung in den genannten Institutionen. Nachdem das Ballistic Research Laboratory und die Moore School bereits Kopien des »Differential Analyzer« gebaut hatten, wurde 1933 vom Ordnance Department of the U.S. Army, der Moore School und dem MIT ein gemeinsames Entwicklungsprogramm durchgeführt. Ergebnis dieses Entwicklungsprogramms war der Bau zweier Rechner. Unter der Leitung von Vannevar Bush wurde am Ballistic Research Laboratory die eine Maschine konstruiert, die andere entstand an der Moore School aus Mitteln der Civil Works Administration.¹¹¹ Beide Rechner wurden 1935 fertiggestellt. Die enge Zusammenarbeit zwischen den Institutionen behielt auch während der nächsten zehn Jahre ihre Bedeutung. (Goldstine 1972, 96f.)

Die These von Heintz, daß Computer, von ENIAC und Colossus abgesehen, nicht primär für den Krieg entwickelt worden seien, ist nicht haltbar. Wenn sie schreibt, die Computer »wurden vor Ausbruch des Krieges konzipiert, aufgrund privater Initiative und mit Blick auf einen Einsatz im Bereich des wissenschaftlichen und technischen Rechnens« (Heintz 1993, 214), dann verfehlt sie gerade das Charakteristikum dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Bei ihnen gab es keine strikte Trennung von Militär, Wissenschaft und Privatwirtschaft. Durch die Art der Arbeitsorganisation in den Forschungseinrichtungen und das Zusammenwirken universitärer und staatlicher Institutionen war es möglich und wurde es gefördert, daß verschiedene Wissenschaftler, Techniker und Ingenieure gemeinsam an einem Problem arbeiteten, dessen Lösung einen zivil-militärischen Doppelcharakter hatte, sofern nicht das Projekt im Ganzen von vornherein nach militärischen Anforderungen ausgelegt war.¹¹²

Vannevar Bush wurde von Norbert Wiener, der 1919 am MIT Mathematics Department begonnen hatte, unterstützt. Wiener lieferte die mathematischen Grundlagen für Bushs praktische Arbeiten, wie zum Beispiel den Anhang »Fourier Analysis and Asymptotic Series« zu Bushs Studie »Opera-

Neumann, Walter Pitts (1923-1969) und Norbert Wiener 1943/44 in Princeton. (Wiener 1948, 43f.) Daß es auch in den USA einen Statusunterschied zwischen Naturwissenschaftlern und Ingenieuren gab, zeigt der Wechsel des Dokortitels vom D. eng. zum D. sc. am MIT.

¹¹¹ Die »Civil Works Administration« war eine unter Präsident Roosevelt gegründete Institution, die im Anschluß an die Weltwirtschaftskrise im New Deal zur Schaffung von Arbeitsplätzen für qualifizierte Personen beitragen sollte. (Goldstine 1972, 96)

¹¹² Auf den militärischen Charakter der US-amerikanischen Entwicklungen verweist auch Walter Kaiser, er gibt auch für Konrad Zuses (1910-1995) Z3 und Z4 einen militärischen Kontext in Deutschland an. (Kaiser 1992, 356ff.)

tional Circuit Analysis«. (Bush 1929; Goldstine 1972, 87; Wildes / Lindgren 1985, 252) Im Jahr 1966 äußerte sich Jerome Wiesner (1915-1994), ebenfalls Mitarbeiter am MIT, über Wieners Verhalten und Interessen:

Norbert Wiener draw the communication sciences together at MIT. The ideas were in the air. Shannon's classic papers, Wiener's own wartime activities, the interest in signals and noise problems that many of us had developed all contributed; but Wiener was the catalyst. [...] He did his job almost without recognizing his role, for his interest was in ideas. But his action did bring together people with related interests. He did this in many ways – by personal contact, by stimulating meetings, and particularly by writing and speaking. Many can remember Norbert's daily visits around the Institute from office to office and his conversations that always began with »How's it going?« (Wiesner zitiert nach Wildes / Lindgren 1985, 266)

Wieners vielseitigen Interessen zeigen sich in den Themenbereichen, mit denen er sich befaßte: Rechenmaschinen für die Lösung partieller Differentialgleichungen (in Zusammenarbeit mit Vannevar Bush), Synthese von elektrischen Netzwerken (zusammen mit Yuk Wing Lee (1904-1989)), Flugabwehrartillerie und das Prinzip der Rückkopplung (zusammen mit Julian Bigelow (1913-2003)), Nachrichtentechnik und Informationsgehalt (zusammen mit Julian Bigelow und Claude Shannon). (Wiener 1948, 28, 30ff., 35ff.)

Weitere Problembereiche, die aufgrund der Kriegssituation behandelt wurden, waren Tragflächenberechnungen sowie umfangreiche Feuertafeln für den Einsatz der Artillerie in unterschiedlichen Klimagebieten¹¹³ und nicht weniger umfangreiche astronomische Tafeln für die Navigation der alliierten Fernbomber¹¹⁴. Bei der Erfüllung solcher Anforderungen traten die Leistungsdefizite von Analogrechnern deutlich zu Tage. Die Maschinen mußten für jede neue Aufgabe neu eingerichtet werden. Sie waren zu lang-

¹¹³ Die Unzulänglichkeit der in den zwanziger und dreißiger Jahren erstellten artilleristischen Tafeln wurde den alliierten Truppen zum ersten Mal während des Afrikafeldzuges drastisch vor Augen geführt.

¹¹⁴ Diese astronomischen Tafeln werden von der Defense Mapping Agency unter dem Titel »Sight Reduction Tables for Air Navigation« (Pub. No. 249) bis heute fortgeschrieben und bieten das im Vergleich zu den vorher in der Seeschifffahrt gebräuchlichen Verfahren bis heute bequemste bordeigene Verfahren zur astronomischen Standortbestimmung. Praktisch hat seine Bedeutung allerdings zunächst durch landgestützte Hyperbelnavigationsverfahren und dann durch Verfahren der Satellitennavigation abgenommen.

sam, um die großen Zahlenmengen zu verarbeiten, und sie rechneten nicht genau genug.¹¹⁵

In Deutschland wurden viele der genannten Probleme ebenfalls bearbeitet. Es machte sich jedoch bemerkbar, daß die Einzelarbeiten in geringerem Maße koordiniert und integriert wurden, so daß das Problem des Berechnens als eigenständiges Problem kaum in den Blick geriet. Was als problematisch angesehen wurde, waren mehr die Lösungsschwierigkeiten bei bestimmten Rechnungen für bestimmte Entwicklungs- oder Fertigungsvorhaben. Damit korrespondiert, daß es in Deutschland keine Analogrechner gab, die in ihrer Leistungsfähigkeit mit den Maschinen Bushs vergleichbar wären. Solche Maschinen wurden erst in den Jahren 1940 bis 1942 von den Askania-Werken¹¹⁶ und 1941 bis 1944 von der Firma Ott entwickelt. Erst im Juni 1944 konnte der Rechner von Ott provisorisch im Institut für Praktische Mathematik (IPM) an der Technischen Hochschule in Darmstadt aufgebaut werden, seine endgültige Aufstellung fällt in das Jahr 1948, von da an wurde er bis 1956 benutzt.

Der Aufstellungsort, das IPM, verweist allerdings darauf, daß im nationalsozialistischen Deutschland eine nachholende Bewegung zu den USA in Gang gekommen war, in der eine ansatzweise Zentralisierung des Rechnens für Großprojekte stattfand. Das 1928 gegründete Institut galt als »Rechenfabrik« und war schon in der Vorbereitungsphase des Zweiten Weltkriegs zu einem erheblichen Teil mit Berechnungen für Ballistik und Funkortung befaßt. Während des Krieges waren seine Kapazitäten durch Arbeiten für das V2-Programm stark in Anspruch genommen. Das Institut benutzte für seine Rechnungen auf dem Markt angebotene Rechen- und Lochkartenmaschinen, die in einer eigenen Werkstatt für die jeweiligen Zwecke modifiziert und vor allem auch verkoppelt wurden. (Vgl. Petzold 1992, 226f.) Es ist auffällig, daß in dieser »Rechenfabrik« trotz des hohen Qualifikationsni-

¹¹⁵ Das Problem der Genauigkeit enthielt eigentlich drei Aspekte: Zum einen gab es die Begrenzung durch die mechanischen Fertigungstoleranzen. Weiter gab es Verluste durch die notwendige Kopplung von Aggregaten. Und drittens blieb die erreichte Genauigkeit nicht konstant, da die Bauteile während der Benutzung durch Verschleiß ihre Dimensionen änderten. Für den Umgang mit solchen Problemen legte von Neumann einen mathematischen Lösungsansatz vor.

¹¹⁶ Die Berliner Askania-Werke AG war seit 1937 eine Tochtergesellschaft der Robert Bosch AG. Die Askania-Werke waren ein führender Hersteller von Geräten für die Flugnavigation. 1933 schlossen sie mit dem in den USA auf diesem Gebiet führenden Unternehmen Sperry Gyroscope Kartellverträge, die Märkte und Patente aufteilten. Noch im Juli 1939 folgte ein weiterer Vertrag, der unter anderem die britische Sperry-Tochter daran hinderte, für Kampfflugzeuge geeignete Geräte zu bauen. (Vgl. Greiner 1995, 37)

veaus der Mitarbeiter und der Leistungsfähigkeit der Werkstatt¹¹⁷ keine Rechnerentwicklung stattfand, die sich auf ein theoretisches Konzept des Rechnens stützte. Dabei kannten Alwin Walther (1898-1967), der Direktor des Instituts, und einige seiner Mitarbeiter sogar die Maschinen und Konzepte Zuses in einem gewissen Umfang. Walther war jedoch nicht davon überzeugt, »daß sie für die Arbeiten des Instituts geeignet waren. Sein Interesse galt nicht Maschinen, die intern universelle Eigenschaften aufwiesen, sondern solchen, die möglichst schnell und zuverlässig die üblichen, einfachen Rechengänge, die bereits an die Möglichkeiten der mechanischen Tischrechenmaschinen angepaßt waren, ausführten und die vor allem die Ergebnisse ohne Übertragungsfehler in reproduzierbare Zahlentafeln ausdruckten.« (Petzold 1992, 228)¹¹⁸

3.1.3 Erste Digitalrechner

Am 2. März 1940 stellte Vannevar Bush in einem Memorandum das Konzept einer »Arithmetical Machine« für die Lösung partieller Differentialgleichungen vor.

The machine [...] is expected to take its information from previously prepared tapes, to perform the four operations of arithmetic as well as storage of partial results, extraction from storage for further manipulation, and printing of final results. There will be three tapes inserted at the beginning of each problem. Each of these will be a punched tape, although magnetic tapes or tapes with pencil marking to be picked up by feelers may be substituted. The first, or A tape, contains the numbers to be operated on. [...] The second, or B tape, contains constants to be used in the computation. [...] Finally the

¹¹⁷ Hartmut Petzold nennt zwei Beispiele für die Leistungsfähigkeit der Werkstatt, nämlich die elektrische Zusammenschaltung von 64 mechanischen Rheinmetall-Maschinen und die mechanische Kopplung von zwei Brunsviga-Doppelrechenmaschinen über eine gemeinsame Antriebswelle, so daß »in einem Arbeitsgang vier Einstellwerte mit einem gemeinsamen Faktor multipliziert werden konnten«. (Petzold 1992, 227)

¹¹⁸ Mit dem Ziel einer rein quantitativen Leistungssteigerung vor Augen scheint Walther noch 1948 an die Konzeption des Darmstädter Elektronischen Rechenautomaten (DERA) gegangen zu sein. In den ersten Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg führte Walther einen Gedankenaustausch mit Howard H. Aiken (1900-1973). In ihm, so kann man rückschließen, war die Universalität des Rechners wohl kein Thema, so daß sich hieraus der Zweifel gewinnen läßt, ob Aiken in diesen Jahren den qualitativen Unterschied des Computers zu den bisherigen Rechenmaschinen schon verstanden hatte.

third, or C tape, contains the instructions for the machine, in the given problem. The holes in any given row of this tape give instructions for a particular operation. First there are holes the positions of which indicate the source of the numbers to be used in that operation, and such source may be the A tape, the B tape, or one of the storage reservoirs. Second a hole by its position indicates the operation to be performed, that is addition, subtraction, multiplication, or division. Finally a hole indicates the disposition of the result, that is whether it is to be placed in an indicated storage reservoir or printed. Extra hole positions may be used to indicate whether a storage reservoir is to be cleared, the order of use of two numbers in subtraction or division, whether the result is to be added into or subtracted from the reservoir sum, and the like. (Bush 1940, 337f.)¹¹⁹

Die vorgeschlagene Rechenmaschine sollte mit Röhren arbeiten, um eine hohe Rechengeschwindigkeit zu erreichen.

Am 21. September 1940 reagierte Wiener in einem Brief an Bush auf dessen Memorandum und modifizierte den Vorschlag für die Rechenmaschine und die für sie geltenden Anforderungen. (Wiener 1940, 122ff.) Wiener schreibt in »Kybernetik«, das Hauptproblem habe darin bestanden, Funktionen mit mehreren Veränderlichen im Rechner darzustellen. Gewöhnliche Differentialgleichungen ließen sich schon mit dem Analogrechner von Bush lösen, partielle Differentialgleichungen jedoch nicht. Wiener sah außerdem einen Zusammenhang zum Prozeß der Bildabtastung beim Fernsehen.

Es war klar, daß jeder Bildabtastprozeß die Zahl von Daten, mit denen operiert wird, verglichen mit der Zahl der Daten in einem Problem gewöhnlicher Differentialgleichungen, ungeheuer vergrößern mußte. Um vernünftige Ergebnisse in einer vernünftigen Zeit zu erhalten, wurde es nötig, die Geschwindigkeit der Elementarprozesse so hoch wie möglich zu steigern und das Unterbrechen des Ablaufs dieser Prozesse durch Schritte von wesentlich langsamerer Natur zu vermeiden. Es wurde auch nötig, die einzelnen Prozesse mit einem sehr hohen Grad an Genauigkeit auszuführen, damit die sehr häufige Wiederholung dieser Elementarprozesse nicht einen so großen Fehler

¹¹⁹ Der Ansatz von Bush mit den drei Bändern erinnert auf den ersten Blick stärker als die späteren Realisierungen von Rechnern in den USA an das Konzept Turings oder auch an die britischen Dechiffriermaschinen.

verursachte, daß das Resultat praktisch völlig unbrauchbar wurde. So entstanden die Forderungen:

1. daß das zentrale Addier- und Multiplizierwerk der Rechenmaschine numerisch sein sollte, wie bei einer gewöhnlichen Addiermaschine; nicht von der Art stetiger Meßprozesse, wie beim Analogrechner von Bush;
2. daß diese Mechanismen, die im wesentlichen Schalter sind, Elektronenröhren enthalten sollten und nicht Getriebe oder mechanische Relais, um nämlich einen schnellen Arbeitsablauf zu sichern;
3. daß es, in Übereinstimmung mit der Erfahrung, die bei einigen bestehenden Apparaten der Bell Telephone Laboratories gesammelt wurde, wahrscheinlich wirtschaftlicher wäre, zur Addition und Multiplikation das binäre Zahlensystem zu benutzen als das dekadische System;
4. daß die gesamte Folge der Operationen durch die Maschine selbst ausgeführt würde; daß also kein menschliches Eingreifen vom Zeitpunkt der Dateneingabe bis zur Auslieferung der Endresultate notwendig wäre und daß alle hierbei notwendigen logischen Entscheidungen in die Maschine selbst hineingebaut werden sollten;
5. daß die Maschine eine Vorrichtung für das Speichern von Daten enthielte, die diese schnell aufzeichnet, bis zum Löschen festhält, sie schnell liest, schnell löscht und dann unmittelbar für das Speichern von neuem Material bereit ist. (Wiener 1948, 28f.)

Diese Forderungen wurden zwar nicht sofort umgesetzt – »Im Stadium der Kriegsvorbereitungen schienen sie nicht wichtig genug zu sein, um sofortige Arbeit an ihnen zu rechtfertigen.« (Wiener 1948, 29f.) –, aber sie enthalten die Grundgedanken für moderne Rechenmaschinen. Es wird ein digitaler (nicht analoger), elektronischer (mit Röhren ausgestatteter) Rechner, der mit dem Binärsystem arbeitet, logische Operationen ausführen kann und eine Speichermöglichkeit für Daten gewährleistet, vorgestellt. Die Ziele, die mit genau diesen Elementen erreicht werden sollen, sind hohe Genauigkeit und große Geschwindigkeit. Beides ist notwendig, um die genannten datenintensiven Berechnungen in adäquater Zeit durchführen zu können.

Genau an diesem Punkt lassen sich die bis dahin vorhandenen Rechenmaschinen, die Hollerithmaschine und der Analogrechner, zusammenführen. Der Analogrechner, dessen Hauptfunktion die Integration ist und der komplizierte mathematische Gleichungen mit begrenzter Präzision lösen

kann, und die Hollerithmaschine, die in den vier Grundrechenarten genau rechnet, (mengen)logische Operationen (Selektion) ausführt, große Datenmengen in kurzer Zeit verarbeitet und die in ihren fortgeschrittenen Modellen Daten mischen kann.

Spur 1	Spur 2
Hollerithmaschine ab circa 1890 • Grundrechenarten • Logische Operationen zum Steuern, Sortieren, Mischen • Hohe Geschwindigkeit	Planimeter ab circa 1850 • Integrieren Analogrechner ab circa 1925 • Differentialgleichungen mindestens erster und zweiter Ordnung • Mechanisch begrenzte Präzision
Digitalrechner ab circa 1940 • Numerisches Addier- und Multiplizierwerk • Binäres statt dezimales Zahlensystem • Elektronenröhren statt mechanischer Relais • Speichern von Daten in der Maschine • Ausführung logischer Entscheidungen in der Maschine	

Tabelle 14. Spuren der Rechnerentwicklungen zum Computer

Die gesteigerten Anforderungen waren durch praktische Aufgabenstellungen entstanden. Einen wesentlichen Anstoß zur Beschäftigung mit präzisen und schnellen Rechenmaschinen lieferte das Problem der Flugabwehr, Vorhaltewinkel bei schnellen Flugzeugen erfassen zu können.

Schon vor dem Krieg war es klargeworden, daß die Geschwindigkeit des Flugzeugs alle klassischen Methoden der Feuerleitung überwunden hatte und daß es nötig war, alle notwendigen Rechnungen in die Regelungsapparatur selbst einzubauen. Diese waren sehr schwierig geartet durch die Tatsache, daß – nicht zu vergleichen mit allen vorher betrachteten Zielen – ein Flugzeug eine Geschwindigkeit hat, die ein sehr ansehnlicher Bruchteil der Geschwindigkeit des Geschosses

ist, das zum Beschuß verwendet wird. Demgemäß ist es außerordentlich wichtig, das Geschloß nicht auf das Ziel abzuschießen, sondern so, daß Geschloß und Ziel im Raum zu einem späteren Zeitpunkt zusammentreffen. Wir mußten deshalb eine Methoden finden, die zukünftige Position des Flugzeuges vorherzusagen. (Wiener 1948, 30)

Die Vorhersage, wo sich ein Flugzeug zu einem bestimmten Zeitpunkt befinden wird, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Im einfachsten Fall kann sein Kurs linear extrapoliert werden. Der Pilot kann jedoch auch seinen Kurs bewußt und willkürlich ändern. In diesem Fall ist zu überlegen, welche Kursänderungen in welcher Zeit tatsächlich machbar sind, ohne daß das Flugzeug zum Beispiel abstürzt. Eine Kursänderung ist nur mit den Steuerrudern möglich. Die neue Strömung, die sich einstellt, benötigt einige Zeit, bevor sie sich auf die Beschleunigung auswirkt. Und erst nachdem die Änderung der Beschleunigung in eine Änderung der Geschwindigkeit umgesetzt worden ist, kann eine Änderung der Position erfolgen. (Wiener 1948, 30f.) Es gibt also eine Eingrenzung der möglichen Kurven oder zukünftigen Positionen. Ziel war, diese Kurven vorauszuberechnen. Um eine Vorhersage für eine Flugkurve zu erreichen, müssen Operationen auf deren Vergangenheit ausgeführt werden.¹²⁰

Da nicht nur das Flugabwehrgerät, sondern auch das Flugzeug von Menschen bedient wird, sind auch deren Handlungscharakteristiken zu berücksichtigen. An dieser Stelle sahen Wiener und Bigelow einen Bezug zum Begriff der Rückkopplung. Darunter wird verstanden, »daß bei einer von einem Muster gelenkten Bewegung die Abweichung der wirklich durchgeführten Bewegung von diesem Muster als neue Eingabe benutzt wird, um den geregelten Teil zu veranlassen, die Bewegung dem Muster näherzubringen« (Wiener 1948, 32). Unter Zuhilfenahme des Prinzips der Rückkopplung lassen sich auch Modelle für menschliche Handlungen wie zum Beispiel das bewußte Aufheben eines Bleistifts formulieren. »Um eine Handlung auf solche Weise durchzuführen, muß es bewußt oder unbewußt eine Nachricht zum Nervensystem geben über den Grad, zu dem der Bleistift zu jedem Augenblick noch nicht erreicht ist.« (Wiener 1948, 34) Funktioniert die Rückkopplung nicht, dann wird das Ziel nicht erreicht, es kann sogar zu übermäßigen Rückkopplungen führen, bei der die Bewegung zu unkontrollierbaren Schwingungen führt.

¹²⁰ Die Berechnungen führte Wiener auf dem Analogrechner Bushs durch, der als Modell eines Feuerleitgerätes fungierte.

Eine ausführliche Erläuterung ihrer Überlegungen zu diesem Themenbereich veröffentlichten Wiener, Rosenblueth und Bigelow unter dem Titel »Behaviour, Purpose and Teleology« in »Philosophy of Science« 1943. Darin erklären sie die behavioristische (im Gegensatz zur funktionellen) Betrachtungsweise, mit der das Verhalten eines beliebigen Objekts, sei es ein Lebewesen oder eine Maschine, beschrieben werden kann. Der behavioristische Ansatz betrachtet nicht die innere Struktur und Organisation des Objekts, sondern sieht das Objekt als Black Box an, auf die ein äußeres Ereignis wirkt (Eingangsgröße) und die eine Änderung in der Umgebung verursacht (Ausgangsgröße). Diese Veränderungen eines Objekts hinsichtlich der Umgebung wird Verhalten genannt. Das Verhalten kann zweckgerichtet sein oder nicht, und es kann eine Rückkopplung enthalten, das heißt, daß ein Teil der Ausgangsgröße als Eingangsgröße in das Objekt wieder zurückgeführt wird. Das zweckgerichtete Rückkopplungsverhalten wiederum kann entweder extrapolativ (vorhersagend) oder nicht-extrapolativ (nicht-vorhersagend) sein. (Rosenblueth / Wiener / Bigelow 1943, 18ff.) Zu den vorhersagenden Rückkopplungen heißt es in Wieners »Kybernetik«:

Rückkopplungen dieses allgemeinen Typs werden sicher in menschlichen und tierischen Reflexen gefunden. Wenn wir auf die Entenjagd gehen, ist der Fehler, den wir zu einem Minimum zu machen versuchen, nicht derjenige zwischen der Richtung der Flinte und dem wirklichen Ort des Zieles, sondern der zwischen der Richtung der Flinte und dem vorweggenommenen Ort des Zieles. Jedes System der Luftabwehrfeuerleitung muß auf das gleiche Problem stoßen. (Wiener 1948, 167)¹²¹

Verallgemeinert man das hier Beschriebene und betrachtet es in Hinblick auf die in Kapitel 2 erörterten Defizite der Modellbildung, so läßt sich zusammenfassend sagen, daß hierin eine letztlich modelltheoretische Alternative zu den undynamischen Beschreibungen (mathematisch-axiomatisch) von Neumanns gelegen hat, für die zwei miteinander verbundene Gesichtspunkte ausschlaggebend sind (Zeitabhängigkeit oder Prozeßcharakter und Zufälligkeit oder Statistik). Diese Alternative wurde für die Informatik nicht dauerhaft paradigmatisch, denn spätestens seit den siebziger Jahren,

¹²¹ Der Begriff der Rückkopplung wurde von R. Wagner (1893-1970) in den Jahren 1925 bis 1927 bereits in Aufsätzen in der »Zeitschrift für Biologie« verwandt. Nach Hans-Joachim Flechtner (1902-1980) (1970, 8) ist Bigelow und Wiener diese frühe Verwendung des Begriffs nicht bekannt gewesen.

also seit der Etablierung der Informatik als wissenschaftlicher Disziplin, ist die Aufmerksamkeit und anfangs sicherlich überschwengliche Begeisterung für den Wienerischen Ansatz verschwunden. Kybernetik und Informatik, die bis dahin als kaum unterscheidbar erschienen, differenzierten sich,¹²² und es fand eine Verlagerung des Forschungs- und Entwicklungsinteresses sowie der Bereitstellung von Mitteln auf die Informatik statt.

3.1.4 ENIAC

Die bisher genannten Rechenmaschinen hatten sehr unterschiedliche, umfassende »Fähigkeiten«. Während Analogrechner zur Lösung von komplizierten mathematischen Gleichungen entworfen wurden, die zum Beispiel im Zusammenhang mit modernen Elektrizitätsnetzen auftraten, konnten Hollerithmaschinen nicht nur die vier Grundrechenarten, sondern mit ihren Sortiermöglichkeiten auch logische Operationen ausführen. Nur war den Erfindern und Benutzern dieser Rechner nach allem, was aus der Literatur hervorgeht und worauf die Überlieferung hinweist, nicht klar, welchen theoretischen Status ihre Maschinen hatten.

Bei der Verfolgung der Spuren, die zur Universalmaschine führten, ist nun auf einige andere Entwicklungen im Feld der Mehrfacherfindung des Computers hinzuweisen, die deutlich machen, daß gerade die Verbindung der beiden Konzepte zur Universalmaschine führte.

1937 formulierte der Physikstudent Howard H. Aiken in Harvard seine Anforderungen an einen Rechner:

He indicated four points of difference between punched card accounting machinery and calculating machinery as required in the sciences. The requirements are these: ability to handle both positive and negative numbers; to utilize various mathematical functions; to be fully automatic in operation – no need for human intervention; to carry out a calculation in the natural sequence of mathematical events. (Goldstine 1972, 111)

1939 wurde ein Projekt gegründet, in dem Harvard- und IBM-Mitarbeiter, von der US-Marine finanziert, zusammenarbeiteten, um eine Rechenmaschine zu entwickeln. Diese elektromechanische, digital arbeitende Maschi-

¹²² Zum Beispiel wurde an der TU Berlin 1976 der Fachbereich »Kybernetik« in »Informatik« umbenannt.

ne mit dem Namen »Automatic Sequence Controlled Calculator« oder »Harvard Mark I« wurde 1944 fertiggestellt. Sie diente vor allem der US-Marine für ballistische Berechnungen. (Goldstine 1972, 111, 118; Lindner / Wohak / Zeltwanger 1984, 92f.)

Parallel zu Aikens Projekt wurde ab 1937 ebenfalls ein elektromechanischer Rechner, der »Partially Automatic Computer«, von George R. Stibitz (1904-1995) und anderen Mitarbeitern der Bell Telephone Laboratories entwickelt. Dieser Rechner war 1940 betriebsbereit. Während des Krieges wurden in den Bell Telephone Laboratories für das Militär weitere Rechner gebaut, die alle mit Telefonrelais ausgestattet waren. So enthielten der »Relay Interpolator« etwa 500 Relais, der »Ballistic Computer« etwa 1.300 und das 1944 entstandene »all-purpose computing system« über 9.000 Relais und viele andere Teile aus der Telefontechnik. (Goldstine 1972, 115f.)

Die dritte Parallelentwicklung in den USA ist schließlich der ENIAC, der »Electronic Numerical Integrator And Computer«.

John William Mauchly (1907-1980) und John Presper Eckert (1919-1995) von der Moore School of Electrical Engineering der Universität von Pennsylvania schrieben 1942 ein Memorandum über die Vorteile eines elektronischen Rechners. John G. Brainerd (1904-1988) unterstützte dieses Memorandum und setzte sich dafür ein, daß an der Moore School verstärkt in diese Richtung geforscht werden sollte. Im Frühjahr 1943 erhielten Leslie E. Simon, Paul N. Gillon (1907-1996) und Herman H. Goldstine vom Ballistic Research Laboratory eine technische Beschreibung des Entwurfs. (Knuth 1970, 249) Schon kurze Zeit später – im März 1943 – schlug das Ordnance Department als Auftraggeber ein Entwicklungsprogramm für einen elektronischen, digitalen Computer für das Ballistic Research Laboratory vor. Am 9. April wurde der Vorschlag angenommen, am 31. Mai wurde mit der Arbeit begonnen und am 5. Juni 1943 wurde ein definitiver Vertrag eingegangen. (Goldstine 1972, 150) Der Entwicklungsauftrag des Army Ordnance Department für die Moore School hatte ein Volumen von einer halben Million Dollar. (Stern 1980, 349) Koordinator zwischen den drei beteiligten Institutionen war Goldstine, der mit Unterstützung von Gillon, der am MIT studiert hatte und seit 1939 zunächst leitender Beamter (executive officer), später stellvertretender Direktor (assistant director) am Ballistic Research Laboratory wurde, das ENIAC-Projekt forcierte. Eckert und Mauchly leiteten die Entwicklung als »chief engineer« beziehungsweise »principle consultant«. (Stern 1980, 349)

Mauchly war 1941 auf die Ideen von John V. Atanasoff (1903-1995) am Iowa State College, der 1940 – wahrscheinlich als erster – eine digitale Rechenmaschine mit Vakuumröhren gebaut hatte, aufmerksam geworden. (Atanasoff 1940, 315ff.; Goldstine 1972, 125f.) 1942 beschrieb er die Vorteile von elektronischen Digitalrechnern gegenüber (elektro)mechanischen Analogrechnern in »The Use of High Speed Vacuum Tube Devices for Calculating«:

As will be brought out in the following discussion, the electronic computer may have certain advantages other than the single one of high speed when compared with the differential analyser of the usual mechanical construction. For instance, the mechanical analyser has an accuracy limited by the way in which the slippage and backlash enter into its operation, whereas the electronic device, operating solely on the principle of counting, can, without great difficulty, be made as accurate as is required for any practical purpose. Secondly, whatever errors are committed by the electronic device are mathematically determined errors which arise through the use of a difference equation in place of a differential equation, and since these errors are mathematically determined, they are reproducible. Hence a check calculation may be run at any time, and whatever the result may be for the first run, that result should be obtained on every succeeding test run. Thirdly, the ease with which the various components of such a computing device can be interconnected by cables and switching units makes it possible to set up a new problem without much difficulty. It is also appreciated that additional component parts may be built and connected in whenever more complicated problems require them, and that additional spare components may be kept in reserve and quickly interchanged with any components which fail in operation. Fourthly, a convenient way of diagnosing faults and isolating defective units is available through the use of standard electrical testing procedures. Fifthly, not only can the regular problems which have to be solved be run through quickly on the electronic [sic!] computer, but also the test problems, and hence less time is lost in discovering any failure which may develop during operation. Sixthly, both the mechanical analyser and the electronic computer require maintenance by skilled labor, but the number of persons required to turn out the same amount of finished work should be appreciably less in the case

of the electronic computer. (Mauchly 1942, 355f.)

Die von Mauchly entwickelten Vorschläge wären nur wenige Jahre zuvor in dieser Form nicht möglich gewesen, denn der Rechnerbau erweist sich auch bezüglich dieser Komponenten als abhängig von technischen Entwicklungen in anderen Bereichen. So ist Mauchlys Vorschlag von der Entwicklung bestimmter Röhrentypen und wesentlich von der Erhöhung der Produktionsgenauigkeit bei der Röhrenherstellung abhängig. Eine ausreichende Produktionsgenauigkeit wurde erst erreicht, als die Röhre zu einem Massenprodukt wurde, und zwar weniger für den zivilen Markt (Radiogeräte), sondern zunächst kriegsbedingt vor allem für Kommunikations- und Zielerfassungsgeräte des Militärs.

Zu den Vorteilen, die Mauchly neben der enormen Geschwindigkeit der elektronischen Rechner, die etwa 1.000 mal schneller als elektromechanische Rechner arbeiteten, sah, hier einige Anmerkungen:

Der Vorteil der Korrektheit, das heißt der Möglichkeit, Fehler leichter zu erkennen, weil es mathematische Fehler sind und die Berechnungen ohne großen Aufwand wiederholt werden können, basiert auf der Annahme, die Rechenmaschine selbst sei fehlerfrei. Denn nur dann könnte ein Rechenfehler tatsächlich reproduziert werden. Da die einzelnen Bauteile selbst nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit korrekt funktionieren¹²³, ist es möglich, daß die mehrfache Berechnung einer Aufgabe zwar immer die gleichen Ergebnisse, aber nicht unbedingt die richtigen Ergebnisse liefert. Eine Überprüfung ließe sich nur vom Menschen durchführen, was jedoch aufgrund der Komplexität der Aufgaben nicht einfach, wenn nicht sogar unmöglich ist. So erlaubten die elektronischen Rechner – zunächst der ENIAC – aufgrund ihrer Geschwindigkeit, meteorologische Berechnungen auszuführen, deren Dauer – wären sie von Menschen gerechnet worden – größer gewesen wäre als der vorhandene Zeitraum bis zur Wettervorhersage.¹²⁴ (Vgl. Goldstine 1972, 146f.; Charney / Fjörtoft / von Neumann 1950, 237ff.)

¹²³ Vgl. von Neumann 1956; Shannon 1958, 123-129.

¹²⁴ Für Wettervorhersagen wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Rechenmodelle vorgelegt. Das eine von Wiener, das andere von von Neumann. Die Differenz zwischen diesen Modellen läßt sich wiederum auf die Unterscheidung von statistisch und prozessual einerseits sowie axiomatisch und deduktiv andererseits bringen. Die »Wetterkontroverse« zwischen Wiener und von Neumann setzte sich über Jahre fort und führte zu unterschiedlichen Vorhersagemodellen bei Wetterdiensten, je nachdem, welcher »Schule« sich die wissenschaftlichen Meteorologen zurechneten. Erst seit den siebziger Jahren kombinieren Wettermodelle beide Ansätze.

Der Aufbau der Maschine aus Bausteinen, die relativ schnell neu zusammengesaltet und erweitert werden können, bedeutet eine Standardisierung. Dieser Vorteil zeigt die damalige Vorstellung, daß ein Rechner für jede Aufgabe neu eingerichtet werden müsse, aber es wurde schon erkannt, daß der Rechner einer größeren Anzahl unterschiedlicher Anforderungen genügen konnte als ein Analogrechner. Mauchly vergleicht den elektronischen Rechner mit einer großen Anzahl vorhandener Analogrechner; es ist dies ein Vergleich, der aber auch deutlich macht, daß das breitere Leistungsvermögen als quantitativer Fortschritt gegenüber dem anderen Rechartyp verstanden wurde, die Differenz aufgrund der Arbeitsweise – also mechanische Operationen als Zahlenrechnen mit Hilfe eines technischen Mediums versus logische Operationen – ist noch nicht im Blick.

If one desires to visualize the mechanical analogy, he must conceive a large number, say twenty or thirty calculating machines, each capable of handling at least ten-digit numbers and all interconnected by mechanical devices which see to it that the numerical result from an operation in one machine is properly transferred to some other machine which is selected by a suitable program device; and one must further imagine that this program device is capable of arranging a cycle of different transfers and operations of this nature with perhaps fifteen oder twenty operations in each cycle. It might be said that even though such mechanical device were constructed, and even though its speed of operation were considered satisfactory, the number of problems which it would solve within the lifetime which is determined by the wear of its parts, would undoubtedly be very small. (Mauchly 1942, 356)

Die Möglichkeit, nicht nur die eigentlichen Aufgaben, sondern auch die Testaufgaben vom Rechner lösen lassen zu können, so daß Fehler bereits im Testfall entdeckt werden können und Zeit gespart wird, ist ein Vorteil sowohl im Hinblick auf ökonomische als auch auf technische Aspekte.

Der von Mauchly schließlich genannte Vorteil, eine geringere Anzahl von ausgebildeten Personen für die Bedienung des Geräts zu benötigen, betrifft ebenfalls die Ökonomie.¹²⁵ Die Programmierung der frühen Rechenmaschinen, die darin bestand, durch Steckverbindungen die Teile der Maschine miteinander zu verbinden, war eine komplizierte und zeitintensive

¹²⁵ Zur Ökonomie (Zeitfragen, technische Fragen, finanzielle Fragen) vgl. Abschnitte 2.2.8 und 3.2.2.

Aufgabe, die oft von Frauen durchgeführt wurde. Die männlichen Mathematiker und Ingenieure hielten diese Tätigkeit für bloße Bedienung und bezeichneten zum Beispiel die Gruppe der Mathematikerinnen, die den ENIAC programmierten, als »ENIAC-Girls«. (Lindner / Wohak / Zeltwanger 1984, 96) Die Arbeitsteilung hat sich erst geändert, nachdem nicht mehr maschinenspezifisch zu programmieren war, sondern als Programmiersprachen eingesetzt wurden. Damit galt die Programmierung nicht mehr als Bedienung. Zudem wurde eine neue Ebene neben dem Hardware- und Software-Entwickler, der Operator, eingeführt. So führten technische Änderungen zu einer anderen Arbeitsorganisation. Diese wiederum führte zu einer anderen Arbeitsteilung, mit der Folge, daß der Umgang mit dem Artefakt Computer von der Anwendung entkoppelt wurde.

Auch bei der Entwicklung des ENIAC kamen die Organisationsformen von Arbeitsteilung und Kooperation zwischen staatlichen, militärischen und universitären Institutionen, deren paradigmatischer Charakter bereits im Zusammenhang mit der Entwicklung der Analogrechner unter Vannevar Bush dargestellt wurde, zum Tragen. Es waren verschiedene Personen mit unterschiedlichsten theoretischen und vor allem praktischen Erfahrungen auf dem Gebiet der Rechenmaschinen in einer organisierten, funktionellen Arbeitsteilung mit dieser Entwicklung befaßt. Goldstine, der als Koordinator des Projekts äußerte, der Erfolg sei ein »joint effort« gewesen, trifft den Kern der Sache, denn diese Form wissenschaftlicher Arbeitsorganisation macht die Frage nach *dem* Erfinder unsinnig. (Goldstine 1972, 155f.; Knuth 1970, 249) Die Kontroversen, die es dennoch gab, zeigen allenfalls die Diskrepanz zwischen einem Selbstverständnis, das am traditionellen Bild des individuell forschenden Wissenschaftlers orientiert ist, und der Wirklichkeit der hier frühzeitig vorhandenen Struktur moderner Großforschung.

Wie das Los-Alamos-Projekt, das den Bau der Atombombe zum Ziel hatte, war das ENIAC-Projekt ebenfalls ein Großprojekt, das sich nur arbeitsteilig realisieren ließ. Durch die Art der Organisation war es möglich, verschiedene Wissenschaftler und Ingenieure – jeden in seinem Teilgebiet und dennoch gemeinsam – an einem komplexen Problem arbeiten zu lassen. Die Entwicklung des ENIAC war auf eine bestimmte, zielgerichtete Lösung praktischer militärischer Probleme ausgerichtet. Vor allem sollten mit dem ENIAC Berechnungen von Geschosßbahnen für die Artillerie durchgeführt werden. (Berkeley 1949, 144; Goldstine 1990, 9)

Wie wichtig die Rechenmaschinen für den Krieg waren und wie wenig Rechenkapazität trotz hoher Nachfrage zur Verfügung stand, zeigt eine von Goldstine 1944 aufgestellte Statistik:

(4) The following summary for the week ending August 15, 1944 is representative of the quantity of this work, in the Computing Branch alone, [...]:

	Completed	In Progress
Ground Gunfire Tables	10	16
Bombing Tables	1	28
Aircraft Fire Tables	3	16
Ballistic Tables		6
Miscellaneous Major Computations	1	8

The number of tables for which work has not been started because of lack of computational facilities far exceeds the number in progress. Requests for the preparation of new tables are being currently received at the rate of six per day. (Goldstine 1972, 166)¹²⁶

Die Forschungssituation mit ihrer Arbeitsteilung hatte zwei Konsequenzen: Zum einen war das Projekt erfolgreich, indem es den ersten elektronischen Rechner der USA baute. Zum anderen fehlte vielen der Beteiligten jedoch die Qualifikation, um die paradigmatischen theoretischen Zusammenhänge der Computerentwicklung einzuholen, und es gab für sie auch keine Notwendigkeit, dies zu tun. Wichtig war, einen als technisches Gerät funktio-

¹²⁶ Die Aufstellung von Goldstine deutet darauf hin, daß das US-amerikanische Militär in großem Umfang mit Tafelwerken gearbeitet hat. Es gibt weitere Hinweise darauf, daß Artillerieeinheiten für die beim Schießen zur Anwendung kommenden Verbesserungen mit Tafeln ausgestattet waren, so wird zum Beispiel festgestellt, daß die vorhandenen Tafeln unter den klimatischen Bedingungen tropischer Schlachtfelder nicht zuträfen. Die deutsche Wehrmacht scheint demgegenüber zunächst Spezialrechner bevorzugt zu haben. Mir ist bekannt, daß die Entwicklung von schiffsbezogenen Feuerleitrechnern für die Marine eine wichtige ingenieurwissenschaftliche Arbeit auf dem Arsenal in Kiel war. (Mitteilung Dr. Klaus Weber) Das Deutsche Museum in München verfügt über ein um 1940 gebautes Exemplar eines Spezialrechners für die leichte Feldhaubitze 18, den Artillerierechenschieber 34. Dieses Gerät berechnet die Gesamtverbesserung zur Ausschaltung der »besonderen und Witterungseinflüsse (BWE)«. Die Eingabegrößen sind: gemessene Entfernung in Kilometern, Schußrichtung, Ladungsstufe, Pulvertemperatur, Geschößklasse, Luftgewicht, Windrichtung, Windgeschwindigkeit. Die Ausgabewerte sind: verbesserte Entfernung in Kilometern, verbesserte Erhöhung in Strich, Seitenverbesserung in Strich. Andererseits arbeitete das IPM (Institut für Praktische Mathematik) in Darmstadt intensiv an ballistischen Tafeln.

nierenden Rechner herzustellen, und nicht, dessen theoretische Grundlagen zu betrachten. Die Situation war für die Detailarbeiter so eingerichtet, daß sie ihre technischen oder ingenieurwissenschaftlichen Aufgaben im Gesamtprojekt abarbeiteten und hierüber kommunizierten, nicht aber über Bedeutung und Tragweite des Projekts. Möglicherweise ist dies ein Grund dafür, weshalb sich bis heute ein gewisser Theoriemangel und ein Desinteresse an Theorie in der Informatik erhalten haben. Die Informatik ist von Anfang an technologisch und durch eine hohe arbeitsteilige Forschungssituation bestimmt. Die Informatik ist die erste Wissenschaft, die von vornherein nach solchen Prinzipien gearbeitet hat.

Im Anschluß an Arthur W. Burks (1915-2008) (1966) schreibt Nancy Stern, daß von Neumanns Augenmerk durch seine Arbeit im Los-Alamos-Projekt Anfang 1944 auf Rechner gelenkt worden sei: »Von Neumann became interested in computational equipment several months before his involvement with the Moore School. His work on implosion at Los Alamos required solutions of nonlinear systems of equations in fluid dynamics. [...] Existing manual methods for solving these problems were extremely time-consuming, so von Neumann sought an alternative. He sensed that digital computers might prove useful in this regard.« (Stern 1980, 351) Der ENIAC war 1945 zu einem Zeitpunkt einsatzbereit, der es von Neumann mit hoher Wahrscheinlichkeit erlaubte, mit Nicholas Metropolis (1915-1999) und Stanley Frankel (1919-1978) Berechnungen für die ersten Atombomben auf dem Rechner zu prüfen. (Goldstine 1990, 12) Der Öffentlichkeit wurde der bis dahin geheimgehaltene Computer am 15. April 1946 auf der Titelseite der New York Times präsentiert.

Goldstine beschrieb den ENIAC wie folgt:

The machine is a large U-shaped assemblage of 40 panels [...] which together contain approximately 18,000 vacuum tubes and 1500 relays. These panels are grouped to form 30 units [...] each of which performs one or more of the functions requisite to an automatic computing machine.

The units concerned mainly with arithmetic operations are 20 accumulators (for addition and subtraction), a multiplier, and a combination divider and square rooter.

Numbers are introduced into the ENIAC by means of a unit called the constant transmitter which operates in conjunction with an IBM card reader. The reader scans standard punched cards (which hold up

to 80 digits and 16 signs) and causes data from them to be stored in relays located in the constant transmitter. The constant transmitter makes these numbers available in the form of electrical signals as they are required. Similarly, results computed in the ENIAC may be punched on cards by the ENIAC's printer unit operating in conjunction with an IBM card punch. Tables can be automatically printed from the cards by means of an IBM tabulator.

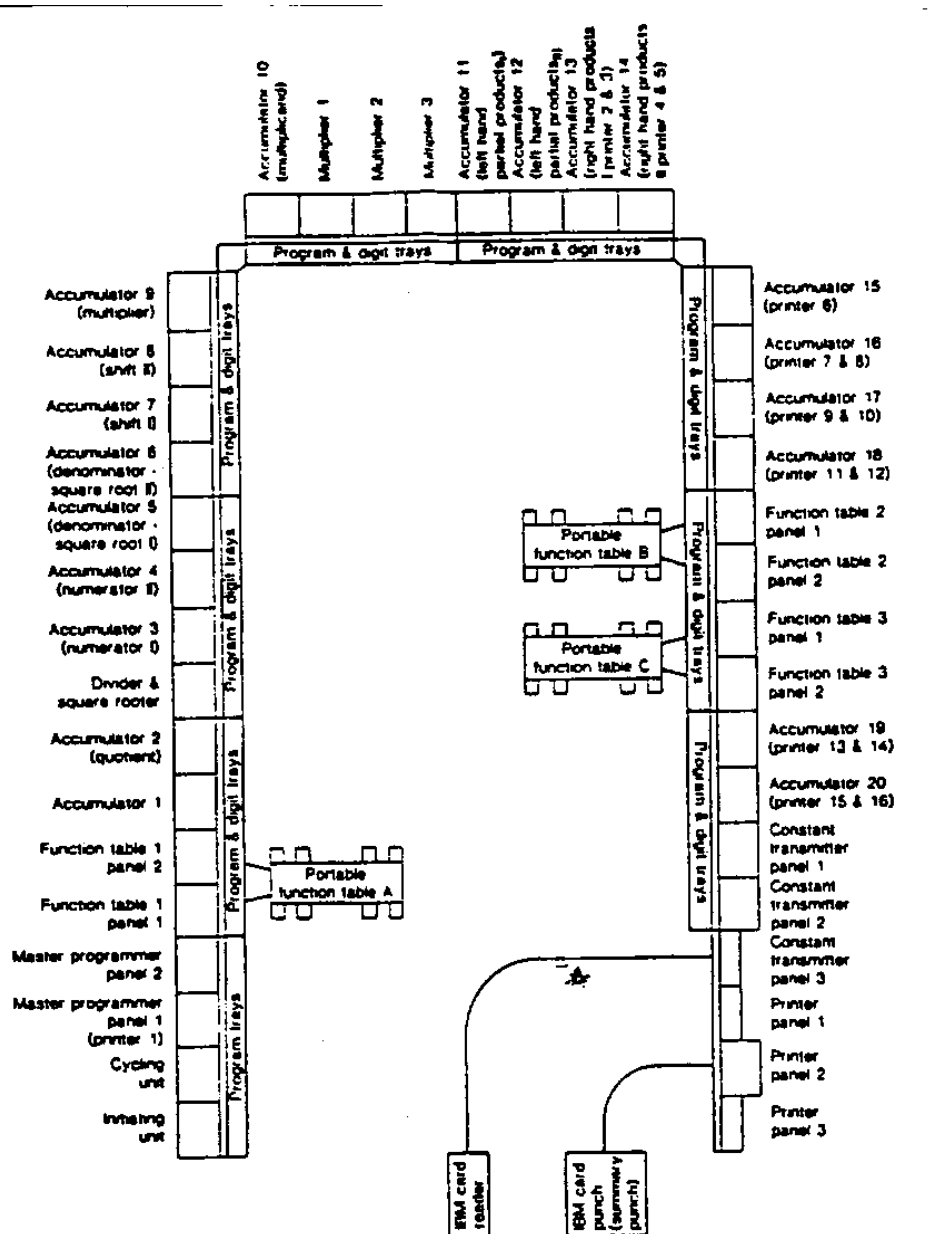


Abbildung 9. ENIAC (Aufstellplan)

The numerical memory requirements of the machine are met in several ways. Three function table units provide memory for tabular data. Each function table has associated with it a portable function matrix with switches on which can be set 12 digits and 2 signs for each of 104 values of an independent variable. [...] Numbers formed in the course of a computation and needed in subsequent parts of a computation can be stored in accumulators. Should the quantity of numbers formed during a computation and needed at a later time exceed the accumulator storage capacity, these numbers can be punched on cards and, later, can be reintroduced by means of the card reader and constant transmitter. (Goldstine / Goldstine 1946, 359f.)

Der ENIAC rechnete im Dezimalsystem. Eine Multiplikation wurde als Summe von Additionen durchgeführt. Eine Subtraktion erfolgte durch Addition des Komplements. Goldstine schreibt: »[...] we may now be more precise about what is meant by the digital approach. It is the realization that a machine can be built to imitate the human method of calculating: to count and to build up the elementary operations – addition, subtraction, multiplication, division – by counting.« (Goldstine 1972, 142)¹²⁷

Kurze Zeit nach der Einführung elektronischer Bausteine in Rechenmaschinen wurde klar, daß deren erhöhte Kapazität nicht effektiv genutzt wer-

¹²⁷ Anzumerken ist, daß der Mensch zur Subtraktion nicht das Komplementverfahren anwendet und daß auch das Rechnen mit der Basis 10 seinen historischen Ort hat und keine anthropologische Eigenschaft ist. Dies ist eines der typischen Beispiele für die selbstverständliche Generalisierung dessen, was »man« in den USA oder Europa tut, in Arbeiten zur Geschichte der Informatik.

An dieser Stelle ist auch darauf hinzuweisen, daß das Konzept von Zuse deutlich überlegen war. Zuse hatte sich damit beschäftigt, wie die Rechenmaschinenhersteller die maschinelle Multiplikation ausführten.

»Sie teilte sich in zwei Lager, wobei das eine die Multiplikation durch wiederholte Addition, das andere die Verwendung von Einmaleinskörpern bevorzugte. Nun, im binären System, besteht der Einmaleinskörper einfach aus 1x1 und 0 für alles andere. Damit ist die binäre Multiplikation zuerst eine Frage der Summierung der Teilprodukte, so daß die beiden Methoden identisch werden. [...]

Seine Entscheidung stellte die Konstruktion des Computers insgesamt auf eine logische Grundlage. Es war eine Grundlage, die er mit seiner Arbeit »Ansätze einer Theorie des allgemeinen Rechnens, unter besonderer Berücksichtigung des Aussagenkalküls und dessen Anwendung auf die Relais-technik« legte. [...] Sie ist der Schlüssel für die Möglichkeit, von einer Bausteintechnologie zur anderen zu wechseln. [...]

Man könnte sie vergleichen mit dem berühmten Entwurf, den John von Neumann 1945 über den EDVAC schrieb, nicht weil er den Aufbau des EDVAC im einzelnen beschrieb (er tat es nicht), sondern weil er eine theoretische Begründung dafür gab, warum man einen Computer in dieser Weise bauen sollte.« (Ceruzzi 1993, 175)

den konnte, weil die Ausgabeeinheit, der IBM-Kartenlocher, sehr viel langsamer war und ein »Flaschenhals« entstand. Eine Lösung dieses Problems wurde erst mit dem Konzept der Speicherhierarchie gefunden, das allerdings nicht nur aus diesem Grund, sondern auch aus Kostengründen entwickelt wurde. Die zunächst erforderliche Ad-hoc-Lösung für den ENIAC bestand darin, den »Constant Transmitter«, eine Art Zwischenspeicher, in die Maschine einzubauen. Eine weitere Lösung war die »idea of the stored program«. (Vgl. Burks / Goldstine / von Neumann 1946, 40f.; Brainerd / Sharpless 1948, 166; Goldstine 1972, 144, 165, 185, 198ff.)

Die Erkenntnis, daß sie mit dem ENIAC eine Maschine konstruiert hatten, aufgrund deren Eigenschaften allgemeine Probleme lösbar waren, gewannen die »Erfinder« erst nach und nach.

It soon emerged that the machine would be much more useful than just a device for solving the differential equations of exterior ballistics. It gradually became clearer that the great advantage of the digital approach was that the ENIAC was going to be a truly general-purpose device. This meant that the machine would be inestimably more useful than had been originally considered – and indeed it was. (Goldstine 1972, 163)

Die hohe Parallelität des ENIAC und seine geringe interne Speicherkapazität wurden als Nachteil angesehen, und es wurde angenommen, daß eine solche Anlage effizienter zu nutzen wäre, wenn man eine serielle Verarbeitung einführte. (Knuth 1970, 85) Schon bevor der ENIAC fertiggestellt war, wurden neue Anforderungen gestellt. So schreibt Goldstine:

By the end of August [1944] I was urging development of a new electronic computing device that would:

- a. Contain many fewer tubes than the present machine and hence be cheaper and more practical to maintain.
- b. Be capable of handling many types of problems not easily adaptable to the present ENIAC.
- c. Be capable of storing cheaply and at high speeds large quantities of numerical data.
- d. Be of such a character that the setting up on it of a new problem will require very little time.
- e. Be smaller in size than the present ENIAC.

(Goldstine 1972, 186)

Die Anforderungen betrafen vor allem das Gebiet der Speicherung. Den Beteiligten wurde deutlich, daß die vorhandene Lösung mit drei Arten von Speicherelementen nicht effektiv war. Erstens gab es elektronische Speicherbauteile, die als Zählwerke genutzt wurden, zweitens manuelle Schalter für Funktionstafeln und drittens steckbare Kabelverbindungen, die die Programme darstellten. (Randell 1982, 376) Das Musterbeispiel für die steckbaren Kabelverbindungen waren die Telefonvermittlungsstellen.¹²⁸ »The problem requires an entirely new approach«, schrieb Brainerd im Zusammenhang mit der Speicherproblematik am 13. September 1944 an Gillon. (Goldstine 1972, 187) In diesem Kontext wurde also erkannt, daß ein grundsätzlich neuer Ansatz, ein neues Paradigma notwendig war.

3.1.5 EDVAC und Von-Neumann-Architektur

Eckert und Mauchly hatten im Januar 1944 einen Artikel verfaßt, in dem sie eine »magnetic calculating machine« vorstellten, in der das Programm im gleichen Speichermedium abgelegt sein sollte wie die Daten. (Vgl. Eckert 1945) Dieses Konzept wurde jedoch nicht weiter verfolgt, bis es durch von Neumann im Zusammenhang mit dem Entwurf des EDVAC als eines der wesentlichen Bestandteile der Von-Neumann-Architektur wieder auftrat.¹²⁹

Die Beschäftigung mit dem grundsätzlichen Aufbau von Rechenmaschinen begann schon während der Arbeit am ENIAC und führte schließlich zum Verständnis als »logische Maschine«. Der ENIAC wies Mängel auf, für die John von Neumann im »First Draft of a Report on the EDVAC« eine Lösung anbot, die so allgemein war, daß sie bis heute die Grundlage für den Bau von Computern darstellt. Die Lösung basierte auf Diskussionen, die ab August 1944 an der Moore School stattfanden und an denen Arthur W. Burks, John P. Eckert, Adele Goldstine (1920-1964), Herman H. Goldstine und John W. Mauchly teilnahmen. (Goldstine 1972, 186) Das Verhältnis von individuellem Beitrag von Neumanns und kollektiven Diskussionsergebnissen ist in der Folgezeit von Teilnehmern und Zeitzeugen kontrovers

¹²⁸ Petzold hat darauf hingewiesen, daß Telefonvermittlungen mit wenigen technischen Änderungen schon Jahrzehnte früher als elektromechanische Großrechner nutzbar gewesen wären. (Petzold 1993, 199) Dies zeigt einmal mehr, daß das bloße Vorhandensein von technischen Bausteinen nicht zur Entwicklung von neuer Technik führt, solange deren historisches Umfeld noch nicht entwickelt ist.

¹²⁹ Der Entwicklungsauftrag für den EDVAC wurde am 27. Oktober 1944 als Ergänzung zum bestehenden ENIAC-Vertrag erteilt. (Supplement No. 4 to contract W-670-ORD-4926). (Vgl. Stern 1980, 353)

erörtert worden. Das Spektrum reicht von Goldstines (1972, 191) Verehrung von Neumanns über die sachlichere Anerkennung Burks (1966, 8f.) bis zu den wesentlich skeptischeren Äußerungen von Metropolis und Worlton (1980, 54). Den Beiträgen ist gemein, daß nach der persönlichen Urhebererschaft von Neumanns für alles im »First Draft of a Report on the EDVAC« Geäußerte gefragt wird, daß aber nicht problematisiert wird, ob und inwieweit Ergebnisse solcher arbeitsteiligen Großprojekte überhaupt persönlich zurechenbar sind. Im März 1945 wurden die Flexibilität, die Speicherkapazität, die Rechengeschwindigkeit, die Sortiergeschwindigkeit, die Codierung und das Design der Schaltungen diskutiert. (Goldstine 1972, 187) Der »First Draft of a Report on the EDVAC« ist auf den 30. Juni 1945 datiert und enthält sämtliche Bestandteile, die heute als Von-Neumann-Architektur bezeichnet werden. (von Neumann 1945, 383ff.)

Mit dem EDVAC wurde eine Universalrechenmaschine konzipiert, auch wenn dies den Entwicklern – sehr wahrscheinlich mit Ausnahme von John von Neumann – wohl nicht bewußt war. Zumindest hat Eckert geäußert, von Neumann sei mehr an den theoretischen Aspekten und am Gebrauch von Rechnern interessiert gewesen als an ihrer Konstruktion, die für ihn im Vordergrund stand. (Stern 1980, 357) Bis dahin war vor allem die technische Seite der Rechenmaschinen gesehen worden, von hier an wurde klar, daß diese Technologie einen logischen Kern hatte. Es wurde eine neue Perspektive betrachtet. Goldstine schreibt, daß von Neumann als erster ausdrücklich verstand, daß ein Computer im wesentlichen logische Funktionen ausführt und daß die elektrischen Aspekte nur zusätzliche auf der Ebene der technischen Realisierung wären. (Goldstine 1972, 191f.) An dieser Stelle setzt für die US-amerikanischen Computerentwickler ein Paradigmenwechsel ein. Was vorher als ingenieurwissenschaftliches Gerät gesehen wurde, wurde jetzt allmählich im Rahmen einer anderen Disziplin, der Logik, angesiedelt.¹³⁰ Zugleich muß Goldstines Prioritätszuweisung bezweifelt werden. Denn Alan Turings Arbeit von 1936/37 »On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem« (Turing 1936/37) ist be-

¹³⁰ Vergleicht man die Entwicklung des Computers mit der der Dampfmaschine, dann trifft auf beide Fälle zu, daß es eine zeitliche und sachliche Differenz zwischen dem Bau und der entfalteten Theorie gibt. Es wird hier aber deutlich, daß das Verhältnis von Maschinenentwicklung und Theorieentwicklung bei der Dampfmaschine und beim Computer nicht identisch ist. Der Carnotsche Kreisprozeß ist die physikalische Erklärung der Funktionsweise der Dampfmaschine. Die Dampfmaschine bleibt Dampfmaschine, das heißt mechanisches Gerät. Hingegen läßt der Paradigmenwechsel in der Erklärung des Computers als Universalmaschine und nicht mehr als Rechenmaschine das Gerät für Erbauer und Anwender zu einem anderen werden.

reits als Theoretisierung von »Universalmaschinen« zu verstehen. Außerdem arbeitete Turing im Jahr 1945 ebenfalls in einem Team am Entwurf eines Computers. Sein Papier mit dem Titel »Proposals for Development in the Mathematics Division of an Automatic Computing Engine (ACE)« (Turing 1945) ist anders als von Neumanns »First Draft of a Report on the EDVAC« nicht nur ein allgemeines Konzept, sondern »a complete description of a computer, right down to logical circuit diagrams, with an exhaustive thirteen page analysis of the physical properties of the memory, and a cost estimate of 11,200£.« (Carpenter / Doran 1975/77, 269)¹³¹

Über die Bekanntschaft mit Turing lernte von Neumann dessen Arbeit aus dem Jahr 1936 kennen. Turing war von 1936 bis 1938 als Student in Princeton. 1946/47 besuchte Turing Princeton erneut und traf sich mit von Neumann und Goldstine. (Goldstine 1972, 174, 191). Durch von Neumann wurden diese theoretischen Überlegungen in den USA in die Praxis einbezogen und führten zur Entstehung der Von-Neumann-Architektur.¹³² 1943 hatte Turing während seiner kryptologischen Arbeit in den USA auch Shannon kennengelernt und mit ihm das Konzept der Turing-Maschine ausführlich diskutiert. Beide zogen dabei Schlüsse für den Bau von »Maschinengehirnen«. (Hodges 1983, 290f.)

Ein wesentliches Merkmal des Von-Neumann-Computers ist, daß Daten und Programme im selben Speicher abgelegt sind. Die Idee des »stored program« war der letzte Schritt hin zum »general-purpose electronic computer«. Indem Programme wie Daten abgelegt werden, können sie während der Laufzeit des Programms modifiziert werden. Damit wurde es möglich, Betriebssysteme, Compiler und ähnliches als Hilfsmittel für den Umgang mit dem Rechner zu entwickeln. Es läßt sich nicht genau feststellen, wer nun tatsächlich als erster die Idee des »stored program« entwickelte. Ansätze hierzu finden sich bei Babbage (in einem Notizbuch aus dem Jahr 1836) ebenso wie bei Turing und Zuse in deren Arbeiten hundert Jahre später – 1936. Über den Prioritätenstreit zwischen Eckert und Mauchly einerseits

¹³¹ Carpenter und Doran (1975/77) analysieren Turings ACE-Report und vergleichen ihn mit von Neumanns »First Draft of a Report on the EDVAC«. Hier wird auf die Darstellung der von Turing vorgeschlagenen Architektur ebenso verzichtet wie an anderer Stelle auf die genauere Darstellung von Zuses Rechnern, da beide nicht paradigmatisch geworden sind.

¹³² Da von Neumann auf die genannten theoretischen Arbeiten und seine eigenen Arbeiten zu Mathematik und logischen Grundlagen nicht explizit verweist, wird manchmal in Abrede gestellt, daß er von ihnen Gebrauch gemacht habe. Es scheint mir eine kuriose Annahme zu sein, daß von Neumann sein theoretisches Wissen ausgeblendet haben soll, umso mehr, da Eckert ihm sein Interesse an theoretischen Fragen nahezu vorwarf.

und von Neumann andererseits zum Thema »Stored-Program Concept« sei auf Stern (1980, 354ff.), Eckert (1945, 525ff.) und Mauchly (1980, 541ff.) verwiesen. Die Auseinandersetzungen darum zeigen, wie wenig eine einzelne Person für das eine oder andere Konzept allein verantwortlich ist, das heißt wie sehr zum damaligen Zeitpunkt bereits die Forscher als Gruppe und nicht als Einzelwissenschaftler arbeiteten. Sie zeigen auch, daß es den Beteiligten um ganz handfeste Interessen, nämlich um die Anmeldung eines Patents für den EDVAC und damit um die zukünftige kommerzielle Nutzung des Rechners, ging. Fest steht, daß die erste veröffentlichte Auseinandersetzung mit den Vor- und Nachteilen dieses Konzepts der »First Draft of a Report on the EDVAC« von John von Neumann vom 30. Juni 1945 ist. Die Pläne für den EDVAC wurden unter anderem in einer Reihe von Vorlesungen an der Moore School verbreitet. (Vgl. Randell 1982, 375ff.) Die Umsetzung der im »First Draft of a Report on the EDVAC« genannten Konzepte dauerte jedoch einige Zeit. Der EDVAC wurde von 1945 bis 1949 an der Moore School entwickelt, dann zum Ballistic Research Laboratory gebracht und dort bis zu seiner Inbetriebnahme 1951 weiterentwickelt und war schließlich bis 1962 im Einsatz. (Randell 1982, 378)¹³³

Der EDVAC war – anders als der ENIAC – ein seriell arbeitender Rechner. Jede Information und jeder Befehl wurden nacheinander gespeichert und ausgeführt. »The guiding principle of EDVAC design was: One thing at a time, down to the last bit.« (Burks 1980, 338)¹³⁴ Der »First Draft of a Report on the EDVAC« von John von Neumann enthält eine systematische Beschreibung der Bestandteile eines Computers, die als Von-Neumann-Architektur bekannt wurde.

Für das Rechnen enthält das Gerät einen Teil, der diese Aufgabe übernimmt: einen »central arithmetical part« (CA). Ob im Gerät die Operationen Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division, Quadratwurzel und andere implementiert sind oder nur die elementare Operation der Addition, aus der die anderen ableitbar sind, spielt für das Prinzip keine Rolle. Um die vom

¹³³ Vor dem EDVAC wurde ein Rechner an der Universität von Manchester fertiggestellt, der nach den gleichen Prinzipien gebaut war, allerdings nur als Prototyp (für den Manchester Mark I). Der EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Calculator) wurde von Maurice Vincent Wilkes, der 1946 an den Moore School Lectures teilgenommen hatte, und Tom Kilburn (1921-2001) am Mathematical Laboratory in Manchester von 1947 bis 1949 entwickelt. Im Mai 1949 wurde das erste Programm gestartet.

¹³⁴ Wie sehr dieses Prinzip dem Denk- und wissenschaftlichen Argumentationsstil von Neumanns generell entsprach, zeigt Steve J. Heims (1980), der in seinem Vergleich der Arbeitsfelder und die je angestrebten Lösungen für wissenschaftliche Fragestellungen von Neumanns und Wieners Revue passieren läßt.

Gerät auszuführenden Operationen in der richtigen Reihenfolge ablaufen zu lassen, wird ein weiterer Teil benötigt: der »central control part« (CC), mit dem der Rechner für verschiedene spezielle Probleme verwendet werden kann: »If the device is to be *elastic*, that is as nearly as possible *all purpose*, then a distinction must be made between the specific instructions given for and defining a particular problem, and the general control organs which see to it that these instructions – no matter what they are – are carried out.« (von Neumann 1945, 384, Hervorhebung im Original) CA und CC lassen sich zu C (»control«) zusammenfassen. (von Neumann 1945, 385) Der dritte Baustein ist der Speicher, der für verschiedene Zwecke verwendet wird: (a) für Zwischenergebnisse bei der Ausführung von arithmetischen Operationen wie Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division, (b) für Instruktionen, insbesondere wenn der Code von anderen Ergebnissen (zum Beispiel logischen Bedingungen) abhängt, (c) für spezifische Funktionen, deren Werte in Tabellen abgelegt werden, um das jeweilige Neuberechnen zu vermeiden, und (d) für die Anfangs- und Grenzwerte in partiellen Differentialgleichungen. Obwohl die genannten Zwecke sehr unterschiedlich sind, hält von Neumann es für sinnvoll, nur ein »memory« (M) vorzusehen und dieses so flexibel wie möglich zu nutzen. (von Neumann 1945, 384f.) Der vierte Teil der Maschine, die Eingabeeinheit (»input« (I)), stellt sicher, daß Informationen vom »outside recording medium« (R), zum Beispiel von Lochkarten oder Lochstreifen, in den Speicher (M) übertragen werden. (von Neumann 1945, 386) Schließlich wird als fünfter Teil der Maschine die Ausgabeeinheit (»output« (O)) benötigt, um Informationen von M nach R zu transferieren. (von Neumann 1945, 386) Die Teile 4 und 5 bilden die Schnittstelle zum Benutzer. Von Neumann diskutiert, ob statt M als Speichermedium nicht R ausreiche und kommt zu dem Ergebnis, daß dies in vielen Fällen genüge, aber er schreibt auch – für Sortierprobleme und statistische Auswertungen –: »In many cases the possibility of using M accelerates matters decisively, but suitable blending of the use of M with a longer range use of R may be feasible without serious loss of speed and increase the amount of material that can be handled considerably.« (von Neumann 1945, 386)

Die Universalität der konzipierten Maschine kommt außer in dem oben angeführten Zitat nur am Rande, zum Beispiel in folgendem Satz, zum Ausdruck: »All transfers of numerical (or other) information between the parts C and M of the device must be effected by the mechanisms contained in these parts.« (von Neumann 1945, 385). Universalität ist hier vor allem

mit der Möglichkeit verbunden, mit Hilfe des CC verschiedene mathematische Probleme lösen zu können, das heißt den Rechner programmieren zu können und nicht jedesmal die Hardware neu konfigurieren zu müssen.

3.1.6 Die Analogie von Rechenmaschine und Gehirn

Eine unklare Rolle spielt die in der frühen Informatik weit verbreitete Analogie zwischen Rechenmaschine und Gehirn beziehungsweise elektronischer Schaltung und Neuron. Sie half am Beginn der Computerentwicklung möglicherweise, die Universalität der Maschine zu erkennen, indem sie eine Brücke zwischen menschlichem Handeln und maschinellem Vorgang schlug. Sie ließ aber mehrere Interpretationen zu. Sie liegen zwischen dem kybernetischen Sinn als »begrenzte strukturelle Übereinstimmung« (Deutsch 1963, 128) auf der einen Seite und dem Turingschen Verständnis einer wörtlich gemeinten Entsprechung auf der anderen.¹³⁵ Die populäre Rede vom »Elektronengehirn« zeigt, welche der beiden Seiten prägend wurde und zu einem reduktionistischen Verständnis der Fähigkeiten, des Baus und der Physiologie des Gehirns führte. Die große Wirkung des Vergleichs von Rechenmaschine und Gehirn beziehungsweise Maschine und Mensch hängt eng damit zusammen, daß er für die Forschungsinteressen der Wissenschaftler und Ingenieure aus verschiedenen Gebieten, die am Rechnerbau direkt beteiligt waren oder zu jenem Diskussionszusammenhang gehörten, der als »cybernetics group« bezeichnet wird, einen Verknüpfungspunkt bildete.

Walter Pitts kam im Herbst 1943 an das MIT, um mit Wiener zusammenzuarbeiten und seine mathematischen Kenntnisse für das Studium der Kybernetik zu erweitern. Er lernte die Arbeiten Shannons kennen und »entdeckte« – zusammen mit Wiener – die Parallele zwischen dem Alles-oder-Nichts-Charakter der Neuronenentladung und der Auswahl einer binären Ziffer. (Wiener 1948, 41f.) Von anderer Seite kamen die Interessen und Kenntnisse der Elektrotechniker hinzu, die jeweils die neueste Schalttechnik in die Entwicklung des Rechners einbrachten. Auch der Psychiater Gregory Bateson (1904-1980), der Elemente der Kommunikationstheorie und die Russellsche Typentheorie für seine kritischen Schizophrenieforschungen

¹³⁵ Vergleiche auch die modelltheoretischen Ausführungen in Kapitel 2 und zu Turing in Abschnitt 4.2.7.

nutzte (vgl. Bateson / Jackson / Haley / Weakland 1956), gehört in diesen Umkreis.

Ein von Wiener und von Neumann im Winter 1943/44 veranstaltetes Treffen von mehreren an der Kybernetik interessierten Ingenieuren, Mathematikern und Physiologen, unter ihnen McCulloch, Lorente de Nó, Goldstine, von Neumann, Pitts und Wiener, führte zu der Erkenntnis, »daß es eine beträchtliche gemeinsame Denkbasis aller Bearbeiter der verschiedenen Gebiete gab, daß man in jeder Gruppe schon Begriffe gebrauchen konnte, die durch andere schon besser entwickelt waren, und daß ein Versuch gemacht werden sollte, ein allgemeines Vokabular zustande zu bringen.« (Wiener 1948, 44)

1944 schlugen Aiken, von Neumann und Wiener vor, eine »Teleological Society« zu gründen und folgende Themen zu diskutieren: »communication engineering, the engineering of computing machines, the engineering of control devices, the mathematics of time series in statistics, and the communication and control aspects of the nervous system«. (Goldstine 1972, 275)

Von Neumann befaßte sich neben »logical design, planning and coding« und »hydrodynamical systems« mit (theoretischen) Automaten und war sehr an den Arbeiten Turings, dem er 1938 eine Stelle als sein Assistent im Institute für Advanced Study anbot, interessiert. (Goldstine 1972, 271ff.) Er kombinierte seine Interessen an Logik, Computern und Neurophysiologie, rezipierte die Thesen des Neurophysiologen McCulloch und griff dessen Theorie des Nervensystems zum Beispiel in »The general and logical theory of automata« (von Neumann 1948) und in »The computer and the brain« (von Neumann 1958) explizit auf.

Schon im »First Draft of a Report on the EDVAC« betonte von Neumann die Analogie zwischen Elementen des Rechners und Neuronen. Beide können sich jeweils in einem von zwei (oder mehreren) Zuständen befinden.

Every digital computing device contains certain relay like *elements*, with discrete equilibria. Such an element has two or more distinct states in which it can exist indefinitely. [...] Or, alternatively, there may be two states, one of which is an equilibrium which exists when there is no outside support, while the other depends for its existence upon the presence of an outside stimulus. [...] It is worth mentioning, that the neurons of the higher animals are definitely elements in the

above sense. They have all-or-none character, that is two states: Quiescent and excited. (von Neumann 1945, 387f., Hervorhebung im Original)

Zustandsübergänge können nach einer gewissen Reaktionszeit erfolgen.

Any such device may time itself autonomously, by the successive reaction times of its elements. In this case all stimuli must ultimately originate in the input. Alternatively, they may have their timing impressed by a fixed clock, which provide certain stimuli that are necessary for its functioning at definite periodically recurrent moments. [...] The neuron has also a definite reaction time, between the reception of a stimulus and the emission of the stimuli caused by it, the *synaptic delay*. (von Neumann 1945, 388, Hervorhebung im Original)

Die Vereinfachung, die in der Analogie liegt, war von Neumann durchaus bewußt:

Following *W. Pitts* and *W. S. McCulloch* [sic] (»A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity«, Bull. Math. Biophysics. Vol. 5 (1943), pp. 115-133) we ignore the more complicated aspects of neuron functioning: Thresholds, temporal summation, relative inhibition, changes of the threshold by after effects of stimulation beyond the synaptic delay, etc. It is, however, convenient to consider occasionally neurons with fixed threshold 2 or 3, that is neurons which can be excited only by (simultaneous) stimuli on 2 or 3 excitatory synapses (and none on an inhibitory synapsis). (von Neumann 1945, 388f., Hervorhebungen im Original)

Interessant ist, daß Pitts' und McCullochs Theorie der Neuronen wiederum nicht ohne Turings Einfluß denkbar ist. In einer Diskussion im Anschluß an einen Vortrag, den von Neumann beim Hixon Symposium am 20. September 1948 hielt,¹³⁶ erläutert McCulloch den Weg zu seiner Theorie:

I came, from a major interest in philosophy and mathematics, into psychology with the problem of how a thing like mathematics could ever arise – what sort of thing it was. For that reason, I gradually shifted into psychology and thence, for the reason that I again and again failed to find the significant variables, I was forced into neuro-

¹³⁶ Der Vortrag wurde unter dem Titel »The general and logical theory of automata« veröffentlicht. (von Neumann 1948)

physiology. The attempt to construct a theory in a field like this, so that it can be put to any verification, is tough. Humorously enough, I started entirely at the wrong angle, about 1919, trying to construct a logic for transitive verbs. That turned out to be as mean a problem as modal logic, and it was not until I saw Turing's paper that I began to get going the right way round, and with Pitts' help formulated the required logical calculus. What we thought we were doing (and I think we succeeded fairly well) was treating the brain as a Turing machine; that is, as a device which could perform the kind of functions which a brain must perform if it is only to go wrong and have a psychosis. The important thing was, for us, that we had to take a logic and subscript it for the time of the occurrence of a signal (which is, if you will, no more than a proposition on the move). This was needed in order to construct theory enough to be able to state how a nervous system could do anything. The delightful thing is that the very simplest set of appropriate assumptions is sufficient to show that a nervous system can compute any computable number. It is that kind of a device, if you like – a Turing machine. (McCulloch in von Neumann 1948, 319f.)

Die Analogie zwischen Rechenmaschine und Gehirn wurde offensichtlich zirkulär gebildet. Sie entstand nicht fachspezifisch, sondern als Resultat einer allgemeinen Herangehensweise der damaligen Zeit. Die Interdisziplinarität der Wissenschaftler, die sich für das neue Gebiet der »Kybernetik«, wie Nobert Wiener es benannte, interessierten, regte offenbar dazu an, Parallelen zwischen den Wissenschaften zu formulieren. »Das Problem, die Natur und Möglichkeiten des tierischen Gedächtnisses darzustellen, hat seine Parallele im Problem des Konstruierens künstlicher Gedächtnisse für die Maschine.« (Wiener 1948, 42f.)

3.1.7 Von der »Bombe« zum Colossus und nicht weiter

In den vorangegangenen Abschnitten ist mehrmals die Entwicklung in Deutschland angesprochen worden. Dabei wurde deutlich, daß die Verarbeitung von Massendaten durch Hollerith- und Tischrechenmaschinen einen Stand wie in den USA hatte, und zwar sowohl im Hinblick auf die Maschinenteknik wie auch im Hinblick auf den quantitativen Umfang. Es wurde

ferner deutlich, daß die NS-Führung den Ausbau dieses Sektors vorantrieb, um die vollständige Erfassung der Bevölkerung zu Zwecken der Kontrolle, Lenkung und Ausrottung voranzutreiben. Im technisch-wissenschaftlichen Bereich wären in den dreißiger Jahren vergleichbare Anwendungsfelder für Rechner wie in den USA vorhanden gewesen. Es ist aber auffällig, daß es zu dieser Zeit nicht zum Bau von Analogrechnern kam, deren Leistungsvermögen denjenigen Bushs vergleichbar wäre. Bereits hierfür lassen sich Unterschiede in der Forschungs- und Entwicklungsorganisation anführen, insbesondere sind solche Unterschiede dann geltend zu machen, wenn man sich fragt, weshalb Zuse keine Resonanz fand.

Im nun folgenden Abschnitt soll am britischen Beispiel im Zusammenhang dargestellt werden, daß eine effektive Organisation von Forschungs- und Entwicklungsarbeit, die hervorragende technische Ergebnisse erzielte, nicht hinreichend war, um für die Informatik paradigmengestaltend zu wirken.

Der Einsatz von Rechenmaschinen zur Massendatenverarbeitung im kommerziellen Bereich unterschied sich in Großbritannien nicht grundsätzlich von deren Einsatz in anderen industrialisierten Ländern. Was im Vergleich mit den USA und erst recht mit dem nationalsozialistischen Deutschland auffällt, ist ihr erheblich geringerer Einsatz im öffentlichen Bereich bei der Auswertung von Bevölkerungsdaten. Solche Daten wurden in Großbritannien in wesentlich kleinerem Umfang erhoben. Bei den großen Analogrechnern konnten britische Geräte ebenso wenig wie deutsche mit denjenigen Bushs konkurrieren. Es wurden hier aber Differential Analyzer gebaut, die für ihre wissenschaftlichen Zwecke eine ausreichende Leistungsfähigkeit aufwiesen. Die Rechner wurden eingesetzt, um mit partiellen Differentialgleichungen quantenmechanische Aufgaben zu berechnen. Für den hierbei auftretenden Rechenumfang reichten offenbar kleinere Maschinen aus als für die ingenieurwissenschaftlichen Berechnungen bei beispielsweise Tragflächenkonstruktionen, die Art der zu lösenden Gleichungen war jedoch gleich. Bushs von 1928 bis 1930 entwickelte Maschine für ingenieurwissenschaftliche Aufgaben hatte sechs Integratoren. Der erste für physikalische Berechnungen in Großbritannien gebaute Rechner war ein von Douglas Hartree (1897-1958) aus Teilen eines Meccano-Baukastens zusammengesetzter Differential Analyzer. Hartrees Maschine bestand aus vier Integratoren und konnte Funktionen für Elektronenwellen und atomare Energieniveaus berechnen. Der entscheidende Anstoß für die britische Computerentwicklung lag allerdings nach dem Beginn des Zweiten Weltkriegs auf einem ganz anderen Gebiet, nämlich dem der Kryptoanalyse.

Mit dem Beginn des Zweiten Weltkriegs durch den deutschen Angriff auf Polen am 1. September 1939 wurde es für die europäischen Alliierten dringend erforderlich, den chiffrierten Funkverkehr der Wehrmacht zu entschlüsseln. Es war bekannt, daß das deutsche Militär Varianten einer walzenbasierten Chiffriermaschine namens Enigma einsetzte. Andere Varianten der Maschine waren handelsüblich und zum Beispiel bei Banken in Gebrauch. Solche handelsüblichen Maschinen wurden während des spanischen Bürgerkriegs von den Fanlangisten und den italienischen Interventionstruppen benutzt. 1937 gelang es den Briten, in Funkschlüssel dieser Maschinen einzubrechen, sie scheiterten aber an den Maschinen der deutschen Verbände. (Vgl. Bloch 1987, 233, Endnote 6)

Bereits 1933 war es der Deutschlandabteilung des dem polnischen Generalstab zugeordneten Biuro Szyfrów (B.S.4) gelungen, eine militärische Enigma zu rekonstruieren, da dem Büro eine »Gebrauchsanleitung für die Chiffriermaschine Enigma« (HDv. g 13 / LDv g 13), eine »Schlüsselanleitung für die Chiffriermaschine Enigma« (HDv. g 14 / LDv. g 14) und einige Monatstafeln mit Schlüsseln des Heeres von Hans Thilo Schmidt (1888-1943), einem Mitarbeiter der Chiffrierstelle des Reichswehrministeriums, zugespielt worden waren. (Vgl. Bloch 1987, 147)

Die Einbrüche in Funkschlüssel waren jedoch zeitlich begrenzt und nur die Arbeiten der polnischen Kryptologen zielten in Richtung einer systematischen Lösung mittels mathematischer und linguistischer Verfahren. Hieran konnte die britische Government Code and Cypher School, eine Einrichtung des Foreign Office, anknüpfen, als sie nach der Niederlage der kontinentalen Verbündeten 1939 in Bletchley Park ihre intensiven Bemühungen zur Entschlüsselung aufnahm.

Eine polyalphabetische Chiffriermaschine war von Arthur Scherbius (1878-1929) während des Ersten Weltkriegs entwickelt worden.

Um 10 (für Ziffern) oder 26 (für Buchstaben) Permutationen zu realisieren, verwendete er *eine einzige* Permutation P von $n=10$ oder $n=26$ eingangs- bzw. ausgangsseitigen Kontakten und leitete alle übrigen Permutationen dadurch her, daß er $Z^i \cdot P \cdot Z^{-i}$ für $i = 0, 1, 2, \dots, n$ bildete, wobei Z eine *zyklische* Permutation der Ordnung n war. Aufgrund des technischen Relativitätsprinzips konnte diese Lösung ohne bewegliche Drahtverbindungen realisiert werden, und eine ringförmige Lösung lag nahe. (Bauer 1991, 212, Hervorhebungen im Original)

Dieses ringförmige Kontaktelement mit paarweiser Verdrahtung nannte Scherbius »Rotor«, im militärischen Sprachgebrauch hieß es »Walze«. Zur Erhöhung der Sicherheit wurden mehrere Rotoren hintereinandergeschaltet, so gab es schließlich Varianten mit drei, vier, fünf und sogar acht Rotoren. Das Enigma-System galt als einbruchssicher und Scherbius warb mit der Berechnung, daß ein einzelner Mann 42.000 Jahre lang ohne Unterbrechung arbeiten müsse, um die möglichen Kombinationen durchzuprobieren. (Vgl. Lindner / Wohak / Zeltwanger 1984, 85) Die Äußerung macht deutlich, daß die Sicherheit der Enigma allein an der Größe ihres Schlüsselraums gemessen wurde und daß man davon ausging, daß der Schlüsselraum der Maschine so groß sei, daß eine Exhaustion¹³⁷ erfolglos bleiben würde. Augenscheinlich dachten Scherbius und sein Mitarbeiter Willi Korn gar nicht an die Möglichkeit von Entschlüsselungsversuchen anderer Art. Dabei war es gerade eine Erfindung Korns, die die Sicherheit der Maschine vordergründig erhöhte, tatsächlich aber minderte.

Ab einer bestimmten Variante, dem Modell C von 1926, wurde die Maschine mit einem Umkehrrotor versehen. Nach drei Rotoren folgte eine vierte Kontaktscheibe, die dazu benutzt wurde, die Leitungen über die drei Rotoren zurückzuführen. Die Anzahl der Rotoren wird dadurch verdoppelt, aber zugleich ändert sich etwas an der Verschlüsselung. Die Permutationen haben nun die Ordnung zwei, sie sind involutorisch. Wird also bei gegebener Rotorenstellung der Buchstabe A durch B ersetzt, so hat umgekehrt die Eingabe von B die Ersetzung durch A zur Folge. In jedem Alphabet aus 26 Buchstaben werden so 13 feste Paare erzeugt. Hier liegt die Schwachstelle dieser Anordnung, denn solche Paarbildungen ermöglichen im Chiffriert »verdächtige Phrasen«, das heißt wahrscheinliche Wörter zu lokalisieren. (Vgl. Bauer 1991, 213)

Den Entschlüsslern war der generelle Kontext der zu entschlüsselnden Texte bekannt: Die Wehrmacht und die Kriegshandlungen. Für Eigenbezeichnungen und um bestimmte Kriegshandlungen zu benennen, benutzten beide Seiten militärische Standardvokabulare, die der jeweils anderen Seite weitgehend vertraut waren. Unter dieser Voraussetzung liegt es nahe, Texte auf wiederkehrende Muster zu prüfen und solchen Mustern probeweise einen Sinn zu geben. Nimmt man zum Beispiel an, eine Zeichensequenz sei ein Rufzeichen und Rufzeichen haben eine definierter Länge sowie stets die Anfangsstellung im Text, dann läßt sich auf den Anfang der Meldung

¹³⁷ Vgl. zur »exhaustive key search« Friedrich L. Bauer (1995, 178).

schließen. Inhaltliche Hinweise ergeben sich möglicherweise aus wiederkehrenden Sendezeiten (Wetterbericht) oder lassen sich erzeugen. Für den Gegner beobachtbare Verminungen rufen zum Beispiel Minenwarnungen hervor, die geographische Koordinaten oder Ortsbezeichnungen enthalten. Bauer führt das Beispiel des Versenkens einer Leuchttonne an, um die Phrase »Erlöschen ist Leuchttonne« zu erhalten. (Bauer 1995, 141) Um nun Lösungen zu erhalten, bietet sich an, eine Maschine zu benutzen, die die Enigma in gewisser Weise imitiert und untaugliche Ansätze aussondert. Bei einer Maschine mit involutorischer Chiffrierung können zum Beispiel Zeichenketten mit genügender Länge außer Betracht bleiben, die eine Lage einnehmen, bei der sich zwei gleiche Buchstaben gegenüberstehen, da hier ein Buchstabe nicht auf sich selbst abgebildet werden kann. Ist die Lage der verdächtigen Phrase eingegrenzt, kann in weiteren Schritten von dieser Sequenz ausgehend durch die Prüfung der logischen Konsistenz von Vertauschungen die Analyse des Maschinenschlüssels fortgesetzt werden. Die von den Briten eingesetzte »Turing-Bombe« nutzte das Prinzip des Widerspruchsbeweises: Es wird angenommen, daß die Einstellung der »Bombe« zutrifft. Dann probiert man, ob das Muster erzeugt werden kann, sofern das nicht der Fall ist, geht man zur nächsten Rotorenkonfiguration über.

Die erste Maschine, die von den Briten zur Dechiffrierung eingesetzt wurde, war die schon genannte »Bombe« oder »Turing-Bombe«.¹³⁸ Sie war eine Relaismaschine, die im Frühjahr 1940 in Betrieb genommen wurde. An ihrer Entwicklung war Turing beteiligt. (Hodges 1983, 211, 217, 222) Turing meldete sich im September 1939 bei der Government Code and Cypher School in Bletchley Park und war ab da mit der Entschlüsselung der Enigma beschäftigt. Hodges schreibt:

¹³⁸ Die »Bombe« wurde ebenso wie die anderen im folgenden erwähnten Maschinen nicht nur zur Entschlüsselung der Enigma benutzt, sondern auch, um den Code des von der Firma Lorenz gebauten Fernschreibers zu brechen. Dieser Fernschreiber verschlüsselte mit dem 1918 von Gilbert Vernam (1890-1960) entwickelten Verfahren. (Vgl. Sale 1998) Die C. Lorenz AG war eine Tochtergesellschaft der US-amerikanischen International Telephone and Telegraph Corporation (ITT). Töchter der ITT nahmen hinter Siemens und der AEG den dritten Rang der deutschen Elektrokonzerne ein. Der Konzern expandierte und investierte während der NS-Zeit in Deutschland weiter. Unter anderem erwarb ITT 1938 einen Anteil von 25 oder 28 Prozent am Flugzeugbauer Focke-Wulf. Größter Kunde der ITT war auf dem deutschen Markt die Wehrmacht. Im Jahr 1942 betrieb ITT dort und im besetzten Europa 38 Niederlassungen. Zwischen der deutschen Regierung, der deutschen Firmenleitung und Sosthenes Behn (1882-1957), Chef von ITT und einer der Direktoren der New York National City Bank, bestanden bis weit in den Zweiten Weltkrieg hinein direkte Verbindungen. (Vgl. Sampson 1973, 23ff.; Greiner 1995, 110ff.)

In der praktischen Kryptographie wurde [...] für gewöhnlich ein Teil der Botschaft gesendet, der nicht den Text selbst übermittelte, sondern Instruktionen zu seiner Dechiffrierung enthielt. [...] Es muß Alan, der mindestens seit 1936 über »die allgemeinste Art von Code oder Chiffre« nachgedacht hatte, sicherlich aufgefallen sein, daß diese Mischung von Instruktionen und Daten in einer Mitteilung an seine »Universalmaschine« erinnerte, die zuerst die »Beschreibungsnummer« in eine Instruktion dechiffrierte und dann die Instruktion auf den Inhalt ihres Bandes anwendete. In der Tat könnte *jedes beliebige* Chiffriersystem als komplizierter »mechanischer Prozeß« oder Turing-Maschine angesehen werden, wobei nicht nur die Regeln des Addierens oder Substituierens Anwendung finden, sondern auch die Regeln, wie man die Chiffriermethode selbst findet, anwendet und mitteilt. Gute Kryptographie lag in der Schaffung eines Gesamtkorpus von Regeln, nicht in dieser oder jener Meldung. Und seriöse Kryptoanalyse bestand in der Arbeit, diese Regeln wieder aufzufinden und durch eine Analyse der Gesamtmasse von Signalen den vollständigen mechanischen Prozeß zu rekonstruieren, den die Chiffreure durchgeführt hatten. (Hodges 1983, 192, Hervorhebung im Original)

Wie wichtig die »Bombe« für das britische Militär war, zeigt eine Äußerung von Winston Churchill (1874-1965) im Sommer 1941. Er bezeichnete die Kryptologen in Bletchley Park als »die Gänse, die die goldenen Eier legen und niemals schnattern« (Lewin 1978, 183, zitiert nach Hodges 1983, 238).

Bis zum Februar 1942, als die Wehrmacht eine neue Marine-Enigma in Betrieb nahm, konnten viele Nachrichten mit Hilfe mehrerer dieser Maschinen entschlüsselt werden, was in erheblichem Umfang dazu beitrug, daß die Alliierten im U-Boot-Krieg die Initiative gewannen. Die Umstellung auf ein erweitertes Enigma-System bedeutete jedoch, daß die Entschlüsselung statt einer Stunde etwa einen Tag in Anspruch nehmen würde oder 26 statt einer »Bombe« notwendig wären. (Hodges 1983, 257ff.)

Im Winter 1942/43, als Turing in den USA war und sich unter anderem an den Bell Telephone Laboratories mit der Technologie der elektronischen Sprachverschlüsselung beschäftigte, gelang es dennoch, wieder viele deutsche Nachrichten zu entschlüsseln.

Das Resultat war, daß die andere Seite nicht verstehen konnte, warum ihr Erfolg bei der Versenkung alliierten Schiffsbestandes plötzlich auf das Niveau von September 1941 zurückgegangen war. In der Tat

waren sie dort sicher, daß die U-Bootpositionen dem Feind irgendwie bekannt waren. Aber der Leiter des deutschen Marinenachrichtendienstes beim Marineoberkommando hielt an der Meinung fest, es wäre dem Feind unmöglich, die Funksignale zu dechiffrieren. Sie nahmen weiter an, daß ein Spionagenetz in ihren Stützpunkten im besetzten Frankreich operierte, obwohl nichts von der Wahrheit weiter entfernt sein konnte. Und so war ihr Glaube an die Maschinen und die Fachleute auch weiterhin so groß wie ihr Mißtrauen gegenüber den Menschen. (Hodges 1983, 283f.)

Für die Kryptoanalyse wurde ein schnelleres System erforderlich und dies sollte ein elektronisches System auf der Basis von Elektronenröhren sein. Eine neue Forschungsgruppe unter der Leitung des Mathematikers Max H. A. Newman (1897-1984) wurde im Herbst 1942 in Bletchley Park eingerichtet. Unter Newmans Federführung wurde die »Heath Robinson«¹³⁹ entworfen, von der sich Newman eine teilweise Automatisierung der Arbeitsvorgänge versprach. Die technische Realisierung und der Bau der Maschine oblag – wie sonst auch –: dem Telecommunications Research Establishment (TRE) in Malvern und den Post Office Research Laboratories in Dollis Hill. (Vgl. Sale 1998; Hodges 1983, 261ff.) Auffällig ist, daß in Großbritannien die Geheimhaltung im Vergleich zu den USA so strikt gehandhabt wurde, daß neben der zellenartigen Arbeitsstruktur in Projekten die Querkommunikation zwischen Projekten militärisch zentralisiert war. Auch leitende Mitarbeiter verschiedener Projekte wußten nicht nur nichts über die jeweiligen Details, sondern sie kannten einander gar nicht. Während es für Goldstine während eines zufälligen Treffens mit von Neumann auf einem Bahnsteig ohne weiteres möglich war, ein Gespräch über den ENIAC zu beginnen, gab es auf dem als Nervenheilanstalt getarnten Landsitz Bletchley Park eine möglichst strikte Trennung zwischen den Mitarbeitern der auf verschiedene Gebäude verteilten Gruppen.¹⁴⁰ Erst recht wurde die konzeptionelle Arbeit an den Dechiffriermaschinen völlig von der technischen Umsetzung ge-

¹³⁹ Die Maschine wurde nach William Heath Robinson (1872-1944) benannt, einem Karikaturisten, der wegen seiner phantasievollen Maschinen, die alle möglichen außergewöhnlichen Aufgaben lösen konnten, bekannt war. (Randell 1976a, 13)

¹⁴⁰ Es gibt viele Hinweise darauf, daß die Briten nach dem Kriegseintritt der USA nur ungern akzeptierten, daß US-amerikanische Verbindungsleute nach Bletchley Park gesandt wurden. Den US-Amerikanern eilte der Ruf voraus, unzuverlässig im Sinne von geschwätzig zu sein. Dabei scheint es sich um ein Vorurteil zu handeln, das vor allem aus der Wahrnehmung eines weniger förmlichen Auftretens in der Öffentlichkeit resultierte. Unzuverlässig im Sinne von illoyal waren die US-Alliierten allerdings, wie die Ausspähung von Bletchley Park unten zeigt.

trennt. Die Ingenieure in Malvern bekamen aus jedem Verwendungszusammenhang isolierte Einzelaufträge für die technische Realisierung bestimmter Anforderungen. Gebaut wurden die Heath Robinsons in Dollis Hill, ohne daß ihr Verwendungszweck bekannt war. Die Maschinen wurden dann nach Bletchley Park transportiert und dort aufgestellt. Es wurden mehrere Heath Robinsons angefertigt, sie zeigten eine große Nähe zur Turingmaschine, denn sie benutzten mehrere automatisch laufende Bänder. (Vgl. Hodges 1983, 308) Die verwendeten Schaltungen repräsentierten auf makroskopischer Ebene die logischen Verknüpfungen »und«, »oder« und »nicht«.

Der Einsatz der Heath Robinson war mäßig erfolgreich, dazu trugen nicht zuletzt Schwächen der technischen Realisierung bei. Die Papierbänder rissen leicht und die Maschinen gerieten hin und wieder in Brand. Das größte Problem bestand bei der Heath Robinson jedoch darin, deren beiden Bänder bei der Lesegeschwindigkeit von 1.000 Zeichen pro Sekunde synchron zu halten. (Sale 1998) Zudem war die bei der Heath Robinson erreichte Geschwindigkeit nach wie vor zu gering, um die Gewähr zu haben, das zu dechiffrierende Material schnell genug zu analysieren.

Newman arbeitete deshalb schon bald an den Anforderungen für eine leistungsfähigere Maschine. Für das Synchronisationsproblem und die Erhöhung der Geschwindigkeit fand der Elektroingenieur Thomas H. Flowers (1905-1998), der ab Februar 1941 die »switching group« der Post Office Research Station in Dollis Hill leitete, die Lösung. (Randell 1976a, 6ff.; Randell 1976b, 351f.)

Flowers hatte sich seit 1931 mit elektronischen Röhren für Telefonschaltungen beschäftigt. »His major research interest over the years had been long distance signalling, and in particular the problem of transmitting control signals, so enabling human operators to be replaced by automatic switching equipment.« (Randell 1976a, 7)

Tommy Flower's [sic!] major contribution was to propose that the wheel patterns be generated electronically in ring circuits thus doing away with one paper tape and completely eliminating the synchronisation problem. This required a vast number of electronic valves but Tommy Flowers was confident it could be made to work. He had, before the war, designed Post Office repeaters using valves. He knew that valves were reliable provided that they were never switched on and off. Nobody else believed him!

Colossus design started in March 1943. By December 1943 all the various circuits were working and the 1,500 valve Mk1 Colossus was dismantled shipped up to Bletchley Park and assembled in F Block over Christmas 1943. The Mk1 was operational in January 1944 and successful on its first test against a real enciphered message tape. (Sale 1998)

Der Colossus Mk1 enthielt 1.500 Röhren, er wurde bald zum Mark 2 weiterentwickelt. Nachdem der erste Colossus in Betrieb genommen war, wurden im März 1944 sechs weitere Maschinen in Auftrag gegeben, die am 1. Juni 1944 fertig sein sollten. (Hodges 1983, 319) Der Grundaufbau des zweiten Modells entsprach dem des Prototypen, doch gab es Erweiterungen: es wurde ein zusätzliches Zählwerk eingerichtet, es wurden weitere Register benutzt und die Schaltungen wurden überarbeitet. Die nun gebauten Maschinen waren fünfmal so schnell wie der Prototyp, bedingt durch eine Kombination von parallelen Operationen und einem »short term memory«. (Randell 1976a, 23f.) Außerdem enthielten die Rechner bestimmte Elemente wie »wired logic processes and a logic switching panel, comprising rows of key switches on which Boolean functions could be set up to control the logical operations performed by the machine« (Randell 1976a, 24).

Die ursprüngliche Colossus konnte durch Erkennen und Zählen die beste Übereinstimmung eines gegebenen Teils eines Musters mit dem Text produzieren. Die neue Colossus konnte durch Automatisierung der Variierung des Textmusters von sich aus herausfinden, welches das am besten zum Versuch geeignete war. Er¹⁴¹ traf mithin einfache Entscheidungen, die weit über das »Ja oder Nein« einer »Bombe« hinausgingen. Das Ergebnis eines Zählvorgangs bestimmte das weitere Verhalten der Colossus. (Hodges 1983, 320)

Der Colossus wurde als erster Rechner in einer Kleinserie von insgesamt zehn Exemplaren gebaut. Bis auf zwei Rechner, die aus Zeitgründen in Bletchley Park montiert wurden, entstanden alle in den technischen Einrichtungen des Post Office.

Die genaue Anzahl der Geräte und erst recht ihre Konstruktion unterlagen nicht nur während des Zweiten Weltkriegs einer strikten Geheimhaltung, sondern auch danach. Keiner der Rechner wurde jemals der Öffent-

¹⁴¹ Andrew Hodges oder der Übersetzer scheint sich mit sich selbst nicht einig zu sein, ob Colossus eine »sie« oder ein »er« sein soll.

lichkeit präsentiert. Wie heute bekannt ist, wurden acht Exemplare nach Kriegsende zerstört, die beiden verbliebenen wurden beim Government Communications Headquarters (GCHQ) bis etwa 1960 benutzt. 1960 wurden dann alle Konstruktionszeichnungen des Colossus verbrannt.

Erst in den siebziger Jahren wurde einiges über den Colossus, die Heath Robinson und die »Bombe« bekannt. Die Bestimmungen über die Geheimhaltung griffen aber nach wie vor und führten zu teils kryptischen Äußerungen.¹⁴² So hielt Irving J. Good zum Beispiel 1976 einen Vortrag über »Pioneering Work on Computers at Bletchley«, den er für die Veröffentlichung vom British Cabinet Office freigeben lassen mußte. In ihm heißt es unter anderem über die »Bombe«:

One might expect a cryptanalytic machine for working on a particular cryptographic machine to contain a fast model of it, or part of it, and this was true of the BOMBE. It obviously could not be sufficient merely to simulate the ENIGMA and to try all possible initial setups for a message because no machine even now would be capable of running through 9×10^{20} possible states in a reasonable time. So there had to be some further ingenuity in the BOMBE. This I cannot describe, but I can say that Gordon Welchman had one of the basic ideas and Turing another one. My impression is that Turing's idea was one that might not have been thought by anyone else for a long time, and it greatly increased the power of the BOMBE. (Good 1980, 35f.)

Auch über den Colossus gab es mehr Vermutungen als Kenntnisse. Am 20. Oktober 1975 gab die britische Regierung erstmals Photos und einige knappe Informationen wie die folgende preis. Es hieß, »a considerable number of further machines was built and gave reliable and effective service until the end of the war« (zitiert nach Randell 1976a, 26). Gemäß der von der britischen Regierung veröffentlichten Erläuterung des Colossus enthielt dieser folgende Bestandteile:

Punched paper type inputs operating at 5000 characters per second,
Photo-electric tape readers,
Bistable hard-valve circuits performing counting, binary arithmetic
and Boolean logic operations,

¹⁴² Zur Geheimhaltung der britischen Entwicklungen vgl. auch Randell 1976a; Metropolis / Howlett / Rota 1980; Lindner / Wohak / Zeltwanger 1984; Hodges 1983.

Electronic storage registers changeable by an automatically controlled sequence of operations,
Conditional (branching) logic,
Logic functions pre-set by patch-panels or switches, or conditionally selected by telephone relays.
Fully-automatic operation,
Solenoid operated electric typewriter output.
COLOSSUS used approximately 1,000 hard valves and 500 gas-filled ones. It operated in parallel arithmetic mode at 5,000 pulses per second. (zitiert nach Randell 1976a, 61)

Brian Randell kam auf Grund der damaligen Kenntnis zu dem Schluß, der Colossus sei der erste »special-purpose program-controlled electronic digital computer« (Randell 1976a, 28) gewesen. Verglichen mit dem US-amerikanischen ENIAC, der 18.000 Röhren enthielt, war der Colossus mit seinen 1.500 Röhren ein wesentlich kleinerer Rechner, was allerdings nicht für seine Leistungsfähigkeit zutrifft:

It seems that a reasonable summing up would be as follows: ENIAC and COLOSSUS, which preceded it by nearly two years, were both program-controlled electronic digital computers, the one specialised towards numerical calculations, the other perhaps somewhat more specialised, in this case toward Boolean calculations of a particular type. (Randell 1976a, 32)

Die Forschungen Randells wurden in den achtziger Jahren durch allgemein gehaltene Äußerungen Flowers' ergänzt, erst seit Beginn der neunziger Jahre wurde dann Genaues über den Computer bekannt. 1991 begann Anthony Sale, damals Mitarbeiter des Science Museum in London, sich gegen den Abriß von Bletchley Park, das danach dem Immobilienmarkt zugeführt werden sollte, und für seine Umwandlung in ein Museum zu engagieren. In diesem Zusammenhang entwickelte er die Idee, den Colossus zu rekonstruieren. Die Kampagne zum Erhalt von Bletchley Park war erfolgreich, und als 1994 das dortige Museum eröffnet wurde, konstituierte sich das Colossus Rebuild Project. Bei der Suche nach Informationen über den Colossus stieß Sale unter circa 5.000 Dokumenten über den Zweiten Weltkrieg, die 1995 in den USA von der American National Security Agency zufolge des Freedom of Information Act freigegeben werden mußten, auf Dokumente, in denen US-Personal aus Bletchley Park detaillierte Beschreibungen

der Arbeitsweise des Colossus an US-amerikanische Dienststellen lieferten. Auf Grund des gesamten nun vorliegenden Materials wurde es möglich, 1996 eine Rekonstruktion des Colossus in Betrieb zu nehmen.

Zusammenfassend charakterisiert Anthony E. Sale Arbeitsweise und Bau des Colossus so:

Colossus read teleprinter characters, in the international Baudet code, at 5,000 characters per second from a paper tape. These characters were usually the intercepted cipher text which had been transmitted by radio. The paper tape was joined into a loop with special punched holes at the beginning and end of the text.

The broad principle of Colossus was to count throughout the length of the text the number of times that some complicated Boolean function between the text and the generated wheel patterns had either a true or false result. At the end of text the count left on the counter circuits was dumped onto relays before being printed on the typewriter during the next read through the text, an early form of double buffering.

Colossus had two cycles of operation. The first one was controlled by the optical reading of the sprocket holes punched between tracks 2 and 3 on the paper tape. The sprocket signal was standardised to 40 microseconds wide. The optical data from the paper tape was sampled on the back edge of the standardised sprocket pulse as was the outputs from the rings of thyratrons representing the Lorenz wheel patterns. The result of the logical calculation was sampled on the leading edge for feeding into the counter circuits.

The second cycle of operations occurred at the beginning and end of the text punched onto the paper tape. The paper tape was joined into a loop and special holes were punched just before the start of text between channels three and four (called the start) and just after the end of text between channels four and five (called the stop). This long cycle of operations began with the electrical signal from the photocell reading the stop hole on the tape. This stop pulse set a bistable circuit which stayed set until the optical signal from the start hole was read. The setting of this bistable thus lasted for the duration of the blank tape where the text was joined into a loop, typically about 100 millisec. The first operation after the stop pulse was to release any settings on the relays from the previous count. Next the new count

was read onto the relays. Then the counters and the thyatron rings were cleared and then the thyatron rings were struck at the next start point to be tried. When the bistable was reset by the start pulse, sprocket pulses were released to precess the thyatron rings, to sample the data read from the paper tape and to sample the calculation output to go to the counters.

The various components of Colossus were the optical reader system, the master control panel, the thyatron rings and their driver circuits, the optical data staticisers and delta calculators, the shift registers, the logic gates, the counters and their control circuits, the span counters, the relay buffer store and printer logic. (Sale 1998)¹⁴³

Eine Abtastung von 5.000 Zeichen pro Sekunde war nicht die Maximalgeschwindigkeit, diese lag bei 9.600 Zeichen, dann rissen die Bänder, sondern die sichere Arbeitsgeschwindigkeit. Bei dieser Geschwindigkeit erwies sich die Rekonstruktion des Colossus auch nach heutigen Maßstäben als schneller Rechner.

At 5,000 cps the interval between sprocket holes is 200 microsecs. In this time Colossus will do up to 100 Boolean calculations simultaneously on each of the five tape channels and across the five character matrix. The gate delay time is 1.2 microsecs which is quite remarkable for very ordinary valves. [...]

Colossus is so fast and parallel that a modern Pentium PC to do the same code breaking task takes twice as long as Colossus to achieve a result! (Sale 1998)

Festzuhalten ist, daß in Großbritannien die Rechnerentwicklung unter individueller Einbeziehung von Wissenschaftlern in staatlichen Institutionen (Militär, Foreign Office, Post Office) stattfand, die, soweit dies sachlich möglich war, voneinander abgeschottet blieben. Am Ende des Zweiten Weltkriegs wurden die vorhandenen Erfahrungen und Ressourcen, anders als in den USA, nicht gezielt einer zivilen Nutzung zugeführt. Der Rückgriff auf sie wurde im Gegenteil unterbunden. Die gerade dargestellte Geschichte des Colossus liefert das Gegenbeispiel zur Vorstellung des ENIAC auf der Titelseite der »New York Times« am 15. April 1946 oder der zivilen Veröffentlichung von Wiener während des Krieges in den »Yellow Books« geheim erschienenen Forschungen.

¹⁴³ Weitere Angaben zu den genannten Komponenten ebenfalls in Sale (1998).

Während in Großbritannien der staatliche, der akademische und der industrielle Sektor mit geringen Überlappungen bestehen blieben, war in den USA deren wechselseitige Durchdringung vorangeschritten. Die Strukturen des militärisch-industriell-wissenschaftlichen Komplexes waren weiter entwickelt als zu Beginn des Krieges, und zwar hinsichtlich der Verflechtung der Beteiligten und hinsichtlich der wirtschaftlichen Bedeutung für Industrie und Hochschulen.

Obwohl der Computer eine Mehrfacherfindung war (in den USA, in Großbritannien und Deutschland), war in erster Linie die Entwicklung in den USA paradigmatisch, dies insofern, als hier von den Grundlagenwissenschaften über die technische Realisierung und die ökonomische Einbindung bis hin zu den Anwendungen alle Einflußfaktoren verbunden auftraten. In Großbritannien war dieser Weg, wie gezeigt wurde, verstellt. Obwohl die wissenschaftlichen Grundlagen und die technische Realisierung gleichermaßen entfaltet waren, haben zunächst die militärischen Anforderungen und dann auch mehr und mehr das geringere ökonomische Potential die Wirksamkeit aufgehoben, so daß IBM schon am Anfang der fünfziger Jahre von britischen Patenten mehr profitierte als die europäischen Lizenzgeber. Ungeachtet seiner persönlichen Leistung ist die Entwicklungsarbeit Konrad Zuses erst recht nicht paradigmatisch geworden. Ihm fehlte das historische Umfeld, in das die Entwicklungen in Großbritannien und den USA eingebettet waren, in Deutschland ganz.

Dies belegt, daß kognitive und technologische Elemente allein nicht ausreichen, um die Paradigmenbildung in der Informatik verständlich werden zu lassen, wenn das Wissenschaftsverständnis nicht auf ein traditionelles Modell von Wissenschaft verkürzt wird, sondern die Realität heutiger Wissenschaft in den Blick genommen wird, wenn also – wie dies in dieser Arbeit durchgängig gefordert wird – Wissenschaft als soziale Praxis verstanden wird.

Wie schwierig es ist, dieser Realität gerecht zu werden, zeigt die Rekonstruktion der vergeblichen Bemühungen Konrad Zuses, ein Patent für die Z3 zu erlangen. Aus ihr wird deutlich, daß noch 1967 hinsichtlich technischer Erfindungen in den Köpfen der Patentrichter das Bild des tüftelnden und dabei neue Prinzipien entwickelnden »Erfinders« spukte. Die letztendliche Begründung für die Ablehnung des 1941 eingereichten Patentantrags lautete, »daß seine theoretischen Erkenntnisse und deren Umsetzung in technische Anwendungen sich ohne »erfinderische Leistung« allein aus dem zeitgenössischen Wissen ergeben hätten« (Petzold 1998, 106). Sie erkennt gerade

die produktive Struktur dieses Wissens. In der Literatur ist Konrad Zuse als Erfinder des Computers immer wieder anerkannt worden. (Vgl. Bauer 1984; Bauer 1998; Zemanek 1991) Auch dabei werden allerdings die Schwierigkeiten mit der industriell arbeitsteiligen Wissenschaftsform deutlich. Randell (1982, 160) erörtert die Frage im Sinne der klassischen Prioritätsfrage; verschärft tut dies noch Emerson W. Pugh (1995). Lediglich Paul E. Ceruzzi (1993) schlägt vor, den Computer nicht unter diesem Gesichtspunkt als einheitlichen Gegenstand zu betrachten, sondern nach der Herkunft der einzelnen Teile und der zugehörigen Konzepte zu fragen.

Die Untersuchung des skizzierten Ablaufs führt zu dem Ergebnis, daß es einen engen Zusammenhang zwischen den technischen Konzepten und jeweiligen Anforderungen für den Einsatz von Rechenmaschinen gibt. Wie auf die Anforderungen reagiert wurde, ist von den jeweiligen Rahmenbedingungen der Anwendungskontexte abhängig. In ihnen spielten zum einen die Auftragsforschung eine beachtliche Rolle, weil die Auftragsvergabe lenkenden Einfluß hatte, und zum anderen Organisations- und Arbeitsweisen, in die Elemente der industriellen Arbeitsteilung eingingen.

An Entwicklung und Bau von Rechnern waren mit je unterschiedlichen Aufgaben Ingenieure, Techniker und Wissenschaftler mit unterschiedlichen Interessen und Erkenntnishorizonten beteiligt, ohne daß es die Figur des »klassischen Entdeckers« oder »Erfinders« gegeben hätte. Im Vorfeld der Informatik setzte eine Entwicklung von Paradigmen ein, die zum Teil technische Regeln wiedergeben, zum Teil vorgegebene Formen der industriellen Produktion widerspiegeln und die zum Teil wissenschaftliche Theoriebildung sind, die aber keinen einheitlichen kritischen Reflektionszusammenhang anbieten.

3.1.8 Der Übergang in die Informatik

Mit dem Ende des Zweiten Weltkriegs setzte in den USA eine Orientierung auf die Erhaltung der im Krieg ausgeweiteten und intensivierten Verbindungen zwischen Militär, Industrie und Hochschulen ein. Es wurde zwar von Seiten der Industrie erwartet, daß zivile Aufgaben wieder zum Schwerpunkt würden,¹⁴⁴ aber zugleich war man sich der Vorteile der gesicherten

¹⁴⁴ So war der Auftrag für die Entwicklung eines Flugsimulators, aus dem schließlich das »Project Whirlwind« werden sollte, schon im Herbst 1944 an das MIT »weitergereicht« worden, weil die American Telephone and Telegraph Company sich und ihrer zunächst

Finanzierung bewußt. Den militärisch-industriell-wissenschaftlichen Komplex behielt auch Vannevar Bush im Auge, als er sich programmatisch über die Nachkriegsorientierung der Wissenschaftler äußerte. Bush hatte als Director of the Office of Scientific Research and Development den Kriegseinsatz von schätzungsweise 6.000 Wissenschaftlern koordiniert und entließ diese nun gewissermaßen in den Frieden. Er tat dies mit großer Öffentlichkeitswirkung in einer beliebten Publikumszeitschrift, »The Atlantic Monthly«. Ohne die Verflechtung der drei Bereiche explizit zu erwähnen, bildet sie den Hintergrund für sein Resümee der erfolgreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeit während des Krieges. Bush beginnt den Artikel »As We May Think« (1945) mit einer Feststellung, die auf die Verflechtung anspielt, indem sie auf Lernprozesse der Kriegszeit hinweist, und die in einer Frage mündet:

This has not been a scientist's war; it has been a war in which all have had a part. The scientists, burying their old professional competition in the demand of a common cause, have shared greatly and learned much. It has been exhilarating to work in effective partnership. Now, for many, this appears to be approaching an end. What are the scientists to do next? (Bush 1945, 101)

Bush läßt dann Revue passieren, auf welchen Feldern die Kriegsforschung mit ihrer neuen Arbeitsorganisation Ergebnisse aufzuweisen hat, und beantwortet seine Eingangsfrage schließlich mit dem Appell, den eingeschlagenen Weg trotz seiner Doppeldeutigkeit weiterzugehen:

The applications of science have built man a well-supplied house, and are teaching him to live healthily therein. They have enabled him to throw masses of people against another with cruel weapons. They may yet allow him truly to encompass the great record and to grow in the wisdom of race experience. He may perish in conflict before he learns to wield that record for his true good. Yet, in the application of science to the needs and desires of man, it would seem to be a singularly unfortunate stage at which to terminate the process, or to lose hope as to the outcome. (Bush 1945, 108)¹⁴⁵

angefragten Tochtergesellschaft Kapazitäten für zukünftige zivile Geschäfte freihalten wollte. (Vgl. Redmond / Smith 1980, 5f.)

¹⁴⁵ Der Schluß dieses Artikels klingt, als ob Bush im Juli 1945 bereits die von vielen Wissenschaftlern nach dem 6. und 9. August artikulierten Zweifel antizipierte.

Tatsächlich wurde der Weg nach 1945 nicht nur beibehalten, sondern stetig verbreitert. (Vgl. Edwards 1996) Im Jahrzehnt nach dem Zweiten Weltkrieg wurde das Department of Defense (DoD) mit dem Einsetzen des Kalten Kriegs endgültig zum größten Auftraggeber für Forschung und Entwicklung. Die Politik der »national security« und des »containment« wurde vom Pentagon in High-Tech-Rüstungsprojekten umgesetzt. Die Ausgaben für militärisch veranlaßte Forschung und Entwicklung erreichten kaum vorstellbare Ausmaße. Setzt man den Vorkriegsstand gleich Eins, so lag die Spitze der Ausgaben während des Zweiten Weltkriegs beim fünfzigfachen Betrag. Dieses Ausgabenvolumen war am Ende des Korea-Krieges wieder erreicht. Von da an stiegen die Ausgaben weiter, um nach dem »Sputnik-Schock« schließlich 1960 einen Wert von fünfeinhalb Milliarden Dollar pro Jahr zu erreichen. Im Schnitt flossen in den fünfziger Jahren 80 Prozent aller staatlichen Forschungs- und Entwicklungsausgaben in Projekte des DoD. (Vgl. Leslie 1993)¹⁴⁶

Die Ausgangssituation für die weitere Entwicklung nach 1945 ist somit klar, und es reicht, auf Meilensteine der Entwicklung hinzuweisen, um den Rahmen zu benennen, in dem die Informatik dann Leitbilder und Lösungsmuster gewann.

- »Project Whirlwind« (Vgl. Redmond / Smith 1980) Ab 1944 wurde an dem Computer gearbeitet. Ziel war zunächst die Entwicklung eines Flugsimulators. Das ursprünglich vom Office of Naval Research geförderte Projekt wechselte 1950 in den Zuständigkeitsbereich der US Air Force. Whirlwind wurde nun als Computer mit der Fähigkeit zur »Echtzeitverarbeitung« ein Kernstück des Cape-Cod-Frühwarnsystems.
- »SAGE« (Vgl. Jacobs 1986) Von 1954 bis 1958 wurde das Semi Automated Ground Environment entwickelt. SAGE sollte die Daten der damals 70 Radarstationen für die Luftraumüberwachung verarbeiten und dabei auf 46 DV-gestützte »direction centers« zurückgreifen können. Ziel war die Schaffung automatisierter »combat centers« der Air Defense Division unter Einbeziehung der Informationen aus den »direction centers«. In das interaktive System waren Funktionen für Flugzeugerkennung, Flugbahnverfolgung, Waffenzuweisung, Abfangjägeranweisung und Simulation implementiert.¹⁴⁷ Schwerpunkte für die Entwicklung der SAGE-

¹⁴⁶ Stuart W. Leslie folgt bei seinen Angaben einer amtlichen Quelle: House Committee on Science and Technology, Science Support by the Department of Defence, Science Policy Study Background Report No. 8, 99th Cong. 2nd sess., December 1986.

¹⁴⁷ Donald W. Kosy berichtet in einer Studie der Rand Corporation für die US Air Force, daß die Bildschirmanzeigen so unübersichtlich gestaltet waren, daß das militärische

Architektur, der Hardware-Komponenten und der Programme lagen bei Mitarbeitern des MIT (Project Whirlwind), des Air Force Cambridge Research Laboratory und der IBM (Computer der Typen FSQ 7 und FSQ 8). Es entstand der Prototyp eines Weitverkehrs-Datennetzes, dessen grundsätzliche Auslegung zeitgleichen zivilen Anforderungen nicht entsprach. (Vgl. Hellige 1992).

- »SOSUS« (Vgl. Bracken 1983) Das Sound Surveillance System war das maritime Gegenstück zur Luftraumüberwachung. Großräumige Aufzeichnungen des Unterwasserschalls ermöglichen die Erfassung von Schiffen und Schiffsbewegungen. Die erfaßten Objekte werden mittels Mustervergleichen identifiziert. Prinzipien der Erkennung und Aufbereitung von (akustischen) Mustern wurden in diesem Projekt thematisiert.
- »BMEWS« (Vgl. Bracken 1983) Das Ballistic Missile Early Warning System setzte ab 1958 endgültig zur Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit die Ablösung von Röhrencomputern durch transistorisierte Rechner durch (IBM 7090).¹⁴⁸
- »NORAD« (Vgl. Bracken 1983) Die Errichtung des North American Aerospace Defence Command als zentraler militärischer Stab, bei dem alle Frühwarninformationen zusammenlaufen sollten, ab 1957 warf wie noch kein anderes Projekt das Problem der Systemintegration auf. In den sechziger Jahren führte dies zur intensivierten Beschäftigung mit Sprachen und Software Engineering.

Auf Initiative des DoD fand 1968 die erste Konferenz der NATO zum Software Engineering statt, auf ihr wurden der Stand der Technik resümiert und Problembereiche definiert: »Design, Production, Service« (Naur / Randell 1969). Ein Jahr später folgte eine weitere Konferenz und ab 1975 gab es jährliche Arbeitstagungen zu diesem Thema von ACM (Association for Computing Machinery), ANSI (American National Standards Institute), DoD (Department of Defense) und IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Ab 1975 begann auch das Defense Systems Software Management Program, mit dem Ziel, bei gleichzeitiger Verbesserung der Funktions- und Termintreue die »life cycle costs« von Software (das US-Militär hatte zu dieser Zeit Software-Kosten von drei Milliarden Dollar pro Jahr bei steigender Tendenz) um

Personal manchmal bestimmte Teile des Bildschirms abklebte, um sich von den Meldungen des Systems nicht irreführen zu lassen und mit solchermaßen reduzierten Angaben »von Hand« arbeitete. (Kosy 1974, 64)

¹⁴⁸ Zur Geschichte der Transistortechnik mit ihren militärischen und zivilen Aspekten vgl. Alfred Kirpal (1992).

den Faktor drei zu senken. (Vgl. Clausen / Huber 1980, 84)

Ein wesentliches Teilprojekt war in diesem Zusammenhang das Vorhaben, eine für alle Streitkräfte verbindliche Programmiersprache (Common High Order Language) zu schaffen, aus dem ADA hervorging. (Vgl. Whitaker 1996; Clausen / Huber 1980) Die militärischen Großsysteme machten es schon früh erforderlich, den ursprünglichen Wildwuchs der maschinennahen Programmierung zu beseitigen. Wesentliche Ergebnisse dieser Vereinheitlichung waren FORTRAN, ALGOL und COBOL, die fortwährende Erweiterung der Anforderungen führte aber im Nu zur Auffächerung von Familien, die wiederum Integrationsprobleme hervorrief.

Die bei weitem nicht vollständige Aufzählung, man denke nur an die Rolle des ARPANET¹⁴⁹, weist darauf hin, daß die Basis- und Systemtechniken der Informatik zusammen mit Anwendungskonzepten zu einem sehr großen Teil im militärisch-industriell-wissenschaftlichen Komplex der USA entstanden. Die Ergebnisse der Forschungs- und Entwicklungsarbeit folgten regelmäßig militärischen Anforderungen. Zu ihrer Leitwirkung über den militärischen Bereich hinaus trägt auch bei, daß die militärischen Projekte neben ihrem großen Umfang sehr lange Dauer aufweisen. So gab zum Beispiel das Air Force Systems Command im März 1971 vor dem Hintergrund der Vietnam-Kriegserfahrungen bei der Rand Corporation eine Untersuchung in Auftrag, deren Ziel so beschrieben wurde: »The purpose of the study was to design an integrated Air Force R&D program for the present decade that would develop the information-processing technology needed to meet probable Air Force command and control requirements in the following decade. The central concern was with the command and control of Air Force combat units.« (Kosy 1974, iii) Zivile Nutzungen sind häufig nachgängig und benutzen vereinfachte oder aus Gründen der Geheimhaltung eingeschränkte Versionen. (Vgl. Hellige 1992) Downgrading führt bestenfalls zur Anpassung an zivile Anforderungen, nicht aber zu deren Berücksichtigung – geschweige denn Dominanz – im Design. Auch zivile Anschlußentwicklungen verlassen den einmal gesetzten Rahmen selten. Bleibt man bei dem Beispiel der gerade erwähnten Sprachen ALGOL und COBOL, so ist zweierlei auffällig. Zum einen kam die vorwiegend zivile, in einem internationalen Zusammenhang entwickelte Sprache ALGOL den Anforderungen des US-Militärs in hohem Maße entgegen; zum anderen

¹⁴⁹ Zur Geschichte des ARPANET vgl. Michael Friedewald (2000).

wurde die militärische Entwicklung COBOL von vornherein mit der Absicht ihrer Verbreitung in zivilen Verwendungen entworfen. (Vgl. Perlis 1981; Naur 1981; Sammet 1981) Die Umsetzung dieser Absicht war bekanntlich so erfolgreich, daß COBOL für Jahre zu einem Standard im kommerziellen Bereich wurde und ihre militärische Nutzung ab 1962 im World Wide Military Command and Control System (WWMCS), das der Befehlsübermittlung diente, völlig im Hintergrund verschwand. Beispiele wie COBOL und ALGOL machen deutlich, daß zwischen militärischen und zivilen Bereichen keine klare Grenze gezogen werden kann, weil Leitbilder für den Entwurf und Anforderungen für die Verwendung in beiden Bereichen augenscheinlich so eng beieinanderliegen, daß die Artefakte für beide Bereiche sich als verwendungsoffen erweisen.

Einen nicht minder wichtigen Gesichtspunkt betont Leslie (1993). Es waren nicht nur die Technologien und Verfahren, die in solchen Großprojekten entwickelt wurden, sondern in ihnen bildeten Forscher aus der Industrie und Hochschullehrer zugleich einen bestimmten Stil, Informatik zu betreiben, aus, die mit ihrer Lehre und ihren Lehrbüchern die Maßstäbe des Fachs prägten.

Die Informationstechnologie hat von Anfang an ein Doppelgesicht besessen. Den Problemlösungen der Informatik und den Produkten der Computerindustrie fehlt wegen dieser historischen Erbschaft bis heute oft das »bürgerliche Maß«. Denn hinsichtlich einer Groß- und Risikotechnologie wie der hier diskutierten wäre für eine Zivilgesellschaft wünschbar, daß ihre Konstrukte Kriterien wie denen der Überschaubarkeit, der Handhabbarkeit, der spezifischen Begrenztheit entsprächen, da letztlich nur so über sie aufgeklärt kommuniziert und demokratisch entschieden werden könnte. In der Informatik gibt es jedoch nur wenige Ansätze, die dezidiert solchen Kriterien zu entsprechen suchen. (Vgl. Siefkes 1993)

3.2 Systematisierung der Paradigmen

Die bis hierher beschriebenen historischen Abläufe mit ihren wissenschaftlichen, technischen, militärischen und ökonomischen Aspekten lassen eine Reihe von Paradigmen für den Entwurf und Bau von Computern und auch allgemeiner für die Informatik deutlich werden. Diese Paradigmen werden nun im einzelnen angeführt.

3.2.1 Industrialisierte Forschung: Arbeitsteilung und Interdisziplinarität

Die Entwicklung des Computers ist im Zweiten Weltkrieg der Kulminationspunkt von technischen Entwicklungen (Hollerithmaschinen, Analogrechner, Röhren, Flugzeuge, Radar), die einerseits Voraussetzungen liefern, einen solchen Rechner zu realisieren, und die andererseits selbst zu den Feldern gehören, die die Anforderungen an und den Bedarf nach solchen Rechnern definierten.

Die Entwicklung des Computers ist weiterhin bedingt von einer quasi industriellen, das heißt arbeitsteiligen Großforschung, deren Prinzipien beispielgebend vor dem Hintergrund des Zweiten Weltkriegs, unter anderem im Manhattan Projekt und bei der Entwicklung des Radars entwickelt wurden.¹⁵⁰

Schließlich setzt die Entwicklung des Computers voraus, daß zwischen der Forschung, der Wirtschaft und dem Militär eine institutionalisierte Kommunikation erfolgt, die die organisierte Definition von Zielen und Bereitstellung von Mitteln zu ihrer Realisierung zum Inhalt hat und in der verknüpfende Leitbilder formuliert werden.¹⁵¹ Es zeigt sich somit, daß die von

¹⁵⁰ Für die heutige Informatik stellt Wolfgang Glatthaar (1993) fest, daß sie sich in einem »Spannungsfeld« zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik befindet, in dem die gegenseitigen Erwartungen nur unvollkommen erfüllt werden. Er fordert deshalb einen intensiven Dialog zwischen Vertretern der Wissenschaft, Wirtschaft und Politik und sagt: »Die Wirtschaft muß den Bedarf feststellen und in der Öffentlichkeit vertreten, die Wissenschaft muß vor allem die organisatorischen Voraussetzungen schaffen, und die Politik muß auch in dieser Zeit knapper Mittel einen weiteren Schritt von der Subventionierung der Vergangenheit in Richtung der Förderung der Zukunft tun.« (Glatthaar 1993, 132) Er fordert damit nichts anderes als das, was schon immer geschieht, nur verlagert er die Initiative zur Industrie. Vgl. auch Ernst Denert (1993), der sich »Grenzgänger« zwischen Wirtschaft und Universität wünscht.

¹⁵¹ Noch einmal sei daran erinnert, daß im Fehlen dieser Voraussetzungen einer der Gründe für die relative Folgenlosigkeit der Entwicklungen Zuses bestand. Denn gerade diese Form von Kommunikation war in vergleichbarer Weise in Deutschland nicht ge-

Wajcman (2002) entwickelte These, daß technische Entwicklungen nicht unabhängig vom System oder »Netzwerk«, in dem sie entstehen, sind. Diese These bestätigt sich in Hinblick auf die Entwicklung des Artefakts Computer und der Entstehung der Disziplin Informatik. Computer und Informatik erweisen sich somit als historisch, technisch und sozial bedingte Konstruktionen.

Die Projekte, in denen Computer entwickelt wurden, waren Großprojekte, die arbeitsteilig durchgeführt wurden. Das Prinzip der industriellen Arbeitsteilung, das mit dem Taylorismus am Anfang des 20. Jahrhunderts verfeinert und verwissenschaftlicht wurde, wurde aus der Wirtschaft in den Wissenschaftsbetrieb übernommen. Großprojekte wie der Bau der Atom-bombe und die Entwicklung von Computern ließen sich ohne planmäßige Arbeitsteilung, ohne die Nutzung des Wissens und der Kenntnisse vieler Beteiligter aus unterschiedlichen Bereichen einschließlich der Anwender nicht realisieren.¹⁵² Erst auf diese Weise wurden komplexe Ergebnisse ermöglicht. Die Zusammenarbeit vieler Spezialisten hatte einerseits zur Konsequenz, daß verschiedene Interessen und Sichten in die Computerentwicklung einfließen. Andererseits führte diese Spezialisierung – bis heute – nicht dazu, daß sich aus der Anwendungsorientierung und dem »Spezialistentum« heraus ein Interesse an der Theorie der Informatik¹⁵³ entwickelte.

Die kommunikativen Erfordernisse zwischen den an den Entwicklungsprozessen beteiligten Wissenschaftlern schufen eine Atmosphäre, in der neue Gesichtspunkte und neue Zusammenhänge disziplinintern und über Fachgrenzen hinweg erkannt wurden. Hierzu gehören zum Beispiel die Verbindungen zwischen Philosophie (Carnaps Konstitutionssystem), Neuropsychologie (McCullochs und Pitts¹⁵⁴ Neuronenmodell), Physik (Wieners Rückkopplung) und von Neumanns Konzept einer Rechenmaschine. Wiener schreibt, »daß es eine beträchtliche gemeinsame Denkbasis aller Bearbeiter der verschiedenen Gebiete gab«. (Wiener 1948, 44).¹⁵⁵ Nicht zu über-

geben. So wurde die Arbeit Zuses zwar genutzt, um bestimmte Rechnungen für die Entwicklung der V-Waffen durchzuführen. Das konzeptionell Neue dieser »Rechenmaschine« gegenüber anderen Rechenmaschinen vermittelte sich aber überhaupt nicht.

¹⁵² Hinsichtlich der Anwender ist dabei zu bedenken, daß Anwender und Benutzer zweierlei sind und daß letztere in den Entwicklungsvorhaben lange gar keine Rolle spielten. Zur Verdeutlichung: Anwender eines Frühwarnsystems ist zum Beispiel das NORAD, Benutzer ist ein konkreter Mensch an einer Bedienerkonsole.

¹⁵³ Nicht zu verwechseln mit den Inhalten der »Theoretischen Informatik« als Teildisziplin.

¹⁵⁴ Pitts war ein Schüler Carnaps. (Vgl. Wiener 1948, 41)

¹⁵⁵ Mit dieser gemeinsamen Denkbasis befaßt sich das folgende Kapitel, das die Einflüsse der Mathematik und Philosophie der gleichen Zeit (circa 1920 bis 1940) auf die entste-

sehen ist allerdings, daß die gemeinsame Denkbasis, von der Wiener hier spricht, und auch die Möglichkeit, unterschiedliche Sichten zu formulieren, davon abhängt, einen gewissen Überblick über das in Frage kommende Ganze zu haben. Die gemeinsame Denkbasis ist deshalb unter den Bedingungen der in diesen Forschungsprojekten realisierten Arbeitsteilung die gemeinsame Denkbasis der »Top shots«, nicht aber der vielen mit Teilprojekten befaßten Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker, die aufgrund der Kombination von Arbeitsteilung und Geheimhaltung in den USA ebenso wie in Großbritannien gar nicht über eine mögliche gemeinsame Denkbasis kommunizieren konnten. Die Interdisziplinarität, die hier deutlich wird, offenbart sofort ein Defizit: sie ist hierarchisch und vernetzt nur die Spitzen.

3.2.2 Ökonomie und Rationalität

Ökonomie und Rationalität sind zwei Vorstellungen, die miteinander verbunden auftreten und sich auf mehrere Bereiche beziehen können. Die Verbindung besteht darin, daß als ökonomisch gilt, was nichts Überflüssiges enthält, und daß als rational gilt, was auf das Klarste erfaßt und strukturiert ist. Womit auf der Hand liegt, daß sich beide Vorstellungen berühren können oder sogar deckungsgleich werden. Dies ist ein Zusammenhang, der nicht erst mit der Entwicklung der Computer und der Informatik entstanden ist, sondern der zu den prägenden Zügen zumindest der neuzeitlichen europäischen Geistesgeschichte gehört und der sich in der einen oder anderen Konkretisierung in praktisch allen Einzelwissenschaften wiederfinden läßt. Insofern ist das Paradigma der »Rationalisierung« auch nicht originär eines der Informatik, sondern eher eines für die Informatik und es tritt in dreifacher Hinsicht auf: als technische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Rationalisierung.

Rationalisierung im technischen Sinn fand in der Automatisierung von Kopfarbeit statt. Mathematische Berechnungen waren für die Lösung physikalischer Probleme nötig, vor allem zur Lösung von Problemen in Telefon- und Elektrizitätsnetzen, aber auch für die Flugabwehrartillerie und für Tragflächenberechnungen sowie für Wettervorhersagen. Diese Aufgaben, die zum Teil wegen der Kriegssituation in möglichst kurzer Zeit gelöst werden

hende Informatik untersucht.

mußten, erforderten leistungsfähige Rechenmaschinen, vor allem hinsichtlich der Geschwindigkeit und der Präzision. Das gleiche galt für die umfangreichen Berechnungen im Kontext der Chiffrier- und Dechiffrierarbeiten. Im Zusammenhang mit der technischen Rationalisierung ist auch der Bedeutungswandel des Begriffs »Computer« zu sehen. Mit dem Wort »Computer« wurden vor 1940 diejenigen Angestellten bezeichnet, die Berechnungen für astronomische Tafeln, Gehälter usw. durchführten, später wurde diese Bezeichnung für elektronische Rechenmaschinen verwandt. Diese Kopfarbeit war zum großen Teil arbeitsteilig organisiert, so daß im gegebenen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Kontext nachvollziehbar ist, wenn diese zunächst mechanisiert, später automatisiert wurde und der Begriff einen entsprechenden Bedeutungswandel erlebte.

Rationalisierung als Effizienzsteigerung in der Gesellschaft ist mit dem Ziel verbunden, Wirtschaft und Gesellschaft mit Hilfe von Statistiken, die bis ins 20. Jahrhundert Zählstatistiken waren, planen und kontrollieren zu können. Dahinter steht die Annahme, daß die ermittelten Zahlen und Auswertungen ein adäquates Bild der vorhandenen Situation und eine angemessene Grundlage für Planungs- und Kontrollentscheidungen liefern könnten. Ob diese Annahme gerechtfertigt ist, läßt sich bezweifeln: Wer entscheidet, was adäquat und angemessen ist, und in wessen Interesse werden die Planungs- und Kontrollentscheidungen getroffen? Die Annahme der Objektivität der mathematisch ermittelten Werte über die Welt existiert seit Descartes' Zeiten. Sie ist ein wesentliches Merkmal der neuzeitlichen Naturwissenschaft, die den Anspruch hat, alles in der Natur, aber auch in der Gesellschaft berechenbar und damit beherrschbar zu machen. Nicht zu bezweifeln ist, daß Statistiken tatsächlich zur Planung und Kontrolle eingesetzt wurden und werden und somit ein Instrument zur Erreichung und zum Erhalt von Macht dienten und dienen. Ohne den Einsatz von Rechenmaschinen wäre dies im vorhandenen Umfang nicht möglich.

Der *wirtschaftliche Rationalisierungsaspekt* wurde gesehen, sobald Computer im zivilen Bereich zugänglich waren. Dabei ist sofort erkennbar, daß die prognostizierte Zahl der Anwendungsmöglichkeiten stets hinter dem zurückblieb, was dann an Anwendungen tatsächlich entstand. Auch ist ersichtlich, daß vorhandene Techniken als Basis für technische Entwicklungen der Zukunft weiter verwendet wurden, während neuartige Techniken nicht antizipiert werden konnten. Hinsichtlich des ersten Aspekts ist hier an die sprichwörtlich gewordenen *drei Rechner* zu erinnern, mit denen es möglich sein sollte, alle in der BRD anfallenden Anwendungen abzudecken. Hin-

sichtlich des zweiten Aspekts ist eine Schätzung aufschlußreich, die Karl Steinbuch (1917-2005) 1971 anführt:

In den USA gab es im Jahr 1955 etwa 1000 Computer, im Jahr 1970 etwa 70000. Das entspricht einem jährlichen Zuwachs von 33%. In der Bundesrepublik Deutschland betrug das jährliche Wachstum in derselben Zeit etwa 31%, Mitte 1970 waren 7259 installiert.^[...]

Die Wachstumsrate wird in den kommenden Jahren vermutlich etwas geringer sein, die Schätzungen für die Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1975 liegen zwischen 11500 und 17100 Computern, was Wachstumsraten von etwa 12,5 bis 22% entspricht. (Steinbuch 1971, 267)

In der zweiten Hälfte der siebziger Jahre erschienen dann bekanntlich die PCs auf dem Markt und seither sieht die gesamte Computerlandschaft völlig anders aus als zu Zeiten der Großrechner. Sofern wirtschaftliche Rationalisierungseffekte als Folge technischer Innovationen prognostiziert werden, kommt ihnen zwangsläufig die gleiche Verlässlichkeit zu wie den technischen Prognosen.

3.2.3 Modularität, Wiederverwendbarkeit und Standardisierung

Unter dem Ökonomieaspekt stand und steht zunächst die Erweiterbarkeit der Rechenmaschinen aufgrund ihres modularen Aufbaus, wobei das Prinzip der Modularität nicht nur die Hardware, sondern auch die Software betrifft. Auch für die Software wurde schon früh – sowohl in den USA als auch in Großbritannien – das Konzept der Unterprogramme entwickelt. So erarbeiteten Goldstine und von Neumann in »Planning and Coding of Problems for an Electronic Computing Instrument« (1947/48) sowie Wilkes, Wheeler und Gill in »The Preparation of Programs for a Digital Computer, with Special Reference to the »EDSAC« and the Use of a Library of Subroutines« (1951) das Konzept der »subroutines«. Goldstine schreibt, daß die Möglichkeit des Einsetzens von Programmen für einfache (Teil-) Aufgaben in komplexere Programme die leichtere Bedienbarkeit und die Effizienz von Rechenmaschinen fördern sollte. Die »subroutines« sollten in einer »library« in einem externen Speicher gesammelt und bei Bedarf automatisch mittels einer »preparatory routine« an die gewünschten Stellen in

komplexeren Programmen eingebunden werden. (Vgl. Goldstine 1972, 335ff.; Wegner 1976, 1208; Lindner / Wohak / Zeltwanger 1984, 122f.)

Im Zusammenhang mit der Entwicklung »höherer« Programmiersprachen in den sechziger Jahren wurde Modularität nicht nur für die Erweiterbarkeit, sondern auch für die Übersichtlichkeit und Wiederverwendbarkeit der Software als Vorteil hervorgehoben. (Vgl. Dahl / Dijkstra / Hoare 1972.)

Fortschreitende Standardisierung ist ein Kennzeichen entfalteter industrieller Massenproduktion. Die Standardisierung technischer Teile wurde durch die Anforderungen des Militärs beschleunigt. Die Arbeitsorganisation in Form der industriellen Arbeitsteilung und der ingenieurmäßigen Arbeitsweise trugen dazu bei, standardisierte Teile in diesem Bereich zu entwickeln und zu verwenden. Schon die britischen und US-amerikanischen Dechiffriermaschinen wurden in Kleinserien gebaut, ebenso der Colossus. Echte Serienfertigung setzte in der Computerindustrie der fünfziger Jahre mit den kommerziellen Rechnern der IBM ein, während der Übergang zu Großserien erst mit der Mikrominiaturisierung der Schaltungen in Chips und mit der Entwicklung der PCs einerseits und der Integration von Chips in eine wachsende Vielzahl anderer industrieller Produkte stattfand.

Nicht nur die technischen Komponenten wurden standardisiert, sondern auch die Verfahren, zum Beispiel die Testverfahren. Dies war zunächst eine ökonomische Anforderung, die aber paradigmatisch für die Informatik wurde, wobei die Wissenschaft auf das naturwissenschaftliche Konzept des wiederholbaren Experiments zurückgreifen konnte, ohne jedoch zu berücksichtigen, daß die Naturwissenschaften gerade dieses Konzept kaum noch als zuverlässig und theoretisch haltbar betrachten.

3.2.4 Genauigkeit und Korrektheit

Die Realisierung der Rechenmaschinen als Digitalmaschinen führte zur Annahme der beliebig großen Präzision der Berechnungen. Aber diese Annahme ist nur prinzipiell berechtigt, da tatsächlich jede Maschine endlich ist. Die Genauigkeit einer Berechnung hängt auch heute noch von der Aufmerksamkeit des Programmierers ab. So gelten beispielsweise das Assoziativgesetz und das Distributivgesetz der Mathematik nicht, wie sich anhand der folgenden Musterbeispiele für eine vierstellige Arithmetik mit Gleitkomma zeigen läßt (vgl. Wirth 1978, 86f.):

Assoziativgesetz:

$$\begin{aligned}
 x &= 9,900 \\
 y &= 1,000 \\
 z &= -0,999 \\
 (x + y) + z &= (9,900 + 1,000) + (-0,999) \\
 &= 10,90 + (-0,999) \\
 &= 10,90 - 0,99 \\
 &= 09,91 \\
 &= \underline{\underline{9,910}} \\
 x + (y + z) &= 9,900 + (1,000 + (-0,999)) \\
 &= 9,900 + 0,001 \\
 &= \underline{\underline{9,901}}
 \end{aligned}$$

Distributivgesetz:

$$\begin{aligned}
 x &= 1100 \\
 y &= -5,000 \\
 z &= 5,001 \\
 (x * y) + (x * z) &= -5500 + 5501 &= \underline{\underline{1,000}} \\
 x * (y + z) &= 1100 * 0,001 &= \underline{\underline{1,100}}
 \end{aligned}$$

Die Genauigkeit läßt sich zwar erhöhen, wenn – in diesem Beispiel – mehr als vier Stellen zur Verfügung stehen, was in einem Computer in der Regel der Fall ist, oder wenn bestimmte Algorithmen angewandt werden, die die Genauigkeit erhöhen, indem sie einen Kontrollmechanismus auf das Ergebnis anwenden und so zu einer bestmöglichen Lösung führen (vgl. Rump 1982; Rump 1983a; Rump 1983b), aber das generelle Problem wird damit nicht gelöst. Dennoch geht heute (fast) jeder Anwender eines Computers davon aus, daß die Berechnungen genau sind. Eine höhere Rechengenauigkeit wird auch deshalb erwartet, weil in der zur Verfügung stehenden Zeit mehr Rechenschritte ausgeführt werden können als ohne Computer möglich ist.

Unter Korrektheit wurde zunächst dreierlei verstanden: die Fehlerfreiheit, die Fehlererkennbarkeit und die Zuverlässigkeit von Computern.

Im »First Draft of a Report on the EDVAC« schreibt von Neumann, man müsse annehmen, daß ein automatisches Computersystem fehlerfrei arbeite. Dieser Punkt scheint ihm sehr wichtig zu sein, denn er weist auf ihn hin, bevor er auf die einzelnen Bestandteile des EDVAC eingeht. Und er

beschäftigt sich auch mit der Frage, ob der Rechner selbst Fehler erkennen und beheben kann:

Malfunctioning of any device has, however, always a finite probability – and for a complicated device and a long sequence of operations it may not be possible to keep this probability negligible. Any error may vitiate the entire output of the device. For the recognition and the correction of malfunctions intelligent human intervention will in general be necessary. [...] However, it may be possible to avoid even these phenomena to some extent. The device may recognize the most frequent malfunctions automatically, indicate their presence and location by externally visible signs, and then stop. Under certain conditions it might even carry out the necessary correction automatically and continue. (von Neumann 1945, 383f.)

Damit ist aber noch nicht gewährleistet, daß jeder Fehler automatisch erkannt und behoben wird. Letztlich bleibt nur die »human intelligent intervention«. Während diese Tatsache zu Beginn der Informatik offenbar bewußt und auch aufgrund der Geschwindigkeit der Rechner einlösbar war, indem bestimmte mathematische Aufgaben von Menschen nachgerechnet werden konnten, ist heute nur noch die Annahme der Fehlerfreiheit übriggeblieben. Bedingt durch die hohe Geschwindigkeit moderner Computer entfällt die Möglichkeit des Nachrechnens, die Forderung einer »human intelligent intervention« wird damit zur Fiktion.

Obwohl von Neumann in der Analogie von Rechenmaschine und Gehirn erhebliche Ähnlichkeiten zwischen Mensch und Maschine formuliert, sieht er dennoch einen Unterschied, und zwar in Hinblick auf den Umgang mit Fehlern. In seinem Vortrag »The general and logical theory of automata« heißt es:

Natural organisms are sufficiently well conceived to be able to operate even when malfunctions have set in. They can operate in spite of malfunctions, and their subsequent tendency is to remove these malfunctions. An artificial automaton could certainly be designed so as to be able to operate normally in spite of a limited number of malfunctions in certain limited areas. Any malfunction, however, represents a considerable risk that some generally degenerating process has already set in within the machine. It is, therefore, necessary to intervene immediately, because a machine which has begun to malfunction

tion has only rarely a tendency to restore itself, and will more probably go from bad to worse. (von Neumann 1948, 306)

Von Neumann weist in dem Vortrag auch darauf hin, daß die vorhandenen Methoden zur Fehlerfeststellung auf der Annahme basieren, es handle sich um einen Fehler, nicht um mehrere.

As soon as the possibility exists that the machine may contain several faults [...] error diagnosing [...] becomes an increasingly hopeless proposition. The high premium on keeping the number of errors to be diagnosed down to one, or at any rate as low as possible, again illustrates our ignorance in this field, and is one of the main reasons why errors must be made as conspicuous as possible, in order to be recognized and apprehended as soon after their occurrence as feasible, that is, before further errors have had time to develop. (von Neumann 1948, 306)

Eine weitere Annahme ist die, daß Fehler leicht erkennbar seien, da die Berechnungen wiederholt werden können. Dies gilt jedoch nur, wenn gleichzeitig vorausgesetzt wird, daß die Maschine selbst – bei jeder Ausführung des Programms – fehlerfrei arbeitet. Nur dann kann angenommen werden, daß Programmierfehler erkennbar sind und sich nicht unter Umständen aufheben.

Für die Antwort auf die Frage, wie ein Rechner aus unzuverlässigen Bauteilen erstellt werden könne oder die Zuverlässigkeit von Raketen erhöht werden könne, wurden die Neurophysiologie und die Statistik zu Hilfe genommen. Der Vergleich mit dem Nervensystem, das trotz vieler Fehler einzelner Neuronen zuverlässig arbeitet, führte zur Einführung von Redundanzen in Rechenmaschinen. Damit wird erreicht, daß das Gerät mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zuverlässig arbeitet. (von Neumann 1956, 57ff.; Shannon 1958, 123f.; Goldstine 1972, 279ff.) Korrektheit ist also nicht für jeden Fall, sondern nur als Wahrscheinlichkeit begründbar. Dies gilt nicht nur wegen der Endlichkeit des Rechners, sondern auch wegen der nicht aufhebenden Eigenschaften der Teile, aus denen er zusammengesetzt ist.

3.2.5 Von-Neumann-Architektur und Informationstheorie

Die Struktur von Computern ist von zwei Paradigmen bestimmt, zum einen von der »Von-Neumann-Architektur«, zum anderen von Prinzipien der Theorie der Informationsübertragung.

Das Paradigma der Von-Neumann-Architektur gilt für die elementare Organisation von Computern:

Ich wiederhole diese Aufzählung der fünf Haupt-Organe:

- 1) Speicher
- 2) Arithmetisches Organ
- 3) Steuer-Organ
- 4) Eingangs-Organ
- 5) Ausgangs-Organ

Hiermit sind alle wesentlichen Bestandteile einer vollautomatischen Maschine aufgezählt. (von Neumann 1954, 259)¹⁵⁶

In der Von-Neumann-Architektur lassen sich verschiedene funktionelle Ausgestaltungen realisieren (zum Beispiel parallel oder sequentiell arbeitende Rechner), die es zulassen, eine Typologie von Computern aufzustellen. Die dabei zum Tragen kommenden Unterschiede führen aber nicht zu einer paradigmatisch anderen Architektur, sondern bleiben im Rahmen der elementaren Organisation.¹⁵⁷

Die Beschreibung der Vorgänge zwischen den Teilen einer Rechenmaschine als Gegenstand der Theorie der Informationsübertragung bezog sich zunächst auf die technischen Komponenten (Hardware): Sender, Empfänger, Kanal. Diese Begriffe stammen aus der Informationstheorie, die im Rahmen der Verbreitung von Elektrizitäts- und Telefonnetzen entwickelt wurde. Dabei ging es nicht um zum Beispiel das Telefonieren mit einem bestimmten Gerät oder Material, sondern um die Frage nach allgemeinen Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit Menschen kommunizieren können, egal, ob sie telefonieren oder trommeln.

¹⁵⁶ Vgl. Abschnitt 3.1.5.

¹⁵⁷ Anders Furger und Heintz (1998), die gerade einige bautechnische und funktionale Gegebenheiten zum Kriterium der Von-Neumann-Architektur machen. In der Konsequenz erscheint die Von-Neumann-Architektur bei ihnen als ein Paradigma für Universalrechner neben anderen. Dies wird auch von anderen Autoren vertreten, jedoch gerät so hinter sekundären Unterschieden die prinzipiell gleiche Architektur aus dem Blickfeld. Als Kandidaten für Computer mit anderer Architektur kommen noch am ehesten neuronale Rechner in Frage.

Hier sei an die »talking drum«, die »sprechende Trommel«, erinnert, eine Trommelart, die ursprünglich in Afrika entwickelt wurde und die heute auch in der Karibik verwendet wird. Diese Trommeln waren in den Auseinandersetzungen zwischen den Sklavenhaltern und den Sklaven von großer Bedeutung. Mit dieser Art von Trommeln können Nachrichten übermittelt werden, und zwar nicht unter Verwendung eines diskreten Codes, wie etwa des Morsecodes, sondern wie in einer Rede. Dies ist möglich, weil in der Übermittlung zugrundeliegenden Sprache, etwa der Yoruba-Sprache, Tonhöhen für die Festlegung des Sinns von Wörtern wichtiger sind als die bloße Anordnung von Vokalen und Konsonanten. (Vgl. Martin 1985, 178ff.)

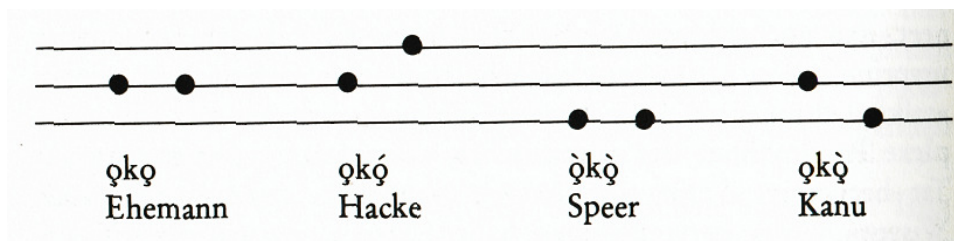


Abbildung 10. Unterscheidung von Wörtern nach Tonhöhen (aus Martin 1985, 188)

In allgemeinster Form werden Kommunikations- oder Informationssysteme wie folgt beschrieben: Eine *Informationsquelle* bringt eine *Nachricht* hervor, welche von einem *Wandler* in ein *Signal* übersetzt wird. Das *Signal* wird über einen *Kanal* an einen *Rückwandler* geleitet, der es wieder in eine *Nachricht* für den *Empfänger* übersetzt. Ein solches System besteht also aus fünf Elementen, wobei der Kanal noch durch ein sechstes Element, eine *Störquelle*, beeinflusst werden kann. (Vgl. Flechtner 1970, 124) Eine weitere allgemeine Vorstellung, die in die Informatik eingegangen ist, ist die »Black-Box-Theorie«. Ursprünglich in der Elektrotechnik verwandt, bezeichnet der Begriff den Versuch, für ein abgeschlossenes *System*, dessen Inneres nicht bekannt ist, aufgrund der *Inputs* und *Outputs* Rückschlüsse auf das Innere zu ziehen. (Vgl. Flechtner 1970, 205f.) Diesen allgemeinen Strukturvorstellungen entspricht die Von-Neumann-Architektur: Die oben zitierten Elemente 1) bis 3) bilden das *System*, 4) steht für den *Input*, 5) für den *Output*. Auch in der Software ist diese Struktur erkennbar: Jedes Programm kann als Black

Box verstanden werden, das gleiche gilt für jedes Unterprogramm, das seinen Input vom Hauptprogramm erhält und das seinen Output an das Hauptprogramm liefert. Die gleichen Prinzipien gelten beispielsweise auch für Data Flow Diagrams oder Nachrichtendiagramme in der Objektorientierung, in denen die »Kommunikation zwischen Klassen« dargestellt wird.

3.2.6 Kalkül: Formalismus und Kybernetik

Bezüglich der theoretischen Interpretation und der formalen Modellierung von Weltausschnitten kommen in den Anfängen der Informatik zwei Haltungen zum Tragen. Die eine Haltung wird durch die formalistische Position John von Neumanns repräsentiert, die andere durch die prozeßorientierte Position Norbert Wiener.

In beiden Positionen kommen die Ergebnisse der Informationstheorie und der Schaltalgebra zur Geltung. Übereinstimmung besteht auch in der Wahl des Dualsystems statt des Dezimalsystems. Dies hatte einerseits praktische, technische Gründe, stellte andererseits aber auch die logischen Vorteile zur Verfügung, die eine Umsetzung des Alles-oder-Nichts-Prinzips bietet.¹⁵⁸

Thus, whether the tubes are used as gates or triggers, the all-or-none, two equilibrium arrangements are the simplest ones. Since these tube arrangements are to handle numbers by means of their digits, it is natural to use a system of arithmetic in which the digits are also two valued. This suggests the use of the binary system. The analogs of human heurons [sic!] [...] are equally all-or-none elements. It will appear that they are quite useful for all the preliminary, orienting considerations on vacuum tube systems [...] It is therefore satisfactory that here too, the natural arithmetical system to handle is the binary one. (von Neumann 1945, 389f.)

Das Alles-oder-Nichts-Prinzip erlaubt eine 1:1-Abbildung der Wahrheitswerte W und F der Aussagenlogik auf die Zustände (Ein, Aus) in den elektronischen Schaltungen. Einen wichtigen Beitrag für die Anwendung dieses Prinzips leistete Shannons Arbeit »A Symbolic Analysis of Relay and Swit-

¹⁵⁸ Das Alles-oder-Nichts-Prinzip geht in dieser Form auf Leibniz' Vorstellungen zurück. Vgl. Kapitel 5.

ching Circuits« aus dem Jahr 1938, in der er die Realisierung der Booleschen Algebra mit elektrischen Schaltungen beschrieb.

Rechnerintern leistet das Binärsystem trotz erhöhter Anzahl Rechenschritte eine Vereinfachung der Multiplikation und Division, da keine Multiplikations- beziehungsweise Divisionstabellen erforderlich sind. Für die Darstellung nach außen, das heißt für den Benutzer, ist allerdings eine Umschlüsselung in das Dezimalsystem zweckmäßig. Dies war kein Problem angesichts der hohen Geschwindigkeit der verwendeten Vakuumröhren. Die Reaktionszeit eines solchen »vacuum tube aggregate« beträgt eine Mikrosekunde ($= 10^{-6}$ Sekunden), während die eines menschlichen Neurons etwa eine Millisekunde ($= 10^{-3}$ Sekunden) beträgt. (von Neumann 1945, 389) Das einzige Problem, das von Neumann in dieser enormen Geschwindigkeit sieht, ist, »that it actually produces a serious problem of keeping the device balanced, that is to keep the necessarily human supervision beyond its input and output end in step with its operations.« (von Neumann 1945, 391)

Hinsichtlich der Kalkülvorstellung treten die Positionen von Wiener und von Neumann dann jedoch auseinander:

Whereas Wiener viewed random process, chaos, as fundamental, von Neumann saw mechanisms and logics underlying all scientific phenomena. Von Neumann's feeling about random process was articulated in the 1950s in a letter to physicist George Gamow, who had developed a theory for the way proteins are built up in nature, a theory resting on random process. Von Neumann wrote, »I shudder at the thought that highly efficient purposive organizational elements, like the protein, should originate in a random process.« (Heims 1980, 154)

John von Neumanns Position war formalistisch, seine Modellvorstellungen orientierten sich am Hilbertprogramm.¹⁵⁹ Für ihn waren Modelle, wenn irgend möglich, formale, deterministische Modelle mit diskreten Zuständen. Er operierte bevorzugt mit der Vorstellung, der Modellierung könne »complete information« zugrundeliegen. Mit anderen Worten, man könne über alle relevanten Parameter informiert sein. Norbert Wiener dagegen

¹⁵⁹ Es ist kein Zufall, daß von Neumann 1930 in Königsberg auf der »2. Tagung für Erkenntnislehre der exakten Wissenschaften« die formalistische Position in der Grundlagendebatte der Mathematik vorstellte. (von Neumann 1931) Seine Position hat letztlich nur wenige Verbindungen zu den Begründungsproblemen, die damals verhandelt wurden. Von Neumann scheint es eher darum gegangen zu sein, ob Mathematik produktiv ist, insofern war der formalistische Standpunkt »der einfachste«.

vertrat eine erkenntnistheoretisch skeptische Position: seine Modellvorstellungen gingen davon aus, daß Wissenschaft es mit Prozessen zu tun habe. Die von ihm ins Auge gefaßten Prozesse enthalten Zeitfaktoren und möglicherweise Zufallselemente, sind also nicht unbedingt deterministisch, sondern eher kybernetisch und/oder stochastisch zu erklären. Wieners Ausgangspunkt war dementsprechend die Annahme von »incomplete information«, also die Annahme, daß nicht alle relevanten Informationen von vornherein bekannt sein können.

3.2.7 Universalität

Über »Universalität« läßt sich als Ergebnis des historischen Abrisses sagen, daß die Mehrzahl der an den Erfindungen des Computers Beteiligten allenfalls einen technisch geprägten, aus dem Vergleich der Leistungen früherer Rechner mit den neu entwickelten gewonnenen Begriff hatten. Die in den Texten der damaligen Zeit immer wieder anzutreffende Bezeichnung »multi-purpose-machine« trifft dies genau. Es wurde also davon gesprochen, daß es nicht notwendig sei, für verschiedene Anwendungen jeweils eine andere Maschine zu bauen.

In dieser Hinsicht bedeutet Universalität, daß die neuen Rechenmaschinen, mithin Computer, die Eigenschaft hatten, ein beliebiges, den Erfordernissen der jeweiligen Maschine entsprechend formuliertes Anwendungsprogramm ausführen zu können, wobei es keine Rolle spielt, ob das Programm endet oder nicht, sondern nur, ob das Programm läuft. Universalität ist in dieser Sicht ein auf das Gerät bezogenes, empirisch gegebenes Kriterium. Sie wird aufgrund eines Induktionsschlusses gestützt. In der Summe kann man davon sprechen, daß Universalität in diesem Sinn im Horizont der zur Entwicklung der Rechner gehörenden Kontexte gewünscht und als erreicht genommen wurde. Die neuen Rechner konnten mehr als die Hollerithmaschinen, sie konnten mehr als die Analoggeräte und sie konnten das alles zusammen.

So verwenden Burks, Goldstine und von Neumann in »Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument« den Begriff »general purpose computer« (Burks / Goldstine / von Neumann 1946, 42), und zwar im Zusammenhang mit der Feststellung, daß ein wichtiger Teil der Maschine nicht arithmetischer, sondern logischer Natur sei. Da die Logik als Ja-Nein-System binär ist, wird vorgeschlagen, die arithme-

tische Komponente des Rechners auf dem Binärsystem basieren zu lassen. Das Problem der Umrechnung dezimaler Zahlen in Binärzahlen soll durch eine automatische Konversion im Rechner gelöst werden, so daß hier kein Eingriff von außen in die Maschine erfolgen muß. Der Gedanke eines Universalrechners bleibt in diesem Text von 1946 auf Rechenaufgaben bezogen.

Im Jahr 1954 hielt von Neumann einen Vortrag mit dem Titel »Entwicklung und Ausnutzung neuerer mathematischer Maschinen«. Auch hier steht das mathematische Rechenvermögen im Vordergrund. Sowohl im Vortrag als auch in der anschließenden Diskussion ist die gleichartige Sicht auf Analogrechner und »Ziffernmaschinen« auffällig. So führt von Neumann in der Diskussion zunächst aus: »[...] die Ziffernmaschinen haben den Vorteil, daß sie einen viel weiteren Problemkreis umfassen und daß man sicher sein kann, daß auch dann, wenn sich das Problem ändert, die Maschine nützlich sein wird.« (von Neumann 1954, 273) Erst in einer präzisierenden Antwort auf eine Frage des Physikers Walter Weizel¹⁶⁰ (1901-1982) nach Genauigkeitsgrenzen der Maschine stellte von Neumann klar: »Es handelt sich bei der Ziffernmaschine um eine logische Maschine. Also kann man alles, was man mit Worten eindeutig ausdrücken kann, auch der Maschine »erklären« (d.h. in ihrem Code ausdrücken), und sie wird es dann der »Erklärung« (d.h. den Code-Anweisungen) gemäß treu durchführen.« (von Neumann 1954, 277)

Spricht man dagegen in einer voläufigen Formulierung – eine Präzisierung liefert in Kapitel 4 der Abschnitt über Turing – von »Universalität« als einer theoretisch begründbaren Eigenschaft von Rechnern, die darin besteht, daß ein gegebener Rechner in der Lage ist, korrekt formulierte rekursive Funktionen auszuführen, dann ist es nicht eindeutig, ob Universalität im zweiten Sinn bewußt war. Bauer hält dafür, daß von Neumann allenfalls verstanden hatte, daß der von ihm vorgeschlagene Computer in der Lage sei, primitiv-rekursive Funktionen zu berechnen. (Bauer 1998, 15)

Der Bau einer Universalmaschine im Sinne der Turingmaschine war kein explizites Ziel der Computerentwicklung. Erst mit von Neumanns Konzept für den EDVAC, in dem die Von-Neumann-Architektur dargestellt ist, wurde in den USA eine universelle Rechenmaschine beschrieben.

¹⁶⁰ Weizel war ab 1951 am Einsatz von Rechnern in der Forschung interessiert. Er gehörte zu den Gründern des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Instrumentelle Mathematik in Bonn. (Wiegand 1994, 30ff.)

Während in den USA die Universalität von Rechenmaschinen nur am Rande betrachtet und mit oder nach dem Bau der Maschinen diskutiert wurde, verlief die Entwicklung in Großbritannien nahezu umgekehrt. Turing hatte mit seinem maschinentheoretischen Entwurf schon 1936 eine universelle Rechenmaschine konzipiert und dann praktisch zeitgleich mit dem »First Draft of a Report on the EDVAC« seinen »ACE-Report« vorgelegt.

Die Vorstellung, daß er an einer Realisierung der Universalmaschine arbeite, läßt sich in Äußerungen Turings aufspüren:

Es müssen mit Sicherheit keine internen Änderungen vorgenommen werden, selbst wenn wir plötzlich von der Berechnung der Energieniveaus des Neon-Atoms zu der Aufzählung der Gruppen der Ordnung 720 umzuschalten wünschen. (Turing 1946, zitiert nach Hodges 1983, 338)

Zwei Jahre später befaßte sich Turing weiterhin mit der Frage nach der Universalmaschine. Er schreibt nun:

Die Bedeutung der universalen Maschine ist klar. Wir brauchen nicht unzählige unterschiedliche Maschinen für unterschiedliche Aufgaben. Eine einzige wird genügen. Das technische Problem der Herstellung verschiedener Maschinen für verschiedene Zwecke ist ersetzt durch die Schreibarbeit, die Universalmaschine für diese Aufgaben zu »programmieren«. (Turing 1969, 88)¹⁶¹

Von heute aus betrachtet lassen sich in den Anfängen der Informatik somit drei Redeweisen über »Universalität« ausmachen:

- Universalmaschine in der Theorie (Turingmaschine, Postsche Systeme)
- Universalmaschine in der Architektur (Von-Neumann-Architektur)
- Universalmaschine in der Realisierung (EDVAC)

Die Vorstellung, diese Art von Maschine für eine allgemeine Informationsverarbeitung, die beliebige Zeichenketten auswertet, verwenden zu können, verallgemeinerte sich erst mit Beginn der fünfziger Jahre.¹⁶²

¹⁶¹ Turings Typoskript »Intelligent Machinery« wurde 1969 veröffentlicht. Es trägt im Original das Datum »8/7/48«. Turings Biograph Hodges verlegt die Entstehung in das Jahr 1945. (Hodges 1983, 639, 645)

¹⁶² Vgl. Abschnitt 4.2.7.

4 Einflüsse aus anderen Wissenschaften

In den Paradigmenbestand der Informatik sind Denkansätze und theoretische Konstrukte aus anderen Wissenschaften eingegangen. Dies war ein historischer Prozeß, dessen Anfänge ebenfalls vor der Herausbildung der Informatik als Disziplin liegen. Einige der an ihm beteiligten Personen spielten allerdings auch in der frühen Informatik eine aktive Rolle, man denke an John von Neumann, Alan Turing oder Norbert Wiener.

Einflüsse stammen aus Biowissenschaften und Physik, Mathematik und Philosophie.

In dieser Untersuchung werden ausschließlich die beiden letztgenannten berücksichtigt, weil besonders bei ihnen die Familienähnlichkeiten mit den in Kapitel 2 angeführten und in Kapitel 6 weiter erörterten Paradigmen ins Auge fallen.

Mit Blick auf die letzten Jahrzehnte des 19. und den Beginn des 20. Jahrhunderts wird für Physik und Mathematik festgestellt, es habe in diesen Wissenschaften Grundlagenkrisen gegeben. Die in der Folge formulierten neuen Theorien und Begründungsstrategien betrafen nicht nur die jeweilige Einzelwissenschaft, sondern auch deren philosophische Reflexion. Vor allem die in den Debatten von Mathematik und Logik sowie empiristischer Philosophie thematisierten Probleme hatten einen konzeptionellen Einfluß auf die Informatik. Eine Erörterung zumindest eines Teils der damaligen Debatten läßt deutlich werden, daß die damals in diesen Wissenschaften anstehenden Probleme sich zum Teil bis heute auf die Informatik auswirken. Problemlösungen, die damals vorgeschlagen wurden, sind für die Informatik paradigmatisch geworden, auch wenn sie an ihren Ursprungsorten so längst aufgegeben wurden oder modifiziert sind.

4.1 Philosophie

4.1.1 Der Logische Empirismus

Zwischen der logizistischen Position der Grundlagendiskussion in der Mathematik und dem Verifikationsprogramm in der Philosophie, das vor allem vom Wiener Kreis entwickelt und vertreten wurde, besteht ein enger Zusammenhang. Die Position des Wiener Kreises, die auch als »Logischer Empirismus« bezeichnet wird, greift nämlich hinsichtlich des logischen Programnteils auf den Logizismus zurück und verbindet diesen mit einem empiristischen Programnteil.

Der Grundlagenstreit in der Mathematik hatte unter anderem das Ergebnis geliefert, daß eine widerspruchsfreie Begründbarkeit nicht gegeben ist.¹⁶³ Von diesem Ergebnis sind das Programm des Logizismus und der Formalismus gleichermaßen betroffen. Zu dem Zeitpunkt, als die Grundvorstellungen des Logischen Empirismus formuliert wurden, stand dieses Ergebnis noch nicht fest und so ist der logische Programnteil noch von der Erwartung geprägt, daß die Anforderungen erfüllbar seien:

Die Mathematiker haben in den letzten Jahrzehnten eine *neue Logik* aufgebaut. Sie sind durch die Not, durch die Grundlagenkrise der Mathematik dazu gezwungen worden, da die alte Logik in dieser Krise vollständig versagte. Es wurde nicht etwa nur ihre Unzulänglichkeit in dieser schwierigen Problemsituation festgestellt, sondern weit Schlimmeres, das Schlimmste, was einer wissenschaftlichen Lehre zustoßen kann: sie führte zu Widersprüchen. Das gab den stärksten Antrieb zum Aufbau der neuen Logik. Diese vermeidet die Widersprüche der alten; aber über dieses bloß negative Verdienst hinaus hat sie auch schon den Beweis positiver Leistungsfähigkeit erbracht; allerdings vorerst nur auf dem Felde der Nachprüfung und Neulegung der Grundlagen der Mathematik.

Es ist historisch verständlich, daß *die neue Logik* zunächst nur im engeren Fachkreise der Mathematiker und Logiker Beachtung gefunden hat. Ihre hervorragende *Bedeutung für die gesamte Philosophie* wird nur

¹⁶³ Vgl. Kurt Gödels (1906-1978) Unvollständigkeitssätze, auf die in Abschnitt 4.2.6 eingegangen wird.

von wenigen geahnt; ihre Auswertung auf diesem Felde hat kaum erst begonnen. Wenn die Philosophie willens ist, den Weg der Wissenschaft (im strengen Sinne) zu betreten, so wird sie auf dieses durchgreifend wirksame Mittel zur Klärung der Begriffe und zur Säuberung der Problemsituationen nicht verzichten können. (Carnap 1928a, XVIIIf., Hervorhebungen im Original)

Im folgenden wird dargestellt und erörtert, wie der Wiener Kreis, vor allem Carnap, den Aufbau einer logisch-empiristischen Wissenschaft entwarf.

Als Wiener Kreis wird eine Gruppe von Philosophen, Mathematikern, Physikern und anderen Wissenschaftlern bezeichnet, die sich um Moritz Schlick (1882-1936) bildete, der 1922 den Lehrstuhl für Naturphilosophie in Wien erhielt. Schlick richtete Diskussionsveranstaltungen ein, die ab 1924 regelmäßig stattfanden und die als »Geburtsstunde« des Wiener Kreises angesehen werden. (Vgl. Mormann 2000, 20f.) Zum Wiener Kreis gehörten neben Schlick Hans Hahn (1880-1934), Otto Neurath (1882-1945), Viktor Kraft (1880-1975), Rudolf Carnap (1891-1970), Friedrich Waismann (1896-1959), Herbert Feigl (1902-1988), Karl Menger (1902-1988), Philipp Frank (1884-1966) und andere. (Vgl. Kraft 1950) Im näheren Umfeld des Wiener Kreises standen Ludwig Wittgenstein (1889-1951), Karl Popper (1902-1994) und Kurt Gödel (1906-1978). Wenn hier vom Wiener Kreis gesprochen wird, darf aber nicht außer acht gelassen werden, daß die einzelnen Mitglieder in vielerlei Hinsicht unterschiedliche Ansichten und Theorien vertraten.

Es ist ein kompliziertes Netz wechselnder Übereinstimmungen und Divergenzen in strittigen Punkten, die man zu sehen bekommt, wenn man sich auf die einzelnen Mitglieder des Wiener Kreises einläßt. Nicht festgefügte Thesen oder dogmatische Lehrsätze halten sie zusammen. Es ist der Wunsch nach einer konzentrierten Kooperation von Philosophen, Mathematikern und Fachwissenschaftlern, die eine fruchtbare gegenseitige Anregung und Kritik höher achten als die genialen Entwürfe der einsamen Denker auf ihren hohen Türmen. Gemeinsam ist ihnen allein eine familienähnliche »Einstellung«, die sich programmatisch äußert in der Hervorhebung des intersubjektiv Erfahrbaren, im Vertrauen auf die erhellende Kraft einer präzisen logischen Argumentationsweise und, last but not least, in dem Bemühen, eine apollinische Lebensintensität zu steigern und aus dem Wirrwarr theologischer und metaphysischer Illusionen zu befreien. (Geier 1992, 16f.)

Einig war sich der Wiener Kreis darin, ein Programm zu entwickeln, das die Wissenschaft von ideologisch oder metaphysisch begründeten Ansätzen reinigen sollte. Dieses Programm wurde in Abgrenzung zu derartigen »Weltanschauungen« als »wissenschaftliche Weltauffassung« bezeichnet. Es umfaßte einerseits ein »*Bekenntnis* zu den Methoden der exakten Wissenschaft, insbesondere der Mathematik und Physik, ein Bekenntnis zu sorgfältigem logischem Schließen (im Gegensatz zu kühnem Gedankenfluge, zu mystischer Intuition, zu gefühlsmäßigem Bemächtigen)« und andererseits eine »*Abgrenzung* gegen die Philosophie im üblichen Sinne, als einer Lehre von der Welt, die beansprucht, gleichberechtigt neben den einzelnen Fachwissenschaften oder gar höher berechtigt über ihnen zu stehen« (Hahn 1930/31, 96, Hervorhebung im Original). Die Philosophie habe nur die Aufgabe, die Sätze der Fachwissenschaften syntaktisch – erst später wurden auch semantische und pragmatische Gesichtspunkte in den Blick genommen – kritisch dahingehend zu prüfen, ob sie sinnvolle Sätze und keine Scheinsätze sind. »Es gibt keine Philosophie als Theorie, als System eigener Sätze neben der Wissenschaft. Philosophie betreiben bedeutet nichts anderes als: die Begriffe und Sätze der Wissenschaft durch logische Analyse klären. Das Werkzeug hierfür ist die neue Logik.« (Carnap 1930/31b, 26) Philosophie im überlieferten Sinn sollte nach dieser nachdrücklich von Carnap vorgetragenen Auffassung durch eine »Wissenschaftslogik« als Nachfolgedisziplin ersetzt werden. Ziel war somit, eine Methode vorzulegen, die zu zweierlei geeignet ist: Erstens zu klären, was »wissenschaftliche Sätze« sind, und zweitens vorzugeben, wie solche Sätze zu erzeugen sind. Damit sind auch die Komponenten genannt, die zur Grenzziehung, was als wissenschaftlich gelten soll und was nicht, herangezogen wurden: Empirie und Logik.

Mit dieser Auffassung ist die Grundlage umrissen, aus der sich die Ablehnung der Vertreter der »wissenschaftlichen Weltauffassung« gegenüber der Metaphysik ergibt. Metaphysische Sätze oder »Scheinsätze« in den Wissenschaften, also Sätze, die weder auf Beobachtung basieren noch durch logische Transformation aus anderen Sätzen entstanden sind, können von ihnen nicht anerkannt werden, sondern gelten als sinnlose und damit überflüssige Wortgebilde. (Vgl. Carnap 1931c, 232)¹⁶⁴

¹⁶⁴ Von solchen Sätzen sind Sätze aus zum Beispiel Märchen zu unterscheiden. Letztere sind falsch, aber nicht sinnlos. (Carnap 1931c, 232)

Die Argumentation mündet in einem Problem, dessen Lösung die Wichtigkeit der Analytizität für den Logischen Empirismus ankündigt. Da Logik und Mathematik nicht empirisch begründbar sind, kann es auch kein auf Empirie beruhendes Verfahren zu ihrer Verifikation oder Falsifikation geben. Als empirisch leere Sätze sind die Sätze von Logik und Mathematik so sinnlos wie die Sätze der Metaphysik, die ja gerade ausgeschlossen werden sollen. Die Sätze von Logik und Mathematik benötigen damit eine eigene Rechtfertigung. Die Annahme einer nicht-empirischen Erkenntnisquelle wie Offenbarung verbietet sich. Wie lassen sich also die Sätze von Logik und Mathematik von denen der Metaphysik unterscheiden? Die Unterscheidung wird möglich, wenn berücksichtigt wird, daß die Sätze der Metaphysik und der Wissenschaft etwas über die Welt aussagen sollen, die der Logik und Mathematik nicht. Es läßt sich nun eine Zuordnung zur Kantschen Urteilstafel treffen:

Urteil	Erkenntnisquelle	Inhalt
Analytisch-apriori	apriori	analytisch
Synthetisch-apriori	apriori	synthetisch
Analytisch-aposteriori	---	---
Synthetisch-aposteriori	aposteriori	synthetisch

Tabelle 15. Urteilstafel

Für die Logischen Empiristen galt: Die Sätze der Logik und Mathematik sind analytisch-apriori. Die Sätze der Metaphysik sind synthetisch-apriori. Die Sätze der Wissenschaft sind synthetisch-aposteriori.¹⁶⁵ Schlick kommentiert Kants Schema wie folgt:

Wenn man die Aussagen nach der Kantischen Weise einteilt, ergibt sich folgendes Schema:

Analytische Urteile <i>a priori</i>	sind eigentlich selbstverständlich.
Synthetische Urteile <i>a priori</i>	gibt es nicht; aber Kant glaubte daran.
Analytische Urteile <i>a posteriori</i>	kann es nicht geben.

¹⁶⁵ Es sei aber daran erinnert, daß die Zuordnung zu dieser Tafel anders ausfällt, wenn man sich auf eine andere Theorie stützt als Carnap. Die mathematischen Urteile waren für Kant synthetisch-apriori und das vertrat auch Luitzen Egbertus Jan Brouwer (1881-1966) mit seinem intuitionistischen Ansatz.

Synthetische Urteile *a posteriori* sind die echten Erfahrungssätze.

(Schlick 1933/34, 165, Hervorhebungen im Original)

Eine gleichermaßen die Philosophiegeschichte und grundsätzliche außerwissenschaftliche Einstellungen heranziehende Begründung für diese Position des Logischen Empirismus, die zugleich als Beispiel für die unterschiedlichen Argumentationsweisen im Wiener Kreis gelesen werden kann, liefert Hahn in seinem Aufsatz »Überflüssige Wesenheiten (Occams Rasiermesser)« aus dem Jahr 1930. In ihm werden zunächst zwei Haupttypen von philosophischen Systemen unterschieden: die »weltzugewandten« und die »weltabgewandten« Systeme. Die weltzugewandte Philosophie beziehe sich auf die Sinne, »sie nimmt diese Welt, wie sie sich darbietet, in ihrer Unbeständigkeit, ihrer Regellosigkeit, ihrer Buntheit, und sucht sich in ihr zurechtzufinden, sich mit ihr abzufinden, sie zu genießen.« (Hahn 1930, 21) Die weltabgewandte Philosophie dagegen mißtraue den Sinnen, »hält die Sinnenwelt für Lug und Trug, für bloßen *Schein*, und sucht nach wahren Wesenheiten, nach wahrhaftem *Sein*« (Hahn 1930, 21, Hervorhebungen im Original). Hahn hält »gewisse psychologische Grundstimmungen«, nämlich Optimismus beziehungsweise Pessimismus, für die letzte Ursache dieser unterschiedlichen Philosophien.¹⁶⁶ Obwohl die weltabgewandte Philosophie in den vergangenen zweitausend Jahren dominiert habe, habe es auch Kritiker wie John Locke, David Hume (1711-1776) und Bertrand Russell gegeben. Besonders zu nennen sei hier Wilhelm von Ockham (1287 oder früher - 1347 oder 1349), dem der Satz »Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem« zugeschrieben wird, der als »Ockhamsches Rasiermesser« bekannt ist.¹⁶⁷ Ockham gilt als Begründer des »Nominalismus«, der philosophischen

¹⁶⁶ »Wer sich in der Sinnenwelt wohl fühlt, wer imstande ist, sich ihrer zu freuen, wird nicht nach Wesenheiten hinter ihr Ausschau halten; wer aber in ihr seine Befriedigung nicht findet, wem es versagt ist, diese Welt der Sinne zu genießen, der will Zuflucht finden in einer Welt andersgearteter Wesenheiten. Und so erweist sich die weltabgewandte Philosophie auch als ein immer wieder benütztes Mittel, um die Menge derer, die mit Recht nicht sehr zufrieden sind in *dieser* Welt, auf eine andere Welt zu vertrösten; und diesem Umstande zumeist verdankt es die weltabgewandte Philosophie, daß sie durch zwei Jahrtausende eine ziemlich unbestrittene Herrschaft führen konnte, die erst in unseren Tagen ernstlich ins Wanken gerät. Doch von dieser, ich möchte sagen politischen und ökonomischen Rolle der weltabgewandten Philosophie soll hier nicht die Rede sein.« (Hahn 1930, 21, Hervorhebung im Original)

¹⁶⁷ Jan Peter Beckmann führt eine Vielzahl Zuschreibungen auf. Er begründet, daß dieser Satz nicht nur nicht von Ockham stammt, sondern daß die ontologische Lesart des Ökonomieprinzips, die zufolge des »entia« zwingend ist, für das Mittelalter kein denkbarer Standpunkt war und auch tatsächlich von Ockham nicht vertreten wurde, sondern eine methodologische Regel oder Maxima, daß die Annahmen nicht unnötig ver-

Richtung, die sich im sogenannten Universalienstreit im Mittelalter gegen die Position des »Realismus« wandte, der – im Anschluß an Platons Ideenlehre – die Meinung vertrat, daß die Universalien, also die Allgemeinbegriffe wie zum Beispiel »Pferd« im Gegensatz zu den Einzelpferden, in irgendeiner Ideenwelt Existenz hätten. In einem strikten nominalistischen Sinn sind die Allgemeinbegriffe nur Namen (»nomina«). Hahn führt an: »Sufficiunt singularia, et ita tales res universales omnino frustra ponuntur«¹⁶⁸ (Hahn 1930, 25) Die Anwendung von »Ockhams Rasiermesser« als methodisches Prinzip heißt zunächst, nicht anzunehmen, daß es so viele Begriffe gibt wie Dinge vorhanden sind. Es heißt weiter, daß es nicht möglich ist, jeden Begriff als Namen für eine Sache zu konstruieren. »Stattdessen muß man schauen, ob man nicht an die Stelle eines Namens eine Beschreibung setzen kann, etwa an die Stelle von »Vaterschaft« die Beschreibung »hat ein Kind gezeugt«, um auf diesem Wege unnötige Existenzannahmen zu vermeiden.« (Beckmann 1995, 45)¹⁶⁹

Hahn nennt drei Gruppen von überflüssigen Gegenständen: Die erste Gruppe sind die unmöglichen Gegenstände, wie zum Beispiel »hölzernes Eisen«. Zwar kann ein wahrer Satz damit gebildet werden (»Ein hölzernes Eisen existiert nicht.«), aber die Übersetzung in die Sprache der symbolischen Logik (»Die Aussage »X ist hölzern und X ist Eisen« ist für jeden Gegenstand X falsch.«) und die Prüfung dieser Aussage anhand der wirklichen Gegenstände zeigen, daß kein unmöglicher Gegenstand angenommen werden muß, um den oben genannten Satz zu verstehen. Die zweite Gruppe bilden Raum und Zeit, die insbesondere in Kants Philosophie als Wesenheiten verstanden werden. Auch die Gegenstände »Raum« und »Zeit« sind überflüssig. Denn Zeit besteht aus »Gleichzeitigkeit und Sukzessionserlebnisse[n]« (Hahn 1930, 28f.) Die dritte Gruppe sind die Zahlen. Hier bedeutet Ockhams Rasiermesser die Ablehnung der Platonischen Vorstellung, in

mehrt werden sollten. Er zitiert zwei Formulierungen dieses Prinzips bei Ockham. »Frustra fit per plura quod fieri potest per pauciora.« (»Umsonst geschieht durch Mehreres, was sich mit Wenigem tun läßt.«) und »Pluralitas non est ponenda sine necessitate.« (»Eine Mehrheit darf nicht ohne Not zugrundegelegt werden.«). (Beckmann 1995, 42ff., 193f.) Die ontologische Lesart ist nach Beckmann nicht denkbar gewesen, weil nach dem so verstandenen Ökonomieprinzip »Dinge« für »überflüssig« erklärt und eliminiert werden können. »Dies zu bejahen hieße behaupten, die Welt und alle Dinge in ihr seien nichts anderes als eine Projektion des menschlichen Geistes, dergestalt, daß sich ihr Umfang nach Belieben erweitern oder vermindern ließe.« (Beckmann 1995, 42)

¹⁶⁸ »Es genügen die Einzeldinge, und so werden diese Allgegenstände gänzlich überflüssigerweise angenommen.«

¹⁶⁹ Vgl. Kapitel 2.2.6.

der Welt der Ideen gäbe es eine Idee der Zwei, eine Idee der Drei usw.¹⁷⁰ Nach der Anwendung von Ockhams Rasiermesser bleiben also nur die Wesenheiten der Sinnenwelt. Und diese sind die Gegenstände, die der Logische Empirismus akzeptiert.

Im folgenden werden die Grundlinien für den Aufbau einer empirisch-logischen Wissenschaft im Sinne des Logischen Empirismus dargestellt, wobei hin und wieder die unterschiedlichen Meinungen der Mitglieder des Wiener Kreises angesprochen werden, so daß deutlich wird, daß es sich nicht in jeder Hinsicht um eine homogene, gemeinschaftliche Ansicht handelt. Für die Herausarbeitung der Grundlinien wird auf Carnaps Position ein gewisses Schwergewicht gelegt, weil er einerseits eine integrierende Rolle im Wiener Kreis einnahm und andererseits gerade derjenige war, der einen stringenten Versuch unternahm, die beiden Seiten des Programms, die logische und die empirische, als »Konstitutionssystem« zusammenzufassen.

Carnaps zentrale Rolle im Wiener Kreis läßt sich unter anderem daran ablesen, daß in den Diskussionsveranstaltungen neben Wittgensteins »Tractatus logico-philosophicus« auch ein Entwurf von »Der logische Aufbau der Welt« gelesen und besprochen wurde. (Vgl. Mormann 2000, 23) Auch war Carnap einer der Autoren des »Manifest des Wiener Kreises«, das unter dem Titel »Wissenschaftliche Weltauffassung – der Wiener Kreis« anläßlich der Gründung des Vereins Ernst Mach veröffentlicht wurde. (Vgl. Carnap / Hahn / Neurath 1929)

Mit dem Aufbau eines Konstitutionssystems in »Der logische Aufbau der Welt« versuchte Carnap, einen präzisen Begriff von Wissenschaftlichkeit und von bestimmten wissenschaftlichen Verfahren vorzulegen. Sein Ansatz geht davon aus, ein *System* im Sinne der »Principia Mathematica« (Russell / Whitehead 1910-1913) als Modell für die Wissenschaft zu erstellen.

Carnaps Ansatz – das sei an dieser Stelle gesagt – war im Wiener Kreis nicht durchgängig akzeptiert. So nahm Neurath nicht ein *System*, sondern eine *Enzyklopädie* als Modell der Wissenschaft an, da er das wissenschaftliche Wissen immer für lückenhaft und mehrdeutig hielt, so daß es allenfalls gelingen könnte, das vorhandene Wissen in Form einer Enzyklopädie zu-

¹⁷⁰ Die Debatte darüber, ob Zahlen Wesenheiten sind oder nicht, wird in Abschnitt 4.2 behandelt. Das dort Gesagte macht deutlich, daß Hahns Umgang mit dieser Gruppe den durch die Position Freges aufgeworfenen Problemen und den häufigen Rückgriffen auf realistische Argumente bei Cantor nicht gerecht wird, denn es geht um mehr als die Ideen der einzelnen Zahlen. Die Reihe der Logiker und Mathematiker des 19. (und auch des 20. Jahrhunderts), die sich zum Teil – so Bernard Bolzano (1781-1848) – sogar explizit auf Platon bezogen, ließe sich leicht verlängern; Gödel, der zunächst eine strikt nominalistische Mathematik forderte, endete als vehementer Realist.

sammenzufassen, die »wie eine Zwiebel aus vielen Schalen bestehen mag. Man kann die zuerst erschienenen Hefte schon in mehrfach verbesserten Auflagen vorliegen haben, ehe man die letzte Schale von Heften herauszugeben angefangen hat. Es soll aber so vorgegangen werden, daß die jeweils vorliegenden Bände ein abgerundetes Ganzes bilden. Sollte aus irgendwelchen Gründen etwa das Weitererscheinen verlangsamt werden, so würde *niemals ein Torso vorliegen*.« (Neurath 1937, 316, zitiert nach Hegselmann 1979, 43)

4.1.2 Das Konstitutionssystem

Im »Logischen Aufbau der Welt« formuliert Carnap als Aufgabe und Ziel:

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist die Aufstellung eines erkenntnismäßig-logischen Systems der Gegenstände oder der Begriffe, des »Konstitutionssystems«. Der Ausdruck »Gegenstand« wird hier stets im weitesten Sinne gebraucht, nämlich für alles das, worüber eine Aussage gemacht werden kann. Danach zählen wir zu den Gegenständen nicht nur Dinge, sondern auch Eigenschaften und Beziehungen, Klassen und Relationen, Zustände und Vorgänge, ferner Wirkliches und Unwirkliches.

Das Konstitutionssystem stellt sich nicht nur, wie andere Begriffssysteme, die Aufgabe, die Begriffe in verschiedene Arten einzuteilen und die Unterschiede und gegenseitigen Beziehungen dieser Arten zu untersuchen. Sondern die Begriffe sollen aus gewissen Grundbegriffen stufenweise abgeleitet, »konstituiert« werden, so daß sich ein Stammbaum der Begriffe ergibt, in dem jeder Begriff seinen bestimmten Platz findet. (Carnap 1928a, 1)

Carnaps Methode der Konstitution ist dadurch gekennzeichnet, daß sie zwei Wissenschaftszweige miteinander in Verbindung bringt: die Logik, vor allem die von Russell und Alfred North Whitehead (1861-1947) formulierte Relationentheorie, und die Empirie, das heißt die Rückführung der »Wirklichkeit« auf das »Gegebene«, wie sie von Ernst Mach (1838-1916), Henri Poincaré (1854-1912) und anderen gefordert wurde. In diesem Zusammenhang gibt Carnap einen Hinweis auf Leibniz:

Die Grundgedanken der Relationstheorie gehen zurück auf die Leib-

nizschen Ideen einer ›mathesis universalis‹ und einer ›ars combinatoria‹; die Anwendung der Relationstheorie für den Aufbau des Konstitutionssystems berührt sich mit der Leibnizschen Idee einer ›characteristica universalis‹ und einer ›scientia generalis‹. (Carnap 1928a, 3)

Der Verweis auf Leibniz liefert einen Anhaltspunkt für dessen Aktualität für den Logischen Empirismus und für die Informatik. Heute wird Leibniz als »Ahnherr« der Informatik angesehen, weil er als Erfinder des Dualzahlensystems und von mechanischen Rechenmaschinen gilt. Seine Bedeutung für die Informatik geht aber weit darüber hinaus, wie das Kapitel 5 dieser Arbeit zeigt, in dem ausführlich auf die »Leibnizschen Ideen«, von denen Carnap hier spricht, eingegangen wird.

Carnap versteht unter Konstitution »eine rationale Nachkonstruktion des gesamten, in der Erkenntnis vorwiegend intuitiv vollzogenen Aufbaues der Wirklichkeit« (Carnap 1928a, 139).

Unter einem ›Konstitutionssystem‹ verstehen wir eine stufenweise Ordnung der Gegenstände derart, daß die Gegenstände einer jeden Stufe aus denen der niederen Stufen konstituiert werden. Wegen der Transitivität der Zurückführbarkeit werden dadurch indirekt alle Gegenstände des Konstitutionssystems aus den Gegenständen der ersten Stufe konstituiert; diese ›Grundgegenstände‹ bilden die ›Basis‹ des Systems. (Carnap 1928a, 2, Hervorhebungen im Original)

Carnaps Ziel war nicht, *ein* Konstitutionssystem aufzubauen, sondern, eine allgemeine Theorie von *vielen möglichen* Konstitutionssystemen zu formulieren. (Vgl. Mormann 2000, 87) Diese allgemeine Theorie besagt, daß alle wissenschaftlichen Begriffe auf wenige Grundbegriffe und alle Beziehungen zwischen den Begriffen auf wenige Grundbeziehungen zurückgeführt werden sollen und wie dieses erfolgen soll. Als Grundelemente eines Konstitutionssystems nimmt Carnap Klassen (›Grundklassen‹) und Relationen (›Grundrelationen‹) an. Er stellt die Grundrelationen an den Anfang des Konstitutionssystems und betrachtet die Einzelgegenstände als sekundär gegenüber den Beziehungen zwischen ihnen. (Carnap 1928a, 83) Die Struktur des Systems ist also das Primäre, die Gegenstände sind das Sekundäre.

Diese Grundrelationen bilden die undefinierten Grundbegriffe des Systems, nicht die Grundelemente; diese werden erst aus den Grundrelationen (als deren Feld) konstituiert. (Carnap 1928a, 105, Hervorhebung im Original)

Und im anschließenden Literaturhinweis schreibt er:

Cassirer ([Substanzbegr.] 292ff.) hat gezeigt, daß eine Wissenschaft, die das Ziel hat, das Individuelle durch Gesetzeszusammenhänge zu bestimmen, ohne daß es seine Individualität verliert, nicht Klassen-(>Gattungs-<)-begriffe, sondern *Relationsbegriffe* verwenden muß, da diese zur Bildung von Reihen und damit zur Aufstellung von Ordnungssystemen führen können. Auch hieraus ergibt sich die Notwendigkeit der Relationen als erster Setzungen, da zwar von Relationen leicht zu Klassen übergegangen werden kann, das Umgekehrte jedoch nur in sehr beschränktem Maße möglich ist. [...]

Der *Positivismus* hat hervorgehoben, daß das einzige *Material* der Erkenntnis im unverarbeiteten, erlebnismäßigen *Gegebenen* liegt; dort sind die *Grundelemente* des Konstitutionssystems zu suchen. Der *transzendente Idealismus* insbesondere neukantianischer Richtung (Rickert, Cassirer, Bauch) hat aber mit Recht betont, daß diese Elemente nicht genügen; es müssen *Ordnungsetzungen* hinzukommen, unsere »*Grundrelationen*«. (Carnap 1928a, 105, Hervorhebungen im Original)

Thomas Mormann versteht Carnaps Ansatz dementsprechend als »Versuch einer Synthese von Positivismus und Neukantianismus mit der [sic!¹⁷¹] Mitteln der Relationenlogik«. (Mormann 2000, 90) Das von Carnap beschriebene System ist ein Konstitutionssystem mit »eigenpsychischer Basis«, das heißt, als Grundelemente werden »Elementarerlebnisse« angenommen. Bei diesen handelt es sich nicht um einfache Sinnesempfindungen, wie Mach vorschlug, da »in diesem Falle nicht das Gegebene selbst, sondern Abstraktionen daraus, also etwas erkenntnismäßig Sekundäres, als Grundelemente genommen werden. Zwar sind Konstitutionssysteme, die von solchen Grundelementen ausgehen, ebenso berechtigt und durchführbar, wie etwa

¹⁷¹ Dieser Druckfehler ist nur einer von vielen in Mormanns Buch. Leider sind auch die Quellenangaben nicht immer korrekt. Zum Beispiel stammen die Zitate auf den Seiten 116 und 117 nicht aus Carnaps Aufsatz »Die physikalische Sprache als Universalsprache der Wissenschaft« (1931b), der in der »Erkenntnis« Band 2, 1931 – nicht 1932 – erschien, sondern aus »Über Protokollsätze« (1932/33b). Auch fehlen viele Literaturangaben: »Stegmüller 1985« (S. 176), »Tversky / Kahneman 1983« (S. 183), »Hintikka 1992« (S. 187), »Heidegger 1935« (S. 203) sind nicht im Literaturverzeichnis zu finden. »Koppelberg 1993« (S. 196) ist ebenfalls nicht im Literaturverzeichnis, dafür gibt es »Koppelberg 1987« gleich zweimal (S. 218 und S. 223). Die Arbeit von Geier wird auf S. 16 als »Geyer 1992« bezeichnet, im Literaturverzeichnis steht »Geier 1995«, richtig wäre: Geier 1992 (wenn die erste Auflage gemeint ist) oder Geier 1995 (zweite Auflage). Schade, denn wegen seines Inhalts hätte das Buch ein sorgfältigeres Lektorat verdient.

Systeme mit physischer Basis. Da wir jedoch von unserem Konstitutionssystem auch die Berücksichtigung der erkenntnismäßigen Ordnung der Gegenstände verlangen wollen [...], so müssen wir von dem ausgehen, was zu allem anderen erkenntnismäßig primär ist, vom »Gegebenen«, und das sind die Erlebnisse selbst in ihrer Totalität und geschlossenen Einheit« (Carnap 1928a, 92). Carnap bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die »Gestalttheorie« von Wolfgang Köhler (1887-1967) (1925) und Max Wertheimer (1880-1943) (1925), die besagt, daß in den verschiedenen Sinnesgebieten der Gesamteindruck das erkenntnismäßig Primäre ist und erst durch Abstraktion die sogenannten Einzelempfindungen ableitbar sind. Bezogen auf das Sehen heißt das, daß der Eindruck des gesamten Sehfeldes den Einzelheiten in ihm vorausgeht und daß erst im nachhinein davon gesprochen werden kann, daß die Wahrnehmung aus den Einzelempfindungen zusammengesetzt ist. (Carnap 1928a, 92f.) Das Eigenpsychische bezieht sich auf unmittelbar Gegebenes, das heißt auf qualitative Elemente wie Farben, Töne, Gerüche usw. Damit kann das empirisch Gegebene als Grundlage der Wissenschaft eingeführt werden. (Carnap 1928a, X, XI, 81, 171) Die Elementarerlebnisse lassen sich mit den in Hilberts »Grundlagen der Geometrie« (1934) beschriebenen Punkten, Geraden, Ebenen vergleichen. (Vgl. Kambartel 1968, 180)

Hinsichtlich der Grundbeziehungen des Konstitutionssystems wählt Carnap eine einzige Relation, nämlich die »Ähnlichkeitserinnerung«. Es kann zwar »nicht als bestimmte Behauptung, sondern nur als Vermutung ausgesprochen werden, daß ein Konstitutionssystem auf eigenpsychischer Basis mit der Grundrelation der Ähnlichkeitserinnerung (Er) allein auskommen kann. Immerhin zeigen aber die Untersuchungen, daß jedenfalls eine recht kleine Anzahl von Grundrelationen genügt und daß als Grundrelationen nur Relationen zwischen Elementarerlebnissen, nicht solche höherer Stufe nötig sind.« (Carnap 1928a, 117) Mit der »Ähnlichkeitserinnerung« ist die Ähnlichkeitsbeziehung zwischen zwei Elementarerlebnissen gemeint. Carnaps Definition der Ähnlichkeitserinnerung lautet: »x und y sind Elementarerlebnisse, die durch Vergleich einer Erinnerungsvorstellung von x mit y als teilähnlich erkannt sind, d.h. als in einem Erlebnisbestandteil annähernd übereinstimmend.« (Carnap 1928a, 150) Unter Erinnerung versteht Carnap nicht nur die »Reproduktion eines schon entschwundenen Erlebnisses«, sondern auch die »Retention eines kurz vorher gewesenen, noch nicht entschwundenen, sondern nachklingenden Erlebnisses, z.B. einer Wahrnehmung.« (Carnap 1928a, 110) Der Begriff der Retention signalisiert eine

direkte Anknüpfung an Edmund Husserls (1859-1938) Untersuchungen »Zur Phänomenologie des inneren Zeitbewußtseins«. (Husserl 1893-1917) Der Begriff ist in Husserls Zeitanalysen wesentlich für die Erklärung subjektiver Zeit. Er dient dazu, die Konstitution von »Eigenzeit« begründen zu können. Der Bezugsrahmen ist lebensweltlich und unabhängig von wissenschaftlicher Objektivierung. Wenn Carnap die Basis seines Konstitutionssystems an dieser Stelle, das heißt in der Lebenswelt ansiedelt, dann heißt das auch, daß Wissenschaft im Carnapschen Sinn nicht exklusiv für das Bild von der Welt ist, das Menschen haben, sondern ein durch besondere Erklärungsweisen ausgezeichnete Zweig des rationalen Umgangs mit Welt. Die Beziehung, die »die annähernde Übereinstimmung zweier Elementarerlebnisse in bezug auf irgendein Bestimmungsstück zweier Bestandteile« angibt, nennt er Teilähnlichkeit. (Carnap 1928a, 109) Hier gibt es ebenfalls einen Bezug zu Hilbert: Die Ähnlichkeitserinnerung läßt sich mit Hilberts Relationen »liegt auf«, »zwischen« usw. in den »Grundlagen der Geometrie« vergleichen. (Kambartel 1968, 180)

Um nun aus den Grundbegriffen und Grundrelationen andere Begriffe abzuleiten, werden Definitionen benötigt. Denn:

Ist ein Gegenstand a auf die Gegenstände b, c zurückführbar, so sind [...] die Aussagen über a umformbar in Aussagen über b und c . » a auf b, c zurückführen« oder » a aus b, c konstituieren« soll bedeuten: eine allgemeine Regel aufstellen, die angibt, in welcher Weise man in jedem einzelnen Falle eine Aussage über a umformen muß, um eine Aussage über b, c zu erhalten. Diese Übersetzungsregel nennen wir »Konstitutionsregel« oder »konstitutionale Definition« [...]. (Carnap 1928a, 2)

Carnap unterscheidet zwei Arten von Definitionen: die explizite Definition und die Gebrauchsdefinition.

Ein Beispiel für eine explizite Definition: Anstelle des neuen Gegenstandszeichens kann ein aus schon bekannten Zeichen zusammengesetztes Zeichen benutzt werden.

Sind die Zahl 1 und die Operation $+$ bekannt, so können die weiteren Zahlen explizit definiert werden:

$$2 =_{\text{Df}} 1 + 1,$$

$$3 =_{\text{Df}} 2 + 1 \text{ usw.}$$

($\hat{=}_{\text{Df}}$ ist zu lesen als »soll kraft Definition bedeuten« oder »soll stets

ersetzt werden dürfen durch).

(Carnap 1928a, 52)

Die Gebrauchsdefinition erklärt nicht das neue Zeichen selbst, sondern seinen Gebrauch in ganzen Sätzen. Es handelt sich um eine kontextabhängige Definition:

» x ist eine Primzahl $\llcorner =_{\text{Df}}$ » x ist eine natürliche Zahl; x hat nur 1 und x als Teiler.« (Carnap 1928a, 53)

Ein typisches Beispiel für Gebrauchsdefinitionen sind die semantischen Definitionen der logischen Verknüpfungszeichen durch Wahrheitstafeln. Denn erst mit und innerhalb der Aufstellung der Wahrheitstafeln erhalten die logischen Ausdrücke ihre Bedeutung. (Wittgenstein TLP 5.101; Stegmüller 1978a, 371f.)

Für das Erreichen einer neuen Konstitutionsstufe ist die Gebrauchsdefinition wichtig, weil mit ihr eine neue Klasse oder Relation, je nach Anzahl der Argumentstellen, definiert wird. Unter einer Klasse wird die Extension einer Aussagefunktion mit einer Argumentstelle, das heißt mit einer Eigenschaft, verstanden. Eine Relation dagegen bezeichnet die Extension einer Aussagefunktion mit mehreren Argumentstellen, das heißt Beziehungen zwischen Elementen. (Carnap 1928a, 42ff.) Carnaps Argumentation stützt sich auf die »Extensionalitätsthese«, die besagt, daß jede Aussage über einen Begriff durch seine Extension, das heißt, durch seine Klasse oder Relation, dargestellt werden kann.

Eine Aussage heißt »extensional«, wenn sie in eine Extensionsaussage (Klassen- oder Relationsaussage) umgeformt werden kann; andernfalls »intensional«. Notwendige und hinreichende Bedingung dafür, daß eine Aussage über eine Aussagefunktion f extensional ist, ist die, daß in der Aussage unbeschadet ihres Wahrheitswertes an Stelle von f eine beliebige andere, mit f umfangsgleiche Aussagefunktion eingesetzt werden kann. Die Extensionalitätsthese besagt, daß alle Aussagen über irgendeine Aussagefunktion extensional sind, daß es also keine intensionalen Aussagen gibt. (Carnap 1928a, 59)

Die extensionale Methode läßt sich mit Hilfe der Unterscheidung in drei verschiedene Arten, in denen Zeichen, aber auch Sätze (Aussagen) und Aussagefunktionen verwendet werden können, rechtfertigen: Nimmt man

die drei Aussagefunktionen »1) x ist ein Mensch, 2) x homo est, 3) x ist ein vernünftiges Tier«, so sind drei Aspekte zu unterscheiden:

In eine *Zeichenaussage* über die erste [Aussagefunktion, B.C.], z.B. » x ist ein Mensch« besteht aus 13 Buchstaben« kann weder die zweite noch die dritte eingesetzt werden. »Ich glaube, es gibt Dinge, die $<x$ ist ein Mensch $>$ befriedigen« ist eine *Sinnaussage*; hier darf die zweite, aber nicht die dritte Aussagefunktion eingesetzt werden, da mein Denken und Glauben sich nicht notwendig auch mit dem Begriff des vernünftigen Tieres beschäftigt haben muß. » $[x$ ist ein Mensch] impliziert generell: x ist sterblich« ist eine *Bedeutungsaussage*; hier kann sowohl die zweite, wie die dritte, wie auch irgendeine beliebige andere, umfangsgleiche Aussagefunktion eingesetzt werden. (Carnap 1928a, 62, Hervorhebungen im Original)

Folgendes läßt sich daraus entnehmen: Nur die Bedeutungsaussage bezieht sich auf die Aussagefunktion » x ist ein Mensch«. Sie ist eine extensionale Aussage. Die Sinnaussage dagegen ist eine intensionale Aussage über die Aussagefunktion; sie betrifft die Aussagefunktion als Inhalt eines Gedankens oder einer Vorstellung. Und die Zeichenaussage bezieht sich allein auf die Zeichen, also die Buchstabengruppe. Den Bedenken gegen die Extensionalitätsthese, die besagen, daß nicht alle intensionalen Aussagen in extensionale Aussagen überführbar seien, wurde von Wittgenstein bereits widersprochen:

Der formale Begriff ist mit einem Gegenstand, der unter ihn fällt, bereits gegeben. Man kann also nicht Gegenstände eines formalen Begriffs *und* den formalen Begriff selbst als Grundbegriffe einführen. Man kann also z.B. nicht den Begriff der Funktion, und auch spezielle Funktionen (wie Russell) als Grundbegriffe einführen; oder den Begriff der Zahl und bestimmte Zahlen. (Wittgenstein TLP 4.12721)

Mit dem Klassenkalkül faßt Carnap die generellen Bestandteile des Systems, das sind die Qualitäten der Elementarerlebnisse, zu »Qualitätsklassen« zusammen. (Carnap 1928a, 113f.) Zwischen den Qualitätsklassen lassen sich Ähnlichkeiten feststellen. Mit der Relation »Ähnlichkeit« werden die Qualitäten dann in »Sinnesklassen« eingeteilt, das sind Klassen, die von Qualitäten eines und desselben Sinnesgebietes gebildet werden. (Carnap 1928a, 120)

Als »Sinnesklassen« werden sich nicht nur die Klassen der Gesichtsqualitäten, Gehörqualitäten, Wärmequalitäten usw. ergeben, sondern gemäß dem Sinne der Grundbeziehung Er und dem [...] über die Gefühle Gesagten auch diese. [...] Es liegt also keine Art psychischer Vorgänge außerhalb des Rahmens der konstituierbaren Gebilde. (Carnap 1928a, 120f.)

Aus den Qualitätsklassen lassen sich dann die individuellen Bestandteile oder die Empfindungen der Elementarerlebnisse konstituieren. Die Empfindungen werden als ein geordnetes Paar, bestehend aus einem Elementarerlebnis und einer zugehörigen Qualitätsklasse, definiert.

Diese Vorgehensweise folgt aus der Auffassung, daß die Einzelbestandteile eines Erlebnisses nicht in dem Einzelerlebnis auftreten, sondern erst durch Abstraktion gewonnen werden. Diese Abstraktion geschieht durch Eingliederung des Erlebnisses in Ordnungen, die andere Erlebnisse mit umfassen. Erst durch diese Ordnung der Erlebnisse, die Abstraktion, ergeben sich die Bestandteile der einzelnen Erlebnisse. (Carnap 1928a, 130) Carnaps Vorgehen ist demnach dreistufig: aus den Elementarerlebnissen werden die Qualitäten und aus den Qualitäten werden die Empfindungen abgeleitet.

Diese Position unterscheidet sich von empiristischen Standpunkten, wie sie später und bis heute vertreten werden, dadurch, daß hier ein qualitativer Begriff von Erlebnis angenommen wird und nicht eine Sammlung von isolierten Daten, die abzuzählen sind. Der qualitative Begriff ist bei Wittgenstein das »Bild«, das wir uns von der Wirklichkeit machen. Große Teile des heutigen Empirismus verwerfen Carnaps Anfangspunkt, das »Gegebene«. Dieser Begriff gilt als »leer«. Es entfällt zugleich der Bezug auf eine Theorie der Wahrnehmung, die wie die Gestaltpsychologie eine entsprechend Prägnanzregeln strukturierte Bildwahrnehmung erklärt. (Vgl. Metzger 1936) An diese Stelle treten isolierte, schon immer theoretisch aufgeladene Daten.

Auf der Grundlage der bisher aufgeführten Konstitution der »eigenpsychischen Gegenstände« wird dann die nächste Konstitutionsstufe aufgestellt: die Wahrnehmungswelt.

Um die Dinge der Wirklichkeit, der Außenwelt zu konstituieren, ist der Übergang von der zweidimensionalen Ordnung, dem *Sehfeld*, das bisher betrachtet wurde, zur dreidimensionalen, räumlichen Ordnung, dem *Sebraum*, notwendig und wichtig. Hier sind Tast- und Muskelempfindungen von Bedeutung, die jedoch auf Gesichtsempfindungen zurückgeführt werden kön-

nen, so daß keine neue Grundrelation eingeführt werden muß. (Carnap 1928a, 131f.; vgl. Carnap 1924, 105ff.)

Durch Zuordnung von Qualitäten anderer Sinne zu den Sehdingen sind die ›Wahrnehmungsdinge‹ zu konstituieren [...] mit Hilfe der ›Wahrnehmungswelt‹ wird die ›physikalische Welt‹ konstituiert [...] In solcher Weise läßt sich das ganze Gebiet der physischen Gegenstände konstituieren. (Carnap 1928a, 132)

Aus der physikalischen Welt läßt sich dann im weiteren die Welt des fremden Bewußtseins konstituieren.

Ein wichtiger Schritt im Konstitutionssystem ist der Übergang vom Eigenpsychischen zur intersubjektiven, objektiven Welt, die für Carnap das eigentliche Gegenstandsgebiet der Wissenschaft bildet. (Carnap 1928a, 200) Bei der intersubjektiven Welt handelt es sich um eine Welt, »die begrifflich erfaßbar ist und zwar als eine identische für alle Subjekte.« (Carnap 1928a, 3)

Die hier angesprochene Identität ist in der intersubjektiven Zuordnung begründet. Diese Zuordnung besagt nichts anderes, als daß zwischen der Welt des anderen und der eigenen Welt eine gewisse Analogie vorhanden ist. Die Analogie besteht darin, daß beide Konstitutionssysteme analoge Definitionsformen besitzen und daß die Aussagen über die Gegenstände sich entsprechen. (Carnap 1928a, 194) Die Intersubjektivität im Sinne der Gültigkeit des Urteils auch für die anderen Subjekte ist für Carnap eine der Forderungen an die Objektivität der Erkenntnis; die Gebundenheit des Urteils (im Gegensatz zur Willkür) ist die zweite. (Carnap 1928a, 90) Aus der Sicht des fremden Bewußtseins, das heißt aus der intersubjektiven Welt läßt sich die Welt der geistigen oder kulturellen Gegenstände und aus diesen wiederum läßt sich die empirische Wirklichkeit konstituieren. (Carnap 1928a, 200ff.)

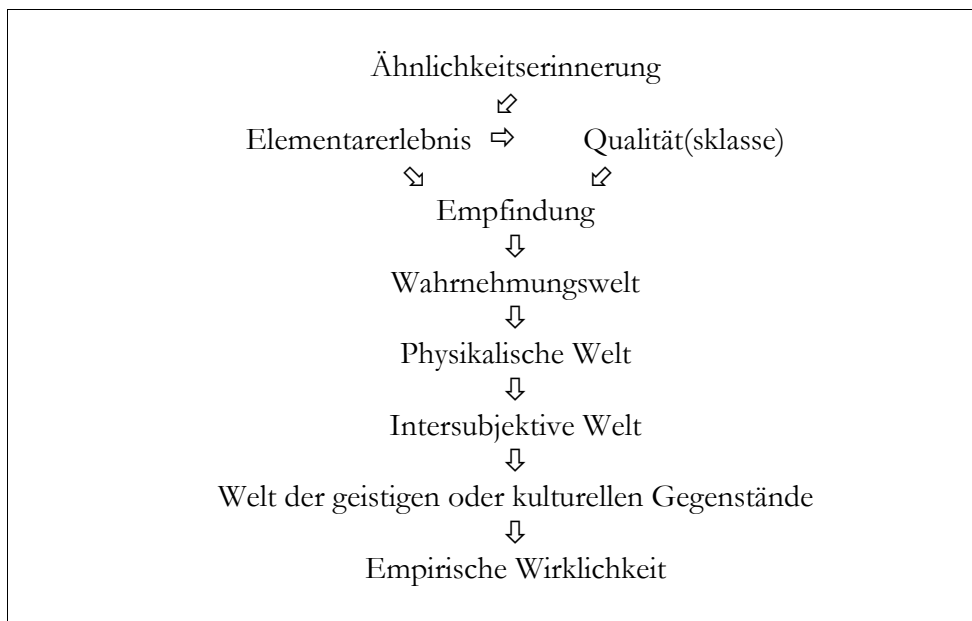


Abbildung 11. Konstitutionssystem

Ein Problem des Konstitutionssystems mit eigenpsychischer Basis besteht darin, daß der Vergleich zweier Empfindungen verschiedener Subjekte »im Sinne ihrer unmittelbaren Gegebenheitsqualität widersinnig ist« (Carnap 1928a, 90f.). Carnap zufolge stimmen jedoch gewisse Struktureigenschaften für die Erlebnisse überein. Wissenschaft hat sich auf Aussagen über solche Struktureigenschaften zu beschränken. Ein Konstitutionssystem liefert keine inhaltlich neuen Erkenntnisse, sondern »nur« eine einheitliche Ordnung der Begriffe. Diese Ordnung soll es ermöglichen, philosophische Fragen genauer zu fassen und Probleme so einer Lösung näher zu bringen.

An dieser Stelle sei noch einmal auf Ähnlichkeiten zwischen Überlegungen Hilberts und Carnaps hingewiesen. Zwischen der Struktur des Gegebenen bei Carnap und den Systemen Hilberts besteht eine Analogie, die besagt, daß die Struktur und die Systeme scheinbar einen voraussetzungslosen Anfang für Definitionen und Beweise liefern. Andererseits besteht aber folgende Differenz: Ein formales Axiomensystem gibt die Form eines Systems von allgemeinen Sätzen und Existenzbehauptungen an. Bei Carnaps Gegebenem müssen solche Aussagen erst herausgelesen, das heißt empirisch gewonnen werden. Der Grund dafür liegt in der eigenpsychischen Basis des Systems. Diese wird durch die intersubjektive Begriffsbildung »subjektlos«. Die eigenpsychische Basis enthält demnach gemeinsame, allgemein beschreibbare Eigenschaften. (Vgl. Kambartel 1968, 183f.)

Zusammengefaßt gehören zu einem Konstitutionssystem folgende Elemente und Annahmen:

- Jede wissenschaftliche Aussage soll mit Hilfe der logischen Analyse auf das unmittelbar Gegebene zurückführbar sein, so daß Begriffe und Aussagen in einen systematischen Zusammenhang gebracht werden können. Ein solches Rückführungssystem für wissenschaftliche Aussagen wird Konstitutionssystem genannt.
- Die wissenschaftlichen Begriffe in einem Konstitutionssystem unterscheiden sich von den Alltagsvorstellungen dadurch, daß sie schärfer und präziser sind. Um die Begriffe zu präzisieren, wird eine genaue Definition benötigt, die angibt, ob ein Gegenstand darunterfällt oder nicht. Ein wissenschaftlicher Begriff ist demnach ein eindeutiges Zeichen einer Gegenstandsart.
- Wissenschaftliche Urteile sind – analog zu den Begriffen – eindeutige Zeichen für Tatsachen, wobei Tatsachen das Bestehen von Beziehungen zwischen den Gegenständen bezeichnen.
- Der Wahrheitsbegriff bezeichnet ebenfalls eine Zuordnung. Urteile sind genau dann wahr, wenn sie Tatsachen eindeutig zugeordnet sind; ansonsten sind sie falsch.

Zu den kognitiven Paradigmen, die in Carnaps Konstitutionssystem eine Rolle spielen, gehören eine »Ordnungsvorstellung« und ein »Ökonomieprinzip«.

Die »Ordnung«, und zwar im Sinne des Konstitutionssystems, ist hier hervorzuheben, da diese Ordnungsvorstellung in der Informatik aufgenommen wurde. Zum einen läßt sich eine Analogie zwischen den Konstitutionsstufen und der Zerlegung von Funktionen herstellen. Beides sind hierarchische Strukturen. Zum anderen liefert Carnap ein Beispiel für die Anwendung der Relationenlogik, auf das hier ausführlicher eingegangen wird, da es eng mit der Datenmodellierung zusammenhängt.

Es geht um die »Aufstellung des logischen Skeletts vorgelegter Sätze« (Carnap 1929, 91ff.). Das logische Skelett oder die logische Aufbauform eines Satzes könnte hergestellt werden, indem jeder nichtlogische Begriff durch eine Variable ersetzt wird. »[...] so ergäbe z.B. der Satz »ich sehe dich«, in logistischer Sprache: **»a Sehen b«**, die Form: xRy .« (Carnap 1929, 92, Hervorhebungen im Original) Carnap schlägt allerdings vor, keine Variablen zu verwenden, sondern die Begriffe in Klammern verschiedener Art zu setzen, so daß die ursprüngliche Aussage leichter lesbar bleibt. Er entwickelt einige Konventionen zur Darstellung: Klassenausdrücke werden durch $< \]$,

Ausdrücke zweistelliger Relationen durch < >, Ausdrücke mehrstelliger Relationen durch [> dargestellt. Klassen werden durch Substantive, Relationen durch Verben (im Infinitiv) oder ein Relationssubstantiv oder einen Komparativ bezeichnet. Bei mehrstelligen Relationen werden die Argumentstellen durch darüberstehende Wörter gekennzeichnet. Hier einige Beispiele:

»a ∈ <rot]>, »Sokrates ∈ <Griechen]>, »ich <sehen> du, »Odysseus <Vater> Telemachos,

Zeit: von: nach:

[reisen> (ich, gestern, Berlin, Wien).

(Carnap 1929, 92)

Vor allem das letzte Beispiel ist als – nicht mehr reflektiertes – Paradigma im Sinne eines Musterbeispiels für die Datenmodellierung interpretierbar. Wie in Kapitel 2 vorgestellt, nimmt die Datenmodellierung Aussagen und bildet daraus Relationen. Das Beispiel der Relation »reisen« würde im Datenmodell folgendermaßen dargestellt:

Objekttyp	Reise
mit:	
Eigenschaftstypen:	Person
	Zeit
	Abreiseort
	Ankunftsort

Tabelle 16. Relation »reisen«

Die neuen Begriffe sind hier gewählt, um anzudeuten, daß in der Datenmodellierung nur Substantive zur Bezeichnung von Objekt- und Eigenschaftstypen verwendet werden.

In einer Datenbank würde folgende Tabelle mit Werten für die Elemente erzeugt:

Reise			
<u>Person</u>	<u>Zeit</u>	<u>Abreiseort</u>	<u>Ankunftsort</u>
Ich	gestern	Berlin	Wien
Du	morgen	Wien	Prag
usw.			

Tabelle 17. Relation »reisen« mit Ausprägungen

Diese Tabelle gilt in dieser Form nur für heute, denn morgen sind die Zeitangaben wahrscheinlich nicht mehr korrekt, und sie gilt nur, sofern klar ist, wer »ich« und »du« sind. In der Datenmodellierung würden andere Bezeichnungen für die Personen und die Zeitangaben verwendet, zum Beispiel der Name oder die Personalnummer der Person und ein Datum, gegebenenfalls ergänzt um die Uhrzeit. Der Grad der Genauigkeit hängt wiederum vom Zweck des Modells ab. In diesem Modell ist jedenfalls noch erkennbar, daß es eine »Momentaufnahme« ist, da »gestern« und »morgen« nur heute Sinn machen. Auch ist hier noch der Modellierer – der »Verwender« in Stachowiaks Modellverständnis – enthalten, nämlich »ich«.

Carnaps Übergang von einer umgangssprachlichen Beschreibung »Ich reiste gestern von Berlin nach Wien« in eine formale Form »[reisen> (ich, gestern, Berlin, Wien)« entspricht in der Informatik dem Übergang zu einer formalen Sprache.

Neben dem Prinzip der »Ordnung« enthält das Konstitutionssystem das »Ökonomieprinzip«, das auf mehreren Ebenen zum Ausdruck kommt. Auf der Ebene der Elemente des Konstitutionssystems wendet Carnap das »Minimumprinzip« an und versucht, mit einer Grundrelation, der »Ähnlichkeitserinnerung«, auszukommen. Auf der Ebene der Konstitutionsregeln lautet die Frage, ob sich die allgemeinen Konstitutionsregeln vielleicht aus einem obersten Prinzip herleiten ließen. Diese Frage könne jedoch an dieser Stelle nicht beantwortet werden und »die Existenz eines solchen obersten Prinzips kann nicht mit Sicherheit behauptet werden.« (Carnap 1928a, 145) Und weiter heißt es dann:

Der Weg zur Bestimmung des Prinzips der Konstitution ist in gewisser Hinsicht analog dem der Bestimmung einer einzigen Weltformel für das physikalische Geschehen. In beiden Fällen ist zunächst induktiv von der Erfahrung auszugehen. [...] Und wie in der Physik aus der Weltformel, wenn sie schon bekannt wäre, die einzelnen Naturgeset-

ze ohne Bezug auf die Erfahrung deduktiv abgeleitet werden könnten, so würde auch die Deduktion aller allgemeinen Konstitutionsregeln aus dem ersten Prinzip der Konstitution ohne Bezug auf die Erfahrung [...] möglich sein. (Carnap 1928a, 145f.)

Das Ökonomieprinzip tritt auch in folgendem Gedanken auf: »Die verschiedenen Systeme der Physik«, die sich je nach Auswahl der für die Konstitution gewählten Zustandsgrößen ergeben, »stehen, an der Empirie gemessen, gleichberechtigt nebeneinander; es wird aber wahrscheinlich einmal eine eindeutige Entscheidung getroffen werden (zwar unter Berücksichtigung der Empirie, aber geleitet durch methodologische Grundsätze, z.B. den der Einfachtheit).« (Carnap 1928a, 181) Schon 1923 hatte sich Carnap in dem Aufsatz »Über die Aufgabe der Physik und die Anwendung des Grundsatzes der Einfachtheit« wie folgt geäußert:

Die Hauptthese des von Poincaré aufgestellten und von Dingler weitergeführten Konventionalismus besagt, daß zum Aufbau der Physik Festsetzungen getroffen werden müssen, die unserer freien Wahl unterliegen. Daraus folgt, daß diejenigen Inhaltsbestandteile der physikalischen Sätze, die aus diesen Festsetzungen hervorgehen, durch die Erfahrung weder bestätigt noch widerlegt werden können. Die Wahl dieser Festsetzungen soll aber nicht etwa willkürlich geschehen, sondern nach bestimmten methodischen Grundsätzen, wobei letzten Endes der Grundsatz der Einfachtheit die Entscheidung zu treffen hat. (Carnap 1923, 90)

Ein System von wahren Sätzen liefert noch keine Erkenntnis. Wahrheit ist notwendig, aber nicht ausreichend. Denn: »Hätte man sämtliche Tatbestände der Welt in ihrer unendlichen Vielfalt eindeutig durch Symbole bezeichnet, so hätte man ein wahres System von Sätzen gewonnen, aber keine Erkenntnis. Es läge vielmehr eine bloße symbolische Wiederholung der Welt vor. Damit es zu einer Erkenntnis kommt, muß die weitere Bedingung erfüllt sein, daß ein Minimum an Begriffen verwendet wird.« (Stegmüller 1978a, 366) Ein Minimum an Begriffen soll eine eindeutige Bezeichnung aller Tatbestände der Welt gewährleisten; Erkenntnis ist somit ein auf Orientierung gerichtetes Unternehmen.¹⁷²

Das Ökonomieprinzip ist in vielen Wissenschaften als ein methodisch-theoretischer Ansatz zu finden. Wenn es angewandt wird, ist damit eine

¹⁷² Vergleiche die Fußnote zu »Modellen im Maßstab 1:1« in Kapitel 2.

Ordnungsannahme oder Ordnungserwartung verbunden. Mit dieser Erwartung ist jedoch keine bestimmte vor- oder übergeordnete Theorie verknüpft, weil die Erwartung, es gebe Gesetzmäßigkeiten, die es ermöglichen, die Mannigfaltigkeit der Welt auf einfache Erklärungen zu bringen, selbst nicht als eigenes Gesetz verstanden werden kann. Die Erwartung, daß Gesetzmäßigkeiten vorhanden sind, besagt nicht, welchen Inhalt und welche Form diese haben. Ob etwas als ökonomisch angesehen wird, hängt von mehreren Faktoren ab: vom theoretischen Kontext, von den empirischen Bedingungen, vom Erkenntnisinteresse und von der Möglichkeit, ein Maß anzugeben, auf das die Ökonomieaussagen bezogen werden können. (Vgl. Rosen 1967, 196ff.; Albert 1972)¹⁷³

Carnaps Konstitutionssystem kann schließlich als ein Kalkül aufgefaßt werden. Dieser besteht aus Elementen, wie den Elementarerlebnissen und den Qualitätsklassen, aus Beziehungen zwischen den Elementen, wie der Basisrelation »Ähnlichkeitserinnerung«, und aus Regeln, wie den Konstitutionsregeln, mit denen Begriffe auf Grundbegriffe zurückgeführt oder aus Grundbegriffen abgeleitet werden. In Carnaps »Abriss der Logistik« aus dem Jahr 1929 heißt es:

Das Ergebnis einer logizistischen Bearbeitung eines Gebietes ist zunächst eine Analyse der vorkommenden Begriffe und Aussagen und dann eine Synthese in zwei Formen: die Begriffe des Gebietes werden aus geeignet zu wählenden Grundbegriffen schrittweise definiert und dadurch in einen Stammbaum der Begriffe (Konstitutionssystem) geordnet; die Aussagen des Gebietes werden aus geeignet zu wählenden Grundaussagen (Axiomen) schrittweise deduziert und dadurch in einen Stammbaum der Aussagen (Deduktionssystem) geordnet. (Carnap 1929, III)

Der Bezug von Carnaps »Wirklichkeitsanalyse mit Hilfe der Relationstheorie« zu Leibniz' Überlegungen zur Analyse und Synthese von Begriffen sowie zur »characteristica universalis« und »scientia generalis« ist hier deutlich erkennbar und wird auch von Carnap selbst reflektiert, wie oben bereits angeführt. Carnaps Vorgehen kann als Versuch interpretiert werden, das Leibnizprogramm der »Analysis und Synthesis«¹⁷⁴ auszuarbeiten und umzusetzen.

¹⁷³ Auf das Ökonomieprinzip wird auch in Kapitel 5 eingegangen.

¹⁷⁴ Vgl. Kapitel 5.

4.1.3 Die Einheitswissenschaft

Trotz der Vielfalt möglicher Konstitutionssysteme enthält Carnaps Konzept das Paradigma der »Einheitswissenschaft«. Dieses Paradigma soll im folgenden betrachtet werden.

Als praktisches Programm für den Aufbau der Einzelwissenschaften forderten die Mitglieder des Wiener Kreises, es solle über die methodologische Vereinheitlichung der Wissenschaften eine »Einheitswissenschaft« entstehen. Der Gedanke der Einheitswissenschaft richtete sich nicht gegen eine Einteilung der Wissenschaften zum Zwecke der Arbeitsteilung, sondern gegen jedweden methodischen Wissenschaftspluralismus (Vgl. Carnap 1931b, 465) Zu den mit dem Programm der »Einheitswissenschaft« angestrebten Zielen gehörte, die eine Wissenschaft so zu entwickeln, daß sie alle wissenschaftlichen Gesetze umfaßt. Gesetze werden hier nicht als Aussagen verstanden, sondern als »Anweisungen darüber, wie man von Beobachtungsaussagen zu *Vorausagen* gelangt«. (Neurath 1931, 398, Hervorhebung im Original) Vorhersage sei das praktische Ziel von Erkenntnis. Als definierende Eigenschaften von Erkenntnis werden dementsprechend nur diejenigen angesehen, die eine Vorhersage möglich machen. Vorhersage bedeutet, sich vor dem Eintritt von Ereignissen einen Überblick zu verschaffen. Dies geschieht nicht durch die Ordnung wirklicher Elemente – das wäre ausprobieren –, sondern durch die Kombination von Symbolen. Diese Symbole oder Zeichen können geistige Bilder oder geschriebene Zeichen, wie Zahlen, Figuren, Modelle, sein.¹⁷⁵ (Vgl. Schlick 1938, 148) Dies korrespondiert mit Carnaps Erläuterung:

So führt die logische Analyse mit den Mitteln der neuen Logik zur

¹⁷⁵ Stephen Toulmin hat 1961 in »Foresight and Understanding« die prognostizistische These als ein entscheidendes Kriterium für die Beurteilung des Leistungsvermögens bestimmter wissenschaftlicher Theorien oder Wissenschaften als nicht haltbar erwiesen. Er kann zum einen zeigen, daß es Theorien und Disziplinen gibt, die überhaupt keine Vorhersagen beabsichtigen und ermöglichen, und er kommt zum anderen hinsichtlich des Wertes von Vorhersagen zu dem Schluß: »Das Vorhersagen ist also ein Handwerk oder eine Technologie; es gehört zu den Anwendungen der Wissenschaft und macht nicht ihren Kern aus. Wenn eine Vorhersagetechnik Erfolg hat, ist das eine Tatsache mehr, die die Wissenschaftler erklären müssen, und die sie vielleicht auch erklären können. Eine neue und erfolgreiche wissenschaftliche Theorie führt unter Umständen zu keiner Verbesserung unserer Vorhersagetechniken, während andererseits erfolgreiche Vorhersagetechniken vielleicht jahrhundertlang ohne wissenschaftliches Fundament bleiben. Im ersten Falle braucht die Theorie darum nicht schlechter zu sein, im zweiten wird die Vorhersagetechnik nicht schon dadurch wissenschaftlich, daß sie funktioniert.« (Toulmin 1961, 45) Toulmins Kritik trifft auf die entsprechenden Teile des Programms der »Einheitswissenschaft« voll und ganz zu.

Einheitswissenschaft. Es gibt nicht verschiedene Wissenschaften mit grundsätzlich verschiedenen Methoden oder gar verschiedenen Erkenntnisquellen, sondern nur die eine Wissenschaft. In ihr finden alle Erkenntnisse ihren Platz, und zwar als Erkenntnisse grundsätzlich gleicher Art; ihre scheinbare Verschiedenheit wird nur durch die Verschiedenheit der Teilsprachen vorgetäuscht, in denen man sie auszudrücken pflegt. (Carnap 1930/31b, 24f., Hervorhebung im Original)

Die Verquickung von Empirie und Logik sollte es möglich machen, für jede Aussage zu entscheiden, ob sie sinnvoll und entweder wahr oder falsch wäre, oder ob sie ein sinnloser Satz über ein Scheinproblem sei. Die neue Methode beanspruchte Exklusivität, da in ihr ein in sich geschlossener Einheitsgedanke formuliert wurde und da an ihr gemessen andere Methoden entweder nicht den Erfordernissen der logischen Analyse genügten oder umgekehrt die Fundierung in der Erfahrung fehlte. Erinnert sei daran, daß die kantische Konzeption der synthetischen Urteile apriori angesichts der Entwicklungen in Logik und Mathematik nicht mehr haltbar schien (vgl. Neurath 1930/31, 313) und daß die empiristische Begründung der Mathematik von Frege destruiert worden war.

Die erkenntnistheoretische Grundannahme, daß Erkenntnis nur durch Erfahrung gewonnen werden könne, sahen die Mitglieder des Wiener Kreises einzelwissenschaftlich am besten durch die Physik mit ihrer systematischen Überprüfung der Theoreme an der Erfahrung eingelöst: Die Physik wurde so zum methodischen Paradigma für den Umgang mit Empirie. Als Bezeichnung für die geforderte Methode wurde dementsprechend der Neologismus »Physikalismus« eingeführt.

Methodisch begründeter Physikalismus verbindet sich nun mit der Forderung nach einer *Einheitsprache*, die dazu taugt, die Täuschungen auszuräumen. An eine solche Sprache wurden einige Bedingungen geknüpft. Sie sollte sowohl intersubjektiv als auch universal sein. Intersubjektiv heißt, sie sollte jedermann zugänglich sein und ihre Zeichen sollten für alle dieselben Bedeutungen haben. Universal heißt, sie sollte die Möglichkeit besitzen, jeden beliebigen Sachverhalt auszudrücken. Unter den Logischen Empiristen bestand zwar Einigkeit darüber, daß die elementaren Erfahrungen die Basis der Wissenschaften bilden, wie diese Erfahrungen jedoch sprachlich formulierbar sein sollten und in welcher Sprache dies erfolgen sollte, wurde kontrovers behandelt.

Carnap und Neurath schlugen die Sprache der Physik mit der Begründung vor, sie erfülle diese Forderungen gut, weil sie eine rein quantitative Sprache sei. In dieser »physikalischen« Sprache seien »Protokollsätze« zu formulieren, die zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten objektive Bezeichnungen des Protokollierenden und objektive Angaben der Zeit und des Ortes enthalten sollen. Ein Protokollsatz hat die Form: »die Person N.N. hat zur Zeit t am Ort x das und das wahrgenommen«. (Vgl. Stegmüller 1978a, 447) Neurath liefert das Beispiel und die zulässige Umformung eines Protokollsatzes:

Die Einheitswissenschaft besteht, wenn wir von den Tautologien absehen, aus *Realsätzen*.

Diese zerfallen in:

- a) Protokollsätze,
- b) Nichtprotokollsätze.

Protokollsätze sind Realsätze von derselben Sprachform wie die anderen Realsätze, doch kommt in ihnen immer ein Personenname *in bestimmter Verknüpfung* mit anderen Termini mehrmals vor. Ein vollständiger Protokollsatz könnte z.B. lauten: »*Ottos Protokoll um 3 Uhr 17 Minuten: [Ottos Sprechdenken war um 3 Uhr 16 Minuten: (Im Zimmer war um 3 Uhr 15 Minuten ein von Otto wahrgenommener Tisch)]*« Dieser Realsatz ist so aufgebaut, daß nach »Auflösung der Klammern« weitere Realsätze entstehen, die aber keine Protokollsätze sind: »*Ottos Sprechdenken war um 3 Uhr 16 Minuten: (Im Zimmer war um 3 Uhr 15 Minuten ein von Otto wahrgenommener Tisch)*« und weiter: »*Im Zimmer war um 3 Uhr 15 Minuten ein von Otto wahrgenommener Tisch.*« (Neurath 1932/33, 207, Hervorhebungen im Original)

Zu diesem Beispiel gibt er sodann die folgenden Erläuterungen:

Für einen vollständigen Protokollsatz ist *wesentlich*, daß der Name einer Person darin vorkommt. [...] der Ausdruck innerhalb der letzten Klammer ist bei einem vollständigen Protokollsatz ein Satz, der nochmals einen Personennamen aufweist und einen Terminus aus dem Gebiet der *Wahrnehmungstermini*. [...]

Der Ausdruck nach der zweiten Klammer »Sprechdenken« empfiehlt sich, wie sich zeigt, wenn man verschiedene Gruppen von Sätzen bilden will, z. B. Sätze mit »Wirklichkeitstermini«, mit »Halluzinationstermini«, mit »Traumtermini«, und insbesondere wenn man überdies

die ›Unwahrheit‹ abtrennen will. Man könnte z. B. sagen: ›Otto hatte zwar das Sprechdenken: Im Zimmer war nur ein von Otto wahrgenommener Vogel, aber er schrieb, um sich einen Scherz zu machen, nieder: Im Zimmer war nur ein von Otto wahrgenommener Tisch.‹ (Neurath 1932/33, 208, Hervorhebungen im Original)

Um »die Unwahrheit abtrennen« zu können, hielt Neurath es für notwendig, daß sich jeder Satz bewähren müsse und daß man jeden Satz der Einheitswissenschaft, auch Protokollsätze, müsse ändern oder streichen können. Insofern wurde hier, auch in klarer Differenz zu Carnap, zum ersten Mal im Wiener Kreis ein Wissenschaftsverständnis zum Ausdruck gebracht, das Wissenschaft nicht für die Kumulation bestätigter Sätze in einem widerspruchsfreien System hielt, sondern innerhalb eines anzustrebenden widerspruchsfreien Systems jedes seiner Elemente für revidierbar hält:

Es gibt kein Mittel, um endgültig gesicherte saubere Protokollsätze zum Ausgangspunkt der Wissenschaften zu machen. Es gibt keine tabula rasa. Wie Schiffer sind wir, die ihr Schiff auf offener See umbauen müssen, ohne es jemals in einem Dock zerlegen und aus besten Bestandteilen neu errichten zu können. Nur die Metaphysik kann restlos verschwinden. Die unpräzisen ›Ballungen‹ sind immer irgendwie Bestandteil des Schiffes. Wird die Unpräzision an einer Stelle verringert, kann sie wohl gar an anderer Stelle verstärkt wieder auftreten. (Neurath 1932/33, 206, Hervorhebung im Original)

Gegen die Protokollsätze wurde Verschiedenes eingewandt: Zum einen wurde argumentiert, daß es keine Vorschriften zur Bildung solcher Sätze gibt. Da jede denkbare Protokollsatzmenge mit anderen gleichberechtigt ist, muß ein Kriterium gesucht werden, mit dem die »wirklichen Protokollsätze« ausgezeichnet werden können. Dies sind keine logischen, sondern zum Beispiel soziale, kulturabhängige Kriterien. Als »wirkliche Protokollsätze« werden die Aussagen oder Aufzeichnungen bezeichnet, die von »irgendwelchen Menschen, insbesondere von den Wissenschaftlern unseres Kulturkreises stammen« (Carnap 1932/33a, 180). Zum anderen erwies sich die Wahl der physikalischen Sprache gerade wegen ihrer vermeintlichen Stärke als nicht geeignet. Weil diese Sprache nur metrische Begriffe enthält, wurde es erforderlich, die physikalistische These abzuschwächen, um auch qualitative Begriffe verwenden zu können. Bestehen blieb jedoch die Forderung nach der Verknüpfung der Begriffe der Sprache mit den beobachtbaren Eigenschaften

ten von Dingen oder den beobachtbaren Relationen zwischen Dingen. Gegen die Auffassung Carnaps, daß Protokollsätze mit den obengenannten Spezifizierungen ihrer Bildung die Basis für Begründungen liefern könnten, wandte Wittgenstein grundsätzlich ein: »Wenn mich ein Blinder fragte: ›Hast du zwei Hände?‹, so würde ich mich nicht durch Hinschauen davon vergewissern. Ja, ich weiß nicht, warum ich meinen Augen trauen sollte, wenn ich überhaupt daran zweifelte. Ja, warum soll ich nicht meine *Augen* damit prüfen, daß ich schaue, ob ich beide Hände sehe? Was ist *wodurch* zu prüfen?! (Wer entscheidet darüber, *was* feststeht?) Und was bedeutet die Aussage, das und das stehe fest?« (Wittgenstein 1949-1951, 145f., Hervorhebungen im Original)

Anders als Carnap und Neurath schlägt Schlick vor, im Sinne des methodischen Positivismus, die »phänomenale Sprache« zu verwenden. Er hält daran fest, »Konstatierungen«, die auch als »Beobachtungssätze« bezeichnet werden, als Basis des Konstitutionssystems zu verwenden. Das Schema von Konstatierungen lautet: »hier jetzt so und so«. Konstatierungen repräsentieren Wahrgenommenes, sie gehören jedoch nicht zum Satzsystem der Wissenschaft, sondern bilden einerseits den Anlaß zur Formulierung von Hypothesen und bestätigen diese andererseits. Sie stehen demnach am Anfang und am Ende des Erkenntnisprozesses. Bei ihnen ist – wie bei analytischen Sätzen – der Vorgang des Verstehens zugleich der Vorgang der Verifikation. Für Schlick haben Konstatierungen immer hinweisenden Charakter. (Vgl. Schlick 1935a, 230ff.)

Die Wahl der physikalischen Sprache als Einheitssprache wurde also nicht als zwingend verstanden:

Daß die Welt gerade so ist wie sie ist, daß gerade die Tatsachen bestehen, welche uns die Erfahrung zeigt: das ist – in leicht verständlichem Sinne – zufällig, und es ist in demselben Sinne zufällig, daß die physikalische Sprache intersubjektive Universalsprache ist. (Auch einer der eifrigsten Exponenten des ›Physikalismus‹, Carnap, erklärt es als einen glücklichen Zufall.) Für uns folgt daraus zunächst, daß das Wort ›Physikalismus‹ keinesfalls eine ›philosophische Richtung‹ bezeichnet, und es ist uns eine Mahnung, den Tatbestand, den das Wort hervorheben soll, nicht anders zu werten und zu behandeln als irgendeinen anderen empirischen Tatbestand, nämlich als Paradigma, als einen möglichen Fall unter anderen. (Schlick 1935b, 247)

In der Interpretation Schlicks wird der Physikalismus als Paradigma im Sinne eines Musterbeispiels verstanden, nicht als metaphysische Grundannahme, als »philosophische Richtung«, wie er selbst es nennt. Schlick bezieht sich hier auf Carnaps Aufsatz »Die physikalische Sprache als Universalsprache der Wissenschaft« (1931b), in dem es heißt, daß außer der Sprache der Physik auch jede andere universale Sprache als geeignet angesehen würde. Es bleibt jedoch offen, welche Sprache die erforderliche Eigenschaft denn überhaupt habe.

Damit ist umrissen, wie zufolge des Logischen Empirismus ein Bild der Welt aufzubauen ist. Damit ist aber noch nicht klar, mit welcher Methode (wissenschaftliche) Aussagen als sinnvoll erkannt oder bewertet werden sollen. Der folgende Abschnitt behandelt die von den Logischen Empiristen vorgeschlagene Methode, die eine strikte Trennung von sinnvollen und sinnlosen Sätzen erlauben sollte.

4.1.4 Das Verifikationsprinzip und seine Kritik

Als Sinnkriterium für wissenschaftliche Aussagen galt den Logischen Empiristen das Verifikationsprinzip. Darunter wird verstanden, daß für einen Satz, der als sinnvoll angesehen werden soll, angebbare Bedingungen sein muß, unter welchen Bedingungen er wahr oder falsch ist.

Dieses Verständnis von Verifikation hängt eng mit Wittgensteins Position im »Tractatus logico-philosophicus« aus dem Jahr 1918 (Wittgenstein TLP) zusammen, in dem eine Abgrenzung von sinnvollen und sinnlosen Aussagen formuliert wird:

Das Bild bildet die Wirklichkeit ab, indem es eine Möglichkeit des Bestehens und Nichtbestehens von Sachverhalten darstellt. (TLP 2.201)

Das logische Bild der Tatsachen ist der Gedanke. (TLP 3)

Im Satz drückt sich der Gedanke sinnlich wahrnehmbar aus. (TLP 3.1)

Der Satz ist ein Bild der Wirklichkeit. (TLP 4.01)

Jeder sinnvolle Satz stellt demnach das Bestehen oder Nichtbestehen von Sachverhalten dar, er legt die Wirklichkeit auf Ja oder Nein, Wahr oder Falsch fest. Dabei muß das Bestehen oder Nichtbestehen nicht tatsächlich nachgewiesen werden. Wichtig ist, daß der Satz verstehbar sein muß, das

heißt, es muß klar sein, unter welchen Bedingungen ihm der Wahrheitswert »wahr« oder »falsch« zuzuordnen ist:

Einen Satz verstehen, heißt, wissen was der Fall ist, wenn er wahr ist.
(Man kann ihn also verstehen, ohne zu wissen, ob er wahr ist.) (TLP 4.024)

Hier wird schon deutlich, daß das Verifikationskriterium zu eng ist, denn gerade die universellen Sätze der empirischen Wissenschaften lassen sich nicht verifizieren, weil es nicht möglich ist, alle Fälle empirisch zu überprüfen. Das Kriterium wurde abgeschwächt, und es wurde als genügend erachtet, wenn die Verifikation logisch denkbar sei. Auch dann sei eine Aussage sinnvoll.

Es gab weitere Einwände gegen das Verifikationsprinzip, die schließlich zur Aufgabe dieses Kriteriums führten. Einige der Einwände seien genannt:

Hinsichtlich der Berufung auf Logik ist hier festzuhalten, daß der Anspruch des Logischen Empirismus, mit der Verifikation ein eindeutiges Kriterium zu erhalten, nicht einlösbar ist. Denn der Logizismus, auf den die Logischen Empiristen bauen, scheitert ja selbst. Das zeigt sich bereits mit Russells Ad-hoc-Hypothesen in der Typentheorie, die Aussagen darüber treffen, was ist: Mit seiner Einführung des Unendlichkeits- und des Auswahlaxioms, die nicht rein logischen Charakters sind, sondern Existenzsätze, verstieß er massiv gegen den grundsätzlichen Ansatz, daß die Logik ihren Gegenstand in der Untersuchung möglicher Formen habe.¹⁷⁶

Ferner, wenn die Wahrheit oder Falschheit einer Aussage, wie oben angegeben, nicht unbedingt konkret empirisch nachgewiesen werden muß, bedeutet das, daß das Aktual-Unendliche – wie schon bei Russell – zugelassen wird. Diese Position wurde bereits von den Intuitionisten und anderen konstruktiven Mathematikern kritisiert, weil das Aktual-Unendliche eine ontologische Annahme ist. Wenn es aber eine ontologische Annahme ist, dann ist es eine Wesenheit, die nach Auffassung der Logischen Empiristen überflüssig ist. An dieser Stelle trifft die Metaphysikkritik das eigene Programm der Logischen Empiristen.

Bedenken gegen das Verifikationsprinzip im strengen Sinne hatte auch Hans Reichenbach (1891-1953). Er hielt die Verifikation als Sinnkriterium für zu anspruchsvoll und forderte allenfalls die Überprüfbarkeit von Aussagen. (Vgl. Kamlah 1992, 75)

¹⁷⁶ Vgl. hierzu und zum folgenden den Abschnitt 4.2.

Popper wies nach, daß die Verifikation als Sinnkriterium zu eng ist. Die meisten naturwissenschaftlichen Erkenntnisse lassen sich nicht verifizieren. So sind die Naturgesetze prinzipiell nicht verifizierbar, da es sich um Allsätze handelt, die eine unendliche Anzahl von Einzelfällen umfassen. Empirisch überprüfbar sind aber immer nur endlich viele Einzelfälle: »[...] die Verifikation eines Naturgesetzes könnte ja nur dann erfolgen, wenn sämtliche unter das Gesetz fallende Einzelereignisse empirisch festgestellt und als in Einklang mit ihm stehend befunden werden – was natürlich nie durchführbar ist.« (Popper 1935, 35)¹⁷⁷ Auch ist die Rechtfertigung wissenschaftlicher Sätze durch Induktionsschlüsse nicht erfolgreich:

Als induktiven Schluß oder Induktionsschluß pflegt man einen Schluß von *besonderen Sätzen*, die z.B. Beobachtungen, Experimente usw. beschreiben, auf *allgemeine Sätze*, auf Hypothesen oder Theorien zu bezeichnen.

Nun ist es aber nichts weniger als selbstverständlich, daß wir logisch berechtigt sein sollen, von besonderen Sätzen, und seien es noch so viele, auf allgemeine Sätze zu schließen. Ein solcher Schluß kann sich ja immer als falsch erweisen: Bekanntlich berechtigen uns noch so viele Beobachtungen von weißen Schwänen nicht zu dem Satz, daß *alle* Schwäne weiß sind. (Popper 1935, 3, Hervorhebungen im Original)

Popper behält zwar die Auffassung der Logischen Empiristen bei, daß wissenschaftliche Sätze oder Systeme von Sätzen an der Erfahrung durch Beobachtung und Experiment überprüft werden müssen (vgl. Popper 1935, 3), er löst sich jedoch von Verifikation und Induktion. Er schlägt stattdessen vor, einer »Forschungslogik« im Sinne einer Methodenlehre zu folgen (vgl. Popper 1935, 22ff.), deren Anwendung die Rationalität von Wissenschaft sichern soll. In ihrem Mittelpunkt steht die Falsifikation. Während der Logische Empirismus die Vollentscheidbarkeit von Sätzen vertrat, formulierte Popper den bescheideneren Anspruch der Teilentscheidbarkeit.

Nun wollen wir aber doch nur ein solches System als empirisch anerkennen, das einer *Nachprüfung* durch die »Erfahrung« fähig ist. Diese Überlegung legt den Gedanken nahe, als Abgrenzungskriterium nicht

¹⁷⁷ Poppers Kritik am Induktionsschluß basiert auf Argumenten, die er zu einem guten Teil bei Hume gefunden hat, mit dem er sich in den verschiedenen Bearbeitungen und Erweiterungen von »Logik der Forschung« ab 1935 auseinandersetzte.

die Verifizierbarkeit, sondern die *Falsifizierbarkeit* des Systems vorzuschlagen. (Popper 1935, 15, Hervorhebungen im Original)

Nach Popper wird jede Theorie als Hypothese aufgefaßt, die niemals empirisch verifizierbar ist, wohl aber potentiell der Widerlegung zugänglich. (Vgl. Popper 1935, 8-14) Die Frage, was Wissenschaft sei, ist keine Wesensfrage mehr, sondern ausschließlich eine Kriterienfrage. Deshalb betont Popper, daß es sich bei der Falsifizierung um ein Abgrenzungskriterium handele, nicht um ein Sinnkriterium.

Popper hat auf den Unterschied von Abgrenzungs- und Sinnkriterium immer wieder hingewiesen. So zum Beispiel in einem Zusatz zu den späteren Auflagen von »Logik der Forschung«: »Die Falsifizierbarkeit unterscheidet zwei Arten von durchaus sinnvollen Sätzen voneinander: die falsifizierbaren und die nichtfalsifizierbaren. Die Falsifizierbarkeit zieht eine Trennungslinie innerhalb der sinnvollen Sprache, nicht um sie herum.« (Popper 1935, 15; vgl. Popper 1935, 253-258; Popper 1963) Die Ersetzung des empiristischen Sinnkriteriums, daß lediglich die Sätze sinnvoll seien, die – wenigstens im Prinzip – empirisch verifizierbar sind, die somit durch Erfahrung als wahr aufgewiesen werden können, durch das Abgrenzungskriterium der Falsifizierbarkeit führt dazu, daß wissenschaftliche Satzsysteme nicht durch Erfahrung begründet, geschweige denn bewiesen werden können. Sie können aber durch Erfahrung widerlegt werden.¹⁷⁸

Da ein Abgrenzungskriterium eine von wem auch immer aufgestellte und durchgesetzte Trennlinie ist, läßt sich nun keine objektive Grenze zwischen Wissenschaft und Nichtwissenschaft mehr ziehen, sondern es sind Gründe anzuführen, die das gewählte Kriterium rechtfertigen. Dies führt zu den von Popper selbst und im Anschluß an sein »fallibilistisches Wissenschaftsverständnis« immer wieder erörterten Fragen nach den Zwecken und Zielen von Wissenschaft, sowie nach dem Maßstab für Rationalität. (Vgl. Popper 1963)¹⁷⁹

Die für die Falsifikation wichtige Schlußweise ist der als Gegenstück zum »modus ponens« anzusehende »modus tollens« der klassischen Logik.

¹⁷⁸ Poppers Liberalität hinsichtlich der Herkunft von Sätzen bringt es allerdings mit sich, daß er wie Reichenbach zu einer strikten Trennung von Entdeckungs- und Rechtfertigungszusammenhang kommt und als Gegenstand von Wissenschaft nur den zweiten nimmt. Zu Risiken der damit einhergehenden Entkontextualisierung sei noch einmal auf die Beiträge in Bonß / Hohlfeld / Kollek (1993) hingewiesen.

¹⁷⁹ Von hier aus entwickelt sich auch der von Popper thematisierte Zusammenhang von kritisch-rationalem Verhalten und demokratischer Gesellschaft.

Mit ihm wird geschlossen, daß ein Satzsystem t dann falsch ist, wenn sich ein Folgesatz p als falsch erweist. Der falsifizierende Schluß lautet formal:

$$((t \rightarrow p) \wedge \neg p) \rightarrow \neg t$$

Das heißt: Wenn p aus t folgt und wenn p falsch ist, dann ist auch t falsch. Der modus tollens bietet also eine Möglichkeit, rein deduktiv von besonderen Sätzen auf die Falschheit allgemeiner Sätze zu schließen. (Vgl. Popper 1935, 16, 45) Folgerichtig wird Poppers Methode als »Hypothetico-Deduktivismus« bezeichnet.

Aber auch der Versuch, mit der Falsifizierbarkeit ein Kriterium für die Nachprüfbarkeit wissenschaftlicher Aussagen aufzustellen, ist unzureichend. Denn so wie ein Allsatz nicht verifizierbar ist, ist ein Es-gibt-Satz nicht falsifizierbar: »[...] wir können nicht die ganze Welt absuchen, um zu beweisen, daß es etwas nicht gibt.« (Popper 1935, 40) Weiterhin dürften auch keine – in den Naturwissenschaften nicht selten vorkommenden – Verknüpfungen von All- und Existenzaussagen zugelassen werden, denn diese sind weder verifizierbar noch falsifizierbar.

Beide Kriterien, das Sinnkriterium der Verifizierbarkeit und das Abgrenzungskriterium der Falsifizierbarkeit, sind also für die Überprüfung von empirischen Aussagen der vorhandenen Einzelwissenschaften, um die es ja nach der oben angeführten Schiffbaumetapher Neuraths bei aller methodischen Strenge nur gehen kann, ungenügend.

Weiterhin bleibt festzustellen, daß eine Trennung von Aussage und der Beurteilung, ob sie sinnvoll ist oder nicht, scheitert. Der Sinn einer Aussage ist, wie weithin akzeptiert wird, immer theorieabhängig. Es lassen sich keine empirischen Aussagen finden, die nicht schon durch den theoretischen Zusammenhang, in dem sie artikuliert werden, als sinnvoll oder sinnlos verstanden werden. Diese Position korrespondiert mit Auffassungen, die etwa zeitgleich mit dem Logischen Empirismus in der Wahrnehmungstheorie formuliert wurden. Die Gesetze des Sehens beispielsweise zeigen, daß nicht einzelne Daten wahrgenommen und dann interpretiert werden, sondern daß eine Gestalt, ein ganzes Bild wahrgenommen wird. (Vgl. Wertheimer 1925; Köhler 1925; Metzger 1936) Die Welt, wie sie wahrgenommen wird, besteht nicht per se aus Daten, sondern ist ein empirisch gegebener Zusammenhang. In diesem lebensweltlichen Zusammenhang handeln und sprechen wir offenkundig, bevor wir ihn nach methodischen Normen analysieren und aufbereiten und auch während wir dies tun. Zwar fußt Carnaps Konstitutionssystem noch in der Lebenswelt und wahrnehmungstheoretische Argumente wurden von ihm beim Aufbau genutzt, aber für die Verfahrenswei-

sen der Wissenschaft gewinnt er hieraus praktisch nichts. Seine Annahme der Verifizierbarkeit wissenschaftlicher Sätze auf der Grundlage gesicherter Verfahren ist die Annahme, mittels dieser Verfahren zu verbindlichen, weil intersubjektiv bestätigten Aussagen darüber zu kommen, wie die Welt wirklich ist. Verifizierte Sätze wären immer auch wahrheitsähnliche Sätze.

Das Bild der Welt, das die Logischen Empiristen mit ihren Verfahren entwarfen, enthält die Annahme wachsender Vollständigkeit. Es sollte einen immer größer werdenden sicheren Kern enthalten. So ist Neuraths Programm der Enzyklopädie zu verstehen, das er seit 1935 plante und das er mit der Herausgabe der ersten Hefes der »Encyclopedia of Unified Science« im Jahr 1938 umzusetzen begann.¹⁸⁰ Auch sichert dieses Bild der Welt den Zusammenhang von Theorien, weil verschiedene Theorien nur als unterschiedliche Beschreibungen ein und derselben Sache verstanden werden.

Laut Neurath bleiben nach Anwendung der logisch-empiristischen Wissenschaftsmethode »immer noch mehrere gleichverwendbare Satzgesamtheiten mit differierenden Protokollsätzen übrig, die in sich widerspruchsfrei sind, aber einander ausschließen. [...] Unter den miteinander konkurrierenden Satzsysteme wählen wir eins aus. Dies so ausgewählte Satzsystem ist aber *nicht logisch ausgezeichnet*. [...] Die Praxis des Lebens reduziert all die Vieldeutigkeit sehr rasch. [...] Man kann im allgemeinen die Verwendbarkeit verschiedener wissenschaftlicher Hypothesensysteme nur sehr unzulänglich ausprobieren; so wenig man etwa die Auswirkung verschiedener Eisenbahnsysteme auf unser Gesamtleben ausprobieren kann.« (Neurath 1934, 352f., Hervorhebung im Original) Die theoretisch mögliche Vielfalt reduziert sich also auf die praktisch verwendeten Systeme.

In dieser Position ist schon die auf Formalisierung beruhende Einbeziehung, Verarbeitung und Bearbeitung jedes Bereiches menschlicher Tätigkeit enthalten. Es geht nicht nur um Naturwissenschaften, sondern um Einheitswissenschaft im weitesten Verständnis. Die Methode wird als gegenstandsunabhängig gedacht.¹⁸¹

¹⁸⁰ Vergleiche aber das so ähnliche und doch ganz andere Projekt der Enzyklopädie Jean d'Alemberts (1717-1783) und Denis Diderots (1713-1784). Deren Enzyklopädie sollte den richtigen Gebrauch der Begriffe, das heißt den nicht durch Machtinteressen und Herrschaft verdrehten Gebrauch sicherstellen und überprüfbar machen. Neuraths Ziel war die Etablierung des »wissenschaftlichen Weltbildes«, während d'Alembert und Diderot den gesellschaftlichen Gebrauch von Wissen zur Diskussion stellten.

¹⁸¹ Diese Annahme des Logischen Empirismus im engeren und der Analytischen Philosophie im weiteren Sinn wird insbesondere in der Position Carl G. Hempels deutlich, der selbst die Geschichtswissenschaft einem deduktiv-nomologischen Erklärungsmodell unterwirft. (Vgl. Hempel 1942)

Allerdings hat Neurath hiermit zugleich eine Interpretation der Einheitswissenschaft kritisiert, die über das Methodische hinausgehend *ein* auch inhaltlich alternativloses System sieht. Die Vieldeutigkeit der »wirklichen Welt« reflektiert Neurath, indem er die Vieldeutigkeit und Unbestimmtheit in der Wissenschaft anerkennt.

Aus den uns zur Verfügung stehenden Daten kann man auf mehr als eine Weise Prognosen ableiten, die mit der Wissenschaft in Einklang stehen, und man kann die Multiplizität des Prognostizierens durch keine Methode ausschalten, mag man, so ausgiebig man will, systematisch vorgehen. Man kann sich sozusagen nicht auf eine »Maschine« einigen, die eindeutig »Induktionen« im weiteren Sinne produziert. Der Fortschritt der Wissenschaft besteht gewissermaßen darin, daß man ständig die Maschine ändert und auf Grund neuer Entschlüsse vorstößt. (Neurath 1935, 18, Hervorhebung im Original)

Einheitlichkeit ist für Neurath keine logische Konsequenz des Programms des Logischen Empirismus, sondern ein historisch-soziales Faktum. Allerdings habe die mit ihm verbundene »Einsicht, daß eine logisch vertretbare Multiplizität durch das Leben reduziert wird, [...] nicht viel Widerhall zu erhoffen, weil sie der üblichen Auffassung vom Zusammenhang zwischen Leistung und »Erfolg« widerspricht. Die Vertreter einer siegreichen Lehre meinen allzu gern, daß ihr Sieg durch genauere logische Nachprüfung gewissermaßen gerechtfertigt würde.« (Neurath 1935, 19)

Der einheitswissenschaftliche Ansatz findet sich in der Informatik wieder. So gilt die Datenmodellierung als universelle Methode zur Strukturierung von Daten, gleich aus welchem inhaltlichen Bereich. Und: Die denkbare Vielfalt verschiedener Beschreibungen wird auf *eine* Welt im Computer reduziert. Die bekannten Kritiken von zum Beispiel Toulmin, Kuhn und Feyerabend an der Einheitswissenschaft, am Logischen Empirismus und an Poppers Kritischem Rationalismus führen bis in die Gegenwart. Die Informatik scheint solche Kritiken bisher nicht wahrgenommen zu haben und auf ihre Methoden zu beziehen. Anders ist nicht verständlich, warum im Bereich der Softwaretechnik die Daten- und Funktionenmodelle wie ein Konstitutionssystem aufgebaut werden, indem Klassen und Relationen als Grundbegriffe gesucht, Forderungen nach Verifikation von Modellen aufgestellt werden und Zeitaspekte ausfallen.

4.1.5 Wittgensteins »Welt«-Vorstellung

Ein weiteres Konzept, das eng mit der Diskussion um die Grundlegung der Mathematik und mit den Überlegungen der Logischen Empiristen zusammenhängt, ist die Philosophie Ludwig Wittgensteins. Wittgenstein stand außerhalb von »philosophischen Schulen«, wenngleich es eine deutliche Verbindung zu Russell gab, bei dem er studiert hatte, und zu Mitgliedern des Wiener Kreises, mit denen er zwischen 1926 und 1931 wiederholt Gespräche führte.¹⁸² So gibt es Bezugnahmen aufeinander. Wittgenstein entwickelte ein Weltbild, das einerseits einen großen Einfluß auf das Weltbild des Logischen Empirismus und hierüber auch auf die Informatik hatte, andererseits aber eine Alternative darstellt.

Zwei Zusammenhänge werden nun vorgestellt und zueinander in Beziehung gesetzt. Zum einen wird in das Jahr 1918 zurückgegangen, zu Wittgensteins »Tractatus logico-philosophicus«, und gezeigt, welchen Einfluß seine Überlegungen auf den Wiener Kreis¹⁸³ hatten. Zum anderen wird ein Teil von Wittgensteins eigener Kritik an seiner »frühen« Philosophie vorgestellt. Mit »Some Remarks on Logical Form« eröffnete er nämlich im Jahr 1929 eine neue Perspektive, die er in seiner »späten« Philosophie hinsichtlich eines Aspekts weiterentwickelte: der Sprachspiele. In den »Remarks« deutet Wittgenstein bereits eine grundsätzlich andere Antwort auf die diskutierten Probleme an. Seine »Sprachspieltheorie« widerspricht dem Einheitsgedanken und bietet stattdessen Vielfalt.

Wittgensteins »Tractatus logico-philosophicus« ist für die Untersuchung der Paradigmen der Informatik aus verschiedenen Gründen beachtenswert: erstens, weil darin Ansätze vorhanden sind, die in die Philosophie des Logischen Empirismus eingeflossen sind, aber auch solche, von denen sie sich abgegrenzt hat, zweitens, weil darin ähnlich wie in Carnaps Konstitutionssystem eine Kalkülvorstellung der Welt zu finden ist, und drittens, weil eben diese philosophischen Grundannahmen bis heute in der Informatik eine wichtige Rolle spielen, während deren Herkunft vielen Informatikern unbekannt sein dürfte.

Die Zustimmung des Wiener Kreises zu Wittgensteins »früher« Philosophie ist unübersehbar, wenn Carnap im Zusammenhang einer Erörterung

¹⁸² Einige dieser Gespräche wurden von Waismann aufgezeichnet und sind in Wittgenstein 1984, Band 3, veröffentlicht.

¹⁸³ »Auf Anregung Rudolf Carnaps wurde der Tractatus im akademischen Jahr 1926/27 Satz für Satz gelesen. Man kann sich vorstellen, daß die intensive Beschäftigung nicht ohne Wirkung auf die Teilnehmer geblieben ist.« (Philippi 1986, I)

der Aufgaben und Grenzen der Wissenschaft mit einer eigenwilligen Erläuterung Wittgenstein zitiert:

Wittgenstein hat sowohl die stolze These von der Allmacht der rationalen Wissenschaft, als auch die bescheidene Einsicht in bezug auf ihre Bedeutung für das praktische Leben klar ausgesprochen: »Zu einer Antwort, die man nicht aussprechen kann, kann man auch die Frage nicht aussprechen. Das Rätsel gibt es nicht. Wenn sich eine Frage überhaupt stellen läßt, so kann sie auch beantwortet werden [...]. Wir fühlen, daß selbst, wenn alle möglichen wissenschaftlichen Fragen beantwortet sind, unsere Lebensprobleme noch gar nicht berührt sind. Freilich bleibt dann keine Frage mehr, und eben dies ist die Antwort.« (Carnap 1928a, 261)

Trotz der Anerkennung sind schwerwiegende Unterschiede festzustellen. Schon in der Frage, was die Grundlage der Wissenschaften sei, differieren Carnaps und Wittgensteins Auffassungen:

Für Carnap stellt – wie oben beschrieben – die *Erfahrung neben der Logik* die Grundlage der Wissenschaften dar. Jeder Konstitutionsschritt läßt sich als Anwendung einer allgemeinen, formalen Regel auf die empirische Situation der vorliegenden Stufe auffassen. Diese formale Regel ist selbst jedoch nicht empirisch, denn sie stellt eine Implikation dar, die für jede Stufe des Konstitutionssystems gilt. Insofern gibt es auch in Carnaps System Regeln a priori. Denn die Konstitution der Begriffe beruht logisch auf ihnen. (Vgl. Carnap 1928a, 143)

Für Wittgenstein dagegen ist die *Logik der Erfahrung vorgeordnet*. Sie bildet die Basis der Wissenschaften. »Die Logik ist *vor* jeder Erfahrung – daß etwas *so* ist.« (TLP 5.552, Hervorhebungen im Original) Diese Annahme teilt Wittgenstein mit Russell. Einig sind sich Wittgenstein und Russell auch in folgendem:

- Ob ein Satz Sinn hat, ist eine Frage der Logik. (Vgl. TLP 2.222, 4.2)
- Ob bestimmte Dinge existieren, ist eine Frage der Erfahrung. (Vgl. TLP 4.05, 5.552)

Nach dieser Auffassung ist der Sinn eines Satzes immer unabhängig davon, welche Dinge im einzelnen existieren, und es kann über jeden Gegenstand gesprochen werden, egal, ob er existiert oder nicht. (Vgl. TLP 3.3; Kenny 1974, 95f.) Allerdings verstehen Russell und Wittgenstein unter einem »Gegenstand« sehr Unterschiedliches. In Russells Beschreibungstheorie beziehen sich die Namen, die für die Variablen in quantifizierten Sätzen

stehen, auf *erkenntnistheoretisch* garantierte Gegenstände, zum Beispiel auf Sinnesdaten. Der Gegenstandsbegriff bei Wittgenstein dagegen ist nicht so eindeutig zu definieren. Es gibt verschiedene Interpretationen, die hier kurz erläutert werden sollen und von denen keine der Russellschen Definition entspricht.

Erstens können Wittgensteins »Gegenstände« als *metaphysisch* garantierte Gegenstände verstanden werden. Die Namen in Sätzen beziehen sich dann auf unzerstörbare letzte Einheiten. (Vgl. Kenny 1974, 96) Nach dieser Interpretation wären die Gegenstände in gewisser Weise mit dem monadologischen Gedankengang bei Leibniz vergleichbar.¹⁸⁴ Der Vergleich hinkt allerdings insofern, als Monaden die Eigenschaft haben, das ganze Universum zu repräsentieren, während die Gegenstände diese Eigenschaft nicht haben. Aber es gibt Ähnlichkeiten:

Gegenstände sind einfach, haben keine Teile, können sich aber zu Komplexen verbinden (TLP 2.02-2.0201). Sie können weder erzeugt noch zerstört werden, denn jede mögliche Welt muß dieselben Gegenstände wie die wirkliche enthalten; Veränderung ist nur Veränderung in der Konfiguration der Gegenstände (TLP 2.022-2.0231, 2.0271). Gegenstände können sich durch ihre logische Form unterscheiden (d.h. sie können in verschiedene mögliche Sachverhalte eingehen) oder durch ihre äußeren Eigenschaften (d.h. sie befinden sich faktisch in verschiedenen wirklichen Sachverhalten), oder sie sind bloß numerisch verschieden (d.h. sie sind zwar ununterscheidbar, aber nicht identisch) (TLP 2.0233-2.02331). Die Gegenstände bilden die unveränderliche feste Form, Substanz und Inhalt der Welt (TLP 2.021, 2.023, 2.024, 2.025) (Kenny 1974, 90)

Zweitens können Wittgensteins »Gegenstände« als *Sinnesdaten* oder Elemente im Wahrnehmungsfeld des einzelnen angesehen werden. Diese Interpretation wird von Merrill B. Hintikka (†) / Jaakko Hintikka (1986) vertreten. Sie entspricht am ehesten der Position der Logischen Empiristen.

Drittens können sie als *physische* oder sonstwie »wirkliche« *Atome* verstanden werden, die selbst unveränderlich sind, während ihre Zusammensetzung variieren kann. In den Arbeiten von Norman Malcolm (1986) und David Pears (1987) findet sich diese Auslegung.

¹⁸⁴ Vergleiche Kapitel 5 (insbesondere Abschnitt 5.3.7) in dieser Arbeit.

Eine vierte Interpretation – von Hidé Ishiguro (1989), Brian F. McGuinness (1981) und Peter Winch (1981) – besagt, daß die Gegenstände nur innerhalb der Funktion der sie bezeichnenden Ausdrücke zu verstehen seien, daß also die *Gegenstände nicht unabhängig vom Kontext* existieren. Mit dieser Interpretation wird vielleicht schon auf die »Gebrauchstheorie« des »späten« Wittgenstein vorgegriffen, aber auch im »Tractatus« wird an einigen Stellen der Begriff »Gebrauch« bereits benutzt: »Wird ein Zeichen nicht gebraucht, so ist es bedeutungslos.« (TLP 3.328) »Nur der Satz hat Sinn; nur im Zusammenhange des Satzes hat ein Name Bedeutung.« (TLP 3.3) Ein Name bezieht sich immer auf einen Gegenstand. »Der Name vertritt im Satz den Gegenstand.« (TLP 3.22; vgl. Ishiguro 1989, 96ff.)

Zwischen den Auffassungen Wittgensteins und Carnaps besteht ein weiterer wichtiger Unterschied: Für Wittgenstein sind die Elemente der Welt nicht einzelne »Gegenstände«, sondern »Tatsachen«. »Die Welt ist die Gesamtheit der Tatsachen.« (TLP 1.1) »Die Welt zerfällt in Tatsachen.« (TLP 1.2) Unter einer »Tatsache« versteht Wittgenstein das Bestehen von Sachverhalten. (TLP 2) Wenn ein Sachverhalt besteht, wird er als wahr oder als positive Tatsache bezeichnet, das Nichtbestehen eines Sachverhaltes wird negative Tatsache genannt. (TLP 2.06) »Der Sachverhalt ist eine Verbindung von Gegenständen (Sachen, Dingen).« (TLP 2.01) »Die Konfiguration der Gegenstände bildet den Sachverhalt.« (TLP 2.0272) Wittgenstein vertritt hier die Auffassung, daß der Gegenstand fest sei, während die Konfiguration sich ändern kann. »Der Gegenstand ist das Feste, Bestehende; die Konfiguration ist das Wechselnde, Unbeständige.« (TLP 2.0271) Die Arbeit von Benjamin Lee Whorf (1897-1941) (1956) zeigt, daß in verschiedenen Kulturen unterschiedliche Wahrnehmungskomplexe strukturgebend sind. Das kann zum Beispiel die Konfiguration sein. Insofern spricht Wittgenstein hier zunächst nur von einer Welt, in der der Gegenstand das Feste ist. Ob die von Whorf dargestellten Sachverhalte auf eine andere Welt hinweisen, die wir nicht denken können, oder ob durch sie nur Übersetzungsprobleme aufgeworfen werden, ist strittig.¹⁸⁵

Mit der Position, daß die Sachverhalte voneinander unabhängig seien (TLP 2.061), übernimmt Wittgenstein Russells logischen Atomismus, und

¹⁸⁵ Die Whorfsche These erfährt durch neuere experimentelle Arbeiten über Farbwahrnehmung und –erinnerung bei den Berinmo eine Stützung. Deren Aufteilung des Farbspektrums und damit ihr Farbraum unterscheidet sich deutlich von dem unseren. (Roberson / Davidoff / Davies 2000)

diese Aussage ist auch die Grundlage für die Annahme der Logischen Empiristen, die Elementarsätze seien unabhängig voneinander.

Erkenntnis der Welt bedeutet – so Wittgenstein –, sich ein Bild oder mehrere Bilder der Tatsachen zu machen. Da die Welt die Gesamtheit der Tatsachen ist (TLP 1.1), entsteht so ein Bild der Welt. Die Verbindung zwischen Welt und Bild liegt darin, daß die Gegenstände den Elementen des Bildes entsprechen und die Strukturen in gewisser Weise ähnlich sind. (TLP 2.13)

Das Bestehen und Nichtbestehen von Sachverhalten ist die Wirklichkeit. (TLP 2.06)

Die gesamte Wirklichkeit ist die Welt. (TLP 2.063)

Das Bild ist ein Modell der Wirklichkeit. (TLP 2.12)

Das Bild besteht darin, daß sich seine Elemente in bestimmter Art und Weise zu einander verhalten. (TLP 2.14)

Daß sich die Elemente des Bildes in bestimmter Art und Weise zu einander verhalten, stellt vor, daß sich die Sachen so zu einander verhalten. Dieser Zusammenhang der Elemente des Bildes heiße seine Struktur und ihre Möglichkeit seine Form der Abbildung. (TLP 2.15)

Das Modell oder das Bild ist selbst kein Ding, sondern eine Tatsache. (Vgl. TLP 2.141) Jedes Bild enthält Elemente und Beziehungen zwischen ihnen. Diese Beziehungen und die abbildende Beziehung zwischen den Elementen des Bildes und den Gegenständen außerhalb ergeben das Bild.

Die Form der Abbildung ist die Möglichkeit, daß sich die Dinge so zu einander verhalten wie die Elemente des Bildes. (TLP 2.151)

Wenn die Form der Abbildung nur eine *Möglichkeit* darstellt, dann gibt es offenbar andere Möglichkeiten, wie sich die Dinge zu einander verhalten können. Damit stellt ein Modell nicht die einzige Abbildung von Tatsachen dar, sondern zeigt eine der vielen Möglichkeiten, wie sich die Gegenstände verhalten können.

Vielfalt ergibt sich auch daraus, daß es verschiedene Arten von Bildern und insofern verschiedene Modelle der Welt gibt. Bilder sind für Wittgenstein nicht nur Gemälde, Zeichnungen und Photographien, sondern auch Landkarten, Plastiken und dreidimensionale Modelle, Partituren und Schallplattenaufzeichnungen. (Vgl. Kenny 1974, 70) Da Wittgenstein die Sprache ebenfalls als Bild der Welt betrachtet, ist die Liste um Schriftstücke, Computerprogramme usw. erweiterbar.

Wittgensteins Bildtheorie läßt sich als »Theorie der Darstellung« verstehen. Bei jeder Art von Darstellung kann gefragt werden, was und ob das, was dargestellt wird, richtig oder falsch dargestellt ist. Bezogen auf die Abbildung der Welt in Sprache, lauten die Fragen: Was sagt der Satz und ist das, was der Satz sagt, richtig oder falsch? Das sind die Fragen nach dem Inhalt oder dem Sinn und nach dem Urteil oder dem Wahrheitswert einer Aussage. (Vgl. Kenny 1974, 70)

Der Zusammenhang zwischen dem Abzubildenden und dem Bild liegt allerdings nicht in der einfachen Ähnlichkeit, sondern in der Übereinstimmung in Bezug auf die »logische (mathematische) Mannigfaltigkeit« (TLP 4.04). So ist es möglich, daß verschiedene Bilder oder Bildarten für die Darstellung von Sachverhalten unterschiedlich gut geeignet sind. Dies hat Einfluß auf die Frage nach dem, was dargestellt wird. Die Art und die Adäquatheit der Darstellung gehen in die Antwort ein.¹⁸⁶

Eine mögliche Abbildung der Welt liefert die Sprache. Damit ist die Gesamtheit der Sätze gemeint. (TLP 2.18ff.) Die Sprache ist ein logisches Bild der Welt, denn im Satz drückt sich – sinnlich wahrnehmbar – der Gedanke aus. Der Gedanke wiederum ist das logische Bild der Tatsachen. (TLP 3) »Der Satz ist ein Bild der Wirklichkeit.« (TLP 4.021) Die Sprache enthält zudem ein konstruktives Moment: »Der Satz konstruiert eine Welt.« Und: »Im Satz wird gleichsam eine Sachlage probeweise zusammengestellt.« (TLP 4.031) Der Mensch entwirft sich sozusagen seine Welt mit Hilfe seiner Sprache. Er konstruiert sie. Dafür hat er mehrere Möglichkeiten, jedoch keine, die über das hinausgehen, was in der Sprache ausdrückbar ist. »Die Angabe der wahren Elementarsätze beschreibt die Welt vollständig.« (TLP 4.26) Ein Mittel, um Erkenntnis über die Welt zu erreichen, wäre demnach die Aufstellung aller wahren Elementarsätze. Dazu ist die Analyse von Sätzen, das heißt die Rückführung von Sätzen auf Elementarsätze erforderlich. Jeder Satz ist in Elementarsätze mit Namen, die einfache Gegenstände repräsentieren, zu zerlegen. Die Nähe von Carnaps Konstitutionssystem zu diesem Gedankengang ist offenkundig. Wittgenstein hat diesen Ansatz allerdings in den »Remarks« aufgegeben, worauf später in diesem Abschnitt eingegangen wird.

¹⁸⁶ Ein Beispiel: »Ein expressionistisches Bild taugt zwar nicht als Paßphotographie, doch zur Wiedergabe einer gewissen Haltung oder Stimmung mag es die richtige logische Mannigfaltigkeit besitzen, z.B. indem es Farben verwendet, die der materiellen Wirklichkeit nicht entsprechen.« (Schulte 1989, 78)

Alle Bilder der Welt, die der Mensch herstellt, haben eine logische Form. (TLP 2.18, 2.182) Welten ohne Logik sind unerkennbar, der Mensch kann sie sich nicht einmal denken, deshalb kann auch nichts über sie gesagt werden.

Wir können nichts Unlogisches denken, weil wir sonst unlogisch denken müßten. (TLP 3.03)

Man sagte einmal, daß Gott alles schaffen könne, nur nichts, was den logischen Gesetzen zuwider wäre. – Wir können nämlich von einer »unlogischen« Welt nicht sagen, wie sie aussähe. (TLP 3.031)

Aus Wittgensteins Argumentation ergibt sich, daß die einzelnen Bilder, die die Welt unter verschiedenen Möglichkeiten darstellen, selbst logisch sind. Die Vielfalt der Bilder bedeutet, daß es immer noch andere Bilder geben kann. Der Mensch kann zwischen den Bildern wechseln und so unterschiedliche Perspektiven der Welt »sehen«. Die Annahme der Möglichkeit von Perspektivwechseln beinhaltet, daß es keine geschlossene Kenntnis der Welt geben kann, die ontologisch wahr wäre, auch kann der Erkenntnisprozeß nie abgeschlossen sein. Stattdessen gibt es verschiedene Annahmen über die Strukturen und Ordnungen dieser Welt(en), die unterschiedlich bewertet werden können. Die Angabe aller wahren Elementarsätze zur vollständigen Beschreibung der Welt ist deshalb ein kontrafaktisches Ideal.

Wittgensteins »Tractatus« enthält Ordnungsannahmen, die auf eine Kalkülvorstellung von der Welt hinauslaufen: Die Elemente der Welt sind die Tatsachen, das heißt das Bestehen von Sachverhalten. Die Sachverhalte selbst sind unabhängig voneinander. (TLP 2.061) Das Bestehen eines Sachverhaltes wird durch einen Elementarsatz behauptet. (TLP 4.21)

Ist der Elementarsatz wahr, so besteht der Sachverhalt; ist der Elementarsatz falsch, so besteht der Sachverhalt nicht. (TLP 4.25)

Die Angabe aller wahren Elementarsätze beschreibt die Welt vollständig. Die Welt ist vollständig beschrieben durch die Angabe aller Elementarsätze plus die Angabe, welche von ihnen wahr und welche falsch sind. (TLP 4.26)

Die Beschreibung der Welt umfaßt also Sätze als Elemente einschließlich des Urteils, ob sie wahr oder falsch sind, das heißt, sie enthält eine Semantik. Auch ist der Grundsatz »tertium non datur« enthalten, denn die Sätze müssen entweder wahr oder falsch sein. Die Elementarsätze können als Elemente des Kalküls angesehen werden.

Die Beziehungen, die zwischen den Gegenständen innerhalb des Sachverhalts bestehen, das heißt der Zusammenhang zwischen den Elementen des Bildes, bilden die Struktur des Sachverhalts. Wenn der Mensch die Welt erkennt, indem er sich Bilder der Tatsachen macht (TLP 2.1) oder indem er sich die Sachlage im logischen Raum darstellt (TLP 2.11), und wenn Bild und Tatsache die Form der Abbildung, die immer auch eine logische Form ist, gemeinsam haben, dann ist die Welt immer auch von logischer Form. Es müssen also in ihr die Gesetze der Logik gelten. Die Logik gibt die Regeln an, wie die Elemente des Bildes miteinander verknüpft sein können. Diese Regeln sind für Wittgenstein die Regeln der Aussagenlogik und der Prädikatenlogik. Die Aussagenlogik umfaßt 16 Wahrheitsfunktionen für die Verknüpfung von zwei Sätzen (p, q). Sie wurden erstmals von Wittgenstein in Form von »Wahrheitstafeln« definiert und in Tabellenform notiert.

p	W	W	F	F	Bezeichnung			
q	W	F	W	F				
1	W	W	W	W	$p \text{ T } q$	$(p \vee \neg p) \wedge (q \vee \neg q)$	Wenn p, so p; und wenn q, so q.	Tautologie
2	F	W	W	W	$p \mid q$	$\neg p \vee \neg q$	Nicht beides p und q.	Exklusion
3	W	F	W	W	$p \rightarrow q$	$\neg p \vee q$	Wenn p, so q.	Implikation
4	W	W	F	W	$p \leftarrow q$	$p \vee \neg q$	Wenn q, so p.	Replikation
5	W	W	W	F	$p \vee q$	$p \vee q$	p oder q.	Alternation
6	F	F	W	W	$\neg p$	$\neg p \vee \neg p$	Nicht p.	Pränonpendenz
7	F	W	F	W	$\neg q$	$\neg q \vee \neg q$	Nicht q.	Postnonpendenz
8	F	W	W	F	$p \neq q$	$(p \vee q) \wedge (\neg p \vee \neg q)$ oder: $(p \wedge \neg q) \vee (q \wedge \neg p)$	p, oder q, aber nicht beide.	Antivalenz
9	W	F	F	W	$p = q$	$(p \vee \neg q) \wedge (\neg p \vee q)$	Wenn p, so q; und wenn q, so p.	Äquivalenz
10	W	F	W	F	q	$q \vee q$	q.	Postpendenz
11	W	W	F	F	p	$p \vee p$	p.	Präpendenz
12	F	F	F	W	$p \downarrow q$	$\neg p \wedge \neg q$	Weder p noch q.	Rejektion
13	F	F	W	F	$\neg(p \leftarrow q)$	$\neg p \wedge q$	q und nicht p.	Nonreplikation
14	F	W	F	F	$\neg(p \rightarrow q)$	$p \wedge \neg q$	p und nicht q.	Nonimplikation
15	W	F	F	F	$p \wedge q$	$p \wedge q$	p und q.	Konjunktion
16	F	F	F	F	$p \text{ K } q$	$(p \wedge \neg p) \vee (q \wedge \neg q)$	p und nicht p; oder q und nicht q.	Kontradiktion

Tabelle 18. Wahrheitsfunktionen. Die Tabelle folgt dem von Wittgenstein in TLP 5.101 vorgestellten Schema, enthält jedoch zusätzlich die heute üblichen Notationen der logischen Funktionen sowie ihre Bezeichnungen.

Während Wittgenstein – beeinflusst durch den logischen Atomismus Russells – 1918 im »Tractatus logico-philosophicus« davon ausgeht, daß die Sachverhalte und damit auch die sie beschreibenden Elementarsätze voneinander unabhängig sind, vertritt er in dem bereits erwähnten Aufsatz »Some Remarks on Logical Form« aus dem Jahr 1929 die Auffassung, daß es Elementaraussagen gibt, die *nicht* voneinander unabhängig sind. Es handelt sich dabei um Aussagen, die den Grad einer Eigenschaft ausdrücken. Solche Eigenschaften können sein: die Länge eines Intervalls, die Höhe eines Tones, die Helligkeit einer Farbe. (Wittgenstein 1929a, 167) Das Besondere an diesen Eigenschaften ist, daß nicht zwei Grade einer Eigenschaft zugleich am selben Ort sein können.¹⁸⁷ Also kann nicht ein Farbfleck zugleich zwei Grade von Helligkeit haben oder ein Fleck in unserem Gesichtsfeld gleichzeitig zwei Farben. So sind die Aussagen »Die Farbe R ist zu einer bestimmten Zeit T an einem bestimmten Ort P unseres Gesichtsfelds« und »Die Farbe B ist zu einer bestimmten Zeit T an einem bestimmten Ort P unseres Gesichtsfelds« – symbolisch $RPT \wedge BPT$ – in gewisser Weise ein Widerspruch. Aber es ist genau genommen zwischen einem Widerspruch (contradiction) und einem Ausschluß (exclusion) zu unterscheiden. Gradaussagen können sich ausschließen, nicht jedoch widersprechen. (Wittgenstein 1929a, 168)

Wittgenstein schreibt, diese Auffassung sei eine andere als die im »Tractatus« vertretene. Dort heißt es unter 2.061: »Die Sachverhalte sind voneinander unabhängig.« Im Aufsatz von 1929 stellt er fest: »The mutual exclusion of unanalyzable statements of degree contradicts an opinion which was published by me several years ago and which necessitated that atomic propositions could not exclude one another.« (Wittgenstein 1929a, 168) Die Verknüpfung läßt sich folgendermaßen in einer Wahrheitstafel darstellen, wobei die erste Zeile entfällt, weil sie eine unmögliche Kombination darstellt:

¹⁸⁷ Die Korrektur beruht auf der »Einsicht der Multiplizität«, daß nämlich eine Gradaussage nur beschrieben werden kann, wenn der gesamte Maßstab angelegt wird. Bernd Philippi weist auf ein Beispiel Wittgensteins für Multiplizität hin. Man könne an einer Maschine nicht drei Geschwindigkeiten wählen, wenn der Hebel nur zwei Stellungen kenne. (Philippi 1986, XXXVI)

RPT	BPT	$RPT \wedge BPT$
-	-	-
W	F	F
F	W	F
F	F	F

Tabelle 19. Wahrheitstafel für Gradaussagen

Abschließend schreibt Wittgenstein, »that in the case of certain kinds of atomic propositions described in terms of definite symbolic features certain combinations of the T's and F's must be left out.« (Wittgenstein 1929a, 171)

In seinen Gesprächen mit Waismann, den er 1929 in Wien traf, bemerkte Wittgenstein:

Ich habe einmal geschrieben: »Der Satz ist wie ein Maßstab an die Wirklichkeit angelegt. Nur die äußersten Teilpunkte berühren den zu messenden Gegenstand.« Ich möchte jetzt lieber sagen: Ein *Satzsystem* ist wie ein Maßstab an die Wirklichkeit angelegt. Ich meine damit folgendes: Wenn ich einen Maßstab an einen räumlichen Gegenstand anlege, so lege ich *alle Teilstriche* zu gleicher Zeit an. Nicht die einzelnen Teilstriche werden angelegt, sondern die ganze Skala. Weiß ich, daß der Gegenstand bis zum Teilstrich 10 reicht, so weiß ich auch unmittelbar, daß er nicht bis zum Teilstrich 11, 12 und so weiter reicht. Die Aussagen, welche mir die Länge eines Gegenstandes beschreiben, bilden ein System, ein Satzsystem. Ein solches ganzes Satzsystem nun wird mit der Wirklichkeit verglichen, nicht ein einzelner Satz. Wenn ich z.B. sage: Der und der Punkt im Gesichtsfeld ist *blau*, so weiß ich nicht nur das, sondern auch, daß der Punkt nicht grün, nicht rot, nicht gelb usw. ist. Ich habe die ganze *Farbenskala* auf einmal angelegt. Das ist auch der Grund dafür, warum ein Punkt zu gleicher Zeit nicht verschiedene Farben haben kann. Denn wenn ich ein *Satzsystem* an die Wirklichkeit anlege, so ist damit – genau wie beim räumlichen – schon gesagt, daß immer nur *ein* Sachverhalt bestehen kann, nie mehrere. (Wittgenstein 1929b, 63f., Hervorhebungen im Original)

Schon im »Tractatus« heißt es, es sei logisch unmöglich, daß zwei Farben zugleich an einem Ort des Gesichtsfelds sind. Durch die logische Struktur der Farbe sei dies ausgeschlossen. »Die Aussage, daß ein Punkt des Gesichtsfeldes zu gleicher Zeit zwei verschiedene Farben hat, ist eine Kontra-

diktion.« (TLP 6.3751) Hier hält Wittgenstein die Beziehung noch für eine Kontradiktion, während er im Aufsatz von 1929 von einer Exklusion spricht.

Wittgenstein widerlegt also seine eigene Annahme der Unabhängigkeit von Elementarsätzen. Wenn aber die Elementarsätze nicht unabhängig voneinander sind, dann ist es nicht mehr möglich, einzelnen Begriffen oder einzelnen Sätzen Wahrheitswerte zuzuordnen, sondern es müssen immer Satzsysteme und damit der Kontext von Sätzen betrachtet werden. Mit dieser Auffassung erweitert Wittgenstein das seit Frege bekannte Kontextprinzip entscheidend. Der Kontext wird nun nicht mehr von Begriffen in Sätzen gebildet, sondern von Sätzen in Satzzusammenhängen. Diese umfassende Perspektive des Kontextes entwickelt er in seiner »späten« Philosophie weiter, in der er sich intensiv mit »Sprachspielen« beschäftigt, das heißt eben nicht mit einzelnen Wörtern oder Sätzen, sondern mit dem Gebrauch von Wörtern und Sätzen in Satzzusammenhängen.

Die neue Perspektive ist im Wiener Kreis nicht unmittelbar aufgenommen worden, und sie ist auch nicht in die entstehende Informatik eingeflossen. Die Informatik bezieht sich nach wie vor auf den Logischen Empirismus und, wie noch gezeigt wird, auf Annahmen, die zunächst in der formalistischen Mathematik eingeführt wurden. Sie stützt sich auf eine Sicht des Logischen Empirismus, in der zwei Gesichtspunkte verlorengegangen sind: Es sind dies zum einen die kritischen Implikationen in der Tradition der Aufklärung, also diejenigen Teile des Logischen Empirismus, die den gesellschaftlichen Gebrauch von Wissen thematisierten. Es ist dies zum anderen der Teil des Logischen Empirismus, der neben dem realisierten Konstitutionssystem daran festhält, daß auch anderes möglich ist.

4.2 Mathematik

4.2.1 Der Verlust der Anschaulichkeit

Im Lauf des 19. Jahrhunderts war in der Mathematik eine Reihe neuer Felder bearbeitet worden und auf bereits länger vorhandenen hatte es Verschiebungen gegeben. Mathematiker hatten Theorien und Verfahren vorgelegt, die kaum mehr anschaulich waren und die sich in ihrer seit Carl Friedrich Gauß (1777-1855) zunehmenden axiomatischen Ausrichtung auch nicht mehr naiv als »evident« bezeichnen ließen. Verschiedene nicht-euklidische Geometrien waren ausgearbeitet worden, und es stand zur Diskussion, daß die Wahrheit der Euklidischen Geometrie (und vice versa der neuen Geometrien) nicht in deren Prinzipien liege, sondern nur im Zusammenhang eines gesamten hypothetisch-deduktiven Systems. Ab der Mitte des 19. Jahrhunderts lieferten die Arbeiten von Georg Cantor (1845-1918), Richard Dedekind (1831-1916) und Karl Weierstraß (1815-1897) eine Begründung der Infinitesimalrechnung, die in der Arithmetisierung der Algebra mündete. Denn es wurde festgestellt, daß die Arithmetik der ganzen Zahlen ausreichte, um die Eigenschaften der allgemeinsten Funktionen darzustellen. Indem es gelang, die erforderlichen allgemeineren Zahlbegriffe der rationalen und der reellen Zahl auf die natürlichen Zahlen zurückzuführen, »bildete sich die Auffassung, daß die natürlichen Zahlen das wahre Objekt der Mathematik bilden und daß die Mathematik eben in der *Lehre von den Zahlen* bestehe«. (Bernays 1930/31, 327, Hervorhebung im Original; vgl. Desanti 1975, 176ff.)

Obwohl also verschiedene Arbeitsfelder grundsätzliche Begründungsprobleme der Mathematik aufwarfen, waren die meisten Mathematiker im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts an diesen weniger interessiert als an der inhaltlichen Ausarbeitung des jeweiligen Gebiets. Erst das Auftauchen der Antinomien um die Jahrhundertwende (Georg Cantor, Cesare Burali-Forte (1861-1931) sowie Bertrand Russell und Ernst Zermelo) (1871-1953) erzeugte breitere Aufmerksamkeit für Grundlagenfragen. Auf der Ebene allgemeiner Begründungen herrschten zwei Annahmen nebeneinander vor:

Erstens. Es war unter kontinentalen Mathematikern weitgehend akzeptiert, daß mathematische Gegenstände nicht unmittelbar empirisch, sondern abstrakt sind; nicht aber in gleichem Umfang im angelsächsischen Bereich,

wo John Stuart Mills (1806-1873) empirische Begründung größere Wirkung zeigte. Für abstrakte Gegenstände setzte sich nicht zuletzt mit der Entwicklung der Mengentheorie neben dem »Psychologismus« eine dem Platonismus ähnliche Interpretation durch, die in ihnen erkenntnistheoretisch und ontologisch autonome Gegenstände sah. Auf diese Position wurde auch nach Cantor im Zusammenhang mit den Neubegründungen der folgenden Jahrzehnte immer wieder zurückgegriffen. Gottlob Frege (1848-1925) stützte sich auf sie, als er mit der Ausarbeitung des logizistischen Programms begann, und ebenso Kurt Gödel, als er die Kritik des formalistischen Programms abgeschlossen hatte (vgl. Dawson 1997, 229). Realistische Annahmen blieben also bis ins 20. Jahrhundert als philosophischer Hintergrund erhalten.¹⁸⁸ Besonders Frege, der sich explizit mit der philosophischen Begründbarkeit der Mathematik auseinandersetzte, baute auf dieser Position seine logische und zahlentheoretische Auffassung auf. Von den raumzeitlich und damit physikalisch beschreibbaren Gegenständen, die in dem Sinne wirklich sind, daß sie in Wechselwirkung treten, also aufeinander einwirken und dabei Veränderungen hervorrufen (vgl. Frege 1969, 149), unterscheidet er die Gegenstände von Logik und Mathematik, die Gedanken sind. »Die Gedanken sind nicht durchaus unwirklich, aber ihre Wirklichkeit ist ganz anderer Art als die der Dinge. Und ihr Wirken wird ausgelöst durch ein Tun der Denkenden, ohne das sie wirkungslos wären, wenigstens soweit wir sehen können. Und doch schafft der Denkende sie nicht, sondern muß sie nehmen, wie sie sind.« (Frege 1967, 362) Mathematische Gegenstände als zeitlos, unveränderlich und objektiv, das heißt als Ideen zu begreifen, macht gerade den Kern der Demonstration des Ansatzes der »Wiedererinnerung« in Platons Dialog »Menon« aus. Platon spricht von »Wiedererinne-

¹⁸⁸ Ein strikt nominalistischer Ansatz wurde in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts allein von Logikern der polnischen Schule, zu nennen sind in diesem Zusammenhang vor allem Stanisław Leśniewski (1886-1939) und Alfred Tarski (1901 oder 1902-1983), nach dem Offenbarwerden der Antinomien in der Mengenlehre vertreten. (Vgl. zum Beispiel Leśniewski 1930) Dieser Ansatz gewann außerhalb Polens nach Tarskis Emigration in die USA dort in den vierziger Jahren Aufmerksamkeit. Besonders Nelson Goodman (1906-1998) und W.V.O. Quine wurden von ihm beeinflusst. So hatte zum Beispiel Leśniewski schon abgelehnt, uninterpretierte Kalküle zu verwenden (vgl. Kamitz 1992), was Quines in »Set Theory and Its Logic« (1969) entwickelter Forderung, nur über Individuenvariablen, das heißt über gebundene Variablen zu quantifizieren, verwandt ist.

Penelope Maddy (1989) – lange Zeit selbst eine Realistin, die zwischen Gödels und Hilary Putnams Varianten des Platonismus vermitteln will (Maddy 1990; Maddy 1991) – hat gezeigt, daß der »working mathematician« ungeachtet aller Reflexionen über Logik und Metamathematik in aller Regel auch heute einem naiven Platonismus anhängt. Für Quine (1960, 465) ist der Mathematiker gar »ein Realist ex officio«.

rung«, weil er hier eine unsterbliche Seele postulieren muß, die, anders als die sterbliche Physis des Menschen, Anteil am Reich der Ideen haben kann. (Platon, Menon 80d–86c) Diese metaphysische Basis der Mathematik anzuerkennen, bereitete im übrigen weder Cantor noch Frege Probleme, da sie mit ihren religiösen Überzeugungen verträglich war. (Vgl. Meschkowski 1967)

Zweitens. Es war im Anschluß an Kant (KrV, B 15) weithin akzeptiert, daß mathematische Urteile, zum Beispiel » $5+7=12$ «, synthetische Urteile a priori seien. Kant hatte argumentiert, daß ein solches Urteil nicht analytisch sei, da der Begriff der Summe zweier Zahlen die Vereinigung beider Zahlen in einer einzigen bezeichne, ohne daß in dem Gedanken der Vereinigung das mathematische Ergebnis enthalten sei. »Ich mag meinen Begriff von einer solchen Summe noch solange zergliedern, so werde ich doch darin die Zwölf nicht antreffen. Man muß über diese Begriffe hinausgehen, indem man die Anschauung zu Hilfe nimmt, die einem von beiden korrespondiert, etwa seine fünf Finger, oder [...] fünf Punkte, und so nach und nach die Einheiten der in der Anschauung gegebenen Fünf zu dem Begriffe der Sieben hinzutun.« (KrV, B 15) Wie das Zitat deutlich zeigt, ist die Summe zugleich nicht in der Erfahrung gegeben, sondern sie entsteht konstruktiv, indem Einheit um Einheit vermehrt wird. Mathematische Urteile wurden also in Hinblick auf die Erkenntnisquelle als unabhängig von der Erfahrung betrachtet und hinsichtlich des Inhalts als die gegebene Erkenntnis erweiternd. Mathematik war zufolge dieser Annahme konstruktiv und inhaltlich.

Hinsichtlich der Bedeutung der Konstruktion der Begriffe für die mathematische Erkenntnis knüpfte Kant an Leibniz an. Seine Auffassung der Mathematik war jedoch als Gegenposition zu derjenigen Leibniz' entwickelt worden. Nach Ernst Cassirer (1874-1945) legte Leibniz eine Theorie der mathematischen Definition und des mathematischen Gegenstands vor, in der alles »Gegebene« aus einer »erzeugenden Regel«, also mittels einer genetischen Definition, abgeleitet und verstanden wird und in der »Sinnlichkeit« und »Vernunft« auf das klarste voneinander getrennt sind. Cassirer umreißt Leibniz' Auffassung so:

Kein mathematischer Inhalt entspringt als solcher der Sinnlichkeit – denn dieser fehlt das charakteristische Merkmal, das konstitutive Prinzip des Mathematischen. Ein Inhalt muß, um als mathematischer Inhalt gelten zu können, distinkt erfaßt sein, das heißt er muß sich aus einfachen, an sich gewissen Grundelementen der Erkenntnis in

derselben Weise aufbauen lassen, wie sich jede Zahl in eindeutiger Weise als ein Produkt von Primzahlen darstellen läßt. Die sinnlichen Erlebnisse sind einer derartigen durchgängigen Zerlegung nicht fähig; bei ihnen müssen wir zuletzt stets bei irgendwelchen Gesamtheiten haltmachen, die sich nicht weiter in ihre bestimmenden »Gründe« auflösen lassen, sondern nur noch »konfus« von uns erfaßt werden. Aus dieser Trennung der »distinkten« und der »konfusen« Erkenntnis ergibt sich unmittelbar, daß für Leibniz kein einziger, wahrhaft-mathematischer Gegenstand sich in der Sinnlichkeit gründet. Dies gilt nicht nur für die Zahl, sondern es gilt in nicht minderer Strenge für die geometrische Ausdehnung. Auch sie ist keineswegs ein Datum der Wahrnehmung, sondern eine reine Verstandesidee [...] Allem menschlichen Erkenntnis liegen ursprüngliche Einsichten der reinen Vernunft zugrunde: aber sie vermag sich dieser Urintentionen der Vernunft nicht anders zu bemächtigen, noch sie für sich festzuhalten, als dadurch, daß sie sich in Bildern, in Symbolen faßbar macht. Das Intuitive bleibt hierbei immer das »dem Wesen nach« Erste, [...]; aber das Symbolische erweist sich andererseits insofern als unentbehrlich, als es das »für uns Erste«, [...], darstellt. Unser endlicher Verstand ist und bleibt ein der Bilder bedürftiger Verstand: er würde sich unfehlbar im Labyrinth des Denkbaren verlieren, wenn ihm nicht durch die allgemeine Charakteristik ein Ariadnefaden in die Hand gegeben würde. (Cassirer 1929, 418f.)

»Vernunftkenntnis« und »Tatsachenerkenntnis« zufolge der Wahrnehmung sind also sowohl klar voneinander getrennt, als auch im Gebrauch durch die »allgemeine Charakteristik« aufeinander bezogen. Mathematik und Logik sind im Bereich der Vernunft angesiedelt. Keine »Vernunftwahrheit«, das heißt kein Urteil, das sich durch Analyse der Begriffe als partielle Identität darstellt, kann aus der Erfahrung gezogen werden, aber jede Vernunftwahrheit gilt für die Erfahrung, wobei mit der empirischen physikalischen Erkenntnis kein Konflikt entsteht, da Vernunft und Erfahrung der »prästabilierten Harmonie« unterworfen sind. Cassirer betont, daß es deshalb im Aufbau von Leibniz' System keine Stelle für das Problem der Anwendbarkeit der Mathematik gegeben habe, während diese Frage für Kant von großer Bedeutung gewesen sei.

Kant, der das Prinzip der »prästabilierten Harmonie« verwirft, frage nach dem Grund der Möglichkeit der Übereinstimmung zwischen apriorischen Begriffen und empirischen Tatsachen.

Und die Antwort auf diese Frage gewinnt er durch die Einsicht, daß auch der empirische Gegenstand, als Gegenstand, nicht schlechthin gegeben ist, sondern daß er ein Moment der mathematischen Konstruktion in sich schließt. Empirische Gegenständlichkeit kommt nur auf Grund einer Ordnung des Empirischen zustande: diese selbst aber ist nur kraft der reinen sinnlichen Anschauung von Raum und Zeit möglich. (Cassirer 1929, 421)

Das apriorische Moment der Anschauung bestimmt für Kant deren Form, genauer deren Formen, denn er unterscheidet strikt zwischen der Anschauungsform des äußeren Sinnes, mit dem »wir uns Gegenstände als außer uns« vorstellen – dies ist der (ruhende) absolute Raum – und der Anschauungsform des inneren Sinnes, »d.i. des Anschauens unserer selbst und unsers innern Zustands«, – dies ist die (fließende) absolute Zeit. (Vgl. KrV, A 22-42, B 37-59) Nicht das Denken, sondern die reine Anschauung begründet für Kant die Mathematik. Die Geometrie, wie sie seit der Antike überliefert war, handelte von den Eigenschaften des in reiner Anschauung völlig exakt gegebenen Raumes. Sie war für die Mathematiker des 18. Jahrhunderts die Wissenschaft des einen, einzigen Raumes, von dem Mathematik und Physik gleichermaßen sprachen. Die heute geläufige Unterscheidung einer Geometrie als Teilgebiet der Mathematik von einer anderen als Teilgebiet der Physik wäre unverständlich gewesen. Für diesen Raum und damit für die Geometrie galten die Axiome Euklids (um 365-um 300 v.Chr.):

- Gefordert soll sein:
1. Daß man von jedem Punkt nach jedem Punkt eine gerade Strecke ziehen kann,
 2. Daß man eine begrenzte gerade Linie zusammenhängend gerade verlängern kann,
 3. Daß man mit jedem Mittelpunkt und Abstand den Kreis zeichnen kann,
 4. Daß alle rechten Winkel einander gleich sind,
 5. Und daß, wenn eine gerade Linie beim Schnitt mit zwei geraden Linien bewirkt, daß innen auf derselben Seite entstehende Winkel zusammen kleiner als zwei Rechte werden, dann die zwei geraden Linien bei Verlängerung ins Unendliche sich treffen auf der Seite, auf

der die Winkel liegen, die zusammen kleiner als zwei Rechte sind.
(Euklid, Die Elemente, 2f.)

Das fünfte Axiom, das sogenannte Parallelenpostulat, stand seit langem unter dem Verdacht, beweisbar zu sein und deshalb nicht zu den Axiomen der Geometrie zu gehören. Seit dem Ende des 18. Jahrhunderts wurde versucht, Widerspruchsbeweise zu führen, die sämtlich scheiterten, die aber zugleich Raum für die Idee schufen, daß eine Geometrie ohne Parallelen möglich sei. Um 1830 wurden die ersten hyperbolischen Geometrien vorgestellt, ab den siebziger Jahren des Jahrhunderts gelangen dann erste relative Widerspruchsfreiheitsbeweise. Mit dem Vorliegen der nicht-euklidischen Geometrien geriet die Berufung auf die Anschauung als Beweis- und Begründungsmittel in Schwierigkeiten. Bereits 1854 hatte Bernhard Riemann (1826-1866) in seinem postum veröffentlichten Habilitationsvortrag angemerkt:

Bekanntlich setzt die Geometrie sowohl den Begriff des Raumes, als die ersten Grundbegriffe der Construction im Raume als etwas Gegebenes voraus. Sie giebt von ihnen nur Nominaldefinitionen, während die wesentlichen Bestimmungen in Form von Axiomen auftreten. Das Verhältniss dieser Voraussetzungen bleibt dabei im Dunklen; man sieht weder ein, ob und in wie weit ihre Verbindung nothwendig, noch a priori, ob sie möglich ist. (Riemann 1867, 272)

Der Raum war fortan nicht mehr apriorisch gegeben, sondern die Räume der Mathematik entstanden als Schöpfungen der Mathematiker. (Vgl. Mehrten 1990, 44-54)

Unter dem Stichwort: »Geometrie und Anschauung« konnte Hans Hahn 1933 eine ganze Reihe weiterer Beispiele anführen, in denen die Anschauung völlig versagt. Die Grundlagenkrise der Mathematik (und der Physik) stellte sich für ihn als »Die Krise der Anschauung« und damit als die Krise der von Kant entwickelten Begründung der Mathematik dar. Denn nicht nur die Geometrie hatte sich als logisches Konstrukt erwiesen, sondern auch die Arithmetik, für die postuliert worden war, sie beruhe auf der reinen, völlig exakten Anschauung der Zeit. Entgegen der These Kants gehöre die Arithmetik in den Bereich des Denkens, der Logik, wie vor allem Russell gezeigt habe. Kants Auffassung, daß die reinen Anschauungsformen von Raum und Zeit den apriorischen Rahmen bildeten, in den wir alle physikalischen Vorgänge, die uns die Erfahrung liefert, einordnen, somit jedes physikalische Ereignis seine ganz präzise, exakt feststehende Stelle in Raum und

Zeit habe, wurde von Hahn nicht nur im Hinblick auf die Mathematik, sondern ebenso auf die zeitgenössische Physik als in jeder Hinsicht widerlegt angesehen. (Hahn 1933) Auch Cassirer hielt fest, daß die moderne Mathematik vor allem wegen der Entdeckung der nicht-euklidischen Geometrien eher Leibniz als Kant folge. »Sie beruft sich auf die Anschauung nicht mehr als positives Beweis- und Begründungsmittel; sondern sie gebraucht sie nur, um eine konkrete Repräsentation der allgemeinen Relationszusammenhänge zu geben, die sie im reinen Denken aufbaut.« (Cassirer 1929, 423)

4.2.2 Die logizistische Begründung der Mathematik

Den Vertretern des Logizismus ging es darum, alle Begriffe der Mathematik auf logische Begriffe zurückzuführen. Dazu gehört auch die Ableitung der natürlichen Zahlen aus der Logik. Die vorausgesetzten logischen Begriffe sind die der Aussagen- und Prädikatenlogik. Im Gegensatz zur formalistischen Methode sollen die Zahlen konstruiert und nicht durch Axiome eingeführt werden. Innerhalb des Systems erfolgen die Ableitungen wie im Formalismus rein kalkülmäßig, das heißt ohne Berücksichtigung der Bedeutung der Begriffe. (Vgl. Carnap 1931a, 94, 104f.)

Das logizistische Begründungsprogramm wurde erstmals von Frege aufgestellt, der nach der Arithmetisierung der Algebra konsequent darauf hinwies, daß die Mathematik nun zwar als Lehre von den Zahlen erwiesen sei, daß in ihr aber völlig ungeklärt bleibe, was Zahlen sind und wie sie als Basis der Mathematik überhaupt eingeführt werden können. Freges Forschungsansatz knüpft an Ideen Leibniz' an. (Carnap 1930/31a, 298f.)¹⁸⁹ In der »Begriffsschrift« (1879) war es Frege gelungen, mittels der Definition des »Nachfolgers in einer Reihe« nach dem Vorbild Leibniz' alle natürlichen Zahlen als Nachfolger der Eins induktiv zu definieren. Als Konsequenz dieses Ansatzes hing die Sicherheit und Gültigkeit mathematischer Urteile nun

¹⁸⁹ Die Anknüpfung an Leibniz ist in der »Begriffsschrift« (1879) genau genommen weiter, als für die Begründungsfrage der Mathematik ausgeführt wird. Um seine Absicht von derjenigen George Booles (1815-1864) abzugrenzen, stellt Frege klar: »Der Zielpunkt meiner Bestrebungen ist eine *lingua characterica*, nicht ein auf reine Logik beschränkter *calculus*.« (Frege 1969, 13, Hervorhebungen im Original) Von hier aus entwickelt sich die Verknüpfung von Logik und Sprachanalyse, die über Freges Kontextprinzip »nach der Bedeutung der Wörter muss im Satzzusammenhange, nicht in ihrer Vereinzelung gefragt werden« (Frege 1884, X) zu Wittgenstein führt; vgl. hierzu besonders Schneider (1992, vor allem 143-254). Verena Mayer (1996, 50) weist deshalb zu Recht darauf hin, daß Darstellungen des Systems der »Begriffsschrift« rein als logischem Kalkül wie beispielsweise Franz von Kutschera (1989) zu kurz greifen.

vor allem vom Zahlbegriff ab. Ist der Zahlbegriff durch Erfahrung zu begründen, so ist es auch die Arithmetik. Ist er aber rein logisch einföhrbar wie die Beziehung zwischen Vorgänger und Nachfolger, so basiert die Arithmetik auf Logik. In diesem Fall sind auch ihre Gesetze nicht empirisch und damit möglicherweise kontingent, sondern sie gelten unbedingt und notwendig. Frege zog die zweite Alternative vor und begründete von ihr ausgehend das logizistische Programm in kritischer Abgrenzung sowohl von Kant, als auch vom zeitgenössischen »Psychologismus«, demzufolge die Elemente eines Urteils je subjektiv gegebene Vorstellungen waren. Stattdessen postulierte er die objektive, zeitlose Existenz von Zahlen und damit der Mathematik. Er war deshalb auf ein nicht nur logisches, sondern zugleich platonistisches Konzept festgelegt. In der Einleitung zu den »Grundlagen« schreibt Frege:

Als Grundsätze habe ich in dieser Untersuchung folgende festgehalten:

es ist das Psychologische von dem Logischen, das Subjective von dem Objectiven scharf zu trennen;

nach der Bedeutung der Wörter muss im Satzzusammenhange, nicht in ihrer Vereinzelung gefragt werden;

der Unterschied zwischen Begriff und Gegenstand ist im Auge zu behalten. (Frege 1884, X)

Nach dem zweiten Grundsatz ging es Frege darum, den Zahlbegriff durch eine Analyse der Zahlurteile zu definieren, also Sätze, in denen Zahlen auftreten, logisch zu untersuchen. So ergibt etwa die Analyse des Satzes: »Die Zahl Eins ist ein Ding«, daß die Definition falsch ist, sofern unter »Ding« ein raum-zeitlicher Gegenstand verstanden wird. Begreift man den Satz so, daß er aus der Funktion »ist ein Ding« und dem Argument »die Zahl Eins« besteht, erlangt man die Antwort, daß »Eins« ein beliebiger Gegenstand ist. Derselbe Satz würde dann »für Verschiedene Verschiedenes bedeuten; es gäbe keinen gemeinsamen Inhalt solcher Sätze«. (Frege 1884, I) In Anwendung dieses Prinzips beginnt Frege also mit der Untersuchung arithmetischer Sätze und erst auf sie folgt die Untersuchung des Begriffs der »Anzahl«. Nach dem zweiten Grundsatz unterscheidet er, vereinfacht gesagt, zwischen Eigennamen und Begriffen und zeigt, daß Zahlen je nach ihrem Gebrauch beiden Kategorien angehören können. »Die Zahl Eins« ist in seiner Sicht eine Verwendung als Eigenname, »eine natürliche Zahl« eine als Begriff. Hinsichtlich eines Begriffs ist zu fragen, wieviele Gegenstände und

von welcher Art »unter ihn fallen«. Was unter einen Begriff fällt, hat »Merkmale«. So hat der Begriff »rechtwinkliges Dreieck« das Merkmal »rechtwinklig«, das eine Eigenschaft der unter ihn fallenden Gegenstände ist, während der Begriff »rundes Viereck« die »Eigenschaft« hat, daß nichts unter ihn fällt. Existenz ist somit für Frege keine Eigenschaft von Gegenständen, sondern von Begriffen. Umgesetzt in die von ihm entworfene Begriffsschrift, hat dies zur Folge, daß manche Probleme von vornherein nicht korrekt notiert werden können und sich bereits dadurch als Scheinprobleme erweisen.

Das bisher Dargestellte wurde von Frege zur Klärung, was »Anzahl« bedeute, genutzt. Auch hier setzt er mit der Analyse von Sätzen ein. Er wiederholt: »Um Licht in die Sache zu bringen, wird es gut sein, die Zahl im Zusammenhange eines Urtheils zu betrachten, wo ihre ursprüngliche Anwendungsweise hervortritt.« (Frege 1884, 59) und fährt fort:

Wenn ich in Ansehung derselben äussern Erscheinung mit derselben Wahrheit sagen kann: »dies ist eine Baumgruppe« und »dies sind fünf Bäume« [...], so ändert sich dabei weder das Einzelne noch das Ganze, das Aggregat, sondern meine Benennung. Das ist aber nur das Zeichen der Ersetzung eines Begriffes durch einen andern. Damit wird uns [...] nahe gelegt, dass die Zahlangabe eine Aussage von einem Begriffe enthalte. Am deutlichsten ist dies vielleicht bei der Zahl 0. Wenn ich sage: »die Venus hat 0 Monde«, so ist gar kein Mond oder Aggregat von Monden da, von dem etwas ausgesagt werden könnte; aber dem *Begriffe* »Venusmond« wird dadurch eine Eigenschaft beigelegt, nämlich die, nichts unter sich zu befassen. (Frege 1884, 59, Hervorhebung im Original)

Im weiteren definiert Frege Anzahl über die Gleichzahligkeit. Gruppen von Dingen sind gleich im Hinblick auf die Anzahl ihrer Elemente, wenn sie sich einander eineindeutig zuordnen lassen. Er wechselt dann von den Begriffen zu den Begriffsumfängen, das heißt, er faßt Begriffe extensional als Klasse von Gegenständen auf. Die Anzahl, die einem Begriff zukommt, ist die Klasse aller gleichzahligen Begriffe. Die Definition der Zahl ist nach der Definition des Begriffs »Anzahl« einfach. Denn da nichts sich selbst ungleich ist, fällt unter den Begriff »sich selbst ungleich« kein Gegenstand. Über ihn wird deshalb die Null definiert. Ist dies geschehen, läßt sich die Eins definieren als Umfang des Begriffs »gleichzahlig dem Begriff »sich

selbst ungleich«, denn einzig und allein ein Gegenstand, die Null, fällt unter diesen Begriff.

Die Behauptung der Logizität dieses Ansatzes knüpft wieder an Leibniz an. Leibniz hatte die Identität von Gegenständen als Ununterscheidbarkeit bestimmt, was nichts anderes heißt, als daß jeder Gegenstand mit sich selbst identisch ist, die Kennzeichnung eines Gegenstands als »sich selbst ungleich« entbehrt daher jeden Inhalts, ist also eine rein formale logische Bestimmung. Frege schließt an die Definition der Anzahl eine Bemerkung an, die gleichermaßen vorsichtig und programmatisch ist:

Ich erhebe nicht den Anspruch, die analytische Natur der arithmetischen Sätze mehr als wahrscheinlich gemacht zu haben, weil man immer noch zweifeln kann, ob ihr Beweis ganz aus rein logischen Gesetzen geführt werden könne, ob sich nicht irgendwo ein Beweisgrund andrer Art unvermerkt einmische. Dies Bedenken wird auch durch die Andeutungen nicht vollständig entkräftet, die ich für den Beweis einiger Sätze gegeben habe; es kann nur durch eine lückenlose Schlusskette gehoben werden, sodass kein Schritt geschieht, der nicht einer von wenigen als rein logisch anerkannten Schlussweisen gemäß ist. (Frege 1884, 102)

Frege erwartete nicht wirklich, daß sein Ansatz ins Wanken geraten könnte. Im ersten Band der »Grundgesetze der Arithmetik«, mit denen er das logizistische Programm abschließen wollte, heißt es explizit: »Und nur das würde ich als Widerlegung anerkennen können, wenn jemand durch die That zeigte, dass auf andern Grundüberzeugungen ein besseres, haltbareres Gebäude errichtet werden könnte, oder wenn mir jemand nachwiese, dass meine Grundsätze zu offenbar falschen Folgesätzen führten. Aber das wird Keinem gelingen.« (Frege 1893, XXVI) Neun Jahre später, wenige Monate vor dem Erscheinen des zweiten Bandes der »Grundgesetze«, war das Unerwartete geschehen. Am 16. Juni 1902 teilte Russell – den Frege bis dahin nicht kannte – ihm brieflich mit, er sei in einem Punkt nicht seiner Auffassung. Frege hatte, wie oben dargestellt, den Begriff der Anzahl umfangslogisch bestimmt, den Begriff des Begriffsumfangs dabei aber stillschweigend vorausgesetzt. Die Annahme, Begriffsumfänge könnten als gegeben betrachtet werden, versuchte er später durch Wertverläufe zu stützen, die nun ihrerseits als logische Gegenstände ausgewiesen werden mußten.

In den »Grundgesetzen« führte Frege drei wichtige Neuerungen ein:

1. die Auffassung des Begriffs als einstellige Funktion erster Stufe mit ausschließlich Wahrheitswerten als Werten, 2. die Zuordnung eines »Wertverlauf« genannten Gegenstands zu jeder einstelligen Funktion erster Stufe, von der Art, daß die Wertverläufe von Begriffen gerade deren Umfänge sind, und 3. die Erklärung der Gleichheit von Wertverläufen (also insbesondere von Begriffsumfängen) durch das berühmte Grundgesetz V (mit der Notation $\epsilon\Phi(\epsilon)$ oder $\alpha\Phi(\alpha)$ für den Wertverlauf einer Funktion $\Phi(\xi)$):

$\epsilon f(\epsilon) = \alpha g(\alpha) \Leftrightarrow$ für alle Gegenstände a : $f(a) = g(a)$.

(Thiel 1988, XXf.)

Nach dem fünften Axiom haben zwei Begriffe dann gleichen Umfang, wenn jeder Gegenstand, der unter einen von beiden fällt, ebenfalls unter den anderen fällt und umgekehrt. Verallgemeinert für Funktionen heißt das, zwei Funktionen haben dann den gleichen Wertverlauf, wenn sie für jedes Argument den gleichen Wert aufweisen. Jeder Begriff (auch der leere) hat einen Umfang und aus dem Axiom läßt sich keine Einschränkung dafür ableiten, welche Gegenstände zulässig sind. Das führt dann zu einer Antinomie, wenn der zu einem Begriff gebildete Wertverlauf beziehungsweise Begriffsumfang, der ja ein Gegenstand im Sinne Freges ist, selbst in die Argumentstelle der Funktion beziehungsweise des Begriffs eingesetzt wird. Jetzt kann nämlich gefragt werden, ob ein Begriffsumfang unter den Begriff fällt, dessen Umfang er ist. Genau an diesem Punkt hakte Russell ein:

Sei ω das Prädicat, ein Prädicat zu sein[, – sic!] welches von sich selbst nicht prädicirt werden kann. Kann man ω von sich selbst prädicieren? Aus jeder Antwort folgt das Gegentheil. Deshalb muß man schliessen[, – sic!] dass ω kein Prädicat ist. Ebenso giebt [sic!] es keine Klasse (als Ganzes) derjenigen Klassen[, – sic!] die als Ganze sich selber nicht angehören. Daraus schliesse ich[, – sic!] dass unter gewissen Umständen eine definierbare Menge kein Ganzes bildet. (Russell 1902, 59)

Frege sah in Russells Vorschlag, Typen von Werteverläufen in Analogie zu den Typen von Funktionen einzuführen, der in der von ihm und Whitehead aufgestellten Typentheorie mündete, keine Lösung, weil dieser Vorschlag seinem methodischen Prinzip, keine willkürlichen Definitionen einzuführen, widersprach. 1924 zog er den Schluß: »Meine Anstrengungen, über das ins Klare zu kommen, was man Zahl nennen will, haben zu einem Misserfolg

geführt.« (Frege 1924, 283) Ungeachtet des von ihm gesehenen Scheiterns des mengentheoretischen Aufbaus der Mathematik, forderte Frege noch lange deren logizistische Begründung. Welche alternative Lösung zur Mengenlehre er für den Aufbau der Mathematik anstrebte, ist dabei unklar. In seinen späteren Arbeiten befaßte er sich verstärkt mit semantischen und auf den sprachlichen Kontext bezogenen Aspekten, sie weisen viele Berührungspunkte mit Wittgenstein auf.¹⁹⁰

Zunächst unabhängig von Frege, später in Bezugnahmen auf seine Arbeiten, verfolgten auch Russell und Whitehead den logizistischen Ansatz, und erst nachdem Russell die Fregesche zweidimensionale Notation durch die Peircesche Notation ersetzt hatte, wurden Freges Ansatz und seine Bedeutung in der wissenschaftlichen Gemeinschaft langsam wahrgenommen, allerdings weniger von Mathematikern als von Logikern.¹⁹¹ Wenngleich Forscher wie zum Beispiel Gödel bemängelten, daß Russell und Whitehead begrifflich unpräziser seien als Frege, wurde deren »Principia Mathematica« zum paradigmatischen Beispiel für den Logizismus in der Debatte um die Grundlegung der Mathematik. Im entfalteten logizistischen Ansatz wird eine zentrale These vertreten, die sich in zwei Teilthesen aufspalten läßt:

1. Die mathematischen *Begriffe* sind aus den logischen Begriffen ableitbar, und zwar durch explizite Definitionen; 2. die mathematischen *Sätze* sind aus den logischen Grundsätzen ableitbar, und zwar durch rein logische Deduktion. (Carnap 1931a, 91f., Hervorhebung im Original)

Hinsichtlich der ersten Teilthese gelten Negation und Implikation, die Quantoren und die Identität für die Definition aller mathematischen Begriffe als hinreichend. Ausgehend von dem zu dieser Zeit vorliegenden Ergebnis mathematischer Untersuchungen über die Abhängigkeit von Begriffen, daß nämlich alle Begriffe der Arithmetik auf die natürlichen Zahlen zurückgeführt werden können, wurde die Ableitung der natürlichen Zahlen aus logischen Begriffen zur nächstliegenden Aufgabe im logizistischen Programm. (Carnap 1931a, 92) Nach Freges Auffassung kann die Zahl weder als durch die Anschauung gegeben, noch als apriorischer Begriff aufgefaßt werden. Zahlen sind für ihn Größen, und Größe ist ein Begriff, der definiert werden

¹⁹⁰ Neben Russell ist Frege der von Wittgenstein im »Tractatus« am häufigsten genannte und am intensivsten diskutierte Autor, die beiden korrespondierten miteinander und Wittgenstein suchte Frege auf.

¹⁹¹ Aufmerksamkeit für Freges Werk erzielte Russell zunächst durch den Anhang über Frege in »Principles of Mathematics« (Russell 1903).

muß. Die Definition von Größe erfolgt durch Messung. Messen heißt, festzustellen, ob ein Gegenstand unter den fraglichen Größenbegriff subsumiert ist, und festzustellen, wieviele Einheiten der Größe der Gegenstand umfaßt. Zahl ist, da Größe, ein Begriff, Begriffe sind Aussagefunktionen und folglich sind Zahlen einstellige Aussagefunktionen, also Prädikate. Die Argumentwerte dieser Prädikate sind ebenfalls Prädikate. Eine Zahl sagt etwas über einen Begriff aus, sie ist Eigenschaft eines Begriffes, genauer seine Umfangseigenschaft und damit wird Zahl als Anzahl definiert. Frege schreibt: »[...] die Anzahl, welche dem Begriffe F zukommt, ist der Umfang des Begriffes »gleichzahlig dem Begriffe F« (Frege 1884, 79f.) Der Sachverhalt, daß einem bestimmten Begriff eine bestimmte Anzahl zukommt, ist eine rein formale Bestimmung dieses Begriffs, die wie gefordert allein mit Hilfe von logischen Begriffen ausgedrückt werden kann:

Z.B. bedeutet der Satz »dem Begriff b kommt die Anzahl 2 zu« nichts anderes als: »es gibt etwas, das unter den Begriff b fällt, und noch etwas anderes, das unter den Begriff b fällt, und sonst nichts, das unter den Begriff b fällt«. Dieser Satz verwendet nur logische Begriffe, und zwar die folgenden: »es gibt...« (Existenz); »der Gegenstand a fällt unter den Begriff b«; die Und-Verknüpfung zwischen Sätzen; Identität; Negation (x ist etwas anderes als y : x ist nicht identisch mit y). (Carnap 1930/31a, 299)

Neben der Definition von Zahlen durch Anzahl können auch die arithmetischen Operationen leicht definiert werden, »z.B. die Addition zweier Zahlen mit Hilfe der Disjunktion zweier sich ausschließender Begriffe. Ferner wird der Begriff der natürlichen Zahl selbst abgeleitet.« (Carnap 1931a, 93) Die Ableitung anderer Zahlenarten geschieht nicht durch Anfügen eines neuen Teilgebiets zu dem alten, stattdessen wird jeder Bereich eigenständig konstruiert. Das hat zur Folge, daß zum Beispiel die natürlichen Zahlen nicht als Teilmenge der Brüche aufgefaßt werden, sondern daß zwischen ihnen nur bestimmte Zuordnungen bestehen. Die natürliche Zahl 3 und der Bruch $3/1$ sind demnach nicht identisch. (Carnap 1931a, 93) Schwierigkeiten ergaben sich jedoch bei der Ableitung der reellen Zahlen, weil hier imprädikative¹⁹² Begriffe Antinomien hervorriefen, deren typentheoretische Lösung die – unerwünschte – Folge hat, daß kein Satz gebildet werden kann, der sich

¹⁹² Der Begriff der imprädikativen Begriffsbildung wurde von Henri Poincaré eingeführt, der darunter die Definition einer Klasse durch Bezugnahme auf einen Bereich von Objekten, zu denen die Klasse selbst gehört, faßt. (Poincaré 1910, 43-48)

auf alle reellen Zahlen bezieht. Zentrale Sätze und Definitionen der Theorie der reellen Zahlen würden dadurch unzulässig; dies zu umgehen, gelang Russell nach dem Scheitern seines »Reduzibilitätsaxioms« nicht.

Mit dem 1908 unter der Nummer *12.1 in die *Principia Mathematica* aufgenommenen Axiom behauptete Russell, daß zu einer beliebigen einstelligen »propositional function« (Aussagefunktion) P eine äquivalente prädikative Aussagefunktion Q vorhanden sei. In der verzweigten Typentheorie ist ein einstelliges Prädikat dann prädikativ, wenn seine Ordnung um 1 höher ist als die des Arguments. Die P definierende Aussagefunktion darf demnach keine gebundene Variable enthalten, deren Ordnung die des Arguments von P übersteigt. Diese Festlegung führt aber dazu, daß es in der verzweigten Typentheorie nicht möglich ist, über alle Prädikate eines Individuums zu sprechen, sondern nur über alle Prädikate der Ordnung $\leq n$ für ein gegebenes n .

Obwohl Russells Bemühung scheiterte, hob Carnap den theoretisch-methodischen Wert des logizistischen Ansatzes hervor:

Das Wesentliche an der angedeuteten logizistischen Methode der Einführung der reellen Zahlen ist, daß hier diese Zahlen *nicht postuliert*, sondern *konstruiert* werden. Es wird nicht durch Postulate oder Axiome die Existenz von Gebilden angesetzt, die die Eigenschaften der reellen Zahlen haben, sondern es werden durch explizite Definitionen logische Gebilde konstruiert, die auf Grund dieser Definitionen diejenigen Eigenschaften haben, die man in der Arithmetik den reellen Zahlen beizulegen pflegt. Eine Begriffsbildung ist nicht eine Erschaffung, sondern nur eine Namengebung für etwas, das als vorhanden schon nachgewiesen sein muß; es gibt keine »schöpferischen Definitionen«. Diese *konstruktivistische* Auffassung gehört zu den Grundtendenzen des Logizismus. (Carnap 1931a, 94, Hervorhebungen im Original)

Der Bezug auf Freges »Grundgesetze der Arithmetik« ist hier leicht zu sehen, dort heißt es im Vorwort: »Wenn wir überhaupt aus dem Subjectiven herauskommen wollen, so müssen wir das Erkennen auffassen als eine Thätigkeit, die das Erkannte nicht erzeugt, sondern das schon Vorhandene ergreift. Das Bild des Ergreifens ist recht geeignet, die Sache zu erläutern. [...] Und es ist wesentlich für das Ergreifen, dass etwas da ist, was ergriffen wird; die innern Veränderungen allein sind das Ergreifen nicht. So besteht auch das, was wir geistig erfassen, unabhängig von dieser Thätigkeit [...]« (Frege

1893, XXIV) Ebensowenig ist aber auch die von Carnap vorgenommene Verschiebung zu übersehen, denn während Carnap hier das konstruktive Moment hervorhebt und lediglich das Vorhandensein des Bezeichneten im arithmetischen Sinne fordert, qualifiziert Frege dieses Vorhandensein realistisch als Vorhandensein objektiver Gegenstände. Er knüpft dabei wohl an eine Stelle in Platons Dialog »Euthydemos« an, an der von den »Meßkünstlern«, »Rechnern« und »Sternkundigen« gesagt wird, sie seien Jägere, »weil sie ja ihre Figuren und Zahlenreihen nicht machen, sondern diese sind schon, und sie finden sie nur auf, wie sie sind«. (Platon, Euthydemos 290b, c)

Hinsichtlich der zweiten Teilthese stieß der Logizismus von Anfang an auf erheblich größere Schwierigkeiten. Manche Sätze der Arithmetik und Mengenlehre erforderten zu ihrem Beweis weitere Axiome. Zu nennen ist zum einen das »Unendlichkeitsaxiom«, es besagt, daß es zu jeder natürlichen Zahl eine größere gibt; zum anderen das »Auswahlaxiom«, es besagt, »daß es zu jeder Menge von elementfremden, nicht leeren Mengen, (mindestens) eine Auswahlmenge gibt, das heißt eine solche, die mit jeder der Elementmengen genau ein Element gemein hat.« (Carnap 1931a, 95) Es liegt auf der Hand, daß beide Axiome Existenzannahmen sind, und wenn der Gegenstand der Logik nur mögliche Formen sind, dann kann Logik keine Aussagen darüber treffen, was existiert oder nicht. Russells Lösungsvorschlag für das Problem bestand darin, die Existenzsätze relativ zu interpretieren und in Bedingungssätze umzuformen. Wenn Gebilde im Sinne der Axiome existieren, dann existieren auch andere mathematische Gebilde, die sich aus jenen logisch ergeben. Zu diesen beiden Axiomen trat ein drittes hinzu, das »Reduzibilitätsaxiom«.

Russell hatte zur Beseitigung der Antinomien der Mengenlehre, darunter auch besonders der nach ihm benannten Antinomie, die Typentheorie vorgelegt. Deren wesentliche Regel besagt umgangssprachlich, daß jeder Begriff zu einem bestimmten Typus gehört und daß er sinnvoll nur auf Ausdrücke des nächstniederen Typus bezogen werden kann. Hinsichtlich einstelliger Funktionen sind folgende Typen gegeben: Zum Typus 0 eines Bereiches gehören die Namen der Gegenstände, mithin Individuen ($a, b, \dots$); zum Typus 1 gehören die Eigenschaften dieser Gegenstände ($f(a), g(a), \dots$); zum Typus 2 gehören die Eigenschaften der Eigenschaften ($F(f), G(f), \dots$), darunter die oben eingeführten Zahlen, etwa der Begriff $2(f)$ etc.

Daraus folgt, daß Sätze der Form $f(a)$, $F(f)$, $2(f)$ stets sinnvoll sind,

nämlich entweder wahr oder falsch; dagegen sind Verbindungen wie $f(g)$, $f(F)$ weder wahr noch falsch, sondern sinnlos. Insbesondere sind hiernach auch Ausdrücke wie $f(f)$ oder $\sim f(f)$ sinnlos; das heißt man kann von einer Eigenschaft weder mit Sinn aussagen, sie komme sich selbst zu, noch, sie komme sich selbst nicht zu. Diese letztere Konsequenz ist, wie wir sehen werden, von Bedeutung für die Ausschaltung der Antinomien. (Carnap 1931a, 96f.)

In dieser Form wurde die einfache Typentheorie weitgehend akzeptiert, aber Russell legte eine verschärfte Form, die verzweigte Typentheorie, vor. In ihr wird jeder Typ nochmals in verschiedene »Ordnungen« unterteilt. Diese zusätzliche Unterteilung hatte keinen Bezug auf die Art der Gegenstände, für die jeweils bestimmte Eigenschaften gelten, sondern nahm Bezug auf die Form, mit der die entsprechenden Definitionen eingeführt wurden. »Die Folge der Aufstellung der verzweigten Typentheorie war, daß beim Aufbau der Mathematik, besonders in der Theorie der reellen Zahlen, gewisse Schwierigkeiten auftraten: Viele der grundlegenden Sätze ließen sich nicht nur nicht beweisen, sondern überhaupt nicht aussprechen.« (Carnap 1931a, 97) Das »Reduzibilitätsaxiom« wurde von Russell eingeführt, um die erwünschten Beweise trotzdem erhalten zu können. Mit Hilfe des Axioms meinte Russell, die verschiedenen Ordnungen eines Typs auf die niedrigste Ordnung dieses Typs reduzieren zu können. Nach Carnap bestand die einzige Begründung Russells darin, keinen Ausweg aus den aufgetretenen Schwierigkeiten zu kennen. Unter der Kritik Wittgensteins, daß das sogenannte Reduzibilitätsaxiom nicht tautologisch sei (TLP 6.03-6.127, besonders 6.123-6.1233), gab Russell im Jahr 1925 bei der zweiten Auflage der »Principia Mathematica« das Axiom ratlos auf. (Carnap 1931a, 97) Nun ist bekanntlich jeder Satz der Logik eine Tautologie, also allein aufgrund seiner Form wahr, und zwar unabhängig davon, ob die Argumentsätze wahr oder falsch sind. Nach der logizistischen These müßte dies auch für die Sätze der Mathematik zutreffen, das ist aber weder hinsichtlich des Unendlichkeitsaxioms, noch hinsichtlich des Auswahlaxioms der Fall. Das erste gilt lediglich für bestimmte Individuenbereiche, und das zweite gilt nicht allein aufgrund seiner Form, wenn »unter der ›Existenz‹ der Auswahlklasse nicht nur Widerspruchsfreiheit dieser Annahme, sondern ihre konstruktive Aufweisbarkeit verstanden wird, [...] seine Gültigkeit hängt davon ab, was für Satzfunktionen in dem betreffenden Denkbereich als gegeben gelten, und wel-

che Konstruktionsprinzipien zur Ableitung weiterer Satzfunktionen (und damit Klassen) aufgestellt werden.« (Carnap 1930/31a, 306)

Über das Reduzibilitätsaxiom brauchte im übrigen nicht weiter debattiert zu werden, denn im Jahr 1926 konnte Frank Plumpton Ramsey (1903-1930) unter dem Einfluß von Wittgenstein zeigen, daß die verzweigte Typentheorie im Ganzen entbehrlich ist. Ramsey wies nach, daß die logischen Antinomien, zu deren Beseitigung Russell die verzweigte Typentheorie aufgestellt hatte, in zwei Teilklassen aufgespalten werden können: Erstens, in logische Antinomien im engeren Sinn; sie sind in logischen Zeichen darstellbar und können bereits mit der einfachen Typentheorie eliminiert werden, denn Sätze wie »eine Eigenschaft kommt sich selbst nicht zu« ($\sim f(f)$) sind sinnlos. Zweitens, in »semantische« oder »epistemologische« Antinomien; hierzu gehören Fragen wie die, ob das Eigenschaftswort »heterologisch« selbst heterologisch sei, oder die nach der kleinsten natürlichen Zahl, die nicht mit weniger als 100 Buchstaben definiert werden kann. Für diese zweite Teilklassse von Antinomien zeigt Ramsey, daß sie in der symbolischen Sprache der Logik gar nicht ausdrückbar sind, sondern nur in natürlichen Sprachen auftauchen. Hieraus schloß er, daß sie beim Aufbau von Logik und Mathematik nicht berücksichtigt zu werden brauchen. (Ramsey 1926)

Wenngleich damit das Problem der logischen Antinomien ohne die verzweigte Typentheorie lösbar geworden war, blieb ein zweiter Grund, der Russell zur Aufstellung seiner Theorie bewogen hatte, noch zu entkräften. Dieser zweite Grund war das *circulus-vitiosus*-Prinzip. Es besagt, daß keine Gesamtheit Glieder enthalten könne, die nur mit Hilfe dieser Gesamtheit definiert werden können. Nicht zugelassen werden also imprädikative Begriffsbildungen. Ein bereits von Russell und Carnap diskutiertes Beispiel kann die Relevanz des Problems verdeutlichen:

Eine Zahl heiße »induktiv«, wenn sie alle erblichen Eigenschaften der Null besitzt. Eine Eigenschaft heiße »erblich« wenn sie, sobald sie einer Zahl n zukommt, stets auch der nächstfolgenden Zahl $n + 1$ zukommt. Im Definiens kommt der Teilausdruck »für alle Eigenschaften (von Zahlen)« vor. Zu allen Eigenschaften gehört auch die Eigenschaft »induktiv«, somit kommt die zu definierende Eigenschaft selbst schon in versteckter Weise im Definiens vor. Die Sinnlosigkeit des imprädikativ definierten Begriffs macht der Einzelfall besonders deutlich.

Um etwa zu prüfen, ob die Zahl Drei induktiv ist, muß nach Definition untersucht werden, ob jede Eigenschaft, die erblich ist und die

der Null zukommt, auch der Drei zukommt. Wenn ich dies für jede Eigenschaft untersuchen muß, so auch für die Eigenschaft »induktiv«, die ja auch eine Eigenschaft von Zahlen ist. Ich muß also, um festzustellen, ob die Zahl Drei induktiv ist, unter anderem auch feststellen, ob die Eigenschaft »induktiv« erblich ist, ob sie der Null zukommt, und schließlich – und das ist der springende Punkt –, ob sie der Drei zukommt. Das aber würde bedeuten, daß die Feststellung überhaupt nicht möglich ist. (Carnap 1931a, 100)

Russell hatte versucht, auch diesem Problem durch die verzweigte Typentheorie zu entgehen, denn in ihr mußte statt »für alle Eigenschaften« geschrieben werden, »für alle Eigenschaften 1. Ordnung« usw. Die Eigenschaft »induktiv« wird dann zur Eigenschaft erster Ordnung, das Verbot der imprädikativen Begriffsbildung läßt sich einhalten. Der Satz »eine Zahl heißt »induktiv«, wenn sie alle erblichen Eigenschaften erster Ordnung, die der Null zukommen, besitzt« ist sinnvoll. Da der Ausdruck »für alle Eigenschaften« ohne Bezug auf eine bestimmte Ordnung nicht mehr zulässig war, rief Russells Lösung des *circulus-vitiosus*-Problems allerdings neue Schwierigkeiten herauf. Denn nun war kein Satz und Ausdruck mehr zugelassen, der sich auf alle reellen Zahlen bezog, wovon wichtige Begriffsbildungen und Sätze der Theorie der reellen Zahlen betroffen waren. Carnap wertete die so entstandene Zwickmühle in seinem Vortrag in Königsberg im Jahr 1930, das heißt vor dem Erscheinen der Arbeit Gödels, so:

Hier liegt das *schwierigste Problem*, das die Aufgabe der Grundlegung der Mathematik gegenwärtig bietet: Wie ist die Logik zu gestalten, wenn einerseits die Gefahr der Sinnlosigkeit imprädikativer Begriffsbildungen vermieden werden soll, andererseits aber die Theorie der reellen Zahlen als Klassen (oder Eigenschaften) von Brüchen in befriedigender Weise aufgebaut werden soll? (Carnap 1931a, 101, Hervorhebung im Original)

Eine Lösung des Problems hatte Ramsey (1926) vorgeschlagen, er erklärte den Zirkel für unbedenklich und ließ imprädikative Begriffsbildungen zu. Er konnte dies aber nur, indem er eine Gesamtheit unendlich vieler an sich schon existierender Eigenschaften postulierte, von denen nicht jede von Menschen als endlichen Wesen bezeichnet werden könne, so daß wir gezwungen seien, uns von Fall zu Fall auf die Gesamtheit aller Eigenschaften zu beziehen. Ramsey verließ mit seinem Vorschlag eines quasi platonischen

Reichs der Ideen und seinem Hinweis auf eine empirisch-anthropologische Gegebenheit den strengen Argumentationsrahmen des Logizismus, wie er von Carnap vertreten wurde, während zum Beispiel Russell und erst recht Frege immer eine Nähe zum Platonismus besaßen. Carnap, der diesen Teil des Denkens Freges gern zu Gunsten der logisch-konstruktiven Züge unberücksichtigt ließ, forderte, die Schranken des »wirklich Erkennbaren und Definierbaren« zu respektieren, und sah die »erbärmliche Notwendigkeit«, »jedes Gebilde in schrittweisem Fortgang konstruieren zu müssen«. Gegen Ramsey betonte er, er glaube, »wir müssen an der Auffassung *Freges* festhalten, daß auch in der Mathematik nur das als vorhanden angenommen werden darf, dessen Existenz bewiesen ist, und das bedeutet: mit endlich vielen Schritten bewiesen ist. Darin möchte ich den Intuitionisten zustimmen: Die Endlichkeit jeder logisch-mathematischen Operation, jedes Beweises und jeder Definition, ist nicht zu fordern wegen eines zufälligen empirischen Faktums, das den Menschen betrifft, sondern gehört zum Wesen der Sache.« (Carnap 1931a, 102, Hervorhebung im Original) Carnap selbst arbeitete ebenfalls an einer Lösung des Problems, die imprädikative Eigenschaften zulassen sollte. Mit dem Erscheinen der Arbeit Gödels »Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme« (1931) erledigte sich allerdings auch dieser Versuch, denn ein Entscheidungsverfahren für das Vorliegen oder Nichtvorliegen imprädikativer Eigenschaften wäre allenfalls denkbar, wenn die Logik ein entscheidungsdefinites System wäre.

4.2.3 Die intuitionistische Kritik

Die Vertreter des Intuitionismus knüpften an Kontroversen, die Dedekind und Cantor mit Leopold Kronecker (1823-1891) hatten, an. Kronecker arbeitete an einer konstruktiven, algebraischen Zahlentheorie, die stark an tatsächlich ausführbaren Berechnungen orientiert war und auf den natürlichen Zahlen aufbaut. Zwei Thesen Kroneckers waren für den Intuitionismus besonders wichtig. Die eine hieß, die ganze Zahl und das Rechnen mit ihr sei intuitiv begründet; die andere, daß das logische Schließen nicht notwendig mathematische Wahrheiten, das heißt hier, Sätze mit intuitivem Sinn, liefere. (Menger 1930/31, 312) Zwar bedarf es nach seinem Verständnis der philosophischen Fundierung der Grundeigenschaften der Begriffe von Zahl, Zeit und Raum, aber dabei entwickelte Prinzipien werden als

normativ und regulierend verstanden; sie sind vorausgesetzt, bevor die einzelwissenschaftliche Behandlung in der Mathematik erfolge. Unter Berufung auf Gauß faßte er Zahlen als geistige Produkte auf, Raum und Zeit als Gegenstände von Geometrie und Mechanik hätten hingegen eine empirische Realität. Die Mathematik, das heißt hier die Arithmetik war für Kronecker demnach keine empirische Wissenschaft, sondern ein exaktes Konstrukt. (Vgl. Mehrtens 1990, 192ff.) Er geriet dadurch in eine kritische Position zu Dedekind, der Definitionen auf der Basis bloßer Postulate – Existenz der »Punkte« als Grundlage für den Aufbau der reellen Zahlen – und unter Verwendung aktual unendlicher Mengen – alle Punkte der Geraden – einführte (vgl. Dedekind 1872),¹⁹³ die nämlich im Sinne der ersten These nicht konstruktiv eingeführt werden können. Zuzufolge der zweiten These erhärtete sich die Kritik an Dedekind, Cantor und anderen wegen deren Beweisverfahren. Nach Kronecker war es zum Beweis eines mathematischen Satzes unzureichend, dessen Negat als widerspruchsvoll zu erweisen. »Vielmehr sei ein *Verfahren* erforderlich, welches die Erlangung des Resultates mit Hilfe endlichvieler [sic!] arithmetischer Operationen gestattet, und dieses Verfahren sei das wesentliche des Beweises.« (Menger 1930/31, 312, Hervorhebung im Original)

Ein zweiter Mathematiker, auf den sich die Intuitionisten beriefen, war der Konventionalist Henri Poincaré. Poincaré hatte vorgeschlagen, das als Beweismittel in der Mathematik längst bekannte Prinzip der vollständigen Induktion als den Ausgangspunkt des Mathematischen zu nehmen und es als *das* konstruktive Verfahren für den Aufbau der Mathematik zu verwenden. Am Prinzip der vollständigen Induktion war das methodisch wichtige die Möglichkeit, »an jeder Stelle der Zahlenreihe den Übergang zum »Nachfolger« der zuletzt betrachteten Zahl auszuführen«. (Fraenkel 1930, 290) In der Entwicklung des Intuitionismus wurde dann zunächst recht unterschiedlich definiert, durch welche Mittel die Forderung nach Konstruktivität erfüllt werden könne. Eine Übereinstimmung liegt aber darin, daß im Ergebnis stets ein effektiver Existenzbeweis vorliegen soll, mit der Konse-

¹⁹³ Herbert Mehrtens kommentiert die Kontroversen Kroneckers mit Dedekind und Cantor folgendermaßen: »Kronecker eröffnet die Gegenmoderne insofern, als er gegen die beginnende Moderne eine moralische Norm setzt. Die Norm heißt vor allem: Berechenbarkeit, scharfe Trennung des absolut Bestimmten vom Unbestimmten. Diese Norm ist moralisch (und nicht praktisch), weil es um ein reines Prinzip geht. Dagegen setzt Cantor, auch wenn er es vermutlich nicht ganz so meinte, die ebenso prinzipielle und reine Norm der Moderne: Freiheit von der Realität, Trennung des mathematischen Begriffs von der Wirklichkeit der Bedeutungen.« (Mehrtens 1990, 204f.)

quenz, daß Sätze über das aktual Unendliche nicht zugelassen oder sinnlos sind, sondern nur Sätze über das potentiell Unendliche.

Auf der »2. Tagung für Erkenntnislehre der exakten Wissenschaften«, die im Jahr 1930 in Königsberg stattfand und vor allem der Diskussion der kontroversen Begründungsversuche der Mathematik diente, stellte der niederländische Mathematiker Arend Heyting (1898-1980) den intuitionistischen Ansatz vor. Sein Vortrag begann mit den Sätzen:

Das Ziel, das der intuitionistische Mathematiker sich setzt, ist folgendes. Er will Mathematik treiben als natürliche Funktion des Intellekts, als freie, lebendige Aktivität des Denkens. Für ihn ist die Mathematik ein Erzeugnis des menschlichen Geistes. Die Sprache, sowohl die gewöhnliche wie die formalistische, gebraucht er nur zur Mitteilung, das heißt um andere oder sich selbst zum Nachdenken seiner mathematischen Gedanken zu veranlassen. Eine solche sprachliche Begleitung ist kein Bild der Mathematik, noch weniger die Mathematik selbst. (Heyting 1931, 106)

Schon diese wenigen Sätze machen deutlich, daß hier von einer Objektivität mathematischer Gegenstände im oben dargestellten Sinn keine Rede ist und die Frage nach ihr ohne Antwort bleiben muß. Für das Verhältnis von Logik und Mathematik ergibt sich die Umkehrung des logizistischen Standpunkts. Hat die Sprache nur Mitteilungsfunktion für Prozesse des Denkens, ist sie auch nur fähig zur Reproduktion mathematischer Konstruktionen. Aus der Reproduktion werden in dieser Sicht »a posteriori gewisse Regeln der Kombination abgeleitet, die die Gesetze der Logik heißen. Diesen kommt also keinerlei ursprüngliche Geltung zu, und insbesondere sind die logischen Gesetze für unendliche Gesamtheiten andere als für endliche.« (Fraenkel 1930, 293)

In diesem Sinne äußert sich Heyting über das Gesetz vom ausgeschlossenen Dritten in einer Weise, aus der auch sehr deutlich hervorgeht, weshalb in dieser Sicht die Logik von der Mathematik abhängt. (Und zwar auch dann, wenn auf Brouwers metaphysische Begründungen nicht zurückgegriffen wird.)

Wir benötigen für das Gesetz vom ausgeschlossenen Dritten die logische Funktion »entweder-oder«. $p \vee q$ bezeichnet diejenige Absicht, die dann und nur dann erfüllt ist, wenn zumindest eine der beiden Absichten p oder q erfüllt ist. Die Formel für das Gesetz vom ausge-

schlossenen Dritten wäre $\neg p \vee \sim p$. Man kann dieses Gesetz für eine bestimmte Proposition p nur dann behaupten, wenn p entweder bewiesen worden ist oder auf einen Widerspruch zurückgeführt wurde. Der Beweis, daß das Gesetz vom ausgeschlossenen Dritten ein allgemeines Gesetz ist, muß daher in der Angabe einer Methode bestehen, durch welche für eine beliebige Proposition entweder diese Proposition selbst oder ihre Negation immer beweisbar wäre. Deshalb bezeichnet die Formel $\neg p \vee \sim p$ die Erwartung einer mathematischen Konstruktion (einer Beweismethode), welche der erwähnten Forderung Genüge tut. Oder, in anderen Worten, diese Formel ist eine mathematische Proposition; die Frage ihrer Gültigkeit ist ein mathematisches Problem, welches, wenn das Gesetz in allgemeiner Form angegeben ist, mit mathematischen Mitteln unlösbar ist. In genau diesem Sinne hängt die Logik von der Mathematik ab. (Heyting 1931, 107)

Nach Heyting ist die Existenz mathematischer Gegenstände »nur gesichert, insoweit sie durch Denken bestimmt werden können; ihnen kommen nur Eigenschaften zu, insoweit diese durch Denken an ihnen erkannt werden können. Diese Möglichkeit der Erkenntnis offenbart sich uns aber nur durch das Erkennen selbst. Der Glaube an die transzendente Existenz, der durch die Begriffe nicht gestützt wird, muß als mathematisches Beweismittel zurückgewiesen werden.« (Heyting 1931, 107) Hieraus ergeben sich zwei Aspekte des Intuitionismus, die sich voneinander trennen lassen und die in der damaligen Debatte tatsächlich getrennt wurden und eine unterschiedliche Bewertung erfahren.

Der eine Aspekt ist der für den »Intuitionismus« namengebende Rückgriff auf eine der Mathematik zugrunde liegende »Urintention«, das heißt auf ein besonderes, bei Mathematikern am stärksten ausgeprägtes Erkenntnisvermögen. (Menger 1930/31, 311) Unter den Intuitionisten war es vor allem Brouwer, der in seinen Werken umfangreiche metaphysische Betrachtungen über die »Urintention« anstellte, um in ihr eine Letztbegründung der Mathematik zu erhalten. Sein Konzept der Urintention postuliert kein Reich der Ideen, sondern setzt bei der intuitiven Erfahrung der Zeit als Lebensmomente an, die Wiederholung ermögliche. Ein Lebensmoment zerfällt in zwei, nämlich das Jetzt und das gewesene Jetzt. Diese Zweiheit kann dann als eines der beiden Glieder einer weiteren Zweiheit genommen werden, was eine zeitliche Dreiheit ergäbe. Sähe man nun vom dinglichen Bezug dieser eigenpsychischen Basis ab, erhalte man eine abstrakte Zweiheit als

Urintention allen Zählens. Auf ihr wird die ganze Mathematik als natürliche Funktion des Intellekts aufgebaut, wobei es eine zeitliche Vorrangigkeit der natürlichen Zahlen gibt, die keiner weiteren Begründung bedürfen, sondern intuitiv klar sind. Durch die Iteration der Zerlegung entstünden dann zunächst die finiten Ordinalzahlen, hieran schlossen alle weiteren Konstruktionen an. (Vgl. Brouwer 1907; Mehrrens 1990, 257ff.; Heintz 1993, 34ff.)¹⁹⁴ Die Annahme einer solchen Intention wurde von Formalisten und Logizisten gleichermaßen abgelehnt. Carnap begründete die logizistische Ablehnung damit, daß dann »die arithmetischen Sätze synthetische Urteile a priori wären, anstatt Tautologien, also analytische Sätze«. (Carnap 1930/31a, 308)¹⁹⁵

Der zweite Aspekt ist die Forderung konstruktiver finiter Verfahren. Aus ihr folgt die Begrenzung der zugelassenen Mittel, dabei sind vor allem Existenzbeweise ohne Konstruktionsverfahren angesprochen, sowie die uneingeschränkte Verwendung des Satzes vom ausgeschlossenen Dritten. Dieses Prinzip kann sich nach Hermann Weyl (1885-1955) »auf keine Evidenz berufen [...], wenn es auf Aussagen angewendet wird, in denen »es gibt« und »alle« sich nicht auf eine Menge einzeln aufgewiesener Objekte beziehen,

¹⁹⁴ Schon Adolf Fraenkel (1891-1965) hat darauf hingewiesen, daß Brouwers Zweiteilung der Eins an eine antike philosophische Vorstellung erinnere. (Fraenkel 1930, 290) Zu denken ist hier zum Beispiel an »Die Rede des Komödiendichters Aristophanes« in Platons »Symposion« (189c-191d). Brouwer verquickt solche Vorstellung mit einer Vorstellung subjektiver Zeit, die im Gegensatz zu den Zeitanalysen Husserls (1893-1917) aber ganz unklar bleibt. Husserl, von Haus aus Mathematiker, war auf Grund seiner Arbeiten zur Logik nicht nur der ernsthafteste Kontrahent Freges, sondern seine Phänomenologie fand vor 1936 in Teilen die Zustimmung Carnaps, der im Zusammenhang mit der Begründung des Eigenpsychischen von ihr Gebrauch machte. (Vgl. Mormann 2000 und auch das Kapitel zu Carnaps Konstitutionssystem.) Bettina Heintz (1993, 38ff.) weist auf Ähnlichkeiten von Brouwers metaphysischer Wissenschafts- und reaktionärer Zivilisationskritik mit Husserls Spätwerk »Die Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendente Phänomenologie« (1936) hin. Sie kommt aber nicht auf die Zeitanalyse zu sprechen und versäumt, auf einen wichtigen Wandel in Status und Gegenstand der Phänomenologie hinzuweisen: In seinen Arbeiten zur Zeit (und zur Logik) geht Husserl davon aus, daß wir von allen empirischen Annahmen über die Objektivität der Welt zunächst absehen müssen. Ohne die Welt zu bezweifeln, bezweifelt er, daß zum Beispiel die objektive Zeit verursacht, daß und wie Zeit und zeitliche Gegenstände im Bewußtsein auftreten. Er fragt deshalb nach der Konstitution solcher Gegenstände im Bewußtsein. Ähnliche Konstitutionsfragen stellte auf anderer theoretischer Grundlage auch die Gestaltpsychologie. (Vgl. Metzger 1936) Phänomenologie in diesem Sinne beschäftigt sich mit einem Bereich subjektiver Erfahrung, der zwischen Formalem und Empirischem vermittelt. Erst Husserls Spätwerk richtet sich auf die Geschichte. In ihm entwirft er eine spekulative Geschichtsphilosophie – das heißt eine systematische Interpretation, die einem Prinzip entspricht, durch das geschichtliche Ereignisse und Abläufe vereinigt und auf einen letztgültigen Sinn gerichtet werden – der obskursten Art.

¹⁹⁵ Vergleiche auch die Ausführungen im Kapitel zum Logischen Empirismus.

sondern auf unendliche Mengen«. (Weyl 1953, 32) Heyting demonstriert die intuitionistische Argumentationsweise an einem Beispiel, in dem es um das Problem der Einführung der reellen Zahlen geht und das ausführlich zitiert werden soll, weil aus ihm die Plausibilität der Forderung klar wird:

Bei der Einführung der Brüche als Paare von ganzen Zahlen stößt man nicht auf grundsätzliche Schwierigkeiten; anders ist es bei der Definition der Irrationalzahlen. Nach Dedekind ist eine reelle Zahl dadurch definiert, daß jeder rationalen Zahl entweder das Prädikat »links« oder das Prädikat »rechts« zugeordnet ist [gemeint ist links oder rechts der Eulerschen Konstante C ; B.C.], derart, daß der natürlichen Ordnung der rationalen Zahlen genügt wird. Wenn wir diese Definition genau so in der intuitionistischen Mathematik übernehmen wollten, so wäre es nicht sicher, daß die Eulersche Konstante C eine reelle Zahl ist. Ich brauche die Definition von C nicht; es genügt zu wissen, daß sie auf eine Rechenvorschrift hinauskommt, welche gestattet, C in ein beliebig kleines rationales Intervall einzuschließen. (Ein rationales Intervall ist ein Intervall, dessen Endpunkte rationale Zahlen sind; der Ausdruck »einschließen« ist ungenau, weil noch gar keine Ordnungsbeziehungen von C zu den rationalen Zahlen definiert sind, aber praktisch und deutlich; es handelt sich um die Berechnung einer Reihe von rationalen Intervallen, deren jedes im vorigen enthalten ist, und welche man immer soweit fortsetzen kann, daß das letzte Intervall kleiner ist als eine beliebig vorgegebene Grenze.) Durch diese Vorschrift ist aber noch kein Mittel gegeben, für eine beliebige rationale Zahl A zu entscheiden, ob sie links oder rechts von C liegt oder vielleicht gleich C ist, und das ist es, was die Dedekindsche Definition, intuitionistisch aufgefaßt, verlangen würde.

Nun ist der übliche Einwand gegen diesen Gedankengang, es mache nichts aus, ob man es entscheiden könne, aber wenn nicht $A = C$, so sei entweder $A < C$ oder $A > C$, und die letztere Alternative entscheide sich nach einer endlichen Anzahl N von Schritten in der Berechnung von C . Ich brauche den Einwand nur ein wenig anders zu formulieren, um ihn zu widerlegen. Er kann nämlich nur folgende Bedeutung haben: entweder es existiert eine natürliche Zahl N mit der Eigenschaft, daß sich nach N Schritten in der Berechnung von C entweder $A < C$ oder $A > C$ herausstellt, oder eine solche Zahl N existiert nicht; dann ist natürlich $A = C$. Nun bedeutet aber, wie wir

gesehen haben, die Existenz von N nichts anderes als die Möglichkeit, eine Zahl mit der geforderten Eigenschaft wirklich aufzuweisen, und die Nichtexistenz bedeutet die Möglichkeit, diese Eigenschaft auf einen Widerspruch zurückzuführen. Weil wir nicht wissen, ob eine dieser Möglichkeiten besteht, können wir nicht behaupten, daß N entweder existiert oder nicht existiert. In diesem Sinn kann man sagen, daß der Satz vom ausgeschlossenen Dritten hier nicht angewandt werden darf. (Heyting 1931, 107f.)

Das Argument hat zur Folge, daß es in der Mathematik an sich unentscheidbare Probleme gibt. Aus dem intuitionistischen Umgang mit dem Satz vom ausgeschlossenen Dritten geht die Ablehnung anderer gebräuchlicher Sätze und Methoden einher: Es gelten nicht mehr der Satz von der doppelten Negation; nichteffektive Existenzbeweise, die einen Gegenstand von der Form des Satzes »Diese Gleichung hat genau eine Lösung« beweisen, ohne daß die Lösung berechnet werden könnte; und der indirekte Existenzbeweis, in dem auf die Existenz eines Gegenstands geschlossen wird, weil die Annahme seiner Nichtexistenz zum Widerspruch führt; ferner sind imprädikative Begriffsbildungen unzulässig. (Vgl. Stegmüller 1978a, 438ff.) Eine in diesen Grenzen agierende Mathematik hätte auf vieles zu verzichten, das zum festen Bestand der nicht-intuitionistischen Mathematik gerechnet wird. Dies war nicht nur unerwünscht, sondern es war für die Mehrzahl der Mathematiker nicht zu akzeptieren. Hierdurch war in der Debatte um die Grundlagen der Mathematik die Schärfe der Polemik in erster Linie motiviert. (Vgl. Mehrtens 1990) Wo ein sachlicherer Ton herrschte, mußten die Kontrahenten des Intuitionismus allerdings anerkennen, daß eine Reihe der zur Verhandlung stehenden ungelösten Probleme und Antinomien gerade durch die Verwendung der angegriffenen Schlußweisen und Methoden entstanden waren. Der kritische Aspekt des Intuitionismus wurde deshalb so weit aufgegriffen, wie er auf finite Methoden zielte, nicht aber mit seiner Forderung weitergehender Limitationen. Was »finit« bedeutet, konnte durchaus unterschiedlich interpretiert werden. Fraenkel charakterisierte die Reaktion und das alternative Programm in der Hilbertschen Fassung:

Bei der konsequenten Durchführung der Prinzipien *Brouwers* bleibt nämlich von der klassischen Mathematik nur ein beklagenswert dürftiger Torso übrig, dessen Aufbau und Begründung überdies mit fürchterlichen Schwierigkeiten verknüpft ist. Eine solche Zerstörung, so sagt der mathematische Instinkt *Hilberts*, können und wollen wir

uns nicht bieten lassen; kein Mensch, und wenn er mit Engelszungen redete, wird uns daran hindern, generelle Aussagen zu negieren und das Tertium non datur auf unendliche Mengen anzuwenden. Wie aber, wenn unsere Einsicht diese bisher üblichen Verfahren nicht legitimieren kann? Dann schaffen wir uns eben zunächst ein Reich der Schatten, innerhalb dessen wir – ohne Legitimation – dennoch entsprechend verfahren. (Fraenkel 1930, 294, Hervorhebungen im Original)

Der Vorwurf, die intuitionistische Mathematik lasse nur einen Torso bestehen, hat sich lange gehalten, teils weil ihre Verfahren umständlich sind, teils weil sie für viele Themenkomplexe nicht ausgearbeitet vorlag, teils weil ihre Konsistenz beargwöhnt wurde. Wenngleich der »historische Sieger« der damaligen Debatte der Formalismus war, liegt heute ein differenzierteres Urteil über die intuitionistische Mathematik vor: Vor allem Arbeiten von Gödel, Stephen C. Kleene (1909-1994), Georg Kreisel und Richard E. Vesley haben dreierlei erwiesen:

- Bestimmte Gegenstandsbereiche der nicht-intuitionistischen Mathematik sind intuitionistisch nicht konstituierbar.
- In bestimmten Bereichen liefert der Intuitionismus Sätze, die denen der nicht-intuitionistischen Mathematik widersprechen.¹⁹⁶
- In bestimmten Bereichen liefert die intuitionistische Mathematik Lösungen, die die nicht-intuitionistische Mathematik nicht erzeugen kann und erweist sich als mächtiger.

Zusammen mit der inzwischen gelungenen Formalisierung, die eine der nicht-intuitionistischen Mathematik gleichwertige Konsistenz bestätigt, führt die im dritten Punkt implizierte Verstärkung der Denkweise der nicht-intuitionistischen Mathematik zu der wissenschaftstheoretischen Beurteilung, daß die intuitionistische Theorie nicht eine Teiltheorie der nicht-intuitionistischen Mathematik ist, sondern eine andersartige Theorie. (Vgl. Stegmüller 1978a, 442) Da die beiden Theorien nur in Teilen aufeinander abgebildet werden können, ist davon auszugehen, daß hier eine Pluralität von Theorien im Sinne Quines vorliegt, der vorschlägt, »Theorien folgendermaßen zu individuieren: Zwei Formulierungen gelten als Formulierungen derselben Theorie, wenn sie empirisch äquivalent sind und es eine Rekonstruktion von Prädikaten gibt, mit deren Hilfe eine der Theorien in ein

¹⁹⁶ In der intuitionistischen Mathematik gilt zum Beispiel der Satz von der gleichmäßigen Stetigkeit jeder definierbaren Funktion. (Vgl. Stegmüller 1978a, 443)

logisches Äquivalent der anderen überführt werden kann.« (Quine 1975, 320) Auch ist kein übergeordnetes Kriterium ersichtlich, mit dem eine Entscheidung zu Gunsten der einen oder anderen Mathematik herbeigeführt werden könnte.

4.2.4 Das Hilbertprogramm

Die Etablierung des Schattenreichs der Schlußregeln und Begriffe ohne inhaltliche Konsequenzen leitet Fraenkel vom Begriff des Existenz her. Ein mathematischer Begriff existiere, »wenn er widerspruchsfrei, das heißt verträglich ist mit den übrigen Begriffen und ihren Konsequenzen. Das Schattenreich wird in diesem Sinne als eine wissenschaftliche Disziplin, der den Namen »Mathematik« zuzuteilen uns niemand hindern kann, legitimiert sein, wenn es gelingt zu beweisen, daß in ihm bei Verwendung der zugelassenen Verfahren niemals ein Widerspruch erzielt werden kann.« (Fraenkel 1930, 295) Ganz in diesem Sinn hatte David Hilbert die »Neubegründung der Mathematik« 1921/22 vorgelegt. Die Aufstellung der Grundlagen der Mathematik (im formalistischen Sinn) hielt er für ein »schwieriges, aber ein in endgültiger Weise lösbares« Problem. (Hilbert 1929, 157) Mit dessen Lösung möchte er »der Mathematik den alten Ruf der unanfechtbaren Wahrheit, der ihr durch die Paradoxien der Mengenlehre verloren zu gehen scheint, wiederherstellen«. (Hilbert 1929, 160) Der Umfang der zu rekonstruierenden Mathematik wird dabei in seiner bekannten Parole: »Aus dem Paradies, das Cantor uns geschaffen, soll uns niemand vertreiben können« klar mit weitesten Grenzen umrissen. (Hilbert 1925, 170)

In einem programmatischen Aufsatz mit dem Titel »Axiomatisches Denken« hatte Hilbert sich mit den Grundlagen der Arithmetik befaßt. In ihm führte er einen Katalog offener Fragen auf, unter anderem: »das Problem der prinzipiellen Lösbarkeit einer jeden mathematischen Frage, das Problem der nachträglichen Kontrollierbarkeit des Resultates einer mathematischen Untersuchung, ferner die Frage nach dem Kriterium für die Einfachheit von mathematischen Beweisen, die Frage nach dem Verhältnis zwischen Inhaltlichkeit und Formalismus in Mathematik und Logik und endlich das Problem der Entscheidbarkeit einer mathematischen Frage durch eine endliche Anzahl von Operationen.« (Hilbert 1918, 412; vgl. Bernays 1967, 500) Die von ihm propagierte Art, Mathematik zu betreiben, war zugleich strikt axiomatisch und strikt formalistisch.

Hilbert beschreibt die axiomatische Methode allgemein als das Verfahren, eine Theorie eines Wissensgebietes auf einigen wenigen besonderen Sätzen (Axiomen) dieses Wissensgebietes basieren zu lassen und die Theorie nach logischen Prinzipien aus diesen Axiomen abzuleiten. (Hilbert 1918, 406) Er hält dies für möglich, weil er annimmt, daß innerhalb eines Wissensgebietes »dem einzelnen Gegenstände des Wissensgebietes ein Begriff [...] und jeder Tatsache [...] eine logische Beziehung zwischen den Begriffen entspricht.« (Hilbert 1918, 405) Die Theorie eines Wissensgebietes stellt somit für ihn einen Kalkül dar mit Elementen, das heißt den Begriffen, und Relationen, das heißt den Beziehungen zwischen den Begriffen. Innerhalb dieses Kalküls sind die Begriffe implizit definiert. Im strikt axiomatischen Ansatz wird verlangt, daß in den Beweisen keine anderen Erkenntnisse aus dem zu behandelnden Wissensgebiet benutzt werden als die, welche ausdrücklich in den Axiomen formuliert sind. In seinem Vortrag auf dem Mathematikerkongreß in Paris im Jahr 1900 hatte Hilbert gefordert:

Wenn es sich darum handelt, die Grundlagen einer Wissenschaft zu untersuchen, so hat man ein System von Axiomen aufzustellen, welche eine genaue und vollständige Beschreibung derjenigen Beziehungen enthalten, die zwischen den elementaren Begriffen jener Wissenschaft stattfinden. Die aufgestellten Axiome sind zugleich die Definitionen jener elementaren Begriffe, und jede Aussage innerhalb des Bereiches der Wissenschaft, deren Grundlagen wir prüfen, gilt uns nur dann als richtig, falls sie sich mittels einer endlichen Anzahl logischer Schlüsse aus den aufgestellten Axiomen ableiten läßt. (Hilbert 1900, 36f.)

Es entspricht dann dieser Forderung, wenn durch die Entwicklung einer axiomatischen Theorie die logische Abhängigkeit der in ihr auftretenden Sätze von den Axiomen erwiesen wird. Paul Bernays (1888-1977) betont, daß es für diese logische Abhängigkeit gleichgültig sei, »ob die vorangestellten Axiome wahre Sätze sind oder nicht; sie stellen einen rein hypothetischen Zusammenhang dar: wenn es sich so verhält, wie die Axiome aussagen, dann gelten die Lehrsätze«. (Bernays 1930/31, 328) Diese Auffassung von Axiomen und Axiomensystemen war früh Gegenstand einer Kontroverse zwischen Hilbert und Frege. Frege bestand nämlich nach der Lektüre der »Grundlagen der Geometrie« von Hilbert darauf, daß Axiome per se wahre Sätze wären; aus ihrer Wahrheit folge, daß sie einander nicht widersprechen – worauf Hilbert antwortete: »Wenn sich die willkürlich gesetzten

Axiome nicht einander widersprechen mit sämtlichen Folgen, so sind sie wahr, so existieren die durch die Axiome definierten [sic!] Dinge. Das ist für mich das Criterium der Wahrheit und Existenz.« (Hilbert 1899, 12) Während Frege also eine ontologisch der Theorie vorgeordnete Wahrheit postulierte, war die Wahrheitsfrage für Hilbert rein theorieimmanent mit der Folge, daß auch die Grundbegriffe nur durch ihren immanenten Gebrauch zu bestimmen sind:

Indem man nun bei einem Axiomensystem von der Wahrheit der Axiome ganz absieht, wird auch die inhaltliche Auffassung der Grundbegriffe irrelevant, und man kommt so dazu, überhaupt *von allem anschaulichen Inhalt der Theorie zu abstrahieren*. Diese Abstraktion wird noch unterstützt durch ein zweites Moment, das in der neueren Axiomatik, wie sie vor allem in *Hilberts »Grundlagen der Geometrie«* zur Ausbildung gelangte, noch hinzukommt und welches überhaupt für die Gestaltung der neueren Mathematik wesentlich ist, nämlich die *existentiale* Fassung der Theorie.

Während Euklid sich die zu betrachtenden Figuren immer konstruiert denkt, geht die heutige Axiomatik aus von der Vorstellung eines von vornherein festliegenden *Systems von Dingen*. Man denkt sich z.B. in der Geometrie die Punkte, Geraden und Ebenen in ihrer Gesamtheit als ein solches System von Dingen. Innerhalb dieses Systems denkt man die Beziehungen der Inzidenz (das Liegen eines Punktes auf einer Geraden bzw. in einer Ebene), des Zwischenliegens (ein Punkt liegt zwischen zwei andern) und der Kongruenz als von vornherein bestimmt. Diese Beziehungen können nun, ohne Rücksicht auf ihre anschauliche Bedeutung, rein abstrakt als gewisse *Grundprädikate* charakterisiert werden. So tritt nun z.B. an die Stelle des euklidischen Konstruktions-Postulates, welches die Möglichkeit der Verbindung zweier Punkte durch eine Gerade fordert, im Hilbertschen System das Existenzaxiom: Zu zwei Punkten gibt es stets eine Gerade, die mit jedem der beiden Punkte zusammengehört. »Zusammengehören« ist hier der abstrakte Ausdruck für die Inzidenz. (Bernays 1930/31, 328f., Hervorhebungen im Original)¹⁹⁷

¹⁹⁷ In der Terminologie Hilberts, der sich Bernays hier anschließt, bezeichnet »Prädikat« sowohl ein- und mehrstellige Prädikate, die Unterscheidung von »Prädikaten« und »Relationen« wird aufgegeben.

Ein Ziel des axiomatischen Denkens ist, eine Ordnung der Tatsachen zu schaffen (Hilbert 1918, 405) – was auch immer der Begriff »Tatsache« nach den bisher skizzierten Grundsätzen noch bezeichnet. Die Theorie eines Wissensgebiets hat dann den Zweck, der Orientierung und Ordnung zu dienen, wobei zwei Anforderungen zu erfüllen sind: Erstens soll sie einen Überblick über die Abhängigkeit oder Unabhängigkeit der Sätze der Theorie geben. Zweitens soll sie eine Gewähr für die Widerspruchslosigkeit der Sätze der Theorie liefern. (Hilbert 1918, 407) Mit Unabhängigkeit der Axiome ist gemeint, daß sich die Axiome nicht aus anderen Axiomen ableiten lassen. (Hilbert 1918, 407). Widerspruchslosigkeit soll heißen, daß in einem Axiomensystem » $A = B$ « und » $A \neq B$ « nicht zugleich beweisbare Formeln sind. » A « und » B « sind hier »Funktionale«, das heißt zusammengesetzte Zeichen. Diese können aus Individualzeichen – den Bestandteilen von Zahlzeichen und individuellen Funktionen – sowie aus Variablen – Grundvariablen und variablen Funktionen – bestehen. Um den Anforderungen nach Unabhängigkeit und Widerspruchslosigkeit genügen zu können, sollten die Theorien formalisiert werden. Für die Mathematik bedeutete das, daß die Axiome, Formeln und Beweise der mathematischen Theorie selbst Gegenstand einer inhaltlichen Untersuchung sein müßten. (Vgl. Hilbert 1929, 165ff.) Zu diesem Zweck »muß eine strenge Formalisierung der ganzen mathematischen Theorie einschließlich ihrer Beweise durchgeführt werden, so daß die mathematischen Schlüsse und Begriffsbildungen – nach dem Muster des Logikkalküls – in das Gebäude der Mathematik als formale Bestandteile einbezogen sind.« (Hilbert 1929, 165)

Diese allgemeinen Vorstellungen Hilberts entsprechen denjenigen Leibniz' über den Aufbau von Kalkülen. Leibniz dachte allerdings bei weitem nicht so inhaltsleer wie Hilbert. Dies wird in Kapitel 5 dargestellt und diskutiert werden. Mit der eben gemachten, gewichtigen Einschränkung ist es zutreffend, wenn das Hilbertprogramm als Leibnizprogramm identifiziert und verschiedentlich auch so genannt wird. (Vgl. zum Beispiel Cassirer 1929, 451f.; Thiel 1992, 173-179; Krämer 1988)

Zufolge des formalistischen Ansatzes soll die Mathematik als formalisiertes Axiomensystem darzustellen sein. »Alles, was bisher die eigentliche Mathematik ausmacht, wird nunmehr streng formalisiert, so daß die eigentliche Mathematik oder die Mathematik in engerem Sinne zu einem Bestande an beweisbaren Formeln wird.« (Hilbert 1929, 174) Für die Durchführung dieses Vorhabens sieht Hilbert im Grundsatz folgende Mittel und Methoden vor:

Grundelemente des Axiomensystems sind die »Zeichen«: »am Anfang [...] ist das Zeichen«. (Hilbert 1929, 163) Zu den Grundsymbolen zählen alle Symbole, die in der Logik und Mathematik verwandt werden, wie zum Beispiel die Variablen $a, b, c, \dots$, Negation, Implikation. Die Kombinationen der Symbole, die syntaktisch korrekte Aussagen bezeichnen, werden Formeln genannt. Syntaktisch korrekt sind beispielsweise » $1+1=2$ « oder » $1+1=3$ «, nicht korrekt sind » $1+-2$ « oder » $++1=-$ «. Ein Axiomensystem besteht aus mehreren solcher syntaktisch korrekten Formeln. Für die Aufstellung eines Axiomensystems für die konkret-inhaltliche Zahlentheorie genügen die Zeichen »1« und »+«. (Hilbert 1929, 163ff.) Für Axiomensysteme der gesamten Mathematik werden weitere Arten von Zeichen benötigt. Hilbert unterscheidet:

I. *Individualzeichen* (meist griechische Buchstaben):

1. 1, + (Bestandteile der Zahlzeichen),
2. $\varphi(*), \Psi(*), \sigma(*,*), \delta(*,*), \mu(*,*)$ (individuelle Funktionen mit Leerstellen, individuelle Funktionenfunktionen),
3. = (gleich), $\neq$ (ungleich), > (größer) (mathematische Zeichen),
4. Z (Zahl sein), Φ (Funktion sein),
5. $\rightarrow$ (»folgt«, ein logisches Zeichen),
6. () (Allzeichen).

II. *Variable* (lateinische Buchstaben):

1. $a, b, c, d, p, q, r, s, t$ (Grundvariable),
2. $f(*), g(*)$ (variable Funktionen, variable Funktionenfunktionen),
3. A, B, C, D, S, T, U, V, W (variable Formeln).

III. *Zeichen zur Mitteilung* (deutsche Buchstaben):

1. **a, b, c, t** (Funktionale),
2. **A, B, C, K, S, T** (Formeln).

(Hilbert 1929, 165f., Hervorhebungen im Original)

Gewisse Formeln eines solchen Systems werden Axiome genannt. Sie bilden einen Teil der Elemente des formalen Systems der Mathematik. Die Ableitung von Sätzen geschieht mit Hilfe eines Schlußschemas. Aus den Prämissen »A'« und »A' impliziert B'« wird »B'« als Konklusion abgeleitet. Hilberts Überlegungen zufolge soll die eigentliche Mathematik nur aus »beweisbaren Formeln« bestehen. Als beweisbar gelten Formeln, die entweder ein Axiom sind oder die eine Konklusion eines Schlusses sind oder die durch Einsetzen aus einer Konklusion entstehen. Beweisbarkeit ist insofern

immer ein relativer Begriff, da eine Formel nur bezogen auf das zugrundeliegende Axiomensystem bewiesen werden kann. (Hilbert 1929, 169)

Um das Ziel zu erreichen, die Mathematik sicher zu begründen, mithin Paradoxien zu vermeiden, muß eine zweite Ebene eingeführt werden, in der das inhaltliche Schließen möglich ist.

Zu der eigentlichen Mathematik kommt eine gewissermaßen neue Mathematik, die Metamathematik, hinzu, die zur Sicherung jener dient, indem sie sie vor dem Terror der unnötigen Verbote sowie der Not der Paradoxien schützt. In dieser Metamathematik kommt – im Gegensatz zu den rein formalen Schlußweisen der eigentlichen Mathematik – das inhaltliche Schließen zur Anwendung, und zwar immer nur zum Nachweis der Widerspruchsfreiheit der Axiome. (Hilbert 1929, 174)

Ab 1928 forderte Hilbert zusätzlich die Vollständigkeit für formale Systeme. Er formulierte zwei Probleme: »the problem of showing that every universally valid logical schema is derivable by the rules of the predicate calculus and the problem of showing the completeness of formalized number theory, in the sense that the formal system of number theory contains no formula which, together with its negation, can be shown to be undervivable in the system«. (Bernays 1967, 501) Vollständigkeit eines formalen Systems bedeutet, daß für jeden Satz dieses Systems eine endliche Schlußkette, ausgehend von den Axiomen, existiert, die entweder mit dem Satz oder mit seiner Negation endet. Es muß in endlich vielen Schritten möglich sein, diesen Nachweis zu führen. Welche exakten Anforderungen an Finitheit zu stellen sind, wurde von Hilbert trotz der immer wiederkehrenden Betonung seines »finiten Standpunktes« nicht expliziert. Erst 1931 formulierte Jacques Herbrand (1908-1931) eindeutig, was als finiter Standpunkt zu gelten habe. (Vgl. Herbrand 1931) Christian Thiel faßt Herbrands Ausführungen zu fünf Forderungen zusammen:

Erstens darf immer nur mit einer endlichen Anzahl von Gegenständen und Funktionen operiert werden, wozu insbesondere gehört, daß jede Ausdrucksbildungs- und jede Schlußregel nur endlich viele Prämissen enthält (wir erinnern uns, daß dies auch eine der Forderungen an einen Vollformalismus war). *Zweitens* muß der Wert jeder verwendeten Funktion für jedes Argument bzw. Argumente-*n*-tupel eindeutig berechnet werden können. *Drittens* darf niemals die Menge *aller* zu

einer unendlichen Gesamtheit gehörenden Objekte betrachtet werden; demgemäß darf die Definition eines mathematischen Objektes nicht imprädikativ sein in dem Sinne, daß in der definierenden Bedingung ein dieses Objekt (später) als Element enthaltende Menge auftritt. *Viertens* soll die Existenz eines Objektes nur unter Aufweis desselben oder unter Angabe der Mittel zu seiner effektiven Auffindung oder »Konstruktion« behauptet werden, und schließlich soll *fünftens* jede Behauptung einer Aussage über *alle* x eines Bereiches von einer Anweisung begleitet sein, wie sich für ein beliebig vorgelegtes x_0 aus dem Bereich die Aussage $A(x_0)$ beweisen läßt, die durch Einsetzung des Namens oder Terms x_0 für die Variable der allquantifizierten Aussageform entsteht. (Thiel 1995, 243f., Hervorhebungen im Original)

Es ist unschwer zu sehen, daß die strikten Forderungen Herbrands auch intuitionistisch einwandfrei sind. Für die formalistische Mathematik erlangten sie aber schon deshalb nur noch eine eingeschränkte Geltung, weil die im selben Jahr veröffentlichten Unvollständigkeitssätze Kurt Gödels eine weitgehende Revision der Ansprüche an Begründbarkeit, Sicherheit und Gewißheit einleiteten. Hilbert arbeitete im selben Jahr bereits an einer Schlußweise, die mit der ersten Forderung Herbrands unverträglich ist, weil sie unendlich viele Prämissen zuläßt.

Ob die Beachtung der Forderungen Herbrands die Bewahrung des Cantorsche Paradieses zugelassen hätte, kann bezweifelt werden. Einige Teilbereiche der Mathematik und der Logik konnten mit Hilfe des Hilbertprogramms kalkülisiert werden. Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit dieser Systeme lassen sich nachweisen. Beispiele dafür sind der Aussagenkalkül und der arithmetische Kalkül für die Addition natürlicher Zahlen. Für andere Kalküle reichte Hilberts Beweismethode jedoch nicht aus, um die Vollständigkeit und Widerspruchsfreiheit zu beweisen.

Bevor das Problem der Beweisbarkeit einer Formel durch ein allgemeines und endliches Verfahren angesprochen wird, sollen die Ähnlichkeiten und Unterschiede der drei erörterten Positionen zur Grundlegung der Mathematik vergleichend festgehalten werden.

4.2.5 Die drei Positionen der Grundlagendebatte im Überblick

	Formalismus	Logizismus	Intuitionismus
Wie funktioniert Mathematik?	Kalkülmäßig		Intuitiver Aufbau
Bedeutung der Elemente in der Mathematik	Begriffe und Formeln sind bedeutungslos	Begriffe und Formeln haben Bedeutung	
Verfahren der Mathematik	»Blind« kalkülmäßig	Konstruktives Verfahren	
Konstruktionsregeln in der Mathematik	Keine Limitation der Konstruktionsregeln		Limitierte Konstruktionsregeln

Tabelle 20. Formalismus, Logizismus, Intuitionismus

Aus der Darstellung der Kontroverse über die Grundlagen der Mathematik wird bis jetzt dreierlei deutlich:

Erstens ist das Vorhandensein bestimmter Probleme und Antinomien in den Mathematiken bereits vor Gödel so umfangreich, daß generelle Begründungen, die widerspruchsfrei sind, allenfalls durch voraussetzungsreiche Ad-hoc-Lösungen, die das ursprüngliche System sprengen, und durch die Zulassung starker Beweismittel möglich sind. Beides führt zur Einschränkung von Konsistenz und Sicherheit im Sinne der jeweiligen Anfangshypothesen. Mit schwachen Beweismitteln lassen sich augenscheinlich nur Theorien begrenzter Reichweite, somit regionale Theorien aufbauen.

Zweitens. Formalistische Theorien sind letztlich nicht möglich, denn wenn sie strikt genommen von nichts sprechen, dann kann man auch nicht von ihnen sprechen. Solche Theorien sind nur mit Bezug auf einen Gebrauch, also auf Pragmatik, damit aber in einem Kontext und nicht absolut zu begründen, sie unterscheiden sich in dieser Hinsicht zwangsläufig nicht von Theorien, die Hilberts »Bierseidel-und-Stühle-Argument« ablehnen.¹⁹⁸

¹⁹⁸ Wenn Hilbert wie Goggelmoggel (vgl. Abschnitt 2.2.7) behauptet, man könne alles beliebig heißen lassen, und wenn Hilbert / Bernays (1934, 7) sagen, der Gebrauch von Worten wie Gerade, Ebene oder Punkt sei nur eine »Konzession ans Gewohnte«, wird die Absicht, mit sinnlosem Sprechen Aussagen formulieren zu wollen, besonders deutlich. Es liegt nahe, daß nicht nur Freges und Hahns diesbezügliche Einwände gegen strikten Formalismus hierhin gehören, sondern auch Wittgensteins Bemerkungen, worüber man sprechen kann.

Drittens. Zwischen verschiedenen Arten von Mathematik besteht Wahlfreiheit. Es gibt keine Begründungsmöglichkeit, die die eine gegenüber den anderen auszeichnet. Die intuitionistische Mathematik läßt sich allerdings von den metaphysischen Hintergrundannahmen Brouwers trennen. Dies führt zu einem anderen Kalkül als dem des »Cantorschen Paradieses«. Auch für die Mathematik gilt somit, daß sie Eigenschaften hat, die denjenigen wahlfreier hypothetisch-deduktiver Systeme entsprechen.

Für den Umgang mit kalkülisierten Systemen gilt dabei: Sie können so sicher sein, wie sie gefordert werden – unter Einschränkung ihrer Komplexität und Leistungsfähigkeit, und sie können so unsicher sein, wie zugelassen wird – unter Anpassung des Zulässigen an die jeweils gewünschte Leistung. Im Jahr 1939 setzte Carnap sich mit dem Ergebnis der Grundlagen-debatte in der Mathematik auseinander. Sein Resümee gilt nach wie vor und dürfte auch in der Informatik zutreffen:

Über die Auffassung der Mathematik als reinen Kalkül gibt es keine harten Auseinandersetzungen. Diese treten auf, sobald die Mathematik als »Wissenssystem« aufgefaßt wird, in unserer Terminologie als interpretiertes System. Wenn wir nun die Mathematik als Instrument für die Deduktion im Bereich des empirischen Wissens auffassen und nicht als Wissenssystem, dann erkennt man, daß viele Streitpunkte nicht Fragen der Wahrheit, sondern Fragen der praktischen Anpassung sind. Die Frage nimmt folgende Form an: welche Form eines mathematischen Systems ist die technisch geeignetste für den ins Auge gefaßten Zweck? Welches System garantiert die größte Sicherheit? Wenn wir zum Beispiel die Systeme der klassischen Mathematik mit denen der intuitionistischen vergleichen, dann finden wir, daß erstere viel einfacher und technisch viel praktischer sind, während letztere mehr Sicherheit vor überraschenden Vorkommnissen, zum Beispiel Widersprüchen, bieten. Im Augenblick ist es schwierig, den Sicherheitsgrad des Systems der klassischen Mathematik abzuschätzen; in anderen Worten: es ist eine Sache subjektiver Entscheidung, welchen Plausibilitätsgrad man ihren Prinzipien beimißt. Die Mehrheit der Mathematiker scheinen diesen Plausibilitätsgrad für alle praktischen Zwecke für genügend hoch zu halten und ziehen es daher vor, die klassische und nicht die intuitionistische Mathematik anzuwenden. (Carnap 1939, 70f.)

4.2.6 Gödels Unvollständigkeitsbeweise

Die umrissenen Probleme der mathematischen Grundlagendebatte erhielten eine ganz neue Akzentuierung, als dem Mathematiker Kurt Gödel in den Jahren 1930 und 1931 der Nachweis gelang, daß formale Systeme hinreichenden Umfangs nicht vollständig und nicht widerspruchsfrei seien. Ganz im Sinne der Hilbertschen Absichten war 1921 von Emil Post (1897-1954) der absolute Widerspruchsfreiheitsbeweis für die syntaktische Vollständigkeit des in der »Principia Mathematica« vorgelegten Aussagenkalküls publiziert worden, 1928 hatten David Hilbert und Wilhelm Ackermann (1896-1962) die Frage der semantischen Vollständigkeit deutlich formuliert und im selben Jahr schloß Hilbert die nach der syntaktischen Vollständigkeit der Formalisierung der Arithmetik an. Weitere Mathematiker und Logiker wie Paul Bernays oder Jan Łukasiewicz (1878-1956) und auch Carnap arbeiteten an solchen Problemen; und Formalisten wie Logizisten erwarteten absolute Widerspruchsfreiheitsbeweise und den Nachweis der Vollständigkeit für kalkülisierte Axiomensysteme. Gödels Unvollständigkeitssätze widerlegten nun nicht nur das Hilbertprogramm, sondern sie taten dies in einer Weise, die die Mathematiker nicht ignorieren konnten, denn seine Argumentation nutzte die Hilbertsche Unterscheidung von Mathematik und Metamathematik, war finit und entsprach der Hilbertschen Beweisstrategie, sowohl Hilbert als auch Gödel gingen von der Arithmetik aus.¹⁹⁹ Wie Hilbert und Bernays bejaht Gödel, daß es auf die Bedeutung der Zeichen nicht ankomme, doch hält er fest, daß Formeln inhaltlich interpretierbar seien (vgl. Gödel 1931, 174) und nutzt bei der Durchführung inhaltliche Argumente.

In seinem Aufsatz »Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I« wählt Gödel die damals am weitesten entwickelten Axiomensysteme der Mathematik, die »Principia Mathematica« von Russell und Whitehead und das Zermelo-Fraenkelsche, von John von Neumann weiter ausgearbeitete Axiomensystem der Mengenlehre als Bezug und führt hierfür als Grund an: »Diese beiden Systeme sind so

¹⁹⁹ Theoretischer Ansatz und Beweistechnik Gödels »paßten« in den argumentativen Kontext der Grundlagendebatte und den Denkstil (im Sinne Flecks (1935)) der meisten Kontrahenten; dies dürfte neben der von ihnen offengelegten Unklarheit darüber, was ein formales System überhaupt ist, was es zu leisten vermag und was nicht, ein Grund gewesen sein, weshalb Gödel sofort wahr- und ernstgenommen wurde, während die Unvollständigkeitseinwände des Zürcher Mathematikers Paul Finsler (1894-1970) aus dem Jahr 1926 keine Resonanz fanden. Zu dem von Finsler ausgelösten Prioritätsstreit mit Gödel vgl. die Hinweise bei John W. Dawson (1997, 77f.).

weit, daß alle heute in der Mathematik angewendeten Beweismethoden in ihnen formalisiert, d.h. auf einige wenige Axiome und Schlußregeln zurückgeführt sind. Es liegt daher die Vermutung nahe, daß diese Axiome und Schlußregeln dazu ausreichen, *alle* mathematischen Fragen, die sich in den betreffenden Systemen überhaupt formal ausdrücken lassen, auch zu entscheiden.« (Gödel 1931, 173, Hervorhebung im Original)²⁰⁰

Gödel untersucht dann das System P, eine Formalisierung des Logikkalküls der »Principia Mathematica« und der Peanoschen Axiome,²⁰¹ wobei er das System als eine Reihe von Grundzeichen (Variable, logische Konstante, Klammern) interpretiert, die nach bestimmten Regeln kombiniert werden können. Endliche Folgen von Grundzeichen bilden syntaktisch korrekte Formeln, mit denen endliche Folgen von Formeln erzeugt werden können, die er als »Beweisfigur« bezeichnet. Die Untersuchung arbeitet also zunächst mit einer Liste der im System auftretenden Zeichen, dann mit der Angabe der Zeichenfolgen, die zulässige Ausdrücke sind, und ferner mit Ableitungsregeln, die nach Maßgabe von Axiomen und logischen Schlußregeln formuliert werden.

Da es – so Gödel – für metamathematische Untersuchungen gleichgültig ist, welche Gegenstände als Grundzeichen verwandt werden, entschließt er sich, die natürlichen Zahlen als Grundzeichen zu nehmen. Den Zeichen, den Formeln und den Folgen von Formeln ordnet Gödel natürliche Zahlen (Primzahlprodukte) eineindeutig zu. Mittels dieser, in heutiger Terminologie, »Gödelnummer« wird jeder Ausdruck des Systems P in einer Folge na-

²⁰⁰ Für die anschließende Darstellung des Gödelschen Argumentationsgangs wird summarisch auf folgende Veröffentlichungen hingewiesen: Die beiden Unvollständigkeitssätze, der Beweis des ersten und die Beweisskizze des zweiten sind in Gödel (1931) nachzulesen; die dort gegebene Darstellung ist allerdings nur unter Aufbietung großer mathematischer Anstrengung eingängig. Ihre Schwierigkeit bemerkten auch zeitgenössische Mathematiker wie Ernst Zermelo, der sich bei Gödel ausdrücklich für einen erläuternden Brief bedankte. Aus der Sekundärliteratur wurde zunächst die Darstellung von Ernest Nagel (1901-1985) und James R. Newman (1907-1966) (1958) herangezogen, weil in ihr der Gedankengang aus dem mathematisch-technischen besonders deutlich herausdestilliert ist. Wegen der größeren Präzision und der Berücksichtigung eines weiteren Kontextes wurde Stegmüller (1973b) benutzt, ferner Jean van Heijenoort (1912-1986) (1967) und schließlich als neuere Arbeit Thiel (1992), der einen gut lesbaren Abriß gibt, dessen generelle (auch gegen Stegmüller gerichteten) Vorbehalte gegen erkenntnistheoretische Folgerungen ich jedoch nicht teile.

²⁰¹ Für Gödels Vorhaben war nicht von Belang, daß die Autoren der »Principia Mathematica« eine andere Begründungsstrategie der Mathematik verfolgten als Hilbert und andere formalistische Mathematiker, indem sie versuchten, alle arithmetischen Begriffe mit logischen Mitteln zu definieren und Axiome aus wenigen Aussagen, die *logisch* als wahr gelten müssen, zu deduzieren. Im übrigen war es gerade das Problem der Widerspruchsfreiheit, das gute Argumente gegen die von Frege und dann Russell angestrebte logizistische Begründung der Mathematik lieferte.

türlicher Zahlen abgebildet. Es wird möglich, die Gödelnummer für jeden in P gegebenen Ausdruck zu berechnen, und umgekehrt kann geprüft werden, ob eine gegebene Zahl einem arithmetisch-logischen Ausdruck im Kalkül entspricht, indem eine Endformel in einer Zeichenreihe, eben einer Beweisfigur, die sozusagen den Formelstammbaum wiederherstellt, vollständig beschrieben wird. Zahlen ≤ 10 identifizieren elementare Zeichen, Primzahlen > 10 oder zweite oder dritte Potenzen einer solchen identifizieren Variablen und Zahlen, die das Produkt potenzierten aufeinanderfolgender Primzahlen sind, identifizieren Formeln oder Beweisfiguren.

Als Beispiel sei die nachstehende Rechnung aus Nagel / Newman (1958, 76) wiedergegeben, in der die arithmetische Formel $0 = 0$ die Gödelzahl 243.000.000 hat:

A	243.000.000				
B	64	x	243	x	15.625
C	2^6	x	3^5	x	5^6
D	6		5		6
	↓		↓		↓
	0		=		0
E	$0 = 0$				

Je nach Leserichtung zeigt das Beispiel, wie die Zahl in den Ausdruck überführt wird oder wie die Zahl für die Formel bestimmt wird.

Arithmetisierung der Metamathematik besagt also, daß sich die logischen Beziehungen zwischen metamathematischen Sätzen in den numerischen Abhängigkeitsverhältnissen der abbildenden arithmetischen Formeln wiederfinden. Durch das skizzierte Verfahren werden metamathematische Aussagen in Aussagen über natürliche Zahlen abgebildet, wobei die wahren metamathematischen Aussagen in wahre arithmetische Aussagen übergehen. Die so gebildeten Sätze lassen sich in den Symbolen der »Principia Mathematica« selbst ausdrücken.

Gödels Argumentation lehnt sich an das Richardsche Paradoxon und die Antinomie des Lügners von Epimenides an. Er schreibt in einer Fußnote, daß sich »überhaupt jede epistemologische Antinomie zu einem derartigen Unentscheidbarkeitsbeweis verwenden« (Gödel 1931, 175) lasse. Das Richardsche Paradoxon sei hier beschrieben, um einen Anhalt für die Analogie, aber auch für die viel komplexere Argumentation Gödels zu geben. Ausgangspunkt ist, daß eine Liste von Definitionen von Eigenschaften natürlicher Zahlen aufstellt wird. Jede dieser Definitionen besteht aus einer endlichen Anzahl von Buchstaben. Diese Definitionen können so angeord-

net werden, daß der Definition mit der kleinsten Buchstabenanzahl die Zahl »1«, der Definition mit der zweitkleinsten Buchstabenanzahl die Zahl »2« usw. zugeordnet werden. Es ist möglich, daß bei diesem Verfahren eine bestimmte Zahl eine Eigenschaft zugeordnet bekommt, die sie selbst hat. Wenn beispielsweise die Definition für Primzahl die Zahl »5« erhält. Als Richardsche Zahl wird nun definiert: » x ist eine Richardsche Zahl, wenn x nicht die Eigenschaft hat, der x in der Reihenfolge der Definitionen zugeordnet ist.« Dies wäre zum Beispiel der Fall, wenn die Definition für Primzahl die Zahl »4« erhält. Wenn dann auch der Definition der Eigenschaft, Richardsche Zahl zu sein, eine Zahl zugeordnet wird, so entsteht ein Paradoxon. Wenn nämlich n eine Richardsche Zahl ist, dann hat sie nicht die Eigenschaft, die in der ihr zugeschriebenen Definition beschrieben ist, nämlich Richardsche Zahl zu sein. Und umgekehrt, wenn n keine Richardsche Zahl ist, dann hat sie die Eigenschaft, eine Richardsche Zahl zu sein, da dies in der Definition angegeben ist. (Vgl. Krämer 1988, 147f.; vgl. Stegmüller 1973b, 3ff.)

Im *ersten* Schritt gibt Gödel unter Verwendung (primitiv-) rekursiver Funktionen eine arithmetische Formel G an, sie repräsentiert den metamathematischen Satz »Die Formel G ist nicht beweisbar.« Die Aussage der Formel ist offenkundig selbstbezüglich. Dieser Formel wird eine Zahl h zugeordnet. G ist so gebildet, daß dieser Formel der Satz entspricht: »Die Formel, der die Zahl h zugeordnet ist, ist nicht beweisbar.«

Im *zweiten* Schritt begründet Gödel, daß G nur dann beweisbar sei, wenn sein Negat beweisbar ist et vice versa. Sind aber sowohl G als auch sein Negat beweisbar, dann ist das axiomatische System widersprüchlich. Ist hingegen das System widerspruchsfrei, dann können weder G noch sein Negat abgeleitet werden, damit ist G formal unentscheidbar im gegebenen System.

Eine Formel aus PM mit genau einer freien Variablen, u. zw. vom Typus der natürlichen Zahlen (Klasse von Klassen) wollen wir ein Klassenzeichen nennen. Die Klassenzeichen denken wir uns irgendwie in eine Folge geordnet, bezeichnen das n -te mit $R(n)$ und bemerken, daß sich der Begriff »Klassenzeichen« sowie die ordnende Relation R im System PM definieren lassen. Sei α ein beliebiges Klassenzeichen; mit $[\alpha, n]$ bezeichnen wir diejenige Formel, welche aus dem Klassenzeichen α dadurch entsteht, daß man die freie Variable durch das Zeichen für die natürliche Zahl n ersetzt. Auch die Tripel-Relation $x = [y; z]$ erweist sich als innerhalb PM definierbar. Nun de-

finieren wir eine Klasse K natürlicher Zahlen folgendermaßen:

$$n \in K \equiv \neg \text{Bew} [R(n); n] \quad (1)$$

(wobei $\text{Bew } x$ bedeutet: x ist eine beweisbare Formel). Da die Begriffe, welche im Definiens vorkommen, sämtlich in PM definierbar sind, so auch der daraus zusammengesetzte Begriff K , das heißt es gibt ein Klassenzeichen S , so daß die Formel $[S; n]$ inhaltlich gedeutet besagt, daß die natürliche Zahl n zu K gehört. S ist als Klassenzeichen mit einem bestimmten $R(q)$ identisch, das heißt es gilt

$$S = R(q)$$

für eine bestimmte natürliche Zahl q . Wir zeigen nun, daß der Satz $[R(q); q]$ in PM unentscheidbar ist. Denn angenommen der Satz $[R(q); q]$ wäre beweisbar, dann wäre er auch richtig, das heißt aber nach dem obigen q würde zu K gehören, das heißt nach (1) es würde $\neg \text{Bew} [R(q); q]$ gelten, im Widerspruch mit der Annahme. Wäre dagegen die Negation von $[R(q); q]$ beweisbar, so würde $n \in K$, das heißt $\text{Bew} [R(q); q]$ gelten. $[R(q); q]$ wäre also zugleich mit seiner Negation beweisbar, was wiederum unmöglich ist. (Gödel 1931, 175)

Gödels *dritter* Schritt besteht darin, zu zeigen, daß G ungeachtet seiner formalen Unbeweisbarkeit wahr ist. Zum Beispiel läßt sich der Satz wegen seiner Selbstbezüglichkeit umformen in: »Ich bin nicht beweisbar.« Dieser Satz ist im System P formal nicht beweisbar, aber wahr, während sein Negat formal nicht beweisbar, aber falsch ist. Die Formel G ist arithmetisch wahr, weil sie einem wahren metamathematischen Satz entspricht, sie ist aber nicht aus den Axiomen der Arithmetik ableitbar. Gödel schreibt: »Aus der Bemerkung, daß $[R(q); q]$ seine eigene Unbeweisbarkeit behauptet, folgt sofort, daß $[R(q); q]$ richtig ist, denn $[R(q); q]$ ist ja unbeweisbar (weil unentscheidbar). Der im System PM unentscheidbare Satz wurde also durch metamathematische Überlegungen doch entschieden.« (Gödel 1931, 176) Ist G zugleich wahr und formal unentscheidbar, sind die Axiome der Arithmetik unvollständig. Ihre Unvollständigkeit ist prinzipiell und nicht durch die Hinzunahme von Axiomen, die G ableitbar machen, zu beheben; Ergebnis dieses Vorhabens wäre stattdessen ein regressus in infinitum. Paradoxien wie die beiden oben genannten sind zwar durch die Anwendung der von Russell entwickelten Typentheorie, gemäß der Allaussagen in verschiedenen hierarchischen Ebenen anzuordnen sind, so daß sie sich nicht mehr auf sich selbst beziehen können, womit das Paradoxe eliminiert wird, lösbar. So genügen im Fall der Lügner-Antinomie zwei Ebenen, die objektsprachliche

und die metasprachliche Ebene, um die Paradoxie aufzulösen. (Vgl. Russell 1908, 23, 41f.) Aber das Russellsche Verfahren kann keine Lösung für die Unvollständigkeit der von Gödel untersuchten formalen Systeme bieten.

Der wahre Grund für die Unvollständigkeit, welche allen formalen Systemen der Mathematik anhaftet, liegt [...] darin, daß die Bildung immer höherer Typen sich ins Transfinite fortsetzen läßt [...], während in jedem formalen System höchstens abzählbar viele vorhanden sind. Man kann nämlich zeigen, daß die hier aufgestellten unentscheidbaren Sätze durch Adjunktion passender höherer Typen [...] immer entscheidbar werden. (Gödel 1931, 191)

Anders als bei der Lösung der Lügner-Antinomie genügt für die Lösung des Unvollständigkeitsproblems also nicht die Unterscheidung in endlich viele Ebenen, sondern der Prozeß kann ins Transfinite fortgesetzt werden, so daß keine endgültige Lösung zu finden ist.

Gemäß den logizistischen und formalistischen Hypothesen hätten in einem formalen System alle wahren Sätze aus den Axiomen formal ableitbar sein müssen, daß dies nicht so ist, macht den Inhalt des ersten Gödelschen Unvollständigkeitssatzes²⁰² aus (Satz VI in Gödel 1931). Zu ihm faßt Gödel zusammen:

Beim Beweise von Satz VI wurden keine anderen Eigenschaften des Systems P verwendet als die folgenden:

1. Die Klasse der Axiome und die Schlußregeln (d.h. die Relation »unmittelbare Folge«) sind rekursiv definierbar (sobald man die Grundzeichen in irgend einer Weise durch natürliche Zahlen ersetzt).
2. Jede rekursive Relation ist innerhalb des Systems P definierbar (im Sinne von Satz V).

Daher gibt es in jedem formalen System, das den Voraussetzungen 1, 2 genügt und ω -widerspruchsfrei ist, unentscheidbare Sätze der Form $(x) F(x)$, wobei F eine rekursiv definierte Eigenschaft natürlicher Zahlen ist, und ebenso in jeder Erweiterung eines solchen Systems durch

²⁰² Der Begriff Unvollständigkeit wird von Gödel 1931 nur in einer Anmerkung benutzt. In der anschließenden Literatur wird dann äquivalent von den Gödelschen Unvollständigkeitssätzen, den Gödeltheoremen, den Unentscheidbarkeitssätzen oder den Unableitbarkeitssätzen gesprochen. Vor allem in populären Darstellungen stellt sich auch der Singular ein, weil manche Autoren nicht wahrnehmen, daß es sich um zwei Sätze handelt. 1931 hat Gödel den zweiten Satz nicht strikt bewiesen. Der Beweis sollte in der nie erschienenen Fortsetzung des Artikels durchgeführt werden. Er erfolgte durch Hilbert und Bernays (1939).

eine rekursiv definierbare ω -widerspruchsfreie Klasse von Axiomen. Zu den Systemen, welche die Voraussetzungen 1, 2 erfüllen, gehören, wie man leicht bestätigen kann, das *Zermelo-Fraenkel'sche* und das *v. Neumann'sche* Axiomensystem der Mengenlehre, ferner das Axiomensystem der Zahlentheorie, welches aus den *Peanoschen* Axiomen, der rekursiven Definition [nach Schema (2)] und den logischen Regeln besteht. Die Voraussetzung 1 erfüllt überhaupt jedes System, dessen Schlußregeln die gewöhnlichen sind und dessen Axiome (analog wie in P) durch Einsetzung aus endlich vielen Schemata entstehen. (Gödel 1931, 190f., Hervorhebungen im Original)²⁰³

Die bisher vorgestellte Gedankenskizze der Argumentation Gödels hat zu dem metamathematischen Satz: »Wenn die Arithmetik widerspruchsfrei ist, ist sie unvollständig« und zu der Unterscheidung von Beweisbarkeit und Wahrheit geführt. Von diesem Zwischenergebnis aus entwickelt Gödel Konsequenzen bezüglich der Widerspruchsfreiheit formaler Systeme, die er selbst »überraschend« und »merkwürdig« nennt. (Gödel 1931, 176, 196) Sie machen den Gehalt seines zweiten Unvollständigkeitssatzes (Satz XI in Gödel 1931) aus:

Sei χ eine beliebige rekursive widerspruchsfreie {Anm. 63: χ ist widerspruchsfrei (abgekürzt als Wid (χ)) wird folgendermaßen definiert: $\text{Wid}(\chi) \equiv (E x) [\text{Form}(x) \ \& \ \text{Bew}_\chi(x)].$ Klasse von *Formeln*, dann gilt: Die *Satzform*, welche besagt, daß χ widerspruchsfrei ist, ist nicht χ -*beweisbar*; insbesondere ist die Widerspruchsfreiheit von P in P unbeweisbar {Anm. 64: Dies folgt, wenn man für χ die leere Klasse von *Formeln* einsetzt.}, vorausgesetzt, daß P widerspruchsfrei ist (im entgegengesetzten Fall ist natürlich jede Aussage beweisbar). (Gödel 1931, 196)

Dem folgt eine Beweisskizze, die sich im wesentlichen umgangssprachlich formulieren läßt: Der Satz »Wenn die Arithmetik widerspruchsfrei ist, ist sie unvollständig« (1), kann in der formalisierten Arithmetik durch eine beweisbare Formel ausgedrückt werden. Sie wird wie folgt aufgestellt: Die Äquivalenz der metamathematischen Sätze »Die Arithmetik ist widerspruchsfrei« (2) und »Es gibt mindestens eine arithmetische Formel, die nicht beweisbar

²⁰³ Tatsächlich genügen schwächere Voraussetzungen als Gödel sie macht. J. Barkley Rosser (1907-1989) (1936) hat gezeigt, daß ω -Widerspruchsfreiheit nicht gefordert werden muß, sondern daß Gödels Ergebnis für bloß widerspruchsfreie Systeme gelten.

ist« (3), wird gezeigt und der letzte Satz durch eine Formel A im arithmetischen Kalkül abgebildet. Diese Formel besagt, daß es mindestens eine Zahl y derart gibt, daß für jede Zahl x gilt: x steht nicht in der Relation Bew zu y . Metamathematisch gedeutet ergibt sich der präzisierte Satz: »Es gibt mindestens eine arithmetische Formel, für die keine Folge von Formeln einen Beweis bildet.« (4) Somit repräsentiert die Formel A den Vordersatz von (1), während der Hintersatz durch die Formel G repräsentiert wird, die den metamathematischen Satz: »Es gibt einen wahren arithmetischen Satz, der in der Arithmetik nicht formal beweisbar ist«, abbildet. Wir erhalten somit als (1') » $A \rightarrow G$ «. Wäre A in P ableitbar, das heißt beweisbar, ließe sich mit dem modus ponens auch G ableiten. Wie im Zusammenhang mit dem ersten Unvollständigkeitssatz erläutert, folgt aus der Ableitbarkeit von G in P aber auch die Ableitbarkeit des Negats von G . P wäre dann widersprüchlich. Wenn also P widerspruchsfrei ist, so kann G nicht formal entscheidbar sein. Es kann dann auch A , das in P ja die Widerspruchsfreiheit von P repräsentiert, in P nicht ableitbar sein. In anderen Worten, die Widerspruchsfreiheit von P ist nicht mit Mitteln beweisbar, die in P formalisiert werden können.

Die Resultate der Gödelschen Arbeit bringen das Hilbertprogramm zum Scheitern. Ein mit finiten Mitteln geführter Widerspruchsfreiheitsbeweis ist schon für die Arithmetik nicht zu führen, geschweige denn, daß er der von Hilbert angestrebte Rettungsversuch für die gesamte klassische Mathematik wäre. »Gödels paradigmatisch am System P vorgeführte Konstruktion des in P unentscheidbaren Satzes G (die sich analog in allen zur Spiegelung der Arithmetik mit Addition und Multiplikation fähigen Vollformalismen vornehmen läßt) hat [...] gezeigt, daß kein Vollformalismus alle wahren Aussagen der durch ihn vollformalisierten Theorie abzuleiten gestattet; darin liegt eine prinzipielle Grenze solcher Kalküle.« (Thiel 1992, 173)

Gödels Unvollständigkeitssätze leisten eine immanente Kritik an der Vorstellung, alle mathematischen Probleme seien innerhalb des Kalküls lösbar, sofern sie nur entsprechend formalisiert werden, das heißt in mathematische Symbole umgeformt, und die Lösung innerhalb des Kalküls rein rechnerisch ermittelt wird. Gegenüber dieser Vorstellung ist das Gödelsche Resümee festzuhalten, daß, obwohl alles Mathematische formalisierbar sei, doch nicht die ganze Mathematik in einem formalen System formalisiert werden könne. Dieser Erkenntnis kommt eine Bedeutung und Geltung zu, die über die Mathematik hinausgeht. Sie entzieht nämlich Programmen wie dem Leibniz' die Möglichkeit einer rationalen Letztbegründung. Eine

»scientia generalis«, mit der alle Erkenntnisgewinnung rein rechnerisch möglich wäre, erweist sich als unmöglich und das »Calculus« zur »Behebung von Streitigkeiten« wird hinfällig. Zwischen mathematischer Unbeweisbarkeit und erkenntnistheoretischer Unbeweisbarkeit stellen sich Analogien ein, die Konsequenzen für inner- und außerwissenschaftliche Einheitsvorstellungen haben. Außer Zweifel steht, daß Hilberts Vorhaben Universalitätsansprüche enthielt. Ein Aufruf wie der kurz nach der Veröffentlichung der Resultate Gödels publizierte, die Mathematik »wie ein Heiligtum zu hüten, damit einst *alles* menschliche Wissen überhaupt der gleichen Präzision und Klarheit teilhaftig wird« (Hilbert 1931, 494, Hervorhebung im Original), läßt daran keinen Zweifel zu. (Vgl. Thiel 1992, 174f.)

Mit Gödels Unvollständigkeitssätzen endete die Suche nach formalistischen Widerspruchsfreiheitsbeweisen jedoch nicht, sondern finitistische Restriktionen des Beweisverfahrens wurden fallengelassen. 1936 legte Hilberts Assistent Gerhard Gentzen (1909-1945) einen Widerspruchsfreiheitsbeweis für die Arithmetik vor, in dem er sich neben finiten Schlüssen, die im System selbst ableitbar sind, der transfiniten Induktion bediente. Wollte Hilbert ursprünglich fragwürdige mathematische Schlußweisen (wie die von den Intuitionisten kritisierte Anwendung des tertium non datur auf Unendliches) durch einen auf unanfechtbaren, das heißt streng finiten Schlußweisen basierenden metamathematischen Widerspruchsfreiheitsbeweis für ein vollformalisiertes System, dem die fragwürdigen Schlußweisen angehören, rechtfertigen, kehrte sich die Beweisstrategie nun um. Um den Teil der im System formalisierten Methoden zu rechtfertigen, gegen die sich das ursprüngliche Mißtrauen richtete, wurden weitere, nicht im formalen System ableitbare Methoden zugelassen. (Vgl. Stegmüller 1973b, 27f.)

4.2.7 Turings maschinentheoretische Wende

Im Jahr 1935 hatte Turing am King's College in Cambridge eine Vorlesung von Newman über Grundlagenfragen der Mathematik gehört. Bei dieser Veranstaltung wurde er auch mit dem von Hilbert aufgeworfenen Entscheidungsproblem bekannt, dessen Bedeutung Hilbert und Ackermann 1928 ausdrücklich hervorgehoben hatten: »Die Lösung des Entscheidungsproblems ist für die Theorie aller Gebiete, deren Sätze überhaupt einer logischen Entwickelbarkeit aus endlich vielen Axiomen fähig sind, von grundsätzlicher Wichtigkeit.« (Hilbert / Ackermann 1928, 73f.) Während Gödels

Ergebnisse aus dem Jahr 1931 die Annahmen der Vollständigkeit und der Widerspruchsfreiheit widerlegt hatten, war dieses Problem noch offen und Newman schloß seine Vorlesung mit ihm. (Vgl. Hodges 1989, 111ff.) 1936 schrieb Turing dann die Arbeit, die die Frage nach der Entscheidbarkeit negativ beantwortete. Sie zeichnete sich dadurch aus, auf das mathematische Problem mit einem maschinentheoretischen Ansatz zu antworten. 1937 wurde die Antwort unter dem Titel »On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem« in den »Proceedings of the London Mathematical Society« veröffentlicht.²⁰⁴ In Erwartung einer positiven Lösung hatten Bernays und Moses Schönfinkel (1889-1942) zum allgemeinen Charakter des Entscheidungsproblems ausgeführt:

Es soll nun ein Verfahren gefunden werden, durch welches man von einer vorgelegten Formel stets entscheiden kann, ob sie für jeden Individuenbereich und für jede Wahl der logischen Funktionen eine richtige Aussage liefert.

Die logischen Funktionen werden hierbei lediglich in Hinsicht auf ihren Wertverlauf betrachtet, d. h. es kommt bei einer logischen Funktion für unsere Frage nur darauf an, daß jedem Wertsystem ihrer Argumente eindeutig einer der Werte »wahr« oder »falsch« zugeordnet ist, gleichgültig, wie man zu dieser Zuordnung gelangt.

Wir wollen eine Formel, die bei jeder Einsetzung logischer Funktionen eine richtige Aussage ergibt, eine »allgemeingültige« Formel nennen. Die geforderte Entscheidung betrifft die Allgemeingültigkeit einer Formel für jeden Individuenbereich.

(Bernays / Schönfinkel 1928, 343)

Turing gab die Hypothese der Entscheidbarkeit von vornherein auf und reformulierte das Entscheidungsproblem unter der entgegengesetzten Hypothese so:

I propose, therefore, to show that there can be no general process for determining whether a given formula $\mathcal{U}$ of the functional calculus $\mathbf{K}$ is provable, i.e. that there can be no machine which, supplied with any one $\mathcal{U}$ of these formulae, will eventually say whether $\mathcal{U}$ is provable. (Turing 1936/37, 259)

²⁰⁴ Die Veröffentlichung weicht von dem 1936 zunächst geschriebenen Text insofern ab, als Turing in ihr auch auf Churchs Arbeiten zum Entscheidungsproblem aus dem Jahr 1936 reagiert.

Das Entscheidungsproblem mit der von Turing gewählten Hypothese anzugehen, erforderte einen präzisen Begriff der Berechenbarkeit, denn die Hypothese enthält einen Allsatz. Die Behauptung, daß eine wohldefinierte Aufgabe durch keinen Algorithmus gelöst werden kann, zwingt dazu, anzugeben, was das allgemeinste denkbare Verfahren ist, denn nur dieses erstreckt sich möglicherweise auf alle Algorithmen. (Vgl. Krämer 1988, 157f.; Hopcroft 1984, 34) In diesem Sinn zielt Turings Absicht über die bloße Beantwortung der Hilbertschen Frage hinaus, was auch der Titel seiner Arbeit belegt, und ist nichts weniger als der Versuch, ein nicht hintergehbare Einheitsverfahren vorzulegen.

Um intuitive Annahmen über Berechenbarkeit durch einen präzisen Begriff zu ersetzen, konzentrierte Turing sich auf die Schritte im Vorgang des Rechnens. »The real question at issue is ›What are the possible processes which can be carried out in computing a number?« (Turing 1936/37, 249) Er machte dazu zunächst eine Annahme darüber, wie ein Mensch auf Karopapier rechne, der beliebig Raum und Zeit für die Ausführung hat. Der von ihm angenommene Rechenvorgang ist deterministisch und endlich, er läßt keinen Raum für Lösungswege jenseits der gegebenen Routine, und er ist insofern elementar, als der Rechner zu einem Zeitpunkt jeweils nur ein Zeichen schreiben oder ausradieren kann. Eine erste Definition ist somit, daß berechenbar sei, was ein so verfahrender Mensch einer Lösung zuführen könne. Das angenommene Verfahren gilt Turing als *mechanisch* und damit als maschinell ausführbar. Seine These lautet dementsprechend: Was zufolge einer eindeutigen Vorschrift von einer Maschine gerechnet werden kann, ist berechenbar, zugleich werden Mensch und Maschine gleichgesetzt.²⁰⁵

Turings Biograph Andrew Hodges meint, der Ausdruck »mechanisches Verfahren«, den Newman in seiner Vorlesung benutzt haben soll, habe Turing besonders beeindruckt, und er habe deshalb überlegt, wie eine Maschine aufgebaut sein müßte, die ein solches Rechenverfahren ausführen kann. Das Bild der Mathematik als Mechanismus war zu diesem Zeitpunkt nicht neu, Gödel bediente sich seiner zum Beispiel gleich im ersten Satz von

²⁰⁵ Diese schlichte Gleichsetzung war von Turing völlig ernst gemeint. Sie wurde von ihm in späteren Arbeiten ausgebaut (vgl. zum Beispiel Turing 1950) und bildet einen Ausgangspunkt der KI. Heinz Mühlenbein (1995) vergleicht den simplifizierenden Umgang Turings mit menschlicher und maschineller »Intelligenz« mit der wesentlich skeptischen Haltung von Neumanns in der Frage. Hinweise auf Geschichte und Kontext des hier vorgelegten Intelligenzbegriffs gibt Heike Stach (1995). Vgl. zum neuzeitlichen »Denken sub specie machinae« Kapitel 5.2.2.

»Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme«, wo es heißt, »daß das Beweisen nach einigen wenigen mechanischen Regeln vollzogen werden kann.« (Gödel 1931, 173) Neu war aber, die Metapher wörtlich zu nehmen und tatsächlich ein Maschinenmodell auszuformulieren.

Im folgenden soll die Turingmaschine als Modell des Berechenbaren in möglichst einfacher Weise erläutert werden, denn gerade so wird klar, weshalb das Turingsche Verfahren als unhintergebar angesehen wird.²⁰⁶

Das mechanische Modell der Turingmaschine ist einer Schreibmaschine sehr ähnlich. Die Reaktion der Schreibmaschine auf eine Eingabe hängt von ihrem augenblicklichen Zustand (Großbuchstaben- oder Kleinbuchstabenkonfiguration) ab, ihre Tastatur erlaubt nur eine endliche Anzahl von möglichen Einwirkungen auf die Maschine und der Anschlagspunkt wird relativ zum Papier verändert. Eine vollständige Beschreibung des Verhaltens der Maschine wäre möglich. Die Turingmaschine besteht aus einem beweglichen Schreib- und Lesekopf, mit dem sukzessive Zeichen eines Alphabets, das heißt einer endlichen Menge von Symbolen, auf ein in Felder unterteiltes, unendliches Band geschrieben werden. Der Schreibkopf kann sich nach rechts oder links pro Arbeitstakt um ein Feld bewegen und jedes Feld darf nur ein Zeichen erhalten. Vorhandene Zeichen kann der Schreibkopf löschen. Zu einem Zeitpunkt befindet sich jeweils ein Feld zur Bearbeitung vor dem Kopf. Dieses Feld wird gelesen, sein Inhalt bestimmt mit dem bestehenden Zustand der Maschine deren nächsten Zustand. Die auf dem Band vorhandenen Zeichen werden also als Eingaben genutzt, die die Arbeitsschritte der Maschine steuern. Zu den beiden Anfangsbedingungen, vorhandener Zustand und aktueller Feldinhalt, muß folglich eine Regel hinzukommen, die bestimmt, wie das Feld nun zu beschriften ist und ob und wenn ja, wohin sich der Schreibkopf als nächstes bewegen soll. (Vgl. Turing 1936/37, 231f.) Jede Anweisung für die Maschine läßt sich somit als Tripel aus Werten für die drei Variablen: Zeichen auf dem Band, Maschinenzustand, Bewegungsrichtung notieren. Die Ausführung wird dann vollständig als Folge von Quintupeln $(z, b, b+1, r, z+1)$ beschrieben. Dabei ist z der aktuelle Zustand der Maschine, b ist das Zeichen des aktuell gelesenen Feldes,

²⁰⁶ Umfangreiche und präzise Darstellungen des Zusammenhangs von Turingberechenbarkeit, Funktionen-, Algorithmen- und Automatentheorie liegen seit langem mit den Lehrbüchern von Hans Hermes (1912-2003) (1961), Wilfried Brauer und Klaus Indermark (1968) sowie John E. Hopcroft und Jeffrey D. Ullman (1979) vor. Zu den mit Hilfe der Turingmaschine begründbaren Grenzen der maschinellen Berechenbarkeit vgl. zudem Brauer (1990).

$b+1$ gibt an, welches Zeichen geschrieben werden soll, r ist die Bewegungsrichtung und $z+1$ ist der nächste Zustand. Eine Folge von Quintupeln wird als Verhaltenstabelle dargestellt; sie kann ebenso gut als Programm angesehen werden.

Zur Veranschaulichung sei das Beispiel einer einfachen Additionsmaschine für zwei natürliche Zahlen gegeben: Die Maschine verwendet einen binären Zeichensatz $(0,1)$ und konstruiert zu jedem Paar (n,m) , das auf dem Band unär zwischen Symbolen 0 dargestellt ist, eine Folge von Zeichen, die $n+m$ darstellt.²⁰⁷

Zustand z	gelesenes Symbol b	zu schreibendes Symbol $b+1$	Bewegung r	nächster Zustand $z+1$
1	0	0	R	1
1	1	0	R	2
2	0	1	L	3
2	1	1	R	2
3	0	0	R	4
3	1	1	L	3
4	0	0	Halt	–
4	1	1	Halt	–

Tabelle 21. Additionsmaschine

Jede Zeile beschreibt einen Rechenschritt. Die erste Zeile der Verhaltenstafel ist wie folgt zu lesen: Wenn die Maschine im Zustand 1 eine 0 auf dem Band liest, dann soll sie dieses Symbol auf 0 stehen lassen, eine Stelle nach rechts (R) rücken und in den nächsten Zustand übergehen, das heißt hier Zustand 1 beibehalten. Die zweite Zeile besagt, daß die Maschine, wenn sie im Zustand 1 eine 1 auf dem Band vorfindet, diese in eine 0 ändern, dann ebenfalls nach rechts wandern und in den Zustand 2 übergehen soll. Die anderen Zeilen werden analog interpretiert.

Die Ausgangsbeschriftung eines gegebenen Bandes sei »0 1 1 0 1 1 1 0«. Es sollen somit die Zahlen 2 und 3 addiert werden. Die Maschine befinde sich auf der am weitesten links stehenden 0. Die Operationen und deren Wirkungen auf die Bandbeschriftung (kursiviert) sind:

²⁰⁷ Soll statt $\mathbb{N}$ (Menge der natürlichen Zahlen) eine Klasse benutzt werden, die die Zahl 0 enthält, muß die Zahl n natürlich durch $n+1$ Einsen dargestellt werden.

Operationen	Bandbeschriftung
1 0 0 R 1	0 1 1 0 1 1 1 0
1 1 0 R 2	0 0 1 0 1 1 1 0
2 1 1 R 2	0 0 1 0 1 1 1 0
2 0 1 L 3	0 0 1 1 1 1 1 0
3 1 1 L 3	0 0 1 1 1 1 1 0
3 0 0 R 4	0 0 1 1 1 1 1 0
4 1 1 H –	0 0 1 1 1 1 1 0 ...

Tabelle 22. Additionsmaschine

Eine Berechnung mittels einer Turingmaschine besteht also lediglich aus der geordneten Abfolge folgender Aktionen:

- eine 0 lesen
- eine 0 schreiben
- eine 1 lesen
- eine 1 schreiben
- ein Feld nach links rücken
- ein Feld nach rechts rücken
- halten
- zu einem bestimmten Schritt des Programms übergehen, wenn eine 0 gelesen wird
- zu einem bestimmten Schritt des Programms übergehen, wenn eine 1 gelesen wird

Die aufgeführten Aktionen sind elementar und sofern eine Turingmaschine ausreichend viele Zustände hat, um eine bestimmte Aufgabe auszuführen, wird dies deterministisch geschehen, wobei es möglich ist, zur Bearbeitung komplexer Aufgaben einfache Turingmaschinen miteinander zu kombinieren.²⁰⁸ Mittels einer Turingmaschine ist also alles das berechenbar, wofür es einen Algorithmus gibt, der durch eine Verhaltenstabelle beschrieben werden kann; und eine berechenbare Funktion ist damit eine solche, für die es einen Algorithmus gibt, der für beliebige gegebene Argumente den Funktionswert liefert. Eine Begrenzung auf arithmetische Aufgaben ist nicht vorhanden, da jegliche Formel, zum Beispiel durch Gödelnumerierung, in bearbeitbarer Weise dargestellt werden kann.

Das bisher Gesagte führt zu dem als »Turing'sche These« bezeichneten Postulat, daß jegliches, was für einen Menschen effektiv berechenbar ist, auch turingberechenbar sei. Die These wird dadurch gestützt, daß Turing

²⁰⁸ Beispiele für spezielle Turingmaschinen in Hermes 1961, 48-55; Brauer und Indermark 1968, 21-39; Hopcroft und Ullman 1979, 162-177.

tatsächlich die Gleichwertigkeit seiner Formalisierung der Berechenbarkeit mit der ebenfalls 1936 formulierten Präzisierung von Church nachwies. (Church 1936a; Church 1936b; Church 1936c; Turing 1937) Auch die Gleichwertigkeit mit den anderen, später vorgelegten Präzisierungen ist gegeben.²⁰⁹

Turings These ist demnach plausibel, sie ist aber nicht beweisbar.²¹⁰ (Vgl. Brauer 1990, 67f.) Auch ist es nicht erforderlich, irgendwelche naturalistischen Schlüsse auf »den Menschen« zu ziehen oder »die Intelligenz« mit zu verhandeln, denn die Analyse des Rechnens als deterministischen Vorgang in elementaren Schritten läßt sich ohne derartiges als Umformung von endlichen Zeichenreihen nach Regeln verstehen.

Eine Vielzahl spezieller Turingmaschinen wäre in der angegebenen Weise mit Maschinen im herkömmlichen Sinn realisierbar, andererseits ist die technische Ausführung beliebig, solange mit ihr das Verfahren ausführbar ist. Dieser Sachverhalt hat dazu geführt, daß von physischen Maschinen, die physikalischen Zwängen und Limitationen unterliegen, häufig ganz abgesehen wird und stattdessen nur die formale Struktur betrachtet wird. Unter der Parole: »Der Algorithmus ist die Maschine« (Bammé u.a. 1983, 145) ist von »transklassischen Maschinen«, »kybernetischen Maschinen« oder wie bei Krämer (1988) von »symbolischen Maschinen« die Rede. Dabei wird auf die Geschichte des formalen Denkens einerseits und Turings Konzept andererseits Bezug genommen, nicht aber auf das faktische maschinelle Rechnen der damaligen Zeit. In Kapitel 3 ist vorgeführt worden, mit welchen Maschinen tatsächlich gerechnet wurde, als Turing die Metapher des Mechanischen wörtlich nahm und sein Maschinenmodell vorstellte. Angesichts der vorhandenen Praxis des maschinellen Rechnens war es vor der technischen Entwicklung des Computers naheliegend, sich auch einen Universalrechner als mechanisch wirkende Maschine zu denken. Dennoch ist dies von Anfang an ein unzutreffendes Modell gewesen. Die maschinentheoretische Beschreibung des Turingschen Verfahrens zur Umformung von endlichen Zeichenketten nach Regeln ist nämlich nur möglich, wenn zugelassen wird, daß in der Beschreibung unmögliche Bestandteile auftreten. Von dem Moment an, in dem nicht mehr auf mathematisch-logische Gegenstände

²⁰⁹ Vgl. hierzu neben den schon genannten Hermes (1961), Brauer und Indermark (1968) sowie Hopcroft und Ullman (1979) auch Robin Gandy (1988) für die Rekonstruktion der mathematischen Problemgeschichte, die 1936 in den zeitgleichen Arbeiten von Church und Turing mündete.

²¹⁰ Das gleiche gilt selbstredend für die entsprechende These von Church, daß jegliche berechenbare Funktion mittels des λ -Kalküls definiert werden kann.

Bezug genommen wird, sondern auf empirische Gegebenheiten, ist es sinnvoll, der Hertzschen Forderung an Bilder zu genügen. In diesem Sinn entwickelte Turing etwas *Unrichtiges*, denn schon mit dem unendlichen Band gerät die Turingmaschine in Widerspruch zu den uns aus der Physik bekannten »Beziehungen der äußeren Dinge«.²¹¹ In einer endlichen Welt gibt es endlose Maschinen ebenso wenig wie das Perpetuum mobile. Die Rede von einer neuen Klasse von Maschinen im Anschluß an Turing läßt die Grenze zwischen Logisch-mathematischem und Empirischem undeutlich werden und eröffnet die Gefahr, »Gedankendinge« wie Kalküle als Eigenschaften von »Realien«, etwa als »Formalität«, zu interpretieren und einen logisch erweiterten Maschinendiskurs zu führen, der problematisch ist, weil damit eine Reinterpretation der alten Mensch-Maschine-Debatte eröffnet wird, die in ihrem Verlauf nie ohne metaphysische Annahmen auskam.

Das Modell der Turingmaschine ist sehr schnell akzeptiert worden. Die maschinen-theoretische Ausformulierung mit ihrer Kette Mensch-Maschine-Algorithmus wurde vor allem von der KI aufgegriffen und hat dort zu kognitionswissenschaftlich ausgerichteten Fragestellungen geführt, die sich mit der Arbeit von Informatikern aus anderen Gebieten kaum noch berühren. Das Modell hat ebenfalls eine wichtige Rolle in der theoretischen Informatik gespielt, wobei festzuhalten ist, daß dort anders als in der KI immer der logisch-mathematische Gehalt im Vordergrund gestanden hat. Insofern könnte es von Vorteil sein, die maschinen-theoretische Rede aufzugeben und das Turingsche Verfahren rein algorithmentheoretisch umzudeuten.

Zu den unbestreitbaren Leistungen des Turingschen Verfahrens gehört die im Titel der Arbeit von 1936 angekündigte Anwendung auf das Entscheidungsproblem. Es nimmt für Turingmaschinen die Form des »Halteproblems« an und kann in einer nichtformalen Beweisskizze dargestellt werden:

Die Frage lautet, ob es einen Kalkül gibt, der für eine beliebige Turingmaschine ebenfalls beliebiger Bandkonfiguration entscheidet, ob die Turingmaschine nach endlich vielen Schritten hält.

Alle Turingmaschinen werden numeriert, desgleichen die Bandkonfigurationen. Die zur Verwendung kommende Turingmaschine heiße T_x und die Bandkonfiguration B_x .

Nun wird angenommen, daß es einen Kalkül gibt, der erfüllt, wonach gefragt ist.

²¹¹ Vgl. die Ausführungen zu Hertz im Abschnitt 2.2.2.

Dies angenommen, sei die Funktion $f(x)$ partiell rekursiv, sofern gilt:

(1) $f(x)$ ist nicht definiert, wenn keine Turingmaschine die Nummer x aufweist;

(2) $f(x)$ ist 1 oder 0, je nachdem, ob die Turingmaschine T_x bei der gegebenen Bandkonfiguration hält oder nicht hält.

Sofern eine Turingmaschine vorhanden ist, die die Funktion $f(x)$ berechnet, läßt sich eine andere Turingmaschine T_y definieren, die sich von der Turingmaschine T_x dadurch unterscheidet, daß sie im Falle, daß T_x das Ergebnis 1 liefert und hält, nicht hält.

Es liegt nun auf der Hand, daß $f(y)=0$ sein muß, wenn die Turingmaschine T_y hält.

Zufolge der Definition der Funktion f hält die Turingmaschine in diesem Fall jedoch nicht.

Hält nun aber die Turingmaschine T_y nicht, dann muß $f(y)$ den Wert 1 annehmen.

Zufolge der Definition der Funktion f hält die Turingmaschine jedoch nun.

Es entsteht ein Widerspruch und folglich kann das Halteproblem nicht gelöst werden.

Für die Informatik ergibt sich hieraus das Argument, daß es kein Programm geben kann, das für alle anderen Programme entscheiden kann, ob sie halten oder nicht. Das hat die praktische Konsequenz:

Ein Betriebssystem eines Computers ist nicht in der Lage zu entscheiden, ob

- ein Programm (das auf dem Computer läuft) jemals hält (und ein Ergebnis liefert) oder
- ein Programmierfehler vorliegt, so daß es nie hält.

U.a. deshalb gilt auch in jedem Rechenzentrum [...], daß Programme, die innerhalb der vereinbarten Frist nicht von selbst halten, abgebrochen werden. (Brauer 1990, 66)

Die Praxis, Programme nach einer bestimmten Laufzeit abzubrechen, ist also nicht nur vordergründigen ökonomischen und zeitökonomischen Gründen geschuldet.

Wenn davon ausgegangen wird, daß ein Programm, das nicht endet, nach einer vorausbestimmten Zeit abgebrochen werden kann, dann ist dies nicht besonders problematisch, sofern es sich um Vorgänge handelt, die stillgestellt werden können, so daß eine andere Lösung angestrebt und aus-

probiert werden kann. Das ist für sehr viele Vorgänge im kommerziellen Bereich der Fall. Anders verhält es sich, wenn das Programm zur Steuerung von zeitkritischen und nicht reversiblen Prozessen dient. In diesem Fall setzt man darauf, daß das Programm enden wird, denn unter der Annahme, daß es nicht enden werde, hätte man den Vorgang gar nicht in Gang gesetzt (AKW zum Beispiel). Endet das Programm nicht, läßt sich hier auch nicht wirklich angeben, was passieren wird (Schlimmes, das steht höchstens fest); daß das Programm gestartet wurde, belegt jedoch schon, daß man von der Lieferung eines Ergebnisses ausgeht, alles andere wäre unsinnig. Das Verhalten hat damit die Struktur einer Wette. Der Wetter spielt dabei mit einem gegebenenfalls gar nicht kalkulierbaren Risiko, nicht aber mit der Vernunft des Pascalschen Wetters.

5 Leibniz' Kalkülvorstellung

Gottfried Wilhelm Leibniz wird immer wieder als »Vorläufer« der Informatik angeführt. Der Begriff des »Vorläufers« ist aber mit Vorbehalt zu benutzen, wie die Argumentation von Georges Canguilhem (1904-1995) klarmacht.

Ein Vorläufer wäre nämlich ein Forscher, der schon vor langer Zeit einen Weg zu Ende gegangen ist, den erst vor kurzem ein anderer zurückgelegt hat. [...] Nur weil er eine heliozentrische Hypothese aufgestellt hat, ist Aristarch von Samos noch kein Vorläufer von Kopernikus, auch wenn dieser sich auf jenen beruft. [...] Ein Vorläufer wäre ein Denker verschiedener Zeiten: seiner eigenen Zeit und der Zeit jener, die man ihm als seine Fortsetzer zuschreibt, als die Vollender seines unfertigen Unterfangens. Der Vorläufer ist also ein Denker, den der Historiker aus seiner kulturellen Umwelt herauslösen zu können glaubt, um ihn in eine andere Umwelt einzupflanzen. Das läuft darauf hinaus, anzunehmen, spekulative oder experimentelle Begriffe, Diskurse und Denkstile könnten beliebig versetzt werden. (Canguilhem 1979, 35)

Auch wird bei der Inanspruchnahme Leibniz' zumeist nur auf zwei Aspekte hingewiesen: Leibniz als »Erfinder« einer mechanischen Rechenmaschine, die neben der Addition auch die Multiplikation erlaubt, und Leibniz als »Erfinder« des Dualzahlensystems.²¹² Beide Aspekte sind wichtig, aber bedeutender ist Leibniz' Einfluß auf die Informatik als »Erfinder« des allgemeinen Kalkülbegriffs. Die Standardansicht hinsichtlich dieses Einflusses lautet weiter, daß mehr als die Anführung Leibniz' als Vorläufer auch nicht möglich sei, weil die für Mathematik und Logik entscheidenden Arbeiten Leibniz' bis in die Gegenwart nahezu gänzlich unbekannt gewesen wären. Diese Standardansicht ist in neueren Forschungen mehrmals korrigiert worden. Es zeichnet sich das Bild ab, daß die von Cassirer (1929) für die Mathematik erörterte Alternative der Anknüpfung an Kant oder Leibniz den Mathematikern des 19. Jahrhunderts präsent war. Detlef Langwitz (1990, 9) führt einen ebenso simplen wie plausiblen Grund für die Einfluß Leibniz' auf Zeitgenossen und Schüler an, nämlich dessen Briefwechsel. Volker Peckhaus (1997) weist auf, daß eine Reihe von Mathematikern sich klar auf Argumen-

²¹² So lauten zum Beispiel die Titel einiger herausgegriffener Aufsätze: »Back to Leibniz« (Wiener 1932). »Leibniz im Vorfeld der Kybernetik« (Timm 1966). »Leibniz als Ahnherr der Kybernetik – ein bisher unbekannter Leibnizscher Vorschlag einer »Machina arithmeticae dyadicae« (von Mackensen 1974).

te Leibniz' beziehen, wenngleich nicht immer im direkten Rückgriff auf die dazugehörenden Schriften. Gert Schubring (1990, 157-160) geht auf Mathematiker und Logiker ein, die von Leonhard Euler (1707-1783) über Kants Diskussionspartner in Sachen Mathematik, den Königsberger Professor Johann Schultz (1739-1809), bis zu Jacob Friedrich Fries (1773-1843), das heißt vom dritten Jahrzehnt des 18. bis ins dritte Jahrzehnt des 19. Jahrhunderts, Leibnizsche Auffassungen erörtern. Weiteres leisteten dann die Leibniz-Ausgaben von Erdmann 1839/40 und Gerhardt 1875-1890. Darüberhinaus kann es angesichts der Zitate und Erörterungen bei Frege, der sich 1884 explizit auf die Darstellung bei Baumann (1868/69) bezieht, und des Buches von Russell (1900) keinen Zweifel daran geben, daß beide mehr als nur Argumente Leibniz' kannten, und bekannt ist, daß Gödel Leibniz' erreichbare Schriften intensiv rezipierte (vgl. Dawson 1997, 94, 118, 136, 227). Vor diesem Hintergrund überrascht es nicht, daß in den folgenden Jahrzehnten für Autoren wie Jörgen Jörgensen (1932/33) oder Georgi Schischkoff (1912-1991) (1947) die Bedeutung der Leibnizschen Logik gegeben war.

In diesem Kapitel wird Leibniz' allgemeiner Kalkülbegriff aus mehreren Schriften und Fragmenten rekonstruiert und seinem zeitgenössischen Kontext zugeordnet. Durch die Rekonstruktion wird gezeigt, daß Leibniz' Denken Strukturen und Inhalte aufweist, die für Fragestellungen in der Informatik noch immer relevant sind. Der auf die Vergangenheit gerichtete Blick findet hier ein solches Konzept zum ersten Mal zusammenhängend vor, weshalb es nicht angebracht wäre, den Blick noch weiter zu lenken. Leibniz' Kalkülvorstellung hier zu rekonstruieren, heißt somit, das durch die oben angesprochene wissenschaftliche Traditionslinie vermittelte Paradigma als explizites Konzept, nämlich als das »Leibnizprogramm«, greifbar werden zu lassen.

5.1 Leibniz und die Moderne

Leibniz beschäftigte sich mit Themen der Philosophie, der Mathematik, der Jurisprudenz, der Naturwissenschaften, der Theologie, der Geschichte, der Sprachwissenschaften, der Ökonomie und der Politik. Sein Denken ist vor allem durch eine enge Verbindung von Theorie und Praxis charakterisiert. Dieses Motiv findet sich beispielweise wieder, wenn er für die nach seinen Plänen gegründete Berliner Akademie der Wissenschaften als Motto »Theoria cum praxi« wählt. Er wollte »immer bei den Worten und übrigen Zeichen der Rede die Klarheit, bei den Dingen aber den Nutzen sehen.«²¹³ Neben diesem pragmatischen Paradigma der »Anwendungsorientierung« gibt es eine weitere Gemeinsamkeit zwischen Leibniz' Überlegungen und den Paradigmen der Informatik: Leibniz formulierte in unterschiedlichen theoretischen und praktischen Kontexten ein Konzept der Welt als Kalkül, das in weiten Zügen mit Grundannahmen heutiger Informatiker übereinstimmt.

Leibniz' Studien zum Kalkülbegriff sind in vielen einzelnen Schriften verstreut²¹⁴ und es ist dementsprechend schwierig, sein Gesamtkonzept zu rekonstruieren.²¹⁵ In den sechziger Jahren des 17. Jahrhunderts schrieb Leibniz Abhandlungen zur juristischen Logik und zur Mathematisierung der Logik²¹⁶. Die meisten Arbeiten zum Kalkülbegriff verfaßte er in den siebziger und achtziger Jahren des 17. Jahrhunderts im Anschluß an seinen Aufenthalt in Paris, wo er sich mit der zeitgenössischen Mathematik vertraut gemacht hatte. Seine Überlegungen zum Infinitesimalkalkül, den er am En-

²¹³ »[...] semper in verbis caeterisque animi signis claritatem, in rebus usum [...]« (Leibniz o.J., zitiert nach Leibniz 1875-1890, Band 7, 52)

²¹⁴ Eine umfassende Sammlung der Werke Leibniz' ist enthalten in: Leibniz, G.W.: Die philosophischen Schriften. Herausgegeben von Carl Immanuel Gerhardt. 7 Bde. Berlin 1875-1890. Leibniz, G.W.: Die mathematischen Schriften. Herausgegeben von C.I. Gerhardt. 7 Bde. Berlin 1849-1863. Leibniz, G.W.: Opusculs et fragments inédits de Leibniz. Herausgegeben von Louis Couturat. Paris 1903. Die Akademie-Ausgabe der Sämtlichen Schriften und Briefe, herausgegeben von der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Darmstadt (später Leipzig, zuletzt Berlin) 1923ff. ist bis heute leider nicht abgeschlossen. Eine Auswahl und Übersetzung vieler »Fragmente zur Logik« wurde von Schmidt veröffentlicht (Leibniz 1960). Eine lateinisch-deutsche Ausgabe von Texten zu »Grundlagen des logischen Kalküls« wurde von Franz Schupp herausgegeben (Leibniz 2000).

²¹⁵ Eine ausführliche Darstellung der Logik einschließlich des Kalkülbegriffs liefert Hans Burkhardt (1980). Eine formale Rekonstruktion hierzu bietet Wolfgang Lenzen (1990), der unter anderem zeigt, daß der traditionelle »intensionale« Ansatz (die Begriffslogik) und der moderne »extensionale« Ansatz (die Mengenalgebra) gleichwertig sind. (Lenzen 1990, VII, X)

²¹⁶ Vgl. zum Beispiel als Schriften aus diesen Themenbereichen »Disputatio juridica de conditionibus« (1665) und »De Arte combinatoria« (1666).

de seines Aufenthalts in Paris entwickelte, wurden 1684 in den Leipziger »Acta eruditorum« veröffentlicht. Hingegen wurden seine Arbeiten zum allgemeinen Kalkülbegriff erst sehr viel später, zum Teil erst im 20. Jahrhundert, veröffentlicht.

Die vorhandene Literatur zu diesem Thema behandelt vor allem Aspekte, die der Aktualität des Themas und seinen weitreichenden Folgen kaum gerecht werden. Die Autoren argumentieren vorwiegend philosophiegeschichtlich oder rekonstruieren rein formallogisch, ohne die pragmatischen Inhalte des Kalkülbegriffs zu erkennen.²¹⁷ In der Literatur der Informatik gibt es zwar ebenfalls viele Verweise auf Leibniz, die jedoch statt auf seine Konzepte einzugehen nur Schlagwörter nennen.²¹⁸ Bei allen angesprochenen Autoren finden die gesellschaftlichen Bedingungen, die die Entstehung des Kalkülbegriffs mitbegründen, so gut wie keine Berücksichtigung. Worin die Modernität des Leibnizschen Denkens besteht, wird aber gerade verständlich, wenn das Konzept der Welt als Kalkül in einen gesellschaftstheoretischen Horizont eingeordnet wird. Diese Einordnung ist auch deshalb sinnvoll und gerechtfertigt, weil Leibniz selbst den Anspruch der »Universalität« hatte und seine theoretischen und praktischen Vorstellungen eng beieinander liegen.

In der gegenwärtigen wissenschaftlichen Diskussion um die Moderne vertreten einige Autoren übereinstimmend die Auffassung, daß die erste Hälfte des 17. Jahrhunderts oder gar schon das 16. Jahrhundert eine veränderte Wahrnehmung der sozialen Wirklichkeit mit sich brachte. Sie betonen, daß die bis dahin tragfähigen Ordnungs- und Sicherheitsvorstellungen mit ihren kosmologischen Begründungen in dieser Zeit den sozialen Erfahrungen nicht mehr standhielten. Die Menschen in Europa erfuhren Unsicherheit in einem bis dahin unbekannten Maß. Diese Erfahrung drückt sich beispielhaft in dem unter diesem Gesichtspunkt viel zitierten Gedicht »An Anatomy of the World« des Engländers John Donne (1572-1631) aus, das eine veränderte Wirklichkeitserfahrung, in der eine Doppelung von Verlust-

²¹⁷ Die ersten Arbeiten zu Leibniz' Logik schrieben Russell (1900) und Louis Couturat (1868-1914) (1901). Seit den sechziger Jahren befassen sich mehr und mehr Autoren mit dem Thema: Raili Kauppi (1920-1995) (1960) stellt Leibniz' Logik aus intensionaler Sicht dar. George H.R. Parkinson (1965) beschäftigt sich mit der Beziehung zwischen Leibniz' Logik und Metaphysik. Hidé Ishiguro (1972) untersucht Leibniz hinsichtlich sprachphilosophischer Aspekte. Eine historische Einordnung der Logik Leibniz' findet sich bei Nicholas Rescher (1967), Hintikka (1972) und Hintikka (1973).

²¹⁸ Eine Ausnahme ist Norbert Wiener, der sich vor allem mit Leibniz' Vorstellungen zur Physik auseinandersetzte. (Wiener 1932; Wiener 1934) Ansonsten wird nur allgemein auf Leibniz verwiesen. (z.B. Brauer / Indermark 1968, 1f.; Bauer / Goos 1971 Bd.2, 174-191)

erfahrung und Aufbruchstimmung massive Ängste auslöst, thematisiert.²¹⁹ Diese Unsicherheit gewinnt durch bestimmte historische Ereignisse praktische Bedeutung. Toulmin führt als ein Ereignis, in dem sofort ein geschichtlicher Wendepunkt gesehen worden sei, die Ermordung Heinrich IV. von Frankreich (1553-1610) an, die er mit der Ermordung John F. Kennedys (1917-1963) vergleicht. (Toulmin 1990, 86) Und schließlich ist der Dreißigjährige Krieg mit bis dahin nicht dagewesenen Zerstörungen und Verwüstungen zu nennen. Die allgemeine Verunsicherung und die tatsächlichen Zerstörungen erforderten und führten zu neuen Umgangsweisen mit Unsicherheit und Gefährdungen, die in traditionellen oder vormodernen Gesellschaften unbekannt waren. In Mitteleuropa entstand eine Verhaltensweise, bei der man sich auf Risiken einließ und zugleich versuchte, diese durch zweckrationale Kalkulation, Versicherungen und Konzepte der Verwissenschaftlichung der Unsicherheit zu beherrschen. Kalkulation, Versicherung und Verwissenschaftlichung zielten darauf ab, Unsicheres sicher, Uneindeutiges eindeutig und den Zufall berechenbar zu machen. (Vgl. Bonß 1995) Die hierfür entstehenden Verfahren sind die des naturwissenschaftlichen Experiments, der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik sowie die Ausarbeitung des Kalkülbegriffs.

In diesem Sinne steht Leibniz mit am Beginn der Moderne und so ist seine Denkweise mit ihrem Anspruch, ein Programm zu entwickeln, bei dem theoretisches Denken und praktisches Handeln gleichermaßen zur Geltung kommen, ein Versuch, um in der geschilderten Situation Sicherheit,

²¹⁹ Vgl. zum Beispiel Serge Moscovici (1982, 301ff.), Toulmin (1990, 83ff.), Bonß (1995, 127ff.); für den Zusammenhang zur Kosmologie auch Feyerabend (1958). Die von diesen und anderen Autoren herangezogene Passage des Gedichts lautet:

»And now the springs and summers which we see,
Like sons of women after fifty be.
And new philosophy calls all in doubt,
The element of fire is quite put out;
The sun ist lost, and th'earth, and no man's wit
Can well direct him, where to look for it.
And freely men confess that this world's spent,
When in the planets, and the firmament
They seek so many new; they see that this
Is crumbled out again to his atomies.
'Tis all in pieces, all coherence gone;
All just supply, and all relation:
Prince, subject, father, son, are things forgot,
For every man alone thinks he hath got
To be a phoenix, and that then can be
None of that kind, of which he is, but he.«
(Donne 1611, Vers 203-218)

Eindeutigkeit und Gewißheit sowohl in Bezug auf kognitive Bereiche, als auch in Bezug auf Anforderungen der Alltagspraxis zu erreichen.

Ebenfalls am Beginn der Moderne steht René Descartes. Im Unterschied zu Leibniz' Vorstellungen sind diejenigen Descartes' jedoch auf ein statisches Weltverständnis gegründet. Die Elemente seiner Welt sind die »res cogitans« und die »res extensa«. Für beide Komponenten fehlt in Descartes' Philosophie der zeitliche Aspekt der Geschichte oder der Erfahrung. Bezüglich der »res extensa« betrachtet er nur die Ausdehnung und die Bewegung; zeitliche Aspekte sieht er nur im Zusammenhang mit dem Zeitmaß der Physik.

Und auch John Locke ist ein hier zu nennender Vertreter der frühen Moderne. Sein Ansatz, der Sensualismus, fordert die Gründung von Erkenntnis auf Erfahrung und war damit kritisch gegen den Rationalismus gewandt. Grundlage der Wissenschaften sind für ihn die beobachtbaren Phänomene und die Beziehungen zwischen ihnen. Für die Rationalisten waren »evidente Sätze« die Basis objektiver Erkenntnis. Locke dagegen versteht wissenschaftliche Erkenntnis als hypothetische Erklärung von Tatsachen, die auf Beobachtung und Experiment gestützt ist.

Leibniz' Programm besteht unter anderem darin, ein Konzept zu entwickeln, welches erlaubt, beide Ansätze zu verbinden. Dies wird mit der Kalkülvorstellung erreicht, mit deren Hilfe es möglich ist, Kalküle für die verschiedensten Bereiche, seien es rein rationale, mathematische oder rein empirische, mit Begriffen, die nicht weiter analysiert werden können, zu entwerfen.

In diesem Kapitel wird zunächst der Kontext beschrieben, in dem Leibniz sein allgemeines Konzept des Kalküls entwickelte. Dabei wird besonders auf Leibniz' Interesse an Wirtschaft und Politik eingegangen. Weiterhin wird eben dieses Konzept vorgestellt, ein Vergleich mit dem modernen Kalkülbegriff angestellt und die These der »allgemeinen Gültigkeit« und die Bedeutung des Begriffs für die Theorie (Metaphysik) und die Praxis erläutert. Anschließend wird mit drei ausgewählten Beispielen die Bedeutung des Kalküls in der damaligen Praxis veranschaulicht. Es handelt sich um die »Erfindung« einer Dualzahlenrechenmaschine, um die Konstruktion von Pumpenanlagen und um eine statistische Untersuchung. Die Beispiele zeigen, wie der Anspruch des Mottos »Theoria cum praxi« von Leibniz selbst eingelöst wurde.

5.2 Der historische Kontext

5.2.1 Wirtschaft und Politik

Während seines Studiums von 1663 bis 1666 in Jena war Leibniz von seinem Lehrer Erhard Weigel (1625-1699) auf die Begriffe »calcul« und »ratio« aufmerksam gemacht worden. (Timm 1966, 460) Weigel vertrat als einer der ersten an einer deutschen Universität Descartes' These, daß die Wissenschaften auf die Mathematik zu gründen seien. Mit Hilfe der mathematischen Methode, das heißt nicht der geometrischen, sondern der arithmetischen, sollte die Grundlegung und Systematisierung aller Wissenschaftsgebiete erfolgen. Weigel hielt das Rechnen für gleichbedeutend mit »Rechen-schaft geben« im Sinn von »Ableiten aus Gründen«. (Wundt 1932, 50f.) Selbst Politik und Moral hatten für ihn diese Grundlage; sie waren für ihn »moralische Arithmetik«. (Feyl 1956/57, 30)

Weigels Interessen reichten über die Universität hinaus. Er wollte durch mathematische Ausbildung die Entwicklung der Manufakturproduktion und ihrer frühindustriellen Technik fördern und setzte sich für die Gründung einer neuen Fakultät an den Universitäten ein, die die »artes humanae« zusammenfassen sollte und eine ökonomisch-technische Fakultät gewesen wäre. (Feyl 1956/57, 30) Ein ähnliches Konzept für die Neugliederung der Fakultäten schlug später Leibniz vor. In seinen »Neuen Abhandlungen über den menschlichen Verstand« heißt es: »Auch die bürgerliche allgemein angenommene Einteilung nach den vier Fakultäten ist nicht zu verachten.« (Leibniz 1703, 646) Gemeint ist damit die Einteilung in Theologie, Jurisprudenz, Medizin und Philosophie. Leibniz ergänzt: »Einige haben mit Recht geglaubt, daß man den übrigen Fakultäten eine ökonomische Fakultät hinzufügen könnte, welche die mathematischen und mechanischen Künste und all das, was den Unterhalt der Menschen und die Bequemlichkeit des Lebens im einzelnen angeht, umfassen würde, worin auch der Ackerbau und die Baukunst mit inbegriffen sein würde.« (Leibniz 1703, 646)²²⁰

²²⁰ Wie groß der Einfluß Weigels auf Leibniz war, wird unterschiedlich beurteilt. Konrad Moll hält Weigels Einfluß für bedeutend. (Vgl. Moll 1978, 74ff.) Wolfgang Röd dagegen hält den Einfluß von Descartes und Hobbes auf Leibniz für erheblich höher als den von Weigel, da Weigel ein Außenseiter von geringem Gewicht war. (Röd 1984, 74)

Das 17. Jahrhundert war die Zeit, in der die Anfänge der neuzeitlichen Nationalökonomie lagen. So entstand die »politische Ökonomie« als Teil der neuen Wissenschaft von der bürgerlichen Gesellschaft. Sie bildete eine Ergänzung zur philosophischen, moralischen, psychologischen, juristischen und politischen »Aufklärung«. In Deutschland lag eine besondere Situation vor: Während das Bürgertum vor dem Dreißigjährigen Krieg so weit entwickelt war, wie außer ihm nur das niederländische, fehlte ihm nach 1648 weitgehend die Bedeutung. Im Reich, das nach dem Krieg in fast 300 Staaten aufgeteilt war und in dem nur noch 2/3 der Vorkriegsbevölkerung lebte, blieb die wirtschaftliche Entwicklung weit hinter der der westeuropäischen Staaten England, Holland, Frankreich zurück. Aus diesem Grund wurde die Wirtschaft von landesherrlicher Seite gefördert, so daß die »Vermehrung des Reichtums« hier in der Folge eher zu einer Planungsaufgabe des Staats wurde. Es entstand eine Art »technischer Ökonomie«, die spätere Kameralistik. Die Förderung der gewerblichen Produktion geschah mit Hilfe von Exportprämien, Subventionen, Monopolen auf verschiedene Produkte sowie Privilegien für die Errichtung von Manufakturen. Auch fungierte der Staat häufig als Abnehmer von gewerblichen Waren wie Waffen, Schiffen, Bekleidungsstücken und Luxusgütern für die Hofhaltung. Zum Teil gründeten die Fürsten selbst Manufakturen oder übernahmen sie von Unternehmern, zum Beispiel Betriebe zur Waffenherstellung, zur Spiegel- und Glasherstellung, zur Wolltuchherstellung und im Bergbau und Hüttenwesen. Die Produktion wurde nicht nur durch die Investitionen des Handelskapitals, sondern auch durch die Erhöhung der Arbeitsproduktivität gesteigert. Dabei wurde zum einen auf Spezialisierung gesetzt, es entstanden neue Berufe und innerbetriebliche Arbeitsteilungen. Zum anderen wurden neue Werkzeuge und neue technische Methoden, besonders im Bergbau und Hüttenwesen, angewandt, die sowohl die Produktivität steigerten, als auch durch Entqualifizierung der Arbeit die Schutzwirkung bestehender berufsständischer Privilegien aushöhlten. Als Beispiele seien hier die Einführung der Pferdegöpel, der wasserbetriebenen Pumpen, der Hochöfen, der Sprengung mit Pulver und des Transports auf Spurbahnen genannt. Auf einen Vorschlag von Leibniz für eine wasserbetriebene Pumpanlage wird später noch eingegangen. Alle diese Maßnahmen wären nicht ausreichend gewesen, hätte nicht der Staat dafür gesorgt, den Mangel an Unternehmern, Fach- und Lohnarbeitern zu beheben. Neben dem Bevölkerungsrückgang im Dreißigjährigen Krieg waren weitere Faktoren für den Arbeitskräftemangel verantwortlich. So verhinderten die Leibeigenschaft, besonders in den deutschen

Staaten im Osten, sowie die Zunftverfassung die Entstehung von Lohnarbeit. Zudem waren die »Besitzlosen«, die als Lohnarbeiter in Frage gekommen wären, nicht qualifiziert genug oder nicht bereit, in den Manufakturen zu arbeiten. Deshalb unterstützten einige Staaten, besonders Preußen, die Einwanderung von Unternehmern und Facharbeitern. Um die wirtschaftliche Situation zu verbessern, sei es nötig, schreibt Leibniz in seiner »Ermahnung an die Deutschen«, darauf hinzuweisen, daß Deutschland ein günstig gelegenes Land sei, in Bezug auf Klima, Krankheiten, Bodenschätze, Ackerbau und vieles mehr. Er »ermahnt« die Fürsten:

Wir wollen deshalb andere hohe Materien, als eine stete Verfassung, dienlich engere Reichsverbindungen, gemeinen Pfennig oder beständige Mittel, Vereinigung oder wenigstens Verträglichkeit der Religionen, Beförderung der Gerechtigkeit, Zucht- und Waisenhäuser, Regulierung der Münzen, Aufrichtung und Beförderung der Kommerzien und Manufakturen, der Werkhäuser, Zurechtbringung der Kriegsdisziplin und was dergleichen wichtige Punkte mehr, diesmal beiseitesetzen, unser Vorhaben aber nur auf ein solches Werk wenden, das wir nicht nur vorschlagen, sondern auch vollstrecken können, welches in hohen Dingen nicht statt hat, allda einer Privatperson wohl zu reden zugelassen, aber ohne sonderbaren hohen Antrieb nichts zu tun gebührt. (Leibniz vermutlich 1683, 8f.)

Diese Ermahnung, Projekte nicht nur vorzuschlagen, sondern sie auch durchzuführen, also selbst zu handeln, geht einher mit der Vorstellung, sein Geschick selbst in die Hand zu nehmen, die in Leibniz' »Metaphysischer Abhandlung« beschrieben ist:

Will man also der wahren Liebe zu Gott gemäß handeln, so genügt es nach diesen Grundsätzen nicht, sich gewaltsam in Geduld zu fassen, sondern man muß wahrhaft mit allem zufrieden sein, was uns seinem Willen gemäß zugestoßen ist. Ich verstehe diese Zustimmung mit Bezug auf die Vergangenheit: denn was die Zukunft betrifft, so soll man kein Quietist sein, noch, was lächerlich wäre, mit gekreuzten Armen abwarten, was Gott tun wird, gemäß jenem Sophisma, das die Alten *λογος αεργοζ*, die faule Vernunft, nannten. Hier vielmehr muß man nach dem mutmaßlichen Willen Gottes – soweit wir darüber urteilen können – handeln und mit ganzer Kraft versuchen, zum allgemeinen Besten beizutragen, insbesondere aber zur Besserung und Vervoll-

kommnung alles dessen, was uns umgibt, was uns nahe ist und, sozusagen, in unserem Bereiche liegt. (Leibniz 1686b, 138f.)

Und damit der Leser sich etwas unter der Vollkommenheit von Handlungen vorstellen kann, heißt es weiter:

So kann man sagen, daß derjenige, der in vollkommener Weise handelt, einem ausgezeichneten Geometer gleicht, der die besten Konstruktionen eines Problems zu finden versteht; einem geschickten Architekten, der den Platz und den Baugrund auf das vorteilhafteste ausnützt, und der nichts stehen läßt, was das Auge beleidigt und was der Schönheit, die unter den gegebenen Bedingungen erreichbar war, ermangelt; einem guten Familienvater, der sein Vermögen so anlegt, daß nichts ungenutzt bleibt; einem geschickten Maschinisten, der die beabsichtigte Wirkung auf dem einfachsten Wege, den man nur wählen kann, erreicht, und einem gelehrten Schriftsteller, der einen möglichst großen Sachverhalt auf kleinstem Raume zusammenzudrängen weiß. [...] Was die Einfachheit der Wege Gottes anbetrifft, so beweist sie sich in der Wahl der Mittel, während umgekehrt in den Zwecken und Wirkungen reichste Mannigfaltigkeit und Überfluß herrschen. Beide Gesichtspunkte müssen somit einander das Gleichgewicht halten, wie die Kosten, die für ein Gebäude ausgeworfen sind, und die Größe und Schönheit, die man demgemäß von ihm verlangt. [...] Fragt man indes nach der Weisheit (der Schöpfung oder des philosophischen Entwurfs), so kommen die Willensakte bez. die Hypothesen in dem Maße, als sie von einander unabhängig sind, auf die Seite der Ausgaben zu stehen; denn die Vernunft verlangt, daß man die Hypothesen oder die Prinzipien nicht unnütz vervielfältigt; wie denn auch in der Astronomie das einfachste System stets den Vorrang hat. (Leibniz 1686b, 139f.)

Vollkommen zu handeln, heißt demnach, ökonomisch zu handeln. Das Ökonomieprinzip, das auch heute als Paradigma vorhanden ist, geht zurück auf eine Vorstellung, die schon bei Platon und Aristoteles (384-322 v.Chr.) zu finden ist und die oftmals als »Einfachheit der Natur« interpretiert wird. Das angesprochene naturphilosophische Prinzip, nach dem in der Natur immer soviel und nur soviel geschieht, wie unter den gegebenen Bedingungen möglich ist, wurde in der Scholastik in die Erkenntnistheorie übertragen. Genau genommen, liegen damit zwei Fassungen vor, nämlich eine on-

tologische und eine erkenntnistheoretisch-methodologische. Beckmann (1995) hat darauf hingewiesen, daß die ontologische tatsächlich Fassung neuzeitlich ist und im mittelalterlichen Denken nicht auftrat. Ockhams »Rasiermesser« ist das wohl bekannteste, immer wieder angeführte Beispiel für das Prinzip.²²¹ Es war bei ihm nicht ontologisch gefaßt. Im 17. Jahrhundert wurde daraus das Prinzip der »Ökonomie der Natur«. Nicolas de Malebranche (1638-1715) beschrieb es in seinen »Recherche de la Vérité« (1674) in dem Sinne, daß die Natur mit möglichst geringem Aufwand das größte Ergebnis, das heißt den größten Nutzen erzielen würde. Das Prinzip wurde in dieser Zeit zu einem allgemein anerkannten Grundsatz und findet sich im 17. und 18. Jahrhundert übertragen auf die Wirtschaft als »Maximum-Minimum-Prinzip« in den Schriften von Ökonomen wie William Petty (1623-1687), Pierre Le Pesant Boisguillebert (1646-1714) und François Quesnay (1694-1774). (Vgl. Fehér 1974, 162ff.) Auch Leibniz erwähnte das »Rasiermesser« in der Ockham zugeschriebenen Form bei Gelegenheit. Seine Beschäftigung mit dem Prinzip geht allerdings weit über einen solchen Verweis hinaus. Für Leibniz galt das Prinzip als die Grundlage einer allgemeinen Ordnung der Welt.

Die Willenshandlungen Gottes teilt man gemeinhin in gewöhnliche und außergewöhnliche ein. Man muß sich aber darüber klar sein, daß Gott nichts tut, was der Ordnung entbehrte. Wenn somit etwas für außerordentlich gilt, so hat dies nur mit Rücksicht auf eine bestimmte, unter den Geschöpfen gültige Ordnung einen Sinn. Denn was die allgemeine Ordnung betrifft, so kann nichts sich ihr entziehen: ja, nicht nur, daß nichts in der Welt geschehen kann, was absolut unregelmäßig wäre, so kann man sich etwas dergleichen nicht einmal erdenken. Denn nehmen wir einmal an, daß jemand aufs Geratewohl eine ganze Reihe von Punkten aufs Papier wirft, [...] so behaupte ich, daß es möglich ist, eine geometrische Linie von konstanter, einheitlicher Definition zu finden, die durch alle diese Punkte, und zwar in derselben Ordnung, wie die Hand sie gezeichnet hat, hindurchgeht. Ja, wenn jemand in einem Zuge eine Linie zeichnete, die bald gerade, bald kreisrund, bald von anderer Art wäre, so kann man einen Begriff oder eine Regel oder Gleichung finden, die alle Punkte dieser Linie enthält und kraft deren genau dieselben Veränderungen eintreten müssen. [...] Man kann daher behaupten, daß, auf welche Weise auch

²²¹ Vgl. Abschnitt 4.1.1.

Gott die Welt geschaffen hätte, sie doch stets regelmäßig und einer bestimmten Ordnung entsprechend gewesen wäre. Gott jedoch hat diejenige erwählt, die die vollkommenste ist, d.h. diejenige, bei der aus der kleinstmöglichen Anzahl von Voraussetzungen die reichste Fülle von Erscheinungen folgt. (Leibniz 1686b, 140f.)²²²

Leibniz' genanntes Interesse an einer ökonomischen Fakultät und seine vielfältigen Tätigkeiten in Hannover ordnen sich zu einem erheblichen Teil in diesen Zusammenhang ein.

Ein wichtiges Moment in Leibniz' Philosophie liegt im »Prinzip der universellen Harmonie«. Leibniz vertritt dieses Prinzip nicht nur in seinen politischen und juristischen Schriften zur Erreichung des Friedens in Europa nach dem Dreißigjährigen Krieg. Im Leibnizschen Verständnis ist Frieden wesentlich mehr als die Abwesenheit von Kriegshandlungen und auch mehr als die Wiederherstellung des Status quo ante. Frieden bedeutet für ihn einen immer aufs Neue gegen Auflösungstendenzen zu erzeugenden Gleichgewichtszustand der Welt. Anzustreben ist die Übereinstimmung von metaphysischer und politischer Ordnung der Welt. Hinsichtlich der metaphysischen Ordnung schreibt Leibniz (1714b) in der Monadologie Nummer 56: »Diese Verknüpfung oder diese Anpassung aller erschaffenen Dinge an jedes einzelne und jedes einzelnen an alle anderen hat zur Folge, daß jede einfache Substanz Beziehungen enthält, welche die Gesamtheit der anderen zum Ausdruck bringen, und daß sie infolgedessen ein lebendiger, immerwährender Spiegel des Universums ist.« Und er schlägt damit die Brücke vom Metaphysischen zur realen Ungerechtigkeit in der Welt, zu der auch der Krieg mit allen seinen Verwüstungen zählt. In einem Gutachten, das die Möglichkeit einer europäischen Friedensordnung erörtert, nennt der politische Berater Leibniz das Mittel, Krieg und Verwüstung zu begegnen. Es ist »die Versicherung des Friedens« durch Vertrag: »Die Versicherung des Friedens besteht in zwei Punkten, erstlich der Abtuumg aller Kriegspractexte, zweitens in Formierung einer so viel möglichen beständigen Allianz der Garantie.« (Leibniz 1674, 72)

²²² So gilt die Logik in allen »möglichen Welten«, von denen bei Leibniz die Rede ist. Zwar genügt die Logik nicht, um eine Welt zu konstituieren, aber ohne sie ist keine Welt denkbar. Nach Schneider bleibt damit »die formale Logik der Maßstab, der Minimalbedingungen angibt, an denen sich jedes System über die Welt muß messen lassen können, es sei denn wir verzichten auf jeden Maßstab für wissenschaftliche Allgemeingültigkeit.« (Schneider 1995, 84) An dieser Stelle ergibt sich eine Verbindung zu den Ausführungen Wittgensteins, auf die in Abschnitt 4.1 bereits eingegangen wurde.

5.2.2 Naturphilosophie und Technik

Überlegungen zur »mathesis universalis« und zur »scientia universalis« haben ebenfalls dazu beigetragen, daß Leibniz seinen allgemeinen Kalkülbegriff formulierte. Die »scientia universalis« sollte die allgemeine Wissenschaft sein, der alle einzelnen Wissenschaftszweige untergeordnet werden könnten.

Schon Descartes hatte sich mit der Konzeption einer solchen allgemeinen Wissenschaft mit dem Ziel einer einheitlichen Betrachtung der Dinge unter den Prinzipien der »Berechenbarkeit« und der Ökonomie befaßt. Das Thema hing eng mit dem in der Renaissance entstandenen »mechanistischen Weltbild« zusammen. Die in der Renaissance erfundenen Maschinen, das sind vor allem Geschütz-, Wasser-, Hebe- und Uhrmaschinen, galten als vollständig erklärbar, da sie nach den Gesetzen der Mechanik konstruiert waren. Die Uhrmaschinen enthielten zusätzlich noch etwas Besonderes. Sie funktionierten automatisch und können sogar als die ersten autonomen Maschinen angesehen werden. (Grossmann 1935; Weizenbaum 1976, 44) Diese Momente des Mechanischen, Automatischen und Autonomen führten dazu, Maschine und Welt gleichzusetzen und die Welt nicht länger als Schöpfung, sondern als mechanisches Konstrukt zu begreifen. So konnte ohne weiteres versucht werden, die Gesetze der Mechanik auf die Natur zu übertragen und deren Erklärung unter diesem Aspekt schließlich aus ausreichend anzusehen. Die Mechanik wurde zum metaphysischen Paradigma auch für andere Naturwissenschaften.

Um 1500 hatte Leonardo da Vinci (1452-1519) behauptet, die ganze Welt, auch die belebte, stehe unter den Gesetzen der Mechanik; die Erde sei eine Maschine und der Mensch sei es auch. Auf einer Zeichnung zur Anatomie der Hand heißt es: »Laß das Buch über die Elemente und Praxis der Mechanik der Darstellung von Bewegung und Kraft des Menschen und anderer Tiere vorausgehen und auf diese Weise wirst du in der Lage sein, alle deine Vorhaben zu beweisen.« (Leonardo da Vinci um 1509 bis 1512, 58, Abbildung 32B) Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) erklärte zum Beispiel die Funktion der Knochen und Muskeln des Menschen mit den mechanischen Grundelementen Hebel und Zug. Während diese Form der Anatomie noch statisch war, verbindet sich mit dem Namen Harvey der Übergang zur »Anatomia animata«. William Harvey (1578-1657) entdeckte den Blutkreislauf und die Bedeutung des Herzens als Pumpe. Aus den theoretischen Anforderungen seines Modells vom Blutkreislauf als einem geschlossenen

Kreislauf leitete er die Existenz der Kapillaren ab, die damals noch nicht gesehen worden waren. Die Bewegung des Blutes, seinen Fluß vom Herz in die Arterien und durch die Venen zurück zum Herz, wies er mit Hilfe von Experimenten nach. Er interpretierte das Gefäßsystem als geschlossenen Kreislauf und die Bewegung des Blutes als dynamische Kreisbewegung, die von einer Pumpe, dem Herz, angetrieben wurde. Der Körper konnte so als hydraulische Maschine angesehen werden. Damit wurden, anders als bei Borelli, der die einzelnen »Bausteine« des Körpers mit Hilfe mechanischer Modelle darstellte, die Bewegungsabläufe beschrieb und das Funktionieren des Körpers als Ganzes erklärt, ohne den von der Mechanik gegebenen Rahmen zu verlassen. (Vgl. Rothschiuh 1953, 34ff., 49ff.)

Descartes war einer der ersten, die versuchten, sämtliche Vorgänge im menschlichen Körper nach den mathematisch begründeten Gesetzen der Mechanik zu erklären. Im »Discours de la Méthode« (1637) vergleicht er die Bewegung des Herzens und des Blutes mit der einer Maschine. Und zwar ist diese Bewegung seiner Meinung nach von der Disposition der Körperorgane ebenso abhängig wie die Bewegung der Uhr von der Disposition der Uhrgewichte und der Uhrräder abhängig ist. Die Bewegungen des Körpers laufen nach denselben Prinzipien ab wie die der Uhr. Die einzelnen Körperteile – Muskeln, Knochen, Organe – müssen zueinander passen, damit das »Uhrwerk« funktioniert. (Descartes 1637, 77ff.) Der Mensch ist demnach eine Maschine, allerdings eine, »die aus den Händen Gottes kommt und daher unvergleichlich besser konstruiert ist und weit wunderbarere Getriebe in sich birgt als jede Maschine, die der Mensch erfinden kann.« (Descartes 1637, 91)

Descartes differenziert explizit zwischen dem menschlichen Körper (*res extensa*) und der menschlichen Seele (*res cogitans*) und bezieht die mechanistische Erklärung nur auf den Körper. Mensch und Maschine unterscheiden sich, da erstens Maschinen niemals wie Menschen Wörter und Sprache verwenden können und zweitens Maschinen nie mit Bewußtsein, sondern nur aufgrund der Anordnung ihrer Organe handeln können, da ihnen die Vernunft als allgemeines Werkzeug fehlt. (Descartes 1637, 93f.)

Die Vorstellung vom Organismus als Uhrwerk war durch bekannte und bewunderte Automaten, wie das Planetarium des Giovanni de Dondi (1318-1389), das zwischen 1348 und 1364 entstand, oder die Gianello Torriano (nach 1500-1585) zugeschriebene Tänzerin mit Laute aus dem Jahr 1560 angeregt worden. Eine Gemeinsamkeit zwischen Automat und Organismus war besonders wichtig: die der Gleichförmigkeit der Bewegungen. Das

Schlagen des Uhrwerks und das Schlagen des Herzens wurden miteinander verglichen.

Die wohl schönsten und auch kompliziertesten Automaten entstanden im 18. Jahrhundert, so Jacques de Vaucansons (1709-1782) Flötenspieler und seine Ente aus dem Jahr 1738, und ebenso die Automaten (l'Ecrivain, le Dessinateur und la Musicienne) von Pierre Jacquet-Droz (1721-1790) und seinem Sohn Henri-Louis Jacquet-Droz (1752-1791), die im Jahr 1774 einem Publikum in La Chaux-de-Fonds vorgestellt wurden.²²³



Abbildung 12. Blick auf den Schreiber, während er schreibt. (Nach einer Photographie des Musée d'Art et d'Histoire, Neuchâtel)

²²³ Die drei Automaten Jacquet-Droz' stehen im Musée d'Art et d'Histoire in Neuchâtel (Schweiz). Sie werden an jedem ersten Sonntag im Monat in Betrieb gesetzt. Sie in Aktion zu sehen, ist beeindruckend! Ein schönes Buch mit vielen Abbildungen zum Thema »Automaten« ist »Die andere Schöpfung« von Herbert Heckmann (1982), in dem auch auf mechanische Automaten der Antike eingegangen wird.

Der Blick des Publikums auf den Schreiber, während er schreibt, zeigt eine Figur, die eine Reihe von Schreibbewegungen ähnlich wie ein Mensch ausführt und die auf dem vor ihr liegenden Karton tatsächlich schreibt, indem sie die Feder in das Tintenfaß taucht, Tinte aufnimmt, die Feder ansetzt und dann Buchstabe für Buchstabe einen Schriftzug ausführt, wobei sie bei Bedarf erneut Tinte aufnimmt und die Zeilen wechselt. Der Automat stellt eine Auswahl aus dem menschlichen Verhaltensspektrum dar. (Seine mechanischen Verwandten tun das gleiche mit anderen Funktionen.) Er verkörpert das Modell des als viel komplizierter vorgestellten anderen Automaten, des Menschen, dem alle möglichen Verhaltensweisen zur Verfügung stehen.

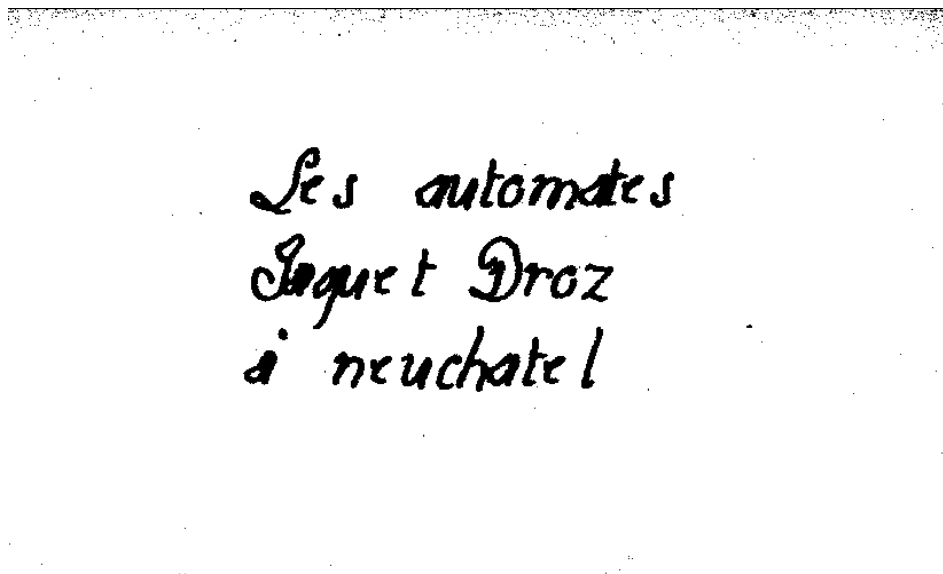


Abbildung 13. Der Schreiber – Schriftzug vom 5. Januar 1997, Tinte auf Karton, Originalgröße

Die zweite Abbildung des Schreibers gibt Einblick in den Mechanismus, mit dem das menschenähnliche Verhalten bewirkt wird. Alfred Chapuis und Edmond Droz gaben folgende Beschreibung:

Der erste Mechanismus, im oberen Teil des Körpers untergebracht, dreht einen langen Zylinder mit einer vertikalen Achse, bestehend aus drei Nockenreihen: jede von ihnen hat die Aufgabe, die Hebel in Gang zu setzen, die dazu dienen, die Bewegungen des Handgelenks in die drei Grundrichtungen zu übernehmen. Die Feder bewegt sich nicht nur horizontal, sondern auch vertikal. So kann sie die Buchsta-

ben in Grund- und Feinstrich schreiben. Bei jedem Nockendurchgang entsteht ein Buchstabe. In diesem Moment tritt der zweite Mechanismus seinerseits in Kraft, um den Nockenzyylinder nach oben oder nach unten zu bewegen. Die Länge des Weges wird durch auswechselbare Stahlpflocke bestimmt, die an der Peripherie einer Scheibe angebracht sind; diese Scheibe befindet sich an der Unterseite des Getriebes. 40 Stahlpflocke gibt es, von denen jeder einen Raum, entsprechend 9 Grad einnimmt. Jeder Pflock ergibt eine Stellung des Nockenzyinders, die so einem bestimmten Buchstaben oder einer bestimmten Handlung entspricht (Zeilenwechsel, Eintauchen der Feder, usw.).

Man kann den Mechanismus so einstellen, daß der Automat jeden Text bis zu einer Höchstzahl von 40 Buchstaben oder Zeichen schreibt. (Chapuis / Droz o.J., 13; zitiert nach Heckmann 1982, 269)

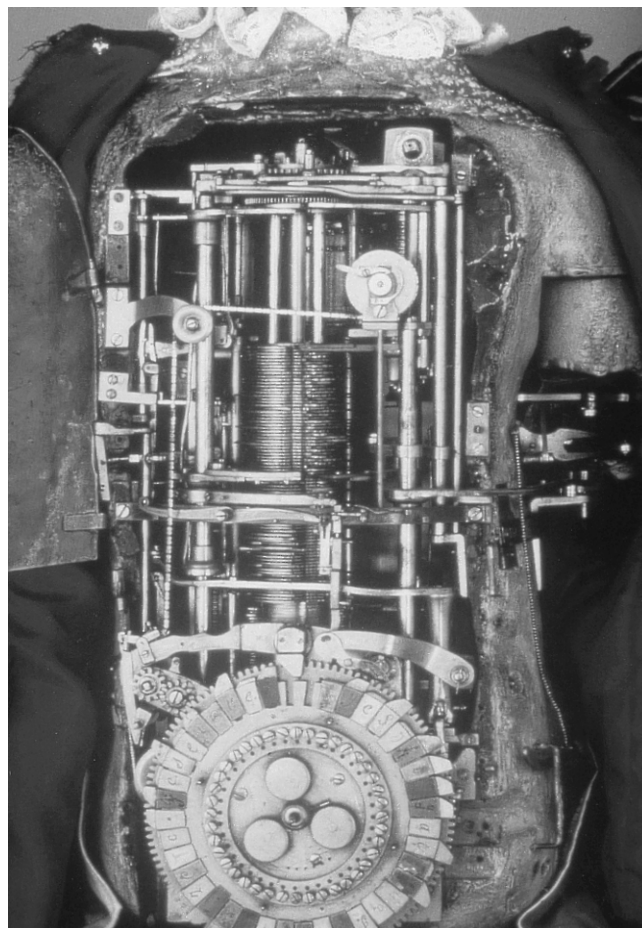


Abbildung 14. Blick in die Mechanik des Schreibers. (Nach einer Photographie des Musée d'Art et d'Histoire, Neuchâtel)

Der Betrachter des Schreibers sieht ihn also aus der einen Perspektive wie einen Menschen schreiben und hat aus der zweiten einen Blick auf die funktionelle Anatomie. Wäre sie so kompliziert und komplex wie beim Menschen, würden auch andere menschenähnliche Verhaltensweisen beobachtbar werden. Die Unterscheidung von menschlichem Konstrukt und dem als Automaten gedachten Menschen besteht somit nicht in der effektiven Handlung, sondern in ihrer Hervorbringung. Das Konstrukt des Menschen ist einfacher, und es bedarf der Voreinstellung der Zeichen; ihm fehlt damit die Autonomie, die für Descartes daraus resultierte, daß der beseelte Mensch die Zeichen selber wählt.

Im 18. Jahrhundert radikalisierte Julien Offray de La Mettrie (1709-1751) die cartesianische Vorstellung, indem er den Menschen als Ganzes als Maschine verstand. 1748 veröffentlichte er »L'Homme Machine«, in dem er nicht nur den Körper, sondern auch die Seele des Menschen als etwas Mechanisches zu erklären versucht. Das Denken ist für La Mettrie ein Resultat der Organisation des Körpers, also der Maschine. Wenn La Mettrie den Menschen als Maschine ansieht, dann heißt das für ihn nicht primär, daß der Mensch künstlich – wie ein Automat, zum Beispiel eine Uhr – herzustellen sei. Er schließt dies jedoch auch nicht aus:

Man sieht, daß es überhaupt nur eine Substanz auf der Welt gibt, und daß der Mensch ihr vollkommenster Ausdruck ist. Er ist im Vergleich zu den Affen und den klügsten Tieren, was die Planetenuhr von Huyghens im Vergleich zu einer Uhr des Königs Julianus ist. Wenn man mehr Instrumente, mehr Räder und mehr Federn brauchte, um die Bewegungen der Planeten, als um die Stunden anzuzeigen und zu wiederholen, wenn Vaucanson mehr Kunst anwenden mußte, um seinen Flötenspieler, als um seine Ente zu machen, so hätte er noch mehr Kunst anwenden müssen, um einen »Sprecher« herzustellen; eine solche Maschine darf, insbesondere unter den Händen eines solchen neuen Prometheus, nicht mehr als eine Unmöglichkeit angesehen werden. [...] Ich täusche mich sicher nicht, der menschliche Körper ist eine Uhr, aber eine erstaunliche und mit soviel Kunst und Geschicklichkeit verfertigte, daß, wenn das Sekundenrad stillsteht, das Minutenrad seinen Gang immer weiter geht, und ebenso das Viertelstundenrad und alle die andern in ihrer Bewegung fortfahren, wenn die ersteren verrostet oder aus irgend einer Ursache verdorben sind und ihren Gang unterbrochen haben. (La Mettrie 1748, 58)

Die Maschine ist für La Mettrie das Erklärungsmodell für den Menschen und für das Leben. Das Prinzip des Lebens oder das Prinzip der Bewegung ist seiner Meinung nach in den einzelnen Teilen des organisierten Körpers enthalten. Jede »Faser« bewegt sich nach einem ihr eigentümlichen Prinzip, der »Irritabilität«.

Die Eigenschaft, sich auf einen Reiz zu bewegen, war der »Faser« des tierischen Körpers schon von dem englischen Anatomen und Physiologen Francis Glisson (1597-1677) zugeschrieben und als »Irritabilität« bezeichnet worden. In seiner Schrift »Tractatus de natura substantiae energetica seu vita naturae eiusque tribus facultatibus« aus dem Jahr 1672 formuliert er, wie die »Faser« als das vitale Element des Körpers aufzufassen sei. Die »Faser« besitzt eine »constitutio organica«, die durch äußere Bedingungen (»constitutio influxa«) beeinflusst wird. Die äußeren Bedingungen sind entweder vital, das heißt durch den »Spiritus vitalis«, oder animal, das heißt durch die Seele, verursacht. (Rothschuh 1953, 56) Giorgio Baglivi (1668-1707) vertrat nach Versuchen an Muskelfasern die These, daß sich diese ohne Beitrag der Seele oder Empfindung kontrahieren. Diese Vorstellung wurde dann auch von Hermann Boerhaave (1668-1738) und seinen Schülern, unter ihnen La Mettrie und Albrecht von Haller (1708-1777), geteilt. Haller baute die Lehre von der Irritabilität am weitesten aus und die Auseinandersetzung um seinen Irritabilitätsbegriff, der bis in die Mitte des 19. Jahrhundert eine Grundlage der Physiologie abgab, dauerte bis zum Ende des 19. Jahrhunderts an. (Vgl. Toellner 1971) Hallers Vorstellung von der Materie ähnelt in vielem der »res extensa« von Descartes, sie hat für ihn die Eigenschaften, ausgedehnt, träge und undurchdringlich zu sein. Nur von außen einwirkende Kräfte können sie in Bewegung bringen:

Deum universae naturae motorem esse pie agnosco. Non ideo elata expandentis se aeris, aut lapidis pondus, aut fervor acidi liquoris cum alcalino confligentis, aut adtractio dissecti musculi ad viris in corporeas referri debet. Deus corporibus vim adtractilem, viris alias dedit, quas semel acceptas exerceant, neque animae alicui debeant, aut spiritui, infra deum. (von Haller 1765, zitiert nach Toellner 1971, 142f.)²²⁴

²²⁴ »Ich erkenne Gott in tiefster Ehrfurcht für die bewegende Kraft der Natur. Darum muß man aber weder die Schnellkraft der sich ausdehnenden Luft, oder die Schwere eines Steines, noch das Aufbrausen der sauren Säfte mit alkalischen Dingen oder das Anziehen eines zerschnittenen Muskels zu den unkörperlichen Kräften rechnen. Es hat Gott den Körpern eine anziehende und andere Kräfte gegeben, die sie, nachdem sie solche einmal empfangen haben, weiter ausüben, ohne sie irgendeiner Seele oder einem Geiste unterhalb Gott zu danken haben.«

Die einmal geschaffene Materie ist für Haller unvergänglich, sie bleibt quantitativ unverändert und wandelt in einem Kreislauf nur ihre Formen. Der Gedanke des Kreislaufs bedingt die Notwendigkeit des Todes, denn durch die Bewegung werden die Strukturen schließlich aufgelöst. Unbewegte Materie ist tot und Haller betont, sie sei »an sich selbst blind, taub, weder denkend noch erkennend« (von Haller 1778, zitiert nach Toellner 1971, 141). Hiermit grenzt Haller sich gleichermaßen von der alten Vorstellung einer intelligiblen Materie der aristotelischen Tradition und von dem Leibnizschen Konzept der Monade ab. Hallers Kritiken an zeitgenössischen wissenschaftlichen Vorstellungen zielten auf die metaphysische Behauptung der vollständigen wissenschaftlichen Erklärbarkeit der Welt; sie sollten vielmehr die Grenzen zu einem außerwissenschaftlichen, aber gleichwohl vorhandenen und »wirkungsmächtigen«, göttlichen Bereich in Erinnerung rufen. Seine Ablehnung der atheistischen Interpretation der Welt durch La Mettrie liegt auf der Hand; wenn er von einer »vis innata« der Materie spricht, dann aber auch nicht im Leibnizschen Sinn, sondern im Anschluß an den Glissonschen Irritabilitätsbegriff viel begrenzter. La Mettrie sieht im Prinzip der »Irritabilität« den Beweis der Selbstbewegung des Menschen. Erstens weise die Irritabilität auf ein regelmäßiges Bewegungsprinzip des Körpers hin und zweitens produziere der Körper seine Bewegungen selbst. Jeder Teil enthalte mehr oder weniger lebhaft »Triebfedern«. Der Mensch gilt als eine Vereinigung von Triebfedern, die sich gegenseitig aufziehen. »Folglich ist die Seele nur Bewegungsprinzip oder ein empfindlicher materieller Teil des Gehirns, den man [...] als eine Haupttriebfeder der ganzen Maschine ansehen kann.« (La Mettrie 1748, 53)

Die Maschine wurde zum Inbegriff dessen, was der Mensch zu leisten imstande ist oder sein sollte. Das hier vorgestellte Konzept begreift die ganze Welt unter einem Einheitsgedanken, den Arno Baruzzi treffend als »Denken sub specie machinae« (Baruzzi 1968; Baruzzi 1973) bezeichnete.

Leibniz entwickelte eine ganz besondere Vorstellung vom Menschen als Maschine. Mit seinem Begriff der Monade entwirft er das Konzept einer »beseelten Maschine«, die auch noch in ihren Teilen Maschine ist.

So ist jeder organische Körper eines Lebewesens eine Art von göttlicher Maschine oder natürlichem Automaten, der alle künstlichen Automaten unendlich übertrifft. Denn eine durch Menschenkunst gebaute Maschine ist nicht auch Maschine in jedem ihrer Teile. So hat z.B. der Zahn eines Messingrades Teile oder Stücke, die für uns

nichts Künstliches mehr sind und die nichts mehr von der Maschine merken lassen, zu deren Betrieb das Rad bestimmt war. Aber die Maschinen der Natur, d.h. die lebendigen Körper, sind noch in ihren kleinsten Teilen, bis ins Unendliche hinein, Maschinen. Eben darin besteht der Unterschied zwischen Natur und Kunst, d.h. zwischen der göttlichen Kunstfertigkeit und der unsrigen. (Leibniz 1714b, 57)

Mit dieser Konzeption kritisierte Leibniz die cartesische Auffassung, nach der Materie nichts als Ausdehnung sei und mechanischer Bewegung unterliege. Um zu begründen, wie die Materieteile sich gegeneinander bewegen, benötigte Descartes Gott als Ursache der Handlungen. Nach Leibniz besteht Materie aus Masse und Kraft, das heißt aus Ausdehnung und Bewegungsantrieb, und jegliche Substanz, körperliche wie unkörperliche, hat in sich die Kraft zu handeln, so daß Gott als Ursache für Bewegung nicht nötig ist. Im übrigen zweifelt Leibniz daran, daß der Geist ohne Bindungen an einen Körper existieren kann und er zweifelt an der Abhängigkeit der Wahrheit vom göttlichen Willen. Gott kann nur gedacht werden, wenn er den (logischen) Kriterien der Wahrheit Genüge tut. Das Leibnizsche System ist also im Gegensatz zur cartesischen Auffassung »weltimmanent« orientiert.

5.2.3 Logik und Erkenntnis

Leibniz hat seinen allgemeinen Kalkülbegriff nicht ohne Einfluß von logischen Denkweisen seiner Zeit formuliert. Er kannte die zeitgenössische spätaristotelische Logik und war mit den logischen Ansätzen Blaise Pascals (1625-1661), der vor allem von Antoine Arnauld (1612-1694) vertretenen Logik von Port Royal, der von Joachim Jungius (1587-1657) formulierten »Logica Hamburgensis« und den Vorstellungen Erhard Weigels vertraut. (Röd 1984, 101ff.) Auch wurde Leibniz von einer Vorstellung des Raimundus Lullus (1235-1315) beeinflusst.²²⁵ Lullus hatte eine »ars combinatoria«

²²⁵ Vgl. Nikolaj Styazhkin (1969, 67ff.) und Gottfried Martin (1960, 28). Der Einfluß von Lullus auf Leibniz wird allerdings unterschiedlich bewertet. Moll bemerkt dazu, daß eine genaue Lektüre der »Ars combinatoria« und ihrer Quellen zeige, daß Leibniz sich dem »vernichtenden Urteil Gassendis über Lullus« (Moll 1978, 30) anschließe und insofern nicht als »Schüler von Raimundus Lullus, auch nicht in einem weiteren Sinne« (Moll 1978, 30) angesehen werden könne. Burkhardt bewertet den Einfluß Lullus' auf Leibniz differenzierter. Nach ihm folgt Leibniz in der »Dissertatio de arte combinatoria« von 1666 dessen kombinatorischer Methode (Burkhardt 1980, 74), er weist weiter

erdacht, mit der die Begriffe durch »Subsumtion« (Unterordnung unter einen allgemeinen Begriff) und »Kombination« (Verknüpfung, Zusammenfügung) rein deduktiv hergeleitet werden sollten. Diese Methode ermöglichte es, wie mit einem Mechanismus Gedanken zu entwickeln, und sollte nach dem Willen ihres Schöpfers den Muslimen die unwiderlegbare Wahrheit des Christentums beweisen. (Bloch 1972, 26f.)

Die Vorstellungen Lullus', nach denen diese Maschine und damit das in ihr vergegenständlichte Verfahren nicht der Lösung von Problemen dient, sondern Gewißeheiten demonstrieren soll, sind typisch vormodern, da in ihnen die Welt noch eine von Gott gegebene, nicht in Frage gestellte oder in Frage zu stellende Ordnung hatte. Leibniz entwickelte seinen Kalkülbegriff in einer Zeit, in der diese Ordnung brüchig geworden war.

Inwiefern Leibniz' theoretische Fragestellungen zeitbedingt waren, zeigt auch folgendes: Jonathan Swift (1667-1745), 21 Jahre jünger als Leibniz, läßt in seinem Roman »Gullivers Reisen« (1726) die Hauptfigur, Lemuel Gulliver, von einem Professor der Akademie von Lagado berichten, der versuchte, auf mechanische Weise zu Wissen zu gelangen. Dazu baute der Gelehrte eine Maschine, mit deren Hilfe Kunst und Wissenschaften durch praktische und mechanische Operationen verbessert werden sollten und entwickelte damit ein frühes »Expertensystem«.

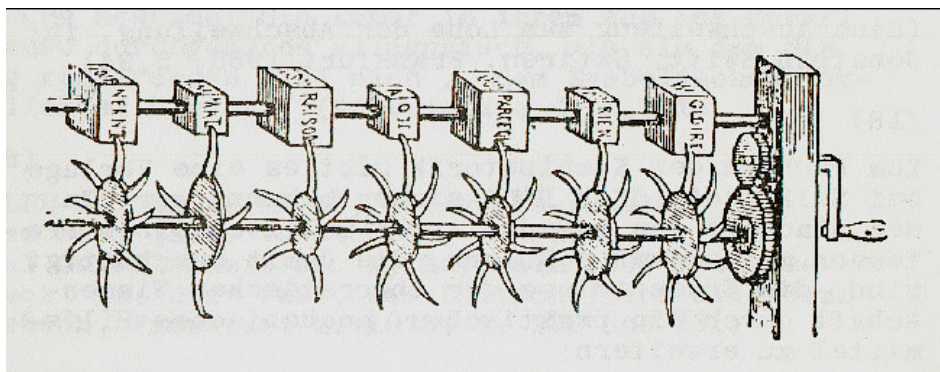


Abbildung 15. Die Maschine des Professors der Akademie von Lagado: Detailansicht eines Getriebes. Illustration von Grandville zu Gullivers Reisen. (aus Held 1977, 58)

darauf hin, daß auch Leibniz eine *characteristica universalis* für die Verbreitung des Glaubens und die Unterrichtung fremder Völker für nützlich hielt (Burkhardt 1980, 203) und erwähnt schließlich eine kritische Bemerkung aus »Den Methoden der universalen Synthesis und Analysis« über ein Werk von Athanasius Kircher (1601 oder 1602-1680), in dem »nur die Lullische Kunst oder etwas dergleichen in ihm wieder vorgebracht wurde« (Leibniz 1679c, 41) Fest steht, daß Leibniz die Werke Lullus' gut kannte, sich mit ihnen auseinandersetzte und insofern durch sie »beeinflußt« war.

Ein jeder wisse, wieviel Mühe die gewöhnliche Erlernung der Künste und Wissenschaften bei den Menschen erfordere; er sei überzeugt, durch seine Erfindung werde die ungebildetste Person bei mäßigen Kosten und bei geringer körperlicher Anstrengung Bücher über Philosophie, Poesie, Mathematik und Theologie ohne die geringste Hilfe des Genies oder von Studien schreiben können. Er führte mich an einen Rahmen, wo alle seine Schüler aufgestellt waren. Der Rahmen enthielt zwanzig Quadratfuß und befand sich in der Mitte des Zimmers. Die Oberfläche bestand aus einzelnen Holzstücken von der Form eines Würfels, von denen jedoch einzelne größer als andere waren. Sie waren sämtlich durch leichte Drähte miteinander verbunden. Diese Holzstücke waren an jeder Fläche mit Papier überklebt, auf dem alle Worte der Landessprache in Konjugationen und Deklinationen, jedoch ohne alle Ordnung aufgeschrieben waren. Der Professor bat mich, achtzugeben, da er seine Maschine in Bewegung setzen wollte. Jeder Zögling nahm auf seinen Befehl einen eisernen Griff zur Hand, von denen vierzig am Rande befestigt waren. Durch eine plötzliche Wendung wurde die ganze Anordnung verändert. Dann befahl er sechzehn Knaben, die verschiedenen Zeilen langsam zu lesen, und wenn sie drei oder vier Worte herausgefunden hatten, die einen Satz bilden konnten, diktierten sie diese vier anderen Knaben, welche sie niederschrieben. Diese Arbeit wurde drei- oder viermal wiederholt. Die Maschine war aber so eingerichtet, daß die Worte bei der Umdrehung einen anderen Platz einnahmen, sobald das ganze Viereck sich von oben nach unten drehte.

Sechs Stunden mußten die Schüler täglich bei dieser Arbeit zubringen. Der Professor zeigte mir mehrere Folianten, die auf diese Weise aus abgebrochenen Sätzen gebildet waren und die er zusammenstellen wollte. Aus diesem reichen Material werde er einen vollständigen Inbegriff aller Wissenschaften und Künste bilden; ein Verfahren, das er jedoch verbessern und schneller beenden könne, wenn das Publikum ein Kapital zusammenbringen wollte, um fünfhundert solcher Rahmen in Lagado aufzustellen, und wenn man die Unternehmer zwingen werde, in verschiedenen Sammlungen die nötige Summe beizusteuern. (Swift 1726, 194f.)

Swift parodiert hier die Bemühungen zahlreicher zeitgenössischer Wissenschaftler und Philosophen, die mechanistische Denkweise unbeschränkt in den verschiedensten Gebieten anzuwenden.²²⁶

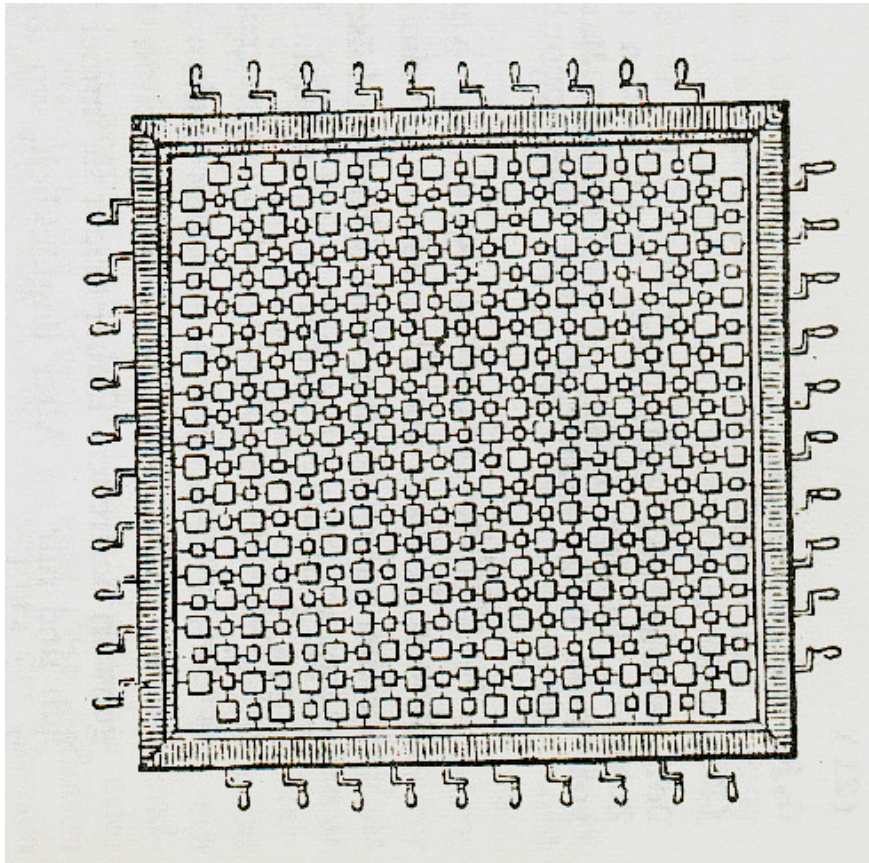


Abbildung 16. Die Maschine des Professors der Akademie von Lagado. Illustration von Grandville zu Gullivers Reisen. (aus Held 1977, 59)

²²⁶ Wiener bezieht sich 1964 in einem Artikel hinsichtlich der Rede von einer »knowledge explosion« direkt auf Swift und schreibt: »There's another illusion that the more papers are being published, the more science is being done. [...] In the *Voyage to Laputa* the academy of projectors have frames where they can put up all the letters of the alphabet in all possible combinations, take them all down and hope ultimately to get all possible wisdom. [...] Among these would certainly be the combinations which are the works of Shakespeare.« (Wiener 1964, 18) Aber es käme nicht nur William Shakespeare (1564-1616) zustande, sondern eine Menge »trash and boldertrash«, so daß eine Aufgabe bliebe: »In order to get Shakespeare, it is not enough to have Shakespeare together with this other, but to have Shakespeare separated from the other. It would be at least as difficult a task as writing the works of Shakespeare to separate those works from all other possible works. Shakespeare's work would not more exist in that mass than a sculpture does in a block of marble. You may say that all the sculptor does is to remove the unnecessary marble. So, in separating the non-Shakespeare from the Shakespeare, you would be doing exactly what the sculptor does in separating the superfluous marble from the statue, and I think we can call this writing the works of Shakespeare.« (Wiener 1964, 18)

Das Ziel, das Leibniz in den Jahren nach 1665 und vor allem nach seinem Aufenthalt in Paris in seinen Arbeiten zum Kalkülbegriff verfolgte und das er mit Hilfe eines neuen Verfahrens zu lösen hoffte, war die Ausarbeitung einer allgemeinen Wissenschaft, der »scientia generalis«, mit der alle Erkenntnisgewinnung rein rechnerisch möglich werden sollte.

Das einzige Mittel, unsere Schlußfolgerungen zu verbessern, ist, sie ebenso anschaulich zu machen, wie es die der Mathematiker sind, derrart, daß man seinen Irrtum mit den Augen findet und, wenn es Streitigkeiten unter Leuten gibt, man nur zu sagen braucht: »Rechnen wirkt ohne eine weitere Förmlichkeit, um zu sehen, wer recht hat. (Leibniz um 1686, 16)

Mit einem solchen Rechenverfahren sollten »Irrtümer des Geistes« ausgeschlossen werden. Hinter dem Ziel, steht der rationalistische Gedanke einer Einheitswissenschaft.

In diesem Zusammenhang sind auch Leibniz' Bemühungen um die Gründung von Akademien zu verstehen. In ihnen sollte eine möglichst umfassende Inventarisierung des menschlichen Wissens erfolgen. Eine endgültige Enzyklopädie des Wissens zu schaffen, hat Leibniz selbst als nicht möglich angesehen, da das menschliche Wissen nicht endgültig festliege. (Röd 1984, 103)

Dennoch war er offensichtlich von der Wichtigkeit seiner Grundidee so überzeugt, daß er sie sogar in seinen »Gehaltsverhandlungen« mit Herzog Johann Friedrich von Braunschweig (1625-1679) im Jahr 1679 zur Sprache brachte. Er schrieb in einem Brief an den Herzog:

Si Dieu inspiroit encor à Y. A. S. la pensée de m'accorder seulement, qve les 1200 écus qv'elle a eu la bonté de déterminer, fussent un revenu perpetuel, je serois aussi heureux qve Raymond Lulle, et peut estre avec bien plus de justice. [...] Car mon invention contient l'usage de la raison tout entier, un juge des controverses, un interprete des notions, une balance pour les probabilités, une boussole qvi nous gvidera sur l'ocean des experiences, une inventaire des choses, un tableau des gnées, un Calcul general, une magie innocente, une cabale non-chimeriqve; une écriture qvi chacun lira dans sa langve: Et même une langve, qu'on pourra apprendre en peu de semaines, qvi

aura bien tost cours parmy le monde. Et qvi menera la vraye religion avec elle partout ou elle passera. (Leibniz 1679e, 168)²²⁷

²²⁷ »Wenn Gott Eurer Hochfürstl. Dchlcht. noch den Gedanken eingäbe, mir lediglich zu bewilligen, daß die 1200 Taler, die festzusetzen Ihr die Güte hattet, zu einer Dauerrente würden, so wäre ich ebenso glücklich wie Raymund Lull, und vielleicht mit größerem Recht [...]. Denn meine Erfindung umfaßt den Gebrauch der gesamten Vernunft, einen Richter für die Streitfälle, einen Erklärer der Begriffe, eine Waage für die Wahrscheinlichkeiten, einen Kompaß, der uns über den Ozean der Erfahrungen leitet, ein Inventar der Dinge, eine Tabelle der Gedanken, ein Mikroskop zum Erforschen der vorliegenden Dinge, ein Teleskop zum Erraten der fernen, einen generellen Calculus, eine unschädliche Magie, eine nicht-chimärische Kabbala, eine Schrift, die jedermann in seiner Sprache liest; und sogar eine Sprache, die man in nur wenigen Wochen erlernen kann und die bald in der ganzen Welt Geltung haben wird. Und die überall, wo sie hinkommt, die wahre Religion mit sich bringt.« Übersetzung aus dem von Burkhard Kroeber ins Deutsche übersetzten Eco 1994, 13f.

5.3 Die Kalkülvorstellung

In einem Brief an Herzog Johann Friedrich aus dem Jahr 1671 schreibt Leibniz:

In Philosophia habe ich ein mittel funden, das jenige was Cartesius und andere per Algebram et Analysin in Arithmetica et Geometria gethan, in allen scientien zuwege zu bringen per Artem Combinatorium, welche Lullius und P. Kircher zwar excolirt, bey weiten aber in solche deren intima nicht gesehen. Dadurch alle Notiones compositae der ganzen Welt, in wenig simplices als deren Alphabet reduciret, und als solches alphabets combination wiederumb alle dinge, samt ihren theorematibus, und was nur von ihnen zu inventiren möglich ordinata methodo mit der zeit zu finden ein weg gebahnet wird. Welche invention, dafern sie wils Gott zu Werck gerichtet, als mater aller inventionen von mir vor das importanteste gehalten wird, ob sie gleich das ansehen noch zur zeit nicht haben mag: Ich habe dadurch alles was erzehlet werden soll, gefunden, und hoffe noch ein mehrers zu wege zu bringen. (Leibniz 1671, 160)

Was Leibniz in diesem Brief als »ars combinatoria« bezeichnet, wird später zum »Kalkül« verallgemeinert. Allerdings entwickelte Leibniz mehrere »allgemeine« Kalküle. So entstand 1679 ein arithmetischer Kalkül mit dem Titel »Elemente der allgemeinen Charakteristik« zur Darstellung der Syllogistik. (Leibniz 1679a) 1686 verfaßte er einen Kalkül unter dem Titel »Allgemeine Untersuchungen über die Analyse der Begriffe und wahren Sätze«. (Leibniz 1686a) Weitere Kalküle entstanden um 1690. Sie werden als »Plus-Minus-Kalküle« bezeichnet und sind extensional wie intensional interpretierbar. (Leibniz gegen 1690) Mit den verschiedenen Ansätzen versuchte Leibniz eine »allgemeine Theorie der Strukturen« als Syntax für eine »scientia generalis« zu entwickeln. (Vgl. Kneale / Kneale 1962, 336) Zwei wichtige Methoden der »scientia generalis« sind die Analyse und die Synthese von Begriffen und Aussagen, die im folgenden vorgestellt werden.

5.3.1 Analyse und Synthese

In seiner Schrift »Die Methoden der universellen Synthesis und Analysis« schlägt Leibniz vor, die »Begriffe und Wahrheiten« in eine bestimmte Ord-

nung zu bringen. Dazu müsse man ein »Alphabet des Denkens« entwickeln, das heißt »ein Verzeichnis der höchsten Gattungen – wie a, b, c, d, e, f – aus deren Vereinigung dann die niederen Begriffe entstünden« (Leibniz 1679c, 39). Auf die höchsten Gattungsbegriffe folgen die »Binionen« – wie ab, ac, bd, cf –, die »Ternionen« – wie abc, bdf – usw.

Die Methode für das Aufstellen der »höchsten Gattungen«, das heißt der Grundbegriffe, nennt Leibniz »Analysis«. Die Analyse geht vom Einzelfall zu den Prinzipien zurück »und verfährt hierbei, wie wenn nichts sonst, das wir selbst oder andere bereits entdeckt haben, uns bekannt und gegeben wäre.« (Leibniz 1679c, 48) »Die Analyse [...] führt ein aufgestelltes Problem auf Einfacheres zurück.« (Leibniz 1669?, 84) Sie soll »die Elemente, nämlich die obersten Gattungen oder die ersten Begriffe, die einfachsten Axiome und die anderen ersten Wahrheiten« (Leibniz 1669?, 85) aufstellen.

Was versteht Leibniz unter den »höchsten Gattungen« oder »ersten Begriffen« und wie unterscheiden sie sich von den abgeleiteten Begriffen?

»Die ersten Begriffe, aus deren Verbindung die übrigen entstehen, sind nun entweder deutlich oder verworren; deutlich sind solche, die aus sich selbst begriffen werden, wie »Wesen« (ens); verworren und dennoch klar die unmittelbaren Wahrnehmungen, wie die Farbe, die wir einem anderen nur dadurch erklären können, daß wir sie ihm zeigen.« (Leibniz 1679c, 41) Ganz ohne Erläuterung kommen aber auch die »deutlichen Begriffe« nicht aus. Denn eine »deutliche Vorstellung« haben wir von all dem, »wovon wir eine Nominaldefinition haben, die nichts anderes als eine Aufzählung der zureichenden Merkmale ist.« (Leibniz 1684, 24) »Die Nominaldefinition besteht in der Aufzählung der Merkmale oder der Konstituentien, die hinreichen, das Objekt von allen anderen zu unterscheiden. Wenn man hierin fortfährt und diese Konstituentien wiederum in ihre Bestimmungen auflöst, so gelangt man schließlich zu den primitiven Begriffen, die entweder, absolut genommen, keine Bestimmungen oder doch keine solchen haben, die von uns weiter erklärt werden können.« (Leibniz 1679c, 41)

Ein ursprünglicher Begriff ist demnach einer, der nicht weiter aufgelöst werden kann. »Einen solchen Begriff kann es allerdings nur von einem einzigen Ding, das durch sich selbst begriffen wird, geben, nämlich von der obersten Substanz, d.h. von Gott. Wir können jedoch keine abgeleiteten Begriffe haben als mit Hilfe des ursprünglichen Begriffs [...], obwohl wir weder deutlich genug erkennen, wie das Wesentliche der Dinge aus Gott, noch auch wie die Ideen der Dinge aus der Idee Gottes hervorgehen, worin die letzte Analyse und die adäquate Erkenntnis aller Dinge durch den

Grund selbst bestünde.« (Leibniz vor 1686?a, 76) Hier erkennt Leibniz selbst die Grenze der Analyse der Begriffe. Vittorio Mathieu schreibt:

[...] der Ausgangspunkt einer Analyse der Begriffe wäre Gott, die Ganzheit; und dieser Ausgangspunkt ist uns nicht gegeben. Der Ausgangspunkt einer Analyse der Wahrheit ist dagegen eine Kenntnis, die wir zum mindestens als provisorisch annehmen können. Durch die Zerlegung einer Wahrheit [sic!] können wir zwar nicht zu den ersten Realelementen gelangen, aber doch zu vorläufigen Postulaten, die wir als Gründe einer hypothetischen Konstruktion annehmen. Der *tatsächlich* gegebene Ausgangspunkt ist immer eine empirische Situation und nicht jener Inbegriff aller Möglichkeiten, die prinzipiell ursprünglich ist.

[...]

Warum denn faßt unsere Analyse nicht die Urbegriffe, sondern nur gleichsam ihre Schatten auf der Ebene eines postulativen Denkens? Eben weil wir uns nie auf den Standpunkt der Gottheit stellen können. Das ist bekanntlich der Unterschied zwischen Vernunftwahrheiten und Tatsachenwahrheiten: aus diesem Grund besteht für uns überhaupt eine Welt von Tatsachenwahrheiten, eine gegebene und nicht völlig ableitbare Welt. Das zwingt uns, uns immer *in medias res* zu stellen und hindert uns, den Ursprung der Dinge zu fassen, der nur in Gott zu finden ist. Um die natürlichen Vorgänge durch eine »mechanische« Kombinatorik zu beherrschen, muß die empirische Situation zunächst zergliedert und zerlegt werden. Dieses Verfahren ist jedoch durch die Situation selbst keineswegs eindeutig bestimmt: Die Zerlegung der Situation ist immer gewissermaßen willkürlich; nur der Erfolg wird uns sagen, ob wir den rechten Weg gewählt haben oder nicht. Das wäre nicht der Fall, wenn wir zu wirklich primitiven Begriffen gelangen könnten; in diesem Fall würden wir über einen absoluten Ausgangspunkt verfügen, um jede Wahrheit a priori zu entdecken und zu konstruieren [sic!].

[...] Die Wahrheit kann durch einen bloß mechanischen und kombinatorischen Formalismus wiedergegeben werden, aber das ermöglicht noch nicht, wirklich primitive und einfache Requisiten zu erhalten, sondern nur, eine freie und ungewisse Interpretation der Lage anzunehmen. [...]

Das beschränkt unvermeidlich auch die Wirksamkeit unseres logischen Rechnens, welches nicht mit der ursprünglichen Wirklichkeit, sondern mit »Schatten« rechnet.

(Mathieu 1974, 153f., Hervorhebungen im Original)

Aus den Grundbegriffen lassen sich dann Begriffe zusammensetzen: »Sodann entspringen alle abgeleiteten Begriffe aus der Verknüpfung der primitiven, und die weiter zusammengesetzten aus der Verknüpfung der zusammengesetzten; nur muß man sich hüten, unnütze Verbindungen zu schaffen, indem man Unvereinbares zusammenbringt.« (Leibniz 1679c, 42)

Die Methode für die Verknüpfung der Begriffe nennt Leibniz »Synthesis« oder »kombinatorische Kunst«. Sie bildet einen Teil der »Kunst der Erfindung«. (Leibniz 1669?, 85) »Eine Synthesis liegt vor, wenn man von den Prinzipien anfängt, der Ordnung nach die Wahrheiten durchläuft, eine gewisse Regelmäßigkeit des Fortschritts feststellt, und auf diese Weise Tafeln oder auch zuweilen allgemeine Formeln begründet, in denen später ein bestimmter Einzelfall aufgefunden werden kann.« (Leibniz 1679c, 48) Aufgabe der Synthese sei es, »Nutzen und Anwendung einer Sache zu entdecken, z.B. nachdem der Magnet bekannt ist, seine Anwendung auf den Kompaß zu ersinnen.« (Leibniz 1679c, 50)

5.3.2 Nominal- und Realdefinition

Analyse und Synthese bedeuten demnach die Definition von Begriffen und die Bildung neuer Begriffe aus den definierten Begriffen. Leibniz setzt sich in diesem Zusammenhang mit verschiedenen Arten von Definitionen auseinander. Nominaldefinitionen hält er für unzureichend, da sie erlauben, Unmögliches oder an sich Widerspruchsvolles zu erzeugen. Da sich aus »dem Unmöglichem oder dem an sich Widerspruchsvollen« (Leibniz 1679c, 44) auch widerstreitende Sätze ableiten lassen, ist es »daher von Wert, im Besitze von Definitionen zu sein, die die Erzeugung der Sache, oder, wenn dies ausgeschlossen ist, ihre innere Verfassung in sich schließen, d.h. ein Verfahren, das die Entstehungsart oder wenigstens die Möglichkeit des Objektes erkennen läßt.« (Leibniz 1679c, 43) Eine solche Definition nennt Leibniz »Realdefinition«. Ein Beispiel: »Der von Euklid angegebene Begriff des Kreises aber, wonach er eine Figur ist, die dadurch zustande kommt, daß eine Gerade sich in einer Ebene um ein festes Zentrum bewegt, ge-

währt eine Realdefinition: es erhellt nämlich aus ihr, daß eine solche Figur möglich ist.« (Leibniz 1679c, 42f.)

Nun kann es verschiedene Realdefinitionen einer Sache geben. Hans Poser unterscheidet Leibniz' Definitionen wie folgt:

Nominaldefinitionen sind diejenigen Definitionen, bei denen man »daran zweifeln kann, ob der definierte Begriff möglich ist«. *Realdefinitionen* hingegen liegen vor, wenn die Merkmale dazu führen, die Möglichkeit des Definierten zu erschließen oder zu erklären. Die Realdefinitionen ihrerseits werden je nach der Weise des Einschlusses der Möglichkeiten unterteilt in *bloße Realdefinitionen*, deren Möglichkeit aus der Erfahrung stammt, und in *Kausaldefinitionen*, deren Möglichkeitsbeweis a priori ist (und damit »die mögliche Erzeugung der Sache in sich schließt«); enthält die Definition schließlich eine vollständige Analyse bis zu den einfachen Begriffen, »ohne irgend etwas vorauszusetzen, was eines apriorischen Beweises für seine Möglichkeit bedarf, so ist die Definition *vollkommen* oder *essentiell*.« {Fußnote 19: DM [Metaphysische Abhandlung] §24 (GP IV 450 / BC II 168f.)} (Poser 1969, 119f., Hervorhebungen im Original)

Eine etwas andere Unterscheidung der vier Arten gibt Burkhardt an:

1. *Bloße* Realdefinition: Die Möglichkeit des Definitum stammt aus der Erfahrung. Jede bloße Realdefinition ist zugleich eine Nominaldefinition.
2. Kausaldefinition im *weiteren* Sinne: Der geforderte Möglichkeitsbeweis wird dahingehend erweitert, daß der zu definierende Begriff in seine Elemente aufgelöst wird, d.h. in andere Begriffe, deren Möglichkeit bereits bekannt ist. Wir müssen dabei wissen, daß in ihnen nichts Unverträgliches ist.
3. Kausaldefinition im *engeren* Sinne: Sie ermöglicht einen apriorischen Möglichkeitsbeweis, der an keiner Stelle von a posteriori widerspruchsfrei erwiesenen Begriffen, also von solchen, die aus der Erfahrung stammen, Gebrauch macht.
4. Die *eigentliche* Kausaldefinition oder die *genetische* Definition: Sie muß die Erzeugbarkeit des definierten Gegenstandes zeigen. (Burkhardt 1980, 215, Hervorhebungen im Original)

Ein Beispiel für eine genetische Definition lautet: »Ein und dieselbe Ellipse z.B. kann man sich durch Bewegung eines Fadens um zwei feste Brenn-

punkte, oder durch den Schnitt eines Kegels oder Zylinders entstanden denken.« (Leibniz 1679c, 44f.) Von den Realdefinitionen seien diejenigen am besten, »die sich den besonderen Umständen des Problems am besten anpassen [...] die allen Hypothesen oder Erzeugungsarten gemeinsam sind und die nächste unmittelbare Ursache des Inhalts in sich schließen; endlich die, aus denen die Möglichkeit der Sache unmittelbar einleuchtet, ohne daß dazu die Beihilfe der Erfahrung oder der Beweis der Möglichkeit eines anderen Gegenstands erfordert würde.« (Leibniz 1679c, 45)

Leibniz' Konzept enthält drei interessante Aspekte. Erstens formuliert er eine methodologische Variante des Ockhamschen Rasiermessers, die ein »Prinzip der Denkökonomie« darstellt, in dem bestimmte Anforderungen an definitorische Verfahren hervorzuheben sind. Zweitens wird Erkenntnis nicht vorzugsweise auf Erfahrung zurückgeführt, wie dies bei Locke der Fall ist, sondern auf Definition von Begriffen (Analyse) und Verknüpfung von definierten Begriffen (Synthese) begründet. Drittens ist für Leibniz die Art der Definition wichtig. Eine Nominaldefinition reicht nicht aus, sondern es muß eine Realdefinition sein, das heißt eine Definition mit einem konstruktiven Moment.

Ernst Bloch (1885-1977) stellt fest, daß Thomas Hobbes als erster die Bedeutung einer genetischen Definition im Gegensatz zu einer beschreibenden Definition erkannte. Mit einer beschreibenden Definition wird ein Begriff definiert, indem das »genus proximum« und die »differentia specifica« angegeben werden. »Kreise sind ebene Figuren,« – übergeordneter Gattungsbegriff – »deren Begrenzungslinie von ihrem Mittelpunkt überall gleich weit entfernt ist« – spezifisches Artmerkmal –. Die genetische Definition dagegen kann zum Beispiel so lauten: »Kreise sind ebene Figuren, die durch Drehung einer Linie um einen ihrer Endpunkte entstehen.« (Bloch 1972, 145)

Diese Art von Definition erhält bei Hobbes insofern eine große Bedeutung, als er das Denken und Erkennen als Erzeugen ansieht.

Wie aber die Erkenntnis einer Wirkung im Ausgang von der Kenntnis ihrer Erzeugungsweise gewonnen werden kann, läßt sich unschwer am Beispiel des Kreises verstehen. Bei einer gegebenen ebenen Figur, die der Kreisfigur sehr nahekommt, kann man zwar mit den Sinnen unmöglich erkennen, ob es ein Kreis ist oder nicht, im Ausgang von der Kenntnis der Erzeugungsweise der vorliegenden Figur dagegen ohne jede Schwierigkeit. Ist diese Figur nämlich zu-

stande gekommen durch die Herumführung eines Körpers, dessen eines Ende unbewegt bleibt, so werden wir folgern: Der herumgeführte Körper legt sich mit seiner gleichbleibenden Länge erst auf den einen Radius, dann auf den zweiten und dritten, den vierten und schrittweise auf alle; daher berührt ein und dieselbe Strecke von ein und demselben Punkt aus die Peripherie überall, d.h. alle Radien sind gleich. Man erkennt also, daß aus einer solchen Erzeugungsweise eine Figur hervorgeht, von deren einzigem Mittelpunkt aus alle Außenpunkte von gleichen Radien berührt werden.

In vergleichbarer Weise werden wir schlußfolgernd von der Kenntnis einer Figur zu einer bestimmten Erzeugungsweise gelangen, wenn vielleicht auch nicht zur tatsächlichen, so doch zu einer möglichen. Denn kennen wir die obengenannte Eigenschaft des Kreises, so weiß man unschwer, daß ein Kreis entsteht, sofern ein bestimmter Körper in der genannten Weise herumgeführt wird. (Hobbes 1655, I, 5)

Bloch faßt dies zu dem Satz zusammen: »Wir können nur insofern und insoweit einen Gegenstand erkennen, als wir ihn selbst erzeugt haben.« (Bloch 1972, 143) Dieser Grundsatz ist ein wesentliches Theorem des mechanistischen Weltbildes. Das Prinzip der Machbarkeit entspricht dem Interesse des aufstrebenden Bürgertums am Erzeugen, an der Herstellung, an der Produktion. Die Bedeutung der genetischen Definition oder der Realdefinition liegt darin, daß sie ein Verfahren zur Herstellung angibt. »Was aber definiert ist, ist herstellbar, ist produzierbar.« (Baruzzi 1968, 52)²²⁸

5.3.3 Wahrheit

Sind nun alle Begriffe definiert, so folgt: »Aus diesen Ideen oder Definitionen können alle Wahrheiten bewiesen werden, mit Ausnahme der identischen Sätze, die offenbar ihrer Natur nach unbeweisbar sind und daher wahrhaft Axiome genannt werden können. [...] Und zwar ist dies das einzige und höchste Kriterium der Wahrheit abstrakter und von der Erfahrung unabhängiger Sätze, daß sie entweder identisch oder doch auf identische Wahrheiten zurückführbar sind.« (Leibniz 1679c, 45f.) »Ein Satz ist wahr, wenn er aus gesetzten und an sich wahren Sätzen durch Folgerungen entspringt.« (Leibniz vor 1686?b, 129)

²²⁸ Vgl. Abschnitt 2.2.13 zu Handlungsorientierung und Machbarkeit.

Um sich eines logischen Schemas praktisch bedienen zu können, muß es möglich sein anzugeben, aus welchen Sätzen gefolgert werden darf, welche Sätze also als »wahr« gelten sollen. Mit dem Problem des Wahrheitskriteriums hat sich Leibniz deshalb verschiedentlich befaßt, so heißt es bei ihm: »Eine Aussage wird von uns für wahr gehalten, sobald unser Geist ihr zu folgen geneigt ist und kein Grund des Zweifels gefunden werden kann. Absolut aber und in sich ist vollends der Satz wahr, der identisch ist oder auf identische Sätze zurückgeführt, d.h. der a priori bewiesen werden kann oder bei dem die Verknüpfung des Prädikats mit dem Subjekt so erklärt werden kann, daß stets der Grund offenbar wird [...]«. (Leibniz vor 1686?a, 76) »Bei den Tatsachen ist das wahr genug, was ebenso sicher ist wie meine eigenen Gedanken und Wahrnehmungen.« (Leibniz vor 1686?a, 77) »Wahrheit ist: daß das Prädikat im Subjekt ist; [...] es wird gezeigt, indem man den Grund angibt [...] durch die Analyse der Ausdrücke in die beiden gemeinsamen Begriffe [...] Diese Analyse ist entweder endlich oder unendlich. Ist sie endlich, heißt sie Beweis [...] und die Wahrheit ist notwendig [...] Sie wird nämlich zurückgeführt auf identische Wahrheiten [...] oder auf das erste Prinzip: des Widerspruchs oder der Identität [...] Wenn die Analyse ins Unendliche geht und niemals zur Vollendung gelangt, ist die Wahrheit zufällig [...]« (Leibniz 1690, 420f.) Und schon 1677 schrieb Leibniz im »Dialog über die Verknüpfung zwischen Dingen und Worten«, daß die Wahrheit oder die Falschheit nicht in den Dingen, sondern in den Aussagen über die Dinge liege. Die Beziehung zwischen dem Gedanken und dem Ding bildet Leibniz zufolge die Grundlage der Wahrheit. (Leibniz 1677, 15f.)

5.3.4 »Characteristica universalis«

Um Erkenntnis rein rechnerisch gewinnen zu können, schlug Leibniz vor, den Elementen, das heißt den Begriffen, mit denen gerechnet werden soll, Zeichen zuzuordnen.²²⁹ Unter Zeichen versteht er »die Wörter, die Buchstaben, die chemischen, die astronomischen, die chinesischen, die hie-

²²⁹ Inwieweit Leibniz sich auf Hobbes bezieht, der im »Leviathan« eine allgemeine Form eines logischen Kalküls beschreibt, soll hier nicht untersucht werden. Nach Hobbes sind Gedanken nichts als ein Kalkül, in dem Wörter den Wert von Symbolen annehmen, und die Mathematik soll als Modell für jede Art von Wissen über die Welt behandelt werden. So wie wir in der Arithmetik Zahlen addieren und subtrahieren, so läßt sich in der Logik mit Wörtern rechnen: Zwei Wörter addiert ergeben eine Aussage, zwei Aussagen addiert ergeben einen Syllogismus, mehrere Syllogismen formen einen Beweis. (Hobbes 1651 Leviathan pt 1 chap 4)

rogyphischen Figuren, die Noten der Musik, die geheimschriftlichen, arithmetischen, algebraischen und alle anderen Zeichen, die wir beim Denken für die Dinge gebrauchen. Geschriebene, gezeichnete oder plastische Zeichen aber heißen Charaktere.« (Leibniz o.J., Charakteristik, 111) »Zur Aufstellung eines allgemeinen Kalküls sind Charaktere für alle beliebigen Ausdrücke zu erfinden, aus denen, nachdem sie miteinander verbunden worden sind, die Wahrheit der aus den Ausdrücken zusammengesetzten Sätze sofort erkannt werden kann.« (Leibniz 1679a, 203)

Leibniz bevorzugt die Sprache der Mathematik als universelles Mittel zur Darstellung wissenschaftlicher Begriffe. So heißt es im selben Text weiter: »Als die bequemsten Charaktere habe ich bisher die Zahlen gefunden. Sie sind nämlich leicht zu handhaben und können sich allen Gegenständen anpassen, ferner geben sie Gewißheit.« (Leibniz 1679a, 203)

Nachdem den Begriffen Zahlen zugeordnet sind, kann man mit ihnen rechnen. Dies geschieht, indem die charakteristischen Zahlen derjenigen Ausdrücke, aus denen ein Begriff konstituiert wird, miteinander multipliziert werden, wobei das Produkt die charakteristische Zahl des Begriffs ergibt. (Leibniz 1679a, 203) Ein Beispiel: »Denke dir, die Zahl von »Lebewesen« sei 2, die von »vernünftig« 3, so wird die Zahl von »Mensch« 6 sein.« (Leibniz 1679a, 195)

Mit Hilfe dieser Zahlen läßt sich feststellen, ob ein Ausdruck einen anderen enthält. »Man braucht nämlich bloß danach zu fragen, ob dessen Zahl die Zahl von jenem glatt teilen kann. Z.B.: Wird etwa als charakteristische Zahl von »Mensch« 6, von »Affe« aber 10 angesetzt, so enthält offensichtlich weder der Begriff des Affen den Begriff des Menschen noch umgekehrt dieser jenen, weil weder 10 durch 6 noch umgekehrt 6 durch 10 glatt dividiert werden kann.« (Leibniz 1679a, 187)

Für diesen »arithmetischen Kalkül« gibt Leibniz als Regeln an: »Wenn ein universal-bejahender Satz wahr ist, ist es notwendig, daß die Zahl des Subjekts glatt oder ohne Rest durch die Zahl des Prädikats dividiert werden kann [...] Wenn ein partikular-bejahender Satz wahr ist, genügt es, wenn entweder die Zahl des Prädikats glatt durch die Zahl des Subjekts oder die Zahl des Subjekts durch die Zahl des Prädikats dividiert werden kann [...] Wenn ein universal-verneinender Satz wahr ist, ist es notwendig, daß weder die Zahl des Subjekts durch die Zahl des Prädikats noch die Zahl des Prädikats durch die Zahl des Subjekts glatt dividiert werden kann[...] Wenn ein partikular-verneinender Satz wahr ist, ist es notwendig, daß die Zahl des

Subjekts nicht glatt durch die Zahl des Prädikats dividiert werden kann.«
(Leibniz 1679a, 170f.)

Dieses Verfahren funktioniert allerdings nur dann, wenn man davon ausgeht, daß die Zusammensetzung von Begriffen nur durch »und«-Verknüpfungen erfolgt und keine mehrstelligen Relationen auftreten. Die Aussage »S ist P«, das heißt »P ist Teilbegriff von S«, kann auch durch die Konjunktion »S ist P und X« ausgedrückt werden. Die Übersetzung dieser Konjunktion in arithmetische Ausdrücke ergibt: $s = p * x$. Die Konjunktion wird durch die Multiplikation abgebildet. Damit ist die Aussage »S ist P« in die mathematische Aussage »s ist durch p teilbar« übersetzt.

Das von Leibniz vorgeschlagene Verfahren führt zu folgenden Schwierigkeiten:²³⁰

Erstens läßt sich die Negation eines Begriffs nicht einfach als Konjunktion darstellen. Wenn $A = P_1$ und ... und P_m ist, dann lautet die Negation: $\neg A = \neg P_1$ oder ... oder $\neg P_m$. Der negierte Begriff kann also nicht zerlegt werden oder die Zerlegung führt zu anderen Grundbegriffen.

Zweitens läßt sich der analytische Charakter der Wahrheit aller Aussagen nur dann sicherstellen, wenn alle einfachen positiven Begriffe miteinander vereinbar sind. Leibniz versuchte die Unverträglichkeit zweier Begriffe darauf zurückzuführen, daß zwei der in den Begriffen enthaltenen Grundbegriffe kontradiktorisch entgegengesetzt sind. In vielen Fällen sind Begriffe aber inkompatibel, ohne kontradiktorisch zu sein. Die Beziehung zwischen den Begriffen ist dann keine analytische, sondern eine synthetische. Leibniz sah dieses Problem:

Illud tamen adhuc hominibus ignotum est, unde oriatur impossibilitas diversorum, seu qui fieri possit ut diversae essentiae invicem pugnent, cum omnes termini pure positivi videantur esse compatibles inter se. (Leibniz o.J. o.T., 195)²³¹

Aussagen, die sich gegenseitig ausschließen, ohne eine Kontradiktion zu enthalten, sind zum Beispiel Aussagen über Farben und über Größen auf

²³⁰ Weitere Grenzen des Verfahrens sind bei Lorenz Krüger zusammenfassend beschrieben. (Krüger 1969, 21ff.)

²³¹ »Es ist bis jetzt den Menschen noch unbekannt, was der Grund für die Unvereinbarkeit von verschiedenen Dingen ist, oder warum verschiedene Wesenheiten einander entgegengesetzt sein können, wo man doch sieht, daß alle rein positiven Ausdrücke unter sich kompatibel zu sein scheinen.«

einer Skala. Mit dieser Art von Aussagen hat sich auch Wittgenstein beschäftigt.²³²

Konsequent angewandt, führt die Analyse der Begriffe nur zu einem einzigen Grundbegriff, dem Begriff Gottes.²³³ Grundbegriffe werden aus sich selbst heraus und nicht durch den Vergleich mit oder durch die Abgrenzung von anderen Begriffen erklärt. In dem Text »Über das Organon oder die große Kunst des Denkens« heißt es: »Was von uns gedacht wird, wird entweder durch sich selbst begriffen oder schließt den Begriff von etwas anderem ein. Was im Begriff eines anderen eingeschlossen ist, wird entweder wiederum durch sich selbst begriffen oder schließt den Begriff von etwas anderem ein. Und so fort. Deshalb muß man entweder ins Unendliche gehen oder alle Gedanken in solche auflösen, die durch sich selbst begriffen werden.« (Leibniz zwischen 1679 und 1686, 24) Da alles in der Welt von Gott abhängt, kann nur der Begriff Gottes der Grundbegriff überhaupt sein. Aus diesem einen Grundbegriff und seiner Negation sollen alle anderen Begriffe ableitbar oder zumindest soll die Möglichkeit der Ableitung denkbar sein.

Es ist möglich, daß nur ein einziges ist, das durch sich selbst begriffen wird, ohne Zweifel Gott selbst, und außerdem das Nichts oder der Mangel schlechthin, was durch eine merkwürdige Entsprechung klar wird. Die Zahlen erklären wir gewöhnlich durch die dekadische Folge, so daß, wenn wir zur Zehn gelangt sind, wir wiederum mit der Eins anfangen – wie dies zweckmäßig geschehen ist, will ich jetzt nicht auseinandersetzen; indessen soll aufgewiesen werden, daß an Stelle jener eine dyadische Folge hätte angewandt werden können, derart, daß, sobald wir bei Zwei angelangt sind, wir wiederum mit der Eins beginnen; auf diese Weise:

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
0	1	10	11	100	101	110	111	1000
(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	
1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111	10000	

Die unermesslichen Nutzenanwendungen dieser Folge berühre ich jetzt nicht: Es wird genügt haben anzumerken, wie auf diese Weise durch eine wunderbare Methode alle Zahlen durch die Eins und das Nichts

²³² Vgl. Abschnitt 4.1.5 zu Wittgensteins Überlegungen in »Some Remarks on Logical Form«.

²³³ Vgl. Abschnitt 5.3.1 zu Analyse und Synthese.

dargestellt werden. Obwohl aber keine Hoffnung besteht, daß die Menschen in diesem Leben zu dieser geheimnisvollen Reihe der Dinge gelangen können, durch die offensichtlich nach einer gewissen Methode alles aus dem reinen Seienden und dem Nichts hervorgeht, genügt es, daß die Analyse der Begriffe so weit zu Wege gebracht wird, wie es die Beweise der Wahrheiten erfordern. (Leibniz zwischen 1679 und 1686, 25f.)

Durch die »Entdeckung« des dualen Zahlensystems hielt Leibniz die Rückführung der Begriffe auf zwei Grundbegriffe für lösbar. Er sah das duale Zahlensystem nicht einfach als ein weiteres Zahlensystem neben dem bekannten Dezimalsystem, sondern als Grundlage für sein Erkenntnisprogramm an.

Denn durch die Kombination von wenigem kann Unendliches zusammengesetzt werden. Dies ist sogar nicht nur möglich, sondern auch glaubhaft und wahrscheinlich, denn die Natur pflegt das Größte mit dem geringsten Aufwand zu bewirken, d.h., auf die einfachste Weise vorzugehen. (Leibniz zwischen 1679 und 1686, 25)

Leibniz' Programm enthält also neben der Analogie zwischen den Dualzahlen »1« und »0« und den Grundbegriffen »Seiendes« und »Nichts«, die er als »merkwürdige Entsprechung« bezeichnet, auch das Ökonomieprinzip. So wie für die Darstellung der Zahlen zwei Ziffern (»1« und »0«) genügen, so genügen für die Erkenntnis zwei Elemente (das »Seiende« und das »Nichts«). Die Vielfalt der Welt läßt sich auf zwei Elemente reduzieren.²³⁴

5.3.5 Der allgemeine Kalkül

Die Elemente des allgemeinen Kalküls sind für Leibniz die »Ideen oder Definitionen«. Nach welchen Regeln lassen sich nun »alle Wahrheiten beweisen«? Im folgenden werden zwei Fragmente vorgestellt:

Im »Versuch eines allgemeinen Kalküls«²³⁵ beschreibt Leibniz die Formen und Folgerungen des universal-bejahenden Satzes.

²³⁴ Es sei daran erinnert, daß der Eins als Ausdruck der Einheit schon in der griechischen Antike eine besondere Bedeutung zukam. Vgl. Platon: Symposion. Rede des Komödiendichters Aristophanes. 189c-191d.

²³⁵ »Specimen Calculi Universalis« und »Ad Specimen Calculi Universalis Addenda« (vgl. Leibniz vor 1686?b, 128-146)

1. Der universal-bejahende Satz wird von uns an dieser Stelle so dargestellt werden:

a ist b,

oder

›(Jeder) Mensch ist ein Lebewesen.« [...]

2. Der an sich wahre Satz:

ab ist a,

oder

›(Jedes) vernünftige Lebewesen ist ein Lebewesen.«

ab ist b,

oder

›(Jedes) vernünftige Lebewesen ist vernünftig.«

(oder bei Weglassung von b:)

a ist a,

oder

›(Jedes) Lebewesen ist ein Lebewesen.«

3. Die an sich wahre Folgerung:

Wenn a b ist und b c ist, dann ist a c, oder ›Wenn (jeder) Mensch ein Lebewesen ist und (jedes) Lebewesen eine Substanz ist, dann ist (jeder) Mensch eine Substanz.«

(Leibniz vor 1686?b, 128f.)

Diese »an sich wahren Sätze« und die »an sich wahre Folgerung« sind Axiome in Leibniz' Kalkül. Er beweist dann folgenden Satz:

Wenn a b ist und b c ist, dann ist a c;

›(Jeder) Mensch ist ein vernünftiges Lebewesen; (jedes) Lebewesen ist eine Substanz; also ist (jeder) Mensch eine Substanz.«

Dies wird so bewiesen:

Wenn a b ist nach der Voraussetzung und b c ist nach Nummer 2, dann ist a c nach Nummer 3. Wenn wiederum a b ist (wie wir gezeigt haben) und b c ist nach der Voraussetzung, dann ist a c nach Nummer 3.

(Leibniz vor 1686?b, 129)

Weiterhin gibt Leibniz einige Grundsätze an, die allgemein gültig sind und auch als Axiome angesehen werden können:

1. Was in gewissen unbestimmten Buchstaben eingeschlossen ist, dasselbe muß verstanden werden als eingeschlossen in irgendwelchen

anderen Buchstaben, die dieselben Bedingungen haben; da es etwa wahr ist, daß ab a ist, wird es auch wahr sein, daß bc b ist, ja sogar, daß bcd bc ist. Denn indem wir für bc e einsetzen [...], ist es dasselbe, als hätten wir gesagt: »ed ist e«.

2. Die Umstellung der Buchstaben in demselben Ausdruck ändert nichts, wie ab mit ba zusammenfällt oder »Lebewesen, ein vernünftiges« mit »vernünftiges Lebewesen«.

3. Die Wiederholung desselben Buchstabens in demselben Ausdruck ist wertlos, wie: b ist aa, oder bb ist a. »Der Mensch ist Lebewesen Lebewesen« oder »Der Mensch Mensch ist Lebewesen«. Es genügt, daß gesagt wird: a ist b, oder »Der Mensch ist ein Lebewesen«.

4. Aus beliebig vielen Sätzen kann ein Satz werden, indem alle Subjekte in ein Subjekt und alle Prädikate in ein Prädikat zusammengezogen werden. a ist b, und c ist d, und e ist f – daraus wird werden: ace ist bdf. Wie: »Gott ist allmächtig.« »Der Mensch ist mit einem Körper begabt.« »Der Gekreuzigte ist leidend.« Also: »Der Gott-Mensch-Gekreuzigte ist allmächtig, mit einem Körper begabt, leidend.« [...]

5. Aus jedem beliebigen Satze, dessen Prädikat aus mehreren Ausdrücken zusammengesetzt ist, können mehrere Sätze werden, von denen jeder dasselbe Subjekt wie vorher, jedoch an Stelle des Prädikats irgendeinen Teil des früheren Prädikats hat. a ist bcd, also: a ist b, a ist c und a ist d. Etwa: »Der Mensch ist vernünftig, sterblich, sichtbar.« Also: »Der Mensch ist vernünftig.« »Der Mensch ist sterblich.« »Der Mensch ist sichtbar.«

(Leibniz vor 1686?b, 137f.)

Der erste Grundsatz gilt nur, wenn man Leibniz' Postulat »Es soll erlaubt sein, einen Buchstaben an die Stelle eines anderen zu setzen oder daß er mehreren Buchstaben zusammen äquivalent ist, wie daß d dem a äquivalent ist und das eine an Stelle des anderen eingesetzt werden kann, oder daß c dem Ausdruck ab äquivalent ist; z.B. »Mensch« ist dasselbe wie »vernünftiges Lebewesen«.« (Leibniz vor 1686?b, 136f.) annimmt.

Der zweite Kalkül, der hier vorgestellt wird, ist der Kalkül der vier Satzarten, der in den »Allgemeinen Untersuchungen über die Analyse der Begriffe und wahren Sätze«²³⁶ beschrieben ist und den Leibniz mit dem kom-

²³⁶ »Generales Inquisitiones de Analysis Notionum et Veritatum«.

mentierenden Untertitel »Hier bin ich besonders weit vorangekommen« (Leibniz 1686a, 241) versehen hat.

Um nicht nur den universal-bejahenden Satz, sondern alle Satzarten formal darstellen zu können, führt Leibniz die Negation ein: Er setzt das »Privative« als »Nicht-A« fest. Und »Nicht-Nicht-A ist dasselbe wie A.« (Leibniz 1686a, 241) Das Gegenteil dazu sei das »Positive«: »Das Positive ist A, wenn es nämlich nicht ein beliebiges Nicht-Y ist, vorausgesetzt, Y ist gleicherweise kein Nicht-Z, usf. [...] »Positiv« ist dasselbe wie »seiend«. »Nicht-seiend« ist, was rein privativ oder an allem privativ ist, nämlich Nicht-Y, d.i. Nicht-A, Nicht-B, Nicht-C usw.« (Leibniz 1686a, 241)

In diesem Kalkül stellt Leibniz die vier Satzarten folgendermaßen dar:²³⁷

partikular-bejahend

$AB = AB$ (oder AB und AB fallen zusammen, d.i. AB ist ein Ding);

partikular-verneinend

$ANicht-B = ANicht-B$ (oder $ANicht-B$ ist ein Ding);

universal-bejahend

$ANicht-B \text{ nicht} = ANicht-B$ (oder $ANicht-B$ ist kein Ding);

universal-verneinend

$AB \text{ nicht} = AB$ (oder AB ist kein Ding).

(Leibniz 1686a, 295)

Für diesen Kalkül der vier Satzarten gelten einige »Prinzipien«, wobei Leibniz mit diesem Begriff recht unterschiedliche Dinge bezeichnet, was er im »Plan einer neuen, nach der entdeckenden Methode abzufassenden Enzyklopädie« von 1679 erklärt: »Die Sätze in einer jeden Wissenschaft sind entweder Prinzipien oder Folgerungen. Die Prinzipien sind Definitionen oder Axiome oder Hypothesen oder Erscheinungssätze [...]« (Leibniz 1679b, 61)

Unter Definitionen versteht Leibniz Sätze, die »zwar an sich frei sind, jedoch dem Sprachgebrauch angepaßt und durch die allgemeine Zustimmung der Sprachgenossen gebilligt werden müssen« (Leibniz 1679b, 61). Axiome sind Sätze, »die von allen für einleuchtend gehalten werden« (Leibniz 1679b, 62). Hypothesen können »von uns noch nicht streng genug bewiesen werden, und daher werden sie einstweilen angenommen« (Leibniz 1679b, 62).

²³⁷ Dieses ist nur eine Auswahl der von Leibniz verwandten Darstellungsweisen. Neben der hier angeführten gibt es, beispielsweise im »Versuch der beweisenden Syllogistik«, auch graphische Abbildungen, das heißt Diagramme aus Strichen und Kreisen. (Leibniz um 1690a, 372ff.) Als »Kreis-Strich-Charakteristik« sind die Diagramme bereits bei Jungius zu finden. (Kangro 1968, 65; Burkhardt 1980, 320, 366) Somit steht außer Frage, daß diagrammatische Darstellungen keine Erfindung des 19. Jahrhunderts sind.

Erscheinungssätze sind Sätze, »die durch die Erfahrung bewiesen werden« (Leibniz 1679b, 62).

Die für die Satzlogik geltenden Prinzipien werden von Leibniz an verschiedenen Stellen im Kalkül zusammengefaßt, beispielweise folgendermaßen:

1. Zusammenfallende (Ausdrücke und Sätze²³⁸) können füreinander eingesetzt werden.
 2. $AA = A$.
 3. Nicht-Nicht- $A = A$.
 4. Falsch oder nicht-wahr ist der Ausdruck, der $ANicht-A$ enthält; wahr derjenige, der dies nicht enthält.
 5. Satz ist, was einem Ausdruck hinzufügt, daß dieser wahr oder falsch ist. Wenn etwa A ein Ausdruck ist und ihm zugeschrieben wird, daß A wahr oder daß A nicht wahr ist, pflegt einfach gesagt zu werden, daß A ist oder daß A nicht ist.
 6. Die Hinzufügung von »wahr« oder »ist« läßt unverändert, jedoch die von »falsch« oder »ist nicht« verändert in das Gegenteil; das Wahre oder das Falsche, von dem man sagt, es sei wahr, bleibt also ein Wahres oder Falsches; wird dagegen von einem Wahren oder einem Falschen gesagt, es sei falsch, so wird aus dem Wahren ein Falsches und aus dem Falschen ein Wahres.
 7. Ein Satz wird selbst ein Ausdruck, wenn dem Ausdruck »das Wahre« oder »Falsche« hinzugefügt wird; ist etwa A ein Ausdruck und ist » A ist« oder » A ist wahr« ein Satz, so wird » A wahr« oder » A ist wahr« oder » A ist« ein neuer Ausdruck sein, aus dem wieder ein Satz werden kann.
 8. Daß ein Satz aus einem anderen Satze folgt, ist nichts anderes, als daß die Folgerung in dem Vorangehenden enthalten ist wie ein Ausdruck in einem anderen; und mit dieser Methode führen wir die Folgerungen auf Sätze und die Sätze auf Ausdrücke zurück.
 9. Daß A I enthält, ist dasselbe wie $A = xI$.
- (Leibniz 1686a, 301f.)

²³⁸ Ein »Ausdruck ist: a , b , ab , bcd , wie: »Mensch«, »Lebewesen«, »vernünftiges Lebewesen«, »vernünftig-sterblich-sichtbar.« (Leibniz vor 1686?b, 136) »Der Satz ist eine Rede, in welcher nur einmal entweder bejaht oder verneint wird. Rede ist das, worin bejaht oder verneint wird, ob einmal oder öfter, ist ohne Bedeutung.« (Leibniz 1702-1704, 122)

Beim Aufbau des Kalküls orientierte sich Leibniz offenbar an der axiomatischen Methode Euklids. Er stellt Axiome auf und gibt Ableitungsregeln für weitere Ausdrücke an. Der Kalkül gilt sowohl für Begriffe, als auch für Aussagen. Leibniz entwickelt hier also einen allgemeinen Kalkül, der sowohl als Begriffs-, als auch als Aussagenkalkül interpretiert werden kann. Bei Aussagen ist die Verknüpfung »ist« als »impliziert« (Folgerelation) zu lesen.

Das Ziel der Anwendung des Kalküls ist, wahre Ausdrücke und Sätze zu finden. So schreibt Leibniz:

Denn beweisen, daß ein komplexer Ausdruck wahr ist, heißt: ihn auf andere wahre komplexe Ausdrücke und diese auf erstlich-wahre komplexe Ausdrücke zurückzuführen, d.h. auf Axiome (oder durch sich selbst erkannte Sätze) oder auf Definitionen inkomplexer Ausdrücke, von denen bewiesen ist, daß sie wahr sind, oder auch auf Erfahrungssätze. Ebenso beweist man die Wahrheit inkomplexer Ausdrücke, indem man sie auf andere wahre inkomplexe Ausdrücke zurückführt und diese weiter auf andere erstlich-wahre inkomplexe Ausdrücke, d.h. auf durch sich selbst begriffene Ausdrücke oder auf Ausdrücke, die wir erfahren haben [...] So endigt also jede Auflösung sowohl der komplexen wie der inkomplexen Ausdrücke bei Axiomen, durch sich selbst begriffenen Ausdrücken, und bei Erfahrungssätzen. Diese Auflösung aber geschieht durch die Einsetzung des Wertes; denn sooft für einen enthaltenden ein enthaltener Ausdruck eingesetzt wird, wird ein unbestimmter Wert eingesetzt [...] (Leibniz 1686a, 265)

Unter den Fragmenten findet sich schließlich folgende sehr allgemeine Formulierung des Kalkülbegriffs:

Der Kalkül oder die Operation besteht in der Erzeugung von Beziehungen, vollzogen durch Umwandlungen der Formeln gemäß gewissen vorgeschriebenen Gesetzen. (Leibniz o.J., Charakteristik, 114)

Die Beschreibung kann kaum knapper und präziser sein. Weiter heißt es in dem Fragment:

Je mehr aber die Gesetze oder Bedingungen dem künftigen Rechner vorgeschrieben werden, um so mehr ist der Kalkül zusammengesetzt und auch die Charakteristik weniger einfach. Die Formeln (unter deren einfachsten man die Charaktere selbst verstehen darf), die Bezie-

hungen und die Operationen verhalten sich offenbar zueinander wie die Begriffe, die Aussagen und die Syllogismen. Auch die Beziehungen sind zusammengesetzt, die gewisse Operationen begründen. (Leibniz o.J., Charakteristik, 114)

Nach Burkhardt bestehen die Aufgaben der Charakteristik oder des Kalküls erstens in der Bildung von Ausdrücken mit Hilfe von »Formationsregeln« und zweitens im Übergang von einem Ausdruck zum anderen mit Hilfe von »Transformationsregeln«. (Burkhardt 1980, 327f.)

Jörgensen (1932/33) und Schischkoff (1947) unterscheiden in ihren Arbeiten über Leibniz' allgemeinen Kalkül vier Hauptaufgaben, die mit der Aufstellung einer »scientia generalis« verbunden sind:

Erstens müssen sämtliche Begriffe, mit denen in den Wissenschaften operiert wird, analysiert werden. Sie sollen auf ein Minimum von Grundbegriffen reduziert werden. Aus diesen Grundbegriffen sollen dann mittels Definitionen wieder Begriffe abgeleitet oder konstituiert werden können. Diese Aufgabe wird von Jörgensen als »konstitutionstheoretische Aufgabe«, von Schischkoff als »kategorialbegrifflich-konstitutionelle Aufgabe der *characteristica generalis*« bezeichnet.

Die zweite Aufgabe besteht in der systematischen Anordnung sämtlicher in den Wissenschaften vorkommenden Aussagen. Die Systematik enthält die Angabe, welches die Grundsätze sind, aus denen andere Sätze der Wissenschaften abgeleitet werden können. Leibniz nennt diese Grundsätze auch erste Sätze oder erste Wahrheiten, wie »A ist A« (Leibniz um 1690b, 446). Ihre Anzahl ist zwar unendlich, dennoch ist es sinnvoll, sie zu suchen. Denn die Auflösungen der Ausdrücke in erste Wahrheiten »würden uns zu einer Unendlichkeit schöner praktischer Folgerungen genügen, ebenso wie es in der Natur nicht nötig ist, die Forschung mit Versuchen wegen deren Unendlichkeit aufzugeben, da wir schon diejenigen sehr gut anwenden können, die uns gegeben sind.« (Leibniz o.J., Grundbegriffe, 125) Diese Aufgabe nennt Jörgensen die »axiomatische Aufgabe«, Schischkoff die »axiomatisch-konstitutionelle Aufgabe des *calculus ratiocinator*«.

Die dritte Aufgabe liegt in der Zuordnung von Zeichen zu den Grundbegriffen und von Kombinationen dieser Zeichen zu den abgeleiteten Begriffen. Auch den Sätzen sind Zeichen zuzuordnen, so daß die in ihnen enthaltenen Beziehungen symbolisiert werden. Leibniz spricht vom »Alphabet des Denkens« (Leibniz 1679c, 39), das es aufzustellen gilt. Jörgensen

nennt dieses die »symbolologische Aufgabe«, Schischkoff verwendet den Ausdruck »formelle Aufgabe der *characteristica generalis*«.

Viertens sollen die höheren Begriffe aus den niederen Begriffen sowie neue Lehrsätze durch schließendes Denken hergeleitet werden. Für diese Operation der Kombination der Begriffe und der Deduktion der Sätze müssen Regeln aufgestellt werden, die dann mit Hilfe der bereits eingeführten Zeichen als Rechenvorschriften dargestellt werden. Diese Aufgabe wird von Jörgensen als »kalkulatorische Aufgabe«, von Schischkoff als »eigentlich-kalkulatorische Aufgabe des *calculus ratiocinator*« bezeichnet.

Leibniz' Kalkülvorstellung hatte für seine Auffassung vom Erkenntnisprozeß Konsequenzen. Trotz der Systematisierung des Wissens und der Anwendung logischer oder mathematischer Regeln bedeutete die Betrachtung der Welt als Kalkül nicht, sie endlich zu machen, sondern der Erkenntnisprozeß wird als prinzipiell nicht abschließbarer verstanden. Auch insofern ist Leibniz ein moderner Denker. Philosophische Systeme können, da jeder Erkenntnisstand immer relativ ist, nicht den Anspruch auf absolute Wahrheit erheben. Und so formuliert Leibniz seine These von der »universellen Harmonie« im »Neuen System der Natur« (1695) als »Hypothese«, indem er sagt:

Es besteht daher unter allen Substanzen eine vollkommene Übereinstimmung, da jede von ihnen das ganze Universum nach ihrer Art und aus einem bestimmten Gesichtspunkte exakt ausdrückt, [...]. Diese Hypothese bleibt durchaus in den Grenzen des Möglichen. [...] Hat man also einmal die Möglichkeit dieser *Hypothese der Übereinstimmung* eingesehen, so sieht man auch, daß sie der Vernunft am besten entspricht und daß sie eine wunderbare Vorstellung von der Harmonie des Universums und von der Vollkommenheit der Werke Gottes gibt. (Leibniz 1695, 267ff., Hervorhebung im Original)

Leibniz' Auffassung des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses ist offensichtlich den Auffassungen, wie sie zum Beispiel von Albert Einstein (1879-1955), Nils Bohr (1885-1962) oder Paul Feyerabend vertreten wurden, ähnlicher als die Fortschrittsgläubigkeit des 19. und frühen 20. Jahrhunderts.

Die Entwicklung der modernen Wissenschaften hat dazu geführt, daß deren Verfahren tatsächlich und gewollt auf Kontexte keine Rücksicht nehmen. Diese Verfahren basieren auf Vorstellungen wie Kalkül, Berechenbarkeit usw. Wenn wissenschaftliche Erkenntnis – wie oben gefordert

– Gewißheit und Sicherheit bringen soll, dann können nach dem eben erwähnten aber nur schwache Sicherheitserwartungen²³⁹ formuliert werden.

5.3.6 Leibniz' Kalkül und moderner Kalkül

Das besondere an Leibniz' Kalkülvorstellung ist, daß es ihm nicht um spezielle Kalküle, auch nicht um bestimmte Logikkalküle²⁴⁰, geht, sondern daß er eine ganz allgemeine Vorstellung von Kalkül als System von Elementen und Regeln, die auf die Elemente angewandt werden, hat. Insofern sind alle von ihm angeführten Kalküle Spezialfälle seines allgemeinen Kalküls.

Die von Leibniz an verschiedenen Stellen genannten Axiome, Regeln usw. finden wir heute systematisch zusammengefaßt in den axiomatischen Theorien der formalen Logik, das heißt der Aussagen- und Prädikatenlogik, wieder.²⁴¹ Die formale Logik gibt eine Theorie des Schließens von bestimmten Aussagen oder Urteilen auf andere an. Sie wird seit Aristoteles als Schule des korrekten, folgerichtigen und klaren Denkens angesehen und dient in der Wissenschaft der Argumentation für oder gegen eine Behauptung. Ein axiomatisches System besteht aus einer Liste von Axiomen, das heißt grundlegenden Sätzen oder Prinzipien dieser Theorie, und Regeln, die besagen, wie man aus diesen Axiomen die übrigen Sätze oder Theoreme der Theorie gewinnen kann. Die moderne Logik zeichnet sich dadurch aus, daß sie einen rein syntaktischen Folgerungsbegriff entwickelt hat: Es wird nicht aufgrund der Inhalte der Prämissen auf den Inhalt der Konklusion geschlossen, sondern es werden aufgrund der syntaktischen Struktur der Formeln andere Formeln abgeleitet. Auf die Bedeutung der Sätze kommt es nicht an. Die Sätze müssen in einer besonderen Sprache formuliert sein, wie es Leibniz forderte:

Die natürlichen Sprachen, obwohl sie dem Denken sehr viel nützen, sind doch unzähligen Zweideutigkeiten ausgesetzt und können daher

²³⁹ Zu den Unterschieden zwischen starken und schwachen Sicherheiten und Sicherheitserwartungen und den damit einhergehenden allgemeinen Risiken vgl. Bonß (1995).

²⁴⁰ Lenzen zeigt zum Beispiel, daß die »Boolesche Algebra« in Leibniz' Fragmenten enthalten ist. (Lenzen 1984; Lenzen 1990) Lenzen (1990) bezieht sich dabei vor allem auf die »Allgemeinen Untersuchungen über die Analyse der Begriffe und wahren Sätze« von 1686 (Leibniz 1686a).

²⁴¹ Rescher und Kauppi haben nachgewiesen, daß Leibniz' Kalkül aussagenlogisch gedeutet werden kann, bei dieser Deutung stehen die Charaktere nicht für Begriffe, sondern für Aussagen. (Vgl. Röd 1984, 102)

dem Kalkül nicht dienen, wie denn sogar Fehler des Denkens in der Bildung und Konstruktion der Wörter selbst aufgedeckt werden können [...] Einen wirklich bewundernswerten Dienst leisten allein die Zeichen der Arithmetiker und Algebraiker, bei denen alles Denken im Gebrauch von Charakteren besteht und ein Irrtum des Geistes dasselbe ist wie ein Rechenfehler. (Leibniz o.J., Charakteristik, 111f.)

Diese Forderung ist in der aussagenlogischen Sprache und Axiomatik erfüllt. Die Sprache der Aussagenlogik besteht aus der Syntax und der Semantik.²⁴²

Die *Syntax* umfaßt zum einen die Elemente, das Alphabet, das heißt eine Liste von Grundzeichen, aus denen Formeln gebildet werden.

- Aussagenvariablen A, B, C,...
- logische Zeichen $\neg$, $\wedge$, $\vee$, $\rightarrow$,...
- technische Zeichen (,)

Zum anderen umfaßt die Syntax die Regeln für die Erzeugung (syntaktisch) korrekter Formeln, das heißt endlicher Folgen von Grundzeichen:

- 1) Jede Aussagenvariable ist eine Formel.
 - 2) Sind A, B Formeln, so ist auch $\neg A$, $A \wedge B$, $A \vee B$, $\neg B$ eine Formel.
 - 3) Nur durch 1) und 2) als Formeln definierte Zeichenreihen sind Formeln.
- (Vgl. Glöckl 1978, 64f.)

Ähnlich formuliert es Leibniz: »Charakter« soll ein beliebiges A oder B oder ein anderes Zeichen sein. Eine Zusammensetzung aus mehreren Charakteren werde »Formel« genannt.« (Leibniz o.J., Charakteristik, 113) »Charaktere« werden von Leibniz nicht nur für Begriffe, sondern auch für Aussagen verwandt. »Jeder beliebige Buchstabe wie A, B, L usw. bedeutet bei mir entweder einen ganzen Ausdruck oder einen ganzen Satz.« (Leibniz 1686a, 251) »A und B aber können Ausdrücke oder auch Sätze bezeichnen.« (Leibniz 1686a, 254) »Wenn A B enthält und A wahr ist, so ist auch B wahr. Unter einem falschen Buchstaben verstehe ich entweder einen falschen Ausdruck (d.h. einen unmöglichen oder einen nicht-seienden) oder einen falschen Satz. Und unter einem wahren Buchstaben mag ebenso ein möglicher Ausdruck oder ein wahrer Satz verstanden werden. Und wie später erklärt wird, ist mir auch der ganze Syllogismus ein Satz.« (Leibniz 1686a, 262) Der Begriff »Charakter« kann also auch als »Aussagenvariable« verstanden werden.

²⁴² Zum dritten Aspekt jedes Zeichensystems, die Pragmatik, und zur Problematik, diesen Aspekt zu ignorieren, vgl. Abschnitt 2.2.16.

Für die Bildung von Formeln kennt Leibniz Verknüpfungen, die den heutigen logischen Operatoren $\neg$ und $\wedge$ entsprechen: »Das Privative: Nicht-A. Nicht-Nicht-A ist dasselbe wie A.« (Leibniz 1686a, 241) und »Ein allgemeiner Übergang ist es, daß, wenn A und B gesetzt sind, man sagen kann AB [...]« (Leibniz o.J., Zeichen, 95)

Zum Aspekt der *Semantik* schreibt Leibniz in den oben vorgestellten »Allgemeinen Untersuchungen über die Analyse der Begriffe und wahren Sätze« in seinem fünften Prinzip, wie den Sätzen Wahrheitswerte zuzuordnen sind, und daß damit etwas über den Inhalt des Satzes ausgesagt wird. Weiterhin unterscheidet Leibniz nicht zwischen der Aussage und der Aussage über diese Aussage, also zwischen objekt- und metasprachlicher Ebene. »Es fallen zusammen: die (direkte) Aussage L und die (reflexive) Aussage ›L ist wahr‹. Deshalb fallen zusammen: ›Daß L wahr ist, ist wahr (bzw. falsch)‹ und ›Also ist L wahr (bzw. falsch)‹.« (Leibniz 1686a, 252)

Um die Regeln für den allgemeinen Kalkül aufstellen zu können, benötigt Leibniz die Negation und formuliert in diesem Zusammenhang zwei wichtige Gesetze. Wenn A wahr ist, dann ist nicht-A falsch. »Es fallen zusammen: das Nicht-Wahre und das Falsche. Also fallen auch zusammen das Nicht-Falsche und das Wahre. Wenn $A = B$, auch $\text{Nicht-}A = \text{Nicht-}B$. Wenn $A =$ eine gewisse Wahrheit; also $\text{Nicht-}A = \text{Nicht-}$ (eine gewisse Wahrheit) oder keine Wahrheit oder eine Falschheit, denn Nicht-A enthält Nicht-AY.« (Leibniz 1686a, 253) »Allgemein: Wenn ein Satz wahr oder nicht-wahr, falsch oder nicht-falsch genannt wird, so gibt Wahr mal Wahr und Falsch mal Falsch Wahr. Nicht mal Nicht ist gleichwertig mit der Aufhebung beider.« (Leibniz 1686a, 253)

In den »Allgemeinen Untersuchungen über die Analyse der Begriffe und wahren Sätze« werden hinsichtlich der Negation drei Punkte genannt:

Erstens gibt Leibniz hier das Gesetz vom ausgeschlossenen Dritten an. Was nicht wahr ist, ist falsch. Etwas Drittes gibt es nicht. Dieses Gesetz ist auch im sechsten Prinzip der »Allgemeinen Untersuchungen« enthalten. Und in der »Einleitung in die geheime Enzyklopädie« wird ebenfalls darauf hingewiesen: »Nichts kann zugleich sein und nicht sein, sondern jedes Beliebige ist oder ist nicht.« (Leibniz vor 1686?a, 78)

Zweitens nennt Leibniz das Gesetz der doppelten Negation, und zwar im dritten Prinzip.

Drittens wird mit den Wahrheitswerten gerechnet wie in der Mathematik. Plus mal Plus und Minus mal Minus ergeben Plus, während Plus mal

Minus und Minus mal Plus Minus ergeben. Wie in so vielen Fällen bildet Leibniz hier die Analogie zum Rechnen.

Die moderne Aussagenlogik definiert die Negation wie folgt:

A	$\neg A$
W	F
F	W

Tabelle 23. Wahrheitstafel Negation

Das Gesetz der doppelten Verneinung wird daraus abgeleitet: Ist A wahr, so ist $\neg A$ falsch. Ist $\neg A$ falsch, so ist $\neg\neg A$ wahr. Also haben A und $\neg\neg A$ den gleichen Wahrheitswert. Die doppelte Verneinung ist demnach die Bejahung.

Das erste Prinzip in den »Allgemeinen Untersuchungen« entspricht dem Gesetz der Identität oder der Widerspruchsfreiheit. Wenn der mit a bezeichnete Gegenstand mit dem mit b bezeichneten Gegenstand identisch ist, dann gilt $a = b$. Ist dies der Fall, so kann man a und b in allen Formeln füreinander einsetzen, ohne daß sich der Wahrheitswert der Sätze ändert. Das Identitätsgesetz wird in der modernen Logik als Erweiterung der Prädikatenlogik verstanden. (Kutschera / Breitkopf 1971, 129ff.)

Leibniz hat das Prinzip der Identität an vielen Stellen hervorgehoben. Eine Formulierung aus dem Kontext der Logik und eine aus dem Kontext der Metaphysik seien hier angeführt.

Es ist wichtig, zu begreifen, daß die Anzahl der ersten Sätze unendlich ist, denn sie sind entweder Definitionen oder Axiome [...] Ich nenne Axiom einen notwendigen, unbeweisbaren Satz. »Notwendig« heißt das, dessen Gegenteil einen Widerspruch einschließt. Nun ist der einzige Satz, der einen Widerspruch einschließt, ohne daß man ihn beweisen kann, die formale Identität [...] Die Sinne zeigen, daß »A ist A« ein Satz ist, dessen Gegenteil »A ist nicht A« formal einen Widerspruch einschließt. Was also die Sinne zeigen, ist unbeweisbar. Folglich sind die wahrhaften und unbeweisbaren Axiome die identischen Sätze. (Leibniz o.J., Grundbegriffe, 124)

In der »Monadologie« Nummer 31 und 35 heißt es:

31. Unsere Vernunftkenntnis beruht auf zwei großen Prinzipien: erstens auf dem des Widerspruchs, kraft dessen wir alles als falsch beurteilen, was einen Widerspruch einschließt, und als wahr alles, was dem Falschen entgegengesetzt oder kontradiktorisch ist [...]

35. Man gelangt hierbei zuletzt auf einfache Ideen, von denen man keine Definition mehr geben kann; ebenso gelangt man zu Axiomen oder Postulaten oder, in einem Wort, zu ursprünglichen Prinzipien, die nicht bewiesen werden können und auch gar keines Beweises bedürfen. Das sind die identischen Sätze, deren Gegenteil einen ausdrücklichen Widerspruch enthält.

(Leibniz 1714b, 41ff.)

Das zweite Prinzip in den »Allgemeinen Untersuchungen« wird heute als Idempotenzgesetz bezeichnet. Es läßt sich folgendermaßen nachweisen:

$$\begin{aligned} A &= A \vee (A \wedge \neg A) \\ &= (A \vee A) \wedge (A \vee \neg A) \\ &= (A \vee A) \end{aligned}$$

- Erste Zeile: Die Disjunktion mit einer Formel, die eine Kontradiktion darstellt ($A \wedge \neg A$), ändert nichts am Wahrheitswert der ursprünglichen Formel A .
- Zweite Zeile: Die Anwendung des Distributivgesetzes führt zu einer Formel, die eine Tautologie ($A \vee \neg A$) enthält. Die Konjunktion mit einer Formel, die immer wahr ist, ändert nichts am Wahrheitswert der Formel ($A \vee A$).
- Dritte Zeile: Läßt man die Tautologie weg, ergibt sich: $A = A \vee A$.

Mit dem vierten Prinzip definiert Leibniz die Kontradiktion. Der Ausdruck A Nicht- A , also die Konjunktion von A und Nicht- A führt zu einem Widerspruch.

A	$\neg A$	$A \wedge \neg A$
W	F	F

Tabelle 24. Wahrheitstafel Kontradiktion

Um zu einem neuen Ausdruck zu gelangen, kann einem bestehenden Ausdruck ein Wahrheitswert (»wahr« oder »falsch«) zugeordnet werden. Das Gesamte, Ausdruck und Wahrheitswert, bildet einen neuen Ausdruck. Die-

se Regel zur Erzeugung neuer Ausdrücke enthält die Rekursion und ist im siebten Prinzip beschrieben.²⁴³

Das achte Prinzip der »Allgemeinen Untersuchungen« besagt, daß der Kalkül ein geschlossenes System ist, in dem aus Sätzen weitere Sätze gefolgt werden können. Diese Folgerungen sind im vorhergehenden Satz bereits enthalten. Es ist nichts abzuleiten, das nicht schon in den Prinzipien vorhanden wäre. Die Satzlogik kann nicht verlassen werden.

In Leibniz' »Allgemeinen Untersuchungen« wie in anderen Texten liegen die heute der Aussagenlogik zugeordneten Schlußregeln vor und auch die heute der Prädikatenlogik zugeordneten Quantoren. Leibniz spricht von »partikularen« und »universalen« Sätzen. Sie entsprechen den Existenzaussagen beziehungsweise den Allaussagen.

Weitere aussagenlogisch wahre Sätze sind in Leibniz' »Versuch eines allgemeinen Kalküls« formuliert:

Dort heißt es zum Beispiel, daß es bedeutungslos sei, ob man *ba* oder *ab* sagt. Diese Regel kennen wir heute als Kommutativgesetz. (Leibniz vor 1686?b, 133)

Und: Verschiedene Prädikate können zu einem zusammengefaßt werden. Wenn *a b* ist und *a c* ist, könnte man sagen, daß *a bc* ist. Wenn der Mensch ein Lebewesen ist und wenn der Mensch vernünftig ist, dann ist der Mensch ein vernünftiges Lebewesen. Umgekehrt können solche Prädikate wieder aufgeteilt werden: *a ist bc*, also: *a ist b* und *a ist c*. Diese Regel entspricht dem Distributivgesetz. (Leibniz vor 1686?b, 134)

Zusammenfassend läßt sich sagen: Die in Leibniz' Kalkülen enthaltenen Elemente, das heißt sowohl die Sätze als auch die Regeln, aus diesen Sätzen andere Sätze abzuleiten, finden sich in der modernen Kalkülvorstellung wieder. »Ein Kalkül ist nichts anderes als ein System von Regeln zur Erzeugung von endlichen Zeichenreihen; diese Regeln nehmen nur auf die graphische Gestalt (nicht aber auf eine Deutung) der Zeichenreihen Bezug.« (Berger 1978) Es gibt Regeln, die bestimmte Ausgangszeichenreihen angeben, und Regeln, die die Umformung von Zeichenreihen in andere Zeichenreihen angeben.

Um zu den Ausgangszeichenreihen zu gelangen, ist für Leibniz die Analyse der Begriffe, das heißt die Lösung der konstitutionstheoretischen Auf-

²⁴³ Thiel bezweifelt in einer Anmerkung zu Freges »Grundlagen der Arithmetik«, daß Leibniz an dieser Stelle eine rekursive Definition vorgeschwebt habe. (Frege 1884, hier die Anmerkung 14 zur Centenar Ausgabe, Hamburg 1986)

gabe, notwendig. Außerdem muß die Zuordnung von Zeichen zu Begriffen und Sätzen, das heißt die Lösung der symbolologischen Aufgabe, erfolgen.

Weiterhin müssen die Ausgangszeichenreihen aufgestellt werden, das heißt, es müssen die Axiome formuliert werden, wie zum Beispiel in den ersten Prinzipien der »Allgemeinen Untersuchungen« beschrieben. Diese Aktivität bedeutet die Lösung der axiomatischen Aufgabe.

Schließlich sind Rechenvorschriften zu entwickeln, die die Umformung der Zeichenreihen in andere Zeichenreihen ermöglichen. Das siebte Prinzip gibt ein Beispiel dafür an. Mit diesem Verfahren versucht Leibniz die kalkulatorische Aufgabe zu lösen.

Inwieweit Leibniz' Kalküle konsistent und vollständig in dem Sinn sind, daß sie alle Komponenten der modernen Logik enthalten, wird hier nicht weiter untersucht. Was gezeigt werden sollte, ist zweierlei: Erstens. Leibniz beschäftigte sich mit dem Thema ausführlich, das heißt in vielen Texten aus unterschiedlichen Jahren, und nahm viele Formalisierungen der Logik vor, die heute selbstverständlich sind. Zweitens. Sein Kalkülbegriff ist allgemeiner Art. Das wird besonders an den Logikkalkülen deutlich, weil diese Modelle darstellen, die es zu interpretieren gilt. Es müssen konkrete Sätze in die Formeln eingesetzt werden und aus der Verknüpfung der Aussagen mit Hilfe der logischen Regeln oder Gesetze die logischen Schlüsse gezogen werden.

Die folgenden Ausführungen interpretieren die Tätigkeit von Leibniz auf anderen Feldern unter dem Gesichtspunkt, daß Leibniz in ihnen Argumentationszusammenhänge entwickelte oder Problemlösungen anstrebte, die sich als Anwendungen kalkülmäßigen Denkens verstehen lassen. Dabei wird die Gültigkeit der Kalkülvorstellung zum einen für die Theorie (Metaphysik), und zum anderen für die Praxis (Dualzahlenrechenmaschine, Pumpmaschine, statistische Untersuchungen) erläutert. Die Kalküle, die für die verschiedenen Anwendungen zu entwickeln sind, können durchaus unterschiedliche Elemente und Regeln enthalten. In einem Brief an Gabriel Wagner²⁴⁴ schreibt Leibniz:

Zwar ist diese Arbeit des Aristoteles nur ein Anfang und gleichsam das ABC, wie es denn andere mehr zusammengesetzte und schwerere Formen gibt, die man alsdann erst brauchen kann, wenn man mit Hilf dieser ersten und leichten Formen festgestellt, als zum Exempel

²⁴⁴ Gabriel Wagner (1660-1717) gab 1696 in Hamburg die popularphilosophisch-kritische Wochenschrift »Vernunftübungen« heraus. (Schmidt 1960, 542)

die euklidischen Schlußformen, da die Verhaltungen (proportiones) versetzt werden, invertendo, componendo, dividendo rationes usw.; ja selbst Additionen, Multiplikationen oder Divisionen der Zahlen, wie man sie in den Rechenschulen lehret, sind Beweisformen (argumenta in forma), und man kann sich darauf verlassen, weil sie kraft ihrer Form beweisen. Und auf solche Weise kann man sagen, daß eine ganze Buchhalterrechnung förmlich schließe und aus argumentis in forma bestehe. So ist es auch mit der Algebra und vielen anderen förmlichen Beweisen bewandt, so nämlich nackend und doch vollkommen. Es ist nicht eben nötig, daß alle Schlußformen heißen: »Omnis, atqui, ergo«. In allen unfehlbaren Wissenschaften, wenn sie genau bewiesen werden, sind gleichsam höhere logische Formen einverleibt, so teils aus den aristotelischen fließen, teils noch etwas anders zu Hülff nehmen. (Leibniz 1697a, 8)

Hier beschreibt Leibniz die Buchhalterrechnung als Kalkül und stellt fest, daß in den verschiedenen möglichen Kalkülen logische, aber auch andere (Rechen-) Regeln enthalten sein können. Allerdings ist für ihn die Logik sogar »vor« der Mathematik. »Ich habe auch befunden, daß die Algebra selbst ihre Vorteil von einer viel höhern Kunst, nämlich der wahren Logik entlehne.« (Leibniz 1697a, 14) Dies ist eine Position, der diejenige der Vertreter des Logizismus in der Debatte um die Grundlegung der Mathematik grundsätzlich entspricht.

Wenn jeder beliebige Gegenstand (wie die Buchhaltung oder die im späteren Abschnitt angeführte Pumpmaschine) als Kalkül aufgefaßt werden kann, dann kann die ganze Welt als Kalkül begriffen werden, indem der Umfang des Kalküls je nach Bedarf unterschiedlich gewählt wird. So läßt sich jedenfalls Leibniz' Vorstellung von Welt im Begriff der »Monade« interpretieren.

5.3.7 Kalkül und Monade

Wie bereits beschrieben, wollte Leibniz mit der Aufstellung und Anwendung eines allgemeinen Kalküls zu neuen Erkenntnissen über die Welt gelangen. Zur Prüfung der These, Leibniz interpretiere die Welt als Kalkül, werden nun die »Monadologie«, die als eine der prägnantesten Formulierung

gen seines philosophischen Systems gilt, sowie die »Vernunftprinzipien der Natur und der Gnade«, beide aus dem Jahr 1714, herangezogen.

Die »Monadologie« beginnt mit einer Definition des Begriffs »Monade«. »Die Monade, von der wir hier sprechen wollen, ist nichts anderes als eine einfache Substanz, die in dem Zusammengesetzten enthalten ist; einfach sein heißt soviel wie: ohne Teile sein.« (Leibniz 1714b, 27) In Nummer 3 der »Monadologie« sagt Leibniz weiter, daß »die Monaden die wahren Atome der Natur und – mit einem Wort – die Elemente der Dinge« seien. (Leibniz 1714b, 27) Und in den »Vernunftprinzipien« heißt es: »Monas ist ein griechisches Wort, das Einheit heißt oder das, was eines ist.« (Leibniz 1714a, 3) Monaden sind also Einheiten, die nicht teilbar sind. Sie können weder durch Zusammensetzung von Teilen entstehen, noch durch Zerfall in Teile vergehen. In der »Monadologie« Nummer 6 schreibt Leibniz: »Man kann demnach sagen, daß die Monaden nur mit einem Schlage entstehen oder vergehen können, d.h. sie können nur durch Schöpfung entstehen und nur durch Vernichtung vergehen; das Zusammengesetzte hingegen entsteht aus Teilen und vergeht in Teile.« (Leibniz 1714b, 27) Kurz gesagt: Eine Monade existiert entweder oder sie existiert nicht; etwas Drittes gibt es nicht. Damit wäre das Gesetz vom ausgeschlossenen Dritten in Leibniz' Welt gewährleistet. Die Monaden sind die – unteilbaren – Elemente der Welt.

Nun sind aber die Monaden nicht alle gleich, sondern jede einzelne ist von jeder anderen verschieden. (Leibniz 1714b, 29) »Denn wenn sich die einfachen Substanzen nicht durch ihre eigentümlichen Beschaffenheiten unterscheiden, so gäbe es überhaupt kein Mittel, irgendeine Veränderung in den Dingen festzustellen.« (Leibniz 1714b, 29) Monaden können insofern als Individuen interpretiert werden. Während die Veränderungen bei den zusammengesetzten Substanzen sich auf die Verhältnisse der Teile zueinander beziehen (Leibniz 1714b, 29), erfolgen die Veränderungen in einer Monade aufgrund eines »inneren Prinzips« (Leibniz 1714b, 31). Denn die Monaden sind Einheiten, in die nichts hineinübertragen werden kann. »Die Monaden haben keine Fenster, durch die etwas in sie hinein- oder aus ihnen heraustreten kann.« (Leibniz 1714b, 29) Sie sind demnach in sich geschlossen.

Das innere Prinzip der Veränderung bewirkt – so heißt es in der »Monadologie« Nummer 15 – ein »Streben« der Monade, von einem Zustand in den anderen überzugehen. Einen Zustand der Monade nennt Leibniz auch »Perzeption«. (Leibniz 1714b, 31) Es handelt sich dabei immer nur um ei-

nen vorübergehenden Zustand, da die Veränderungen in der Monade kontinuierlich ablaufen.²⁴⁵

Die Zustandsübergänge geschehen nach bestimmten Gesetzen. »Die Perzeptionen in der Monade entstehen auseinander und nach den Gesetzen des Strebens oder den Zweckursachen des Guten und des Bösen, die in geordneten oder ungeordneten bemerkbaren Perzeptionen bestehen – wie die Veränderungen der Körper und die äußeren Erscheinungen nach den Gesetzen der Wirkursachen, d.h. der Bewegungen, auseinander hervorgehen.« (Leibniz 1714a, 6f.) Mit »Körper« bezeichnet Leibniz die zusammengesetzte Substanz, also die Ansammlung einfacher Substanzen oder Monaden. (Leibniz 1714a, 3)

Es scheint zwei Arten von Übergängen zwischen den Perzeptionen zu geben:

Es gibt unter den Perzeptionen der Tiere eine Verbindung, die eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Vernunftschluß hat, aber diese ist auf nichts anderes als die Erinnerung an Tatsachen und Wirkungen gegründet, keineswegs aber auf die Erkenntnis der Ursachen [...] Und insofern die Menschen empirisch verfahren, d.h. zu drei Vierteln ihrer Handlungsweisen, handeln sie nicht anders als die Tiere. So erwartet man z.B., daß es morgen Tag sein wird, weil man es stets so erfahren hat: der Astronom sieht das aus Vernunftgründen voraus [...] Das wahrhaft vernünftige Schlußfolgern aber hängt ab von den notwendigen oder ewigen Wahrheiten, wie es die der Logik, der Arithmetik, der Geometrie sind, die eine unzweifelhafte Verknüpfung der Ideen und unfehlbare Folgerungen herstellen. (Leibniz 1714a, 9f.)

In der »Monadologie« formuliert Leibniz das so:

Die Menschen handeln insofern wie die Tiere, als die Schlußfolgerungen aus ihren Perzeptionen allein durch das Prinzip des Gedächtnisses geschehen; darin gleichen sie den empirischen Ärzten, die bloße Praxis, aber keine Theorie besitzen. Auch wir sind bei drei Vierteln unserer Handlungen reine Empiriker. Erwartet man z.B., daß es morgen wieder Tag sein wird, so verfährt man empirisch, da dies eben bisher immer so gewesen ist. Nur der Astronom urteilt darüber nach Vernunftgründen [...] Die Erkenntnis der notwendigen

²⁴⁵ Ähnlich wie Leibniz legt auch Wiener den Schwerpunkt auf »Prozesse« anstatt auf »Statik«. Vgl. Kapitel 2.

und ewigen Wahrheiten jedoch unterscheidet uns von den bloßen Tieren und setzt uns in den Besitz der Vernunft und der Wissenschaften, indem sie uns zur Selbst- und Gotteserkenntnis erheben. (Leibniz 1714b, 39)

Leibniz gelangt dann mit seiner Argumentation zum »Ich« und zur Reflexion über das Sein, die Substanz, Einfaches und Zusammengesetztes:

Durch die Erkenntnis der notwendigen Wahrheiten und durch ihre Abstraktionen erheben wir uns auch zu den reflexiven Akten, die uns den Gedanken unseres Ich fassen lassen und zu der Erwägung führen, daß dieses oder jenes in uns sei. Indem wir in dieser Weise an uns selbst denken, richten wir unsere Gedanken zugleich auf das Sein, die Substanz, auf Einfaches und Zusammengesetztes, auf Immaterielles und selbst auf Gott, indem wir begreifen, daß dasjenige, was in uns beschränkt ist, in ihm ohne Schranken ist. Diese reflexiven Akte liefern demnach die Hauptgegenstände unserer Vernunftkenntnisse. (Leibniz 1714b, 39f.)

Bisher wurde nur von einer Monade als einer in sich geschlossenen Einheit mit gewissen Regeln für Zustandsübergänge gesprochen. Nun kann man aber – nach Leibniz – auf verschiedenen Ebenen von Einheiten reden. Es ist demnach möglich, auch »Teile« von Monaden als Monade anzusehen. Leibniz beschreibt dies sehr anschaulich in der »Monadologie« Nummer 67:

Jedes Stück Materie kann wie ein Garten voller Pflanzen und wie ein Teich voller Fische aufgefaßt werden. Aber jeder Zweig der Pflanze, jedes Glied des Tieres, jeder Tropfen seiner Säfte ist wiederum ein solcher Garten oder ein solcher Teich. (Leibniz 1714b, 59)

Und umgekehrt kann auch die Zusammenfassung von einfachen Substanzen als Einheit, als Monade, angesehen werden:

Das Zusammengesetzte stellt hierin das Einfache symbolisch dar. Da nämlich alles erfüllt ist – wodurch die ganze Materie in Verknüpfung steht –, und da im erfüllten Raume jede Bewegung auf die entlegenen Körper ihrer Entfernung entsprechend einwirkt, da mithin jeder Körper nicht nur von den ihn unmittelbar berührenden betroffen wird und so in gewisser Weise alles, was ihnen geschieht, verspürt, sondern mittels dieser auch die Einwirkung derjenigen, die die ersten, ihn unmittelbar berührenden, berühren – so ergibt sich, daß dieser

Zusammenhang sich auf jede beliebige Entfernung erstreckt. (Leibniz 1714b, 55)

Das Zusammengesetzte ist also wieder Einfaches, wenn es unter einem entsprechenden Blickwinkel betrachtet wird.

Leibniz' Welt bildet ein System, ein in sich geschlossenes, geordnetes Ganzes, das er als Monade bezeichnet. Jedes Element dieses Systems kann wiederum als System, also als Monade aufgefaßt werden, und zwar vom gesamten Universum bis zum kleinsten Teil der Materie. Jede Monade repräsentiert die Welt, wobei diese Repräsentationen der Welt durch die Monaden nicht grundsätzlich verschieden sind, sondern sich nur in der Perspektive unterscheiden, unter der sie die Welt darstellen.²⁴⁶ Leibniz beschreibt auch dies sehr anschaulich:

Und wie ein und dieselbe Stadt, von verschiedenen Seiten betrachtet, ganz anders und gleichsam in perspektivischer Vielfalt erscheint, so gibt es auch – zufolge der unendlichen Menge der einfachen Substanzen – gleichsam ebenso viele verschiedene Welten, die jedoch nur die Perspektiven einer einzigen unter den verschiedenen Gesichtspunkten jeder Monade sind. (Leibniz 1714b, 53)

In dem Bild der Stadt, die aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet wird, wird die Perspektivität der Erkenntnis vermittelt.

Unter diesem allgemeinen Aspekt ist Leibniz' Konzept sehr modern. So schreibt zum Beispiel Vadim Sadovsky: »The monad develops from itself,

²⁴⁶ Zwar sind nach Leibniz verschiedene Welten denkbar, es besteht aber nur eine, nämlich die »beste aller Welten«. In der *Monadologie* Nummer 53 heißt es: »Da nun die Ideen Gottes eine unendliche Anzahl von möglichen Welten enthalten und doch nur eine einzige davon existieren kann, so muß es wohl einen zureichenden Grund für die Wahl Gottes geben, der ihn zu der einen Welt mehr als zu einer anderen bestimmt.« (Leibniz 1714b, 51) Vgl. auch Röd (1984, 93). Vgl. Platon: »Geben wir denn an, welcher Grund den Ordner alles Entstehens und dieses Weltganzen, es zu ordnen, bestimmte. Er war gut; im Guten aber erwächst niemals und in keiner Beziehung Mißgunst. Dieser fern wollte er, daß alles ihm selbst möglichst ähnlich werde. [...] Indem nämlich Gott wollte, daß alles gut und, soviel wie möglich, nichts schlecht sei, brachte er, da er alles Sichtbare nicht in Ruhe, sondern in ungehöriger und ordnungsloser Bewegung vorfand, dasselbe aus der Unordnung zur Ordnung, da ihm diese durchaus besser schien als jene. Aber dem Besten war es weder, noch ist es ihm gestattet, etwas anderes als das Schönste zu tun; indem er also von dem seiner Natur nach Sichtbaren den Schluß machte, fand er, daß nichts des Denkvermögens Entbehrendes als Ganzes je schöner sein werde als das mit Vernunft Begabte als Ganzes, daß aber unmöglich ohne Seele etwas der Vernunft teilhaftig werden könne. Von diesem Schlusse bewogen, verlieh er der Seele Vernunft und dem Körper die Seele und gestaltete daraus das Weltall, um so das seiner Natur nach schönste und beste Werk zu vollenden.« (Platon, *Timaios* 29d8-30b8)

spontaneously. In these assertions Leibniz anticipates also the idea concerning the isolated, closed systems and the concept of the self-organising system which occupies such an important place in the theoretical knowledge of the second half of the 20th century.« (Sadovsky 1974, 110)

Eine Interpretation im Sinne der »Informatik« bietet Alex Sutter, indem er die Leibnizsche Monade als »individuell programmierten Vorstellungsautomaten [...] oder eben als einen komplexen Algorithmus zur geregelten Erzeugung von repräsentierenden Zuständen« (Sutter 1988, 96f.) versteht, mit der Begründung, daß die Handlungen einer Monade darin bestehen, eine geregelte Abfolge von inneren Zuständen zu erzeugen, wobei diese Zustände mit den Zuständen aller anderen Monaden miteinander harmonieren. Ein wichtiges Moment in diesem Zusammenhang ist Hervorhebung der Prozessualität, die für Leibniz im Vordergrund steht, während für das informatische Handeln heute eine überwiegend statische Auffassung von Welt vorherrscht.²⁴⁷

Für Leibniz' Metaphysik ist der Kalkülbegriff nicht nur nachgewiesen, sondern er erweist sich als zentral. Leibniz' Vorstellung von Welt ist die der Welt als Kalkül, in welcher der Grundsatz gilt, daß alles mit allem zusammenhängt, daß jedes vom anderen mitbedingt ist und daß nichts in der Welt isoliert betrachtet werden kann.²⁴⁸ Alles befindet sich im Zustand der prästabilisierten Harmonie.

²⁴⁷ Vgl. Kapitel 2, insbesondere die Abschnitte zur Modellbildung.

²⁴⁸ Vgl. Wieners »kybernetischen Ansatz« sowie den »Kontextualismus«.

5.4 »Theoria cum praxi«

In diesem Abschnitt wird die Anwendung der von Leibniz formulierten Kalkülvorstellung anhand dreier Beispiele erläutert. Erstens wird auf die von Leibniz konstruierte, jedoch nie gebaute Dualzahlenrechenmaschine und das Dualzahlensystem eingegangen. Hier handelt es sich um einen von mehreren speziellen Kalkülen, die Leibniz entwarf. Zweitens wird die von Leibniz geplante, aber nicht in Betrieb genommene Pumpanlage für Harzer Bergwerke vorgestellt. Dies ist kein mathematischer, sondern ein allgemeiner Kalkül. Drittens wird ein weiteres Beispiel für einen mathematischen Kalkül geliefert, nämlich die Anwendung des Kalkülbegriffs bei einer statistischen Untersuchung, in dem es um die Berechnung der Sterblichkeitsrate der Bevölkerung geht. Die Beispiele werden nicht formalisiert ausgeführt, da es mir primär um die Darstellung der Zusammenhänge zwischen dem neuen Verfahren und dem Gestaltungsprozeß von »Welten« im Rahmen praktischer Aufgaben geht.

Die Beispiele zeigen, wie Leibniz seine theoretischen Überlegungen von der Welt als Kalkül mit den praktischen Problemen, die er im Rahmen seiner Tätigkeiten für die Fürsten in Mainz und Hannover lösen sollte, verband. In seinen Briefen und Schriften gibt er immer wieder Anwendungsmöglichkeiten für seine Erfindungen an und weist gleichermaßen auf ihren zu erwartenden materiellen Nutzen (vgl. Leibniz 1671; Leibniz 1686b, 138f.) wie auch auf das metaphysische Motiv hin.

5.4.1 Rechenmaschine und Dualzahlensystem

Um immer größer werdende Zahlenmengen, die mit der Ausbreitung des Handels und des Geldverkehrs entstanden, bearbeiten und auswerten zu können, bemühte man sich um die Erfindung von Rechenmaschinen.²⁴⁹ So hatte Blaise Pascal Anfang der vierziger Jahre des 17. Jahrhunderts eine Rechenmaschine für seinen Vater, einen französischen Gouverneur und Vorsteher von Steuereinnehmern, konstruiert und gebaut. 1671 entwickelte Leibniz ebenfalls eine Rechenmaschine, und zwar eine Dezimalrechenma-

²⁴⁹ Die technische Ausführung früher Rechenmaschinen wie der von Pascal und Wilhelm Schickard (1592-1635) oder von Leibniz' dezimaler Rechenmaschine ist zum Beispiel in Karl Ganzhorn und Wolfgang Walter (1975) oder in Rolf Oberliesen (1982) beschrieben.

schine, die er 1672 in Paris vorstellte. In dem bereits zitierten Brief an Herzog Johann Friedrich schreibt er dazu:

In Mathematicis und Mechanicis habe ich vermittelst artis combinatoriae einige dinge gefunden die in praxi vitae von nicht geringer importanz zu achten, und erstlich in Arithmetice eine Maschine, so ich eine Lebendige Rechenbanck nenne, dieweil dadurch zu wege gebracht wird, daß alle zahlen sich selbst rechnen, addiren subtrahiren multipliciren dividiren, ja gar radicem Quadrata und Cubica extrahiren ohne einige Mühe des Gemüths, wenn man nur die numeros datos in machina zeichnet, welches so geschwind gethan als sonst geschrieben, so komt die summa motu machinae selbst heraus. Und ist der nuzen noch dazu dabey, daß solange die machina nicht bricht, kein fehler in rechnen begangen werden kan; welches was für einen Nuzen in Cammern, Contorn, re militari, Feldmeßen, Tabula sinuum und Astronomi habe, und wie größer mühe es die Menschen überheben könne, leicht zu erachten. (Leibniz 1671, 160)

Einige Jahre später, ab 1676, vermutlich 1680²⁵⁰, schrieb Leibniz einen Entwurf für den Bau einer Dualzahlenrechenmaschine. Ihre Funktionsweise sei hier zunächst zitiert:

Dyadische Zahlen mit Hilfe einer Maschine zu addieren, zu subtrahieren, zu multiplizieren und zu dividieren ist sehr leicht. Denn bei jeder Zweizahl ist es leicht, eine Einheit auf die folgende Stelle zu übertragen.

Und ich möchte glauben, daß man bequem Räder mit 4 Zähnen herstellen und einem Zylinder 0, 1, 0, 1 aufschreiben kann; so wird eine Umdrehung jeweils zwei Übertragungen verursachen.

Auch die Veränderung sowohl nach 0 als auch 1 ist leicht zu bewerkstelligen, selbst im Multiplikanden oder Dividenten, und das ohne Räder.

Was in meiner üblichen Maschine nicht geht, könnte (hier) bewirkt werden, daß (nämlich) der Multiplikand als auch der Multiplikator von Anfang an in der Maschine eingestellt werden und sodann nur noch die »regula« vorwärts getrieben wird; folglich wird der Multipli-

²⁵⁰ Vgl. Ludolf von Mackensen (1974, 256), der diese Datierung damit begründet, daß Leibniz' früheste Arbeiten zum Dualzahlensystem, das eine inhaltliche Voraussetzung für dieses Papier darstellt, aus den Jahren 1676 bis 1679 stammen. Ein Fragment mit dem Titel »De progressionem dyadica« entstand 1679. (Leibniz 1679d, 574)

kator, während er sich einem durch 0 bezeichneten Ort des Multiplikanden nähert, ganz herabgedrückt oder vielmehr zur Seite hin bewegt werden, so daß er nichts bewirkt, (doch) nähert er sich einer anderen Stelle, wo 1 ist, wird er wieder auftauchen und sein Werk verrichten, und während des Intervalls werden die Übertragungen geschehen.

Was die Division oder Subtraktion betrifft, muß man aber, außer daß die Sache nicht von Anfang an bezeichnet werden kann, während des Antreibens Obacht geben: aber die größte Schwierigkeit ist, eine dyadische Zahl in eine gewöhnliche zu verwandeln oder umgekehrt.

Von der gewöhnlichen Zahl sollen die Zahlen der Zweierfolge der Reihe nach abgezogen werden, indem man mit der größten anfängt.

Diese seien auf Zylindern oder Rädern durch die Zahl der Zähne bezeichnet; so wird es für 12 Ziffern der Zweierfolge 12 subtrahierende Zylinder geben.

Ganz unten stehen vorn an den Rädern »regulae« (Einzähne) hervor, dort wo Zähne in der selben Ebene wie Rechen sind.

Aber der Einzahn derjenigen Zahl, die nicht subtrahiert werden kann, schreibt durch seine Verschiebung nach rechts vor, wo er im Vorübergehen wieder in seine Stellung gebracht wird.

Die »regulae« scheinen ein wenig mehr Raum einzunehmen als die Zylinder, aber sonst ist die Handhabung einfach, weil keine Umdrehung nötig ist.

An der Seite wird die Zahl erscheinen, sobald die Subtraktion gemacht ist oder nicht; d.h. man wird die Zahl dyadisch ausgedrückt in 0 und 1 erhalten.

(Leibniz ab 1676, vermutlich 1680, 259f.)

Betrachtet man den Text im Zusammenhang mit den philosophischen Schriften, zum Beispiel dem bereits zitierten Teil aus »Über das Organon oder die große Kunst des Denkens« (Leibniz zwischen 1679 und 1686, 25f.), dann wird deutlich, daß es Leibniz nicht nur um die theoretische Bearbeitung von Problemen ging, sondern daß er die Probleme ganz praktisch lösen wollte.

Auf diese enge Verbindung von Mathematik (Dualzahlensystem) und Philosophie (Grundbegriffe »Gott« und »Nichts«) wurde schon hingewiesen.²⁵¹ Hier sei noch ein Zitat mit der Analogie zwischen 1 und Gott sowie

²⁵¹ Vgl. Abschnitt 5.3.4.

0 und dem Nichts angeführt, das aus einem Brief an Herzog Rudolf August (1627-1704) im Jahr 1697 stammt:

Denn einer der Haupt-Punkten des christlichen Glaubens, und zwar unter denjenigen, die den Weltweisen am wenigsten ein(ge)gangen, und noch den Heiden nicht wohl beizubringen, ist die Erschaffung aller Dinge aus nichts durch die Allmacht Gottes. Nun kann man wohl sagen, daß nichts in der Welt sie besser vorstelle, je gleichsam demonstriere, als der Ursprung der Zahlen, wie er allhier vorgestellt, durch deren Ausdrückung bloß und allein mit Eins und Null oder Nichts, und wird wohl schwerlich in der Natur und Philosophie ein bessers Vorbild dieses Geheimnisses zu finden sein. (Leibniz 1697b, 19)

Wenn man durch die Kombination von zwei Zahlen (Eins und Null) unendlich viele Zahlen darstellen kann, dann müßte es doch möglich sein, aus zwei Grundbegriffen (Gott und Nichts) sämtliche Begriffe abzuleiten. Diese Analogie scheint Leibniz im Sinn gehabt zu haben, als er die Medaille entwarf: »Omnibus. Ex. Nihilo. Ducendis. Sufficit. Unum.« Die Welt ist einfach, indem sie auf nur zwei Grundbegriffen basiert, und doch vielfältig, weil mit diesen Grundbegriffen unendlich viele abgeleitete Begriffe erzeugt werden können. Und diese Erzeugung geschieht auch noch nach Regeln, analog zu den Rechenregeln des Dualzahlensystems.

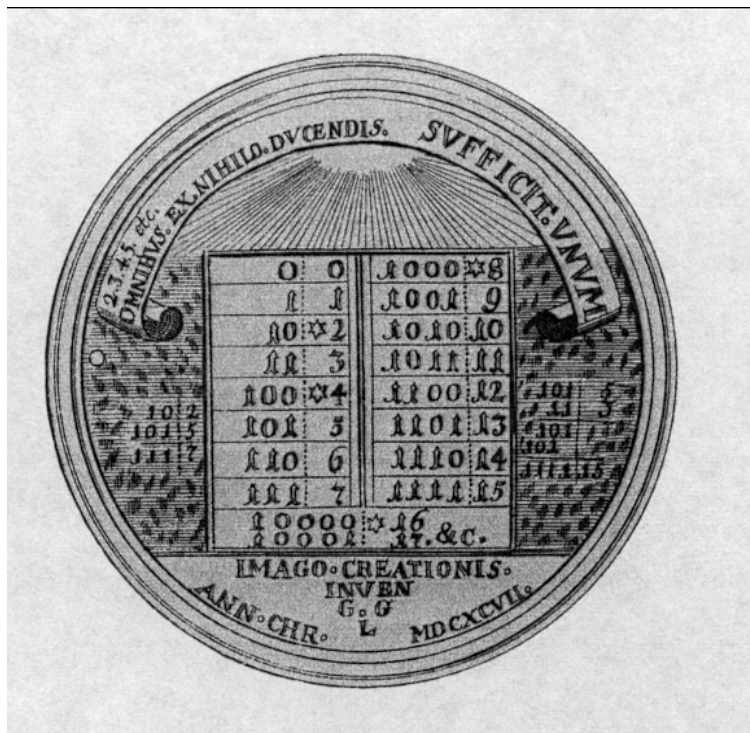


Abbildung 17. Die im Neujahrsbrief vorgeschlagene Gedenkmünze mit Darstellung der dyadischen Zahlenfolge. Nach Carl Günther Ludovici (1707-1778) Entwurf von 1737. (aus Leibniz 1697b, 23)

5.4.2 Pumpmaschine

Als zweites Beispiel für den wechselseitigen Einfluß von praktischen Problemstellungen und theoretischen Überlegungen sei Leibniz' Konstruktion einer Pumpanlage für die Harzer Bergwerke genannt. Es handelt sich hierbei um ein maschinelles System von Elementen, die von Windkraft geordnet in Gang gesetzt werden. Die Zusammenstellung und Ordnung der Elemente kann als Kalkül aufgefaßt werden, das Besondere daran ist die Gestaltung des Systems zumindest theoretisch als »geschlossener Kreislauf«.

Um den kontinuierlichen Betrieb der Gruben zu gewährleisten, versuchte Herzog Johann Friedrich, technische Neuerungen im Bergbau einzuführen. Holz als Bau- und Brennstoff für den Hüttenbetrieb sowie Wasserkraft für die im wesentlichen aus Holz errichteten Maschinen waren die wichtigsten »Energieförderer« für den Bergbau. Obwohl im Harz oft genügend Wasser vorhanden war, gab es auch sehr trockene Jahre, in denen das Wasser nicht ausreichte, um die Entwässerungspumpen der Gruben zu betreiben, so daß einige Gruben geschlossen werden mußten, weil sie unter Wasser standen. 1678 hatte der Hof- und Bergrat Peter Harzingk (oder Hartzing) (1637-1680) den Vorschlag gemacht, das Wasser mit Hilfe von Windmühlen aus den Gruben zu entfernen. Mit der Entwicklung einer Windmühle für diesen Zweck wurde Leibniz 1679 beauftragt. (Gerland 1898, 225)

Leibniz plante, die Windkraft nicht nur zum Antrieb der Entwässerungspumpen, sondern auch zur Hebung des Wassers von einem niedriger zu einem höher gelegenen Teich zu nutzen. Es sollte ein ständiger Wasserkreislauf entstehen. Zunächst sollte Wasser aus einem höher gelegenen Teich die Entwässerungspumpen der Gruben antreiben. Dieses Aufschlagwasser sollte dann mit Hilfe einer von der Windmühle angetriebenen Schnecke in einen Graben gehoben werden und anschließend mittels einer von derselben Windmühle angetriebenen Pumpe wieder in den oberen Teich gepumpt werden.²⁵²

²⁵² Eine genaue Ortsangabe und eine Rekonstruktion der Horizontalwindmühle finden sich in Ulrich Horst und Jürgen Gottschalk (1973). Die Rekonstruktion der beiden Autoren unterscheidet sich von einer Rekonstruktion, die Leonhard Stiegler (1968) unternahm. Unterschiede bestehen insbesondere in der Berechnung der Dicke der benötigten Dielen und in der Größe der Windkunst. (Vgl. Horst / Gottschalk 1973, 50, 56)

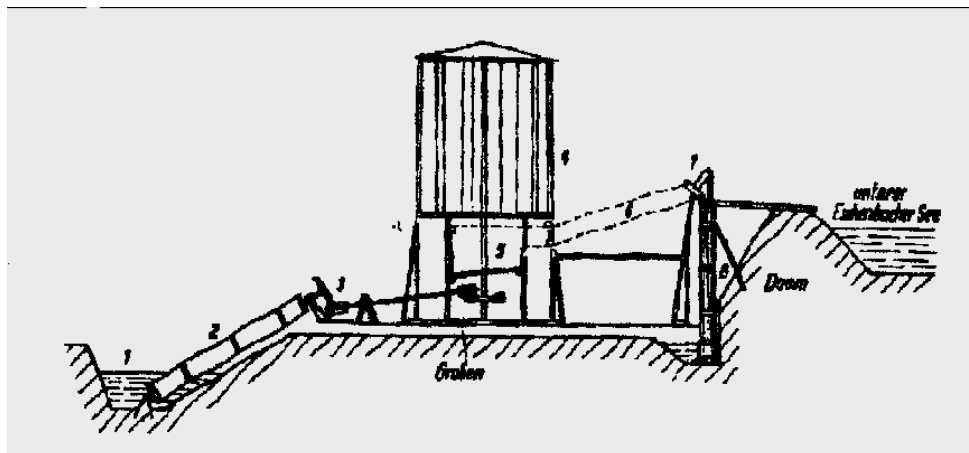


Abbildung 18. Skizze der Horizontalwindkunst mit angeschlossenen Pumpen (aus Stiegler 1968, 285)

Leibniz beabsichtigte, »daß durch den windt daß bereits von dem Kunst-
rade herab gefallene waßer wieder darauff geschüttet undt also durch con-
junction beyder Kräfte ein fast steter undt starcker umblauß der Kunsträ-
der so wohl in waßernötigen alß andern zeiten unterhalten werde.« (Leibniz
1680a, 69) Wegen der Unbeständigkeit des Windes konnte das Wasser nicht
direkt auf die »Kunsträder« zurückgepumpt werden. »Derowegen sind nun
oben und unten eigne behalter und Receptacula vonnöthen, damit der wind
auff einmahl viel schöpfen und laßen; das geschöpfte und wieder hinauff-
gebrachte waßer auch in wehrender windstille dennoch lauffen könne, Wel-
che receptacula aber wenn man die Windmühlen an vortheilhaffte orthe
legt, meistentheils sich selbst finden.« (Leibniz 1680a, 69) Am nächsten
Tag schrieb Leibniz: »Das obere receptaculum soll waßer aufs rad geben, so
lange es kan; das abfallende Waßer soll sich im untern Receptaculo samlen,
der wind wenn er komt, soll oft in einer stunde wieder hinauff schaffen,
was in etlichen herab gelauffen. Der Spahrteich soll nicht ehe gezogen wer-
den, bis man siehet, daß etwa nach vielen circulationen und ermangelnden
Wind-succurs das obere receptaculum abzulauffen beginne.« (Leibniz
1680b, 77)

Dieses Konzept der Verbindung von wind- und wasserbetriebenen
Pumpen macht deutlich, daß Leibniz sich die Zu- und Abführung des Spei-
sewassers als einen geschlossenen Kreislauf dachte, in dem zumindest der

Rückfluß ohne menschlichen Eingriff vonstatten gehen sollte und auch der Zufluß nur gelegentliche Eingriffe verlangte. Eine echte Rückkopplung oder vollständige Selbstregulierung war zufolge des Konzepts jedoch nicht beabsichtigt oder möglich. Die Rückflußmenge war intern durch das zur Verfügung stehende Wasser begrenzt und extern durch die jeweilige Windstärke gesteuert, ohne daß es eine informative oder instrumentelle Rückkopplung gegeben hätte.²⁵³

Aus einem im Jahr 1680 zu Beginn seiner Arbeit im Harz verfaßten Brief wird klar, daß Leibniz' Interesse über die technische Seite dieses Projekts hinausging:

Gestern begab ich mich auf Befehl meines Fürsten nach den Gruben im Harze. Sie wundern sich vielleicht, was ich, als Mann vom Staatsfache, mit den Gruben gemein habe? Aber ich bin lange schon der Ansicht, daß die Staatswirtschaft der bei weitem wichtigste Teil der Staatswissenschaft sei, und daß Deutschland aus Unkenntnis oder Gleichgültigkeit darüber zu Grunde gehen muß. Die Gruben aber machen einen großen Theil unserer Einkünfte aus; [...]. (zitiert nach Guhrauer 1846, 203)

Die von Leibniz konzipierte Pumpanlage umfaßte unter anderem eine Horizontalwindmühle, die im Gegensatz zu den bis dahin üblicheren Vertikalwindmühlen keine senkrecht stehenden Flügel, sondern ein liegendes Schaufelrad, das durch den Wind angetrieben wird, hat. Um den Wind geschickt auszunutzen, werden Leitschirme um das Rad aufgestellt. Ein Vorteil der Mühle ist, daß sie nicht in den Wind gedreht werden muß, ein Nachteil dagegen, daß nur etwa ein siebtel der Windenergie in mechanische Arbeit umgesetzt wird, da die Schaufeln vor dem Wind zurückweichen. Leibniz war von seiner »Horizontalkunst« überzeugt: Er schreibt, sie koste nicht mehr als 200 Taler, brauche nicht mehr Wartung als ein Wasserrad und sei Tag und Nacht bereit, mit allen Winden und ohne in Richtung und Stellung gebracht zu werden. Außerdem sei sie sehr sicher gegen Sturm. Als weiterer Bestandteil seiner Pumpanlage sollte eine »Schneckenkunst« verwendet werden, die das Wasser vom unteren Teich zur Mühle pumpen sollte. Sie besteht aus einem offenen Zylinder, in dem sich eine Transportschnecke befindet. Dieser Zylinder ragt mit einem Ende ins Wasser, so daß das Was-

²⁵³ Anders Hans Heinz Holz: »so operiert er [Leibniz, B.C.] beispielsweise schon mit dem Prinzip der Rückkopplung, derart daß die Maschinerie sich selbst in gleichmäßiger Funktion erhält.« (Holz 1958, 105)

ser nach oben befördert wird, wenn die Schnecke gedreht wird. Auch diese Schneckenkunst war im Harzbergbau kaum bekannt. Die dritte Komponente war eine von Leibniz verbesserte Form einer Kolbenpumpe, die das Wasser von der Mühle in den oberen Teich pumpen sollte und die so konstruiert war, daß der Kolben nie trocken lag und somit ein manuelles »Anfrischen« nicht nötig wurde. (Vgl. Stiegler 1968, 273ff., 282ff.)

Der Bau dieser Anlage wurde immer wieder verzögert. Mehrfach fehlte Material, einmal wurde eine Leiter mutwillig zerstört. Als die Windkunst im November 1684 endlich aufgebaut und Probeläufe – sogar bei wenig Wind – erfolgreich verlaufen waren, fehlte nur noch der Anschluß der Pumpen. Aber auch zu diesem Zeitpunkt zeigte das Bergamt kein Interesse an der Fertigstellung der Leibnizschen Maschine, denn es verzögerte auch den Anschluß der Pumpen, so daß schließlich im April 1685 die Versuche mit der Horizontalkunst eingestellt wurden.

Während Stiegler (1968) vor allem den Widerstand des Bergamts gegen die Leibnizsche Horizontalwindkunst als Ursache für den Abbruch der Versuche sieht, geben Horst und Gottschalk (1973) mehrere Gründe an: Leibniz habe die unregelmäßigen Windverhältnisse im Harz nicht ausreichend berücksichtigt. Die Qualität der Baumaterialien sei sehr unterschiedlich gewesen. Die besondere Art der Windmühle, die Horizontalwindmühle, sei im Vergleich zur Windmühle mit senkrecht stehendem Flügelkreuz weniger leistungsfähig. Die geplante Verwendung einer 13 Meter langen Schnecke hätte die Anlage deshalb überfordert. Die Erfahrung mit einer solchen Anlage habe gefehlt. Schließlich hätten auch die Unstimmigkeiten zwischen dem Bergamt und Leibniz zum Mißlingen beigetragen.

Man kann begründet mutmaßen, daß diese Unstimmigkeiten ein wesentlicher Grund für das Scheitern des Projekts waren, denn in den folgenden Jahrzehnten wurden im Harz umfangreiche Wasserführungs- und –bevorratungssysteme errichtet, deren technische Schwierigkeiten keineswegs kleiner waren als die des Leibnizschen Projekts. (Vgl. Bartels 1988) Die Rekonstruktion von Horst und Gottschalk belegt die technischen Einwände gegen das Funktionieren des Leibnizschen Systems nicht durch quantitative technische Argumente; es ist indessen aus Äußerungen der Baumeister späterer Wasserführungsanlagen und von Zeitgenossen Leibniz' bekannt, daß diese am Funktionieren der Anlage nicht zweifelten.

Sucht man nach einem Grund für das Verhalten des Bergamts, so liegt dieser möglicherweise außerhalb aller technischen Erwägungen. An der Wende vom 16. zum 17. Jahrhundert hatte sich das Kaufmannskapital weit-

gehend aus dem Bergbau zurückgezogen. Im Harz förderten die Landesherren das Fortbestehen und die Weiterentwicklung des Bergbaus, indem sie das Eigeninteresse ihrer Bergbeamten dadurch stärkten, daß sie ihnen Anteile an den Gruben zubilligten. Dies hatte einerseits zur Folge, daß im Harzbergbau die Effizienz der angewandten technischen Mittel hoch war und damit die Ausbeutung der Gruben gut; es hatte andererseits zur Folge, daß die Durchsetzung der Eigeninteressen der Bergbeamten gegenüber den Bergleuten heftige soziale Konflikte hervorrief. Diese Konflikte hatten sich ab 1660 so zugespitzt, daß es im Jahr 1674 zu großen Protestaktionen und Streiks von Grubenarbeitern gekommen war. Da die Konflikte mit der Einführung neuer Techniken Hand in Hand gegangen waren und deren soziale Auswirkungen auf die Bergleute noch keineswegs ausgestanden waren, ist es durchaus möglich, daß das Bergamt einen weiteren Innovationsschub vermeiden wollte, um keine neuen Unruhen entstehen zu lassen und seine eigenen Interessen zu schützen. Das Eigeninteresse der Bergherren wird noch in einer anderen Hinsicht im Vordergrund gestanden haben, denn Leibniz war im Harz ein unmittelbarer Repräsentant des Hofes, der als solcher die Autonomie der Bergherren gegenüber dem Landesherren beeinträchtigte. Es gehörte nämlich zu den Besonderheiten der Verwaltung des Harzes, daß das Bergamt nicht nur für den Betrieb der Gruben zuständig war, sondern auch nahezu selbständig die politische Herrschaft ausübte. (Vgl. Bartels 1994; Bartels 1996)²⁵⁴

²⁵⁴ Hidé Ishiguro hat darauf hingewiesen, daß Jonathan Swift das Leibnizsche Windmühlenprojekt literarisch verarbeitet hat. (Ishiguro 1972, 7) Swift läßt seine Hauptfigur in »Gullivers Reisen« von einem Land berichten, das durch Projekte von Akademikern zerstört wurde. So wird von einem »vornehmen Herrn« erzählt, der »eine sehr gute Mühle (hatte), die, eine halbe Stunde vom Hause entfernt, durch einen Wasserlauf getrieben wurde. Die Mühle genügte ihm, seiner Familie und einem großen Teile seiner Pächter. Vor sieben Jahren aber kam ein Klub von Projektmachern mit dem Vorschlage, er solle die Mühle niederreißen und eine andere an dem Abhange jenes Berges erbauen, an dessen Abhang ein Kanal eingehauen werden müsse nebst einem Behälter für das Wasser, das durch Röhren und Maschinen der Mühle zugeführt werden solle. Wind und Luft wirkten nämlich in der Höhe auf das Wasser aufregend und machten es somit geeigneter zur Bewegung; wenn nun das Wasser einen Abhang hinabfließe, würde es die Mühle mit halb soviel Strommenge treiben können wie ein Fluß, dessen Lauf flacher ist. Seine Exzellenz sagte: Damals sei er bei Hofe nicht gut angeschrieben gewesen; seine Freunde hätten ihn gedrängt, und somit sei er auf den Vorschlag eingegangen. Er habe hundert Menschen zwei Jahre lang arbeiten lassen, das Werk sei mißlungen, die Projektmacher seien davongegangen und hätten ihm allein die Schuld zugeschoben, seitdem fortwährend über ihn gespottet und andere zu demselben Experiment mit derselben Versicherung des glücklichen Erfolgs bewogen, aber auch mit derselben Vereitelung aller Hoffnungen sitzengelassen.« (Swift 1726, 189)

5.4.3 Eine statistische Untersuchung zur Sterblichkeitsrate

Als drittes Beispiel zur Verbindung von Theorie und Praxis in Leibniz' Arbeiten sei eine Untersuchung zur Sterblichkeitsrate der Bevölkerung genannt, die Leibniz 1675/76 durchführte. Dieses Beispiel ist ein versicherungsmathematisches Modell, für das Leibniz einen speziellen Kalkül aufstellte.

Zu diesem Thema hatte 1662 der Engländer John Graunt (1620-1674) eine Studie mit dem Titel »Natural and political observations mentioned in a following index, and made upon the bills of mortality« veröffentlicht, die 1666 in der Nummer 31 des »Journal des Scavans« vom 2. August besprochen wurde. In dieser Zeitschrift finden sich Angaben darüber, wieviele Menschen aus welchen Gründen (Krankheiten, Krieg, Hunger usw.) starben, sowie Angaben aus Geburtenstatistiken.

Leibniz' Fragestellung gründete sich auf folgende Bemerkung im Artikel des »Journal des Scavans«:

Von 100 Kindern, die zu derselben Zeit geboren werden, sind sechs Jahre später nicht mehr als 64 übrig, nach 16 Jahren nur noch 40, nach 26 Jahren noch 25, nach 36 Jahren noch 16, nach 46 Jahren noch 10, nach 56 Jahren noch 6, nach 66 Jahren noch 3 und nach 67 Jahren von diesen Dreien nur noch 1. Nach 80 Jahren schließlich bleibt keine Person mehr übrig. (zitiert nach Biermann 1955, 205)

Daraus entwickelte Leibniz die Aufgabe, die Anzahl der in jedem Jahr Gestorbenen zu ermitteln, wenn von 64 Menschen 36 im Verlauf von 10 Jahren verstorben sind. Leibniz geht davon aus, daß alle 64 Menschen gleich kräftig und gesund sind und sie wegen beliebiger Ereignisse und aus immer gleicher Ursache sterben.

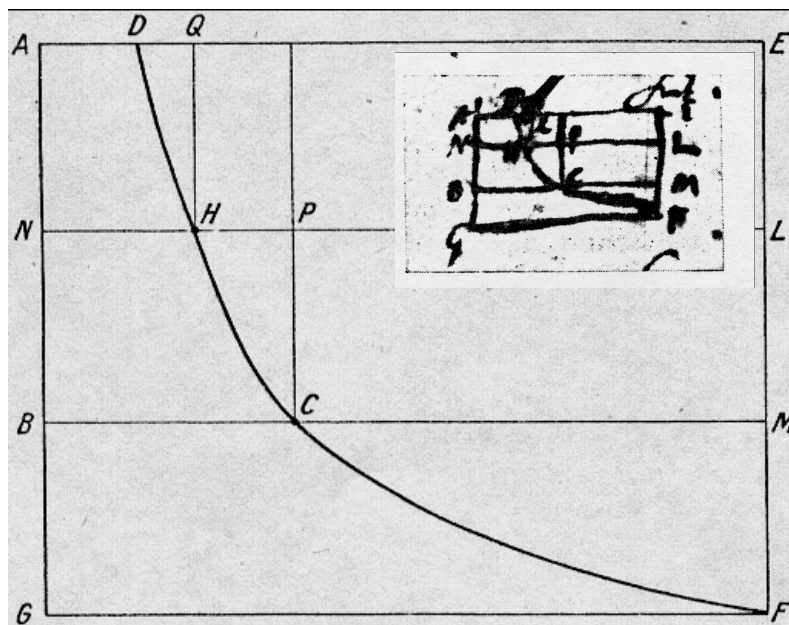
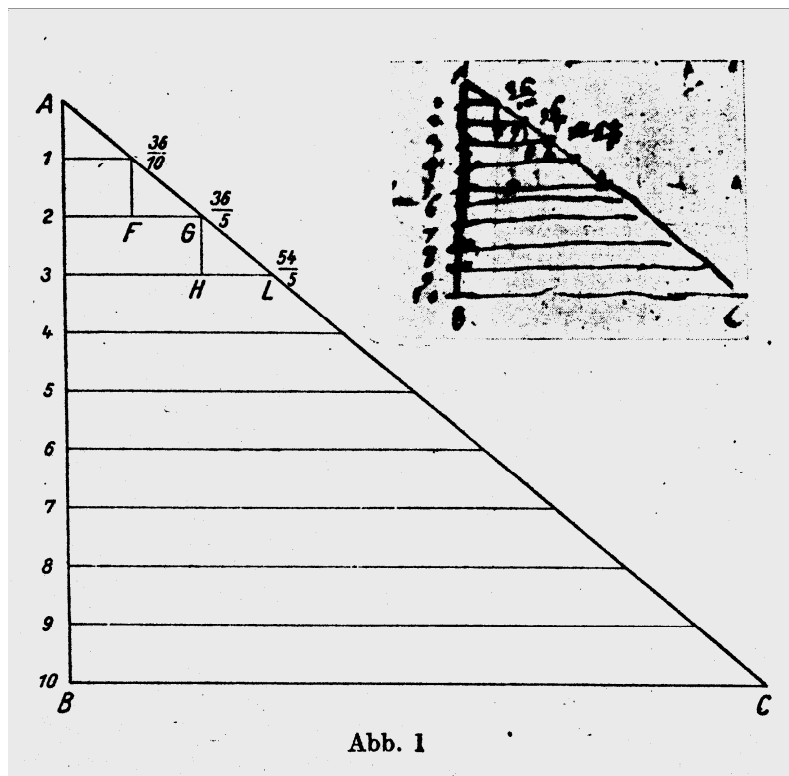


Abbildung 19. Leibniz' Skizzen zur Sterbestatistik mit Umzeichnung. (verändert aus Biermann 1955)

Zunächst wird die Strecke AB in zehn gleiche Abschnitte (= zehn Jahre) geteilt. Die Strecke BC entspricht den in zehn Jahren Sterbenden. Die Anzahl der in jedem Jahr Sterbenden ($=36 \cdot n/10$, $n=\text{Jahr}$) wird als Strecke jeweils parallel zu BC eingetragen. Leibniz kommt zu der Feststellung:

Es sind deshalb die Differenzen dieser Linien unter sich gleich. Denn wie stark die Zahl derjenigen, die im ersten Jahr sterben, sich von der der in den ersten 2 Jahren Sterbenden unterscheidet, so unterscheidet sich die Zahl derer, die in den beiden ersten Jahren sterben, von der Zahl der in den 3 ersten Jahren Sterbenden. Es kommt also in jedem Jahr eine neue Zahl Toter hinzu, und so wird in jedem Jahr dieselbe Anzahl sterben, d.h. in jedem Jahr werden $36/10$ ableben. Es ist daher offensichtlich, daß die Zahl 64 nichts zur Sache tut. (zitiert nach Biermann 1955, 206)

In einem zweiten Schritt überlegt Leibniz sich, daß im ersten Jahr $36/10$ sterben und somit für das zweite Jahr nur $64 - 36/10$ bleiben. Das Verhältnis der in einem Jahr Sterbenden beträgt also nicht 1:10, sofern das Verhältnis der in einem Jahr Sterbenden zu der Anzahl der Überlebenden gleich bleiben soll. »Da die 64 nicht konstant bleibt oder wieder aufgefüllt wird, muß die Aufgabe in Minima oder »Momenten« aufgelöst werden, und eine Kurve ist erforderlich.« (zitiert nach Biermann 1955, 206)

y sei die Zahl der im ersten Jahr Sterbenden, übrig bleiben $64 - y$; z sei die Zahl der im zweiten Jahr Sterbenden, übrig bleiben $64 - y - z$. Dann ergibt sich folgendes Verhältnis:

$$y : 64 = z : (64 - y); z : y = (64 - y) : 64.$$

$$\text{Im dritten Jahr sterben } (z): (z) : y = (64 - y - z) : 64$$

$$w \text{ sei } z + y. \text{ Dann ist: } (z) = (64 - w) y / 64$$

$$(w) \text{ sei } w + (z). \text{ Dann ist: } ((z)) = (64 - (w)) y / 64$$

usw.

Bezeichnet man (z) mit z_1 , $((z))$ mit z_2 , (w) mit w_1 usw., so gilt allgemein:

$$z_n = (C - w_{n-1}) y / C \text{ und } z_n : z_{n+1} = (C - w_{n-1}) : (C - w_n)$$

Man muß also eine Figur suchen, in der sich die Ordinaten wie Strecken verhalten, die von einer gegebenen Größe subtrahiert sind. Oder es ist eine andere Figur zu suchen, in der sich die Differenzen der Ordinaten wie der Rest der Ordinaten von gegebener Größe verhalten. (zitiert nach Biermann 1955, 207)

Die Strecken AE, GF,... entsprechen 64. Es müssen sich verhalten:

$$BC : NH = NH : AD = HP : DQ.$$

Folglich sind AD, NH, BC und DE, HL, CM ihren Differenzen proportional. Das Verhältnis zwischen der Anzahl der Sterbenden zu der Anzahl der Überlebenden bleibt in jedem Jahr gleich. Es handelt sich um eine geometrische Zahlenfolge. Leibniz nennt als Quotienten der Folge:

$$y / z = 64 / (64 - y) \quad (\text{steigende Folge mit } z_8 \text{ als erstem Glied})$$

$$z / y = (64 - y) / 64 \quad (\text{fallende Folge mit } y \text{ als erstem Glied}).$$

Die weiteren Rechnungen wurden von Leibniz nicht mehr vorgenommen. Mit Hilfe dieses Quotienten läßt sich leicht die Anzahl der in jedem Jahr Sterbenden bestimmen.

Gefunden wurde als Quotient der fallenden Folge

$$q = (64 - a) / 64$$

(wobei $a = \text{Leibniz' } y$).

Gegeben ist die Summe der Folge $s_n = 36$ und die Zahl der Glieder mit $n = 10$.

Da

$$s_n = a (1 - q^n) / (1 - q),$$

folgt [...]

$$36 = 64 - 64 (1 - a/64)^{10}$$

[...]

$$a = 5,079 \text{ und damit } q = 0,92064. \text{ [...]}$$

Wir erhalten daraus für die einzelnen Jahre:

Jahr	Es sterben	seit Beginn gestorben	es bleiben am Leben
		(w)	(64-w)
1.	$y = 5,079$	5,079	58,921
2.	$z = 4,676$	9,755	54,245
3.	$(z) = 4,305$	14,060	49,940
4.	$((z)) = 3,963$	18,023	45,977
5.	$((z)) = 3,649$	21,672	42,328
6.	$z_4 = 3,359$	25,031	38,969
7.	$z_5 = 3,093$	28,124	35,876
8.	$z_6 = 2,847$	30,971	33,029
9.	$z_7 = 2,621$	33,592	30,408
10.	$z_8 = 2,413$	36,005	27,995

Von den noch folgenden Gedanken Leibniz' [...] sei hier nur erwähnt, daß sich y , z usw. bzw. die Zahlen der Überlebenden stets auf das Jahresende beziehen. (Biermann 1955, 207f.)

Das Beispiel zeigt dreierlei: Erstens, welche mathematischen Hilfsmittel Leibniz zur Verfügung standen, ein statistisches Problem zu lösen.

Zweitens wird aus ihm deutlich, wie nach Maßgabe der anfangs des Kapitels dargestellten Entwicklungen in Richtung auf die Kameralistik diejenigen, die den Reichtum erarbeiteten, allmählich als ein Bestandteil der Wirtschaft auftauchten. Die Bevölkerung sollte als Objekt in die staatliche Planung eingehen. Das Interesse an der Bevölkerungspolitik entstand nicht nur in den weit entwickelten Ländern wie England, wo die genannte Studie verfaßt wurde, sondern auch in den deutschen Staaten, die sich an diesen Ländern orientierten, wie Mainz, für das Leibniz von 1672 bis 1676 mit diplomatischen Aufgaben nach Paris gegangen war.

Drittens steht die Erstellung von Sterbetafeln in direktem Zusammenhang mit dem Aufkommen von personenbezogenen Versicherungen, wie Lebens-, Vorsorge- oder Aussteuerversicherungen. Solche Personenversicherungen konnten nur in einer gesellschaftlichen Situation entstehen, in der bei den sozialen Sicherungen der Vormoderne, wie Hausgemeinschaft, Nachbarschaft oder Zunft, erste Funktionsverluste einsetzten, in der das Leben einer Person unter zeitlichen und sozialen Gesichtspunkten berechenbar wurde und in der die unsichere Zukunft auch nicht mehr von Gott bestimmt wurde. Das menschliche Leben wurde zwar als unsicher, aber dennoch als planbar und verantwortbar angesehen. Dazu gehörte, daß der Mensch, zumindest der Bürger, sein eigenes Schicksal selbst in die Hand nahm und nicht nur Risiken einging, sondern sich ebenso gegen Unsicherheiten versicherte. (Bonß 1995, 182f.) Die ersten Lebensversicherungen waren als Wettversicherungen organisiert und basierten nicht auf Erfahrungswerten aus damals bereits vorliegenden Sterbetafeln oder Leibrentenberechnungen. Erst nach dem Zusammenbruch vieler Versicherungsgesellschaften in der Krise von 1721 und einem neuen Aufschwung ab 1762, als in England die Old Equitable Society gegründet wurde, entstanden Lebensversicherungen auf mathematischer Basis. (Vgl. Bonß 1995, 185f.) Leibniz kann also auch in diesem Bereich als modern denkender Wissenschaftler angesehen werden, der die Bedeutung der Wahrscheinlichkeitsrechnung in Theorie und Praxis frühzeitig erkannte. Zur gesellschaftstheoretischen Bedeutung der Versicherung sei hier auf die Arbeit von Bonß (1995) verwiesen.

5.5 Zusammenfassung

Leibniz' Kalkülvorstellung läßt sich – wie gezeigt – rekonstruieren als eine »Mischung« aus Formalismus und Konstruktivismus. Wichtige Aspekte sind dabei die Sprache und das Rechnen. Der semantische Aspekt findet sich in der universalen wissenschaftlichen Sprache, der »characteristica universalis« wieder, der syntaktische Aspekt im Rechnen, dem »calculus ratiocinator«. Beides zusammen bildet die »scientia generalis«. Diese Punkte werden im 20. Jahrhundert rekapituliert. Selbst ohne eine umfassende systematisch-technische Rezeption war das Leibnizsche Programm um die Wende zum 20. Jahrhundert modernen Logikern präsent, und es bildete darüber hinaus für einen weiteren Kreis ein Ideal der Naturerklärung im Sinne Toulmins. Die Vielzahl der Verweise auf Leibniz als »Vorläufer« im Zusammenhang der Ausarbeitung der modernen Logik und der Kybernetik sind ernstzunehmende Hinweise darauf, wenngleich unter dem Vorbehalt der oben erwähnten Problematik des Vorläuferbegriffs. Leibniz formulierte als erster den Kalkülbegriff; die moderne Logik und die Informatik sind unter dem »Kalkülparadigma« ausgearbeitet worden; Wissenschaftsentwicklung, von metaphysischen Paradigmen geleitet, führt so auch zu familienähnlichen Lösungen im sachlichen Bereich.

Während Leibniz den Kalkül als umfassend und welterklärend verstand, herrscht in der Informatik heute nur eine mathematisch-reduktionistische Vorstellung des Kalküls vor, gleichwohl wird diese Kalkülvorstellung für allumfassend erachtet, weil der präzisierte Algorithmenbegriff (Turingmaschine) bis heute mathematisch nicht hintergebar ist. Für Leibniz bedeutete der Versuch, die Welt zu kalkülisieren, nicht, sie endlich zu machen, sondern sie in ihrer Vielfalt und mit ihren unterschiedlichen Perspektiven zu erkennen. In der Informatik heute wird die Welt dagegen auf »Ausschnitte« reduziert, die kontextfrei und begrenzt auf eine Perspektive in Computern »abgebildet« werden. Die Informatik heute versteht unter Kalkül explizit weniger, als Leibniz implizit damit gemeint hat. Die Ansprüche an einen Kalkül, die in Leibniz' Konzeption vorkommen, wie Widerspruchsfreiheit, Einheitlichkeit, Kausalität, Geschlossenheit des Systems, Ökonomieprinzip, Gewißheit und Welterklärung, werden heute kaum in Frage gestellt, obwohl erstens schon Leibniz erkannte, daß der Versuch, die Welt zu kalkülisieren, nicht bedeutet, sie endlich machen zu können, zweitens die Uneinlösbarkeit der Ansprüche nachgewiesen wurde und drittens – aufgrund dieses Erkenntnis – ihre Einlösung in den meisten Wissenschaften auch nicht mehr an-

gestrebt wird. Es wird ignoriert, daß »Antworten« eines Informationssystems nur vorläufige, auf der Basis von Elementen und Regeln des jeweiligen Kontextes erstellte Antworten sind. Diese Erkenntnis ist aber wichtig für die »Gewißheits- und Sicherheitserwartungen«, die an solche Systeme gestellt werden. Nimmt man Leibniz' Kalkülbegriff als Grundlage, dann können nur schwache Sicherheitserwartungen formuliert werden. Dieses wird im Rahmen informatischen Handelns nicht reflektiert und dementsprechend auch nicht in die Entwicklung und Wartung von komplexen Informationssystemen einbezogen. Dabei ist es gerade bei zunehmender Integration und damit verbundener erhöhter Komplexität solcher Systeme wichtig, diese Erkenntnis zu berücksichtigen und die Risiken immer mit zu analysieren und zu behandeln. Vorschläge für verschiedene Handlungsmöglichkeiten, die sich aufgrund der genannten Überlegungen ergeben und die einen bewußten Umgang mit Risiken fördern, werden in Kapitel 7 vorgestellt.

6 Zusammenfassung der Paradigmen

In den vorangegangenen Kapiteln dieser Arbeit wurden kognitive, soziale und historische Aspekte des informatischen Handelns teils einzeln, teils miteinander verbunden vorgestellt und diskutiert.

So wurden im zweiten Kapitel theoretische und praktische Aspekte der Modellbildung (zum Beispiel Softwaretechnik sowie Daten- und Funktionenmodellierung) untersucht, wie sie in vielen Gebieten der heutigen Informatik auftreten. Die Bezugnahmen auf kommerzielle Verwendungszusammenhänge einerseits und militärische andererseits machten ersichtlich, daß hiermit Fragestellungen untersucht werden, die sehr weit verbreitet auftreten, und daß hier tatsächlich ein zentrales Problemfeld der Informatik vorliegt.

Im dritten Kapitel wurden historische Aspekte (Hollerithmaschine, Analogrechner, frühe Computer,...) abgehandelt, die über den technisch-apparativen Bereich formierend wirkten. Die Ausführungen zur Geschichte lieferten dabei keine technikgeschichtliche Darstellung mit dem Ziel, die Abfolge der technischen Artefakte oder von Entwicklungsreihen im Sinne einer Konstruktionsgeschichte darzustellen. Sie hatten stattdessen das Ziel, auf Herstellungs- und Verwendungszusammenhänge hinzuweisen und damit Zuordnungen von technischen Entwicklungen zu Anforderungen und Zwecken anzusprechen sowie die Koentwicklung von technischen Systemen (zum Beispiel schnelles Kampfflugzeug – Flugabwehr – Rechner) anzudeuten.

Im vierten Kapitel wurde auf kognitive Aspekte eingegangen, indem Theoriebildungsprozesse in Mathematik und Philosophie (Carnaps Konstitutionssystem, Grundlagendebatte der Mathematik,...) vorgestellt wurden, die einen Hintergrund für die Paradigmenbildung der Informatik abgeben. Dabei wurden Anknüpfungen und Übernahmen klar, aber bei aller Ähnlichkeit auch Vereinfachungen, Reduktionen und eine eigene metaphysische Maschinentheorie.

Im fünften Kapitel wurde schließlich Leibniz' Kalkülvorstellung rekonstruiert, und es wurden Beispiele für deren praktische Kontexte vorgeführt. Damit wurde zugleich die zeitliche Grenze für das Programm ausgeleuchtet, das unter dem Namen »Leibnizprogramm« bis heute – in den in Kapitel 4 dargestellten mathematischen und philosophischen Varianten – wirksam ist. Somit klärt dieses Kapitel die Bedeutung von Leibniz für die Informatik derart, daß Leibniz nicht als »Vorläufer« erscheint, sondern indem deutlich wird, daß die Informatik von einem Denkstil geprägt ist, der theoretisch und praktisch seit dem Beginn der Moderne entfaltet wurde.

Die in den vorhergehenden Kapiteln angesprochenen Paradigmen werden nun in den folgenden Abschnitten den Kategorien »semantisch-kognitiv«, »situativ-praktisch« und »sozial-interaktiv« zugeordnet. Mit diesem Kapitel werden mehrere Zwecke erfüllt:

- Es findet eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Kapiteln 2 bis 5 statt.
- Es wird ein Überblick über Zusammenhänge zwischen den Kapiteln 2 bis 5 hergestellt.
- Die Paradigmen werden in allgemeine Kontexte eingeordnet und somit systematisiert.
- Es werden Hinweise auf Gefahren und Chancen der Paradigmen gegeben.
- Es werden Hinweise auf Handlungsvorschläge gegeben, wie Informatiker anders als bisher in und mit der Informatik umgehen könnten. Auf einige dieser Handlungsvorschläge wird in Kapitel 7 dann ausführlicher eingegangen.

6.1 Semantisch-kognitive Paradigmen

Zu den semantisch-kognitiven Paradigmen zählen diejenigen Denkmuster, die der Informatik vorgeordnet und zugleich Teil der Informatik sind. Sie gelten als selbstverständlich und werden selten oder nie hinterfragt.

Zu diesen Denkmustern gehört die Vorstellung, die Welt sei ein *Kalkül*. Diese Vorstellung wurde durch Leibniz geprägt, wurde von Carnap in seiner Arbeit über Konstitutionssysteme aufgegriffen und ist bis heute ein wichtiges Paradigma. Festzuhalten ist aber ein entscheidender Unterschied: Während Carnap bei der Konstruktion seines Konstitutionssystems beim Eigenpsychischen ansetzt, befaßt sich Leibniz mit einer gegebenen Welt, die dem Prinzip der prästabilierten Harmonie folgt. Die Welt als Kalkül im engeren Sinn zu verstehen, das heißt im Sinn eines mathematischen Algorithmus, bedeutet eine Reduktion im Sinne der Einschränkung von Modellierungs- und Erkenntnismöglichkeiten. Nimmt man den Kalkülbegriff im weiteren Sinn, sei es wie von Leibniz oder von Carnap vorgeschlagen, dann ergeben sich andere Möglichkeiten. Sie bestehen in der Chance, eine Kalkülvorstellung mit einem flexiblen Verständnis von Welt zu verbinden. Erforderlich ist, deutlich zu machen, was mit welchen Voraussetzungen und Grenzen jeweils angesprochen ist. Zur Vermeidung von Risiken sind erstens die Voraussetzungen (Hypothesen, Paradigmen) explizit zu machen (vgl. Popper) und zweitens die Wahlfreiheit für den Aufbau von Theorien sowie drittens die Gesichtspunkte, nach denen entschieden wird, zum Beispiel für ein System nach ökonomischen Aspekten (vgl. Carnap, vgl. Popper) oder nach Konventionen (vgl. Neurath), herauszustellen.

Wenn man von Kalkülen im engeren Sinn spricht, ist zu bedenken, daß diese sich nicht auf ein vollformalisiertes System der Mathematik zurückführen lassen, und generell ist im Hinblick auf Kalküle zu berücksichtigen, daß mit diesem Paradigma stets einige andere mit angesprochen sind. Eines dieser Paradigmen ist ein *Realismus* im Sinne einer *Referenzsemantik*. Inhaltlich läßt sich dieser Realismus auch als Substanzannahme oder Stabilitätshypothese kennzeichnen. Die Annahme bezieht sich auf die Elemente des Kalküls. Sie ist unmittelbar in der Sprache verankert, und es ist schwierig oder sogar unmöglich (für uns), wie die Untersuchungen von Whorf zeigen, sich eine Welt ohne diese Annahme vorzustellen. Die Annahme, die Welt bestehe aus »festen Dingen«, führt zur Annahme der Stabilität der Dinge, was auch *Zeitunabhängigkeit*, wie im zweiten Kapitel ausgeführt, einschließen kann. Dieses Paradigma birgt die Gefahr, daß die Möglichkeit anderer Wel-

ten ausgeschlossen wird und daß die Welt, in der wir leben, verabsolutiert wird. Nimmt man den Handlungsvorschlag an, die Existenz anderer Positionen nicht zu ignorieren – andere Menschen haben andere Fähigkeiten (vgl. Feyerabend) oder andere Beschreibungen (vgl. Whorf) –, sondern die Grenzen der eigenen Sicht zu formulieren, dann ergibt sich die Chance, zu erkennen, daß jede Erklärung der Welt unvollständig und begrenzt ist.

Der *Einheitsgedanke* gehört zu den Denkvoraussetzungen, die es als sinnvoll erscheinen lassen, die Welt mit einer einheitlichen Methode in Modelle zu fassen. Solche Modellbildungen entsprechen dem Leibnizschen Vorhaben der »characteristica universalis«, die ein allgemeines Alphabet zur Beschreibung der Welt zur Verfügung stellt. Die Denkvoraussetzung der Einheit kann jedoch unterschiedlich begründet werden. Der Einheitsgedanke kann ontologisch gefaßt sein, dann wird angenommen, daß die gegenständliche Mannigfaltigkeit der Welt einer einheitlichen Ordnung unterliege. Die Gesetzmäßigkeiten, seien sie nun kausal oder stochastisch, können von den Wissenschaften entdeckt werden und sind vorgegeben. Einheit ist demnach als Voraussetzung gedacht und das Weltbild letztlich deterministisch. Die Frage nach Einheit ist hier zugleich die Frage nach Wahrheit. Der Einheitsgedanke kann aber auch methodisch verstanden werden. In diesem Fall ist es nicht erforderlich, Einheit vorauszusetzen, sondern es ist ebenso denkbar, Einheit als Ziel für den wissenschaftlichen Erkenntnis- und Erklärungsprozeß zu postulieren. Angestrebt werden homogene Erklärungsweisen, wie zum Beispiel in Carnaps Konzept der physikalistischen Einheitswissenschaft. Um eine aus diesem Paradigma folgende Reduktion zu vermeiden, bietet sich als Handlungsvorschlag an, eine Vielfalt in Weltbildern und Methoden zu erhalten und zu fördern.

Für die Frage, ob zunehmende Einheitlichkeit in der Theoriebildung als wachsende *Wahrheitsähnlichkeit* interpretiert werden kann, wie Popper behauptete, zeichnet sich keine Lösung ab. Wird Einheitsähnlichkeit als Wahrheitsähnlichkeit genommen, folgt die *Wahrheitsähnlichkeit der Modelle* und somit die Annahme, es gäbe idealiter nur eine richtige Beschreibung der Welt. Modelle sollten vielmehr strikt als Hypothesen oder nach Feyerabend als Kunstwerke entwickelt und angesehen werden.

Zur Kalkülvorstellung gehört auch das Paradigma der *Definierbarkeit*. Definitionen sind – zumindest in Form einer Nominal- oder Realdefinition – etwas Statisches, sie suchen nach elementaren Begriffen (vgl. Analyse bei Leibniz, Konstitutionssystem bei Carnap) und legen Begriffe auf Dauer fest. Definitionen, die auf statische Weise festlegen, sind nicht gebrauchtsabhän-

gig und reagieren deshalb auch nicht auf Wandlungen dessen, worauf sie sich beziehen. Sie setzen also ein ebenso statisches Definiendum voraus. Gebrauchsunabhängigkeit impliziert mit Rücksicht auf Pragmatik wiederum *Zeitunabhängigkeit*. Die besonders engen Grenzen des Leistungsvermögens von Nominaldefinitionen sind seit Leibniz bekannt. Definitions- und Entscheidungskriterien sollten expliziert werden, ebenso sollte die Reichweite einer Definition deutlich gemacht werden. Auch sind kontextbezogene Gebrauchsdefinitionen vorzuziehen. Das Paradigma der Zeitunabhängigkeit verweist auch auf Descartes. Wenn die Zeitgebundenheit von Vorgängen bei der Modellierung ignoriert wird, kann dies eine Gefahr bedeuten, wenn die Zeit eine wichtige Komponente des zu Modellierenden ist.

Die *Logik* – hier sind Aussagen-, Prädikaten- und Relationenlogik gemeint – ist in zweierlei Hinsicht paradigmatisch für die Informatik, erstens in der Annahme der *Logizität* der Welt und zweitens in der Annahme der *Formalisierbarkeit* der Welt. Wenn die Welt als logisch vorausgesetzt wird, dann läßt sie sich formalisieren, zum Beispiel indem eine Satzanalyse, das heißt eine Reduktion der natürlichen Sprache auf formale Sprache, durchgeführt wird. Das Paradigma der Formalisierbarkeit geht auf Leibniz’ »ars inveniendi« zurück und findet sich im Hilbertprogramm unter dem Begriff der Axiomatisierbarkeit. Und wenn die Welt dann formalisiert ist, können die Regeln der Logik angewandt werden, die sicherstellen, daß nur logisch richtige Schlußfolgerungen gezogen werden. Diese Denkweise entspricht der Leibnizschen Forderung nach »Calculus!«. Eng verbunden mit der Formalisierbarkeit sind die Paradigmen *Verifizierbarkeit* und *Korrektheit*. Beides sind Ansprüche, die nicht erfüllbar sind. Die Informatik bezieht sich dabei auf eine falsifizierte Hypothese, aus der falsche Folgerungen möglich sind. Es ist nur möglich, eine begrenzte Überprüfbarkeit von Theorien, Modellen, Programmen... zu erreichen, weil jeweils nur Teilsysteme formalisierbar sind. Für die Datenmodellierung wird die *Relationenlogik* genutzt. Sie stellt die Regeln für die Darstellung und die Bearbeitung der Elemente des Datenmodells. Ein Paradigma für die Programmiersprachen ist der *Prädikatenkalkül*. Selten reflektiert wird, daß Quantoren aufgrund der Endlichkeit des Computers nicht oder nur mit Zusatzbedingungen einsetzbar sind. Diese Begrenztheit sollte transparent gemacht werden. Die *Aussagenlogik* wiederum ist das Muster für die Schaltalgebra, die auf der Analogie von »wahr« und »falsch« zu »ein« und »aus« oder »1« und »0« basiert. Diese Dualität findet sich bei Leibniz in der Analogie von »Einheit« und »Nichts«, aus der sich die Welt zusammensetzen lasse.

In diesen Zusammenhang gehören auch die Annahmen der *Vollständigkeit* und *Entscheidbarkeit* des Kalküls. Für die Vollständigkeit wird ein Erzeugungsverfahren verlangt, mit dem die wahren Sätze konstruiert werden können. Dieses Programm entspricht der »ars inveniendi« bei Leibniz. Für die Entscheidbarkeit wird verlangt, daß es ein Verfahren gibt, mit dem die Wahrheit oder Falschheit eines Satzes festgestellt werden kann. Leibniz bezeichnete dies als »ars iudicandi«. Diese Annahmen, die im Leibnizprogramm wie auch in seinem formalistischen Sonderfall, dem Hilbertprogramm, formuliert wurden, sind nicht gerechtfertigt. Dies zeigen die Beweise der Unvollständigkeit und der Unentscheidbarkeit von Kalkülen hinreichender Komplexität im Einklang mit den Grenzen der Berechenbarkeit, die sich bei Funktionen wie zum Beispiel der »Busy-Beaver-Funktion« abzeichnen. Die Unvollständigkeitsbeweise (Gödel) und das Halteproblem (Turing) werden zwar an der Universität im Teilgebiet »Theoretische Informatik«, das ein Zweig der Mathematik sein könnte, diskutiert, in der übrigen Informatik aber nicht berücksichtigt. So wird das Verhalten von Computern falsch eingeschätzt, weil das Halteproblem nicht als Fehlerursache in Frage zu kommen scheint. Ein Betriebssystem stoppt willkürlich nach einer bestimmten Zeit, weil eine Endlosschleife im Programm angenommen wird (vgl. Brauer 1990).

Die *Universalität* ist ebenfalls ein semantisch-kognitives Paradigma der Informatik. Die Informatik hält sich für eine Universalwissenschaft, die Methoden zur Verfügung stellt, die in allen anderen Wissenschaften angewandt werden können. Gestützt wird dieses Ideal durch das Verständnis der »Turingmaschine als Universalmaschine«. Weil der Begriff der Berechenbarkeit, wie er im Turingschen Verfahren realisiert ist, heute als nicht hintergebar genommen werden muß, besteht die Gefahr, daß das Turingsche Verfahren zur Einheitsvorstellung wird und die Welt ihr zufolge als berechenbar gilt. Hierin liegt eine entscheidende Verschiebung: Im Konzept des Logischen Empirismus fallen in den Bereich des Berechenbaren oder Formalisierbaren höchstens diejenigen Sätze, die nicht metaphysisch sind. Es wird damit aber nicht behauptet, daß es keine metaphysischen Sätze gäbe, daß also zum Beispiel Sätze aus dem Bereich des Glaubens leer seien. Ihnen mangelt es an Intersubjektivität und Ableitbarkeit innerhalb eines logisch-empirisch konstruierbaren oder prüfbaren Konstitutionssystems. Und ebensowenig sind künstlerische Symbolisierungen leer. Die Welt nach Maßgabe der Turingmaschine hat für diese Art von Sätzen indessen keinen Platz mehr. Zuzufolge dieser Verschiebung gewinnt die Turingmaschine quasi ontologische Eigen-

schaften. Dies ist umso fragwürdiger, als die Verbindung von Berechenbarkeit und Universalität eben auf den »wackligen Beinen« steht, die der Mathematik am Ende der Grundlagendebatte geblieben sind. Denn die Mathematik ist ja nur in der Lage, teilformalisierte Systeme aufzustellen, nicht aber Vollformalismen. Ein so gefaßtes Paradigma der Universalität entspricht den Leibnizschen Überlegungen zur »scientia generalis«, einer Universalwissenschaft für die Erkenntnis der gesamten Welt. Es besteht die Gefahr, daß die Möglichkeiten anderer Modelle ausgeschlossen werden und die Welt, wie sie durch die Universalitätsannahme erklärt wird, verabsolutiert wird. Hilfreich in diesem Zusammenhang wäre eine Bescheidenheit bezüglich der Erwartungen an Wissenschaften.

Die Beherrschung durch Berechnung. Dieses Paradigma geht zurück auf Descartes, findet sich in Leibniz' »calculus ratiocinator« sowie im mechanistischen Weltbild und ist in praktischer Anwendung untrennbar mit der Informatik verbunden. Es zeigt sich zum Beispiel schon in den Hollerithmaschinen zur Auswertung von Statistiken und in jedem heute vorhandenen Informationssystem, von der AKW-Steuerung bis zum Versicherungssystem. Mit diesem Paradigma gekoppelt ist ein *Exklusivitäts- oder Verdrängungsprinzip*, das darin besteht, prinzipiell keine Problemlösungen mehr zu suchen, die außerhalb dessen liegen, was mit einem Computer tatsächlich oder möglicherweise zu berechnen ist. Hier ist wieder auf eine Verschiebung hinzuweisen. Der allgemeine Kalkülbegriff bei Leibniz strebt zwar Berechenbarkeit an, läßt in seiner Definition des Kalküls als Gebilde, bestehend aus Elementen und Regeln, die auf die Elemente angewandt werden, jede funktionierende Systembildung zu. Der Kalkül im Sinne des präzisierten Algorithmenbegriffs von Turing ist demgegenüber strikter. Diese Reduktion auf Berechenbares kann durch Einbeziehung nicht berechenbarer Aspekte sowie die Suche nach Lösungen außerhalb des Computers vermieden werden.

Die Konstruierbarkeit. Dieses Paradigma zeigt die Handlungsorientierung der Informatik. Die Datenmodellierung ist nicht nur ein analysierendes, sondern auch ein konstruktives Verfahren. Und wenn es darum geht, aus einem Modell ein lauffähiges Programm(system) herzustellen, wird sogar von »Realisierung« gesprochen. So wird eine zweite »Realität« geschaffen. Dieses Paradigma erfüllt Hobbes' Vorstellung: »Der Mensch versteht nur, was er macht.« In diesen Zusammenhang gehört die Auffassung des Informatikers, selbst Schöpfer zu sein. Dieser Aspekt war besonders in der Frühzeit der Informatik präsent. Von ihm aus findet der Übergang zum Para-

digma der *Analogie Rechner - Gehirn* statt. In ihm wird der Rechner als künstlicher Mensch (»Elektronengehirn«) angesehen. Den Menschen als Ganzes als Maschine zu verstehen, findet sich in La Mettries »L'Homme Machine«, in der Tradition des mechanistischen Weltbilds. Die darin enthaltene Überschätzung der eigenen Fähigkeiten kann vermutlich nur durch eine Bescheidenheit und das Erkennen der eigenen, begrenzten Möglichkeiten korrigiert werden. Die Analogie Rechner – Gehirn kann dazu anregen, den Blick für Differenzen zwischen unterschiedlichen Bereichen der Welt zu schärfen.²⁵⁵

Anzumerken ist, daß dieses Paradigma nicht mit dem Einheitsgedanken im Sinne einer ontologischen Voraussetzung zusammenpaßt. Dann wäre der Informatiker nur Entdecker. Wenn jedoch der Einheitsgedanke im Sinne eines methodischen Prinzips verstanden wird, dann kann der Informatiker als Schöpfer angesehen werden. Der Zusammenhang zwischen Konstruierbarkeit, Einheit und Wahrheit (die sogenannte Schöpfer-Entdecker-Dichotomie) ist in der Philosophie nicht entschieden und nicht entscheidbar. Die beiden Positionen durchziehen auch den Grundlagenstreit in der Mathematik und haben infolgedessen implizit Eingang in die Informatik gefunden, deren Annahmen beiden Deutungen offenstehen. Dies zeigt im übrigen, wie wichtig es ist, die kognitiven Paradigmen in Betracht zu ziehen, denn hier wird deutlich, daß ganz traditionelle Probleme der Philosophie selbst noch in formalistischen, axiomatischen Wissenschaften als in der Regel unausgesprochene Voraussetzungen wirksam bleiben.

Die in dieser Arbeit erwähnten Paradigmen im Sinne von Musterbeispielen sind einerseits bezogen auf Inhaltliches (semantisch-kognitiv) als »Kochbuch« zu verstehen. (»Ein Datenmodell wird wie folgt gemacht: Man nehme einen Ausschnitt der Welt und notiere die Informationen, die diesen Ausschnitt beschreiben. Um Redundanzen, die zu Update-Anomalien führen können, im Modell zu vermeiden, wende man die Normalisierungsregeln an. Diese lauten:...«). Andererseits können die Musterbeispiele auch bezogen auf Interaktion (sozial-interaktiv) als »Laborregeln« verstanden werden. (»Wir machen ein Datenmodell immer so und so.«) In den hier untersuchten Bereichen ist vor allem der Aspekt des »Kochbuchs« vorhanden, er

²⁵⁵ Diese Analogie spielt heute in weiten Bereichen der Informatik so dem gesamten kommerziellen Bereich keine Rolle mehr. Allenfalls die KI schöpft aus der Analogie in einem Überschneidungsbereich von philosophisch oder psychologisch ausgerichteter »Kognitionswissenschaft« und Hirnforschung Fragen, die vermutlich unbeantwortet bleiben werden. Die praktischen Ergebnisse der KI sind demgegenüber in der Regel mit den heute üblichen Argumenten und Methoden der theoretischen und praktischen Informatik darstellbar. (Vgl. Brauer 1993)

überlagert den Aspekt der »Laborregel«. Bei Lehrbuchdatenmodellen wird nicht darauf hingewiesen, daß es sich um Beispiele handelt und wie die Entscheidung, welche Information in das Modell aufgenommen wird, getroffen wird. Es fehlt auch insofern ein Hinweis auf die Kontextabhängigkeit des Modells.

Die *Von-Neumann-Architektur* ist ein typischer Fall für ein solches Musterbeispiel in der Informatik. Es ist die generelle Beschreibung der Komponenten eines Computers. Dieser besteht grundsätzlich aus (1) einem Prozessor, der sich aus einem Rechenwerk und einem Leit-/Steuerwerk zusammensetzt, (2) einem (Haupt-)Speicher und (3) einer Ein- und Ausgabeinheit. Eine wichtige Eigenschaft der Von-Neumann-Architektur ist, daß Daten und Funktion in ein und demselben Speicher abgelegt sind. Diese Eigenschaft unterscheidet den Von-Neumann-Computer von allen vorher vorhandenen Rechenmaschinen.

6.2 Situativ-praktische Paradigmen

Informatiker modellieren die Welt so, daß ihre Ergebnisse *kontextfrei* und *zeitunabhängig* sind. Die Modelle geben nicht ihre soziale Eingebundenheit wieder und enthalten keine Zeitparameter.²⁵⁶ Sie reduzieren also Kontexte. Zudem findet eine Gleichsetzung von *Beschreibung, Ausführung und »Realität«* statt. Dieses Paradigma war nicht von Anfang an führend, sondern hat sich erst im Lauf der Zeit gegen das Paradigma des *dynamischen, kybernetischen Modells*, das die Prozessualität berücksichtigt und insofern eher der Leibnizschen Konzeption der Monade entspricht durchgesetzt. (Dies kann als ein Beispiel für Paradigmenkonkurrenz für eine Phase genommen werden, in der noch nicht feststand, welches Paradigma durchgesetzt würde.) Handlungsmöglichkeiten könnten sein: Berücksichtigung von Zeitaspekten, Rekontextualisierungen oder alternative Theorien, zum Beispiel Aufgreifen des kybernetischen Ansatzes.

Es wird als selbstverständlich angenommen, daß ein informationstechnisches Modell grundsätzlich aus *Daten und Funktionen* besteht. Dieses Verständnis korrespondiert mit dem Ideal des Kalküls, der aus Elementen und Regeln zusammengesetzt ist. Die lange verbreitete Annahme, Daten und Funktionen seien getrennt voneinander modellierbar, wurde mit der »Objektorientierung« relativiert. Zwar wurde durch die Konzentration auf jeweils einen Aspekt (Daten oder Funktionen) eine gewisse Übersichtlichkeit erreicht, es wurde aber erkannt, daß die getrennte Modellierung von Daten und Funktionen ohne Berücksichtigung des einen durch das andere sinnlos ist.

Für das informatische Handeln ist das Paradigma der *Modularität* wichtig. Dieses explizit bekannte Paradigma hängt mit dem – weniger bekannten – kognitiven Paradigma der *Unabhängigkeit der Elemente* zusammen. Auch wenn die Annahme der Unabhängigkeit der Elemente in der Regel zutreffen mag und ein Modell aufgrund der Annahme übersichtlich sein mag, so bleiben doch diejenigen Elemente nicht abbildbar, für die die Elementaraussagen abhängig voneinander sind. Jedes Informationssystem wird als Modul, bestehend aus kleineren Modulen aufgefaßt. Jedes Modul für sich stellt eine *Black Box* dar, deren interner Aufbau nicht bekannt ist, sondern nur die Funktion dieser Einheit und die Schnittstellen sind bekannt und werden be-

²⁵⁶ Die hier gemeinten Zeitparameter beziehen sich auf die Struktur der Modelle. Die Struktur gilt als zeitlos. Auf der Ebene der Inhalte des Modells werden Zeitaspekte explizit modelliert. (Vgl. Kapitel 2.)

nutzt. Die Anwendungen, zum Beispiel redundante Prüfsysteme in Flugzeugen, verhalten sich jedoch nicht immer erwartungsgemäß. Es kommt vor, daß mehrere solcher Black Boxes fehlerhaft sind, so daß sich Fehler addieren oder aufheben. Der Vorteil der Modularisierung liegt in der Übersichtlichkeit und in den einfachen Input-/Output-Annahmen.

Die Elemente eines Informationssystems oder eines Datenmodells sind entweder in einer hierarchischen oder einer netzartigen Struktur eingebettet. *Hierarchie* und *Netz* sind zwei weitere Paradigmen der Informatik. Hierarchische Strukturen werden auch als Baumstrukturen bezeichnet und für die Zerlegung von Funktionen verwendet. Netzartige Strukturen finden sich in Datenmodellen und in Petri-Netzen. Die Aufstellung eines Daten- oder Funktionenmodells erfolgt analog zu Leibniz' Verfahren der *Analyse und Synthese* durch Zerlegung oder Spezialisierung beziehungsweise Aggregation oder Klassifizierung. Hierarchie und Netz sind nicht informatikspezifische Strukturen, sie finden sich vielmehr in der Gesellschaft, zum Beispiel im Militär und in Unternehmen. Eine Gefahr hierarchischer Strukturen besteht darin, daß ein einzelner Aspekt »nach oben« gestellt wird und damit alles andere »nachrangig« wird. Eine Chance bietet die Hierarchie in der Gliederung eines Modells nach bestimmten Aspekten. Dagegen ist die Netzstruktur den Vorteil der »Gleichberechtigung« der Elemente, sie kann aber den Nachteil der Unübersichtlichkeit haben. Da jede Form von wissenschaftlichem Modell Beziehungen nach bestimmten Regeln schafft und insofern reduktionistisch ist, ist ein Netz immer wohlgeordnet. Wenn dieses nicht mehr übersichtlich ist, dann ist zu fragen: Habe ich schlecht modelliert oder muß ich akzeptieren, daß die Sache – zum Beispiel das Internet – so komplex ist? Auf jeden Fall ist es sinnvoll, die Entscheidung für die eine oder andere Struktur bei der Modellierung transparent zu machen.

Das *Ökonomieprinzip* ist ein Paradigma auf verschiedenen Ebenen, indem es – semantisch-kognitiv – als Strukturgesetz der Welt verstanden werden kann, welches in ein – situativ-praktisches – technisches Prinzip umgesetzt wird. Es geht unter anderem darum, Kosten zu minimieren – am Anfang der Computerentwicklung primär Hardwarekosten, aktuell vor allem Softwarekosten –, indem zum Beispiel wiederverwendbare Module entwickelt werden. Ist das Prinzip als Voraussetzung transparent, dann können die Risiken besser eingeschätzt werden.

Hinsichtlich der Modellbildung gibt es zwei Vorgehensmodelle: zum einen die *sequentielle Softwareentwicklung*, gemäß dem zur Behebung der »Softwarekrise« entwickelten »Wasserfallmodell«, zum anderen die *iterative Soft-*

wareentwicklung, die heute im Zusammenhang mit der Objektorientierung favorisiert wird. Die sequentielle Softwareentwicklung hat den Nachteil, daß bei Projekten, die über einen längeren Zeitraum laufen, Modell und »Realität« auseinandergehen, weil das Modell am Anfang des Projekts festgeschrieben wurde und Änderungen in der Welt später nicht oder nur eingeschränkt berücksichtigt werden. Ein Vorteil gegenüber der iterativen Entwicklung ist eine klare Trennung: erst werden die fachlichen Anforderungen definiert, dann werden diese Anforderungen in eine formale Sprache, eine Programmiersprache, übersetzt. Das iterative Vorgehen enthält diese Trennung nicht, dafür sind jedoch grundsätzliche Änderungen in späteren Phasen schwieriger umzusetzen, weil schon vieles implementiert ist. Beim »Auseinanderfallen« von Modell und Welt sollte das Modell »weggeworfen« werden, auch wenn dies im kommerziellen Bereich vielleicht kurzfristig zu »Ärger« führen mag. Der Übergang von der sequentiellen zur iterativen Softwareentwicklung kann als »Paradigmenwechsel« für einen bestimmten Bereich informatischen Handelns interpretiert werden. Beide Paradigmen existieren verträglich nebeneinander und sind ein Zeichen für mögliche Methodenvielfalt.

Ebenfalls eine Veränderung gab es vom Analogrechner – als Spezialmaschine – zum Digitalrechner – als Universalmaschine. Der Grundgedanke ist nicht mehr, wie etwas mit einem analogen, kontinuierlichen Medium modelliert werden kann, sondern wie etwas in ein digitales Modell, das heißt mit diskreten Zuständen, übersetzt werden kann. Dieses Paradigma kann mit den Begriffen *Diskretheit/Digitalisierbarkeit* gekennzeichnet werden. Analoges und Kontinuierliches werden in Diskretes übersetzt. Es entstehen dadurch unterschiedliche Modelle. Diese Tatsache und die jeweiligen Begrenzungen der Modelle sollten transparent gemacht werden.

6.3 Sozial-interaktive Paradigmen

Zur Unterscheidung von den bisher genannten kognitiven und praktischen Paradigmen seien hier diejenigen Paradigmen zusammengefaßt, die sich daraus ergeben, daß das Handeln von Informatikern in der Geschichte und in sozialen Systemen stattfindet. Es geht um Paradigmen, die die Informatik als Handlungssystem betreffen.

Informatik ist in einer konkreten historischen Situation entstanden und hat diese gleichzeitig mitbestimmt. Bis heute sind die Entwicklungen der Informatik zu einem beachtlichen Teil kontextabhängig im Sinne einer Abhängigkeit von vorgeordneten Verwendungszwecken und Zielen. Das *Militär* ist nach wie vor einer der größten Auftraggeber für Entwicklungen in der Informatik. Informatikprojekte werden *industriell arbeitsteilig* durchgeführt, das heißt, jeder Informatiker bearbeitet nur jeweils einen Teil des Gesamten. Es besteht die Gefahr einer (Selbst-)Täuschung über die Unabhängigkeit der Informatik von historischen und sozialen Kontexten, in denen aber immer gearbeitet wird. Es gibt keine Trennung im Sinne von »hier Politik, da Wissenschaft«, wie von Neumann behauptete. Auch sind die Konzepte der Informatik nicht unabhängig von der Situation, in der sie entwickelt werden. So basiert die Unsicherheit des Internet darauf, daß dieses Netz für einen bestimmten Zweck aufgebaut wurde und diesem Zweck angemessen ist, nicht aber den heute damit verbundenen Anforderungen. Eine unreflektierte Übernahme militärisch motivierter Forschungsergebnisse in kommerzielle Bereiche (zum Beispiel Internet) kann deshalb eine Gefahr darstellen. Andererseits bietet die *Kommerzialisierung* der Informatik eine Chance, indem Informationssysteme weit verbreitet und weiterentwickelt wurden. Als Handlungsorientierung wird empfohlen, kontextabhängig zu prüfen, ob der Entstehungskontext zum Verwendungskontext paßt oder ob eine neue Verwendung in einen ganz anderen Anforderungshorizont führt.

Die praktische Zusammenarbeit von Informatikern mit Fachleuten des jeweiligen Gebietes ist von der *Interdisziplinarität* der Vorphase einerseits unterschieden, da es sich nicht um die Entwicklung gemeinsamen Wissens handelt (Beispiel Norbert Wiener und andere), andererseits folgten viele der frühen technischen Entwicklungen bereits dem industriell arbeitsteiligen Muster. Insofern war Interdisziplinarität für den damaligen Arbeitsansatz nicht paradigmatisch, denn dieser war durch *hierarchische Strukturen* bestimmt, in denen sich Teamchefs Spezialisten für die Entwicklung von Rechenmaschinen gesucht haben. Heute findet sich das Paradigma der Inter-

disziplinarität vor allem in Anwendungsbereichen der Informatik, so in der Zusammenarbeit von Betriebswirten und Informatikern oder von Medizinern und Informatikern. Dabei handelt es sich nicht um eine zufällige Zusammenarbeit, sondern es gibt immer pragmatische Gründe für die Interdisziplinarität. Sofern die Informatik den Anspruch einer »Dachwissenschaft« und damit einen Universalitätsanspruch vertritt, gelten selbstverständlich die Gefahren, die mit der Informatik verbunden sind, auch für die anderen Wissenschaften. Wenn Interdisziplinarität allerdings so verstanden wird, daß durch die Zusammenarbeit verschiedener Wissenschaftler unterschiedliche Aspekte und Kontexte bei der Modellierung berücksichtigt werden, stellt dieses Paradigma eine Chance dar, Vielfalt in Modellen zu erhalten. Es kann dabei Neues entstehen und es können durch die Kontextualisierungen auch Korrekturen vorgenommen werden.

Die Modelle der Informatik sollen *rational* sein, und zwar in verschiedenen Aspekten: zum einen in Bezug auf die Technik im Sinne von *Redundanzfreiheit*, mit dem Vorteil der Übersichtlichkeit, da Elemente je Modell nur einmal vorkommen, und dem Nachteil der Reduktion, indem in der Welt vorhandene Wiederholungen unter Umständen nicht angemessen modelliert werden, oder *Wiederverwendbarkeit*; zum anderen in Bezug auf die Wirtschaft im Sinne der *Kostenminimierung* durch die Automatisierung von Kopfarbeit, indem – in der Praxis ganz üblich – vorhandene Konzepte und Spezifikationen als Muster für neue verwendet werden. Dieses Verfahren sei als Musterbeispiel für *Vorgangswiederverwendung* genannt.

Modelle sollen zudem gewisse *Qualitätskriterien* erfüllen. Dazu gehören die *Benutzungsfreundlichkeit* für den Anwender (Verständlichkeit, Lesbarkeit, Angemessenheit, Fehlertoleranz, Fehlererkennbarkeit), die Zuverlässigkeit (Korrektheit, Robustheit, Ausfallsicherheit), die Flexibilität (Adaptabilität, Portabilität) und die Effizienz. Nicht alle diese Kriterien sind wissenschafts- oder informatikinterne, sondern sind von außen durch Anforderungen der Anwender, allgemeine Prinzipien der Wirtschaft oder technische Standards bedingt. Und es sind in vielen Fällen weniger formale Kriterien als vielmehr »weiche Aspekte«, wie zum Beispiel die Forderung, daß – im Sinne der Übersichtlichkeit und damit der einfacheren Lesbarkeit – die Entitäten in Datenmodellen so angeordnet sein sollen, daß die Relationen sich in der Darstellung nicht überschneiden, eine Forderung, die aus topologischen Gründen (ähnlich wie beim »Königsberger Brückenproblem«) bei weitem nicht immer erfüllbar ist. Die aus der Physik oder Mathematik bekannten Werte »Einfachheit« oder gar »Eleganz« (in der Informatik bezogen auf

Modelle, Programme,...) sind auch vorhanden, es ist aber auffällig, daß sich die Werte der Informatiker eher präzise fassen lassen und sich bei ihrer Erörterung Kriterien erzeugen lassen, die über das sprichwörtliche intuitive Empfinden des Mathematikers für die Eleganz eines Beweises hinausgehen. Diese Kriterien zu berücksichtigen und zu erfüllen, bietet eine Chance, Informationssysteme in Abstimmung mit den Nutzern zu gestalten. Hierfür ist allerdings Kommunikationsaufwand nötig und die Zweckabhängigkeit des Informationssystems ist transparent zu machen. Die hieraus folgende Betonung einer »Nutzungsperspektive« hat partiell zu einer Verbindung von informatischen Entwicklungsmethoden und Aspekten der Arbeitswissenschaft geführt.

Indem die Informatik an diesen Ansprüchen festhält und solche Abgrenzungen ihres Gebietes schafft, hält sie grundsätzlich auch am Paradigma des *Risikooptimismus* fest. Zwar sehen auch Informatiker Risiken in ihrer Disziplin und sie versuchen, diese zum Beispiel mit Methoden der Softwaretechnik, die zu einer besseren Qualität der Software führen sollen, zu minimieren. Zu diesen Methoden zählt auch das systematische Testen, das in der Praxis immer wieder in »Testkonzepten« beschrieben und gefordert wird. Die Erfahrung zeigt aber, daß solche Testkonzepte in der Regel »Schrankware« sind und daß das Testen von Software, sei es auf Programm- oder auf Systemebene, weniger aufgrund fehlenden Wissens über das Testen, sondern vielmehr aufgrund von Zeitrestriktionen ziemlich unsystematisch mit »Trial-and-error-Verfahren« erfolgt. Dieses Verhalten entspricht dem von Bonß als »Kalkulation und Inkaufnahme von (Rest-)Risiken« bezeichneten Verfahren und den Versuchen, Risiken zu beherrschen. (Vgl. Bonß 1995, 241ff.) Gefahren werden nicht erkannt oder nicht ernst genommen. Handlungsalternative sollte Risikoskepsis sein, das bedeutet auch, im Rahmen eines Risikomanagements eine ex-ante-Perspektive einzunehmen.

Zu den pragmatischen Paradigmen, die in der Informatik vorhanden sind, aber nicht reflektiert werden, gehört das der *Definitionsmacht*. Dieses existiert in dreierlei Hinsicht: Erstens übt der Modellierer Macht aus, indem er Begriffe definiert. Bei der Modellierung ist also immer die Frage zu stellen: Wer definiert? Wer entscheidet, welche die richtige Definition ist?²⁵⁷ Diese werden – im Sinne der Substanzannahme – als »fest« verstanden und nicht nur in der Beschreibung des Datenmodells, sondern auch in der Im-

²⁵⁷ Vergleiche das Zitat aus »Alice hinter den Spiegeln« von Lewis Carroll in Abschnitt 2.2.7.

plementation, also der Datenbank, als feste, unveränderbare Bestandteile aufgenommen. Insofern ist Definitionsmacht auch als Ausschluß oder Reduktion von sozialen Zusammenhängen zu verstehen. Zweitens wird die Definitionsmacht an den Computer übergeben, der nämlich – auch wenn der Begriff in der Welt längst etwas anderes bedeutet – an der einmal implementierten Definition festhält, was dazu führen kann, daß »Realität« und »virtuelle Welt« verwechselt werden oder daß eine Art von Ungleichzeitigkeit erzeugt wird. Welt und virtuelle Welt laufen asynchron. Definitionsmacht ist auch als sozial-interaktives Paradigma zu interpretieren, indem die beiden genannten Verständnisweisen in der realen Welt wirksam werden. Die Gefahren, die in diesen Paradigmen liegen, können nur durch Kommunikation mit anderen erkannt werden.

Ähnlich verhält es sich mit der *Entscheidungsmacht*. Auch dieses Paradigma ist in dreierlei Hinsicht zu verstehen: Erstens bestimmt zunächst der Modellierer, nach welchen Regeln der Computer in welcher Situation entscheiden soll. Zweitens: Wenn diese Regeln einmal implementiert sind, bleibt – wie am Beispiel AEGIS zu sehen – oft keine Zeit, die Entscheidung des Computers zu überprüfen und eine andere Entscheidung zu treffen, sondern die Entscheidungsmacht wird an das Informationssystem übergeben. Und drittens hat auch dieses Paradigma einen sozial-interaktiven Aspekt, indem die Entscheidungsmacht sich in der Alltags- und Lebenswelt bemerkbar macht. Wie im Fall der Definitionsmacht gilt auch hier der Handlungsvorschlag der Kommunikation mit anderen.

Zu den sozial-interaktiven Paradigmen lassen sich auch die in der Informatik üblichen Notationen und Bilder zählen. Dabei besteht ein Konsens über die Verwendung bestimmter Formen und Begriffe.

Eine häufig verwendete Notation ist die *Netzstruktur*. So werden für Abläufe Petri-Netze oder ähnliche Formen (beispielsweise Datenfluß- und Kontrollflußdiagramme gemäß DIN 66001) zur Darstellung verwendet. Auch Datenmodelle werden als Netze gesehen, indem die Informationsobjekte als Elemente und die Beziehungen als Verbindungen zwischen den Elementen dargestellt werden (Entity-Relationship-Diagrams). Statt der graphischen Elemente »Rechteck« und »Pfeil« kann für Datenmodelle auch die *Notation der Relationenlogik* angewandt werden, was in der Praxis aber ungebräuchlich ist. Hier wird offensichtlich die visuelle Wahrnehmung von Graphiken und Bildern der Vorzug gegenüber der Schrift gegeben.

Neben den Netzstrukturen sehen und verwenden Informatiker die *Baumstruktur*. Mit ihr werden Hierarchien, zum Beispiel Gliederungen (Zer-

legungen und Klassifizierungen) von Funktionen oder Daten, dargestellt. Die Baumstruktur ist eine Spezialform der Netzstruktur, indem in ihr nur 1:M-Beziehungen zu untergeordneten Elementen erlaubt sind.

Ein weiteres Paradigma ist die Veranschaulichung der Modellierung durch eine Graphik, in der die Welt oder das, was modelliert werden soll, als »Amöbe« und das Modell als *Rechteck* dargestellt wird. Es entsteht dabei der Eindruck, als ob die Rundungen, Ausbuchtungen, Unregelmäßigkeiten der »Amöbe« abgeschnitten werden (müssen), um ein handhabbares, berechenbares Modell herzustellen, vermutlich in der Annahme, daß Umfang und Fläche eines Rechtecks einfacher zu ermitteln sind als die einer »Amöbe«. Handlungsorientierung sollte sein, zumindest die Reduktionen transparent darzustellen und die Kriterien für die Reduktionen explizit zu benennen.

Verallgemeinerungen wie die Baumstruktur legen offen, daß die Informatik mit *kanonischen Bildern* arbeitet. Der Begriff »kanonische Bilder« wurde von Stephen Jay Gould (1941-2002) eingeführt. Gould spricht von kanonischen Bildern im Sinne von »allgemein akzeptierten, zur Norm gewordenen Bildinhalte[n], die einem stillschweigenden Übereinkommen zufolge zur Veranschaulichung der Schlüsselbegriffe unseres Gesellschafts- und Geisteslebens verwendet werden.« (Gould 1995, 47) Gould macht unter anderem anhand von Visualisierungen der »Evolution« klar, daß sich darin keine biologische Erkenntnis, sondern ein gesellschaftliches Vorurteil zeigt. Die Geschichte des Lebens wird zum Beispiel im Bild der »Leiter« als »Fortschritt vom Einzeller zum Menschen« dargestellt. Die Artenvielfalt wird als »ein auf der Spitze stehender Kegel« oder »Stammbaum« dargestellt, die assoziieren, daß sich aus einer ursprünglich kleinen Vielfalt (wenige Zweige = wenige, »primitive« Arten) im Lauf der Zeit eine vorhersagbare größere Vielfalt (Krone des Baumes = viele, »hochentwickelte« Arten) entwickeln würde. Dies ist jedoch nicht der Fall. So sind beispielsweise die »jungen, hochentwickelten« Säugetiere eine kleine Klasse mit etwa 4.000 Arten, während die »älteren, primitiveren« Insekten etwa 1.000.000 Arten zählen. »Die größte Vielfalt tritt [...] schon ziemlich früh auf, und in der weiteren Geschichte des Lebens gehen die meisten anatomischen Experimente wieder verloren, so daß sich die spätere Aufspaltung auf wenige überlebende Baupläne konzentriert. [...] Wenn Bilder nicht nur schmückendes Beiwerk sind, sondern einen zentralen Bestandteil unseres Denkens darstellen, erweist sich die Frage nach alternativen Darstellungsformen als grundlegend für die Geschichte des Paradigmenwandels in der Wissenschaft (und sogar für die völlig berechnete Vorstellung von wissenschaftlichem Fortschritt!).« (Gould

1995, 69f.) Zu ihnen gehören auch besonders auch »Systeme«, die zum Beispiel aus Rechtecken, Rauten und Pfeilen aufgebaut werden und die sich, wenn man an Datenmodelle denkt, als zusammenhängendes Bild einstellen.

Eine Besonderheit der Informatik ist, daß die genannten Strukturen nicht nur »abgebildet«, sondern auch implementiert werden. Sie sind also einerseits ein Bild für die Strukturierung von Gegenständen, andererseits schafft die Informatik zufolge dieses Bildes auch neue Gegenstände. Dieser Aspekt kann als Schöpfungsmoment in der Informatik interpretiert werden und insofern sind die hier genannten symbolischen Verallgemeinerungen auch praktisch paradigmatisch.

Wenn man die Notationen und Bilder konventionalistisch versteht, dann läßt sich ein Rückbezug zur Diskussion um den Realismus herstellen: Es stellt sich dann die Frage, ob die Realität ein Netz ist oder ob nur so getan wird, als ob die Realität ein Netz wäre.

6.4 Informationssysteme als Risikosysteme

In der Summe kann aus den vorgestellten Paradigmen der Schluß gezogen werden, daß der überwiegend unausgesprochen bleibende Anspruch auf *Genüßlichkeit und Sicherheit* besteht. Dieser Anspruch ist nicht haltbar, wie die Ausführungen in den vorangegangenen Kapiteln belegen:

- Nach Maßgabe der Paradigmen formulierte Ziele werden für erfüllbar gehalten. In vielen Fällen sind sie es aber nicht, zum Beispiel wegen der Komplexität der modellierten Systeme oder wegen der Dekontextualisierung während der Modellierung oder weil ein Paradigma falsifiziert ist (Verifikationsannahme). Die formulierten Ziele deuten darauf hin, daß Informatiker glauben, eventuelle Risiken mit bestimmten Methoden (Modellierung im Prädikatenkalkül und damit Reduktion von Komplexität auf Berechenbares) ausschließen oder zumindest minimieren zu können. Diese Annahme fußt auf dem Hilbertprogramm, das sich als unlösbar herausgestellt hat. Deshalb ist das mit Formalisierung einhergehende Sicherheitsversprechen hinfällig. Informatiker können diesen Sachverhalt übergehen, indem sie konzeptionell entkontextualisieren und so verfahren, als seien ihre Theorien informatikspezifisch. Entsprechend der Reichenbachschen Unterscheidung von »context of discovery« und »context of justification« wird die Automatentheorie so zum Kern der Theoretischen Informatik und streift dabei die Anbindung an die Begründungsprobleme der Mathematik ab.
- Es verschwindet auch aus dem Blickfeld, daß die Entwicklungsgeschichte des technisch und sozial determinierten Artefakts Computer und der Theorie des Computers nicht zusammenfallen.
- Ansprüche an die Verfahren der Softwaretechnik sind überhöht. Die Modellierung führt nicht zu tatsächlicher Beherrschung, aber die unter anderem durch die – modellierungsbedingte – generelle Reduktion begründete, nur scheinbare Beherrschung komplexer Systeme führt stattdessen zu Gefahren zweiter Ordnung. Die Verantwortung für (negative) Auswirkungen der Informatik wird von handelnden Menschen nicht auf sich selbst bezogen, sondern in den Bereich objektivierbarer Wahrheitsansprüche einer Disziplin oder auf Artefakte, die autonomes Verhalten aufweisen, verlagert. Im ersten Fall erscheint der Eintritt von Gefahren *post festum* als theoretisch nicht vorhersehbar, im zweiten Fall wird ihr Auftreten einem technischen System zugeordnet, dem Verantwortung nicht zugeschrieben werden kann.

- Die Anwendung von systematisch unsicheren Informationssystemen führt zu Risiken im Gebrauch derselben. So wie das Hochtechnologiesystem Kernkraftwerk prinzipiell physikalisch risikobehaftet ist, ist jedes Informationssystem wegen der »Quasiuniversalität« des Computers prinzipiell risikobehaftet. Systematische, wissenschaftsinduzierte Risiken sind innerhalb der Informatik nicht behebbar, minimierbar sind allenfalls Risiken in Bezug auf konkrete Realisierungen.
- Insgesamt wird ein Risikooptimismus vertreten. Zwar sehen auch Informatiker Risiken in ihrer Disziplin und sie versuchen, diese zum Beispiel mit Softwaremetriken zu minimieren. Dies entspricht dem von Bonß als »Kalkulation und Inkaufnahme von (Rest-)Risiken« bezeichneten Verfahren.²⁵⁸ (Bonß 1995, 241ff.). Bei genauerem Hinsehen ist demnach festzustellen, daß Risikooptimismus selbst zu den Risiken zu zählen ist.

Informationssysteme als Risikosysteme lassen sich den von Bonß (1995, 76) vorgeschlagenen Matrices zuordnen:

²⁵⁸ Für die (Nicht-)Anwendung von Testverfahren bringt Fevzi Belli diese Ansicht auf den Punkt: »Man ist immer bereit, mit einem Restrisiko zu leben. Das fängt bereits beim Aufstehen an, denn das Leben ist lebensgefährlich, und rein statistisch betrachtet ist bekanntlich das Bett das gefährlichste aller Werkzeuge. Trotz bahnbrechender Errungenschaften der modernen Medizin sterben die meisten Menschen noch immer im Bett und nicht im Auto oder Flugzeug, und auch nicht durch Software-Fehler.« (Belli 1998, 345)

	niedrige Komplexität	hohe Komplexität
enge Koppelung	• relativ kleine Systeme • lineare Interaktionen mit begrenzter Reichweite, auch bei Krise begrenzt • Kausalität: stark / eindeutig <i>Beispiel: PC</i>	• relativ große Systeme • lineare Interaktionen mit begrenzter Reichweite, im Krisenfall potentiell unbegrenzt • Kausalität: stark / uneindeutig <i>Beispiel: Großrechner</i>
lose Koppelung	• relativ kleine Systeme • reflexive Interaktion, im Prinzip begrenzt, im Krisenfall relativ begrenzt • Kausalität: schwach / eindeutig <i>Beispiel: kleine Informationssysteme</i>	• relativ große Systeme • reflexive Interaktion, im Prinzip unbegrenzt, im Krisenfall relativ unbegrenzt • Kausalität: schwach / uneindeutig <i>Beispiel: Internet</i>

Tabelle 25. Risikosysteme in der Informatik und ihre Binnenorganisation

	geringe negative externe Effekte	hohe negative externe Effekte
geschlossene Grenze	• rigides Containment²⁵⁹ • definierte Umweltbeziehung auch bei Krise kaum zu durchbrechen • Folgen kalkulierbar <i>Beispiel: PC</i>	• rigides Containment • definierte Umweltbeziehung bei Krise unvorhergesehen durchbrechbar • Folgen unkalkulierbar <i>Beispiel: Großrechner</i>
offene Grenze	• Grenzziehung prinzipiell kontextsensibel • Umwelten relativ variabel definiert • Schäden potentiell begrenzt <i>Beispiel: kleine Informationssysteme</i>	• Grenzziehung schwach kontextsensibel • Umwelten relativ variabel definiert • Schäden potentiell unbegrenzt <i>Beispiel: Internet</i>

Tabelle 26. Risikosysteme in der Informatik und ihre Umweltbeziehung

An das Ergebnis läßt sich mit der Frage anknüpfen, wie mit ihm umgegangen werden kann: Wenn die Welt ist, wie sie ist, das heißt wir in einer Gesellschaft leben, in der Alltagswelt und Verwissenschaftlichung unauflös-

²⁵⁹ »Containment« war ursprünglich ein technischer Begriff für ein völlig von der Umwelt abgeschottetes Labor und die Sicherheitseinrichtungen um einen Versuch herum. Inzwischen wird der Begriff mit weiterer Bedeutung benutzt und bezeichnet hier die bewußte und radikale Abschottung eines beliebigen Systems gegenüber der Umwelt. (Vgl. Bonß / Hohlfeld / Kollek 1993)

bar ineinander verwoben sind und in der Gewißheit und Sicherheit nicht erreichbar sind, dann lassen sich folgende Möglichkeiten für den Umgang formulieren:

- Wissenschaft und Welt werden trotzdem als zwei Paar Schuhe verstanden. Diese Auffassung entspricht derjenigen von John von Neumann, der Technologie und Wissenschaft für neutral hielt (»Technology – like science – is neutral all through, providing only means of control applicable to any purpose, indifferent to all.« (Von Neumann 1955, 515)) und der explizit ausdrückte, daß über die Konsequenzen von Wissenschaft von anderen, nämlich von Politikern entschieden werden müßte.
- Wissenschaft und wissenschaftsbeeinflußtes Handeln sind im Bewußtsein des historischen Ortes und ihrer Grenzen zu betreiben. Kontextualismus basiert auf dieser Möglichkeit. Schlußfolgerung aus der Ablehnung eines Risikooptimismus ist jedoch kein Risikopessimismus, sondern eine Risikoskepsis, die eine produktive Haltung einnimmt, indem sie gerade Unsicherheit und Vieldeutigkeit anerkennt und offen mit ihnen umgeht. Für das informatische Handeln ergeben sich daraus die allgemeinen Fragen: Was kann man – unter der Annahme von Risikoskepsis – wie sicher machen? Wie lassen sich Bereiche vertretbarer und unvertretbarer Risiken und Gefahren voneinander unterscheiden?

7 Handlungsorientierungen

Die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Zusammenhänge führen zu dem allgemeinen Schluß, daß Informatik in normativer Hinsicht, das heißt mit Blick als Wissenschaftsprogramm, ungeachtet ihres gegensätzlichen Selbstbildes, reduktionistisch ist und daß sie in deskriptiver Hinsicht sich auf zu enge Kontexte orientiert und die zeitliche Diskrepanz zwischen Spezifikation, Modellierung und Einsatz nicht thematisiert. Informatiker weisen deshalb eine große Bereitschaft auf, sich mit ihrem Handeln auf hohe Risiken einzulassen. Möglichkeiten, wie auf diese Befunde in der Absicht reagiert werden kann, informatisches Handeln als Handeln unter der Bedingung von Unsicherheit weiterzuentwickeln, sollen nun erörtert werden.

Besonders die Kapitel 2 und 3 machen deutlich, daß informatisches Handeln überwiegend in Zusammenhängen stattfand und –findet, die von der Organisationsweise, den Anforderungen und den Effizienzkriterien von Firmen, staatlichen Einrichtungen und Auftragsforschung abhängen.

Der soziale Ort wohl der meisten Informatiker ist daher gestern wie heute von instrumentellen Gesichtspunkten, nicht von kommunikativen, wie sie Habermas als allgemeine Voraussetzungen eines auf Verständigung abzielenden Handelns analysiert hat, bestimmt und weder Unternehmen noch staatliche Einrichtungen oder Forschungszusammenhänge sind kooperativ und herrschaftsfrei strukturiert. Habermas vertritt die These, daß jeder Beteiligte an einem konsensuellen Prozeß für seine Sprechhandlungen universale Geltungsansprüche erheben und ihre Einlösbarkeit unterstellen müsse, um an einem solchen Prozeß überhaupt teilnehmen zu können.

Der Sprecher muß einen *verständlichen* Ausdruck wählen, damit Sprecher und Hörer *einander verstehen* können; der Sprecher muß die Absicht haben, einen *wahren* propositionalen Gehalt mitzuteilen, damit der Hörer *das Wissen* des Sprechers *teilen* kann; der Sprecher muß seine Intentionen *wahrhaftig* äußern wollen, damit der Hörer an die Äußerung des Sprechers *glauben* (ihm vertrauen) kann; der Sprecher muß schließlich eine im Hinblick auf bestehende Normen und Werte *richtige* Äußerung wählen, damit der Hörer die Äußerung akzeptieren kann, so daß beide, Hörer und Sprecher, in der Äußerung bezüglich eines anerkannten normativen Hintergrunds *miteinander übereinstimmen* können. Ferner gilt, daß kommunikatives Handeln ungestört nur so lange fortgesetzt werden kann, wie alle Beteiligten unterstellen, daß sie die reziprok erhobenen Geltungsansprüche zu Recht erheben. (Habermas 1976, 354f., Hervorhebungen im Original)

Es liegt auch für Habermas auf der Hand, daß das Einverständnis mit allen vier Komponenten nicht der Normalzustand sprachlicher Kommunikation ist, sondern daß sie sich zwischen »Unverständnis und Mißverständnis, beabsichtigter und unfreiwilliger Unwahrhaftigkeit, verschleierter und offener Nicht-Übereinstimmung einerseits, Vorverständigtsein und erzielter Verständigung andererseits« (Habermas 1976, 355) bewegt. Er richtet sein Augenmerk deshalb auf die Herbeiführung eines Einverständnisses. Für diesen Prozeß müssen die gemeinsam anerkannten reziproken Geltungsansprüche vorausgesetzt werden können:

- Sprecher und Hörer wissen implizit, daß jeder von ihnen die genannten Geltungsansprüche erheben muß, wenn überhaupt eine Kommunikation im Sinne verständigungsorientierten Handelns zustandekommen soll;
- beide unterstellen gegenseitig, daß sie diese Kommunikationsvoraussetzungen auch tatsächlich erfüllen, d. h. ihre Geltungsansprüche zu Recht erheben;
- dies bedeutet die gemeinsame Überzeugung, daß die jeweils erhobenen Geltungsansprüche entweder (wie im Falle der Verständlichkeit der geäußerten Sätze) bereits eingelöst sind oder (wie im Falle von Wahrheit, Wahrhaftigkeit und Richtigkeit) eingelöst werden könnten, weil die Sätze, Propositionen, ausgedrückten Intentionen und Äußerungen den entsprechenden Adäquatheitsbedingungen genügen. (Habermas 1976, 355f.)

Wenn Habermas von der Einlösung der Geltungsansprüche spricht, so meint er damit, daß der Proponent die Anerkennungswürdigkeit durch den »Appell an Erfahrung und Intuition oder durch Argumente und Handlungskonsequenzen« begründet, wodurch eine »übersubjektive Anerkennung der Gültigkeit« herbeigeführt werde. (Habermas 1976, 356f.) Für eine Kommunikationsgemeinschaft gilt dann, »daß die Struktur ihrer Kommunikation, aufgrund formal zu beschreibender Merkmale, jeden von außen auf den Verständigungsprozeß einwirkenden oder aus ihm selbst hervorgehenden Zwang, außer dem des besseren Arguments, ausschließt und damit auch alle Motive außer dem der kooperativen Wahrheitssuche neutralisiert.« (Habermas 1983, 99) Hierfür werden »Diskursregeln« vorgeschlagen, die nicht konventionell verstanden werden, sondern als »unausweichliche Präsuppositionen« (Habermas 1983, 99f.) Sie lauten:

- (3.1) Jedes sprach- und handlungsfähige Subjekt darf an Diskursen teilnehmen.
- (3.2.) a. Jeder darf jede Behauptung problematisieren.
- b. Jeder darf jede Behauptung in den Diskurs einführen.
- c. Jeder darf seine Einstellungen, Wünsche und Bedürfnisse äußern.^[...]
- (3.3) Kein Sprecher darf durch innerhalb oder außerhalb des Diskurses herrschenden Zwang daran gehindert werden, seine in (3.1) und (3.2) festgelegten Rechte wahrzunehmen. (Habermas 1983, 99)

Nun kann keineswegs jeder, der fähig ist zu argumentieren, an den Diskursen teilnehmen, von denen er es für richtig hält; ebensowenig haben alle diejenigen, die teilnehmen, gleiche Chancen, sich zu artikulieren und wahrgenommen zu werden. Unter realen Handlungsbedingungen kann man vielmehr annehmen, daß der angesprochene Hintergrundkonsensus selten gegeben ist und für die genannten Geltungsansprüche die Präsupposition der Erfüllung oder Einlösbarkeit oft genug zurückgestellt wird. Kommunikatives Handeln kann nach Habermas dann nicht fortgesetzt werden oder kommt gar nicht erst zustande. Was stattdessen stattfindet, ist instrumentelles oder strategisches Handeln. Kommunikatives Handeln im umrissenen Sinn erweist sich als kontrafaktisches Ideal, als ein idealisierter Maßstab für die Verzerrung der wirklichen Kommunikationsvorgänge gegenüber dem, was vernünftig wäre.

Habermas' Bemühung, in der Theorie des kommunikativen Handelns einen universalistischen Vernunftbegriff zu rekonstruieren, der sich dadurch auszeichnet, daß Vernunft sich prozedural im – nach den obigen Regeln auf Verständigung verpflichteten – Diskurs einstellt, erscheint nicht zwingend. Denn wenn reale Kommunikationsvorgänge sich durch anders geleitete lokale Sprachspiele und Diskursregeln ergeben, dann ist unklar, wie in handlungsorientierten Zusammenhängen überhaupt die allgemein verbindliche, optimale Lösung eines Problems bestimmt werden könnte – um den von Habermas verwendeten Begriff Wahrheit erst gar nicht zu benutzen. Nach Maßgabe der faktischen Möglichkeiten von Kommunikation ist nicht wechselseitig davon auszugehen, daß alle jeweils Beteiligten denselben Regeln und Ansprüchen folgen, und ist auch nicht wechselseitig ersichtlich, wer weshalb wann was wozu vertritt. Unübersichtlichkeit und Unsicherheit kennzeichnen faktische Kommunikationsvorgänge außerdem nicht nur bezüglich der Sprechakte, sondern auch hinsichtlich des sachlich Behaupteten, sobald es um nichttriviale reale Systeme geht. Beispiele hierfür lieferte das

Kapitel 2. Deshalb ist es ebenso vertretbar, das Augenmerk gerade auf die lokalen Sprachspiele und Diskursregeln zu lenken. Dies heißt ja gerade nicht, sie für beliebig zu halten, sondern zu unterscheiden, Grenzen und Verknüpfungen zu suchen und sich zu ihnen zu positionieren. Insofern erfordert die Anerkennung von Vielfalt und Kontextgebundenheit nicht Unverbindlichkeit sondern genaue Maßgaben.

Bonß hat darauf hingewiesen, daß es weitgehend offen sei, wie ein rationaler Umgang mit Ungewißheit gedacht und praktiziert werden könne, da die thematisch einschlägigen Debatten in ganz unterschiedlichen Zusammenhängen von der Wissenschaftstheorie bis zur Technologiefolgenabschätzung und von der Statistik bis hin zur Sozialpolitik geführt würden. Jedoch verwiesen die jeweiligen Argumentationen immer wieder auf drei Grundoptionen für den Umgang mit den Unsicherheiten der modernisierten Moderne:

Einerseits kann man versuchen, die veränderte Situation mit den alten Mitteln weitgehend unkorrigiert zu bewältigen. Andererseits gibt es die Variante, die Strategien der kalkulatorischen Risikobewältigung durch Formen der Prävention und Schadensvermeidung zu ergänzen, und jenseits dessen kann man schließlich auch für eine kommunikative Verflüssigung und Politisierung des Risikodiskurses votieren. (Bonß 1995, 240)

Informatisches Handeln und Kommunikationsvorgänge unter den Bedingung von Unübersichtlichkeit und Unsicherheit legen gegenüber komplexen, vermutlich weitreichenden Lösungen eher einen skeptischen Anfangsverdacht nahe als reine Zustimmung und weniger die Verpflichtung auf den Konsens als Offenheit für Dissens. Unterscheidungen von Fall zu Fall sind erforderlich. Für einen Ansatz, der die Kontextgebundenheit informatischen Handelns hervorhebt, sind Kriterien erforderlich, nach denen unterschieden wird. Zu ihnen gehören die Überschaubarkeit und Reichweite von Kontexten und Systemen, ihre Dauer (finit, infinit, indefinit), ihre Regelbezogenheit (regelmäßig, regelgemäß, regellos), ihre Struktur (Hierarchie, Kooperation). Mit Hilfe solcher Unterscheidungen und ihrer Artikulation wird vielleicht unter Alltagsbedingungen von Fall zu Fall möglich, in informatischen Kontexten hinsichtlich der kognitiven Ebene Risikoskepsis und hinsichtlich der Handlungsebene Risikoscheu zu etablieren.

Generell lassen sich drei Verhaltensweisen empfehlen:

- (1) Paradigmen explizieren und bewußt mit ihnen umgehen.

- (2) Informatik zu einer risikobewußten Praxis und Wissenschaft entwickeln.
- (3) Informatisches Handeln in Kontexte einbetten.

(1) Paradigmen explizieren und bewußt mit ihnen umgehen. Die Paradigmen der Informatik werden in der alltäglichen Arbeit der Informatiker selten expliziert. Um Aufmerksamkeit dafür zu gewinnen, daß Paradigmen Risiken enthalten, um welche Risiken es sich handelt und daß Risiken nicht nur ad hoc an Wirkungen ersichtlich sind, sondern auf der Ebene der Paradigmen angelegt sind, müssen die Paradigmen explizit formuliert werden. Das ist ein Schritt, der nur in Kommunikation mit anderen Informatikern und Beteiligten erfolgen kann. Wenn die jeweiligen Risiken herausgearbeitet sind, läßt sich darüber nachdenken und kommunizieren, wie ein bewußter Umgang mit ihnen im gegebenen Fall aussehen sollte. Generell wirksam ist, daß die Informatik geistesgeschichtlich in einer Traditionslinie steht, die von einem Einheitsgedanken bestimmt ist. Von einem Einheitsgedanken macht die Informatik in der Art Gebrauch, daß sie zum einen Einheit im Gegenständlichen voraussetzt und zum zweiten, indem sie Einheit durch Reduktion schafft. Nur was sich im Netz ihrer Formalismen verfängt, gibt es für sie. Und zum dritten wirkt dies wie ein kognitiver Filter, wenn stillschweigend angenommen wird, dasjenige, was es für die Informatik gäbe, sei alles, was es auf der Welt wirklich gibt. In der Summe verankert die Informatik mittels der Kalkülvorstellung und über ihre Verfahren der Modellbildung respektive Systemkonstruktion Einheit der Welt über eine quasi »technische Regel« neu im Bereich der Verfahren. Ältere, ontologisch oder theologisch begründete Einheitsvorstellungen enthielten inhaltliche Bedeutungen und Behauptungen, über deren praktische Durchsetzung sich streiten ließ. Demgegenüber weist der ins Methodische und Formale verlagerte Gedanke solche Inhalte nicht ohne weiteres auf. Damit geht möglicherweise ein Gefahrenpotential einher, weil sich der inhaltlichen Kritik keine Angriffsfläche mehr bietet. Praktisch wird ein Einheitsgedanke so über ein technisches Instrumentarium umgesetzt und zugleich als rational legitimiert. Durch die den Verfahren innewohnende Definitions- und Entscheidungsmacht wird er »hinter dem Rücken der Akteure« handlungs- und damit weltgestaltend. Wie ist mit diesem Ergebnis umzugehen? Inwieweit kann eine Interpretation, die im Bereich der metaphysischen Annahmen bescheidener ist und die reflektiert, daß es nicht um Wahrheitsähnlichkeit und um eine Annäherung an die richtige, vollständige Abbildung der Welt geht, sondern um die Manipulati-

on von begrenzten, konstruierten Zusammenhängen mittels technisch-wissenschaftlicher Artefakte, Verfahren der Informatik überhaupt beeinflussen? Werden damit die Verfahren der Informatik harmloser, weil man ihre Grenzen mit reflektiert, weil man sich um die Überprüfbarkeit der Verfahren kümmert, weil man sie im Hinblick auf das, wie sie gemacht sind, als wahlfrei, änderbar und zeitgebunden versteht? Man kann einen Paradigmenwechsel andenken, der auf einer solchen Bescheidenheit basiert, was nicht heißt, daß man alles anders macht, sondern daß man vieles mit anderen Grenzen in einen kleiner gewordenen Erwartungshorizont stellt.

(2) *Informatik zu einer risikobewußten Praxis und Wissenschaft entwickeln.* Wenn nun die Risiken der Informatik explizit zu machen sind, dann ist zu fragen, wie das geschehen kann und welche Umgangsweisen mit Risiken möglich sind. Eine Möglichkeit ist, eine risikooptimistische Haltung einzunehmen. Risikooptimismus geht einher mit der Überzeugung, in der Zukunft selbst das noch bewerkstelligen zu können, was sich in der Gegenwart als problematisch erweist. Risikooptimismus geht also mit Fortschrittsoptimismus einher und erwartet den Erfolg des eigenen Tuns. Diese Einstellung ist unter vielen Informatikern verbreitet und wird nach wie vor vielerorts in der Ausbildung propagiert; sie hat nicht zur Verringerung von Risiken geführt. Neben einem prinzipiellen Risikopessimismus, der nur die Umkehrung des Optimismus wäre und keine Handlungsmöglichkeiten erkennen läßt, bleibt die Möglichkeit einer skeptischen Haltung. Sie sieht in den Risiken sowohl die Chancen als auch die Gefahren. Damit wird Technik nicht mehr nur als Fortschritt und als Erfolgsablauf, sondern ebenso als Mißerfolgsablauf denkbar. Darüber, was akzeptabel erscheint und was nicht, sind bewußte Entscheidungen zu treffen, die nachvollziehbar bleiben und die, angesichts der Unabgeschlossenheit unseres Wissens über Zukünftiges, versuchen, Risiken zu vermeiden oder zu minimieren, und die Risiken bei hohem Risikopotential und hoher Wahrscheinlichkeit des Umschlagens in Gefahren ablehnen. Dabei ist zu bedenken, daß Entscheidungen auf der Basis von kontextabhängigen Argumenten getroffen werden und die Triftigkeit von Argumenten immer kontingent bleibt, weil unser Wissensbestand über Kontexte und Systeme selbst zeitbedingt ist. Um nicht handlungsunfähig zu werden und um neue oder andere Lösungen zu finden, bietet es sich an, in und von Alternativen zu denken.

(3) *Informatisches Handeln in Kontexte einbetten.* Informatiker sollten für ihr Handeln einen Reflexionsstandard einhalten, in dem Fachliches nicht in einem verkürzten Sinn gesehen wird, sondern in dem die Qualität des Fachli-

chen sich durch die Einbettung in weitere Handlungszusammenhänge und Wirkungsmechanismen auszeichnet. Um einen solchen Standard einhalten zu können, wäre nötig, daß Informatiker lernen, in Kontexten zu denken, daß sie lernen, Instrumentelles zu erkennen und in seinem Mittelcharakter anzuerkennen, daß sie lernen zu kontextualisieren. Meine Erfahrungen in Informatikprojekten zeigen, daß tatsächlich immer Überschneidungen mehrerer Kontexte eine Rolle spielen, diese aber nicht als integrale Bestandteile von Projekten gesehen und berücksichtigt werden. So werden Informatikprojekte überwiegend als technische Projekte definiert und Probleme und Anforderungen, die die soziale Einbettung solcher technischen Lösungen betreffen, allenfalls als Randphänomene genommen, für die entweder eine Aktivität »Kommunikation« im Projektplan vorgesehen wird, die dann mit mehr oder weniger niedriger Priorität ausgeführt wird oder für die ein separates Projekt eingerichtet wird. Ein solches als »Change Management« bezeichnetes Projekt soll Friktionen vermeiden, die Motivation und Akzeptanz der beteiligten oder betroffenen Mitarbeiter erhöhen und helfen, die Implementation des Technischen in Arbeits- und Organisationsabläufe vereinfachen. Wird die soziale Einbettung technischer Lösungen in dieser Weise gehandhabt, handelt es sich oft genug um nicht mehr als den Versuch, durch begleitende Maßnahmen momentane Konflikte nicht zum Tragen kommen zu lassen. Informatikprojekte sind jedoch längerfristig nur dann erfolgreich, wenn sie sowohl die technische Aufgabe angemessen lösen, als auch die beteiligten Personen zu einem Team zusammenfügen, und zwar nicht durch getrennte Aktivitäten, sondern in einem Schritt. Damit wird ein Informatikprojekt in die vorhandenen Handlungszusammenhänge und Wirkungsmechanismen in einem Unternehmen eingebunden. Allgemeiner ausgedrückt bedeutet dieses Vorgehen die Integration von technischen und sozialen Zusammenhängen. Einige der verschiedenen »Blickwinkel«, die in einem Informatikprojekt vorkommen, und die Rollen, die diese »Blickwinkel« einnehmen, lassen sich in das in Kapitel 2 vorgestellte Modell von Stachowiak integrieren.

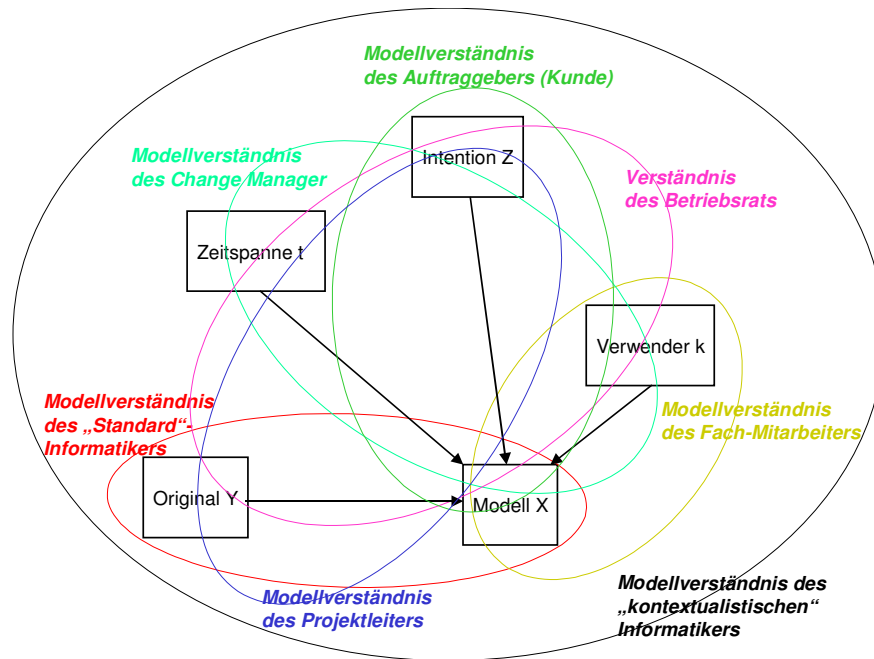


Abbildung 20. Das um zusätzliche Sichern erweiterte Modell Stachowiaks

Die Graphik zeigt, daß je nach Rolle im Projekt unterschiedliche Aspekte der Modellbildung in das Blickfeld treten. Ziel des »kontextualistischen« Informatikers müßte sein, ein an Stachowiak angelehntes Modellverständnis zu realisieren, das heißt nicht nur Original und Modell, sondern auch Verwender, Zeitspanne und Intentionen zu berücksichtigen. Das bedeutet, Kontextualisierungen oder Rekontextualisierungen vorzunehmen. Dieses kann auf verschiedenen Ebenen stattfinden: auf der semantisch-kognitiven Ebene der Erklärung und Interpretation, auf der situativ-praktischen Ebene der experimentellen und technischen Handlung und auf der sozial-interaktiven Ebene der kommunikativen und sozial-symbolischen Aspekte. Ein Ziel der Kontextualisierung ist, die Risiken im Denken und Handeln, die mit bisherigen, dekontextuierenden Verfahren verbunden sind, zu erkennen und ohne Verleugnung mit ihnen umzugehen. (Vgl. Bonß / Hohlfeld / Kollek 1993)

7.1 Die semantisch-kognitive Ebene

Auf semantisch-kognitiver Ebene wird nun auf folgendes eingegangen:

7.1.1 Wissen und Kenntnisse erwerben	Geschichte und Theorie der Informatik (inklusive Paradigmen und deren Herkunft) kennen
	Wissenschaftliche Erkenntnisse jenseits der disziplinären Grenzen und Ergebnisse der Wissenschaftsforschung berücksichtigen
7.1.2 Methoden entwickeln	Methodische Vorgaben für die Anwendung der Informatik entwickeln
	Methoden entwickeln, die die Grenzen verdeutlichen, statt allein an der Leistungsfähigkeit orientiert zu sein
7.1.3 Erwartungen anpassen	Erwartungen an Einheit, Universalität, usw. ändern
	Logik als Hilfsmittel zur Verdeutlichung verstehen
	Risikoskepsis; Technik als Mißerfolgsablauf denken
	Selbstreflexion betreiben
7.1.4 Beispiel	Mögliche Modifikation des Paradigmas »Kalkül« - Unterscheidung Elementar- und Gradaussagen - Unterscheidung Logik und Grammatik - Zwei Reduktionen des Logischen Raums - Anwendung auf Farbenräume (»Logik der Farben«)

Tabelle 27. Handlungsorientierungen auf semantisch-kognitiver Ebene

7.1.1 Wissen und Kenntnisse erwerben (Kontexte erkennen)

In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, daß viele Paradigmen der Informatik aus einem weiteren Bereich als dem gegenwärtig als »Informatik« definierten kamen. Zu ihnen rechnen andere Wissenschaften, aber auch kommerzielle und militärische Praxisfelder. Auf sie wird heute nicht besonders reflektiert. (Vgl. Kapitel 3, 4, 5.) Zwar kann aufgrund der Analyse allein nicht gesagt werden, wie zu handeln ist, und ad hoc stellt sich keinerlei Handlungsmaxime ein, dennoch ist es sinnvoll, die theoretischen und historischen Grundlagen der Informatik zu kennen, um diskutieren zu können, wie diese Grundlagen in eine (Re-)Kontextualisierung einbezogen werden müßten. Es gibt vermutlich kein vorab festzulegendes und eindeutiges »Korrekturprogramm« für die Informatik, aber es ist wahrscheinlich, daß eine Revision der Theorie von Nutzen wäre, die der propagandistischen Wirkung des Turingschen Verfahrens, daß fast alles berechenbar sei, und

dem Glauben an die Elementarsätze entgegenwirkte. In Kapitel 4 wurden die mit der Logik zusammenhängenden Annahmen (Formalisierbarkeit, Vollständigkeit, Entscheidbarkeit) herausgearbeitet, und es wurde gezeigt, daß einige von ihnen – zumindest in ihrer ursprünglichen starken Form – falsifiziert sind. Ohne nun Poppers normatives Methodenverständnis propagieren zu wollen, wäre es zu wünschen, daß die Informatik den Anschluß an die Debatten um induktivistisches und hypothetico-deduktivistisches Wissenschaftsverständnis herstellte. Von der im Anschluß an Kuhn von Feyerabend und anderen durchgesetzten Einsicht, daß es kein methodisches Allround-Programm zur Erkenntnis gibt, könnte auch die Informatik nur profitieren. Das Berücksichtigen von Vielfalt führt nicht zu Pessimismus oder zu irrationalem Verhalten, sondern bietet gerade die Chance, neue Paradigmen zu entwickeln oder Subvarianten explizit zu benennen und Paradigmen wie das Hilbertprogramm und das Mechanistische Weltbild zu überwinden.

Eine Möglichkeit, das Wissen über die Grundlagen der Informatik und ihren gesellschaftlichen Ort zu verbreitern, wäre die Anpassung des Informatik-Curriculums, und zwar in einer Art, die sicherstellt, daß die Kontextualisierung integrierter Bestandteil der Ausbildung ist. Dazu zählt auch die Aufhebung der Lücke zwischen akademischer und betrieblicher Informatik. Die Anregung von Denert (1993), daß Hochschullehrer in die Wirtschaft und Wirtschaftler in die Hochschule gehen sollten, daß also viel mehr Leute »Grenzgänger« werden sollten, ist eine richtige, aber eine in ihrer Dimension gar nicht ausreichende Forderung. Nicht nur die Manager und die Professoren betrifft dies, sondern angesichts der weiter zunehmenden Verbreitung von Informationstechnologien in nahezu alle Lebensbereiche eine sehr viel größere Anzahl von Handelnden/Benutzern. Dies gesagt, stellt sich die Frage, wo diese Kommunikation stattfinden kann? Es ist also nach der Institutionalisierung von Kommunikation in handlungsentlasteten Räumen gefragt, denn gerade die Handlungsorientierung der Informatik ist wie oben ausgeführt ein Garant für verzerrte Kommunikation. Da man nur vernünftig von dem sprechen kann, was nachvollziehbar ist, würden auch hier Kriterien wie die oben genannten der Reichweite, der Dauer usw. zum Tragen kommen. Dies würde zum Beispiel heißen, daß man zwar vernünftig über, nicht aber von großen Informationssystemen sprechen kann, da sie nicht überschaubar sind. Schon unter diesem kommunikativen Gesichtspunkt, der in der skizzierten Perspektive gegenüber dem technisch-instrumentellen Gesichtspunkt gleichrangig wäre, ließe sich ein Argument für kleine Infor-

mationssysteme gewinnen, zu denen auch Alternativen entwickelbar sind. Eine solche Forderung berührt sich mit dem Programm von Siefkes (1993; 1996), ist jedoch nicht mit ihm deckungsgleich, da die Anforderungen an kleine Systeme bei ihm in der Forderung nach einer »ökologischen Orientierung« der Informatik mündet. Hierunter versteht Siefkes, daß Systeme klein werden, »wenn die Beteiligten sie nach ihren materiellen, intellektuellen und emotionalen Bedürfnissen gestalten« (Siefkes 1996, 145). Kleine Systeme im strikten Sinne Siefkes' sind mit den herrschenden Anforderungen von Unternehmen oder Verwaltungen an Informationssysteme nicht kompatibel.

7.1.2 Methoden entwickeln (kontextualisieren)

Die wissenschaftstheoretischen Überlegungen, auf die vor allem in Kapitel 4 eingegangen wurde, haben ergeben, erstens, daß das Verifikationsprogramm des Wiener Kreises nicht funktioniert, zweitens, daß das Falsifikationsprinzip Poppers ebenfalls nicht funktioniert, und drittens, daß es kein methodisches Verfahren für die Aufstellung richtiger Theorien gibt. Es ist kein Verfahren bekannt, mit dem Theoriensicherheit erzeugbar wäre. Wenn man diese wissenschaftstheoretischen Erkenntnisse akzeptiert und wenn man kein handlungsunfähiger Pessimist ist, dann stellt sich die Frage: Wie kann konstruktiv mit diesen Erkenntnissen umgegangen werden?

Es läßt sich zum einen als generelles Konzept ein bescheidener Skeptizismus fordern. Dieser impliziert, daß es keinen »Königsweg« zu Theorien, Paradigmen, usw. gibt. Zum anderen müßten im speziellen Handlungsanweisungen für Informatiker formuliert werden, und zwar in der Praxis, also im kommunikativen, aufgabenbezogenen Arbeitsprozeß.

Für die Bewertung vorhandener oder die Aufstellung von neuen oder modifizierten Modellen, Theorien, Paradigmen usw. können folgende Kriterien verwendet werden, die Eigenschaften von Prozessen oder Strukturen beschreiben.

- Reichweite: Wie weit reicht das Modell, die Theorie, das Paradigma?
- Dauer: Wie dauerhaft ist das Modell, die Theorie, das Paradigma?
- Regel: Inwieweit ist das Modell oder der Prozeß oder die Struktur regelmäßig oder unregelmäßig?

Die bisher in der Informatik entwickelten Methoden, zum Beispiel die in Kapitel 2 diskutierten Softwaretechnikverfahren, orientieren sich fast ausschließlich an der technischen Leistungsfähigkeit. Nicht oder nur selten

werden die Grenzen der Methoden angesprochen. Dieses Verhalten entspricht einem technokratischen, risikounbewußten Umgang, der unverständlich ist, wenn man bedenkt, daß die Methoden der Softwaretechnik gerade zur Behebung von Risiken entworfen wurden. Die in den sechziger Jahren vorliegende Situation wurde, was der damalige Ausdruck »Softwarekrise« wiedergibt, als – erster – Einbruch in das von Optimismus geprägte, fortschrittsgläubige Programm der Informatik wahrgenommen. Es hatte sich herausgestellt, daß die immer komplexeren Softwaresysteme nicht mehr wartbar waren, viele Fehler enthielten und schlechte »Performance« zeigten, und es wurde erkannt, daß die Konsequenzen schlechten Designs, von Instabilität und Diskrepanz zwischen Anforderung und tatsächlicher »Performance« nicht nur »informatikintern«, sondern auf große Bereiche der Gesellschaft Auswirkungen hätten. (Vgl. Naur/Randell 1969)

Die Maßnahmen, die man zur Behebung der Krise vorschlug und einführte, sind heute unter der Bezeichnung »Software Engineering« oder »Softwaretechnik« bekannt. Sie umfassen Vorgehensmodelle für die Entwicklung von Software, Konventionen für die Daten- und Funktionenmodellierung sowie Qualitätskriterien für Informatikprodukte (Software, Modelle, usw.). Zu diesen Qualitätskriterien zählt auch die »Benutzungsfreundlichkeit«. Dieses Kriterium zielt nicht in erster Linie auf die technischen Aspekte eines Informationssystems, sondern auf den Umgang der Menschen, die mit dem System arbeiten sollen oder müssen, mit dem System. Dies eröffnet zwei Perspektiven, eine mit Blick auf die Ergonomie, wobei technische Kriterien zum Teil als DIN-Normen vorliegen, die andere darauf, daß es um ein Arbeitsmittel für Menschen geht und daß deren Anforderungen und Qualifikationen den Ausschlag für die Gestaltung geben sollten. Diesem Ansatz folgt ein Stil informatischen Arbeitens, in dem die in dieser Arbeit schwerpunktmäßig thematisierte Produktionssicht auf die Softwareentwicklung durch eine Designsicht abgelöst wurde. (Vgl. Floyd 1994)

7.1.3 Erwartungen und Möglichkeiten reflektieren

Indem die Informatik gemäß eines Einheitsgedankens und des Paradigmas der Universalität ihre Modelle als universell ansieht, verbaut sie sich selbst die Möglichkeit, differenziertere Modelle der Welt in den Blick zu bekommen. Sie verengt ihren Horizont und erweist sich so als alles andere denn eine Universalwissenschaft. Zu berücksichtigen wäre, daß Modelle

(der Informatik wie die anderer Wissenschaften) immer Reduktionen sind, das heißt zweckorientierte Repräsentationen von Ausschnitten der Welt. Damit erhält die Modellbildung der Informatik ihre Berechtigung und die Modelle werden gleichzeitig in ihre Kontexte (und damit »auf den Teppich«) gestellt. Der Kontext, in den die Modelle gestellt werden, kommt dadurch zustande, daß die Modelle – wie Carnaps Konstitutionssysteme – nach verschiedenen Konventionen entwickelt werden. Obwohl immer verschiedene Modelle möglich sind, wird in einem Informationssystem immer nur ein Modell formuliert. Die Informatik pflegt die Vorstellung, ein ordentlich formulierter Kalkül bilde Welt objektiv ab. Die Gewähr hierfür wird auf die logische Verknüpfung von Daten verlagert, auf der jedes Informationssystem basiert. An die Logik werden damit Erwartungen gerichtet, die diese nicht erfüllen kann. Hans Hahn hat prägnant dargestellt, inwiefern die Logik »nur« ein Hilfsmittel ist:

Wenn es wirklich zutrifft, daß die Sätze der Logik tautologisch sind, daß sie nichts über die Gegenstände aussagen, wozu dient dann überhaupt die Logik?

Die logischen Sätze, an denen wir exemplifizierten, flossen aus den Verabredungen über den Gebrauch des Wortes »nicht« und »oder« (und man kann zeigen, daß das gleiche von allen Sätzen der sogenannten Aussagenlogik gilt). Überlegen wir also zunächst, wozu man die Worte »nicht« und »oder« in die Sprache einführt. Das geschieht wohl deshalb, weil wir nicht allwissend sind. Fragt man mich nach der Farbe des Kleides, das Fräulein Erna gestern trug, so werde ich mich vielleicht an seine Farbe nicht erinnern können; ich kann nicht sagen, ob es rot oder blau oder grün war; aber vielleicht werde ich wenigstens sagen können: »gelb war es nicht«; wäre ich allwissend, so wüßte ich seine Farbe, ich hätte dann nicht nötig, zu sagen: »gelb war es nicht«, sondern könnte etwa sagen: »es war rot«. [...]

Und so haben auch die logischen Sätze, obwohl sie rein tautologisch sind, so hat auch das logische Schließen, obwohl es nichts anderes ist als tautologisches Umformen, für uns Bedeutung deshalb, weil wir nicht allwissend sind. Unsere Sprache ist so gemacht, daß wir bei Behauptung gewisser Sätze andre Sätze implizit mitbehaupten – aber wir sehen nicht sofort, was wir alles so implizit mitbehauptet haben, erst das logische Schließen macht uns das bewußt. (Hahn 1932, 156f.)

Trotz oder wegen der logischen Fundierung ist Skepsis geboten. Skepsis gegenüber der Technik ist in der Informatik allerdings nicht unbekannt, sie wird oft in ironisierend distanzierenden Äußerungen wie »Murphys Gesetzen« formuliert. Ein Beispiel, das von Brunnstein (1990) in einem Vortrag zum Thema »Rechnersicherheit« präsentiert wurde, lautet:

- Fehlertracht von Software: Größere Programme enthalten unerkannte Fehler, und zwar 1 pro 5 bis 10 kB Code.
- Prinzip der größten Gemeinheit: Fehler treten zum ungünstigsten Zeitpunkt auf und verursachen größtmöglichen Schaden.
- Teufelskreis: Fehler müssen korrigiert werden und dabei treten neue Fehler auf...

Diese Art von humorvoller Skepsis führt in der Praxis leider selten dazu, die eigene Arbeit zu reflektieren und damit auch eine gewisse Distanz zur eigenen Tätigkeit einzunehmen, obwohl nur so Bestandteile, Strukturen, Zusammenhänge sowie Gründe, Ursachen, Wirkungen und Risiken erkannt und bewertet werden können. Zur Selbstreflexion gehört auch, die Grenzen der eigenen Sicht zu sehen und zu formulieren. Dies umfaßt das Wissen über die Unvollständigkeit und Begrenztheit jeder Erklärung, die Anerkennung der Existenz grundsätzlich anderer Positionen, wie sie von Feyera-bend oder Whorf beschrieben wurden, und auch das Verständnis dafür, daß es andere kulturell determinierte Wahrnehmungen und Beschreibungen der Welt gibt.

Im speziellen sollte man zum Beispiel berücksichtigen, daß ein Informationssystem *nicht* oder *anders als geplant* funktionieren könnte, weil der Kontext, in welchen es implementiert wird, anders ist, als angenommen wurde. Brauer / Brauer schreiben zu ähnlichen Erfahrungen:

Änderungen von Aufgabenstellungen entstehen häufig schon allein dadurch, daß sich erst im Laufe längerer Zusammenarbeit zwischen Auftraggeber, Auftragnehmer und künftigem Nutzer genauer festlegen läßt, was eigentlich nötig, sinnvoll und machbar ist. Dies ist eine in der Informatik, insbesondere der Anwendungssystementwicklung sehr bekannte Erscheinung. Bisher versuchte man jedoch, solche »Nachbesserungen« der Aufgabenstellung zu vermeiden durch aufwendige Systemanalyse, strenge Einhaltung von Anforderungsdefinitionsverfahren etc. Heute merkt man immer mehr, daß dies gar nicht immer funktionieren kann. Denn aus nichttrivialen Systemen lassen sich Teile i.a. nicht sauber herauspräparieren, gesondert behandeln

und durch verhaltensäquivalente ersetzen, weil das Herausnehmen zur Zerstörung vieler unbeachteter Zusammenhänge führt, was sich dann erst später als Fehlverhalten des Systems äußert. Als Beispiele seien nur die Planung einer neuen Straße, die Änderung eines Gesetzes oder die Einführung eines DV-Systems in eine Organisation erwähnt. (Brauer / Brauer 1995)

Bonß hat deutlich gemacht, daß Sicherheit sowieso nur in Ausnahmefällen die Abschaffung von Unsicherheit ist. Es kann nämlich allenfalls um die Schaffung von historisch und pragmatisch gerechtfertigten Erwartungssicherheiten gehen.²⁶⁰ Der Begriff »Erwartungssicherheit« benennt »die Umdefinition von (nicht handhabbarer) Kontingenz in (handhabbare) Komplexität« (Bonß 1995, 90). Die Vorstellung eines Sicherheitsstrebens im Sinn von Erwartungssicherheiten ist relativ.

Denn mit der Rede von den Erwartungssicherheiten rückt das Sicherheitsproblem in einen neuen Kontext; es bezieht sich nicht länger auf deskriptiv unverrückbare und eindeutige, sondern auf normativ unterstellte soziale Gewißheiten. Durch diese Konzeptualisierung wird Sicherheit selbst zu einer sozialen Konstruktion – ein Punkt, der vor allem in der Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlich-technischen Sicherheitskonzeptionen von Bedeutung ist. Während letztere stets mit eindeutig objektivierbaren Sicherheitsgrenzen operieren, die subjekt- und situationsunabhängig existieren, sind Erwartungssicherheiten subjekt- und situationsbezogene Konstrukte, die im Prinzip akzeptiert oder verworfen werden können. (Bonß 1995, 90f.)

7.1.4 Eine mögliche Modifikation des Paradigmas »Kalkül«

In diesem Abschnitt wird nun ein Beispiel für ein Paradigma auf semantisch-kognitiver Ebene ausführlich vorgestellt, und zwar eine Modifikation der Kalkülvorstellung.

Ausgangspunkt ist die Diskussion über die Annahme der »Unabhängigkeit der Elemente« in einem Kalkül.²⁶¹ Diese Annahme geht auf den logischen Atomismus von Russell und den *Tractatus logico-philosophicus* von

²⁶⁰ In Abschnitt 1.2.3 wurde dies am Beispiel der Erwartung, daß die Sonne morgen wieder aufgehen werde, ausgeführt.

²⁶¹ Vgl. Abschnitt 2.2.19.

Wittgenstein (1918) zurück.²⁶² Wittgenstein selbst widerlegte 1929 in »Some Remarks on Logical Form« dieses Paradigma, indem er feststellte, daß es Aussagen gibt, die – anders als es der logische Atomismus annahm – elementar *und* voneinander abhängig sind. Es handelt sich dabei um Gradaussagen, wie Temperatur- oder Farbsätze.

In die Abbildung solcher Phänomene in logische Formen gehen – so Wittgenstein – auch der »Maßstab« oder die »Koordinaten« ein. Das Besondere daran ist, daß zum einen ein Grad einer solchen Eigenschaft alle andere ausschließt und daß zum anderen diese Erkenntnis nicht auf Erfahrung beruht, sondern in gewisser Weise eine Tautologie ist. Denn in der Alltagswelt wird eine Aussage, zum Beispiel über die Temperatur: »Es sind 25°C im Schatten«, als vollständige Beschreibung verstanden, weil gleichzeitig und implizit angenommen wird, daß es weder 30°C, noch 10°C usw. sind. Eine solche Aussage unterscheidet sich von der Aussage: »Im Kühlschrank sind zwei Wurstenden, ein Stück Käse und sonst nichts«. In diesem Fall macht der Zusatz »und sonst nichts« den Satz komplett und erlaubt eine vollständige Analyse des Satzes in ein logisches Produkt aus Einzelaussagen. Dies ist bei der Temperaturenaussage nicht der Fall. Hier enthält der Satz die gleiche Vielfalt wie der Maßstab, der ihm zugeordnet ist. (Wittgenstein 1929a, 167f.)

Gradaussagen widersprechen sich nicht, sie können sich aber ausschließen. Für solche voneinander abhängigen Elementarsätze und ihre gültigen Verknüpfungen bietet die logische Notation keine Formulierungsmöglichkeit. (Wittgenstein 1929a, 170f.)

Inwiefern – ausgehend von diesem Ansatz – eine Interpretation der Welt als Kalkül möglich ist, die eine Vielfalt von Welt(en) zuläßt, soll nun anhand der von Gerd Held erarbeiteten »Logik der Farben« erläutert werden.²⁶³

Zunächst sind zwei Gedanken besonders hervorzuheben: erstens der Begriff der logischen Struktur der Phänomene und zweitens die Möglichkeit der Reduktion von Wahrheitstafeln.

Der Gedanke, daß die logische Untersuchung der Phänomene die Grundlage des systematischen Gebrauchs eines Wortes oder eines Satzes festlegt, ist neu im Vergleich zum Tractatus, in dem es heißt: »Wenn ich die Elementarsätze nicht a priori angeben kann, dann muß es zu offenbarem Unsinn führen, sie angeben zu wollen.« (TLP 5.5571) Einen Zusammen-

²⁶² Vgl. Kapitel 4.

²⁶³ Ich danke Gerd Held, der mir für diese Arbeit sein unveröffentlichtes Manuskript über »Logik der Farben« zugänglich gemacht hat, für seine Großzügigkeit.

hang zwischen Phänomen und logischem Symbolismus herzustellen, heißt für Wittgenstein, eine Methode für die Projektion der Phänomene in eben diesen Symbolismus anzugeben. Die Methode besteht darin, eine Logik des Maßstabs zu entwickeln. Damit wird gewährleistet, daß die Erfahrungssätze nicht unabhängig voneinander, sondern nur im Zusammenhang mit anderen Sätzen derselben Art verstanden werden können. Es gibt offensichtlich Sätze, die wie Elementarsätze aussehen, die aber ohne logische Verknüpfung mit anderen Sätzen derselben Art nicht denkbar sind. Wittgenstein zeigt anhand von Farbsätzen, daß diese elementar *und* voneinander abhängig sind und gibt damit die Vorstellung von der Unabhängigkeit der Elementarsätze auf. (Vgl. TLP 2.061; Wittgenstein 1929a, 168)

Die Einführung eines Maßstabs und damit eines Zusammenhangs zwischen den Elementarsätzen hat folgende Konsequenz: »die Tatsache, daß eine Erfahrung dem Maßstab widerspricht, behauptet weder, daß die Erfahrung widersprüchlich ist, noch daß der Maßstab widersprüchlich ist, sondern lediglich, daß dieser Erfahrung ein anderer Maßstab entspricht.« (Held unv. Man., 16f.) Die Elementaraussagen werden zu »Gradaussagen« und mit der Wahl des Maßstabs ist zugleich eine Entscheidung für oder gegen einen Teilbereich des logischen Raums getroffen. Denn die Basis des Kalküls bilden nun nicht mehr die Elementarsätze, sondern der jeweilige Maßstab. Dieser stellt eine Reduktion des logischen Raums dar:

Die beiden Erfahrungssätze »Der Fleck P zum Zeitpunkt T ist rot« (=RPT) und »Der Fleck P zum Zeitpunkt T ist blau« (=BPT) widersprechen sich nicht, sondern sie schließen sich aus.

RPT	BPT	RPT $\wedge$ BPT
W	W	W
W	F	F
F	W	F
F	F	F

Tabelle 28. RPT $\wedge$ BPT

Die Konjunktion beider Sätze ergeben nicht einen falschen Satz, sondern einen unmöglichen. Aus diesem Grund ist die erste Zeile der Wahrheitstafel für die Konjunktion der beiden Sätze logisch unmöglich und sie kann gestrichen werden.

RPT	BPT	$RPT \wedge BPT$
~~W~~	~~W~~	~~W~~
W	F	F
F	W	F
F	F	F

Tabelle 29. $RPT \wedge BPT$: Streichung der ersten Zeile

Mit dem Streichen der Wahrheitsbedingungen werden zwei Dinge erreicht, einerseits läßt sich damit das Verhältnis von Grammatik und Logik genauer bestimmen, andererseits läßt sich – darauf basierend – die Beziehung von Logik und Empirie neu formulieren.

Logik und Grammatik sind nicht deckungsgleich. Eine logische Grammatik wird aus der Logik im Sinne möglicher Aussagenverknüpfungen abgeleitet und kann sich nur eingeschränkt im Sinne reduzierter Wahrheitstafeln auf Logik beziehen. Das Verhältnis von Logik und Erfahrung ergibt sich aus dieser Reduktion: »Insofern nämlich Logik insgesamt das ›Universe of Discourse‹ sinnvollen Sprechens darstellt, fungiert jedes logische System [...] gewissermaßen als Horizont möglicher Erfahrung, d.h. als systematische Zusammenfassung der in ihr möglichen Empirien bildet sie das Konzept möglicher Erfahrung«. (Held unv. Man., 22) Genau damit erhält die Welt eine Ordnung, die jedoch ein »es könnte auch anders sein« gewährleistet. So bewahrt Wittgenstein eine Vielfalt von Welt(en) und begrenzt die Möglichkeiten nicht.

Wie eine Wahrheitstafel reduziert werden kann und welche Folgen das für alle anderen Funktionen im logischen Kalkül hat, zeigt Held für die Aussagenlogik. Ausgangspunkt für die Reduktion ist der gesamte logische Raum, das heißt das System M_n^m . Dieses stellt die Kombination von n elementaren Zeichen (zum Beispiel »w« und »f«) m -ter Ordnung, das heißt die Anzahl der Basen der Kombinationen (zum Beispiel der Elementarsätze) dar. Für M_2^2 sind folgende Kombinationen möglich:²⁶⁴

²⁶⁴ Vgl. Abschnitt 4.1.5.

P	W	W	F	F	
Q	W	F	W	F	
1	W	W	W	W	Tautologie
2	W	W	W	F	Alternation
3	W	W	F	W	Replikation
4	W	W	F	F	Präpendenz
5	W	F	W	W	Implikation
6	W	F	W	F	Postpendenz
7	W	F	F	W	Äquivalenz
8	W	F	F	F	Konjunktion
9	F	W	W	W	Exklusion
10	F	W	W	F	Antivalenz
11	F	W	F	W	Postnonpendenz
12	F	W	F	F	Nonimplikation
13	F	F	W	W	Pränonpendenz
14	F	F	W	F	Nonreplikation
15	F	F	F	W	Rejektion
16	F	F	F	F	Kontradiktion

Tabelle 30. Wahrheitsfunktionen

Dargestellt als Hasse-Diagramm²⁶⁵ sieht die Matrix wie folgt aus:

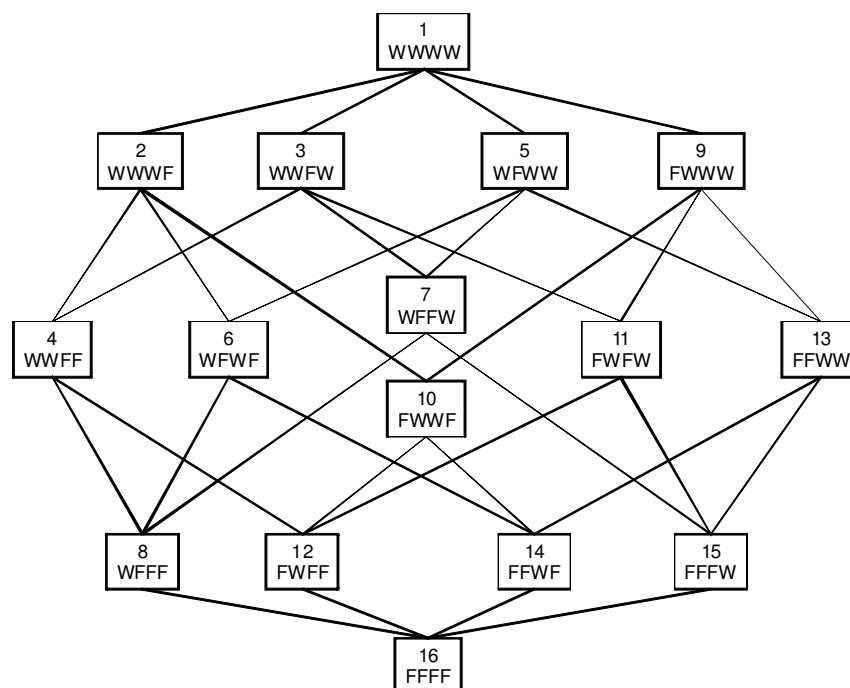


Abbildung 21. Wahrheitsfunktionen als Hasse-Diagramm

Ein Hasse-Diagramm veranschaulicht, zu welcher Wahrheitsfunktion man kommt, wenn ein einzelner Wahrheitswert in einer Wahrheitsfunktion

²⁶⁵ Nach dem Mathematiker Helmut Hasse (1898-1979) benannt.

durch einen anderen ersetzt wird. Zum Beispiel gelangt man von (2) (WWW) zu (6) (WFW), indem der zweite Wahrheitswert »W« durch »F« ersetzt wird.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, den logischen Raum zu reduzieren.

– *Streichung eines gesamten Matrixbereichs.*

Dieses Verfahren schlägt Wittgenstein für die Farbsätze vor, wenn er die erste Zeile der Konjunktion $RPT \wedge BPT$ streicht, weil sie eine unmögliche Kombination darstellt (siehe oben). Die Tabelle der Wahrheitsfunktionen sieht dann wie folgt aus:

P	~~W~~	W	F	F	
Q	~~W~~	F	W	F	
1	~~W~~	W	W	W	Tautologie
2	~~W~~	W	W	F	Alternation
3	~~W~~	W	F	W	Replikation
4	~~W~~	W	F	F	Präpendenz
5	~~W~~	F	W	W	Implikation
6	~~W~~	F	W	F	Postpendenz
7	~~W~~	F	F	W	Äquivalenz
8	~~W~~	F	F	F	Konjunktion
9	F	W	W	W	Exklusion
10	F	W	W	F	Antivalenz
11	F	W	F	W	Postnonpendenz
12	F	W	F	F	Nonimplikation
13	F	F	W	W	Pränonpendenz
14	F	F	W	F	Nonreplikation
15	F	F	F	W	Rejektion
16	F	F	F	F	Kontradiktion

Tabelle 31. Reduktionsmatrix der Wahrheitsfunktionen

Indem die Wahrheit der Konjunktion (8) bestritten wird, wird die Wahrheit ihres Negats, der Exklusion (9), behauptet. In dieser Reduktionsmatrix wiederholen sich die Wahrheitswerte wie folgt:

(1) (= WWW) entspricht (9)

(2) (= WFW) entspricht (10)

usw.

Im Hasse-Diagramm wird der logische Raum dementsprechend reduziert:

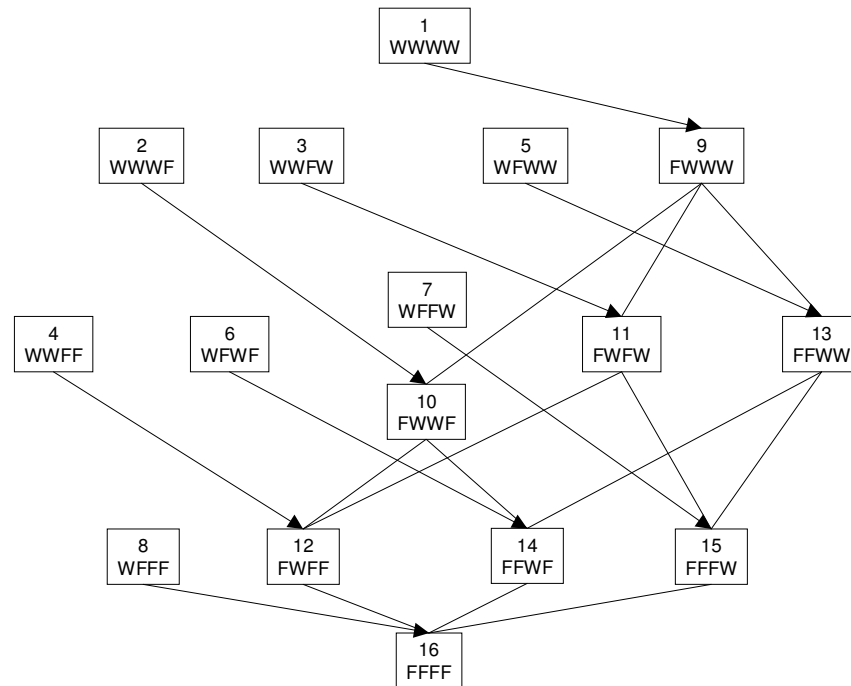


Abbildung 22. Reduktionsmatrix bei Streichung einer Spalte (Hasse-Diagramm)

Mit der Entscheidung für die Streichung einer Spalte kann der Fall eintreten, daß dadurch die Wahrheit anderer Beziehungen mitbehauptet wird. Bei dieser Art von Reduktion bleibt jedoch ein logischer Raum erhalten, der in sich konsistent ist.

– *Streichung einer ganzen Wahrheitsfunktion.*

Die Alternative, den logischen Raum zu reduzieren, indem man eine Wahrheitsfunktion als Ganzes streicht, führt zu einem deformierten logischen Raum, der als Hasse-Diagramm – bei Streichung der Konjunktion (8) – wie folgt aussehen würde:

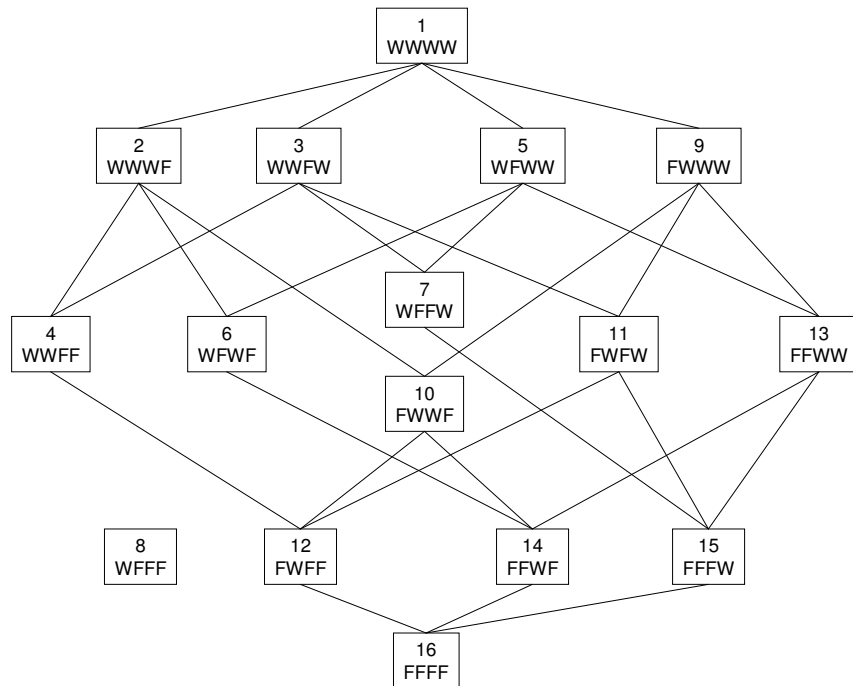


Abbildung 23. Reduktionsmatrix bei Streichung einer einzelnen Funktion (Hasse-Diagramm)

Die Streichung des logischen Raumpunkts (Konjunktion (8)) bedeutet, die Wahrheitsfunktionen als isolierte Funktionen zu interpretieren. Ein so reduzierter logischer Raum enthält eine willkürliche Streichung, die die systematischen Beziehungen zwischen den Wahrheitsfunktionen ignoriert.

Für die Aufstellung eines logischen Farbenraumes gemäß der ersten Variante entwickelt Held eine Reduktionsmatrix RM_2^3 (234).

Ausgangspunkt ist die gesamte Matrix:

P	W	W	W	W	F	F	F	F
Q	W	W	F	F	W	W	F	F
R	W	F	W	F	W	F	W	F
1	W	W	W	W	W	W	W	W
...								
234	F	F	F	W	F	W	W	F
...								
256	F	F	F	F	F	F	F	F

Tabelle 32. Reduktionsmatrix RM_2^3 (234)

Die Funktion (234) entspricht der Antivalenz in der binären Matrix und repräsentiert die Formel:

$$(P \vee Q \vee R) \wedge (\neg P \vee \neg Q) \wedge (\neg Q \vee \neg R) \wedge (\neg P \vee \neg R)$$

Streicht man in der Gesamtmatrix die unmöglichen Verknüpfungen, das heißt die »F«-Spalten, dann folgt daraus:

P	~~W~~	~~W~~	~~W~~	W	~~F~~	F	F	~~F~~
Q	~~W~~	~~W~~	~~F~~	F	~~W~~	W	F	~~F~~
R	~~W~~	~~F~~	~~W~~	F	~~W~~	F	W	~~F~~
1	~~W~~	~~W~~	~~W~~	W	~~W~~	W	W	~~W~~
...								
234	~~F~~	~~F~~	~~F~~	W	~~F~~	W	W	~~F~~
...								
256	~~F~~	~~F~~	~~F~~	F	~~F~~	F	F	~~F~~

Tabelle 33. Reduktionsmatrix RM_2^3 (234), mit Streichung der unmöglichen Verknüpfungen

Analog zu der oben angeführten binären Matrix wiederholen sich die Wahrheitswerte von Funktionen:

(1) (= WWW) entspricht (2), (9), (10), (33), (34), (41), (42), (65), (66), (73), (74), (97), (98), (105), (106), (129), (130), (137), (138), (161), (162), (169), (170), (193), (194), (201), (202), (225), (226), (233), (234).

(3) (= WWF) entspricht (4), (11), (12), (35), (36), (43), (44), (67), (68), (75), (76), (99), (100), (107), (108), (131), (132), (139), (140), (163), (164), (171), (172), (195), (196), (203), (204), (227), (228), (235), (236).

(5) (= WFW) entspricht (6), (13), (14) usw.

(7) (= WFF) entspricht (8), (15), (16), usw.

(17) (= FWW) entspricht (18), (25), (26), (49), (50), (57), (58), (81), (82), (89), (90), (113), (114), (121), (122), (145), (146), (153), (154), (177), (178), (185), (186), (209), (210), (217), (218), (241), (242), (249), (250).

(19) (= FWF) entspricht (20), (27), (28), usw.

(21) (= FFW) entspricht (22), (29), (30), usw.

(23) (= FFF) entspricht (24), (31), (32), usw.

Damit ergibt sich eine Matrix mit acht Funktionen:

P	W	F	F
Q	F	W	F
R	F	F	W
1 ⁺	W	W	W
2 ⁺	W	W	F
3 ⁺	W	F	W
4 ⁺	W	F	F
5 ⁺	F	W	W
6 ⁺	F	W	F
7 ⁺	F	F	W
8 ⁺	F	F	F

Tabelle 34. Reduktionsmatrix RM_2^3 (234), nach Streichung der unmöglichen Verknüpfungen

In dieser Reduktionsmatrix gilt:

Wenn

$$4^+ = F_1$$

$$6^+ = F_2$$

$$7^+ = F_3$$

dann

$$1^+ = F_1 \vee F_2 \vee F_3 = T \quad (T = \text{Tautologie})$$

$$8^+ = F_1 \wedge F_2 \wedge F_3 = K \quad (K = \text{Kontradiktion})$$

$$2^+ = F_1 \vee F_2$$

$$3^+ = F_1 \vee F_3$$

$$5^+ = F_2 \vee F_3$$

F_1, F_2, F_3 können wegen ihrer formalen Bestimmung als elementare Wahrheitsfunktionen auch als Primärfarben (PF) gedeutet und der so aufgestellte logische Raum kann wie folgt interpretiert werden:

1. Die Primärfarben F_1, F_2 , und F_3 sind voneinander unabhängig und füllen den ganzen Farbenraum aus, denn $F_1 \vee F_2 \vee F_3$ ist ein wahrer Satz.
2. Die Primärfarben schließen sich gegenseitig aus, denn $F_1 \mid F_2$, $F_1 \mid F_3$ und $F_2 \mid F_3$ sind wahre Sätze, aber sie widersprechen sich nicht. Denn zwar führt die Konjunktion zweier PF zur Kontradiktion (eben zufolge der grundsätzlichen Annahme $F_a \mid F_b$, daß zwei unabhängige Farben nicht zugleich dieselbe Stelle einnehmen können), aber sie widersprechen sich nicht in dem Sinne, daß sie sich gegenseitig negieren.²⁶⁶
3. Das Negat einer PF ist selbst keine PF, sondern wird erst durch die Alternation der jeweils beiden anderen PF gebildet, also $\neg F_1 = F_2 \vee$

²⁶⁶ Die Formel $F_1 \mid F_2$ bezeichnet die Exklusion. Sie kann auch geschrieben werden als $\neg F_1 \vee \neg F_2$. (Nicht beides F_1 und F_2) [B.C.]

F_3 , $\neg F_2 = F_1 \vee F_3$ und $\neg F_3 = F_1 \vee F_2$ sind wahre Sätze.

4. Sofern mit der Antivalenz $F_a \neq F_b$ angenommen wurde, daß in einem derart konstruierten Raum alle sinnvollen Satzzeichen (d.h. solche, die weder T noch K sind) auch eine Farbe repräsentieren, müssen die Negate der PF als sinnvolle Satzzeichen selbst wieder Farben sein. Da sie zufolge der alternativen Verknüpfung zweier PF zustande kommen, können sie als Sekundärfarben (SF) bezeichnet werden.

5. Die Sekundärfarben sind nicht unabhängig, denn die Konjunktion zweier SF führt nicht zum Widerspruch, sondern zu einer PF, nämlich zu der Farbe, die an beiden Alternativen beteiligt ist. (z.B. $(F_1 \vee F_2) \wedge (F_2 \vee F_3) = F_2$). Die Alternation zweier SF führt zur Tautologie, da an deren Alternation alle PF beteiligt sind.

6. Der Widerspruch zwischen PF und SF im Sinne von Negation soll im Unterschied zum Widerspruch aufgrund von $F_a \mid F_b$ komplementär genannt werden, denn die Alternation einer PF und ihrem Negat erfüllt den ganzen Farbenraum.

7. Die Verknüpfung zweier Farben in diesem Raum mit dem Ergebnis einer neuen Farbe kann Mischung [...] zweier Farben genannt werden. Die konjunktive Mischung zweier PF führt danach zu keiner Farbe (Kontradiktion), deren alternative Mischung zu einer SF. Die konjunktive Mischung von PF und SF hat wiederum PF oder, wenn SF und PF komplementär sind, keine Farbe zur Folge. Die alternative Mischung beider ergibt entweder die SF oder, wenn PF und SF komplementär sind, alle Farben. Die konjunktive Mischung zweier SF hat die gemeinsame PF, die alternative Mischung alle Farben zum Ergebnis.

(Held unv. Man., 48ff.)

Welche konkreten Farben hier als Primärfarben eingesetzt werden, ist gleichgültig, denn eine daraus resultierende Nichtübereinstimmung der Farbsätze mit der Erfahrung bedeutet nur, daß die Bezeichnung der Skalen des Maßstabs entgegen der Erfahrung erfolgte, nicht aber, daß die Skaleneinteilung falsch ist.

Wenn man, wie Philipp Otto Runge (1737-1825) in seiner »Farben-Kugel« (1810) vorschlägt, als Primärfarben »gelb«, »rot« und »blau« annimmt, so ergibt sich folgende Interpretation des logischen Farbenraumes:

Sei $F_1 = \text{rot}$, $F_2 = \text{gelb}$, $F_3 = \text{blau}$
dann
 $F_1 \vee F_2 = \text{orange}$
 $F_1 \vee F_3 = \text{violett}$
 $F_2 \vee F_3 = \text{grün}$
 $1^+ = \text{alle Farben} = \text{schwarz}$
 $8^+ = \text{keine Farbe} = \text{weiß}$

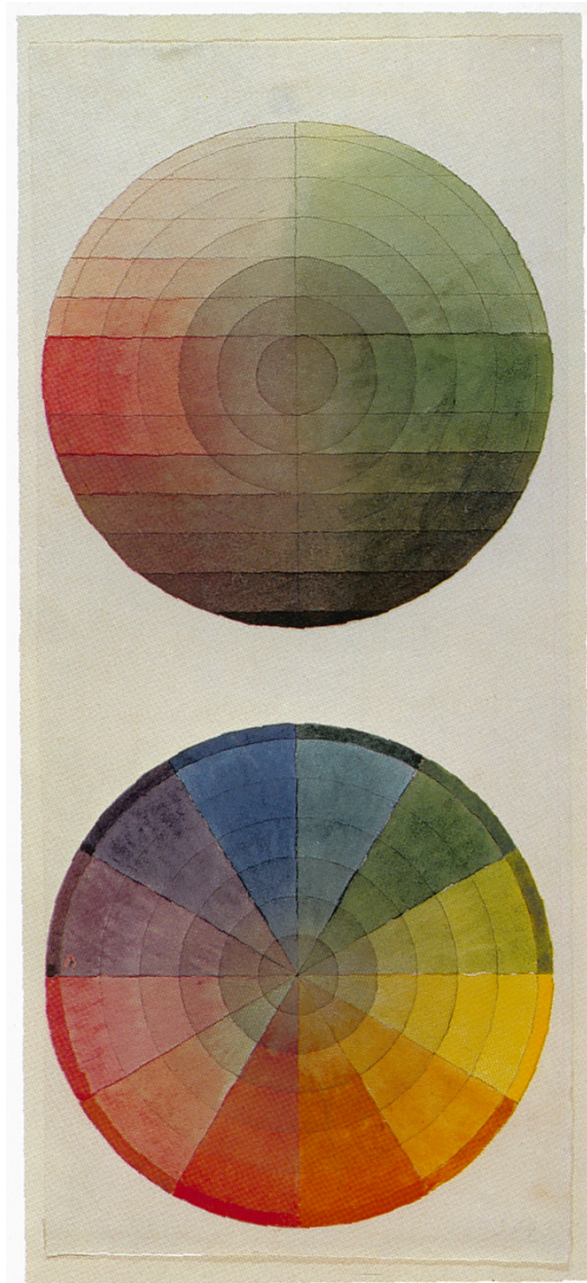


Abbildung 24. Philipp Otto Runge – Quer- und Längsschnitt aus den Studien zur Farbenkugel (Hofmann 1977, 68)

Schwarz und weiß bilden hier die Grenzen des Farbenraumes. Held zeigt also, daß ein logischer Raum mit voneinander abhängigen Sätzen herstellbar

ist, der in sich konsistent ist, und entwickelt – als Anwendungsbeispiel – eine Farbenlogik mit drei Primärfarben. In Bezug auf die Farbenlogik geht er auch auf den Einwand ein, daß es nicht nur drei, sondern vier Grundfarben gibt: rot, gelb, blau und grün, wie Wittgenstein annahm:

Was uns mißtrauisch machen kann, ist, daß manche drei Grundfarben zu erkennen glaubten, manche vier. Manche hielten dafür, daß Grün eine Zwischenfarbe von Blau und Gelb sei, und mir, z.B., kommt das falsch vor, auch abgesehen von jeder Erfahrung.

Blau und Gelb, sowie Rot und Grün, erscheinen mir als Gegensätze – aber das mag einfach daher rühren, daß ich gewöhnt bin, sie im Farbkreis an entgegengesetzten Punkten zu sehen. (Wittgenstein 1950/1951, 45)

Held weist nach, daß ein logischer Raum mit vier Satzzeichen M_2^4 genauso konsistent ist, wie der oben angeführte Raum mit drei Satzzeichen RM_2^3 (234). Allerdings ergeben sich bei der Anwendung auf vier Farben $F_1 = \text{rot}$, $F_2 = \text{gelb}$, $F_3 = \text{blau}$ und $F_4 = \text{grün}$ Probleme.

Werden nämlich »rot« und »grün« bzw. »blau« und »gelb« als komplementär verstanden, dann sind sie nicht mehr unabhängig, so daß sich der Raum auf zwei primäre Farben und ihre Negate reduziert. Das ist aber genau der Fall von RM_2^2 (9). [...]

Andererseits, wenn man die vier Farben als nicht-komplementär, d.h. unabhängig, und als elementare Satzzeichen im Raum von RM_2^4 (x) versteht, dann ergibt sich das Dilemma, daß z.B. »grün« in zweifacher Weise vorkommt, einmal als Primärfarbe und zum anderen als Sekundärfarbe von »blau« und »gelb« im Sinne einer subtraktiven Mischung. (Held unv. Man., 52f.)

An diesem Dilemma wird auch deutlich, daß Logik Erfahrung korrigieren kann. Nicht in dem Sinne, daß sie diese als falsch erwiese, sondern indem sie deren Widersprüchlichkeit aufweist. Wenn man annimmt, daß es Grundfarben und Zwischenfarben gibt, die zusammen den Farbraum bilden, und wenn man – wie Wittgenstein – weiterhin darauf rekurriert, sich Grün nicht als Zwischenfarbe vorstellen zu können, dann wird diese auf Wahrnehmung beruhende Erfahrung durch das doppelte Vorkommen von Grün im logischen Farbraum ja nicht beseitigt, es wird aber gezeigt, welche Konsequenz ihr innewohnt, nämlich daß ein Farbraum entsteht, der, anders als der mit

drei Grundfarben aufgebaute, nicht konsistent ist. Im Anschluß besteht dann die Möglichkeit, Farbgargumente auf einer Entscheidung aufzubauen.

Die hier dargestellte Abbildung voneinander abhängiger Sätze durch Reduktion logischer Räume, ergibt eine Möglichkeit, die Welt als Kalkül zu interpretieren, und zwar in einer ungeahnten Vielfalt. Dies bedeutet eine Modifikation der Kalkülvorstellung: Die Logik bildet den Rahmen für Erfahrung. Erfahrung ist nur möglich innerhalb der Logik. Das entspricht Wittgensteins im *Tractatus* formulierten Grundsatz, daß die Logik vor der Erfahrung ist. Die Logik stellt keine Einschränkung der Erfahrung dar, sondern im Gegenteil, sie ermöglicht eine Vielfalt von Erfahrungen. Eine Erfahrung bezieht sich immer auf einen Teilbereich des logischen Raums. Ein solcher Teilbereich ist der Maßstab, an den die Wirklichkeit angelegt wird. (Vgl. TLP 2.1512) Der Maßstab kann gewechselt werden, wobei die Art des Wechsels nicht individuell, sondern durch pragmatische Aspekte, die unter anderem kulturell bedingt sind, bestimmt wird. Bemerkenswert ist, daß der Mensch immer den gesamten logischen Raum »mitdenkt«, denn die Streichungsregeln betreffen jeweils einen Teilbereich des logischen Raums, nicht eine einzelne logische Funktion. Die Zeichenverarbeitung in einem Computer dagegen geschieht durch die Anwendung einzelner logischer Funktionen, wobei die Zeichen als voneinander unabhängige Elemente betrachtet werden. Die Streichung eines Teilbereichs des logischen Raums in der oben angeführten Art und der Wechsel von einem Maßstab zu einem anderen sind im Computer nicht vorgesehen.

7.2 Die situativ-praktische Ebene

Auf der situativ-praktischen Ebene werden folgende Bereiche angesprochen:

7.2.1 Paradigmen und Risiken explizit machen	Unsicherheiten aufzeigen und Entscheidung für eine Lösung treffen
	Grenzen der Logik aufzeigen
	Explizitmachen der Voraussetzungen, der Wahlfreiheit, der Entscheidungskriterien
	Entscheidungen transparent machen
7.2.2 Modelle kontextualisieren	Modelle (re)kontextualisieren und Modellverständnis erweitern
	Ein den Anforderungen angepaßtes Verfahren wählen (prüfen, ob der Entstehungskontext zum Anwendungskontext paßt)
7.2.3 Alternativen entwickeln	Kleine, überschaubare Systeme herstellen
	Deautomatisierung als eine Möglichkeit vorsehen
	Mut zum Wegwerfen entwickeln
	Vorsicht mit Musterbeispielen
7.2.4 Vielfalt erhalten	Nach Strukturen (Reichweite, Dauer, Regelmäßigkeit / Regelmäßigkeit) fragen
	Stabilität und Flexibilität zugleich anstreben
7.2.5 Beispiel	Ansätze für ein IT-Risikomanagement - Gründe für IT-Risikomanagement - Umfang von IT-Risikomanagement - Risikoobjekte - Vorschlag für ein Risikomodell

Tabelle 35. Handlungsorientierungen auf situativ-praktischer Ebene

7.2.1 Paradigmen und Risiken explizit machen

Im klassischen, seit Descartes in der Wissenschaft eingeführten Modell der »absoluten Rationalität« sind die geforderten Ziele: Optimierung von Sicherheit, Eindeutigkeit, Komplexität und Kontextinvarianz. Durch den Fortschritt der Forschung und die Ansammlung von Wissensbeständen sollen immer bessere Lösungen und genauere Berechnungen erlangt werden. So gibt es noch heute Vertreter der absoluten Rationalität, die behaupten, daß Kernkraftwerke langfristig immer sicherer werden und daß die For-

schung zu größerer Sicherheit und steigender Risikobeherrschung führe. (Vgl. Bonß 1995, 295, 306)

Im Bereich komplexer Informationssysteme sind Testverfahren und Verlässlichkeitsbewertungen lediglich Versuche, Risiken berechenbar und damit beherrschbar zu machen, ohne zu reflektieren, daß dies nicht zu absoluter Sicherheit führt. So wird zum Beispiel von Erwin Thurner, Mario Dal Cin und Winfried Schneeweiß (1998) vorgeschlagen: Wenn die Bewertungskenngrößen für einzelne Komponenten bekannt sind, wird nach der Gesamtverfügbarkeit des Systems gefragt, und umgekehrt wird nach der Zuverlässigkeit einzelner Komponenten gefragt, wenn eine bestimmte Verfügbarkeit erreicht werden soll. Weiterhin wird die Frage nach den Auswirkungen von Systemänderungen auf die Verfügbarkeit gestellt. Immerhin wird darauf hingewiesen, daß es wichtig sei, eine möglichst vollständige Liste der unerwünschten Ereignisse zu haben, um die Berechnung der Zuverlässigkeit durchführen zu können. Es wird aber nicht darauf hingewiesen, daß diese Liste dazu dienen könnte, eine Entscheidung für oder gegen das Risiko zu treffen.

Auch das von Boehm vorgeschlagene Spiralmodell für die Softwareentwicklung, das in jeder Windung der Spirale eine Risikoanalyse und Risikohebung enthält, genügt nicht. Es macht zwar auf Risiken aufmerksam, behandelt sie jedoch im herkömmlichen Sinn als behebbar. (Vgl. Boehm 1988, 61-72)

Beide genannten Aspekte richten sich vorwiegend auf Binnenorganisation und Entwicklung der Systeme, berücksichtigen hingegen nicht oder nur sekundär die Umweltbeziehungen. Bei Risikoanalyse sollte nicht nur die Innensicht Berücksichtigung finden. Risiken, die systemintern handhabbar sind, sind es nicht zwangsläufig auch in ihrer Außenwirkung. Es ist aber zu beachten, daß Umweltbeziehungen gerade in Bereichen mit höchsten Risiken (AKW, SDI) kaum praktisch überprüfbar sind. Sicherheit ist vielfach nicht durch technische Mittel zu erreichen.

Werden Umweltbeziehungen thematisiert, dann vorzugsweise unter Gesichtspunkten des Datenschutzes und der Datensicherheit. Aber der Schutz von Informationssystemen vor unerwünschten Zugriffen wird nur relativ größer dadurch, daß neben User Id und Password zusätzlich eine Secure Id (zum Beispiel eine Ziffernfolge, die jede Minute mit einem Zufallsgenerator neu erzeugt wird und die mit einer im Rechner erzeugten Ziffernfolge übereinstimmen muß) zu erfassen ist. Außerdem ist bei solchen technischen Lösungen zu bedenken, daß es sich selbst aufhebende Lösungen gibt. Dies ist

ein Problem, das am Beginn des 20. Jahrhunderts unter dem Terminus der *complexion illusionaire*²⁶⁷ bekannt war. Als sicher können heute letztlich nur Verschlüsselungen von mehr als 128 Bits gelten, weil zu deren Entschlüsselung der Rechenaufwand immens ist und praktisch nicht bewerkstelligt werden kann. Wer aber kann sich ein Password von der Art »(AIQ34np0(?ß_[FP]*#gG:« (139-Bit-Schlüssel) merken?

Die Risikodebatte hat gezeigt, daß solche Ansätze nicht ausreichen, um mit den Risiken bestimmter Technologien umzugehen. Seither wird gefordert, das Augenmerk auf das jeweilige Gegenteil der oben genannten Ziele zu richten: auf Unsicherheit, Uneindeutigkeit, Kontingenz und Kontextbezogenheit. Es soll erreicht werden, daß möglichst viele Unsicherheiten, Uneindeutigkeiten usw. behandelt werden, wobei bewußt ist, daß keine Vollständigkeit zu erreichen ist, da schon dieser Anspruch zur Handlungsunfähigkeit führen würde. Es geht vielmehr darum, eine Entscheidung für eine von vielen Unsicherheiten zu treffen. Eine solche Entscheidung ist wiederum eine politische Entscheidung – und zwar eine, die nicht, wie von Neumann meinte, von Politikern zu treffen sei, sondern eine, die der Wissenschaftler selbst trifft oder von der er weiß, daß er sie aufgrund des Kontextes nicht treffen kann.²⁶⁸ Das führt aber zur Frage, ob er einem anderen überlassen will oder kann, die Entscheidung zu treffen. Man wird bereit sein, die Entscheidung zu delegieren, wenn man von der Übereinstimmung der beiderseitigen Maximen überzeugt ist. (Von Neumann war dies offensichtlich hinsichtlich der US-amerikanischen Demokratie und Bagge oder Heisenberg haben sich im NS-Deutschland auch nicht anders verhalten.) Ist hingegen die Übereinstimmung sowieso schon in Frage gestellt, wird man

²⁶⁷ Ein durch eine solche »complexion« wieder anfällig gemachtes Gerät war die ENIGMA. Vgl. Abschnitt 3.1.7.

²⁶⁸ In einer Antwort auf eine Einladung des Bulletin of Atomic Scientists schrieb von Neumann: »I do not want to appear in public in a not primarily technical context.« (John von Neumann to John Simpson, Nov. 18, 1948, Library of Congress Archives, zitiert nach Heims 1980, 235) Und 1955 führte er aus: »Technology - like science - is neutral all through, providing only means of control applicable to any purpose, indifferent to all. [...] Technological power, technological efficiency as such, is an ambivalent achievement. Its danger is intrinsic.« (von Neumann 1955, 515) »[...] prohibition of technology (invention and development, which are hardly separable from underlying scientific inquiry), is contrary to the whole ethos of the industrial age. [...] Only if those disasters that we fear had already occurred, only if humanity were already completely disillusioned about technological civilization, could such step be taken. But not even the disasters of recent wars have produced that degree of disillusionment, as is proved by the phenomenal resiliency with which the industrial way of life recovered even - or particularly - in the worst-hit areas. [...] A much more satisfactory solution than technological prohibition would be eliminating war as a means of national policy.« (von Neumann 1955, 516f.)

»engere ethische Grenzen« ziehen. Dies legt nahe, daß eine ex ante Perspektive immer defizitär ist und daß Entscheidungsfragen für oder gegen Unsicherheiten am Anfang und arbeitsbegleitend formuliert und beantwortet werden müssen, nicht erst angesichts von Ergebnissen.

7.2.2 Modelle kontextualisieren

Kontextualisieren heißt ganz allgemein, bei der Modellbildung Kontexte zu berücksichtigen. An dieser Stelle geht es nicht um konkrete Kontexte, sondern um die Eigenarten und die Kontextfähigkeit von Modellen. Zu den Kontexten in diesem Sinn gehören zum Beispiel Zeitabhängigkeit und Zeitstrukturen. Ein möglicher Schritt in der Informatik könnte sein, das Modellverständnis um die von Stachowiak vorgeschlagenen Komponenten zu erweitern und damit nicht nur die Frage nach dem »wie«, sondern auch nach dem »wozu« in die Modellbildung einzubeziehen. Ein Modell in der Informatik wäre dann zumindest eine fünfstellige Relation, bestehend aus Modell, Original, Verwender, Zeitspanne und Intention.²⁶⁹

In der Praxis wird partiell eine Kontextualisierung gefordert, wie das von Himmler (1991) formulierte Vorgehen zur Erarbeitung von unternehmensweiten Datenmodellen zeigt. Dort wird unter anderem festgestellt, daß die Inangriffnahme eines Datenmodells nur dann sinnvoll ist, wenn dem Beginn der Arbeiten Zielvorgaben vorausgehen. Diese Zielvorgaben sollen nach der Fertigstellung des noch nicht implementierten Modells als Meßlatte zur Bewertung des Ergebnisses verwendet werden, denn nur wenn solche Bewertungsmaßstäbe vorhanden sind, kann ausgemacht werden, ob das erreichte Ergebnis für den Auftraggeber zufriedenstellend ist. Diese Zielvorgaben, die im Großen und Ganzen dem entsprechen, was Stachowiak als Intentionen bezeichnet, sind im Informationssystem nicht formal abgebildet, sondern allenfalls in der Dokumentation zum System beschrieben. Eine solche partielle Kontextualisierung erfüllt insofern die Stachowiaksche Forderung, Intentionen in die Modellbildung einzubeziehen, nur teilweise, als Dokumentationen, Kommentare in Programmen oder separat, zwar jederzeit erreichbar sind, zugleich aber nebenläufig bleiben und nicht integraler Bestandteil des operationalen Modells sind.

²⁶⁹ Vgl. Kapitel 2; vgl. Smith 1985a.

Eine Kontextualisierung, die sich nicht vollständig in den Formalismen abbildet, ist aber keineswegs durchgängig negativ zu bewerten. Wie wichtig eine solche Kontextualisierung ist, sei hier am Begriff der »Regel« verdeutlicht. In Informationssystemen werden die Regeln der Logik abgebildet. Um den Begriff zu explizieren, greift Hans Radermacher in seinem Aufsatz »Intelligenza naturale e artificiale« auf die »Philosophischen Untersuchungen« von Wittgenstein zurück. (Radermacher 1988, 109ff.) Bei Wittgenstein findet sich folgende Bemerkung: »Betrachten wir nun diese Art von Sprachspiel: B soll auf Befehl des A Reihen von Zeichen niederschreiben nach einem bestimmten Bildungsgesetz. Die erste dieser Reihen soll die sein der natürlichen Zahlen im Dezimalsystem. – Wie lernt er dieses System verstehen? – Zunächst werden ihm Zahlenreihen vorgeschrieben und er wird angehalten, sie nachzuschreiben [...] Und schon hier gibt es eine normale und eine abnormale Reaktion des Lernenden.« (PU §143) Durch die Differenz zwischen normaler und abnormaler Reaktion läßt sich der Begriff der »Regel«, so Radermacher, erläutern. Es gibt nämlich vier Arten von Fehlern.

- Die erste Fehlerart besteht darin, daß die Zeichen ohne Reihenfolge, das heißt regellos kopiert werden. Ist bei der Kopie keine Reihenfolge erkennbar, dann liegt auch keine Regel vor.
- Die zweite Fehlerart betrifft Fehler in der Reihenfolge. Dieser Typ von Fehler läßt sich beheben, indem durch Elimination gewisser Fehler gelernt wird, eine Regel streng zu befolgen.
- Der dritte Fehlertyp bezieht sich auf systematische Fehler, wenn zum Beispiel nur jedes zweite Zeichen kopiert wird. »Hier werden wir beinahe versucht sein zu sagen, er habe uns *falsch* verstanden.« (PU §143, Hervorhebung im Original) Um diese Art von Fehler zu beheben, gibt es zwei Möglichkeiten: Man kann den Fehler als Abart abgewöhnen oder versuchen, die normale Schreibweise als Abart von jener Abart beizubringen. Es kann nicht genau gesagt werden, ob der Fehler eine Abart von einer Regel oder die Regel eine Abart von einer Regel, die als abartig bewertet wird, ist.
- Die vierte Fehlerart betrifft die Frage, ob es nur eine Verwendungsart von Zeichenfolgen gibt. Wenn sich nämlich mehrere Gebrauchsarten anbieten, dann sind die genannten Unterscheidungsmerkmale nicht ausreichend. Wittgenstein liefert ein Beispiel: »Ich sehe ein Bild: es stellt einen alten Mann dar, der auf einen Stock gestützt einen steilen Weg aufwärts geht. – Und wie das? Konnte es nicht auch so aussehen, wenn er in dieser Stellung den Berg hinunterrutschte?« (PU §§139, 140, Anm.)

Hier kann nicht mehr von Fehler unabhängig vom Kontext gesprochen werden. Beide Interpretationen des Bildes sind möglich und gleichberechtigt. Die Pragmatik der Zeichen enthält immer auch den Aspekt von Intention, nicht im Sinne von Zweck und Zielgerichtetheit, sondern im Sinne von Möglichkeit einer Vielfalt von Welten. (Vgl. Hintikka 1975, 68f.) Und in diesem Punkt, also in der Möglichkeit verschiedener Interpretationen von Situationen und Informationen unterscheiden sich Computer von Menschen, künstliche von natürlicher Intelligenz. Diese Art von Fehler bleibt natürlicher Intelligenz »vorbehalten«.

Als Handlungsanweisung läßt sich daher fordern, bei der Entwicklung der Systeme möglichst viele Kontexte zu berücksichtigen, damit die zwangsläufige Reduktion durch die Modellierung zumindest auffällt und bedacht werden kann. Ein Vorschlag ist, »Risikoprotokolle« oder »Reduktionsprotokolle« anzufertigen, die das Bewußtsein für die Probleme und die Entscheidung für oder gegen bestimmte Risiken schärfen. In diese Reduktionsprotokolle könnten zum Beispiel Aspekte aufgenommen werden, die bewußt nicht modelliert werden. Da eine Liste solcher Aspekte im positiven wie im negativen zwangsläufig unvollständig bleibt, gäbe sie auch die Grenze dessen an, was bei der Entwicklung überhaupt in den Blick genommen wurde, und würde damit einen Hinweis darauf liefern, daß Risikobetrachtungen und –bewertungen neu vorgenommen werden müßten, wenn Systeme in veränderten Kontexten verwandt werden sollen. Genügend weit gefaßt würden derartige Risikoprotokolle eine Art Historienkonzept für die Binnenaspekte und die Umweltbezüge eines Systems liefern. Damit wäre denkbar, für jede Modellbildung über die Dauer ihres Lebenszyklus nachzufragen, ob die angewandten Verfahren den ursprünglichen Anforderungen und Erwartungen entsprachen und aktuellen angemessen sind.

7.2.3 Alternativen entwickeln

Bisher ist man oft davon ausgegangen, Risiken in komplexen Systemen seien durch immer weitergehende Automatisierung verhinder- oder vermin-derbar. Diese Annahme hat sich nicht als realistisch erwiesen. Im Gegenteil, je komplexer die Systeme, desto mehr Risiken sind vorhanden. Eine mögliche Alternative zum bisherigen Vorgehen ist die Deautomatisierung. Diese Variante wurde explizit zum Beispiel im »Workshop on Flight Crew Accidents and Incident Human Factors« der Federal Aviation Administration

(FAA) vom 21. bis 23. Juni 1995 bei der Erörterung von Flugzeugunfällen vorgeschlagen. In einem Beitrag von Hop Potter, einem Mitarbeiter des »Air Carrier Training Branch Flight Standard Service« der FAA heißt es, daß die Eingabe von Daten in das Flight Management System (FMS) in einem von zehn Fällen fehlerhaft sei. Einer der Gründe dafür sei die Arbeitsüberlastung und die daraus resultierende Konfusion des Cockpit-Personals. In den meisten Fällen werde deshalb die FMS-Eingabe komplett wiederholt, was zu erneuten Eingabebefehlen führen kann. Es wird folgendes vorgeschlagen:

An effective ›human-centered‹ automation system would recognize when erraneous keystrokes are starting to signal that the human is getting overloaded (confused) and would fail – drop off – to a low- or zero-automation state.

[...]

The overriding message seems to be: THE MORE THE CONFUSION, THE LESS SHOULD BE THE AUTOMATION IN USE BY THE PILOT.

IF THE PILOT CAN'T RECOGNIZE THE MESS THAT'S DEVELOPING (and drop back to a lower level of automation by choice), THE SYSTEM SHOULD (and drop back to a lower level of automation on its own). (Potter 1995, A-85, Hervorhebungen im Original.)

Hier wird explizit eine Deautomatisierung vorgeschlagen, um Situationen, die riskant sind oder werden können, nicht eskalieren zu lassen.

Es ist aber umgekehrt auch zu bedenken, daß Deautomatisierung Gefahren erzeugen kann. Es gibt Prozesse, für deren Ablaufsteuerung sich Deautomatisierung geradezu verbietet (Tschernobyl). In solchen Fällen ist eher sinnvoll, daß automatische Systeme bereits bei Ereignissen, die als unkritisch bewertet sind, die aber eine Störung indizieren, alternativlos das gesteuerte System abschalten und auch ein Einschalten vor einer Normalisierung des Zustands nicht zulassen. Verlängert man diesen Gedanken weiter, ergibt sich, daß hochkritische Systeme, bei denen wiederum das Ausschalten zur Gefahr werden kann, von den möglichen Folgen her bewertet, nicht zugelassen sind. Ob die erforderlichen Unterscheidungen der Fälle immer getroffen werden können, ist selbst problematisch, denn mit zunehmender Komplexität werden Systeme in ihren Außen- und Binnenbeziehungen immer weniger überschaubar. Dies legt nahe, daß allgemein eine Verknüpfung

von zunehmender Komplexität von Systemen, sinkenden Handlungsmöglichkeiten und wachsender Schadensgröße besteht.

Wenn man nicht wie Siefkes (1996) eine »ökologische Informatik« fordert, in der Systeme strikt auf kleine Systeme (Siefkes 1993) begrenzt bleiben, ergibt sich aus dem eben Angeführten trotzdem eine absolute Obergrenze für die Vertretbarkeit von Informationssystemen, ohne daß es erforderlich ist, Extrembeispiele wie AKW oder SDI heranzuziehen.

Ähnlich wie die Deautomatisierung könnte auch das Wegwerfen unbrauchbarer, veralteter und wegen Unübersichtlichkeit nicht mehr wartbarer Software risikomindernd wirken. Dies gilt auch für iterativ entwickelte Software. Auch hier kann das Informationssystem unübersichtlich werden, weil ausgehend von einem kleinen Ausschnitt des gesamten Modells, dem Prototypen, das gesamte System entwickelt wird. Wenn die Struktur des Prototypen für den Rest des Systems nicht geeignet ist und dennoch, zum Beispiel weil schon viel Geld für ihn ausgegeben wurde, auf dem Prototypen aufgebaut wird, entsteht ein unübersichtliches, mit Ad-hoc-Lösungen versehenes System. Besser in Bezug auf Übersichtlichkeit, Handhabbarkeit und damit Risikominimierung wäre, nachdem klar ist, daß die Strukturen nicht zusammenpassen, den bereits erstellten Prototypen nicht mehr weiterzuverwenden.

7.2.4 Vielfalt erhalten (Flexibilität und Stabilität)

Informatisches Handeln ist bisher von Dekontextualisierung und Reduktionismus geprägt. Es schränkt also Vielfalt ein, was zu Problemen und Gefahren führt. Eine dem gegensteuernde Handlungsorientierung für die situativ-praktische Ebene ist, Vielfalt zu erhalten und zu ermöglichen.

Im folgenden wird ein Datenmodell vorgestellt, das im Rahmen eines Projekts bei einem Kreditinstitut in Hamburg entstand. Es basiert auf ähnlichen Modellen, die Ulrich Himmler in verschiedenen Projekten entwickelte und die einem Ansatz folgen, der besagt, daß Datenmodelle gleichzeitig flexibel und stabil sein können und sollen. (Himmler 1991; Himmler 1992) Flexibilität und Stabilität müssen kein Widerspruch, sondern können sich ergänzende Eigenschaften sein. (Ähnlich wie mein Brillengestell, das stabil ist, wenn es auf der Nase sitzt, und das sich biegen läßt, ohne zu brechen, wenn ich es abnehme.) Für das hier präsentierte Datenmodell heißt das, spätere Änderungen und Erweiterungen aufgrund von Anforderungen des

Marktes, der Gesetzgebung und der Geschäftspolitik sind möglich, ohne die einmal festgelegte (Grund-)Struktur in Frage zu stellen. Die Auslegung des Modells mit ihrer Verbindung von Stabilität und Flexibilität ist ein »gutes« Beispiel für Bereiche mit einem mittleren Risikopotential: Es hat eine umfangreiche Binnenstruktur und seine Auswirkungen auf die Umwelt sind komplex, insofern Banken finanzielle und soziale Gefahren generieren können. Solche Gefahren sind gegebenenfalls weder konkret vorhersehbar, noch durch den Verursacher behebbar (Weltwirtschaftskrise), sie sind aber nicht unregulierbar katastrophal wie bei Kernkraftwerken. Dabei spielt eine Rolle, daß das Bankgeschäft und –wesen ein alteingeführter Bereich ist, der ohne Computer handhabbar war und immer noch wäre, während dies für Hochtechnologiesysteme nicht gilt.

Ausgangspunkt für die Entwicklung des Datenmodells war die Infragestellung der in vielen Kreditinstituten üblichen Trennung der Geschäftsparten in Kredite, Sparen, Wertpapiere, usw. Ziel des Projekts war die Erarbeitung eines unternehmensweiten, spartenübergreifenden Datenmodells. Mit einem solchen Datenmodell lassen sich Gemeinsamkeiten zwischen den Sparten erkennen und eine einheitliche Datenbasis schaffen. In einem weiteren Schritt können die bankbetrieblichen Funktionen untersucht werden und Basisfunktionen definiert werden, die in den verschiedenen Sparten wiederverwendet werden können.

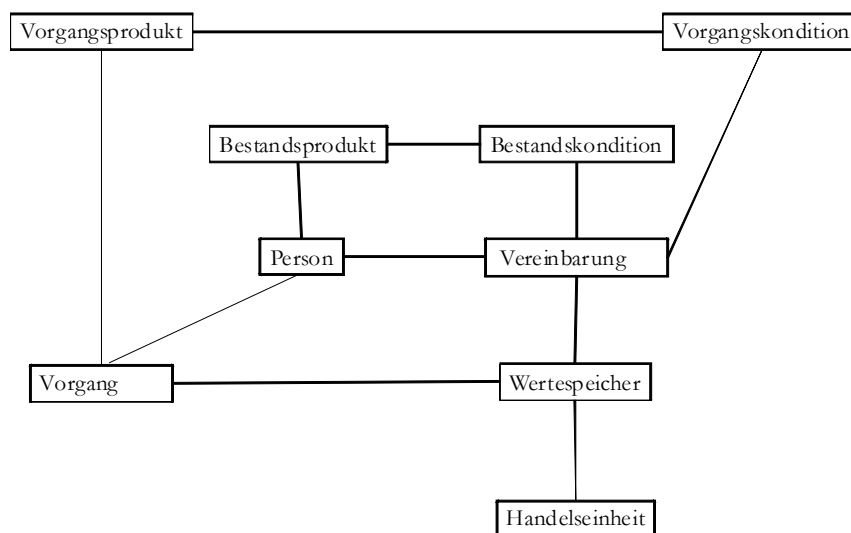


Abbildung 25. Bankendatenmodell

Das Datenmodell besteht aus neun Objekttypen. Als zentraler Objekttyp wird das »Bestandsprodukt« modelliert. Unter einem Bestandsprodukt werden die Geschäfte der Bank verstanden, die als Aktiv- oder Passivposition die Bilanz eingehen oder für die Bestandsnachweise geführt werden müssen oder sollen. Beispiele für Produkte sind: Girokonto, Dispositionskredit, Depotvertrag, Beratung eines Kunden, Spardose, Hypothekendarlehen. Als Spezialisierungen lassen sich modellieren: Aktiv-/Passivprodukt, Verwahrprodukt, Beratungsprodukt, Vermittlungsprodukt, usw.

Zu jedem »Bestandsprodukt« gibt es Preise, diese werden im Objekttyp »Bestandskondition« modelliert. Beispiele für Konditionen sind: »Gebühr für Bestandsprodukt Depotvertrag = € 10,00 pro Monat für Studenten« oder »Zinsen für Bestandsprodukt Hypothekendarlehen = 12% p.a. plus 2% Disagio«. Zwischen Bestandsprodukt und Bestandskondition besteht eine 1:M-Beziehung, da jedes Produkt mindestens einen Preis hat und umgekehrt jeder Preis genau einem Produkt zugeordnet wird.

Des weiteren wird ein Objekttyp »Person« benötigt. Person steht allgemein für natürliche Personen, juristische Personen, Personengemeinschaften und organisatorische Einheiten, für und über die die Bank Informationen speichert. Beispiele für Personen sind: Kunde Meier, Makler Müller, Treuhänder Schulze, Kreditabteilung. Eine Person kann in verschiedenen Rollen auftreten: als Bürge, Bevollmächtigter, usw.

Die »Vereinbarung« ist die Summe aller Informationen, die zur Administration einer Geschäftsbeziehung erforderlich und die nicht bereits Teil der Beschreibung des Bestandsprodukts sind. (Statt Vereinbarung könnte auch der Begriff »Vertrag« verwendet werden.) Zwischen Person und Vereinbarung können verschiedene Beziehungen bestehen; so kann der Kunde Eigentümer oder Bevollmächtigter oder Treuhänder oder Begünstigter einer Vereinbarung sein.

Zu jeder Vereinbarung kann es einen »Wertespeicher« geben. Wertespeicher können Konten (Giro, Spar, Spardosen, usw.) oder Bestände sein, die der Überwachung der Geschäftsbeziehung dienen. Er gibt den wertmäßigen Stand einer Vereinbarung wieder.

Wertespeicher sind nur im Zusammenhang mit einer zugehörigen »Handelseinheit« sinnvoll. In ihr ist die Rechnungseinheit modelliert, in der der Wertespeicher geführt wird, zum Beispiel: €, \$, Stück Deutsche Bank Aktien, usw. Spezialisierungen von Handelseinheit können sein: Wertpapiergattung, Währung, Edelmetalle, Spardosen usw. In einem Wertespeicher

finden sich zum Beispiel folgende Angaben: Girokonto mit Saldo 10000, Habenzinsen 33, Auszug Nr. 45 (plus Bezug zur Handelseinheit »€«). Oder: Eigenbestand mit Saldo 135 (plus Bezug zur Handelseinheit »Spardose Glücksschwein«)

Neben dem Objekttyp »Bestandsprodukt« wird das »Vorgangsprodukt« modelliert. Vorgangsprodukte sind Typen von Geschäftsvorfällen, deren Ausprägungen (konkrete Vorfälle), im Modell als »Vorgang« bezeichnet, Änderungen an anderen Objekten bewirken. Auch Vorgangsprodukte haben einen Preis, hier »Vorgangskondition« genannt.

Zusätzlich zu den dargestellten Beziehungen, die hier mit Absicht ohne Kardinalität dargestellt sind, um anzudeuten, daß es sich auch um mehrere Beziehungen zwischen den Objekttypen handeln kann, bestehen rekursive Beziehungen bei den Objekttypen »Bestandsprodukt«, »Person«, »Vereinbarung«, »Handelseinheit« und »Vorgang«. Einige Beispiele dafür sind: Eine Person kann mit einer anderen Person in einer Ehegemeinschaft, Eigentümergemeinschaft, Organschaftsbeziehung, Vormundschaftsbeziehung usw. in Verbindung stehen. Eine Handelseinheit kann durch eine andere Handelseinheit ersetzt werden, € durch \$, Stück ABC-Aktien durch CHF usw. Der bei einer Auflösung der Rekursion entstehende Objekttyp kann dementsprechend als »Kurs« bezeichnet werden.

Ein solches »abstraktes« Datenmodell kann die Grundlage für eine Parametrisierung von Produkten bilden. Damit werden die Spartengrenzen überwunden, die Bank hat die Möglichkeit, unterschiedliche Produkte zu definieren, ohne die Struktur des Modells zu verändern. Das Modell ist somit einerseits stabil und andererseits flexibel. Das liegt daran, daß die Ebene der Modellierung gerade so gewählt wird, daß von den konkreten, sparten-spezifischen Informationen Typen von Informationen gebildet werden. Ein Beispiel:

Zu einer Vereinbarung gehören Termine. Im Datenmodell werden diese, unter Verwendung von »Terminotypen«, wie folgt modelliert:

Vereinbarung	
<i>Vereinbarungsnummer</i>	(+ weitere Eigenschaften)
4711	
4712	
9933	

Terminotyp	
<i>Terminotypnummer</i>	Bezeichnung

01	Rate
02	Zinsfälligkeit
03	Auszug
04	Depotauszug

Termin		
<i>Vereinbarungsnummer</i>	<i>Terminotyp</i>	Termin
4711	01	31.12.
4711	03	Monatsultimo
4711	04	30.06.

Tabelle 36. Beispiel für »Typisierung«

Sollen neue Termintypen eingeführt werden, so ist dies möglich, ohne die Struktur des Modells zu verändern, es muß lediglich eine neue Zeile in der Tabelle »Terminotyp« eingefügt werden. Danach kann der neue Termin-
typ in der Tabelle »Termine« verwendet werden.

Hervorzuheben ist, daß dieses Prinzip der Typisierung nicht um seiner selbst willen, sondern immer im fachlichen Kontext zu verwenden ist. Ge-
schieht dies nicht, so erreicht man allenfalls ein Metamodell dieser Art:

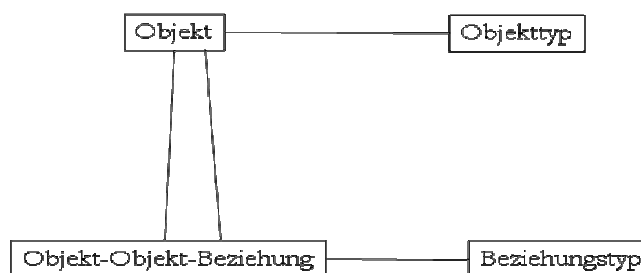


Abbildung 26. »Typisierung« im Datenmodell

Ein solches Modell ist nicht falsch. Es ist allerdings zu fragen, ob es dem Zweck, in diesem Fall die Herstellung eines spartenunabhängigen Modells des Aktiv-/Passivgeschäfts eines Kreditinstituts, gerecht wird.

Fazit: Es ist möglich und anzustreben, bei der Modellierung eine »Ebe-
ne« oder »Perspektive« zu finden, die gerade so abstrakt ist, daß allgemeine Aspekte deutlich werden, und die gerade so konkret ist, daß die Inhalte nicht beliebig sein können, sondern dem zu modellierenden Gegenstand adäquat sind. Und nicht nur das. Bei dem hier vorgestellten Modell sind ei-
nige der Aspekte, die in Stachowiaks Modellverständnis (Modell, Original.

Verwender, Zeit, Intention) vorkommen, eingelöst. So ist klar, daß das Modell eine Reduktion darstellt, daß es keine 1:1-Abbildung des Originals ist oder sein soll. Es läßt viele Interpretationsmöglichkeiten offen, die in einer konkreten Anwendung des Modells zu definieren sind. Des weiteren ist die Zeitkomponente implizit enthalten, denn Änderungen und Erweiterungen, die durch neue Anforderungen des Kontextes (Markt, Gesetzgebung, Geschäftspolitik) entstehen, sind problemlos möglich, ohne die einmal festgelegte (Grund-)Struktur in Frage zu stellen. Das heißt allerdings nicht, daß die Daten, die gemäß dieses Modells in einer Datenbank gespeichert werden, bereits eine Zeitinformation enthielten. Diese ist, wie in anderen Modellen auch, explizit zu definieren und abzulegen. Auch der in Stachowiaks Modellverständnis vorhandene Aspekt der Intention ist in diesem abstrakten Datenmodell nicht explizit enthalten. Es wird nur in der Beschreibung des Modells immer wieder darauf hingewiesen, daß das Modell nur das Aktiv-/Passivgeschäft eines Kreditinstituts umfasse, nicht etwa die Kantinenverwaltung. Die Intention ist insofern deutlich, als es um ein Modell des »Kerngeschäfts« einer Bank geht. Und auch der Zweck, ein Modell zu entwickeln, das flexibel bezüglich Anpassungen aufgrund wirtschaftlicher Gründe ist, wird nicht im Modell abgebildet, sondern nur außerhalb beschrieben. Schließlich fehlt auch der Verwender des Modells. Auch er ist nur implizit erkennbar, indem das Modell zum Beispiel für einen bestimmten Auftraggeber, der von wirtschaftlichen, persönlichen oder anderen Interessen ausgeht, entwickelt wurde. Das folgende Kapitel zeigt am Beispiel des Kontextes »IT-Risikomanagement«, wie dieser Modellierungsansatz angewandt und um die genannten Aspekte erweitert werden könnte.

7.2.5 Ein Ansatz für IT-Risikomanagement

In diesem Kapitel geht es um einen Ansatz, wie in der Praxis mit IT-Risiken umgegangen werden könnte. Das hier aufgeführte Beispiel ist vor dem Diskussionsstand um das Jahr 2000 im Hinblick auf einen kommerziellen Kontext entstanden, beschränkt sich jedoch nicht auf dieses Feld und auf seine Entstehungszeit.

Ausgangspunkt der Überlegungen war die Feststellung, daß Unsicherheiten und Risiken im Informatikbereich immer deutlicher werden. Erkennbar ist dies an der Häufung von Erfahrungen mit »Ausfällen«, »Inkonsistenzen« usw. von Informationssystemen einerseits und »Widerständen« gegenüber

Informationssystemen andererseits. Diese Risiken müssen »behandelt« werden, wobei es nicht darum geht, Unsicherheit durch illusionäres Festhalten an »Metagaranten« bewältigen zu wollen, sondern darum, den Umgang mit den in einer als offen vorgestellten Zukunft notwendig verbleibenden Unsicherheiten souveräner als bisher gestalten zu können. Diese Erkenntnis in praktische Handlungsmöglichkeiten und Handlungen umzusetzen, ist Ziel des hier vorgestellten »Risikomanagements«.

Die Situation ist durch drei Aspekte gekennzeichnet, die im folgenden erläutert werden.

(1) *Risiken im Informatikbereich nehmen zu.* Es handelt sich dabei sowohl um Einzelrisiken, wie sie heute schon erörtert und behandelt werden, als auch um systembedingte Risiken, die sich aus der Verknüpfung von Einzelelementen ergeben und die mit der zunehmenden Komplexität und Heterogenität der Informationssysteme wachsen. Solche systembedingten Risiken sind nicht die Summe der Einzelrisiken. Beide Arten von Risiken sind von Fall zu Fall zu untersuchen und zu behandeln.

Einzelrisiken lassen sich in technische, rechtliche, organisatorische und finanzielle Risiken unterscheiden. Bis heute entwickelte Handlungs- und Organisationskonzepte zur Behandlung der Risiken beziehen sich jeweils auf die einzelne Risikoart. So werden beispielsweise folgende Maßnahmen vorgeschlagen:

Risikoart	Maßnahmen zur Behebung der Risiken
technische Risiken (systemimmanente und Umweltauswirkungen)	Technischen Lösungen suchen <i>Beispiele: Datensicherheit, Netzsicherheit, Virenschutz</i>
rechtliche Risiken	Neue Gesetze / Vorschriften in Prozesse umsetzen <i>Beispiel: Datenschutz</i>
organisatorische Risiken	Change Management initiieren <i>Beispiel: im Zusammenhang mit Informatikgroßprojekten aufgrund von Fusionen (Stichwort: Mergers and Acquisitions²⁷⁰)</i>
finanzielle Risiken	Verstärkte Controllingmaßnahmen einführen Projektmanagementmaßnahmen zur Sicherstellung der Softwarequalität <i>Beispiel: IT-(Groß-) Projekte</i>

Tabelle 37. Risikoarten

Diese Arten von Risiken werden zum Teil seit einigen Jahren von Informatikfachzeitschriften über die »Computerwoche« bis zur »Online-Messe« diskutiert. Es wurden rechtliche Normen und mehr oder weniger zufriedenstellende Verfahren entwickelt, diese Risiken »in den Griff zu bekommen«, zum Beispiel mit Einsatz von (Softwaretechnik-)Methoden, Projektmanagementmethoden oder Kryptologie.²⁷¹

Alle diese Risikoarten werden weiter bestehen, aber deutlich an Bedeutung gewinnen werden Risiken, die sich aus der Verknüpfung der genannten Elemente ergeben. Sie wachsen zwangsläufig mit der zunehmenden Komplexität und Heterogenität der Informationssysteme. Diese systembedingten Risiken sind nicht für alle Systeme gleich und müssen den Beteiligten und Betroffenen (Modellierern, Entscheidern, Anwendern, usw.) oft erst transparent gemacht werden.

(2) Das Thema »Risiko« gewinnt in der Fachöffentlichkeit an Gewicht. Generell wird in der aktuellen Risikodebatte, die sich zum Beispiel in technischer Hinsicht auf Risiken industrieller Großprojekte oder in finanzieller Hinsicht auf die Versicherbarkeit von Risiken bezieht, zwischen verschiedenen »Risi-

²⁷⁰ Mergers and Acquisition zählte laut International Data Corporation (IDC 1998) zu den acht »Major Market Forces Driving Growth« in Europa. Die anderen sieben waren: Globalisierung, Europas wirtschaftliche und finanzielle Union (Euro), technologische Themen (Y2K, Internet, E-Commerce), Deregulation, Privatisierung, Mittelstand sowie Enterprise Resource Planning (ERP).

²⁷¹ Vgl. speziell für den kommerziellen Bereich beispielsweise das von der CSC Consulting and Systems Integration 1998 verfaßte Handbuch zum Thema »Security Architecture« sowie die Arbeit »Taxonomy-Based Risk Identification« von Marvin J. Carr u.a. (1993).

kosystemen« unterschieden. Diese Systeme werden zum einen hinsichtlich ihrer »Binnenorganisation« und zum anderen hinsichtlich ihrer »Umweltbeziehung« untersucht. Die Binnenorganisation umfaßt dabei zum einen die Komplexität des Systems, zum anderen die Koppelung der Elemente innerhalb des Systems. Die Umweltbeziehung umfaßt zum einen die Grenze des Systems, zum anderen die negativen externen Effekte.²⁷² Für Informationssysteme gilt: Je komplexer sie aufgrund zusätzlicher Erweiterungen und zunehmender Integration werden, desto häufiger sind sie in den Bereichen »hohe Komplexität in der Binnenorganisation« und »hohe negative externe Effekte hinsichtlich der Umweltbeziehung« zu finden. Sie sind damit in Bezug auf ihre Risikostruktur sensibelsten Großtechnologien vergleichbar. Und ihre Familienähnlichkeit zu der Risikostruktur von Großunternehmen gibt schon einen Hinweis darauf, welche wichtige Rolle Informationssysteme in Unternehmen selbst spielen.

In der Informatikfachliteratur ist das Thema »IT-Risiken« seit einiger Zeit präsent und auch die seriöse Tagespresse befaßt sich immer wieder mit dem Thema. Ab Mitte der neunziger Jahre wurden an Hand von Risiken wie beispielsweise des Jahr-2000-Problems, der Euro-Einführung oder von Internet-Risiken beiläufig viel weitergehende Aspekte angesprochen. Auch dort nämlich, wo der Begriff »Risiko« nicht explizit auftaucht, ist das Thema präsent. In dem Artikel »Die wichtigsten Business-Trends und deren Auswirkungen auf die IT« in der CW Extra vom 28. November 1998 wurde auf eine ganze Reihe von Unsicherheiten hingewiesen, die in Wirtschaft und Gesellschaft deutlicher zu Tage traten als zwanzig Jahre zuvor. Die Unsicherheiten betreffen Veränderungen in Organisation, in Managementmodellen, in der IT-Welt usw. Wo früher Einheit herrschte, führt heute organisatorische Dezentralisierung zu neuen Geschäftsbereichen. Dieser Geschäftstrend bewirkt eine »anarchische oder föderative Struktur der unternehmensweiten IT-Abteilungen«, die »hybriden, im Extremfall widersprüchlichen Managementmodellen« folgt. Es gibt »zunehmend unvorhersehbare Anforderungen an die IT« mit der Folge eines »Planungs-Chaos«. Bei diesen Wahrnehmungen geht es nicht mehr um Einzelrisiken, sondern um ein Gemenge von ihnen mit systemumfassenden Risiken.

(3) *Risiken werden vor allem als singuläre, isolierte Phänomene angesehen.* Interessanterweise wurden bisher vor allem singuläre, meistens technische Risikoaspekte betrachtet, wie Virenschutz oder Sicherheit im Internet. Schon das

²⁷² Vgl. Abschnitt 1.2.3 und 6.4.

Thema Datenschutz wird in einem »normalen« Informatikprojekt nicht behandelt. Wenn überhaupt, dann wird dieser Punkt von spezialisierten Firmen oder Instituten untersucht. Analysen und Vorschläge für Maßnahmen, die die Risiken von Informationssystemen in ihrer Gesamtheit betreffen, werden bis heute nicht angeboten.

Es genügt aber nicht, die genannten Aspekte isoliert voneinander zu behandeln. So schreiben Clare Price und Michael Zboray (1996) in ihrer Research Note »Internet Security: Why Firewalls Are Not Enough«, daß ein umfassendes Sicherheitskonzept nötig sei, um die Sicherheitskategorien (Confidentiality, Authentication, Data Integrity, Non-repudiation, Access control) erfüllen zu können. Das, was bisher an Techniken der Risikobestimmung, -sicherung und -definition eingesetzt wurde, um den Umgang mit Gefahren kalkulierbar zu machen, ist nicht ausreichend, wenn systeminduzierte Risiken zum Tragen kommen. Mit diesen Techniken wird nämlich zumeist gerade der Versuch unternommen, den Zusammenhang der Risiken aufzulösen und auszublenden.

Die dargestellte Ausgangssituation zeigt, daß herkömmliche Ansätze des Risikomanagements nicht genügen, die mit der zunehmenden Komplexität und Heterogenität der Informationssysteme verbundenen systembedingten Risiken zu erkennen und das Eintreten von Gefahren zu vermeiden.

Es fehlt bis heute ein Verfahren, das Risikostrukturen nach Art und Reichweite transparent macht und das übergreifende Aspekte von Risiken in Kombination mit einer konstruktiven Nutzung der in ihnen auch enthaltenen Entwicklungschancen aufzeigt. Es fehlen des weiteren Handlungsorientierungen zum bewußten und konstruktiven, aber nicht leichtfertigen Umgang mit IT-Risiken.

Wenn Risiken (auch IT-Risiken) immer mit Unsicherheit über und Nicht-Wissen von Folgen von (Unternehmens-)Planung und Technik verbunden sind, dann ist zu fragen: Wie kann eine neue Art von Wissen entstehen, das vom Wissen um unsere Unwissenheit seinen Ausgang nimmt? Der hier vorgestellte Vorschlag zur Analyse und Behandlung von IT-Risiken ermöglicht, über die traditionellen (und keineswegs als solche obsolet gewordenen) Sicherungen im Einzelfall hinaus ein Orientierungswissen und praktische Handlungsmöglichkeiten neu zu erwerben und einzusetzen.

IT-Risikomanagement hat das Ziel, die allgemeinen Aspekte von IT-Risiken zu analysieren, zu modellieren und daraus Schlüsse zu ziehen, wie die Wechselwirkungen zwischen den Einzelrisiken und den systemumfassenden Risiken zu behandeln sind. Es geht nicht darum, das eine durch das

andere zu ersetzen, sondern beides aufeinander zu beziehen. Dabei sollten zum einen die Methoden und das Wissen über Einzelaspekte zur Verfügung gestellt und zum anderen das sach- oder branchenspezifische Wissen für die Verfeinerung und Weiterentwicklung des Instrumentariums genutzt und eingebunden werden.

In einem Informatikprojekt sind solche Risiken abzugrenzen, die im Rahmen der Risikoanalyse zwar benannt werden können, zu deren Behebung aber keine Kompetenz vorhanden ist. Welche Risiken das im einzelnen sind, ergibt sich in der Kommunikation mit den Ansprechpartnern im Projekt (Projektmitarbeiter, Entscheider, Anwender, usw.). Diese Abgrenzung kann nur im konkreten Fall erfolgen. Sie ist innerhalb der Methode ein Verfahrensschritt, in dem zugleich die Einbindung der verschiedenen Risiken stattfindet. Diese Einbindung ist die Voraussetzung für die Konkretisierung und den Erfolg der allgemeinen Ansätze für die Lösung der Risiken. Es sollte keine Konkurrenz zu denjenigen, die sich mit Einzelrisiken befassen, entstehen, vielmehr sollten die Zusammenarbeit mit ihnen gefördert und Synergieeffekte genutzt werden.

Der hier vorgestellte Vorschlag für IT-Risikomanagement versteht Informatik nicht nur als Technik, sondern vor allem als zentrales Mittel für das Geschäft eines Unternehmens oder einer anderen Institution. Technische, organisatorische, rechtliche und finanzielle Risiken dürfen nicht isoliert und nicht als Summe von Einzelrisiken, sondern müssen als neuer qualitativer Aspekt untersucht werden. Dieser neue Aspekt ergibt sich vor allem aus der Komplexität und Heterogenität der Systeme. Die Risiken werden in ihrem Zusammenhang analysiert, modelliert und konstruktiv gelöst, um sie im Sinne von Chancen für die Erreichung der jeweiligen Ziele einzusetzen.

Die Vielfalt der Bereiche, die mit Informationssystemen verknüpft sind und die mit Risiken behaftet sind oder sein können, zeigt die nachfolgende Tabelle.

Bereich	Bemerkungen und Beispiele
Daten	Die Daten eines Informationssystems sind bezüglich ihrer Risiken zu analysieren. Aufhänger für solche Risikoanalysen und Risikomanagementprojekte können Data-Warehouse- oder Business-Information-Warehouse-Projekte sein, weil diese insbesondere mit Daten befaßt sind.
Anwendung / Funktionen	Die Funktionen eines Informationssystems sind bezüglich ihrer Risiken zu analysieren. In einem Integrations- oder Migrationsprojekt sind Fehler im System aufgrund mangelnder systematischer Testbarkeit möglich.
Technologie	Hinsichtlich der Technologie sind nicht nur die technischen Aspekte, wie Datensicherheit, Zugriffsschutz, Netzsicherheit, Virenschutz, zu bedenken, sondern auch die Kommunikation der Systeme untereinander und mit dem Benutzer. So können Interpretationsrisiken entdeckt und behoben werden. Ausfallzeiten aufgrund technischer Ausfälle und komplizierter Abläufe können Auslöser für Reviews und Audits sein.
Prozeß	Die Prozesse sind hinsichtlich Aufbau und Ablauf auf Risiken zu untersuchen. In einem Organisationsprojekt oder Business-Reengineering-Projekt können fehlende oder überflüssige Prozesse erkannt werden.
Organisation	Die Organisation kann mit Risiken behaftet sein. Die Organisation kann dem Geschäft nicht (mehr) angemessen sein. Organisatorische Änderungen enthalten Risiken in Hinsicht auf Abläufe und Mitarbeiter(zufriedenheit). Es sind Risiken im Zusammenhang mit der Dezentralisierung der Informatikabteilungen²⁷³ möglich. Auswirkungen von Veränderungsprojekten auf die Menschen²⁷⁴ stellen ebenfalls ein Risiko dar. Barrieren in Veränderungsprojekten, die sich auf das Projektziel, das Knowhow, die Mitarbeiter oder die Kultur beziehen können²⁷⁵, können Gegenstand einer Risikoanalyse sein.
(Unternehmens-) Führung	Informationstechnologie als zentraler Hebel für organisatorische und koordinative Aufgaben enthält Risiken für die Führung eines Unternehmens. Dieser Aspekt kann in IT-Strategieprojekten bedeutsam sein.
Kultur	Durch die große Bedeutung der Informationssysteme im Unternehmen und für das Unternehmen wird auch die Kultur im Unternehmen beeinflusst.

²⁷³ Vgl. Information Week 21.12.1998

²⁷⁴ »Veränderungen sind nur möglich, wenn die betroffenen Menschen willens und fähig sind, diese mitzutragen.« (Hallmann 1998b, Folie 5)

²⁷⁵ Hier die zehn am häufigsten genannten der zum Scheitern von Veränderungsprojekten führenden Faktoren aus ILOI 1997, 17: Keine schnellen Realisierungserfolge, mangelnde Aufarbeitung der kulturellen Situation, fehlende Zielvereinbarungen, fehlende Kontrolle der Zielvereinbarungen, fehlende Vorbildfunktion der Führungskräfte, negative Erfahrungen mit Veränderungen, fehlende Rollendefinition der Beteiligten, kein Feedback über den Veränderungsprozeß, fehlende Eigenverantwortung der Mitarbeiter, Ansatz an falschen Stellhebeln.

Bereich	Bemerkungen und Beispiele
	Die Risiken in der Kultur und ihrer Veränderung sind Gegenstand von Change-Management-Projekten.
Zustimmung	Das Thema IT-Risikomanagement benötigt wegen seiner Innovativität besonderes Marketing, damit eine konstruktive Auseinandersetzung mit dem Thema erreicht wird. Dieser Aspekt ist vor allem in Veränderungsprojekten zu betrachten.
Fähigkeiten	Knowhow zu speziellen Themenbereichen ist im Unternehmen oder bei externen Mitarbeitern meistens, wenngleich verteilt vorhanden. Es fehlen der übergreifende Aspekt und die Zusammenarbeit der Mitarbeiter. Dieser Punkt betrifft vor allem Projekte, die auf eine Veränderung der Organisation oder die Einführung neuer Methoden zielen und die eine Verunsicherung der Mitarbeiter bewirken.
Strukturen	Strukturen können sich auf verschiedene Ebenen beziehen, beispielsweise auf die Unternehmensstruktur, auf die IT-Struktur oder auf die Mitarbeiterstruktur. In Projekten, die sich mit der IT-Struktur befassen, sind Risiken aufgrund der Unübersichtlichkeit und der mangelnden Kenntnisse über die betroffenen Systeme, unter anderem wegen unvollständiger oder fehlender Dokumentation des Systems und dessen Weiterentwicklung, feststellbar.
Kommunikation	Risiken in der Kommunikation bestehen ebenfalls auf verschiedenen Ebenen. Zu untersuchen wäre beispielsweise, ob und wie die Mitarbeiter mit Know-how verschiedener Aspekte kommunizieren und übergreifende Aspekte erkennen und bearbeiten. Risiken in der Kommunikation liegen nicht nur in technischen Aspekten wie Netzsicherheit, Virenschutz usw., sondern auch in der Interpretation von Informationen, das heißt im pragmatischen Aspekt von Informationssystemen.
Ort	Risiken hinsichtlich eines Ortes für verschiedene Organisationseinheiten sind zu betrachten. Diese Risiken können im Rahmen eines Organisationsprojektes analysiert und modelliert werden.
Performance	Eine gute Performance eines Informationssystems unterstützt die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. Dementsprechend sind Risiken in der Performance zu untersuchen und zu beheben. Reviews und Audits sowie Qualitätssicherungsprojekte sind mögliche Aufhänger für die Untersuchung der Performance-Risiken.
Projekte	Informatikprojektrisiken, die sich aus dem Aufbau und dem Ablauf von Projekten ergeben²⁷⁶, können Gegenstand eines Qualitätssicherungsprojekts sein.

²⁷⁶ Nur 30% der Business Reengineering Projekte sind erfolgreich, nur 20-30% der Qualitätsinitiativen enden mit einem zufriedenstellenden Return on Investment (ROI), in nur 30-40% der Fälle erfolgt eine effektive Einbringung neuer Technologien, nur 40-50% der Kundenserviceprogramme sind erfolgreich. (Vgl. Hallmann 1998a). Eine Umfrage des Internationalen Instituts für Lernende Organisation und Innovation (ILOI) bei 111 größeren Unternehmen (davon über 85% mit mehr als 500 Mitarbeitern) ergab, daß 4

Bereich	Bemerkungen und Beispiele
Recht / Gesetze	Die Einhaltung / Verletzung von Gesetzen (Datenschutzgesetz, KonTraG ²⁷⁷ usw.) und deren Konsequenzen bergen ebenfalls Risiken für ein Unternehmen. So ist beispielsweise in einem e-commerce-Projekt, das auch Kundenprofile erstellen soll, das Datenschutzrecht zu beachten.
Investitionen	Um Fehlinvestitionen im Informatikbereich zu vermeiden, ist eine Risikoanalyse der IT-Investitionen sinnvoll. Auch hier sind Reviews und Audits mögliche Auslöser für die Untersuchung und Behebung der Risiken.

Tabelle 38. Risikoobjekte

Die hier angesprochenen Zusammenhänge sind lediglich Beispiele für Ansatzpunkte, die ein IT-Risikomanagement unter die Lupe nehmen müßte, und keinesfalls eine Aufzählung aller möglichen Aspekte. Es genügt nicht, einzelne Risiken und die Empfehlungen hinsichtlich deren »Beherrschung« (im üblicherweise verstandenen Sinn) um Risiken zu ergänzen, die wiederum isoliert betrachtet werden, sondern es sollte eine übergreifende Perspektive eingenommen werden, die es möglich macht, diese Risiken im jeweiligen Gesamtkontext zu behandeln.

Im folgenden wird ein Vorschlag für ein Modell zur Abbildung von Risiken vorgestellt. Analog zu vorhandenen allgemeinen (Daten-)Modellen²⁷⁸ läßt sich auch für den Bereich des Risikomanagements ein allgemeines Modell der Risikostrukturen entwickeln. Dieses ist so allgemein wie möglich und so konkret wie nötig zu formulieren und soll dem Grundsatz der größtmöglichen Stabilität bei größtmöglicher Flexibilität genügen. Mit diesem Modell ist es möglich, die Daten für die Analyse der IT-Risiken aufzunehmen und die Bewertungskriterien festzulegen.

Im Modell sind drei Ebenen zu berücksichtigen:

- Allgemeine Informationen und Verfahren zur Analyse und Bewertung von Risiken
- Risikopotentiale, zum Beispiel in geschäftlichen Veränderungen wie Fusionen, Integrationen, IT-Strategien, Outsourcing usw.
- Fach-, branchen- und unternehmensspezifische Risiken

²⁷⁷ von 10 Projekten weniger als 60% der gesteckten Ziele erreichten. (ILOI 1997)
²⁷⁷ Das »Gesetz zur Kontrolle und Transparenz im Unternehmensbereich (KonTraG)« ist am 1. Mai 1998 in Kraft getreten.

²⁷⁸ Vgl. Abschnitt 7.2.4.

Die beiden letztgenannten Ebenen sind nicht im voraus bekannt und sind deshalb in der konkreten Situation zu füllen, während allgemeine Aspekte bereits im genannten allgemeinen Modell der Risikostrukturen enthalten sind. Das nachstehende Modell ist die von Ulrich Himmler (1998, 5) im Kontext »Risk Management Systeme für Kreditinstitute« entwickelte Grundstruktur für ein Datenmodell eines Risikomanagementsystems:

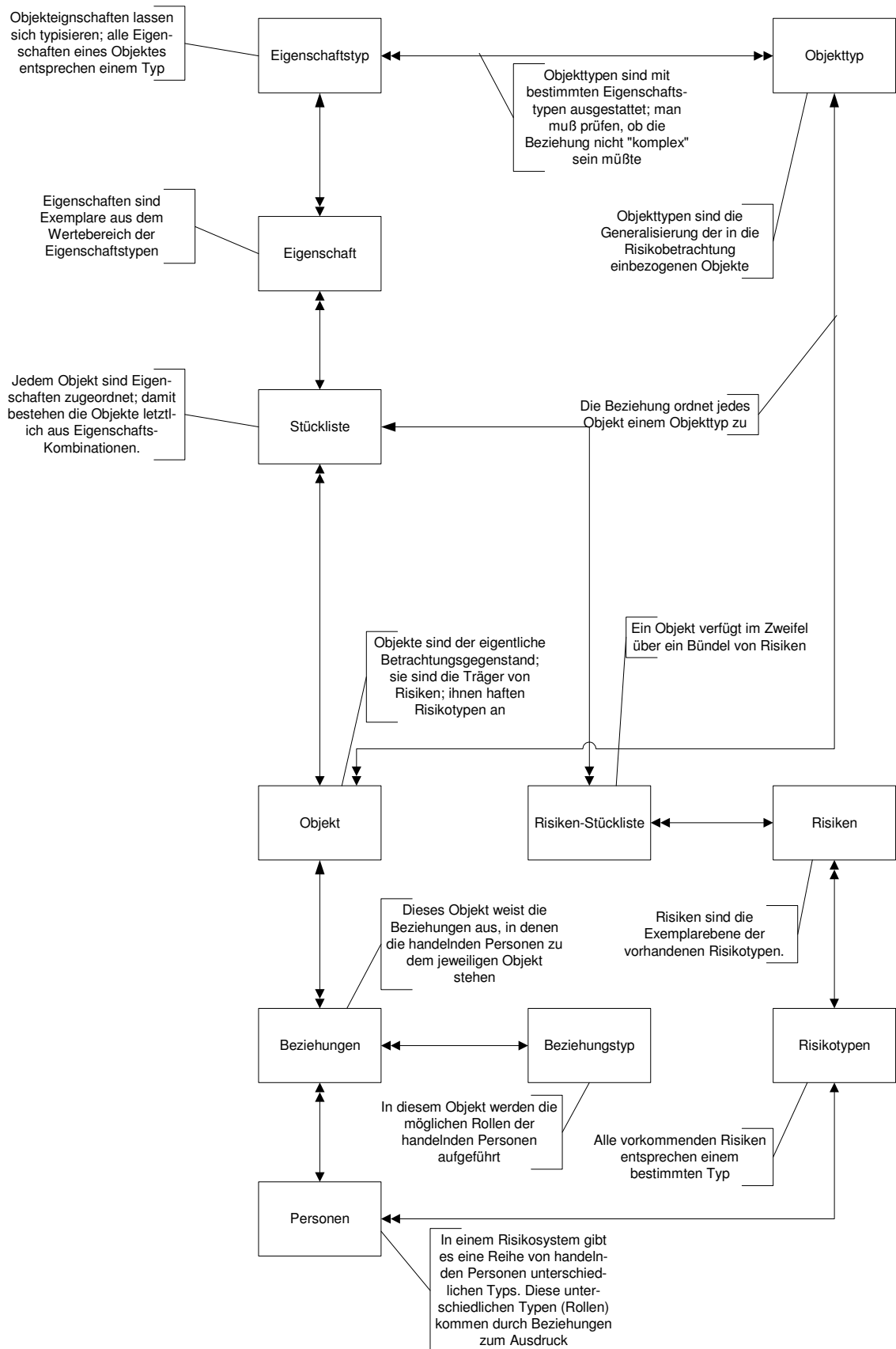


Abbildung 27. Himmlers Datenmodell für Risikomanagementsysteme

Das Modell ist nicht nur für den ursprünglichen Einsatz im Kontext »Risk Management Systeme für Kreditinstitute« geeignet, sondern ermöglicht aufgrund seiner Abstraktion unter anderem auch die Abbildung der in der Tabelle genannten Risikobereiche, so daß ein »Risk Management System für Informationssysteme« entstehen kann.

Als *Objekttypen* können die Bereiche (Daten, Anwendung, Technologie, Prozeß, Organisation, Führung, Kultur, Zustimmung, Fähigkeiten, Struktur, Kommunikation, Ort, Performance, Projekte, Recht/Gesetze, Investitionen) eingesetzt werden.

Zu diesen Objekttypen gibt es konkrete Ausprägungen, also *Objekte*. Zum Beispiel kann ein Objekt »Kreditvergabesystem« dem Objekttyp Anwendung zugeordnet werden.

Ein Objekt kann aus mehreren (Teil-)Objekten zusammengesetzt sein, dies wird durch die *Stückliste* repräsentiert. In der Regel besteht ein Informationssystem aus mehreren Komponenten und läßt sich dementsprechend in die Stücklistenstruktur gliedern.

Jeder Komponente, aber auch dem Gesamtobjekt, zum Beispiel dem »Kreditvergabesystem«, können Risiken zugeordnet werden. Dies erfolgt mit Hilfe der *Risiken-Stückliste*, die – modellierungstechnisch gesehen – die Auflösung einer M:N-Beziehung zwischen Stückliste und Risiken ist.

Auch die Risiken können typisiert werden, dafür stehen die *Risikotypen*. Als Beispiele seien genannt: technische Risiken, rechtliche Risiken, organisatorische Risiken, finanzielle Risiken.

Im Modell sind auch Informationen über *Personen* und deren Abhängigkeiten von Objekten und Risiken darstellbar. Personen treten in verschiedenen Rollen gegenüber den Objekten auf (siehe *Beziehungen/Beziehungstyp*) und haben einen Bezug zu den Risikotypen, zum Beispiel in Form von Interessen oder Intentionen.

Nicht im allgemeinen Modell enthalten ist die Zeit, die in Datenmodellen immer explizit zu modellieren ist.

Hinsichtlich der Risikoobjekte und der mit ihnen verbundenen Risiken ist zwischen der Binnensicht und der Umweltbeziehung zu unterscheiden. Die Binnensicht betrachtet die Komplexität eines Systems und die Kopplung seiner Teile, die Umweltbeziehung untersucht die (negativen) externen Effekte und die Frage, wie offen respektive geschlossen die Grenze des Systems zur Umwelt ist. Beide Aspekte sind im Rahmen einer Risikoanalyse zu betrachten und zu bewerten. Je nach Bewertung (der Innen- und der Außenperspektive) kann dann das System »abgelehnt« oder »angenommen«

werden, es müssen also Entscheidungen bezüglich Handlungen getroffen werden und die Entscheidungen müssen in Handlungen umgesetzt werden.

Das vorgestellte Modell ermöglicht Kontextualisierungen, es erzwingt sie jedoch nicht. Eine Voraussetzung für die Kontextualisierung ist die Ausführung aller Kombinationen von Objekttypen, Risikotypen usw., d.h. alle Felder sind auszufüllen. Außerdem muß das Modell fortlaufend überarbeitet werden, indem die vorhandenen Elemente auf Gültigkeit geprüft und gegebenenfalls neue Aspekte eingefügt werden, so daß das Modell »realitätsnah« bleibt. Nach Sicherstellung dieser Voraussetzungen könnte eine Auswertung stattfinden, bei der das alte Modell mit dem neuen Modell hinsichtlich der Risiken und ihrer Bewertungen verglichen wird. Aufgrund des Vergleichs ist zu entscheiden, ob die aktuellen Risiken vertretbar sind oder nicht, wenn nicht, sollte das Informationssystem stillgelegt werden.

7.3 Schlußbemerkung

Das informatische Handeln samt der Theoriebildung wird von Paradigmen geleitet, die idealiter nur eine eindeutige Weltansicht zulassen. Über Formalisierung und auf Eindeutigkeit zielende Modelle abstrahiert die Informatik von Kontexten und damit von den Vieldeutigkeiten der Alltags- und Lebenswelt. Durch die ihr zufallende Definitions- und Entscheidungsmacht trägt die Informatik dazu bei, Alltags- und Lebenswelt nach diesem Bild zu überformen. Dabei schafft das informatische Handeln wegen der Leistungsfähigkeit seiner Konstrukte Risikolagen, zu deren Behebung die Mittel immer wieder einmal fehlen. Ein von den Konzepten der Elementarsätze und der Verifizierbarkeit sowie dem Gedanken der Kalkülisierbarkeit der Welt geprägtes Instrumentarium erweist sich als defizitär, weil mit ihm die Probleme des Handelns unter der Bedingung von Unsicherheit nicht in den Griff zu kriegen sind. Handeln unter der Bedingung von Unsicherheit impliziert, unter der Bedingung von Nichtwissen zu urteilen und zu entscheiden. Im Wissen um das Nichtwissen zu handeln, führt zum Konzept der Risikoskepsis und Risikoscheu. Unter dem veränderten Blickwinkel gilt das Augenmerk nicht mehr vordringlich der Erzielung von Sicherheit und Eindeutigkeit, sondern der Gestaltung und Erhaltung von Verhältnissen, die als prinzipiell unsicher begriffen werden. Nach dieser Maßgabe gilt Joseph Weizenbaums Äußerung aus dem Jahr 1972 unverändert: »Der Informatiker hat daher die schwerwiegende Verantwortung, die Fehlbarkeit und Begrenztheit der Systeme, die er entwerfen kann, äußerst klarzumachen. Gerade die Wirkungsmöglichkeiten seiner Systeme sollten ihn zögern lassen, bereitwillig seinen Rat zu erteilen, und sollten ihn veranlassen, den Wirkungskreis seiner geplanten Arbeit einzuschränken.« (Weizenbaum 1972, 22) Einer solchen Sicht der Dinge, die nicht das Machbare bejaht, weil es machbar ist, sondern eine vorsichtige Handhabung einfordert, hat in der informatischen Praxis bislang wenig Raum. Eine Richtung, in welche Schritte zu seiner Vergrößerung führen könnten, haben die Beispiele in Kapitel 7 andeutungsweise markiert. Für die als erforderlich angesehenen Veränderungen läßt sich eine Maxime angeben. Sie stammt aus der Seefahrt und besagt, daß es bei der Bestimmung des Schiffsortes zur Vermeidung von Gefahren nicht darauf ankomme, wie gut mein Ort sein kann, sondern wie schlecht.

8 Literaturverzeichnis

- Abrahams, Paul (1988). Specifications and Illusions. President's Letter. In: Communications of the ACM, Band 31, Nr. 5, 1988, S. 480-481.
- Achinstein, Peter (1964). Models, analogies, and theories. In: Philosophy of Science, Nr. 31, S. 328-350.
- Addison, J. W. / Henkin, Leon / Tarski Alfred. (Hg.) (1965). The theory of models. Proceedings of the 1963 international symposium at Berkeley. Amsterdam.
- Albert, Hans (Hg.) (1972). Theorie und Realität. Ausgewählte Aufsätze zur Wissenschaftslehre der Sozialwissenschaften. Tübingen.
- Alisch, Lutz-Michael / Rössner, Lutz (1978). Erziehungswissenschaft als technologische Disziplin. Ein Beitrag zur Technologie-Diskussion in den Sozialwissenschaften. München / Basel.
- Aly, Götz / Roth, Karl Heinz (1984). Die restlose Erfassung. Volkszählen, Identifizieren, Aussondern im Nationalsozialismus. Berlin.
- Anonymus (1986). Fluggesellschaften und Linienflugzeuge. Koblenz.
- Apostel, Leo u.a. (1961). The concept and the role of model in mathematics and natural and social sciences. Proceedings of the colloquium sponsored by the Division of Philosophy of Science of the International Union of History and Philosophy of Sciences, organized at Utrecht, January 1960, by H. Freudenthal. Dordrecht.
- Ashby, W. Ross (1956). An Introduction to Cybernetics. Dt.: Einführung in die Kybernetik. Frankfurt am Main 1974.
- Atanasoff, John V. (1940). Computing Machine for the Solution of Large Systems of Linear Algebraic Equations. (Unpublished memorandum). Ames, Iowa. Iowa State College. August 1940. In: Randell, Brian. The Origins of Digital Computers. Selected Papers. 3. Auflage. Berlin / Heidelberg / New York 1982, S. 315-335.
- Austin, John Langshaw (1962). How to do things with words. Cambridge, Mass.
- Bagge, Erich / Diebner, Kurt (1957). Zur Entwicklung der Kernenergieverwertung in Deutschland. In: Bagge, Erich / Diebner, Kurt / Jay, Kenneth. Von der Uranspaltung bis Calder Hall. Hamburg. S. 9-80.
- Balzert, Helmut (1985). Allgemeine Prinzipien des Software Engineering. In: Angewandte Informatik, 1/1985, S. 1-8.
- Bammé, Arno u.a. (1983). Maschinen-Menschen Mensch-Maschinen. Grundrisse einer sozialen Beziehung. Reinbek.
- Bartels, Christoph (1988). Das Wasserkraft-Netz des historischen Erzbergbaus im Oberharz. Seine Schaffung und Verdichtung zu großtechnischen Systemen als Voraussetzung der Industrialisierung. In: Technikgeschichte, Band 56, 1988, S. 177-192.
- Bartels, Christoph (1994). Soziale und religiöse Konflikte im Oberharzer Bergbau des 18. Jahrhunderts: Ursachen, Hintergründe, Zusammenhänge. In: Niedersächsisches Jahrbuch für Landesgeschichte, Band 66, 1994, S. 79-104.
- Bartels, Christoph (1996). Krisen und Innovationen im Erzbergbau des Harzes zwischen ausgehendem Mittelalter und beginnender Neuzeit. In: Technikgeschichte, Band 63, 1996, S. 1-19.
- Baruzzi, Arno (Hg.) (1968). Aufklärung und Materialismus im Frankreich des 18. Jahrhunderts. La Mettrie – Helvetius – Diderot – Sade. München.
- Baruzzi, Arno (1973). Mensch und Maschine. Das Denken sub specie machinae. München.
- Bateson, Gregory / Jackson, Don D. / Haley, Jay / Weakland, John W. (1956). Towards a Theory of Schizophrenia. In: Behavioral Science. Band 1. Dt.: Auf dem Wege zu einer Theorie der Schizophrenie. In: Bateson, Gregory / Jackson, Don D. / Laing, Ronald D. / Lidz, Theodore / Wynne, Lyman C. u.a. Schizophrenie und Familie. Frankfurt am Main 1969, S. 11-43.
- Bauer, Friedrich L. (1984). Geleitwort zur zweiten Auflage. In: Zuse, Konrad. Der Computer - mein Lebenswerk. Berlin 1984. (1. Auflage München 1970)
- Bauer, Friedrich L. (1991). Scherbius und die ENIGMA. In: Informatik Spektrum, Band 14, Heft 4, August 1991, S. 211-214.

- Bauer, Friedrich L. (1993). Software Engineering – wie es begann. In: Informatik Spektrum, Band 16, Heft 5, Oktober 1993, S. 259-260.
- Bauer, Friedrich L. (1995). Entzifferte Geheimnisse. Methoden und Maximen der Kryptologie. Berlin / Heidelberg / New York.
- Bauer, Friedrich L. (1998). Konrad Zuse – Fakten und Legenden. In: Rojas, Raúl (Hg.). Die Rechenmaschinen von Konrad Zuse. Berlin / Heidelberg / New York 1998. S. 5-20.
- Bauer, Friedrich L. / Goos, Gerhard (1971). Informatik. Eine einführende Übersicht. Band 1 und 2. Berlin / Heidelberg / New York.
- Baumann, Johann Julius (1868/69). Die Lehren von Raum, Zeit und Mathematik in der neueren Philosophie nach ihrem ganzen Einfluss dargestellt und beurtheilt. Erster Band: Suarez, Descartes, Spinoza, Hobbes, Locke, Newton. Berlin 1868. Zweiter Band: Leibniz, Leibniz und Clarke, Berkeley, Hume. Kurzer Lehrbegriff von Geometrie, Raum, Zeit und Zahl. Schluss und Regeln aus dem Ganzen. Berlin 1869.
- Beckmann, Jan Peter (1995). Wilhelm von Ockham. München.
- Beeri, Catriel (1990). A formal approach to object-oriented databases. In: Data & Knowledge Engineering 5, S. 353-382.
- Belli, Fevzi (1998). Methoden und Hilfsmittel für die systematische Prüfung komplexer Software. In: Informatik Spektrum, Band 21, Heft 6, Dezember 1998, S. 337-346.
- Berger, P. (1978) Artikel »Kalkül«. In: Radermacher, H. / Braun, E. (Hg.). Lexikon zur Wissenschaftstheorie.
- Berkeley, Edmund Callis (1949). Giant Brains or Machines that Think. New York. Dt.: Die Computer-Revolution. Elektronengehirne, Automation und Gesellschaft. Frankfurt am Main 1966.
- Berliner Börsenzeitung, Nr. 65, 8.2.1911. Vorstellung Hollerith-System im Reichstagsgebäude.
- Bernays, Paul (1930/31). Die Philosophie der Mathematik und die Hilbertsche Beweistheorie. In: Blätter für deutsche Philosophie, Band 4, S. 326-367.
- Bernays, Paul (1967). Hilbert. In: Edwards, Paul (Hg.). The Encyclopedia of Philosophy, Band 3, New York, S. 496-504.
- Bernays, Paul / Schönfinkel, Moses (1928). Zum Entscheidungsproblem der mathematischen Logik. In: Mathematische Annalen, Band 99, S. 342-372.
- Bertalanffy, Ludwig von (1953). Biophysik des Fließgleichgewichts. Einführung in die Physik offener Systeme. Braunschweig.
- Bertalanffy, Ludwig von (1957). Allgemeine Systemtheorie. Wege zu einer neuen Mathesis universalis. In: Deutsche Universitätszeitung, 5/6, S. 8-12.
- Bertalanffy, Ludwig von (1968). Organismic Psychology and System Theory. Barre, Mass.
- Bertalanffy, Ludwig von (1969). General System Theory. Foundations, Development, Applications. 2. Auflage. New York.
- Biermann, Kurt-R. (1955). Eine Untersuchung von Gottfried Wilhelm Leibniz über die jährliche Sterblichkeitsrate. In: Forschungen und Fortschritte, Berlin 1955, Jahrgang 29, Heft 7, S. 205-208.
- Black, Max (1960). Models and Archetypes. In: Black, Max. Models and Metaphors. Studies in Language and Philosophy. Ithaca, N.Y. 1962, S. 219-243.
- Bloch, Ernst (1972). Vorlesungen zur Philosophie der Renaissance. Frankfurt am Main.
- Bloch, Gilbert (1987). Enigma before Ultra – Polish Work and the French Contribution. Translated by C.A. Deavours. In: Cryptologia. A Quaterly Journal Devoted to Cryptology, Band 11, Nr. 3, Juli 1987, S. 142-155 und Nr. 4, Oktober 1987, S. 227-234.
- Boehm, Barry W. (1988). A Spiral Model of Software Development and Enhancement. In: Computer, Mai 1988, S. 61-72.
- Bonß, Wolfgang (1995). Vom Risiko. Unsicherheit und Ungewißheit in der Moderne. Hamburg.
- Bonß, Wolfgang / Hohlfeld, Rainer / Kollek, Regine (Hg.) (1993). Wissenschaft als Kontext – Kontexte der Wissenschaft. Hamburg.
- Bossel, Hartmut (1992). Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Braunschweig / Wiesbaden.
- Boulding, Kenneth (1967). Die Parameter der Politik. In: atomzeitalter. Zeitschrift für Sozialwissenschaften und Politik, 7/8, Juli/August 1967, S. 362-373.

- Bracken, Paul (1983). *The Command and Control of Nuclear Forces*. Cambridge, Mass.
- Brainerd, John G. / Sharpless, T. Kite (1948). *The ENIAC*. In: *Electrical Engineering*. (The Journal of the AIEE.) New York, Februar 1948, Band 67, S. 163-172.
- Brauer, Wilfried (1989). Von der sequentiellen zur parallelen Verarbeitung. In: *Theorie und Praxis der Wirtschaftsinformatik* (HMD 150), Heft 150, November 1989, S. 15-25.
- Brauer, Wilfried (1990). Grenzen maschineller Berechenbarkeit. In: *Informatik-Spektrum*, Band 13, Heft 2, S. 61-70.
- Brauer, Wilfried (1993). KI auf dem Weg in die Normalität. (Überarbeitete Version eines Vortrags bei der 11. Frühjahrsschule Künstliche Intelligenz (KIFS-93) des Fachbereichs 1 der GI am 27. Februar 1993.) In: *KI Künstliche Intelligenz*, Sonderheft zur 17. Fachtagung für Künstliche Intelligenz, August 1993, S. 85-91.
- Brauer, Wilfried / Brauer, Ute (1992). Wissenschaftliche Herausforderungen für die Informatik: Änderungen von Forschungszielen und Denkgewohnheiten. (Vortrag GI-Fachbereich 8, Fachtagung »Informatik - cui bono?«, erscheint in Tagungsband W. Langenheder (Hg.): *Informatik aktuell*. München.)
- Brauer, Wilfried / Indermark, Klaus (1968). *Algorithmen, rekursive Funktionen und formale Sprachen*. Mannheim.
- Brödner, Peter / Krüger, Detlef / Senf, Bernd (1981). *Der programmierte Kopf. Eine Sozialgeschichte der Datenverarbeitung*. Berlin.
- Brouwer, Luitzen Egbertus Jan (1907). *On the Foundations of Mathematics*. In: Brouwer, Luitzen Egbertus Jan. *Collected Works*, Band I, herausgegeben von Arend Heyting. Amsterdam / Oxford 1975, S. 11-101.
- Brunnstein, Klaus (1990). Vortrag zum Thema »Rechnersicherheit«. Hamburg 21. Mai 1990.
- Brunnstein, Klaus / Fischer-Hübner, Simone (1990). *Risk Analysis of »Trusted Computer Systems«*. Hamburg.
- Burkhardt, Hans (1980). *Logik und Semiotik in der Philosophie von Leibniz*. München.
- Burks, Arthur W. (1966). Introduction. In: Neumann, John von. *The Theory of Self-Reproducing Automata*. Urbana, Ill.
- Burks, Arthur W. (1980). From ENIAC to the Stored-Program Computer. In: Metropolis, Nicholas Constantine / Howlett, Jack / Rota, Gian Carlo. *A History of Computing in the Twentieth Century*. New York 1980. S. 311-346.
- Burks, Arthur W. / Goldstine, Herman H. / Neumann, John von (1946). Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument. Part I. Report prepared for U.S. Army Ord. Dept. under Contract W-36-034-ORD-7481. Reprinted in: Neumann, John von (1963). Band 5, S. 34-79. [Part II vgl. Goldstine / Neumann (1947/1948).]
- Bush, Vannevar (1929). *Operational Circuit Analysis*. New York.
- Bush, Vannevar (1931). The Differential Analyzer. A New Machine for Solving Differential Equations. In: *Journal of the Franklin Institute*, Band 212, S. 447-488.
- Bush, Vannevar (1940). *Arithmetical Machine*. Vannevar Bush Papers, Container 18, Folder: Caldwell, Samuel, 1939-1940. Library of Congress, Washington, D.C. In: Randell, Brian. *The Origins of Digital Computers. Selected Papers*. 3. Auflage. Berlin / Heidelberg / New York 1982, S. 337-343.
- Bush, Vannevar (1945). As We May Think. In: *The Atlantic Monthly* 7/1945, Band 176, Heft 1, S. 101-108.
- Campbell-Kelly, Martin / Aspray, William (1996). *Computer – A History of the Information Machine*. New York.
- Canguilhem, Georges (1979). *Wissenschaftsgeschichte und Epistemologie. Gesammelte Aufsätze*. Herausgegeben von Wolf Lepenies. Frankfurt am Main.
- Cantor, Georg (1887). Mitteilungen zur Lehre vom Transfiniten. In: *Gesammelte Abhandlungen mathematischen und philosophischen Inhalts*. Herausgegeben von Ernst Zermelo. Berlin / Heidelberg / New York 1980, Nachdruck der Ausgabe Berlin 1932, S. 378-439, mit Anmerkungen Zermelos auf S. 439.
- Carlson, David R. (1989). The Vincennes Incident. In: *Proceedings US Naval Institute*, September 1989, Band 115/9/1039, S. 87-92.

- Carnap, Rudolf (1923). Über die Aufgabe der Physik und die Anwendung des Grundsatzes der Einfachheit. In: Kant-Studien, Band 28, S. 90-107.
- Carnap, Rudolf (1924). Dreidimensionalität des Raumes und Kausalität. In: Annalen der Philosophie und philosophischen Kritik, Band 4, S. 105-130.
- Carnap, Rudolf (1928a). Der logische Aufbau der Welt. Berlin, Frankfurt am Main 1979.
- Carnap, Rudolf (1928b). Scheinprobleme in der Philosophie. Das Fremdpsychische und der Realismustreit. Berlin.
- Carnap, Rudolf (1929). Abriss der Logistik. (= Schriften zur wissenschaftlichen Weltauffassung. Band 2) Wien.
- Carnap, Rudolf (1930/31a). Die Mathematik als Zweig der Logik. In: Blätter für Deutsche Philosophie, Band 4, S. 298-310.
- Carnap, Rudolf (1930/31b). Die alte und die neue Logik. In: Erkenntnis, Band 1, S. 12-26.
- Carnap, Rudolf (1931a). Die logizistische Grundlegung der Mathematik. In: Bericht über die 2. Tagung für Erkenntnislehre der exakten Wissenschaften Königsberg 1930. In: Erkenntnis, Band 2, S. 91-105.
- Carnap, Rudolf (1931b). Die physikalische Sprache als Universalsprache der Wissenschaft. In: Erkenntnis, Band 2, S. 432-465.
- Carnap, Rudolf (1931c). Überwindung der Metaphysik durch logische Analyse der Sprache. In: Erkenntnis, Band 2, S. 219-241.
- Carnap, Rudolf (1932/33a). Erwiderung auf die vorstehenden Aufsätze von E. Zilsel und K. Duncker. In: Erkenntnis, Band 3, S. 177-188.
- Carnap, Rudolf (1932/33b). Über Protokollsätze. In: Erkenntnis, Band 3, S. 215-228.
- Carnap, Rudolf (1939). Foundations of Logic and Mathematics. Dt.: Grundlagen der Logik und Mathematik. München 1973.
- Carnap, Rudolf / Hahn, Hans / Neurath, Otto (1929). Wissenschaftliche Weltauffassung – Der Wiener Kreis. Veröffentlichungen des Vereins Ernst Mach. Wien. In: Neurath, Otto. Wissenschaftliche Weltauffassung, Sozialismus und Logischer Empirismus. Frankfurt 1979, S. 81-101.
- Carpenter, B.E. / Doran, R.W. (1975/77). The other Turing machine. In: The Computer Journal. A Publication of The British Computer Society, Band 20, Nr. 3, 1977, S. 269-279.
- Carr, Marvin J. / Konda, Suresh L. / Monarch, Ira / Ulrich, R. Carol / Walker, Clay F. (1993). Taxonomy-Based Risk Identification. Technical Report CMU/SEI-93-TR-06 ESC-TR-93-183.
- Carroll, Lewis (1872). Through the Looking-Glass and what Alice Found there. In: Carroll, Lewis. The Complete Illustrated Lewis Carroll with an Introduction by Alexander Woollcott. Illustrations by John Tenniel. Ware 1996. Dt.: Alice im Wunderland. Alice hinter den Spiegeln. 2 Romane. Frankfurt am Main 1963.
- Carroll, Lewis (1889). Sylvie and Bruno. In: Carroll, Lewis. The Complete Illustrated Lewis Carroll with an Introduction by Alexander Woollcott. Illustrations by John Tenniel. Ware 1996.
- Cassirer, Ernst (1929). Philosophie der symbolischen Formen. Dritter Teil. Phänomenologie der Erkenntnis. Berlin.
- Ceruzzi, Paul E. (1993). Die frühen Arbeiten von Konrad Zuse im Kontext der Erfindung des digitalen Computers. In: Deutsches Museum. Wissenschaftliches Jahrbuch 1992/93. München. S. 170-186.
- CG47 Class Advisory Nr 15-94 (1994). <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/weaps/cg-15-94.html>
- Chapuis, Alfred / Droz, Edmond (o.J.). Les Automates des Jacquet-Droz. Neuchâtel.
- Charney, Jule Gregory / Fjörtoft, Ragnar / Neumann, John von (1950). Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation. In: Tellus, Band 2, S. 237-254. Auch in: Neumann, John von. Collected Works. Herausgegeben von A. H. Taub. Band 6, Oxford 1963, S. 413-430.
- Chen, Peter (1976). The Entity-Relationship Model – Toward a Unified View of Data. In: ACM Transactions on Database Systems, Band 1, Nr. 1, März 1976, S. 9-36.
- Church, Alonzo (1936a). An Unsolvable Problem of Elementary Number Theory. In: American Journal of Mathematics, Band 58, S. 345-363.

- Church, Alonzo (1936b). A Note on the Entscheidungsproblem. In: Journal of Symbolic Logic, Band 1, Nr. 1, März 1936, S. 40-41.
- Church, Alonzo (1936c). Correction to the Note on the Entscheidungsproblem. In: Journal of Symbolic Logic, Band 1, Nr. 3, September 1936, S. 101-102.
- [Clasen, Brigitte] (1992). Migration. Relationale Datenbankstrukturen systematisch einführen. Hamburg. [Firmenschrift: Ploenzke Informatik, Geschäftsstelle Hamburg, Technologieberatung.]
- Clausen, Horst / Huber, Eric (1980). Das DoD-Sprachenprojekt für rechnergestützte Systeme. In: Wehrtechnik 1/80, S. 84-88.
- Codd, Edgar F. (1970). A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. In: Communications of the ACM, Band 13, Nr. 6, Juni 1970, S. 377-387.
- Codd, Edgar F. (1979). Extending the Database Relational Model to Capture more Meaning. In: ACM Transactions on Database Systems, Band 4, Nr. 4, Dezember 1979, S. 397-434.
- Couturat, Louis (1901). La Logique de Leibniz. Paris. Nachdruck Olms 1961.
- Coy, Wolfgang / Nake, Frieder / Pflüger, Jörg-Martin / Rolf, Arno / Seetzen, Jürgen / Siefkes, Dirk / Stransfeld, Reinhard (Hg.) (1992). Sichtweisen der Informatik. Braunschweig / Wiesbaden.
- CSC (1991). CSC Catalyst. Version 1.0 [Firmenschrift; Version 5.0 wurde 2006 fertiggestellt.]
- CSC Consulting and Systems Integration (1998): Security Architecture. Practice Guide 5. [Firmenschrift, Waltham, Mass.]
- CW Extra (28.11.1998): Die wichtigsten Business-Trends und deren Auswirkungen auf die IT.
- Dahl, Ole-Johan / Dijkstra, Edsger W. / Hoare, C.A.R. (1972). Structured Programming. London.
- Date, Christopher J. (1986). An Introduction to Database Systems. Band 1. Reading.
- Dawson, John W. jr. (1997). Logical Dilemmas: The Life and Work of Kurt Gödel. Wellesley, Mass. Hier zitiert nach: Dt.: Kurt Gödel: Leben und Werk. Wien / New York 1999.
- Dedekind, Richard (1872). Stetigkeit und irrationale Zahlen. In: Dedekind, Richard, Gesammelte mathematische Werke. Herausgegeben von R. Fricke / E. Noether / O. Ore, Band 3. Braunschweig 1932, S. 315-334.
- Defense Mapping Agency – Hydrographic / Topographic Center. Pub. No. 249, Sight Reduction Tables for Air Navigation. 3 Bände.
- De Marco, Tom (1978). Structured Analysis and System Specification. Englewood Cliffs.
- De Millo, Richard A. / Lipton, Richard J. / Perlis, Alan J. (1979). Social Processes and Proofs of Theorems and Programs. In: Communications of the ACM, Band 22, S. 271-280.
- Denert, Ernst (1993). Software-Engineering in Wissenschaft und Wirtschaft: Wie breit ist die Kluft? In: Informatik Spektrum, Band 16, Heft 5, Oktober 1993, S. 295-299.
- Denkschrift zur Einweihung der neuen Arbeitsstätte der Deutschen Hollerith Maschinen Gesellschaft mbH in Berlin-Lichterfelde am 8. Januar 1934. Im Auszug als Faksimile in: Petzold, Hartmut. Moderne Rechenkünstler. Die Industrialisierung der Rechentechnik in Deutschland. München 1992. S. 145.
- Denne, Norbert (1988). DB2. Theorie und Praxis. Allensbach.
- Denne, Norbert (2000). DB2. Theorie und Praxis. Allensbach. 6. Auflage.
- Desanti, Jean-Toussaint (1975). Mathematik, die Geburt der »Moderne« 1850-1900. In: Châtelet, François. Geschichte der Philosophie, Frankfurt am Main, Band 6, S. 176-189.
- Descartes, René (1637). Discours de la Méthode. Von der Methode des richtigen Vernunftgebrauchs und der wissenschaftlichen Forschung. Übersetzt und herausgegeben von Lüder Gäbe. Hamburg 1960.
- Descartes, René (1641). Meditationen über die Grundlagen der Philosophie (Lat.-dt.) Übersetzt und herausgegeben von Lüder Gäbe. Hamburg 1959.

- Descartes, René (1644). *Prinzipien der Philosophie*. Übersetzt von A. Buchenau. Hamburg 1955.
- Deutsch, Karl W. (1963). *Politische Kybernetik. Modelle und Perspektiven*. Freiburg 1969. 3., unveränderte Auflage 1973 nach der erweiterten amerikanischen Neuausgabe von 1966: *The Nerves of Government: Models of Political Communication and Control*. New York 1963.
- DGLR – Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt. (1984). *Test und Verifikation von Software bei digitalen Systemen der Luft- und Raumfahrt*. DGLR-Bericht 83-02. Bonn.
- Dijkstra, Edsger W. (1972). *Notes on Structured Programming*. In: Dahl, Ole-Johan / Dijkstra, Edsger W. / Hoare, C. A. R.. *Structured Programming*. London, S. 1-82.
- DIN 66001. *Sinnbilder und ihre Anwendung*. Informationsverarbeitung = Information processing / Normenausschuß Informationsverarbeitungssysteme (NI) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Stand 12.83. Berlin 1983.
- Dörner, Dietrich (1989). *Die Logik des Mißlingens*. Strategisches Denken in komplexen Situationen. Reinbek.
- Donne, John (1611). *An Anatomy of the World*. In: Donne, John. *The Complete English Poems*. Herausgegeben von A. J. Smith. London 1996, S. 270-286.
- Dyson, Freeman (1981). *Innenansichten. Erinnerungen an die Zukunft*. Basel / Boston / Stuttgart.
- Echtle, Klaus / Silva, João Gabriel (1998). *Fehlerinjektion – ein Mittel zur Bewertung der Maßnahmen gegen Fehler in komplexen Systemen*. In: *Informatik Spektrum*, Band 21, Heft 6, Dezember 1998, S. 328-336.
- Eckert, John Presper (1945). *Disclosure of Magnetic Calculating Machine* (Unpublished typescript). 1. Februar 1945. Wiederabgedruckt in Eckert, John Presper (1980). *The ENIAC*. In: Metropolis, Nicholas Constantine / Howlett, Jack / Rota, Gian Carlo. *A History of Computing in the Twentieth Century*. New York 1980, S. 525-539.
- Eco, Umberto (1982). *Die Karte des Reiches im Maßstab 1:1*. In: Eco, Umberto. *Platon im Striptease-Lokal. Parodien und Travestien*. Frankfurt am Main 1990. S. 73-83.
- Eco, Umberto (1994). *Die Suche nach der vollkommenen Sprache*. München.
- EDV Studio Ploenzke (1989). *ISOTEC - Integrierte Softwaretechnologie*. Wiesbaden. [Firmenschrift]
- Edwards, Paul N. (1996). *The Closed World. Computers and the Politics of Discourse in Cold War America*. Cambridge, Mass. / London.
- Eisenhower, Dwight D. (1961). *Farewell Radio and Television Address to the American People*. 17.1.1961. In: National Archives and Records Administration of the United States. *Public Papers of the Presidents, Dwight D. Eisenhower, 1960*, S. 1035-1040.
- Endres, Albert (1977). *Analyse und Verifikation von Programmen*. München / Wien.
- Euklid. *Die Elemente*. Buch I-XIII. Nach Heibergs Text aus dem Griechischen übersetzt und herausgegeben von Clemens Thaer. 7. Auflage, Darmstadt 1980.
- Everett, Robert E. (1980). *Whirlwind*. In: Metropolis, Nicholas Constantine / Howlett, Jack / Rota, Gian Carlo. *A History of Computing in the Twentieth Century*. New York 1980, S. 365-384.
- FAA (1995). *Federal Aviation Administration. Office of Systems Safety. Workshop on Flight Crew Accident and Incident Human Factors*. June 21-23, 1995.
- Fehér, Márta (1974). *Vom Prinzip des einfachsten Weges bis zum Prinzip der kleinsten Wirkung*. In: *Akten des II. Internationalen Leibniz-Kongresses Hannover 1972*. Band II. [= *Studia Leibnitiana Supplementa*. Band 13. Wiesbaden 1974. S. 161-172.]
- Feyerabend, Paul (1958). *Artikel »Naturphilosophie«*. In: *Das Fischer Lexikon, Philosophie*. Mit einer Einleitung von Prof. Dr. Helmuth Plessner. Herausgegeben von Dr. Dr. Alwin Diemer und Ivo Frenzel. Frankfurt am Main, S. 203-227.
- Feyerabend, Paul (1976). *Wider den Methodenzwang*. Frankfurt am Main.
- Feyerabend, Paul (1978a). *Kuhns »Struktur wissenschaftlicher Revolutionen«*. In: Feyerabend, Paul. *Der wissenschaftstheoretische Realismus und die Autorität der Wissenschaften*. Braunschweig / Wiesbaden, S. 153-204. Veränderte und erweiterte Fassung

- von »Consolations for the Specialist«. In: Lakatos, Imre / Musgrave, Alan (Hg.). *Criticism and the Growth of Knowledge*. Cambridge 1970, S.197-230.
- Feyerabend, Paul (1978b). Die »Rationalität« der Forschung. In: Feyerabend, Paul. *Der wissenschaftstheoretische Realismus und die Autorität der Wissenschaften*. Braunschweig / Wiesbaden, S. 339-350.
- Feyerabend, Paul (1983a). Institutionelle Methoden der Wahrheitsgewinnung und Wahrheitsfestlegung in den Wissenschaften. In: Feyerabend, Paul / Thomas, Christian / Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Hg.). *Wissenschaft und Tradition*. Zürich, S. 139-148.
- Feyerabend, Paul (1983b). Der Galileiprozess - Einige unzeitgemäße Betrachtungen. In: Feyerabend, Paul / Thomas, Christian / Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Hg.). *Wissenschaft und Tradition*. Zürich, S. 183-192.
- Feyl, Othmar (1956/57). Deutsche und europäische Bildungskräfte der Universität Jena von Weigel bis Wolff (1650-1850). In: *Wissenschaftliche Zeitschrift der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Gesellschafts- und sprachwissenschaftliche Reihe*, Jahrgang 6, S. 27-62.
- Flechner, Hans-Joachim (1970). *Grundbegriffe der Kybernetik*. München.
- Fleck, Ludwik (1935). *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache*. Frankfurt am Main 1980.
- Floyd, Christiane (1984). A Systematic Look at Prototyping. In: Budde, R. / Kuhlenkamp, K. / Mathiassen, L / Züllighoven, H. (Hg.). *Approaches to Prototyping*. Berlin, S. 1-18.
- Floyd, Christiane (1994). Software-Engineering – und dann? In: *Informatik Spektrum*, Band 17, Heft 1, Februar 1994, S. 29-37.
- Floyd, Christiane / Reisin, F.-M. / Schmidt, G. (1989). STEPS to Software Development with Users. In: Ghezzi, C. / McDermid, J.A. (Hg.). *ESEC'89, Lecture Notes in Computer Science*, Nr. 387. Berlin, S. 48-64.
- Fraenkel, Adolf (1930). Die heutigen Gegensätze in der Grundlegung der Mathematik. In: *Erkenntnis*, Band 1, 1930/31, S. 286-302.
- Frank, Philipp (1949). *Modern Science and its Philosophy*. Cambridge.
- Frege, Gottlob (1879). *Begriffsschrift, eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens*. Halle an der Saale. Nachdruck Darmstadt 1964.
- Frege, Gottlob (1884). *Die Grundlagen der Arithmetik. Eine logisch mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl*. Breslau.
- Frege, Gottlob (1893). *Grundgesetze der Arithmetik. Begriffsschriftlich abgeleitet*. Band I. Jena.
- Frege, Gottlob (1924). *Nachgelassene Schriften*. Unter Mitwirkung von Gottfried Gabriel und Walburga Rödding. Bearbeitet, eingeleitet und mit Anmerkungen versehen von Hans Hermes, Friedrich Kambartel, Friedrich Kaulbach. 2. erweiterte Auflage. Hamburg 1983.
- Frege, Gottlob (1967). *Kleine Schriften*. Herausgegeben von Ignacio Angelelli. Darmstadt / Hildesheim.
- Frege, Gottlob (1969). *Nachgelassene Schriften und wissenschaftlicher Briefwechsel*. Band I. *Nachgelassene Schriften*. Herausgegeben von Hans Hermes, Friedrich Kambartel, Friedrich Kaulbach. Hamburg.
- Frege, Gottlob (1976). *Wissenschaftlicher Briefwechsel*. Herausgegeben, bearbeitet, eingeleitet und mit Anmerkungen versehen von Gottfried Gabriel, Hans Hermes, Friedrich Kambartel, Christian Thiel, Albert Veraart. Hamburg.
- Friedewald, Michael (2000). Vom Experimentierfeld zum Massenmedium: Gestaltende Kräfte in der Entwicklung des Internet. In: *Technikgeschichte*, Band 67, Nr. 4, S. 331-361.
- Friedrichs, Günter / Schaff, Adam (Hg.) (1982). *Auf Gedeih und Verderb. Mikroelektronik und Gesellschaft. Bericht an den Club of Rome*. Wien.
- Fulbright, J. William (1970). The War and Its Effects. The Military-Industrial-Academic Complex. In: Schiller, Herbert J. (Hg.) *Super-State. Readings in the Military-Industrial Complex*. Urbana. S. 171-178.

- Furger, Franco / Heintz, Bettina (1998). Wahlfreiheiten. Frühe Computerentwicklung am Beispiel der Schweiz. In: Siefkes, Dirk / Eulenhöfer, Peter / Stach, Heike / Städtler, Klaus (Hg.). Sozialgeschichte der Informatik. Kulturelle Praktiken und Orientierungen. Wiesbaden. S. 231-253.
- Gadamer, Hans-Georg (1967). Philosophisches Lesebuch. Frankfurt am Main.
- Gandy, Robin (1988). The Confluence of Ideas in 1936. In: Herken, Rolf (Hg.) The Universal Turing Machine. A Half-Century Survey. Hamburg / Berlin. S. 55-111.
- Ganzhorn, Karl / Walter, Wolfgang (1975). Die geschichtliche Entwicklung der Datenverarbeitung. Herausgegeben von IBM Deutschland GmbH, Stuttgart.
- Geier, Manfred (1992). Der Wiener Kreis. Reinbek.
- Gerland, Ernst (1898). Über Leibnizens Versuche, dem Mangel an Aufschlagwassern in den Gruben des Harzes mit Hilfe der Kraft des Windes abzuweichen. In: Berg- und Hüttenmaennische Zeitung, Jahrgang 57, S. 225-228 und S. 243-245.
- Gesetz zur Kontrolle und Transparenz im Unternehmensbereich (KonTraG) vom 27. April 1998. In: Bundesgesetzblatt Teil 1. Bonn 1998, 24, S. 786-794.
- Gewald, K. (1977). Software Engineering. München / Wien.
- Glatthaar, Wolfgang (1993). Informatik im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. In: Informatik Spektrum, Band 16, Heft 3, Juni 1993, S. 129-132.
- Glöckl, Johann (1978). Artikel »Aussagenlogik«. In: Radermacher, H. / Braun, E. (Hg.). Lexikon zur Wissenschaftstheorie.
- Gödel, Kurt (1930). Die Vollständigkeit der Axiome des logischen Funktionenkalküls. In: Monatshefte für Mathematik und Physik, Band 37, Heft 2, S. 349-360.
- Gödel, Kurt (1931). Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme. I. In: Monatshefte für Mathematik und Physik, Band 38, S. 173-198.
- Goldstine, Herman H. (1972). The Computer from Pascal to von Neumann. Princeton 1993.
- Goldstine, Herman H. (1990). Remembrance of Things Past. In: Nash, Stephen G. (Hg.) A History of Scientific Computing. New York. S. 5-16.
- Goldstine, Herman H. / Goldstine, Adele (1946). The Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC). In: Mathematical Tables and Other Aids to Computation (MTAC), 2, Nr. 15, S. 97-110. Nachdruck in: Randell, Brian. The Origins of Digital Computers. Selected Papers. 3. Auflage. Berlin / Heidelberg / New York 1982. S. 359-373.
- Goldstine, Herman H. / Neumann, John von (1947/48). Planning and Coding of Problems for an Electronic Computing Instrument, Report on the Mathematical and Logical Aspects of an Electronic Computing Instrument, Part II, vol. 1 (1947), vol. 2 (1948), vol. 3 (1948). Report prepared for U.S. Army Ord. Dept. under Contract W-36-034-ORD-7481. Nachdruck in: Neumann, John von (1963). Band 5. [Part I vgl. Burks / Goldstine / Neumann (1946).]
- Good, Irving John (1976). Pioneering Work on Computers at Bletchley. In: Metropolis, Nicholas Constantine / Howlett, Jack / Rota, Gian Carlo. History of Computing in the Twentieth Century. New York 1980. S. 31-45.
- Gould, Stephen Jay (1995). Leitern und Kegel: Einschränkungen der Evolutionstheorie durch kanonische Bilder. In: Sacks, Oliver / Miller, Jonathan / Gould, Stephen Jay / Kevles, Daniel / Lewontin, R.C. Verborgene Geschichten der Wissenschaft. Herausgegeben von Robert B. Silvers. Berlin. [Engl. zuerst in: Hidden Histories of Science. New York 1995.]
- Graunt, John (1662). Natural and political observations mentioned in a following index, and made upon the bills of mortality. London. Farnborough 1973.
- Greiner, Bernd (1995). Die Morgenthau-Legende. Zur Geschichte eines umstrittenen Plans. Hamburg.
- Grossmann, Henryk (1935). Die gesellschaftlichen Grundlagen der mechanistischen Philosophie und die Manufaktur. In: Zeitschrift für Sozialforschung, Jahrgang 4, Heft 2, S. 161-231.

- Günther, Gotthard (1957). *Das Bewußtsein der Maschinen. Eine Metaphysik der Kybernetik*. Krefeld. Zitiert nach der Neuauflage 1963.
- Guhrauer, Gottschalk Eduard (1846). *Gottfried Wilhelm Freiherr von Leibniz*. Breslau. Nachdruck Hildesheim 1960.
- Habermas, Jürgen (1963). Die klassische Lehre von der Politik in ihrem Verhältnis zur Sozialphilosophie. (Ausarbeitung der Marburger Antrittsvorlesung Dezember 1961) In: Habermas, Jürgen. *Theorie und Praxis. Sozialphilosophische Studien*. 3. Auflage. Frankfurt am Main 1982. S. 48-88.
- Habermas, Jürgen (1968). *Erkenntnis und Interesse*. Frankfurt am Main.
- Habermas, Jürgen (1976). Was heißt Universalpragmatik? In: Habermas, Jürgen: *Vorstudien und Ergänzungen zur Theorie des kommunikativen Handelns*. Frankfurt am Main 1995. S. 353-440.
- Habermas, Jürgen (1983). *Moralbewußtsein und kommunikatives Handeln*. 7. Auflage. Frankfurt am Main 1999.
- Habermas, Jürgen (1988). Motive nachmetaphysischen Denkens. In: Habermas, Jürgen. *Nachmetaphysisches Denken. Philosophische Aufsätze*. Frankfurt am Main. S. 35-60.
- Hahn, Hans (1930). *Überflüssige Wesenheiten (Occams Rasiermesser)*. Wien. Nachdruck in: Hahn, Hans (1988). *Empirismus, Logik, Mathematik*. Mit einer Einleitung von Karl Menger. Herausgegeben von Brian Mc Guinness. Frankfurt am Main. S. 21-37.
- Hahn, Hans (1930/31). Die Bedeutung der wissenschaftlichen Weltauffassung, insbesondere für Mathematik und Physik. In: *Erkenntnis*, Band 1, S. 96-105.
- Hahn, Hans (1932). *Logik, Mathematik und Naturerkennen*. (Diese Arbeit gibt zwei Vorträge wieder, die im Frühjahr 1932 in einem Vortragszyklus zugunsten der Errichtung eines Grabdenkmales für Ludwig Boltzmann und im Herbst 1932 im Verein Ernst Mach in Wien gehalten wurden.) In: *Einheitswissenschaft*, Heft 2, 1933. Nachdruck in: Hahn, Hans. *Empirismus, Logik, Mathematik*. Mit einer Einleitung von Karl Menger. Herausgegeben von Brian Mc Guinness. Frankfurt am Main 1988, S. 141-172.
- Hahn, Hans (1933). Die Krise der Anschauung. In: *Krise und Neuaufbau in den exakten Wissenschaften. Fünf Wiener Vorträge*. Leipzig / Wien. Nachdruck in: Hahn, Hans. *Empirismus, Logik, Mathematik*. Mit einer Einleitung von Karl Menger. Herausgegeben von Brian Mc Guinness. Frankfurt am Main 1988, S. 86-114.
- Haller, Albrecht von (1765). *Elementa Physiologiae Corporis Humani*. 8 Bände. Bern / Lausanne 1757-1766. Hier: Band 7.
- Haller, Albrecht von (1778). *Briefe über einige noch lebenden Freygeister. Einwürfe wider die Offenbarung*. 3 Teile in 1 Band. 2. verbesserte und vermehrte Auflage. Bern.
- [Hallmann, Cornelia] (1998a). *Change Management. Accelerating Change – Den Wandel antreiben*. [Firmenschrift: CSC Ploenzke, Competence Center Organisationsentwicklung und Methoden. Hamburg]
- [Hallmann, Cornelia] (1998b). *Change Management. Veränderungen erfolgreich implementieren*. [Firmenschrift: CSC Ploenzke, Competence Center Organisationsentwicklung und Methoden. Hamburg]
- Hanson, Norwood Russel (1958). *Patterns of Discovery - An Inquiry into the Conceptual Foundations of Science*. Cambridge.
- Heckmann, Herbert (1982). *Die andere Schöpfung. Geschichte der frühen Automaten in Wirklichkeit und Dichtung*. Frankfurt am Main.
- Hegselmann, Rainer (1979). Otto Neurath – Empiristischer Aufklärer und Sozialreformer. In: Neurath, Otto. *Wissenschaftliche Weltauffassung, Sozialismus und Logischer Empirismus*. Herausgegeben von Rainer Hegselmann. Frankfurt am Main. S. 7-78.
- Heijenoort, Jean van (Hg.) (1967). *From Frege to Gödel: A Source Book in Mathematical Logic, 1879-1931*. Cambridge, Mass.
- Heims, Steve J. (1980). *John von Neumann and Norbert Wiener. From Mathematics to the Technologies of Life and Death*. Cambridge, Mass. / London.
- Heintz, Bettina (1993). *Die Herrschaft der Regel. Zur Grundlagengeschichte des Computers*. Frankfurt am Main.
- Held, Gerd (1977). *Der Schoß des faulen Heinze. Vorläufige Rücksichten auf Jean Pauls »Komet«*. Frankfurt am Main.

- Held, Gerd (unv. Man.). Logik der Farben.
- Hellbardt, Günter (1996). Die Ethik von Agenten. In: Informatik Spektrum, Band 19, Heft 2, April 1996, S. 87-90.
- Hellige, Hans Dieter (1992). Militärische Einflüsse auf Leitbilder, Lösungsmuster und Entwicklungsrichtungen der Computerkommunikation. In: Technikgeschichte, Band 59, Nr. 4, S. 371-401.
- Hellige, Hans Dieter (1993). Von der programmatischen zur empirischen Technikgeneseforschung: Ein technikhistorisches Analyseinstrumentarium für die prospektive Technikbewertung. In: Technikgeschichte, Band 60, Nr. 3, S. 186-222.
- Hempel, Carl G. (1942). The Function of General Laws in History. In: Gardiner, Paul. Theories of History. New York / London 1967, S. 344-356.
- Hempel, Carl G. (1977). Aspekte wissenschaftlicher Erklärung. Berlin / New York.
- Herbrand, Jacques (1931). Sur le problème fondamental de la logique mathématique. In: Sprawozdania z posiedzen Towarzystwa Naukowego Warszawskiego, XXIV, Wydział 3, S. 12-56.
- Hermes, Hans (1961). Aufzählbarkeit, Entscheidbarkeit, Berechenbarkeit. Einführung in die Theorie der rekursiven Funktionen. Berlin.
- Herschel, Rudolf (1974). Einführung in die Theorie der Automaten, Sprachen und Algorithmen. München / Wien.
- Hertz, Heinrich (1894). Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt. Herausgegeben von Philipp Lenard. Mit einem Vorwort von H. von Helmholtz. In: Heinrich Hertz. Gesammelte Werke, Band 3, Leipzig.
- Heyting, Arend (1931). Die intuitionistische Grundlegung der Mathematik. In: Erkenntnis, Band 2, S. 106-115.
- Hilbert, David (1899). Brief an Frege vom 29. Dezember 1899. In: Gabriel, Gottfried / Kambartel, Friedrich / Thiel, Christian (Hg.). Gottlob Freges Briefwechsel mit D. Hilbert, E. Husserl, B. Russell, sowie ausgewählte Einzelbriefe Freges mit Einleitungen, Anmerkungen und Register. Hamburg 1980, S. 11-13.
- Hilbert, David (1900). Mathematische Probleme. Vortrag, gehalten auf dem internationalen Mathematiker Kongreß zu Paris 1900. In: Die Hilbertschen Probleme. Vortrag »Mathematische Probleme« gehalten auf dem 2. Internationalen Mathematikerkongreß Paris 1900 von David Hilbert erläutert von einem Autorenkollektiv unter der Redaktion von P.S. Alexandrov. Thun / Frankfurt am Main 1998. [= Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften. Band 252.], S. 22-80.
- Hilbert, David (1918). Axiomatisches Denken. In: Mathematische Annalen. Band 78. Nachdruck New York / London 1964. S. 405-415.
- Hilbert, David (1925). Über das Unendliche. In: Mathematische Annalen, Band 95, S. 161-190.
- Hilbert, David (1929). Neubegründung der Mathematik. Erste Mitteilung. In: Abhandlungen aus dem mathematischen Seminar der Hamburger Universität, Band 1, S. 157-177. Leipzig / Berlin.
- Hilbert, David (1931). Die Grundlegung der elementaren Zahlenlehre. In: Mathematische Annalen, Band 104, S. 485-494.
- Hilbert, David / Ackermann, Wilhelm (1928). Grundzüge der theoretischen Logik. 5. Auflage, Berlin 1967.
- Hilbert, David / Bernays, Paul (1934). Grundlagen der Mathematik. Band 1. Berlin.
- Hilbert, David / Bernays, Paul (1939). Grundlagen der Mathematik. Band 2. Berlin.
- Hildebrand, Knut / Müßig, Michael (1991). Modellierung zeitbezogener Daten im unternehmensweiten Datenmodell (UDM). In: Wirtschaftsinformatik, Jahrgang 33, Heft 3, Juni 1991, S. 238-243.
- Hilty, Lorenz M. (1988). Die Rolle von Notationen im Modellbildungsprozeß. In: GI (FG EMISA) Proceedings. Der Weg zum Modell beim Entwurf von Informationssystemen. 2./3.11.1988. Tutzing, S. 41-45.
- Himmler, Ulrich (1991). Das Banken-Unternehmensdatenmodell. Manuskript o.O.
- Himmler, Ulrich (1992). Die Überwindung der Spartengrenzen im Aktiv-/Passivgeschäft. In: Bank und Markt, Heft 4, April 1992, S. 32-34.

- Himmler, Ulrich (1998). Prozesse in der IT. In: Protokolle der 19. Tagung Unternehmensmodell Banken, 24./25.6.1998, Rüdesheim. Wiesbaden.
- Hintikka, Jaakko (1972). Leibniz on Plenitude, Relations, and the »Reign of Law«. In: Leibniz. A Collection of critical Essays. Herausgegeben von Harry G. Frankfurt. New York. S. 155-190.
- Hintikka, Jaakko (1973). Time and Necessity. Studies in Aristotle's Theory of Modality. Oxford.
- Hintikka, Jaakko (1975). Die Intentionen der Intentionalität. In: Neue Hefte für Philosophie, Band 8, S. 65-95.
- Hintikka, Merrill B. / Hintikka, Jaakko (1986). Investigating Wittgenstein. Oxford / New York. Dt.: Untersuchungen an Wittgenstein. Frankfurt am Main 1990.
- Hobbes, Thomas (1651). Leviathan Or The Matter, Forme and Power of A Commonwealth Ecclesiasticall and Civil. By Thomas Hobbes of Malmesbvry. London. Printed for Andrew Crooke 1651. Dt.: Leviathan oder Wesen, Form und Gewalt des kirchlichen und bürgerlichen Staates. London.
- Hobbes, Thomas (1655). Elementorum Philosophiae Sectio Prima De Corpore. London. Dt.: Thomas Hobbes. Elemente der Philosophie. Erste Abteilung. Der Körper. Übersetzt, mit einer Einleitung und mit textkritischen Annotationen versehen und herausgegeben von Karl Schuhmann. Hamburg 1997.
- Hodges, Andrew (1983). Alan Turing: The Enigma. London. Hier zitiert nach: Dt.: Alan Turing. Enigma. Berlin 1989.
- Hörcher, Hans-Martin / Peleska, Jan (1992). Safer Software – an Introduction into Formal Software Engineering. Kiel.
- Hofmann, Werner (1977). Runge in seiner Zeit. Katalog der Ausstellung in der Hamburger Kunsthalle 21. Oktober 1977 bis 8. Januar 1978. München / Hamburg.
- Hollerith-Nachrichten (1932-1937). Deutsche Hollerith-Maschinen-Gesellschaft. Berlin.
- Holz, Hans Heinz (1958). Leibniz. Stuttgart.
- Hopcroft, John E. (1984). Turingmaschinen. In: Spektrum der Wissenschaft, Heft 7, Juli 1984, S. 34-49.
- Hopcroft, John E. / Ullman, Jeffrey D. (1979). Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Komplexitätstheorie. Bonn.
- Horowitz, Ellis (1983). Fundamentals of Programming Languages. Berlin / Heidelberg / New York.
- Horst, Ulrich / Gottschalk, Jürgen (1973). Über die Leibniz'schen Pläne zum Einsatz seiner Horizontalwindkunst im Oberharzer Bergbau und ihre mißglückte Durchführung. In: Studia Leibnitiana Supplementa, Vol. 12, Band 1, Wiesbaden, S. 35-59.
- House Committee (1989). No. 100-119. Iran Air Flight 655 Compensation. Hearings before the Defence Policy Panel of the Committee on Armed Services House of Representatives. One Hundredth Congress. Second Session. Hearings held August 3 and 4, September 9, and October 6, 1988. Washington 1989.
- House Committee (1993). No. 102-77. The July 3, 1988 Attack by the Vincennes on an Iranian Aircraft. Hearing before the Investigations Subcommittee and the Defence Policy Panel of the Committee on Armed Services House of Representatives. One Hundred Second Congress. Second Session. Hearing held July 21, 1992. Washington 1993.
- Hume, David (1748). An Enquiry Concerning Human Understanding. Dt.: Eine Untersuchung über den menschlichen Verstand. Übersetzt und herausgegeben von Herbert Herring. Durchgesehene und verbesserte Ausgabe. Stuttgart 1990.
- Husserl, Edmund (1893-1917). Texte zur Phänomenologie des inneren Zeitbewußtseins. Herausgegeben und eingeleitet von Rudolf Bernet. Text nach Husserliana, Band X. Hamburg 1985.
- Husserl, Edmund (1936). Die Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendente Phänomenologie. Eine Einleitung in die phänomenologische Philosophie. Herausgegeben von W. Biemel. In: Husserliana. Edmund Husserl. Gesammelte Werke, Band 6. Den Haag 1954.
- IBM (1985). Zum Jubiläum. Stuttgart.

- IBM (1987). Kleine Chronik der IBM Deutschland 1910 - 1987. IBM Enzyklopädie der Informationsverarbeitung. Stuttgart.
- IDC (1998) International Data Corporation. European Consulting and Management Services Markets and Trends 1996 - 2002.
- ILOI (1997) Internationales Institut für Lernende Organisation und Innovation. Management of Change. Erfolgsfaktoren und Barrieren organisatorischer Veränderungsprozesse. Studienbericht. München.
- Informatik Spektrum (1987). Organ der Gesellschaft für Informatik e.V., Band 10, Heft 3, Juni 1987. Themenheft: Software-Qualitätssicherung. Berlin / Heidelberg / New York.
- Informatik Spektrum (1988). Organ der Gesellschaft für Informatik e.V., Band 11, Heft 6, Dezember 1988. Themenheft: Verfahren zur Software-Qualitätssicherung. Berlin / Heidelberg / New York.
- Informatik Spektrum (1994). Organ der Gesellschaft für Informatik e.V., Band 17, Heft 1, Februar 1994. Thema: Softwaretechnik. Berlin / Heidelberg / New York.
- Information Week (21.12.1998). Rezentralisierung ist ein zweischneidiges Schwert. S. 52.
- Ishiguro, Hidé (1972). Leibniz' Philosophy of Logic and Language. London.
- Ishiguro, Hidé (1989). Namen. Gebrauch und Bezugnahme. In: Schulte, Joachim (Hg.). Texte zum Tractatus. Frankfurt am Main. S. 96-135.
- Jacobs, John F. (1986). The SAGE Air Defense System. A Personal History. Bedford, Mass.
- Janik, Allan / Toulmin, Stephan (1984). Wittgensteins Wien. Aus dem Amerikanischen von Reinhard Merkel, München / Wien.
- Jörgensen, Jörgen (1932/33). Über die Ziele und Probleme der Logistik. In: Erkenntnis, Band 3, S. 73-100.
- Journal des Scavans (Savans) (1666). Nr. 31, 2. August 1666. Amsterdam.
- Kaiser, Walter (1992). Technisierung des Lebens seit 1945. In: Propyläen Technikgeschichte. Herausgegeben von Wolfgang König. Band 5. Braun, Hans-Joachim / Kaiser, Walter. Energiewirtschaft. Automatisierung. Information. Seit 1914. S. 281-529.
- Kambartel, Friedrich (1968). Erfahrung und Struktur. Bausteine zu einer Kritik des Empirismus und Formalismus. Frankfurt am Main.
- Kamitz, Reinhard (1992). A. Tarski: Die semantische Konzeption der Wahrheit. In: Speck, Josef (Hg.): Grundprobleme der großen Philosophen. Philosophie der Neuzeit VI. Göttingen. S. 9-66.
- Kamlah, Andreas (1992). H. Reichenbach: Prinzipien, Konventionen, Wahrscheinlichkeit. In: Speck, Josef (Hg.): Grundprobleme der großen Philosophen. Philosophie der Neuzeit VI. Göttingen. S. 67-109.
- Kangro, Hans (1968). Heureka (Erfindungskunst) und Begriffskalkül – ist der Inhalt der Leibnizhandschrift Phil VII C 139r - 145r Joachim Jungius zuzuschreiben? In: Sudhoffs Archiv, Band 25, Heft 1, S. 48-66.
- Kant, Immanuel (1781/1787) (KrV). Kritik der reinen Vernunft. Zitiert nach: Kant, Immanuel. Werke in zehn Bänden. Herausgegeben von Wilhelm Weischedel. Band 3 und 4, 3. überprüfter Nachdruck der Ausgabe Darmstadt 1956. Darmstadt 1968.
- Kauppi, Raili (1960). Über die Leibnizsche Logik. Helsinki.
- Keegan, John (1975). Das Antlitz des Krieges. Die Schlachten von Azincourt 1415, Waterloo 1815 und an der Somme 1916. Frankfurt am Main 1991. (Engl. Originalausgabe 1975.)
- Kenny, Anthony (1974). Wittgenstein. Frankfurt am Main.
- Kimm, Reinhold (1979). Einführung in Software Engineering. Berlin.
- Kirpal, Alfred (1992). Die Entwicklung der Transistorelektronik. Aspekte einer militärischen und zivilen Technik. In: Technikgeschichte, Band 59, Nr. 4, S. 353-369.
- Kluge, Alexander (1964/1978). Schlachtbeschreibung. Der organisatorische Aufbau eines Unglücks. Olten / München.
- Kneale, William / Kneale, Martha (1962). The Development of Logic. Oxford.
- Knorr-Cetina, Karin D. (1984). Die Fabrikation von Erkenntnis. Zur Anthropologie der Naturwissenschaften. Frankfurt am Main.

- Knorr-Cetina, Karin D. (1988). Das naturwissenschaftliche Labor als Ort der »Verdichtung« von Gesellschaft. In: Zeitschrift für Soziologie, Band 17, Heft 2, S. 85-101.
- Knuth, Donald E. (1970). Von Neumann's first computer program. In: Computing Surveys, Band 2, Nr. 4, Dezember 1970, S. 247-260. Nachdruck in: Aspray, William / Burks, Arthur (Hg.). Papers of John von Neumann on Computing and Computer Theory. [= Charles Babbage Institute reprint series for the history of computing. Band 12.] Cambridge, Mass. / London 1987, S. 83-96.
- Köhler, Wolfgang (1925). Gestaltprobleme und Anfänge einer Gestalttheorie. Übersichtsreferat. In: Jahresberichte über die gesamte Physiologie III (über 1922), 1. Hälfte, S. 512-539.
- Koistinen, Paul A.C. (1980). The Military-Industrial Complex. A Historical Perspective. New York.
- Koppel, Ted (1992). The USS Vincennes: Public War, Secret War. July 1, 1992. <http://homepage.ntlworld.com/jksonc/docs/ir655-nightline-19920701.html>
- Kosiol, Erich (1968). Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden.
- Kosy, Donald W. (1974). Air Force Command and Control Information Processing in the 1980s: Trends in Software Technology. Prepared for Deputy Chief of Staff, Research and Development (Air Force). June 1974. Rand Corporation R-1012-PR. Santa Monica.[U.S. Department of Commerce. National Technical Information Service. AD-A017 128]
- Koyré, Alexandre (1957). From the Closed World to the Infinite Universe. Baltimore. Dt.: Von der geschlossenen Welt zum unendlichen Universum. Frankfurt am Main 1969.
- Krämer, Sybille (1988). Symbolische Maschinen. Die Idee der Formalisierung in geschichtlichem Abriß. Darmstadt.
- Kraft, Victor (1950). Der Wiener Kreis. Der Ursprung des Neopositivismus. Wien.
- Krüger, Lorenz (1969). Rationalismus und Entwurf einer universalen Logik bei Leibniz. Frankfurt am Main.
- Kuhn, Thomas S. (1962). The Structure of Scientific Revolutions. Chicago. Dt.: Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen. 5. Auflage. Frankfurt am Main 1981.
- Kuhn, Thomas S. (1970b). Anmerkungen zu Lakatos. In: Lakatos, Imre / Musgrave, Alan E. (Hg.). Kritik und Erkenntnisfortschritt. Braunschweig 1974. S. 313-321.
- Kuhn, Thomas S. (1974). Neue Überlegungen zum Begriff des Paradigma. In: Die Entstehung des Neuen. Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte. Herausgegeben von Lorenz Krüger. Übersetzt von Hermann Vetter. Frankfurt am Main. S. 389-420.
- Kuhn, Thomas S. (1978). Die Entstehung des Neuen. Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte. Herausgegeben von Lorenz Krüger. Übersetzt von Hermann Vetter. Frankfurt am Main.
- Kummer, Benno (1975). Grundsätzliche Bemerkungen zum Einfluß der Körpergröße und der Gravitation auf die Konstruktion des Bewegungsapparates landbewohnender Tetrapoden. In: Ontogenetische und konstruktive Gesichtspunkte bei phylogenetischen Rekonstruktionen. Aufsätze und Reden der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft. Band 27. Frankfurt am Main. S. 69-84.
- Kutschera, Franz von (1989). Gottlob Frege. Eine Einführung in sein Werk. Berlin / New York.
- Kutschera, Franz von / Breitkopf, Alfred (1971). Einführung in die moderne Logik. München.
- La Mettrie, Julien Offray de (1748). Der Mensch eine Maschine. Übersetzt, mit einer Vorrede und mit Anmerkungen versehen von Max Brahn, Leipzig 1909.
- Lakatos, Imre (1970a). Die Geschichte der Wissenschaft und ihre rationalen Rekonstruktionen. In: Lakatos, Imre / Musgrave, Alan E. (Hg.). Kritik und Erkenntnisfortschritt. Braunschweig 1974.
- Lakatos, Imre (1970b). Falsifikation und die Methodologie wissenschaftlicher Forschungsprogramme. In: Lakatos, Imre / Musgrave, Alan E. (Hg.). Kritik und Erkenntnisfortschritt. Braunschweig 1974.

- Lakatos, Imre / Musgrave, Alan E. (Hg.) (1970). *Criticism and the Growth of Knowledge. Proceedings of the International Colloquium in the Philosophy of Science. London 1965, Volume 4.* Cambridge. Dt: Kritik und Erkenntnisfortschritt. Braunschweig 1974.
- Lampert, Timm (2000). *Wittgensteins Physikalismus. Die Sinnesdatenanalyse des Tractatus Logico-Philosophicus in ihrem historischen Kontext.* Paderborn.
- Langwitz, Detlef (1990). Das mathematische Unendliche bei Euler und Cauchy. In: König, Gert (Hg.). *Konzepte des mathematisch Unendlichen im 19. Jahrhundert.* Göttingen. S. 9-33. [= Studien zur Wissenschafts-, Sozial- und Bildungsgeschichte der Mathematik. Herausgegeben von Otte, Michael / Schneider, Ivo / Steiner, Heinz-Georg. Band 5]
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (ab 1676, vermutlich 1680). Eine Maschine der dyadischen Arithmetik (*Machina Arithmeticae Dyadicae*). In: Mackensen, Ludolf von. Leibniz als Ahnherr der Kybernetik - ein bisher unbekannter Leibnizscher Vorschlag einer »Machina arithmeticae dyadicae«. In: *Akten des II. Internationalen Leibniz-Kongresses 1972 in Hannover, Band 2* [= *Studia Leibnitiana Supplementa, Band 13*], Wiesbaden 1974, S. 256-260.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (gegen 1690). Der Plus-Minus-Kalkül. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Fragmente zur Logik.* Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 304-343.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (o.J., Charakteristik). Die Charakteristik als Organon der allgemeinen Wissenschaft. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Fragmente zur Logik.* Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 110-115.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (o.J., Grundbegriffe). Grundbegriffe der Logik. Definitionen. Axiome. Identische Sätze. Beweise. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Fragmente zur Logik.* Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 122-125.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (o.J., o.T.). Ohne Titel. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Die philosophischen Schriften.* Herausgegeben von C.I. Gerhardt. Berlin 1875-1890, Band 7, S. 195.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (o.J., Zeichen). Zeichen und Substitution von Zeichen. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Fragmente zur Logik.* Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 95-96.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (um 1686). Das Ideal und die Mittel mathematischen Denkens. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Fragmente zur Logik.* Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 14-23.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (um 1690a). Versuch der beweisenden Syllogistik. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Fragmente zur Logik.* Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 372-417.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (um 1690b). Die ewigen Wahrheiten als virtualiter identische Sätze. Das Axiom vom Vernunftgrunde. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Fragmente zur Logik.* Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 445-449.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (vermutlich 1683). Ermahnung an die Deutschen, ihren Verstand und ihre Sprache besser zu üben, samt beigefügtem Vorschlag einer deutsch-gesinnten Gesellschaft. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Deutsche Schriften.* Herausgegeben von Walther Schmied-Kowarzik. Erster Band. Muttersprache und völkische Gesinnung. Leipzig 1916. S. 3-24.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (vor 1686a?). Einleitung in die geheime Enzyklopädie oder Anfangsgründe und Probestücke der allgemeinen Wissenschaft von der Erneuerung und den Vermehrungen der Wissenschaften, von der notwendigen Vervollkommenung des Geistes und von den Entdeckungen zur öffentlichen Glückseligkeit. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Fragmente zur Logik.* Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 73-79.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (vor 1686b?). Versuch eines allgemeinen Kalküls. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. *Fragmente zur Logik.* Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 128-146.

- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (zwischen 1679 und 1686). Über das Organon oder die große Kunst des Denkens. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Fragmente zur Logik. Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 23-28.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1665). Disputatio juridica de conditionibus. Leipzig.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1666). De arte combinatoria. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Sämtliche Schriften und Briefe. Hg. Preußische Akademie der Wissenschaften. 6. Reihe: Philosophische Schriften. Band 1. 1663-1672. Darmstadt 1930. Auch in: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Gesammelte Werke. Herausgegeben von G.H. Pertz. 3. Folge. Mathematik. Band 5. Halle 1858. S. 7-79.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1669?). Synthetische (kombinatorische) und analytische Methode. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Fragmente zur Logik. Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 84-87.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1671). Leibniz an Herzog Johann Friedrich (Okt. 1671). In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Sämtliche Schriften und Briefe. Hg. Preußische Akademie der Wissenschaften. 2. Reihe: Philosophischer Briefwechsel. Band 1: 1663-1685. Darmstadt 1926. S. 159-165.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1674). Gutachten über den Frieden. In: Gottfried Wilhelm Leibniz. Politische Schriften I. Herausgegeben und eingeleitet von Hans Heinz Holz. Frankfurt am Main 1966. S. 69-74.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1677). Dialog über die Verknüpfung von Dingen und Worten. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Hauptschriften zur Grundlegung der Philosophie. Herausgegeben von Ernst Cassirer. Leipzig 1924. Band 1, S. 15-21.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1679a). Elemente der allgemeinen Charakteristik. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Fragmente zur Logik. Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 170-240.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1679b). Plan einer neuen, nach der entdeckenden Methode abzufassenden Enzyklopädie. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Fragmente zur Logik. Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 60-73.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1679c). Die Methoden der universellen Synthesis und Analysis. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Hauptschriften zur Grundlegung der Philosophie. Herausgegeben von Ernst Cassirer. Leipzig 1924. Band 1, S. 39-52.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1679d). De progressionem dyadica. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Opusculum et fragmenta inédita de Leibniz. Extraits des manuscrits de la Bibliothèque royale de Hanovre. Herausgegeben von Louis Couturat. Paris 1903.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1679e). Brief an Herzog Johann Friedrich von Braunschweig, April 1679. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von: Sämtliche Schriften und Briefe. Hg. Preußische Akademie der Wissenschaften. Darmstadt 1927. Reihe 1, Band 2, S. 167-169.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1680a). Leibniz für das Bergamt zu Clausthal. Deduktion. 26. Juli (5. August) 1680. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von: Sämtliche Schriften und Briefe. Hg. Preußische Akademie der Wissenschaften. Darmstadt 1938. Reihe 1, Band 3, S. 66-73.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1680b). Leibniz für das Bergamt zu Clausthal. 27. Juli (6. August) 1680. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von: Sämtliche Schriften und Briefe. Hg. Preußische Akademie der Wissenschaften. Darmstadt 1938. Reihe 1, Band 3, S. 76-80.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1684). Betrachtungen über die Erkenntnis, die Wahrheit und die Ideen. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Hauptschriften zur Grundlegung der Philosophie. Herausgegeben von Ernst Cassirer. Leipzig 1924, Band 1, S. 22-29.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1686a). Allgemeine Untersuchungen über die Analyse der Begriffe und wahren Sätze. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Fragmente zur Logik. Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 241-303.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1686b). Metaphysische Abhandlung. In: Hauptschriften zur Grundlegung der Philosophie. Herausgegeben von Ernst Cassirer. Leipzig 1924, Band 2, S. 135-188.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1690). Notwendige und zufällige Wahrheiten in Philosophie und Mathematik. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Fragmente zur Logik. Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 420-422.

- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1695). Neues System der Natur und der Gemeinschaft der Substanzen. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Hauptschriften zur Grundlegung der Philosophie. Herausgegeben von Ernst Cassirer. Leipzig 1924, Band 2, S. 258-271.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1697a). Leibniz über seine logischen Studien: Aus dem Brief an Gabriel Wagner. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Fragmente zur Logik. Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 3-14.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1697b). Das Geheimnis der Schöpfung. Neujahrsbrief an Herzog Rudolf August von Braunschweig-Lüneburg-Wolfenbüttel. (2. Januar 1697). In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Zwei Briefe über das binäre Zahlensystem und die chinesische Philosophie. Aus dem Urtext neu ediert, übersetzt und kommentiert von Renate Loosen und Franz Vonessen. Stuttgart 1968. S. 19-26.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1702-1704). Grundbegriffe der Logik. Aus der Tafel der Definitionen. In: Leibniz, Gottfried Wilhelm von. Fragmente zur Logik. Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin 1960. S. 116-122.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1703). Neue Abhandlungen über den menschlichen Verstand. Leipzig 1904.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1714a). Vernunftprinzipien der Natur und der Gnade. Hamburg 1982.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1714b). Monadologie. Hamburg 1982.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1849-1863). Die mathematischen Schriften. Herausgegeben von C.I. Gerhardt. Band 1-7. Berlin / Halle. Nachdruck Hildesheim 1962.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1875-1890). Die philosophischen Schriften. Herausgegeben von C.I. Gerhardt. Band 1-7. Berlin. Nachdruck Hildesheim 1965.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1903). Opusculs et fragments inédits de Leibniz. Extraits des manuscrits de la Bibliothèque royale de Hanovre. Herausgegeben von Louis Couturat. Paris. Nachdruck Hildesheim 1961.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1923ff.). Sämtliche Schriften und Briefe. Hg. Preußische Akademie der Wissenschaften. Darmstadt. Reihe 1, Band 1: 1668-1676 (1923), Band 2: 1676-1679 (1927), Band 3: 1680-1683 (1938), Band 4: 1684-1687 (1950).
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (1960). Fragmente zur Logik. Ausgewählt, übersetzt und erläutert von Franz Schmidt. Berlin.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm von (2000). Die Grundlagen des logischen Kalküls. Lateinisch-Deutsch. Herausgegeben, übersetzt und mit einem Kommentar versehen von Franz Schupp unter der Mitarbeit von Stephanie Weber. Hamburg.
- Lenzen, Wolfgang (1984). Leibniz und die Boolesche Algebra. In: *Studia Leibnitiana*, Band 16. S. 187-203.
- Lenzen, Wolfgang (1990). Das System der Leibniz'schen Logik. Berlin / New York.
- Leonardo da Vinci (um 1509 bis 1512). Anatomische Zeichnungen aus der königlichen Bibliothek auf Schloß Windsor. Gütersloh 1979.
- Leslie, Stuart W. (1993). The Cold War and American Science. The Military-Industrial-Academic Complex at MIT and Stanford. New York.
- Leśniewski, Stanisław (1930). Über die Grundlagen der Ontologie. In: *Sprawozdania z posiedzen Towarzystwa Naukowego Warszawskiego*, XXIV, Wydział 3, S. 111-132.
- Lewin, Ronald (1978). Ultra Goes to War: The Secret Story. Dt.: Entschied Ultra den Krieg? Alliierte Funkaufklärung im 2. Weltkrieg. Herausgegeben und mit einem Vorwort versehen von Jürgen Rohwer. o.O. [Koblenz / Bonn] 1981.
- Lindner, Rudolf / Wohak, Bertram / Zeltwanger, Holger (1984). Planen, Entscheiden, Herrschen. Vom Rechnen zur elektronischen Datenverarbeitung. Reinbek.
- Loeckx, Jacques / Sieber, Kurt (1984). The Foundation of Program Verification. Stuttgart / Chichester / New York.
- Luft, Alfred Lothar (1988). Sprachpragmatische Aspekte der Modellbildung. In: *Proceedings. Der Weg zum Modell beim Entwurf von Informationssystemen*. Tutzing. S. 37-40.
- Mackensen, Ludolf von (1974). Leibniz als Ahnherr der Kybernetik – ein bisher unbekannter Leibnizscher Vorschlag einer »Machina arithmeticae dyadicae« (ab 1676, vermutlich

- 1680). In: Akten des II. Internationalen Leibniz-Kongresses 1972 in Hannover. Band 2. [= *Studia Leibnitiana Supplementa*, Band 13], Wiesbaden 1974, S. 255-268.
- Maddy, Penelope (1989). The Roots of Contemporary Platonism. In: *Journal of Symbolic Logic*, Band 54, S. 1121-1144.
- Maddy, Penelope (1990). *Realism in Mathematics*. Oxford.
- Maddy, Penelope (1991). Philosophy of Mathematics. Prospects for the 1990s. In: *Synthese*, Band 88, S. 155-164.
- Malcolm, Norman (1986). *Nothing is Hidden. Wittgenstein's Criticism of his Early Thought*. Oxford.
- Martin, Gottfried (1960). *Leibniz. Logik und Metaphysik*. Köln.
- Martin, Peter (1985). *Das rebellische Eigentum. Vom Kampf der Afroamerikaner gegen ihre Versklavung*. Hamburg.
- Masterman, Margaret (1970). Die Natur eines Paradigmas. In: Lakatos, Imre / Musgrave, Alan E. (Hg.). *Kritik und Erkenntnisfortschritt*. Braunschweig 1974.
- Mathieu, Vittorio (1974). Wissenschaft und Wirksamkeit bei Leibniz. In: Akten des II. Internationalen Leibniz-Kongresses 1972 in Hannover, Band IV. [= *Studia Leibnitiana Supplementa*, Band 15] Wiesbaden 1974. S. 147-155.
- Mauchly, John William (1942). The Use of High Speed Vacuum Tube Devices for Calculating (privately circulated memorandum), Philadelphia, Pa. Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania. August 1942. In: Randell, Brian. *The Origins of Digital Computers. Selected Papers*. Third Edition. Berlin / Heidelberg / New York 1982. S. 355-358.
- Mauchly, John William (1980). The ENIAC. In: Metropolis, Nicholas Constantine / Howlett, Jack / Rota, Gian Carlo. *A History of Computing in the Twentieth Century*. New York 1980, S. 541-550.
- Mayer, Verena (1996). *Gottlob Frege*. München.
- McGuinness, Brian F. (1981). The so-called realism of Wittgensteins Tractatus. In: Block, Irving (Hg.). *Perspectives on the Philosophy of Wittgenstein*. Oxford.
- Mehrtens, Herbert (1990). *Moderne Sprache Mathematik. Eine Geschichte des Streits um die Grundlagen der Disziplin und des Subjekts formaler Systeme*. Frankfurt am Main.
- Menger, Karl (1930/31). Der Intuitionismus. In: *Blätter für deutsche Philosophie*, Band 4, S. 311-325
- Meschkowski, Herbert (1967). *Probleme des Unendlichen. Werk und Leben Georg Cantors*. Braunschweig.
- Metropolis, Nicholas Constantine / Howlett, Jack / Rota, Gian Carlo (1980). *History of Computing in the Twentieth Century*. New York.
- Metropolis, Nicholas Constantine / Worlton, J. (1980). A Trilogy on Errors in the History of Computing. In: *Annals of the History of Computing*, Band 2, Nr. 1, Januar 1980, S. 49-59.
- Metzger, Wolfgang (1936). *Gesetze des Sehens. Die Lehre vom Sehen der Formen und Dinge des Raumes und der Bewegung*. Herausgegeben von der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft zu Frankfurt am Main. 3. Auflage. Frankfurt am Main 1975.
- Miller, George A. (1956). The magical number seven, plus or minus two. In: *Psychological Review*, Nr. 63, S. 81-97.
- Minsky, Marvin (Hg.) (1968). *Semantic information processing*. Cambridge, Mass.
- Misa, Thomas (1985). Military Needs, Commercial Realities, and the Development of the Transistor, 1948-1958. In: Smith, Merritt Roe (Hg.) *Military Enterprise and Technological Change. Perspectives on the American Experience*. Cambridge, Mass. S. 253-288.
- Moldt, Daniel (1996). *Höhere Petrinetze als Grundlage für Systemspezifikationen*. Hamburg.
- Moll, Konrad (1978). *Der junge Leibniz. I. Die wissenschaftstheoretische Problemstellung seines ersten Systementwurfs. Der Anschluß an Erhard Weigels Scientia Generalis*. Stuttgart / Bad Cannstadt.
- Moravia, Sergio (1977). *Beobachtende Vernunft. Philosophie und Anthropologie in der Aufklärung*. Frankfurt am Main, Berlin, Wien.

- Mormann, Thomas (2000). Rudolf Carnap. München.
- Morris, Charles William (1946). Signs, Language and Behavior. Englewood Cliffs, N.J. Dt.: Zeichen, Sprache und Verhalten. Düsseldorf 1973.
- Moscovici, Serge (1982). Versuch über die menschliche Geschichte der Natur. Frankfurt am Main.
- Mühlenbein, Heinz (1995). Grenzen der Künstlichen Intelligenz – Ein Plädoyer für Bescheidenheit. In: KI Künstliche Intelligenz, Heft 1, Januar / Februar 1995, S. 46-51.
- Myrach, Thomas (1997). TSQL2: Der Konsens über eine temporale Datenbanksprache. In: Informatik Spektrum, Band 20, Heft 3, Juni 1997, S. 143-150.
- Nagel, Ernest / Newman, James R. (1958). Gödel's Proof. London. Hier zitiert nach: Dt.: Der Gödelsche Beweis. Wien / München 1964. München 1987.
- Nagel, Ernest / Suppes, Patrick / Tarski, Alfred (Hg.) (1962). Logic, methodology and philosophy of science. Proceedings of the 1960 international congress. Stanford, Cal.
- Nagl, Manfred (1990). Softwaretechnik: Methodisches Programmieren im Großen. Berlin.
- Nake, Frieder / Rolf, Arno / Siefkes, Dirk (Hg.) (2004). Informatik zwischen Konstruktion und Verwertung. Materialien der 3. Arbeitstagung »Theorie der Informatik«, Bad Hersfeld 3. bis 5.4.2003. Bericht Nr. 1/04, Universität Bremen, Fachbereich Mathematik & Informatik.
- Narr, Wolf-Dieter (1967). Systemzwang als neue Kategorie in Wissenschaft und Politik. In: atomzeitalter. Zeitschrift für Sozialwissenschaften und Politik. 7/8 Juli/August 1967. S. 400-412.
- Nash, Stephen G. (Hg.) (1990). A History of Scientific Computing. New York.
- Naur, Peter (1981). The European Side of the Last Phase of the Development of ALGOL 60. In: Wexelblat, Richard L. (Hg.). History of Programming Languages. New York / London / Toronto. S. 92-137.
- Naur, Peter / Randall, Brian (Hg.) (1969). Software Engineering. Report on a conference sponsored by the NATO Science Committee. Garmisch 7.-11. Oktober 1968. Scientific Affairs Division NATO. Brüssel.
- Neumann, Johann von (1931). Die formalistische Grundlegung der Mathematik. In: Erkenntnis, Band 2. S. 116-121.
- Neumann, John von (1945). First Draft of a Report on the EDVAC. Contract No. W-670-ORD-492. Moore School of Electrical Engineering. University of Pennsylvania (30 June 1945). Im Auszug in: Randell, Brian. The Origins of Digital Computers. Selected Papers. 3. Auflage. Berlin / Heidelberg / New York 1982. S. 383-392.
- Neumann, John von (1948). The General and Logical Theory of Automata. In: Neumann, John von. Collected Works. Herausgegeben von A.H. Taub. Band 5. Oxford 1963. S. 288-328.
- Neumann, John von (1954). Entwicklung und Ausnutzung neuerer mathematischer Maschinen. Köln 1955. In: Neumann, John von. Collected Works. Herausgegeben von A.H. Taub. Band 5. Oxford 1963. S. 248-287.
- Neumann, John von (1955). Can we survive technology? In: Neumann, John von. Collected Works. Herausgegeben von A.H. Taub. Band 6. Oxford 1963. S. 504-519.
- Neumann, John von (1956). Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components. In: Shannon, C.E. / McCarthy, J. (Hg.). Automata Studies. Princeton 1956. S. 43-98. Dt. Wahrscheinlichkeitslogik und der Aufbau zuverlässiger Organismen aus unzuverlässigen Bestandteilen. In: Shannon, C.E. / McCarthy, J. (Hg.). Studien zur Theorie der Automaten. München 1974. S. 57-121.
- Neumann, John von (1958). The Computer and the Brain. New Haven. Dt.: Die Rechenmaschine und das Gehirn. München 1960.
- Neurath, Otto (1930/31). Historische Anmerkungen (zur wissenschaftlichen Weltauffassung). In: Erkenntnis, Band 1, S. 311-314.
- Neurath, Otto (1931). Soziologie im Physikalismus. In: Erkenntnis, Band 2, S. 393-431.
- Neurath, Otto (1932/33). Protokollsätze. In: Erkenntnis, Band 3, S. 204-214.
- Neurath, Otto (1934). Radikaler Physikalismus und »Wirkliche Welt«. In: Erkenntnis, Band 4. S. 346-362.

- Neurath, Otto (1935). Einheit der Wissenschaft als Aufgabe. In: Erkenntnis, Band 5, S. 16-22.
- Neurath, Otto (1937). Die neue Enzyklopädie des wissenschaftlichen Empirismus. In: Scientia, Dezember 1937, S. 309-320.
- Oberliesen, Rolf (1982). Information, Daten und Signale. Geschichte technischer Informationsverarbeitung. Reinbek.
- Oberquelle, Horst (1987). Sprachkonzepte für die kooperative Rollenentwicklung. Hamburg.
- Oberweis, Andreas (1990). Zeitstrukturen für Informationssysteme. Mannheim.
- Oestereich, Bernd (1998). Objektorientierte Softwareentwicklung: Analyse und Design mit Unified Modeling Language. München.
- Ortner, Erich / Rössner, J. / Söllner, B. (1990). Entwicklung und Verwaltung standardisierter Datenelemente. In: Informatik Spektrum, Band 13, Heft 1, Februar 1990, S. 17-30.
- Parkinson, George Henry Radcliffe (1965). Logic and Reality in Leibniz's Metaphysics. Oxford.
- Parnas, David Lorge (1972). On the Criteria To Be Used in Decomposing Systems into Modules. In: Communications of the ACM, Jahrgang 15, Band 12, Dezember 1972, S. 1053-1058.
- Parnas, David Lorge (1974). On a »Buzzword«: Hierarchical Structure. In: Information Processing 74, S. 336-339.
- Pears, David (1987). The false Prison. Oxford.
- Peckhaus, Volker (1997). Logik, Mathesis universalis und allgemeine Wissenschaft. Leibniz und die Wiederentdeckung der formalen Logik im 19. Jahrhundert. Berlin. (zugleich Erlangen / Nürnberg, Univ., Habil-Schr., 1996)
- Perlis, Alan J. (1981). The American Side of the Development of ALGOL. In: Wexelblat, Richard L. (Hg.). History of Programming Languages. New York / London / Toronto. S. 75-91.
- Petri, Carl Adam (1962). Kommunikation mit Automaten. Darmstadt [auch: Schriften des Rheinisch-Westfälischen Instituts für instrumentelle Mathematik an der Universität Bonn, Nr. 2, zugleich Diss. TH Darmstadt.]
- Petri, Carl Adam (1977). Notizen zum Sommer-Seminar »Systemorganisation«. Entwurf einer Organisationstheorie. o.O.
- Petzold, Hartmut (1992). Moderne Rechenkünstler. Die Industrialisierung der Rechentechnik in Deutschland. München.
- Petzold, Hartmut (1993). Mechanisierung und Automatisierung in der Rechenmaschinenteknik bis 1950 als Randbedingung für die frühen Arbeiten von Konrad Zuse. In: Deutsches Museum. Wissenschaftliches Jahrbuch 1992/93. München. S. 187-205.
- Petzold, Hartmut (1998). Die Mühlen des Patentamts. In: Rojas, Raúl (Hg.) (1998). Die Rechenmaschinen von Konrad Zuse. Berlin / Heidelberg / New York. S. 63-106.
- Pflüger, Jörg (1994). Informatik auf der Mauer. In: Informatik Spektrum, Band 17, Heft 4, August 1994, S. 251-257.
- Philippi, Bernd (1986). Protokollsätze versus Konstatierungen. Ein Kernproblem des Wiener Kreises. In: Schlick, Moritz (1986). Philosophische Logik. Frankfurt am Main. S. I-XLI.
- Pitts, Walter / McCulloch, Warren S. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. In: Bulletin of Mathematical Biophysics, Band 5, 1943, S. 115-133.
- Platon. Euthydemos. In: Platon. Sämtliche Werke, Band 2. In der Übersetzung von Friedrich Schleiermacher mit der Stephanus-Numerierung. Herausgegeben von Walter F. Otto / Ernesto Grassi / Gert Plamböck. Hamburg 1957, S. 73-106.
- Platon. Menon. In: Platon. Sämtliche Werke, Band 2. In der Übersetzung von Friedrich Schleiermacher mit der Stephanus-Numerierung. Herausgegeben von Walter F. Otto / Ernesto Grassi / Gert Plamböck. Hamburg 1957, S. 7-42.

- Platon. Politeia. In: Platon. Sämtliche Werke, Band 3. In der Übersetzung von Friedrich Schleiermacher mit der Stephanus-Numerierung. Herausgegeben von Walter F. Otto / Ernesto Grassi / Gert Plamböck. Hamburg 1957, S. 67-310
- Platon. Symposion. Rede des Komödiendichters Aristophanes. 14. Kap. 189c2 - 190c1, 15. Kap. 190c1 - 191d3, 16. Kap. 191d3 - 193d5. In: Platon. Sämtliche Werke, Band 2. In der Übersetzung von Friedrich Schleiermacher mit der Stephanus-Numerierung. Herausgegeben von Walter F. Otto / Ernesto Grassi / Gert Plamböck. Hamburg 1957, S. 203-250.
- Platon. Timaios. In: Platon. Sämtliche Werke, Band 5. In der Übersetzung von Friedrich Schleiermacher mit der Stephanus-Numerierung. Herausgegeben von Walter F. Otto / Ernesto Grassi / Gert Plamböck. Hamburg 1957, S. 141-213.
- Poincaré, Henri (1910). Sechs Vorträge über ausgewählte Gegenstände aus der reinen Mathematik und mathematischen Physik. Leipzig / Berlin.
- Polytechnisches Centralblatt (1896). Die Hollerith'sche elektrische Zählmaschine für Volkszählungen. In: Polytechnisches Centralblatt Berlin. Nr. 11, Jahrgang 57, 16. März 1896. S. 121-125.
- Popper, Karl (1935). Logik der Forschung. 9. verbesserte Auflage. Tübingen 1989.
- Popper, Karl (1963). Conjectures and Refutations. London.
- Porter, Robert P. (1891). The Eleventh Census. In: Proceedings of the American Statistical Association Nr. 15, S. 321.
- Poser, Hans (1969). Zur Theorie der Modalbegriffe bei G. W. Leibniz. Wiesbaden. [= Studia Leibnitiana Supplementa. Band 6]
- Post, Emil Leon (1936). Finite Combinatory Processes – Formulation I. In: Journal of Symbolic Logic. Band 1. S. 103-105.
- Potter, Hop (1995). Needed: A Systematic Approach for a Cockpit Automation Philosophy. In: FAA. Federal Aviation Administration. Office of Systems Safety. Workshop on Flight Crew Accident and Incident Human Factors. June 21-23, 1995, S. A-84 - A-85.
- Potthoff, Klaus (1981). Einführung in die Modelltheorie und ihre Anwendungen. Darmstadt.
- Price, Clare / Zboray, Michael (1996). Internet Security: Why Firewalls Are Not Enough. [= Gartner Group. Information Security Studies (ISS) Research Note]
- Prior, David (Regie) (2003). Cinematic Phasmids in which the art and craft of visual deception is explored in connection with Master and Commander: The Far Side of the World. Regie David Prior. 2003.
- Pugh, Emerson W. (1995). Building IBM. Shaping an Industry and its Technology. Cambridge, Mass. / London.
- Quine, Willard Van Orman (1953). Two Dogmas of Empiricism. In: Quine, Willard Van Orman. From a Logical Point of View. Cambridge, Massachusetts. Dt. in: Von einem logischen Standpunkt. Frankfurt am Main 1979.
- Quine, Willard Van Orman (1960). Word and Object. Cambridge, Mass. Dt.: Wort und Gegenstand, aus dem Englischen übersetzt von Joachim Schulte in Zusammenarbeit mit Dieter Birnbacher. Stuttgart 1980.
- Quine, Willard Van Orman (1969). Set Theory and Its Logic. Cambridge, Mass. Dt.: Mengenlehre und ihre Logik. Braunschweig 1973.
- Quine, Willard Van Orman (1975). On Empirically Equivalent Systems of the World. In: Erkenntnis, Band 9, S. 313-328.
- Rade[r]macher, Hans (1988). Intelligenza naturale e artificiale. In: Prini, Pietro (Hg.). Antropologia e cosmologia a confronto. Milano. S. 109ff.
- Radkau, Joachim (1983). Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft 1945-1975. Verdrängte Alternativen in der Kerntechnik und der Ursprung der nuklearen Kontroverse. Reinbek. [Habilschrift Universität Bielefeld 1981]
- Ramsey, Frank Plumpton (1926). The Foundations of Mathematics. In: Proceedings of the London Mathematical Society. Serie 2, S. 338-384. Abgedruckt in: Ramsey, Frank Plumpton. The Foundations of Mathematics and other Logical Essays. London 1931.

- Randell, Brian (1976a). The Colossus. [Technical Report Series, Band 90, University of Newcastle upon Tyne] Newcastle upon Tyne.
- Randell, Brian (1976b). Colossus: Godfather of the Computer. In: Randell, Brian. The Origins of Digital Computers. Selected Papers. 3. Auflage. Berlin / Heidelberg / New York 1982. S. 349-354.
- Randell, Brian (1982). The Origins of Digital Computers. Selected Papers. 3. Auflage. Berlin / Heidelberg / New York.
- Rechenberg, Ingo (1973). Evolutionsstrategie. Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Stuttgart.
- Redmond, Kent C. / Smith, Thomas Malcolm (1980). Project Whirlwind. The History of a Pioneer Computer. Bedford, Mass.
- REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (1981). Methodenlehre der Organisation für Büro und Verwaltung (insbesondere Teil 3: Ablauforganisation). Darmstadt.
- Reichenbach, Hans (1938). Experience and Prediction. Chicago.
- Reisig, Wolfgang (1982). Petrinetze. Berlin.
- Reisig, Wolfgang (1985). Systementwurf mit Netzen. Berlin.
- Reister, Dietrich (1997). Dem »Human Centered Design« von Assistenzsystemen gehört die Zukunft. Wird die Fahrzeugführung später an Automaten delegiert? In: Informatik Spektrum, Band 20, Heft 3, Juni 1997, S. 179-183.
- Reiter, Raymond (1978). On Reasoning by Default. In: Proceedings of TINLAP-2 (Theoretical Issues in Natural Language Processing), Urbana, S. 210-218.
- Rescher, Nicholas (1967). The Philosophy of Leibniz. Englewood Cliffs.
- Riemann, Bernhard (1867). Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen. In: Riemann, Bernhard. Gesammelte mathematische Werke und wissenschaftlicher Nachlaß. Herausgegeben unter Mitwirkung von Richard Dedekind und Heinrich Weber. 2. Auflage Leipzig 1892. Nachdruck New York 1953. S. 272-287.
- Risks Forum (Peter G. Neumann, Coordinator). www.catless.ncl.ac.uk/Risks.
- Roberson, Debi / Davidoff, Jules / Davies, Ian (2000). Color Categories Are Not Universal: Replications and New Evidence From a Stone-Age Culture. In: Journal of Experimental Psychology: General, Band 129, Nr. 2, S. 369-398.
- Röd, Wolfgang (1984). Die Philosophie der Neuzeit. Band 2. Von Newton bis Rousseau. München. [= Geschichte der Philosophie Band 8].
- Rosen, Robert (1967). Optimality Principles in Biology. London.
- Rosenblueth, Arturo / Wiener, Norbert / Bigelow, Julian (1943). Behavior, Purpose and Teleology. In: Philosophy of Science, Band 10, S. 18-24.
- Rosenstengel, Bernd / Winand, Udo (1982). Petri-Netze. Braunschweig.
- Rosser, Barkley (1936). Extensions of some theories of Gödel and Church. In: Journal of Symbolic Logic I, S. 87-91.
- Rothschuh, Karl E. (1953). Geschichte der Physiologie. Berlin / Göttingen / Heidelberg.
- Rump, Siegfried M. (1982). Computer und Rechengenauigkeit. In: Elektronische Rechenanlagen, Band 24, Heft 6. S. 268-277.
- Rump, Siegfried M (1983a). Wie zuverlässig sind die Ergebnisse unserer Rechenanlagen? In: Jahrbuch Überblicke Mathematik 1983. S.163-168.
- Rump, Siegfried M. (1983b). Mathematik auf dem Rechner. Computeralgebra und neue Numerik. In: Elektronische Rechenanlagen, Band 25, Heft 6. S. 126-132.
- Runge, Philipp Otto (1810). Farben-Kugel oder Construction des Verhältnisses aller Mischungen der Farben zueinander, und ihrer vollständigen Affinität, mit angehängtem Versuch einer Ableitung der Harmonie in den Zusammenstellungen der Farben. Hamburg.
- Russell, Bertrand (1900). A critical exposition of the philosophy of Leibniz. Cambridge.
- Russell, Bertrand (1902). Brief an Frege vom 16. Juni 1902. Haslemere. In: Gabriel, Gottfried / Kambartel, Friedrich / Thiel, Christian (Hg.). Gottlob Freges Briefwechsel mit D. Hilbert, E. Husserl, B. Russell, sowie ausgewählte Einzelbriefe Freges mit Einleitungen, Anmerkungen und Register. Hamburg 1980, S. 59f.
- Russell, Bertrand (1903). The Principles of Mathematics. Band 1. Cambridge.

- Russell, Bertrand (1908). *Mathematical Logic as Based on the Theory of Types*. In: *American Journal of Mathematics*, Band 30. Hier zitiert nach: Dt. in: Russell, Bertrand. *Die Philosophie des logischen Atomismus. Aufsätze zur Logik und Erkenntnistheorie. 1908-1918. Ausgewählt, übersetzt und eingeleitet von Johannes Sinnreich*. München 1976. S. 23-65.
- Russell, Bertrand (1908-1918). *Die Philosophie des logischen Atomismus. Aufsätze zur Logik und Erkenntnistheorie. Ausgewählt, übersetzt und eingeleitet von Johannes Sinnreich*. München 1976.
- Russell, Bertrand / Whitehead, Alfred North (1910-1913). *Principia Mathematica*. 3 Bände. Cambridge.
- Sadovsky, Vadim N. (1974). *Leibniz and Development of General Systems Ideas*. In: *Akten des II. Internationalen Leibniz-Kongresses 1972 in Hannover, Band IV. (= Studia Leibnitiana Supplementa, Band 15)* Wiesbaden 1974. S. 105-113.
- Sale, Anthony E. (1998). *The Colossus of Bletchley Park – The German Cipher System*. Vortrag, gehalten auf der International Conference on the History of Computing. 14.-16. August 1998. Paderborn. [Als Manuskript veröffentlicht.]
- Sammet, Jean I. (1981). *The Early History of COBOL*. In: Wexelblat, Richard L. (Hg.). *History of Programming Languages*. New York / London / Toronto. S. 199-241.
- Sampson, Anthony (1973). *Sovereign State. The Secret History of I.T.T.* London. Dt.: *Weltmacht I.T.T. Die politischen Geschäfte eines multinationalen Konzerns*. Reinbek 1975.
- Schäfer, Lothar. (1978). *Einleitung: Duhems Bedeutung für die Entwicklung der Wissenschaftstheorie und ihre gegenwärtigen Probleme*. In: Duhem, Pierre. *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien*. Autorisierte Übersetzung von Friedrich Adler. Mit einem Vorwort von Ernst Mach. Mit einer Einleitung und Bibliographie herausgegeben von Lothar Schäfer. Nachdruck der Auflage von 1908. Hamburg. S. IX*-XXXIV*.
- Schewe, Bettina (1996). *Kooperative Softwareentwicklung. Ein objektorientierter Ansatz*. Wiesbaden.
- Schiller, Herbert J. (Hg.) (1970). *Super-State. Readings in the Military-Industrial Complex*. Urbana.
- Schischkoff, Georgi (1947). *Die gegenwärtige Logistik und Leibniz*. In: *Monographien zur philosophischen Forschung*. Band 1. *Beiträge zur Leibniz-Forschung*. Reutlingen. S. 224-240.
- Schlageter, Gunter / Stucky, Wolfried (1983). *Datenbanksysteme: Konzepte und Modelle*. Stuttgart.
- Schlick, Moritz (1933/34). *Die Probleme der Philosophie in ihrem Zusammenhang. Vorlesungen aus dem Wintersemester 1933/34*. Herausgegeben von Henk L. Mulder, Anne J. Kox und Rainer Hegselmann. Frankfurt am Main 1986.
- Schlick, Moritz (1935a). *Über »Konstatierungen«*. (Original: *Sur les »constatations«*); veröffentlicht in: Moritz Schlick: *Sur le fondement de la connaissance*. Paris 1935. Deutsche Fassung aus dem Nachlaß. Hier zitiert nach: Schlick, Moritz. *Philosophische Logik*. Frankfurt am Main 1986, S. 230-237.
- Schlick, Moritz (1935b). *Über die Beziehung zwischen den psychologischen und den physikalischen Begriffen*. (Original: *De la relation entre les notions psychologiques et les notions physiques*); veröffentlicht in *Revue de Synthèse*, Band 10, 1935, S. 5-26. Deutsche Fassung nach: Moritz Schlick. *Gesammelte Aufsätze*. Wien 1938. Hier zitiert nach: Schlick, Moritz: *Philosophische Logik*. Frankfurt am Main 1986, S. 238-258.
- Schlick, Moritz (1938). *Form und Inhalt. Eine Einführung in philosophisches Denken*. (Original: *Form and Content, an Introduction to Philosophical Thinking*); drei Vorlesungen an der University of London, zuerst veröffentlicht in: Schlick, Moritz: *Gesammelte Aufsätze*. Wien 1938. Aus dem Englischen übersetzt von Bernd Philippi. In: Schlick, Moritz. *Philosophische Logik*. Frankfurt am Main 1986, S. 110-222.
- Schmidt, Franz (1960). *Einleitung zu Leibniz, Gottfried Wilhelm von*. *Fragmente zur Logik*. Herausgegeben von Franz Schmidt. Berlin.
- Schneider, Hans Julius (1992). *Phantasie und Kalkül. Über die Polarität von Handlung und Struktur in der Sprache*. Frankfurt am Main.

- Schneider, Martin (1995). Weltkonstitution durch logische Analyse. Kritische Überlegungen zu Leibniz und Carnap. In: *Studia Leibnitiana*. Band 27/1. S. 67-84.
- Schubring, Gert (1990). Das mathematisch Unendliche bei J.F. Fries. In: König, Gert (Hg.). *Konzepte des mathematisch Unendlichen im 19. Jahrhundert*. Göttingen. S. 152-164. [= *Studien zur Wissenschafts-, Sozial- und Bildungsgeschichte der Mathematik*. Herausgegeben von Otte, Michael / Schneider, Ivo / Steiner, Heinz-Georg. Band 5]
- Schulte, Joachim (1989). *Wittgenstein. Eine Einführung*. Stuttgart.
- Schulz von Thun, Friedemann (1981). *Miteinander reden 1. Störungen und Klärungen*. Allgemeine Psychologie der Kommunikation. Reinbek. Zitiert nach: Schulz von Thun, Friedemann. *Miteinander reden. 1 Störungen und Klärungen und 2 Stile, Werte und Persönlichkeitsentwicklung*. Psychologie der Kommunikation. Reinbek 1998. (Einmalige Sonderausgabe.)
- Schwinn, Klaus (1998). Vom UDM zum DW-Modell. In: *Protokolle der 20. Tagung Unternehmensmodell Banken vom 1./2.12.1998 in Rüdesheim*. Wiesbaden.
- Searle, John R. (1969). *Speech Acts – An Essay in the Philosophy of Language*. Cambridge.
- Searle, John R. (1986). *Geist, Hirn und Wissenschaft*. Die Reith Lectures 1984. Frankfurt am Main.
- Shannon, Claude E. (1938). A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits. In: *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers (AIEE)*. Band 57, S. 713-723.
- Shannon, Claude E. (1958). Von Neumann's Contributions to Automata Theory. In: *Bulletin of the American Mathematical Society*. Band 64, Nr. 3, Teil 2, S. 123-129.
- Siefkes, Dirk (1993). *Formale Methoden und kleine Systeme. Lernen, leben und arbeiten in formalen Umgebungen*. Braunschweig / Wiesbaden.
- Siefkes, Dirk (1996). Umdenken auf kleine Systeme – Können wir zu einer ökologischen Orientierung in der Informatik finden? In: *Informatik Spektrum*, Band 19, 1996, S. 141-146.
- Siefkes, Dirk / Eulenhöfer, Peter / Stach, Heike / Städtler, Klaus (Hg.) (1998). *Sozialgeschichte der Informatik. Kulturelle Praktiken und Orientierungen*. Wiesbaden.
- Smith, Brian Cantwell (1985a). Limits of Correctness in Computers. In: Dunlop, Charles / Kling, Rob (Hg.). *Computerization and Controversy – Value Conflicts and Social Choices*. Boston 1991. S. 632-646 (= Reprint von: Smith, Brian Cantwell. *The Limits of Correctness*. Center for Study of Language and Information, Stanford University, Report Number CSLI-85-35 (1985).)
- Smith, Merritt Roe (Hg.) (1985b). *Military Enterprise and Technological Change. Perspectives on the American Experience*. Cambridge, Mass.
- Sneed, Joseph D. (1971). *The logical structure of mathematical physics*. Dordrecht.
- Snodgrass, Richard T. (Hg.) (1995). *The TSQL2 Temporal Query Language*. Boston.
- Snodgrass, Richard T. u.a. (1994a). TSQL2 Language Specification. In: *SIGMOD Record* 23, 1, S. 65-86.
- Snodgrass, Richard T. u.a. (1994b). TSQL2 Language Tutorial. In: *SIGMOD Record* 23, 3, S. 27-33.
- Der Spiegel (1988). Nummer 28 vom 11. Juli 1988, »Auf die Spitze getriebene Irrsinnslögik«, S. 112-123.
- Spillner, Andreas / Liggesmeyer, Peter (1994). Software-Qualitätssicherung in der Praxis. In: *Informatik Spektrum*, Band 17, Heft 6, Dezember 1994, S. 368-372.
- Stach, Heike (1995). 2000 Jahre Künstliche Intelligenz? In: *KI Künstliche Intelligenz*, Heft 4, Juli / August 1995, S. 47-51.
- Stachowiak, Herbert (1957). Über kausale, konditionale und strukturelle Erklärungsmodelle. In: *Philosophia Naturalis* 4, S. 403-433.
- Stachowiak, Herbert (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien / New York.
- Stachowiak, Herbert (Hg.) (1983). *Modelle – Konstruktion der Wirklichkeit*. München.
- Stachowiak, Herbert (1989). Artikel »Modell«. In: *Handlexikon zur Wissenschaftstheorie*, herausgegeben von Helmut Seiffert und Gerard Radnitzky, 2. Auflage 1994, S. 219-222.
- Stegmüller, Wolfgang (1969). *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie*. Band 1. Berlin / Heidelberg / New York.

- Stegmüller, Wolfgang (1970). Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie. Band 2, 1. Berlin / Heidelberg / New York.
- Stegmüller, Wolfgang (1973a). Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie. Band 2, 2. Berlin / Heidelberg / New York.
- Stegmüller, Wolfgang (1973b). Unvollständigkeit und Unentscheidbarkeit. Die metamathematischen Resultate von Gödel, Church, Kleene, Rosser und ihre erkenntnistheoretische Bedeutung. 3. verbesserte Auflage. Wien / New York.
- Stegmüller, Wolfgang (1978a). Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie. Band 1. Stuttgart. 6. Auflage.
- Stegmüller, Wolfgang (1978b). Das Universalien-Problem. Darmstadt.
- Steinbuch, Karl (1971). Mensch, Technik, Zukunft. Probleme von morgen. Stuttgart. (Hier zitiert nach der Taschenbuchausgabe. Reinbek 1973)
- Stern, Nancy (1980). John von Neumann's Influence on Electronic Digital Computing 1944-1946. In: Annals of the History of Computing, Band 2, Nr. 4, Oktober 1980, S. 349-362.
- Stiegler, Leonhard (1968). Leibnizens Versuche mit der Horizontalwindkunst auf dem Harz. In: Technikgeschichte, Band 35, S. 265-292.
- Styazhkin, Nikolaj I. (1969). History of mathematical logic from Leibniz to Peano. Cambridge, Mass. / London.
- Sutter, Alex (1988). Göttliche Maschinen: die Automaten für Lebendiges bei Descartes, Leibniz, La Mettrie und Kant. Frankfurt am Main.
- Swift, Jonathan (1726). Gulliver's Travels. Hier zitiert nach: Dt.: Gullivers Reisen. Leipzig 1971.
- Taeger, Jürgen (Hg.) (1983). Die Volkszählung. Reinbek.
- Taylor, Frederick Winslow (1919). Die Grundsätze der wissenschaftlichen Betriebsführung. München / Berlin.
- Thiel, Christian (1988). Einleitung des Herausgebers. In: Frege, Gottlob. Die Grundlagen der Arithmetik. Eine logisch mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl. Auf der Grundlage der Centenarausgabe. Herausgegeben von Christian Thiel. Hamburg. S. XIII-XXII.
- Thiel, Christian (1992). Kurt Gödel: Die Grenzen der Kalküle. In: Speck, Josef (Hg.): Grundprobleme der großen Philosophen. Philosophie der Neuzeit VI. Göttingen. S. 138-181.
- Thiel, Christian (1995). Philosophie und Mathematik. Eine Einführung in ihre Wechselwirkungen und in die Philosophie der Mathematik. Darmstadt.
- Thurner, Erwin / Dal Cin, Mario / Schneeweiß, Winfried (1998). Verlässlichkeitsbewertung komplexer Systeme. In: Informatik Spektrum, Band 21, Heft 6, Dezember 1998, S. 318-327.
- Timm, Albrecht (1966). Leibniz im Vorfeld der Kybernetik. In: Totok, Wilhelm / Haase, Carl (Hg.). Leibniz. Sein Leben – sein Wirken – seine Welt. Hannover.
- Toellner, Richard (1971). Albrecht von Haller. Über die Einheit im Denken des letzten Universalgelehrten. Wiesbaden. [= Sudhoffs Archiv Beiheft 10]
- Toulmin, Stephen (1953). Einführung in die Philosophie der Wissenschaft. Göttingen.
- Toulmin, Stephen (1961). Foresight and Understanding. An Inquiry into the Aims of Science. London. Dt.: Voraussicht und Verstehen. Frankfurt am Main 1981.
- Toulmin, Stephen (1972). Human Understanding. Vol. 1. General Introduction and Part 1: The Collective Use and Evolution of Concepts. Princeton. Dt.: Kritik der kollektiven Vernunft. Frankfurt am Main 1978.
- Toulmin, Stephen (1990). Cosmopolis. The Hidden Agenda of Modernity. New York. Hier zitiert nach: Dt.: Kosmopolis. Die unerkannten Aufgaben der Moderne. Frankfurt am Main 1994.
- Toulmin, Stephen / Goodfield, June (1966). The Architecture of Matter. London.
- Turing, Alan (1936/37). On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. In: Proceedings of the London Mathematical Society, Band 2, Nr. 42, S. 230-265.

- Turing, Alan (1937). On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. A Correction. In: Proceedings of the London Mathematical Society, Band 2, Nr. 43, S. 544-546.
- Turing, Alan (1945). Proposals for Development in the Mathematics Division of an Automatic Computing Engine (ACE). Report E882. Executive Committee, National Physical Laboratory. Nachdruck mit einem Vorwort von D.W. Davies als: NPL report, Computer Science, Nr. 57, 1972. Auch in: Carpenter, B.E. / Doran, R.W. (Hg.). A. M. Turing's ACE Report of 1946 and Other Papers. Cambridge, Mass. 1986, S. 20-105.
- Turing, Alan (1946). Vgl. Turing (1945).
- Turing, Alan (1950). Computing Machinery and Intelligence. In: Mind 59, S. 433-460.
- Turing, Alan (1969). Intelligent Machinery. In: Meltzer, B. / Michie, D. (Hg.). Machine Intelligence 5, Edinburgh. Dt.: Intelligente Maschinen. In: Turing, Alan. Intelligence Service. Schriften. Herausgegeben von Bernhard Dotzler und Friedrich Kittler. Berlin 1987, S. 81-113.
- US Department of Defense (1993). Investigation Report. Formal Investigation into the Circumstances Surrounding the Downing of Iran Air Flight 655 on 5 July 1988. Full-text July 28, 1988. As partially declassified in 1993.
- US Department of State Bulletin (1987). Persian Gulf – President's remarks, May 29, 1987. Transcript.
- US Navy Fact File »Aegis Combat System« [www.chinfo.navy.mil / navpalib/ factfile/ weapons/ wepaegis.html](http://www.chinfo.navy.mil/navpalib/factfile/weapons/wepaegis.html)
- Vetter, Max (1987). Aufbau betrieblicher Informationssysteme. Stuttgart.
- Vico, Giambattista (1744). Die Neue Wissenschaft über die gemeinschaftliche Natur der Völker. Nach der Ausgabe von 1744 übersetzt von Erich Auerbach. Reinbek 1966.
- Vollmer, Wilhelm (1874). Wörterbuch der Mythologie aller Völker. Neu bearbeitet von Wilhelm Binder. Stuttgart (3. Auflage). Reprint Leipzig 1990.
- Wajcman, Judy (2002). Addressing Technological Change: The Challenge to Social Theory. In: Current Sociology, Band 50, Nr. 3, Mai 2002, S. 347-363.
- Wegner, Peter (1976). Programming Languages – The First 25 Years. In: IEEE Transactions on Computers, Band c-25, Nr. 12, Dezember 1976, S. 1207-1225.
- Weizenbaum, Joseph (1966). ELIZA – A Computer Program for the Study of Natural Language Communication between Man and Machine. In: Communications of the ACM, Band 9, Nr. 1, Januar 1966, S. 36-45.
- Weizenbaum, Joseph (1972). Alpträum Computer. Ist das menschliche Gehirn nur eine Maschine aus Fleisch? In: Die Zeit, Nr. 3, 21. Januar 1972. Nachdruck in: Fachbereich Informatik Universität Hamburg. 1971-1996. 25 Jahre Informatik. Hamburg 1996. S. 19-22.
- Weizenbaum, Joseph (1976). Computer Power and Human Reason. From Judgement to Calculation. Hier zitiert nach: Dt.: Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft. Frankfurt am Main 1977.
- Wertheimer, Max (1925). Über Gestalttheorie. Berlin. (Sonderdruck aus Symposion I, S. 39-60.)
- Weyl, Hermann (1953). Über den Symbolismus der Mathematik und mathematischen Physik. In: Studium Generale. Hier zitiert nach: In: Reidemeister, K. (Hg.). Hilbert. Berlin / Heidelberg / New York 1971. S. 20-38.
- Whitaker, William A. (1996). ADA – The Project: The DoD High Order Language Working Group. In: Bergin, Thomas J. / Gibson, Richard G. (Hg.). History of Programming Languages – II. Reading, Mass. / Menlo Park, Cal. / New York u.a. S. 173-228.
- Whorf, Benjamin Lee (1956). Language, Thought and Reality. Cambridge. Dt.: Sprache, Denken, Wirklichkeit. Reinbek 1963.
- Wiegand, Josef (1994). Informatik und Großforschung. Geschichte der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung. Frankfurt am Main / New York.

- Wiener, Norbert (1932). Back to Leibniz! Physics Reoccupies an Abandoned Position. In: The Technology Review 34, S. 201-203, 222, 224. Nachdruck in: Wiener, Norbert. Collected Works. Cambridge, Mass. 1976-1979. Band 4, S. 76-79.
- Wiener, Norbert (1934). Quantum Mechanics, Haldane, and Leibniz. In: Philosophy of Science 1. S. 479-482. Nachdruck in: Wiener, Norbert. Collected Works. Cambridge, Mass. 1976-1979. Band 4, S. 80-83.
- Wiener, Norbert (1940). Letter Covering the Memorandum on the Scope, etc., of a Suggested Computing Machine (September 21, 1940). In: Wiener, Norbert. Collected Works. Cambridge, Mass. 1976-1979. Band 4, S. 122-124.
- Wiener, Norbert (1948). Cybernetics or control and communication in the animal and the machine. Erweiterte Neuauflage Cambridge, Mass. 1961. Dt.: Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine. Übersetzt von E.H. Serr, unter Mitarbeit von Dr. E. Henze. Düsseldorf / Wien 1963. Hier zitiert nach der Neuauflage Düsseldorf / Wien / New York / Moskau 1992.
- Wiener, Norbert (1964). Intellectual Honesty and the Contemporary Scientist. (Transcript of talk given to Hillel Group at Massachusetts Institute of Technology), The Technology Review 66, S. 17-18, 44-45, 47. Auch in: Wiener, Norbert. Collected Works. Cambridge, Mass. 1976-1979. Band 4, S. 725-729.
- Wiener, Norbert (1976-1979). Collected Works. Herausgegeben von Pesí Masani. Band 1-4. Cambridge, Mass.
- Wiener, Norbert / Rosenblueth, Arturo (1945). The Role of Models in Science. In: Philosophy of Science. Band 12. S. 316-321. Nachdruck in: Wiener, Norbert. Collected Works. Cambridge, Mass. 1976-1979. Band 4, S. 446-451.
- Wildes, Karl / Lindgren, Nilo A. (1985). A Century of Electrical Engineering and Computer Science at MIT 1882-1982. Cambridge, Mass. / London.
- Wilkes, Maurice Vincent / Wheeler, David J. / Gill, Stanley (1951). The Preparation of Programs for a Digital Computer, with Special Reference to the »EDSAC« and the Use of a Library of Subroutines. New York 1951. Verbesserte Auflage 1957. Reprint Los Angeles 1982
- Winch, Peter (1981). Language, Thought and World in Wittgenstein's Tractatus. In: Block, Irving (Hg.). Perspectives on the Philosophy of Wittgenstein. Oxford.
- Wirth, Niklaus (1978). Systematisches Programmieren. Stuttgart.
- Wittgenstein, Ludwig (1918) (TLP). Logisch-philosophische Abhandlung. In: Annalen der Naturphilosophie 14, 1921. Herausgegeben von M. Ostwald. Als »Tractatus logico-philosophicus« erschienen London 1922. Zitiert nach: Wittgenstein, Ludwig. Werkausgabe. Band 1, Frankfurt am Main 1984.
- Wittgenstein, Ludwig (1929a). Some remarks on logical form. In: Proceedings of the Aristotelian Society. Ergänzungsband 9, Reprint New York. S. 162-171.
- Wittgenstein, Ludwig (1929b). Gespräche, aufgezeichnet von Friedrich Waismann (hier 25.12.1929). In: Wittgenstein, Ludwig. Werkausgabe. Band 3, Frankfurt am Main 1984.
- Wittgenstein, Ludwig (1949-1951). Über Gewißheit. Herausgegeben von G.E.M. Anscombe und G.H. von Wright. In: Wittgenstein, Ludwig. Werkausgabe. Band 8, Frankfurt am Main 1984, S. 113-257.
- Wittgenstein, Ludwig (1945) (PU). Philosophische Untersuchungen. In: Wittgenstein, Ludwig. Werkausgabe. Band 1, Frankfurt am Main 1984, S. 225-580.
- Wittgenstein, Ludwig (1950/51). Bemerkungen über die Farben. In: Wittgenstein, Ludwig. Werkausgabe. Band 8, Frankfurt am Main 1984, S. 7-112.
- Wittgenstein, Ludwig (1984). Werkausgabe. Band 1-8, Frankfurt am Main.
- Wundt, Max (1932). Die Philosophie an der Universität Jena. Jena. [=Zeitschrift des Vereins für thüringische Geschichte und Altertumskunde. Hg. Georg Meutz. N.F. 15. Beiheft. Beiträge zur Geschichte der Universität Jena, Heft 4.]
- Zboray, Michael (1995). Will the Market for Security Products Remain Segmented? [=Gartner Group Information Security Strategies (ISS) Research Note]
- Zemanek, Heinz (1991). Weltmacht Computer, Weltreich der Information. Esslingen / München.

- Zemanek, Heinz (1993). Philosophische Wurzeln der Informatik im Wiener Kreis. In: Scheffé, Peter / Hastedt, Heiner / Dittrich, Yvonne / Keil, Geert (Hg.). Informatik und Philosophie. Mannheim. S. 85-117.
- Zuse, Konrad (1970). Der Computer – mein Lebenswerk. München. 2. Auflage Berlin 1984.
- Zuse, Konrad (1980). Petri-Netze aus der Sicht des Ingenieurs. Braunschweig.
- Zuse, Konrad (1982). Anwendungen von Petri-Netzen. Braunschweig.

9 Personenregister

- Abrahams, Paul, 139
Achinstein, Peter, 67
Ackermann, Wilhelm, 88, 327, 335
Addison, John West, 67
Aiken, Howard H., 183, 189f., 206
Albert, Hans, 268
Alembert, Jean Baptist le Rond, genannt, 279
Alisch, Lutz-Michael, 73
Aly, Götz, 160, 165, 172f.
Amsler, Jakob, 174
Apostel, Leo, 67
Aristarch von Samos, 346
Aristophanes, 314, 383
Aristoteles, 355, 391, 397
Arnauld, Antoine, 366
Ashby, W. Ross, 77
Atanasoff, John V., 191
Austin, John Langshaw, 140
Babbage, Charles, 164, 166, 202
Bagge, Erich, 178, 476
Baglivi, Giorgio, 364
Balzert, Helmut, 84f.
Bammé, Arno, 341
Bartels, Christoph, 412f.
Baruch, Bernard, 178
Baruzzi, Arno, 98, 365, 378
Bateson, Gregory, 205
Bauch, Bruno, 256
Bauer, Friedrich L., 85, 210ff., 222, 242, 349
Baumann, Johann Julius, 347
Beckmann, Jan Peter, 251f., 356
Behn, Sosthenes, 212
Behrmann, 170
Belli, Fevzi, 441
Berger, P., 396
Berkeley, Edmund Callis, 194
Bernays, Paul, 292, 318ff., 323, 325, 327, 332, 336
Bertalanffy, Ludwig von, 31, 64
Biermann, Kurt-R., 414-417
Bigelow, Julian, 181, 187f.
Black, Max, 69
Blenck, 167
Bloch, Ernst, 133, 367, 377, 378
Bloch, Gilbert, 210
Boehm, Barry W., 138, 475
Boerhaave, Herrmann, 364
Bohr, Nils, 390
Boisguillebert (Boisguilbert), Pierre Le Pesant de, 356
Bolzano, Bernard, 253
Bonß, Wolfgang, 15, 20-25, 27, 35, 137, 160, 277, 350, 391, 418, 436, 441f., 449, 453, 460, 475
Boole, George, 164, 216-220, 240, 391
Borelli, Giovanni Alfonso, 358
Borges, Jorge Luis, 68
Bossel, Hartmut, 82f.
Boulding, Kenneth E., 64
Bracken, Paul, 225
Brainerd, John G., 190, 199f.
Brauer, Ute, 126, 459f.
Brauer, Wilfried, 82, 126, 157f., 338, 340f., 343, 349, 429, 459f.
Breitkopf, Alfred, 394
Brödner, Peter, 166
Brouwer, Luitzen Egbertus Jan, 250, 312ff., 316, 326
Brunnstein, Klaus, 72, 96, 135, 139, 459
Burali-Forte, Cesare, 292
Burkhardt, Hans, 348, 366, 376, 386, 389
Burks, Arthur Walter, 196, 199f., 203, 241
Bush, Vannevar, 161f., 164, 175f., 178, 180-185, 187, 194, 209, 223
Canguilhem, Georges, 346
Cantor, Georg, 91, 253, 292ff., 310f., 318, 324, 326
Carlson, David R., 53
Carnap, Rudolf, 17, 74, 102, 112, 150, 153, 229, 248ff., 253-274, 278, 281f., 284, 286, 298, 303-310, 314, 326f., 422, 424f., 458
Carnot, Sadi, 201
Carpenter, B.E., 202
Carr, Marvin J., 34, 488
Carroll, Lewis (eigentlich Charles Dodgson), 69, 105f., 436
Cassirer, Ernst, 256, 294ff., 298, 321, 346
Ceruzzi, Paul E., 198, 222
Chapuis, Alfred, 361f.
Charney, Jule Gregory, 192
Chen, Peter, 86, 88, 153
Church, Alonzo, 157, 336, 341
Churchill, Winston, 213
Clasen, Brigitte, 141
Clausen, Horst, 226
Codd, Edgar F., 86ff., 90f., 93, 115
Compton, Karl T., 176
Couturat, Louis, 348f.
Cowan, R.S., 10
Coy, Wolfgang, 8, 16
Crowe, William J., 39, 42f., 49f.
Dahl, Ole-Johan, 233
Dal Cin, Mario, 475
Date, Christopher J., 107

- Davidoff, Jules, 284
Davies, Ian, 284
Dawson, John W. jr., 293, 327, 347
De Millo, Richard A., 145
Dedekind, Richard, 292, 310f., 315
DeMarco, Tom, 127, 129
Denert, Ernst, 228, 455
Denne, Norbert, 105
Desanti, Jean-Toussaint, 292
Descartes, René, 15, 97ff., 134, 141, 231, 351f., 358f., 363f., 366, 372, 428, 474
Deutsch, Karl W., 64, 77-80, 205
Diderot, Denis, 279
Diebner, Kurt, 178
Dijkstra, Edsger W., 70, 142f., 145f., 233
Dingler, Hugo, 267
Donne, John, 349f.
Doran, R.W., 202
Dörner, Dietrich, 37
Droz, Edmond, 361f.
Duhem, Pierre, 18
Dyson, Freeman, 160
Echtle, Klaus, 146
Eckert, John Presper, 190, 200ff.
Eco, Umberto, 68, 371
Edwards, Paul N., 224
Einstein, Albert, 390
Eisenhower, Dwight D., 161f.
Elberling, 171
Endres, Albert, 143, 146
Epimenides, 329
Erdmann, Johann Eduard, 347
Euklid, 292, 296ff., 320, 375, 388, 398
Euler, Leonhard, 315, 347
Everett, Robert E., 165
Fehér, Márta, 356
Feigl, Herbert, 248
Feyerabend, Paul, 17, 72, 280, 350, 390, 425, 455, 459
Feyl, Othmar, 352
Finsler, Paul, 327
Fischer-Hübner, Simone, 72, 96, 135, 139
Fjörtoft, Ragnar, 192
Flechtner, Hans-Joachim, 188, 238
Fleck, Ludwik, 17, 327
Flowers, Thomas Harold, 215, 218
Floyd, Christiane, 31, 457
Fogarty, William, 48, 51f.
Ford, Henry, 174
Fraenkel, Adolf, 311f., 314, 316ff., 327, 333
Frank, Philipp, 18, 248
Frankel, Stanley, 196
Frege, Gottlob, 28, 90, 97, 253, 270, 291, 293f., 298-303, 305, 310, 314, 319, 325, 328, 347, 396
Friedewald, Michael, 226
Friedrichs, Günter, 8
Fries, Jacob Friedrich, 347
Fulbright, J. William, 162
Furger, Franco, 9, 237
Gadamer, Hans-Georg, 97
Galilei, Galileo, 70
Gammert (Dr.), 170
Gamow, George, 240
Gandy, Robin, 341
Ganzhorn, Karl, 404
Gassendi, Pierre, 366
Gauß, Carl Friedrich, 292, 311
Geier, Manfred, 248, 256
Gentzen, Gerhard, 335
Gerhardt, Carl Immanuel, 347f.
Gerland, Ernst, 409
Gewald, K., 83
Gill, Stanley, 232
Gillon, Paul N., 190, 200
Giovanni de Dondi, 359
Glatthaar, Wolfgang, 228
Glisson, Francis, 364f.
Glöckl, Johann, 392
Gobbers, 170
Gödel, Kurt, 247f., 253, 293, 303, 309f., 317, 324f., 327-335, 334f., 337, 340, 347
Goggelmoggel (lit.), 105, 325
Goldstine, Adele, 198, 200
Goldstine, Herman H., 176f., 179ff., 189-192, 194ff., 198-202, 206, 214, 232, 236, 241
Good, Irving John, 217
Goodfield, June, 97
Goodman, Nelson, 293
Goos, Gerhard, 349
Gottschalk, Jürgen, 409, 412
Gould, Stephen Jay, 438
Grandville (eigentlich Jean Ignace Isidore Gérard), 367, 369
Greiner, Bernd, 182, 212
Grossmann, Henryk, 358
Groß-Rhode, Martin, 9
Guhrauer, Gottschalk Eduard, 411
Gulliver, Lemuel (lit.), 367
Günther, Gotthard, 133
Habermas, Jürgen, 102, 104, 446ff.
Hahn, Hans, 14, 248f., 251ff., 297, 325, 458
Haley, Jay, 206
Haller, Albrecht von, 364f.
Hallmann, Cornelia, 492f.
Hartree, Douglas, 209
Harvey, William, 358
Harzingk (Hartzing), Peter, 409
Hasse, Helmut, 464-467
Hazen, Harold L., 177
Heckmann, Herbert, 360, 362
Hegselmann, Rainer, 254
Heidegger, Martin, 256

- Heijenoort, Jean van, 328
- Heims, Steve J., 203, 240, 476
- Heinrich IV. von Frankreich, 350
- Heintz, Bettina, 9, 11f., 14, 180, 237, 314
- Heisenberg, Werner, 178, 476
- Held, Gerd, 367, 369, 461ff., 467, 470ff.
- Hellbardt, Günter, 57f.
- Hellige, Hans Dieter, 73f., 123, 163, 225f.
- Hempel, Carl G., 17, 67, 279
- Henkin, Leon, 67
- Herbrand, Jacques, 323f.
- Hermes, Hans, 338, 340f.
- Herschel, Rudolf, 77
- Hertz, Heinrich, 13, 74-77, 342
- Heyting, Arend, 312f., 315f.
- Hilbert, David, 11, 14, 65, 88, 91, 240, 257f., 263, 316, 318-325, 327f., 332, 334f., 337, 427, 440, 455
- Hildebrand, Knut, 96
- Hilty, Lorenz M., 156
- Himmler, Ulrich, 113ff., 477, 481, 495
- Hintikka, Jaakko, 256, 283, 349, 479
- Hintikka, Merrill B., 283
- Hoare, Charles Anthony Richard, 233
- Hobbes, Thomas, 132ff., 352, 377ff., 428
- Hodges, Andrew, 202, 212ff., 216f., 243, 336f.
- Hofmann, Werner, 471
- Hohlfeld, Rainer, 15, 20, 22, 25, 35, 277, 442, 453
- Hollerith, Hermann, 31, 160, 164ff., 168-172, 185f., 189, 208, 228, 241, 422, 428
- Holz, Hans Heinz, 411
- Hopcroft, John E., 77, 337f., 340f.
- Hopkins, Larry, 49
- Hörcher, Hans-Martin, 144
- Horowitz, Ellis, 125
- Horst, Ulrich, 409, 412
- Howlett, Jack, 217
- Huber, Eric, 226
- Hume, David, 251, 276
- Hunsaker, Jerome C., 177
- Husserl, Edmund, 258, 314
- Huyghens, Christiaan, 363
- Indermark, Klaus, 157, 338, 340f., 349
- Ishiguro, Hidé, 284, 349, 413
- Jackson, Don D., 206
- Jacobs, John F., 123, 224
- Jacquard, Joseph-Marie, 166
- Jacquet-Droz, Henri-Louis, 360
- Jacquet-Droz, Pierre, 360
- Janik, Allan, 76
- Joerges, Bernward, 12
- Johann Friedrich, Herzog von Braunschweig-Calenberg, 372, 405, 409
- Jørgensen, Jörgen, 347, 389f.
- Julianus, 363
- Jungius, Joachim, 366, 386
- Kahneman, 256
- Kaiser, Walter, 160, 168f., 180
- Kambartel, Friedrich, 257f., 263
- Kamitz, Reinhard, 293
- Kamlah, Andreas, 275
- Kangro, Hans, 386
- Kant, Immanuel, 65, 250, 252, 294-297, 299, 346
- Kauppi, Raili, 349, 391
- Kelvin (of Largs), William Thomson, Baron, 175
- Kennedy, John F., 350
- Kenny, Anthony, 282f., 285, 286
- Kepler, Johannes, 81
- Kilburn, Tom, 203
- Kimm, Reinhold, 83
- Kircher, Athanasius, 367, 372
- Kirpal, Alfred, 225
- Kleene, Stephen C., 317
- Kluge, Alexander, 37
- Kneale, Martha, 372
- Kneale, William, 372
- Knorr-Cetina, Karin D., 18, 35, 83
- Knuth, Donald E., 190, 194, 199
- Koefoed, 171
- Köhler, Wolfgang, 257, 278
- Koistinen, Paul A.C., 161
- Kollek, Regine, 15, 20, 22, 25, 35, 277, 442, 453
- Konda, Suresh L., 34
- Kopernikus, Nikolaus, 346
- Koppel, Ted, 39, 41, 43
- Koppelberg, D., 256
- Koreuber, Mechthild, 9
- Korn, Willi, 211
- Kosiol, Erich, 119
- Kosy, Donald W., 224, 226
- Koyré, Alexandre, 93
- Kraft, Viktor, 248
- Krämer, Sybille, 11ff., 157, 321, 330, 337, 341
- Kreisel, Georg, 317
- Kronecker, Leopold, 310f.
- Krüger, Detlef, 166
- Krüger, Lorenz, 381
- Kuhn, Thomas S., 15, 17-20, 61, 151, 154, 280, 455
- Kummer, Benno, 70
- Kutschera, Franz von, 298, 394
- La Mettrie, Julien Offray de, 363ff., 429
- Lampert, Timm, 76
- Langwitz, Detlef, 346
- Lazarsfeld, Paul, 78

- Lee, Yuk Wing, 181
 Leibniz, Gottfried
 Wilhelm von, 27f.,
 32, 79, 105, 112,
 118, 150, 156, 239,
 254f., 268, 283,
 294f., 298, 301, 321,
 334, 345-358,
 365ff., 370-419,
 422, 424ff., 428,
 431
 Lengyel (Professor),
 170
 Lenk, Hans, 57
 Lenzen, Wolfgang, 348,
 391
 Leonardo da Vinci, 358
 Leslie, Stuart W., 161ff.,
 178, 224, 227
 Leśniewski, Stanisław,
 293
 Lewin, Ronald, 213
 Liggesmeyer, Peter, 146
 Lindgren, Nilo A.,
 176f., 179, 181
 Lindner, Rudolf, 160f.,
 168, 190, 194, 211,
 217, 233
 Lipton, Richard J., 145
 Locke, John, 100, 251,
 351, 377
 Loecx, Jacques, 143,
 145
 Lorente de Nó, Rafael,
 179, 206
 Ludovici, Carl Günther,
 408
 Łukasiewicz, Jan, 327
 Lull, Raymund →
 Raimundus Lullus,
 371
 Lulle, Raymond →
 Raimundus Lullus,
 370
 Lustig, Scott, 48f.
 MacCulloch, Warren S.
 → McCulloch,
 Warren S., 207
 Mach, Ernst, 253f., 256
 Mackensen, Ludolf von,
 346, 405
 MacLane, Saunders, 9
 Maddy, Penelope, 293
 Malcolm, Norman, 283
 Malebranche, Nicolas
 de, 356
 Martin, Gottfried, 366
 Martin, Peter, 238
 Masani, Pesi, 160
 Masterman, Margaret,
 19, 61
 Mathieu, Vittorio, 374f.
 Mauchly, John William,
 190-193, 200, 202
 Mayer, Verena, 298
 McCulloch, Warren S.,
 179, 206ff., 229
 McGuinness, Brian F.,
 284
 Mehrtens, Herbert, 13f.,
 297, 311, 314, 316
 Meier, Bernhard, 155
 Menger, Karl, 248, 310,
 313
 Meschkoswki, Herbert,
 294
 Metropolis, Nicholas
 Constantine, 196,
 201, 217
 Metzger, Wolfgang,
 155, 261, 278, 314
 Mill, John Stuart, 65,
 293
 Miller, George A., 129
 Miller, James G., 64
 Millikan, Robert, 178
 Minsky, Marvin, 67
 Misa, Thomas, 163
 Moldt, Daniel, 123, 126
 Moll, Konrad, 352, 366
 Monarch, Ira, 34
 Moravia, Sergio, 98
 Mormann, Thomas,
 248, 253, 255f., 314
 Morris, Charles
 William, 140
 Moscovici, Serge, 350
 Moulton, Forest Ray,
 179
 Mühlenbein, Heinz, 337
 Müßig, Michael, 96
 Myrach, Thomas, 95
 Nagel, Ernest, 67, 328f.
 Nagl, Manfred, 137,
 142f.
 Nike, Frieder, 16
 Narr, Wolf-Dieter, 64f.
 Nash, Stephen G., 161
 Naur, Peter, 85, 225,
 227, 457
 Neumann, John von,
 31, 124, 141f., 164,
 180, 182, 188, 192,
 196, 198-204,
 206ff., 214, 229,
 232, 234-243, 327,
 333, 337, 430, 443,
 476
 Neurath, Otto, 248,
 253, 269-273, 279f.,
 424
 Newman, James R.,
 328f.
 Newman, Max H.A.,
 214f., 335, 337
 Newton, Isaac, 81
 Noether, Emmy, 9
 Oberliesen, Rolf, 165f.,
 169, 172, 404
 Oberquelle, Horst, 126
 Oberweis, Andreas, 96
 Occam → Ockham,
 Wilhelm von, 251
 Ockham, Wilhelm von,
 251f., 356, 377
 Odysseus (lit.), 265
 Ortner, Erich, 106
 Parkinson, George
 Henry Radcliffe,
 349
 Parnas, David Lorge,
 119
 Pascal, Blaise, 344, 366,
 404
 Peano, Giuseppe, 328,
 333
 Pears, David, 283
 Peckhaus, Volker, 346
 Peirce, Charles S., 303
 Peleska, Jan, 144
 Perlis, Alan J., 145, 227
 Petri, Carl Adam, 82,
 123-126, 432, 437
 Petty, William, 356
 Petzold, Hartmut, 169-
 173, 182f., 200, 221
 Philippi, Bernd, 281,
 289
 Pitts, Walter, 180, 205-
 208, 229
 Platon, 13, 65, 101, 132,
 252f., 293f., 299,
 306, 309, 314, 355,
 383, 402
 Poincaré, Henri, 254,
 267, 304, 311
 Popper, Karl R., 17, 65,
 74, 248, 276ff., 280,
 424f., 455f.
 Porter, Robert P., 166
 Poser, Hans, 376

- Post, Emil, 157, 243, 327
- Potter, Hop, 480
- Potthoff, Klaus, 67
- Price, Clare, 34, 490
- Prior, David, 70
- Pugh, Emerson W., 222
- Putnam, Hilary, 293
- Quesnay, François, 356
- Quine, Williard Van Orman, 17, 101, 293, 317
- Radermacher, Hans, 478
- Radkau, Joachim, 178
- Raimundus Lullus, 366f., 372
- Ramsey, Frank Plumpton, 308f.
- Randell, Brian, 200, 203, 215-218, 222, 225, 457
- Rapoport, Anatol, 64
- Rathenau, Walther, 169
- Rauchberg, Heinrich, 166
- Reagan, Ronald, 39, 41
- Rechenberg, Ingo, 68
- Redmond, Kent C., 165, 223f.
- Reichenbach, Hans, 15, 18, 79, 275, 277, 440
- Reisig, Wolfgang, 123, 125
- Reister, Dietrich, 26
- Reiter, Raymond, 91f.
- Rescher, Nicholas, 349, 391
- Richard, Jules, 329
- Rickert, Heinrich, 256
- Riemann, Bernhard, 297
- Roberson, Debi, 284
- Robinson, William Heath, 214
- Rockefeller (Stiftung), 178
- Röd, Wolfgang, 352, 366, 370, 391, 402
- Rogers, William C., 49
- Rolf, Arno, 16
- Roosevelt, Franklin Delano, 162, 178, 180
- Rosen, Robert, 268
- Rosenblueth, Arturo, 68f., 78, 188
- Rosenstengel, Bernd, 125f.
- Rosser, John Barkley, 333
- Rössner, J., 106
- Rössner, Lutz, 73
- Rota, Gian Carlo, 217
- Roth, Karl Heinz, 160, 165, 172f.
- Rothschuh, Karl E., 359, 364
- Rottke, Hermann, 170
- Rudolf August, Herzog zu Braunschweig und Lüneburg, 407
- Rump, Siegfried M., 234
- Runge, Philipp Otto, 470f.
- Russell, Bertrand, 76, 205, 251, 253f., 260, 275, 281f., 284, 289, 292, 297, 301ff., 305-310, 327f., 331, 347, 349, 460
- Sadovsky, Vadim N., 402
- Sale, Anthony E., 212, 214ff., 218ff.
- Sammet, Jean I., 227
- Sampson, Anthony, 212
- Schäfer, Lothar, 18
- Schaff, Adam, 8
- Schausten, 170
- Scherbius, Arthur, 210
- Schewe, Bettina, 138
- Schickard, Wilhelm, 404
- Schiess-Defries, 170
- Schiller, Herbert J., 161
- Schischkoff, Georgi, 347, 389f.
- Schlageter, Gunter, 87, 89, 94, 104, 114, 116, 155
- Schlick, Moritz, 248, 250f., 269, 273f.
- Schmidt, Franz, 348, 397
- Schmidt, Hans Thilo, 210
- Schmidt-Brücken, Katharine, 9
- Schneeweiß, Winfried, 475
- Schneider, Hans Julius, 90, 298
- Schneider, Martin, 357
- Schönfinkel, Moses, 336
- Schubring, Gert, 347
- Schulte, Joachim, 286
- Schultz, Johann, 347
- Schulz von Thun, Friedemann, 103
- Schupp, Franz, 348
- Schwinn, Klaus, 148
- Searle, John R., 65, 67, 140
- Senf, Bernd, 166
- Shakespeare, William, 369
- Shannon, Claude E., 123, 181, 192, 202, 205, 236, 239
- Sharpless, T. Kite, 199
- Sieber, Kurt, 143, 145
- Siefkes, Dirk, 9, 16, 30, 59, 227, 456, 481
- Silva, João Gabriel, 146
- Simon, Leslie E., 190
- Simpson, John, 476
- Smith, Brian Cantwell, 143, 146f., 477
- Smith, H.W., 177
- Smith, Merritt Roe, 163
- Smith, Thomas Malcolm, 165, 223f.
- Sneed, Joseph D., 72f.
- Snodgrass, Richard T., 95
- Sokrates, 265
- Söllner, B., 106
- Spillner, Andreas, 146
- Stach, Heike, 337
- Stachowiak, Herbert, 67, 71f., 74, 76, 140, 266, 452, 477, 485
- Stegmüller, Wolfgang, 67, 72, 74, 76, 101, 256, 259, 267, 271, 316f., 328, 330, 335
- Steinbuch, Karl, 232
- Steinhaus, 170
- Stern, Nancy, 190, 196, 200f., 203
- Stübitz, George R., 190
- Stiegler, Leonhard, 409f., 412
- Stucky, Wolffried, 87, 89, 94, 104, 114, 116, 155

- Styazhkin, Nikolaj I., 366
- Suppes, Patrick, 67
- Sutter, Alex, 403
- Swift, Jonathan, 367ff., 413
- Taeger, Jürgen, 166
- Tarski, Alfred, 67, 293
- Taylor, Frederick
Winslow, 119, 174, 229
- Taylor, Richard, 69
- Telemachos (lit.), 265
- Thiel, Christian, 302, 321, 323f., 328, 334f., 396
- Thurner, Erwin, 475
- Timm, Albrecht, 346, 352
- Toellner, Richard, 364f.
- Torriano, Gianello, 359
- Toulmin, Stephen, 15, 17, 20, 32, 76, 97, 104, 269, 280, 350, 419
- Turing, Alan, 11f., 157, 184, 201f., 205-208, 212f., 215, 217, 242f., 335-338, 340-343, 419, 427f., 454
- Tversky, 256
- Ullman, Jeffrey D., 77, 338, 340f.
- Ulrich, R. Carol, 34
- Vaucanson, Jacques de, 360, 363
- Vernam, Gilbert, 212
- Vesley, Richard
Eugene, 317
- Vetter, Max, 100f., 104, 112, 116, 154
- Vico, Giambattista, 134, 139
- Vollmer, Wilhelm, 37
- Wagner, Gabriel, 397
- Wagner, R., 188
- Waismann, Friedrich, 248, 281, 290
- Wajcman, Judy, 10, 35f., 229
- Walker, Clay F., 34
- Walter, Wolfgang, 404
- Walther, Alwin, 183
- Weakland, John W., 206
- Webb Jr., James H., 41
- Weber, Klaus, 195
- Wegner, Peter, 233
- Weierstraß, Karl, 292
- Weigel, Erhard, 352, 366
- Weir, Peter, 69
- Weizel, Walter, 242
- Weizenbaum, Joseph, 8, 66, 358, 499
- Welchman, Gordon, 217
- Wertheimer, Max, 257, 278
- Weyl, Hermann, 314
- Wheeler, David J., 232
- Whitaker, William A., 226
- Whitehead, Alfred
North, 253f., 302f., 327
- Whorf, Benjamin Lee, 284, 424f., 459
- Wiegand, Josef, 242
- Wiener, Norbert, 31, 68f., 78, 123, 160, 180f., 184f., 187ff., 192, 203, 205f., 208, 220, 229, 239ff., 346, 349, 369, 434
- Wiesner, Jerome, 181
- Wildes, Karl, 176f., 179, 181
- Wilkes, Maurice
Vincent, 203, 232
- Wilson, Thomas
Woodrow, 177
- Winand, Udo, 125f.
- Winch, Peter, 284
- Wirth, Niklaus, 143ff., 156f., 233
- Wittgenstein, Ludwig, 28, 72, 74, 76, 94, 112, 140, 150, 152, 248, 253, 259ff., 273ff., 281-291, 298, 303, 307, 325, 357, 382, 461, 463, 465, 472f., 478
- Wohak, Bertram, 160f., 168, 190, 194, 211, 217, 233
- Worlton, J., 201
- Wundt, Max, 352
- Zboray, Michael, 34, 490
- Zeltwanger, Holger, 160f., 168, 190, 194, 211, 217, 233
- Zemanek, Heinz, 94, 222
- Zermelo, Ernst, 292, 327f., 333
- Zuse, Konrad, 123, 180, 183, 198, 202, 209, 221, 228

Hiermit versichere ich an Eides statt, daß ich die vorliegende Arbeit selbst verfaßt habe und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.