

**Konzeption eines Geo-Datenmodells
unter Verwendung von Freiformkörpern
auf der Basis von
Volume Non Uniform Rational B-Splines**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg

vorgelegt von
Dipl.-Inf. Björn Kesper
aus Kassel

Hamburg 2001

Genehmigt vom Fachbereich Informatik der Universität Hamburg
auf Antrag von Prof. Dr.-Ing. D.P.F. Möller (Universität Hamburg),
Prof. G. Reik, PhD. (Technische Universität Clausthal)
und Prof. Dr.-Ing. B. Page (Universität Hamburg)

Hamburg, den 12. Januar 2001

Prof. Dr. L. Dreschler-Fischer
(Dekanin)

Danksagungen

Mein herzlicher Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Dietmar P.F. Möller für die Unterstützung und die zahlreichen Diskussionen während der Entstehung dieser Arbeit sowie für die gute Zusammenarbeit während meiner Zeit als Mitarbeiter an der Technischen Universität Clausthal und der Universität Hamburg.

Herrn Prof. Gerhard Reik, PhD. danke ich für die anwendungsbezogene Begutachtung der Arbeit und die anregenden Diskussionen im Projekt BAGIS.

Für die kurzfristige Übernahme des Gutachtens danke ich Prof. Dr.-Ing. Bernd Page.

Des weiteren gilt mein Dank Herrn Dipl.-Geol. Christian Zemke für die Zusammenarbeit im Projekt BAGIS sowie den Herren Dipl.-Inf. Mario Lichtsinn und Dipl.-Inf. Michael Buchholz für das Korrekturlesen der Arbeit.

Nicht unerwähnt bleiben sollen Herr Dr. Carsten Hörner, dessen Arbeiten zum Kernsystem CORE die Grundlage des Geo-Datenmodells GeoCORE bildet, und Herr Dr. Detlef Bringemeier, der mich schon in den Anfängen des Projektes BAGIS immer wieder darauf aufmerksam gemacht hat, daß „hohle Pappschachteln“ nicht für die Modellierung geowissenschaftlicher Raummodelle geeignet sind und der somit den Anstoß für das in dieser Arbeit neu entwickelte Konzept zur räumlichen Modellierung gegeben hat.

Für die Unterstützung während meines Studiums danke ich meinen Eltern.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Kerstin für ihre Unterstützung während meiner Zeit in Hamburg.

Kurzfassung

Die Modellierung und Visualisierung thematischer, räumlicher und temporaler Daten in rechnergestützten Informationssystemen ist in den Geowissenschaften für die gesamtheitliche Erfassung des geologischen Untergrundes und die Prognose anthropogen induzierter Prozesse von entscheidender Bedeutung. Aufgrund der Komplexität von Geo-Systemen, die sich u.a. aus den schwer zu charakterisierenden geologischen Eigenschaften, der dreidimensionalen Ausdehnung sowohl homogener als auch inhomogener Geo-Strukturen und den darin ablaufenden zeitlichen Prozesse ergibt, ist die realitätsnahe Modelldarstellung unter Berücksichtigung thematischer und zeitlicher Aspekte notwendig.

Bisherige Ansätze zur Verwaltung und Analyse geologischer Modelle erfassen häufig nur zweidimensionale oder flächenhaft dreidimensionale Informationen, erlauben aber keine kontinuierliche Repräsentation von Geo-Körpern. Häufig erfolgt die Verwaltung der anfallenden Informationen nicht problemadäquat. In der vorliegenden Arbeit wird ein neuer Ansatz eines integrierten Geo-Datenmodells entwickelt, in dem die sach-, raum- und zeitbezogenen Daten bereits auf der Ebene der Datenmodellierung berücksichtigt werden.

Die Grundlage der Konzeption bildet die neuartige Modellierung und Visualisierung von Körpern mittels Volume Non Uniform Rational B-Splines. Mit dieser Methodik können erstmals echte dreidimensionale Freiformkörper definiert werden, die ausgehend von Stützpunktgittern die kontinuierliche Berechnung beliebiger Punkte des Raummodells ermöglichen. Anhand von Parametervariationen kann das lokale oder globale Verhalten problemspezifisch beeinflusst und der repräsentierte Körper durch den Anwender modifiziert werden. Untersucht werden Ansätze zur Prognose und Simulation raum- und zeitbezogener Parameterverteilungen in Geomodellen.

Ausgehend von einem objekt-relationalen Datenbankmodell zur Beschreibung thematischer Informationen erfolgt die Einbettung des räumlichen Repräsentationsmodells in einem Geo-Datenmodell als Grundlage für die Entwicklung von Geo-Informationssystemen. Herkömmliche Systeme zur computergestützten Repräsentation umfassender dreidimensionaler Modelle der Realwelt mittels datenbankgestützter Informationssysteme bilden die anfallenden Informationen oft auf Datenbankmodelle ab, deren Konzepte und (Standard-)Datentypen die komplex strukturierten Geo-Daten nicht angemessen abbilden. Geowissenschaftliche Problemstellungen erfordern ein eigenständiges Datenbankkonzept, das unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen der Modellierung von Geo-Körpern auf der Grundlage weniger Informationen und unter Berücksichtigung umfangreicher thematischer Randbedingungen die konsistente, effiziente und persistente Verwaltung eines parametrisierbaren Raummodells realisiert. Durch integrative Vereinigung der Informationsaspekte Thematik, Geometrie und Zeit in den Grundstrukturen des neu entwickelten Geo-Datenmodells wird die effektive Bearbeitung drei- bzw. vierdimensionaler Modelle sichergestellt, die bisher in Geo-Informationssystemen nicht realisiert werden konnten.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	v
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Modelle der menschlichen Realität	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Räumliche Modellierung	7
2.1 Grundlagen der räumlichen Modellierung	7
2.1.1 Grundlagen topologischer Rauminformation	9
2.1.2 Grundlagen metrischer Rauminformation	14
2.2 Räumliche Repräsentationsmodelle	17
2.3 Räumliche Darstellung	22
3 Non Uniform Rational B-Spline Volumes	25
3.1 Eigenschaften von Non Uniform Rational B-Splines	27
3.2 Definitionen	30
3.3 Visualisierung und Modellbildung	40
3.3.1 Kontrolle der Stützpunkte	41
3.3.2 Rendering von NURBS-Volumen	43
3.3.3 Visualisierung von Parameterverteilungen	45
3.3.4 Isoparameter-Kurven und -Flächen	48
3.3.5 Parameterberechnung	49
3.3.6 Schnittberechnung	50
3.3.7 Volumengenerierung	51
3.3.8 Generierung innerer Punkte	54
3.3.9 Darstellung von Standardkörpern	55
3.4 Erweiterung in die vierte Dimension	58
3.5 Modellierung eines realen Anwendungsbeispiels	60

4	Geo-Informationssysteme	65
4.1	Grundlagen von Informationssystemen	65
4.2	Anforderungen an Informationssysteme	67
4.3	Historische Entwicklung von Geo-Informationssystemen	69
4.4	Konzepte räumlicher Informationsverarbeitung	71
4.4.1	Repräsentationsstrukturen	72
4.4.2	Geo-Datenmodelle	73
5	CORE und MORE	79
5.1	Das Datenbankmodell CORE	79
5.1.1	Die Modellierungskonzepte von CORE	80
5.1.2	Die Datendefinitionssprache CORE DDL	84
5.1.3	Die grafische Notation	86
5.1.4	Die Metaebene	87
5.2	Das Schalenkonzept MORE	88
5.2.1	Binäre Relationen	88
5.2.2	Die temporale Erweiterung MOREtime	90
6	Das Geo-Datenmodell GeoCORE	95
6.1	Grundlegende Konzepte	95
6.1.1	Modellbildung in räumlichen Informationssystemen	97
6.2	Das 3-Ebenen-Modell	98
6.2.1	Die thematische Ebene	100
6.2.2	Die topologische Ebene	102
6.2.3	Die metrische Ebene	112
6.3	Die Kopplung thematischer und räumlicher Informationen	123
6.4	Einbeziehung von Zeitkonzepten	125
7	Zusammenfassung und Ausblick	129
A	Das Geo-Datenmodells GeoCORE in CORE DDL	133
B	Die temporale Erweiterung von GeoCORE in CORE DDL	139
	Literaturverzeichnis	141

Lebenslauf	151
Persönliche Daten	151
Ausbildung	151
Berufliche Laufbahn	152
Lehrtätigkeit	152
Veröffentlichungen	152
 Eidesstattliche Erklärung	 155

Abbildungsverzeichnis

2.1	Globale und lokale Koordinatensysteme	16
2.2	Darstellungsverfahren für Körper	19
3.1	NURBS-Kurve	31
3.2	Übergang von NURBS-Kurven zu NURBS-Flächen	32
3.3	NURBS-Fläche	33
3.4	Übergang von NURBS-Flächen zu NURBS-Körpern	34
3.5	Darstellungen von Volume NURBS	35
3.6	Transformation aus dem Parameterraum in den euklidischen Raum (vgl. [CS85])	36
3.7	Lokalität der NURBS-Darstellung	37
3.8	Veränderung des Grads von NURBS-Kurven	38
3.9	Auswirkung unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren	38
3.10	Vergleich von triangulierter Fläche und NURBS-Fläche	39
3.11	Konvexe Hülle einer NURBS-Kurve	40
3.12	Selbstdurchdringung eines Volumens	42
3.13	Stützpunktkontrolle durch Kontrollgitter	43
3.14	Rendering eines NURBS-Volumens mit Kugeln und Drahtgitter	45
3.15	Dreidimensionaler Farbverlauf durch farblich kodiertes Kontroll- gitter	46
3.16	Visualisierung eines CKW-Schadstoffeintrags in einen Porenwas- serkörper	47
3.17	Isoparameter-Kurven und -Flächen eines NURBS-Volumens	48
3.18	Isoparameter-Flächen eines NURBS-Volumens für variierende Pa- rameter u bzw. v	49
3.19	Iterationsverfahren zur Parameterberechnung	50
3.20	Funktional generierte Faltungen erster und zweiter Ordnung (Ein- hüllende und Überlagerung)	53

3.21 Skinned Volume: Generierung eines Körpers aus zwei begrenzenden Schichten	54
3.22 Rotationskörper mit unterschiedlicher Lage der Rotationsachse	56
3.23 Durch Sweeping entstandener Zylinder	57
3.24 Rotation von Konturkurven	57
3.25 Interpretation des vierten Laufparameters als zeitliche Komponente	59
3.26 Zeitlich simulierter Verlauf eines Schadstoffeintrags in einen Porowasserkörper	60
3.27 Druck-Mengen-Diagramm eines WD-Tests [Sie99]	61
3.28 Durchlässigkeit des Untergrundes der Talsperre Leibis/Lichte	63
5.1 Die grafische Notation von CORE	86
5.2 Das Schalenkonzept von MORE	89
6.1 Die 3-Ebenen-Architektur von GeoCORE	99
6.2 Die Klassenhierarchie von GeoCORE	100
6.3 Die topologische Ebene	103
6.4 Die topologischen Beziehungen	108
6.5 Die topologischen Relationen	110
6.6 Ursprüngliche Konzeption der metrischen Ebene	115
6.7 Die metrische Ebene	117
6.8 Parameter der metrischen Ebene	118
6.9 Die Klasse vnurbs	119
6.10 Die Klasse coordinate	120
6.11 Die erweiterte Struktur von GeoCORE um temporale Aspekte	126

Kapitel 1

Einleitung und Zielsetzung

1.1 Modelle der menschlichen Realität

Eigentlich mag es überflüssig erscheinen, im Rahmen einer Arbeit auf dem Gebiet der Informatik die Ziele und Einsatzmöglichkeiten von Rechnern im alltäglichen Leben zu diskutieren. Diese Diskussion soll hier dennoch an den Anfang gestellt werden, um auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse die vorliegende Arbeit zu begründen.

Betrachtet man Rechner als Arbeitsgeräte, sieht also von ihren Möglichkeiten etwa im Bereich der Unterhaltungselektronik ab, besteht ihre Hauptaufgabe darin, den Menschen bei seinen täglichen Arbeiten zu unterstützen, einige Teilbereiche sogar automatisch *abzuarbeiten*. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, werden Programme mit dem Ziel entwickelt, die Arbeiten und vor allem die Arbeitsabläufe des Menschen auf der Basis abstrakter Modelle im Rechner nachzubilden.

Zu Beginn des Informationszeitalters waren dies zunächst einfache Berechnungen, die dann zu komplexeren Systemen, etwa im Bereich der Buchhaltung, erweitert wurden. Dabei wurden hauptsächlich Zahlen verarbeitet. Hinzu kamen textuelle Informationen zur Beschreibung der zu verarbeitenden Daten. Es wurden Verfahren der Buchhaltung in die Systeme integriert, die auf der Basis verschiedener Eingabewerte und unter Beachtung vorgeschriebener Regeln, Verfahren und Randbedingungen eine bestimmte Form der Ausgabe *produzieren*.

Zu diesen Systemen gesellten sich Textverarbeitungen, mit deren Hilfe die anfallende Korrespondenz schneller, effizienter und nicht zuletzt anschaulicher verarbeitet werden kann. Auch hier werden vor allem textuelle Informationen verwaltet, wenngleich in den letzten Jahren vermehrt grafische Elemente in Form von Bildinformationen hinzugekommen sind.

Zur Verwaltung von Kundendaten, komplexer Produktinformationen oder ähnlich strukturierter Daten wurden Datenbanken entwickelt. Diese hatten zunächst das Ziel, die anfallenden Informationsmengen nicht nur effizient und dauerhaft zu speichern, sondern insbesondere handhabbar und verwaltbar zu machen.

Hierzu gehören neben Anfragemöglichkeiten, mit deren Hilfe gezielt nach bestimmten Daten gesucht werden kann, auch Analyseverfahren. Mit letzteren sollen Informationen gewonnen werden, die nicht direkt vom Anwender eingegeben und im System verwaltet werden.

Neben den beschriebenen Systemen, die hauptsächlich die abstraktere Realität des Menschen modellieren, wurden Verfahren zur grafischen Darstellung entwickelt. Diese dienen sowohl der Visualisierung realer Gegenstände als auch der abstrakten Veranschaulichung etwa von Analyseergebnissen in Form von Diagrammen. Auch bei diesen Einsatzmöglichkeiten des Rechners stand eine Erleichterung der menschlichen Arbeiten im Vordergrund. Wenngleich die Darstellung abstrakter Grafiken relativ einfach handhabbar ist, stellte die Modellierung eines Ausschnitts der materiellen Realwelt neue Anforderungen an die zugrundeliegenden Datenverarbeitungssysteme. Daher beschränkte man sich zunächst auf zweidimensionale Projektionen der dreidimensionalen Realwelt, womit natürlich ein Informationsverlust einhergeht.

Gesteigerte Leistungen moderner Rechner, nicht zuletzt im Bereich der Grafikverarbeitung, rücken das Ziel der realitätsnahen, wenn auch nicht realitätsgetreuen Nachbildung der räumlichen Realwelt immer näher. In den Bereichen des Schaltungsentwurfs, des Maschinenbaus, der Automobilindustrie oder der Architektur sind diese Systeme längst zum Standard geworden und unter dem Oberbegriff CAD zusammengefaßt. Sie dienen dem Entwurf und der Konstruktion von Modellen, etwa neuen Werkstücken, technischen Maschinen, Leiterbahnen oder Gebäuden, die später produziert bzw. errichtet und somit Teil der Realwelt werden. Diese Anwendungen basieren im allgemeinen auf räumlichen Objekten, die einfach spezifiziert und geometrisch exakt beschrieben werden können.

Im Gegensatz dazu steht die Modellierung natürlicher Gegebenheiten, etwa in den Geowissenschaften, der Meteorologie oder der Ozeanographie aber auch in der Medizin. Die zu modellierenden Objekte werden nicht *konstruiert*, sondern es muß vielmehr anhand gemessener Daten, aus den zu untersuchenden Strukturen und nicht zuletzt aus fachspezifischem Wissen über die speziellen Zusammenhänge versucht werden, die jeweiligen Objekte mit Hilfe entsprechender rechnergestützter Methoden nachzubilden, also zu *rekonstruieren*.

Die abzubildenden Ausschnitte der Realwelt in den Geowissenschaften zeichnen sich zudem durch inhomogene und diskontinuierliche Strukturen aus, die sich nicht nur über verschiedene Bestandteile des Modells hinweg ausbilden, sondern auch innerhalb eines einzelnen Körpers auftreten. Insbesondere zur Simulation und Prognose von struktur- oder anthropogen induzierten Parameterveränderungen innerhalb des geologischen, geomechanischen oder geohydraulischen Untergrundes sind Variationen des Körperinneren in das abstrakte Modell zu integrieren. Sekundäre Parameter, die nicht direkt dem Körper zugeordnet werden, müssen in Korrelation mit den modellierten Strukturen analysierbar sein, um anhand von Simulationen zu aussagekräftigen Prognosen über die Veränderung des Modells in Raum und Zeit zu gelangen.

An Systeme zur Modellierung derartiger natürlicher Gegebenheiten werden da-

her wesentlich höhere Ansprüche gestellt als an die technisch ausgerichteten CAD-Systeme:

- Geometrien, die nicht exakt bekannt und eingemessen sind, müssen realitätsgetreu und effizient repräsentierbar sein.
- Fehlende oder unsichere Daten sollen möglichst wenig Einfluß auf die Genauigkeit und Eindeutigkeit der weiteren Modellkomponenten haben.
- Neu gewonnene Daten müssen sich problemlos und unter Beibehaltung der Transparenz für den Benutzer in das räumliche Modell integrieren lassen.
- Inhomogenitäten innerhalb eines Objektes müssen darstellbar sein.
- Sekundäre Parameter, wie beispielsweise räumlich verteilte Charakteristika, physikalische Eigenschaften oder Meßwerte innerhalb von Objekten, müssen in die modellierten Strukturen integrierbar sein.

Neben diesen reinen Modellierungsaspekten ist, wie in anderen Anwendungsbereichen, die Akzeptanz des Systems durch den Anwender unabdingbare Voraussetzung. Daher spielen z.B. die unkomplizierte und unter Umständen systemgestützte Eingabe räumlicher Informationen, die einfache Modifizierbarkeit vorhandener Daten, die visuelle Aufbereitung der Informationen, eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit, etc. eine entscheidende Rolle.

Darüber hinaus verwalten die beschriebenen Systeme zur Verarbeitung *grafischer* Modelle nur Informationen zur Beschreibung räumlicher Elemente und Strukturen. Wie beschrieben, ist das Ziel des Einsatzes von Rechnern jedoch die möglichst verlustfreie Abbildung der Anwendungswelt und die (Unterstützung bei der) Ausführung anwendungsspezifischer Aufgaben. Daher müssen rechnergestützte Systeme für den Einsatz in den genannten Bereichen Geowissenschaft, Medizin, etc. zusätzlich sachbezogene, „thematische“ Informationen gleichberechtigt oder sogar eingebettet im räumlichen Modell repräsentieren. Damit wäre das Ziel der vollständigen Abbildung der Realwelt mit Hilfe des Rechners einen Schritt näher gerückt, und in vielen Bereichen des Lebens könnten die Vorteile des Rechners – schneller, effizienter, sicherer und damit auch ökonomischer zu arbeiten – besser ausgenutzt werden.

1.2 Zielsetzung

Die Modellierung, Visualisierung und Analyse thematischer und räumlicher Informationen ist in den Geowissenschaften von herausragender Bedeutung für die gesamtheitliche Erfassung des geologischen und geohydraulischen Untergrundes in rechnergestützten Informationssystemen, für die Simulation der geologischen Strukturen und die Prognose möglicher Einflüsse anthropogen induzierter

Prozesse. Aufgrund der Komplexität von Geo-Systemen, die durch die dreidimensionale Ausdehnung des Untergrundes, dessen schwer zu charakterisierende Eigenschaften in Verbindung mit Inhomogenitäten und die innerhalb der Geo-Strukturen ablaufenden Prozesse gekennzeichnet sind, werden Werkzeuge benötigt, die die volumenhafte Modelldarstellung der geologischen Strukturen in Kombination mit inhomogenen Parameterverteilungen auf der Grundlage vielfältiger thematischer Aspekte ermöglichen.

Bisherige Ansätze zur rechnergestützten Verwaltung und Analyse geologischer Modelle erfassen häufig nur zweidimensionale oder flächenhaft dreidimensionale Informationen, erlauben aber keine kontinuierliche Repräsentation geologischer Körper im Raum. Ferner erfolgt die Verwaltung der anfallenden Informationen, zu denen einerseits die Repräsentation der räumlichen Strukturen des Untergrundes und technischer Objekte und andererseits die zugehörigen thematischen Daten und Eigenschaften zählen, nicht problemadäquat.

Ein Ansatz zur Lösung dieser Problemstellung wird in der vorliegenden Arbeit durch die Entwicklung eines integrierten Systemkonzepts vorgestellt, indem die Informationskomponenten raumbezogener und sachbezogener Daten bereits auf der Ebene des Datenbankmodells berücksichtigt sowie speziell auf die Anforderungen der Geowissenschaften abgestimmte Konzepte und Speicherstrukturen zur Verfügung gestellt werden.

Das räumliche Modell setzt dabei auf einer neuen Methodik zur analytischen Repräsentation parametrisierbarer Volumina auf. Damit können erstmals geologische Körper sowohl durch einfache Benutzer-Interaktion als auch mit Unterstützung parametrisierter mathematischer Algorithmen modelliert, ihre intrinsischen Inhomogenitäten bezüglich unterschiedlichster Kenngrößen dreidimensional-räumlich zugeordnet und mittels problemspezifischer Visualisierungstechniken realitätsgetreu dargestellt werden. Im Kontext von Geo-Informationssystemen wird damit eine Modellierungs-, Visualisierungs- und Analysetechnik eingeführt, die die thematisch-räumliche Untersuchung hochkomplexer Modelle ermöglicht. Dabei werden effiziente Methodiken zur Unterstützung des Anwenders bei der Abbildung der Realwelt in das Informationssystem vorgestellt, die die umfassenden Möglichkeiten des räumlichen Repräsentationsmodells aufzeigen. Einbezogen werden dabei insbesondere Ansätze zur Prognose und Simulation von Parameterverteilungen in räumlichen Geomodellen, mit deren Hilfe die geowissenschaftlichen Eigenschaften sowohl einzelner Volumina als auch das Gesamtmodell raum- und zeitübergreifend untersucht werden.

Das räumliche Repräsentationsmodell wird mit einem datenbankgestützten Konzept zur Beschreibung thematischer Daten in einem Geo-Datenmodell als Grundlage für die Entwicklung von Geo-Informationssystemen zur volumenbezogenen Modellierung geologischer und geotechnischer Problemstellungen zusammengeführt. Herkömmliche Systeme zur computergestützten Repräsentation umfassender dreidimensionaler Modelle der Realwelt mittels datenbankgestützter Informationssysteme bilden die anfallenden Informationen in vielen Fällen auf Datenbankmodelle ab, deren zur Verfügung stehende Konzepte (im Relationenmodell etwa Relationen mit Tupeln in 1. Normalform) und Datentypen

(Standard-Datentypen `character`, `integer`, `enum`, ...) zur Beschreibung der komplex strukturierten Daten die geowissenschaftlichen Gegebenheiten nicht angemessen abbilden. Vielmehr erfordern geowissenschaftliche Problemstellungen ein eigenständiges Datenbankkonzept, das unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen der naturgetreuen Modellierung realer Körper auf der Grundlage weniger Informationen und unter Berücksichtigung umfangreicher thematischer Randbedingungen die konsistente, effiziente und persistente Verwaltung eines parametrisierbaren Raummodells realisiert. Durch integrative Vereinigung sachbezogener und raumbezogener Informationen in den Grundstrukturen des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Datenbankkonzeptes wird die Bearbeitung vollständig dreidimensionaler Modelle durch darauf aufsetzende Systeme sichergestellt, die bisher in Geo-Informationssystemen nicht realisiert werden konnten.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden die verwendeten Begriffe und mathematischen Grundlagen räumlichen Modellierens als Basis für die Konzeption des Geo-Datenmodells GeoCORE definiert. Insbesondere werden der topologische und metrische Raum als Grundlage der räumlichen Informationsverwaltung eingeführt sowie deren Eigenschaften untersucht. Ferner werden Modelle zur räumlichen Repräsentation und mathematischen Darstellung dreidimensionaler Modelle erläutert und bezüglich ihrer Vor- und Nachteile verglichen. Anhand der gezogenen Schlußfolgerungen wird die Notwendigkeit einer neuen räumlichen Modellierungsform evident.

In Kapitel 3 wird ein entsprechendes Repräsentationsmodell für die Modellierung und Visualisierung echter Volumina auf der Basis trivariater Freiformkörper entwickelt. Dieses als Volume Non Uniform Rational B-Splines (V-NURBS) bezeichnete Repräsentationsmodell wird, ausgehend von NURBS-Kurven und -Flächen, als Erweiterung zu volumenhaften Freiformkörpern hergeleitet, charakterisiert und mathematisch definiert. Anschließend werden Methodiken zur problemspezifischen Visualisierung und Modellierung mit Volume NURBS ausführlich erläutert.

Nach der Untersuchung des Anwendungsgebiets, also der Einsatzmöglichkeiten und vor allem der Anforderungen von Geo-Informationssystemen in Kapitel 4 folgt in Kapitel 5 eine Einführung in die Konzepte des objektrelationalen Datenbankmodells CORE (*Combined Objekt-Relational Database Model*) als Grundlage der Modellierung thematischer, sachbezogener Aspekte und dessen Erweiterungsebene MORE als modulares Schalenkonzept.

Die Konzeption der Strukturen und Beziehungen des Geo-Datenmodells GeoCORE und die Einbettung des neu entwickelten V-NURBS-Repräsentationsverfahrens folgt in Kapitel 6. Ausgehend von einer flexiblen 3-Ebenen-Architektur wird die Klassenhierarchie des Datenmodells schrittweise eingeführt und zu einem integrierten Konzept für die Verwaltung dreidimensionaler Körper als Grundlage für die Entwicklung von Geo-Informationssystemen ausgebaut. In

einem ersten Ansatz wird darüber hinaus die Einbeziehung temporaler Aspekte vorgestellt, mit deren Hilfe der Schritt von einem 3D-Modell zu einer echten 4D-Repräsentation von Raum und Zeit vollzogen werden kann.

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefaßt, weitergehende Forschungsansätze formuliert und Möglichkeiten für zukünftige Entwicklungen aufgezeigt.

Im Anhang der Arbeit ist die formale Notation des entwickelten Geo-Datenmodells anhand der Datendefinitionssprache von CORE als Ausgangspunkt für dessen Umsetzung angefügt.

Kapitel 2

Räumliche Modellierung

Räumliche Modellierung beinhaltet die Untersuchung, Strukturierung und Verwaltung realer räumlicher Gegebenheiten in Modellen zur rechnergestützten Repräsentation. Mit den Mitteln der Abstraktion und Klassifizierung räumlicher Information wird versucht in Bezug auf die betrachteten Raumdaten ein geeignetes Abbild eines Ausschnitts der Realwelt zu schaffen und effizient in einem Modell abzulegen. Dabei sind nicht nur die Ausgangsdaten von ausschlaggebender Bedeutung für die Modellierung, sondern vor allem die Anforderungen des konkreten Anwendungsbereichs sind von zentraler Bedeutung.

Da der Fokus dieser Arbeit Anwendungen im Bereich der Geowissenschaften sind, ergibt sich bei der Darstellung der Modelle und Methoden zur räumlichen Modellierung eine entsprechende Ausrichtung der Ausführungen. Dennoch sind alle vorgestellten Konzepte auch in andere Bereiche räumlicher Datenverarbeitung übertragbar.

Im folgenden werden nach der Definition grundlegender Begriffe zur räumlichen Modellierung verbreitete Modelle zur Repräsentation räumlicher Objekte erläutert, gegenübergestellt und deren Vor- und Nachteile für die Repräsentation natürlicher Körper herausgearbeitet. Schließlich werden mathematische Darstellungsformen für räumliche Körper, Flächen und Kurven vorgestellt.

2.1 Grundlagen der räumlichen Modellierung

Das Ziel bei der Konzeption räumlicher Modelle ist die Darstellung räumlicher Objekte in ihrer Form und Ausdehnung, ihrer Position im Raum und ihrer Beziehungen zueinander. Dabei wird zwischen zwei Arten räumlicher Information unterschieden:

Topologie: Informationen, die Aufschluß über die *relative* Lage von Objekten im Raum beziehungsweise über die wechselseitigen Beziehungen von räumlichen Objekten geben, werden als Topologie bezeichnet. Zu diesen zählen u.a. Nachbarschafts-, Begrenzungs-, Umschließungs-, und Schnittbeziehungen.

Topologische Beziehungen zwischen räumlichen Objekten zeichnen sich durch ihre Invarianz bezüglich der umkehrbar eindeutigen, stetigen Transformationen Rotation, Translation und Skalierung aus, d.h., eine topologische Transformation ist eine Bijektion zwischen der Ausgangsdomäne und dem Wertebereich [Wor95]. Durch topologische Transformationen erzeugte Abbilder werden als topologisch äquivalent bezeichnet.

Damit ermöglicht die topologische Modellierung von Objekten die Beschreibung der Anordnung von Objekten im Raum unabhängig von ihrer exakten Form und Position [Ege91, Wor95]. Diese Form der räumlichen Information wird in GeoCORE zur Darstellung von Expertenwissen und als Ebene zur Verwaltung von benutzerdefinierten Randbedingungen integriert (Abschnitt 6.2.2).

Metrik: Metrische Informationen beschreiben die einzelnen räumlichen Objekte in ihrer konkreten Ausdehnung und Lage im Raum. Grundlage der metrischen Repräsentation von Objekten ist die Festlegung auf einen metrischen Raum, ein hinterlegtes Koordinatensystem und ein Modell zur Beschreibung der metrischen Informationen.

Topologie und Metrik werden unter dem Begriff *Geometrie* zusammengefaßt und beinhalten die vollständige räumliche Information eines Objektes. Häufig können jedoch topologische und metrische Informationen nicht exakt getrennt werden, d.h. es existiert keine klare Abgrenzung der beiden räumlichen Informationsebenen. Ohne den folgenden Ausführungen vorzugreifen, sei hier als Beispiel die räumliche Information betrachtet, daß etwa eine Stadt „südlich“ von einer anderen Stadt liegt. Auf der einen Seite handelt es sich hier um topologische Information, da zunächst nur eine relative Lage des Objekts beschrieben und keine Auskunft über die Form oder exakte Position gegeben wird. Auf der anderen Seite erfordert das Attribut „südlich“ ein zugrundegelegtes metrisches System, in dem Norden, Osten, Süden und Westen bezeichnet sind. Andere Beziehungen erfordern über die Orientierung des zugrundegelegten Raums hinaus die Angabe des Standpunktes eines Betrachters (Der Parkplatz ist „vor“ dem Bahnhof).

Untersuchungen zu den verschiedenen topologisch-metrischen Beziehungen und Informationen finden sich in [BSK94]. Die Autoren unterscheiden zwischen Richtungsprädikaten, die eine Hauptrichtung als Grundlage der Orientierung benötigen (nördlich, südlich, links, rechts, über, unter) und Ordnungsprädikaten, die die konkrete Definition eines Standpunktes erfordern.

Daneben können weitere Beziehungen eingebettet werden, wie die Fuzzy-Notation zur Beschreibung räumlicher Ungenauigkeiten (*Das Hotel ist nicht so weit von hier*) und räumlicher Unschärfen [Win96] oder Richtungsbewegungen (hinein, durch; *Die Straße führt durch die Stadt*).

Eine Aufschlüsselung räumlicher Beziehungen und dreidimensionaler Funktionen findet sich in [FMP93] und [RK91].

Aus diesen Ausführungen wird deutlich, daß weiterführende Unterscheidungen zwischen den Informationsebenen eine Spezialisierung auf bestimmte Pro-

blemstellungen implizieren. Da mit GeoCORE der Ansatz verfolgt wird, ein möglichst allgemeingültiges räumliches Datenmodell zu entwickeln, bleiben weitere Verfeinerungen der Begriffe Topologie und Metrik sowie deren Integration in das Modell unberücksichtigt.

Bevor die unterschiedlichen Ansätze zur Darstellung topologischer und metrischer Information konkret erläutert werden, wird das zugrunde gelegte mathematische Modell definiert.

2.1.1 Grundlagen topologischer Rauminformation

Als Grundlage der topologischen Rauminformation werden in der Literatur unterschiedliche Ansätze diskutiert. Die Unterschiede liegen in der Behandlung des topologischen Raums als diskrete, gleichmäßige Unterteilung, durch Aufteilung in Grundkörper oder als Punktmenge.

Ein bekannter Vertreter für die Aufteilung des topologischen Raums in Grundkörper sind die Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 350 der Universität Bonn [Bre96, BBC94], dessen Datenstrukturen auf Grundkörpern (Simplexen) und deren Zusammenführung zu Komplexen beruhen. Grundlage ist ein algebraisch definierter topologischer Raum über einer Tetraeder-Tessellierung.

Ein interessanter Ansatz für die äquidistante Diskretisierung des topologischen Ausgangsraums findet sich in [GS93, Sch97], der ausgehend von der endlichen Darstellungsgenauigkeit von rechnerinternen Darstellungen ein vordefiniertes, diskretes Raster vorgibt, in deren Knoten paarweise disjunkte, d.h. sich nicht schneidende Linien zusammenlaufen können. Somit kann bereits auf der Modellebene die rechnerinterne Darstellungsgenauigkeit repräsentiert und damit besser verarbeitet werden. Durch die diskrete Unterteilung des Raums sind derartige Darstellungen jedoch für das hier zu entwickelnde Datenmodell ungeeignet.

Als Ausgangspunkt für GeoCORE wird ein topologischer Raum über einer Menge von Punkten (*point-set topology*, [Ale61, EF91, Ege91]) gewählt, der die grundlegenden räumlichen Eigenschaften Abgeschlossenheit, Verbundenheit und Nachbarschaft zur Verfügung stellt.

Definition 2.1 *Ein topologischer Raum $\mathcal{R} = (P, \mathcal{T})$ besteht aus einer Menge P von Punkten und einer Topologie $\mathcal{T}$ auf P , $\mathcal{T} \subseteq \mathcal{P}(P)$, wobei folgende Bedingungen erfüllt sein müssen:*

$$P \in \mathcal{T}, \emptyset \in \mathcal{T} \quad (2.1)$$

$$A \in \mathcal{T}, B \in \mathcal{T} \Rightarrow A \cap B \in \mathcal{T} \quad (2.2)$$

$$\mathcal{S} \subseteq \mathcal{T} \Rightarrow \bigcup_{A \in \mathcal{S}} A \in \mathcal{T} \quad (2.3)$$

Die Elemente von $\mathcal{T}$ heißen **offene Mengen** (A_{open}), ihre Komplemente in P **geschlossene Mengen** ($A_{\text{closed}} = \bar{A}_{\text{open}} = P - A_{\text{open}}$).

Definition 2.2 Ein topologisches Objekt O_t ist eine geschlossene Untermenge eines topologischen Raums $\mathcal{R}$:

$$O_t \subset \mathcal{R} \quad (2.4)$$

Auf diesen Begriffen aufsetzend wird die Dreiteilung eines topologischen Raums definiert, die durch jedes topologische Objekt $O_t \subseteq P$ impliziert wird (vgl. etwa [Ege91]).

Definition 2.3 Die topologische Menge der inneren Punkte von O_t ist die Vereinigung aller offenen Untermengen A_{open} von O_t :

$$\text{interior}(O_t) = \bigcup_{A_{\text{open}} \subseteq O_t} A \quad (2.5)$$

Die topologische Menge der äußeren Punkte von O_t ist die Vereinigung aller offenen Untermengen A_{open} , die nicht in O_t enthalten sind:

$$\text{complement}(O_t) = \bigcup_{A_{\text{open}} \not\subseteq O_t} A = P - O_t \quad (2.6)$$

Die topologische Hülle von O_t ist der Schnitt aller geschlossenen Untermengen A_{closed} von O_t :

$$\text{closure}(O_t) = \bigcap_{A_{\text{closed}} \subseteq O_t} A \quad (2.7)$$

Die topologische Menge der Randpunkte von O_t ist der Schnitt der Hülle von O_t und der Hülle des Komplements von O_t :

$$\begin{aligned} \text{boundary}(O_t) &= \text{closure}(O_t) \cap \text{closure}(\text{complement}(O_t)) \\ &= \text{closure}(O_t) \cap \text{closure}(P - O_t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Zusätzlich zu dieser Dreiteilung des Raums kann man topologische Objekte danach charakterisieren, ob sie *zusammenhängend* sind, also nicht aus zwei disjunkten Teilmengen bestehen:

Definition 2.4 Eine Separierung von O_t besteht aus zwei Teilmengen $A, B \subseteq P$ mit den folgenden Eigenschaften:

$$A \neq \emptyset, B \neq \emptyset \quad (2.9)$$

$$A \cup B = O_t \quad (2.10)$$

$$\text{closure}(A) \cap B = \emptyset \quad (2.11)$$

Existiert für O_t keine derartige Separierung, so heißt O_t **zusammenhängend** ($\text{connected}(O_t)$).

Aus dieser Definition läßt sich ableiten, wann ein topologisches Objekt, dessen Inneres nicht leer ist, *Löcher* hat:

Definition 2.5 Ein topologisches Objekt O_t mit $\text{interior}(O_t) \neq \emptyset$ hat **Löcher**, falls die Begrenzung $\text{boundary}(O_t)$ separierbar ist.

Aufsetzend auf diesen Begriffen können topologische Beziehungen zwischen zwei topologischen Objekten definiert werden, die die Grundlage für die spätere Konzeption der topologischen Beziehungen bzw. des topologischen Datenmodells von GeoCORE (vgl. Abschnitt 6.2.2) bilden.

Insbesondere Egenhofer et. al. setzten sich intensiv mit binären topologischen Beziehungen auseinander. In [Ege89, EH90] wird von einem *4-intersection-Modell* ausgegangen, das in tabellarischer Form alle topologischen Beziehungen zwischen zwei topologischen Objekten A und B anhand der Schnitte zwischen ihrem Inneren (A°, B°) und ihren Rändern ($\partial A, \partial B$) und der Kriterien, ob das Ergebnis eine leere ($\emptyset$) oder eine nicht-leere Schnittmenge ($\neg\emptyset$) liefert, auflistet. Die sich daraus ergebenden 16 Möglichkeiten geben dann Aufschluß über die topologischen Beziehungen der beiden Objekte.

In [Ege91] verfeinert Egenhofer das 4-intersection-Modell zu einem *9-intersection-Modell* $\mathcal{M}$, indem die topologischen Beziehungen zweier topologischer Objekte A und B zusätzlich bezüglich der Schnittbeziehungen zwischen ihren Komplementen (A^-, B^-) untersucht und in der folgenden Matrix-Schreibweise notiert werden:

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^\circ & \partial A \cap B^- \\ A^\circ \cap \partial B & A^\circ \cap B^\circ & A^\circ \cap B^- \\ A^- \cap \partial B & A^- \cap B^\circ & A^- \cap B^- \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Mit dem 9-intersection-Modell nutzt Egenhofer die Dreiteilung eines topologischen Raums durch ein topologisches Objekt zur Untersuchung möglicher Beziehungen zu anderen topologischen Objekten.

Eine topologische Beziehung, hier beispielhaft die Nachbarschaft, erfolgt durch Auswertung der Matrixeinträge:

$$\begin{pmatrix} \neg\emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \end{pmatrix}$$

Insgesamt lassen sich damit 9^2 mögliche topologische Beziehungen zwischen zwei Objekten darstellen. Egenhofer merkt jedoch an, daß bei nichtleeren, zusammenhängenden Objekten ohne Löcher aus dem $\mathbb{R}^n$, lediglich acht dieser Möglichkeiten realisiert werden können. Betrachtet man zusätzlich inverse Beziehungen (A umschließt B , B wird von A umschlossen) als einen topologischen Sachverhalt, verbleiben sechs zu unterscheidende topologische Beziehungen.

Die Definitionen wurden hier, im Gegensatz zu Egenhofers Notation und der daraus resultierenden Exklusivität der einzelnen topologischen Beziehungen, bewußt allgemeiner formuliert, da in der vorliegenden Arbeit weniger die Untersuchung *möglicher* und *unterscheidbarer* topologischer Beziehungen interessiert,

als vielmehr die Anwendbarkeit derartiger Beziehungen. Aus dem dreidimensionalen Ansatz ergeben sich weitere Beziehungen und Differenzierungen, wobei zunächst angenommen werden soll, daß sich Objekte prinzipiell (also etwa volumenhafte Körper) durchdringen können, d.h., bei den folgenden Betrachtungen sind topologische Objekte mit nichtleeren Schnittmengen ihres Inneren erlaubt. Bei der Einführung des Geo-Datenmodells werden diesbezüglich Einschränkungen getroffen, um in Anlehnung an reale Körper im physikalischen Sinne die Existenz zweier Körper an einem Ort zum Teil auszuschließen (Abschnitt 6.2.2).

Definition 2.6 Zwei Objekte O_{t_1} und O_{t_2} heißen **gleich**, wenn ihr Schnitt gleich O_{t_1} und gleich O_{t_2} ist:

$$\mathbf{equal}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Leftrightarrow \text{closure}(O_{t_1}) \cap \text{closure}(O_{t_2}) = O_{t_1} = O_{t_2} \quad (2.13)$$

Zwei Objekte O_{t_1} und O_{t_2} heißen **disjunkt**, wenn ihr Schnitt leer ist:

$$\mathbf{disjoint}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Leftrightarrow \text{closure}(O_{t_1}) \cap \text{closure}(O_{t_2}) = \emptyset \quad (2.14)$$

Zwei Objekte O_{t_1} und O_{t_2} heißen **benachbart**, wenn der Schnitt ihres Inneren leer und der Schnitt ihrer Randpunkte nicht leer ist:

$$\mathbf{neighbouring}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Leftrightarrow \begin{aligned} &\text{boundary}(O_{t_1}) \cap \text{boundary}(O_{t_2}) \neq \emptyset \\ &\wedge \text{interior}(O_{t_1}) \cap \text{interior}(O_{t_2}) = \emptyset \end{aligned} \quad (2.15)$$

Ein Objekt O_{t_1} **begrenzt** ein Objekt O_{t_2} , falls O_{t_1} eine Untermenge des Randes von O_{t_2} ist:

$$\mathbf{bounding}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Leftrightarrow O_{t_1} \subseteq \text{boundary}(O_{t_2}) \quad (2.16)$$

Zwei Objekte O_{t_1} und O_{t_2} heißen **überlappend**, wenn ihr Schnitt nicht leer ist:

$$\mathbf{overlap}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Leftrightarrow O_{t_1} \cap O_{t_2} \neq \emptyset \quad (2.17)$$

Ein Objekt O_{t_1} **beinhaltet** ein Objekt O_{t_2} , falls O_{t_2} eine Untermenge von O_{t_1} ist:

$$\mathbf{contain}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Leftrightarrow O_{t_2} \subseteq O_{t_1} \quad (2.18)$$

Die Definition der Begrenzung drückt aus, daß ein Objekt höherer Dimensionalität jeweils durch ein oder mehrere Objekte niedrigerer Dimensionalität begrenzt wird. Diese Beziehung ist insbesondere für die spätere Referenzierung topologischer Objekte in topologischen Beziehungen von Bedeutung, um Schnitte und Berührungen darzustellen.

Aus den Definitionen resultieren die folgenden ableitbaren topologischen Beziehungen, wobei wie erwähnt zu beachten ist, daß diese lediglich aufgrund der weniger stringenten Definitionen gelten.

Aus der Gleichheit zweier topologischer Objekte folgt, daß sich die beiden topologischen Objekte gegenseitig beinhalten und überlappen:

$$\mathbf{equal}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Rightarrow \mathbf{contain}(O_{t_1}, O_{t_2}) \wedge \mathbf{contain}(O_{t_2}, O_{t_1}) \quad (2.19)$$

$$\mathbf{equal}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Rightarrow \mathbf{overlap}(O_{t_1}, O_{t_2}) \quad (2.20)$$

Begrenzt ein topologisches Objekt ein anderes, so gilt auch die Nachbarschaftsbeziehung, und das begrenzende Objekt wird von dem begrenzten beinhaltet:

$$\text{bounding}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Rightarrow \text{neighbouring}(O_{t_1}, O_{t_2}) \quad (2.21)$$

$$\text{bounding}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Rightarrow \text{contain}(O_{t_2}, O_{t_1}) \quad (2.22)$$

Beinhaltet ein topologisches Objekt ein anderes, so überlappen sich die beiden Objekte auch:

$$\text{contain}(O_{t_1}, O_{t_2}) \Rightarrow \text{overlap}(O_{t_1}, O_{t_2}) \quad (2.23)$$

Neben diesen ableitbaren topologischen Gesetzmäßigkeiten ergeben sich die in Tabelle 2.1 dargestellten algebraischen Eigenschaften der definierten topologischen Beziehungen.

topologische Beziehung τ	Transitivität $O_{t_1} \tau O_{t_2}, O_{t_2} \tau O_{t_3}$ $\Rightarrow O_{t_1} \tau O_{t_3}$	Reflexivität $O_{t_1} \tau O_{t_1}$	Symmetrie $O_{t_1} \tau O_{t_2} \Rightarrow O_{t_2} \tau O_{t_1}$
Gleichheit	•	•	•
Ungleichheit			•
Nachbarschaft			•
Begrenzung	•		
Beinhaltung	•	•	
Überlappung		•	•

Tabelle 2.1: Algebraische Eigenschaften topologischer Beziehungen

Ergänzend zu den grundlegenden topologischen Beziehungen, die sich direkt aus den Eigenschaften topologischer Räume ergeben, werden als Grundlage für die spätere Datenstruktur von GeoCORE drei weitere topologische Bezeichnungen eingeführt, die sich aufgrund der Nachbarschaft und der Überdeckung zweier topologischer Objekte ergeben. Diese erlauben später bei der Konzeption der räumlichen Datenstrukturen deren Referenzierung innerhalb der topologischen Relationen von GeoCORE.

Definition 2.7 *Zwei benachbarte topologische Objekte O_{t_1} und O_{t_2} **berühren** sich in O_{t_3} , falls der Schnitt von O_{t_1} und O_{t_2} eine Untermenge von O_{t_3} ist:*

$$\mathbf{meet}(O_{t_1}, O_{t_2}, O_{t_3}) \Leftrightarrow \begin{aligned} &\text{neighbouring}(O_{t_1}, O_{t_2}) \\ &\wedge O_{t_1} \cap O_{t_2} \subseteq O_{t_3} \end{aligned} \quad (2.24)$$

*Zwei benachbarte topologische Objekte O_{t_1} und O_{t_2} **schneiden** sich in O_{t_3} , falls O_{t_3} gleich dem Schnitt von O_{t_1} und O_{t_2} ist:*

$$\mathbf{intersect}(O_{t_1}, O_{t_2}, O_{t_3}) \Leftrightarrow \begin{aligned} &\text{neighbouring}(O_{t_1}, O_{t_2}) \\ &\wedge O_{t_1} \cap O_{t_2} = O_{t_3} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Zwei überlappende topologische Objekte O_{t_1} und O_{t_2} **überdecken** sich in O_{t_3} , falls O_{t_3} gleich dem Schnitt von O_{t_1} und O_{t_2} ist:

$$\begin{aligned} \text{overlay}(O_{t_1}, O_{t_2}, O_{t_3}) \Leftrightarrow & \text{overlap}(O_{t_1}, O_{t_2}) \\ & \wedge O_{t_1} \cap O_{t_2} = O_{t_3} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Die ersten beiden Beziehungen erlauben sowohl die unscharfe, d.h. nicht exakt bestimmte Angabe der Berührungsstellen, als auch die direkte Darstellung der Schnittmenge zweier topologischer Objekte. Bei der Überlappung wird nur eine Beziehung zur Repräsentation der Überdeckungsmenge der topologischen Objekte eingeführt, da die unscharfe Angabe eines Überdeckungsbereiches keine topologisch interessante Information beinhaltet.

2.1.2 Grundlagen metrischer Rauminformation

In diesem Abschnitt wird die Grundlage für die Darstellung metrischer Rauminformationen geschaffen. Dazu wird, ausgehend von dem Begriff des topologischen Raums, zunächst der metrische Raum definiert:

Definition 2.8 Ein **metrischer Raum** $\mathcal{M} = (\mathcal{R}, d)$ ist ein topologischer Raum $\mathcal{R}$ mit einer Abstandsfunktion $d : \mathcal{M} \times \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^+$.

Definition 2.9 Eine Funktion $d, d : \mathcal{M} \times \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}^+$ heißt **Abstandsfunktion** auf $\mathcal{M}$, falls für alle $p, q, r \in \mathcal{M}$ gilt:

$$d(p, q) \geq 0 \quad (2.27)$$

$$d(p, q) = 0 \Leftrightarrow p = q \quad (2.28)$$

$$d(p, q) = d(q, p) \quad (2.29)$$

$$d(p, q) \leq d(p, r) + d(r, q) \quad (2.30)$$

Zur Vereinfachung der Schreibweise wird der Abstandsbegriff über den Abstand zwischen Punkten hinaus auch auf Punktmengen $X, Y \subseteq \mathcal{M}$, also höherdimensionale Objekte wie Bögen, Flächen und Körper, erweitert [FMP93]:

$$d(p, Y) = \min_{q \in Y} d(p, q) \quad (2.31)$$

$$d(X, Y) = \min_{p \in X} d(p, Y) \quad (2.32)$$

Metrische Räume erlauben es, die Distanz, Richtung oder Positionen von Punktmengen beziehungsweise Objekten im Raum zu bestimmen.¹ Aus der Definition ist ersichtlich, daß metrische Räume eine Untermenge topologischer Räume sind. Eine weitere Spezifizierung ist die Festlegung auf den Euklidischen Raum, der in GeoCORE als zugrundeliegender Raum gewählt wird.

¹Die Beziehungen zwischen den verschiedenen Räumen werden in [Bui89] anschaulich dargestellt und in [Sch97] weitergehend erläutert.

Definition 2.10 *Der dreidimensionale Euklidische Raum E^3 über $\mathbb{R}$ ist ein metrischer Raum mit der Abstandsfunktion*

$$d_e(p, q) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (2.33)$$

mit $p = (x_1, y_1, z_1)$, $q = (x_2, y_2, z_2)$, $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2 \in \mathbb{R}$.

Falls keine weitere Angabe erfolgt, wird im folgenden der dreidimensionale Euklidische Raum E^3 mit Punkten $p(x, y, z)$ als zugrundegelegtes Koordinatensystem angenommen, wobei zu beachten ist, daß eine Implementierung aufgrund der Endlichkeit der rechnerinternen Zahlendarstellung immer nur einen Unterraum $E_I^3 \subset E^3$ abbilden kann. Der wesentliche Unterschied liegt vor allem darin, daß E^3 *dicht* ist, d.h. zu je zwei Punkten mit beliebig kleinem Abstand existiert ein weiterer Punkt, der zwischen diesen beiden Punkten liegt. Diese Eigenschaft wird von rechnerinternen Darstellungen selbstverständlich nicht erfüllt, sie ist in realen Anwendungen jedoch auch nicht erforderlich, da die kleinste zugrundegelegte Einheit entsprechend der problemspezifischen Anforderungen gewählt wird. In Bezug auf Geo-Informationssysteme genügt beispielsweise die Beschränkung auf 1/10 Millimeter, da die Genauigkeit der Meßwert- und Raumangaben üblicherweise im Zentimeterbereich liegt. Benötigt eine spezielle Anwendung eine höhere Genauigkeit, ist die Wahl der kleinsten Einheit entsprechend anzupassen.

Der zugrunde gelegte metrische Raum, also hier der Euklidische Raum, bildet lediglich die Grundlage der internen Datenverwaltung. Auf der Benutzerebene kann insbesondere bei der Verwendung in einem Geo-Informationssystem ein beliebiges Koordinatensystem (Zylinder-, Kugel-, Kegelkoordinatensystem, etc.) bzw. Referenzsystem (Gauß-Krüger, etc.) Verwendung bei der räumlichen Datenverwaltung finden. Es ist dann die Aufgabe der anwendungsspezifischen Datenmodellierung bzw. der Anwendungsprogrammierung, geeignete Transformationsmethoden zur Umrechnung zwischen dem Euklidischen Raum und dem übergeordneten Koordinatensystem bereitzustellen.

Ferner können in ein globales Koordinatensystem weitere lokale eingehängt werden. Lokale Koordinatensysteme werden zum Beispiel bei Bauprojekten in unterschiedlichen Formen verwendet. Im Tunnelbau wird häufig ein Tunnelkoordinatensystem genutzt, das Punkte auf der Oberfläche der Tunnellaibung ausgehend von der Tunnelachse durch Angabe der Entfernung vom Tunnelportal und den Rotationswinkel bzgl. der Lotrechten angibt. Vielfach entsprechen lokale Koordinatensysteme dem unterliegenden globalen System und unterscheiden sich lediglich durch eine andere Lage im Raum.

Die Referenzierung lokaler Koordinatensysteme erfolgt ausgehend von dem globalen Koordinatensystem durch Definition eines Aufpunktes und einer Rotationsmatrix, die die Lage des lokalen Systems bezüglich des globalen angibt. Abbildung 2.1 verdeutlicht die Verwendung lokaler Koordinatensysteme. In das globale Koordinatensystem wurde ein ebenfalls rechtwinkliges, blau dargestelltes Koordinatensystem eingehängt. Das blaue Objekt wird nun über die Koordinaten des lokalen Koordinatensystems referenziert. Die Umrechnung vom

globalen in das lokale Koordinatensystem erfolgt durch Anwendung der rot gekennzeichneten Rotation und Translation.

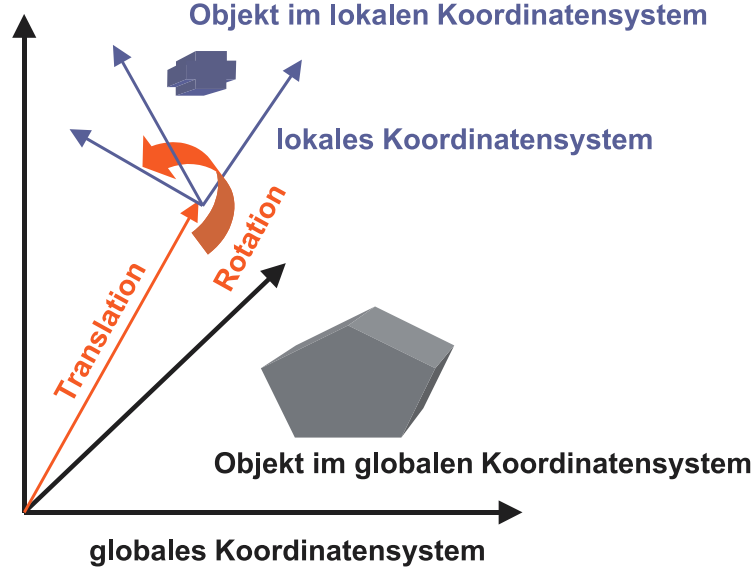


Abbildung 2.1: Globale und lokale Koordinatensysteme

Aufsetzend auf dem metrischen Abstandsbegriff werden die grundlegenden Eigenschaften metrischer Räume analog zu denen der topologischen Räume (Definition 2.3) definiert, wonach jede Teilmenge O_m des E^3 , d.h. jedes metrische Objekt, eine Dreiteilung des Raums in die metrische Menge der inneren Punkte, der Randpunkte und der äußeren Punkte impliziert:

Definition 2.11 Die **metrische Menge der inneren Punkte** von O_m ist die Menge aller Punkte $p \in O_m$, deren Nachbarpunkte in einem beliebig kleinen Abstand ebenfalls zu O_m gehören:

$$\text{interior}(O_m) = \{p \in O_m \mid \exists \epsilon > 0 : d(p, q) < \epsilon \Rightarrow q \in O_m\} \quad (2.34)$$

Die **metrische Menge der Randpunkte** von O_m besteht aus allen Punkten $p \in O_m$, zu denen es in beliebig kleinem Abstand mindestens einen Punkt gibt, der nicht zu O_m gehört:

$$\text{boundary}(O_m) = \{p \in O_m \mid \forall \epsilon > 0 \exists q : d(p, q) < \epsilon \wedge q \notin O_m\} \quad (2.35)$$

Die **metrische Hülle** von O_m ist die Vereinigung des Inneren und der Randpunkte von O_m :

$$\text{closure}(O_m) = \text{interior}(O_m) \cup \text{boundary}(O_m) \quad (2.36)$$

Die **metrische Menge der äußeren Punkte** von O_m ist das Komplement von O_m in dem zugrunde gelegten metrischen Raum und besteht aus allen Punkten

p , die nicht zu O_m gehören:

$$\text{complement}(O_m) = \bigcup_{p \notin O_m} p \quad (2.37)$$

Definition 2.12 Eine metrische Menge M heißt **abgeschlossen**, wenn die Hülle von M zu M gehört:

$$\text{closure}(M) \subseteq M \quad (2.38)$$

Andernfalls ist der Schnitt des Randes von M mit M leer. M heißt dann **offene metrische Menge**:

$$\text{boundary}(M) \cap M = \emptyset \quad (2.39)$$

Definition 2.13 Ein **metrisches Objekt** O_m ist eine abgeschlossene Unter-
menge des dreidimensionalen Euklidischen Raums:

$$O_m \subset E^3 \quad (2.40)$$

Ist im folgenden keine Unterscheidung zwischen topologischen und metrischen Eigenschaften bzw. Objekten notwendig, wird von *räumlichen* Eigenschaften bzw. *räumlichen* Objekten (O_r) gesprochen. Handelt es sich bei den räumlichen Objekten um Repräsentationen von Objekten der Realwelt in einem Datenmodell bzw. einer Datenbank, werden diese als **GeoObjekte** bezeichnet.

Definition 2.14 Ein metrisches Objekt O_m heißt **zusammenhängend**, wenn es zu je zwei Punkten $p, q \in O_m$ eine Folge von Punkten mit beliebig kleinem Abstand zueinander gibt, die ebenfalls zu O_m gehören:

$$\forall p = p_1, q = p_n \in O_m \exists \epsilon > 0, p_1, \dots, p_n \in O_m : d(p_i, p_{i+1}) < \epsilon \quad (2.41)$$

$$\forall i = 1, \dots, n-1$$

Definition 2.15 Ein Punkt $p_{\text{isolated}} \in O_m$ eines Objekts O_m heißt **isolierter Punkt**, wenn kein anderer Punkt von O_m in beliebig kleinem Abstand von p_{isolated} liegt:

$$\exists \epsilon > 0 : d(p_{\text{isolated}}, q) < \epsilon \Rightarrow q \notin O_m \quad (2.42)$$

2.2 Räumliche Repräsentationsmodelle

Im folgenden werden verschiedene Konzepte zur rechnergestützten Repräsentation dreidimensionaler Körper diskutiert, da diese entscheidend für die Qualität der Modellierbarkeit, der Analysefähigkeiten und der Visualisierung des räumlichen Modells der Anwendungsdomäne sind. Aus den Betrachtungen wird die Notwendigkeit zur Einführung einer neuen Methodik zur Abbildung räumlicher Volumina deutlich. Insbesondere vor dem Hintergrund geowissenschaftlicher Anwendungen werden die Nachteile der gängigen Modelle untersucht.

Topologische Informationen sind für datenbankspezifische Aspekte, zu denen die Verwaltung von (räumlichem) Expertenwissen und räumlichen Anfragen zählen, von Bedeutung und werden daher in Abschnitt 6.2.2 bei der Konzeption des Geo-Datenmodells wieder aufgegriffen.

Zur metrischen Beschreibung (dreidimensional-)räumlicher Körper werden in der Literatur eine Vielzahl von Repräsentationsformen diskutiert. An dieser Stelle werden die wichtigsten Modelle in ihren grundlegenden Ausprägungen erläutert, zu denen [Hof89] eine gute Übersicht gibt. Darüber hinaus existieren vielfältige Variationen und Kombinationen der Basismodelle. Insbesondere professionelle, kommerzielle CAD-Systeme vereinen meist verschiedene Darstellungsformen, um den Benutzer in möglichst vielen Anwendungsbereichen zu unterstützen.

In der Betrachtung werden Drahtgitter-Modelle (*Wireframe*²) und ähnliche Repräsentationsmodelle bewußt ausgelassen. Diese erlauben zwar prinzipiell die Darstellung volumenhafter Objekte, beinhalten jedoch keine direkten Flächen- oder Volumeninformationen, da diese für die entsprechenden Anwendungen nicht von Bedeutung sind. Aus diesem Manko ergeben sich mehrdeutige Interpretationsmöglichkeiten, so daß weder eine echte räumliche Darstellung der Objekte noch Volumenberechnungen möglich sind [TC91]. Auch Vektorsysteme zur Modellierung von Netzwerken werden hier nicht näher betrachtet, da lediglich Vektoren als eindimensionale Elemente im dreidimensionalen Raum verwaltet werden und somit ihre dreidimensionale Ausprägung nur sekundäre Bedeutung hat.

Auch Grammatiken zur räumlichen Modellierung und fraktale Techniken [AM91, IG93, ESK97] finden keine Berücksichtigung. Mit Hilfe derartiger Verfahren lassen sich zwar auf der Grundlage von Algorithmen sehr anschaulich Landschaften nach dem Prinzip der Selbstähnlichkeit erzeugen, die gesteuerte und zielgerichtete Modellierung eines Ausschnitts der Realwelt ist jedoch mit den derzeit existierenden Verfahren äußerst schwierig.

Grundsätzlich werden drei Arten der Darstellung von Körpern im Raum unterschieden (vgl. Abbildung 2.2):

Räumliche Zerlegung (S-Part, Space Partitioning): Die einfachste Möglichkeit der körperhaften Repräsentation beruht auf der diskreten Zerlegung eines Objektes in einfache, benachbarte Körper. Diese Grundkörper können dabei entweder die gleiche Größe und Form haben, wie z.B. die Voxel (dreidimensionale Pixel) in Abbildung 2.2, in ihrer Größe variieren (Simplexdarstellung durch Tetraeder) oder in Form und Größe variieren.

Die Vorteile der räumlichen Zerteilung sind die einfachen Darstellungsmöglichkeiten, etwa auf der Basis von Enumerationsverfahren oder Baumstrukturen (Octree). Daher wird dieses Verfahren vor allem in Systemen eingesetzt, bei denen primär die einfache volumetrische Beschreibung eines räumlichen Modells im Vordergrund steht. Darüber hinaus wird die

²nicht zu verwechseln mit der Wireframe-Darstellung als Visualisierungsform

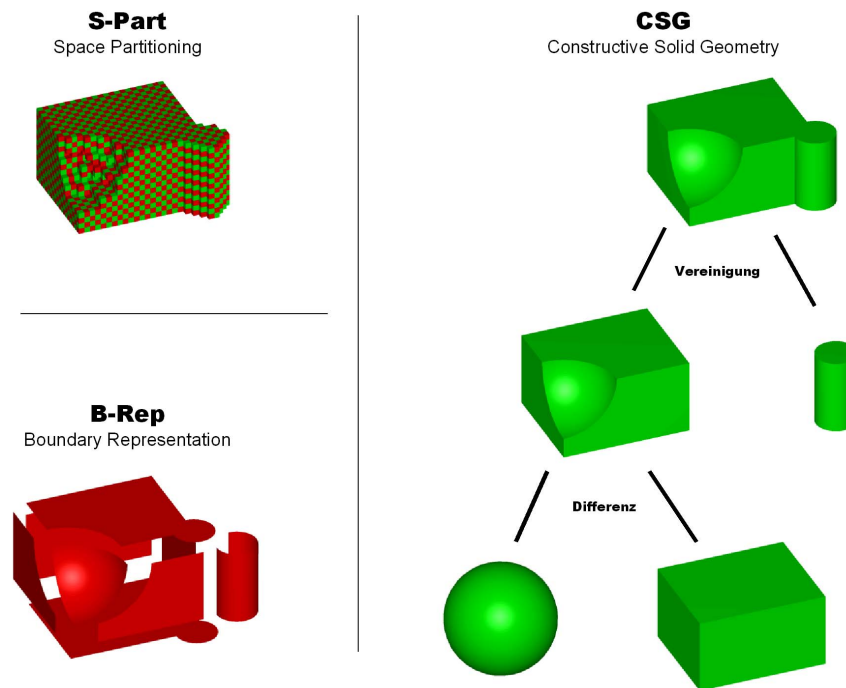


Abbildung 2.2: Darstellungsverfahren für Körper

räumliche Zerlegung häufig für Modelle zur Simulationsrechnung (FE-/FD-Verfahren) verwendet, da sich Ausbreitungs- und Distanzanalysen durch die Aufteilung des Ausgangskörpers in diskrete Homogenbereiche und die Berechnung der Übergangsparameter einfach realisieren lassen [Sta95].

Nachteilig ist diese diskrete Unterteilung der Objekte, da einerseits eine grobe Rasterung zu großen Ungenauigkeiten innerhalb des Modells bzw. der Darstellung führen kann und andererseits jede Verfeinerung des Rasters mit einer exponentiellen Zunahme des zu verwaltenden Datenvolumens verbunden ist. Ferner ist die Zuordnung von Sachinformationen zu einzelnen Objekten, um zum Beispiel räumliche Parameter oder thematische Beschreibungen in das räumliche Modell zu integrieren, nicht zufriedenstellend modellierbar, da prinzipiell jedem einzelnen Grundkörper des Gesamtobjekts die vollständige Information zugeordnet werden muß. Auch hier können Enumerationsverfahren den Aufwand verringern, jedoch nicht vermeiden.

Des weiteren ist die diskrete Unterteilung des Raums speicherintensiv, da etwa bei einem Volumen mit einer Rasterung von $512 \times 512 \times 512$ über 134 Millionen Voxel gespeichert werden müssen. Derartige Datenmengen stellen hohe Anforderungen an die Datenverarbeitung und führen zu langen Rechenzeiten bei Operationen auf Volumen. [Kau94]

Constructive Solid Geometry (CSG): Die zweite Möglichkeit zur Model-

lierung dreidimensionaler Objekte besteht in der Konstruktion mit Raumprimitiven. Dabei werden einfache Grundkörper (Quader, Kugel, Zylinder, etc.) durch boolesche Mengenoperationen (Vereinigung, Durchschnitt, Differenz) zu einem resultierenden Gesamtkörper verknüpft. Die einzelnen Konstruktionsschritte werden in binären hierarchischen Baumstrukturen verwaltet. Ausgehend von den Blättern, in denen nur Grundkörper zugelassen sind, werden jeweils zwei Knoten durch eine boolesche Operation zu einem Zwischenobjekt verknüpft. In der Wurzel des Baums wird schließlich das Ergebnisobjekt repräsentiert. Durch die hierarchische Struktur kann der Ablauf der Modellierung jederzeit nachvollzogen und verändert werden.

Die Vorteile der CSG-Modellierung sind der geringe Verwaltungsaufwand, da lediglich einige wenige Primitiven und die entsprechenden Verknüpfungen innerhalb der Hierarchie gespeichert werden, sowie die Nachvollziehbarkeit der Konstruktion. Letztere ermöglicht eine einfache Modifikation von Objekten, da dies lediglich eine Modifikation der Parameter der Basiskörper oder eine andere Auswahl bzw. Reihenfolge der Mengenoperationen erfordert. Unter Umständen ist dabei jedoch eine vollständige Reorganisation der Baumstruktur notwendig.

Aus der Ableitung des Objekts durch den CSG-Baum ergeben sich jedoch auch Nachteile. Zum einen erfordert jede Visualisierung des Modells eine Berechnung des darzustellenden Objekts aus allen Grundkörpern und allen darauf angewandten Operationen aus der entsprechenden CSG-Darstellung, so daß daraus insbesondere bei komplexen Modellen ein erheblicher Zeitaufwand resultiert. Zum anderen ist die Darstellung eines Objektes durch einen CSG-Baum nicht eindeutig, d.h. ein und dasselbe Objekt kann durch verschiedenartige CSG-Bäume mit unterschiedlichen Basiskörpern und identischem Resultat modelliert werden. Dies erschwert die Zuordnung von Parametern, ermöglicht aber andererseits eine unter Umständen systemgesteuerte Optimierung des konstruierten Modells.

Ein weiterer Nachteil der Konstruktion mit Raumprimitiven ergibt sich aus der Festlegung auf Basiskörper, da somit eine realitätsnahe Repräsentation *natürlicher* Objekte nicht realisiert werden kann. Es existieren zwar Ansätze, um auch parametrisierte Basiskörper zu verwenden, wobei jedoch ein Teil der oben erwähnten Vorteile verlorengeht [KNM95].

Randdarstellung (B-Rep, Boundary Representation): Als weitere Methodik zur Modellierung dreidimensionaler Objekte kann die Boundary Representation bzw. Randdarstellung genannt werden. Bei diesem Verfahren werden volumenhafte Objekte durch ihre begrenzenden Flächen beschrieben, die Flächen wiederum durch die begrenzenden Seitenbögen und diese wiederum durch ihre Stützpunkte. Somit ergibt sich eine einfache und im Prinzip beliebig mächtige Darstellung volumenhafter Objekte. Zur Beschreibung der Flächen bzw. Bögen können verschiedenartige Darstellungsformen verwendet werden, so daß die Randdarstellung immer in Kombination mit anderen Verfahren eingesetzt wird.

Bei dieser Art der Darstellung werden im Prinzip nur *hohle* Körper modelliert, deren Inneres durch komplizierte Verfahren hinzugerechnet werden muß. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, das Modell nach jeder Änderung auf mögliche Inkonsistenzen zu überprüfen, wie zum Beispiel die Abgeschlossenheit von Körpern. Auch Volumen- und Flächenberechnungen sind nicht analytisch durchführbar.

Die Vor- und Nachteile der Verfahren bezüglich der Repräsentation dreidimensionaler Volumina sind in Tabelle 2.2 in Anlehnung an [Kau94] zusammenfassend gegenübergestellt.

	S-Part	CSG	B-Rep
Interpolation verteilter Datenpunkte	+	—	—
Schnittoperationen	+	+	—
Darstellung des Körperinneren	+	+	—
Repräsentation komplexer Objekte	+	o	—
Speicherbedarf / Rechenzeit	—	o	+
Glättung der Visualisierung	—	o	+
Zuordnung von Objekteigenschaften	—	o	+
Transformationseigenschaften	—	—	+

Tabelle 2.2: Vergleich der räumlichen Repräsentationsmodelle

Es bleibt festzuhalten, daß jedes der beschriebenen Verfahren nur einen Teil der Anforderungen erfüllen kann. Wie in den folgenden Ausführungen gezeigt wird, erfüllt das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren der Körperdarstellung alle beschriebenen Anforderungen.

Betrachtet man die Verfahren ferner unter dem Gesichtspunkt des Einsatzes in Geo-Informationssystemen, stellen die Ansätze keine zufriedenstellenden Lösungen zur Modellierung natürlicher Körper in Geosystemen dar. Wie diskutiert, weisen natürliche Körper eine komplexe Struktur auf, deren exakte Geometrie nicht bekannt ist und nur ungenau beschrieben werden kann. Ferner ist zu beachten, daß die anfallenden Daten im voraus nicht exakt charakterisiert und in ihren Eigenschaften bestimmt werden können. Die zu verwaltenden Informationen zeichnen sich dadurch aus, daß das Datenvolumen und die Anzahl der zu speichernden Objekte enorm groß und die Objekte selbst sehr variabel in Bezug auf Struktur, Form, Ausdehnung und Verteilung im Raum sowie ihren Speicherplatzbedarf sind [BHKS93].

Die beschriebenen Verfahren sind daher nur bedingt zur Repräsentation derartiger räumlicher Informationen geeignet. Wünschenswert wäre ein Ansatz, der mathematische Funktionen zur Beschreibung der Körper oder Approximations-, Interpolations- und Extrapolationsverfahren zur Verknüpfung von Meßwerten, digitalisierten Punktinformationen und anderen Rauminformationen ermöglicht.

In Kapitel 3 wird daher eine neue Methodik zur dreidimensional-volumetrischen Modellierung von Freiformkörpern eingeführt, die die speziellen Anforderungen der Geowissenschaften an die Modellierbarkeit, Visualisierbarkeit und Analysierbarkeit durch ein mathematisch definiertes Repräsentationsmodell in allen wesentlichen Punkten erfüllt. Zuvor ist jedoch die Einführung mathematischer Konzepte zur funktionalen Beschreibung räumlicher Darstellungen notwendig.

2.3 Räumliche Darstellung

Die mathematische Beschreibung metrischer Objekte, d.h. die Beschreibung einer Teilmenge von Punkten eines metrischen Raums, die Bestandteil des jeweiligen metrischen Objekts sind, kann – unabhängig von dem konkreten Repräsentationsmodell – durch drei unterschiedliche Darstellungsformen beschrieben werden. Der Unterschied liegt in der funktionalen Berechnung der Raumkoordinaten.

implizite Darstellung: Bei dieser Darstellung gehören die Punkte zu dem Objekt, die die Bedingung einer Gleichung der Form

$$f(x, y, z) = 0 \quad (2.43)$$

erfüllen.

Dann läßt sich zum Beispiel eine Kugel durch die Funktion

$$f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - r^2 = 0$$

beschreiben.

Zur Darstellung eines Punktes des Objekts muß die angegebene Gleichung für das Koordinaten-Tripel gelöst werden. Bei nichtlinearen Gleichungen bedeutet dies einen nicht unerheblichen Rechenaufwand, wobei auch die Angabe einer Gleichung für unregelmäßige Objektformen nicht trivial ist.

explizite Darstellung: Bei der expliziten Darstellung von Objekten wird jede Koordinate eines Punktes als Funktionswert der beiden anderen Koordinaten errechnet:

$$z = f(x, y) \quad (2.44)$$

Ein Punkt auf einer *Halbkugel* ist dann definiert durch:

$$z = \sqrt{r^2 - x^2 - y^2}$$

Mit dieser Repräsentation lassen sich jedoch nur Kurven und Flächen darstellen, deren Form durch echte Funktionen repräsentiert werden können, d.h., jedem z -Wert darf nur genau ein Funktionswert $f(x, y)$ zugeordnet sein. Die integrierte Darstellung einer Kugel ist daher nicht möglich.

Parameterdarstellung: Bei der parametrisierten Form der Beschreibung eines metrischen Objekts wird für jede Koordinate des dreidimensionalen Raums eine Funktion definiert, die zur Darstellung von Kurven, Flächen oder Körpern in Abhängigkeit eines, zweier bzw. dreier Parameter u , v und w berechnet werden. Die Bestimmung der Koordinaten ist somit eine Transformation aus dem Parameterraum (u, v, w) in den metrischen Raum (x, y, z) .

$$C(u) = \begin{pmatrix} x(u) \\ y(u) \\ z(u) \end{pmatrix} \quad \text{für Kurven} \quad (2.45)$$

$$S(u, v) = \begin{pmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{pmatrix} \quad \text{für Flächen} \quad (2.46)$$

$$V(u, v, w) = \begin{pmatrix} x(u, v, w) \\ y(u, v, w) \\ z(u, v, w) \end{pmatrix} \quad \text{für Körper} \quad (2.47)$$

Vor dem Hintergrund der Parameterdarstellung lassen sich räumliche Objekte anhand ihrer Ausdehnung im metrischen Raum, d.h. der Dimension ihres Parameterbereichs in Körper, Flächen, Kurven bzw. Punkte unterscheiden.

Zur Vereinfachung wird häufig eine homogenisierte Darstellung gewählt, in der die Parameter u , v und w aus dem Intervall $[0, 1]$ gewählt werden.

Eine Kugel läßt sich durch folgende Parameterform darstellen:

$$x = r \cos(u) \sin(v), \quad y = r \sin(u) \sin(v), \quad z = r \cos(v)$$

Grundlage der mathematischen Beschreibungen des im folgenden Kapitel zu definierenden Repräsentationsmodells für dreidimensionale Freiformkörper ist die Parameterform als räumliche Darstellungsform. Die Definition dieser konkreten Parameterdarstellung erfordert die mathematische Beschreibung der Transformation aus dem Parameterraum in den metrischen Raum. Die Qualität des resultierenden Modells wird also im wesentlichen von der Transformationskomponente bestimmt.

Kapitel 3

Non Uniform Rational B-Spline Volumes

Wie die Untersuchungen in Abschnitt 2.2 gezeigt haben, sind die in vielen Geo-Informationssystemen zur Abbildung von geowissenschaftlichen, räumlichen Modellen eingesetzten Repräsentationsmodelle, also insbesondere Rasterverfahren und Randdarstellungen, nur bedingt zur Darstellung komplexer Geosysteme geeignet.

Verfahren der räumlichen Zerlegung bieten auf der einen Seite die Möglichkeit, echte Volumeninformationen abzubilden und darzustellen. Andererseits erlaubt die Diskretisierung des Raums auch nur diskrete Analyse- und Prognoseverfahren, die zudem maßgeblich von der gewählten Unterteilung und damit auch der Genauigkeit der Ergebnisse abhängen. Ferner erfolgt die Zuordnung der geologischen, geotechnischen und geohydraulischen Eigenschaften an jeweils einzelne Rasterelemente, so daß die Identifizierung zusammenhängender Objekte nicht effizient realisierbar ist.

Im folgenden soll daher ein neuer Ansatz vorgestellt werden, der die mathematisch integrierte Repräsentation von echten Volumenobjekten auf der Basis spezieller Freiformkörper (*Non Uniform Rational B-Spline Volumes*) erlaubt. Aufgrund der Parametrisierbarkeit der Methodik können geowissenschaftliche Charakteristika innerhalb verschiedener Körper in ihrer Verteilung über den dreidimensionalen Raum funktional definiert und anhand von Simulationmethoden analysiert werden. Die getrennte Verwaltung unterschiedlicher Objekte unterstützt dabei die Modellierung, vermeidet redundante Eigenschaftszuweisungen und erlaubt effektive Benutzeranfragen sowohl bezüglich des räumlichen Modells als auch der thematischen Objekthierarchien.

Non Uniform Rational B-Splines, kurz NURBS, sind eine Repräsentationsform für viele Bereiche geometrieverarbeitender Systeme. Ausgehend von ihrem Einsatz vor allem in der Automobilindustrie und dem Schiffsbau [Sta89], wo sie u.a. für den Entwurf der Karosserie respektive des Schiffskörpers eingesetzt werden, sind sie mittlerweile in nahezu jedem CAD-/CAM-/CAE-System integriert und finden in einfacheren Zeichenprogrammen Anwendung. NURBS sind

integraler Bestandteil der wichtigsten Grafikstandards, wie OpenGL, PHIGS, IGES, STEP, etc., und werden somit auch in Zukunft in immer mehr Systemen Verwendung finden.

Im folgenden werden, ausgehend von den charakteristischen Eigenschaften der Darstellung räumlicher Informationen durch NURBS, zunächst die Gründe für deren Verbreitung erläutert. Der Definition von NURBS-Kurven und -Bögen folgt die Einführung von Volume NURBS (*V-NURBS*), der Erweiterung der NURBS-Methodik für die Darstellung von Körpern als echte Volumen im dreidimensionalen Raum. Zum Abschluß des Kapitels werden Ansätze zur Modellierung räumlicher Modelle auf der Basis dieses neuen Verfahrens entwickelt, die die Grundlage der Integration von Volume NURBS in das Geo-Datenmodell GeoCORE bilden.

Erste Ansätze zur Verwendung von analytischen Freiform-Darstellungen als Modellierungsgrundlage für echte Körper finden sich bei Casale und Stanton. In [CS85] werden allgemeine trikubische Volumen, sog. *hyperpatches*, als Erweiterung kubischer Kurven bzw. bikubischer Patches eingeführt und deren Anwendungen im Rahmen des *analytic solid modeling (ASM)* detailliert erläutert. Am Beispiel technischer Werkstücke wird dabei auch die Verwendung des Körperinneren zur Darstellung von Parametereigenschaften, hier der Temperaturverteilung, verdeutlicht. Bereits in dieser Arbeit wird die Mächtigkeit trivariater Volumen anschaulich erläutert, wobei jedoch durch den technischen Hintergrund der Untersuchungen der Schwerpunkt auf der Visualisierung und Modellierung vordefinierter Körper liegt.

In [FH85] leiten Farouki und Hinds aus der Verschiebung polynomial beschriebener Flächen trivariate Körper ab und weisen darauf hin, daß je nach Anwendung das Körperinnere vernachlässigt werden kann und das Volumen dann durch die begrenzenden Flächen repräsentierbar ist.

Sederberg und Parry beschreiben in [SP86] die Verwendung trivariater Bézier-Polynome zur Deformationsberechnung bestehender Körperbeschreibungen (*Free Form Deformation*, FFD). Ziel der Anwendung ist dabei nicht die direkte Modellierung von Volumen, sondern die parametrisierte Veränderung bereits existierender Körper, die etwa durch CSG konstruiert wurden.

Auf diese Möglichkeit der Nutzung trivariater Körperdarstellungen weist auch Farin in [Far97] hin. Als Vorteil der Verformung gegebener Darstellungen durch parametrisierte Deformationsberechnungen führt er die Möglichkeit an, komplexe Modelle mit mehreren Elementen anhand einer Beschreibungsform gleichmäßig zu manipulieren.

Lasser [Las89, Las94a, Las94b, LK90] zeigt Möglichkeiten der Modellierung und Visualisierung von Bézier-Volumen auf, geht jedoch nicht weiter auf Modellierungstechniken, Datenhaltung u.ä. ein.

Abramowski und Müller weisen in [AM91] ebenfalls auf die Möglichkeit der Erweiterung von Vierecks-Bézier-Segmenten in n -dimensionale Darstellungen hin und stellen eine allgemeingültige Formel vor, ohne jedoch auf das Verfahren im Detail einzugehen.

Die seltene Verwendung von trivariaten Polynomdarstellungen zur Repräsentation echter Volumen erscheint zunächst schwer verständlich, erlaubt diese Methodik doch die vollständige mathematische Definition von Freiform-Körpern. Ein Grund für die geringe Beachtung derartiger Verfahren besteht sicherlich darin, daß sich bisherige Anwendungen auf die Beschreibung eines in sich homogenen Körpers bezogen haben. Der Einsatz von Freiform-Körpern beschränkt sich damit auf die Modellierung homogener Objekte, so daß die eigentliche Stärke trivariater Volumen, nämlich die vollständige Repräsentation des Körperinneren in seiner Inhomogenität über den Raum auf der Grundlage einer kontinuierlichen mathematischen Berechnungsvorschrift, keine Anwendung findet. Ausgehend von den beschriebenen geowissenschaftlichen Anforderungen wird jedoch genau diese besondere Eigenschaft der Darstellungsform erforderlich.

3.1 Eigenschaften von Non Uniform Rational B-Splines

Die Darstellung der Eigenschaften von NURBS erfolgt hier zunächst auf der Grundlage der Anwendbarkeit dieses Verfahrens und der daraus resultierenden Vorteile (vgl. [PT97]). Die detaillierte Darstellung der mathematischen Grundlagen erfolgt im nächsten Abschnitt.

Einheitliche Beschreibung: Die Vorteile der Modellierung mit NURBS resultieren vor allem aus der einheitlichen Repräsentation der metrischen Informationen. Auf der Grundlage *einer* Beschreibungsform können alle metrischen Objekte dargestellt werden. Neben analytischen Standardformen, wie Quader, Zylinder oder Kugel, sind insbesondere Freiform-Objekte darstellbar.

Daraus ergibt sich in technischen Disziplinen der Vorteil, daß der Entwurf neuer Konstruktionen einerseits nicht auf häufig eingesetzte Standardformen verzichten muß, es aber andererseits möglich ist, beliebig geschwungene Formen direkt zu integrieren.

Das gleiche gilt für die Darstellung geowissenschaftlicher Modelle, in denen natürliche Objekte als Freiformen mit technischen Objekten als Standardformen auf der Grundlage einer Beschreibung zusammengeführt und miteinander in Beziehung gesetzt werden können.

Modellierbarkeit: Aus der einheitlichen Modellierung aller räumlichen Objekte mit NURBS resultiert zunächst, daß auch die Handhabung aller Objekte durch den Benutzer immer nach demselben Prinzip funktioniert. Daher sind für verschiedene Standard- oder Freiformen keine unterschiedlichen Eingabe- und Modifizierungs-Tools notwendig. Ferner beruht die Verwendung von NURBS auf einem intuitiv bedienbaren Konzept, das per se eine einfache Modellierung erlaubt.

Darstellungsgenauigkeit: Im Gegensatz zu verschiedenen anderen Konzepten zur räumlichen Modellierung, insbesondere Enumerationsverfahren, ist die Darstellungsgenauigkeit von NURBS theoretisch unbegrenzt. Durch die mathematische Beschreibung kann jeder beliebige Punkt eines Objektes exakt berechnet und dargestellt werden. Dies führt nicht nur zu genaueren Visualisierungen, sondern ist speziell bei der algorithmischen Analyse räumlicher Informationen zur Steigerung der Genauigkeit vorteilhaft.

Speicherbedarf: Trotz der beschriebenen Genauigkeit bei der Darstellung benötigen NURBS nur relativ wenige Parameter zur Beschreibung beliebiger Standard- und Freiformen, so daß komplexe Modelle informationstechnisch handhabbar bleiben. Die exakte Form von Objekten ergibt sich erst aus deren Berechnung auf der Basis der sie repräsentierenden Parameter.

Berechnung: Das mathematische Verfahren zur Berechnung von Objekten aus einer gegebenen NURBS-Darstellung ist schnell, effizient und mathematisch stabil.

Algorithmische Unterstützung: Ausgehend von der mathematischen Beschreibung von Objekten kann die computergestützte Modellierung besser als bei anderen Beschreibungsformen unterstützt werden. Somit können räumliche Informationen problemspezifisch algorithmisch ausgewertet und als NURBS-Darstellungen visualisiert werden.

Optimierbarkeit: Aus der mathematischen Beschreibung folgt auch die mögliche Optimierbarkeit modellierter Objekte. Verfahren etwa zur Punkt-reduktion, d.h. zur Verringerung der notwendigen Parameter zur Repräsentation eines speziellen Objektes, sind theoretisch untersucht und in vielfältiger Form in den verschiedenen CAD-Systemen umgesetzt.

Transformationsinvarianz: Die NURBS-Darstellung eines Objektes ist invariant bezüglich der Transformationen Translation, Rotation, Skalierung und Projektion. NURBS-Objekte können daher ohne Parameterveränderung beliebig im Raum oder in lokalen Koordinatensystemen platziert werden.

Generalisierung: NURBS sind Generalisierungen von nicht-rationalen B-Splines und Bézier-Kurven bzw. -Flächen, d.h., bei Bedarf kann das Verhalten dieser Beschreibungsformen durch entsprechende Parameterwahl der NURBS-Darstellung angewendet werden.

Die beschriebenen Vorteile der NURBS-Darstellung führten bisher zu deren Anwendung bei der Repräsentation von Bögen und Flächen. Bei der Darstellung von Volumen greift man jedoch weiterhin auf andere Verfahren zurück. Entweder weicht man dabei der NURBS-Darstellung ganz aus und modelliert Körper durch Raumprimitiven (OpenGL Volumizer, SGI), oder man kombiniert

NURBS-Darstellungen mit anderen Verfahren, etwa der Boundary Repräsentation (vgl. Abschnitt 2.2). Ein volumenhaftes Objekt wird also nicht als reine, volumenhafte NURBS-Darstellung verwaltet, sondern der Körper wird durch seine begrenzenden NURBS-Flächen modelliert.

[NURBS] Solids are closed surfaces or (more usually) polysurfaces that enclose a volume. Most of the primitives are closed single-surfaces carefully edge-matched.

(*Rhinoceros*, Robert McNeel & Associates)

Dem Zitat zur Definition eines NURBS-Körpers ist bereits die grundlegende Schwierigkeit dieses Ansatzes zu entnehmen: Das NURBS-Volumen wird von NURBS-Flächen begrenzt, die sorgfältig aneinandergesetzt werden. Ungenauigkeiten, die bei der Anpassung der einzelnen Bestandteile auftreten, sind schwierig zu erkennen und zu beheben und führen zu Inkonsistenzen.

Die beschriebene Kombination von NURBS-Flächen und der Randdarstellung wurde auch bei der räumlichen Datenmodellierung in GeoCORE zunächst verfolgt. Die in [Kes96] beschriebenen Konzepte wurden im Rahmen des Forschungsprojektes BAGIS (*Baugeologisch-Geotechnisches Informationssystem*) [BRBM97] umgesetzt und anhand realer geologischer Daten evaluiert [KM99]. Dabei wurden jedoch die Schwierigkeiten bei dieser Vorgehensweise deutlich:

Konsistenz: Das schwerwiegendste Problem bei der Darstellung eines Körpers durch seine begrenzenden NURBS-Flächen besteht in der Konsistenzsicherung. Da ein Körper in beliebiger Form durch Flächen zusammengesetzt bzw. begrenzt werden kann, muß vom System sichergestellt werden, daß keine inkonsistente Darstellung aus der Modellierung des Anwenders resultiert. Die Überprüfung, ob eine gegebene Anzahl von Flächen einen Körper beschreibt, ist jedoch äußerst schwierig.

Zugehörigkeitsbestimmung: In engem Zusammenhang mit der Konsistenzsicherung steht die Bestimmung der inneren Punkte eines Körpers. Der Test auf Zugehörigkeit eines Punktes zu einem Körper erfordert komplizierte Verfahren der Strahlenverfolgung und Schnittberechnung, um eine Entscheidung treffen zu können, ob der gegebene Punkt innerhalb oder außerhalb des Körpers liegt. Ist der Körper darüber hinaus „zerlöchert“, d.h. er besitzt mehr als eine begrenzende Oberfläche, wird die Zugehörigkeitsbestimmung noch schwieriger.

Modifizierbarkeit: Wird ein Körper verschoben oder in seiner Form verändert, so erfolgt dies ebenfalls über die begrenzenden NURBS-Flächen. Daher ist jede Modifikation mit erheblichem Aufwand verbunden, da die Veränderung des Körpers auf die jeweiligen Flächen unter Berücksichtigung der jeweils angrenzenden Nachbarflächen umgerechnet werden muß.

Volumeneigenschaften: Besonders deutlich wird der Nachteil dieser Darstellungsform, wenn Informationen über das Innere eines Körpers benötigt werden, die räumlich variieren. Derartige Zuordnungen werden bei der Modellierung räumlicher Parameterverteilungen benötigt, um zum Beispiel Ausbreitungen von Stoffen, Einflüsse von Kräften oder Verformungen im Raum zu modellieren. Da jedoch bei der Randdarstellung lediglich Information über den Rand verwaltet werden kann, ist dieses Problem nur durch eine Unterteilung des Körpers in verschiedene diskrete Teilkörper darstellbar. Kontinuierliche Parameterdarstellungen sind somit nicht möglich.

Durch die Verwendung dieser Methodik zur Volumenmodellierung verliert man viele positive Eigenschaften des NURBS-Verfahrens, die für die gegebene geowissenschaftliche Fragestellung benötigt werden.

Im folgenden wird daher erstmals die NURBS-Methodik zur Modellierung echter Volumina unter Beibehaltung aller dargestellten Charakteristika erweitert. Damit wird die einheitliche Repräsentation von räumlichen Gegebenheiten auf der Basis eines Verfahrens auf Körper übertragen, so daß *eine* mathematische Beschreibung zur Darstellung aller räumlichen Informationen eingesetzt werden kann. Die Einbettung dieses Ansatzes in ein Datenmodell als Grundlage für den Einsatz in Geo-Informationssystemen wird in Kapitel 6 dargestellt.

3.2 Definitionen

Die Definition von NURBS-Kurven und -Flächen folgt im wesentlichen [PT97]. Im Hinblick auf die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Erweiterung zu NURBS-Volumen werden andere Indizes und Variablennamen gewählt. Insbesondere Laufvariablen und Angaben zur Anzahl von Punkten werden mit zusätzlichen Indizes versehen (z.B. i_u, n_u). Werden diese nicht angegeben, so sind die Angaben allgemeingültig zu verstehen.

Definition 3.1 *Eine Non-Uniform Rational B-Spline-Kurve (NURBS-Kurve) der Ordnung $k_u + 1$ ist ein stückweise rationales Polynom vom Grad k_u , das $n_u + 1$ gewichtete Stützpunkte (Kontrollpunkte) $S^1 = \{s_0, \dots, s_{n_u}\}$ mit $s_i = (x_i, y_i, z_i)$ und Gewichten $w_i \in \mathbb{R}$ interpoliert:*

$$p(u) = \frac{\sum_{i_u=0}^{n_u} S^1(i_u) w_{i_u} N_{i_u, k_u}(u)}{\sum_{i_u=0}^{n_u} w_{i_u} N_{i_u, k_u}(u)} \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (3.1)$$

Dabei ist die Basis $N_{i,k}$ eines B-Splines wie folgt rekursiv zu berechnen:

$$N_{1,i}(u) = \begin{cases} 1 & \text{für } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u - u_i)N_{i,k-1}(u)}{u_{i+k-1} - u_i} + \frac{(u_{i+k} - u)N_{i+1,k-1}(u)}{u_{i+k} - u_{i+1}} \quad (3.2)$$

Der Knotenvektor $U = u_0, \dots, u_{k_u+n_u+1}$ ist ein Vektor von $m_u+1 (= k_u+n_u+2)$ Knoten $u_i \geq 0$ mit $u_i \leq u_j \Leftrightarrow i < j$.

Durch die B-Spline-Basisfunktionen $N_{i,k}$ werden die einzelnen Kurvensegmente, d.h. die einzelnen stückweise rationalen Polynome, festgelegt, wobei das jeweilige Intervall durch den Knotenvektor U bestimmt ist. Letzterer hat die Form

$$U = \{\underbrace{0, \dots, 0}_{k_u+1}, u_{k_u+1}, \dots, \underbrace{u_{m_u-k_u-1}}_{=n_u-k_u}, \underbrace{1, \dots, 1}_{k_u+1}\}.$$

In Abbildung 3.1 ist eine NURBS-Kurve dargestellt, die durch ein Kontrollgitter mit fünf Kontrollpunkten $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$ definiert ist. Als Gewicht wurde für jeden Kontrollpunkt 1 gewählt (Gleichgewichtung), der Grad der Kurve ist 3 und als Knotenvektor wurde $U = \{0, 0, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1, 1\}$ gewählt.

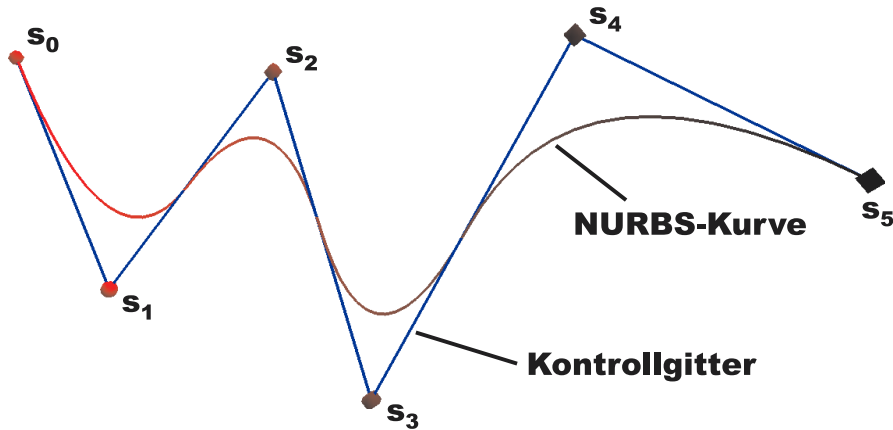


Abbildung 3.1: NURBS-Kurve

Ist die Anzahl der Stützpunkte plus 1 gleich dem Grad der Kurve ($n = k$) und wird als Knotenvektor

$$U = \{\underbrace{0, \dots, 0}_{k+1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{k+1}\}$$

gewählt, entspricht die B-Spline-Kurve einer Bézier-Kurve, da der Knotenvektor dann genau ein Kurvensegment definiert. Durch die geeignete Wahl der Parameter läßt sich somit das Verhalten von Bézier-Kurven nachbilden.

Werden keine Gewichtungsfaktoren w_i angegeben, spricht man von einem nicht-rationalen B-Spline. Werden die Knoten des Vektors U immer im gleichen Abstand und auf der Basis ganzer Zahlen gewählt, handelt es sich um einen uniformen B-Spline.

Durch die Erweiterung der Polynomdarstellung von NURBS-Kurven um einen zweiten Parameter v und somit um einen weiteren Freiheitsgrad, können auf einfache und homogene Weise eindimensionale Kurven auf zweidimensionale Flächen erweitert werden. Der Vektor der Kontrollpunkte wird dabei zu einem zweidimensionalen $u \times v$ Kontrollgitter erweitert, und die Berechnung entsprechend als doppelte Summenbildung über die Parameter u und v definiert. Der Übergang von einer eindimensionalen NURBS-Kurve zu einer zweidimensionalen NURBS-Fläche ist in Abbildung 3.2 schematisch durch die wiederholte Darstellung einer Kurve und damit der Erweiterung um eine Laufrichtung veranschaulicht.

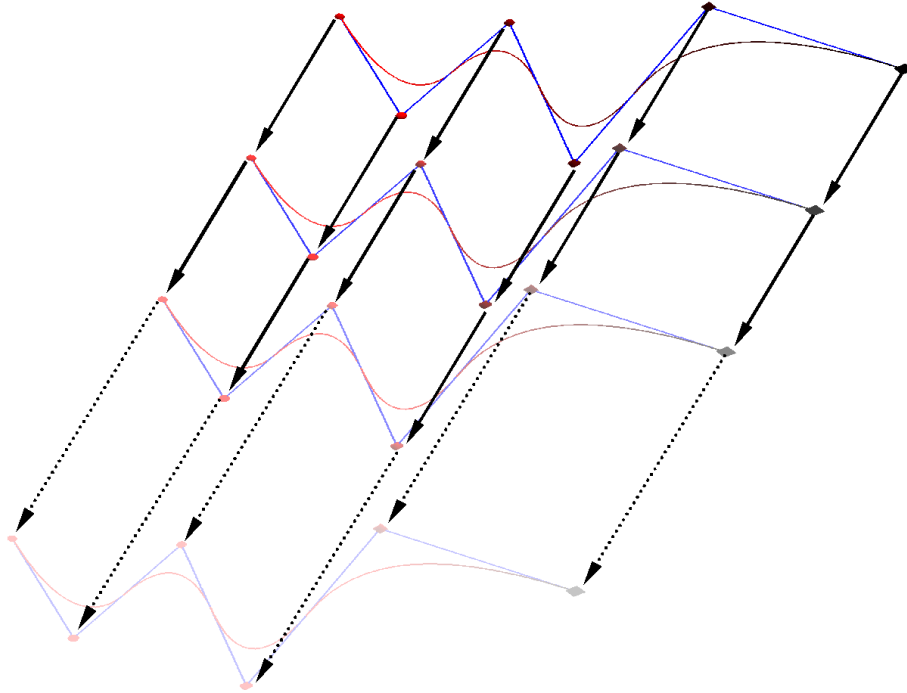


Abbildung 3.2: Übergang von NURBS-Kurven zu NURBS-Flächen

Definition 3.2 Eine Non Uniform Rational B-Spline-Fläche (NURBS-Fläche) vom Grad k_u in u -Richtung und k_v in v -Richtung ist die zweidimensionale Erweiterung einer NURBS-Kurve und wird definiert durch:

$$p(u, v) = \frac{\sum_{i_u=0}^{n_u} \sum_{i_v=0}^{n_v} S^2(i_u, i_v) w_{i_u i_v} N_{i_u, k_u}(u) N_{i_v, k_v}(v)}{\sum_{i_u=0}^{n_u} \sum_{i_v=0}^{n_v} w_{i_u i_v} N_{i_u, k_u}(u) N_{i_v, k_v}(v)} \quad 0 \leq u, v \leq 1 \quad (3.3)$$

Dabei ist S^2 eine Matrix von Stützpunkten:

$$S^2 = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n_u} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2n_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n_v 1} & s_{n_v 2} & \dots & s_{n_v n_u} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

mit $s_{ij} = (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$.

Die Basisfunktionen N_{i_u, k_u} und N_{i_v, k_v} werden analog zu (3.2) mit den zwei Knotenvektoren

$$U = \{\underbrace{0, \dots, 0}_{k_u+1}, u_{k_u+1}, \dots, \underbrace{u_{m_u-k_u-1}}_{=n_u-k_u}, \underbrace{1, \dots, 1}_{k_u+1}\}$$

$$V = \{\underbrace{0, \dots, 0}_{k_v+1}, v_{k_v+1}, \dots, \underbrace{v_{m_v-k_v-1}}_{=n_v-k_v}, \underbrace{1, \dots, 1}_{k_v+1}\}$$

berechnet.

In Abbildung 3.3 ist zur Veranschaulichung eine 4×4 NURBS-Fläche dargestellt. Auf der linken Seite sind sowohl das Kontrollgitter und die 16 Stützpunkte als auch eine Drahtgitteransicht der Fläche dargestellt. Auf der rechten Seite ist dieselbe Fläche gerendert abgebildet, d.h. eine bis zu einem gewissen Genauigkeitsgrad berechnete Darstellung.

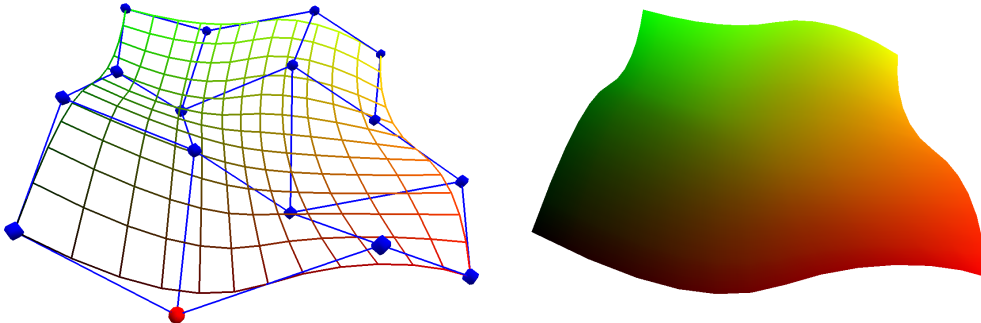


Abbildung 3.3: NURBS-Fläche

Analog zum Übergang von NURBS-Kurven zu NURBS-Flächen erfolgt der Übergang von NURBS-Flächen zu NURBS-Körpern durch die Erweiterung der Formel um einen weiteren Laufparameter w . Ausgehend von einem Kontrollgitter von Stützpunkten werden, wie in Abbildung 3.5 anschaulich dargestellt, im Prinzip mehrere NURBS-Flächen hintereinander berechnet und zu einem Volumen verbunden.

Definition 3.3 *Ein Non Uniform Rational B-Spline Volume (Volume NURBS) vom Grad k_u in u -Richtung, k_v in v -Richtung und k_w in w -Richtung ist die dreidimensionale Erweiterung einer NURBS-Fläche und wird wie folgt definiert:*

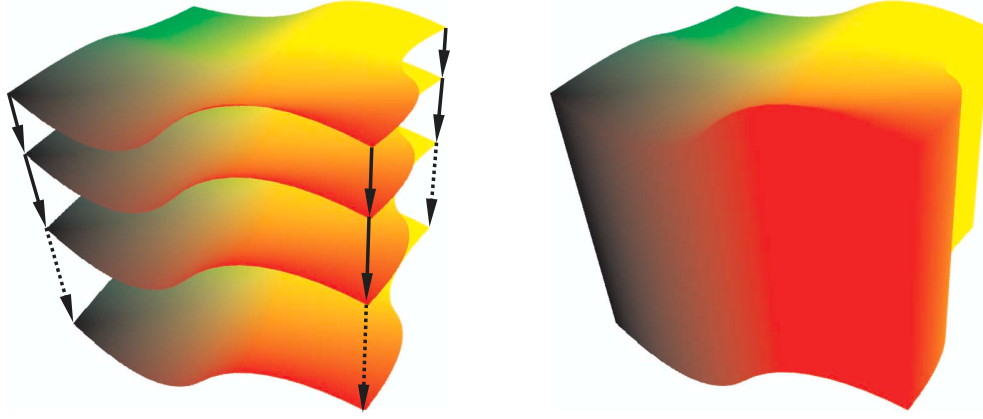


Abbildung 3.4: Übergang von NURBS-Flächen zu NURBS-Körpern

$$p(u, v, w) = \frac{\sum_{i_u=0}^{n_u} \sum_{i_v=0}^{n_v} \sum_{i_w=0}^{n_w} S^3(i_u, i_v, i_w) w_{i_u i_v i_w} N_{i_u, k_u}(u) N_{i_v, k_v}(v) N_{i_w, k_w}(w)}{\sum_{i_u=0}^{n_u} \sum_{i_v=0}^{n_v} \sum_{i_w=0}^{n_w} w_{i_u i_v i_w} N_{i_u, k_u}(u) N_{i_v, k_v}(v) N_{i_w, k_w}(w)} \quad (3.5)$$

$$0 \leq u, v, w \leq 1$$

Die S^3 bilden dabei das dreidimensionale Kontrollgitter der Stützpunkte:

$$\left(\begin{array}{cccc} & & & \left(\begin{array}{cccc} s_{u11} & s_{u12} & \cdots & s_{u1w} \\ & s_{u21} & & s_{u22} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & s_{u2w} \\ & & & \vdots \\ & & & s_{uww} \end{array} \right) \\ & & \left(\begin{array}{cccc} s_{211} & s_{212} & \cdots & s_{21w} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & s_{2vw} \end{array} \right) & \\ \left(\begin{array}{cccc} s_{111} & s_{112} & \cdots & s_{11w} \\ s_{121} & s_{122} & \cdots & s_{12w} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{1v1} & s_{1v2} & \cdots & s_{1vw} \end{array} \right) & \end{array} \right) \mathbf{u} \quad (3.6)$$

Analog zu (3.2) werden die Basisfunktionen N_{i_u, k_u} , N_{i_v, k_v} und N_{i_w, k_w} mit den Knotenvektoren U, V und W berechnet:

$$\begin{aligned} U &= \{ \underbrace{0, \dots, 0}_{k_u+1}, \underbrace{u_{k_u+1}, \dots, u_{m_u-k_u-1}}_{=n_u-k_u}, \underbrace{1, \dots, 1}_{k_u+1} \} \\ V &= \{ \underbrace{0, \dots, 0}_{k_v+1}, \underbrace{v_{k_v+1}, \dots, v_{m_v-k_v-1}}_{=n_v-k_v}, \underbrace{1, \dots, 1}_{k_v+1} \} \\ W &= \{ \underbrace{0, \dots, 0}_{k_w+1}, \underbrace{w_{k_w+1}, \dots, w_{m_w-k_w-1}}_{=n_w-k_w}, \underbrace{1, \dots, 1}_{k_w+1} \} \end{aligned}$$

In Abbildung 3.5 ist ein Volume NURBS-Körper mit $u = 8, v = 4$ und $w = 9$ Kontrollpunkten in vier verschiedenen Darstellungsformen abgebildet. In 3.5

a) ist das Kontrollgitter mit farbigen Stützpunkten visualisiert, 3.5 b) zeigt das Kontrollgitter mit dem daraus resultierenden Körper (zur Verdeutlichung transparent), in 3.5 c) ist der NURBS-Körper als Drahtgitterdarstellung zu sehen und in 3.5 d) schließlich die vollständig gerenderte Ansicht.

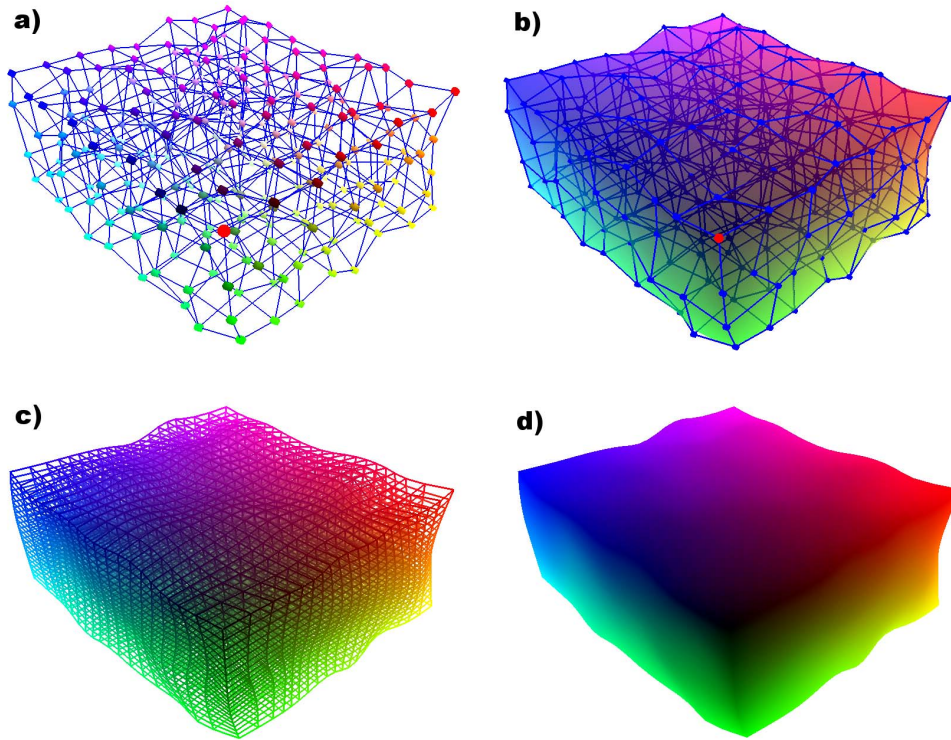


Abbildung 3.5: Darstellungen von Volume NURBS: a) Kontrollgitter, b) Kontrollgitter und transparenter Körper, c) Drahtgitter und d) vollständiger Körper

Wie der Definition 3.3 der NURBS-Volumen zu entnehmen ist, spannen die drei Parameter u , v und w in Analogie zur rechteckigen Grundfläche von NURBS-Kurven einen Quader im Parameterraum auf. Formel (3.5) stellt eine Abbildung dieses Parameterraums in den dreidimensionalen euklidischen Raum dar. Ausgehend von den definierenden Kontrollpunkten und der gewählten Ordnung wird der Ausgangsquader dabei deformiert, wie in Abbildung 3.6 (vgl. [CS85]) dargestellt.

Zur Verdeutlichung wird im folgenden häufig im wesentlichen ein deformierter Quader dargestellt. Dies bedeutet jedoch nicht, daß die Darstellungsmächtigkeit von NURBS-Volumen auf mehr oder minder quadratische Körper begrenzt ist. In Abschnitt 3.3.9 werden erweiterte Ansätze zur Repräsentation von Kugeln, Zylindern und anderen Basiskörpern sowie geologischen Strukturen beschrieben, die diesen Sachverhalt verdeutlichen.

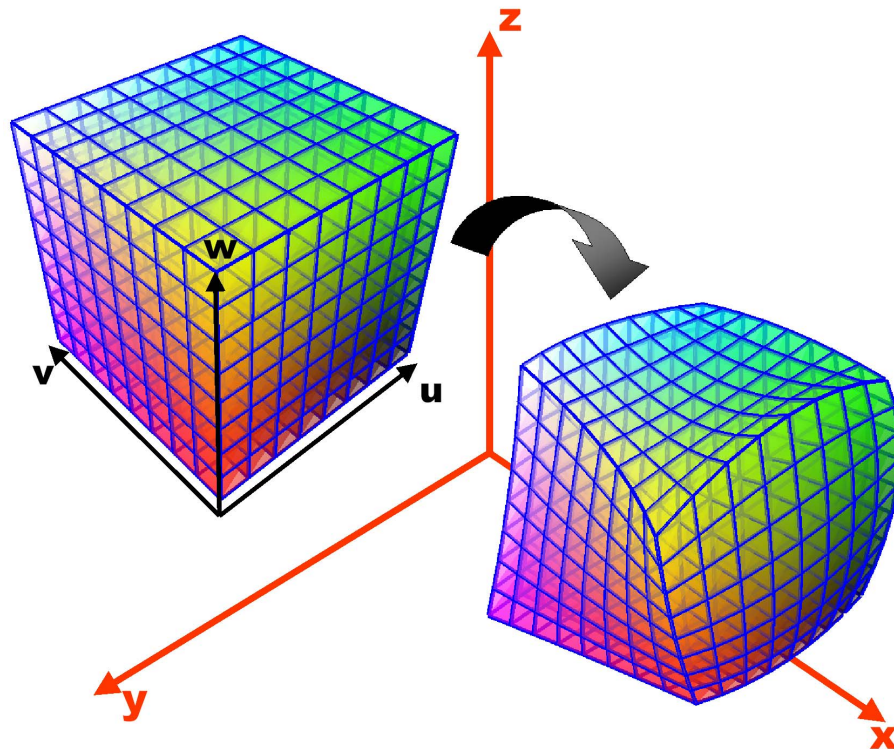


Abbildung 3.6: Transformation aus dem Parameterraum in den euklidischen Raum (vgl. [CS85])

Neben den bereits zu Beginn des Abschnitts detailliert erläuterten Vorteilen bei der Modellierung haben NURBS¹ die folgenden mathematischen Eigenschaften:

Lokalität: Im Gegensatz zu anderen polynomialen Darstellungen (zum Beispiel Bézier-Kurven), die aus nur einem polynomialen Segment berechnet werden, wirken sich Änderungen an den Parametern eines Kontrollpunktes eines NURBS nur lokal auf das betroffene Segment aus.

Der Vergleich zwischen einer NURBS-Kurve vom Grad 3 und einer Bézier-Kurve mit jeweils sieben Kontrollpunkten in Abbildung 3.7 verdeutlicht die Lokalität der NURBS-Methodik. Im Fall der Bézier-Darstellung geht die Kurve nur durch die beiden Endpunkte und wird über den gesamten Verlauf der Kurve durch den herausgezogenen Kontrollpunkt beeinflusst. Im Gegensatz dazu erlaubt der Freiheitsgrad 3 der NURBS-Darstellung der Kurve nur eine lokale Abweichung durch den herausgezogenen Kontrollpunkt, die dafür deutlich stärker ausfällt.

Die lokale Steuerung reduziert zum einen den Rechenaufwand, da lediglich die Punkte innerhalb des veränderten Segments neu zu berechnen

¹Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Begriff NURBS als Oberbegriff für NURBS-Kurven, -Flächen und -Volumen verwendet.

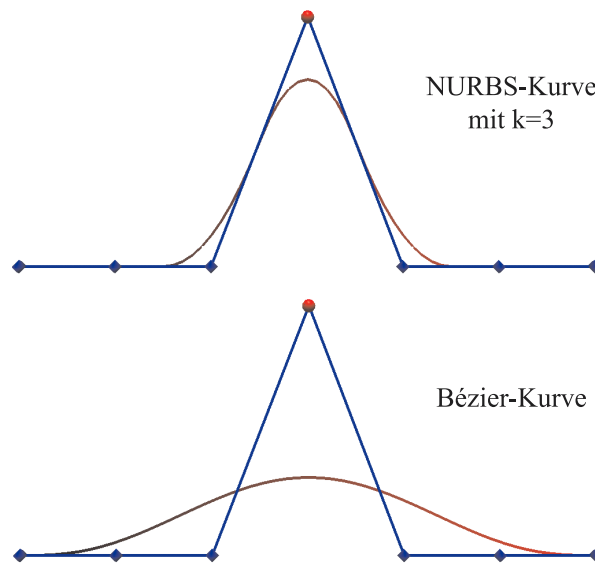


Abbildung 3.7: Lokalität der NURBS-Darstellung

sind. Zum anderen wird die interaktive Modifizierung von NURBS dadurch wesentlich vereinfacht, da insbesondere lokale Veränderungen ohne Seiteneffekte auf andere modellierte Teilsegmente möglich sind. Die Segmentgröße wird durch den Knotenvektor bestimmt, so daß die Lokalität fallspezifisch eingestellt werden kann.

Flexibilität: Aufgrund der Lokalität des Einflusses eines einzelnen Kontrollpunktes, die aus der segmentweisen Berechnung resultiert, können n Datenpunkte auch von B-Splines niedrigeren Grades ($k < n$) durchlaufen werden. Somit können ineffiziente Polynome hohen Grades zur Modellierung komplexer Geometrien oder Darstellungen vermieden werden, da diese rechenintensiv sind und zu „welligen“ Darstellungen führen (Abbildung 3.8).

Toleranz: Die Abweichungstoleranz bei der Interpolation der vorgegebenen Kontrollpunkte kann durch die Veränderung der Grundparameter Gewichtung, Ordnung und Knotenanzahl je nach spezieller Anforderung angepaßt werden. Ferner definieren diese Parameter auch die „Welligkeit“ der resultierenden NURBS-Darstellung.

Abbildung 3.9 zeigt die Auswirkungen der Erhöhung der Gewichtung eines Kontrollpunktes S_G in einer sonst unveränderten Darstellung. Es ist der immer stärkere Einfluß dieses einen Kontrollpunktes sichtbar, der bei entsprechend hoher Gewichtung dazu führt, daß der Punkt von dem NURBS-Volumen interpoliert wird.

Visualisierung: Zur Visualisierung von NURBS-Objekten werden diese gerendert, d.h., je nach Ansicht werden Schrittweiten gewählt, mit denen jeweils die Parameter u , v und w durchlaufen werden (vgl. hierzu Abschnitt

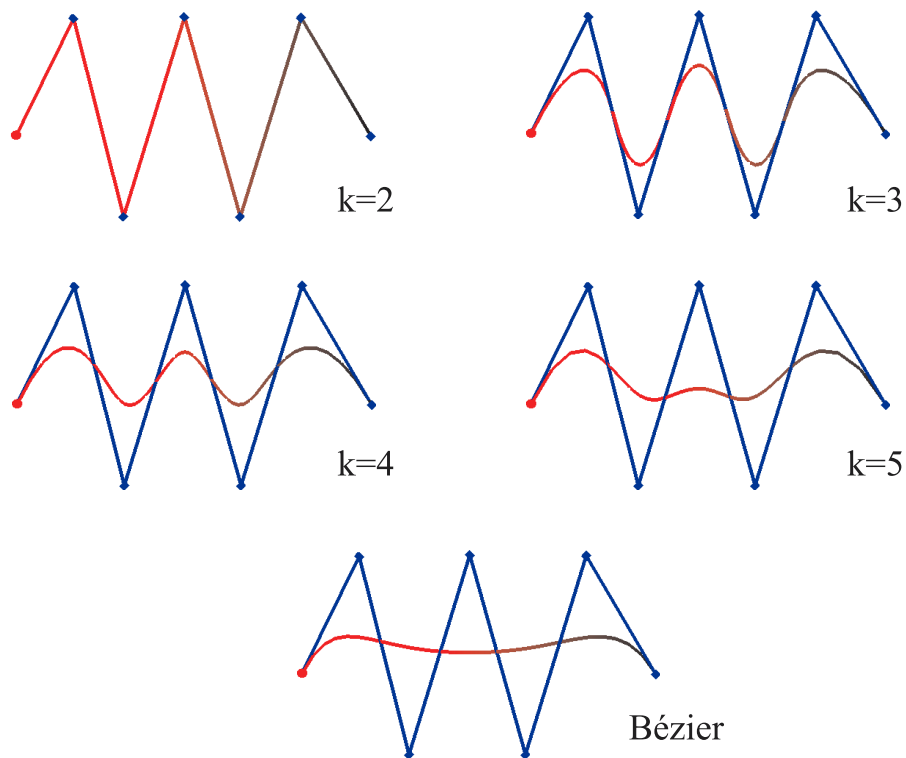


Abbildung 3.8: Veränderung des Grads von NURBS-Kurven

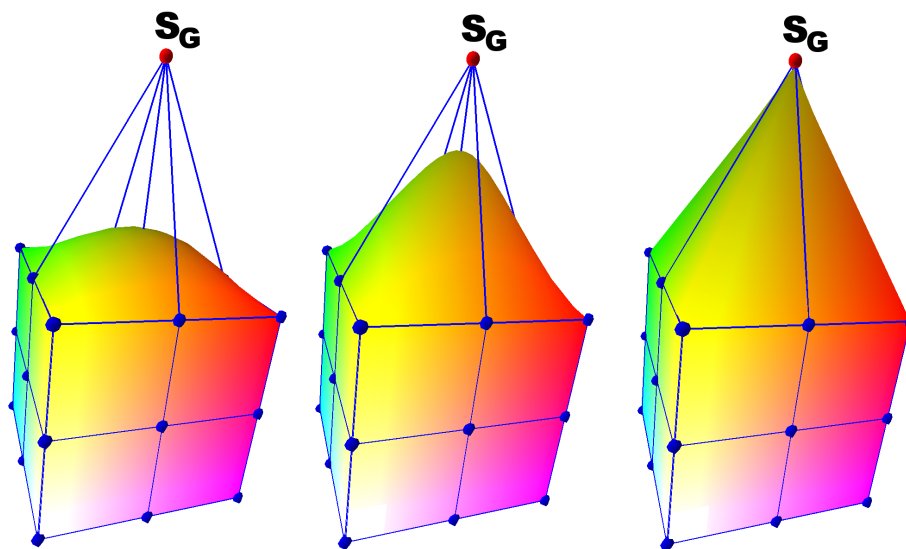


Abbildung 3.9: Auswirkung unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren

3.3.2). Dank der mathematischen Definition kann bei einer Detailansicht eine verfeinerte Berechnung gewählt werden, so daß die resultierende Dar-

stellung ebenfalls ecken- und kantenfrei ist.

Zum Vergleich sind in Abbildung 3.10 auf der linken Seite eine triangulierte Fläche und ein vergrößerter Ausschnitt derselben Fläche und auf der rechten Seite eine gerenderte NURBS-Fläche mit dem gleichen vergrößerten Ausschnitt gegenübergestellt. Bei der triangulierten Fläche ist deutlich zu sehen, daß bei einer Vergrößerung des Ausschnitts die Kantigkeit der Fläche immer stärker zu erkennen ist. Demgegenüber kann an die NURBS-Fläche beliebig nah herangegangen werden, ohne daß die Qualität der Darstellung nachläßt. Zwar kann die triangulierte Repräsentation einer Fläche durch Schattierungs- und Glättungsverfahren bei der Visualisierung verbessert werden, aber dennoch bleibt der Nachteil der ungenauen Abbildung der Realwelt bestehen, da mit derartigen Verfahren eine Genauigkeit vorgetäuscht wird, die in der tatsächlichen Repräsentation des Raummodells nicht abgebildet ist.

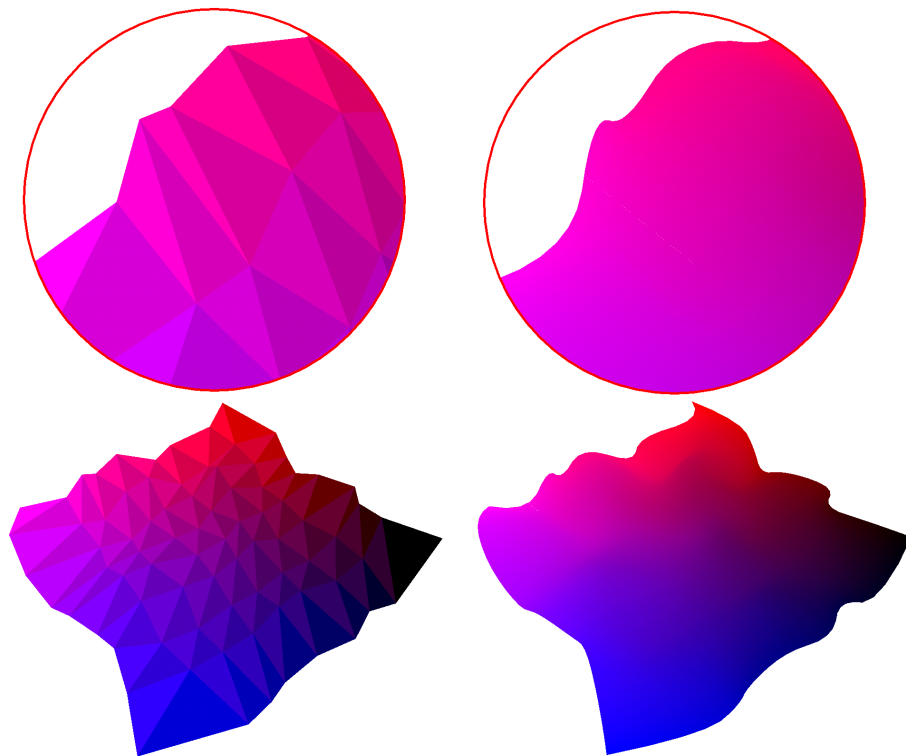


Abbildung 3.10: Vergleich von triangulierter Fläche und NURBS-Fläche

Eckpunkt-Interpolation: Die Eckpunkte der beschreibenden Kontrollgitter werden immer interpoliert und definieren somit auch den Anfang und das Ende des resultierenden NURBS-Objekts.

Konvexe Hülle: Sind alle Gewichte positiv ($w_i \geq 0$), so liegt das NURBS-Objekt immer innerhalb der konvexen Hülle der Kontrollpunkte, bzw. noch strenger in der konvexen Hülle der beeinflussenden Stützpunkte,

die durch den Grad und die Wahl des Knotenvektors gegeben sind. Am Beispiel einer NURBS-Kurve wird diese Eigenschaft in Abbildung 3.11 verdeutlicht. Das blaue Kontrollgitter spannt die rote NURBS-Kurve auf, die vollständig innerhalb der konvexen Hülle der beeinflussenden Stützpunkte (grün) liegt.

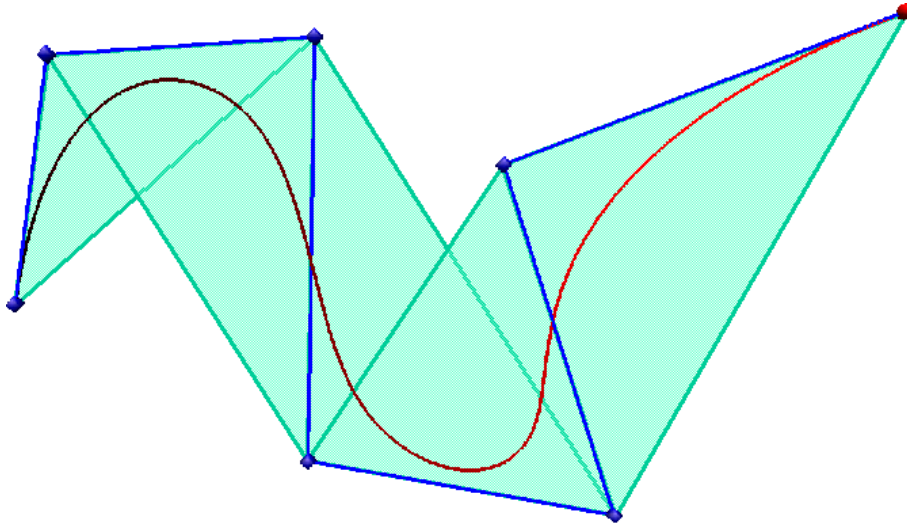


Abbildung 3.11: Konvexe Hülle einer NURBS-Kurve

Diese Eigenschaft kann besonders zur Abschätzung der räumlichen Ausdehnung bzw. des Volumens dienen und erleichtert zudem die Berechnung von Schnitten zwischen NURBS-Objekten (vgl. Abschnitt 3.3.6).

3.3 Visualisierung und Modellbildung

In den folgenden Abschnitten werden Ansätze zur Visualisierung und Modellbildung untersucht und verschiedene Methoden der Manipulation von NURBS-Objekten vorgestellt. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen dabei die spätere Einbindung der Methodik in das Geo-Datenmodell GeoCORE (Kapitel 6) und die Realisierung in einem Geo-Informationssystem. Bei der Beschreibung der verschiedenen Verfahren werden zur Verdeutlichung zum Teil die notwendigen mathematischen Grundlagen bei der Modellbildung mit NURBS-Volumen angegeben. Dabei sind einige der Verfahren, wie Schnittalgorithmen und Methoden der Knoten- und Stützpunktmanipulation, Erweiterungen der NURBS-Flächen und -Kurven bezogenen Methoden, die im Detail etwa in [Bar88, PT97, Far97] nachgelesen werden können. Daraus wird ersichtlich, daß die Modellierung von Volume NURBS, als Fortführung der Flächen- und Kurvendarstellungen, auf vorhandene Grundlagen zurückgreifen kann und eine kompatible Erweiterung bildet, in der bisherige Repräsentationen von Freiformflächen und -Kurven verlustfrei integriert und, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben, um die Möglichkeit der Darstellung echter Volumina ausgebaut werden

können.

Bei der folgenden Darstellung der Verfahren ist zu beachten, daß die Präsentation dreidimensionaler Modelle in zweidimensionalen Abbildungen natürlich nicht die Qualität und Aussagekraft erreichen kann, die dasselbe Modell bei interaktiver Visualisierung durch den Anwender mit der Möglichkeit der freien Drehung, Bewegung und Manipulation der verschiedenen Rendering-Parameter bietet. Erst durch die Bewegung des Modells und die dreidimensionale Visualisierung mit modernen Virtual-Reality-Technologien können die Vorteile einer vollständigen Volumenmodellierung in letzter Konsequenz vermittelt werden. Die Abbildungen können dennoch einen Einblick in die Mächtigkeit der in dieser Arbeit eingeführten Volume NURBS geben.

Aufsetzend auf den Definitionen von NURBS-Kurven, -Flächen und -Volumen wird zunächst die Konsistenzwahrung speziell bei der interaktiven Manipulation untersucht. In den folgenden Abschnitten werden Möglichkeiten der Visualisierung unter spezieller Berücksichtigung des geowissenschaftlichen Anwendungsfeldes dargestellt. Dabei werden insbesondere grafische Wiedergabemöglichkeiten von NURBS-Körpern zur Darstellung und Extraktion der inneren Struktur von Parameterverteilungen diskutiert (vgl. [LK90, Las94a, Las94b]).

Neben der Visualisierung sind die Modellierungs- und Manipulationsmöglichkeiten ein wesentlicher Aspekt für den Einsatz räumlicher Repräsentationsmodelle. Dazu zählen einerseits Konzepte zur (semi-)automatischen Generierung dreidimensionaler Modelle aus gegebenen Ausgangsdaten durch Interpolation, Extrapolation und Approximation sowie parametrisierte oder funktionale Beschreibungen; andererseits spielt die Anwendbarkeit für den Benutzer eine wichtige Rolle. Diese Konzepte werden in den Abschnitten 3.3.7 bis 3.3.9 behandelt.

3.3.1 Kontrolle der Stützpunkte

Ein Problem bei der konsistenten Modellierung mit NURBS-Objekten stellt die Anordnung der Stützpunkte im Raum dar. Analog zu NURBS-Flächen können die Stützpunkte eines NURBS-Volumens so gewählt werden, daß sich der resultierende Körper selbst durchdringt, d.h. Teile des Körperinneren werden durch die NURBS-Darstellung mehrfach bestimmt.

In Abbildung 3.12 ist die Durchdringung eines Körpers beispielhaft visualisiert, indem einzelne Teilflächen des Körperinneren dargestellt werden. Der rot markierte Kontrollpunkt wurde so plazierte, daß der resultierende Körper an einigen Stellen seines Inneren zweifach bestimmt ist, d.h., bestimmte Teile des Volumens werden durch zwei verschiedene Parameterwerte (u_1, v_1, w_1) und (u_2, v_2, w_2) definiert. Der Einfluß des hervorgehobenen Stützpunktes bewirkt so die Selbstdurchdringung der resultierenden inneren Struktur des Volumens.

Formal existieren Werte u_1, v_1, w_1 und u_2, v_2, w_2 , $0 \leq u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2 \leq 1$, $u_1 \neq u_2 \vee v_1 \neq v_2 \vee w_1 \neq w_2$ ($\vee$ ist kein exklusives Oder, d.h. es können sich alle drei Parameter unterscheiden), für die die berechneten Punkte des Körpers gleich sind: $p(u_1, v_1, w_1) = p(u_2, v_2, w_2)$.

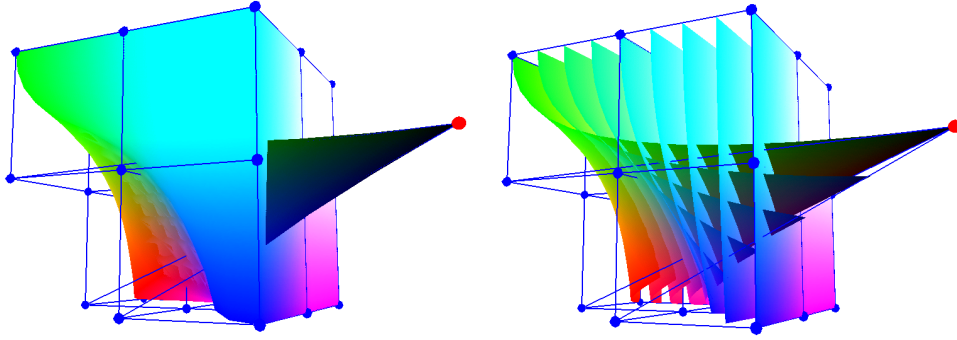


Abbildung 3.12: Selbstdurchdringung eines Volumens

Kontrollgitter, die zu derartigen Überbestimmungen führen, erzeugen nicht nur weniger anschauliche Visualisierungen wie in Abbildung 3.12 gezeigt, sondern stellen vor allem für die Analyse der Struktur des Körperinneren ein schwerwiegendes Problem dar. Insbesondere für den Fall der Parameterverteilung innerhalb eines Körpers ergeben sich Inkonsistenzen bei der Bestimmung von Parameterwerten an einem Punkt des Körperinneren, da mehrere Ergebniswerte berechnet werden können. Durch die Überbestimmung kann keine Aussage über den tatsächlichen Parameterverlauf innerhalb des Körpers getroffen werden.

Die einfachste Möglichkeit zur Vermeidung solcher Überbestimmungen besteht in der Überwachung des Kontrollgitters innerhalb der Anwendung selbst oder der zugrundeliegenden Datenbankverwaltung durch Überwachung des Kontrollgitters bei der Modellierung bzw. der Übertragung der Daten in die Datenbank.

Als Ansatz läßt sich die Kontrolle der Überlagerung der durch das Kontrollgitter aufgespannten schiefen Achtecke wählen. Ein solches Achteck A sei wie folgt durch die acht Eckpunkte $e_0, \dots, e_7 \in S^3$ definiert:

$$A_{ijk} = \{e_0 = s_{ijk}, e_1 = s_{i+1jk}, e_2 = s_{ij+1k}, e_3 = s_{i+1j+1k}, \\ e_4 = s_{ijk+1}, e_5 = s_{i+1jk+1}, e_6 = s_{ij+1k+1}, e_7 = s_{i+1j+1k+1}\}$$

$$0 \leq i \leq n_u, 0 \leq j \leq n_v, 0 \leq k \leq n_w$$

Diese A_{ijk} müssen innerhalb eines Volumens bis auf die begrenzenden Stützpunkte und die Randflächen paarweise disjunkt sein. Damit wird im wesentlichen ausgedrückt, daß die Stützpunkte des Kontrollgitters nur innerhalb der vorgegebenen Gitterstruktur variieren dürfen. Auf der linken Seite in Abbildung 3.13 liegt der rot markierte Punkt innerhalb des begrenzenden Kontrollgitters (blaue Punkte) bzw. des durch das Gitter aufgespannten Raums (hier transparent dargestellt). Auf der rechten Seite ist eine Übertretung der Kontrollgitterstruktur gezeigt, die zu einer Selbstdurchdringung des Volumens führen kann.

Dieses Verfahren stellt ein strenges Kriterium dar, weil ein Stützpunkt mit geringem Einfluß außerhalb des begrenzenden Achtecks A nicht unbedingt zu

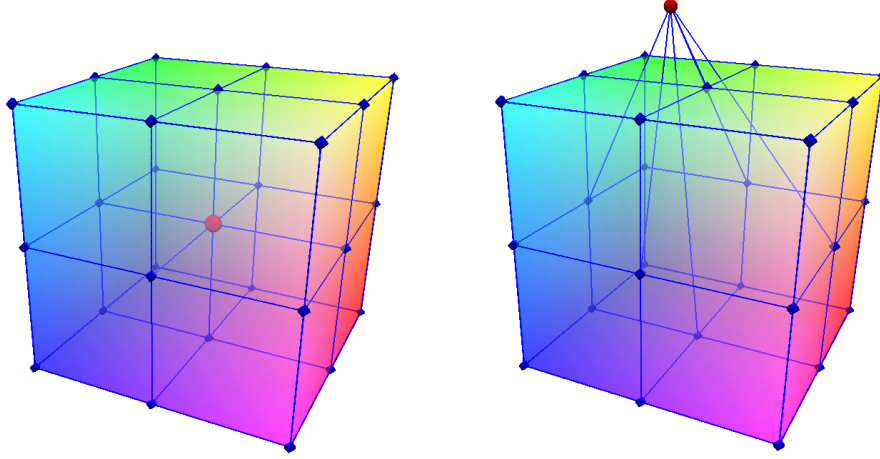


Abbildung 3.13: Stützpunktkontrolle durch Kontrollgitter

einer Selbstdurchdringung des Volumens führt. Dennoch ist die Anwendung dieses Kontrollverfahrens sinnvoll, da eine Verletzung des Kriteriums auf eine schlechte Anordnung des Stützpunkt-Gitters hinweist.

3.3.2 Rendering von NURBS-Volumen

Ausgehend von Definition 3.3 errechnet sich die Visualisierung eines NURBS-Volumens in gerendeter Ansicht, also dessen diskretisierte Darstellung durch Berechnung einzelner Punkte, durch Anwendung der Formel (3.3) auf die Raumkoordinaten $\partial \in \{x, y, z\}$ mit Iteration von 0 bis 1 über die Parameter u, v und w . In Pseudocode ergibt sich damit die folgende Berechnung, wobei die Feinheit der Diskretisierung von der gewählten Schrittweite, d.h. der Anzahl der Unterteilungen des Intervalls $[0, 1]$ in der jeweiligen Laufrichtung (S_u, S_v, S_w) , abhängt:

```

for  $u = 0$  to 1 step  $S_u$ 
  for  $v = 0$  to 1 step  $S_v$ 
    for  $w = 0$  to 1 step  $S_w$ 
       $x = 0$ 
       $y = 0$ 
       $z = 0$ 
       $w = 0$ 
      for  $i_u = 0$  to  $n_u$  step 1
        for  $i_v = 0$  to  $n_v$  step 1
          for  $i_w = 0$  to  $n_w$  step 1
             $x = x + x_{i_u, i_v, i_w} * w_{i_u, i_v, i_w} * N_{i_u, k_u}(u) * N_{i_v, k_v}(v) * N_{i_w, k_w}(w)$ 
             $y = y + y_{i_u, i_v, i_w} * w_{i_u, i_v, i_w} * N_{i_u, k_u}(u) * N_{i_v, k_v}(v) * N_{i_w, k_w}(w)$ 
             $z = z + z_{i_u, i_v, i_w} * w_{i_u, i_v, i_w} * N_{i_u, k_u}(u) * N_{i_v, k_v}(v) * N_{i_w, k_w}(w)$ 
             $w = w + w_{i_u, i_v, i_w} * N_{i_u, k_u}(u) * N_{i_v, k_v}(v) * N_{i_w, k_w}(w)$ 

```

```

        end
    end
end
x = x / w
y = y / w
z = z / w
end
end
end

```

Die $\partial_{i_u i_v i_w}, \partial \in \{x, y, z\}$ seien dabei die Komponenten der Stützpunkte $S_{i_u i_v i_w}$ in den drei Raumrichtungen x, y und z .

Neben der Berechnung der Punkte eines NURBS-Volumens ist deren Visualisierung durch verschiedene Rendering-Verfahren von entscheidender Bedeutung für die Anwendbarkeit in fachspezifischen Problemfeldern. Wie bereits in Abbildung 3.5 d) veranschaulicht, führt das vollständige Rendern eines Volumens dazu, daß innere Strukturen des Körpers nicht mehr sichtbar sind. Eine Möglichkeit zur Vermeidung derartiger Verdeckungen ist die ebenfalls in Abbildung 3.5 c) veranschaulichte Drahtgitterdarstellung.

An dieser Stelle werden zwei weitere Verfahren vorgestellt, mit denen NURBS-Volumen gerendert werden können, um innere Strukturen nicht zu verdecken. In Abschnitt 3.3.4 wird anschließend erläutert, wie das Körperinnere durch Isoparameterdarstellungen hervorgehoben werden kann.

Die erste Möglichkeit, Verdeckungen des Körperinneren durch Außenflächen mit Hilfe transparent gerendeter Ansichten zu vermeiden, wurde in dieser Arbeit bereits mehrfach angewandt, zum Beispiel in Abbildung 3.5 b). Je nach Transparenzstufe tritt die äußere Form des Volumens mehr und mehr in den Hintergrund und die inneren Strukturen werden deutlicher hervorgehoben. Dennoch ist bei dieser Darstellungsform keine detaillierte Zuordnung der inneren Strukturen zu erkennen.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, nicht das vollständige Volumen zu rendern, sondern lediglich in bestimmten Abständen eine Berechnung der Punkte vorzunehmen und diese zu visualisieren. Eine Form dieser Rendermethodik, die Drahtgitterdarstellung, wurde bereits in Abbildung 3.5 c) verwendet. Eine weitere Möglichkeit ist die Darstellung der in Ausschnitten berechneten Punkte durch Kugeln oder andere Standardkörper. Insbesondere die gleichzeitige Verwendung von Kugel- und Drahtgitterdarstellung erlaubt, wie in Abbildung 3.14 veranschaulicht, eine sehr aufschlußreiche Repräsentation der inneren Struktur, ohne die Zuordnung innerhalb des Volumens zu verlieren. Wie in der Abbildung deutlich wird, können auch die Farben im hinteren Bereich des Körpers erkannt und räumlich eingeordnet werden.

Wie diesem Beispiel zu entnehmen ist, kann die Verwendung verschiedener Darstellungsverfahren eingesetzt werden, um bestimmte Details deutlicher hervorzuheben. Eine Anwendung hierfür ist die Visualisierung von Parametervertei-

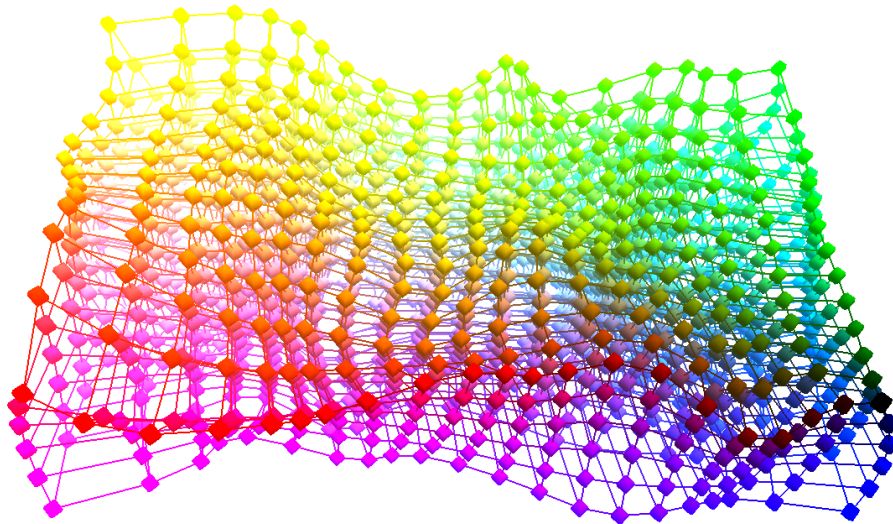


Abbildung 3.14: Rendering eines NURBS-Volumens mit Kugeln und Drahtgitter

lungen innerhalb geologischer Strukturen, die im folgenden Abschnitt behandelt werden.

3.3.3 Visualisierung von Parameterverteilungen

In der Begründung zu dieser Arbeit wurde bereits auf ein wesentliches Problem bei der Repräsentation geowissenschaftlicher, räumlicher Modelle hingewiesen: die Darstellung inhomogener geologischer Körper und Strukturen. In diesem Abschnitt soll anhand eines einfachen Beispiels die Überwindung dieses Problems durch Volume NURBS vorgestellt werden.

Zu diesem Zweck soll zunächst die in dieser Arbeit verwendete Visualisierung von Volume NURBS näher betrachtet werden. NURBS-Volumina werden in den Abbildungen mit Farbverläufen in allen Raumrichtungen dargestellt. Dies soll zunächst der Verdeutlichung dienen, daß jeder Punkt des Körperinneren mathematisch bestimmt ist und einzeln – und somit in einer anderen Farbe – berechnet und dargestellt werden kann.

Ferner wird daran auch die Zuweisung anwendungsspezifischer Parameter innerhalb inhomogener Strukturen aufgezeigt. Die Farbverläufe der abgebildeten Volume NURBS wurden durch Zuweisung von Farbwerten zu den Stützpunkten des Kontrollgitters realisiert. Bei dem Verfahren des Renderings werden diese Farbwerte mit dem NURBS-Verfahren – und damit in Abgleich mit der repräsentierten Struktur – interpoliert und dargestellt. Ein farblich kodiertes Kontrollgitter und das resultierende gerenderte NURBS-Volumen sind in Abbildung 3.15 gezeigt.

Die Möglichkeiten der farblichen Kodierung einzelner Stützpunkte und die Interpolation der Zwischenstufen mit dem NURBS-Verfahren kann insbesonde-

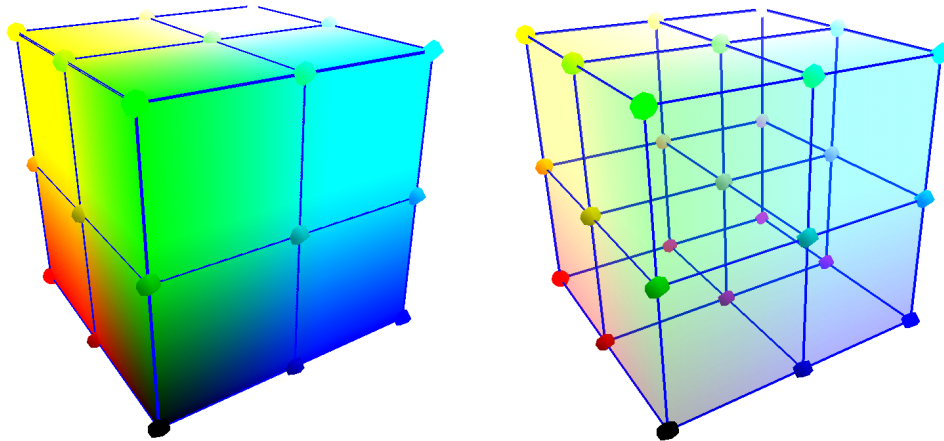


Abbildung 3.15: Dreidimensionaler Farbverlauf durch farblich kodiertes Kontrollgitter

re für die Beschreibung von Inhomogenitäten in geologischen Strukturen oder für die Modellierung und Visualisierung von Parameterverteilungen angewandt werden. Hydrodynamische oder hydrogeochemische Einflüsse können innerhalb der Strukturen eines geologischen Körpers durch Zuweisung von Farbwerten zu Parameterwerten und deren Kombination mit dem Kontrollgitter veranschaulicht und untersucht werden. Die NURBS-Methodik ermöglicht es, anhand von Gewichtungsparemtern Einflüsse unterschiedlicher Strukturen je nach Anforderung zu variieren und naturgetreu zu visualisieren.

Zur Veranschaulichung der Möglichkeiten wurde in Abbildung 3.16 das Modell eines geologischen Lockergesteinskörpers (grün dargestellt) auf der Basis von Volume NURBS mit einem farblich hervorgehobenen Schadstoffeintrag visualisiert. Die Strömungsmechanik in Porenwasserräumen kann im lokalen Maßstab häufig als isotrop beurteilt werden. In dem hier angenommenen unbeeinflussten Porenwasserleiter bildet sich durch den Eintrag von CKWs (Chlorkohlenwasserstoffe) in diesem Strömungsregime eine Schadstofffahne aus, die einer berechenbaren Dynamik unterliegt. Die dargestellten organischen Fluidphasen mit niedrigerer Dichte als Wasser setzen sich basal an grundwasserhemmenden lithologischen Einheiten (Schluff- oder Tonkörper) ab (vgl. [MU83]). Wie der Grafik zu entnehmen ist, erfolgt der Übergang des schadstoffbelasteten Bereichs in die unveränderten Strukturen kontinuierlich. Im oberen Teil der Abbildung ist der vollständig gerenderte Körper dargestellt. Im unteren Teil der Grafik ist eine Kombination von gerendeter Darstellung zur Hervorhebung des kontaminierten Bereichs und der Drahtgitterdarstellung zur Verdeutlichung des umliegenden Lockergesteinskörpers abgebildet.

Bei der Einführung des Geo-Datenmodells GeoCORE in Kapitel 6 wird gezeigt, wie verschiedene thematische Aspekte und somit verschiedene geologische Parameter oder Meßwerte anhand einer einzigen NURBS-Darstellung integriert verwaltet und je nach Bedarf visualisiert werden können. Damit ist erstmals

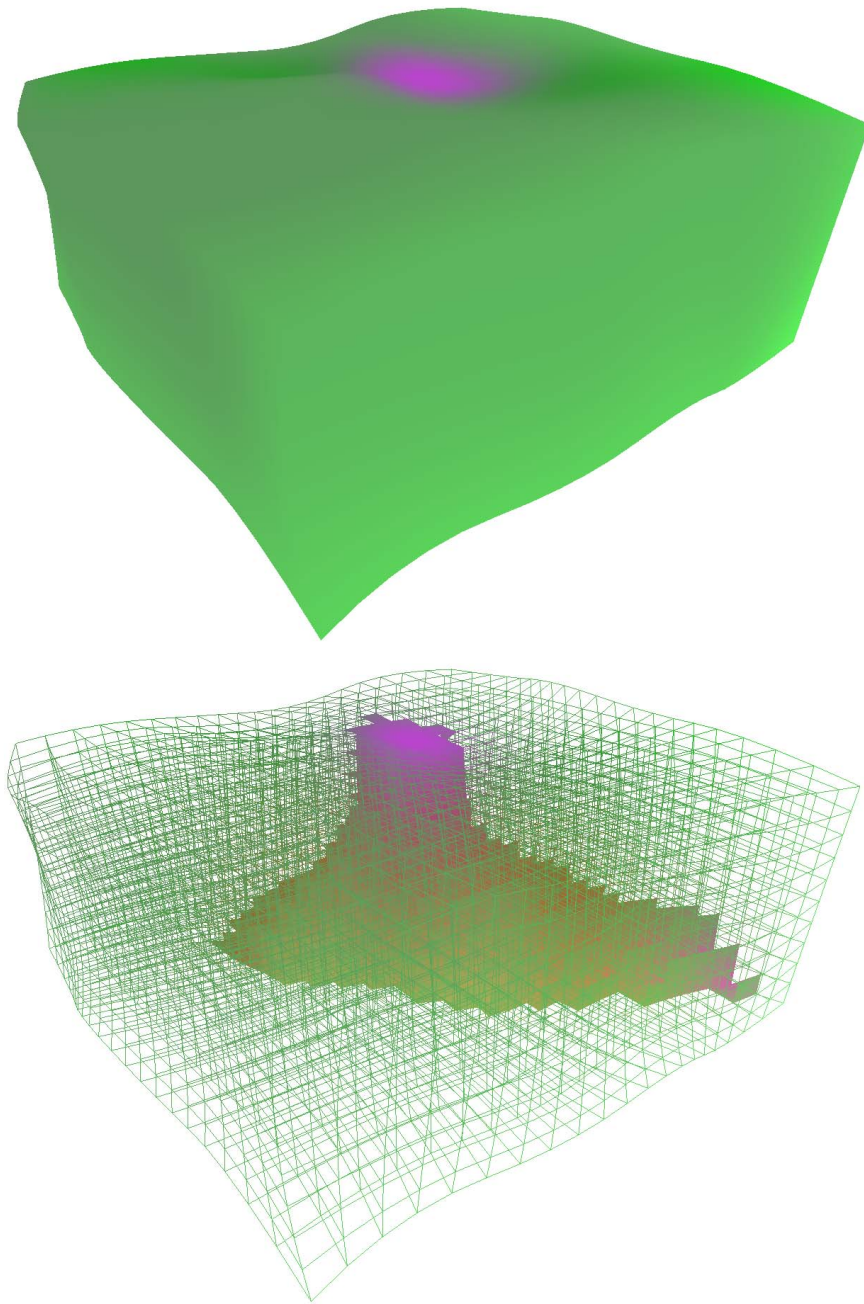


Abbildung 3.16: Visualisierung eines CKW-Schadstoffeintrags in einen Porenwasserkörper

die Möglichkeit gegeben, Untersuchungen an inhomogenen geologischen Strukturen auf der Grundlage eines kontinuierlichen Interpolationsverfahrens durchzuführen, das die modellierte innere Struktur berücksichtigt.

3.3.4 Isoparameter-Kurven und -Flächen

Wie den Definitionen 3.2 und 3.3 zu entnehmen ist, erfolgt die Erweiterung von NURBS-Kurven zu NURBS-Flächen bzw. von NURBS-Flächen zu NURBS-Körpern jeweils durch die Erweiterung der Summationsformel um eine weitere Laufrichtung bzw. einen weiteren Parameterwert.

Durch die Umkehrung, d.h. durch Setzen einer der Parameter auf einen konstanten Wert lassen sich sogenannte Isoparameter-Kurven und -Flächen aus NURBS-Volumen extrahieren.

Bei NURBS-Flächen können die Begrenzungskanten durch Setzen jeweils einer der Parameter u bzw. v auf konstant 0 bzw. 1 errechnet werden. Wird einer der Parameter auf Werte zwischen 0 und 1 gesetzt, so werden die inneren Isoparameter-Kurven der Fläche extrahiert.

Zur Extraktion der begrenzenden Isoparameter-Flächen eines NURBS-Körpers wird jeweils einer der drei Parameter u , v oder w auf 0 bzw. 1 gesetzt, die begrenzenden Isoparameterkurven eines NURBS-Körpers werden durch konstantes Setzen jeweils zweier Parameter auf 0 oder 1 errechnet, wie in Abbildung 3.17 exemplarisch dargestellt. Im linken Teil der Abbildung wurden für einen Körper die möglichen Kombinationen visualisiert, in denen jeweils ein Parameter variiert und zwei Parameter mit den konstanten Werten 0 bzw. 1 besetzt sind. Die Abbildung der rechten Seite wurde durch die Berechnung aller Kombinationen von einem konstanten und zwei variierenden Parametern erzeugt. Eine Zuordnung der Parameter zu den begrenzenden Kurven und Flächen wird in Abschnitt 6.2.3 als Grundlage für die Beschreibung der internen Speicherstruktur von GeoCORE vorgenommen.

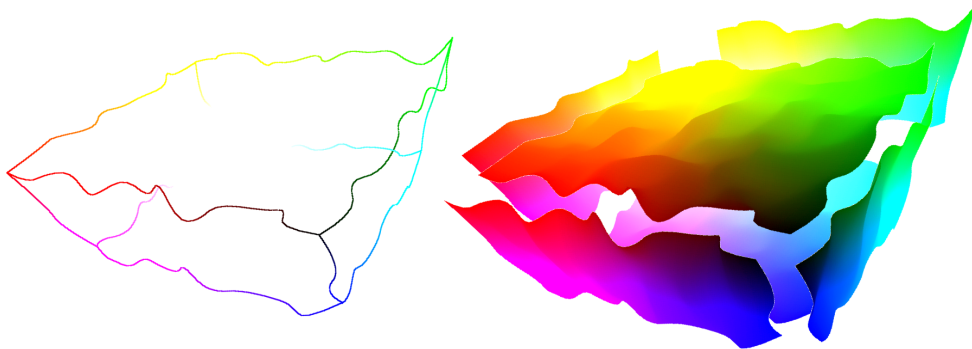


Abbildung 3.17: Isoparameter-Kurven und -Flächen eines NURBS-Volumens

Diese Eigenschaften werden vor allem bei der Visualisierung von NURBS als Wireframe-Darstellungen eingesetzt, um Schnellansichten auf der Grundlage weniger Parameterberechnungen in Gitterstruktur zu erzeugen. Bezogen auf NURBS-Volumen lässt sich dadurch auch die innere Struktur des Körpers visualisieren und analysieren, da diese bei vollständiger Volumenvisualisierung verdeckt wird. In Abbildung 3.18 wird ein NURBS-Volumen anhand seiner Isoparameterflächen a) in u -Richtung mit den konstanten Werten $\{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$

und b) in v -Richtung mit $\{0, 0.33, 0.66, 1\}$ visualisiert. In c) ist die vollständig gerenderte Ansicht des gleichen Volumens abgebildet, die keinen Aufschluß über das Innere des Körpers liefert.

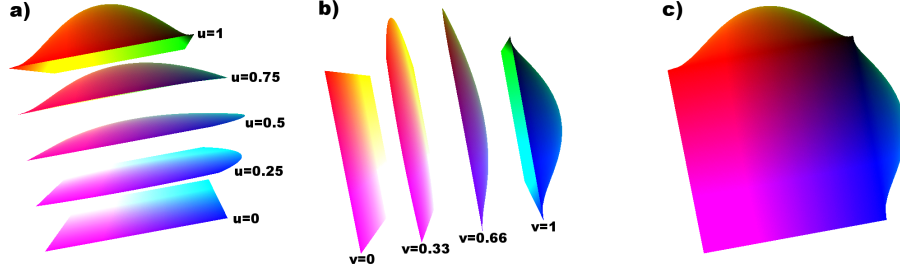


Abbildung 3.18: Isoparameter-Flächen eines NURBS-Volumens für variierende Parameter u bzw. v

Zur Analyse der inneren Struktur von Volumen kann dieses Verfahren ferner dazu verwendet werden, den Körper benutzergeführt scheibenweise zu durchlaufen. Der Benutzer kann dabei die Laufrichtung vorgeben, indem der konstant zu setzende Parameter vorgegeben wird. Die dargestellten Flächen visualisieren dann die durch die Kontrollpunkte definierte innere Struktur sowie die Eigenschaften des Körperinneren durch Darstellung der Parameterverteilungen auf den Flächen.

3.3.5 Parameterberechnung

Das inverse Problem zur Berechnung von Isoparametern ist die Ermittlung der Parameter u, v und w einer NURBS-Darstellung $p(u, v, w)$ zu einem gegebenen Punkt (x, y, z) , d.h. die Auflösung der Gleichung $p(u, v, w) - (x, y, z) = 0$.

Leider ist diese Berechnung aufgrund der Definition von NURBS nicht direkt möglich. Daher werden mit Hilfe von Iterationsmethoden, etwa dem Newton-Verfahren, die Parameter durch schrittweise Annäherung berechnet (vgl. [CS85, PT97]). Dabei kann man sich die konvexe Hülle-Eigenschaft von NURBS zu Nutze machen, um einen guten Startpunkt für den Beginn der Iteration zu bestimmen. Diese wird solange fortgesetzt, bis der Abstand zwischen dem vorgegebenen Punkt und dem mit den Parametern berechneten Punkt unter einer vorher definierten Schranke liegt.

Formal wählt man sechs Startparameter $0 \leq u_1, u_2, v_1, v_2, w_1, w_2 \leq 1$, die einen Quader im Parameterraum aufspannen, wie in Abbildung 3.19 verdeutlicht. Zur Beschleunigung des Verfahrens kann bei der Wahl der Startpunkte die konvexe Hülle-Eigenschaft von NURBS ausgenutzt werden, so daß der Ausgangssuchraum minimal gehalten wird.

Innerhalb des aufgespannten Suchraums werden mit vorgegebenen Schrittweiten $q_u, q_v, q_w \in \mathbb{N}$ über die drei Parameterrichtungen Punkte

$$p_{i_u i_v i_w} = p \left(u_1 + \frac{u_2 - u_1}{q_u} i_u, v_1 + \frac{v_2 - v_1}{q_v} i_v, w_1 + \frac{w_2 - w_1}{q_w} i_w \right)$$

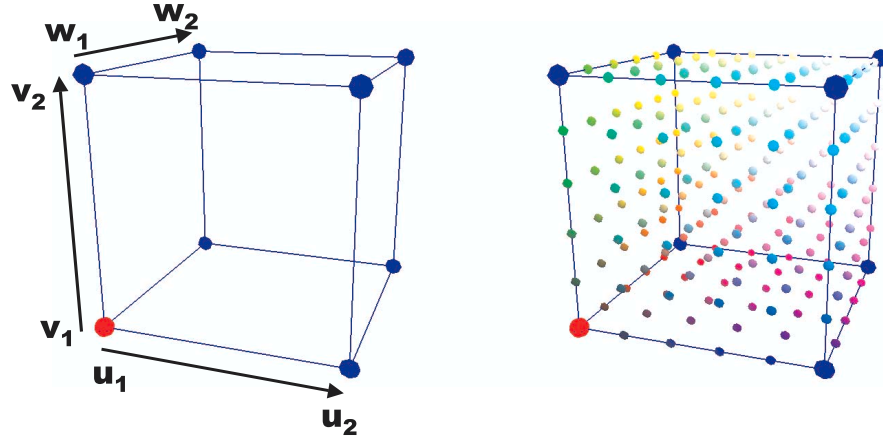


Abbildung 3.19: Iterationsverfahren zur Parameterberechnung

für $i_u = 1, \dots, q_u, i_v = 1, \dots, q_v, i_w = 1, \dots, q_w$ des Körpers berechnet. Diese Punkte sind in Abbildung 3.19 im rechten Teil der Grafik beispielhaft dargestellt.

Aus den berechneten Punkten werden die benachbarten Punkte als neue Startwerte ausgewählt, in deren aufspannenden Quader der gesuchte Punkt enthalten sein könnte, wobei der Abstand im euklidischen Raum als Grundlage genommen werden kann:

$$p_{i_u i_v i_w} \leq (x, y, z) \leq p_{i_u+1 i_v+1 i_w+1}$$

Die Parameter des aufspannenden Quaders $0 \leq u'_1, u'_2, v'_1, v'_2, w'_1, w'_2 \leq 1$ werden wiederum als Grundlage für einen neuen Iterationsschritt genommen, bis

1. entweder für Parameter u_r, v_r, w_r eine Genauigkeitsschranke ϵ

$$|p_{u_r v_r w_r} - (x, y, z)| < \epsilon$$

erreicht ist und die Iteration erfolgreich abgebrochen werden kann,

2. oder keine weitere Verbesserung des Ergebnisses in dem aktuellen Suchraum erzielt werden kann. In diesem Fall muß mit Backtracking ein neuer Teilsuchraum bestimmt und die Iteration von neuem gestartet werden.

3.3.6 Schnittberechnung

Isoparameterkurven und -flächen visualisieren die innere Struktur des Körpers per se. Zur Analyse des Körperaufbaus können zusätzlich planare oder Freiform-Flächen als Schnitte durch den Körper gelegt werden, die weiteren Aufschluß über interne Parameterverteilungen geben und etwa im Anwendungsfeld der Geologie zur Generierung von Profilen einsetzbar sind. Bei der Modellierung ist

außerdem die Berechnung von Schnitten zweier NURBS-Objekte notwendig, um beispielsweise aus einem bestehenden geologischen Körper einen Tunnel auszuschneiden.

Im Gegensatz zur Isoparameter-Berechnung und in Analogie zur Parameterberechnung können Schnitte jedoch nicht direkt aus der Definition der NURBS-Körper abgeleitet werden. Daher beruht die Schnittberechnung wiederum auf der Annäherung zwischen den zu schneidenden Objekten durch schrittweise Iteration und Minimierung des Abstands der Schnittpunkte. Es ist also das Iterationsverfahren aus dem vorangegangenen Abschnitt 3.3.5 für die Berechnung der Schnittpunkte mit vorgegebener Genauigkeit anzuwenden.

Das Ergebnis des Schnitts für zwei NURBS-Objekte M und N ist eine endliche Menge von Punkten

$$\begin{aligned} P &= \{(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_i, y_i, z_i)\} \\ &= \{M(u_{m_1}, v_{m_1}, w_{m_1}), \dots, M(u_{m_i}, v_{m_i}, w_{m_i})\} \\ &= \{N(u_{n_1}, v_{n_1}, w_{n_1}), \dots, N(u_{n_i}, v_{n_i}, w_{n_i})\}, \end{aligned}$$

die auch leer sein kann, falls kein Schnitt zwischen den beiden Objekten besteht.

3.3.7 Volumengenerierung

Insbesondere im Bereich der Geowissenschaften sind Volumen in vielen Fällen aus begrenzenden Flächen zu generieren. Bei der Modellierung geologischer Untergrundmodelle aus den Daten von Bohrungen, Aufschlüssen oder seismischen Untersuchungen liegen hauptsächlich Informationen über die Schichtgrenzen der geologischen Einheiten vor. Zur Überführung dieser flächenhaften Information in ein Volumenmodell ist die Verbindung von Flächen zu einem Körper zu automatisieren. Dazu werden im folgenden Verfahren eingeführt, die unter Berücksichtigung von Randbedingungen aus einer oder mehr NURBS-Flächen ein NURBS-Volumen erzeugen.

Flächenverschiebung

Liegt je Schicht nur eine Fläche vor, kann ein Volumenkörper durch Verschiebung der Ausgangsfläche erzeugt werden. Im einfachsten Fall wird eine zweite Fläche in einem bestimmten Abstand sowie einer vorgegebenen Richtung von der Originalfläche erzeugt und mit dieser linear verbunden, d.h., Kontrollpunkte mit gleichen Parametern werden verbunden und bilden das Kontrollgitter des erzeugten Körpers.

Formal wird auf alle Stützpunkte $p_i = (x_i, y_i, z_i), i = 1, \dots, n$ einer NURBS-Fläche F ein Verschiebungsvektor $V = (x, y, z)$ addiert und in eine zweite Flächenbeschreibung F' mit $p'_i = (x_i + x, y_i + y, z_i + z)$ überführt. Die Kontrollpunkte dieser beiden Flächen F und F' werden dann zu dem körperbeschreibenden Kontrollgitter K zusammengefaßt:

$$K = \{p_1, \dots, p_n, p'_1, \dots, p'_n\}$$

Im zweiten Fall kann die Ausgangsfläche F durch Angabe einer NURBS-Kurve C zu einem geschwungenen Volumen erweitert werden. Zu diesem Zweck wird die richtungsbestimmende Kurve durch Translation in den Parameterursprung $f(u_0, v_0)$ der Ausgangsfläche verschoben. Dann werden die Verschiebungsvektoren $v_i(x, y, z) = c(u_i, v_i, w_i) - c(u_{(i+1)}, v_{(i+1)}, w_{(i+1)})$, die sich zwischen je zwei Kontrollpunkten der Kurve ergeben, auf alle Kontrollpunkte der Fläche angewandt, so daß diese entlang der Kurve verschoben wird. Hat die Translationskurve n Kontrollpunkte, so besteht das resultierende Kontrollgitter des NURBS-Volumens aus n Kopien der verschobenen Fläche.

Auf der Grundlage derartiger Verschiebungen definierte Volumen werden als *sweep volumes* bezeichnet. Sie können zur Erzeugung sowohl natürlicher als auch technischer Objekte als Modellierungsgrundlage eingesetzt werden. So läßt sich der Ausbruch eines Tunnels durch die Angabe des Tunnelquerschnitts und den Verlauf der Tunnelachse auf einfache Art und Weise erzeugen. Die Faltung eines Gebirges läßt sich durch Vorgabe der vertikalen Form der verformten Schicht und einer funktional bestimmten Verschiebungskurve repräsentieren.

In Abbildung 3.20 wurde eine rechteckige Grundfläche (rot) entlang einer durch zwei überlagerte Sinuswellen bestimmten Kurve verschoben, um Faltungen erster und zweiter Ordnung darzustellen. Die Stützpunkte der Translationskurve können für eine Faltung zweiter Ordnung dabei wie folgt bestimmt werden:

$$s_i = \left\{ \begin{array}{l} x(i) = i \\ y(i) = \left\{ \begin{array}{ll} i + \sin(i) & \sin(i) < c \\ i + \sin(i) + f * \sin(i) & sonst \end{array} \right. \\ z(i) = 0 \end{array} \right\}$$

Der Faktor f gibt die Stärke der überlagerten Faltung vor, die Konstante c bestimmt die Höhe der Faltung zweiter Ordnung.

Da die Kurve funktional beschrieben ist, lassen sich durch Parameterveränderungen unterschiedlichste Faltungen beliebiger Ordnung erzeugen. Diese Parameter könnten über die Bedienoberfläche eines Systems vom Anwender variiert werden, so daß die generierten Faltungen als Grundlage der Modellierung einsetzbar wären.

Verbindung disjunkter Flächen

Bei der Untersuchung des geologischen Untergrundes liegen meist Informationen zu den Schichtgrenzen vor. Im folgenden wird die Verbindung von zwei oder mehr Flächen vorgestellt, die disjunkt zueinander sind und in einer bekannten Reihenfolge im Raum liegen. Die Flächen können beliebig im Raum orientiert sein. Zur Vereinfachung der Beschreibung wird jedoch angenommen, daß die Flächen übereinander liegen.

Die Zusammenführung disjunkter Flächen zu einem Volumen erfordert den Abgleich der Anzahl der Kontrollpunkte und der Ordnung in u - und v -Richtung. Die Flächen mit jeweils geringerer Knoten- bzw. Ordnungszahl werden an die

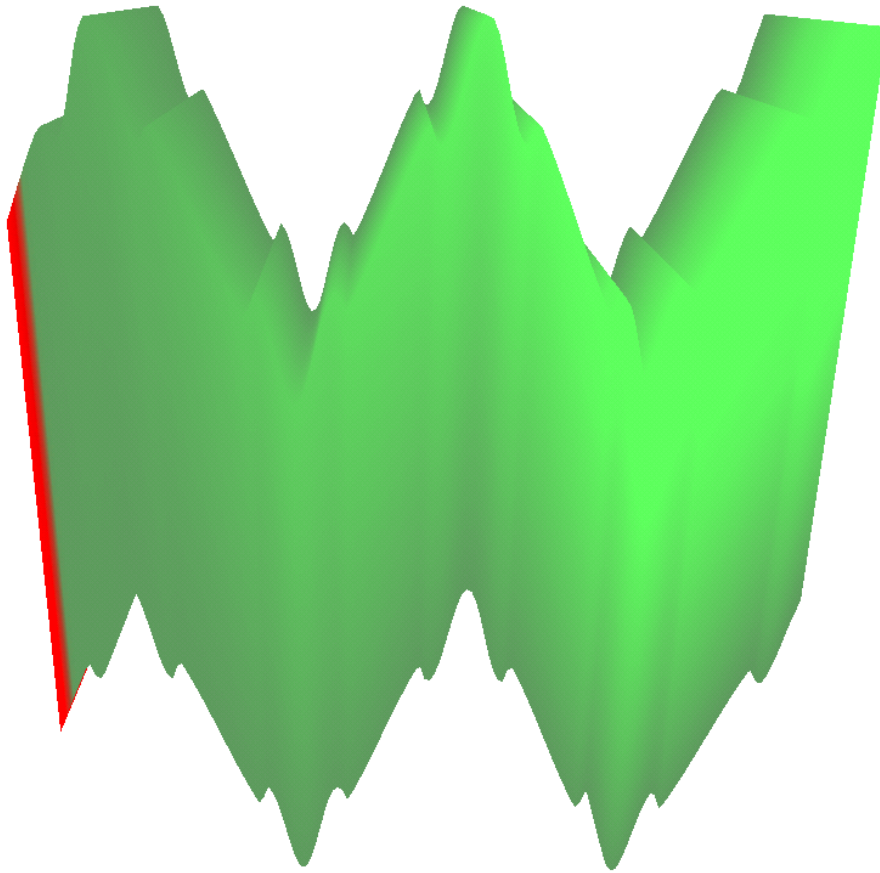


Abbildung 3.20: Funktional generierte Faltungen erster und zweiter Ordnung (Einhüllende und Überlagerung)

jeweilige Fläche mit maximaler Anzahl von Kontrollpunkten bzw. maximaler Ordnung angeglichen, um keinen Informationsverlust zu haben. Verfahren zur Erweiterung einzelner Flächen um Kontrollpunkte oder zur Erhöhung der Ordnung sind theoretisch und praktisch umfangreich erforscht, siehe zum Beispiel [PT97, Far97]. Sie sollen hier nicht weiter diskutiert werden.

Darüber hinaus ist unter Umständen eine Anpassung der Parameterlaufrichtungen erforderlich, um bei der Zusammenführung Verdrehungen in dem resultierenden Volumen zu vermeiden. Zu diesem Zweck sind die Parameter der Flächen so zu vertauschen, daß die Summe der Abstände aller Eckpunkte mit gleichen Parametern u, v und $0, 1$ minimiert wird. Die Vertauschung der Parameterlaufrichtungen innerhalb des Kontrollgitters verändert nur die Verwaltung der Kontrollpunkte und hat keinen Einfluß auf die Form der Fläche per se.

Die Flächen können direkt in ein Volumen überführt werden, indem die Stützpunkte der in ihren Parametern angeglichenen Flächen zu einem gemeinsamen Kontrollgitter kombiniert werden, d.h., Kontrollpunkte mit gleichen Parametern in der Reihenfolge benachbarter Ausgangsflächen werden linear miteinander

der verbunden. Der resultierende Körper hat dann in Richtung des generierten Parameters w so viele Kontrollpunkte, wie Flächen verbunden wurden. Gegebenenfalls können zwischen je zwei benachbarten Flächen weitere Stützpunkte durch Interpolation erzeugt werden, falls nachfolgende komplexe innere Strukturen in dem generierten Körper modelliert und untersucht werden sollen.

Ein mit dieser Vorgehensweise erzeugter Körper heißt *skinned* oder *ruled volume*. In Abbildung 3.21 wird dieses Verfahren anhand der Verbindung zweier disjunkter Flächen zu einem Körper verdeutlicht. Im linken Teil der Grafik sind die zu verbindenden, disjunkten Flächen dargestellt, in der Mitte wurden die bezüglich ihrer Parameter benachbarten Kontrollpunkte linear verbunden und in der Darstellung rechts ist das resultierende Volumen (transparent) visualisiert.

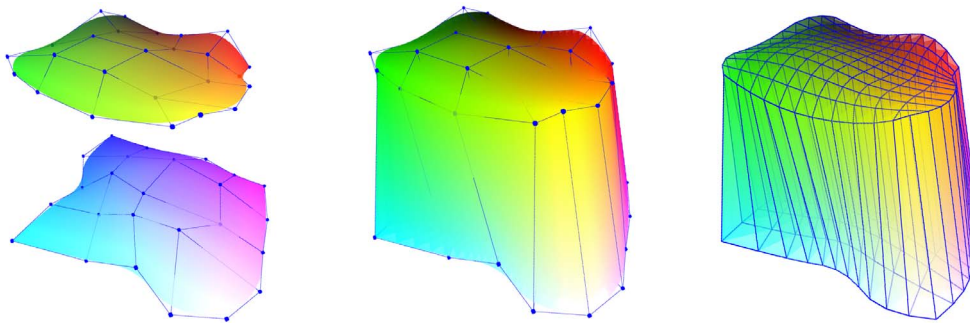


Abbildung 3.21: Skinned Volume: Generierung eines Körpers aus zwei begrenzenden Schichten

Diese einfache Umwandlung zweier Flächen zu einem Körper hat den Vorteil, daß die ursprünglichen Flächen bis auf eventuell notwendige Parameteranpassungen unverändert zur Darstellung des Volumens übernommen werden und damit im wesentlichen auch der Speicherbedarf konstant bleibt. Auf dieser Grundlage können bereits existierende, flächenhafte Modelle effizient und schnell in echte Volumenmodelle konvertiert werden.

3.3.8 Generierung innerer Punkte

Wie bei der Volumengenerierung in Abschnitt 3.3.7 dargestellt, ist in vielen Fällen eine Modellierung des Inneren eines Körpers nicht notwendig, da dieser als vollständiger Homogenbereich angesehen wird oder die innere Struktur für das Raummodell nicht von Bedeutung ist. Derartige Volumen haben in einer Parameterichtung nur zwei Kontrollpunkte und bestehen im wesentlichen aus zwei Flächen, die zu einem Körper verbunden sind.

Soll zu derartigen Darstellungen eine innere Struktur erzeugt werden, muß das beschreibende Kontrollgitter in dieser Parameterichtung um eine oder mehrere weitere Ebenen mit Stützpunkten ergänzt werden. Ziel ist dabei die Erhaltung der ursprünglichen Struktur und Form des Ausgangskörpers.

In der Theorie der Non Uniform Rational B-Splines wird die Erweiterung eines Kontrollgitters einer Fläche um weitere Stützpunkte durch Einfügen eines Knotens in einen der Knotenvektoren U oder V und anschließende Bestimmung eines neuen Kontrollgitters mit n_u bzw. n_v zusätzlichen Stützpunkten realisiert, d.h., die Beibehaltung der Form beinhaltet eine Restrukturierung des ursprünglichen Kontrollgitters. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens findet sich in [PT97].

Die Vorgehensweise läßt sich auch auf Zwischenbereiche eines Körpers anwenden, falls dort mehr Strukturinformation benötigt wird. Je nach Parameterrichtung, in der weitere Strukturbeschreibungen benötigt werden, wird der entsprechende Knotenvektor U , V oder W mit dem genannten Verfahren erweitert und das neue Kontrollgitter berechnet.

3.3.9 Darstellung von Standardkörpern

Neben natürlichen Gegebenheiten der Realwelt sind in Geo-Informationssystemen auch Darstellungsmöglichkeiten für technische Körper vorzusehen, da nicht nur geologische sondern auch geotechnologische und bautechnische Sachverhalte bearbeitet werden müssen. Nachdem bereits erläutert wurde, wie geologische Körper auf der Grundlage der NURBS-Darstellung modelliert und manipuliert werden können, wird in diesem Abschnitt gezeigt, daß auch Standardkörper, wie Kugel, Zylinder, Kegel, etc., sehr effizient dargestellt werden können. Diese bilden eine flexible Modellbasis für die Konstruktion technischer Körper und können in Analogie zu den Standardelementen herkömmlicher CAD-Systeme eingesetzt werden. Aufgrund derselben Methodik zur Modellierung technischer und natürlicher Körper wird die Zusammenführung beider Domänen in einem Modell vereinfacht, da nicht mit unterschiedlichen Modellierungs-Paradigmen gearbeitet werden muß.

Die Beschreibung von Standardkörpern mit den Mitteln von NURBS-Darstellungen sind vielfältig mit durchaus sehr unterschiedlichen Zielsetzungen realisierbar. Mag im einen Fall die möglichst effektive, also wenige Kontrollpunkte umfassende Beschreibung das primäre Ziel sein, so ist in anderen Fällen häufig die mögliche Manipulierbarkeit des resultierenden Körpers von ausschlaggebender Bedeutung.

Mit den Mitteln unterschiedlicher Gewichtungen der Kontrollpunkte sowie variierender Grad- und Knotenzahlen stehen bei der Modellierung eine Vielzahl möglicher Ansätze zur Verfügung. An dieser Stelle sollen die wesentlichen Prinzipien der Beschreibung von Standardkörpern eingeführt werden.

In den meisten Fällen wird dabei als einfachste Form der Modellierung auf das bereits beschriebene Verfahren des Sweepings oder die Generierung von Volumen durch Rotation zurückgegriffen. Rotationskörper werden durch Rotation einer Ausgangsfläche um eine Gerade beschrieben.

Bei vollständiger Rotation um die Gerade fällt die Ausgangsfläche mit der letzten Fläche zusammen. Wird ein geringerer Rotationswinkel gewählt, können Segmente des Rotationskörpers definiert werden.

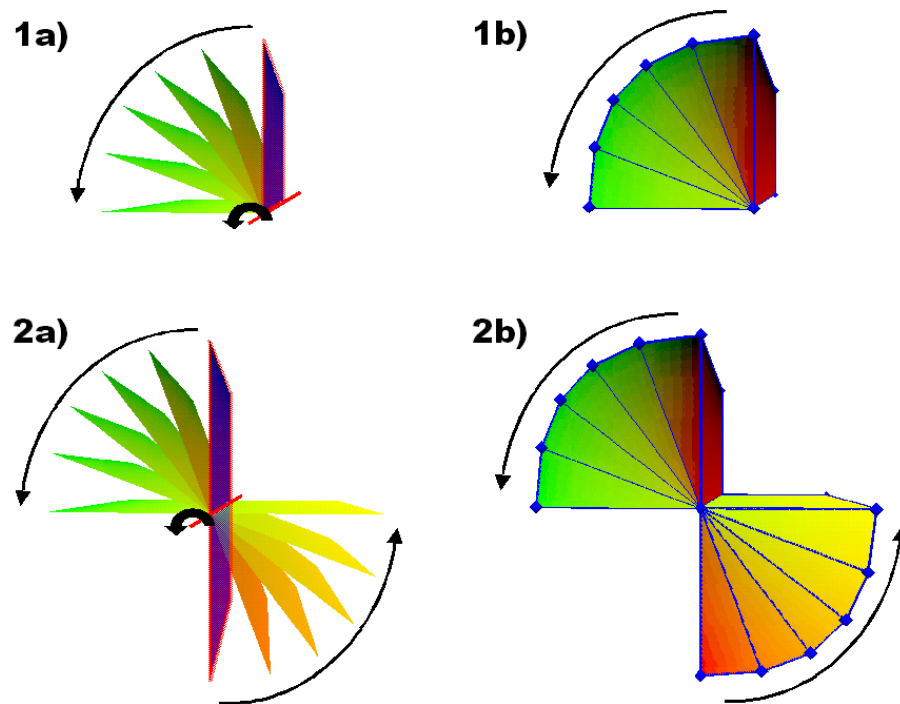


Abbildung 3.22: Rotationskörper mit unterschiedlicher Lage der Rotationsachse

Der resultierende Rotationskörper wird vor allem durch die Lage der Geraden relativ zur Lage der initialen Fläche bestimmt. Zur Vermeidung fehlerhafter Darstellungen ist zu beachten, daß das erzeugte Volumen sich nicht selbst durchdringt (s. Abschnitt 3.3.1). Daher sollte als Ursprungsfläche immer eine planare Fläche gewählt werden, die in einer Ebene mit der Geraden liegt. Schneidet bei einer derartigen Ausgangskonfiguration die Gerade die Ausgangsfläche nicht nur in ihrem Rand, sollte der Rotationswinkel maximal 180° betragen, da bei weiterer Drehung keine Veränderung der Form bewirkt und eine Selbstdurchdringung des Körpers erzeugt wird. In Abbildung 3.22 1a) und 1b) wird die Ausgangsfläche entlang einer Kante gedreht, was eine vollständige Rotation um 360° erlaubt. In 2a) und 2b) der Abbildung liegt die Rotationsachse in der Mitte der Ausgangsfläche, so daß bereits nach einer Rotation um 180° ein geschlossener Zylinder entsteht.

Je nach Form der Ausgangsfläche wird bei der Rotation in bestimmten Grad-schritten eine um die Gerade rotierte Kopie der ursprünglichen Fläche erzeugt. Häufig werden Schritte im Abstand von 45° gewählt, da dann mit minimaler Anzahl von Kontrollpunkten der Rotationskörper beschrieben wird. Wählt man die Abstände größer, kann es zu Deformationen durch die NURBS-Beschreibung kommen, d.h., die resultierende äußere Körperumrandung verliert ihre exakte Kreisform.

Auf der Grundlage der Rotation läßt sich sehr einfach eine Kugel beschreiben. Dazu wird eine planare Beschreibung einer Kreisfläche längs ihrer eigenen Achse

um 180° gedreht. Plaziert man die Gerade außerhalb der Kreisfläche, erhält man durch Rotation um 360° einen Torus.

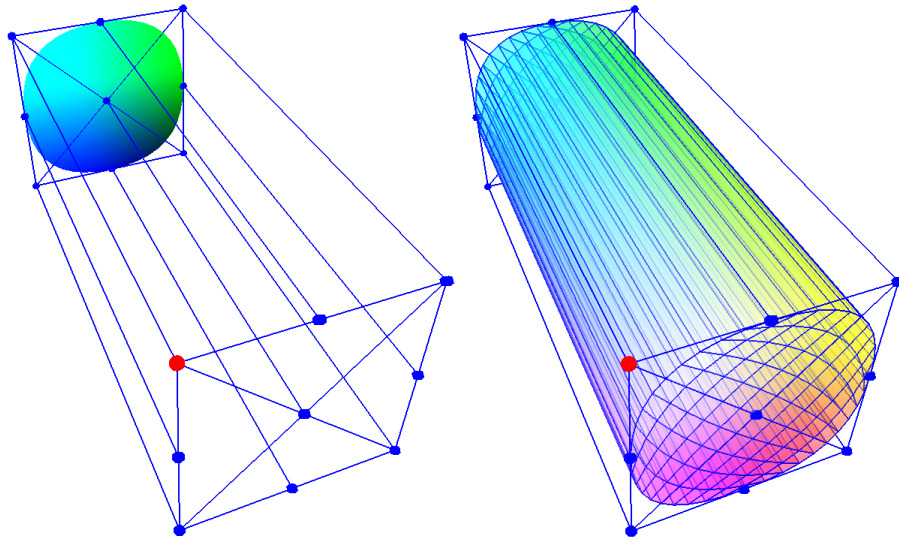


Abbildung 3.23: Durch Sweeping entstandener Zylinder

Ein Zylinder kann durch Rotation eines Rechtecks entlang einer Kante oder durch Sweeping einer Kreisfläche entlang einer Geraden erzeugt werden. Abbildung 3.23 illustriert das Ergebnis eines durch Sweeping entstandenen Zylinders. Wie der Grafik zu entnehmen ist, genügen bereits 18 Kontrollpunkte in einem $3 \times 3 \times 2$ Gitter zur exakten Darstellung.

In Analogie entsteht ein Kegel durch die Rotation eines Dreiecks um eine Kante.

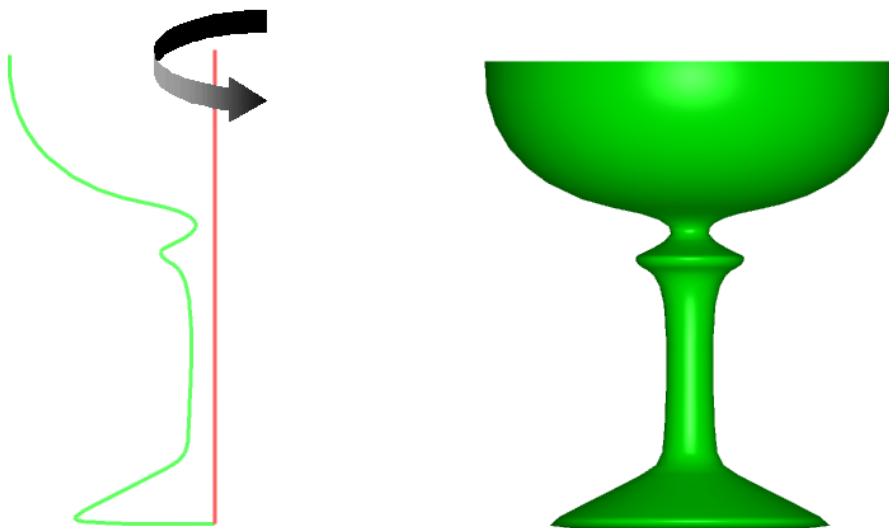


Abbildung 3.24: Rotation von Konturkurven

Aufgrund der Allgemeingültigkeit der Methodik können auch komplexe Objekte durch einfache Rotationskörper beschrieben werden. Eines der bekanntesten Beispiele ist die Erzeugung von Vasen oder Kelchen durch die Rotation einer geschwungenen Kontur, wie in Abbildung 3.24 dargestellt.

3.4 Erweiterung in die vierte Dimension

Die beschriebene Modellierung auf der Basis von Volume NURBS erlaubt die flexible und effektive Darstellung dreidimensional-räumlicher Gegebenheiten. Komplexe Geosysteme erfordern darüber hinaus die Integration der Komponente Zeit. Bisherige Ansätze erlauben die Verwaltung diskreter Zustände anhand von Zeitintervallen, innerhalb derer ein bestimmter räumlicher Zustand gültig ist. Durch die diskrete Unterteilung des in der Realwelt kontinuierlichen Zeitstrahls können Übergänge zwischen verschiedenen Modellzuständen nicht oder nur durch Modellierung kurzer Zeitintervalle und daher mit erheblichem Verwaltungsaufwand abgebildet werden.

Daher wird in dieser Arbeit ein neuer Ansatz vorgestellt, um die Vorteile der NURBS-Methodik für die exakte Berechnung kontinuierlicher Modelle aus vorgegebenen Kontrollwerten auch auf temporale Darstellungen anzuwenden. Zur Abbildung dreidimensionaler Modelle und Prozesse über die Zeit kann die Kombination von Raum und Zeit derart realisiert werden, daß die NURBS-Beschreibung von der vorgestellten dritten in die vierte Dimension erweitert wird. Analog zum Übergang von der zweiten, flächenhaften Dimension in die dritte, volumenhafte Dimension ist die Formel aus Definition 3.3 um einen weiteren Laufparameter t als Zeitvariable zu erweitern, um zu einer Darstellung von *Temporal Volume NURBS (TV-NURBS)* zu gelangen:

$$p(t, u, v, w) = \frac{\sum_{i_t=0}^{n_t} \sum_{i_u=0}^{n_u} \sum_{i_v=0}^{n_v} \sum_{i_w=0}^{n_w} S^4(i_t, i_u, i_v, i_w) w_{i_t, i_u, i_v, i_w} N_{i_t, k_t}(t) N_{i_u, k_u}(u) N_{i_v, k_v}(v) N_{i_w, k_w}(w)}{\sum_{i_t=0}^{n_t} \sum_{i_u=0}^{n_u} \sum_{i_v=0}^{n_v} \sum_{i_w=0}^{n_w} w_{i_t, i_u, i_v, i_w} N_{i_t, k_t}(t) N_{i_u, k_u}(u) N_{i_v, k_v}(v) N_{i_w, k_w}(w)}$$

$$0 \leq t, u, v, w \leq 1$$

In dem vierdimensionalen Kontrollgitter S^4 ist die vierte Koordinate als kontinuierlicher Zeitvektor zu interpretieren, wie in Abbildung 3.25 veranschaulicht. Mit dem Kontrollgitter wird ein räumliches Volumen in der Entwicklung über die Zeit mit unterschiedlichen Zuständen repräsentiert, die durch den NURBS-Algorithmus kontinuierlich interpoliert werden. In der Abbildung wird die zeitliche Komponente durch dreidimensionale Stützpunktegitter zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt, die durch die farblich hervorgehobenen Veränderungskurven über die Zeit interpoliert werden. Die Kurven zwischen den Randstützpunkten verändern sich nicht und werden daher linear durchlaufen. Die Verschiebung der inneren drei Kontrollpunkte führt dagegen zu einer gekrümmten Interpolation. Zwischen den zeitlichen Stützpunkten kann zu jedem Zeitpunkt jeder beliebige Punkt eines modellierten Körpers exakt berechnet werden.

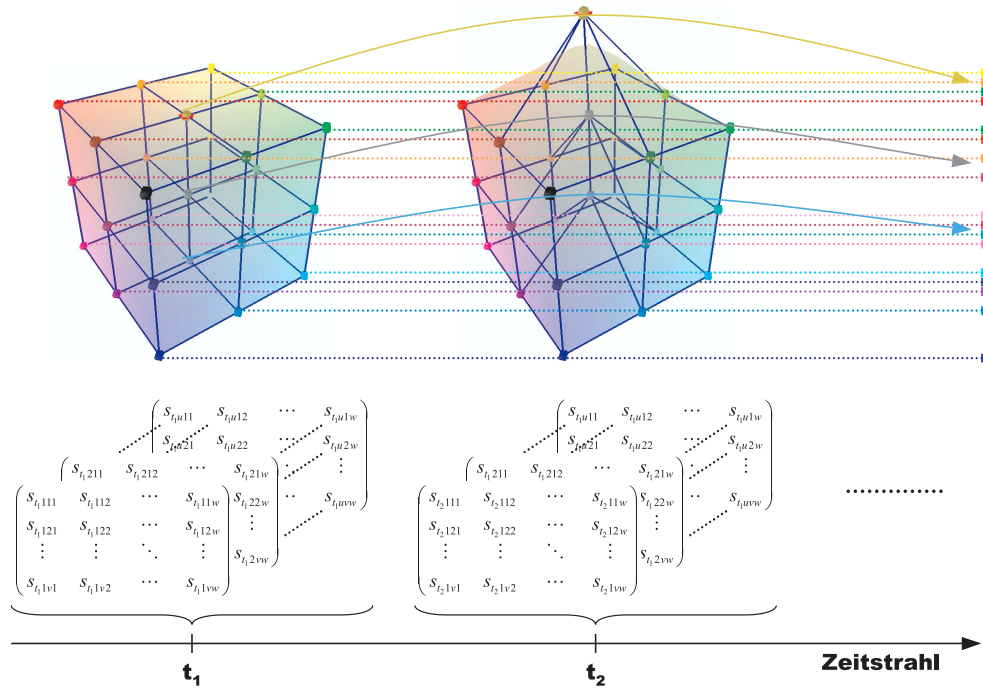


Abbildung 3.25: Interpretation des vierten Laufparameters als zeitliche Komponente

Wie in Abbildung 3.26 veranschaulicht, können sich die möglichen Veränderungen des Körpers nicht nur auf die räumliche Ausprägung beziehen, sondern auch die mit den Stützpunkten assoziierten, thematischen Parameter können über die Zeit variiert werden. Ausgehend von dem in Abbildung 3.16 dargestellten CKW-Schadstoffeintrag in einem Porenwasserkörper wird dessen zeitlicher Ablauf in sechs Zeitschritten $t_1, \dots, t_6$ visualisiert. Zur Verdeutlichung wurde der schadstoffhaltige Bereich durch eine gerenderte Darstellung hervorgehoben und der umgebende Porenwasserkörper durch ein Gitternetz dargestellt.

Es ist sowohl der parameterbezogene zeitliche Einfluß durch die farbliche Kodierung als auch die Veränderung der Form des schadstoffhaltigen Bereichs deutlich sichtbar. Der CKW-Eintrag erfolgt lokal und zeitlich begrenzt. Im zeitlichen Verlauf dringt der Schadstoff in den ungesättigten Porenwasserkörper ein und verteilt sich am unteren Ende durch eine stauende Schicht aus Schluff oder Ton. Aufgrund des kurzzeitigen Eintrags baut sich im zeitlichen Verlauf durch die räumliche Verteilung die Konzentration des CKWs ab, dargestellt durch die Änderung der Farbe im kontaminierten Untergrund von rot (hoher Schadstoffgehalt) nach hellblau (geringer Schadstoffgehalt).

Abschließend ist zu beachten, daß die zeitliche Dimension prinzipiell auch auf NURBS-Repräsentationen niedrigerer Dimension angewendet werden kann. Aus der Darstellung einer NURBS-Kurve wird durch Ergänzung temporaler Information eine Darstellung, die mit einer NURBS-Fläche identisch ist. Als Unterschied wird einer der Parameter nicht als räumliche sondern als zeitliche

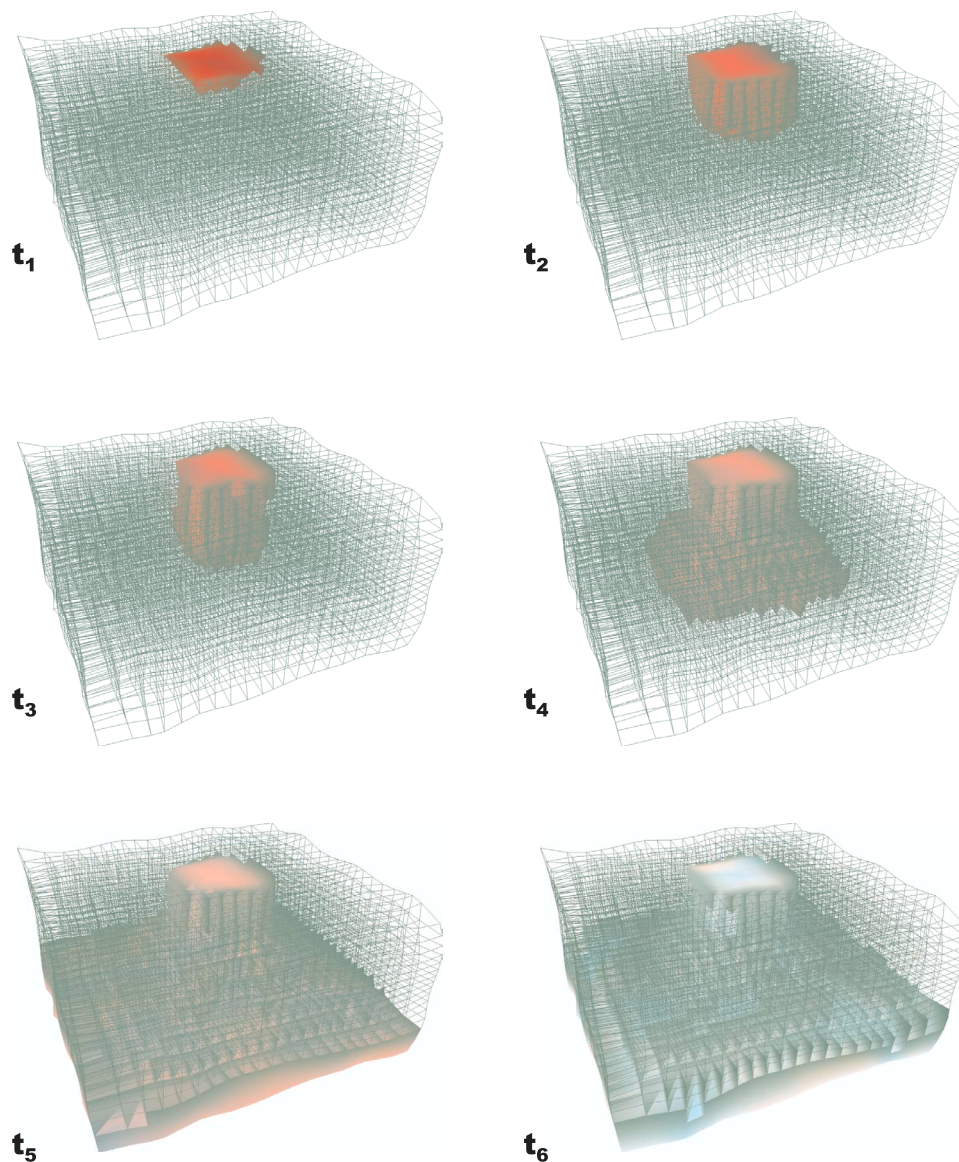


Abbildung 3.26: Zeitlich simulierter Verlauf eines Schadstoffeintrags in einen Porenwasserkörper

Laufvariable interpretiert.

3.5 Modellierung eines realen Anwendungsbeispiels

Zum Abschluß dieses Kapitels wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren der volumenhaften Modellierung mit Volume Non Uniform Rational B-Splines anhand realer Daten des geologischen Untergrundes der geplanten Talsperre Leibis/Lichte, Thüringen, veranschaulicht.

Das geplante Absperrbauwerk der Talsperre Leibis/Lichte mit einer Höhe über Gründungssohle von 98 Metern (Stand 9/98) soll den Fluß Lichte auf einer Länge von ca. 3,5 km zu einem Wasservolumen von durchschnittlich 32,4 hm³ anstauen. Die Talsperre soll der Rohwasserabgabe zur Trinkwasserversorgung im Versorgungssystem Ost-Thüringen sowie dem Hochwasserschutz dienen.

Der geologische Untergrund der Talsperre setzt sich aus einer quartären Lockergesteinsdecke und den Auflockerungs- und Festgesteinshorizonten ordovizischer Phycodenschiefer zusammen. Das geomechanische Verhalten ist durch drei Trennflächenpopulationen und unregelmäßige Störungen geprägt.

Zur Erkundung der Wasserdurchlässigkeit und der Injizierbarkeit des Untergrundes wurden in mehreren Vorerkundungsphasen 50 Bohrungen zur Durchführung von Wasserabpreßversuchen abgeteuft. Bei diesen sog. WD-Tests werden Bohrlöcher in unterschiedlichen Höhen auf einer Länge von bis zu 5 Metern ein- bzw. beidseitig verschlossen. In den abgedichteten Bereich wird durch einen Schlauch von der Tagesoberfläche mit leistungsfähigen Pumpen Wasser eingepreßt. In Stufendruckversuchen wird, beginnend mit ca. 0.3 Bar, der Wasserdruck in den Druckstufen 0.5, 0.7 und 1.2 Bar erhöht und jeweils die Menge verpreßbaren Wassers bei gegebenem Druck über eine vorgegebene Zeitspanne ermittelt und protokolliert. Nach Erreichen der maximalen Druckstufe wird der Wasserdruck wiederum in den vorgegebenen Stufen verringert. Abbildung 3.27 zeigt eine typische Verlaufskurve der verpreßbaren Wassermenge in Bezug auf den angelegten Druck als Druck-Mengen-Diagramm. Aus den Charakteristika der Meßkurve können Rückschlüsse auf das geo- und hydromechanische Verhalten der im Untergrund vorliegenden Klüfte als der wesentlichen wasserführenden Strukturen gezogen werden und damit das Durchlässigkeitsverhalten abgeschätzt werden, das als Grundlage für die Bemessung von Injektionsschleiern zur Abdichtung des Untergrundes dient. [Bie97, Sie99]

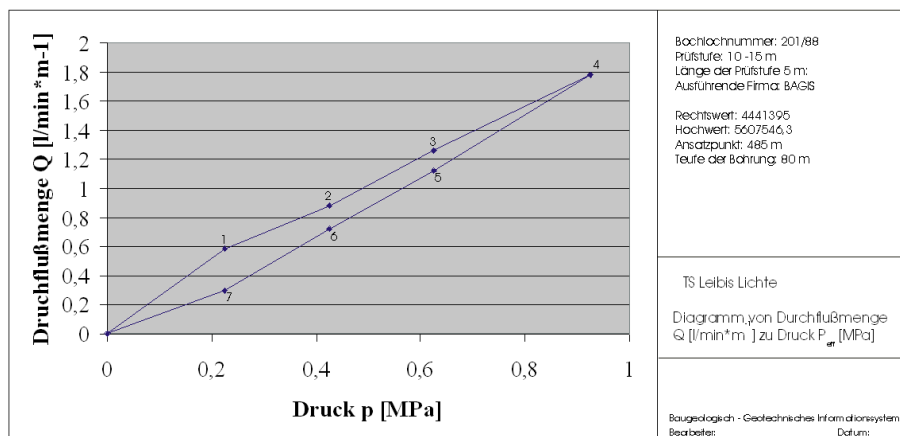


Abbildung 3.27: Druck-Mengen-Diagramm eines WD-Tests [Sie99]

Die Daten zur beispielhaften Modellierung des geologischen Untergrundes mit dem in dieser Arbeit entwickelten Konzept der Volume NURBS wurden aus

mehreren, nachfolgend beschriebenen Quellen zusammengetragen und zu einem umfassenden Modell zusammengeführt. Im ersten Schritt wurde aus einer topographischen Karte durch Ermittlung der ortsbezogenen Höhenwerte eine NURBS-Darstellung der Oberfläche mit 17×23 Stützpunkten gewonnen. Anhand des in Abschnitt 3.3.7 entwickelten Verfahrens zur Körpergenerierung kann nunmehr aus dieser Oberfläche und einer Grundfläche in 300 m üNN ein Volume NURBS Körper mit 5 inneren Schichten erzeugt werden. Dieses volumetrische Raummodell des geologischen Untergrundes diene als Grundlage für die Einbettung der Meßwerte aus den im Rahmen der Vorerkundung durchgeführten Wasserabpreßversuchen. Die gemessenen Werte wurden farblich kodiert (grün: geringe Durchlässigkeit, gelb: mittlere Durchlässigkeit, dunkelrot: hohe Durchlässigkeit) und den jeweiligen Stützpunkten des Raummodells zugeordnet.

Das generierte Raummodell ist in Abbildung 3.28 in zwei unterschiedlichen Ansichten dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist die Blockansicht des generierten Raummodells abgebildet. Zur räumlichen Einordnung wurde mittels einer Textur auf der Oberfläche die Gründungssohle des geplanten Absperrbauwerks (grau) in die Darstellung integriert. Somit können anhand der durch die farbliche Kodierung visualisierten Wasserdurchlässigkeit des Untergrundes Rückschlüsse auf notwendige Injektionsmaßnahmen gezogen werden.

Im unteren Teil der Abbildung ist das Modell in Drahtgitterdarstellung visualisiert, so daß die Untersuchung der WD-Meßwerte auch in ihrer volumenhaften Ausprägung untersucht werden können. Dies erlaubt die Bestimmung der Tiefe des zu planenden Injektionsschleiers räumlich besser zu validieren.

Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren kann der Untergrund des Absperrbauwerks erstmals vollständig räumlich modelliert, visualisiert und dessen Entwicklung über die Zeit unter verschiedenen Randbedingungen dargestellt und Prognosen zu Auswirkungen des Wasseraufstauens auf die hydrodynamischen Prozesse unterhalb der Talsperre auf der Grundlage geologischer und geohydraulischer Annahmen erstellt werden. Durch die Anwendung der neuen volumenbezogenen NURBS-Methodik ist die Berechnung und Darstellung jedes beliebigen Raumpunktes in Bezug auf eine frei wählbare Druckstufe möglich. Aus der Entwicklung verschiedener Szenarien über die Zeit können Rückschlüsse auf notwendige Maßnahmen zur Abdichtung des Untergrundes mit Injektionsbohrungen gezogen werden, die neben der Kostenreduktion auch einen entscheidenden Faktor für die Sicherheit des geplanten Bauwerks darstellen.

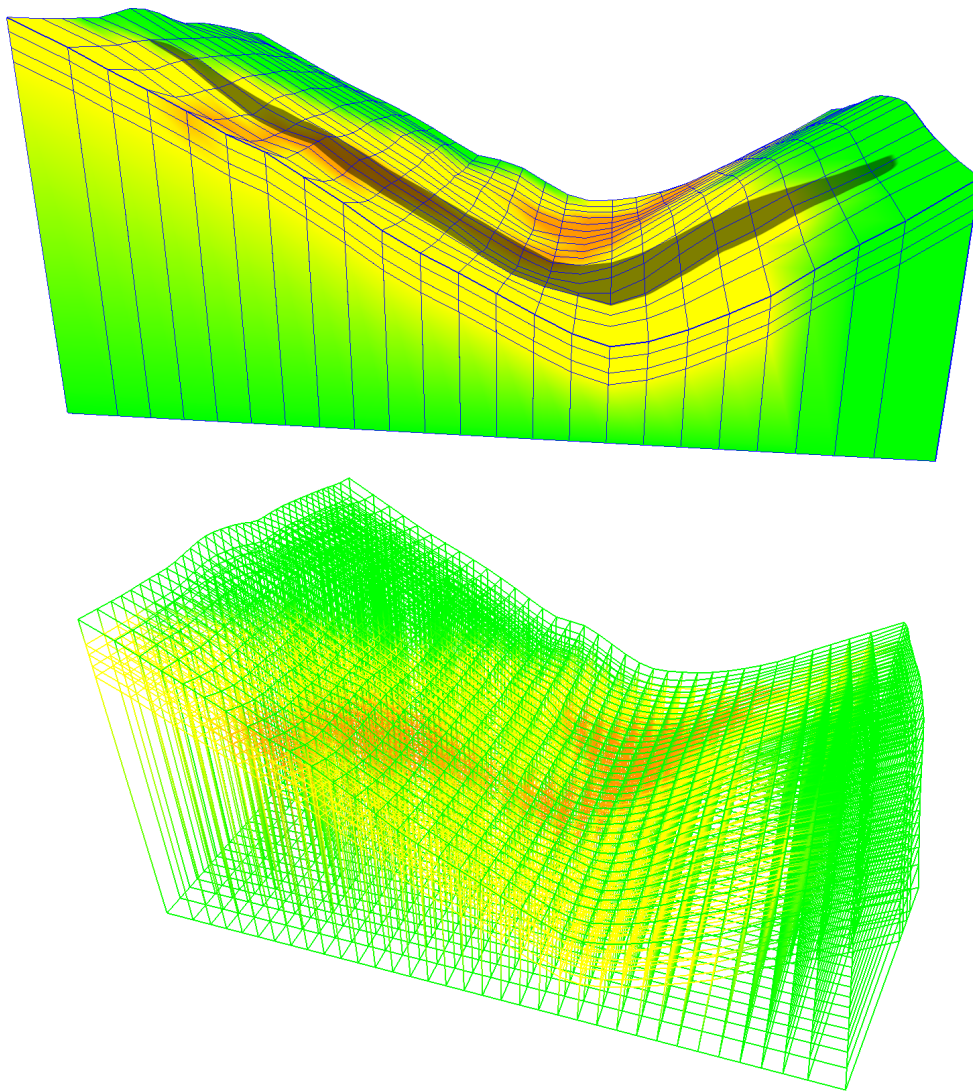


Abbildung 3.28: Durchlässigkeit des Untergrundes der Talsperre Leibis/Lichte

Kapitel 4

Geo-Informationssysteme

Das Ziel für das in dieser Arbeit entwickelte Geo-Datenmodell ist dessen Verwendung in einem Geo-Informationssystem (GIS), also einem fachspezifischen Informationssystem, das die räumliche Komponente der verwalteten Daten berücksichtigt. Im folgenden werden Informationssysteme kurz eingeführt und deren Realisierungskonzepte beschrieben. Im Anschluß werden die speziellen Problemstellungen in Bezug auf die Verwaltung raumbezogener Daten diskutiert und eine kurze Historie zur Entwicklung und Forschung auf dem Gebiet der Geo-Informationssysteme angeführt. Schließlich folgt eine Beschreibung verschiedener Ansätze zur Datenmodellierung und Datenhaltung und eine Untersuchung existierender Systeme bezüglich der beschriebenen Anforderungen. Aus den Darstellungen wird ersichtlich, warum der in dieser Arbeit verfolgte, neue Ansatz bestehende Probleme gängiger Geo-Informationssysteme lösen kann.

4.1 Grundlagen von Informationssystemen

Informationssysteme dienen der computergestützten Verwaltung anwendungsbezogener Informationen als Beschreibung von Ausschnitten der Realwelt mit dem Ziel, diese für den Anwender unter Berücksichtigung unterschiedlicher Fragestellungen zugreifbar, interpretierbar und analysierbar aufzubereiten [Bis95, Zeh98]. Für den Anwender stehen die Komponenten Eingabe, Veränderung, Ausgabe, Verknüpfung und Analyse von problemspezifischen Informationen im Vordergrund. Persistenz, Effizienz und Zuverlässigkeit sind dabei zwingende Voraussetzungen für den fortlaufenden Einsatz an realen Problemstellungen.

Aus der Sicht der Informatik besteht ein Informationssystem aus einem zugrundegelegten Datenbanksystem und einer Benutzerschnittstelle:

Datenbanksystem: Das Datenbanksystem stellt einerseits geeignete Mittel zur Modellbildung in Form von Datenbankmodellen bereit und bildet das anwendungsbezogene Datenmodell, d.h. die konkrete Darstellung eines Problems, auf effiziente interne Strukturen ab. Andererseits stellt das Datenbanksystem alle notwendigen Funktionen und Operationen zur

Verfügung, um die anfallenden Daten dauerhaft und zuverlässig zu speichern, zu ändern und mittels verschiedener Anfrageformen wiederzugewinnen. Die funktionale Ebene der Datenverwaltung wird dabei durch ein Datenbankmanagementsystem bereitgestellt, die Daten werden in einer Datenbank gespeichert.

Benutzerschnittstelle: Informationssysteme werden häufig von Anwendern eingesetzt, die keine oder nur wenig Vorkenntnisse im Bereich moderner Informations-Technologien haben. Soll die anfallende Arbeit, die bisher ohne Verwendung eines computergestützten Systems durchgeführt wurde, mit den Mitteln eines Informationssystems unterstützt werden, ist nicht nur die fachspezifische Anpassung der Datenbankinhalte, sondern vor allem auch ein Benutzer- oder Benutzergruppen-spezifisches Mensch-Maschine-Interface notwendig. Dieser Bestandteil soll im folgenden jedoch nicht betrachtet werden.

Die Aufgabe des Informationssystems besteht darin, eine spezifische, wohlstrukturierte Informationshierarchie zu erstellen, die eine Abbildung des Problems in eine Datenbank und gleichzeitig eine einfache Behandlung in einer Bedienoberfläche erlaubt [Kön96].

Aus der Sicht der Anwendung bzw. des Anwenders lassen sich Informationssysteme in vier wesentliche Komponenten gliedern:

Eingabe: Die Übernahme der Anwendungsdaten in ein Informationssystem kann durch unterschiedliche Eingabeformen erfolgen. Dabei wird zwischen Primär- und Sekundärerfassung unterschieden. Erstere umfaßt die problemspezifische Aufbereitung und Eingabe der Daten, letztere die Übernahme der Daten aus einer bereits aufbereiteten Datenmenge. Die Dateneingabe kann digital durch die Übernahme aus vorhandenen Datenbanken oder Dateien oder durch die manuelle Erfassung der Daten erfolgen.

Verwaltung: Die Aufgabe der Verwaltung spiegelt im wesentlichen die informationstechnische Sicht von Informationssystemen als Datenbanksystem wider und umfaßt die effiziente, konsistente und persistente Speicherung der Daten.

Analyse: Auf der Grundlage der abgelegten Informationen, die durch die Eingabe in die Datenbank übernommen wurden, können mittels problemspezifischer Analysen neue Erkenntnisse gewonnen werden. Diese können als Grundlage neuer Analysen wiederum in die Datenbasis aufgenommen werden.

Ausgabe: Die Ausgabe bereitet die gespeicherten Daten anwendungsspezifisch auf und präsentiert sie dem Benutzer grafisch als Diagramme, Karten oder Pläne sowie in textueller Form. Da die Ausgabe die wichtigste Schnittstelle zwischen dem Informationssystem und dem Anwender ist, muß ihr eine entsprechende Bedeutung beigemessen werden.

Diese Gliederung, in [BF91] als EVAP-Prinzip (Eingabe, Verwaltung, Analyse, Präsentation) bezeichnet, beschreibt die systeminternen Prozesse innerhalb des Informationssystems. Diese Operationen mit und auf den Daten müssen bei der Konzeption von Informationssystemen bereits im Vorfeld analysiert und in die Strukturen des Datenmodells integriert werden.

Eine wesentliche Grundlage bei der Entwicklung von Informationssystemen ist die Modellbildung auf der Basis der bereitgestellten Datenbankkonzepte mit dem Ziel, einen Teil der Realwelt möglichst problemspezifisch und exakt abzubilden. Da einerseits der Facettenreichtum der Realität nicht vollständig abbildbar ist, und in vielen Fällen auch nicht alle auftretenden Informationen in der späteren Anwendung von Bedeutung sind, werden die zu verwaltenden Informationen in Modellen strukturiert, abstrahiert und generalisiert.

Bei der Modellbildung wird die Domäne des Anwendungsfeldes detailliert analysiert, und es werden die wesentlichen Komponenten und ihre Beziehungen zueinander identifiziert. Die extrahierten Komponenten werden anschließend unter Zuhilfenahme semantischer Datenmodelle oder objektorientierter Entwurfsverfahren abstrakt modelliert und schließlich mit den Ausdrucksmitteln des zugrunde gelegten Systems abgebildet. Eine wesentliche Voraussetzung für die korrekte, konsistente und informationserhaltende Abbildung der Anwendungsdomäne ist die Adäquatheit der bereitgestellten Datendefinitionssprachen (*DDL, Data Definition Language*) und der Ausdrucksmächtigkeit des Datenbankmodells. Derzeit werden hauptsächlich relationale, objektorientierte und neuerdings objekt-relationale Datenbankmodelle eingesetzt, die sich durch unterschiedliche Paradigmen und die damit verbundene Leistungsfähigkeit in Bezug auf die modellierbare Modellkomplexität voneinander unterscheiden.

Informationssysteme werden vor allem im Bereich von Personal-, Kunden- und Materialverwaltungen von Unternehmen, zur Entscheidungsunterstützung in vielen Anwendungen, als Überwachungssysteme oder im Bibliothekswesen eingesetzt [Bis95]. In diesen Anwendungen fallen im wesentlichen thematische Daten in Form von Textinformationen und Zahlen an. In einfachen Anwendungsbereichen ist die Komplexität der Datenstruktur darüber hinaus gering, d.h., es fallen strukturell gleichwertige Daten an. Hierzu zählen beispielsweise Adressenverwaltungen mit den Informationen *Name, Straße, Wohnort, etc.* Die wesentliche Anforderung an das Informationssystem ist in diesen Fällen die effiziente Verwaltung großer Datenmengen durch Bereitstellung geeigneter Indizierungsmechanismen und Zugriffsstrukturen.

4.2 Anforderungen an Informationssysteme zur Verwaltung räumlicher Daten

Im Gegensatz zur Verarbeitung textueller und numerischer Daten stellt die Integration raumbezogener Informationen grundlegend neue Anforderungen an die bereitzustellenden Modellierungs- und Verwaltungskonzepte. Standard-Datentypen zur Darstellung von Zeichen oder Zeichenfolgen und Zahlen, wie Charac-

ter, String, Integer, etc., sind zur Darstellung räumlicher Informationen nicht ohne weiteres als Modellierungsgrundlage einsetzbar. Vielmehr ist die konzeptuelle Erweiterung bestehender Systeme erforderlich, um den Anforderungen genügen zu können, die die Repräsentation räumlicher Daten stellt. In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften räumlicher Informationen näher untersucht.

Worboys nennt in [Wor95] drei wesentliche Aspekte für die Qualität räumlicher Daten, die hier ausführlich erläutert werden:

Korrektheit und Genauigkeit: Zwar sind die Korrektheit und die Genauigkeit auch bei textuellen oder numerischen Informationen von Bedeutung, da nur korrekte und mit der geforderten Genauigkeit eingegebene Daten für die Weiterverarbeitung und Extraktion von Information eingesetzt werden können. In Bezug auf räumliche Informationen ist jedoch ferner zu analysieren, ob die Daten auch tatsächlich der Realität entsprechen, die sie als abstraktes Modell repräsentieren. Auftretende Ungenauigkeiten oder Inkonsistenzen sind schwer zu identifizieren, können aber leicht zu fehlerhaften Interpretationen führen.

Das Problem der Genauigkeit ergibt sich insbesondere bei der Sekundäreingabe von Daten, die unter Umständen in anderen Maßstäben oder anderen Bezugs-Koordinatensystemen digitalisiert wurden. Die Transformation der Daten zwischen den verschiedenen Bezugssystemen bewirkt Verzerrungen der Originaldaten und ist häufig nur durch Iterationslösungen realisierbar. [Sta95]

Die Qualitätsabschätzung der Korrektheit und Genauigkeit von Daten kann in Anlehnung an die Darstellungen von Chrisman [Chr91] auf vier mögliche Fehlerquellen in räumlichen Modellen zurückgeführt werden:

Positionierungsfehler: Stimmen die metrischen Angaben mit denen der Realität (bis zu einem gewissen Toleranzgrad) überein?

Datenfehler: Stimmen die Sachdaten mit den Eigenschaften der realen Domäne überein?

Konsistenzfehler: Sind die Elemente des Modells untereinander konsistent?

Vollständigkeit: Werden alle benötigten Elemente im Modell abgebildet?

Aktualität, Relevanz und Kosten: Bereits bei der Erarbeitung eines Datenmodells sind die Faktoren Aktualität, Relevanz und Kosten zu beachten. Erst wenn das entwickelte Modell nur die relevanten Informationen der Realwelt abbildet – und somit auch als Eingabe des Anwenders fordert – kann die Aktualität durch effiziente Übernahme der Daten in das System und damit auch die ökonomische Datenerfassung erreicht werden. Unnötige Detaillierungen bestimmter Aspekte müssen bei der Untersuchung des Anwendungsbereichs vermieden werden.

Die Aktualität der Quellen ist insbesondere bei der Sekundärerfassung von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Daten. Daten unterschiedlichen Alters und veraltete Daten führen zu Ungenauigkeiten und Inkonsistenzen.

Aufgrund der Komplexität, des Umfangs und der geforderten Genauigkeit der Daten, die in Geo-Informationssystemen verarbeitet werden, ist der Kosten- und Zeitaufwand für die Datenerfassung und -pflege nicht zu unterschätzen. Das Verhältnis der Kosten von Hardware, Software und Daten ist mit 2:3:10 anzusetzen, die Lebensdauer der Komponenten mit 4:10:30. Die Daten sind also der kostenintensivste und wesentlichste Faktor von Geo-Informationssystemen. [Sta95, BF91, Bar95]

Verwendbarkeit und Zugreifbarkeit: Ein weiterer wichtiger Aspekt, der durch die Komplexität und Menge räumlicher Daten an Bedeutung gewinnt, ist die spätere Verwendbarkeit und Zugreifbarkeit der Daten. Kann durch schlechte Implementierung des Datenschemas, ineffiziente Indizierungen oder ungünstige Unterstützung der internen Strukturen durch die übergeordnete Anwendung nicht ausreichend auf die verwalteten Informationen zugegriffen werden, rückt die Qualität der Daten in den Hintergrund. Der Anwender muß den Inhalt der verwalteten Modelle problem-spezifisch aufbereitet dargestellt bekommen und mit den zur Verfügung gestellten informationstechnischen Werkzeugen den spezifischen Anforderungen des Anwendungsgebiets entsprechend abrufen können.

Um die Verwendbarkeit und Zugreifbarkeit bereits bei der Anwendungsprogrammierung integrativ bereitzustellen, ist die übergeordnete Verwaltung von Metadaten sinnvoll. Diese geben detaillierte Auskunft über den Aufbau des Datenmodells der Anwendung und können zur Laufzeit genutzt werden, um etwa mittels generischer Applikationen Anfragen über den Datenbankinhalt auszuwerten.

Aus den Qualitätsanforderungen wird deutlich, daß die Integration räumlicher Daten in Informationssysteme durch die Verwendung von Standardkonzepten nicht adäquat abgebildet werden kann. Ferner ist die Ebene der räumlichen Datenverwaltung den Anforderungen des Anwendungsbereichs anzupassen, um eine effiziente Unterstützung der spezifischen Anwendung zu gewährleisten. Nicht zuletzt sind geeignete Konzepte zu erarbeiten, auf deren Grundlage räumliche Informationen einerseits fehlertolerant und flexibel und andererseits konsistent strukturiert und verwaltet werden können.

4.3 Historische Entwicklung von Geo-Informationssystemen

Bevor in den folgenden Abschnitten konkrete Konzepte zur Realisierung von raumbezogenen Informationssystemen vorgestellt werden, wird zunächst ein

Überblick der historischen Entwicklung von Geo-Informationssystemen gegeben. Daraus wird unter anderem die in gängigen Systemen vorherrschende Konzeption von GIS als flache Erweiterungen relationaler Datenbanken oder als CAD-Systeme mit zugeordneten Sachdaten in ihrer Historie ersichtlich. Einen detaillierteren Einblick geben [CR91, PC89] und [Sta95].

Geo-Informationssysteme haben sich in ihrem Ursprung aus kartographischen Anwendungen entwickelt. Ausgehend von ersten Zusammenstellungen detaillierter Karten mit zugeordneten Informationen zur Population, Vegetation und Untergrundbeschaffenheit zu Beginn des 19. Jahrhunderts in Papierform wurden die Techniken der Kartographie fortlaufend ausgebaut und verbessert. Mit der Einführung der Digitaltechnik Mitte des 20. Jahrhunderts war erstmals die Möglichkeit gegeben, die Datenmengen strukturiert zu verwalten, zu verknüpfen und je nach Anforderung auszugeben. Die ersten digitalen Geo-Informationssysteme bezogen sich im wesentlichen auf Sachdaten.

Erste Ansätze zur Abbildung räumlicher Informationen anhand von Vektorgrafiken und Drahtmodellen wurden Ende der 50er Jahre mit dem ersten digitalen Geländemodell am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt. In den 60er Jahren folgten erste Anwendungen der digitalen Bildverarbeitung mittels Rastermodellen, die Verbindung thematischer und kartographischer Daten und am Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis die Konzeption unabhängiger Datenebenen, der heute vielfach verwendeten Layerstruktur. Die Forschungsergebnisse führten zu ersten großen GIS-Projekten und gingen schließlich in die Firma ESRI und das Produkt ARC/INFO auf. Im Rahmen des ersten GIS-Symposiums 1970 von R.F. Tomlinson wurde schließlich der Begriff GIS zunächst als *Geographische* Informationssysteme geprägt. Im Laufe der Zeit wurde vermehrt von Geo-Informationssystemen gesprochen, um zu verdeutlichen, daß nicht nur geographische, sondern auch andere Formen *geo*-wissenschaftlicher Anwendungen durch GIS unterstützt werden.

Mit diesen Forschungen war der Grundstein für unzählige Untersuchungen und Entwicklungen kartographischer Anwendungen, Kartierungssysteme und Katasterverwaltungen gelegt. In Deutschland wurden Landinformationssysteme (*ALK* Automatisierte Liegenschaftskarte, *ATKIS* Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem) standardisiert und als Grundlage der amtlichen Basisdaten der Vermessungsverwaltung festgelegt. Geo-Informationssystemen kam dabei insbesondere die Rolle der Datenerfassung aus vorhandenen Karten und Plänen zu.

Diese Systeme beruhen im wesentlichen auf digitalen Karten, denen auf verschiedenen Ebenen Sachinformationen zugewiesen sind. Durch die Überlagerung einzelner Ebenen (Layer) können Informationen räumlich verknüpft und ausgewertet werden. Es steht also die räumliche Information im Mittelpunkt der Betrachtung.

Neben den behördlichen Universalsystemen entwickelten sich viele Speziallösungen für kleinere Problemstellungen, die nach und nach zu modularen Toolboxes für unterschiedliche Anwendungen ausgebaut wurden. Aus dem ursprünglichen Anwendungsbereich des Vermessungswesens hat sich ein breites Spektrum von

Systemen für verschiedene Disziplinen ausgebildet, z.B. Leitungsdokumentation, Netzmanagement, Verkehrsmanagement, Funknetzplanung, Lagerstättensuche, Klimaforschung, Schadstoffausbreitung in Luft und Wasser, etc., die jeweils eigene Terminologien und Nomenklaturen entwickelt haben [Bai94]. Einen detaillierten Überblick über GIS-Systeme im deutschsprachigen Raum findet sich in [Wie95].

Aus der Komplexität der Problemstellungen folgt, daß mit der zunehmenden Entwicklung spezieller Geo-Informationssysteme eine Abkehr von einem umfassenden Universalsystem unvermeidlich ist [Car89]. Sowohl die Sachdaten als auch die räumlichen Informationen und Dimensionen variieren so stark, daß die integrierte Verwaltung in einem System nicht realisierbar ist.

Ein weiterer Trend ist bei der Implementierung von Speziallösungen zu beobachten. Aufgrund der Nähe zu den Bereichen des Desktop Mapping, der digitalen Bildverarbeitung und des computergestützten Designs (CAD) werden derartige Systeme als Grundlage für die Entwicklung von Geo-Informationssystemen gewählt. In dieser Entwicklung schlägt sich die primäre Ausrichtung der Systeme an den räumlichen Daten nieder. Sachinformationen werden an die grafischen Modelle über Referenzen gekoppelt und losgelöst von der hinterlegten räumlichen Struktur verwaltet. Insbesondere moderne CAD-Systeme und relationale Datenbanken bieten mittlerweile standardisierte Schnittstellen [Sin93], die jedoch weniger die Kombination räumlicher und thematischer Informationen fördern als vielmehr deren Trennung bewirken.

Verbreitete Schnittstellen für den Datenaustausch zwischen Geo-Informationssystemen unter Einbeziehung standardisierter Attribute sind der objektorientierte Austauschstandard des Vermessungswesens EDBS (Einheitliche Datenbankschnittstelle) oder der in den USA verwendete Standard SDTS (Spatial Data Transfer Standard). Im Rahmen des OPEN GIS CONSORTIUMS wird ferner versucht, einen offenen Standard für die Konzeption und Implementierung von Geo-Informationssystemen zu definieren [OGC98]. Probleme ergeben sich aus der universellen Attributauswahl, die zwar äußerst umfangreich ist, aber dennoch nicht jeden Anwendungsfall abdecken kann.

Abschließend bleibt festzuhalten, daß zum einen die Unterschiedlichkeit der Systeme die Bereitstellung von Konzepten und Werkzeugen zur modularen Systemgestaltung erfordert und daß zum anderen die bevorzugte Repräsentation der räumlichen Informationen Probleme bei der integrierten Datenverwaltung aufwirft.

4.4 Konzepte räumlicher Informationsverarbeitung

In diesem Abschnitt werden die grundlegenden Konzepte der Repräsentation räumlicher Informationen erläutert. Dazu werden die notwendigen Begriffe eingeführt und verbreitete Konzepte zur Verwaltung und Modellierung raumbezogener Informationen vorgestellt.

4.4.1 Repräsentationsstrukturen

In der Literatur werden eine Vielzahl konkreter Modelle diskutiert, mit deren Hilfe die in Abschnitt 2.2 beschriebenen räumlichen Repräsentationsmodelle auf konkrete Strukturen abgebildet werden können. Im folgenden werden die wesentlichen Ansätze kurz vorgestellt, um einen Einblick in die derzeitige Umsetzung räumlicher Informationsverarbeitung vor dem Hintergrund des geowissenschaftlichen Anwendungsumfeldes zu geben. Die gewählten Modelle wurden nach der Eigenständigkeit ihrer Repräsentationsstruktur gewählt, um die Unterschiede zwischen den Ansätzen aufzuzeigen. Eine umfassende Übersicht verschiedener Repräsentationsstrukturen geben [Fin90, BF91] und [AG97].

In der Auswahl sind neben dreidimensionalen auch zweidimensionale Modelle vertreten, da diese in der Literatur vorherrschen. Bei der Untersuchung der Strukturen wird deutlich, wie problematisch der Übergang von der zweiten in die dritte Dimension unter Berücksichtigung aller Eigenschaften des Modells ist. Einige Repräsentationsstrukturen vermeiden daher die konkrete Beschreibung der dritten Dimension.

Ausgangspunkt der Repräsentationsstrukturen ist eine Abbildung der räumlichen Beziehungen zwischen Koordinaten und deren Verknüpfung zu Linien, Flächen und Körpern. Je nach Umfang des Modells werden dabei verschiedene topologische Nachbarschafts- und Begrenzungsbeziehungen aus der metrischen Sicht der Daten definiert und verwaltet. Damit können Redundanzen vermieden und Integritätsbedingungen einbezogen werden. Durch die Zusammenführung von Topologie und Metrik sind die jeweiligen Beziehungen jedoch fest miteinander verbunden und hängen gegenseitig voneinander ab.

Das einfachste Modell zur Verwaltung räumlicher Informationen ist die sog. Spaghetti-Struktur. Jeder Fläche oder Linie werden sequentiell die nacheinander durchlaufenen Koordinaten zugeordnet, so daß die einzelnen Objekte aus langen, Spaghetti-artigen Listen bestehen. Diese Struktur ist aufgrund der redundanten Speicherung von Koordinaten und Begrenzungslinien nicht nur ineffizient, sondern bietet auch keine Form der Konsistenzprüfung.

Eines der ersten und bekanntesten topologischen Modelle ist die DIME-Datenstruktur (*Dual Independent Map Encoding*). Im Mittelpunkt des Modells stehen Liniensegmente, die einerseits durch zwei Knotenpunkte begrenzt werden und andererseits links und rechts (als topologische Beziehungen) auf die Polygonbegrenzungen eines Flächenobjektes zeigen. Mit dieser Struktur werden topologische Zusammenhänge als Grundlage der metrischen Beschreibung eingeführt und in verschiedenen verbesserten Datenstrukturen, z.B. POLYVRT (*Polygon-Converter*) und GEOGRAF, erweitert. Andere Strukturen realisieren die Beschreibung von Knoten mit mehr als zwei Ausgangskanten ausgehend von einer Kantenbeschreibung durch die Angabe der jeweils bei Links- bzw. Rechtsdrehung nächsten Kante (*winged-edge-Struktur*).

Aufsetzend auf diesen zweidimensionalen Modellen wird in [BF91] eine Struktur eingeführt, die auch zur dreidimensionalen Körpermodellierung geeignet ist. Zur Darstellung von Volumen werden Raumzellen definiert, denen Linien als

Bestandteile zugeordnet werden können. Ferner kann angegeben werden, daß Flächen innerhalb eines Volumens liegen. Diese Beschreibung macht deutlich, daß für die Integration echter dreidimensionaler Informationen sowohl auf der metrischen als auch auf der topologischen Ebene andere Konzepte eingeführt werden müssen.

Die zweite Tendenz bei der Beschreibung räumlicher Daten ist die Enumeration von Raumelementen anhand verschiedener Rasterstrukturen (Dreieck, Viereck, Hexagon, etc.) und darauf aufsetzenden Indizierungsverfahren. Insbesondere Binärbaumdarstellungen, wie Quadtree (zweidimensional) und Octree (dreidimensional), die jeweils durch gegliederte Aufteilung des Objekts eine hierarchische Rasterung verwirklichen, und Lauflängencodierungen, z.B. Peano-Code, werden zur Effizienzsteigerung eingesetzt. Dennoch können Rastermodelle keine Objektzusammenhänge oder Beziehungen zwischen Objekten repräsentieren und sind somit als Grundlage von Geo-Informationssystemen nicht geeignet.

Neben diesen zwei Standard-Strukturen in ihren diversen Ausprägungen existieren eine Vielzahl von Datenstrukturen, die direkt als Grundlage für eine spezifische Implementierung entwickelt wurden. Derartige Strukturen werden am Ende des folgenden Abschnitts als Beispiele für realisierte Geo-Datenmodelle beschrieben.

4.4.2 Geo-Datenmodelle

Zur Beschreibung realer Objekte und deren thematischen Eigenschaften, Funktionalitäten und Beziehungen untereinander sowie übergreifender Integritätsbedingungen in einem abstrakten Modell werden Datenmodelle entworfen, die die Grundlage der späteren konkreten Verwaltung und Speicherung aller anfallenden anwendungsspezifischen Informationen sind. Datenmodelle legen daher das spätere Verhalten des Datenbank-Management-Systems und der darauf aufsetzenden Anwendung fest.

Die Integration räumlicher Daten in ein Modell erfordert darüber hinaus die Konzeption eines Geo-Datenmodells. Zum einen bedeutet dies, daß die räumlichen Aspekte der realen Objekte möglichst effizient, konsistent und flexibel repräsentiert werden, d.h., es muß eine der operationalen Intension der zu speichernden Informationen optimal angepaßte Struktur des Modells entworfen werden. Räumliche Datenmodelle, die die raumbezogenen Informationen lediglich in Form thematischer Zusatzinformationen verwalten, sind daher nicht geeignet. [AS91]

Zum anderen ist die Kopplung zwischen thematischen und geometrischen Informationen ein entscheidender Aspekt bei der Konzeption eines Geo-Datenmodells. Dies muß einerseits für den Anwender transparent bleiben, d.h., die Handhabung thematischer Objekte und räumlicher Geo-Objekte darf sich bis auf die zusätzlichen Eigenschaften und Verhaltensbeschreibungen nicht unterscheiden. Andererseits erfordert die komplexe Struktur räumlicher Daten einen flexiblen Ansatz, damit auch reine Sachobjekte dargestellt werden können, räumliche Informationen veränderbar bleiben, etc. Wesentlich bleibt jedoch die Wahrung

der Konsistenz über das gesamte Modell, also sowohl bei den thematischen als auch bei den topologischen und räumlichen Zusammenhängen.

Integration räumlicher Information in Datenbanksysteme

Die Integration komplex strukturierter, heterogener Non-Standard-Informationen in Datenbanksystemen wird nicht nur im Bereich von Geo-Informationen in den letzten Jahren verstärkt untersucht. Die höheren Anforderungen der Anwender und Anwendungen an die zugrundeliegenden Datenbanken und der Wunsch nach einer einheitlichen Verwaltung aller Informationen erfordern zunächst grundlegende Ansätze zur Erweiterung von Standard-Datenbanken. Der Wunsch ist, alle Daten in den jeweils effizientesten und den Anforderungen angepaßten Strukturen zu verwalten [AS91].

Im folgenden werden drei Ansätze vorgestellt und bezüglich ihrer Vor- und Nachteile untersucht (vgl. [Wor95]).

Dateiverarbeitende Systeme: Dateiverarbeitende Systeme verwalten sowohl thematische als auch räumliche Daten der Anwendung in einzelnen Dateien mit proprietären Strukturen. Die Verarbeitung der Dateien wird nicht durch systeminterne Konzepte zur effizienten Speicherung, Integritätssicherung, etc. unterstützt und unterliegt einzig der übergeordneten Anwendungsimplementierung. Diese Systemform wird nur noch selten als Grundlage der Datenverwaltung eingesetzt, da sie weder sachbezogene noch raumbezogene Daten adäquat abbilden kann.

Hybride Modelle: Grundlage hybrider Modelle ist die Verarbeitung aller thematischen Standard-Informationen innerhalb eines Datenbank-Management-Systems. Daneben werden die Non-Standard-Informationen, also etwa geometrische Daten, in speziell zu diesem Zweck entwickelten Datenstrukturen außerhalb des Datenbanksystems abgelegt und verwaltet. Die Verbindung zwischen den Modellen kann dabei über Verknüpfungen (Links) in Form von Pointern oder Verweisen realisiert werden.

Diese Vorgehensweise findet in marktgängigen Systemen eine weite Verbreitung. Auf der Grundlage von CAD-Systemen werden die räumlichen Informationen konstruiert und über definierte Verknüpfungspunkte (zum Beispiel Schwerpunkt) oder durch direkte Anbindung an das Element mit externen relationalen oder objektorientierten Datenbanksystemen verbunden. Typische Vertreter dieser Verwaltungsform sind ARC/INFO der Firma ESRI, (hier wird bereits in der Namengebung die Zweiteilung zwischen Geometrie und Information deutlich), und MICROSTATION der Firma BENTLEY. In letzterem System stellen sogenannte *Database-Linkages* die Verbindung zwischen räumlichen und thematischen Informationen her, wobei die kommerziellen Datenbanksysteme INFORMIX, dBASE, ORACLE sowie die Datenbank-Schnittstellen RIS (Integraph Relational Interface System) und ODBC (Open Database Connectivity Standard) unterstützt werden.

Die getrennte Verwaltung der Informationen in zwei voneinander weitestgehend unabhängigen Systemen erleichtert auf der einen Seite die Integration räumlicher Informationen in bereits bestehende Datenbankanwendungen beziehungsweise, im umgekehrten Fall, von Sachinformationen in CAD-Anwendungen. Durch die Trennung kann außerdem die Performance deutlich verbessert werden, da für jeden Datentyp die ideale Modellierung gewählt werden kann. Die relativ freie Wahl des zugrunde gelegten Datenbanksystems ist ebenfalls von Vorteil.

Auf der anderen Seite können sehr leicht Inkonsistenzen im abgebildeten Modell der Realwelt auftreten, da die Systeme auch getrennt voneinander Daten manipulieren und verändern können. Ein echtes Transaktionsmanagement und Concurrency Control, wesentliche Bestandteile bei der sicheren Datenverwaltung, können nicht ausgenutzt werden. Darüber hinaus erschwert die Zuordnung von Sachinformationen an einzelne grafische Elemente die Handhabung komplexer Objekte.

Datenbanksystem-Erweiterungen: Um das Manko der getrennten Verwaltung von Standard und Non-Standard-Daten zu umgehen, werden daher immer häufiger bestehende Datenbanksysteme um zusätzliche Modellierungskonzepte erweitert. Alle anfallenden Daten der Anwendung werden in einem System verwaltet, so daß die Konsistenz des Modells zu jeder Zeit gewährleistet ist.

Prinzipiell können drei Möglichkeiten der Erweiterung unterschieden werden:

Flache Erweiterungen: Die einfachste Möglichkeit der Integration von Non-Standard-Daten ist die Abbildung der erforderlichen Strukturen auf die durch das Datenbankmodell bereitgestellten Modellierungskonzepte. Am Beispiel des Relationenmodell kann ein zweidimensionales Polygon in Randdarstellung etwa durch Relationen für Liniensegmente, die aus Linien bestehen, die wiederum aus Punkten bestehen und die ihrerseits Koordinaten darstellen, beschrieben werden.

Auf diese Weise kann jedes Datenbanksystem erweiterte Beschreibungen von Objekten verwalten. Es ist jedoch einsichtig, daß etwa komplexe räumliche Objekte nicht oder nur äußerst umständlich repräsentiert werden können. Daraus resultieren unnötig viele Datenbankzugriffe und Joins über Tabellen, um die geometrischen Objekte zu rekonstruieren, so daß die Datenbankzugriffe relativ langsam sind. Außerdem muß der Datenbankentwickler auf einem sehr niedrigen Abstraktionsniveau entwickeln, und aufgrund der Vielzahl der notwendigen Verbindungen können Operationen nicht effizient ausgeführt werden [Abe89].

Eine weitere Möglichkeit ist, die Geometrie als Folge binärer Zeichen (Bitstream) in einem BLOB (Binary Large Object) wie ein herkömmliches Attribut in einer Tabelle zu verwalten [Sta95]. Auf

die in den BLOBs gespeicherten räumlichen Informationen kann jedoch nicht mit den Mitteln der Datenbank zugegriffen werden.

Abstrakte Datentypen: Um das Problem der flachen Abbildungen zu umgehen, bei der lediglich die vom Datenmodell vorgesehene Menge von Datentypen und Operationen zur Abbildung der Non-Standard-Daten verwendet werden kann, werden in einigen Modellen abstrakte Datentypen unterstützt. Diese erlauben die Erweiterung des Modells um benutzerdefinierte Typen, die eine adäquate Beschreibung der speziellen Daten darstellen. Die neu definierten Typen verhalten sich dann wie die im Modell vorgesehenen Standard-Datentypen, zum Beispiel *integer* oder *char* [DSW90].

Stellen abstrakte Datentypen eine Verbesserung gegenüber der flachen Abbildung von Non-Standard-Daten dar, so bleiben sie dennoch sehr stark an das zugrunde gelegte Modell gebunden. Wird diese Bindung durch eine Auslagerung der Implementierung aus den modelleigenen Strukturen umgangen [DSW90], ist unter Umständen die Gesamtkonsistenz der Datenbank nicht mehr gewährleistet.

Konzeptuelle Modellerweiterungen: Um eine vollständige Integration der Non-Standard-Daten zu erreichen, ist eine konzeptuelle Erweiterung des zugrunde gelegten Datenbankmodells unumgänglich. Erst durch die Einführung spezieller, an die Anforderungen angepaßter Strukturen können die Daten effizient und für den Benutzer transparent in das Modell integriert werden. Die Trennung der Datenhaltung für Geometrie- und Sachdaten entfällt und wird durch eine einheitliche Datenhaltung im Datenbanksystem ersetzt [Wie95]. Auch im Hinblick auf eine Anfragesprache führen nur konzeptuelle Modellerweiterungen zu einer Ausnutzung der Non-Standard-Operation bei der Definition und Auswertung von räumlichen Operationen. Erst die integrierte Erweiterung des Datenmodells erlaubt eine konsequente Unterstützung und einfache Bedienbarkeit.

Der Nachteil dieses Ansatzes ist die Notwendigkeit, ein bestehendes Modell in seinen internen Konzepten zu erweitern. Flexible Anpassungen, unter Umständen sogar zur Laufzeit, können nicht realisiert werden. Eventuell notwendige Optimierungen oder Restrukturierungen bedingen jeweils konzeptuelle Veränderungen auf einer relativ niedrigen Ebene des Datenmodells.

Aufbauend auf den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Repräsentationsmodellen wurden in Abschnitt 4.4.1 Datenstrukturen zur Abbildung räumlicher Gegebenheiten beschrieben. Nach den Untersuchungen des vorangegangenen Abschnitts zur konzeptuellen Integration raumbezogener Konzepte werden im folgenden verschiedene Ansätze für Geo-Datenmodelle zur Einbindung zwei- bzw. dreidimensionaler Modelle in Datenbanken vorgestellt. Eine Aufstellung unterschiedlicher Modelle findet sich zum Beispiel in [AG97].

Einerseits existieren viele relationale Geo-Datenmodelle, die im wesentlichen als hybride Modelle oder flache Erweiterungen konzipiert sind. Aufgrund der Kom-

plexität der Daten, die in Geo-Informationssystemen zu verwalten sind, werden andererseits vermehrt objektorientierte Datenbankmodelle als Grundlage der Entwicklung gewählt. Allgemeine Anforderungen an objektorientierte Modelle für Geo-Informationssysteme definieren Egenhofer und Frank in [EF88, EF92].

Es ist zu beobachten, daß relationale und objektorientierte Erweiterungen bestehender Systeme häufig auf topologischen Vektormodellen oder einfachen Rastermodellen für die Verwaltung der räumlichen Daten aufsetzen, da diese mit den Standard-Strukturen einfach und effizient integrierbar sind. Zu derartigen Systemen zählen etwa PROBE, Starburst, TIGRIS [Her92], GODOT und GeO₂ [DRS93]. Im Rahmen des DASDBS Projektes wurde ein Konzept für die Erweiterung eines bestehenden Systems um abstrakte Datentypen konzipiert und für die Entwicklung eines Geo-Kernels eingesetzt [DSW90].

An der Universität Bonn wurde auf der Basis von Simplexen (Tetraedern) und deren räumlicher Zusammenfassung zu Objekten in Komplexen ein GeoTool-Kit in Form einer Klassenbibliothek als Grundlage für die Entwicklung von Geo-Informationssystemen entwickelt und für die Umsetzung von GeoStore, einem problemspezifischen Geo-Informationssystem, eingesetzt [BBC97]. Bei der Analyse möglicher Schnittoperationen zwischen Simplexen und Komplexen in [Bre96] werden die Probleme der diskreten Unterteilung des dreidimensionalen Raums in Tetraeder deutlich. Die Modellierung erweist sich als äußerst schwierig, und das System muß eine Vielzahl unterschiedlicher Fälle differenzieren und auf ihre Konsistenz überprüfen.

Die Betrachtung der verschiedenen Systeme verdeutlicht die Schwierigkeiten der echten Volumenmodellierung und die Notwendigkeit für einen neuen Ansatz zur Beschreibung räumlicher Objekte in Datenbanken. Aufsetzend auf dem in Kapitel 3 entwickelten Verfahren zur Volumenrepräsentation mittels Volume Non Uniform Rational B-Splines und der im folgenden Kapitel beschriebenen Entwicklung des objektrelationalen Datenbankmodells CORE wird in Kapitel 6 ein neuer Ansatz für die effiziente, konsistente und flexible Realisierung eines Geo-Datenmodells konzipiert, der die Probleme herkömmlicher Systeme aufgrund der hinterlegten räumlichen Repräsentationsstruktur lösen kann.

Kapitel 5

CORE und MORE

Bevor im folgenden Kapitel 6 die Konzepte des Geo-Datenmodells GeoCORE detailliert erläutert werden, wird zunächst die Grundlage der thematischen Modellierung, das objektrelationale Datenbankmodell *Combined Object-Relational Database Model (CORE)*, eingeführt. Für eine ausführliche und formale Beschreibung sei auf [HK96a] verwiesen. Auf Änderungen, Ergänzungen und Erweiterungen, die in [Hör99] beschrieben werden, wird hier nicht näher eingegangen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass insbesondere die Integration unscharfer Datenbankinhalte für die beschriebene Problemstellung äußerst interessante Ansätze bietet.

5.1 Das Datenbankmodell CORE

Das hier zugrunde gelegte Datenbankmodell CORE ist aus EXTREM (*Extended Relational Model* von Heuer [Heu89, HH91] hervorgegangen. EXTREM selbst ist als Nachfolger des IFO-Modells von Abiteboul und Hull [AH84, AH87] entwickelt worden und verfolgte das Ziel, objektorientierte Konzepte auf das relationale Modell bzw. dessen Erweiterung auf geschachtelte Relationen (NF², Non-First-Normal-Form) abzubilden. Im Rahmen der Projekte OSCAR (*Object Management System Clausthal, Approach: Relational*) [HFW90, Kla92] und MC-MEDIS (*Mannheim-Clausthaler Medizinisches Informationssystem*) [HMH92] wurde das EXTREM-Modell in vieler Hinsicht verändert und erweitert und hat sich dabei als mächtiges und ausdrucksstarkes Modellierungswerkzeug bewährt. Vor allem die konzeptuelle Modellierung der realen Anwendungswelt konnte mit den bereitgestellten Konzepten effizient durchgeführt werden.

Im Laufe der Entwicklung haben sich jedoch auch einige Nachteile des EXTREM-Modells bemerkbar gemacht. Einerseits ist EXTREM durch viele Ergänzungen und Erweiterungen in seiner Ausdrucksstärke herkömmlichen Modellen, etwa dem Relationenmodell von Codd [Cod70], dem Entity-Relationship-Modell von Chen [Che76] oder anderen objektorientierten Modellen, überlegen. Andererseits fehlen Abbildungskonzepte etwa für temporale und räumliche Aspekte oder die Beschreibung von Beziehungen zwischen Objekten. Zudem erschwe-

ren die vielfältigen Konzepte eine einfache Implementierung des Modells bzw. machen sie fast unmöglich.

Daher wurde, vor allem im Hinblick auf das Projekt BAGIS (Baugeologisch-Geotechnisches Informationssystem), eine Aufteilung des EXTREM-Modells in zwei neue Modelle vorgeschlagen [Hör95]. CORE wird als leicht implementierbares Kernmodell eingeführt, bei dem Abstriche an der Modellierungsmächtigkeit gemacht werden. Daneben wird das ausdrucksstarke und um anwendungsspezifische Fachschalen erweiterbare Modell MORE (*Modular Object-Relational Database Model*) eingeführt.

5.1.1 Die Modellierungskonzepte von CORE

In diesem Abschnitt werden die in [HK96a] eingeführten strukturellen und dynamischen Konzepte des objektrelationalen Datenbankmodells CORE in ihren Grundzügen erläutert. Dabei werden Ergänzungen, die in späteren internen Berichten veröffentlicht wurden, bereits mit in die Beschreibung einbezogen.

CORE ist als hybrides Datenbankmodell konzipiert worden, das neben objektorientierten Konzepten auch relationale Strukturen integriert. Diese Integration ist jedoch nicht als Rückschritt zu relationalen Datenbanken zu sehen, sondern vielmehr steht die Nutzung der Vorteile beider Ansätze im Vordergrund.

Wie bereits dargestellt haben rein objektorientierte Modelle das Manko, Beziehungen zwischen Objekten nur über Hilfskonstruktionen darstellen zu können. Zum einen kann dies über die Einführung zusätzlicher Klassen gelöst werden, die die Beziehungen in Form von Objekten verwalten. Diese Modellierung widerspricht jedoch in gewisser Hinsicht den objektorientierten Konzepten und verursacht darüber hinaus unnötigen Verwaltungsaufwand.

Zum anderen kann die Beschreibung von Beziehungen zwischen zwei Objekten durch beidseitige Referenzen gelöst werden, wobei die Überwachung der Konsistenz der Beziehungen, falls eines der beteiligten Objekte verändert oder gelöscht wird („*dangling pointer*“), schwerwiegende Probleme aufwirft.

Daher werden in CORE Beziehungen zwischen Objekten in Relationen zusammengefaßt (ähnlich wie Objekte in Klassen), die die einfache und formal definierbare Darstellung von Beziehungen ermöglichen.

In CORE werden somit drei wesentliche strukturelle Modellierungskonzepte definiert: *Klassen*, *Relationen* und *Typen*. Des weiteren stehen Methoden als dynamische Modellierungskonzepte zur Verfügung.

Klassen

Eine Klasse C als Zusammenfassung von Objekten mit gleicher Struktur und gleichem Verhalten wird in einem Datenbankschema zunächst durch ihren eindeutigen Namen $name(C)$ identifiziert. Beschrieben wird sie durch ihre statischen und dynamischen Merkmale (Attribute respektive Methoden). Die Attribute geben den Wertebereich $dom(C)$ einer Klasse vor, wobei die Domäne

eines Attributs durch die Angabe eines Datentyps spezifiziert wird. Methoden beschreiben die Operationen, die auf einem Objekt bzw. dessen Attributen ausgeführt werden dürfen. Dabei wird zwischen Query-, Update- und unbeschränkten Methoden unterschieden (s.u.). Objekte werden durch die Werte der Attribute der jeweiligen Klasse beschrieben und anhand einer eindeutigen und unveränderlichen Identität (Objekt-ID) differenziert. Ihr Zustand kann sich im Laufe ihrer Lebenszeit verändern, wobei grundsätzlich mehrere Objekte einen identischen Zustand aufweisen dürfen. Zu jeder Klasse kann eine Menge von Schlüsseln angegeben werden, bei der es sich um eine minimale identifizierende Attributmenge handelt.

Eines der wichtigsten Merkmale von Klassen ist deren Einordnung in eine Klassenhierarchie und die Vererbung von Attributen und Methoden von Oberklassen in spezialisierende Unterklassen. In CORE sind Objekte im Sinne der Teilmengensemantik der Vererbung sowohl Bestandteil ihrer speziellsten Klasse als auch aller auf dem Vererbungsweg darüberliegenden Klassen. Alle Objekte einer Klasse werden in dem Extent der Klasse verwaltet.

Klassen werden je nach ihrer Stellung in der Klassenhierarchie nach drei Kategorien unterschieden:

Basis-Klassen (*base classes*) stellen jeweils die oberste Klasse einer Klassenhierarchie dar. Die einzelnen Klassenhierarchien einer Datenbank sind paarweise disjunkt, so daß die Basisklassen die Menge aller möglichen Objekte einer Datenbank in disjunkte Teilmengen partitionieren.

Abhängige Klassen (*dependend classes*) sind die Spezialisierungen genau einer anderen Klasse. Es dürfen nur solche Objekte in eine abhängige Klasse aufgenommen werden, die bereits in ihrer Oberklasse enthalten sind.

Schnittklassen (*intersection classes*) sind die einzigen Klassen einer Klassenhierarchie, die zwei oder mehr Oberklassen besitzen. Ziel der Schnittklassen ist die explizite Auflösung von Konflikten, die bei der Mehrfachvererbung von Attributen und Methoden auftreten.

Ferner kann eine Klasse als abstrakt definiert werden, d.h., ein Objekt darf ihr nur angehören, wenn es mindestens einer ihrer Unterklassen angehört. Details zu den Problemen bei der gemeinsamen Verwendung von Schnittklassen und dem Konzept abstrakter Klassen sowie Lösungsansätze finden sich in [Hör97b].

Objekte können somit in einer nicht-abstrakten abhängigen oder Basisklasse erzeugt werden. Sie sind jedoch – im Gegensatz zu anderen Modellen – nicht an diese Klasse gebunden. Vielmehr erlaubt das Konzept der dynamischen Klassifizierungen, daß sich Objekte im Rahmen der vorgegebenen Klassenhierarchie frei bewegen können. Ein Objekt kann durch Migration in eine speziellere Klasse aufgenommen bzw. durch Demigration aus einer spezielleren Klasse gelöscht werden.

Relationen

Wie bereits erläutert werden Beziehungen zwischen Objekten in Relationen zusammengefaßt. Prinzipiell sind Beziehungen beliebiger Stelligkeit (q -näre Beziehungen, $q \in \mathbb{N}_0$) erlaubt. Beschrieben werden Relationen durch ihren eindeutigen Namen und eine Menge von Attributen, die insbesondere Referenzen auf Objekte sind. Um dem Konzept der Relationen gerecht zu werden, sind zum einen keine Referenzen als Komponenten von Typkonstruktoren erlaubt, und zum anderen ist die Lebensdauer einer Beziehung implizit an die der referenzierten Beziehungs-Objekte gebunden.

Zu Relationen kann, analog zu Klassendefinitionen, eine Menge von Schlüsselattributen angegeben werden. Des weiteren kann eine Menge von Fremdschlüsseln definiert werden, die in Anlehnung an das relationale Modell als Elemente Mengen von einwertigen Attributen enthält, die isomorph einer Menge von Attributen einer referenzierten Relation sind.

Typen

Typen werden in CORE als Zusammenfassung gleichartiger Werte mit vorgegebenem Wertebereich (der Domäne $dom(T)$ des Typs T) definiert. Im Unterschied zu Klassen werden die Werte dabei als vorgegeben angesehen und müssen nicht explizit erzeugt werden. Zu jedem Typ existiert eine Menge von Axiomen ($ax(T)$) und eine Menge anwendbarer Operationen ($op : (dom(T))^q \rightarrow dom(T)$, $q \in \mathbb{N}_0$), die diesen Axiomen genügen.

Neben den üblichen atomaren, d.h. nicht in weitere Komponenten zerlegbaren Datentypen `int`, `fixed`, `float`, `bool`, `str`, `void`, werden die datenbankspezifischen Typen `surrogate` (systemgenerierte Identifikatoren), `text` und `blob` (Binary Large Objects für binäre Daten) sowie Aufzählungstypen (`enum`) und Referenztypen (Verweise auf Objekte) bereitgestellt. Mit Hilfe der Typkonstruktoren `set`, `list` und `bag` können durch deren einfache Anwendung auf atomare Typen komplexe Typen erzeugt werden.

Methoden

Die bisher beschriebenen Konzepte definieren die strukturellen, statischen Eigenschaften einer Datenbank. Daneben spielt das Verhalten der in einer Datenbank definierten Objekte eine entscheidende Rolle. Diese dynamischen Eigenschaften werden in CORE durch Methoden beschrieben, die als Folge von Anweisungen auf den Zustand von Objekten lesend oder schreibend (d.h. verändernd) zugreifen. Zudem verwirklichen Methoden das Konzept der Kapselung der Implementierung von Klassen, um Attribute vor dem direkten Zugriff zu schützen. Auf Attribute kann und darf im Sinne der objektorientierten Philosophie nur über die entsprechenden Methoden zugegriffen werden, in CORE ist der direkte Zugriff jedoch im Hinblick auf die Effizienz des Systems erlaubt.

Methoden werden nach der Art des Zugriffs und des Einflußbereichs der entsprechenden Operationen in *Query*-, *Update*-, *Klassifikations*- und *unbeschränkte Methoden* gegliedert:

Query-Methoden (*query methods*): Methoden, die nur lesend auf die Objekte zugreifen, werden als *Query-Methoden* bezeichnet. Der Name deutet bereits darauf hin, daß diese Methoden hauptsächlich zur Realisierung von Anfragen mittels einer Anfragesprache an den Zustand eines Objektes verwendet werden. Neben der Forderung, daß Query-Methoden den Zustand des Objekts oder anderer Objekte nicht verändern dürfen, muß ferner gewährleistet sein, daß Query-Methoden sicher sind und insbesondere in endlicher Zeit terminieren. Erreicht wird diese Forderung durch die Einschränkung der Mächtigkeit der erlaubten Programmierkonstrukte.

Update-Methoden (*update methods*): Update-Methoden dienen der kontrollierten und gekapselten Veränderung von Datenbankinhalten. Somit stellen Update-Methoden um Schreibzugriffe auf einzelne Objekte bzw. deren durch ihre Attribute beschriebenen Zustand erweiterte Query-Methoden dar. An sie wird ebenfalls die Forderung nach Sicherheit und Terminierbarkeit gestellt. Seiteneffektfreiheit wird dagegen nicht gefordert, so daß Update-Methoden eines Objektes während ihrer Abarbeitung auch schreibend auf die Werte anderer Objekte zugreifen dürfen.

Klassifikations-Methoden (*classification methods*): Methoden zur Veränderung der Position von Objekten innerhalb der Klassenhierarchie, also auf einer höheren Ebene als Update-Methoden angesiedelt sind, werden als Klassifikations-Methoden bezeichnet. Es werden die folgenden vier Klassifikations-Methoden unterschieden:

Konstruktoren: Objekte werden durch den Aufruf eines Konstruktors der Klasse mit den entsprechenden initialisierenden Werten neu erzeugt. Ein Objekt darf in jeder nicht-abstrakten Basisklasse oder abhängigen Klasse erzeugt werden. Im letzteren Fall wird das Objekt automatisch in alle Oberklassen der Klassenhierarchie aufgenommen.

Destruktoren: Als Gegenstück zu Konstruktoren löschen Destruktoren Objekte vollständig aus der Klassenhierarchie und aus allen Relationen.

Migratoren: Durch Migratoren werden bereits existierende Objekte in eine speziellere Klasse innerhalb der Klassenhierarchie aufgenommen. Als Zielklasse kommt nur eine nicht-abstrakte abhängige Klasse in Frage. Werden weitere Werte zur Initialisierung des Objekts in der spezielleren Klasse benötigt, müssen diese explizit angegeben werden.

Demigratoren: Demigratoren löschen Objekte aus ihrer speziellsten Klasse, ohne sie vollständig aus dem Klassenverband zu entfernen. Wird der Demigrator in der speziellsten Klasse aufgerufen, ist das Objekt

lediglich aus diesem Extent zu entfernen. Bei einem Aufruf in einer Oberklasse wird das Objekt aus allen Unterklassen gelöscht.

Unbeschränkte Methoden (*unrestricted methods*): Die letzte Form der Methoden dient der Beschreibung aller Funktionalitäten von Objekten, die mit den vorangegangenen und in ihren Mitteln eingeschränkten Methoden nicht realisierbar sind. Diese Methoden werden daher unbeschränkte Methoden genannt, da an sie weder Forderung nach Terminierung oder Sicherheit noch nach Seiteneffektfreiheit gestellt werden. Diese Mächtigkeit wird durch die Bereitstellung einer vollständigen Programmiersprache zur Definition derartiger Methoden realisiert.

5.1.2 Die Datendefinitionssprache CORE DDL

CORE Datenbankschemata werden mit den Mitteln der Datendefinitionssprache CORE DDL (*Data Definition Language*) beschrieben und durch einen eigens dafür entwickelten Präcompiler automatisch auf ein zugrundeliegendes Datenbankmanagementsystem abgebildet. Dieses ist im Fall des Geo-Informationssystems BAGIS das objektorientierte Datenbanksystem OBJECTSTORE der Firma OBJECT DESIGN. Prinzipiell ist jedoch die Anbindung an ein beliebiges System möglich. So wurde im MC-MEDIS-Projekt eine relationale Datenbank als Systemgrundlage gewählt, die Modellierung der Schemata erfolgt dennoch auf der Ebene der CORE DLL.

Die CORE DLL erleichtert die Definition von Datenbankschemata, da sie auf abstraktem Niveau alle speziellen Konzepte von CORE zur Verfügung stellt, und so mit einfachen Mitteln eine äußerst mächtige und ausdrucksstarke Darstellung komplexer Sachverhalte ermöglicht. Dank der Übersetzung in ein Basisystem können Änderungen an Datenbankschemata in kurzer Zeit durchgeführt und direkt getestet werden. Ferner sind im Präcompiler Überwachungsmechanismen für die Überprüfung von Konsistenzbedingungen an das Datenmodell eingebettet, die bereits vor der Überführung des Schemas etwaige Modellierungsfehler aufdecken.

Im folgenden wird ein Überblick über die wesentlichen Konzepte der CORE DLL gegeben, mit deren Hilfe später das Geo-Datenmodell beschrieben wird. Die genaue Definition auf der Grundlage der Backus-Naur-Form wird in [Hör96a] gegeben.

database database1 beginnt die Definition eines Datenschemas, in dem beliebig viele Klassen, Relationen und Aufzählungstypen folgen können.

include database2, database3, ... bindet eine oder mehrere andere Datenbanken ein. Mit diesem Konzept können datenbankübergreifende Aspekte definiert werden.

use lib1, lib2, ... erlaubt die spätere Verwendung der eingebundenen Bibliotheken. Die Verwendung der Schalen des Erweiterungsmodells MORE wird auf diese Weise in eine Datendefinition integriert.

class [abstract] [intersection] class1 definiert eine Klasse mit dem Namen **class1**, die optionalen Schlüsselwörter **abstract** und **intersection** vor **class** kennzeichnen eine abstrakte respektive eine Schnittklasse.

spec class2 kennzeichnet die Klasse **class2** als direkte Oberklasse von **class1**.

attributes leitet die Definition der Attribute der Klasse ein.

[private | public] att1:int | float | ...[not null] definiert **att1** als privates oder öffentliches Attribut des angegebenen einwertigen Typs. Durch Angabe von **not null** wird das Attribut als total definiert, d.h., dem Attribut muß immer ein Wert des entsprechenden Typs zugeordnet werden.

set | list | bag of (...) erzeugt einen komplexen Typ, wobei in der Klammer beliebig viele einwertige Typen in der obigen Definitionsform angegeben werden.

unique (att1, att2, ...) dient zur Definition der Schlüsselattribute der Klasse.

[query | update] methods kennzeichnet den Anfang eines Methodendefinitionsblocks. Durch die vorangehenden Schlüsselwörter **query** und **update** werden Query- und Updatemethoden angezeigt, fehlen diese, werden unbeschränkte Methoden definiert. Die Definition von Methoden soll hier nicht weiter spezifiziert werden.

end [abstract] [intersection] class class1 schließt die Definition der Klasse ab.

relation rel1 definiert eine Relation **rel1**.

attributes leitet wie bei Klassen die Definition der Attribute ein.

[private | public] att1:int | float | ...[not null] definiert Attribute analog zur Klassendefinition, insbesondere auch Referenzattribute.

set | list | bag of (...) erzeugt Mengen, Listen und Multimengen der angegebenen Tupel, wobei im Gegensatz zur Klassendefinition keine Referenztypen verwendet werden dürfen.

unique (att1, att2, ...) definiert die Schlüsselattribute der Relation.

foreign keys(att1, att2, ...) references rel2(att1, att2, ...) legt die Fremdschlüssel der Relation fest. Die ausschließlich ein-

wertigen Attribute in den Listen müssen dabei in ihrem Typ übereinstimmen.

`end relation rel1` beendet die Definition der Relation.

`enum enum1: (value1, value2, ...)` definiert einen Aufzählungstyp mit anwendungsspezifischen Werten, die als Bezeichner ohne weitere Funktion dienen.

`constraint disjoint(class1, class2, ...)` kennzeichnet die angegebenen Klassen als paarweise disjunkt, d.h., Objekte dürfen jeweils nur in maximal einer der angegebenen Klassen enthalten sein.

`end database database1` gibt das Ende der Definition eines Datenbankschemas an.

5.1.3 Die grafische Notation

Da die Beschreibung des Geo-Datenmodells mit den Mitteln von CORE in den folgenden Abschnitten grafisch veranschaulicht wird, folgt an dieser Stelle eine kurze Übersicht über die grafische Notationsform von CORE. Eine ausführliche Beschreibung gibt [Hör97a].

In Abbildung 5.1 sind die nachfolgend beschriebenen Repräsentationsformen grafisch dargestellt.

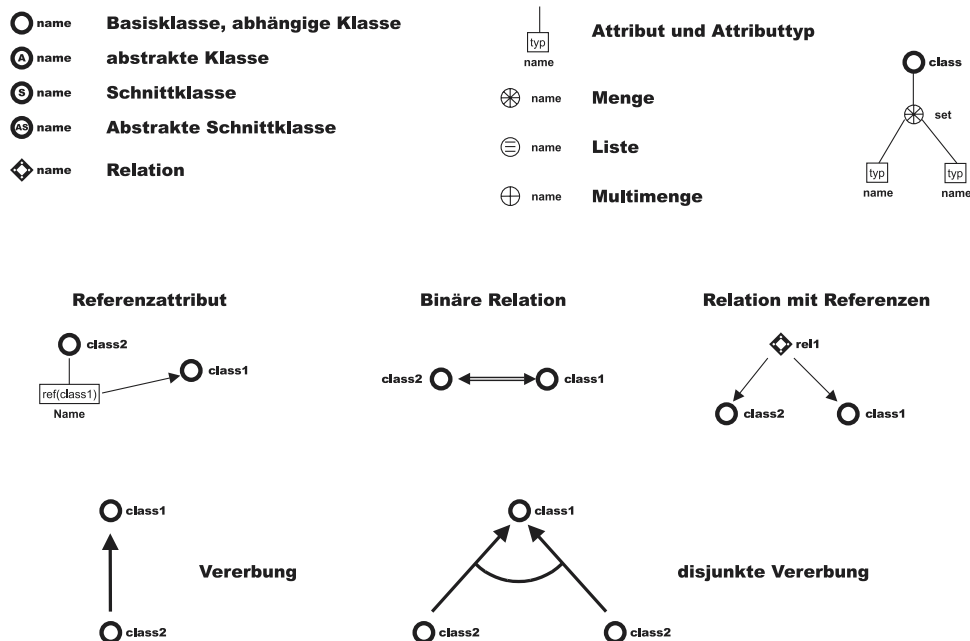


Abbildung 5.1: Die grafische Notation von CORE

Klassen werden durch einen Kreis mit dem zugehörigen Namen gekennzeichnet. Abstrakte Klassen werden durch ein *A*, Schnittklassen durch ein *S* und abstrakte Schnittklassen durch ein *AS* innerhalb des Kreises hervorgehoben. Relationen werden durch Rauten mit dem zugeordneten Namen dargestellt.

Einwertige Attribute werden durch Rechtecke repräsentiert, denen der Name des Attributs zugeordnet ist und die durch eine Linie mit ihrer Klasse verbunden sind. Innerhalb des Rechtecks wird der Typ des Attributs vermerkt. Typkonstruktoren werden ebenfalls durch eine Linie mit der jeweiligen Klasse verbunden und werden durch Kreissymbole mit einer Kennzeichnung für Mengen, Listen und Multimengen dargestellt.

Referenzen werden durch Pfeile dargestellt, die von dem Referenzattribut auf die referenzierte Klasse verweisen. Insbesondere bei Relationen wird das Attribut selbst zur Vereinfachung nicht gezeichnet, sondern lediglich der Pfeil als Verweis auf die referenzierte Klasse. Binäre Relationen (s.u.!, Abschnitt 5.2.1) werden durch Doppelpfeile zwischen den jeweiligen Attributen oder Klassen notiert.

Die Vererbungshierarchie wird durch einen Pfeil von der Unterklasse zur Oberklasse grafisch dargestellt. Hat eine Oberklasse mehrere disjunkte Unterklassen, werden die Vererbungspfeile durch einen Halbkreis verbunden.

Zur Vereinfachung der grafischen Darstellung komplexer Datenbankschemata werden häufig einzelne Teile der beschriebenen Notation weggelassen. Insbesondere bei der reinen Darstellung der Klassenhierarchie in sogenannten Klassengraphen werden Attribute nicht eingezeichnet.

5.1.4 Die Metaebene

Datenbankschemata, die für den jeweiligen Anwendungsbereich alle Benutzerdaten modellieren und mit den Mitteln der CORE DDL beschrieben sind, werden in einer zentralen, übergeordneten Metaebene verwaltet [HK96c]. Im wesentlichen handelt es sich dabei um Strukturinformationen, die den Aufbau der Benutzerdatenbanken widerspiegeln.

Diese Information dient zunächst der internen Verwaltung, kann darüber hinaus aber vor allem von den jeweiligen Anwendungen ausgenutzt werden, um zur Laufzeit Informationen über das Datenbankschema auszuwerten. Damit können generische Anfrage- und Updatekonzepte realisiert werden, die datenbankunabhängige Operationen zur Auswertung und Analyse des aktuellen Datenbankinhaltes ermöglichen. Ferner können Anwendungen auch datenbankübergreifend Informationen austauschen.

Die Metaebene folgt dem Grundkonzept von CORE, ein auf die wesentlichen Merkmale beschränktes Modell zu entwickeln. Daher bildet die Metaebene alle strukturellen Konzepte des Datenbankmodells CORE in einem für Anwendungen leicht zugreifbaren Schema ab, das sich vollständig durch die CORE DDL beschreiben läßt.

5.2 Das Schalenkonzept MORE

Wie beschrieben bildet das Kernmodell CORE die Grundlage für modulare Erweiterungen, die in dem Schalenkonzept MORE (*Modular Object Relational Database Model*) zusammengefaßt werden. Der Grundgedanke bei dieser Konzeption ist die Ergänzung datenbankspezifischer Konzepte für unterschiedliche Anwendungen. Durch den offenen Kern können Erweiterungen entwickelt und mit bereits vorhandenen Komponenten gekoppelt werden, ohne daß diese Änderungen Auswirkungen auf CORE oder andere Schalen haben.

Damit ist der Grundstein für eine flexible Anpaßbarkeit des gesamten Modells gegeben, das die Integration neuer Anwendungen wesentlich erleichtert, aber auch die Weiterentwicklung bestehender Systeme ermöglicht. Neue Schalenkomponenten können direkt in vorhandene Datenbankschemata eingebunden und ihre Funktionalitäten genutzt werden.

Bei der Definition der CORE DDL wurde bereits die Verwendung von Erweiterungen durch die **use**-Klausel erläutert. Auf der Seite der Implementierung können dabei zwei Prinzipien der Umsetzung unterschieden werden:

Interne Erweiterungen erweitern die Ausdrucksmächtigkeit des Kernmodells durch systemnahe Ergänzungen. Dabei besteht die Möglichkeit, neue elementare Datentypen mit den entsprechenden Eigenschaften zu definieren und neue Formen der Datenverwaltung zu integrieren. Beispiele hierfür sind die in den folgenden Abschnitten beschriebenen binären Relationen (*BinRels*) [Ber99] und temporalen Konzepte (*MOREtime*) [Lic00], aber auch die Erweiterungen um Nullwerte [Hör99] erfordern einen derartigen Ansatzpunkt.

Aufgesetzte Erweiterungen setzen bei der Implementierung auf den vorhandenen Features von CORE und den internen Erweiterungen auf und definieren auf dieser Basis neue Klassen und Methoden, die dann von benutzerdefinierten Datenbanken eingebunden und verwendet werden können. Das in dieser Arbeit entwickelte Geo-Datenmodell GeoCORE ist im wesentlichen eine solche Erweiterung, da auf der Seite der persistenten Datenstrukturierung und -verwaltung keine Erweiterungen der internen Strukturen vorgenommen werden. Ferner existiert die Erweiterung für Hypermedia-Strukturen (*MoreHyper*) sowie erste Ansätze für die Schale *Hyperklassifikatoren*.

Der Aufbau des MORE-Schalenkonzepts ist in Abbildung 5.2 veranschaulicht. Den Kern des Konzepts bildet CORE mit den grundlegenden Datenbankkonzepten. In der ersten MORE-Schale sind die internen und in der äußeren MORE-Schale die aufgesetzten Erweiterungen zusammengefaßt.

5.2.1 Binäre Relationen

Bei der Entwicklung des Geo-Informationssystems BAGIS, insbesondere bei der Umsetzung der datenbankspezifischen Konzepte und der Implementierung von

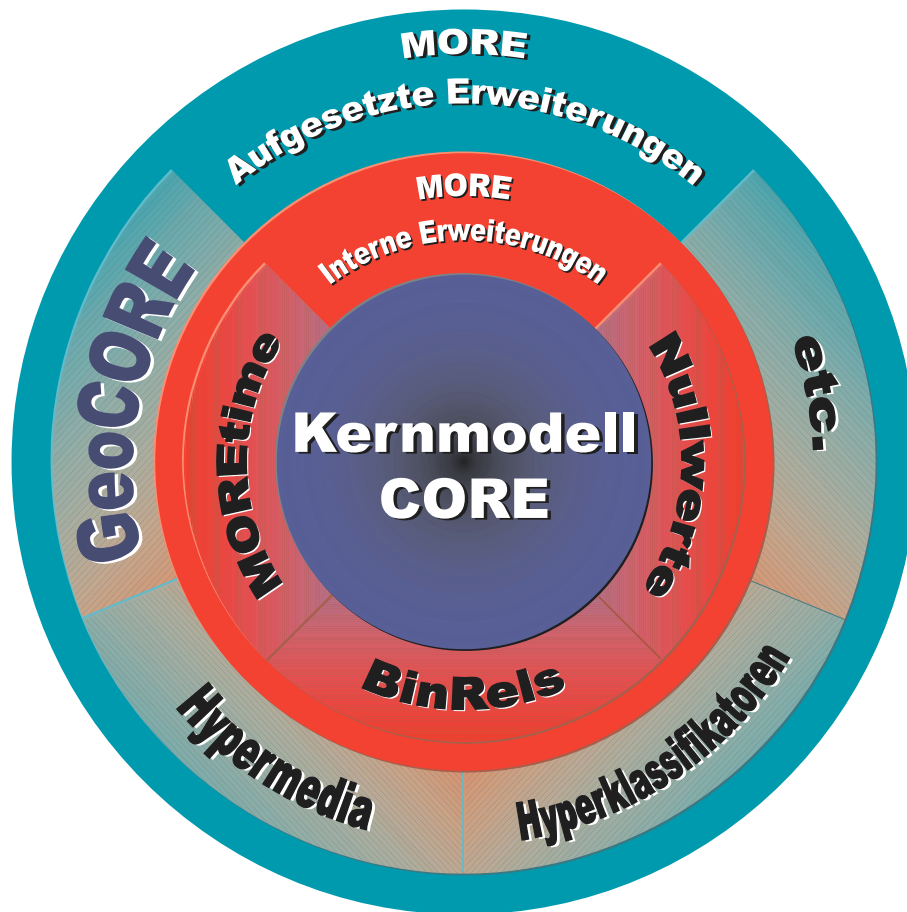


Abbildung 5.2: Das Schalenkonzept von MORE

GeoCORE, wurden zunächst die Relationen von CORE zur Modellierung aller Beziehungen zwischen Objekten verwendet. Aufgrund der Mächtigkeit und Allgemeingültigkeit von CORE-Relationen und insbesondere aufgrund der Verwaltung q -närer Beziehungen mit zusätzlichen beschreibenden Attributen erlauben diese einerseits eine elegante Modellierung komplexer Beziehungen in stark strukturierten Anwendungen. Andererseits beinhalten CORE-Relationen damit aber auch einen Verwaltungsaufwand, der sich vor allem bei einfachen 1-zu-1- und 1-zu- m -Beziehungen negativ bemerkbar macht.

Untersuchungen mit speziellen binären Relationen zwischen Objekten auf der Basis von Verweisen und Rückverweisen ergaben erhebliche Performancegewinne gegenüber normalen CORE-Relationen. Binäre Relationen können mit den vorhandenen Referenzen von CORE realisiert werden, indem je zwei Objekte gegenseitig über Referenzattribute aufeinander verweisen, jedoch muß bei dieser Form der Umsetzung die Konsistenzsicherung und automatische Aktualisierung der Beziehungen anwendungsseitig realisiert werden und ist somit fehleranfällig.

Daher wurden in [Ber99] binäre Relationen in Form der MORE-Schale **BinRel** eingeführt. Diese Form von Relationen steht allen Anwendungen zur Verfügung,

die schnelle Beziehungen zwischen zwei Objekten benötigen. Die Erweiterung stellt beidseitige 1 -zu- 1 , 1 -zu- m und m -zu- n Referenzierungen zwischen Objekten her und aktualisiert die Verbindung bei Veränderungen einer der beteiligten Objekte, so daß die Konsistenz integrativ im Datenmodell abgebildet ist.

Binäre Relationen werden in der Syntax der CORE DDL durch BinRel-Attribute in den jeweiligen referenzierenden Klassen mit den Schlüsselwörtern `binrel11 to` und `binrel1m to` bzw. `binrelm1 to` definiert:

```
database BinRelBeispiel:
use binrel;

class Klasse1
  attributes
    Att1: binrel11 to (Klasse2: Att2),
    ...;
end class Klasse1;

class Klasse2
  attributes
    Att2: binrel11 to (Klasse1: Att1),
    ...;
end class Klasse2;
...
end database.
```

Mit dieser Definition stehen in den Klassen bzw. für die jeweiligen BinRel-Attribute automatisch alle notwendigen Methoden zum Erzeugen, Setzen, Überprüfen, Verändern und Löschen der doppelseitigen Referenzen zur Verfügung. Damit liegt die Konsistenzwahrung der doppelseitigen Beziehungen nicht mehr bei dem Anwender sondern integrativ im Datenbankmodell.

Die Verwendung von binären Relationen bei der CORE DDL-Definition von GeoCORE findet sich in Anhang A.

5.2.2 Die temporale Erweiterung MOREtime

Neben thematischen und räumlichen Informationen ist die Verwaltung temporaler Daten wesentlich für die realitätsgetreue Abbildung geowissenschaftlicher Anwendungsszenarien. Neben der eigentlichen Verwaltung zeitbezogener Veränderungen der modellierten Anwendungsdomäne wird mit temporalen Konzepten insbesondere die Grundlage für Simulationen gelegt, die über den in der Datenbasis gespeicherten Wissensstand hinaus extrapolieren und Prognosen für mögliche Veränderungen aufgrund anthropogen induzierter Prozesse ermöglichen.

In [Lic00] wurde mit MOREtime ein flexibles, bitemporales Erweiterungskonzept zur effizienten und gleichberechtigten Integration zeitlicher Informationen

für CORE entwickelt. Ausgehend von dem 3W-Prinzip (Was, Wo, Wann) erfolgt die Konzeption des temporalen Modells als interne Erweiterung des Schalenmodells MORE. Die entwickelten Strukturen setzen direkt auf der Klassenhierarchie von CORE auf und stehen möglichen Anwendungen ebenso wie die eigentlichen Modellierungskonzepte von CORE zur Verfügung. Diese transparente Abbildung der zeitbezogenen Verwaltungsebene wurde insbesondere vor dem Hintergrund der zeitlichen Entwicklung der in dieser Arbeit konzipierten räumlichen Modelle konzipiert. Die Verwendung des Modells von MOREtime in GeoCORE wird in Abschnitt 6.4 eingeführt.

Die temporalen Konzepte von MOREtime beziehen sich auf die Verwaltung eindimensional-zeitlicher Veränderung von Informationen des Anwendungsmodells, d.h., sie orientieren sich am realen, kontinuierlichen Zeitstrahl. Ausgehend von einer diskreten Unterteilung der Zeitachse in konstante Zeitsegmente kleinster Granularität (*Chronons*) werden *Zeitpunkte* und *Zeitintervalle* sowie *Zeitspannen* als Längen von Zeitintervallen definiert. Zur Referenzierung noch nicht bekannter zeitlicher Obergrenzen werden die beiden äquivalenten Bezeichner **now** und **u.c.** (*until changed*) eingeführt, die jeweils den aktuellen Zeitpunkt beziehungsweise unbestimmte Zeitpunkte in der Zukunft referenzieren.

Das Zeitkonzept von MOREtime unterscheidet zwei Zeitdimensionen:

Gültigkeitszeit Diese Zeitdimension erlaubt die Spezifikation der zeitlichen Gültigkeit eines Datenbankzustandes. Anhand von Angaben des Anwenders wird die Entwicklung von Zuständen der Realwelt über die Zeit modelliert, wobei je zeitgestempeltem Element mehrere Zustände mit zugeordneten Gültigkeitszeitintervallen oder -zeitpunkten verwaltet werden.

Transaktionszeit Die Transaktionszeit ist ein vom Datenbanksystem generierter Zeitstempel, der den Zeitpunkt der Übernahme (*commit time*) neuer oder der Veränderung bereits existierender Daten der Datenbank festhält. Mit diesem Konzept wird das physische Überschreiben bzw. Löschen veralteter Informationen beim Einfügen zeitabhängig veränderter Daten durch ein logisches Verändern zugeordneter Transaktionszeitintervalle ersetzt. Die Änderung eines Wertes bewirkt die Übernahme eines neuen Wertes mit einem zugeordneten Zeitintervall, sowie die Beschränkung des ursprünglichen Wertes auf einen bestimmten Zeitraum. Mit diesem Konzept kann rückwirkend ein zu einem gegebenen Zeitpunkt in der Datenbank gespeicherter Wissensstand rekonstruiert werden, der unter Umständen von der Gültigkeitszeit der Daten verschieden ist. Die Transaktionszeit bildet die wesentliche Grundlage für ein Dokumentationssystem.

Durch eine orthogonale Integration der Zeitdimensionen in MOREtime steht es dem Anwendungsmodellierer frei, die Transaktionszeit und die Gültigkeitszeit beliebig zu kombinieren, so daß neben weiterhin möglichen nicht-temporalen Daten sowohl nur transaktionszeitgestempelte, nur gültigkeitszeitgestempelte als auch bitemporale Informationen durch das Anwendungsmodell definiert

werden können. Ferner sind die Zeitstempelverfahren nicht, wie in bisherigen Datenbankmodellen, auf eine Strukturebene beschränkt, sondern die Zeitstempelverwaltung kann sowohl auf Klassen (Objektzeitstempel) bzw. Relationen (Beziehungs- bzw. Relationenzeitstempel) als auch auf Attribute (Attributzeitstempel) und erstmals auch auf Kombinationen von Klassen, Relationen und Attributen angewendet werden. Lediglich zeitgestempelte Referenzen in Relationen werden ausgeschlossen, da diese der Semantik von Beziehungen widersprechen würden.

Die Nutzung der Konzepte von MOREtime in der erweiterten Syntax der CORE DDL erfordert zu Beginn der Datenbankdefinition die Einbindung der `moretimelib`:

```
database MOREtimeBeispiel:
use moretimelib;
...
end database.
```

Zeitstempel für die Gültigkeitszeit werden durch die Schlüsselwörter `validchronon` (Gültigkeitszeitpunkt) bzw. `validinterval` (Gültigkeitszeitintervall) direkt vor der Definition einer Klasse, einer Relation oder eines Attributtyps spezifiziert. Die Kennzeichnung von transaktionszeitgestempelten Klassen, Relationen oder Attributen erfolgt durch den Bezeichner `transaction`, der bei bitemporalen Definitionen vor den Schlüsselwörtern `validchronon` und `validinterval` angegeben werden muß.

Eine bitemporale Beispielklasse `BeispielKlasse` mit einem Gültigkeitszeitintervall und einem transaktionszeitgestempelten Attribut `Att1` und einem gültigkeitszeitgestempelten Attribut `Att2` wird durch die folgende Syntax definiert:

```
transaction validinterval class BeispielKlasse:
  attributes
    Att1: transaction int,
    Att2: validinterval str(100);
end class BeispielKlasse;
```

Die Spezifikation einer Relation `BeispielRelation` mit zugeordnetem Gültigkeitszeitintervall und einem bitemporalen Attribut `Att1` erfolgt durch:

```
validinterval relation BeispielRelation:
  attributes
    Att1: transaction validinterval int;
end relation BeispielRelation;
```

Die Verwaltung der zeitgestempelten Informationen erfolgt intern durch das Datenbanksystem und ist sowohl vom Anwender als auch vom Anwendungsprogrammierer transparent gekapselt. Grundlage der temporalen Eingabe- und Anfrageauswertung bilden temporale Operationen, die die Addition, Subtraktion

und Multiplikation von Zeitpunkten, Zeitintervallen und Zeitspannen ermöglichen, und temporale Prädikate, mit denen zeitliche Reihenfolgen (*precedes*, Zustand *a* folgt zeitlich nach Zustand *b*), Nachbarschaften (*meets*, Zustand *a* und *b* folgen direkt aufeinander), Überschneidungen (*overlaps*, Zustand *a* und *b* überschneiden sich zeitlich) und Beinhaltungen (*contains*, Zustand *a* beginnt vor und endet nach Zustand *b*) ausgedrückt werden.

Die flexible Integration temporaler Konzepte in MOREtime ist für das im folgenden Kapitel im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte Geo-Datenmodell Geo-CORE von entscheidender Bedeutung, da somit die effiziente Erweiterung des Modells in die vierte Dimension realisierbar wird (vgl. Abschnitt 6.4).

Kapitel 6

Das Geo-Datenmodell GeoCORE

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Grundlagen für die räumliche Modellierung (Kapitel 2), das räumliche Repräsentationsmodell der Volume NURBS (Kapitel 3) und das zugrunde gelegte Datenbankmodell CORE und dessen Erweiterungsschale MORE (Kapitel 5) erarbeitet wurden, wird in diesem Kapitel, aufsetzend auf den gewonnenen Ergebnissen, die Erweiterung des objektrelationalen Datenbankmodells CORE um räumliche Aspekte – das Geo-Datenmodell GeoCORE – eingeführt.

Primäres Ziel bei der Konzeption ist die gleichberechtigte Integration dreidimensional-räumlicher und thematischer Informationen in einem Datenmodell, wobei auf der Grundlage einer flexiblen Repräsentation komplex strukturierte Objekte effizient, konsistent und persistent verwaltet werden sollen. Der Wunsch nach Integration geometrischer und nicht-geometrischer Informationen wurde in der Datenbanktheorie schon früh aufgegriffen, und nicht nur im Bereich von Geo-Informationssystemen wurde nach Lösungen gesucht [HS93]. Haas und Cody sprechen in diesem Zusammenhang von einem erweiterbaren DBMS-Ansatz als *Integrator* [HC91], wobei die Erweiterbarkeit des DBMS auf allen Ebenen als wesentliches Merkmal betont wird.

6.1 Grundlegende Konzepte

Wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, ist eine wesentliche Anforderung an Geo-Informationssysteme die flexible Beschreibung unvollständiger räumlicher Modelle unter Ausnutzung aller verfügbaren Informationen und mit der Möglichkeit der späteren Erweiterung bereits vorhandener Darstellungen. Um diese Funktionalitäten effizient umsetzen zu können, sind bereits bei der Konzeption des zugrunde gelegten Geo-Datenmodells Beschreibungsmechanismen vorzusehen, die diesen speziellen Anforderungen genügen.

Bei der Entwicklung von GeoCORE wurde dieser Aspekt daher bereits bei der Konzeption der grundlegenden Strukturen des Modells berücksichtigt. Dabei

resultiert die Grundstruktur des Modells aus der Unterteilung der anfallenden Informationen in die drei Aspekte Thematik, Raum und Zeit.

Erste Ansätze zu einer derartigen Dreiteilung finden sich in [Sin78] bei der Konzeption einer Struktur für Geo-Informationssysteme. Sinton argumentiert, daß Informationen, die nicht alle drei Informationsaspekte erfüllen, als unvollständig zu bewerten sind und daher nicht in das System übernommen werden dürfen. In dieser Arbeit soll jedoch genau die konsistente Verwaltung auch von Informationsdefiziten und die in zeitlicher Abfolge verlaufende Erfassung zunächst nur in Ausschnitten bekannter Informationen konzeptuell ermöglicht werden.

Thematische Informationen: Dieser Informationsaspekt umfaßt alle Sachdaten, die zur Beschreibung des Modells der Realwelt notwendig sind. Prinzipiell handelt es sich dabei um Daten, die mit normalen Datenbankmodellen bzw. Datenbankkonzepten beschrieben werden können.

Räumliche Informationen: Der räumliche Informationsaspekt umfaßt alle Informationen, die zur Beschreibung des räumlichen Modells notwendig sind. Dazu gehören jedoch nicht nur die konkreten Beschreibungen der einzelnen Objekte, sondern auch weitere, darüber hinausgehende Informationen, die zum einen die Strukturierung der Daten erlauben und zum anderen weiterführende räumliche Informationsaspekte beinhalten. Zu letzteren zählen in diesem Zusammenhang insbesondere die in Abschnitt 2.1 beschriebenen topologischen Informationen, die Auskunft über die relative Lage räumlicher Objekte zueinander geben können und dabei zunächst unabhängig von der konkreten Form und Darstellung der Objekte sind.

Zeitliche Informationen: Durch den zeitlichen Informationsaspekt können Modelle mit thematischen und räumlichen Informationen in ihrer Entwicklung über die Zeit betrachtet werden. Dabei kann zwischen zwei Formen zeitlicher Information unterschieden werden.

Zum einen kann die lineare Entwicklung eines Modells über die Zeit betrachtet werden, d.h., es werden Veränderungen des Modells in Abhängigkeit von diskreten Zeitpunkten, Zeitintervallen und kontinuierlichen Zeitrepräsentationen verwaltet und unter Umständen über den aktuellen Zeitpunkt hinaus dargestellt. Grafisch kann diese Form des Zeitaspektes als eindimensionaler Zeitstrahl dargestellt werden.

Zum anderen kann in Ergänzung oder als Alternative zur linearen Zeit die Versionierung von Modellen realisiert werden. Ausgehend von einem oder mehreren Modellen werden durch Modelländerungen unterschiedliche Alternativen der Modellbildung betrachtet. Darstellbar ist dieser zeitliche Aspekt durch einen sich verzweigenden Zeitstrahl, der auch das Zusammenführen unterschiedlicher Modelle bzw. verschiedener Versionen ein und desselben Modells erlaubt.

Letztere Form von Zeitaspekten dient vor allem der datenbankbasierten Repräsentation von Szenarien in der Entwicklung über die Zeit, die mittels Simulation Aussagen und Prognosen über die Veränderung des Modells

unter differierenden Annahmen ermöglichen sollen und somit die Grundlage der Parameterevaluation bilden.

Ausgehend von diesen drei Informationsaspekten findet in GeoCORE zunächst eine Unterteilung des Modells in thematische, d.h. mit CORE beschreibbare, und räumlich-zeitliche Informationen statt. Diese Unterteilung soll im folgenden durch eine Betrachtung der Anforderungen an das Geo-Datenmodell in den speziellen Anwendungsfällen Geologie/Geowissenschaften und Medizin weiter ausgeführt werden, wobei die Aussagen analog auf andere Bereiche der Anwendung räumlicher Datenverarbeitung zutreffen.

Die Integration zeitlicher Informationsaspekte erfolgt in dieser Arbeit durch eine erweiterte Darstellung der räumlichen Ebene, so daß erste Ansätze zur Repräsentation zeitbezogener Veränderungen des dreidimensionalen Modells als Grundlage von Prozeßsimulationen darstellbar sind. Eine ausführliche Behandlung zeitbezogener Datenbankkonzepte als Erweiterung von CORE findet sich in [Lic00].

6.1.1 Modellbildung in räumlichen Informationssystemen

Zu Beginn einer jeden Datenerhebung oder Modellbildung werden die grundlegenden Informationen zu dem speziellen Vorhaben erfaßt. Im geowissenschaftlichen Fall sind dies beispielsweise Angaben zu dem zu erkundenden Gebiet, im medizinischen Bereich können dies zum Beispiel Aussagen über die Art der Untersuchung, den chirurgischen Eingriff bzw. Patientendaten sein.

Bei diesen grundlegenden Informationen handelt es sich um rein thematische Sachverhalte, die vorerst ohne jeglichen Raumbezug verwaltet werden können.

Grundsätzlich kann im Vorfeld der Gewinnung von Informationen zur modellhaften Repräsentation davon ausgegangen werden, daß ein gewisses Grundwissen über den untersuchten Anwendungsbereich vorliegt. Ein Geologe kann etwa ohne Voruntersuchungen mehr oder weniger genaue Aussagen über die stratigraphische Schichtenfolge in einem bestimmten Gebiet machen. Ebenso kennt der Mediziner den Aufbau des menschlichen Körpers und kann daher bereits vor einem konkreten operativen Eingriff diesbezügliche Aussagen treffen.

Diese Information ist zunächst wieder thematischer Natur (Namen der stratigraphischen Schichten bzw. der inneren Organe etc.), beinhaltet aber erste räumliche Aspekte: die relative Lage der verschiedenen räumlichen Objekte zueinander bzw. der abstrakte Aufbau der Objekte selbst, d.h. die Topologie des Modells.

Diese Vorabinformationen, das Expertenwissen des Anwenders, sollen möglichst in einem frühen Stadium der Erkundung der Realwelt Eingang in das Modell finden, um es später durch mehr oder minder exakte Daten zu ergänzen, die im geowissenschaftlichen Fall erst im Laufe der Erkundung bzw. im medizinischen Fall erst nach den ersten Röntgen-/CT-/MR-Aufnahmen oder dem ersten Schnitt erhoben werden. Bei diesen Daten handelt es sich um die Beschreibung der Objekte in ihrer Form und ihrem Aussehen, d.h. der metrischen Information des Modells.

6.2 Das 3-Ebenen-Modell

Ausgehend von den drei Informationsaspekten Thematik, Topologie und Metrik wurde in GeoCORE eine Untergliederung des Gesamtmodells in drei Ebenen der räumlichen Repräsentation vorgenommen, um den Ablauf der Informationsgewinnung und -verarbeitung bereits integrativ im Modell abzubilden.

Im Gegensatz zur Konzeption von GeoCORE in [HK96b] wird in der vorliegenden Arbeit die Trennung von Thematik, Topologie und Metrik durch drei mehr oder minder unabhängige Klassenhierarchien aufgehoben. Vielmehr werden topologische und metrische Informationen in einer Hierarchie zur Verwaltung der räumlichen Informationen zusammengefaßt, da mit diesem Ansatz nicht nur ein erheblicher Performancegewinn in Bezug auf die räumlichen Operationen erzielt wird, sondern insbesondere die Wahrung der Konsistenz zwischen topologischen und metrischen Informationen wesentlich vereinfacht wird. Darüber hinaus können Redundanzen auf der Ebene der räumlichen Informationsverarbeitung vermieden werden, die in der ursprünglichen Konzeption von GeoCORE bei der Verwaltung topologischer und metrischer Beziehungen auftraten.

Nicht zuletzt ergibt sich diese Veränderung der Klassenhierarchie aus der Integration der V-NURBS-Darstellung und der einheitlichen Repräsentation der metrischen Objekte. Die Abkehr von der Randdarstellung erlaubt eine deutlich kompaktere Darstellung der metrischen Ebene. Erforderte der ursprüngliche Ansatz eine Untergliederung des metrischen Klassenschemas in mehrere disjunkte Hierarchien, deren Wurzeln jeweils abstrakte Basisklassen unterschiedlicher Dimensionalität waren und die ausgehend von den Operationen der Erzeugung unterteilt wurden, ist nun je Dimension nur eine metrische Klasse erforderlich. Die exakte Beschreibung der metrischen Ebene folgt in Abschnitt 6.2.3.

Da das Modell von GeoCORE aber nach wie vor auf der Unterscheidung thematischer, topologischer und metrischer Informationen beruht, und diese Informationsaspekte auch weiterhin im Modell direkt voneinander unterscheidbar sind, wird der konzeptuelle Aufbau des Geo-Datenmodells auch künftig als *3-Ebenen-Architektur* von GeoCORE bezeichnet.

Thematische Ebene: Die thematische Ebene beschreibt zunächst die Sachinformationen aller Objekte, unabhängig davon, ob sie einen Raumbezug besitzen oder nicht. Dabei sind alle Modellierungskonzepte von CORE uneingeschränkt anwendbar.

Topologische Ebene: Wird eine Klasse als Geo-Klasse definiert, so kann jedem in ihr erzeugten thematischen Objekt eine Menge topologischer Objekte über binäre *m-zu-n* Relationen zugeordnet werden.

Diese Modellierung erlaubt die Verwaltung topologischer Beziehungen zwischen GeoObjekten, ohne daß dabei bereits Kenntnisse über deren exakte Form und Ausprägung vorliegen müssen. Somit können Beziehungen zwischen Objekten in das Modell aufgenommen werden, die etwa anhand von Expertenwissen bezüglich globaler Zusammenhänge bekannt sind.

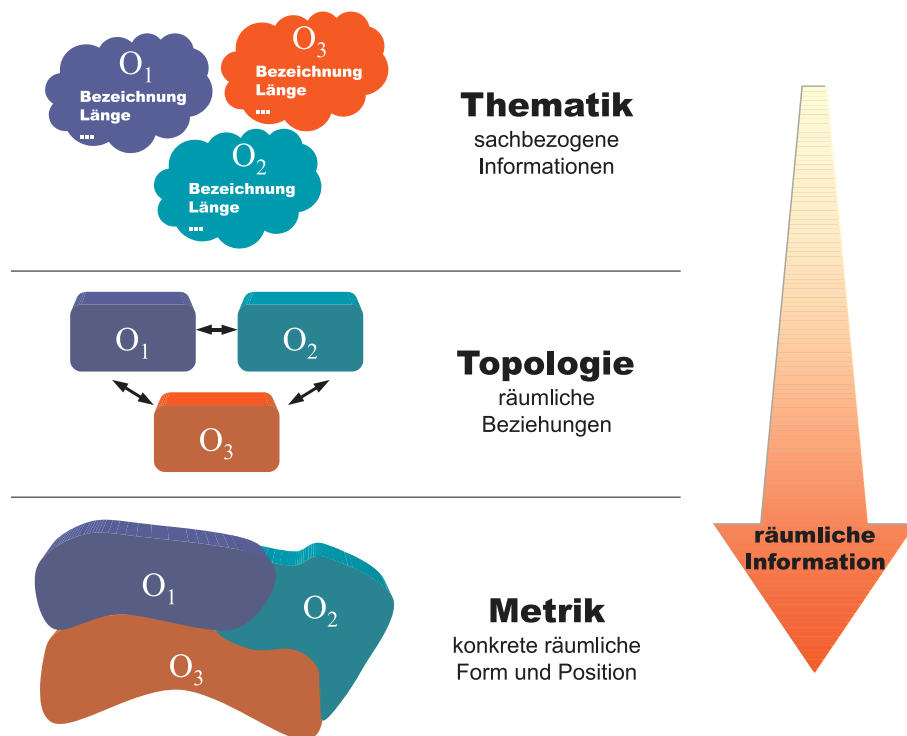


Abbildung 6.1: Die 3-Ebenen-Architektur von GeoCORE

Metrische Ebene: Wesentlich bei der räumlichen Modellierung ist jedoch die Möglichkeit, zu einem späteren Zeitpunkt weitere Informationen über die konkrete Ausprägung der GeoObjekte aufnehmen zu können. Diese Daten zur Form und Position werden in der dritten Ebene des Modells, der metrischen Ebene, verwaltet.

Die 3-Ebenen-Architektur ist in Abbildung 6.1 grafisch veranschaulicht. Auf der Ebene der thematischen Informationen stehen die Objekte zunächst in keinem räumlichen Bezug zueinander. Die topologische Ebene führt relative Beziehungen zwischen den Objekten ein, trifft jedoch keine Aussage über deren Form und Lage im Raum. Diese Information wird vielmehr auf der metrischen Ebene eingeführt. Der Gehalt räumlicher Information wird sukzessive über die drei Ebenen erweitert und erlaubt damit integrativ die stetige Ergänzung und Erweiterung bestehender Datenbankinhalte.

Ohne den folgenden Ausführungen vorzugreifen, sei an dieser Stelle anhand der Klassenhierarchie der strukturelle Aufbau von GeoCORE verdeutlicht (Abbildung 6.2). Ausgehend von den topologischen Klassen (links) werden die echten topologischen Klassen (mitte links) abgeleitet. Diese werden wiederum zu den metrischen Klassen (mitte rechts) spezialisiert. Zur Darstellung der metrischen Information stehen die metrischen Klassen in binärer Relation zur Volume NURBS-Repräsentation (rechts).

In den folgenden Abschnitten werden die thematische und die beiden geome-

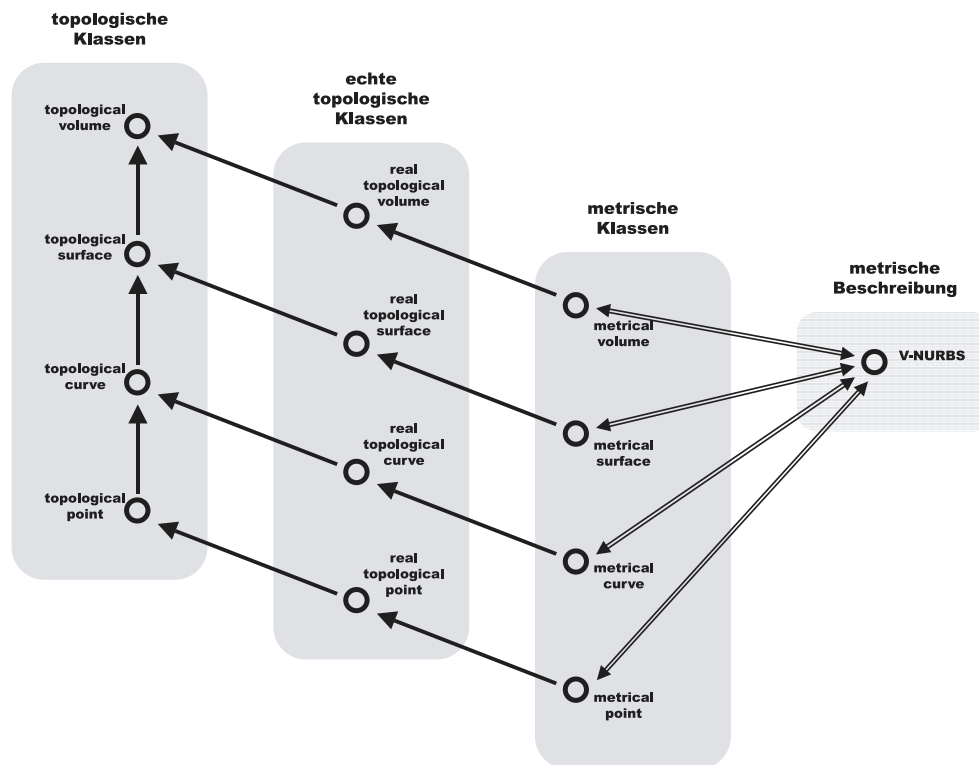


Abbildung 6.2: Die Klassenhierarchie von GeoCORE

trischen Ebenen, Topologie und Metrik, im Detail erläutert und die Klassenhierarchie Schritt für Schritt eingeführt. Im Anschluß wird die Kopplung der drei Ebenen konzipiert und die Integration der zeitlichen Informationsaspekte in ersten Ansätzen dargestellt.

6.2.1 Die thematische Ebene

Die oberste Ebene des Geo-Datenmodells GeoCORE dient der Verwaltung aller nichträumlichen, thematischen Informationen. Die Modellierung erfolgt dabei mit den durch CORE bereitgestellten Datenbankkonzepten. Zur Integration der räumlichen Modellierungskonzepte werden die Objekte der thematischen Ebene hinsichtlich der möglichen räumlichen Ausprägung der Objekte erweitert. Dazu wird unterschieden, ob einem Objekt prinzipiell ein Raumbezug zugeordnet werden kann oder nicht.

Objekte ohne jeglichen Raumbezug werden als thematische Objekte bezeichnet. Zu ihnen zählen beispielsweise Dokumente, Karten und Pläne, Personen oder Firmen, etc.¹ Sie unterscheiden sich in der Modellierung nicht von Objekten, die in einer Datenbank ohne räumliche Information erzeugt werden.

¹Je nach konkretem Anwendungsfall kann auch derartigen Informationen unter Umständen eine räumliche Position zugeordnet werden.

Objekte, denen prinzipiell eine räumliche Position und gegebenenfalls eine Form und Ausdehnung zugeordnet werden kann, werden als GeoObjekte bezeichnet. Sie unterscheiden sich auf der thematischen Ebene zunächst nur durch ihre Kennzeichnung als GeoObjekt von rein thematischen Objekten. Bei ihrer Definition kann darüber hinaus angegeben werden, welche maximale Dimensionalität (zum Begriff der maximalen Dimensionalität s.u.!) sie später annehmen dürfen. Damit kann bereits bei der Entwicklung des Datenschemas Einfluß auf das Aussehen und die gewünschte Funktionalität des späteren Modells genommen werden.

Ein reales Objekt mit volumenhafter Ausdehnung kann somit bereits im thematischen Datenschema so gekennzeichnet werden, daß bei der räumlichen Modellierung lediglich eine flächen-, kurven- oder punkthafte Darstellung erlaubt ist. Aus dem Kontext der Anwendung wird durch diese Einschränkung der Dimensionalität auf der thematischen Ebene irrelevante Information aus der Modellierung ausgeschlossen.

Bei der Modellierung eines Talsperrenbauwerks und des umgebenden geologischen Umfeldes ist beispielsweise die Repräsentation von Straßen zur Planung möglicher Zufahrtswege sinnvoll, um die Einsatzmöglichkeiten für Baustellenfahrzeuge auswerten zu können. In der Regel ist die Modellierung der Straßen jedoch nicht volumenhaft in der Datenbank darzustellen, sondern lediglich als Flächen- oder Liniennetz. Durch die Einschränkung der Dimensionalität legt die Anwendungsmodellierung fest, daß keine räumliche Information über die volumenhafte Ausprägung des Straßennetzes modelliert werden kann und darf.

In [Ber99] wurde die Erweiterung der Core DDL um Sprachkonzepte für die Festlegung von GeoObjekten eingeführt. Die Kennzeichnung eines thematischen Objektes als GeoObjekt und die Angabe der maximalen Dimensionalität erfolgt durch den Bezeichner **geoclass** und die optionale Spezifizierung als **volume**, **surface**, **curve** oder **point**. Fehlt die explizite Spezifizierung, wird die maximale Dimensionalität eines Volumens angenommen.

```
use geocorelib

...
geoclass volume anchor:
  attributes
    ...;
end geoclass volume anchor;
```

In diesem Beispiel wird die DDL-Erweiterung von GeoCORE eingebunden (**use geocorelib**) und eine Klasse **Anchor** als geometrisches Objekt mit der maximalen Dimensionalität eines Volumens definiert. Die Definition der Attribute, Methoden und Integritätsbedingungen ist gegenüber einer rein thematischen Klassendefinition unverändert.

6.2.2 Die topologische Ebene

Bevor im folgenden die Konzepte zur Repräsentation topologischer Informationen in GeoCORE erläutert werden, sei zunächst deren Verwendung innerhalb des Geo-Datenmodells begründet.

Topologie stellt einen wesentlichen Bestandteil der menschlichen Verwendungs- und Beschreibungsform räumlicher Sachverhalte dar. Im Alltag werden topologische Begriffe wesentlich häufiger als metrische verwendet, da letztere nur bei direktem Vorliegen exakter Informationen verwendet werden können. Demgegenüber kann mit Hilfe topologischer Aussagen trotz fehlender Daten ein breites Spektrum räumlicher Information ohne Verfälschung abgedeckt werden.

Beispielhaft seien hier linguistische Aussagen für einige in Definition 2.6 erläuterte topologische Beziehungen angeführt:

- Die beiden Häuser sind benachbart. (*Nachbarschaft*, (2.15))
- Das Grundstück wird von der Straße begrenzt. (*Begrenzung*, (2.16))
- Der Garten umgibt das Haus. (*Umschließung*, (2.18))

Im Sinne der Datenverwaltung können die beschriebenen räumlichen Operationen häufig überladen sein, das heißt, sie können als Parameter Objekte verschiedener räumlicher Dimension verarbeiten. Gleichheit, Disjunktheit und Nachbarschaft können zwischen beliebigen Kombinationen räumlicher Objekte unterschiedlicher Dimension definiert werden.

Auch im Hinblick auf topologische Anfrageauswertungen müssen die verschiedenen Kombinationen unterschiedlich dimensionaler Objekte beachtet werden. So kann der nichtleere Schnitt zweier Körper eine Fläche, eine Kurve oder sogar nur ein Punkt sein. Nachfolgende Operationen müssen diesen Sachverhalt berücksichtigen und entsprechend der jeweiligen Dimension des Ergebnisobjekts ausgelegt werden.

Wie beschrieben soll ferner die Möglichkeit bestehen, reale räumliche Objekte zunächst durch GeoObjekte niedrigerer Dimensionalität darzustellen, um später anhand neuer Erkenntnisse die bereits vorhandene Information nicht vollständig revidieren zu müssen, sondern lediglich zu ergänzen.

Topologische Klassenhierarchie

Auf der topologischen Ebene von GeoCORE wird daher eine Klassenhierarchie auf der Grundlage der maximalen Dimensionalität topologischer Objekte definiert, die in Abbildung 6.3 grafisch und in Anhang A in CORE DDL dargestellt ist. Die Basis bildet die Klasse der topologischen Volumina (**topological volume**). Von dieser Klasse ausgehend werden nacheinander die Klassen topologische Fläche (**topological surface**), topologische Kurve (**topological**

curve) und topologischer Punkt (**topological point**) in einer Spezialisierungshierarchie angeordnet, d.h., ein topologischer Punkt ist eine spezielle topologische Kurve, die wiederum eine spezielle topologische Fläche darstellt, und die Fläche ist schließlich ein spezielles topologisches Volumen. Damit wird zum Ausdruck gebracht, daß eine Fläche im Prinzip ein Volumen ist, das lediglich in einer Richtung keine Ausdehnung hat. Daher werden räumliche Objekte, die die Spezialisierung eines höherdimensionalen räumlichen Objekts sind, als **degeneriert** bezeichnet.

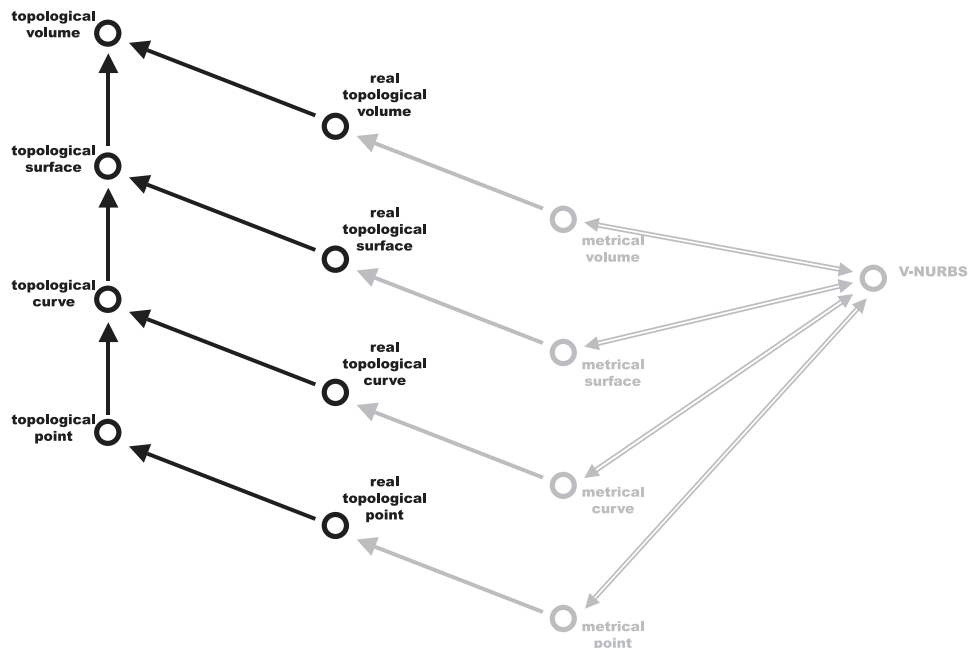


Abbildung 6.3: Die topologische Ebene

Durch die dynamische Klassenzugehörigkeit und die Teilmengensemantik der Vererbung von CORE ermöglicht die beschriebene Konzeption der topologischen Klassenhierarchie, daß ein GeoObjekt in der topologischen Hierarchie zunächst als Punkt erzeugt und behandelt wird, und dann im Laufe seiner Existenz durch Demigration in der Hierarchie bis zu einem Volumen generalisiert werden kann. Im Zuge dieser Demigration gehen dann u.U. Beziehungen verloren, die Objekten niedrigerer Dimensionalität vorbehalten sind. Gleichzeitig hat das Objekt aber von Beginn an alle Eigenschaften – insbesondere auch alle Methoden – eines topologischen Volumens.

Daher können alle Operationen auf der Klasse maximaler Dimension, auf der sie anwendbar sind, allgemein definiert und bei Bedarf in der spezielleren Klasse redefiniert werden. Der Vorteil bei dieser Vorgehensweise liegt in der transparenten Handhabung: eine Operation kann ohne Berücksichtigung der Dimensionalität der beteiligten GeoObjekte aufgerufen werden. Bei der Anfrageauswertung ist dies von Vorteil, da die Dimension eines räumlichen Objektes als Ergebnis einer Anfrage im allgemeinen nicht von vornherein bekannt ist.

Wird zu einem bestimmten Zeitpunkt festgelegt, welche metrische Modellierung und damit welche Dimension das topologische Objekt repräsentieren soll, kann es in eine *echte* topologische Klasse migrieren. Damit wird das Objekt auf genau eine Dimension festgelegt und erlaubt die Modellierung weiterführender topologischer Beziehungen bei gleichzeitiger Überprüfung der Konsistenz.

Die echten topologischen Klassen werden als disjunkte Unterklassen der topologischen Klassen der jeweiligen Dimension definiert, so daß daraus die vier Klassen der echten topologischen Volumen (**real topological volume**), Flächen (**real topological surface**), Kurven (**real topological curve**) und Punkte (**real topological point**) resultieren.

Zur Verdeutlichung sei angemerkt, daß im Gegensatz zu den Ausführungen in [HK96b] nicht verlangt wird, daß echten topologischen Objekten bereits eine metrische Beschreibung zugeordnet sein muß. Die Aufnahme in eine echte topologische Klasse legt fest, daß ein GeoObjekt eine bestimmte räumliche Ausdehnung hat. Durch die Festlegung auf eine Dimension sind bereits alle Anforderungen für die Behandlung in speziellen topologischen Beziehungen gegeben, die darüber hinaus bei der Demigration aus einer echten Klasse wieder verlorengehen.

Topologische Beziehungen

Die Abgrenzung der topologischen Information sowohl von der metrischen als auch von der thematischen Ebene dient vor allem der Darstellung topologischer Beziehungen zwischen zwei oder mehreren topologischen Objekten. Ausgehend von der Konzeption des Geo-Datenmodells ist topologische Information eines oder mehrerer GeoObjekte insbesondere dann von Interesse, wenn noch keine exakte Kenntnis über die metrische Form und Position bekannt ist. Daher werden in den meisten Fällen der räumlichen Modellierung zunächst topologische Beziehungen als räumliche Informationsträger in die Datenbank eingebracht. Mit diesen topologischen Informationen werden Kenntnisse des Anwenders informationstechnisch definiert, die als Grundlage für die weitere Modellierung anzusehen sind. Der Anwender kann also fordern, daß eine bestimmte topologische Beziehung zwischen den beteiligten GeoObjekten gelten soll.

Topologische Beziehungen helfen nicht nur bei der räumlichen oder der konkreten metrischen Modellierung eines Ausschnitts der Realwelt, sondern insbesondere auch bei der Veränderung bestehender Modelle. Da der Anwender durch die topologischen Beziehungen einen Rahmen für die metrische Realisierung festgelegt hat, können Verschiebungen oder Verformungen metrischer Objekte anhand der Topologie auf ihre Konsistenz im Hinblick auf das Gesamtmodell überprüft werden. Wird beispielsweise topologisch gefordert, daß zwei Objekte benachbart sind, und eine metrische Darstellung spiegelt diesen Sachverhalt auch wider, dann muß nach einer Manipulation eines der beteiligten Objekte die Nachbarschaft weiterhin gelten. Kann eine bestehende topologische Beziehung nicht verifiziert werden, muß der Anwender durch das System auf die Inkonsistenz hingewiesen und die Veränderung rückgängig gemacht werden.

Zur Unterstützung der Modellierung sind ferner Mechanismen realisierbar, bei denen topologische Bedingungen während der Manipulation einzelner metrischer Objekte durch den Anwender automatisch umgesetzt werden. Verschiebt der Anwender zum Beispiel ein Objekt, so werden die topologisch benachbarten Objekte entweder mitverschoben oder verformt, um die Beziehung weiterhin zu erfüllen.

Die Festlegung topologischer Beziehungen durch den Anwender bedeutet einerseits, daß eingetragene topologische Beziehungen bei der nachfolgenden metrischen Modellierung oder einer späteren Veränderung berücksichtigt werden müssen, d.h., die metrische Information muß den zuvor festgelegten topologischen Beziehungen genügen.

Andererseits bedeutet die explizite Eingabe und vorrangige Behandlung topologischer vor metrischer Information, daß aus metrischer Information keine topologische abgeleitet werden darf. Ist zum Beispiel ein metrisches Objekt einem anderen metrischen Objekt benachbart und ist diese Beziehung auf der topologischen Ebene vom Anwender nicht definiert worden, so darf dieser Sachverhalt auch nicht in die Topologie übernommen werden, denn die Objekte können rein zufällig benachbart sein. Bei der Übertragung der Nachbarschaft in die topologische Ebene würde eine nachfolgende Trennung der metrischen Objekte und Aufhebung der Nachbarschaft, auch wenn dies durchaus korrekt wäre, eine Konsistenzverletzung hervorrufen, die in dieser Form vom Anwender nicht gewünscht sein kann.

Durch die vorrangige Berücksichtigung topologischer Beziehungen vor der metrischen Darstellung wird ferner die Abarbeitung räumlicher Anfragen festgelegt. Zur Überprüfung räumlicher Beziehungen (*Sind zwei Objekte benachbart?*) wird zunächst auf der topologischen Ebene untersucht, ob ein gegebener Sachverhalt dargestellt ist. Ist das der Fall, kann die räumliche Anfrage direkt beantwortet werden, ohne daß diese Aussage auf der metrischen Ebene überprüft werden muß. Nur im Falle des Fehlens einer topologischen Aussage ist die Anfrage auf der metrischen Ebene auszuwerten.

Zur Verdeutlichung des Konzepts der Klassenhierarchie von GeoCORE sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die Angabe topologischer Beziehungen durch den Anwender optional ist. Werden keine Informationen auf der topologischen Ebene verwaltet, verhält sich das Modell von GeoCORE wie ein Datenmodell zur reinen Darstellung metrischer Daten. Die Topologie ist daher ein Zusatz, der dem Anwender bestimmte Möglichkeiten zur konsistenten und in gewisser Hinsicht constraint-basierten Modellierung bereitstellt, ohne daß damit Anforderungen an den Modellierungsprozeß verbunden sind. Dies ist im Sinne der Zielsetzung zu sehen, ein flexibles, aber dennoch ausdrucksstarkes Geo-Datenmodell zu konzipieren, das eine Vielzahl an Modellierungstechniken bereitstellt, von denen der Anwender je nach Einsatzbereich profitieren kann, die aber immer fakultativ sind.

Zurückgreifend auf die Definitionen 2.6 und 2.7 wird im folgenden die Verwaltung der topologischen Beziehungen in GeoCORE eingeführt. Zunächst sei jedoch darauf hingewiesen, daß die in Definition 2.6 eingeführten Beziehungen

Gleichheit (*equal*, (2.13)) und Disjunktheit (*disjoint*, (2.14)) in GeoCORE nicht als topologische Beziehungen aufgenommen werden.

Die Gleichheit ist bereits implizit im Modell realisiert, da thematische Objekte mit Raumbezug, die in der Realität auf ein und denselben räumlichen Sachverhalt verweisen, auch in der Modellierung von GeoCORE dasselbe topologische Objekt referenzieren (z.B. ein Fluß mit zugeordneten thematischen Eigenschaften, der gleichzeitig als Grenze zweier Länder referenziert wird). Die ausführliche Darstellung der Zuordnung zwischen thematischen und topologischen Objekten folgt in Abschnitt 6.3 bei der Darstellung der Kopplung der Ebenen.

Die Disjunktheit wird bei Körpern bereits durch die grundlegenden Konzepte von GeoCORE abgebildet, da sie sich zunächst nur in ihrem Rand schneiden dürfen. Daher würde die sich Disjunktheitsbeziehung nur auf topologische Flächen, Kurven und Punkte beziehen. Diese Form des Expertenwissens soll nicht mit in das Modell von GeoCORE aufgenommen werden, da die topologischen Beziehungen Zusammenhänge ausdrücken, die gelten sollen. Die Disjunktheit drückt aus, daß bestimmte Situationen zwischen räumlichen Objekten nicht auftreten sollen und steht somit im Widerspruch zum Modellierungskonzept topologischer Beziehungen. Mit der Einführung der Disjunktheit müßten ferner auch die Negationen aller anderen Beziehungen bereitgestellt werden (*Die topologischen Objekte sind nicht benachbart*, etc.), ohne daß damit der Informationsgehalt im Hinblick auf die geowissenschaftliche Modellbildung gesteigert würde.

In Abschnitt 2.1.1 wurde bereits angesprochen, daß in GeoCORE zunächst in Anlehnung an die physikalischen Gesetzmäßigkeiten gefordert wird, daß sich an einem Ort im Raum keine zwei Körper gleichzeitig befinden können. Diese Forderung wird im System überwacht, um mögliche Inkonsistenzen des dreidimensionalen Modells zu vermeiden. Modelliert der Anwender versehentlich zwei Körper, die sich nicht nur in ihrem Rand schneiden, wird bei Beendigung der Transaktion eine Fehlermeldung ausgegeben. Das System verwehrt dann entweder die Speicherung in der Datenbank oder nimmt unter Anleitung des Anwenders eine Verschneidung oder Remodellierung der Körper vor.

Diese Vorgehensweise ist auch in den meisten Anwendungsfällen nicht nur sinnvoll, sondern zur Modellierung in sich konsistenter Modelle hilfreich. Bei der Modellierung bestimmter geologischer und bautechnischer Gegebenheiten ergeben sich aus dieser Einschränkung jedoch Schwierigkeiten. An zwei Beispielen sollen diese erläutert werden.

In dem ersten Beispiel handelt es sich um ein einfaches Abstraktionsproblem, das sich aus der generalisierten Modellierung des Ausschnitts der Realwelt ergibt. Da im Modell nicht jedes Detail erfaßt werden kann – sonst müßte im Prinzip jedes kleinste Teilchen nachgebildet werden – ergeben sich in einigen Bereichen Repräsentationsschwierigkeiten. So ist der Grundwasserkörper kein Körper, der durch Flächen begrenzt ist und nur Wasser enthält. Vielmehr handelt es sich dabei um die Beschreibung des Phänomens, daß sich in den Poren verschiedener Gesteinsarten, in Hohlräumen (Klüfte, Spalten, etc.) und zwi-

schen Gesteinsschichten Wasser ansammeln kann. Der Anwender will natürlich nicht jede Ansammlung von Wasser in ihrer realen Form beschreiben – und kann es im Normalfall mangels exakter Informationen auch nicht – sondern er will vielmehr einen Bereich angeben, in dem Wasser zu finden ist. Gleichzeitig ist dieser Raum von Gesteinsschichten ausgefüllt, so daß diese Art der Modellierung in GeoCORE mit den bisherigen Konzepten nicht erlaubt ist.

Das zweite Beispiel hängt weniger mit der Generalisierung des Raummodells, als vielmehr mit den Vorstellungen und Erwartungen der Anwender bezüglich des Modells zusammen. Viele „Körper“, die vom Anwender in das Modell integriert werden, sind eher ideeller Natur. Ein Ausbruchsegment ist der Teil eines Tunnelbauwerks, an dessen Stelle sich ursprünglich geologischer Untergrund befand. Durch den Prozeß des Ausbrechens wurde der geologische Körper entfernt, und an dessen Stelle tritt das Ausbruchsegment als mit Luft gefüllter Körper. Direkt nach dem Ausbruch erfolgt die Sicherung des Hohlraums, etwa durch eine Spritzbetonschale. Diese füllt einen Teil des Körpers des Ausbruchsegments mit Spritzbeton aus, was jedoch bei der bisherigen Konzeption des Modells nicht repräsentiert werden kann. Genauer betrachtet handelt es sich bei diesem Modellierungsproblem um einen Zeitaspekt, der durch die Modellierung verschiedener Phasen des Bauwerks dokumentiert werden könnte. Dennoch existiert in der Vorstellung des Anwenders das Ausbruchsegment auch nach dem Einbringen der Sicherungsmittel und dem Innenausbau noch in seiner ursprünglichen Form. Auch die Modellierung des Ausbruchsegments als flächenhaftes Objekt kann nicht als akzeptable Lösung angesehen werden, da dann wichtige Eigenschaften nicht berücksichtigt werden könnten. Genannt seien hier etwa die Volumenberechnung oder die Abstimmung mit Regelausbrüchen.

Aus diesen Beispielen wird ersichtlich, daß die strikte Forderung nach der räumlichen Disjunktheit von Körpern zwar physikalisch korrekt, für die reale Anwendung aber zu restriktiv ist. Daher wird das Konzept der topologischen Ebene so erweitert, daß die Überlappung von Volumen im Raum unter definierten Voraussetzungen im Modell dargestellt und auch in topologischen Beziehungen erfaßt werden kann.

Angemerkt sei an dieser Stelle, daß Überlagerungen für Flächen, Bögen und Knoten bereits erlaubt sind. Aber auch hier fehlt bisher die Möglichkeit, diesen Sachverhalt in einer topologischen Beziehung widerzuspiegeln.

Demzufolge integriert das Modell von GeoCORE die folgenden vier binären und drei weiterführenden topologischen Beziehungen (vgl. jeweils die Definitionen 2.6 bzw. 2.7), die in Abbildung 6.4 grafisch veranschaulicht und in Anhang A durch Relationen in CORE DDL definiert sind:

Nachbarschaft (*neighbouring*, Definition 2.15): Nachbarschaft stellt die elementarste topologische Beziehung dar und drückt aus, daß sich zwei GeoObjekte beliebiger Dimension in ihrem Rand schneiden. Dabei ist jedoch weder bekannt, in welchem Teil des Randes der Schnitt liegt, noch welche Form der Schnitt selbst hat. Liegt weitere Information über die Nachbarschaft zwischen zwei Volumen vor, kann dies mit den Relationen *Berührung* und *Schnitt* ausgedrückt werden.

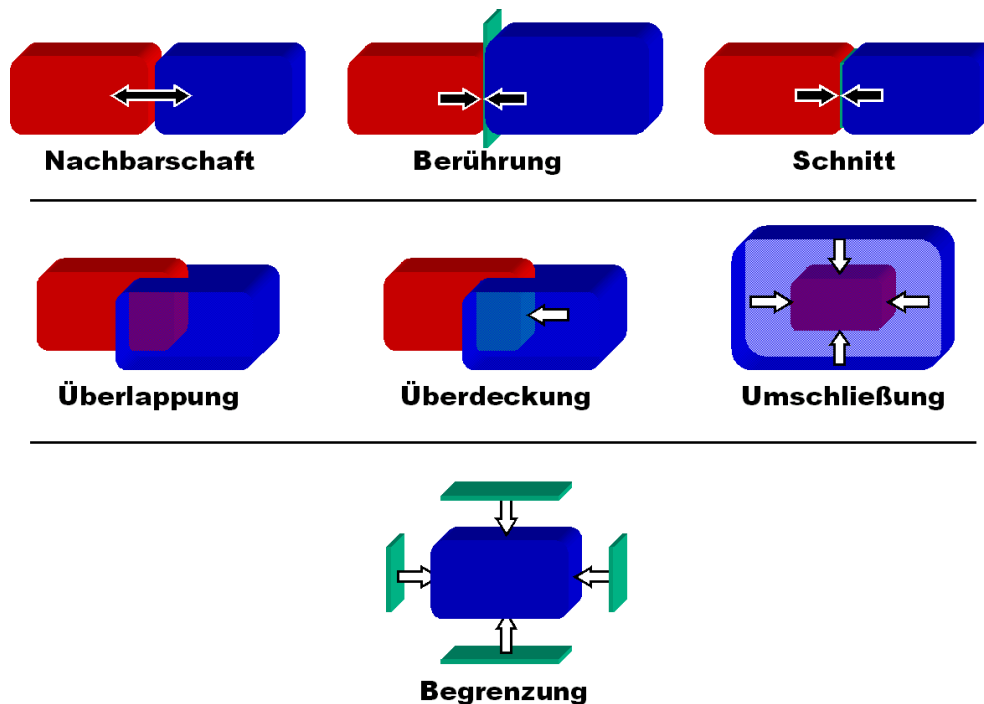


Abbildung 6.4: Die topologischen Beziehungen

Nachbarschaft ist eine der am häufigsten verwendeten topologischen Beziehungen, da mit minimaler Kenntnis bereits hochkomplexe Modelle in ihrer Struktur beschrieben werden können. Im Bereich der Geowissenschaften können mit dieser Beziehung zum Beispiel Schichtenfolgen effizient beschrieben werden.

Begrenzung (*bounding*, Definition 2.16): Durch die Begrenzung wird der Aufbau höherdimensionaler GeoObjekte durch Objekte niedrigerer Dimension beschrieben. Daher setzt diese Beziehung die Zugehörigkeit der beteiligten GeoObjekte zu jeweils zwei echten topologischen Klassen mit einer Dimension Unterschied voraus.

Das Konzept der Begrenzung (*boundary* und *co-boundary*, vgl. [FMP93, EFJ89]) wird bisher vor allem bei der Modellierung mit Simplexen und Komplexen sowie bei räumlichen Datenmodellen auf der Grundlage der Randdarstellung zur Beschreibung des Aufbaus der einzelnen Objekte verwendet, trifft aber insbesondere auch auf alle Iso-Flächen, -Kurven und -Punkte der metrischen Objektbeschreibungen durch NURBS zu.

Je nach Anforderung können Anwendungen auf der Grundlage von GeoCORE die automatisierte Eintragung dieser Beziehung vornehmen, um Benutzeranfragen effizienter auszuwerten.

Überlappung (*overlap*, Definition 2.17): Wie beschrieben ist im Repräsentationsmodell von GeoCORE festgelegt, daß an einem Ort keine zwei

Volumen gleichzeitig modelliert werden dürfen. Um aus den erwähnten Gründen dennoch derartige Situationen zuzulassen, wird die Überlappungs-Beziehung eingeführt.

Diese muß für alle sich überlappenden volumenhaften GeoObjekte explizit vom Anwender spezifiziert werden, d.h., für je zwei topologische Volumen, deren Schnitt ihrer Inneren nicht leer ist, muß die Beziehung definiert werden. Andernfalls wird bei der Modellierung der entsprechenden metrischen Information die Speicherung in die Datenbank zurückgewiesen, so daß auch weiterhin die Konsistenz des Modells in Bezug auf Konstruktionsfehler vom System überprüfbar bleibt.

Diese Form der Modellierung ist auf den ersten Blick aufwendig, da etwa bei einem großen Grundwasserkörper, der viele einzelne geologische Körper überlappt, eine Vielzahl an Beziehungen zu realisieren ist. Mittels einer darauf abgestimmten Anwendungsmodellierung und -programmierung kann dem Anwender die Eingabe jedoch wesentlich vereinfacht werden, indem bestimmte Objekte (zum Beispiel der Grundwasserkörper) automatisch für die Überlappungsbeziehung vorgesehen und eingetragen werden.

Für topologische Flächen, Kurven und Punkte kann die Überlappung zur Modellierung von topologischem Wissen angegeben werden, sie ist jedoch für deren metrische Modellierung keine Voraussetzung. Die Relation der Überlappung verweist daher auf zwei Objekte der Klasse der topologischen Volumen, wodurch sie in alle Unterklassen vererbt wird.

Beinhaltung (*contain*, Definition 2.18): Eine Spezialisierung der Überlappungsbeziehung ist die Beinhaltung. Analog erfordert die Beinhaltung die explizite Modellierung dieser topologischen Beziehung, falls ein topologisches Volumen ein zweites beinhalten soll. Auch hier kann die Anwendung die Eintragung der Beziehung automatisieren.

Um bei der Modellierung Inkonsistenzen zu vermeiden, wird die Beinhaltung jeweils durch die Referenz auf ein echtes topologisches Objekt einer bestimmten Dimension als beinhaltendes Objekt und ein topologisches Objekt gleicher oder niedrigerer Dimension als beinhaltetes Objekt definiert.

Berührung (*meet*, Definition 2.24): Die Berührung ist eine Spezialisierung der Nachbarschafts-Beziehung und erlaubt die Angabe des Randobjektes, in dem sich zwei Objekte berühren, ohne daß bekannt ist, in welchem Teil des Randobjektes sich die beiden Objekte tatsächlich schneiden. Die Relation verweist auf zwei echte topologische Objekte gleicher und ein topologisches Randobjekt niedrigerer Dimension.

Schnitt (*intersect*, Definition 2.25): Ist bei der Nachbarschaft zweier Geo-Objekte über die Berührungsfläche hinaus die genaue Schnittfläche bekannt, kann diese über die Schnitt-Beziehung zweier echter topologischer Objekte gleicher Dimension und das topologische Schnittobjekt mit mindestens einer Dimension weniger referenziert werden.

Überdeckung (*overlay*, Definition 2.26): Analog zu der Schnittbeziehung für Nachbarschaft kann für die Überlappung zweier echter topologischer Objekte der Überdeckungsbereich der beiden Objekte referenziert werden. Die Dimension des Überdeckungsobjekts darf dabei maximal gleich der minimalen Dimension der beiden überlappenden Objekte sein.

Zur Überwachung dieses Constraints wäre die Modellierung aller möglichen Überlappungsbeziehungen und der jeweiligen Schnittreferenzen notwendig. Um den durch derartige Beziehungen entstehenden Verwaltungsaufwand zu vermeiden (bei jeder Migration oder Demigration eines beteiligten Objektes wäre die alte Beziehung zu löschen und eine neue einzufügen), wird die Überdeckung zwischen drei topologischen Volumen definiert und muß dann entweder durch aktive Datenbankkomponenten oder die Anwendung selbst auf Korrektheit überprüft werden.

In Abbildung 6.5 ist die Integration der beschriebenen topologischen Beziehungen als CORE-Relationen in die Klassenhierarchie von GeoCORE in der grafischen Notation von CORE dargestellt.

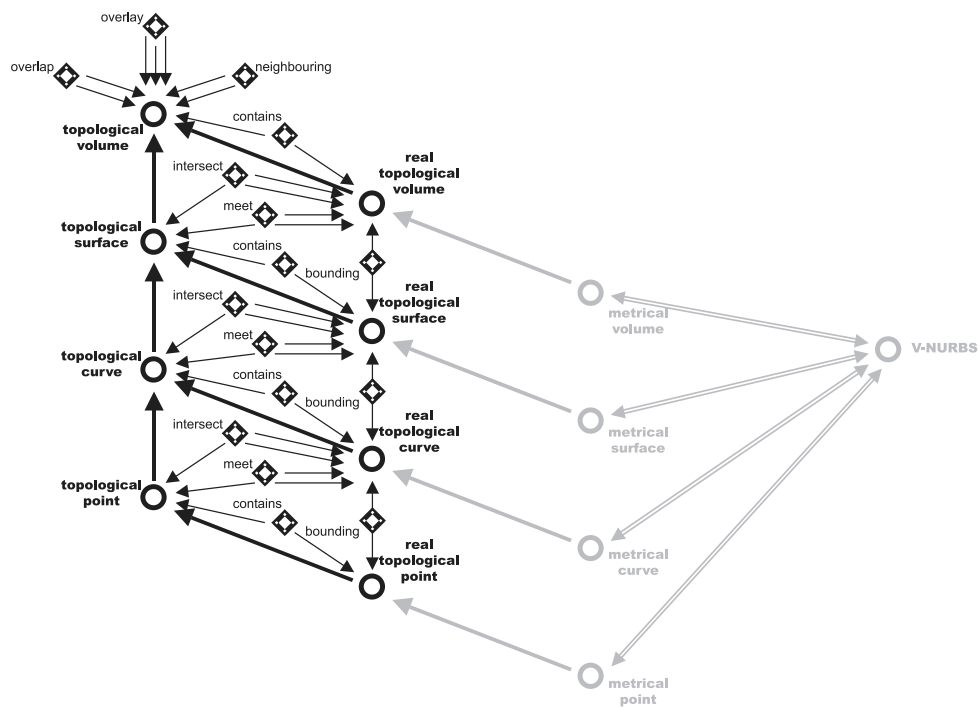


Abbildung 6.5: Die topologischen Relationen

Aufgrund der Klassenhierarchie von GeoCORE gelten alle Relationen der topologischen Ebene auch auf der metrischen Ebene. Beziehungen, die zwischen topologischen Objekten etabliert werden, existieren automatisch auch zwischen metrischen Objekten. Daher können auf der Seite der Anwendung topologische Beziehungen direkt für metrische Objekte angegeben und vor allem auf der metrischen Ebene verwendet oder ausgewertet werden.

Neben den letzten drei nicht-binären werden auch die binären topologischen Beziehungen durch CORE-Relationen und nicht durch binäre m -zu- n Relationen² der MORE-Erweiterung BinRel modelliert. Durch diese Abbildung wird die Anfrageauswertung für topologische Fragestellungen unterstützt, da ohne Umweg über die einzelnen Klassen direkt auf die Beziehungen zurückgegriffen werden kann.

Wird in einer Anfrage zum Beispiel nach *allen Häusern, die von einer Straße begrenzt werden*, gefragt, kann diese über die Begrenzungs-Relation ausgewertet werden. In dem gewählten Beispiel werden alle Beziehungen herausgefiltert, in denen sowohl Häuser als auch Straßen referenziert werden. Bei der Modellierung mit binären Relationen würden derartige Anfragen erfordern, daß bei allen Objekten der Klasse *Haus* (oder der Klasse *Straße*) einzeln überprüft wird, ob sie in einer binären Nachbarschaftsrelation zu einer Straße (bzw. einem Haus) stehen. Damit ergibt sich im allgemeinen eine deutlich größere Anzahl zu überprüfender Objekte.

Topologische Bedingungen

In den Gleichungen (2.19) und (2.20) (aus Gleichheit folgt Beinhaltung und Überlappung), (2.21) und (2.22) (aus Begrenzung folgt Nachbarschaft und Beinhaltung), (2.23) (aus Beinhaltung folgt Überlappung) und in Tabelle 2.1 wurden bereits algebraische Gesetzmäßigkeiten erläutert, die sich aus der mathematischen Definition der topologischen Beziehungen ergeben.

Im folgenden werden weitere Bedingungen definiert, die sich direkt oder indirekt aus vorhandenen topologischen Beziehungen in GeoCORE ableiten lassen. Dabei werden jedoch nur dann neue Beziehungen abgeleitet und in das Modell übernommen, wenn diese die Aussage des topologischen Modells nicht verändern. Die Erzeugung neuer Beziehungen dient der Konsistenzsicherung des Modells, d.h., topologische Beziehungen, deren Aussage bereits implizit im Modell abgebildet ist, werden auch explizit aufgeführt. Neben der Integritätswahrung des Modells wird mit dieser Vorgehensweise auch die Beschleunigung der Abarbeitung von Anfragen erreicht, da die ableitbaren Aussagen direkt in der Datenbank hinterlegt sind.

Probleme ergeben sich bei der Ableitung neuer Beziehungen, wenn die ursprüngliche Beziehung durch den Benutzer gelöscht wird. In solchen Fällen sind auch die abgeleiteten Beziehungen zu löschen, da sie vom Anwender nicht direkt gefordert wurden.

Eine Möglichkeit ist, die Registrierung jeder einzelnen topologischen Beziehung durch das System zu protokollieren, um bei Veränderungen dementsprechende Anpassungen vornehmen zu können. Eine derartige Vorgehensweise wäre jedoch nicht nur aufwendig zu realisieren, sondern die Integritätssicherung dieser Verwaltung ist per se nicht trivial, da einzelne topologische Beziehungen auch von

²Jedes GeoObjekt kann in topologischen Beziehungen zu verschiedenen GeoObjekten stehen!

zwei oder mehr ursprünglichen Beziehungen abgeleitet werden können und abgeleitete Beziehungen höherer Ordnung (abgeleitete Ableitungen) möglich sind. Darüber hinaus können abgeleitete Beziehungen vom Anwender gewünscht sein. Da sie bereits im Modell abgeleitet worden sind, betrachtet der Anwender sie als Bestandteil der modellierten Anwendungsdomäne. Außerdem können diese abgeleiteten Beziehungen bereits Einfluß auf die metrische Darstellung genommen haben, so daß deren Löschung nicht ohne den Einfluß des Anwenders vollzogen werden kann.

In GeoCORE wird die Verwaltung *aller* topologischen Beziehungen daher dem Anwender überlassen, da dieser das Wissen über das tatsächliche, reale Modell hat. Der Anwender wird bei der Modellierung topologischer Zusammenhänge auf die durch das System abgeleiteten Beziehungen hingewiesen. Löscht oder manipuliert der Anwender einzelne Beziehungen, ist eine systemgeführte Überprüfung *möglicher* abgeleiteter Beziehungen durchzuführen. Dem System kommt dabei die Rolle der Konsistenzüberwachung zu.

Diese Form der Behandlung abgeleiteter Beziehungen ist insbesondere deswegen problemlos anwendbar, da die Beibehaltung abgeleiteter Beziehungen nach Löschung der ursprünglichen Beziehung keine Inkonsistenz des Modells zur Folge hat. Es wird unter Umständen lediglich ein topologischer Sachverhalt dargestellt, der durch den Anwender nicht mehr gewünscht ist.

Bei der Darstellung der Ableitungsregeln werden für die Beziehungen die Notationen aus den Definitionen 2.6 und 2.7 verwendet. T bezeichnet ein topologisches Objekt beliebiger Dimension, T^- ein entsprechendes topologisches Objekt mit einer oder mehreren Dimensionen weniger, V ein Volumen, S eine Fläche, C eine Kurve und P einen Punkt:

- Die topologischen Beziehungen implizieren sich gegenseitig, d.h., ein Sachverhalt wird durch beide Seiten gleichwertig ausgedrückt.

$$\text{bounding}(T^-, T_1) \wedge \text{bounding}(T^-, T_2) \Leftrightarrow \text{intersect}(T_1, T_2, T^-) \quad (6.1)$$

- Die abgeleiteten Beziehungen sind eine Folgerung aus der ursprünglichen Beziehung. Umgekehrt kann nur aus den abgeleiteten Beziehungen nicht geschlossen werden, daß die ursprüngliche Beziehung gelten muß.

$$\text{bounding}(T^-, T_1) \wedge \text{bounding}(T^-, T_2) \Rightarrow \text{neighbouring}(T_1, T_2) \quad (6.2)$$

$$\text{bounding}(T^-, T_1) \wedge \text{bounding}(T^-, T_2) \Rightarrow \text{meet}(T_1, T_2, T^-) \quad (6.3)$$

6.2.3 Die metrische Ebene

Die metrische Ebene von GeoCORE dient der Verwaltung exakt spezifizierter und in Lage und Position bekannter räumlicher Objekte. Die Zielsetzung bei der Neukonzeption des metrischen Datenmodells in dieser Arbeit ist zunächst die Einbettung der konkreten räumlichen Information in das topologische Rahmenwerk, das durch die benutzerdefinierten Beziehungen vorgegeben ist. Die

Integration der metrischen Information muß alle topologischen Beziehungen erfüllen, aber auch ohne Topologie zur Modellierung eingesetzt werden können.

Aus Sicht der späteren Anwendung in einem Geo-Informationssystem ist vor allem die Anwenderfreundlichkeit der Informationsverwaltung ausschlaggebend. Dazu zählt eine effiziente Datenstruktur, die bereits auf Modellebene eine Optimierung des Datenzugriffs berücksichtigt. Die Erfahrungen aus der ersten Konzeption der metrischen Ebene in [Kes96] und deren Implementierung im Rahmen des Drittmittelprojektes BAGIS [RMBBKZS98, KM99, KMRZ99a] haben gezeigt, daß gerade bei zeitintensiven Operationen auf räumlichen Daten die zu komplexe Zergliederung einzelner metrischer Objekte sowie das Fehlen des direkten Zugriffs auf darzustellende Objekte in der ursprünglichen Konzeption der metrischen Ebene deutliche Nachteile darstellen. Diese Konzeption der metrischen Datenverwaltung wird daher in dieser Arbeit durch eine vollständige Umstrukturierung der metrischen Ebene ersetzt.

Wie beschrieben, basiert die in dieser Arbeit neu eingeführte Beschreibung metrischer Objekte auf dem Konzept der Non Uniform Rational B-Splines (NURBS). Bei der Einführung von Volume NURBS als Erweiterung von NURBS-Flächen in Abschnitt 3.1 wurden bereits die positiven mathematischen Eigenschaften dieses räumlichen Repräsentationsmodells beschrieben. An dieser Stelle werden die vier wesentlichen Charakteristika, die speziell für die Verwendung von Volume NURBS in GeoCORE von großem Vorteil sind, detaillierter diskutiert.

Darstellung: Ein wichtiger Aspekt bei der Wahl der Modellierungsmethode ist die spätere Visualisierbarkeit der Objekte. Der Anwender wünscht sich hier besonders die realitätsnahe Darstellung der modellierten Objekte, was insbesondere bei natürlichen Gegebenheiten von Bedeutung ist. Verfahren auf der Basis von Triangulierungen oder räumlichen Zellzerlegungen haben dabei den Nachteil, daß sie einerseits bei geringer Punktdichte ein „eckiges“ Bild liefern (vgl. Abbildung 3.10 und die Ausführungen in Abschnitt 3.2), und andererseits eine zu hohe Punktdichte hohen Speicherbedarf bedeuten kann (siehe auch *Speicherkomplexität*).

Die Visualisierung räumlicher Objekte mit Hilfe von NURBS ist dagegen unabhängig von der gewählten Ansicht und der Anzahl der beschreibenden Punkte. Jeder anzuzeigende Punkt ist durch die Interpolation der vorgegebenen Stützpunkte und Kontrollparameter exakt berechenbar.

An dieser Stelle sei angemerkt, daß eine *ansprechende* Visualisierung einer gegebenen Menge von Daten die „Richtigkeit“ des Modells nicht beeinflußt. Dennoch führt eine realistischere oder naturgetreuere Präsentation der vorliegenden Informationen zu einer höheren Akzeptanz der modellierten natürlichen Gegebenheiten durch den Anwender.

Speicherkomplexität: Wie im vorangegangenen Punkt diskutiert, muß bei der Verarbeitung von GeoObjekten ein Kompromiß zwischen der Menge der zu speichernden Daten und der ansprechenden Visualisierung dieser Informationen gefunden werden. Dies erfordert zunächst eine möglichst

exakte Abbildung der Realwelt im Modell, darüber hinaus aber auch eine Reduzierung der Informationen zur metrischen Beschreibung der Objekte. Da NURBS die vorgegebenen Daten interpolieren und die resultierende Form anhand der Gewichtung der einzelnen Punkte und der Ordnung des Polynoms variiert werden kann, sind nur wenige Zusatzinformationen im System zu verwalten. Darüber hinaus existieren Verfahren zur Punktreduktion bei vorgegebenen NURBS-Objekten unter Beibehaltung der ursprünglichen Form.

Einheitsbeschreibung: Die Darstellung von NURBS-Körpern, -Flächen und -Kurven beruht auf *einer* mathematischen Basis, so daß Objekte verschiedener räumlicher Dimension analytisch miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Objekte beliebiger Dimensionalität können verschnitten oder aufeinander abgebildet werden.

Unter Berücksichtigung der weiteren Konzepte von GeoCORE, insbesondere der „Degenerierung“ räumlicher Objekte und der damit verbundenen Repräsentation prinzipiell höherdimensionaler Objekte durch topologische und metrische Beschreibungen niedrigerer Dimension, kann auch auf der Ebene boolescher Operationen auf GeoObjekten ein hohes Maß an Flexibilität gewährleistet werden.

Weiterhin erleichtert diese einheitliche Basis die in GeoCORE zur direkten Beschreibung topologischer Beziehungen vorgesehene Referenzierung der Ränder aller GeoObjekte. Zu jedem Objekt können die begrenzenden Objekte niedrigerer Dimension durch einfache mathematische Methoden berechnet werden.

Parameter: Ein wichtiger Aspekt bei der Modellierung natürlicher Gegebenheiten ist die Rekonstruktion von Objekten aus zerstreuten Punktmengen. Für diese Aufgabenstellung wurden eine Vielzahl von Lösungsverfahren entwickelt, um eine möglichst genaue, aber auch realistische Interpolation der gegebenen Punkte zu erreichen. Lineare Verfahren, etwa die Triangulation, haben dabei den Nachteil, daß sie stark von anderen Punkten abweichende „Ausreißer“ vollständig in das entstehende Modell einbeziehen. In den Geowissenschaften ist dies jedoch häufig nicht gewünscht, da viele Meßpunkte nur geschätzt oder ungenau eingemessen werden können und nur einen groben Anhaltspunkt für die tatsächliche Lage liefern. Daher müssen die Verfahren einen Steuerungsmechanismus bereitstellen, mit dessen Hilfe der Anwender den Grad der Annäherung bestimmen kann.

NURBS als Grundlage der Modellierung bieten den Vorteil, daß über die Wahl der Ordnung des Polynoms und die Anzahl und Gewichtung der Stützpunkte der Grad der Approximation der Punkte durch eine Fläche variiert werden kann. Die Ordnung legt dabei fest, ob jeder der Punkte direkt in der resultierenden Fläche liegen muß, wohingegen durch die Gewichtung der Stützpunkte die Relevanz einzelner Punkte für die Berechnung der Fläche eingestellt werden kann.

Die beschriebenen Parameter können entweder vor der Berechnung ei-

ner Interpolationsfläche festgelegt, bei unbefriedigenden Ergebnissen aber auch später durch den Anwender manuell angepaßt werden. Somit kann die Genauigkeit an die Qualität der Eingangsdaten adaptiert werden [MS96].

Metrische Klassenhierarchie

Für die metrische Ebene wurde ursprünglich eine Klassifizierung der Objekte in vier disjunkten Klassenhierarchien umgesetzt, die die einzelnen Objekte anhand ihrer Konstruktionsmethode unterschieden. Körper wurden beispielsweise in Rotations-, Translations-, irreguläre und zusammengesetzte Körper zergliedert, wobei jede dieser Beschreibungen wiederum auf metrische Flächen in ähnlicher Struktur zurückgreift (Abbildung 6.6). Die Umsetzung dieser Konzeption offenbarte folgerichtig Effizienzprobleme bei allen Lade- und Speicheroperationen auf der Datenbank und erforderte zudem Hilfskonstruktionen zur Indizierung der metrischen Objekte, da diese nicht referenzierbar und somit nicht direkt zugreifbar sind.

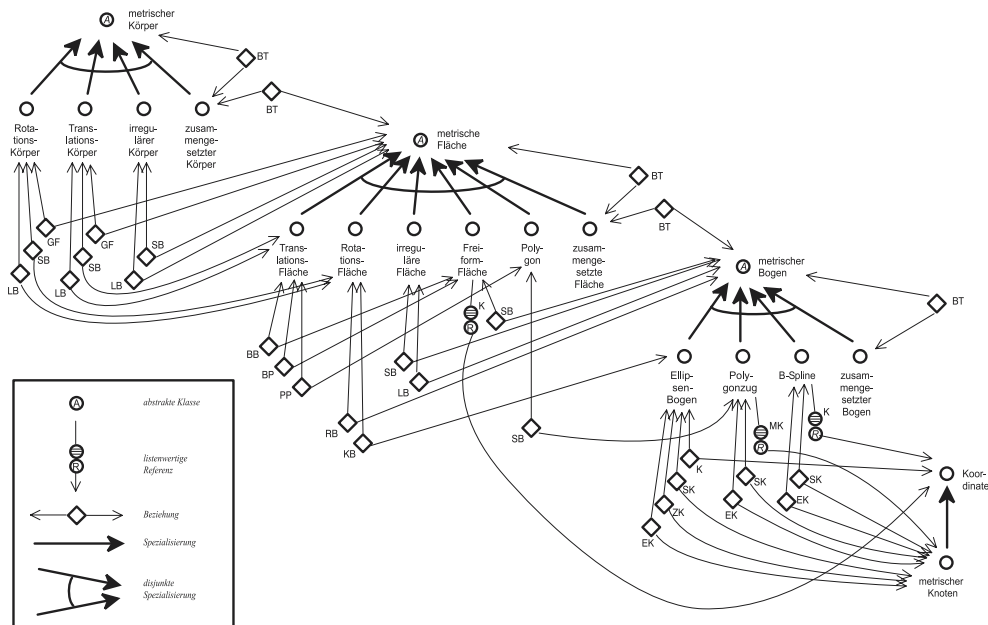


Abbildung 6.6: Ursprüngliche Konzeption der metrischen Ebene

In [Ber99] wurde ein modifiziertes Konzept der metrischen Ebene vorgestellt, das durch ein vereinfachtes Modell, spezielle Zugriffsstrukturen und vor allem durch die Einführung binärer Relationen (Abschnitt 5.2.1) eine deutliche Verbesserung der Zugriffszeiten erreicht. In den Grundzügen setzt dieses Modell jedoch ebenfalls auf der oben beschriebenen Zergliederung der metrischen Ebene in vier Klassenhierarchien auf, so daß das grundsätzliche Problem des ersten Ansatzes nicht gelöst werden konnte.

In dieser Arbeit wird daher eine Neustrukturierung der metrischen Ebene vorgestellt, welche die Zusammenführung der metrischen und topologischen Infor-

mation in einer Klassenhierarchie vorsieht und die konkreten metrischen Raumdaten in eine eigenständige Klasse auslagert. Möglich wird diese Restrukturierung durch die Vereinheitlichung der Beschreibung metrischer Objekte durch das in dieser Arbeit erstmals eingeführte Konzept der Volume NURBS. Für die Beschreibung topologischer und metrischer Informationen ergeben sich zwei wesentliche Vorteile.

Zum einen beinhaltet die Zusammenführung der topologischen und der metrischen Klassenhierarchie auch die Zusammenführung der Verwaltung von geometrischen Beziehungen. Die ursprüngliche Konzeption von GeoCORE erforderte die Darstellung der Begrenzungsbeziehung zwischen GeoObjekten sowohl auf der topologischen als auch auf der metrischen Ebene. Die direkte Abhängigkeit der Klassen in einer Vererbungshierarchie macht die doppelte Repräsentation dieser Beziehung überflüssig, vermeidet die redundante Speicherung und verbessert die Konsistenzprüfung. Die Beziehungen werden von den topologischen Klassen an die metrischen Repräsentanten weitergeleitet, und auf sie kann von der metrischen Ebene direkt zugegriffen werden.

Zum anderen ermöglicht die Auslagerung der metrischen Beschreibung von GeoObjekten durch Volume NURBS in einer separaten Klasse nicht nur die bereits angesprochene vereinheitlichte Speicherung der metrischen Objekte, sondern auch deren effiziente Zugreifbarkeit und damit auch eine deutlich gesteigerte Performance bei der Visualisierung komplexer Objekte. Erforderte im ursprünglichen Modell von GeoCORE das Auslesen eines einzelnen metrischen Objektes zur Visualisierung eine mehrstufige Zusammenstellung der notwendigen Informationen über die Verknüpfungsbeziehungen innerhalb der metrischen Klassen, ist in der hier vorgestellten Strukturierung nur das Auslesen des jeweiligen Objektes aus der ausgelagerten Klasse notwendig.

Der konzeptuelle Aufbau der metrischen Ebene basiert – in Analogie zur topologischen Ebene – auf einer Unterscheidung der Objekte nach ihrer Dimensionalität. In Fortführung der Modellierung der topologischen Klassen bilden die metrischen Klassen Unterklassen der jeweiligen echten topologischen Klassen gleicher Dimensionalität, so daß daraus die Klassen metrisches Volumen (**metrical volume**), metrische Fläche (**metrical surface**), metrische Kurve (**metrical curve**) und metrischer Punkt (**metrical point**) resultieren. Aufgrund der Modellierung der topologischen Klassenhierarchie sind die metrischen Klassen untereinander disjunkt. Die resultierende Vererbungshierarchie ist in Abbildung 6.7 in der grafischen CORE-Notation dargestellt. Die Beschreibung in CORE DDL findet sich im Anhang A dieser Arbeit.

Durch die Anordnung in der Vererbungshierarchie erben metrische Objekte alle topologischen Beziehungen, was in Anlehnung an die Definition des verwendeten metrischen Raums auf der Grundlage der Definition des topologischen Raums auch theoretisch begründet ist (vgl. Definition 2.8). Weitere, spezielle metrische Beziehungen sind aufgrund der neuen Struktur von GeoCORE nicht erforderlich.

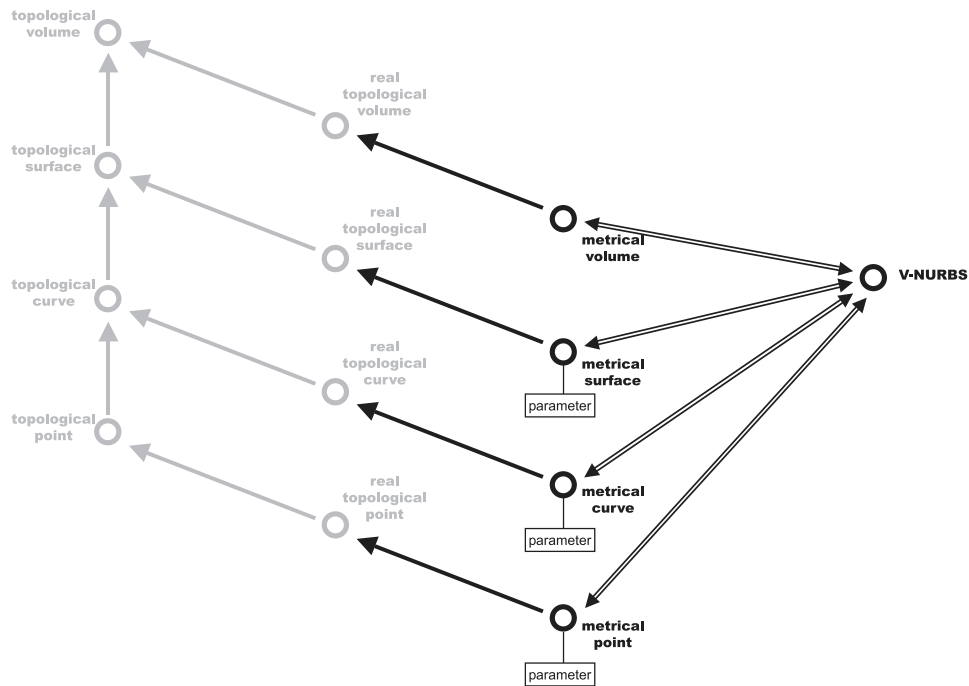


Abbildung 6.7: Die metrische Ebene

Repräsentation von Volume NURBS

Die konkrete Beschreibung metrischer Objekte durch Volume NURBS wird, wie in Abbildung 6.7 veranschaulicht, in die entkoppelte Klasse **vnurbs** ausgelagert. Dies ist aufgrund der Einheitsrepräsentation aller metrischen Objekte mit den Methoden der Volume NURBS möglich. Damit wird jedes darstellbare metrische Objekt von GeoCORE in dieser Klasse abgelegt und kann direkt und unabhängig von seiner Dimensionalität referenziert werden. Eine auf dieser Konzeption aufsetzende Implementierung muß zur Visualisierung der metrischen Objekte lediglich den Extent der Klasse **vnurbs**, d.h. die Liste aller aktuell zu dieser Klasse existierenden Objekte, durchlaufen und die Daten der Objekte darstellen. Daraus resultiert eine deutliche Beschleunigung des Datenbankzugriffs, da der Ladevorgang eine lineare Komplexität hat.

Die Verbindung zwischen den metrischen Objekten und ihrer räumlichen Repräsentation erfolgt über binäre *1-zu-m* Relationen, so daß die Extraktion einzelner Objekte zur Visualisierung durch die direkte Referenzierung gegenüber der vollständigen Durchsuchung einer normalen CORE-Relation erheblich beschleunigt wird. Ferner wird durch die *1-zu-m* Relation zum Ausdruck gebracht, daß jedes metrische Objekt mit genau einer Beschreibung durch ein NURBS-Objekt verbunden ist. Umgekehrt kann ein NURBS-Objekt als Beschreibung von mehreren metrischen Objekten referenziert werden.

Der Grund für diese Modellierung ist die Darstellung metrischer Objekte mit unterschiedlichen Dimensionen. Wie beschrieben existiert genau eine Klasse,

in der die konkrete Beschreibung der metrischen Form und Position verwaltet wird. Bei der Modellierung wird zunächst immer von einer volumenhaften Repräsentation ausgegangen, d.h., es werden alle metrischen Objekte durch die Beschreibung eines NURBS Volumens gespeichert. In Anlehnung an die degenerierten Objekte der topologischen Ebene ist es dabei möglich, daß eine oder zwei Parameterrichtungen nicht besetzt werden, d.h., die Liste der Stützpunkte enthält kein dreidimensionales Gitter, sondern lediglich eine zweidimensionale Matrix, einen Vektor oder im Extremfall nur einen Punkt.

Begrenzungen höherdimensionaler metrischer Objekte durch Objekte mit einer Dimension weniger werden durch die Angabe der Parameter der Iso-Flächen, -Kurven und -Punkte in der jeweiligen Laufrichtung u, v oder w (vgl. die Ausführungen in Abschnitt 3.3.4) referenziert und zeigen damit auf direkte Bestandteile des Objektes selbst. Jede metrische Klasse, mit Ausnahme der metrischen Volumen, enthält einen Aufzählungstyp, der die möglichen Parameter zur Referenzierung der Berandung enthält. Die Aufzählungstypen kennzeichnen die Berandung eines höherdimensionalen Objektes durch das konstante Setzen eines, zweier oder aller drei Parameter u, v und/oder w auf die Werte 0 oder 1.

Wie in Abbildung 6.8 verdeutlicht, sind die möglichen Parameter

- für Flächen: $u0, u1, v0, v1, w0, w1$,
- für Kurven: $u0v0, u0v1, u0w0, u0w1, u1v0, u1v1, u1w0, u1w1, v0w0, v0w1, v1w0, v1w1$,
- und für Punkte: $u0v0w0, u0v0w1, u0v1w0, u0v1w1, u1v0w0, u1v0w1, u1v1w0, u1v1w1$.

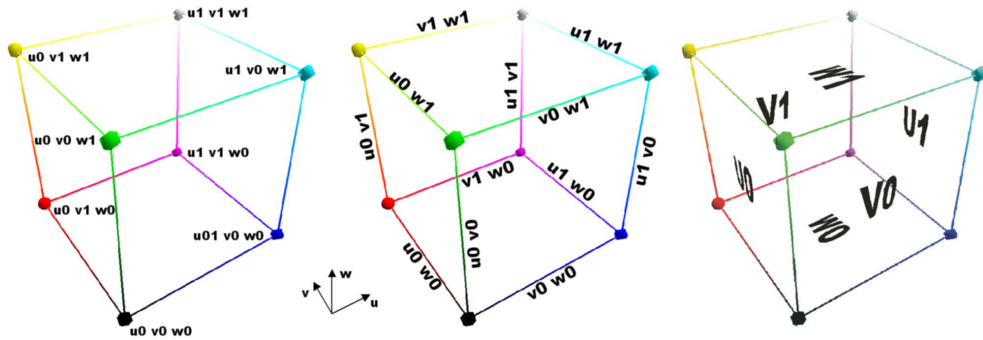
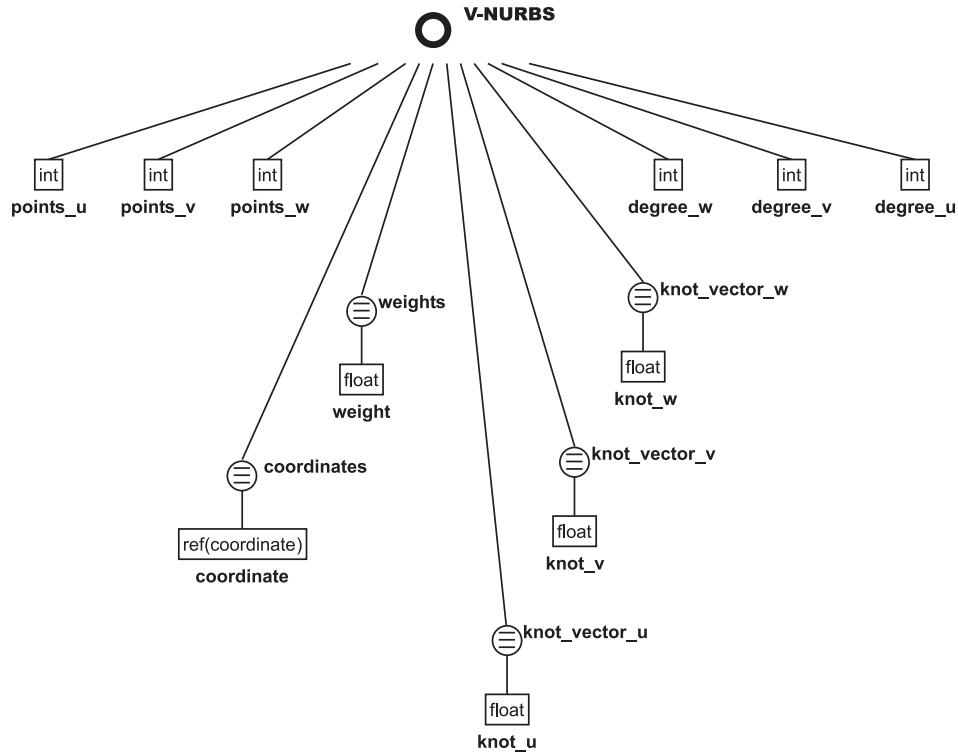


Abbildung 6.8: Parameter der metrischen Ebene

Die Klasse `vnurbs` selbst enthält alle notwendigen Parameter, um die in Kapitel 3 beschriebenen Volume NURBS zu verwalten. Abbildung 6.9 zeigt die Struktur der Klasse `vnurbs` in der grafischen CORE-Notation. In Anhang A ist die entsprechende CORE DDL-Notation dargestellt.

Die Koordinaten der Stützpunkte werden als Referenzen auf eine Klasse `coordinate` durch Iteration über die Parameter u, v und w hintereinander in

Abbildung 6.9: Die Klasse `vnurbs`

einer Liste ablegt. Dabei wird das dreidimensionale Gitter der Stützpunkte aus Gleichung (3.6) wie folgt sequentiell durchlaufen:

$$\left(\underbrace{s_{111}, s_{112}, \dots, s_{11w}}_w, \underbrace{s_{121}, s_{122}, \dots, s_{12w}}_w, \dots, \underbrace{s_{1v1}, s_{1v2}, \dots, s_{1vw}}_w, \right. \\
 \underbrace{s_{211}, s_{212}, \dots, s_{21w}}_w, \underbrace{s_{221}, s_{222}, \dots, s_{22w}}_w, \dots, \underbrace{s_{2v1}, s_{2v2}, \dots, s_{2vw}}_w, \\
 \dots, \dots, \dots, \\
 \left. \underbrace{s_{u11}, s_{u12}, \dots, s_{u1w}}_w, \underbrace{s_{u21}, s_{u22}, \dots, s_{u2w}}_w, \dots, \underbrace{s_{uv1}, s_{uv2}, \dots, s_{uvw}}_w \right)$$

$v * w$

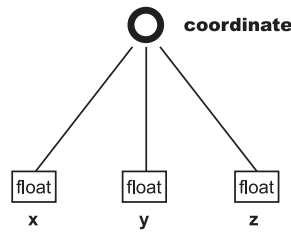
$v * w$

$v * w$

$u * v * w$

Der Stützpunkt an der Position a, b, c des Kontrollgitters wird in der Liste `coordinates` an der Position $(a - 1) * v * w + (b - 1) * w + c$ gespeichert. Die Klasse `coordinate` besteht aus den drei Attributen `x`, `y` und `z`, wie in Abbildung 6.10 dargestellt.

Die Gewichte der Stützpunkte werden separat in einer analog aufgebauten Liste (`weights`) abgelegt. Somit können Darstellungen nicht-rationaler B-Splines auf die Speicherung der Gewichtungsfaktoren verzichten. Für den Zugriff auf die Listen

Abbildung 6.10: Die Klasse `coordinate`

werden die Anzahlen der Stützpunkte in den jeweiligen Parameterrichtungen in den Attributen `points_u`, `points_v` und `points_w` gespeichert.

Die Knotenvektoren der Volume NURBS-Darstellung bezüglich der Parameter u , v und w werden in den Listen `knot_vector_u`, `knot_vector_v` und `knot_vector_w` verwaltet. Bei der Beschreibung lediglich flächen-, kurven- oder punkthafter Objekte ist die Liste der jeweiligen Parameterrichtung leer.

Der Grad des Freiform-Volumens wird in Abhängigkeit des Parameters der Laufrichtung in den Attributen `degree_u`, `degree_v` und `degree_w` gespeichert. Zulässig sind dabei nur positive Werte größer Null.

Die beschriebene kompakte Speicherung beschleunigt die Ladezeiten aller Stützpunkte zur Extraktion des gesamten Arrays, und darüber hinaus lassen sich Teile des Gitters durch einfache Offset-Operationen aus den hinterlegten Attributen extrahieren. Vor allem bei der beschriebenen Referenzierung von Flächen, Kurven und Punkten ist ein derartiges Auslesen von Teilbereichen notwendig.

In der ursprünglichen Konzeption von GeoCORE war zur Visualisierung der metrischen Informationen neben der eigentlichen Beschreibung in der metrischen Ebene zusätzlich ein sog. CAD-Element (vgl. [Ber99]) vorgesehen. Dieses speichert die Daten eines übergeordneten CAD-Systems in der jeweiligen proprietären Datenstruktur. Im Projekt BAGIS wurde das 3D-CAD-System MICROSTATION der Firma BENTLEY eingesetzt, da dieses u.a. NURBS-Flächen und -Kurven sowie die anwendungsspezifische Anpassung der Visualisierung und der Bedienoberfläche ermöglicht.

Mit der Einführung der hier vorgestellten Datenmodellierung soll eine Abkehr von der Verwendung eines übergeordneten CAD-Systems vollzogen werden. Dafür sind mehrere Gründe zu nennen:

1. Ausschlaggebend für die Visualisierung aller räumlichen Daten mit den Mitteln eines kommerziellen CAD-Systems war der Gedanke, die Implementierung einer Visualisierungsapplikation für dreidimensional-räumliche Objekte nicht erneut nachzuvollziehen. Vielmehr sollte die primäre Entwicklung im Bereich der konzeptionellen Datenverwaltung liegen, so daß die Auslagerung der Darstellung die sinnvollste Alternative war. Mittlerweile hat sich OpenGL von SILICON GRAPHICS (SGI) als offener Industrie-Standard für die räumliche Modellierung und Visualisierung durchge-

setzt. OpenGL wird von allen gängigen Betriebssystemen auf unterschiedlichen Plattformen unterstützt und steht für die anwendungsspezifische Programmierung in Form von APIs (Application Programming Interface) als Entwicklungsumgebung zur Verfügung. Die enthaltenen Grafikfunktionalitäten werden von modernen Grafikkarten direkt auf der Hardware-Ebene unterstützt und bieten damit eine ausgezeichnete Grafikperformance. Der Umfang der integrierten Visualisierung stellt auf abstraktem Niveau eine Vielzahl von Funktionen zur photorealistischen Visualisierung zur Verfügung, zu denen Beleuchtungs- und Schatteneffekte sowie Texturen zählen.

Somit wird die direkte Programmierung räumlicher Modellierung und Visualisierung ohne den Overhead eines übergeordneten CAD-Systems ermöglicht, die zudem eine gewisse Unabhängigkeit von der zugrunde gelegten Plattform und dem jeweiligen Betriebssystem schafft.

2. Mit JAVA3D existiert ferner eine auf JAVA (SUN MICROSYSTEMS) basierende Programmierungsumgebung, die die Plattformunabhängigkeit von Java mit den Funktionalitäten von OpenGL verbindet und somit eine von den zugrundeliegenden Systemen vollständig losgelöste Entwicklung erlaubt. Einziger Nachteil ist derzeit die geringere Ausführungsgeschwindigkeit gegenüber reinen OpenGL-Programmen, da Java eine interpretierende Sprache ist. Die zunehmende Verbreitung von Java wird in naher Zukunft jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer deutlichen Performancesteigerung führen.
3. CAD-Systeme unterstützen zwar in den meisten Fällen NURBS-Flächen und -Kurven, die Modellierung echter Volumina wird jedoch nur durch CSG-, S-Part oder Enumerationsverfahren (Abschnitt 2.2) umgesetzt. Die Visualisierung der in dieser Arbeit verwendeten Volume NURBS würde daher die Konvertierung echter Körper in die jeweilige Darstellungsform des zugrunde gelegten CAD-Systems implizieren. Der damit einhergehende Informationsverlust stellt einen Rückschritt gegenüber der direkten Abbildung der beschriebenen Konzepte dar. Außerdem sind die zur Verarbeitung der modellierten Objekte durch das CAD-System bereitgestellten Funktionalitäten entsprechend zu modifizieren, um der eigentlichen volumenhaften Darstellung Rechnung zu tragen.
4. Nicht zuletzt bedeutet die Verwendung eines kommerziellen CAD-Systems auch einen finanziellen Nachteil. Ist dieser bei der Entwicklung des Systems zunächst zu vernachlässigen, stellt er bei einem geplanten Vertrieb einen nicht unerheblichen Kostenfaktor dar, der durch die Verwendung einer frei verfügbaren Umgebung wie OpenGL bzw. Java3D vermieden werden kann.

Angemerkt sei an dieser Stelle, daß im metrischen Modell von GeoCORE keine grafischen Informationen (Visualisierungsaspekte wie Linienstärke, Farbe, Textur usw.) verwaltet werden. Diese sind von der speziellen Anwendung, der

Visualisierungssoftware und anderen Faktoren abhängig, so daß eine Integration einerseits nicht alle möglichen Charakteristika abdecken kann und andererseits diese auch nicht persistent in der Datenbank hinterlegt werden sollten. Textattribute wie Schriftart und Absatzformatierung werden für thematische Attribute gleichfalls nicht in der Datenbank abgelegt.

Des weiteren ist auch keine Verwaltung temporärer räumlicher Daten im Modell vorgesehen. Temporäre Daten fallen auf der Bedienoberfläche etwa bei der Konstruktion komplexer Objekte an. Dabei werden häufig zunächst räumliche Objekte erzeugt, die lediglich temporär als Konstruktionshilfen im dreidimensionalen Modell benötigt und unter Umständen über einen längeren Zeitraum verwendet werden.

Einerseits ist damit ein Bezug zu dem in der Datenbank verwalteten räumlichen Modell gegeben. In diesen Daten ist jedoch andererseits keine Information enthalten, die Bestandteil des räumlichen Modells ist. Daher darf temporäre Information auch in Abfragen nicht ausgewertet werden. Ferner besteht auch kein Bezug zu topologischen oder thematischen Daten.

In [Hör96b] wurde zur Verwaltung temporärer Informationen auf der metrischen Ebene die Möglichkeit der Kennzeichnung metrischer Objekte als „in Bearbeitung“ eingeführt, um räumliche Objekte, die nicht in Verbindung zum eigentlichen thematisch-räumlichen Modell stehen, weiterhin in der Datenbank belassen zu können. Objekte ohne Bezug zum Modell und ohne eine derartige Kennzeichnung sollten dann durch eine selbständig ablaufende „Garbage Collection“ (Eliminierung nicht mehr benötigter Objekte) beim Abschluß von Transaktionen gelöscht werden.

Einerseits ist diese Verwaltung sehr restriktiv, da Konstruktionshilfen ohne eine Kennzeichnung und ohne Verbindung zu einem metrischen Objekt sofort gelöscht werden. Des weiteren wird die temporäre metrische Information für alle Benutzer des Systems in einem Datenmodell verwaltet. Damit wird bei der Modellierung komplexer Systeme die gleichzeitige Bearbeitung durch mehrere Benutzer erschwert. Andererseits erlaubt die willkürliche Kennzeichnung metrischer Objekte im Extremfall die dauerhafte Speicherung eigentlich nur temporär sinnvoller metrischer Informationen, die nicht Bestandteil des räumlichen Modells sind.

Daher wird die Verwaltung temporärer Information aus der Ebene des Datenbankmodells auf die externe Ebene der Applikation verlagert. Im Fall des Geo-Informationssystems BAGIS wird metrische Hilfsinformation auf der Grundlage des zugrunde gelegten Visualisierungssystems erzeugt und verwaltet, d.h., der Benutzer kann beliebige Hilfskonstruktionen modellieren und verwenden und ist lediglich für deren Löschung mit den gegebenen Mitteln zuständig. Erst durch die explizite Übernahme dieser Informationen in Verbindung mit thematischen und topologischen Aspekten werden die erzeugten metrischen Daten persistent in der Datenbank abgelegt und unterliegen dann der ausschließlichen Verwaltung durch die Datenbankebene.

6.3 Die Kopplung thematischer und räumlicher Informationen

In diesem Abschnitt wird die Kopplung der thematischen Ebene mit der Klassenhierarchie von GeoCORE sowie der Ablauf der Erzeugung thematischer, topologischer und metrischer Objekte als auch der Volume NURBS-Repräsentanten beschrieben. Eine erste Darstellung der vorgesehenen Verbindung zwischen Thematik und Topologie wurde in [Hör96b] konzipiert. Aufgrund der neuen Struktur von GeoCORE sind diese Ausführungen jedoch hinfällig.

Wesentlich bei der angestrebten Verbindung zwischen sachbezogenen und raumbezogenen Informationen ist auf der einen Seite die Wahrung der Konsistenz zwischen den Ebenen und auf der anderen Seite die Gewährleistung von Flexibilität und Transparenz innerhalb der Modellierung. Die Integration räumlicher Aspekte soll für die Konzeption von anwendungsspezifischen Datenbankschemata ohne wesentliche strukturelle Veränderungen gegenüber rein thematischen, nur mit den Mitteln von CORE entwickelten Modellen, möglich sein.

Die Einbindung von GeoCORE unter Zuhilfenahme der CORE DDL wurde bereits in Abschnitt 6.2.1 dargestellt. An dieser Stelle sollen die Übersetzung dieser Datendefinition und das zugrunde gelegte Abbildungsschema eingeführt werden.

Dabei gilt es, die nachfolgenden Fragestellungen zu klären:

- In welcher Form sollen zusammengesetzte Objekte der Realwelt untergliedert werden? Wie wird beispielsweise ein Tunnelbauwerk als übergeordnetes Objekt mit seinen einzelnen Komponenten, wie Ausbruchsegmente, Tübbinge, Anker etc., abgebildet?
- Wie sollen einzelne Objekte der Realwelt in ihrer metrischen Darstellung untergliedert werden, d.h., wie erfolgt die räumliche Modellierung einzelner komplexer Objekte? Dabei ist festzulegen, wie etwa ein einzelnes Ausbruchsegment in verschiedene räumliche Repräsentanten aufgespalten wird.

Durch die flexible Struktur von GeoCORE sind vier mögliche Darstellungsformen eines Objektes realisierbar:³

	Informationsgehalt			
	1	2	3	4
Thematik	•	•	•	•
Topologie		•	•	○
Metrik			•	•

Der nicht ausgefüllte Punkt bei Möglichkeit 4 stellt dabei das Fehlen topologischer Information in Form von topologischen Beziehungen dar, obwohl das

³Das Fehlen thematischer Information soll hier ausgeschlossen werden!

Objekt trotzdem auf der topologischen Ebene repräsentiert ist. Damit wird verdeutlicht, daß dem Anwender die Möglichkeit gegeben wird, keine topologischen Informationen anzugeben, so daß sich GeoCORE in derartigen Fällen wie ein System ohne die Möglichkeit zur Verwaltung von Topologie verhält. Die Struktur von GeoCORE verbindet somit die Ausdrucksmächtigkeit anderer Systeme mit der flexiblen Nutzbarkeit eines topologischen Rahmenwerks.

Die verschiedenen Darstellungsformen eines Objektes sind aufgrund der beschriebenen dynamischen Konzepte jederzeit ineinander überführbar, d.h., ein Objekt kann zu beliebigen Zeitpunkten seine aktuelle Repräsentationsform durch Erweiterung oder Verlust der vorhandenen Information ändern.

Zusammengesetzte thematische Objekte werden aufgrund der geforderten Unabhängigkeit der thematischen von der räumlichen Modellierung mit den üblichen Verfahren des objektorientierten Datenbankentwurfs modelliert. Übergeordneten Objekten werden ihre untergeordneten Bestandteile über *Part-of*-Beziehungen zugeordnet, die in CORE über Referenzen oder Relationen abgebildet werden. Bei dem Datenentwurf ist nur festzulegen, ob es sich um ein räumliches Objekt handelt und gegebenenfalls welcher maximaler Dimensionalität das Objekt ist.

Die Kopplung zwischen der thematischen und der räumlichen Ebene erfolgt über binäre *m-zu-n* Relationen. Diese Form der Beziehung erlaubt die Modellierung von zwei Sachverhalten. Zum einen wird ausgedrückt, daß ein thematisches Objekt, beispielsweise ein Ausbruchssegment, sich aufgrund der Komplexität räumlich nicht durch eine Darstellung ausdrücken läßt. Daher kann jedem thematischen Objekt eine Menge räumlicher Repräsentanten zugeordnet werden. Diese sind ihrerseits alle mit dem thematischen Objekt verbunden.

Zum anderen kann ein GeoObjekt auch der Repräsentant zweier thematischer Objekte sein. Als Beispiel sei die Modellierung eines Flusses als ein GeoObjekt genannt, das einerseits die räumliche Darstellung eines thematischen Objekts *Fluß* ist und andererseits als Grenze zwischen zwei Ländern referenziert wird. Diese Modellierung drückt implizit aus, daß sowohl die Grenze als auch die Sachattribute des Flusses thematische Eigenschaften einer räumlichen Gegebenheit sind. Eine Veränderung der räumlichen Modellierung des Flusses auf der Basis dieser Abbildung wirkt sich immer auf beide Sachobjekte aus, so daß die Beziehung der realen Welt korrekt widerspiegelt wird.

Die (topologischen) Begrenzungen eines topologischen Objekts, also die begrenzenden Flächen zu einem gegebenen Körper, werden als eigenständige (topologische) Objekte repräsentiert. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die Begrenzung eines Körpers durch mehrere Seitenflächen topologisch abzubilden. Auf der metrischen Ebene zeigen sowohl das begrenzte als auch die begrenzenden Objekte auf genau eine V-NURBS-Darstellung, wobei die beschreibenden Parameter des metrischen Objektes die unterschiedlichen Begrenzungen differenzieren. Mit dieser Modellierung kann einerseits jedes Teilobjekt einer räumlichen Darstellung sowohl thematisch als auch räumlich referenziert und in Beziehung gestellt werden, und andererseits ist die metrische Beschreibung durch die ausgelagerte V-NURBS-Darstellung einheitlich und konsistent abgebildet.

Zur Vervollständigung der Kopplung von thematischen und räumlichen Objekten ist abschließend die Verbindung zwischen der V-NURBS-Repräsentation eines Körpers und der räumlichen Zuordnung für die in Abschnitt 3.3.5 vorgestellten Parameterverteilungen festzulegen. Dabei stellt sich das Modellierungsproblem, daß thematische und räumliche Informationen ineinander verschachtelt sind, da sich die jeweiligen Parameter auf einzelne Stützpunkte des Kontrollgitters beziehen. Einem Stützpunkt bzw. einem Koordinaten-Tripel können ein oder mehrere thematische Eigenschaften, also beispielsweise WD-Meßwerte, geochemische Zustände, etc., zugewiesen werden.

Um die Flexibilität der bisher vorgestellten Konzepte aufrecht zu erhalten und dennoch eine enge Verknüpfung zu erreichen, werden die Parametereigenschaften eines thematischen Objektes in eigene Klassen als Spezialisierungen von `coordinate` eingeführt. Diese *Parameterklassen* können somit zu jedem Kontrollpunkt eigene Attribute definieren, die dann durch entsprechende Methoden in die Visualisierung der NURBS-Objekte einfließen. Aufgrund der Definition als Unterklasse von Koordinaten können bei der Datenmodellierung beliebige Parameter miteinander kombiniert und gegebenenfalls in weiteren Klassen hierarchisch spezialisiert werden. Durch die direkte Integration in die Koordinaten-Objekte wird die Konsistenz der Datenverwaltung gesichert und die Modellierung durch den Anwender vereinfacht.

Die Definition einer Parameterklasse in CORE DLL hat den folgenden Aufbau:

```
...
class Beispielklasse:
    spec Coordinate;
    attributes
        Beispielparameter: float,
        ...;
end class Beispielklasse;
```

6.4 Einbeziehung von Zeitkonzepten

Der letzte Schritt zu einer *virtuellen Realwelt* ist die Integration der Komponente Zeit zur Abbildung temporaler räumlicher Informationen als grundlegendes Konzept für die Simulation. Die wesentliche Anforderung für die angestrebte Erweiterung im Rahmen des vorgestellten Modells von GeoCORE ist die gleichberechtigte Handhabung und unifizierte Integration temporaler, geometrischer und thematischer Aspekte [Wor94].

Ein Konzept zur Modellierung temporaler Aspekte im Datenmodell von CORE wurde in [Lic00] mit der MORE-Erweiterung **MOREtime** vorgestellt (vgl. Abschnitt 5.2.2). Bei der Entwicklung dieses Konzeptes wurde bereits die Zusammenführung mit dem in dieser Arbeit entwickelten Geo-Datenmodell berücksichtigt. An dieser Stelle soll ein Überblick über eine konzeptuelle Erweiterung von GeoCORE zur Behandlung *geo-temporaler* Informationsaspekte gegeben werden.

Die mathematische Grundlage der Verwaltung temporaler räumlicher Informationen bildet die in Abschnitt 3.4 eingeführte Erweiterung des NURBS-Konzepts in die vierte Dimension, wobei insbesondere die Speicherung des dreidimensionalen Stützpunktgitters der NURBS-Körper zu verschiedenen Zeitpunkten konzeptuell definiert werden muß. Die vollständig neue Abbildung des dreidimensionalen Kontrollgitters bei der Veränderung einzelner Punkte über die Zeit ist extrem speicherintensiv und kann nicht effizient in der Datenbank abgebildet werden. Daher werden die Koordinaten des dreidimensionalen Kontrollgitters jeweils einzeln mit einem Zeitstempel versehen und können sich individuell über die Zeit ändern. Die Rekonstruktion des Kontrollgitters zu einem bestimmten Zeitpunkt erfolgt über die von MOREtime bereitgestellte Funktionalität zur Verwaltung temporaler Datenbankinhalte. Topologische Beziehungen und die dynamischen Klassenzugehörigkeiten der topologischen Objekte werden ebenfalls mit den Zeitstempelverfahren von MOREtime verwaltet.

Damit steht die Zeit als integraler Bestandteil eines echten 4D-Modells in direktem Bezug zur räumlichen Modellierung. Parameterverteilungen lassen sich mit diesem Ansatz sowohl über die Zeit als auch im Raum kontinuierlich modellieren und visualisieren. Veränderungen von Kontrollpunkten zu einem bestimmten Zeitpunkt beeinflussen dann in Abhängigkeit von den gewählten Parametern nicht nur einen diskreten Modellzustand, sondern eine Zeitspanne. Innerhalb dieses Zeitintervalls lassen sich alle Zustände raum-zeitbezogen kontinuierlich und auf der Grundlage einer einheitlichen Beschreibung berechnen.

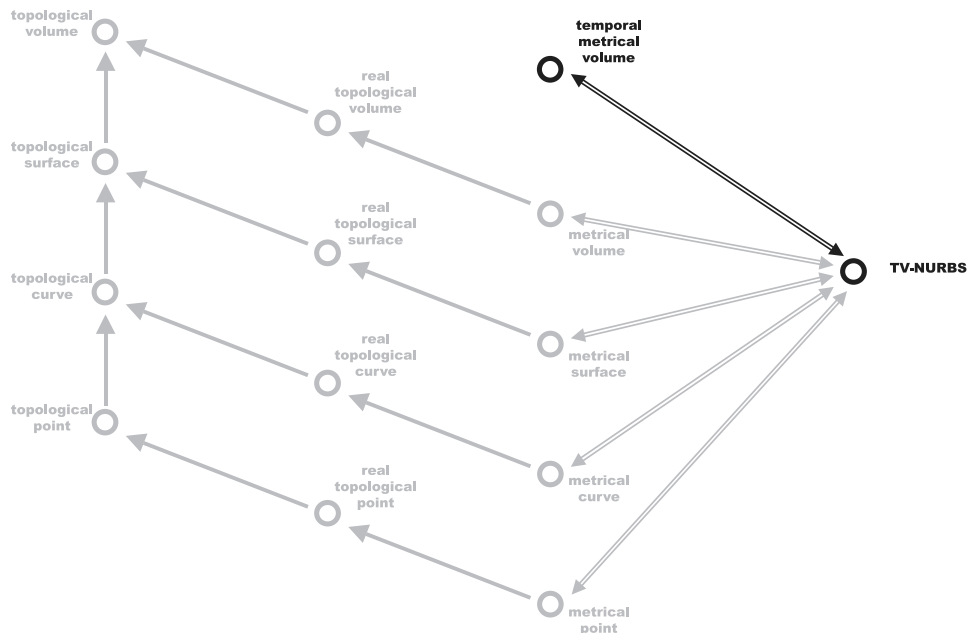


Abbildung 6.11: Die erweiterte Struktur von GeoCORE um temporale Aspekte

In Abbildung 6.11 ist die Integration geo-temporaler Konzepte in den strukturellen Aufbau von GeoCORE dargestellt, die Notation folgt in Anhang B. Die

grundlegende Erweiterung beinhaltet die Veränderung der ursprünglichen Klasse **vnurbs** zu einer temporalen Klasse **tvnurbs**, deren zugeordnete Koordinaten zeitgestempelt sind. Somit kann für die Verwaltung des vierdimensionalen Gitters der temporalen Stützpunkte die bisherige, dreidimensionale Struktur beibehalten werden.

In der Klassenhierarchie von GeoCORE ist die geo-temporale Klasse **temporal metrical volume** als Erweiterung der metrischen Ebene eingeführt worden. Die Verknüpfung der beiden Klassen erfolgt in Analogie zur Referenzierung zwischen den bisherigen metrischen Klassen und der Klasse **vnurbs** durch eine binäre Relation. Der Zugriff auf einzelne Teile temporaler räumlicher Objekte folgt äquivalent zu der in Abschnitt 6.2.3 beschriebenen Methode.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In der Einleitung dieser Arbeit wurde die Entwicklung eines umfassenden Informationssystems für die Geowissenschaften durch den Wunsch begründet, die Umwelt, also die den Menschen umgebende Welt, möglichst realistisch mit den Mitteln der Informationstechnik nachzubilden und dieses Modell dem geowissenschaftlichen Anwender zur Verfügung zu stellen, um die Lösung fachspezifischer Probleme zu vereinfachen oder sogar zu automatisieren.

Das Ziel des zu entwickelnden Konzeptes eines Geo-Datenmodells war zum einen, möglichst viel Information bzw. Wissen des Anwenders in das abstrakte Modell zu integrieren, um eine breite Datenbasis mit verschiedenen Informationsaspekten bereitzustellen. Zu diesen zählen neben thematischen, sachbezogenen Aspekten aufgrund der fachlichen Ausrichtung insbesondere räumliche Informationen mit körperhafter Ausbildung und die zeitliche Entwicklung dieser Daten. Dabei gilt es, Unschärfen, Ungenauigkeiten oder das Fehlen von relevanten Daten bereits bei der Konzeption der grundlegenden Modellstrukturen zu berücksichtigen.

Zum anderen müssen die konzipierten Strukturen problemadäquat ausgelegt sein, um die Haltung unwichtiger, unnötiger oder redundanter Daten bei der nachfolgenden konkreten Anwendungsmodellierung ausschließen zu können.

Grundlage des entwickelten Geo-Datenmodells GeoCORE bildet die neuartige Modellierung und Visualisierung von Körpern mittels Volume Non Uniform Rational B-Splines. Mit dieser Methodik können erstmals echte dreidimensionale Freiformkörper durch die Vorgabe eines Stützpunktgitters definiert werden, die mathematisch eindeutig bestimmt sind und die exakte, kontinuierliche Berechnung beliebiger zugehöriger Punkte ermöglichen. Anhand von Parametereinstellungen kann das lokale oder globale Verhalten von Volume NURBS problemspezifisch beeinflusst und der repräsentierte Körper durch den Anwender modifiziert werden.

Durch die Fortführung des NURBS-Konzeptes in die vierte Dimension ist darüber hinaus die Abbildung zeitbezogener Aspekte integrierbar, die eine ebenfalls kon-

tinuierliche Modellrepräsentation und -Interpolation temporaler Rauminformationen ermöglicht.

Auf der Grundlage dieses geo-temporalen Repräsentationsmodells konnte erstmals das hydrogeologische Verhalten des Untergrunds einer Talsperre sowohl in der räumlichen als auch in der zeitlichen Entwicklung integrativ modelliert und über die Zeit visualisiert werden. Die resultierenden Parametermodelle zeigen die Bedeutung der vierdimensionalen Raumrepräsentation auf, da die Analyse der Meßwerte des Durchströmungsverhaltens des geologischen Untergrundes erstmals in ihrem Gesamtzusammenhang dargestellt wurden.

Aufsetzend auf diesem neu entwickelten Konzept zur Repräsentation räumlicher und temporaler Informationen wurde das Geo-Datenmodell unter Berücksichtigung der angestrebten Ziele konzipiert. Das wesentliche Merkmal der entwickelten Struktur ist die Dreiteilung des Modells in die Aspekte Thematik, Topologie und Metrik, anhand derer die verschiedenen Stufen der geowissenschaftlichen Modellgewinnung modellintern nachvollzogen werden können. Vor allem die Verwaltung topologischer Beziehungen stellt eine relativ abstrakte, einfach zu handhabende Möglichkeit zur Repräsentation von Expertenwissen dar.

Auf der Ebene der metrischen Informationen wurde die Beschreibung der eigentlichen Volume NURBS-Information in eine losgelöste Klasse ausgelagert, die mittels schneller, binärer Relationen eine effiziente Referenzierung der zugehörigen Bestandteile ermöglicht. Damit können Flächen, Kurven und Punkte als direkte Komponenten eines Körpers ausgewiesen werden, so daß nicht nur eine feste Verbindung zwischen den Bestandteilen besteht, sondern daß insbesondere Änderungen implizit alle Repräsentationen in den vier Dimensionen gleichermaßen beeinflussen.

Mit dem konzipierten Geo-Datenmodell ist die Grundlage für die gesamtheitliche und realitätsnahe Repräsentation aller für geowissenschaftliche Anwendungen notwendigen Informationsaspekte in einem integrierten Modell geschaffen.

Für die Anwendung der entwickelten informationstechnischen Strukturen, die die modulare Basis für die anwendungsspezifische Datenmodellierung bilden, ist die Untersuchung der relevanten thematischen und räumlichen Informationen für die geowissenschaftliche Anwendungsdomäne durchzuführen. Das aus dieser Analyse resultierende Modell ist mit den bereitgestellten Konzepten des in dieser Arbeit entwickelten Geo-Datenmodells umzusetzen.

Anschließend erfolgt die angesprochene Integration aller Systemkomponenten unter einer für den Anwender transparenten Bedienoberfläche, mit dem Ziel, die anfallenden Arbeitsschritte und Problemlösungsstrategien möglichst einfach und effizient bedienbar abzubilden. In Bezug auf die körperhafte Modellierung mit Volume NURBS sind die veränderlichen Parameter derart aufzubereiten, daß der Geowissenschaftler aus seiner Sicht im wesentlichen geologische, geohydraulische oder geotechnische Einflußgrößen ändert. Außerdem sind die vorgestellten Verfahren zur Modellbildung zu implementieren und gegebenenfalls um fachspezifische Ausprägungen zu ergänzen. Hierzu zählt insbesondere die Anpassung des in [Irm98] vorgestellten und umgesetzten Multi-Level B-Spline

(MBA) Algorithmus zur automatischen Flächenbildung aus verstreuten Punktinformationen an die Generierung von Volumina.

In Bezug auf die temporalen Konzepte ist die in [Lic00] eingeführte Erweiterung MOREtime umzusetzen und wie beschrieben mit der Klassenhierarchie von GeoCORE zu koppeln und für die Simulation von thematischen und räumlichen Systemveränderungen auszubauen. Darüber hinaus ist die Konzeption und Integration des zweiten zeitlichen Aspekts, der Versionierung von Informationen, durchzuführen, womit die Grundlage für Szenarienanalysen und Prognosen gegeben ist.

Bei der Modellbildung, Visualisierung und Simulation kann ferner durch die Einbettung von Virtual Reality-Konzepten der Immersionseffekt gesteigert und damit die Mensch-Maschine-Kommunikation verbessert werden. Infolge der komplexen geowissenschaftlichen Modelle im drei- oder vierdimensionalen Raum ist die stereoskopische Darstellung des geologischen Untergrundes und der technischen Bauwerke mittels Head-Mounted-Displays oder ähnlicher VR-Hardware in Kombination mit verschiedenen Tracking-Verfahren zur Orientierung im Raum fast zwingend erforderlich. Neben der eigentlichen Anbindung der VR-Hardware ist auf Seiten der Visualisierung lediglich die Berechnung zweier Bilder mit unterschiedlichen Blickwinkeln und deren seitenabhängige Projektion auf das linke und rechte Auge erforderlich. [KMRZ99b, ZRKM00]

Literaturverzeichnis

- [Abe89] D.J. Abel: *SIRO-DBMS: a database tool-kit for geographical information systems*; International Journal Geographical Information Systems, Vol.3, No.2, pp. 103-116, 1989.
- [AG97] N.R. Adam, A. Gangopadhyay: *Database Issues in Geographic Information Systems*; Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [AH84] S. Abiteboul, R. Hull: *IFO: A formal semantic database model*; Proc. of the International Conference on Principles of Database Systems, 1984.
- [AH87] S. Abiteboul, R. Hull: *IFO: A formal semantic database model*; ACM Transactions on Database Systems, Vol. 12, No.4, pp. 525-565, 1987.
- [Ale61] P. Alexandroff: *Elementary Concepts of Topology*; Dover Publications, New York, 1961.
- [AM91] S. Abramowski, H. Müller: *Geometrisches Modellieren*; Reihe Informatik, Bd. 75, BI-Wissenschaftsverlag, 1991.
- [Ame98] M. Ameskamp: *Three-Dimensional Rule-Based Continuous Soil Modelling*; Dissertation Universität Kiel, Februar 1997.
- [AS91] W.G. Aref, H. Samet: *Extending a DBMS with Spatial Operations*; in O. Günther, H.-J. Scheck (Eds.): *Advances in Spatial Databases*; Proc. Second Symposium SSD'91, Zurich, Lecture Notes in Computer Science 525, pp. 299-318, 1991.
- [AS93] G. Aumann, K. Spitzmüller: *Computerorientierte Geometrie*; Reihe Informatik, Bd. 89, BI-Wissenschaftsverlag, 1993.
- [Bai94] T.C. Bailey: *A review of statistical spatial analysis in geographic information systems*; in S. Fotheringham, P. Rogerson: *Spatial Analysis and GIS*; Taylor&Francis, 1994.
- [Bar88] B.A. Barsky: *Computer Graphics and Geometric Modeling Using Beta-splines*; Springer-Verlag, 1988.
- [Bar95] N. Bartelme: *Geoinformatik – Modelle, Strukturen, Funktionen*; Springer-Verlag, 1995.

- [BBC94] M. Breunig, T. Bode, A.B. Cremers: *Implementation of Elementary Geometric Database Operations for a 3D-GIS*; 6th International Symposium on Spatial Data Handling, 1994.
- [BBC97] O. Balovnev, M. Breunig, A.C. Cremers: *From GeoStore to Geo-ToolKit: The Second Step*; 5th International Symposium on Spatial Databases, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 1997.
- [Ber99] S. Bergstedt: *Ein GIS-spezifisches Implementierungskonzept für das Geo-Datenmodell GeoCORE*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Diplomarbeit, Februar 1999.
- [BF91] R. Bill, D. Fritsch: *Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Band 1*; Wichmann Verlag, 1991.
- [BHKS93] T. Brinkhoff, H. Horn, H.-P. Kriegel, R. Schneider: *A Storage and Access Architecture for Efficient Query Processing in Spatial Database Systems*; in D. Abel, B.C. Ooi (Eds.): *Advances in Spatial Databases*; Proceedings Third International Symposium SSD '93, Lecture Notes in Computer Science 692, Springer-Verlag, 1993.
- [Bie97] W. Biewald: *Die Talsperre Leibis/Lichte im Thüringer Schiefergebirge aus ingenieurgeologischer Sicht*; Geowiss. Mitt. von Thüringen 5, Weimar, S. 235-278, 1997.
- [Bis95] J. Biskup: *Grundlagen von Informationssystemen*; Vieweg Verlag, 1995.
- [BRBM97] D. Bringemeier, G. Reik, W. Busch, D.P.F. Möller: *BAGIS – Ein Informationssystem für den Tunnelbau*; In J. Gosler, W.J. Hinkel, W. Schubert (Hrsg.): *Tunnel für Menschen*; World Tunnel Congress '97, Balkema, 1997.
- [Bre96] M. Breunig: *Integration of spatial information for geo-information systems*; Lecture Notes in Earth Sciences 61, Springer-Verlag, 1996.
- [BSK94] U. Bähr, C. Singer, W. Kiessling: *Zur Systematik räumlicher Operatoren in Geo-Datenbanken*; GIS 4/1994.
- [Bui89] L. Buisson: *Reasoning on Space with Object-Centered Knowledge Representations*; in A. Buchmann, O. Günther, T.R. Smith, Y.-F. Wang (Eds.): *Design and Implementation of Large Spatial Databases*; Proceedings First Symposium SSD '89, Lecture Notes in Computer Science 409, Springer-Verlag, 1990.
- [Car89] J.R. Carter: *On Defining the Geographic Information System*; in W.J. Ripple (ed.): *Fundamentals of Geographic Information Systems: A Compendium*; American Society of Photogrammetry and

- Remote Sensing and the American Congress on Surveying and Maps, 1989.
- [Che76] P.P. Chen: *The entity-relationship model – towards a unified view of data*; ACM Transactions on Database Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 9-36, 1976.
- [Chr91] N.R. Chrisman: *The error component in spatial data*; in D.J. Maguire, M.F. Goodchild, D.W. Rhind (eds.): *Geographical Information Systems*; Vol. 1, Harlow, pp. 165-174, 1991.
- [CL92] A. Choi, W.S. Luk: *Using an object-oriented database system to construct a spatial database kernel for GIS applications*; computer systems science & engineering, CRL Publishing Ltd, 1992.
- [Cod70] E.F. Codd: *A relational model for large shared data banks*; Communications of the ACM, Vol.13, Nr. 6, Seite 377-387, Juni 1970.
- [CR91] J.T. Coppock, D.W. Rhind: *The history of GIS*; in D.J. Maguire, M.F. Goodchild, D.W. Rhind (Eds): *Geographical Information Systems*; Vol 1., Longmans, pp. 21-43, 1991.
- [CS85] M.S. Casale, E.L. Stanton: *An Overview of Analytic Solid Modeling*; IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 5, No. 2, pp. 45-56, Feb. 1985.
- [DRS93] B. David, L. Raynal, G. Schorter: *GeoO₂: Why objects in a geographical DBMS?* 3rd International Symposium on Advances in Spatial Databases '93, Lecture Notes in Computer Science 692, Springer-Verlag, 1993.
- [DSW90] G. Dröge, H.-J. Schek, A. Wolf: *Erweiterbarkeit in DASDBS*; in *Informatik Forschung und Entwicklung*; Springer-Verlag, 1990.
- [EF88] M.J. Egenhofer, A.U. Frank: *Object-Oriented Databases: Database Requirements for GIS*; Proc. International Geographic Information Systems (IGIS) Symposium: The Research Agenda, Arlington, Virginia, Nov. 1987, NASA, Vol. 2, pp. 189-211, 1988.
- [EFJ89] M.J. Egenhofer, A.U. Frank, J.P. Jackson: *A Topological Data Model for Spatial Databases*; in A. Buchmann, O. Günther, T.R. Smith, Y.-F. Wang (Eds.): *Design and Implementation of Large Spatial Databases*; Proceedings First Symposium SSD '89, Lecture Notes in Computer Science 409, Springer-Verlag, 1990.
- [EF91] M. Egenhofer, R. Franzosa: *Point-set topological spatial relations*; International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 161-174, 1991.
- [EF92] M. Egenhofer, A. Frank: *Object-Oriented Modeling for GIS*; Journal of the Urban and Regional Information Systems Association 4 (2), pp 3-19, 1992.

- [Ege89] M.J. Egenhofer: *A Formal Definition of Binary Topological Relationships*; in W. Litwin, H.-J. Schek (Eds.): *Foundations of Data Organization and Algorithms*; 3rd International Conference, Paris, France, June 1989, Lecture Notes in Computer Science 367, Springer-Verlag 1989.
- [Ege91] M.J. Egenhofer: *Reasoning about Binary Topological Relations (extended Abstract)*; in O. Günther, H.-J. Schek (Eds.): *Advances in Spatial Databases*; Proc. Second Symposium SSD '91, Zürich, August 1991; Lecture Notes in Computer Science 525, Springer-Verlag, pp. 143-160, 1991.
- [EH90] M. Egenhofer, J. Herring: *A Mathematical Framework for the Definition of Topological Relationships*; in K. Brassel, H. Kishimoto (Eds.): *Fourth International Symposium on Spatial Data Handling*; Zürich, pp. 803-813, 1990.
- [ESK97] J. Encarnação, W. Straßer, R. Klein: *Graphische Datenverarbeitung 2: Modellierung komplexer Objekte und photorealistische Bilderzeugung*; R. Oldenbourg Verlag, 1997.
- [Far97] G. Farin: *Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design. A Practical Guide*; Fourth Edition, Academic Press, 1997.
- [FDFHP94] J.D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner, J.F. Hughes, R.L. Phillips: *Grundlagen der Computergraphik: Einführung, Methoden, Prinzipien*; Addison-Wesley, 1994.
- [FH85] R.T. Farouki, J.K. Hinds: *A Hierarchy of Geometric Forms*; IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 5, No. 5, pp. 51-78, May 1985.
- [Fin90] D. Findeisen: *Datenstruktur und Abfragesprachen für raumbezogene Informationen*; Kirschbaum-Verlag, 1990.
- [FMP93] L. De Floriani, P. Marzano, E. Puppo: *Spatial queries and data models*; in A.U. Frank, I. Campari (Eds.): *Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS*; COSIT'93, Italy, Lecture Notes in Computer Science 716, Springer-Verlag, 1993.
- [GGJ93] C.A. Goble, A. Glowinski, K.G. Jeffery: *Semantic Constraints in a Medical Information System*; Lecture Notes in Computer Science 696, Springer-Verlag, 1993.
- [Goo91] M. Goodchild: *Spatial Analysis with GIS: problems and prospects*; Proceedings GIS/LIS '91, ASPRS/ACSM, Falls Church, pp. 40-48, 1991.

- [GS93] R.H. Güting, M. Schneider: *Realms: A Foundation for Spatial Data Types in Database Systems*; 3rd International Symposium on Advances in Spatial Databases '93, Lecture Notes in Computer Science 692, Springer-Verlag, pp. 14-35, 1993.
- [HC91] L.M. Haas, W.F. Cody: *Exploiting Extensible DBMS In Integrated Geographic Information Systems*; Second Symposium on Large Spatial Databases, Lecture Notes in Computer Science 525, Springer-Verlag, 1991.
- [Her92] J.R. Herring: *TIGRIS: A Data Model for an Object-Oriented Geographic Information System*; Computers & Geosciences 18, No. 4, pp. 443-452, Pergamon Press, 1992.
- [Heu89] A. Heuer: *A Data Model for Complex Objects Based on a Semantic Database Model and Nested Relations*; in: S. Abiteboul, P.C. Fischer, H.-J. Schek (Eds.): *Nested Relations and Complex Objects in Databases*; Lecture Notes in Computer Science 361, Springer-Verlag, pp. 297-312, 1989.
- [HFW90] A. Heuer, J. Fuchs, U. Wiebking: *OSCAR: An Object-Oriented Database System with Nested Relational Kernel*; Proc. 9th International Conference on Entity-Relationship Approach, Lausanne, pp. 95-110, Oct. 1990.
- [HH91] C. Hörner, A. Heuer: *EXTREM – The structural part of an object-oriented database model*; Informatik-Bericht 91/5, TU Clausthal, Institut für Informatik, Oktober 1991.
- [HK96a] C. Hörner, B. Kesper: *CORE: Die Modellierungskonzepte*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Projektgruppe Datenmanagement, Forschungsbericht 26, 1996.
- [HK96b] C. Hörner, B. Kesper: *GeoCORE: Die topologische Modellebene*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Projektgruppe Datenmanagement, Projekt BAGIS, Interner Bericht 6, 1996.
- [HK96c] C. Hörner, F. Kroll: *CORE: Die Metaebene*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Projektgruppe Datenmanagement, Forschungsbericht 29, 1996.
- [HMH92] C. Hörner, D.P.F. Möller, A. Heuer: *The MC-MEDIS project: Medical data management using OODBS*; in K.R. Dittrich (Hrsg.): *Proceedings des SI-Workshops „OODBS at Work“*; Zürich, Oktober 1992.
- [Hör95] C. Hörner: *Zur Nachfolge des EXTREM-Modells*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Projektgruppe Datenmanagement, Forschungsbericht 25, 1995.

- [Hör96a] C. Hörner: *Eine Datendefinitionssprache für CORE*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Projektgruppe Datenmanagement, Forschungsbericht 27, 1996.
- [Hör96b] C. Hörner: *GeoCORE: Kopplung der Modellebenen*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Projektgruppe Datenmanagement, Projekt BAGIS, Interner Bericht 7, 1996.
- [Hör97a] C. Hörner: *CORE: Die graphische Notation*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Projektgruppe Datenmanagement, Forschungsbericht 31, 1997.
- [Hör97b] C. Hörner: *Schnittklassen und dynamische Klassifikation in CORE*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Projektgruppe Datenmanagement, Forschungsbericht 34, 1997.
- [Hör99] C. Hörner: *Erweiterte Modellierungskonzepte in einem objektorientierten Datenbankmodell: Beziehungen, dynamische Klassenzugehörigkeit und Handhabung von Informationsdefiziten*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Dissertation, 1999.
- [Hof89] C.M. Hoffmann: *Geometric and Solid Modeling: An Introduction*; Morgan Kaufmann Publishers, 1989.
- [HS93] M.L. Heytens, C. Sacchi: *A declarative, object-oriented interface to a solid modeler*; in D. Abel, B.C. Ooi (Eds.): *Advances in Spatial Databases*; Proceedings SSD '93, Singapore, Lecture Notes in Computer Science 692, Springer-Verlag, 1993.
- [IG93] M.D. Impey, P. Grindrod: *Application of Fractal Geometry to Geological Site Characterization*; in A.J. Crilly, R.A. Earnshaw, H. Jones: *Applications of Fractal and Chaos: The Shape of Things*; Springer-Verlag, 1993.
- [Irm98] N. Irmer: *Approximation von Datenpunkten durch NURBS-Flächen*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Softwarepraktikum, 1998.
- [Kau94] A. Kaufmann: *Trends in volume visualisation and volume graphics*; in L. Rosenblum et. al.: *Scientific Visualization: Advances and Challenges*; Academic Press, 1994.
- [Kes96] B. Kesper: *GeoCORE: Die metrische Modellebene*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Projektgruppe Datenmanagement, Projekt BAGIS, Interner Bericht 8, 1996.
- [Kes97] B. Kesper: *Das Geo-Datenmodell GeoCORE*; in Christian Eckert, Torsten Polle, Tatja Stülten: *Kurzfassungen 9. Workshop „Grundlagen von Datenbanken“*, Königslutter; Universität Dortmund, Fachbereich Informatik, Forschungsbericht Nr. 643, S. 51-55, Mai 1997.

- [Kla92] T. Klaustal: *Das OSCAR-Projekt*; Informatik-Bericht 92/2, TU Clausthal, Institut für Informatik, August 1992.
- [KM99] B. Kesper, D.P.F. Möller: *BAGIS – Baueologisch-Geotechnisches Informationssystem: Informationstechnische Realisierung*; in G. Reik, W. Paehge: *Raumbezogene Informationssysteme für geologische, bau- und geotechnische Aufgaben*; FIS-Forum Clausthal 1997, Papierflieger, 1999.
- [KMRZ99a] B. Kesper, D.P.F. Möller, G. Reik, C. Zemke: *Realisierung und Einsatzmöglichkeiten des Geoinformationssystems BAGIS*; in W. Lempp, G. Reik (Hrsg.): *Berichte von der 12. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie (Halle/Saale)*, Fachverlag Geowissenschaften, S. 129-138, 1999.
- [KMRZ99b] B. Kesper, D.P.F. Möller, G. Reik, C. Zemke: *Dynamische Virtual Reality Modelle im Talsperrenbau*; in G. Hohmann (Hrsg.): *Simulationstechnik*, SCS Publ., Ghent, S. 135-140, 1999.
- [KNM95] S. Krishnan, A. Narkhede, D. Manocha: *BOOLE: A System to Compute Boolean Combinations of Sculptured Solids*; in *Proceedings of ACM symposium on computational geometry*, 1995.
- [Kön96] A. Königer: *3D-GIS für den Städtebau*; Bl. 4, 1996.
- [Las89] D. Lasser: *Bernstein-Bézier Representation of Solid Models*; in W. Strasser, H.-P. Seidel (Eds.): *Theory and Practice of Geometric Modeling*; Springer-Verlag, pp. 109-125, 1989.
- [Las94a] D. Lasser: *Free Form Volumes – Definition, Applications, Visualization Techniques*; Interner Bericht 238/94, Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern, 1994.
- [Las94b] D. Lasser: *Rational Tensor Product Bézier Volumes*; Interner Bericht 239/94, Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern, 1994.
- [Lic00] M. Lichtsinn: *Temporale Aspekte in CORE*; TU Clausthal, Institut für Informatik, Diplomarbeit, Januar 2000.
- [LK90] D. Lasse, P. Kirchgeßner: *Rationale Bézier-Volumina*; in M. Frühauf, M. Göbel: *Visualisierung von Volumendaten*; Springer-Verlag, 1990.
- [Mag92] D.J. Maguire: *An Overview and Definition of GIS*; in D.J. Maguire, M.F. Goodchild, D.W. Rhind: *Geographical Information Systems*; Vol.1: Principles, Longman Scientific & Technical, 1991.
- [MS96] R. Marschallinger, C. Stejskal: *NURBS-basierte 3-D Modellierung in den Geowissenschaften*; Beiträge zur Geographischen Informationswissenschaft, Salzburger Geographische Materialien, Heft 24, S. 11-15, 1996.

- [MU83] G. Mattheß, K. Ubell: *Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt*; in G. Mattheß (ed.): *Lehrbuch der Hydrogeologie*, Bd. 1, Bornträger, 1983
- [OGC98] Open GIS Consortium: *The OpenGIS Guide: Introduction to Interoperable Geoprocessing and the OpenGIS Specification*; Third Edition, www.opengis.org, 1998.
- [Ore90] J.A. Orenstein: *An object-oriented approach to spatial data processing*; in *Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling*, volume 2, pp. 669-678, July 1990.
- [PC89] P. Parent, R. Church: *Evolution of Geographic Information Systems as Decision Making Tools*; in W.J. Ripple (ed.): *Fundamentals of Geographic Information Systems: A Compendium*; American Society of Photogrammetry and Remote Sensing and the American Congress on Surveying and Maps, 1989.
- [PT97] L. Piegl, W. Tiller: *The NURBS Book*; 2. ed., Springer-Verlag, 1997.
- [RK91] J.F. Raper, B. Kelk: *Three-Dimensional GIS*; in D.J. Maguire, M.F. Goodchild, D.W. Rhind: *Geographical Information Systems*; Vol.1: Principles, Longman Scientific & Technical, 1991.
- [RMBBKZS98] G. Reik, D.P.F. Möller, W. Busch, D. Bringemeier, B. Kesper, C. Zemke, D. Schöttler: *Abschlußbericht zum Projekt „Entwicklung eines Baugeologisch-Geotechnischen Informationssystems (BAGIS) als Planungs-, Überwachungs- und Steuerungselement für den bergmännischen Tunnelbau“*; Förderungsnummer I/70 287, Volkswagen-Stiftung, 1998.
- [Sch97] M. Schneider: *Spatial data types for database systems: finite resolution geometry for geographic information systems*; Lecture Notes in Computer Science 1288, Springer-Verlag, 1997.
- [Sie99] M. Siebigteroth: *Einsatz und konzeptionelle Erweiterung des Geo-Informationssystems BAGIS auf Injektionsmaßnahmen beim Tal-sperrenbau Leibis/Lichte, Thüringen*; Diplomarbeit, TU Clausthal, Institut für Geologie und Paläontologie, 1999.
- [Sin78] D.F. Sinton: *The inherent structure of information as a constraint to analysis: Mapped thematic data as a case study*; in G. Dutton (ed.): *Spatial Semantics: Understanding and Interacting with Map Data*; First Int. Adv. Study Symposium on Topological Information Systems, Vol. 7, Harvard Papers on Geographic Information Systems, 1978.
- [Sin93] C. Singer: *Relationale Datenbanksysteme als Basis Geographischer Datenbanken*; GIS 6, 1993.

- [SP86] T.W. Sederberg, S.R. Parry: *Free-Form Deformation of Solid Geometric Models*; in D.C. Evans, R.J. Athay (ed.): *Computer Graphics*; SIGGRAPH '86 Conference Proceedings, Dallas, 1986.
- [Sta89] N.B. Standerski: *The Generation of Ship Hulls with given Design Parameters using Tensor Product Surfaces*; in W. Straßer, H.-P. Seidel (Eds.): *Theory and Practice of Geometric Modeling*. Springer-Verlag, pp. 65-79, 1989.
- [Sta95] R. Stahl: *Moderne Landkarten: Grundlagen geographischer Informationssysteme*; iX 9/1995.
- [TC91] H. Toriya, H. Chiyokura: *3D CAD Principles and Applications*; Computer Science Workbench, Springer-Verlag, 1991.
- [TL94] K.D. Tönnies, H.U. Lemke: *3D-Computer-grafische Darstellungen*; in A. Endres, H. Krallmann, P. Schnupp (Hrsg.): *Handbuch der Informatik*;, Band 9.2, R. Oldenbourg Verlag, 1994.
- [Tom90] D. Tomlin: *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*; Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.
- [VBH95] A. Voigtmann, L. Becker, K. Hinrichs: *An Object-Oriented Data Model and a Query Language for Geographic Information Systems*; Bericht 15/95-I, Institut für Informatik, WWU Münster, 1995.
- [Wei86] K.J. Weiler: *Topological Structures for Geometric Modeling*; Rensselaer Polytechnic Institute, Doctoral Thesis, 1986.
- [Wie95] J. Wiesel: *Buntes Angebot: Geographische Informationssysteme in Deutschland*; iX 9/1995.
- [Win96] S. Winter: *Unsichere topologische Beziehungen zwischen ungenauen Flächen*; Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 1996.
- [Wor94] M.F. Worboys: *A Unified Model for Spatial and Temporal Information*; The Computer Journal, Vol. 37, No. 1, pp. 26-34, 1994.
- [Wor95] M.F. Worboys: *GIS: A Computing Perspective*; Taylor&Francis, London, 1995.
- [Zeh98] C.A. Zehnder: *Informationssysteme und Datenbanken*. 6. Auflage, B.G. Teubner, 1998.
- [ZRKM00] C. Zemke, G. Reik, B. Kesper, D.P.F. Möller: *Virtual reality in modelling and simulation of hydrodynamic processes of dams*; in I. Troch, F. Breitenecker (eds): *Proceed. 3rd Mathmod, ARGESIM Report*, pp. 517-520, 2000.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Björn Kesper
Geburtsdatum	14. Juli 1971
Geburtsort	Kassel
Familienstand	ledig
Eltern	Helga Kesper, geb. Neu, Lehrerin Eckhard Kesper, Lehrer

Ausbildung

1977-1981	Grundschule Korbach
1981-1990	Besuch des Gymnasiums „Alte Landesschule“, Korbach
1990	Abitur am Gymnasium „Alte Landesschule“, Korbach
1990-1995	Informatikstudium an der Technischen Universität Clausthal
1995	Diplomarbeit mit dem Titel „Objektorientierte Modellierung der nichträumlichen Daten für das Baugeologisch-Geotechnische Informationssystem BAGIS“
1995	Abschluß als Diplominformatiker an der Technischen Universität Clausthal

Berufliche Laufbahn

- | | |
|-----------|--|
| 1995-1998 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Informatik der Technischen Universität Clausthal im interdisziplinären Projekt BAGIS (Entwicklung eines Baugeologisch-Geotechnischen Informationssystems als Planungs-, Überwachungs- und Steuerungselement für den bergmännischen Tunnelbau) der Institute für Geologie und Paläontologie, Informatik und Markscheidewesen der Technischen Universität Clausthal, gefördert von der Volkswagen-Stiftung |
| seit 1999 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg im interdisziplinären Projekt BAGIS _{VR} (Virtual Reality Modelle zur Simulation und Optimierung anthropogen beeinflusster Prozesse in Geosystemen am Beispiel von Abdichtungsinjektionen im Baugrund des Absperrbauwerkes Leibis/Lichte (Thüringen)) des Fachbereichs Informatik der Universität Hamburg und des Instituts für Geologie und Paläontologie der Technischen Universität Clausthal, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG |

Lehrtätigkeit

- Vorlesung *Einführung in Datenbanksysteme*
- Seminar *Geo-Informationssysteme*
- Projektseminar *Datenmanagement*
- Praktikum *Datenentwurf*

Veröffentlichungen

1. B. Kesper: *Das Geo-Datenmodell GeoCORE*; in C. Eckert, T. Polle, T. Stülten (Hrsg.): *Kurzfassungen 9. Workshop „Grundlagen von Datenbanken“*. Königslutter, Universität Dortmund, Fachbereich Informatik, Forschungsbericht Nr. 643, S. 51-55, 1997.
2. D.P.F. Möller, B. Kesper: *Virtual Reality: A Methodology for Modelling and Simulation of Combined Dynamical Systems*; in D. Al-Dabass, R. Cheng (ed.): *Proceedings 4th UKSIM*, Cambridge, 7.-9. April 1999, UKSS Publ., Nottingham, pp. 166-170, 1999.
3. B. Kesper, D.P.F. Möller, G. Reik, C. Zemke: *Realisierung und Einsatzmöglichkeiten des Geoinformationssystems BAGIS*; in W. Lempp, G.

- Reik (Hrsg.): Berichte von der 12. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie (Halle/Saale), Fachverlag Geowissenschaften, S. 129-138, 1999.
4. B. Kesper, D.P.F. Möller: *BAGIS – Präsentation des Baugeologisch-Geotechnischen Informationssystems*; in W. Lempp, G. Reik (Hrsg.): Berichte von der 12. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie (Halle/Saale), Fachverlag Geowissenschaften, S.406-408, 1999.
 5. D.P.F. Möller, B. Kesper: *Virtual Reality: Technology for Advanced Simulation in Geoscience*; in M. S. Obaidat, A. Nisanci, B. Sadoun (ed.): Proceed. 31st Summer Computer Simulation Conference, SCS Publication, San Diego, pp 645-649, 1999.
 6. D.P.F. Möller, B. Kesper, E. Godehardt: *VR-Simulation: Werkzeug der Computergestützten Rekonstruktionen*; in G. Hohmann (Hrsg.): Simulationstechnik, SCS Publ., Ghent, S. 253-258, 1999.
 7. E. Godehardt, D.P.F. Möller, B. Kesper: *Segmentierung und Flächenrückführung zur Darstellung des Herzens: Einsatz in der Herzchirurgie*; in G. Hohmann (Hrsg.): Simulationstechnik, SCS Publ., Ghent, S. 249-252, 1999.
 8. B. Kesper, D.P.F. Möller, G. Reik, C. Zemke: *Dynamische Virtual Reality Modelle im Talsperrenbau*; in G. Hohmann (Hrsg.): Simulationstechnik, SCS Publ., Ghent, S. 135-140, 1999.
 9. D.P.F. Möller, B. Kesper: *Deformable Models as Part of a Virtual Reality Framework for Advanced Image Analysis*; in G. Horton, D. Möller, U. Rüde (ed.): Proceed. ESS'99, SCS Publ. Ghent, pp. 334-340, 1999.
 10. E. Godehardt, D.P.F. Möller, B. Kesper, P. Feindt, J.-A. Koch: *Segmentation and Deformation for VR Visualization for Minimal Cardiosurgery*; in G. Horton, D. Möller, U. Rüde (ed.): Proceed. ESS'99, SCS Publ. Ghent, pp. 164-172, 1999.
 11. C. Zemke, G. Reik, B. Kesper, D.P.F. Möller: *Parameter Derivation for the Simulation of Hydrodynamic Processes in Joint Aquifer based on VR Methodology*; in G. Horton, D. Möller, U. Rüde (ed.): Proceed. ESS'99, SCS Publ. Ghent, pp. 341-344, 1999.
 12. B. Kesper, D.P.F. Möller: *Dynamical Virtual Reality Models for Geoscience Simulations*; in G. Horton, D. Möller, U. Rüde (ed.): Proceed. ESS'99, SCS Publ. Ghent, pp. 345-352, 1999.
 13. B. Kesper, D.P.F. Möller, E. Godehardt: *Reconstruction and Animation of the Neandertal*; in G. Horton, D. Möller, U. Rüde (ed.): Proceed. ESS'99, SCS Publ. Ghent, pp. 738-740, 1999.
 14. B. Kesper, D.P.F. Möller: *BAGIS – Baugeologisch-Geotechnisches Informationssystem: Informationstechnische Realisierung*; in G. Reik, W. Paehge: Raumbezogene Informationssysteme für geologische, bau- und

- geotechnische Aufgaben: Veranstaltung am 15. und 16.10.1997 an der TU Clausthal, Papierflieger, S 57-66, 1999.
15. E. Godehardt, P. Feindt, J.-A. Koch, D.P.F. Möller, B. Kesper: *Virtual reality visualisation: a new methodology for minimal invasive cardiac surgery*; in I. Troch, F. Breiteneker (eds): Proceed. 3rd Mathmod, ARGESIM Report, pp. 509-512, 2000.
 16. B. Kesper, D.P.F. Möller, G. Reik, C. Zemke: *Virtual reality models for advanced simulation in geoscience and geotechnology*; in I. Troch, F. Breiteneker (eds): Proceed. 3rd Mathmod, ARGESIM Report, pp. 513-516, 2000.
 17. C. Zemke, G. Reik, B. Kesper, D.P.F. Möller: *Virtual reality in modelling and simulation of hydrodynamic processes of dams*; in I. Troch, F. Breiteneker (eds): Proceed. 3rd Mathmod, ARGESIM Report, pp. 517-520, 2000.
 18. D.P.F. Möller, B. Kesper: *Morphing as part of a virtual reality framework for surface reconstruction*; in I. Troch, F. Breiteneker (eds): Proceed. 3rd Mathmod, ARGESIM Report, pp. 521-524, 2000.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, daß ich diese Dissertation selbst verfaßt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Hamburg, den 11. April 2000

Björn Kesper