X-Strahlen, Radiometer und Hauteinheitsdosis

Die Entwicklung der Messverfahren und Maßeinheiten für Röntgenstrahlung in der medizinischen Physik von den Anfängen bis zur internationalen Standardisierung

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften Fachbereich Physik der Universität Hamburg

 ${\bf vorgelegt} \ {\bf von} \ {\bf Simone} \ {\bf Gleßmer-Junike}$

Hamburg 2015

Tag der Disputation:

22. Januar 2015

Folgende Gutachter empfehlen die Annahme der Dissertation:

Prof. Dr. Gudrun Wolfschmidt

Prof. Dr.-Ing. Constantin Canavas

Prof. Dr. Florian Grüner

Mitglieder der Promotionskommission:

Prof. Dr. Peter Hauschildt (Vorsitzender)

Prof. Dr. Gudrun Wolfschmidt

Prof. Dr.-Ing. Constantin Canavas

Prof. Dr. Florian Grüner

Prof. Dr. Jan Louis

Dekan der MIN-Fakultät:

Prof. Dr. Heinrich Graener

Zusammenfassung

Bereits kurz nach der Entdeckung und Beschreibung der Röntgenstrahlen Ende des Jahres 1895 wurde ionisierende Strahlung in Medizin und Technik genutzt. Allerdings erforderte eine solche Nutzung auch die Entwicklung einer Messtechnik für die Strahlung. Für diese hat sich nach anfänglichen Benennungen der Geräte als "Radiometer" schließlich die allgemeinere Bezeichnung "Dosimetrie" eingebürgert. Die Entwicklung zahlreicher neu erfundener in der Strahlentherapie eingesetzter Dosimeter ging einher mit entsprechenden neuen Maßeinheiten für fast jedes neue Dosimeter bzw. Verfahren zur Darstellung der Strahlenwirkungen. Während dabei zunächst Umrechnungen zwischen älteren und neueren Maßeinheiten üblich waren, wurde später deutlich, dass sowohl innerhalb Deutschlands als auch innerhalb Europas sogar gleich benannte Einheiten unterschiedliche Verwendungen fanden, also inkompatibel waren. Erste ernsthafte Schritte zur deutschlandweiten Standardisierung wurden jedoch erst nach dem Ersten Weltkrieg getroffen, als man sich zunehmend auf die Nutzung der Eigenschaft von Röntgenstrahlung, Gase ionisieren zu können, konzentrierte. Erfolgreiche Bemühungen zu einer internationalen Standardisierung erfolgten erst Mitte der 1920er Jahre.

Durch umfangreiche systematische Recherchen in gedruckten Publikationen konnten im betrachteten Zeitraum vier Phasen der Entwicklung von Röntgenstrahlen-Messinstrumenten und -Einheiten in der Strahlentherapie herauskristallisiert werden: zunächst die Phase der diagnostischen Anwendung von Röntgenstrahlen, in der auch Instrumente zur Strahlungs-Qualitätsmessung entwickelt wurden; dann die nur wenig später beginnende Phase der therapeutischen Anwendung, in der Instrumente und Einheiten zur Messung von Strahlenmengen ("Dosis") ausgearbeitet wurden. Aufgrund der Vielzahl und Diversität von Instrumenten und Einheiten entstand eine dritte Phase der Standardisierung innerhalb Deutschlands, die teilweise eng mit der Entstehung neuer Instrumente verzahnt war. Mit Abschluss dieser Phase – dem Beschluss einer in Deutschland zu verwendenden Einheit zur Dosismessung – begann die Phase der internationalen Standardisierung. Diese dauert bis in die Gegenwart an, da inzwischen nicht nur internationale Einheiten, sondern auch Normen zur Messung dieser Einheiten sowie zur Qualitätssicherung entwickelt werden.

Rückschauend wird in einigen Abschnitten dieser Arbeit verdeutlicht, wie heutiges Wissen über die physikalischen Grundlagen sowie über mögliche Messfehler und Mängel der damaligen Methodik dazu beiträgt, den geschilderten geschichtlichen Entwicklungsprozess besser verstehen zu können. Bei der Anwendung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse in Medizin und Technik ist solches historisches Wissen wichtige Voraussetzung gerade für gelingende Kommunikation in einer globalisierten Welt, die ohne internationale Standards bei Fabrikation und Nutzung von Geräten nicht auskommt.

Abstract

X-rays, a special form of ionizing radiation, have been utilized in medicine and technology ever since their discovery at the end of 1895. However, the usage of X-rays made the development of measuring techniques necessary. Newly-developed measuring devices were at first called "radiometers", but later the term "dosimeter" has gained universal acceptance. The development of numerous dosimeters used in radiotherapy was accompanied by new units of measurement, each corresponding to its individual newly constructed dosimeter or method of measurement. While at first conversions between old and new units were performed, it later became clear that both within Germany and Europe units with similar names were used with different meanings, which was both incompatible and confusing. The first serious attempts of a standardization of units in Germany were made after the First World War, when the when the ionizing properties of X-rays was focused on for both measurements and unit definitions. Efforts towards an international standardization of units became successful in the mid-1920s when the Röntgen was defined as the universal unit.

From the development described above, four stages of the evolution of radiation measurement and units in radiotherapy could be identified by means of comprehensive systematic research in printed publications. The first stage was the period of diagnostic application of X-rays, when tools for the determination of X-ray quality were designed. This stage progressed into that of therapeutic administration of X-rays shortly after, when instruments and units for the measurement of X-ray quantities ("dose") were implemented. Due to the variety and diversity of measurement apparatus and units a third stage emerged, closely interconnected with the second. During the third stage, a nation-wide standardization was attempted in Germany. With the conclusion of this stage – the resolution of a unit for dose measurement in Germany – the stage of international standardization began. This fourth stage continues arguably to the present day, since by now not only units, but also standards for both measurement of these units and quality assurance, are developed in international cooperation.

This study presents how present-day knowledge of fundamental physical laws, of potential measurement errors and of shortcomings of methods contribute to a better

understanding of the historical process of the development portrayed here. When applying scientific discoveries to medicine and technology, this historical knowledge is an essential prerequisite for successful communication in a globalized world, which depends on international standards for manufacturing and application of measurement devices.

Inhaltsverzeichnis

1	Ein	leitung		11					
	1.1	Forsch	nungsstand	14					
	1.2	Quelle	en und Methodik	16					
	1.3	Eingre	enzung des Themas	17					
	1.4	Strukt	tur der Arbeit	18					
2	Historischer Hintergrund 2								
	2.1	Entdeckung der X-Strahlen: Wilhelm C. Röntgen							
	2.2	Entdeckung der Radioaktivität: Henri Becquerel							
	2.3	Weiter	re Charakteristika ionisierender Strahlung	23					
	2.4	Krebs	therapie um 1900	24					
	2.5	Einflu	ssreiche Personen	24					
		2.5.1	Wiener Röntgenlaboratorium: Freund, Holzknecht, Kienböck und						
			Schwarz	25					
		2.5.2	Hamburger Röntgenpionier: Bernhard Walter	28					
		2.5.3	Instrumente, Kritik, Theorie: Theophil Christen	29					
		2.5.4	Physikalisch-Technische Reichsanstalt: Hermann Behnken	30					
3	Ter	Terminologie 3							
	3.1	Qualit	tät und Quantität	32					
	3.2	Direkt	te und indirekte Messmethoden	33					
	3.3	Messg	röße Intensität	34					
	3.4	Messg	größe Dosis	35					
4	Qua	alitätsr	nessung von Röntgenstrahlen	37					
	4.1	"Anza	hl"-Härteskalen	40					
		4.1.1	Skiameter	40					
		4.1.2	Walter-Skala	41					
		4.1.3	Beez-Skala	42					
	4.2	Härtes	skalen aus zwei Materialien	43					

		4.2.1	Benoist-Skala						 	 44
		4.2.2	Benoist-Walter-Skala						 	 46
		4.2.3	Kryptoradiometer						 	 47
4.3		Elektri	ische Härteskalen					•	 	 49
		4.3.1	Parallele Funkenstrecke					•	 	 50
		4.3.2	Spannungs-Härte-Korrelation						 	 52
		4.3.3	Radiosklerometer nach Villard					•	 	 60
	4.4	Halbwe	ertschicht			٠			 	 62
		4.4.1	Absoluter Härtemesser nach Christen			٠			 	 64
	4.5	Verglei	ich der Härteskalen						 	 66
	4.6	Qualit	ätsindex						 	 70
5	Qua	ntitäts	smessung von Röntgenstrahlen							72
	5.1	Das Cl	hromoradiometer						 	 73
	5.2	Jodofo	orm-Lösung					•	 	 78
		5.2.1	Freundsches Radiometer			٠				 79
		5.2.2	Bordier und Galimard			٠				 80
	5.3	Bariun	nplatincyanür						 	 82
		5.3.1	Sabouraud-Noiré-Radiometer					•	 	 82
		5.3.2	Bordier-Radiometer					•	 	 89
		5.3.3	Fluoreszenz					•	 	 90
	5.4	Zinksil	likat						 	 91
	5.5	Silberb	promid: Kienböcks Quantimeter						 	 92
		5.5.1	Messung der Tiefendosis						 	 97
		5.5.2	Härtemessung mit dem Quantimeter						 	 98
	5.6			•	 	 99				
	5.7						 	 104		
	5.8	Widers	standsänderung von Selen						 	 108
	5.9	Milliar	mpèremeter			•			 	 114
	5.10	Bestim	nmung der Therapie-Dosen						 	 116
	5.11	Phanto	ome	٠		•	•		 	 118
6	Stra	hlungs	smessung durch Ionisation							123
	6.1	Erste a	auf Ionisation beruhende Messinstrumente							 125
	6.2	Villard	lsches Quantitometer						 	 127
	6.3	Iontoq	uantimeter (Szilard)						 	 128
	6.4	Integra	al-Iontometer					•	 	 131
	6.5	Iontog	uantimeter von Reiniger, Gebbert & Schall .						 	 132

	6.6	Mater	ial der Ionisationskammer	33							
	6.7	Größe	${\rm der\ Ionisationskammer} \ldots \ldots \ldots 13$	39							
	6.8	Druck	luft-Ionisationskammern	41							
	6.9	Hamm	her-Dosimeter	44							
	6.10	Eichst	andgerät (Küstner)	46							
	6.11	Proble	mbewusstsein für Fehlerquellen	51							
		6.11.1	Messfehler-Korrekturen	56							
7	Ent	wicklu	ng der Einheiten	63							
	7.1	Auf H	autreaktion geeichte Dosen	65							
		7.1.1	Einheiten der Dosimeter aus Bariumplatincyanür	65							
		7.1.2	Einheit des Kienböck-Quantimeters	66							
		7.1.3	Kalomel-Einheit	67							
	7.2	Einhei	ten ohne Hautreaktions-Bezug	67							
		7.2.1	Jodoform-Einheiten	67							
	7.3	Biolog	ische Dosisdefinitionen	69							
		7.3.1	Erythemdosis	69							
		7.3.2	Hauteinheitsdosis	70							
		7.3.3	Kritik der Hauteinheitsdosis	72							
	7.4	Ionisat	tions-Einheiten	73							
		7.4.1	Einheit e: Villardsche Formulierung	74							
		7.4.2	Einheit Megamegaion: Szilardsche Formulierung	74							
		7.4.3	Einheit E: Duanesche Formulierung	75							
		7.4.4	Einheit t: Friedrichsche Formulierung	76							
	7.5	Einhei	ten-Standardisierung in Deutschland	78							
	7.6	Konve	rsion Hauteinheitsdosis in Röntgen	81							
	7.7	Solomonsche R-Einheit									
	7.8	Intern	ationale Standardisierung	85							
8	Aus	blick	19	91							
	8.1	Braggs	s Beiträge zur Hohlraumtheorie	92							
	8.2	Beiträ	ge weiterer Wissenschaftler zur Hohlraumtheorie	94							
	8.3	Grays	Beiträge zur Hohlraumtheorie	95							
9	Abschließende Betrachtungen										
	9.1	Zusam	$oxed{umenfassung} \ldots \ldots$	99							
	9.2	Diskus	sion	06							
	0.3	Absch	11155	Ո7							

10	INHALTSVERZEICHNIS
Quellenverzeichnis	209
Literaturverzeichnis	228
Personenregister	237
Index	248
Abkürzungsverzeichnis	251

Kapitel 1

Einleitung

Wissenschaftliche Entdeckungen und ihre Nutzanwendungen vollziehen sich zunehmend im internationalen Austausch. Das war nicht immer der Fall. Vielmehr war die Suche nach neuen Erkenntnissen zu Beginn des 20. Jahrhunderts zugleich Wettbewerb verschiedener Nationen. Natürlich spielt in der Gegenwart ebenfalls nationales Prestige und Ähnliches eine bedeutende Rolle. Jedoch ist von wachsender Bedeutung, ob und wie Ergebnisse über nationale Grenzen hinweg für Standards – z.B. hinsichtlich der Sicherheit – nutzbar gemacht werden können. Ein gewisser Grad einer ersten internationalen Verständigung über Standardisierung wurde zwar Mitte der 1920er Jahre erreicht, so dass dieser Zeitpunkt auch als Ende der vorliegenden Untersuchung angemessen ist. Jedoch ist es wichtig, die über die nominelle Standardisierung hinaus verbliebenen Spannungen in Terminologie und Messmethodik, die sich aus ihren jeweiligen Vorgeschichten ergeben, zu verstehen. Dazu will diese wissenschaftsgeschichtliche Arbeit beitragen.

Für die Frage nach der Messung von Strahlungs-"Mengen", die im Fokus dieser Arbeit stehen soll, ist deren mehr als ein Jahrhundert zurückliegender Anfang für ein Verständnis der Entwicklungslinien von großem Interesse: Die aktuelle, internationale Definition für Einheiten ionisierender Strahlung nach dem Système international d'unités(SI) stammt aus dem Jahr 1985, sie hat sich jedoch auch nach über 25 Jahren nicht vollständig durchgesetzt. Insbesondere in angelsächsischen Ländern werden auch heute noch selten die "neuen" Einheiten in ihrer Reinform verwendet. Die Umstellung scheint unter anderem deshalb so schwer zu fallen, weil die alten Einheiten – mit gewissen Modifikationen – etwa 50 Jahre lang gültig waren, also fast die Hälfte der Zeit, in der ionisierende Strahlung in Medizin und Technik angewendet wurden.

Auch die Bedingungen, unter denen Messungen vorgenommen werden, haben sich stark verändert und sind noch immer einem Wandel unterworfen. So steht aktuell die Wahl der Referenzfeldgröße bei geringem Durchmesser des Strahlprofils ("für kleine

Felder") zur Debatte. Auch der Wandel der Referenzmessbedingungen einzelner Messinstrumente soll daher beleuchtet werden. Die prägende Vorgeschichte der beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der verschiedenen Disziplinen und nationalen Traditionslinien stellt ebenfalls eine einflussreiche Komponente im Entwicklungsprozess auch der Geschichte der Naturwissenschaften dar.

Die Wurzeln der veralteten Einheiten reichen weiter zurück als bis zur Gründung der International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU, gegründet 1925 als International X-Ray Unit Committee). Insofern gilt es, einen umfangreichen zeitlichen Hintergrund der Forschungskommunikation zu erhellen, um das gewachsene Verständigungsproblem besser bearbeitbar zu machen.

Bereits sehr schnell nach der Entdeckung und Beschreibung der Röntgenstrahlen Ende des Jahres 1895 – und der Radioaktivität wenig später – wurde ionisierende Strahlung in Medizin und Technik genutzt. Dosierung und Entwicklung der ersten in der Therapie eingesetzten Dosimeter sowie Messung der Strahlung wurden anfangs weniger von Physikern als von Medizinern durchgeführt, was dazu führte, dass die frühen Dosimeter sich häufig weniger durch Exaktheit der Messmethodik als durch praktische und einfache Handhabung im medizinischen Betrieb auszeichnen.

Die Entwicklung zahlreicher Dosimeter ging einher mit neuen Maßeinheiten für fast jedes neu konstruierte Dosimeter bzw. neu erfundene Messverfahren. Während zunächst Umrechnungen zwischen den Einheiten vorgenommen wurden, wurde später deutlich, dass sowohl innerhalb Deutschlands als auch innerhalb Europas gleich benannte Einheiten unterschiedliche Verwendungen fanden, also inkompatibel waren. Erste ernsthafte Schritte zur deutschlandweiten Standardisierung wurden jedoch erst nach dem Ersten Weltkrieg getroffen, als man sich zunehmend auf die Nutzung der Eigenschaft von Röntgenstrahlung, Gase ionisieren zu können, konzentrierte. Erfolgreiche Bemühungen zu einer internationalen Standardisierung erfolgten erst Mitte der 1920er Jahre.

Die Motivation zu dieser Arbeit entstand aus dem Kennenlernen aktueller Messtechnik in der Medizinphysik im strahlentherapeutischen Bereich sowie der daraus resultierenden Frage "Wie funktionierte Medizinphysik früher?", die sich in erster Linie auf die Messinstrumente, aber damit auch die mit ihnen verbundenen physikalischen Einheiten und Dosisberechnungsmethoden bezieht. Hieraus entwickelte sich die zentrale Fragestellung der vorliegenden Arbeit:

Wie ist es von einer Vielfalt an Geräten und Verfahren zur Messung von X-Strahlen Ende des 19. / zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu ersten Standardisierungen in den 1920er Jahren gekommen?

Die Frage nach der frühen Nutzung von Röntgen-Strahlung ist für die Entwicklung

der Lebenswissenschaften von außerordentlicher Bedeutung: Denn an diesem Beispiel der praktischen Anwendung neuer, naturwissenschaftlicher Erkenntnisse wird deutlich, wie aus einer Vielfalt und in Einzelverantwortung betriebener klinischer Praxis ein in "Risiken und Nebenwirkungen" gesamtgesellschaftlich verantwortetes Verfahren wurde. Insofern hat die scheinbar "nur" auf geschichtliche Rekonstruktion gerichtete Frage nicht nur eine historisch äußerst detaillierte und nachvollziehbare Antwort gefunden, sondern sie ist auch für analoge Fragen im Umgang mit "Strahlungs-Techniken" gesellschaftlich höchst relevant.

Als ein erster Schwerpunkt dieser Arbeit soll daher die Entwicklung der Dosimeter in den ersten drei Jahrzehnten von den ersten, auf chemischen Reaktionen beruhenden Dosimetern hin zu den Urformen der noch heute verwendeten Ionisationskammern beleuchtet werden. Weitere Schwerpunkte bilden die Entwicklung der Maßeinheiten für ionisierende Strahlung sowie ihre Standardisierung in Deutschland. Die Entwicklung der Hohlraumtheorie, einer Theorie zur Berechnung der absorbierten Dosis eines in ein bestrahltes Medium eingebrachten Hohlraums, begann um 1910. Die Anfänge dieser Entwicklung bis in die 1930er Jahre werden im Rahmen eines Ausblicks behandelt.

Diese Themenschwerpunkte erfordern eine eingehende Recherche der medizinphysikalischen – sowohl medizinischen als auch physikalischen – Fachliteratur, um die Voraussetzungen der Messvorgänge und Maßeinheiten nachvollziehbar zu machen. Die Recherche findet unter Berücksichtigung einiger einschränkender Kriterien wie zeitlicher und räumlicher Selbstbeschränkung statt, die unten noch genauer geschildert werden sollen.

Ziel der Arbeit ist eine grundlegende Darstellung der ersten Jahrzehnte der Dosimetriegeschichte, mit Hilfe derer ein tieferes Verständnis für den Ist-Zustand in der Dosimetrie und deren Weiterentwicklung im Kontext internationaler Kommunikation und Standardisierung erreicht werden soll. Erst ein solcher Beitrag zur wissenschaftsgeschichtlichen Forschung schafft die Voraussetzung, um künftig angemessen den Weg weiterer Standardisierung beschreiten zu können. Denn es zeigte sich, dass hierfür Kategorisierungen sowohl der verschiendenen Messinstrumente als auch der Maßeinheiten in ihre Funktionsweisen notwendig sind. Es gilt, das Verständnis der Kategorien vorzubereiten sowie die vier Phasen, in denen die Entwicklung der Röntgenstrahlen-Messinstrumente stattgefunden hat, darzustellen: zunächst die diagnostische Anwendung, übergehend in die therapeutische Anwendung, die Standardisierung von Messinstrumenten und -einheiten in Deutschland sowie abschließend die internationale Standardisierung.

1.1 Forschungsstand

Die bisher vorhandene Literatur zeigt zwar bereits eine Auseinandersetzung mit vorhandenen Messmitteln, es wurden jedoch meist andere Schwerpunkte gesetzt. Zudem erschienen viele zusammenfassende Artikel zur Entwicklung der Strahlentherapie und ihrer Technik zu verschiedenen Jubiläen: 100 Jahre Entdeckung der Röntgenstrahlen, 100 Jahre Zeitschrift Strahlentherapie usw. Eine wissenschaftshistorische Aufarbeitung fehlt bislang. Diese Lücke soll diese Arbeit schließen helfen.

Die vorhandene Literatur lässt sich in mehrere Kategorien gruppieren: die Entwicklungen von Röntgendiagnostik, Strahlentherapie (häufig auf eine bestimmte Region bezogen), Strahlenschutz, Entwicklung der Bestrahlungsinstrumente sowie Rückblicke zur Instrumentenentwicklung. Zusätzlich gibt es Beiträge zur Entwicklung von Bestrahlungsmethoden und -geräten (s. Kneschaurek und Nüsslin [2012]) sowie von Röntgenröhren (Wolfschmidt [1995] und Mould [1995b]).

Ihren Forschungsschwerpunkt auf Röntgendiagnostik legten Mould¹ und Kütterer²; sie gingen jeweils nur in einem Kapitel auf qualitative und quantitative Messmethoden ein. Eine weitere Schwierigkeit an Kütterers Buch ist zudem, dass es für wörtliche Zitate keine Seitenangaben im Quellenverzeichnis wiedergibt, was die wissenschaftshistorische Auswertung stark erschwert.

Die Entwicklung der Strahlentherapie in einzelnen Ländern wird in verschiedenen Artikeln thematisiert (Frankreich: z.B. Tubiana et al. [1996], Camilleri und Coursaget [2005]; Österreich: z.B. Kogelnik [1996], Sedlmayer [2012]; Deutschland: z.B. Heilmann [1996], Willers et al. [1998], Heilmann [2012]). Diese Artikel sind stärker medizinisch ausgerichtet – ihre Autoren sind bzw. waren Strahlentherapeuten. Besonders regionalspezifisch ist das Buch "Die Röntgenpioniere Hamburgs: vom Selbstversuch zur medizinischen Fachdisziplin"³. Hierbei handelt es sich um eine detailreich recherchierte zahnmedizinische Dissertation, weshalb die physikalisch-technische Aussagekraft an einigen Stellen begrenzt ist. Dennoch bietet das Buch interessante Einblicke in die Tätigkeiten verschiedener Hamburger Wissenschaftler. Ebenfalls eine überwiegend medizinische Ausrichtung hat das dreibändige Werk "Chronik der Strahlentherapie: 1900-1960" von Eberhard Scherer⁴ (1918 – 2007); bei diesen Büchern kommt erschwerend hinzu, dass sie sich zu großen Teilen auf einzelne Lehrbücher sowie auf Artikel beziehen, die fast ausschließlich in der Zeitschrift Strahlentherapie erschienen sind.

Einen deutlich physikalischen Hintergrund hingegen haben die Beiträge von Daniel

¹Mould [1995a]

 $^{^2}$ Kütterer [2005]

³Frühling und Vogel [1995]

⁴Scherer [1992], Scherer [1994a], Scherer [1994b]

Paul Serwer⁵ (*1945) und Lauriston Taylor⁶ (1902 – 2004), beide Autoren beziehen sich jedoch primär auf die Entwicklung des Strahlenschutzes. Obwohl Serwers Buch insgesamt wohl die meisten Informationen und Quellenangaben zu Messmitteln und Einheiten enthält, so ist es doch insgesamt für einen Überblick über Messtechnik nicht optimal gestaltet.

Weiterhin gibt es einige Rückblicke auf die Entwicklung der Dosimetrie von Physikern, die an der Instrumenten- und / oder Einheitenentwicklung oder -standardisierung aktiv beteiligt waren (Glasser [1941], Glasser [1995] (Neuauflage eines Buches von 1931), Quimby [1945], Lindell [2003], Lindell [2004], Lindell [2006], letztendlich auch Taylor [1979], Taylor [1981], Pychlau [1983]) Diese Beiträge umfassen jeweils recht große Zeiträume (Glasser und Edith Quimby (1891 – 1982) je über 40 Jahre, Taylor und Peter Pychlau je über 80 Jahre) und können daher kaum detailliert auf einzelne Instrumente eingehen. An einigen Stellen bleibt auch fraglich, ob die Autoren nachträglich eine Literaturrecherche durchgeführt oder ihre persönlichen Erinnerungen niedergeschrieben haben. Insbesondere Bo Lindell (*1922) berichtet häufig anekdotisch, und misst den schwedischen Beiträgen tendenziell extrem großen Einfluss zu. Dies lässt sich z.B. dadurch illustrieren, dass der dritte Band⁷, der sich v.a. mit Rolf Sievert (1896 – 1966) beschäftigt, den Titel "Die Heldentaten des Herkules" trägt.

Den besten Überblick über die Entwicklung der Dosimetrie von den Anfängen bis ins 21. Jahrhundert gibt Paul Frame⁸. Dieser Autor scheint – anders als die meisten anderen genannten Autoren – noch im Rahmen einer Sammlung historischer Messinstrumente im Bereich der Dosimetriegeschichte (s. Frame [2012]) an den Oak Ridge Associated Universities aktiv zu sein. Der große betrachtete Zeitraum von über 100 Jahren und die Tatsache, dass auch sehr viele moderne Messmethoden – auch für Messungen im nicht-medizinischen Kontext – eingeschlossen werden, macht Frames Betrachtungen jedoch meist weniger detailliert. Darüber hinaus ist die Herangehensweise des Autors eher physikalisch und nicht physik- oder technikhistorisch orientiert, was sich insbesondere in der Zitierweise niederschlägt, die ohne exakte Seitenbezüge nicht auf Nachvollziehbarkeit ausgerichtet ist [wie es zwar in historischen Arbeiten üblich und notwendig ist, jedoch leider in manchen naturwissenschaftlichen Arbeiten nicht als Standard betrachtet wurde und wird].

Als einer der wenigen Autoren beschäftigt sich Alan Jennings⁹ mit der Entwicklung von Einheiten in der Dosimetrie. Ebenso wie Frame betrachtet er den kompletten

⁵Serwer [1976]

⁶Taylor [1979], Taylor [1981]

⁷Lindell [2003]

⁸Frame [2004]

⁹Jennings [2007]

Entwicklungszeitraum bis in die Gegenwart, sodass auch hier die einzelnen Entwicklungsstufen sehr knapp – teils nur mit Namen der Einheit und Autor – beschrieben werden.

Insgesamt kann man so zwar mit der Lektüre einer Vielzahl von Quellen einen Überblick über die Messmethoden der frühen medizinischen Physik erhalten, dies ist jedoch mit großem Aufwand und eigenständiger Erarbeitung des jeweiligen Kontextes verbunden. Die vorliegende Arbeit soll daher die bislang vorhandene Lücke schließen und die verschiedenen Messinstrumente sowie die Maßeinheiten in Funktionsweisen systematisch gegliedert und detailliert beschreiben (sowie in den Indices auch für schnelle Recherche das Material erschließen).

1.2 Quellen und Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit wurden vor allem schriftliche und zu geringen Teilen bildliche Quellen ausgewertet. Die schriftlichen Quellen sind vorwiegend Originalquellen und stammen zu großen Teilen aus den Zeitschriften Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen (auch RöFo genannt) und Strahlentherapie. Diese beiden Zeitschriften wurden bis in die 1920er Jahre über die Professionsgrenzen hinweg von Ärzten, Physikern und Techniker gelesen und für Publikationen genutzt. RöFo war das offizielle Publikationsorgan der Deutschen Röntgengesellschaft, bildete also in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts alle neu entstehenden Fachrichtungen – Röntgendiagnostik, Strahlentherapie und Röntgenmesstechnik – ab. Auch die Strahlentherapie widmete sich sowohl Medizin als auch Technik.

Beide Zeitschriften wurden für die Datenerfassung der vorliegenden Arbeit jeweils von den ersten Jahrgängen – 1897 respektive 1912 – bis 1925 systematisch auf Artikel über Messinstrumente durchgesehen, da die meisten in der "Röntgenologie" verwendeten Instrumente hier präsentiert wurden. Dies liegt daran, dass insbesondere in den ersten Jahren wenige Physiker – die potentiell in anderen Zeitschriften veröffentlicht hätten – mit Messungen therapeutischer Strahlenanwendungen beschäftigt waren. Die Instrumente hingegen, die von "reinen" Physikern – v.a. in Verbindung mit Radioaktivitätsmessungen – entwickelt wurden, fanden in der Strahlentherapie wenig bis keine Anwendung, da viele Ärzte, die sie hätten bedienen müssen, die Verwendung zu kompliziert fanden. Eine Einschränkung auf RöFo und Strahlentherapie als Hauptsuchstrang ist plausibel, da diese beiden Zeitschriften – anders als in Buchform veröffentlichte Monographien – über "Schul-" und sonstige Meinungsgrenzen hinweg genutzt wurden.

Ausgehend von den in RöFo und Strahlentherapie gefundenen Artikeln sowie Quellenangaben aus der oben genannten Sekundärliteratur wurden weitere Originalquellen, in diesem Falle auch englische, amerikanische und französische, untersucht. Weiterhin wurden auch die elektronischen Patentdatenbanken des Deutschen Patent- und Markenamtes¹⁰ sowie die des Europäischen Patentamtes¹¹ konsultiert. In letzterer Datenbank fanden sich jedoch verhältnismäßig wenige Suchtreffer – ab ca. 1930 finden sich wesentlich mehr Patente in diesen Datenbanken. Bei der Espacenet-Datenbank kommt erschwerend hinzu, dass englische Suchbegriffe gefordert werden, die jedoch in deutschsprachigen Patentanmeldungen aus dem frühen 20. Jahrhundert nicht gefunden werden (können).

1.3 Eingrenzung des Themas

Die Eingrenzung des Themas der vorliegenden Arbeit ist durch mehrere Faktoren bedingt: Anwendungsgebiet, Raum, Zeit sowie die Zugänglichkeit von Quellen.

Das Anwendungsgebiet, auf dem der Fokus dieser Arbeit liegt, ist die Dosimetrie in der Strahlentherapie mit Röntgenstrahlen. Medizinisch-dosimetrische Messungen von Gammastrahlen werden nur am Rande betrachtet. Dies liegt teils an der räumlichen Einschränkung, am wichtigsten ist jedoch die Tatsache, dass die Strahlenbehandlung mit Röntgenstrahlen im deutschsprachigen Raum wesentlich verbreiteter war als die mit Gammastrahlung. Die Entwicklungen von Röntgen- und Gammastrahlendosimetrie sind als praktisch unabhängig voneinander zu betrachten und wurden erst 1937 mit Einführung einer gemeinsamen Einheit zusammengeführt. Aus diesem Grund wird die Gammastrahlendosimetrie größtenteils außer Acht gelassen.

Die räumliche Eingrenzung der Recherche vor allem auf Deutschland, teils auch den weiteren deutschsprachigen Raum ist größtenteils begründet durch die Zugänglichkeit von Quellen. Dass in Deutschland wenig fremdsprachige medizinphysikalische Literatur vorhanden ist, ist bedingt durch die teilweise Isolation Deutschlands nach dem Deutsch-Französischen Krieg und dem Ersten Weltkrieg. Das Nicht- oder Wenig-Vorhandensein französischer Quellen wirkte sich dahingehend aus, dass die Dosimetrie von Röntgenstrahlung (vor allem in Deutschland vorangetrieben) und Gammastrahlung (besonders in Frankreich / Institut Curie) sich weitgehend getrennt voneinander entwickelten.

Trotz der ursprünglichen räumlichen Eingrenzung bei der Quellensuche wurden in dieser Arbeit in vielen Fällen auch englisch- und französischsprachige Quellen mit einbezogen. Dies war insbesondere dann erforderlich, wenn entweder die Grundlagen einer Messmethode in fremdsprachigen Quellen gelegt wurde und sich die deutschsprachi-

¹⁰DEPATISnet [2014]

¹¹Espacenet [2014]

ge Literatur hierauf bezog (Beispiel: Wirkung von Röntgenstrahlen auf Bariumplatincyanür), oder aber wenn ein Messinstrument, das großen Einfluss auf die weitere Entwicklung hatte, im Ausland entwickelt wurde (Beispiel: Villards Quantitometer).

Der zeitliche Rahmen, innerhalb dessen die Entwicklung der Dosimetrie betrachtet werden soll, reicht von Röntgens Entdeckung der X-Strahlen im Jahr 1895 bis zur standardisierden Benennung der Einheit der Röntgenstrahlung nach dem Entdecker 1924. Bis zu diesem Zeitpunkt war eine (nominelle) deutsche Standardisierung der Maßeinheiten – und teils auch der Messinstrumente – geschaffen. Im folgenden Jahr wurden zusätzlich im Rahmen des ersten internationalen Radiologiekongresses in London die Grundlagen einer internationalen Standardisierung gelegt. Für eine Recherche über die internationale Standardisierung der Einheiten über 1925 hinaus würde ein Zugang zu diversen ausländischen Bibliotheken sowie die Archive der International Commission on Radiation Units and Measurements(ICRU) benötigt. In Übereinstimmung mit der gegebenen Themenstellung und Abgrenzung bleibt der Prozess der internationalen Konsensfindung jedoch bewusst ausgeklammert, so interessant auch hier die Aufhellung dieser Dimension der wissenschaftsgeschichtlichen Hintergründe ist.

1.4 Struktur der Arbeit

Um die historische Ausgangslage darzustellen, werden zunächst die "Entdeckungen", d.h. die ersten Beschreibungen von Röntgenstrahlen und Radioaktivität sowie einige bald nach den Entdeckungen gefundene der zahlreichen Eigenschaften dieser Strahlenarten vorgestellt.

Anschließend wird die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Nomenklatur erläutert, da die im betrachteten Zeitraum verwendeten Begriffe heute anders verwendet bzw. interpretiert werden.

Die hierauf folgenden Kapitel – der Hauptteil der Arbeit – ist in mehrere große Blocks geteilt: die Entwicklung der Instrumente zur Bestimmung der Röntgenstrahlungsqualität, darauffolgend die der Instrumente zur Bestimmung der Röntgenstrahlungsquantität. Bei der letzteren bildet die Nutzung der Gasionisation das Unterscheidungsmerkmal: unabhängig funktionierende Instrumente sowie Instrumente, die das Prinzip der Ionisation ausnutzen.

Nach der Darstellung der Instrumenten-Entwicklung wird auf die Entwicklung von Strahlungsquantität-Maßeinheiten eingegangen. Auch diese ist zweigeteilt: während die ersten Einheiten sich jeweils auf eine bestimmte Hautreaktion bezogen, basierten spätere Einheiten wie die Messinstrumente auf Ionisation. In der drei Jahrzehnte währenden Anfangsphase im Umgang mit X-Strahlen sowie durch empirische Erkenntnisse über

die Hautwirkung und Festlegung einer "Hauteinheitsdosis" und parallel dazu durch die Entstehung der Gerätekategorie "Radiometer" und zugehörigen Maßeinheiten wuchsen erst langsam die Bedürfnisse nach einheitlichen Kommunikationsgrundlagen. Die schwierige Konversion des erst- in den letztgenannten Einheitentyp und vor allem Verwechslungsmöglichkeiten mit gleichnamigen ausländischen Einheiten waren Gründe für den Beginn einer internationalen Einheiten-Standardisierung. Deren Anfänge sollen abschließend behandelt werden. In einem Ausblick werden schließlich die ersten Schritte der Hohlraumtheorie dargestellt, die in der Gegenwart zur Dosisberechnung in Medien verwendet wird.

Kapitel 2

Historischer Hintergrund

Die Fähigkeit von elektrischem Strom, u.a. die Bestandteile von Flüssigkeiten zu ionisieren, war lange vor den Strahlungsexperimenten, die in den 1890er Jahren stattfanden, bekannt. Das Wort "Ion" (griechisch $o\nu$, gehend) wurde 1834 von Michael Faraday¹ (1791 – 1876) geprägt. Faraday beschäftigte sich zu diesem Zeitpunkt mit Elektrolyse und führte zur Beschreibung der von ihm verwendeten Aufbauten und beobachteten Effekte ebenfalls u.a. die Worte "Kathode" und "Anode" sowie "Kation" und "Anion" ein². Die Anwendung dieser Ausdrücke verbreitete sich auch außerhalb der Elektrolyse, so z.B. bei der Strahlenerzeugung mittels "Kathodenstrahlröhren".

Schon vor der Entdeckung der Röntgenstrahlen hatte der Erforschung der Eigenschaften verschiedener bekannter Strahlenarten ein besonderes Interesse gegolten. Nachdem im Rahmen von Experimenten mit Kathodenstrahlröhren die Existenz von Röntgenstrahlen wahrgenommen worden war, wurden auch deren Eigenschaften genauer betrachtet. Diese waren insbesondere deswegen von Interesse, da durch die besonderen Eigenschaften verschiedene Nachweis- und Messmöglichkeiten für ionisierende Strahlung entwickelt werden konnten. Die Entdeckung von "Röntgen-" und "Becquerel-Strahlen" soll an dieser Stelle zusammengefasst werden. Zusätzlich soll kurz auf einige ausgewählte Eigenschaften ionisierender Strahlung eingegangen werden, die für die Entwicklung der frühen Strahlungsmessinstrumente, die im medizinischen Bereich eingesetzt wurden, eine wesentliche Rolle spielten. Ergänzend wird ein kurzer Einblick in den Stand der Krebstherapie gegen Ende des 19. Jahrhunderts gegeben.

¹Faraday [1834], S. 79

²Faraday [1834], S. 78-79

2.1 Entdeckung der X-Strahlen: Wilhelm C. Röntgen

Nach den Darstellungen mehrerer Zeitgenossen Röntgens wurden die Röntgenstrahlen am Abend des achten November³ 1895 von Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923) entdeckt. Das amerikanische McClure's Magazine zitierte den die Entdeckung beschreibenden Röntgen folgendermaßen:

"I was working with a Crookes tube covered by a shield of black cardboard. A piece of barium platino-cyanide paper lay on the bench there. I had been passing a current through the tube, and I noticed a peculiar black line across the paper."⁴

Ob das hier angegebene Datum stimmt oder nicht, soll an dieser Stelle nicht diskutiert werden. Es ist jedoch sicher, dass der erzeugte Effekt reproduzierbar war: die Fluoreszenz von Bariumplatincyanür. In den auf die Entdeckung folgenden Wochen führte Röntgen systematische Versuche durch, und kurz vor Ende des Jahres 1895 präsentierte er der wissenschaftlichen Welt seine Ergebnisse durch die Würzburger Physikalisch-Medizinische Gesellschaft. Ein Farbeffekt spielte hierbei eine wichtige Rolle: "[man sieht einen] mit Bariumplatincyanür angestrichenen Papierschirm bei jeder Entladung hell aufleuchten, fluoresciren"⁵. Henry Jackson Wells Dam (1856 – 1906), der interviewende Journalist des McClure's Magazine, beschrieb den Effekt sehr plastisch:

"The moment the current passed, the paper began to glow. A yellowish-green light spread all over its surface in clouds, waves, and flashes. The yellow-green luminescence, all the stranger and stronger in the darkness, trembled, wavered, and floated over the paper, in rhythm with the snapping of the discharge."

Röntgen selber nannte die von ihm entdeckten Strahlen so, wie sie in anglophonen Ländern heute noch genannt werden: "X-Strahlen". Dieser Name lässt sich darauf zurückführen, dass Strahlung zunächst neu, also "unbekannt" war, und er den naheliegenden Variablennamen X verwendete. Röntgen schlug nicht vor, die Strahlen nach sich selber zu benennen, wie viele andere Wissenschaftler – gerade in deutschsprachigen Ländern – zu seiner Zeit es taten und zum Teil noch tun. Die Benennung "Röntgenstrahlen" geht auf Albert von Kölliker (1817 – 1905) zurück, der im Anschluss an Röntgens Vortrag vor der *Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft* im Januar 1896 vorschlug, die X-Strahlen nach ihrem Entdecker zu benennen⁷.

³Dam [1896], S. 413, und Glasser [1995], S. 3

⁴Dam [1896], S. 413

⁵Röntgen [1895], S. 1

⁶Dam [1896] S. 412

⁷Haenisch [1923], S. 3; Glasser [1995], S. 39-40

2.2 Entdeckung der Radioaktivität: Henri Becquerel

Die erste Beschreibung von Radioaktivität durch Henri Becquerel (1852 – 1908) fand am vierundzwanzigsten Februar 1896⁸ im Rahmen einer Sitzung der *Académie des Sciences* in Paris statt. Ebenso wie die erste Beschreibung von Röntgenstrahlen war es die Beschreibung eines Farbwechsels.

Becquerel experimentierte mit phosphoreszierenden Substanzen, verwendete jedoch nicht Bariumplatincyanür, sondern fotografische Platten für seine Versuche. Die Fotoplatten bestanden aus einer in Gelatine eingebetteten Silberbromidschicht auf einem stabilen Trägermaterial. Becquerels Experimente zielten auf eine mögliche Korrelation von Sonnenlicht und Phosphoreszenz ab, weshalb er phosphoreszierende Substanzen auf Fotoplatten deponierte, die in schwarzem Papier verpackt waren:

"On enveloppe une plaque photographique Lumière, au gélatino-bromure, avec deux feuilles de papier noir très épais […] On pose sur la feuille de papier, à l'exterieur, une plaque de la substance phosphorescente, et on l'expose le tout au Soleil, pendant plusieurs heures. Lorsqu'on développe ensuite la plaque photographique, on reconnaît que la silhouette de la substance phosphorescente apparaît en noir sur le cliché."

Eine der für die Experimente verwendeten Substanzen war "le sulfate double d'uranium"¹⁰. Versuche mit diesem Salz führte Becquerel während eines mehrere Wochen langen Zeitraumes durch und präsentierte seine Ergebnisse bei der nächsten Sitzung der Académie des Sciences, welche am zweiten März stattfand. Becquerel berichtete, er habe – entgegen seiner Erwartung – an einem bedeckten Tag nach der Entwicklung der Fotoplatten auf diesen deutliche Silhouetten der Präparate gefunden¹¹. Dieses Resultat überraschte ihn zunächst, da die daraus gezogene Schlussfolgerung das Gegenteil seiner vorherigen Annahme darstellte: "Il importe d'observer que ce phénomène ne parait pas devoir être attribué à des radiations lumineuses émises par phosphorescence"¹².

Becquerel bemerkte rasch Parallelen zwischen seiner Entdeckung und anderen Strahlenarten, die ebenfalls Fotoplatten belichteten:

"Une hypothèse qui se présente assez naturellement à l'esprit serait de supposer que ces radiations, dont les effets ont une grande analogie avec les effets

⁸Becquerel [1896a]

⁹Becquerel [1896a], S. 421

¹⁰Becquerel [1896a], S. 421

¹¹Becquerel [1896b], S. 502

¹²Becquerel [1896b], S. 503

produits par les radiations étudiées par MM. Lenard et Röntgen, seraient des radiations invisibles émises par phosphorescence"¹³.

Moderne Messmittel sind ebenfalls auf die gleichen Eigenschaften von Röntgenstrahlen und "Becquerel-" bzw. γ -Strahlen ausgelegt: die Ausrüstung kann – je nach Energiebereich – in vielen Fällen für beide Strahlungsarten verwendet werden.

2.3 Weitere Charakteristika ionisierender Strahlung

Typische Eigenschaften ionisierender Strahlung in Hinblick auf ihren Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften ihrer Umgebung waren bald nach der Entdeckung von Röntgenstrahlen und Radioaktivität Gegenstand vieler Untersuchungen. Obwohl Röntgen wohl schon vor seiner ersten "X-Strahlen"-Veröffentlichung aus dem Dezember 1895 beobachtet hatte, dass Röntgenstrahlen geladene Körper oder Gas entladen können, berichtete er dieses Ergebnis nicht, bevor er seine Resultate verifizieren konnte.

Am dritten Februar 1896 waren die Eigenschaften von Röntgenstrahlen eines der Themen der Académie des Sciences in Paris. Louis Benoist (*1856) und Dragomir Hurmuzescu (1865 – 1954) berichteten, dass Röntgenstrahlen ein Elektroskop "sofort und direkt" entluden. Die entgegengerichtete Reaktion, die Aufladung eines ursprünglich ungeladenen Leiters mittels Strahlung, war ebenfalls möglich. Jean-Baptiste Perrin (1870 – 1942), der Experimente mit planparallelen Kondensatoren durchführte, erklärte dies folgendermaßen: "les rayons X dissocient certaines molécules du diélectrique où ils pénètrent, libérant ainsi des ions positifs et des ions négatifs" Die Anzahlen negativ und positiv geladener Ionen wurden als gleich angenommen de Änderungen der Ladung wurden mit Hilfe von Elektrometern gemessen.

In Röntgens zweiter Strahlen-Veröffentlichung (9. März 1896) berichtete er, dass die Entladungsgeschwindigkeit mit der Intensität der Strahlen stieg¹⁷. Hierbei wurde die Intensität der Strahlen mit fotografischen Platten oder Fluoreszenzschirmen bestimmt.

Perrin fand Abhängigkeiten der Röntgenstrahlen-Quantität sowohl von der "quantité d'électricité dissociée [...] par unité de longueur" als auch von Druck und Temperatur des umgebenden Gases¹⁸.

¹³Becquerel [1896b], S. 503

¹⁴Benoist und Hurmuzescu [1896], S. 235

¹⁵Perrin [1896a], S. 352

¹⁶Perrin [1896b], S. 878

¹⁷Röntgen [1896], S. 4

¹⁸Perrin [1896a], S. 353

2.4 Krebstherapie um 1900

Bis weit ins 20. Jahrhundert hinein war eins der größten Probleme einer potentiellen Krebstherapie, dass die Krankheit erst in einem fortgeschrittenen Stadium diagnostiziert werden konnte. Dieses lag insbesondere daran, dass zunächst keine bildgebenden Verfahren vorhanden waren bzw. sie Jahrzehnte lang keine ausreichende Auflösung besaßen. Aus diesem Grund war die Erkennung kleiner (also maximal wenige Millimeter großer) Tumore nicht möglich gewesen. Damit war man vor allem auf Tastbefunde angewiesen, konnte so aber auch erst Tumore einer gewissen Größe finden. Die Tumorgröße besaß meist eine Korrelation mit dem Fortschritt der Erkrankung, sodass eine Therapie – unabhängig von der Art der Therapie – geringe Aussichten auf Erfolg bot. Krebs war damit eine quasi nicht heilbare Krankheit.

Obwohl die Krankheit Krebs seit dem Altertum bekannt ist, gab es lange Zeit kaum ernsthafte Therapiemöglichkeiten. Außer verschiedensten Hausmitteln waren auch Aderlass, Schröpfen sowie "Entschlackung" 19 (durch die Gabe von Brech- oder Abführmitteln) eingesetzt worden. Um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert war die wichtigste Behandlungsmethode die Operation. Viele nur lokal auftretende – nicht metastasierte – Krebsarten wie Karzinome in Uterus, Ovarien, Brust, Prostata, Colon und Lunge konnten chirurgisch behandelt werden. 20 Die weiteren beiden "Säulen der Krebstherapie" (Chemo- und Strahlentherapie), die heute einzeln oder in verschiedenen Kombinationen angewandt werden, kamen erst später hinzu. Daher war es verständlich, dass die Idee, dass Tumore durch Strahlung zum Schrumpfen gebracht werden konnten, große Hoffnungen hervorriefen. Die neue Technologie wurde daher mit Freude und Wagemut in erster Linie experimentell eingesetzt. Strahlentherapie war technisch möglich, also wurde sie eingesetzt – aufgrund der langen Abwesenheit systematischer Studien ist der Beginn der Strahlentherapie eher als technik- und nicht als wissenschaftsinduziert anzusehen.

2.5 Einflussreiche Personen der Dosimetriegeschichte

In den folgenden Abschnitten sollen einige Personen und Institutionen vorgestellt werden, die wichtige Rollen in der Entwicklung der Dosimetrie spielten. Die Einflüsse dieser Personen können sich entweder auf einzelne Messmethoden oder auf eine Vielzahl von Ansätzen beziehen.

¹⁹Mukherjee [2011], S. 61

²⁰Mukherjee [2011], S. 59

2.5.1 Wiener Röntgenlaboratorium: Freund, Holzknecht, Kienböck und Schwarz

Aus dem k.k. allgemeinen Krankenhaus Wien stammen verschiedene wichtige Beiträge aus der frühen Entstehungsgeschichte der Strahlentherapie. Hierzu gehören nicht nur die Röntgen-Bestrahlung eines der ersten Patienten (Leopold Freund), sondern auch die Formulierung wichtiger Dosierungs-Prinzipien (Robert Kienböck) sowie die Entwicklung einiger sehr verschiedener Dosismessgeräte (Guido Holzknecht, Leopold Freund, Robert Kienböck, Gottwald Schwarz). Auf Biografien und Beiträge der einzelnen Personen soll im Folgenden kurz eingegangen werden.

Leopold Freund (1868 - 1943)

Der 1868 geborene Leopold Freund studierte Medizin und schloss 1895 seine Promotion ab²¹. Im Jahre 1897 berichtete Freund (1868-1943) über einen Fall der erfolgreichen Therapie mit Röntgenstrahlen, die fast genau ein Jahr nach Entdeckung der Röntgenstrahlen durchgeführt wurde: ein kleines Mädchen konnte durch mindestens zehnmalige Bestrahlungen ab Ende November 1896²² mit einer Gesamtdauer von über 22 Stunden von einem Tierfellnaevus – einer starken, großflächigen Behaarung – am Rücken befreit werden²³. Diese Behandlung erwies sich auch langfristig als erfolgreich, es existieren Fotos des Patientinnenrückens 70 Jahre nach der Behandlung, die eine große Narbe, aber keine Haare mehr zeigen. Zusätzlich wurde berichtet, dass die Patientin gesunde Nachkommen hatte²⁴. Mit der Behandlung dieser Patientin gehört Freund zu den ersten Ärzten, die eine Strahlentherapie mit positivem Ergebnis durchgeführt haben – die Frage der Priorität soll an dieser Stelle nicht behandelt werden.

Mit der Behandlung verschiedener Erkrankungen mit Röntgenstrahlen beschäftigte sich Freund auch in den Jahren nach o.g. Veröffentlichung: 1903 veröffentlichte er eins der ersten Strahlentherapie-Lehrbücher: "Grundriss der gesammten [sic] Radiotherapie für praktische Ärzte"²⁵. Im Mai des folgenden Jahres habilitierte sich Freund gleichzeitig mit Holzknecht und Kienböck²⁶ (s.u.); die Lehrbefugnis bezog sich auf das neue Fach der medizinischen Radiologie²⁷. Etwa zeitgleich stellte er auch sein Radiometer (s. Kap. 5.2.1) vor, welches aus einer Jodoform-Chloroform-Lösung bestand. Wurde diese Lösung bestrahlt, so sah Freund eine Proportionalität zwischen Expositionsdauer und

²¹ Jantsch [1961], S. 413

²²Freund [1897b], S. 857

²³Freund [1897a]

²⁴Fuchs und Hofbauer [1966], S. 163

²⁵Freund [1903]

²⁶Kogelnik [1996], S. 221

²⁷Ruckensteiner [1954], S. 21

der Menge abgeschiedenen Jods²⁸.

Zur Zeit des Ersten Weltkriegs wurde Freund zum a.o. Professor²⁹ ernannt, 1937 folgte der Titel Hofrat³⁰. 1938 – nach dem "Anschluss" Österreichs an das Dritte Reich emigrierte Freund nach Belgien³¹, wo er 1943 starb.

Guido Holzknecht (1872 – 1931)

Guido Holzknecht wurde 1872 in Wien geboren. Nach seinem Abitur im Jahre 1893 studierte er in Straßburg und Königsberg³² Medizin und schloss das Studium 1899 mit einer Promotion ab. Nach Wien zurückgekehrt, war er in einer internistischen Abteilung des Allgemeinen Krankenhauses tätig und begann sich mit Röntgendiagnostik zu beschäftigen. Ab 1901 war er am Röntgeninstitut tätig, das zu einer dermatologischen Abteilung gehörte.³³

1902 veröffentlichte Holzknecht eines der ersten Hilfsmittel zur Quantitätsmessung von Röntgenstrahlen: das sog. Chromoradiometer (s. Kap. 5.1). Dies bestand aus einer – nicht genauer definierten – Mischung von Salzen, für die ein Zusammenhang zwischen Strahlenmenge und "Tiefe der Färbung"³⁴ gelten sollte. Ein bestimmter Farbton stand daher für eine bestimmte Röntgenlichtdosis. Die Dosiseinheit benannte Holzknecht nach sich selbst. Sein Einfluss auf die Entwicklung der medizinischen Strahlungsmessung beruht dennoch weniger auf dem Messinstrument "Chromoradiometer" als auf dem Impuls zu systematischen aber dennoch einfachen Messungen von Strahlungsmengen.

In dem auf seine Habilitation folgenden Jahr – 1905 – wurde Holzknecht Leiter des nun unabhängigen Zentral-Röntgenlaboratoriums³⁵. Wegen verstärkten Patientenzulaufes wurden neue Räumlichkeiten benötigt; 1913³⁶ wurde das neue Institut eingeweiht. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich Holzknecht schon Amputationen an den Händen³⁷ unterziehen müssen, da diese durch die häufige Strahlenapplikation ulzerierten. Die Strahlenschädigungen nahmen weiter zu, da Holzknecht unbeirrt seine Tätigkeit weiter durchführte. Bis zu seinem letztendlich strahlenbedingten Tod im Jahre 1931 wurden ihm die gesamte rechte und Teile der linken Hand amputiert³⁸.

 $^{^{28}}$ Freund [1904], S. 418; Freund [1903-1904], S. 217

 $^{^{29} {\}rm Jantsch}$ [1961], S. 413, nannte 1914; Kogelnik [1996], S. 221, hingegen 1915

³⁰Jantsch [1961], S. 413

³¹Kogelnik [1996], S. 221

³²Holthusen [1931], S. 2327

³³Regato [1977], S. 1202

³⁴Holzknecht [1902a], S. 685

³⁵Pilz [2010], S. 104

³⁶Holthusen [1931], S. 2327

³⁷Regal und Nanut [2006]

³⁸Regato [1977], S. 1205

Robert Kienböck (1871 – 1953)

Ab 1899³⁹ war auch der 1871 geborene Robert Kienböck Mitarbeiter des Röntgenlaboratoriums. Der gebürtige Wiener, der 1894 in Medizin promoviert⁴⁰ hatte, beschäftigte sich zu Beginn seiner ärztlichen Tätigkeit in der "Röntgenologie" insbesondere mit Röntgendiagnostik und dermatologischen Fragestellungen. Aus diesen Arbeiten ging im Jahr 1900 der Artikel "Ueber die Einwirkung des Röntgenlichts auf die Haut" hervor, der eine Korrelation zwischen der Wirkung auf bestimmte Reagenzkörper – in diesem Fall Fluoreszenzschirm und photographische Platte⁴¹ – und der Hautreaktion postulierte. Diese Korrelation wurde über zwei Jahrzehnte von vielen Ärzten als Grundlage der Röntgenstrahlendosierung verwendet.

Nach Kienböcks Habilitation entstand das sog. Quantimeter (s. Kap. 5.5), ein Dosierungshilfsmittel, das er ab 1905 auf nationalen und internationaler Ebene propagierte. Später schlug Kienböck auch vor, das Quantimeter nicht nur für die Messung von Oberflächen- sondern auch von Tiefendosen zu verwenden – zu dieser Zeit ein revolutionäres Konzept.

1907 veröffentlichte Kienböck "Radiotherapie, ihre biologischen Grundlagen, Anwendungsmethoden und Indikationen"⁴², ein zusammenfassendes Buch über Strahlentherapie, das auch auf Radiumtherapie mit einging. Bis 1910 war Kienböck bei vielen nationalen und internationalen Kongressen anwesend, danach mied er nach einer Schädelverletzung öffentliche Auftritte⁴³. Im Jahr 1917 erhielt Kienböck den Titel eines a.o. Professors⁴⁴, er starb im September 1953. Kienböcks Bedeutung für die Entwicklung der Messmethoden liegt insbesondere in der Einführung systematischer Messungen mit Hilfe des Quantimeters. Mit dem Aufkommen weiterer, teils genauerer Messgeräte, vor allem von Ionisationskammern, nahm sein Einfluss im physikalisch-technischen Bereich zunehmend ab. In der Medizin ist Robert Kienböck heute für die erste Beschreibung der Lunatummalazie, einer Erkrankung eines bestimmten Handwurzelknochens, bekannt, da diese auch den Namen Morbus Kienböck trägt.

Gottwald Schwarz (1880 – 1959)

Gottwald Schwarz wurde in Brünn geboren. Er studierte in Wien Medizin und schloss seine Promotion 1904 ab. 45 Schon während des Studiums hatte Schwarz Kontakt mit

³⁹Wagner und Chung [2005], S. 1118

⁴⁰Ruckensteiner [1954], S. 20

⁴¹Kienböck [1900], S. 1160

⁴²Kienböck [1907]

⁴³Ruckensteiner [1954], S. 21

⁴⁴Ruckensteiner [1954], S. 21

⁴⁵Case [1959], S. 148

Holzknecht und beschäftigte sich mit den Effekten von Röntgenstrahlung.

1907 veröffentlichte Schwarz seinen Entwurf eines Messhilfsmittels für Röntgenstrahlen: das Kalomel-Radiometer (s. Kap. 5.6). Dieses bestand aus einer "Mischung von Ammoniumoxalat- und Sublimatlösung"⁴⁶, welche sich unter dem Einfluss von Röntgenstrahlung in Kohlensäure und "Kalomel" zersetzte. Die abgegebene Strahlenmenge sollte durch die entstehende Trübung der Flüssigkeit gemessen werden können.

Bereits vor seiner Habilitation im Jahr 1914 leitete Schwarz ab 1910 das Röntgeninstitut der 1. Medizinischen Universitätsklinik in Wien⁴⁷. Im Anschluss an diese Tätigkeit wechselte Schwarz 1920 ins Röntgeninstitut des Kaiserin-Elisabeth-Spitals⁴⁸, dessen Leitung er drei Jahre später übernahm. 1923 wurde Schwarz auch zum a.o. Professor ernannt⁴⁹.

Noch 1937 führte Schwarz die österreichische Delegation beim fünften internationalen Radiologiekongress, doch mit dem "Anschluss" Österreichs ans Dritte Reich verlor er wie viele andere jüdische Wissenschaftler seine Anstellung⁵⁰ und emigrierte zunächst nach England und kurze Zeit später in die USA. Dort war er, bis er mit 77 Jahren⁵¹ in den Ruhestand ging, als Röntgenologe tätig. Schwarz starb 1959.

2.5.2 Hamburger Röntgenpionier: Bernhard Walter (1861 – 1950)

Bernhard Walter wurde 1861 in Mecklenburg geboren. Er studierte Physik und promovierte zum Dr. phil. Anschließend war er zwei Jahre lang an der Gelehrtenschule des Johanneums in Hamburg als Lehrer tätig, bevor er 1887 wissenschaftlicher Mitarbeiter am des Physikalischen Staatslaboratoriums wurde⁵². Dort beschäftigte er sich in verschiedenster Weise mit Röntgenröhren und -strahlung: er entwarf eine wassergekühlte Röntgenröhre, kooperierte u.a. mit der Firma C. F. Müller ("Röntgenmüller") und entwickelte ein Instrument zur Härtemessung von Röntgenstrahlung, die sog. Walter-Skala (s. Kap. 4.1.2).

Im Jahr 1907 wurde Walter Professor für Physik⁵³. Mit verschiedenen auf dem Gebiet der Röntgenologie tätigen Ärzten – insbesondere Heinrich Albers-Schönberg (1865 – 1921) – verband Walter eine enge Zusammenarbeit. Dies spiegelt sich auch darin wider, dass Walter auf die physikalischen Inhalte der Zeitschrift "Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen" vor allem in den ersten Jahren nach ihrer Gründung

 $^{^{46}}$ Schwarz [1907a], S. 114

 $^{^{47} \}ddot{\mathrm{O}}\mathrm{sterreichische}$ Röntgengesellschaft [2013]

⁴⁸Tragl [2007], S. 242

⁴⁹Tragl [2007], S. 242

⁵⁰Case [1959], S. 149

⁵¹Case [1959], S. 149

⁵²Nyary [2005]

⁵³Frühling und Vogel [1995], S. 134

einen großen Einfluss hatte und die "physikalisch-technischen Mitteilungen" in den ersten Ausgaben selber schrieb⁵⁴.

Später wandte sich Walter eher physikalischen als technischen Themen zu, z.B. der Röntgenbeugung⁵⁵. Im zweiten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts werden daher seine auf medizinische Strahlenkunde bezogenen Beiträge seltener. 1927 wurde Walter emeritiert, blieb jedoch weiterhin am *Physikalischen Staatslaboratorium* und in der *Deutschen Röntgengesellschaft* aktiv. Walter starb im Jahr 1950. Sein Nachlass befindet sich im Archiv des *Zentrums für Geschichte der Naturwissenschaft und Technik* der *Universität Hamburg*⁵⁶ und soll in der Zukunft bearbeitet werden.

2.5.3 Instrumente, Kritik, Theorie: Theophil Christen (1873 – 1920)

Der Schweizer Theophil Christen wurde 1875 geboren. Er studierte zunächst Mathematik, Physik, Chemie und Meteorologie und arbeitete nach seiner Promotion zum Dr. phil. für kurze Zeit in letztgenanntem Themengebiet⁵⁷. Dann studierte er Medizin und promovierte mit 30 Jahren zum Dr. med.. Seine Spezialisierungsrichtung war die Chirurgie, evtl. kam er über die Frakturenlehre mit der Arbeit mit Röntgenröhren in Kontakt.

Ab ca. 1910 erstellte Christen zahlreiche Publikationen zu Fragen der (im weitesten Sinne) Dosierung der Röntgenstrahlen⁵⁸. 1913 erschien Christens wahrscheinlich bekanntestes Werk, die Monographie "Messung und Dosierung der Röntgenstrahlen"⁵⁹, als Ergänzungsband der Zeitschrift Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen. Dieses Buch enthält Beschreibungen und Kritiken der meisten zu dieser Zeit (bis auf wenige Ausnahmen: im deutschsprachigen Raum) bekannte Strahlungsmessinstrumente sowohl für qualitative als auch für quantitative Messungen. Weitere Themen sind die Definition und die Berechnung von Dosis.

Im Jahr 1915 wechselte Christen in die Forschungsabteilung der deutschen Firma Reiniger, Gebbert & Schall in München, wo er die Leitung einer speziell geschaffenen "Strahlenforschungsstelle"⁶⁰ übernahm. Ab diesem Zeitpunkt finden sich in den Zeitschriften Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und Strahlentherapie schlagartig wesentlich weniger Publikationen Christens. Einige der Entwicklungen der

⁵⁴z.B. Walter [1897-1898], Walter [1899-1900]

⁵⁵Walter und Pohl [1908], Walter und Pohl [1909] bis Walter [1924]

⁵⁶Wolfschmidt [2013]

⁵⁷Busch und Bautz [2005]

⁵⁸z.B. Christen [1910a], Christen [1910b], Christen [1910-1911]

⁵⁹Christen [1913a]

⁶⁰Schweizerische Gesellschaft für Strahlenbiologie und Medizinische Physik [2011]

Münchener Zeit sind ein härteunabhängiger Dosismesser (das Integral-Iontometer⁶¹) sowie die Spezifizierung eines durch einen anderen Wissenschaftler vorgeschlagenen Härtemessprinzips: die Verwendung eines bestimmten Dosisquotienten (Qualitätsindex, s. Kap. 4.6), ein Prinzip, das sich bis heute erhalten hat.

1919 kehrte Christen in die Schweiz zurück, wo er sich politisch engagierte. Etwa zu dieser Zeit nahmen die Nebenwirkungen einer Hirnnervenerkrankung zu, die u.a. zu psychischen Veränderungen führten⁶². Christen nahm sich 1920 das Leben. So konnte er weder die zunehmende Verbreitung der Verwendung von Ionisationskammern – die sich auf ein so oft von ihm gefordertes "wohldefiniertes Maß", die Ionisation in einem bestimmten Luftvolumen bezogen – noch die Einführung einer standardisierten Einheit für die Dosis durch die Deutsche Röntgengesellschaft miterleben und -gestalten. Sein Einfluss auf die Entwicklung der Dosimetrie bleibt dennoch groß, da Christen durch sein medizinisches und naturwissenschaftliches Studium sowohl den Wunsch nach einfacher Handhabung als auch nach exakter Formulierung und "absoluten" Messungen hegte und beides kombiniert umzusetzen suchte.

2.5.4 Physikalisch-Technische Reichsanstalt: Hermann Behnken (1889-1945)

Hermann Behnken wurde 1889 in Hamburg geboren. Er besuchte bis zu seinem Abitur im Jahre 1908⁶³ die Gelehrtenschule des Johanneums, die Schule, an der über 20 Jahre zuvor Bernhard Walter unterrichtet hatte. Die gleichen Fächer, die Walter unterrichtet hatte, wählte Behnken als Studienfächer: Mathematik und Physik. Außerdem studierte er zeitweise auch Astronomie, Theologie und Philosophie⁶⁴. Nach einer Studienphase in Jena wechselte Behnken nach Berlin, wo er u.a. wissenschaftlicher Assistent am Kaiserlichen Telegrafenversuchsamt wurde⁶⁵. 1913 folgte seine Berufung an die Physikalisch-Technische Reichsanstalt, 1913⁶⁶ konnte Behnken seine Promotion zum Thema "Über die Polarisation kurzer Hertz'scher Wellen durch metallische Gitter" mit summa cum laude abschließen. Im folgenden Jahr meldete er sich als Kriegsfreiwilliger.

Nach dem Ersten Weltkrieg nahm Behnken die Arbeit an der *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt* wieder auf und beschäftigte sich insbesondere mit Röntgenstrahlen und ihrer Messung. Aus dieser Zeit stammen die wesentlichen Beiträge Behnkens, auf die in Kap. 7.4 eingegangen wird. Im Jahr 1925 wurde Behnken zum Mitglied

⁶¹Christen [1915-1916b]

⁶²Janus [1921], S. 918

⁶³Hoffmann [2001]

⁶⁴Jäger [1970], S. 114

⁶⁵Hoffmann [2001]

⁶⁶Serwer [1976], S. 132

der *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt* sowie zum Vorstand des Röntgen-Labors ernannt, zehn Jahre später zum Oberregierungsrat. 67 Ab 1940 war Behnken als Reserveoffizier – teils wissenschaftlich, teils aktiv militärisch – tätig, im April 1945 fiel er als Oberstleutnant der Luftwaffe 68 in der Schlacht um Berlin.

⁶⁷Hoffmann [2001]

 $^{^{68}}$ Jäger [1970], S. 115

Kapitel 3

Terminologie

Um die Terminologie in der frühen Dosimetrie richtig zu verstehen und gewichten, muss man berücksichtigen, dass viele derer, die sie mitgeprägt haben, keinen naturwissenschaftlichen, sondern einen primär medizinischen Hintergrund besaßen. Insbesondere in den ersten Jahren der Strahlentherapie waren noch sehr wenige Physiker an den Entwicklungen beteiligt; die ersten Messinstrumente – und deren Benennungen und Beschreibungen – gehen auf Ärzte zurück.

3.1 Qualität und Quantität

Bereits vor der Anwendung von Röntgenstrahlen zu therapeutischen Zwecken wurden sie diagnostisch verwendet. Eines der ersten "Röntgenbilder" stellt die Hand von Röntgens Frau Bertha¹ (1839 – 1919) dar. Die Verbreitung dieses und ähnlicher Bilder weckte schnell den Wunsch nach Röntgen-Untersuchungen weiterer Körperteile. Dabei fiel auf, dass für Aufnahmen verschieden dicker Körperteile wie Hüft- oder Handgelenk unterschiedliche Röhreneinstellungen gewählt werden mussten und so auch die Kontrasteigenschaften der Aufnahmen beeinflusst werden konnten. Man bezeichnete dieses Phänomen mit einer variierenden Qualität der Röntgenstrahlung. Qualität stand dabei für die "Beschaffenheit, Eigentümlichkeit des Wesens im Gegensatze zur Quantität (s.d.), der Menge oder dem Größenwerte"².

Die Quantität der Röntgenstrahlung spielte in der Röntgendiagnostik im Vergleich zur Qualität eine untergeordnete Rolle; lediglich die unterschiedlichen Expositionszeiten für verschiedenartige oder -scharfe Aufnahmen waren von Bedeutung. Dies änderte sich erst allmählich mit der zunehmenden Verwendung von Röntgenstrahlen zu therapeutischen Zwecken. Ausgehend von der Verwendung des Begriffs "Quantität" war

¹Glasser [1995], S. 22

²Meyer Verlag [1905-1909]

in der Medizin der aus dem Griechischen kommende Begriff "Dosis" ("zugemessene [Arznei]gabe"³) folgerichtig. Dieser wurde zunächst wörtlich genommen, bedeutete also schlicht "Menge" (zumeist der auf der Körperoberfläche ankommenden Energie), und hatte nichts mit der heutigen Energiedosis zu tun. Zu unterschiedlichen Zeitpunkten wiesen verschiedene Autoren⁴ jedoch auch darauf hin, dass es sich bei der "Röntgenlichtdosis" um eine Größe handeln müsse, bei der es um Absorption gehe und die die "im Körperteil absorbierte Lichtmenge"⁵ beschreiben solle.

3.2 Direkte und indirekte Messmethoden

Im Rahmen der Entwicklung von Messmethoden für die Röntgenstrahlungsquantität entwickelten sich zwei unabhängige Zweige: die "direkten" und die "indirekten" Methoden. Über die Einteilung der unterschiedlichen Messmethoden in verschiedene Zweige herrschte Einigkeit, zur Benennung der Zweige existierten jedoch komplementäre Meinungen. Der Hamburger Physiker Bernhard Walter schlug auf dem ersten deutschen Röntgenkongress folgende Nomenklatur vor: unter indirekten Methoden seien "solche zu verstehen, bei denen nicht direkt eine Wirkung dieser Strahlen selbst, sondern vielmehr eine mit ihrer Erzeugung in unmittelbarer Verbindung stehende Erscheinung der Messung unterworfen" würden. Dieses bedeutete die Ablesung verschiedener Parameter der Röntgenröhre wie z.B. Strom und Spannung sowie der Bestrahlungszeit. Als direkte Methoden nannte Walter jene nach Kienböck, Holzknecht, Sabouraud-Noiré, Freund, sowie die Verwendung von Selen. Christen – Arzt, Mathematiker und Physiker – hingegen vertrat die Ansicht, dass als direkt zu benennen "alles [sei], was ohne Zwischenglied ausgeführt werden" könne. Der Rückschluss von der Wirkung auf einen Reagenzkörper auf eine physiologische Wirkung hingegen sei nur als indirekt zu betrachten.

Diese Begründung erschien Zeitgenossen⁸ zwar plausibel, führte jedoch auch zu Verwirrung, da sie der von Walter sieben Jahre zuvor eingeführten Nomenklatur widersprach. Kurze Zeit später rief Christen daraufhin dazu auf, die Begriffe "direkt" und "indirekt" fallenzulassen und stattdessen von "elektrodynamischen" und "radiodynamischen" Methoden zu sprechen⁹. Insgesamt wurde die Diskussion kaum weiter vertieft;

³Drosdowski et al. [1963], S. 116

⁴Christen [1910-1911], S. 355; Christen [1913a], S. 69; Grossmann [1914-1915], S. 115

⁵Kienböck [1912-1913], S. 294

⁶Walter [1905], S. 127-128

⁷Christen [1912-1913a], S. 93

⁸Kienböck [1912-1913], S. 294

⁹Christen [1913a], S. 38

dies mag z.T. auch daran liegen, dass die insbesondere durch Walter¹⁰ propagierte Methode der Dosierung nach Röhreneinstellungen und Zeit (s. Kap. 5.9) mit fortschreitender Entwicklung in den Hintergrund geriet, während die Messung z.B. mit Ionisationskammern zunehmend einfacher und weiter verbreitet wurde.

3.3 Messgröße Intensität

Die Strahlungsgröße, die zu Therapiezwecken dosiert werden sollte, wurde zu Beginn der (halbwegs) systematischen Messungen meist "Intensität" der Strahlung genannt. Dies war insofern plausibel, als dass es sich bei fast allen in den ersten Jahren nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen behandelten Krankheiten um Hautkrankheiten handelte (s. z.B. Albers-Schönberg [1897-1898], Hahn [1898-99], Gassmann und Schenkel [1898-1899]) und daher die Wirkung der Strahlung an der Oberfläche des bestrahlten Körpers interessant war. Erst mit der zunehmenden Behandlung auch tiefer liegender Erkrankungen wie Tumoren musste man sich genauere Gedanken machen, dass die Intensität der Strahlung in der obersten zu behandelnden Schicht nicht mehr die gleiche wie an der Oberfläche war und dass es zusätzlich einen Unterschied zwischen applizierter und absorbierter, also zwischen verabreichter und zur Wirkung kommender Strahlung gab. Erst zu Beginn des zweiten Jahrzehnts des 20. Jahrhunderts wurden häufiger mit Messwerten auch die Definitionen der angegebenen Größen veröffentlicht. So schrieb Christen:

"Unter Intensität der Röntgenstrahlung hat man die in der Zeiteinheit auf die Flächeneinheit geworfene Röntgenenergiemenge zu verstehen." 11

In seinem Aufsatz "Grundprinzipien der Dosimetrie" nannte der Physiker Gustav Grossmann (1878 – 1957) zwei Jahre später eine Definition, die unserer heutigen Vorstellung von Intensität als Flächenleistungsdichte entspricht:

"Bezeichnen wir mit Röntgenstrahlenintensität in irgendeinem Punkte des Raumes diejenige Röntgenstrahlenenergiemenge, die durch ein in dem betreffenden Punkte senkrecht zur Strahlenrichtung angenommenes Flächenstück von $1~\rm cm^2$ Flächeninhalt innerhalb einer Sekunde strömt." 12

Diese Beschreibung einer durch eine Fläche strömenden Größe entspricht einer mathematischen Abstraktion und damit nicht mehr einer eher von Ärzten bevorzugten

¹⁰Walter [1909-1910]

¹¹Christen [1912-1913b], S. 166

¹²Grossmann [1914-1915], S. 102

materiellen Vorstellung. Grossmanns Auffassung von Intensität schlossen sich später weitere Wissenschaftler an¹³.

Zusätzlich zum Begriff der Intensität wurde vereinzelt der Begriff der Flächenenergie verwendet. Hierunter wurde die Energie verstanden, die "ein Flächenstück (geringer Ausdehnung) [...] während der Dauer der Bestrahlung pro cm² aufgenommen hat."¹⁴ Dieser Ausdruck wurde später zugunsten der Dosis fallengelassen.

3.4 Messgröße Dosis

Das Konzept der absorbierten Dosis entstand aus der Überlegung heraus, dass allein die auf eine bestimmte Gewebemenge gestrahlte Energie keine Proportionalität mit der Wirkung haben konnte, sondern dass es nur der Teil der Strahlung, der nicht auf der entgegengesetzten Seite wieder austrat, zur Wirkung kommen konnte. Etwas physikalischer formulierte Küstner dieses später so: "Wollte man den hindurchgegangenen Röntgenstrahlen irgendwelche Wirkung zuschreiben, so wäre das gleichbedeutend mit der Möglichkeit eines Perpetuum mobile."¹⁵ Aus diesem Grund sollte nur die absorbierte Dosis betrachtet werden.

Eine der frühesten Definitionen, die diesen Sachverhalt berücksichtigt, stammte von Christen aus dem Jahr 1910:

"Bezeichnet man [...] die eintretende Energiemenge mit E_1 und die austretende mit E_2 , so ist die absorbierte Energiemenge gleich $E_1 - E_2$. Ein Teil dieser Energiemenge wird bei der Absorption so transformiert, dass er die spezifischen Röntgenschädigungen, d.h. die gewollte physiologische Wirkung hervorbringt. Wir bezeichnen ihn mit P. [...] Bezeichnet man mit V das Volumen eines bestrahlten Körperelements, so muss die wirksame Dosis definirt [sic] werden als $D = \frac{P}{V}$ oder [...] $D = \rho \frac{E_1 - E_2}{V}$ "16

Der Buchstabe ρ hatte an dieser Stelle nichts mit der Dichte des absorbierenden Materials zu tun, sondern stand für einen "Koeffizienten der spezifischen Röntgenempfindlichkeit". Weiterhin versuchte Christen, die Dosis nach dem Absorptionsgesetz zu berechnen und dabei mögliche verschiedene Strahlhärten und Tiefenlagen der zu bestrahlenden Volumina zu berücksichtigen. Da die Dosierung von Strahlung zu diesem Zeitpunkt jedoch noch überwiegend von Ärzten und kaum von Physikern durchgeführt wurde, empfanden Erstgenannte dieses Verfahren des Berechnens offenbar als zu kompliziert; es stieß kaum auf Resonanz.

¹³z.B. Krönig und Friedrich [1918], S. 97-98; Küstner [1924a], S. 18

¹⁴Grossmann [1914-1915], S. 112

¹⁵Küstner [1924a], S. 3

¹⁶Christen [1910b], S. 355

Doch auch bei Physikern waren die "Dosis"-Formulierungen oft nicht eindeutig und sie verwendeten sowohl die Begriffe "verabreicht" als auch Äquivalente zu "absorbiert", wie das folgende Zitat Grossmanns zeigt.

"Wir wollen die von der Volumeneinheit des bestrahlten Körpers zurückgehaltene Röntgenstrahlenenergiemenge, also diejenige Menge an Strahlenenergie, die wir dem Körper während der Bestrahlung pro cm³ verabreicht haben, als Röntgendosis bezeichnen. Hat der Körper vom Volumen V während der Bestrahlung im ganzen die Strahlenenergiemenge $E_0 - E_r$ verschluckt, so ist die pro Volumeneinheit aufgesogene Energiemenge D_m , also die Röntgendosis: $D_m = \frac{E_0 - E_r}{V}$."17

Eine analoge Definition der Dosis gab auch Friedrich Voltz¹⁸ (1891 – 1938). Beide Definitionen beruhten – wie auch Christens – auf der Berücksichtigung des absorbierenden Volumens, nicht aber explizit der Dichte dieses Volumens. Trotzdem war durch das exponentielle Absorptionsgesetz auch Christen schon bekannt, dass die Dichte die Absorption beeinflusst: "Der Dichtigkeitsunterschied verschiedener Gewebe beeinflusst die 'rohe Dosis' und deshalb auch die 'wirksame Dosis". Eine explizite Aufnahme der Dichte in die Dosisdefinition erfolgte letztendlich erst mit der Entwicklung der Hohlraumtheorie (s. Kap. 8).

Insgesamt stellte die Entwicklung der Dosisdefinition also einen mehrstufigen Prozess dar, in dessen Rahmen die Mehrdimensionalität der Dosis Schritt für Schritt berücksichtigt wurde: Zunächst die Definition der Intensität (das Strömen von Energie durch eine abstrakte Fläche), dann die Definition der Flächenenergie (Absorption von Energie durch eine Fläche), anschließend die Dosis als absorbierte Energie pro Volumen, dann, als absorbierte Energie pro Volumen eines bestimmten Materials, und schließlich die Dosis als absorbierte Energie pro Dichte und Volumen, also pro Masse.

 $^{^{17}}$ Grossmann [1914-1915], S. 115

¹⁸Voltz [1915-1916], S. 476

¹⁹Christen [1910-1911], S. 279

Kapitel 4

Instrumente zur Qualitätsmessung von Röntgenstrahlen

Die Messung der Qualität von Röntgenstrahlung stand schneller als die der Quantität im Fokus der in der röntgenologischen Diagnostik tätigen Ärzte. Dieses hatte den schlichten Grund, dass die Qualität von Röntgenaufnahmen von der Strahlungsqualität abhängig war: es mussten unterschiedliche Röhrenhärte-Einstellungen oder sogar andere Röhren gewählt werden, um gute – sprich: kontrastreiche – Aufnahmen von unterschiedlich dicken Körperteilen, wie z.B. Hand, Thorax oder Becken, machen zu können. Um aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können, waren also Kenntnisse über die Strahlungsqualität notwendig. Erst allmählich ging die ärztliche Aufnahmetechnik über eine "Kunst des Bildermachens" hinaus und wurde zur Wissenschaft; mit diesem Schritt wurde auch eine Quantifizierung der Strahlungsqualität erforderlich. Obwohl im Bereich der Qualitätsmessungen schon früh Physiker (z.B. Benoist und Walter um 1902) involviert waren, trat eine verstärkt naturwissenschaftliche Prägung erst deutlich später ein, und zwar nach 1910 insbesondere durch Christen. Zu diesem Zeitpunkt gab es auch schon physikalische Ansätze zur Dosismessung.

Die Anwendung von Röntgenstrahlung zu diagnostischen Zwecken sowie die damit einhergehende Entwicklung von Instrumenten zur Messung der Strahlungsqualität bildet die erste Phase der Entwicklung der Röntgenstrahlen-Dosimetrie. Sie stellt keine abgeschlossene Einheit dar: einerseits wird Röntgenstrahlung bis heute zu diagnostischen Zwecken verwendet, andererseits begann kurz nach der Einführung der Röntgendiagnostik die – ebenfalls bis heute andauernde – therapeutische Anwendung von Röntgenstrahlung.

Die für viele Experimentatoren und Ärzte am nächsten liegende Möglichkeit zur Prüfung der Strahlungsqualität wurde bereits in Röntgens erster Mitteilung beschrieben: "Hält man die Hand zwischen den Entladungsapparat und den Schirm, so sieht

man die dunklen Schatten der Handknochen in dem nur wenig dunkleren Schattenbild der Hand."¹ Röntgens so naheliegende Art der Härtemessung fand schnell Eingang in den "röntgenologischen" (also nicht nur ärztlichen) Alltag und galt zunächst als "ungefährlich […] und allgemein [üblich]"². Der Wiener Arzt Kienböck veröffentlichte in seinem vielzitierten Artikel "Über die Einwirkung des Röntgenlichtes auf die Haut" eine Reihe von Abbildungen, die darstellen sollten, wie sich eine Röntgenröhre bei einem optimalen bzw. suboptimalen Bild verhielt (s. Abb. 4.1).

Etwas detaillierter beschrieb der Hamburger Arzt Albers-Schönberg verschiedene Röhreneinstellungen in verschiedenen Auflagen des Buches "Die Röntgentechnik. Handbuch für Ärzte und Studierende":

"Hart: Auf dem Schirm erscheinen die Knochen der Handbilder hellgrau, transparent, Handwurzelknochen sind deutlich voneinander zu differenzieren, am Radius und an der Ulna, welche klar erscheinen, erkennt man Corticalis und Markhöhle; mittelweich: Im Durchleuchtungsbild erscheinen die Knochen grauschwarz, die Handwurzelknochen lassen sich deutlich voneinander differenzieren, an den Mittelhandknochen und Phalangen erkennt man Markhöhle und Corticais; weich: Auf dem Durchleuchtungsbild erscheinen die Phalangen und Mittelhandknochen schwarz, die Weichteile der Finger dunkel und kontrastieren scharf gegen die übrigen Teile des Schirmes, die Handwurzelknochen sind gar nicht, Radius und Ulna gut voneinander zu differenzieren; sehr weich: Im Durchleuchtungsbild erscheinen die Handknochen tintenschwarz."³

Man muss bei der Verwendung der Begriffe "hart" und "weich" beachten, dass einige Anwender diese nicht immer nur für die Härte der Strahlung, sondern teils auch für den Evakuierungsgrad der Röhre verwendeten. Dies wird u.a. im oben erwähnten Artikel Kienböcks deutlich:

"Eine hochevacuirte [sic] Röhre bedarf zur Bildung von Röntgen-Licht eines Stromes von grösserer Spannung, man nennt sie, weil sie dem Durchtritt des Stromes einen grösseren Widerstand entgegensetzt, harte Röhre. [...] Nieder evacuirte [sic] setzen dem Strome einen geringeren Widerstand entgegen und heissen daher weiche Röhren."⁴

Obwohl sich innerhalb von wenigen Jahren Schäden insbesondere an den Händen der die Röntgenröhren Bedienenden bemerkbar machten – so wurde z.B. im Jahr 1905 der Fall eines Arztes berichtet, "der sich seine chronische Dermatitis vor 4 Jahren" zuge-

¹Röntgen [1895], S. 2

²Kienböck [1900], S. 1154

³Albers-Schönberg [1903] zit. nach Kütterer [2005], S. 275

⁴Kienböck [1900], S. 1156

⁵Schilling [1905-1906], S. 313

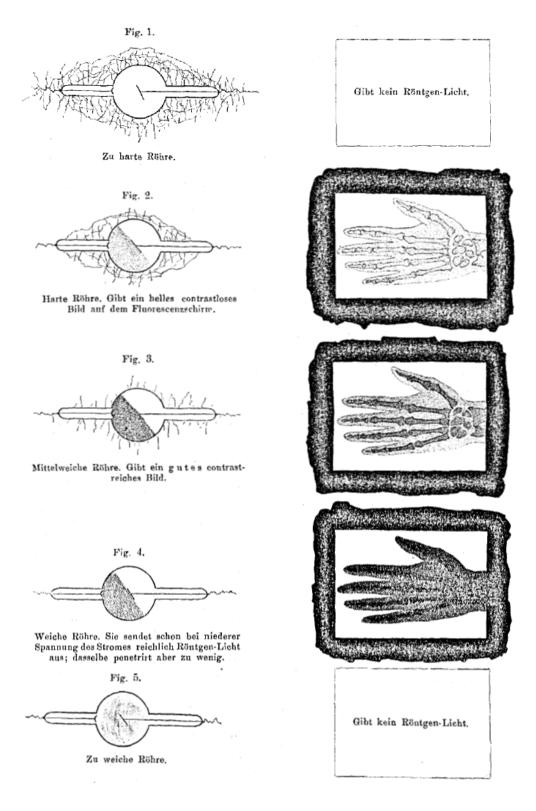


Abbildung 4.1: Darstellung zum Verhältnis von Röhrenhärte und Qualität der Röntgenaufnahme. In der linken Spalte ist die Röhrenhärte sowie die Funken und Fluoreszenz um die Röhre herum abgebildet, in der rechten das sich mit der jeweiligen Röhre ergebende Bild einer Hand auf einem Fluoreszenzschirm. Abbildung aus Kienböck [1900], S. 1157.

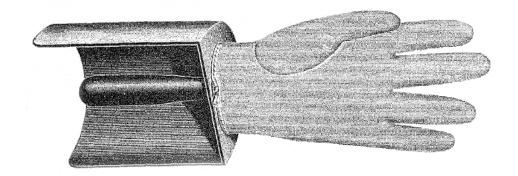


Abbildung 4.2: Härtemesser nach Schilling: ein in Wachs eingebettetes Handskelett in einem Handschuh. Die Hand des Experimentierenden, die den Härtemesser an einem Griff hielt, wurde durch dünnes Bleiblech "geschützt". Abbildung aus Schilling [1905-1906], S. 313.

zogen haben sollte – blieb diese unkomplizierte Art der "manuellen" Härtebestimmung vielfach klinische Praxis. Die Idee, die Hand der Experimentierenden ausschließlich durch Handskelette zu ersetzen, setzte sich nicht durch, da einerseits die Differenzierungsmöglichkeiten zwischen Weichteilen und Knochen fehlten, und andererseits der Anblick von Skelettteilen den Patienten nicht zugemutet werden sollte. Als Alternative zu losen Knochen beschrieb daher Theodor Schilling (1875 – 1921), ein Arzt aus Bayern, ein von ihm entwickeltes Handphantom (s. Abb. 4.2):

"Ich habe mir nun einen einfachen Härtegradmesser hergestellt, indem ich ein Handskelett in einen Handschuh steckte, dann diesen mit Wachs ausgoss und ihn über ein zurechtgeschnittenes Bleiblech, wie man es zur Abdeckung von Strahlen immer zur Verfügung hat, zuknöpfte. In das Wachs wurden Nadelstückchen eingebettet, um dadurch noch besser die Röhrenhärte kontrollieren zu können."

4.1 "Anzahl"-Härteskalen

4.1.1 Skiameter

Ein frühes Hilfsmittel zur Messung der Röntgenstrahlenhärte, wie es von vielen "Röntgenologen" zusätzlich zu oder alternativ zur Hand verwendet wurde, wurde "Skiameter" genannt (nach griech. $\sigma\kappa\iota\alpha$, Schatten). Bei diesem Instrument, lässt es sich schwer genau bestimmen, von wem es zuerst entwickelt und verwendet wurde. Eine Beschreibung stammt von dem Experimentator Alfred Parzer-Mühlbacher (*1868).

⁶Schilling [1905-1906], S. 313-314

"Dieses Prüfgerät besteht aus einem in 32 Felder unterteilten Karton der Größe 9 mal 12 cm, wobei das erste Feld mit einer Lage Stanniol (dünne Folie einer Blei-Zinn-Legierung), das zweite Feld mit zwei Lagen und so weiter bis hin zum 32. Feld mit 32 Lagen Stanniolpapier, beklebt wird. In den Strahlengang gebracht, kann die Anzahl der auf dem Leuchtschirm noch erkennbaren Stufen einen orientierenden Eindruck über die von der Röntgenröhre erzeugten Strahlung vermitteln."⁷

Einige Praktiker versuchten offenbar auch, nicht nur die Qualität, sondern auch die Quantität der Strahlen mit dem Skiameter zu bestimmen: man versuchte

"schon bald nach der Entdeckung unserer Strahlen die Intensität derselben mit Hülfe der bekannten "Skiameter" zu bestimmen, jedoch war es für jeden, der sich etwas eingehender mit den Eigenschaften der Strahlen beschäftigt hatte, von vornherein klar, daß sich auf diese Weise niemals die Intensität, sondern höchstens das Durchdringungsvermögen oder die Härte derselben feststellen läßt".⁸

Abwandelungen des Skiameters wurden lange Zeit verwendet, wie die folgenden Abschnitte zeigen.

4.1.2 Walter-Skala

Der Hamburger Physiker Bernhard Walter kritisierte 1902 an den herkömmlichen Skiametern, dass die Anzahl der noch sichtbaren Stufen aufgrund der geringen Dickenzunahme von einer Stufe zur nächsten nicht nur von der Strahlungshärte, sondern auch von der Röhrenbelastung abhängig sei. Hätte ein Skiameter jedoch größere Dickeunterschiede, wäre es für die Abstufungen weicher Röntgenröhren nicht sensitiv. Um diese Mängel zu beheben konstruierte Walter eine "neue Auflage" eines Skiameters, welche nach seinen eigenen Angaben schon ein Jahr vor der Veröffentlichung des Artikels über das Instrument entstand. Bei dem neuen Instrument war die Skala so angelegt, dass "die Metalldicken derselben nicht in arithmetischer, sondern in geometrischer Progression wachsen"⁹. Die Dicke der jetzt nur noch acht Schichten des Härtemessers ergab sich also nach $2^{x-1} \cdot 0,005$ mm mit der Nummer der Schicht x. Zusätzlich verwendete Walter nicht mehr Stanniol sondern Platin, "weil nämlich das letztere eine weit schwächere Sekundärstrahlung entwickelt als das erstere und daher bei diesem auch die einzelnen Felder sich viel schärfer abheben als bei jenem."¹⁰ Die verschiedenen Platinscheibchen

⁷Parzer-Mühlbacher [1897] zit. nach Kütterer [2005], S. 274

⁸Walter [1905], S. 126

⁹Walter [1902-1903], S. 69

¹⁰Walter [1902-1903], S. 69

hatten einen Durchmesser von je 6 mm, einen Randabstand von 1 cm und waren in zwei Reihen in einer runden Bleischeibe angebracht (s. Abb. 4.3). Die Bestimmung des Strahlungs-Härtegrades erfolge wie beim ursprünglichen Skiameter durch die Anzahl der sichtbaren Felder. Die Walter-Skala konnte über die Firma Seifert & Co. bezogen werden.

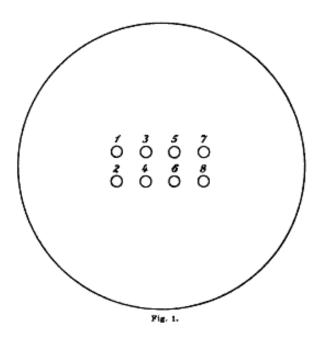


Abbildung 4.3: Härtemessung mittels Walter-Skala: auf einer Bleischeibe waren acht Platinscheibehen unterschiedlicher Dicke angebracht, je höher die Nummer des Scheibehens desto dicker die Platinschicht. Die Anzahl der auf einem Fluoreszenzbild des Härtemessers sichtbaren Felder gab Aufschluss über die Röhrenhärte: bei steigender Härte wurden mehr Felder sichtbar. Abbildung aus Walter [1902-1903], S. 69.

Angaben, dass die Waltersche Platinskala "eine Modifiktation der Stanniolskala von Biesalski"¹¹ sei, konnten bislang aufgrund mangelnder Literaturangaben nicht bestätigt werden.

4.1.3 Beez-Skala

Carl Beez, "Konstrukteur von elektromedizinischen und Röntgenapparaten", entwickelte eine weitere Härteskala, bei der die Härte der Röhre an der Anzahl der sichtbaren Felder abzulesen war. Die Skala hatte nur fünf Stufen: aus einer Bleiplatte waren die Buchstaben "CBEEZ" gestanzt und mit verschiedenen Materialien hinterlegt. Diese

 $^{^{11}}$ Kienböck [1914-1915a], S. 573

sollten eine "gleich[e] Stärke aber für Röntgenstrahlen verschieden[e] Durchlässigkeit"¹² besitzen. Welche die fünf verwendeten Materialien waren, erwähnte Beez nicht, hingegen führte er den besonders billigen Preis von 7 Mark im Gegensatz zu den teuren, Platin beinhaltenden Härtemessern an. Ähnlich wie Walters Skala sollte die Beez-Skala von der Röhrenhärte unabhängig sein. Der Härtegrad ergab sich wie folgt:

- "5 Buchstaben: Zu hart, für röntgenographische Zwecke nicht mehr brauchbar. Entspricht Walter-Skala 8 Felder.
- 4 Buchstaben: Mittelweich, geeignet für Aufnahmen von Becken, Hüftgelenk, Wirbelsäule, Nierensteinen von korpulenten Personen [...] Entspricht Walter-Skala 7 Felder.
- **3 Buchstaben:** Weich, für Aufnahmen von Becken, Hüftgelenk, Wirbelsäule, Nierensteinen von Durchschnittspersonen [...] Entspricht Walter-Skala 5 Felder.
- 2 Buchstaben: Sehr weich, für Aufnahme und Durchleuchtung von Hand, Fuss, kindliche Extr. [...] Entspricht Walter-Skala 4 Felder.
- 1 Buchstabe: Zu weich, kaum noch zu gebrauchen. Entspricht Walter-Skala 2 Felder."¹³

4.2 Härteskalen aus zwei Materialien

Eine weitere Methode der Härtemessung geht vermutlich auf Röntgen zurück, der in seiner "dritten Mittheilung" vom 10. März 1897 das Prinzip und einen Prototypen, welchen er "Platin-Aluminiumfenster" nannte, beschrieb.

"Dieselbe [Vorrichtung] besteht aus einem auf einen dünnen Papierschirm aufgeklebten, rechteckigen (4,0 x 6,5 cm) Stück Platinfolie von 0,0026 mm Dicke, das mittels Durchschlages mit 15 auf drei Reihen vertheilten, runden Löchern von 0,7 cm Durchmesser versehen ist. Diese Fensterchen sind verdeckt mit genau passenden und sorgfältig übereinander geschichteten Scheibchen aus 0,0299 mm dicker Aluminiumfolie, und zwar so, dass in dem ersten Fensterchen ein, im zweiten zwei etc., schliesslich im fünfzehnten fünfzehn Scheibchen liegen. Bringt man diese Vorrichtung vor den Flourescenzschirm, so erkennt man namentlich bei nicht zu harten Röhren [...] sehr deutlich, wieviel Aluminiumblättchen gleich durchlässig sind wie die Platinfolie. Diese Anzahl soll kurz die Fensternummer genannt werden."¹⁴

¹²Beez [1907], S. 286

¹³Beez [1907], S. 286

¹⁴Röntgen [1897], S. 26

Röntgen fand mit Hilfe seines Platin-Aluminiumfensters, dass eine Platinschicht von $1\cdot 0,0026$ mm Dicke bei der von ihm verwendeten Röhrenhärte eine gleiche Durchlässigkeit hatte wie eine Aluminiumschicht von $6\cdot 0,0299$ mm =0,1794 mm Dicke. Die Durchlässigkeit bei einer Verdopplung der Platinschichtdicke entsprach jedoch nicht der Durchlässigkeit von 12, sondern von 16 Aluminiumschichten. Außerdem stellte Röntgen fest, dass "das Verhältnis der Dicken von Platin und Aluminium gleicher Durchlässigkeit um so kleiner [war], je härter die Röhren" waren. Daher war nur die relative Messung der Röhrenhärte mit dem "Platin-Aluminiumfenster" möglich.

4.2.1 Benoist-Skala

Vom Ergebnis her ähnliche Versuche wie Röntgen stellte Benoist in den Jahren 1901 und 1902¹⁶ an, wobei er sich zunächst auf die Atomgewicht-Bestimmung von Materialien mittels Röntgenstrahlen konzentrierte. Aus seinen Versuchen entstand jedoch ein Härtemesser, der dem "Platin-Aluminiumfenster" Röntgens stark ähnelte. Benoist erwähnte in seinen Veröffentlichungen keine Kenntnisse von Röntgens Versuchen. Der entstandene Härtemesser (s. Abb. 4.4), auf Französisch "Radiochromomètre", auf Deutsch "Benoistscher Härtemesser" oder "Benoist-Skala" genannt, setzte statt Platin Silber ein:

"Dans le radiochromomètre, j'ai utilisé les variations inégales de transparance des corps différents, lorsque la qualité des rayons X change, pour définir une série des qualités de rayons par une série des transparences relatives de l'un de ces corps par rapport à l'autre, par exemple de l'aluminium par rapport à l'argent. [...] L'échelle est constituée par les multiples et sous-multiples d'épaisseur d'aluminium qui équivaut, dans le cas de rayons de dureté moyenne, à l'épaisseur moyenne et presque invariable de l'argent. Pour faciliter les comparaisons, les diverses épaisseurs d'aluminium sont disposées autour de l'épaisseur unique d'argent."¹⁷

In Benoists Beitrag vom 27. Januar 1902 wurde auch der Aufbau des Härtemessers detailliert beschrieben, der Verständlichkeit halber wird hier jedoch auf die Beschreibung von Christen [1913a] zurückgegriffen.

"[Benoist] hat um ein kreisförmiges Silberblech von 0,11 mm Dicke eine Reihe von Aluminiumschichten angeordnet, deren Dicken je um 1 mm zunehmen, und hinter dem Ganzen einen Leuchtschirm angebracht. Visiert man mit diesem

 $^{^{15}}$ Röntgen [1897], S. 28

¹⁶Benoist [1901a,b,c, 1902]

¹⁷Benoist [1902], S. 226

Instrumente gegen eine leuchtende Röntgenröhre, so findet man rasch dasjenige Feld heraus, welches die gleiche Helligkeit zeigt wie das Mittelfeld, das dem Silberblech entspricht. Die Zahl der betreffenden Millimeter Aluminiumdicke gibt dann den 'Härtegrad' an. So bedeutet z.B. 'Benoist 5' denjenigen Härtegrad, bei welchem eine Strahlung durch 5 mm Aluminium gleich stark absorbiert wird, wie durch 0,11 mm Silber."¹⁸

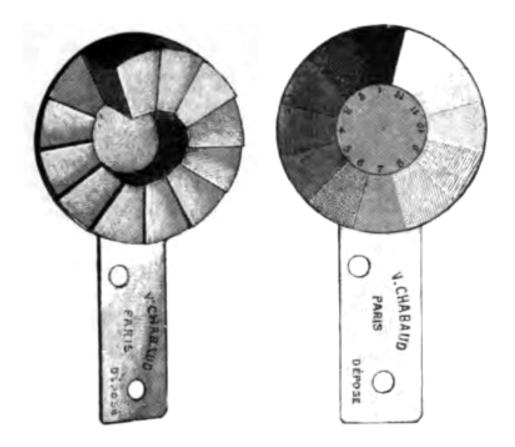


Abbildung 4.4: Die Benoist-Skala zur Härtemessung (links) und eine Schemazeichnung ihres Röntgenbilds (rechts). Die Skala bestand aus Aluminiumstücken, die treppenförmig um eine Silberscheibe angeordnet waren. Zur Härtemessung wurde das Gerät vor eine Röntgenröhre gehalten und die Helligkeit der Fluoreszenzbilder von Aluminium und Silber auf einem Leuchtschirm verglichen. Der Härtegrad in "Benoist" war durch die Nummer derjenigen Aluminiumfläche gegeben, deren Helligkeit der des Silbers entsprach. Abbildungen aus Belot [1905b], S. 72-73

2 bis 3 Benoist Härte standen für weiche Strahlung, 5 bis 6 Benoist für mittelharte Strahlung, und 9 bis 10 Benoist gaben eine große Strahlungshärte an.

¹⁸Christen [1913a], S. 14-15

Der Benoistsche Härtemesser wurde mehrfach modifiziert, die bekannteste Form stellt die Benoist-Walter-Skala (s.u.) von 1902 dar. Auch noch etwa zehn Jahre nach Benoists Veröffentlichungen wurden ähnliche Skalen entwickelt und präsentiert¹⁹.

4.2.2 Benoist-Walter-Skala

Der mit Röntgenstrahlen sowohl als Physiker als auch als Mitarbeiter eines Arztes experimentierende Walter sah als großen Nachteil der Benoist-Skala an, dass sie sehr weiche Strahlung – also zwei und weniger Härtegrade der Walter-Skala – nicht mehr abdeckte, da diese bereits von der Silberschicht absorbiert wurde. Außerdem sah er die "arithmetische Progression" der Schichtdicken als problematisch an. Eine einfache Kombination von "geometrischer Progression" (wie bei o.g. Walter-Skala) und dem Vergleich mit Silber hielt Walter für nicht sinnvoll, da man

"dabei übersehen [würde], dass das Benoistsche Messprinzip auf ganz anderen Grundlagen beruht als das meine [Walters]. Das erstere stützt sich nämlich auf den Vergleich der absorbierenden Kraft zweier verschiedener Körper, während bei dem letzteren die Härte einer Röhre einfach nach der Dicke der von ihrer Strahlung durchdrungenen Schicht eines bestimmten Stoffes gemessen wird. Dementsprechend haben wir es denn auch bei Benoist mit einer Erscheinung zu thun, deren gesetzmäßiger Verlauf jedenfalls kein ganz einfacher ist, während bei mir das Durchdringungsvermögen der Strahlung der Röhre, mit der ja ihre Härte parallel geht, sozusagen direkt in Ziffern ausgedrückt wird."²⁰

Aus Walters Versuchen, eine Verbesserung von Benoists Skala zu entwickeln, ging die sog. "Benoist-Walter-Skala" hervor. Diese hatte nur noch sechs Stufen, also halb so viele wie die ursprüngliche Benoist-Skala. Die untersten beiden Stufen der Walter-Skala entfielen, da die ihrer Härte entsprechende Strahlung von der 0,11 mm dicken Silberschicht, mit der die übrigen sechs Stufen verglichen wurden, sowieso absorbiert worden wären. Die Stufendicke wuchs quadratisch²¹ an. Die Schichtdicken von Benoist-, Walter- und Benoist-Walter-Skala sind in Abb. 4.5 dargestellt.

Die Helligkeitsabstufung zwischen den Feldern war bei der Benoist-Walter-Skala "bei allen Röhrenhärten nahezu" gleich²². Der besseren Handhabung willen wurde die Skala in einen Bleischirm eingelassen, mit einem Rohr als Griff sowie einem kleinen Leuchtschirm versehen.

¹⁹Walsham [1911], S. 916; Rzewuski [1912-1913], S. 269

²⁰Walter [1902-1903], S. 73

²¹Walter [1902-1903], S. 73

²²Walter [1902-1903]. S. 74

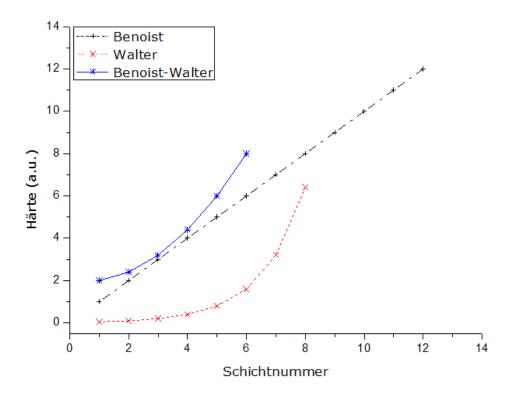


Abbildung 4.5: Relation von Schichtnummern und -dicken für verschiedene Härteskalen: Benoist-Skala (linearer Zusammenhang), Walter-Skala (exponentieller Zusammenhang) und Benoist-Walter-Skala (quadratischer Zusammenhang).

4.2.3 Kryptoradiometer

Trotz wesentlicher Verbesserungen gegenüber vorherigen Härtemessern hatte die Benoist-Walter-Skala immer noch einen wesentlichen Nachteil: Sie hatte Abstufungen. Wenn also eine Röhrenhärte zwischen zwei Stufen lag, konnte die Härte nicht quantifiziert werden. Diesem Manko wirkte ein weiterer Härtemesser entgegen, den Arthur Wehnelt (1871 – 1944) im Juli 1903 beschrieb. Das neue Instrument bestand aus einem 20 cm langen Aluminiumkeil, dessen Dicke kontinuierlich von 0,1 cm bis 1,6 cm anstieg, und zwar mit quadratischem Wachstum – im damaligen Sprachgebrauch also "nach einer arithmetischen Reihe zweiter Ordnung". Das Vergleichsmaterial war eine 0,01 cm dicke Silberplatte. Die Verwendung des sog. Kryptoradiometers beschrieb Wehnelt wie folgt (s. Abb. 4.6):

"Dieses System Σ aus zwei Metallen läßt sich an einem 0,5 cm breiten und 2 cm hohen Spalt S in einer dicken Messingplatte vorbeiziehen, die sich am Ende eines weiter Rohres R befindet, welches dazu dient, fremdes Licht von den Augen fernzuhalten. Zwischen Σ und dem Spalt liegt ein Leuchtschirm B. Durch

Verschieben von Σ kann man leicht die Stelle finden, bei der die obere vom Aluminiumkeil bedeckte Spalthälfte die gleiche Helligkeit mit der unteren vom Silber bedeckten Spalthälfte zeigt."²³

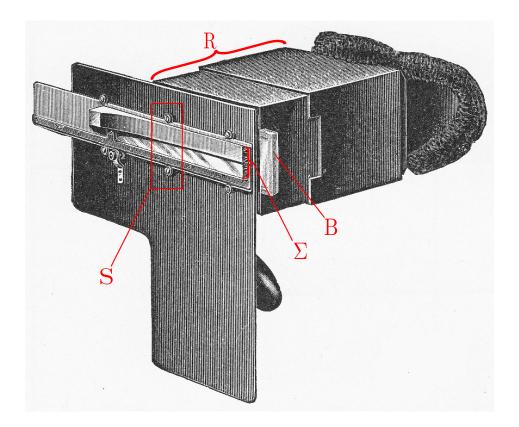


Abbildung 4.6: Kryptoradiometer zur Härtemessung nach Wehnelt. Der Beobachter schaute durch ein Rohr (R) und einen Schlitz (S, in der Abbildung ist die ungefähre Position markiert) auf einen integrierten Leuchtschirm (B). Die Helligkeit des Abbilds eines Aluminiumkeils (gemeinsam mit Silberplatte mit Σ bezeichnet) wurde mit der Helligkeit einer Silberplatte verglichen. Der Name des Gerät leitet sich davon ab, dass "das Auge des Beobachters dem Tageslicht verborgen ist." Abbildung nach Christen [1913a], S. 16.

Die numerische Röhrenhärte wurde durch die mittlere Dicke des Keils zwischen den Spalträndern definiert. Die Einheiten des Kryptoradiometers wurden nach einiger Zeit modifiziert, wie Christen berichtete: "Dem alten Härtegrad 2 entspricht an der neuen Skala der Wert 6, dem alten Wert 6 entspricht der neue Wert 7, dem alten Wert 8 entspricht der neue Wert 10^{24} .

²³Wehnelt [1904], S. 167

²⁴Klingelfuß: "Das Sklerometer usw." Strahlentherapie 3, Heft 2, um S. 809, nach Christen [1914-1915], S. 249

Der von Wehnelt konstruierte Härtemesser wurde "Kryptoradiometer" genannt, da "das Auge des Beobachters dem Tageslicht verborgen"²⁵ war. Es wurde von der Firma Rzewuski hergestellt²⁶ und von der Firma Reiniger, Gebbert & Schall vertrieben.

Eine modifizierte Form des Kryptoradiometers, die zwei Keile enthielt, wurde ab ca. 1912 vertrieben. Diese Form ging zurück auf die Vorstellung des Herstellers *Rzewuski*, der zugleich einen ""Universalhärtemesser" mit drei Skalen nach Wehnelt, Benoist-Walter und Benoist"²⁷ entwarf:

"Das Instrument besteht aus zwei gleich langen gradlinig begrenzten Keilen aus technisch reinem Aluminium [...] die Keile haben eine Steigung von 1:10 [...] Der eine Keil ist mittels Zahnstange und Trieb über den anderen verschiebbar gemacht. Wird nun dieser Keil über den festen geschoben, so ergibt sich eine planparallele Aluminiumschicht, die bei je 1 mm Verschiebung des beweglichen Keiles 0, 1 mm stärker wird. [...] Halten wir das Instrument vor eine im Betriebe befindliche Röntgenröhre, so sehen wir drei meistens verschiedene helle Felder, das mittlere ist das Aluminium, unten die Benoistsilberplatte, oben die Wehneltsilberplatte. Wenn wir nun nach Benoist oder Benoist-Walter messen wollen, verschieben wir den beweglichen Aluminiumkeil mittels des Trieben so lange, bis das mittlere Feld gleich hell wie das untere erscheint, soll nach Wehnelt gemessen werden, so vergleichen wir das obere Feld mit dem mittleren."²⁸

4.3 Elektrische Härteskalen

Alternativ zur Verwendung von Helligkeitsvergleichen zu Zwecken der Härtemessung existierte die Idee, verschiedene elektrische Eigenschaften des Röntgenröhren-Stromkreises zur Charakterisierung zu verwenden. Verfahren dieser Art boten u.a. den Vorteil, dass die Härtebestimmung während der diagnostischen oder therapeutischen Bestrahlung stattfinden konnte, Änderungen also sofort und nicht erst nach Unterbrechung der Bestrahlung detektiert werden konnten. Außerdem musste kein Härtemesser in den Strahlengang gehalten werden, was den Händen der Experimentierenden durch geringere Strahlenbelastung zugute kam.

²⁵Christen [1913a], S. 16

²⁶Rzewuski [1912-1913], S. 271

²⁷Rzewuski [1912-1913], S. 271

²⁸Rzewuski [1912-1913], S. 270

4.3.1 Parallele Funkenstrecke

Einer der ersten Versuche, die Härte von Röntgenstrahlen auf elektrischem Wege zu messen, geht auf den französischen Arzt Antoine Béclère (1856 – 1939) zurück, der eine Messung der "parallelen Funkenstrecke" anstrebte. Das Wort "parallel" ist hier nicht geometrisch zu verstehen sondern als Ausdruck für ein "Parallelgehen", also eine Proportionalität. Dies spiegelt sich auch in der englischen Bezeichnung "equivalent spark gap" wider. Im Jahr 1900 beschrieb Béclère also ein Messinstrument, mit dem es möglich sein sollte, die Strecke, die ein Funken im Messkreislauf eben noch zu überwinden vermochte, mit dem Härtegrad der zu vermessenden Röhre zu korrelieren: das Spintermeter²⁹, welches von einem Herrn [Louis] Drault konstruiert wurde³⁰. Von Joseph Belot (1876 – 1953) wurde es einige Jahre später folgendermaßen beschrieben (s. Abb. 4.7):

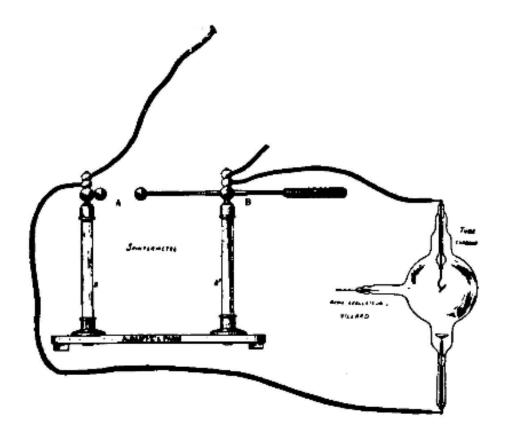


Abbildung 4.7: Instrument zur Härtemessung: Spintermeter nach Béclère. Mit dem Spintermeter konnte man die sog. parallele Funkenstrecke messen – die Strecke, die ein elektrischer Funken im Messkreislauf eben noch überwinden konnte. Die Funkenstrecke wurde als Maß für den Widerstand der Röntgenröhre und damit der Durchdringungsfähigkeit der Strahlung gesehen. Abbildung aus Belot [1905a], S. 67.

³⁰Belot [1905a], S. 44

²⁹Béclère [1900]. Leider muss im Folgenden auf Sekundärquellen zurückgegriffen werden.

"It consists essentially of a graduated metallic rod, terminated by a ball at one end, and an insulating handle at the other, working smoothly in a metallic tube mounted on an insulating support. The ball can thus be adjusted at a greater or less distance from a similar metallic ball, mounted on a second insulating pillar mounted at a distance of some 10 inches from the first. The whole is supported on a wooden base. [...] The spintermeter is thus placed in the circuit which drives the focus-tube in parallel with the tube. If the two balls are near enough, a spark passes between them when the current is turned on. The adjustable ball is drawn back until the sparking becomes intermittent. The length of the spark-gap may then be read off the graduated rod. This measurement of the 'equivalent spark' enables us to determine the resistance between the electrodes of the focus-tube."³¹

Belot gab die Funkenstrecke als ein indirektes Maß für die Durchdringungsfähigkeit von Röntgenstrahlen an und betrachtete sie als äquivalent zu einer Messung des Widerstandes einer Röntgenröhre³².

Zum Zeitpunkt der ersten Beschreibung des Béclèreschen Spintermeters hatte sich die Verwendung von Härteskalen noch kaum durchgesetzt, die Röhrenhärte wurde lediglich in mehr oder weniger weich, mittel oder hart unterteilt. Béclère fand es daher für die Zukunft wünschenswert, eine Skala mit Zahlenwerten einzuführen.

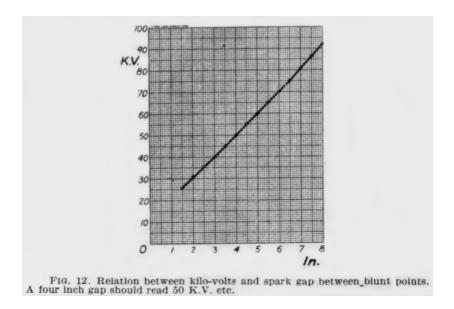


Abbildung 4.8: Lineare Beziehung zwischen Röhrenspannung in kV (y-Achse) und paralleler Funkenstrecke in inch (x-Achse). Abbildung aus Shearer [1917], S. 36.

³¹Belot [1905a], S. 44-45

³²Belot [1905a], S. 46

Die Verwendung der Funkenstrecke als Maß für Strahlhärten ließ nach Einführung verschiedener anderer "numerischer" Härteskalen (s.o) rasch nach und wurde bald als "bekanntlich ganz unverläßlich und ganz ungenügend"³³ beschrieben. Dennoch scheint die Größe an einigen Stellen weiterverwendet worden zu sein, wie ein Handbuch der U.S. Army von 1917 demonstriert. Dort wurden Spannungen zur Dosierungsberechnung verwendet. Aus diesem Grund findet sich in dem Buch ein Diagramm zur Konvertierung der Funkenstrecke in Röhrenspannungen (s. Abb. 4.8) und eine Faustregel zur Berechnung der Spannung: "The kilovoltage is approximately ten times the gap in inches plus ten"³⁴.

4.3.2 Spannungs-Härte-Korrelation

Diverse Methoden beschäftigen sich mit mit einer Korrelation von Härte und Röhrenspannung. Mit "Röhrenspannung" ist jeweils die Beschleunigungs- oder Anodenspannung gemeint, sie wurde teils mit "Sekundärspannung" bezeichnet. Diese Bezeichnung macht die Unterscheidung zur "Primärspannung", also der Heizspannung, deutlich, deren Einfluss auf die Härte jedoch nicht untersucht wurde. Es ist fraglich, ob bei den jeweils verwendeten Röhren sowohl Heiz- als auch Anodenspannung variiert werden konnten. Boten die jeweiligen Röntgenröhren jeweils nur eine fixe Heizspannung, erklärt dies, wieso die Verwendung einer einzigen Zahl zur Beschreibung der Härte in Betracht gezogen wurde: war die Heizspannung konstant, war auch der Widerstand der Röhre nicht durch diese Größe zu variieren. Bei einer variablen Heizspannung hätte man diese zusätzlich zur Beschleunigungsspannungs angeben müssen, um eine aussagekräftige Spannungs-Härte-Korrelation tätigen zu können.

Elektrostatisches Voltmeter

Mit einer möglichen Korrelation zwischen dem Härtegrad von Strahlung und der jeweiligen (Sekundär-) Spannung der Röntgenröhre beschäftigte sich insbesondere der französische Arzt Jean Alban Bergonié (1857 – 1925) um 1907. Das hierbei verwendete Messinstrument war ein elektrostatisches Voltmeter, das von Bergonié folgendermaßen beschrieben wurde (s. Abb. 4.9):

Zwischen zwei komplementär geladenen Platten a und c, welche an der Quelle, deren Spannung zu messen ist, befestigt waren, befand sich eine dritte, an einem Scharnier aufgehängte Platte b. Bei Ladung des Apparates bestand Anziehung zwischen b und c sowie Abstoßung zwischen a und b und daher eine induzierte Bewegung von b. Die

³³Kienböck [1914-1915a], S. 573

³⁴Shearer [1917], S. 38

Bewegung wurde durch einen Hebelarm auf einen Verstärker übertragen, wodurch ein Ausschlag auf einer Skala sichtbar wurde³⁵ (s. Abb. 4.10).

Am Anfang von Bergoniés Versuchsreihen mit einem elektrostatischen Voltmeter zur Härtemessung stand folgende Beobachtung: Bei Spannungsmessungen von Strahlung, die zuvor auf (Benoist-) Härte 7 eingestellt worden war, lagen die Ausschläge im obersten Bereich der Voltmeter-Skala, bei einer Benoist-Härte 5 der Strahlung im untersten Bereich. Die Benoist-Härte 6 deckte den mittleren Bereich der Skala ab³⁶.

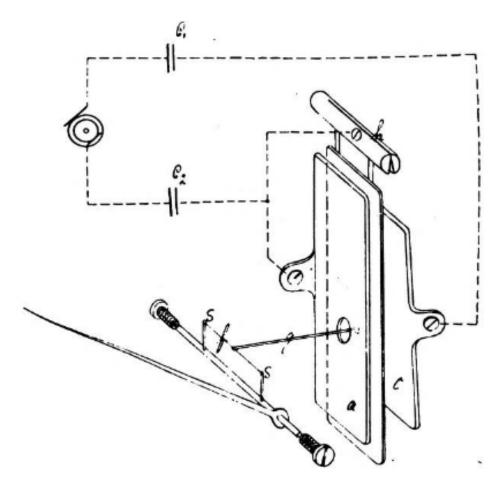


Abbildung 4.9: Schemazeichnung des elektrostatischen Voltmeters nach Bergonié: Zwischen zwei komplementär geladenen Platten a und c, welche an der Quelle, deren Spannung zu messen ist, befestigt sind, befindet sich eine dritte, an einem Scharnier aufgehängte Platte b. Bei Ladung des Apparates besteht Anziehung zwischen b und c sowie Abstoßung zwischen a und b und daher eine induzierte Bewegung von b. Die Bewegung wird durch einen Hebelarm auf einen Verstärker übertragen, wodurch ein Ausschlag auf einer Skala sichtbar wird. Abbildung aus Bergonié [1907b], S. 125.

 $^{^{35}}$ Bergonié [1907b], S. 125-126

³⁶Bergonié [1907b], S. 124

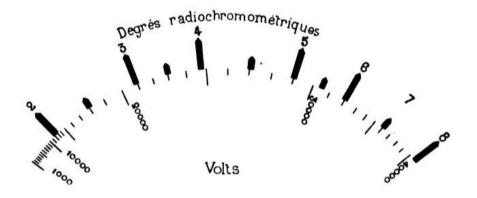


Abbildung 4.10: Skala des Bergonié-Voltmeters: es wurden sowohl die Benoist-Härtegrade (obere Skala) als auch die Spannung in Volt angegeben. Abbildung aus Bergonié [1907b], S. 132.

Um diese Beobachtung zu überprüfen und eine Strahlenhärte-Spannungs-Korrelation herzustellen, machte Bergonié hintereinander mehrere Röntgenaufnahmen des Benoistschen Radiochromometers. Bei einem konstanten Abstand von 15 cm vom Fokus wurde je 30 Sekunden belichtet und dabei Spannung und Strom notiert³⁷. Ausgewertet wurden dann nur die Aufnahmen, während denen die Spannung "nicht zu stark" variierte – wobei Bergonié die mögliche Schwankung in seiner Veröffentlichung nicht quantifizierte. Auf Grundlage dieser und ähnlicher Messungen mit verschiedenen Röntgenröhren etablierte Bergonié Relationen von Spannungen und Härte bei verschiedenen Stromstärken.

Für eine gewisse Spanne der Skala konnte Bergonié eine Proportionalität bzw. Korrelation zwischen Spannung und Härtegrad feststellen, jenseits von 42 kV konnte er aufgrund des nicht regelhaften Verhaltens der Röhre keine sicheren Werte mehr ablesen³⁸. Zum Abschluss seiner Messungen stellte er eine Härte-Spannungs-Tabelle auf (s. Tab. 4.1).

In beiden Veröffentlichungen von 1907 bot Bergonié Vergleichstabellen von Spannungsmessungen mit Benoist-Radiochromometer dar. Dabei waren die Messungen, die in den Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des Sciences (Paris) dargestellt waren, ohne Toleranzen oder Messfehler angegeben, während die Messungen aus den Archives d'électricité médicale (s. Tab. 4.1) pro Benoisthärtegrad Spannungsbereiche zwischen 3 kV und 13 kV hatten.

Der Schweizer Friedrich Wilhelm Klingelfuß (1859 – 1932), der für seine Härtemessmethode ebenfalls einen Bezug zwischen Sekundärspannung (von ihm Funkenpotential genannt) und Härtegrad verwendete, kritisierte an Bergoniés Methode, dass

³⁷Bergonié [1907b], S. 127

³⁸Bergonié [1907a], S. 29

Härtegrad [Benoist]	2	3	4	5	6	7	8
Spannung [kV]	12 - 18	19 - 22	23 - 26	27 - 30	30 - 34	34 - 38	38 - 41

Tabelle 4.1: Beziehungen zwischen Benoisthärte und Spannungsbereichen für elektrostatische Voltmeter. Werte nach Bergonié [1907b], S. 131.

dieser die Sekundärspannung an den Enden der Sekundärspule abgegriffen habe³⁹ und dass dies zu fehlerhaften Messungen führe.

Sklerometer nach Klingelfuß

Auch das von Klingelfuß vorgestellte Sklerometer baute – wie Bergoniés Methode der Härtemessung mit dem elektrostatischen Voltmeter – auf der Grundlage von Härtebestimmung durch Spannungsmessung auf. Das Instrument erhielt seinen Namen durch das griechische Wort $\sigma \kappa \lambda \eta \rho o \varsigma$, hart⁴⁰.

Bei den Spannungsmessungen trat laut Klingelfuß ein Phänomen auf, auf welches Bergonié nicht eingegangen war, das Klingelfuß jedoch dazu bewegte, das von Bergonié angewandte Messprinzip zu modifizieren. Der bei Entladungen erkennbare Effekt war, dass die Spannung einer Röntgenröhre in einer Größenordnung $10^5 / 10^4$ (an dieser Stelle keine Einheit angegeben, aus Klingelfuß [1908], S. 146, ergibt sich die Einheit Volt) schwankte bzw. hin und her pendelte. Es waren also zwei verschiedene Spannungen messbar.

Die untere Grenze der höheren Spannung nannte Klingelfuß Funkenpotential. Bei dieser Spannung trat eine Ionisation der Gasstrecke auf. Bei der niedrigeren Spannung wurden Röntgenstrahlen erzeugt; sie war auch proportional zur Härte der erzeugten Röntgenstrahlen⁴¹. Daher sollte nur die niedrigere und nicht die höhere Spannung gemessen werden. Klingelfuß ging davon aus, dass die höhere Spannung durch Oberschwingungen hervorgerufen würde, welche sich nur an den Spulenenden bilden würden. Daher sollte es möglich sein, nur die niedrigere Spannung (von Klingelfuß auch "Spannung der gedämpften Welle" genannt) zu messen, wenn man einen Spannungsmesser in der Mitte der Sekundärspule anschloss. Der Spannungsmesser sollte ein elektrostatischer oder aber ein "besonders [...] geeichte[s] Hitzedrahtinstrument"⁴² sein. Das von Klingelfuß verwendet Prinzip, in der Mitte der Spule die niedrigere Spannung zu messen, stand im Gegensatz zu den Messungen von Bergonié, der die "unkontrollierbare

³⁹Klingelfuß [1910b], S. 329

⁴⁰Christen [1913a], S. 21

⁴¹Klingelfuß [1910a], S. 329

 $^{^{42}}$ Klingelfuß [1908], S. 146

Spannung der Oberschwingung" mitmaß.

Christen kritisierte in seiner "Messungs"-Monograpie, dass Klingelfuß' Sklerometer nicht in Volt geeicht war. Dadurch, dass die Messung nicht über alle Spulenwindungen erfolgte, war das Messergebnis auch nicht die Sekundärspannung, sondern ein der Sekundärspannung proportionaler Wert. Nach Christens Ansicht konnte man die Sekundärspannung jedoch aus dem "absoluten Wert der wirksamen Sekundärspannung jederzeit berechnen, indem man den Klingelfußschen Skalenwert mit 226 Volt multipliziert"⁴³.

In den Verhandlungen des vierten deutschen Röntgenkongresses (1908) beschrieb Klingelfuß die zu seinem Härtemesser gehörige Skala (s. Abb. 4.11): "das Zeigerinstrument [kann] bis zur Härte 8 Benoist – 6 BW in 150 Skalenteile unterteilt werden, die bis 80 Teile eine Ablesung von 5 zu 5, und von dort an von 1 zu 1 Einheit ermöglicht."⁴⁴

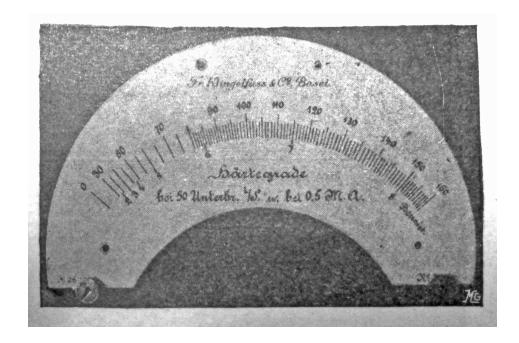


Abbildung 4.11: Skala des Klingelfuß-Sklerometers. Einteilung in Sklerometergrade (0 bis 160, oberer Teil der Skala) sowie Benoist (2 bis 8, unterer Teil der Skala). Abbildung aus Klingelfuß [1908], S. 147.

Durch die Hilfsmittel des Spannungsmessers und der Skala sollte man ein "direkt zeigendes Härtemeßinstrument"⁴⁵ erhalten. Unter der Annahme, dass man mit höheren Spannungen größere Strahlenhärten erreichen könne⁴⁶, sollte es laut Klingelfuß dann

⁴³Christen [1913a], S. 21

⁴⁴Klingelfuß [1908], S. 147

⁴⁵Klingelfuß [1910b], S. 382

⁴⁶Klingelfuß [1909], S. 64

möglich sein, mit dem Sklerometer "innerhalb der möglichen Grenzen an einer gegebenen Röhre die Einstellung auf eine gewollte Strahlenhärte vorzunehmen."

Klingelfuß beschrieb bereits 1908 seine Experimente zusammenfassend folgendermaßen:

"Die Bedeutung dieser Neuerung in der Meßtechnik der Röntgenstrahlen tritt erst recht zutage durch die von mir gemachte Beobachtung, daß der Bestrahlungseffekt der von einer Röhre ausgesandten Röntgenstrahlen direkt proportional ist 1. der am Milliampèremeter abgelesenen Stromstärke, 2. der auf der neuen Skala angegebenen Härte [...] der Expositionszeit – gleiche Abstände vorausgesetzt."⁴⁷

Bauersches Qualimeter

Der Ingenieur Heinz Bauer (1879 – 1915) präsentierte sein Qualimeter sowohl auf dem fünften Röntgenkongress (1909) als auch auf dem Kongress des Jahres 1911. Das Instrument sollte zur Messung der Röhrenhärte dienen, welche Bauer für "eine Funktion der Spannung des Sekundärstroms"⁴⁸ hielt. Bauer beschrieb die Konstruktion des Qualimeters folgendermaßen (s. Abb. 4.12):

"[Das Instrument] besteht im wesentlichen aus zwei feststehenden Flächen, zwischen denen sich eine Achse befindet, an der beweglich zwei Flügel angebracht sind. Bei Anschluß an eine Hochspannungsleitung laden sich Flügel und Metallflächen gleichnamig auf, und es kommt zu einer Abstoßung. "⁴⁹

Den Flügeln des Qualimeters war ein Kondensator vorgeschaltet, um die Empfindlichkeit herunterzusetzen. Durch die drehbare Achse wurde die bei der elektrostatischen Abstoßung der Flügel entstehende Bewegung auf eine Skala übertragen, wobei die Größe des Ausschlags mit wachsender Spannung anstieg. Die Skala hatte Bauer so ausgelegt, dass "die Absorption, die die Strahlen in Bleiblech erfahren, zur Grundlage dient. Jeder Grad bedeutet ein Zehntel Millimeter Bleiblech, so daß bei einer Stellung des Zeigers beispielsweise auf vier der Ausschlag besagt, daß die von der Röhre ausgehenden Strahlen bei vier Zehntel Millimeter Bleiblech absorbiert sind."⁵⁰ Der Anschluss des Qualimeters an die "Hochspannungsleitung" ermöglichte insgesamt die "Kontrolle der Röhrenhärte während der ganzen Betriebsdauer von einem strahlensicheren Ort aus."⁵¹

⁴⁷Klingelfuß [1908], S. 147

⁴⁸Bauer [1911], S. 137

⁴⁹Bauer [1911], S. 137

⁵⁰Bauer [1911], S. 138

⁵¹Bauer [1911], S. 138

Walter stellte seine zahlreichen Versuche zum Bauerschen Qualimeter in den auf den dem siebten Röntgenkongress folgenden Fortschritten auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen vor. Er hatte für verschiedene Versuchsaufbauten und -schaltungen den Härtegrad der Röhre sowohl mit der Benoist-Walter-Skala als auch mit dem Bauerschen Qualimeter gemessen und kam zu dem Schluss,

"dass [das Qualimeter] […] der eingangs erwähnten Aufgabe, d.h. also der Kontrolle der Härte der Röntgenröhre, zwar beim Funkeninduktor in der Regel recht gut entspricht und dann also tatsächlich eine schätzenswerte Bereicherung des Laboratoriums darstellt, dass es dagegen bei den Hochspannungsgleichrichtern dieser Aufgabe oft nur in sehr unbefriedigender Weise gerecht wird und hier in vielen Fällen sogar vollständig versagt."⁵²

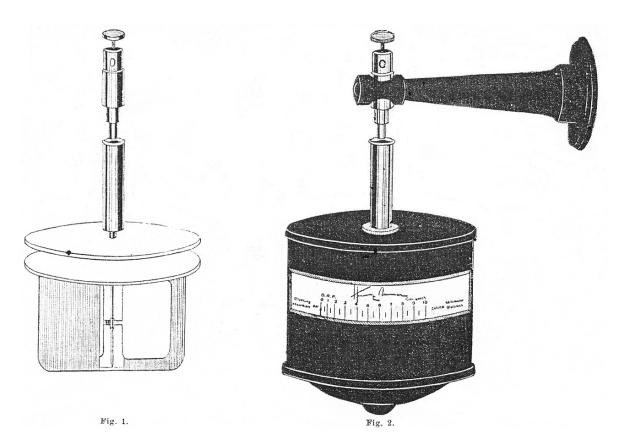


Abbildung 4.12: Darstellung des Bauerschen Qualimeters: Links ist der funktionelle Teil dargestellt, der aus "Flügeln" und Metallflächen, die sich nach Aufladung abstießen, bestand. Rechts ist das Gehäuse mit Skala abgebildet. Abbildungen aus Walter [1911], S. 213.

Insgesamt befand Walter, das Qualimeter könne "noch keineswegs als ein vollgültiger Ersatz der Härteskala angesehen werden [...] – was übrigens vom Fabrikanten auch nicht

⁵²Walter [1911], S. 214

beansprucht"⁵³ würde. Andererseits sah Walter gegenüber einer Messung mit dem Milliampèremeter den Vorteil, dass bei während des Betriebs auftretenden Röhrenhärte-Schwankungen (mit gewissen Einschränkungen) die Größe dieser Schwankungen mit dem Qualimeter quantifizierbar sein sollten, während man beim Milliampèremeter nur wahrnehmen konnte, dass eine Veränderung der Röhrenhärte stattfand⁵⁴. Wollte ein Anwender jedoch das Qualimeter für die "Bestimmung der Strahlendosis" werden, müsse er dieses "nicht bloss für jede Schaltung seines Hochspannungsapparates, sondern auch für jede Schaltung seines Unterbrechers, sowie drittens auch für jede Belastung seiner Röhre besonders eichen."⁵⁵

Auf diese Ausführungen Walters folgte im nächsten Band der *RöFo* ein Beitrag Holzknechts⁵⁶, bei dem er den Einsatz des Bauerschen Qualimeters in der klinischen Routine verteidigte. Holzknecht argumentierte, Walter habe das Qualimeter für "exakte Messungen"⁵⁷ und nicht für den Holzknechts Ansicht nach relevanten Einsatzzweck – gröbere Messkontrollen bei der Verwendung durch Ärzte – getestet. Insbesondere für die Kontrolle der Röhrenhärte während Röntgenaufnahmen fand Holzknecht das Qualimeter jedoch sehr hilfreich.

Von der Dosierung mittels elektrischer Skalen hielt der Arzt Holzknecht offenbar generell wenig, wodurch sich der grundsätzliche Konflikt zwischen Mediziner und Physiker als Entwickler von Messinstrumenten deutlich machte:

"Was soll der Praktiker zu der Zumutung der Physiker sagen, dass er diesem schwierigen Konstanzbetrieb mit seinen Minutiositäten erlernen soll, bloss um in der Lage zu sein, die einfache direkte Dosierung mit der komplizierten Berechnung der indirekten zu vertauschen. [...] Bauer hat nun freilich das Qualimeter nicht speziell für diesen Zweck gebaut, sondern seinen Härtemesser als solchen in die Welt gesetzt und es den Ärzten überlassen, sich seiner zu entsprechenden Zwecken zu bedienen. Und es hat sich überall, nur dafür nicht, wofür Walter es geprüft hat, als sehr nützlich erwiesen."⁵⁸

Walters Reaktion in der folgenden Ausgabe der *RöFo* lautet beschwichtigend: "Ich gebe also gerne zu, dass das Qualimeter [...] zur Kontrolle der Röhrenhärte ein erheblich bequemeres und auch für den Beobachter selbst strahlensichereres Arbeiten gestattet als die Härteskalen"⁵⁹ – strahlensicherer deshalb, weil der Ablesende kein Messmittel in

⁵³Walter [1911], S. 214

⁵⁴Walter [1911], S. 215

⁵⁵Walter [1911], S. 224

⁵⁶im Artikel Holzknecht [1911-1912] ist "Doz. Dr. H. Holzknecht" als Autor angegeben, es handelt sich jedoch wohl um Guido Holzknecht

⁵⁷Holzknecht [1911-1912], S. 270

⁵⁸Holzknecht [1911-1912], S. 271

⁵⁹Walter [1911-1912], S. 359

den Strahlengang halten musste. Der "normal funktionierende" Bereich des Qualimeters war jedoch eingeschränkt, wie Walter nochmals betonte.

Christen wiederum betonte, dass der vom Qualimeter angezeigte Härtegrad bei steigender Belastung unverhältnismäßig stark anstieg: "Dies ist ein weiterer Grund, um dem Qualimeter den Wert eines absoluten Instrumentes abzusprechen. Dementsprechend hat die Aufnahme der Bauerskala in die Vergleichstabelle […] wenig Wert. Sie erfolgte nur der Vollständigkeit halber, gestützt auf die Angaben ihres Erfinders, dem auch die Verantwortlichkeit für deren Richtigkeit überlassen werden muß."⁶⁰

4.3.3 Radiosklerometer nach Villard

Das Radiosklerometer, welches im Jahr 1908 von Paul Villard (1860 – 1934) vorgestellt wurde, stellte ebenfalls ein Instrument zur Messung des Durchdringungsvermögens (pouvoir pénétrant) bzw. der Strahlenhärte dar. Der Aufbau des Radiosklerometers (s. Abb. 4.13) wurde von Villard folgendermaßen beschrieben:

"En principe, cet apparail est consititué par un condensateur double à armature centrale commune qui sert de recepteur au rayonnement. L'armature centrale qui sert de *filtre* aux rayons X communique avec l'aiguille d'un électromètre dont les quadrants communique avec les deux armatures du condensateur et avec une source à potentiel fixe."⁶¹

Je nach Härtegrad der Strahlung stellte sich Villard vor, dass eine kleinere Menge Strahlung an der weiter vom Eintrittsfenster der Strahlung entfernten Kondensatorplatte A messbar sein sollte als bei der unmittelbar am Eintrittsfenster liegenden Kondensatorplatte, da die Strahlung durch die zentrale Platte A geschwächt wurde. Diese Tatsache sollte ausgenutzt und die jeweiligen Ionisationen mittels Elektrometer gemessen werden:

"Le rapport des ionisations entre AB et AC ne dépendra donc pas de l'intensité des rayons incidents, mais seulement de leur pouvoir pénétrant et pourra par suite servir de mesure à ce [sic] pouvoir." 62

Die Ablesung des Durchdringungsvermögens erfolgte auf einer Skala, welche von hinten mit einer Lampe geringer Leuchtkraft beleuchtet wurde. Die Skala besaß zwei verschiedene Einteilungen: eine, die in 100 gleiche Teile, und eine, die in Benoisteinheiten geteilt war⁶³.

⁶⁰Christen [1913a], S. 23

⁶¹Villard [1908a], S. 236

⁶²Villard [1908b], S. 694

⁶³Villard [1908a], S. 238

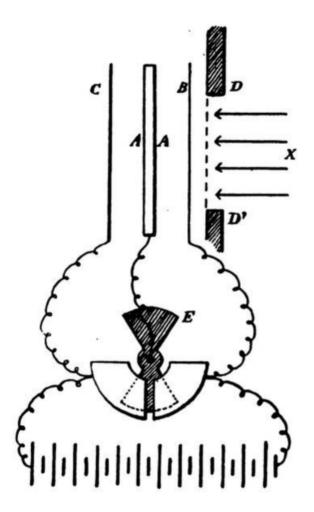


Abbildung 4.13: Schemazeichnung des Villardschen Radiosklerometers. Die eintretende Strahlung x wurde von der zentralen Platte A geschwächt, aus der Differenz der an S und C gemessenen "Ionisationen" wurde die Schwächung und damit die Durchdringungsfähigkeit der Strahlung gemessen. Abbildung aus Villard [1908b], S. 693

Das Radiosklerometer diente damit zur Messung der Strahlenhärte unter Betriebsbedingungen⁶⁴; es konnte auch für Radiummessungen verwendet werden. Zusätzlich zur Härtemessungsfunktion schlug Villard vor, eine weitere Skala des Radiosklerometers als "compteur de quantité"⁶⁵, also als "Quantitätszähler", zu verwenden. Diese Funktion soll in Kap. 6.2 thematisiert werden. Die Messung und Anzeige des Durchdringungsvermögens sollte jedoch von Intensität und Quantität unabhängig sein⁶⁶.

⁶⁴Villard [1908a], S. 237

⁶⁵Villard [1908b], S. 696

⁶⁶Villard [1908a], S. 236

4.4 Halbwertschicht

Die Halbwertschicht als solche wurde als Mittel zur Messung der Härte einer Strahlung vor allem von Christen verwendet und propagiert. Ein von Kienböck verwendetes Prinzip, das nicht zwangsläufig die Tiefe in jener Schicht maß, in welcher sich die "Intensität" der Strahlung auf die Hälfte verringert hatte, sondern unabhängig von der prozentualen Verringerung die Intensität in einer bestimmten Tiefe maß, soll in Kap. 5.5.1 näher behandelt werden.

Die Halbwertschicht wurde 1910 von Christen vorgestellt und in den folgenden Jahren wies der Autor wiederholt auf die Vorzüge ihrer Verwendung hin. Sie sollte als Einheit für die Messung der Strahlungsqualität dienen und dabei leichter verständlich sein als Größen wie Absorptionskoeffizienten: "Man kann sich leicht die Vorstellung bilden, dass es für jede Strahlung in Kombination mit irgendeinem absorbierenden Material eine bestimmte Schichtdicke geben muss, in welcher gerade die Hälfte der Strahlungsenergie absorbiert wird."⁶⁷ Rein qualitativ bedeutete dies, dass die Halbwertschicht eines gegebenen Materials mit wachsender Strahlenhärte größer wurde.

Als Referenzmaterial für die Bestimmung der Halbwertschicht schlug Christen destilliertes Wasser vor. Dieses Material wählte er auf Grundlage der Versuche von Georg Clemens Perthes (1869 – 1927), welcher schrieb,

"dass sämtliche Weichteile des menschlichen Körpers mit Ausnahme derer, die spezifisch leichter sind als Wasser (Lunge und Fettgewebe) in ihrer Durchlässigkeit für Röntgenstrahlen der des destillierten Wassers ganz ausserordentlich nahe kommen. Nur Lunge und Fettgewebe sind durchlässiger, die übrigen erweisen sich bei radiographischen Versuchen mit sehr weichen Röhren als ganz wenig undurchlässiger."

Um die ähnliche bzw. abweichende "Durchlässigkeit" von verschiedenen Materialien sichtbar zu machen, wurden Röntgenaufnahmen oder Fluoreszenzbilder der zu testenden Materialien, jeweils von Wasser umgeben, gemacht. Zeichneten sich auf dem jeweiligen Bild verschiedene Farbtöne ab, unterschieden sich die Durchlässigkeiten. Hatte das Material die gleiche Durchlässigkeit wie Wasser, war es auf dem Bild nicht vom Wasser zu unterscheiden⁶⁹.

Zur Bestimmung der Halbwertschicht wurden Röntgenaufnahmen eines treppenförmigen mit Wasser gefüllten Zelluloidgefäßes (s. Abb. 4.14) gemacht. Bei diesen Aufnahmen wurde

⁶⁷Christen [1910b], S. 351

⁶⁸Perthes [1904-1905], S. 18

⁶⁹Perthes [1904-1905], S. 17

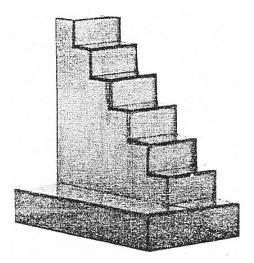


Abbildung 4.14: Wassertreppe zur Bestimmung der Halbwertschicht: Es wurden Röntgenaufnahmen eines mit Wasser gefüllten treppenförmigen Zelluloidgefäßes gemacht, wobei nach der Hälfte der Belichtungszeit eine "Vergleichsstufe" mit Blei abgedeckt wurde. Die Halbwertschicht wurde dann diejenige Stufe genannt, deren Helligkeit auf dem fertigen Röntgenbild der abgedeckten Vergleichsstufe entsprach. Abbildung aus Christen [1910-1911], S. 278.

"nach Ablauf der halben Belichtungszeit die Vergleichsstufe mit Blei bedeckt und dann erst die Belichtung fortgesetzt. Jene Stufe der Treppe, welche auf der photographischen Platte nach der Entwicklung den gleichen Ton wie die Vergleichsstufe zeigt, stellt die HWS dar."⁷⁰

Die Halbwertschicht in destilliertem Wasser stellte für Christen "das denkbar beste Mass für die Strahlenqualität [dar], nicht nur weil sie sich aus gewissen Experimenten direkt bestimmen lässt, sondern weil sie ein absolutes Mass darstellt, im Gegensatz zu allen konventionellen Härteskalen."⁷¹ Auf dieses Prinzip baute er daher auch sein eigenes Härte-Messinstrument auf, den "absoluten Härtemesser" (s. Kap 4.4.1).

Da insbesondere Christen lange mit der Annahme arbeitete, dass die von Röntgenröhren ausgesandten Strahlen "für unseren praktischen Zwecke"⁷² homogen seien, war auch das Prinzip der Halbwertschicht zunächst nur für homogene Strahlung vorgesehen. Nach vermehrter Auseinandersetzung vor allem mit dem Ingenieur Friedrich Dessauer (1881 – 1963) konnte Christen seine Annahme der Homogenität "für praktische Zwecke" nicht mehr aufrecht erhalten und erweiterte 1915 den Begriff der Halbwertschicht auch auf heterogene Strahlengemische. Die Formulierungen von 1915 wirken allerdings noch

⁷⁰Kienböck [1914-1915a], S. 569

⁷¹Christen [1910b], S. 351

⁷²Christen [1913a], S. 9

oberflächlich und nicht voll durchdacht, für die Heterogenität der Strahlung wird ein sehr einfaches Modell angenommen. Dies spiegelt sich u.a. an folgenden Aussagen wider: "die Zunahme [der Halbwertschichtdicke] ist um so stärker, je heterogener die Strahlung ist. [...] Die Heterogenität wird in einfachster Weise definiert und gemessen als Quotient der ersten zwei Halbwertschichten: $h = a_2/a_1$."⁷³

4.4.1 Absoluter Härtemesser nach Christen

Nachdem Christen die Halbwertschicht in destilliertem Wasser als Maßeinheit "für die Röntgenstrahlenqualität (Durchdringungsfähigkeit, Härte)"⁷⁴ vorgeschlagen hatte, beschrieb er ab dem Jahr 1912 ein Messmittel für diese physikalische Größe. Da Wasser selbst als Messmittel denkbar ungeeignet war, wählte Christen Bakelit als Vergleichsmaterial aus, nachdem er mit der Methode von Perthes (s.o.) hatte bestimmen lassen, dass das Absorptionsvermögen von Wasser und Bakelit vergleichbar war. Die Suche nach einem geeigneten Material wurde nicht von Christen persönlich, sondern von "den Herren Ingenieuren der Reiniger, Gebbert & Schall A.-G."⁷⁵ – Namen wurden nicht genannt – durchgeführt; diese Firma vertrieb später auch das fertige Messinstrument: den "absoluten Härtemesser".

Das Material Bakelit, ein synthetisches Harz⁷⁶ aus Phenol und Formaldehyd, war zu diesem Zeitpunkt noch nicht lange bekannt, es war im Jahre 1909 von dem Chemiker Leo Hendrik Baekeland (1863 – 1944) entdeckt und vorgestellt worden⁷⁷.

Christen suchte nun nach einer Möglichkeit, die Dicke einer Schicht Bakelit zu finden, die die Hälfte einer gegebenen Strahlung absorbierte. Dafür verwendete er

"eine Scheibe mit regelmäßig verteilten Löchern, deren Durchmesser und gegenseitige Abstände so berechnet sind, daß die Summe aller Löcher gerade halb so groß ist wie die Fläche der ganzen Scheibe. Die andere Hälfte bildet dann das stehengebliebene Metall, aus welchem die Scheibe besteht, und welches so dick genommen wurde, daß auch von der härtesten, in Betracht kommenden Strahlung nicht so viel durchgeht, daß eine sichtbare Fluoreszenz erregt würde."⁷⁸

Diese Scheibe, von Christen "Halbwertsplatte" genannt, sollte die Strahlung auf die halbe Intensität reduzieren, sofern die Platte in eine solche Entfernung von einem Leuchtschirm gebracht wurde, dass nicht mehr die einzelnen Löcher, sondern stattdessen eine gleichmäßige Helligkeit sichtbar war. Damit verglichen wurde die durch eine

⁷³Christen [1915-1916a], S. 228

⁷⁴Christen [1913a], S. 21

⁷⁵Christen [1913a], S. 21

⁷⁶Bottler [1910], S. 209

⁷⁷Braun und Collin [2010], S. 194

⁷⁸Christen [1912], S. 326

verschiebbare Treppe aus Bakelit fallende Strahlung. Die Dicke der Bakelithalbwertschicht ergab sich dann aus der Dicke derjenigen Treppenstufe⁷⁹, bei der die gleiche Helligkeit wie bei der Halbwertsplatte sichtbar wurde. Die Treppe war in Stufen von 2 mm Höhe aufgeteilt und reichte von 2 mm bis 3 cm⁸⁰.

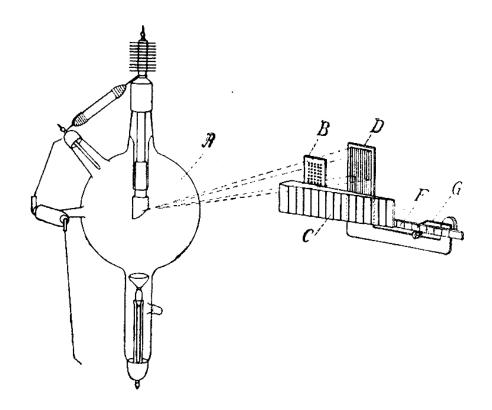


Abbildung 4.15: Schemazeichnung des absoluten Härtemessers: A Röntgenröhre, B Halbwertscheibe, C Bakelittreppe, D Leuchtschirm, F Skala, G Zeiger. Abbildung aus Christen [1913a], S. 26.

Das fertige Instrument (Schemazeichnung s. Abb. 4.15) besaß zusätzlich zu Halbwertsplatte und Bakelittreppe eine "Metallplatte […], welche den Körper des Beobachters vor den Röntgenstrahlen schützt. Außerdem ist ein Kryptoskop angebracht, welches die Möglichkeit bietet, die Messung im unverdunkelten Raume vorzunehmen."⁸¹

Christen gab eine detaillierte Anleitung für die Handhabung des "absoluten Härtemessers":

1. "Man faßt mit der linken Hand den Griff des Instruments, stellt sich in angemessene Entfernung (etwa 60 cm) von der Röhre, legt das Gesicht dicht an das Kryptoskop, und visiert gegen die leuchtende Röntgenröhre.

⁷⁹Christen [1912], S. 327

⁸⁰Christen [1913a], S. 27

⁸¹Christen [1912], S. 328

- 2. Man orientiert das Instrument so, daß
 - a. die Vergleichsfelder die größtmögliche Breite haben und
 - b. an der Grenze der beiden Vergleichsfelder weder ein dunkler noch ein heller Grenzstreifen auftritt. Nur dann sind die Strahlen parallel zu den Achsen der Löcher der Halbwertscheibe.
- 3. Man dreht den Triebknopf F so weit, bis beide Vergleichsfelder gleich hell erscheinen.
- 4. Man liest an der Marke G die Halbwertschicht der Strahlung in Zentimetern ab."⁸²

Anders als andere Wissenschaftler und Ärzte, die neue Messsysteme einführten, legte Christen Wert darauf, dass die einzelnen Härtegerade des "absoluten Härtemessers" nicht mit "x Christen" oder "x C" bezeichnet wurden. Dies lag jedoch nicht daran, dass er nicht die persönliche Eitelkeit gehabt hätte, eine Einheit nach sich selber zu benennen wie beispielsweise Holzknecht. Christen stellte einen anderen Anspruch an die von ihm eingeführte Einheit: "Es handelt sich durchaus nicht etwa um eine neue Skala, die nun gerade der persönlichen Liebhaberei des Herrn Christen eine bestimmte Nummerierung verdankt, sondern um eine Einführung einer physikalisch wohl definierten Maßeinheit"⁸³. Statt einer Angabe der Strahlhärten "in Christen" forderte Christen, die Strahlung folgendermaßen zu klassifizieren: "Wenn […] eine gegebene Strahlung in einer Wasserschicht von 1,5 cm auf die Hälfte ihrer Intensität reduziert wird, so ist sie eine "1,5 cm-Strahlung", ihr Härtegrad entspricht einer Halbwertschicht von 1,5 cm "⁸⁴

Die Halbwertschicht als Einheit für die Strahlungsqualität wurde von vielen Ärzten und Physikern angenommen und verwendet. Noch 1920 wurde sie als "zurzeit die bequemste Definition der Qualität der Strahlung"⁸⁵ bezeichnet. Es wurde jedoch auch der Wunsch nach einer praktischen Definition über die Wellenlänge geäußert.

4.5 Vergleich der Härteskalen

Der ausführlichste Vergleich der verschiedenen vorgestellten Härteskalen findet sich in Christens Veröffentlichungen. Nachdem er seine Vorstellung einer Härteskala, das Halbwertschicht-System, vorgestellt hatte, fügte er im gleichen Artikel eine tabellarische Gegenüberstellung der einzelnen Härteskalen hinzu, "deren Ausarbeitung die Herren von Reiniger, Gebbert & Schall A.-G. [ihm] in liebenswürdiger Weise abgenommen"⁸⁶ hatten. Die Werte dieser Tabelle sind in Abb. 4.16 graphisch wiedergeben,

⁸²Christen [1912], S. 328

⁸³Christen [1914], S. 252

⁸⁴Christen [1914], S. 252-253

⁸⁵Heidenhain [1920], S. 419

⁸⁶Christen [1912], S. 329

Halbwertwertschicht [cm]	0,4	0,6	0,8	1,2	1,4
Härte	sehr weich	weich	mittel	hart	sehr hart

Tabelle 4.2: Zuordnung der Halbwertschichten zu den gebräuchlichen Härtebezeichnungen. Daten nach Christen [1912], S. 329.

lediglich auf das Sklerometer soll unten gesondert eingegangen werden.

Als Einordnungshilfe war zu den Halbwertschichten noch eine Härtezuordnung beigefügt (s. Tab. 4.2).

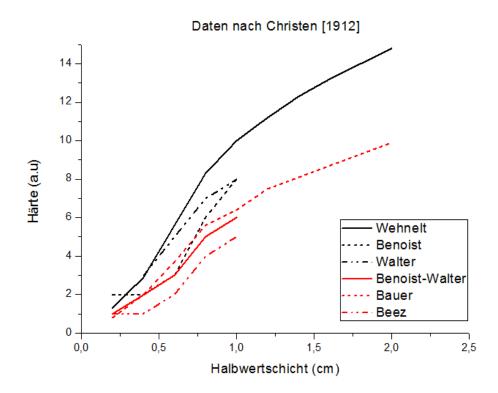


Abbildung 4.16: Vergleich der verschiedenen Härteskalen – Version von 1912. Die Skalen nach Wehnelt (Kryptoradiometer) und Bauer decken einem mehr als doppelt so großen Halbwertschichtenbereich ab wie die Skalen von Benoist, Walter, Benoist-Walter und Beez. Daten nach Christen [1912], S. 329.

Wie zu erwarten war, war Christen nicht der Einzige, der die verschiedenen Härteskalen verglich bzw. vergleichen ließ. Andere Forscher kamen z.T. zu anderen Ergebnissen⁸⁷ und brachten Christen dazu, die von ihm veröffentlichten Werte zu überprüfen. Letztendlich konnte er seine ursprünglichen Werte nicht halten und publizierte eine neue Tabelle, die nach eigenen Angaben mit den anderer Wissenschaftler deutlich bes-

⁸⁷Christen [1914-1915], S. 247

ser in Einklang stand. Christens neue Angaben sind in Abb. 4.17 wiedergegeben. Beim Vergleich der alten Werte (Abb. 4.16) mit den neuen Werten (Abb. 4.17) fällt auf, dass die alten Werte der verschiedenen Härteskalen im Wesentlichen auf den Bereich zwischen 0,2 cm und 1,2 cm Halbwertschicht beschränkt sind, während sich bei den neuen Werten alle Skalen über einen wesentlich größeren Halbwertschichtbereich erstrecken.

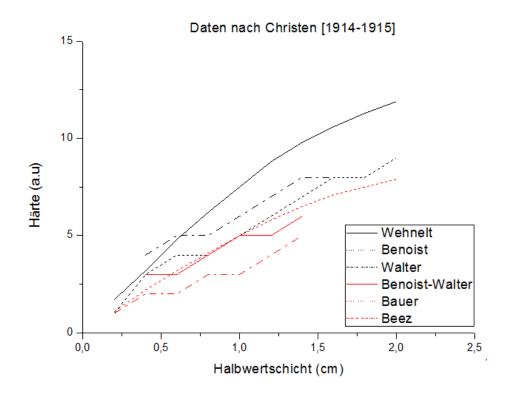


Abbildung 4.17: Vergleich der verschiedenen Härteskalen – Version von 1914. Die Skalen der Benoist- und Walterskalen decken nun den gleichen Halbwertschicht-Bereich ab wie die Wehneltskala. Daten nach Christen [1914-1915], S. 248

Das Klingelfußsche Sklerometer betrachtete Christen gesondert. Die Angaben nach Christen [1912] und Christen [1914-1915] sind in Abb. 4.18 gegenübergestellt. Für die Werte von 1912 gab Christen eine Formel zur Umrechnung von Sklerometergraden in Halbwertschichten an, die für Halbwertschichten größer als 0,65 cm gelten sollte: "Man kann dies durch folgende Gleichung ausdrücken: a=0,52 cm $+s\cdot0,9038$ cm, wobei a die Halbwertschicht und s den Sklerometergrad bedeutet."⁸⁸ Diese Formel konnte Christen zwar nach der Ermittlung neuer Vergleichstabellen nicht aufrecht erhalten, es ergab sich jedoch erneut eine gute Proportionalität.

Dem Vergleich der vielen verschiedenen Härteskalen fügte Christen abschließend ein Plädoyer für ein standardisiertes System zur Härtemessung an – und warb für die

⁸⁸Christen [1912], S. 329

Verwendung der Halbwertschicht.

"Wie gerne tadeln wir die Engländer, die sich von ihrem altmodischen komplizierten Maßsystemen nicht trennen können, und wie stolz sind wir auf die Idee, den Kubikzentimeter Wasser als Gewichtseinheit gewählt zu haben! Aber in der Messung der Röntgenstrahlenqualität treiben wir es viel schlimmer: So viele Gewichtssätze, wie wir Härteskalen, haben selbst die Engländer nicht. Und doch ist die Halbwertschicht destillierten Wassers, gemessen in Zentimetern, ein ebenso wohldefiniertes Maß für das Durchdringungsvermögen der Röntgenstrahlen, wie der Kubikzentimeter destillierten Wassers für das Gewicht."⁸⁹

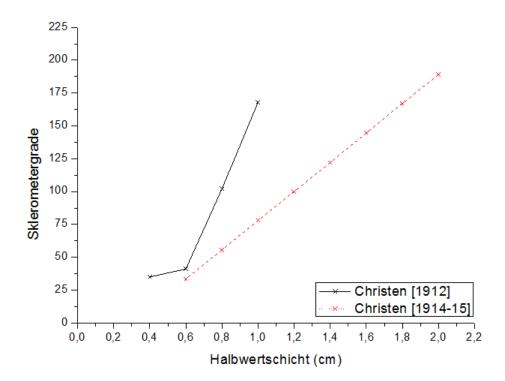


Abbildung 4.18: Vergleich Relation von Sklerometergrad und Halbwertschicht in den Versionen von 1912 und 1914. Daten nach Christen [1912], S. 329, und Christen [1914-1915], S. 248

Die Halbwertschicht – zwar nicht von Wasser, sondern von Metallen – hat sich in der Radiologie bis heute gehalten⁹⁰. Bei der Formulierung der Grundlagen des in der Strahlentherapie für Strahlhärte verwendeten Messprinzips spielte Christen ebenfalls eine wichtige Rolle (s.u.).

⁸⁹Christen [1914-1915], S. 252

⁹⁰Ishii et al. [2011]

4.6 Qualitätsindex

Die Wurzeln des heute verwendeten Verfahrens zur Bestimmung der Härte von Strahlung gehen auf die Zeit des Ersten Weltkriegs zurück⁹¹. Ausgangspunkt für die Entwicklung eines neuen Verfahrens war ein zunehmendes Verständnis für den Einfluss von Streustrahlung, die u.a. nach Auffassung des Erlanger Arztes Hermann Wintz (1887 – 1947) bei Verwendung der Halbwertschicht nicht ausreichend berücksichtigt war. Wintz schlug daher vor, man könne "entweder nur mit dem sog. Dosisquotienten rechnen, oder den Wert als die prozentuale Tiefendosis bezeichnen." Weiter spezifizierte er diesen Vorschlag nicht, so dass eine Konkretisierung durch Christen erfolgte, nachdem dieser das Halbwertschicht-System wegen der Heterogenität der Röntgenstrahlung nicht mehr aufrecht erhielt. Christen schlug dem Sonderausschuss für Strahlenmessung der Deutschen Röntgengesellschaft folgendes Vorgehen vor:

"1. Man bringt das Reagens auf den Körper A_1 [...] und gibt ihm damit eine Lage wie sie den Zellen der menschlichen Haut entspricht, die ja ebenfalls nicht nur die direkte Strahlung von der Röntgenröhre, sondern auch die rückwärts kommende Streustrahlung vom Körper empfängt, und mißt die Reaktion. 2. Man bedeckt das Reagens mit dem Körper A_2 [...] und mißt die Reaktion wieder. Das Verhältnis der beiden Reaktionsgrößen (bzw. das reziproke Verhältnis der Reaktionszeiten) ist dann gleich dem gesuchten Absorptionsquotienten und kann als eindeutiges Maß für den Härtegrad dienen."⁹³

Dabei legte Christen Wert auf eine ausreichende Größe der absorbierenden Körper A_1 und A_2 , damit eine Messung in einem "unendlich großen Körper"⁹⁴ imitiert werden sollte. Praktisch bedeutete dies, dass der Körper so groß sein sollte, dass eine Verringerung des Körpervolumens sich nicht in variierenden Messergebnissen widerspiegeln sollte. Das Reagens, mit dem gemessen werden sollte, legte Christen nicht fest.

Einige Jahre nach der Einführung des absoluten Härtemessers beanspruchte Kienböck Priorität⁹⁵ für das Prinzip der Härtemessung durch Bestimmung des Quotienten zweier Dosismessungen. Dies scheint zwar nach Literaturlage plausibel, jedoch ist hierbei zu beachten, dass Kienböck die Messung mit Aluminium als Phantommaterial empfahl. Zum Zeitpunkt Kienböck Anspruchs (Ende 1914 / Anfang 1915) war jedoch bekannt, dass Aluminium eben nicht wasseräquivalent ist, wovon 1906 noch allgemein ausgegangen wurde. Eine Besonderheit des absoluten Härtemessers von Christen be-

⁹¹Busch und Bautz [2005], S. 60

⁹²Wintz [1917], S. 902

⁹³Christen [1918-1919], S. 40

⁹⁴Christen [1918-1919], S. 40

⁹⁵Kienböck [1914-1915a], S. 570

stand im Gegensatz dazu aber darin, zur Bestimmung ein möglichst wasseräquivalentes Material zu verwenden. Zudem wurde im zweiten Jahrzehnt des zwanzigsten Jahrhunderts zunehmend die aufhärtende Wirkung von Aluminium auf Röntgenstrahlung berücksichtigt, also die Tatsache, dass das Röntgenspektrum nach dem Durchdringen einer Aluminiumschicht im Mittel eine größere Härte aufwies als vorher. Auf Grund der Berücksichtigung dieses Umstands ist es um so ungewöhnlicher, dass Kienböck sein auf Aluminium aufbauendes Messprinzip in den Fokus rückte.

Die Verwendung eines Dosisquotienten als Maß der Strahlungsqualität hat sich bis heute erhalten, die Messtiefen sind in DIN-Norm 6800-2 konkretisiert worden: "Der Strahlungsqualitätsindex Q ist der Quotient der Anzeigen eines Ionisationsdosimeters in 20 cm und in 10 cm Tiefe in einem Wasserphantom bei konstantem Fokus-Messort-Abstand von 100 cm und der Feldgröße $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ [...] am Messort." Der rechnerische Wert wird zudem durch eine Anpassungsgleichung leicht modifiziert.

⁹⁶Deutsches Institut für Normung e.V. [2008], S. 20-21

Kapitel 5

Instrumente zur Quantitätsmessung von Röntgenstrahlen

Die zweite Phase der Entwicklung der Röntgenstrahlen-Dosimetrie beinhaltet die therapeutische Anwendung von Röntgenstrahlung sowie der Entwicklung von Quantitäts-Messinstrumenten. Während bei der Aufnahme von Röntgenbildern neben der Qualität der Strahlen vor allem die Belichtungszeit für kontrastreiche Bilder von Bedeutung war, stellte sich bei einer Therapie mit Strahlung bald nicht nur die Frage, wie lange die Röntgenröhre den Patienten bestrahlt hatte, sondern auch, welche "Dosis" dem Patienten wie ein Medikament verabreicht worden war.

Die sich hieraus ergebende Entwicklung der Messinstrumente für die Quantität von Röntgenstrahlen lässt sich in mehrere Bereiche einteilen, deren Entwicklung weitgehend unabhängig voneinander ablief und die in diesem Kapitel dargestellt werden sollen. Die erste Messmittel-Gruppe beruht auf Farbveränderungen¹ und wurden größtenteils von Ärzten entwickelt. Zu dieser Gruppe gehören das Holzknechtsche Chromoradiometer, verschiedene Instrumente aus Bariumplatincyanür, u.a. von Sabouraud und Noiré sowie von Bordier, das Jodoform-Radiometer nach Freund sowie die insbesondere von Kienböck eingeführte Verwendung von Bromsilbergelatine. Eine weitere – wenn auch deutlich kleinere – Gruppe bilden auf Fluoreszenz beruhende Messmittel, die Bariumplatincyanür (Contremoulins) oder Zinksilikat (Wintz und Rump) verwendeten. Zusätzlich gab es noch chemisch anmutende Verfahren wie die Ausfällung von Kalomel (Schwarz). Ein andersartiger Ansatz versuchte, aus der Erwärmung der Röntgenröhre auf die Quantität der Strahlung zu schließen (Köhler). Aus dem elektrischen Bereich sind die Verwendung von Selenzellen (Fürstenau) sowie von Milliamperemetern (Walter) zu nennen; auf die deutlich von Physikern beeinflusste Entwicklung von auf Ionisa-

 $^{^1{\}rm Teile}$ der Darstellungen dieser Instrumente wurden bereits veröffentlicht: s. Glessmer [2011a] und Glessmer [2011b]

tion beruhenden Messinstrumenten hin zu Ionisationskammern wird in Kap. 6 separat eingegangen, da dieser Bereich stärker von einer zunehmenden Standardisierung von Instrumenten und Einheiten geprägt war. Ein anderer Ansatz zur Bestimmung der Bestrahlungsdauer war, diese aus Abhängigkeiten von Abstand und Röhrenparameter mittels Tabellen, Graphen oder eines Schiebereglers zu bestimmen. Zum Abschluss des Kapitels sollen einige Phantome – Hilfsmittel zur Simulation eines Patienten in der unmittelbaren Umgebung des Messinstruments – dargestellt werden.

5.1 Das Chromoradiometer

Eine der frühesten Methoden zum Abschätzen der auf den Patienten applizierten Strahlenmenge war, die durch Strahlung induzierten Farbänderungen verschiedener Materialien zu betrachten. Bereits mehrere Jahre vor der Entdeckung der Röntgenstrahlen wurden Darstellungen über die Existenz solcher "persistent colorations"², im deutschen Sprachraum mit "Nachfarben" bezeichnet, veröffentlicht und ihre Eigenschaften erforscht.

1894 berichtete der Physiker Eugen Goldstein (1850 – 1930), dass bestimmte Salze ihre Farbe änderten, wenn sie mit Kathodenstrahlen bestrahlt wurden: "die Körperfarbe, die [das Salz] in Folge der Bestrahlung durch das Kathodenlicht annimmt und auch nach der Bestrahlung zeigt – sie heisse Nachfarbe des Salzes"³. Andere Salze wiederum zeigten nur dann Verfärbungen, wenn sie während oder nach der Bestrahlung erhitzt wurden. Diese Verfärbung wurde dann "Nachfarbe zweiter Classe"⁴ genannt.

Die durch die Bestrahlung entstehenden Farben unterschieden sich je nach verwendetem Material stark und reichten von "chamoisgelb" (für "Chlornatrium purissimum") bis zu "heller Veilchenfarbe"⁵ für eine Mischung aus Kalium und Chlor. Nachfarben zeigten sich jedoch nicht zwangsläufig dauerhaft, wie Goldstein beschrieb: "Bei Bromkalium bewirkt das diffuse Tageslicht bei 2 m Fensterabstand schon in einer Minute eine erkennbare Schwächung der durch Kathodenstrahlen hervorgerufenen Farbe."⁶

Überlegungen über Analogien zwischen Kathodenstrahlen, von radioaktiven Material ausgesandten Strahlen und Röntgenstrahlen führten zu der Annahme, dass nicht nur die ersten beiden, sondern auch die letztere⁷ Nachfarben hervorrufen könnte. Der Mineraloge Cornelio Doelter (1850 – 1930) sowie Goldstein schrieben diese Entdeckung

 $^{^{2}}$ Roth [1990]

³Goldstein [1894], S. 938

⁴Goldstein [1901], S. 223

⁵Goldstein [1894], S. 940

⁶Goldstein [1895], S. 1019-1020

⁷Goldstein [1901], S. 228

und ihre Interpretation dem Chemiker Friedrich Giesel⁸ (1852 – 1927) zu.

Das Thema Röntgenstrahlen-Nachfarben wurde längere Zeit diskutiert, Holzknecht schrieb dazu:

"Dass auch die Röntgenstrahlen solche Nachfarben erzeugen können, wurde bisher mehrfach in Abrede gestellt, (so von Büttner und Müller, bei Knapp, Halle, 1899, 2. Auflage S. 81)⁹, was sich aus der Verwendung zu geringer Lichtmengen bei den bisherigen Versuchen erklärt."¹⁰

Nachdem Holzknecht es als erwiesen ansah, dass Röntgenstrahlen der Ursprung von Nachfarben sein konnten, beanspruchte er diese "Entdeckung" für sich¹¹ und entwickelte im Jahr 1902 ein Instrument zur Messung von Röntgenstrahlen, das dieses Prinzip verwendete. Das Messinstrument nannte er Chromoradiometer. Es basierte auf einer Annahme, welche zwei Jahre zuvor von Holzknechts Kollegen Kienböck dargestellt worden war und die besagte, dass ein "Parallelismus" zwischen Röntgenstrahlenmenge und Wirkung bestand, also eine Korrelation zwischen der Quantität der Strahlung und dem Effekt. Da die Wirkung auf Salze sich in der "Tiefe der Färbung" ausdrückte, wurden Ärzte in die Lage versetzt, den Effekt der Strahlung durch Farbänderungen zu messen.

Es zeigte sich, dass Holzknechts Experimente zu Nachfarben für ihn dahingehend nützlich waren, dass sie ihm Informationen für Materialauswahl und Produktion von Messkörpern lieferten:

"Wenn man nämlich z.B. chemisch reines Natriumsulfat [...] bestrahlt, so färbt es sich nicht. Wenn man chemisch reines Natriumchlorid bestrahlt, so färbt es sich schwach gelb. Mengt man beide, so färben sie sich im Röntgenlicht schwach gelb. Schmilzt man beide, so färben sie sich nach dem Erkalten violett-rosa.[...] Die Mischungsverhältnisse haben einen grossen Einfluss auf die Tiefe der Färbung."¹⁴

Über die tatsächliche Zusammensetzung des Chromoradiometers gab Holzknecht keine Angaben; Henri Bordier (1863 – 1942) schrieb sogar, sie seien "geheim gehalten" worden¹⁵. Die Gründe dieser Geheimhaltung könnten wirtschaftlicher Natur gewesen sein; eventuell wurden die Inhaltsstoffe nicht veröffentlicht, um eine Nachahmung des Chromoradiometers zu verhindern. Daher ist nicht gesichert, aus welchen Bestandteilen

⁸Doelter [1910], S. 31; Goldstein [1901], S. 226

⁹Bei dem zitierten Lehrbuch handelt es sich um Büttner und Müller [1899], Anm. d. Verf.

 $^{^{10}\}mathrm{Holzknecht1902a},\,\mathrm{S.}\,\,239\text{-}240$

¹¹Holzknecht [1902a], S. 686; Holzknecht [1901-1902a], S. 239

¹²Kienböck [1900], S. 1160

¹³Holzknecht [1902a], S. 685

¹⁴Holzknecht [1902a], S. 686

¹⁵Bordier [1906], S. 5

die Pastille genau bestand¹⁶. Eine französische Untersuchung aus dem Jahr 1906 soll folgendes Ergebnis gebracht haben: "The reagent consists of 99.77 per cent. potassium sulphate, the remainder being potassium sulphite or hyposulphite, or possibly potassium tri-, tetra-, or penta-thionate. The mixed mass is impregnated and held together with copal varnish."¹⁷. Serwer dagegen nannte eine mögliche Zusammensetzung aus Chlorwasserstoff und Natriumkarbonat¹⁸ und bezog sich dabei auf eine Quelle aus dem Jahr 1933. Glasser, der Herausgeber des von Serwer als Referenz angeführten Buches, nannte später Kaliumchlorid und Natriumcarbonat¹⁹. Mould schloss sich den 99.77 % Kaliumsulfat nach Bordier an, zählte aber trotzdem die Bestandteile Kaliumchlorid und Natriumcarbonat²⁰ auf und wies auf eine Änderung der Zusammensetzung hin. Diese ist allerdings in den Quellen schwer nachzuvollziehen, obgleich Holzknecht sich in einem Artikel 1910 auf eine "III. Type des Radiometers"²¹ bezog.

In der Zeitschrift Wiener klinische Rundschau präsentierte Holzknecht sein Messmittel (s. Abb. 5.1) erstmalig in der Ausgabe vom 31. August 1902 und beschrieb dessen Handhabung:

"Eine immer gleiche Menge eines solchen Salzes legt man neben die zu bestrahlende Stelle auf die Haut und bestrahlt nun so lange, bis die richtige Färbung erreicht ist, z.B. für die entzündliche Rumpfhaut des Erwachsenen bis zu 5,0 H in der Vergleichsscala. Ob man mit diesen oder jenen Instrumenten, mit schwachem oder starkem Licht, mit naher oder ferner Lichtquelle arbeitet, ist für die Erreichung der richtigen Dosirung gleichgiltig, und hat nur zu bedeuten, dass intensives, mittelstark absorbirbares Licht in kürzerer Zeit zu diesem Ziele führt, als anderes. [...] Man bestrahlt, wie immer man will, so lange, bis der Reagenskörper den für die gewünschte Reaction verzeichneten [...] Färbungsgrad erreicht hat. Dieser wird an einer Vergleichsscala abgelesen."²²

In den auf die erste Präsentation des Chromoradiometers folgenden Wochen wurde das Instrument auch bei verschiedenen anderen Veranstaltungen vorgestellt. Eine Veranstaltung hiervon war der zweite internationale Kongress für medizinische Elektrologie und Radiologie in Bern, der zwischen dem 1. und 6. September 1902 stattfand. Dort hielt Holzknecht einen Vortrag über das Chromoradiometer²³, welches ebenfalls auf der Ausstellung des Kongresses ausgestellt wurde. Nach diesem Kongress wurde das

¹⁶Kassabian [1910], S. 432; Geyser [1909], S. 788; Serwer [1976], S. 71

¹⁷Bordier [1906], S. 6

¹⁸Serwer [1976], S. 99

¹⁹Glasser [1941], S. 221

²⁰Mould [1995b], S. 175

²¹Holzknecht [1910], S. 374

²²Holzknecht [1902a], S. 686

²³Holzknecht [1903]

Instrument bei der 74. Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte in Karlsbad (21. bis 28. September 1902) präsentiert. Holzknechts Vortrag zu diesem Anlass ging näher auf den Messkörper und die zum Vergleich verwendeten Dosen ein:

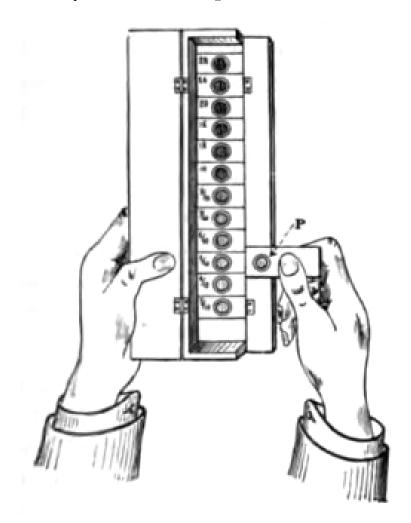


Abbildung 5.1: Vergleich der Holzknecht-Chromoradiometerpastille mit der Farbskala: Die Pastille P wurde in eine dafür vorgesehene Vertiefung gelegt und mit den Referenzfarbtönen verglichen. Abbildung aus Belot [1905b], S. 79.

"[das Salz] habe ich mit einem durchsichtigen Bindemittel emulgieren und in Form kleiner [Kienböck nannte eine Höhe von 5 mm²⁴, Anm. d. Verf.] Reagenskörper bringen lassen. Zur Ablesung des erreichten Färbungsgrades habe ich eine Normalskala fixer Färbungen anfertigen lassen. Als Einheit der Röntgenlichtmenge (H) ist eine Menge gewählt, deren Dreifaches genügt, auf der Haut des Gesichtes eine leichte Reaktion hervorzubringen. Man legt nun den Reagenskörper auf das die gesunde Umgebung des zu bestrahlenden Herdes bedeckende Bleiblech

²⁴Kienböck [1905-1906], S. 281

und bestrahlt so lange, bis nach mehrmaligem Nachsehen der Reagenskörper die gewünschte Röntgenlichtmenge anzeigt." 25

Der gleiche Vortrag wie auf der Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte wurde bei einem Treffen der k.k. Gesellschaft der Aerzte in Wien am 24. Oktober 1902 gehalten. Während der auf den Vortrag folgenden Diskussion räumte Holzknecht einige Nachteile seines Messmittels ein:

"Die einzelnen Stufen der Skala sind […] nicht sehr different. Besonders am Ende der Skala, wo die Kurve der Färbungsintensität, eine Parabel, in den flachen Schenkel übergeht, können nur mehr Intervalle von 4 Einheiten unterschieden werden. […] Die untersten Stufen (bis 4) stimmen in der Farbennüance nicht ganz genau zu manchen Reagenskörpern; am präzisesten funktioniert die Mitte der Skala (zwischen 4 und 12). […] Ferner könnte ich noch tadelnd bemerken, daß die Reagenskörper, wenn im Bestrahlungszimmer nicht reichliches Tageslicht besteht, außer der grünen Farbe noch etwas Grau annehmen, das am Fenster rasch unter Zurücklassung des Blaugrün verschwindet."²⁶

Weitere Nachteile wurden später entdeckt, aber nicht immer publiziert, noch weniger von Holzknecht direkt. So berichten z.B. Sabouraud und Noiré:

"Enfin, un gros inconvénient, peu connu, des pastilles de Holzknecht est celuici: après les avoir exposées aux rayons X, lorsqu'on les soustrait à l'action de ces rayons, on peut voir que leur teinte continue de virer et de s'accentuer davantage."²⁷

Ein weiterer Nachteil des Chromoradiometers war, dass die Nachfarben durch die Exposition von Tageslicht verringert wurden. Daher konnten die Pastillen nicht am nächsten Tag weiterverwendet²⁸ werden, um die kumulative Wirkung einer weiteren Fraktion aufzuzeichnen. Nachdem die Pastillen sich wieder komplett entfärbt hatten, wurden sie von einigen Anwendern jedoch für weitere Messungen verwendet: "Der entfärbte Reagenskörper kann neuerdings verwendet werden, ist aber schliesslich weniger verlässlich."²⁹ Weiterhin war eine Falschdosierung möglich, wenn der Zeitpunkt der "Ablesung" nicht stimmte: es musste unmittelbar nach der Bestrahlung abgelesen werden. Kienböck warnte:

²⁵Holzknecht [1902-1903], S. 108

²⁶Holzknecht [1902b], S. 1182

²⁷Sabouraud und Noiré [1904], S. 825

²⁸Köhler [1905], S. 79

²⁹Kienböck [1905-1906], S. 281

"Nach Unterbrechung der Bestrahlung schreitet nämlich die Grünfärbung durch mehrere Minuten und – wenn die Bestrahlung stark gewesen – durch etwa eine halbe Stunde fort und kann so zur doppelten Höhe ansteigen." 30

Im Gegensatz zu anderen im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Messmitteln wurde das Chromoradiometer nur über einen sehr begrenzten Zeitraum verwendet: "wegen Herstellungsschwierigkeiten bezüglich der Messkörper"³¹ war es weniger als acht Jahre im Handel erhältlich. Die Ursache der Herstellungsschwierigkeiten wurde nicht näher spezifiziert.

[Zu den Quellenproblemen sei nebenbei bemerkt: In der zusammenfassenden Sekundärliteratur werden an mindestens zwei Stellen falsche Quellenangaben zum Chromoradiometer gemacht. Hierbei handelt es sich um die Artikel von Kogelnik [1996] und Willers et al. [1998]: beide geben "G. Holzknecht: Das Chromoradiometer. RöFo 1902:4:1-49" an. Diese Quelle existiert jedoch nicht, da Band 4 der Zeitschrift Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen nicht im Jahr 1902 erschien. In jenem Jahr findet sich in Band 6 einen dreiseitigen Artikel zum Chromoradiometer; in Band 4 und 5 gibt es keine Artikel zu diesem Thema.

Da Willers et al. [1998] sich in ihrem Artikel auch auf Kogelnik [1996] beziehen, liegt es nahe, dass sie die falsche Quellenangabe von dort übernommen haben. In einem späteren Artikel gibt Horst Dieter Kogelnik (*1938) eine andere, jedoch korrekte Quelle (Holzknecht [1903] mit Jahreszahl des Kongresses 1902) an.]

5.2 Jodoform-Lösung

Jodoform (CHI₃) ist ein weiteres Material, welches unter Bestrahlung mit ionisierender Strahlung seine Farbe ändert. Eine wichtige Darstellung zu diesem Thema wurde am 21. Juli 1903 durch die *Royal Society of London* publiziert. Die Biochemiker William Bate Hardy (1864 – 1934) und Edith Gertrude Willcock (1879 – 1953) berichteten:

"In the course of certain experiments one of us noticed that a solution of crystals of pure iodoform in chloroform rapidly became purple. [...] As the reaction itself seems not to have been described, a few words may be devoted to it before passing to the main point-namely, the influence of the rays from radium upon this chemical change."³²

Anders als bei Experimenten über Materialentfärbung wie z.B. durch Goldstein und Holzknecht wurde hier keine Erwärmung der Flüssigkeit benötigt, sondern war sogar

 $^{^{30}{\}rm Kienb\"{o}ck}$ [1905-1906], S. 281

³¹Holzknecht [1910], S. 374

³²Hardy und Willcock [1903-1904], S. 200

hinderlich³³. Der Versuchsaufbau war sehr einfach:

"a solution of iodoform in chloroform was turned deep purple by simply resting the test-tube containing it on a plate of mica covering the radium salt. That is to say, the active rays penetrate mica and glass. [...] The radium rays which produce the change were identified by measuring the effect of screens upon the time necessary to produce a standard depth of purple in 1 c.c. of a standard solution of iodoform in chloroform."³⁴

Das zu diesem Zweck verwendete Radiumsalz war Radiumbromid, das zu dieser Zeit bereits kommerziell erhältlich war.

In dem Jahr, das auf die Publikation der englischen Version des Artikels folgte, wurde dieser auch in Deutschland veröffentlicht³⁵. Diese Übersetzung diente deutschen und österreichischen Wissenschaftlern, die sich mit ähnlichen Themen befassten, als Referenz und Anregung³⁶.

5.2.1 Freundsches Radiometer

Der Wiener Arzt Leopold Freund, der zu den ersten Ärzten gehört hatte, die Patienten erfolgreich mit Röntgenstrahlen behandelt hatten³⁷, beschäftigte sich spätestens ab 1904 mit der Verwendung von Jodoform zur Dosismessung. Im April 1904 berichtete er der k.k. Gesellschaft der Aerzte in Wien seine Ergebnisse zu Flüssigkeiten, die unter Bestrahlung ihre Farben änderten und die Möglichkeit der Dosismessung.

"Es zeigte sich tatsächlich, daß die Farbnuancen, welche Röntgenbestrahlungen von verschiedener Dauer und verschiedener Intensität in Lösungen des Jodoforms erzeugen, wesentlich differieren und leicht auseinander gehalten werden können. (Dieselben dunkeln am Tageslicht rasch nach, daher müssen sie nicht nur im Dunklen hergestellt, sondern auch aufbewahrt werden.) Am besten bewährten sich 2 %ige Lösungen des kristallisierten chemisch reinen Jodoforms in chemisch reinem aus Chloral hergestellten Chloroform [...] Die 2 %ige Lösung behielt jedoch, wie ermittelt wurde, bei Abwesenheit einer Strahlenquelle ihre gelbliche Beschaffenheit auch nach 48 Stunden bei. [...] Werden nun Jodlösungen verschiedener Konzentration in Chloroform als Vergleichsflüssigkeiten hergestellt, so kann man nicht nur den Umfang des vor sich gegangenen chemischen Prozesses

 $^{^{33}}$ Kienböck [1905-1906], S. 282

³⁴Hardy und Willcock [1903-1904], S. 202

³⁵Hardy und Willcock [1904]

³⁶Freund [1904], S. 417; Kienböck [1905-1906], S. 282; Doelter [1910], S. 4

³⁷Freund [1897a]

aus der Uebereinstimmung der Farbe der bestrahlten Flüssigkeit mit einer dieser Vergleichsflüssigkeiten beurteilen, sondern man hat auch in dem bekannten Jodgehalte der letzteren ein absolutes chemisches Maß des Effektes"³⁸.

Freund fand die Bestimmung der Dosis durch einen "rein chemischen Oxydationsprozeß" 39 sehr vorteilhaft, insbesondere, da die Ursache des "physikalisch-chemischen Vorgangs", der Nachfarben hervorrief (mit dem Chromoradiometer also ein konkurrierendes Verfahren), noch umstritten war. Zusätzlich sah Freund eine Proportionalität zwischen Expositionsdauer und der Menge abgeschiedenen Jods⁴⁰: "Die für therapeutische Zwecke zu verwendende Minimaldosis von sechs Minuten Bestrahlung gibt einen Effekt, welcher durch die Jodzahl 0,59 Milligramm freigemachtem Jod pro 5 ccm Radiometerflüssigkeit ausgedrückt ist." 41

Praktische Details zur Handhabung des Jodoform-Radiometers, welches nicht kommerziell erhältlich war, sondern vom Nutzer selber vorbereitet werden musste, wurden von Kienböck gegeben.

"Man löst vor jeder Sitzung und bei Lichtabschluss chemisch reines Jodoform in reinem, aus Chloral hergestellten Chloroform, 2:100, und bringt die Lösung in einer mit schwarzem Papier verhüllten Glaseprouvette dicht neben die zu belichtende Hautstelle. Die entstandene Rotfärbung wird unmittelbar nach der Sitzung mit einer Reihe von Jodlösungen in aufsteigender Konzentration unter Benutzung einer Gelbscheibe verglichen. Der Autor empfiehlt bis zu blasspurpurroter Färbung entsprechend 0,35 bis 0,59 mg Jod in 5 cm³ Flüssigkeit (täglich) zu bestrahlen."⁴²

5.2.2 Bordier und Galimard

Ausgehend von Freunds Versuchen zur Verwendung der Verfärbung von Jodoform-Chloroform als Röntgenstrahlenmessmittel beschäftigten sich auch die Franzosen Henry Bordier (1863 – 1942) und Joseph Galimard (*1860) mit diesen Chemikalien. Sie hatten mehrere Kritikpunkte an Freunds Radiometer, die sie zu verbessern suchten.

Der erste Kritikpunkt war der von Freund vorgeschlagene Farbvergleich der bestrahlten Jodoform-Chloroformlösung mit einer Referenzfarbe. Als Alternative dazu probierten Bordier und Galimard eine "titration with hyposulphite"⁴³: dies hatte jedoch

³⁸Freund [1904], S. 417-418

³⁹Freund [1904], S. 418

⁴⁰Freund [1904], S. 418; Freund [1903-1904], S. 217

⁴¹Freund [1903-1904], S. 217

 $^{^{42}}$ Kienböck [1905-1906], S. 282

⁴³Bordier und Galimard [1906], S. 165

u.a. den Nachteil, dass während des Titrierungsprozeses Licht auf die Probe wirkte, wodurch der Jodabscheidungsprozess sich fortsetzte und so die Ergebnisse zu groß werden ließ. Daher wurde doch auf einen – gegenüber Freunds Verfahren stark modifizierten – Farbvergleich zurückgegriffen.

Die erste Neuerung war, dass die Referenzlösung – eine unbestrahlte Chloroform-Jodoform-Lösung – während des Farbvergleiches vor ein gelb gefärbtes Löschpapier gehalten werden sollte. Diese Maßnahme hielten Bordier und Galimard für notwendig, weil die unbestrahlte Lösung einen Lila-Farbton hatte, während die bestrahlte Lösung sherry-farben⁴⁴ war. Es sollte keine gelb färbende Chemikalie hinzugefügt werden, da sonst eine Reaktion hätte auftreten können und Titrierung nicht möglich gewesen wäre.

Außerdem wurde eine Vergleichsskala mit zwölf verschiedenen Farbtönen entwickelt (s. Kap. 7.2.1). Die Farbtöne wurden durch Lösungen mit jeweils einem definierten Jodgehalt pro Kubikzentimeter gebildet. Die einzelnen Proben wurden luftdicht in Reagenzgläser mit 1,5 cm Durchmesser eingeschmolzen. In Reagenzgläser dieser Dimension sollte die Jodoform-Chloroform-Lösung auch während der Bestrahlung gefüllt werden, "placing the tube containing the solution in such a position that the normal incident ray shall be parallel to its axis."⁴⁵

Obwohl Jodoform-Radiometer verhältnismäßig wenig Verwendung fanden, wurden in den 1920er Jahren mehrere Artikel (u.a. Baumeister und Glocker [1921], Glocker et al. [1923], Günther et al. [1928]) veröffentlicht, die sich mit der Einwirkung von Röntgenstrahlen auf Jodoform und / oder Chloroform beschäftigten. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass die bis dahin gültige Annahme einer die Proportionalität zwischen Expositionsdauer und der Menge abgeschiedenen Jods nicht aufrecht erhalten werden konnte:

"Die Röntgenstrahlen wirken nur auslösend, die durch die Bestrahlung eingeleitet chemische Reaktion schreitet dann unabhängig von der einwirkenden Röntgenstrahlung fort; der größte Teil der ausgeschiedenen Jodmenge rührt von dieser ausgelösten Sekundärreaktion her." 46

Jodoform-Radiometer konnten also nicht mehr zu Dosierung oder Messung verwendet werden, weil eine Abhängigkeit der abgeschiedenen Jodmenge von der Strahlenenergie oder Dosis nicht mehr angenommen wurde. Ein gewisser Einfluss der "Intensität" konnte trotzdem beobachtet werden. Glocker et al. beschrieben, dass "bei den schwach

⁴⁴Bordier und Galimard [1906], S. 165

⁴⁵Bordier und Galimard [1906], S. 165-166

⁴⁶Glocker et al. [1923], S. 403

bestrahlten Kölbchen die Färbung erst einige Minuten nach der Bestrahlung ("Latenzzeit") auftrat, während die mit großer Intensität bestrahlten Kölbchen schon während der Bestrahlung sich verfärbten."⁴⁷

5.3 Bariumplatincyanür

Ein weiteres Material, das unter Bestrahlung seine Farbe ändert, ist Bariumplatincyanür (Barium-tetracyano-platinat). Seinen Ursprung in der Röntgentechnik hatte dieser Stoff als Fluoreszenzschirm für Experimente mit Crookeschen Röhren. Nach Beschreibung des Journalisten Dam bemerkte Röntgen die "X-Strahlen", da er ihren Fluoreszenzeffekt auf einem Bariumplatincyanür-Schirm wahrnahm⁴⁸. Nach Röntgen beschrieb Villard im Jahr 1898⁴⁹ die Entfärbung von Bariumplatincyanür, die von Zeitgenossen als durch Röntgenstrahlen hervorgerufene Dehydrationsreaktion⁵⁰ beschrieben wurde. Trotz der frühen Beschreibung des Effekts wurde das Material erst nach mehreren Jahren als Nachweis für die Wirkung von Röntgenstrahlen verwendet.

5.3.1 Sabouraud-Noiré-Radiometer

Sechs Jahre nach dem Erscheinen Villards Veröffentlichung – 1904 – verwendeten die französischen Ärzte Raymond Sabouraud (1864 – 1938) und Henri Noiré (1878 – 1937) "kleine aus einem Leuchtschirm geschnittene Scheibchen"⁵¹, um die Menge abgegebener Röntgenstrahlen zu bestimmen: "le papier […] vire sous l'action des rayons X et change de couleur proportionnellement à la quantité qu'il en reçoit"⁵².

Die "nicht nur durch Röntgenbestrahlung […], sondern auch durch Radium, Kathodenund ultraviolette Strahlen"⁵³ auf Leuchtschirmen aus Bariumplatincyanür hervorgerufenen Nachfarben wurden sehr unterschiedlich beschrieben. Während der Arzt Hans Erwin Schmidt (1874 – 1919) darstellte, dass sich die ursprünglich hellgrüne Farbe des Testpapiers "unter der Einwirkung der Röntgenstrahlen zunächst in ein Gelb und schliesslich in ein Rot"⁵⁴ verwandelte, bezog sich Kienböck auf eine "braune Modifikation des an sich gelbgrünen"⁵⁵ Materials.

Die Bestimmung der Strahlenmenge beim Sabouraud-Noiré-Radiometer bestand in

⁴⁷Glocker et al. [1923], S. 403

⁴⁸Dam [1896], S. 101

⁴⁹Villard [1898], S. 1415

⁵⁰Kassabian [1910], S. 433

⁵¹Kienböck [1905-1906], S. 282

⁵²Sabouraud und Noiré [1904] S. 826

⁵³Holzknecht [1910], S. 372

⁵⁴Schmidt [1904-1905], S. 261

⁵⁵Kienböck [1905-1906], S. 282

einem Vergleich des frisch verfärbten Papiers mit einer definierten Farbe, die für eine festgelegte Strahlenmenge stand. Die definierte Farbe war folgendermaßen festgelegt worden:

"il était facile d'établir à l'aquarelle une teinte correspontant à celle que prend le papier au platino-cyanure lorsque la séance radiothérapique a été suffisante pour provoquer une dépilation totale d'une région donnée du cuir chevelu, sans radiodermite, sans érythème et sans alopécic définitive. C'est cette couleur qu'indique la teinte B de notre radiomètre X. Celle teinte correspond à 5 unités H de Holzknecht."⁵⁶

H.E. Schmidt gab an, die zu Teinte B gehörige Farbe sei ein Dunkelgelb, während "ein dem Reagenskörper entsprechendes Hellgrün"⁵⁷ Teinte A darstelle. Teinte A war die Farbe des unbestrahlten Papiers; es stand daher nach der Bestrahlung nur eine einzelne Farbe und keine Farbskala für einen Vergleich bereit. Abgesehen von dieser Tatsache wurde ein Vergleich dadurch erschwert, dass

"die Vergleichsfarbe nicht aus dem gleichen Material hergestellt, sondern ein mit Farbe bemalter Karton ist. [...] Beim Leuchtschirm kommt überdies noch das Fluoreszenzlicht hinzu, das derselbe in jedem blaue Strahlen enthaltendem Lichte aussendet, so dass nicht nur die Farbnuance, sondern insbesondere die Helligkeit bei verschiedener Beleuchtung stark wechselt."⁵⁸

Ein weiterer Nachteil wurde u.a. von Holzknecht erwähnt: das "Verhalten der Färbung gegen das Tageslicht [...] Dieses bringt bekanntlich die Röntgenbräunung zum Verschwinden und nur bei oftmaliger Färbung und Entfärbung bleibt ein schwaches Braun auch bei langer Tageslichtbehandlung zurück (Restfarbe)."⁵⁹ Aus diesem Grund empfahlen Sabouraud und Noiré, das Testpapier unter einer Abdeckung aus schwarzem Papier zu verwenden⁶⁰. Zusätzlich sollte der Farbvergleich unmittelbar nach der Bestrahlung stattfinden, und zwar bei Tageslicht und aus diesem Grund sehr schnell. Holzknecht führte aus:

"Sabouraud und Noiré [waren] genötigt, die Ablesung bei Tageslicht festzusetzen, offenbar als diejenige, bei der die geringsten Schwankungen in der Zusammensetzung des Lichtes bestehen. [...] Aus diesem Grunde habe ich von Anfang an daran festgehalten, dass die Vergleichsfarbe aus dem gleichen Material hergestellt sein muss, um so von der Lichtsorte unabhängig zu sein, weil dann sowohl

 $^{^{56}}$ Sabouraud und Noiré [1904], S. 826

⁵⁷Schmidt [1904-1905], S. 261

⁵⁸Holzknecht [1910], S. 373

⁵⁹Holzknecht [1910], S. 373

⁶⁰Sabouraud und Noiré [1904], S. 826

der Testkörper als der Messkörper durch die verwendete Lichtart die gleiche Veränderung seiner Nuance erleidet. 61

Um konstante Vergleichsbedingungen zu schaffen, machte R. Krüger aus der Kieler dermatologischen Klinik 1913 den Vorschlag der Verwendung einer "fünfzigkerzige[n] Osramlampe mit Vorschaltung eines Blauglasfilters von ganz bestimmter Dicke und und ganz bestimmter Färbung"⁶². Diese künstliche Strahlenquelle sollte den gleichen Blauanteil wie Tageslicht enthalten und daher dem Tageslicht vergleichbar sein, ohne dessen Schwankungen unterworfen zu sein. Diesem Vorschlag schloss sich H.E. Schmidt zunächst an⁶³, zog den Vorschlag jedoch schon in der folgenden Ausgabe der RöFo zurück, nachdem er selbst Experimente mit einer entsprechenden Lampe durchgeführt hatte.

"Das Licht dieser Lampe hat nun und nimmer die gleiche Zusammensetzung wie das Tageslicht; es hat eine ausgesprochen blaue Färbung, wie sie das Tageslicht weder bei unbedecktem, noch bei bedecktem Himmel zeigt. [...] Wenn man nun bestrahlte Tabletten beim Lichte dieser Lampe betrachtet, so erscheinen sie immer viel grüner als bei Tageslicht, und wenn eine Tablette bei Tageslicht bereits die Teinte B zeigt, so sieht sie beim Licht der Pohlschen Lampe noch grün aus, so daß man also annehmen müßte, die Teinte B wäre noch nicht erreicht, wenn man sich auf die Abschätzung beim Licht der Pohlschen Lampe verlassen würde."⁶⁴

Schmidt verkannte jedoch das Potential einer künstlichen Lampe: um konstante Ablesungen zu ermöglichen, wäre es nicht zwangsläufig nötig gewesen, dass die gleichen Ergebnisse wie beim Tageslicht erzielt würden. Reproduzierbare Ergebnisse beim Lampenlicht hätten ausgereicht, vorausgesetzt, dass das Ablesen immer bei diesem Licht vollzogen worden wäre. Der Franzose Th. Nogier (1874 – 1944) hatte ein Jahr zuvor dieses Potential jedoch erkannt und speziell für das mehrstufige Bordiersche Radiometer, das ebenfalls aus Bariumplatincyanür bestand (s. Kap. 5.3.2), eine Ablesehilfe konstruiert, die in genau diese Lücke passte. Er berücksichtigte dabei auch die Blau-Problematik des Lichtes, wobei er anders als Schmidt genauer erläuterte, wann diese auftrat:

"Je ärmer aber das Tageslicht an blauen Strahlen ist (Regentage, Nebel- und Wintertage, nördliche Breiten), um so dunkler wird die Farbe der Pastille erscheinen. [...] Man wird also unterdosieren. Je reicher aber das Licht an blauen Strahlen ist (Sonnen- und Sommertage, Licht das Gebirges und heißer Länder),

⁶¹Holzknecht [1910], S. 374

⁶²Krüger [1913], S. 354

⁶³Schmidt [1914-1915a], S. 417

⁶⁴Schmidt [1914-1915b], S.595

um so mehr wird die Farbe der Tablette die Neigung haben, sich der Originalfarbe des Baryumplatinzyanürs zu nähern. [...] Man wird also überdosieren" ⁶⁵.

Wie Nogier das Problem von verschiedenen Ablesungen bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen lösen wollte, wird im Abschnitt über das Bordiersche Radiometer beschrieben (s. Kap. 5.3.2). Obwohl Nogiers Erläuterungen zeitlich vor Schmidts Artikel in der Zeitschrift Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen erschienen und es daher durchaus möglich ist, dass Schmidt ihn kannte, erwähnte er ihn mit keinem Wort und ließ auch nicht erkennen, dass er wusste, dass andere Wissenschaftler die Problematik konstanter Ablesungen anders lösten als er.

Holzknecht schlug 1910 ein recht einfaches Hilfsmittel vor, dass den Farbvergleich erleichtern sollte (s. Abb. 5.2). Farbliche Einflüsse, die den Ablesenden beeinflussen könnten, sollten dadurch ausgeschlossen sein, dass die zu betrachtenden Flächen ohne Zwischenraum direkt aneinander gesetzt werden und von einer schwarzen Umgebung umschlossen wurden. Zusätzlich sollten die Stückchen die gleiche Form und Größe haben. 66

Anders als Messmittel, die etwa zeitgleich eingeführt wurden, sollten die "Sabouraud-Noirésche[n] Leuchtscheibchen [...] für die Dauer der radiotherapeutischen Bestrahlung in der Nähe der Röhre und zwar in halber Fokusdistanz – am besten an einem Reagensträger – angebracht"⁶⁷ werden. Daher brauchten die Scheibchen eine Unterlage, deren Eigenschaften Sabouraud und Noiré spezifizierten: sie sollte metallisch sein, nicht von Röntgenstrahlen durchdringbar und "non pas absorbante (comme l'aluminium), sans quoi le virage de la pastille derait moins accentué qu'il ne devrait l'être out la quantité de rayons qu'elle aurait reçus."⁶⁸

Die halbe Fokusdistanz wiederum war ein Punkt, an dem der in Kiel arbeitende Arzt Hans Meyer (1877 – 1964) – ein Kollege von Krüger – ansetzte. Er entwickelte ein alternatives Dosierungssystem zu dem von Sabouraud und Noiré vorgegebenen. Hierbei wurden die Sabouraud-Pastillen verwendet, aber nicht zwangsläufig in halber Fokusdistanz plaziert: es wurde "auch stets bis zur Teinte B bestrahlt und die Änderung der Dosis bei gleichbleibenden Fokus-Hautabstand nur durch Veränderung des Fokus-Pastillenabstandes bewirkt."⁶⁹ Dies bedeutete, dass bei diesem Verfahren "die der Haut applizierte Gesamtdosis um so größer [war], je größer der Abstand der bis zur Teinte B bestrahlten Pastille vom Fokus war."⁷⁰

Obwohl das Sabouraud-Noiré-Radiometer nur eine Stufe als "Skala" kannte, stellte

⁶⁵Nogier [1913], S. 166

⁶⁶Holzknecht [1910], S. 375

⁶⁷Kienböck [1905-1906], S. 282

⁶⁸Sabouraud und Noiré [1904], S. 826

⁶⁹Wels [1922], S. 190

⁷⁰Wels [1922], S. 191

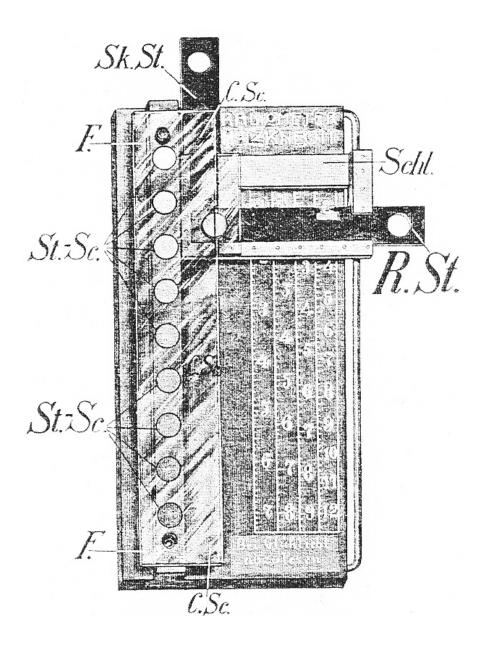


Abbildung 5.2: Holzknecht-Skala zum Radiometer von Sabouraud und Noiré: "Das Wichtige ist der eine geteilte helle Kreis. Die Reihe heller Scheiben ist nebensächlich. FF rotbraunes Farbband von zunehmender Färbung, unter dem ein halbkreisförmiges Leuchtschirmstückchen (Skalenstück, Sk. St.) verschoben wird. Im gleichen Schlitten (Schl.) verschiebt sich das mitbestrahlte Messstück (R. St.) und zwar beide solange, bis die beiden Halbkreise einen gleichfärbigen [sic] Kreis bilden. Dann liesst man an derjenigesn Skala ab, welche vom Ausschnitt des Kartons des Messstückes automatisch indiziert wird (z.B. im Bild Skala 2). Die anderen Skalen dienen für andersempfindliche Messstücke St. Sc. Stufenskala zur vorläufigen Ablesung." Abbildung und Bildunterschrift aus Holzknecht [1910], S. 373.

Schmidt eine Korrelation zwischen der Tiefe der Färbung und der Reaktion her. Die Stufe sollte den Unterschied zwischen Teinte A, dem unbestrahlten Papier, sowie Teinte B, der Farbe, deren Dosis einer Hauterythemdosis ohne Epilation entsprach, darstellen.

"1. Je stärker die durch die Röntgenstrahlen hervorgerufene Gelbfärbung des ursprünglich hellgrünen Reagenspapiers ist, desto stärker ist auch die entsprechende Hautreaktion. 2. Nach einer Röntgen-Bestrahlung, welche eine der Teinte B entsprechende Färbung des Reagenspapiers zur Folge hat, tritt je nach der individuell verschiedenen Empfindlichkeit eine mehr oder weniger starke Rötung der Haut auf."⁷¹

Die hier vertretene Ansicht einer möglichen verschiedenen Empfindlichkeit der Haut von Patient zu Patient war zu diesem Zeitpunkt noch nicht weit verbreitet. U.a. Holz-knecht⁷² und Kienböck⁷³ gingen anfänglich von einer annähernd einheitlichen Empfindlichkeit aus – so auch alle Dosierungssysteme, die auf "eine Hauterythemdosis" oder "Hauteinheitsdosis" geeicht waren. Diese Problematik soll an anderer Stelle gesondert beleuchtet werden (s. Kap. 7.1).

Zusätzlich zu den bereits genannten Einflüssen auf die Ablesung gab es auch Umgebungseinflüsse, die eine einheitliche Ablesung des Sabouraud-Noiré-Radiometers erschwerten: Wärme und Feuchtigkeit. Schmidt berichtete von einer langsameren Verfärbung bei Wärme⁷⁴, während er einen möglichen Einfluss von Feuchtigkeit bestritt. Seine Versuchsbeschreibung erweckt jedoch Zweifel an der Richtigkeit der Schlussfolgerung: "Ich habe S.-N.-Tabletten 24 Stunden in ein Schälchen mit Wasser gelegt, so daß sich die grüne Schicht bis auf einen kleinen zentralen Rest abgelöst hatte, und sie dann bestrahlt. Dieser zentrale Rest zeigte in genau der gleichen Zeit die Teinte B, wie die mitbetrahlen Kontrolltabletten."⁷⁵ Aus dieser Beschreibung könnte man auch schließen, dass die Feuchtigkeits-Kritiker recht hätten, da sich der Großteil der Tablette eben nicht mehr so verhielt wie der das gewohnte Verhalten zeigende "zentrale Rest".

Als gegen Ende des ersten Jahrzehnts des 20. Jahrhunderts Überlegungen aufkamen, dass die Dosierung von Röntgenstrahlung ein Problem sein könnte, dass nicht strikt von der Thematik verschiedener Strahlenhärten zu trennen sei, wurde bald deutlich, dass auch das Sabouraud-Noiré-Radiometer zu problematisieren war. Selbst Schmidt, der auch noch Jahre später ein starker Verfechter dieses Messmittels war⁷⁶, bemerkte: "Man wird mit dem Radiometer von Sabouraud und Noiré richtig dosieren bei einer Strahlung von mittlerer Penetrationskraft, unterdosieren bei einer Strahlung von grosser

⁷¹Schmidt [1904-1905], S. 263

⁷²Holzknecht [1902a], S. 686

⁷³Kienböck [1900], S. 1165

⁷⁴Schmidt [1906-1907], S. 42

⁷⁵Schmidt [1914-1915a], S. 417

⁷⁶Schmidt [1914-1915a], S. 417

Penetrationskraft, überdosieren bei einer Strahlung von geringer Penetrationskraft."⁷⁷ Diese Darstellung wurde, anders als die sonstige Einschätzung des Radiometers, von Christen geteilt⁷⁸. In seinem Artikel "Das Lastkonto der Sabouraudpastille" beschrieb dieser seine Ansicht der Korrelation von Dosis und Härte und die Auswirkung dieser Korrelation auf die Verwendung des Sabouraud-Noiré-Radiometers.

"Die Wirkung (Dosis) einer Röntgenstrahlung auf eine dünne Schicht ist nicht nur der Flächenenergie proportional, sondern gleichzeitig der Halbwertschicht der Strahlung in dem betreffenden Medium umgekehrt proportional. [...] Dementsprechend ist die Wirkung auf die Sabouraudpastille nicht ein Mass für die Flächenenergie, sondern für den Quotienten aus der Flächenenergie und der Halbwertschicht der Strahlung im Baryumplatinzyanür. [...] Die Sabouraudpastille eignet sich daher zu Messungen von Flächenenergie oder Intensitäten nur dann, wenn man den Härtegrad konstant hält."⁷⁹

In die Härte-Abhängigkeiten könnten eventuell auch die Unregelhaftigkeiten beim Vergleich mit dem Kienböck-Quantimeter einzuordnen sein. Schmidt bemängelte, dass "das Kienböcksche Verfahren recht unzuverlässig [erscheint], da der Quantimeterstreifen fast niemals 10 x angibt, wenn die S.-N.-Tablette die Teinte B zeigt, sonder meist erheblich mehr: 20-30-50 x⁸⁰. Auch Walter Friedrich (1883 – 1969) kam Jahre später zu einem ähnlichen Ergebnis, nämlich "daß bei gleicher Verfärbung der Sabouraud-Tablette die dem biologischen Körper applizierte Dosis um so größer ist, je härter die Strahlung ist."⁸¹

Eine mögliche schwankende Empfindlichkeit wurde auch z.B. von Schmidt und Kienböck⁸² angemerkt. Die französische Herstellerfirma gab auf Nachfrage die Vermutung an, "daß die Teinte B nach einer gewissen Zeit nachdunkelt"⁸³. Schmidt jedoch, der die Anfrage gestellt hatte, hielt eher – evtl. zusätzlich – eine mit den verschiedenen Lieferungen⁸⁴ schwankende Empfindlichkeit als wahrscheinlich. Zusätzlich legten Versuche mit anderen Dosimetern nahe, dass die Empfindlichkeit des Sabouraud-Noiré-Radiometers mit zunehmender erhaltener Dosis abnahm⁸⁵.

⁷⁷Schmidt [1910], S. 40

⁷⁸Christen [1912-1913b], S. 166

⁷⁹Christen [1912-1913b], S. 166

⁸⁰Schmidt [1914-1915a], S. 415

⁸¹Friedrich [1920], S. 1077

⁸²Kienböck [1914], S. 794

⁸³Schmidt [1914a], S. 467

⁵ Schmat [1914a], S. 467

⁸⁴Schmidt [1914b], S. 796

⁸⁵Adler [1915], S. 468

5.3.2 Bordier-Radiometer

Kurz nach der Entwicklung des Sabouraud-Noiré-Radiometers aus Bariumplatincyanür wurde ein weiteres französisches Messmittel aus dem gleichen Grundmaterial vorgestellt: das Radiometer von Bordier⁸⁶. Hier war das Bariumplatincyanür in eine Schicht Kollodium eingebettet und wurde in eine quadratische Form mit 6,5 mm Kantenlänge gebracht. Diese Pastillen wurden mit ihrer klebrigen Unterseite auf der Haut oder in Hautebene befestigt.⁸⁷

Anders als das Sabouraud-Noiré-Radiometer besaß das Bordier-Radiometer eine Skala mit mehreren Farbschattierungen, die mit verschiedenen Hautreaktionen in Korrelation gestellt wurden. Zusätzlich zum initialen gelben Farbton gab es Farbton 0, ein Blassgrün, bei welchen eine Hautreaktion ersten Grades hervorgerufen wurde, jedoch keine Entzündung⁸⁸. Diese trat – in leichter Form – erst bei Bestrahlung bis Farbton 1 ein. Die folgenden Farbtöne wurden von Bordier beschrieben:

- "Tint No. 1, a pale yellowish-green, is the shade that the pastille takes when exposed to the maximum dose of rays compatible with the complete integrity of the normal skin. [...]
- Tint No. 2, of a sulphur-yellow shade, is that color that the pastille assumes when the skin has been exposed to an irradiation calculated to produce a strong reaction, viz. erythema, tumefaction, and, at the end of the reaction marked desquamation. The latent period corresponding to this dose is from twelve to fifteen days. [...] The reaction corresponding to this No. 2 tint is a mild form of Kienbock's reaction of the Second Degree [...]
- **Tint No. 3** is almost of the color of gamboge. It corresponds to a reaction of the skin of the Second Degree [...] It is a true dermatitis [...]
- **Tint No. 4** is of a chestnut color, and corresponds to a reaction of the Third Degree, which is accompanied by necrosis and ulceration of the skin."⁸⁹

Die Vergleichsfarbtöne des Bordier-Radiometers wurden auf Pappkarten mitgeliefert, auf die gefärbte Papierquadrate mit je 15 mm Seitenlänge aufgeklebt wurden. In der Mitte der Papierquadrate befanden sich Aussparungen von Größe der Pastillen, sodass ein Farbvergleich ohne weitere störende Kanten möglich war. Auf die Pappkarten waren folgende Angaben gedruckt: "(A) The degree of reaction corresponing to the dose; (B) the therapeutic effect; (C) the duration of the latent period."⁹⁰ Als Packungsbeila-

⁸⁶Bordier und Galimard [1905]

⁸⁷Bordier [1906], S. 9

⁸⁸Mould [1995b], S. 176

⁸⁹Bordier [1906], S. 9-10

⁹⁰Bordier [1906], S. 10

Bordier-Grade	0	I	II	III	IV
Holzknechtsche Einheiten (H)	$3 \ 1/2$	5	7	13	22

Tabelle 5.1: Konversionstabelle von Bordier-Graden zu Holzknecht-Einheiten. Werte nach Kienböck [1913], S. 701.

ge des Bordier-Radiometers soll außerdem eine Konversionstabelle in (ursprünglichen) Holzknecht-Einheiten beigelegen haben, die durch Kienböck wiedergegeben wurde (s. Tab. 5.1).

5.3.3 Fluoreszenz

Die von Villard beschriebene Wirkung von ionisierender Strahlung auf Bariumplatincyanür, nämlich Fluoreszenz, wurde ebenso wie die Verfärbung als Hilfsmittel zur Messung von Strahlenmengen verwendet. Gaston Contremoulins (1869 – 1950) stellte 1902 über die Pariser Académie des Sciences eine Messmethode vor, die darin bestand, einen der üblichen Leuchtschirme aus Bariumplatincyanür zu bestrahlen und seine Fluoreszenz mit dem variablen Effekt einer Acetylenflamme⁹¹ zu vergleichen.

Bei einer Variation dieses Verfahrens, die fünf Jahre später durch den französichen Arzt Hyacinthe Guilleminot (1869 – 1922) propagiert wurde, sollte der Fluoreszenzeffekt von Röntgenstrahlen auf Bariumplatincyanür mit dem Effekt einer bestimmten Menge Radiumbromid verglichen werden. Damit nicht nur eine Stufe einer Vergleichsskala vorhanden war, sollten "die Fluoreszenzwirkungen bei direkter Bestrahlung und nach Zwischenschaltung von Filtern miteinander verglichen werden"⁹². Das Radiumbromid sollte die "activité 500000"⁹³ besitzen und eine runde Fläche mit 1 cm Durchmesser aus 2 cm Abstand eine Minute lang bestrahlen. So – ohne Verwendung eines Filters – definierte Guilleminot seine Fluoreszenzeinheit, die er "M" nannte und die äquivalent zu einem Einhundertfünfundzwanzigstel einer Holzknechteinheit⁹⁴ sein sollte. Guilleminots Einheit bot nach eigenen Angaben den Vorteil, dass sie sowohl in der radiologischen Diagnostik als auch in der Strahlentherapie angewendet werden können sollte.

Die Fluoreszenzmethode war in Frankreich deutlich weiter verbreitet als in Deutschland. Dies macht sich einerseits dadurch bemerkbar, dass in deutschen "Röntgenologie"-Zeitschriften kaum Veröffentlichungen darüber erschienen, eher die Übersetzungen französischer Original-Artikel. Außerdem entstanden Weiterentwicklungen der Methode

⁹¹Contremoulins [1902], S. 650

⁹²Klieneberger [1910-1911], S. 297

⁹³Guilleminot [1907], S. 712

⁹⁴Guilleminot [1907], S. 712; Klieneberger [1910-1911], S. 297

5.4. ZINKSILIKAT 91

fast ausschließlich in Frankreich. (Eine Ausnahme, die 24 Jahre nach Contremoulins Veröffentlichung liegt und ein anderes fluoreszierendes Material verwendet, soll in Kap. 5.4 beschrieben werden). Zusammenfassend wurden in einem Buch über medizinische Jurisprudenz folgende Fluoreszenz-Messmethoden aufgezählt: "The Guilleminot-Courtarde Modification [...] The Fluorometer of Williams⁹⁵ [...] The Method of Contremoulins. – These three methods are but slight modifications of the original radiometer system. They do not present any special feature of merit without at the same time, by overcoming one obstacle, obscuring other points of value."⁹⁶

Schon zu Beginn der 1940er Jahre zog der aus Deutschland stammende und in die USA ausgewanderte Physiker Otto Glasser das Fazit, dass sich fluorometrische Dosierungsmethoden nie weit verbreitet hätten⁹⁷.

5.4 Zinksilikat

Ein weiteres Messgerät, dass den Fluoreszenzeffekt nutzte, wurde 1926 – mehr als 20 Jahre nach Einführung von Fluoreszenzmessern in die Dosimetrie – von Hermann Wintz und Walther Rump (1878 – 1965) vorgestellt. Es beruhte jedoch nicht auf Bariumplatincyanür als fluoreszierendes Material, sondern nutzte einen "Leuchtschirm [...] aus Willemit (Zinksilikat)." Die Autoren beschrieben ihre Erfindung folgendermaßen (s. Abb. 5.3):

"Der Schirm wird durch einen Lummer-Brodhunschen Photometerwürfel betrachtet, der gleichzeitig das passend gefärbte Licht einer kleinen elektrischen Normallampe ins Auge reflektiert […] Das Licht des Vergleichslämpchens wird durch Abstandsänderung, durch Änderung der Stromstärke oder dergl. variiert, bis beide Felder gleich hell sind und eine vollständig gleichmäßig erleuchtete Fläche bilden. Aus der Ablesung der Stromstärke bzw. des Abstandes des Vergleichslämpchens wird mit Hilfe eines beigegebenen Nomogramms unmittelbar das Meßergebnis entnommen."⁹⁹

Wintz und Rump konnten noch keine Aussage darüber treffen, ob zwischen "Helligkeit des Leuchtschirms und der Intensität der Röntgenstrahlen volle Proportionalität"¹⁰⁰ bestand. Sie gaben jedoch keine separate Einheit vor, sondern schlugen vor, dass eine Eichung beispielsweise in "R-Einheiten oder nach HED [Hauteinheitsdosis]"¹⁰¹ (s.

⁹⁵Francis Henry Williams (1852 – 1936)

⁹⁶Geyser [1909], S. 791

⁹⁷Glasser [1941], S. 222

⁹⁸Wintz und Rump [1926], S. 448

⁹⁹Wintz und Rump [1926], S. 444

¹⁰⁰Wintz und Rump [1926], S. 449

¹⁰¹Wintz und Rump [1926], S. 450

Kap. 7.1) erfolgen konnte.

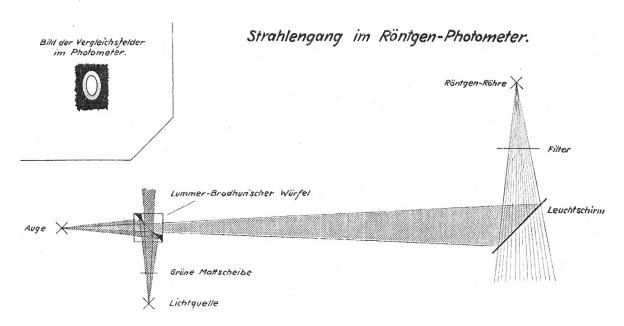


Abbildung 5.3: Strahlengang im Röntgen-Photometer nach Wintz und Rump: Das Fluoreszenzlicht einer Röntgenröhre auf einem Leuchtschirm wurde mithilfe eines Lummer-Brodhunschen Würfels mit grünem Referenzlicht verglichen. Stromstärke und Abstand der Referenzlampe wurden so lange verändert, bis sich die Farbtöne des Leuchtschirms und des Referenzlichtes glichen. Der "Messwert" der Röntgenstrahlenintensität wurde dann aus einem Nomogramm ermittelt. Abbildung aus Wintz und Rump [1926], S. 445.

5.5 Silberbromid: Kienböcks Quantimeter

Obwohl bereits durch die Entdeckung der Radioaktivität die Wirkung von ionisierender Strahlung auf Fotoplatten bekannt war, wurde die Idee, die Plattenschwärzung als Maß der von Röntgenröhren abgegeben und von einem Medium absorbierten Energie zu verwenden, erst im Jahre 1905 von Kienböck systematisch aufgegriffen. Zwar waren bereits zuvor Veröffentlichungen nicht nur in fotografischen, sondern auch medizinischphysikalischen Fachzeitschriften über "die photochemischen Grundlagen der Röntgographie" 102 erschienen, jedoch wurden die dort vorgenommenen systematischen Untersuchungen nicht weiter in Hinblick auf Messmittel verfolgt. Dennoch waren die geleisteten Arbeiten eine wichtige Grundlage für spätere Entwicklungen.

Holzknecht beschäftigte sich in seinem Photochemie-Artikel mit Faktoren, die Einfluss auf die optischen Eigenschaften einer Röntgenaufnahme haben könnten:

¹⁰²Holzknecht [1901-1902a], Holzknecht [1901-1902b]

- 1. "Lagerung des Objektes.
- 2. Distanz zwischen Focus und Platte.
- 3. Grösse des sekundären Stromschlages.
- 4. Zahl der Stromschläge in der Zeiteinheit i.e. Unterbrechungszahl
- 5. Expositionszeit.
- 6. Penetrationskraft des Röntgenlichtes." ¹⁰³

Weiterhin erstellte Holzknecht Dosis-Wirkung-Kurven von Fotoplatten: "Die Schwärzungen nehmen um gleichviel zu (1, 2, 3, 4, 5 ...) wenn die zugeführten Energiemengen, [sic] wie die Quadrate der natürlichen, [sic] Zahlenreihe wachsen (1, 4, 9, 16, 25...)."¹⁰⁴

Basierend auf den von Holzknecht dargestellten Grundlagen präsentierte der im gleichen Institut arbeitende Kienböck am 2. Mai 1905 auf dem ersten deutschen Röntgenkongress im Rahmen eines Vortrages "Das Quantimeter. Auch Quantitometer. [...] ein neues Verfahren der direkten Dosenmessung [...] welches sich der Wirkung der Röntgenstrahlen auf die photographische Schichte [sic] bedient."¹⁰⁵ Dieses Instrumentarium wurde durch die "Herren Berger¹⁰⁶ und Horn (Reiniger, Gebbert & Schall, Erlangen)"¹⁰⁷ entwickelt und Kienböck "zur Prüfung zur Verfügung gestellt und in einer für die praktische Röntgentherapie passenden Weise modifiziert"¹⁰⁸, wobei weder Urform noch Modifikation weiter spezifiziert wurden. Vertrieben wurde das Quantimeter ebenfalls von Reiniger, Gebbert & Schall.

In einem ausführlichen Artikel beschrieb Kienböck zunächst Aufbau und Kalibrierung des Quantimeters:

"Das Quantimeterpapier besteht aus einer unterempfindlichen photographischen Schichte [sic] aus Chlorbromsilbergelatine auf starkem Papier. Die Emulsion besitzt eine nur in engen Grenzen schwankende Empfindlichkeit und Gradation, sie stellt sich beim Vergleiche mit Bromsilbergelatinepapieren, zumal mit gewöhnlichen photographischen Platten, als unterempfindlich dar; ein empfindlicheres Papier würde [...] grosse Dosen, Normaldosen, nicht mehr anzeigen. Unsere Normalskalen werden mit Glühlicht hergestellt und sind nach Lichtmengen (Zeiten) graduiert. Die Schwärzungen steigen bei Glühlicht und Röntgenlicht in fast vollkommen gleichem Masse." ¹⁰⁹

¹⁰³Holzknecht [1901-1902b], S. 317

¹⁰⁴Holzknecht [1901-1902a], S. 245

¹⁰⁵Kienböck [1905-1906], S. 282

 $^{^{106}}$ Wilhelm Berger (1875 – 1952), Anm. d. Verf.

¹⁰⁷Kienböck [1905], S. 197

¹⁰⁸Kienböck [1905], S. 198

¹⁰⁹Kienböck [1905-1906], S. 283

Analog zur Behandlung von Fotoplatten und -papier bei Becquerel¹¹⁰ sollte auch das Quantimeter in schwarzes Papier gewickelt werden. Während der Bestrahlung wurde der Reagenzpapierstreifen direkt auf die zu behandelnde Körperregion gelegt und danach möglichst unter Lichtabschluss entwickelt. Kienböck empfahl für diese Zwecke eine Dunkelkammer oder ein lichtdichtes Kästchen (das in dem Artikel ebenfalls abgebildet wurde) und machte zugleich Entwicklungsvorschriften: "Die Normalentwicklung besteht in der Behandlung des Streifens mit Normalentwickler von Zimmertemperatur 18 °C durch genau eine Minute und nachfolgende Fixage."¹¹¹ Selbst für den Normalentwickler gab Kienböck Zubereitungsvorschriften an:

"Als Stammlösung können dienen: Lösung A. Metol (Hauff) 15,0; Natrium sulfurosum 150,0; Aqua destill. 1000,0. Lösung B. Kalium carbonicum 110,0; Aqua destill. 1000,0. Der Normalentwickler wird durch Mischung der Stammlösungen zu gleichen Teilen und Verdünnung mit Brunnenwasser hergestellt; die Verdünnung ist nicht für jede Lieferung Quantimeterpapiers in gleicher Weise vorzunehmen, sondern wie es die von der Fabrik beigegebene Entwicklungsvorschrift angiebt [sic]. Wer wissenschaftlich exakt arbeiten will, wird die Genauigkeit dieser Vorschrift mittelst einer Empfindlichkeitsprobe kontrollieren und so die richtige Verdünnung selbst feststellen. 112

Durch die Entwicklung entstand eine Graufärbung des Papiers, die mit der zum Instrumentarium gehörenden, von 1/4 bis 15 reichenden Normalskala verglichen wurde (s. Abb. 5.4): "Der graue Ton giebt ein Mass für das von der oberflächlichen Hautschicht absorbierte Röntgenlichtquantum, Oberflächendose."¹¹³ Die Dosen wurden in x-Einheiten gemessen – Kienböck sah davon ab, wie Holzknecht "seine" Einheit nach sich selbst zu benennen und richtete sich stattdessen in der Namensgebung nach den "X-Strahlen". Für Dosen am oberen Ende der Skala war das Ablesen schwieriger, da die Farbgrade schwerer zu unterscheiden waren, während "Grad 1-4 grossen Kontrast [zeigten] und Zwischenstufen [zuließen]"¹¹⁴. Einige Jahre später, als die Einflüsse schwankender Strahlhärte auf Patient und Dosimeter bekannt wurden, gab Kienböck auch an, für welche Bedingungen seine Skala entstanden war: "Unsere Skala galt vor allem für den Fall, daß mittelweiches Licht verwendet wurde und die Dose 10 x in 20 Minuten erreicht wurde."¹¹⁵ Als Sensibilitätsprobe konnte man das Quantimeter z.B. der Strahlung einer bestimmten Radiummenge eine zuvor definierte Zeit lang aussetzen¹¹⁶.

¹¹⁰Becquerel [1896a]

¹¹¹Kienböck [1905-1906], S. 285

¹¹²Kienböck [1905], S. 286

¹¹³Kienböck [1905-1906], S. 287

¹¹⁴Kienböck [1905-1906], S. 283

¹¹⁵Kienböck [1912], S. 72

¹¹⁶Kienböck [1905-1906], S. 285

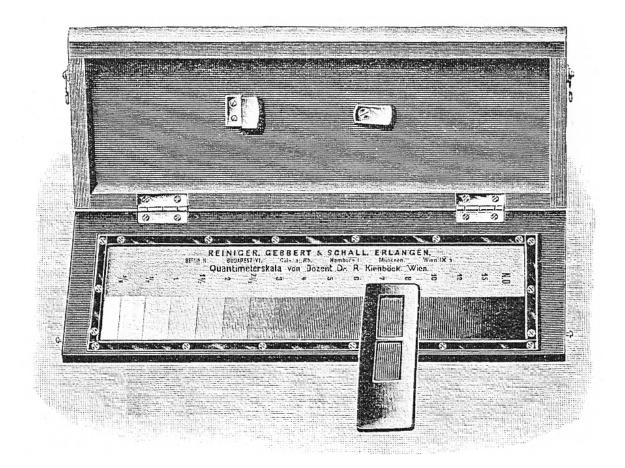


Abbildung 5.4: Kienböck-Quantimeterkästchen mit Normalskala: "Skalenkästchen mit aufgelegtem Schieber, der einen Reagensstreifen mit Schwärzung 7 X enthält." Abbildung und Bildunterschrift aus Kienböck [1905-1906], S. 286.

Die Messergebnisse, die mit dem Quantimeter erreicht wurden, waren von verschiedenen Faktoren abhängig, die durch den Nutzer selbst nicht zu beeinflussen waren. Hierzu gehörten u.A. die Empfindlichkeit der verwendeten Fotopapiere und Zustand und Zusammensetzung der Entwicklerlösungen¹¹⁷. Auch der Entwicklungsvorgang selbst war "von größtem Einfluß auf die Menge des bei gleicher Bestrahlungsweise ausgeschiedenen Silbers"¹¹⁸. Die "außerordentliche Schwierigkeit, ein belichtetes Papier unter völlig gleichen Bedingungen zu entwickeln"¹¹⁹ war generell bekannt. Nicht nur die Länge der Verweildauer des zu entwickelnden Papiers in den Lösungen spielte eine Rolle, sondern auch die Temperatur der Entwicklerflüssigkeit, berichtete der Arzt Friedrich Kirstein (1880 – 1937). Er erhielt unter ansonsten konstant gehaltenen Bedingungen,

¹¹⁷Schwarz [1911-1912], S. 68

¹¹⁸Glocker et al. [1923], S. 405

¹¹⁹Adler [1915], S. 465

jedoch variierter Entwicklertemperatur¹²⁰ die folgenden Werte:

```
Grad C entwickelte Streifen
                                         3-4 X
      12
"bei
bei
      14
           Grad C entwickelte Streifen
                                         4 X
bei
           Grad C entwickelte Streifen
                                         5 X
           Grad C entwickelte Streifen
                                         5-5 \ 1/2 \ X
bei
      20
           Grad C entwickelte Streifen
                                         mehr als 10 X".
bei
      27
```

Ein weiteres Problem von Silber enthaltendem Fotopapier wurde erst mehrere Jahre nach der Einführung des Kienböck-Quantimeters bekannt. Es handelt sich hierbei um selektive Absorption, also die über einen bestimmten Wellenlängenbereich nicht homogene Absorption, wie sie speziell für Silber von Charles Glover Barkla (1877 – 1944) und Charles Albert Sadler (1886 – 1921) beschrieben wurde: "Ag-I Group. – This group is characterized by its sensitiveness to changes in the character of the primary rays when they are of ordinary penetrating power."¹²¹ 1913 folgte eine spezielle Beschreibung des Absorptionsverhaltens von Fotopapier:

"The first increase [of absorption] occurs when there is additional absorption of the primary radiation and re-emission of secondary radiations for the *bromine* of silver bromide the second when the absorption in silver increases and the energy re-emitted in the form of secondary rays from silver increases" 122

Barkla und sein Kollege George Herbert Martyn konnten den Schluss ziehen, dass der im Fotopapier hervorgerufene Effekt weder ausschließlich zur Absorption von Silber, Brom oder Silberbromid proportional war, sondern die in der Gelatine ebenfalls vorhandenen leichten Elemente zusätzlich eine Rolle spielten¹²³.

Die Beurteilung des Einflusses dieser Faktoren fiel nicht einheitlich aus. Während man rückblickend sagen kann, dass die wenigsten Praktiker sich von der Problematik beeinflussen ließen, gab es auch Theoretiker, die aus ähnlichen wie o.g. Überlegungen die Verwendung des Quantimeters kategorisch ablehnten. So schrieb z.B. Christen:

"Das Absorptionsvermögen des Silbers ist also mit wachsender Strahlhärte im Vergleich mit Aluminium auf das Achtfache gestiegen! Hiernach ist zu erwarten, daß alle Reagenzkörper, welche Silber enthalten, bei harten Strahlen von mehr als 2 cm Halbwertschicht viel zu große Dosen geben. [...] Infolge des Silberfehlers sind alle silberhaltigen Dosimeter für die Tiefentherapie absolut unbrauchbar. Für alle diesbezüglichen Untersuchungen, sowie für die praktische Dosimetrie ist

¹²⁰Kirstein [1914], S. 789-790

¹²¹Barkla und Sadler [1908a], S. 344

¹²²Barkla und Martyn [1913], S. 299

¹²³Barkla und Martyn [1913], S. 300

daher künftig, sobald man mit harten und ultraharten Strahlen arbeitet, das Quantimeter (Kienböck) ein für allemal auszuschalten."¹²⁴

Der einzige Nachteil, den Kienböck selbst an seinem Quantimeter in Veröffentlichungen eingestand, war hingegen "die Unmöglichkeit einer augenblicklichen Ablesung der Dose, die Notwendigkeit einer sorgfältigen Entwicklung der Reagenzstreifen." 125 Nichtsdestotrotz hat sich die Verwendung von Silberhalogeniden in Form von radiographen Filmen wie Kodak EDR- 2126 bis ins 21. Jahrhundert erhalten.

5.5.1 Messung der Tiefendosis

Die ersten Ansätze zur Bestimmung anderer Dosen als der Oberflächendosis oder der Dosis bei halbem Fokus-Oberflächenabstands stammen spätestens aus dem Jahre 1905 und wurden von Kienböck durchgeführt. Dieser verwendete sein in Kap. 5.5 beschriebenes Quantimeter zur Bestimmung von Intensitäten oder – je nach Terminologie – Dosen in bestimmten Tiefen. Dafür wurde ein Streifen mit Quantimeterpapier auf die zu bestrahlende Hautpartie gelegt, jedoch zur Hälfte mit einem dünnen Aluminiumstreifen definierter Dicke abgedeckt.

"Die Dicke des Aluminiumplättchens [1 mm] ist so gewählt, dass sein Schatten beläufig dem einer 1 cm dicken Wasserschicht (oder was ziemlich dasselbe ist: Muskelschicht) entspricht. Der unter dem Härtemesser erscheinende hellere Ton zeigt demnach beiläufig die einer 1 cm tief gelegenen Gewebsschicht während der Sitzung gegebene Dose, "1 cm-Tiefendose" an."¹²⁷

Die Idee, die abschwächende Wirkung von 1 mm Aluminium mit der von 1 cm Gewebe gleichzusetzen, stammte von Perthes, der 1904 ein Vergleichsverfahren für die Strahlen-Absorptionsverhalten verschiedener Materialien beschrieben hatte¹²⁸. Aus dem Verfahren ergab sich ein praktischer Nutzen. Christen schrieb rückblickend über Kienböcks Tiefendosismessprinzip:

"Man konnte also einfach mit Aluminium experimentieren und dann in den Ergebnissen alle gefundenen Schichtdicken mit 10 multiplizieren, um ohne weiteres auf die Verhältnisse in den menschlichen Weichteilen zu schließen. Dies war alles schön und recht, solange man mit denjenigen Strahlen arbeitete, welche seinerzeit Perthes zur Verfügung standen." ¹²⁹

¹²⁴Christen [1915-1916a], S. 226

¹²⁵Kienböck [1912], S. 85

 $^{^{126}}$ Moyers [2008]

¹²⁷Kienböck [1905-1906], S. 287-288

¹²⁸Perthes [1904-1905]

¹²⁹Christen [1915-1916a], S. 225

1915, zum Zeitpunkt von Christens Veröffentlichung, war nämlich die Heterogenität von Röntgenstrahlung ein heiß diskutiertes Thema, während zehn Jahre vorher noch keine Vorstellung davon existierte, dass eine dünne Aluminiumschicht die Strahlung aufhärten bzw. die besonders weichen Anteile hinausfiltern konnte. Für Christen ergab sich als Schlussfolgerung seines Artikels unter anderem, dass Aluminiummodelle "zur Beurteilung der Tiefenwirkung harter und ultraharter Röntgenstrahlen [...] unbrauchbar" 130 waren. Anstelle solch stark vereinfachender Modelle traten bald die rechnerische Bestimmung der Tiefendosis sowie die Bestimmung der Tiefendosis in Phantomen, deren Schwächungsverhalten weniger problematisch als das des Aluminiums war.

5.5.2 Härtemessung mit dem Quantimeter

Das von Kienböck vorgestellte Quantimeter sollte nach dessen Idee nicht nur zur Messung von Oberflächendosen und Tiefendosen, sondern auch zur Bestimmung der Röntgenstrahlenhärte verwendet werden können. Das Verfahren, das Kienböck dafür vorsah, soll hier kurz dargestellt werden.

"Zu diesem Zwecke wird der couvertierte Reagensstreifen mit einem 1 mm dicken Aluminiumplättchen (Härte- oder Tiefenmesser) halbseitig bedeckt. [...] Man liest an dem entwickelten Streifen durch Vergleich mit der Skala den Schwärzungsgrad des freigebliebenen und des mit Aluminium bedeckten Feldes ab."¹³¹

Die Härte der Strahlung sollte dann aus dem Verhältnis der verschiedenen Schwärzungen, also der x-Einheiten, bestimmt werden können. Hierbei indizierte ein steigender Quotient ein Weicherwerden der Strahlung, die Kienböck in einer "Quantimetrischen Härtetabelle" darlegte und die in Tab. 5.2 wiedergegeben ist. Hier steht x^s für die Oberflächendosis (s für superfizial) und x^1 für die Dosis unter 1 mm Aluminium, also nach Kienböck die "1 cm-Wassertiefendose"¹³².

Später erweiterte Kienböck sein Messverfahren auch auf die Messung anderer als der 1 cm-Wassertiefendosis sowie der Halbwertschicht. Ersteres wurde nötig, da immer härtere Strahlung verfügbar wurde und daher auch die Dosen in größeren Tiefen eine Rolle zu spielen begannen. Für die Prüfung der Halbwertschicht empfahl er je nach Strahlhärte verschiedene Serien von Aluminiumprüfplättchen, die während der Belichtung auf die Quantimeterstreifen gelegt werden sollten (s. Tab. 5.3). Je nach Strahlhärte empfahl Kienböck auch die Messung verschiedener Tiefendosen, so z.B. "bei weichem

¹³⁰Christen [1915-1916a], S. 226

¹³¹Kienböck [1905-1906], S. 287

¹³²Kienböck [1914-1915a], S. 568

5.6. KALOMEL 99

$x^s : x^1 \hat{=} 10:2$	
$x^s : x^1 \hat{=} 10:3$	sehr weich
$x^s : x^1 \hat{=} 10:4$	weich
$x^s: x^1 \hat{=} 10.5$	mittelweich
$x^s : x^1 \hat{=} 10:6$	hart

Tabelle 5.2: Quantimetrische Härtetabelle 1906: Verhältnis von Oberflächendose x^s und Tiefendose x^1 unter 1 mm Aluminium. Werte nach Kienböck [1905-1906], S. 288 und Kienböck [1914-1915a], S. 568.

relative Härte	Aluminiumdicke in mm							
weich	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8			
mittelweich	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4			
hart	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8			
sehr hart	1,8	2,2	2,6	3,0	3,4			

Tabelle 5.3: "Aluminiumplättchenserien" zur Bestimmung der Halbwertschicht nach Kienböck. Nach Kienböck [1914-1915a], S. 571.

Licht [...] die 1, 2, 3 cm-Wassertiefendose [...], bei mittelweichem und hartem (filtriertem) Licht geht man bis zur Ermittlung der 10 cm-Wassertiefendose vor und nimmt daher Aluminiumstufen bis zu 10 mm, wobei allerdings der Einfachheit halber mehrere Reagensstreifen ausgelassen werden sollen."¹³³

5.6 Kalomel

Der Wiener Arzt Schwarz entwickelte eine Möglichkeit, Röntgenstrahlenmengen mit Hilfe der chemischen Reaktion einer Flüssigkeit zu messen, die er am 1. April 1907 auf dem dritten deutschen Röntgenkongress¹³⁴ vorstellte. Durch systematische Untersuchungen verschiedener Materialien bezüglich ihres Verhaltens unter Röntgenbestrahlung hatte er herausgefunden, "dass die Mischung von Ammoniumoxalat- und Sublimatlösung durch die Röntgenstrahlen unter Abscheidung von Kohlensäure und Kalomel zersetzt"¹³⁵ wurde. Diese Mischung war im Bereich der Photochemie seit ihrer Einführung durch Gilbert John Fowler¹³⁶ (1868 – 1953) verwendet worden. Der Photochemiker Josef Maria Ludwig Eder (1855 – 1944) hatte verschiedene Experimente mit der Flüssigkeit durchgeführt, weshalb sie auch unter dem Namen Edersche Lösung bekannt

¹³³Kienböck [1914-1915a], S. 575

¹³⁴Schwarz [1907b]

¹³⁵Schwarz [1907a], S. 114

¹³⁶Schwarz [1907a], S. 114

wurde. 1894, also vor der Entdeckung der Röntgenstrahlen, hatte Friedrich Max Roloff (*1870) den Effekt von Licht auf die Edersche Lösung durch eine elektrochemische Theorie erklärt.

Für dosimetrische Zwecke verwendete Schwarz eine Lösung, die er aufgrund ihrer Fähigkeit, "Kalomel" (Quecksilberchlorid) zu produzieren, "Kalmelogen" nannte. Sie war entweder fertig und mit einer definierten Empfindlichkeit bei *Reiniger*, *Gebbert & Schall* kommerziell erhältlich oder konnte aus zwei Flüssigkeiten, die einzeln weder licht- noch röntgenstrahlensensitiv waren, im Verhältnis 2:1 gemischt werden:

"Das Kalmelogen ist eine Mischung von zwei Lösungen: Lösung A besteht aus Ammonii oxalici purissimi pro analysi (*Merck*) 8,0; Aquae destillatae purissimae 210,0; Lösung B besteht aus Hydrargyri bichlorati-corrosivi purissimi pro analysi (*Merck*) 5,0; Aquae destillatae purissimae 105,0."¹³⁷

Wenn Kalmelogen Röntgenstrahlen ausgesetzt wurde, trübte sich die Lösung nach einer kurzen Latenzzeit durch weißen Niederschlag. Der Zersetzungsprozess, der unter Bestrahlung stattfand, wurde beschrieben durch

$$2H_{gCl_{2}} + C_{2}O_{4}(NH_{4})_{2} = 2H_{gCl} + 2CO_{2} + 2NH_{gCl}$$
(5.1)

Mit Worten: es entsteht Kalomel, Kohlensäure und Amoniumchlorid."¹³⁸ Schwarz vermutete, angelehnt an Roloff, dass die Entstehung von Quecksilberoxalat der erste Schritt der Reaktion war, gefolgt von der Dissoziation von positiv geladenen Quecksilberionen und negativ geladenen Oxalat-Ionen. Durch den photoelektrischen Effekt (durch Schwarz als Hallwachs-Effekt zitiert) wurde das Oxalat entladen und dadurch zu CO₂. Die Quecksilberionen wiederum reagierten mit dem Sublimat HgCl₂, wodurch das nichtlösliche Kalomel Hg₂Cl₂ entstand. Der relative Anteil von Kohlensäure hatte einen Einfluss auf die Reaktion, da sowohl die Strahlenempfindlichkeit der Flüssigkeit als auch die Größe der ausgefällten Kalomelstücke mit steigendem Kohlensäureanteil größer wurden.

Der beschriebenen Theorie folgend nahm Schwarz den Anteil ausgefällten Kalomels als Anzeiger "für die durch die Wirkung der X-Strahlen hervorgerufene elektrische Gleichgewichtsstörung, ein chemisches Mass für die Menge der in Freiheit gesetzten Elektronen."¹³⁹. Schwarz sah zwei verschiedene Möglichkeiten, eine Korrelation zwischen der Röntgenstrahlenmenge und der Menge erzeugten Kalomels messbar zu machen: Entweder konnte nach einer Zentrifugierung der Lösung die Kalomelmenge volu-

¹³⁷Schwarz [1912], S. 89

¹³⁸Schwarz [1912], S. 90

¹³⁹Schwarz [1907a], S. 116

5.6. KALOMEL 101

metrisch bestimmt werden – diesem Ansatz ging Schwarz einige Zeit nach¹⁴⁰, verwarf ihn aber wieder. Alternativ konnte dazu die Trübung der Flüssigkeit bestimmt werden. Diese Methode wurde auf die Annahme gestützt, dass "im gleichen Verhältnis als das verabreichte X-Strahlenquantum und die zu erwartende physiologische Wirkung wächst, [...] auch der Grad der Trübung"¹⁴¹ wuchs. Daher entschloss sich Schwarz, "in einem kleinen Eprouvettchen mit Gummikappe die Reagenzflüssigkeit zu exponieren und die entstandene Trübung mittels eines dahintergehaltenen schwarzen Striches auf weißem Grunde zu beurteilen."¹⁴² Auch sollte mit definierten Trübungen verglichen werden.

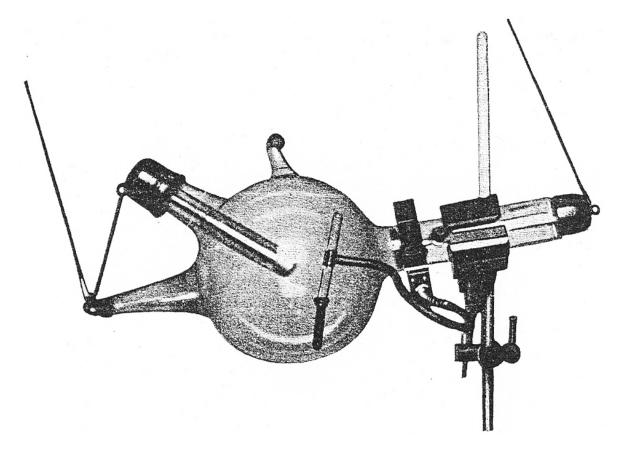


Abbildung 5.5: Aufbau bei Messungen mit Kalmelogen-Röhrchen: Die Glasröhrchen wurden zur Hälfte mit Kalmelogen gefüllt und bei halben Fokus-Haut-Abstand positioniert. Abbildung aus Schwarz [1912], S. 94.

Der Aufbau für die Messungen wurde ebenfalls von Schwarz beschrieben (s. Abb. 5.5): die Glasröhre sollte bis zu einer Höhe von 4 cm mit Kalmelogen gefüllt und bei halbem Fokus-Haut-Abstand positioniert werden. Die Bestrahlung der Patienten sollte alle fünf

¹⁴⁰Schwarz [1912], S. 89

¹⁴¹Schwarz [1907a], S. 116

¹⁴²Schwarz [1912], S. 89

Minuten unterbrochen werden. So konnte die Teströhre aus ihrem Halter genommen und umgedreht werden, sodass die dann getrübte Flüssigkeit aus der Gummikappe in den Glasteil der Röhre fließen konnte. Um den Trübungsgrad zu ermitteln, wurde die Teströhre mit anderen Röhrchen, die Flüssigkeiten vordefinierter Trübung (genannt Trübung Nummer 0, 1, 2, 3) enthielten, verglichen. Beide Röhrchen sollten dabei vor einen dunklen Hintergrund gehalten werden. Wenn eine Dosis erteilt werden sollte, die einer größeren Trübung als Nummer 3 entsprachen, musste nach Erreichen von Trübung 3 ein neues Teströhrchen verwendet werden. Zum Zeitpunkt einer späteren Veröffentlichung (1912) existierte eine vorgefertigte Skala (s. Abb. 5.6).

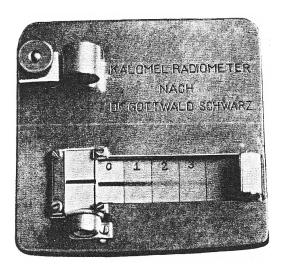


Abbildung 5.6: Trübungsskala des Kalomel-Radiometers: Das Glasröhrchen konnte in die dafür vorgesehene Halterung eingespannt und dann mit den Referenzgrautönen verglichen werden. Abbildung aus Schwarz [1912], S. 96.

Im Jahr 1907 gab Schwarz Auskunft für die mit dem Fällungsradiometer gemessenen Dosen: "Nr. 1 entspricht ungefähr 1 1/2 H [...] Nr. 2 entspricht ungefähr 3 H [...] Nr. 3 entspricht ungefähr 5 H"¹⁴³. Diese Angaben galten unter der Voraussetzung, dass die Kautele während der Bestrahlung bei halbem Fokus-Haut-Abstand platziert wurde. Hierbei war H die Holzknecht-Einheit des Chromoradiometers. Ein "Kalom" stand für "diejenige Röntgenlichtmenge, die notwendig [war], um das wasserklare Kalmelogen in die Trübung 1 zu überführen"¹⁴⁴. In einem fünf Jahre später veröffentlichten Artikel gab Schwarz jedoch eine abweichende Definition an: "Ein Kalom in halber Fokushautdistanz gemessen, ist das Drittel derjenigen Dosis, welche auf der behaarten Kopfhaut appliziert, nach 14tägiger Latenzzeit temporäre Epilation ohne jede anderen Reakti-

¹⁴³Schwarz [1907a], S. 119

¹⁴⁴Schwarz [1907a], S. 119

5.6. KALOMEL 103

onserscheinugen hervorruft."¹⁴⁵ Die Dosiseinheit, mit der ein Kalom verglichen wurde, hatte sich ebenfalls geändert: "Schließlich sei noch angegeben, daß 1 K ungefähr 3/4 H gemessen an der Holzknechtschen Skala zum Sabouraud entspricht"¹⁴⁶.

Verschiedene Wissenschaftler machten sich Gedanken über andere Möglichkeiten der Messung mit Kalomel. Hierzu zählte der Physiker Richard Grann, der probierte, "die Veränderung der chemischen Zusammensetzung ohne Analyse zu verfolgen, die trotzdem ein objektives Maß der chemischen Umsetzung geben können. Es sind dies die Änderung der Leitfähigkeit und des spezifischen Gewichtes der Lösung."¹⁴⁷ Er musste jedoch feststellen, dass die Leitfähigkeit "in komplizierter Weise und stark von der Temperatur beeinflußt"¹⁴⁸ wurde und "außerordentlich komplizierten Gesetzen folgend und zufälligen Beeinflussungen ausgesetzt (Verunreinigungen u. dgl.)"¹⁴⁹ war. Auch in Bezug auf Dichteänderungen konnte er keine zuverlässigen Gesetzmäßigkeiten ausmachen.

Grann sowie der Photochemiker Hinricus Lüppo-Cramer (1871 – 1943) gaben an, durch Zugabe von geringen Mengen Eisenchlorids die Kalomelreaktion beschleunigen zu können¹⁵⁰, was aber das Problem der Quantifizierung der Änderung auch nicht erleichterte. Schwarz kam zu dem Schluss, dass es nicht möglich war, die Menge an NH₄Cl durch Titrierung zu messen, da auf diesem Wege auch die Mengen an HgCl₂ und C₂O₄(NH₄) die Messung beeinflusst hätten. Da das Wiegen der abgeschiedenen Kalomelmenge zu kompliziert für die klinische Routine gewesen wäre und er rückblickend zugeben musste, dass ein Vergleich der Trübung "ein Verfahren [ist], das der Natur der Sache nach beträchtlichen Fehlern unterworfen ist"¹⁵¹, sah er nur die Möglichkeit, die Menge von nicht-wasserlöslichem ausgefällten Kalomel zu bestimmen.

Als Lösung dieses Problems schlug Schwarz mit seinem Kollegen Hugo Sirk (1881 – 1959) ein nephelometrisches Verfahren vor. Das Wort Nephelometrie stammt vom griechischen Wort $\nu\varepsilon\varphi o\varsigma$, Wolke, ab und beschreibt die Messung der Schwächung von Licht, das eine Suspension durchquert. Schwarz präsentierte zur Messung folgendes Instrument:

"Wir haben nun einen einfachen Apparat konstruiert, der es gestattet, die nephelometrische Bestimmung des in der zersetzten Ederschen Lösung suspendierten HgCl in einfachster Weise auszuführen. Das vom Niederschlage reflektierte Licht wird entweder optisch oder durch seine Einwirkung auf eine hochempfindli-

¹⁴⁵Schwarz [1912], S. 97

¹⁴⁶Schwarz [1912], S. 98

¹⁴⁷Grann [1915-1916b], S. 290

¹⁴⁸Grann [1915-1916b], S. 291

¹⁴⁹Grann [1915-1916b], S. 292

¹⁵⁰Grann [1915-1916b], S. 291; Lüppo-Cramer [1914-1915], S. 601

¹⁵¹Schwarz und Sirk [1915-16], S. 452

che Selenzelle gemessen, so daß auch hier die verabfolgte Strahlendosis, nicht bloß die jeweilige Intensität an einem Zeigerinstrument abgelesen werden kann." 152

Die ebenfalls angekündigte ausführliche Arbeit¹⁵³ zu diesem Instrument – oder zumindest ihre Veröffentlichung – wurde wahrscheinlich durch den weiteren Verlauf des Ersten Weltkriegs verhindert.

5.7 Röhren-Erwärmung

"Dass die X-Strahlen auch eine Wärmewirkung auszuüben im Stande sind, habe ich noch nicht experimentell nachgewiesen, doch darf man wohl diese Eigenschaft als vorhanden annehmen"¹⁵⁴, schrieb Röntgen 1895. Seit der ersten Veröffentlichung Röntgens "Ueber eine neue Art von Strahlen" beschäftigten sich Wissenschaftler in aller Welt damit, einen Nachweis oder Gegenbeweis dieses Aspektes zu finden. Hierzu gehörten nicht nur Joseph John Thomson (1856 – 1940) und Ernest Rutherford¹⁵⁵ (1871 – 1937), sondern auch Ernst Dorn (1848 – 1916), der sich in den Jahren 1896 und 1897 mit einer möglichen Korrelation zwischen einer Erwärmung und einer bestimmten Röntgenstrahlenmengen beschäftigte. Durch in mehreren seiner wissenschaftlichen Beiträgen nicht weiter erläuterte qualitative Versuche sah er eine Temperaturerhöhung durch Röntgenstrahlen gegeben¹⁵⁶, wobei "diese Erwärmung nicht etwa von Inductionsströmen, hervorgerufen durch die Entladungen, hervorrührte"¹⁵⁷. Weiterhin beschäftigte er sich mit der "Bestimmung der gesammten [sic] absorbirten [sic] Energie der Röntgenstrahlen"¹⁵⁸. Andere Wissenschaftler kamen zu anderen Ergebnissen als Dorn; sie sahen keine oder nur geringfügige Temperaturerhöhungen¹⁵⁹.

Ein Wiesbadener Arzt, Alban Köhler (1874 – 1947), sah nicht nur eine Proportionalität zwischen der "Wirkung" der Röntgenstrahlen und der Erwärmung einer bestimmten Stelle der Glasröhrenwand als gegeben an, er ließ auch eine spezielle Röntgenröhre konstruieren, in die ein Thermometer integriert war. Mit Hilfe dieses Thermometers sollten die Röntgenstrahlen dosiert werden.

In der Münchener medizinischen Wochenschrift vom 10. Januar 1905 erschien der erste Artikel Köhlers, der sich mit der neuen Röntgenröhre befasste. Dort beschrieb er zuerst die Annahmen, aufgrund derer er seine Dosierungsmethode entwickelt hatte:

¹⁵²Schwarz und Sirk [1915-16], S. 452

¹⁵³Schwarz und Sirk [1915-16], S. 452

¹⁵⁴Röntgen [1895], S. 4

¹⁵⁵Thomson und Rutherford [1896]

¹⁵⁶Dorn [1897], S. 169

¹⁵⁷Dorn [1897], S. 169

¹⁵⁸Dorn [1897], S. 172

¹⁵⁹Köhler [1905], S. 77

"Verfasser [ist] zu der Ueberzeugung gekommen, dass – rationelle Belastung vorausgesetzt – bei ein und derselben Röhre die Wirkung im proportionalen Verhältnis zur Erwärmung der dem Antikathodenspiegel gegenüberliegenden Glaswand der Röhre steht." ¹⁶⁰

Als Argument hierfür sah Köhler Folgendes: "von der Röhre [erhält man] das kontrastreichste Photogramm, welche sich am Ende der Belichtung am heissesten anfühlt [...] die Röhre, welche die kontrastreichsten Photogramme liefert, [erweist sich als] auch therapeutisch am wirksamsten."¹⁶¹ Wodurch er die therapeutische Wirksamkeit oder woran generell die "Wirkung" von Röntgenstrahlen festmachen zu können glaubte, schrieb Köhler nicht explizit. Einer späteren persönlichen Mitteilung an Christen ist jedoch zu entnehmen, dass Köhler sich wohl auf Hauterytheme¹⁶² bezieht. Als Belege für die Korrelation zwischen den kontrastreichsten Photogrammen und der höchsten therapeutischen Wirksamkeit führte Köhler Artikel von Max Levy-Dorn (1863 – 1929), den häufig zitierten Artikel Kienböcks "Ueber die Einwirkung des Röntgenlichtes auf die Haut"¹⁶³ sowie seine eigene Erfahrung an.

Nach dieser Beschreibung der Grundlagen seiner Dosierungsmethoden ging Köhler genauer auf den Effekt der Erwärmung von Röntgenröhren ein: "Eine erhebliche Erwärmung des Glasmantels findet statt um die Kathode herum, an der Stelle, wo der zylindrische Teil der Röhre in die Kugel übergeht und ferner gegenüber der Antikathode."¹⁶⁴ Die Glaspartie gegenüber der Antikathode bezeichnete Köhler als die "antifokale Glasstelle", und auf sie beschränkt er seine weiteren Ausführungen. Er folgerte aus den Ergebnissen anderer Wissenschaftler, die keine oder nur geringe Temperaturerhöhungen mit Röntgenröhren erreichten, sowie aus der dritten Mitteilung Röntgens¹⁶⁵, dass die Erwärmung der antifokalen Glaspartie nicht ausschließlich, oder, in Köhlers Worten, unmittelbar, durch Röntgenstrahlen stattfinden konnte.

Die für Köhler am nächsten liegende Vermutung war, dass der erwärmte Antikathodenspiegel das Glas der Röhre durch Wärmestrahlung erhitzte, und dass der Antikathodenspiegel wiederum durch das Auftreffen der Kathodenstrahlen erhitzt wurde. Die Variation des Primärstroms resultierte für Köhler in einer Variation der Röntgenstrahlungsquantität, und damit sowohl in einer Variation der therapeutischen Wirksamkeit als auch in einem "proportionale[n] Mehr oder Weniger"¹⁶⁶ in der Erhitzung des Antikathodenspiegels.

¹⁶⁰Köhler [1905], S. 77

¹⁶¹Köhler [1905], S. 77

¹⁶²Christen [1913a], S. 80

¹⁶³Kienböck [1900]

¹⁶⁴Köhler [1905], S. 77

¹⁶⁵Röntgen [1897]

¹⁶⁶Köhler [1905], S. 78

Nach der Darlegung der Proportionalitäten suchte Köhler das Prinzip nutzbar zu machen. Sein Ideal war eine Röntgenröhre, in die ein Thermometer zur Dosierung der Röntgenstrahlen integriert war, die man aber dennoch für Röntgenaufnahmen nutzen konnte. Das Thermometer musste daher so angebracht werden, dass Aufnahmen nicht behindert wurden. Des Weiteren sollte die Röhre eine Einrichtung zum Regenerieren enthalten. Eine Röhre, die diese Voraussetzungen erfüllte, ließ Köhler von der Firma Hirschmann zu Berlin-Pankow konstruieren und vertreiben. Über den Konstruktionsprozess schrieb er:

"Da das Anbringen eines Thermometers mit der Quecksilberkugel in der Glaswand der Röhre selbst technisch schlecht ausführbar war, schlug Herr Hirschmann [Alfred Hirschmann, *1868; Anm. d. Verf.] vor, das Thermometer in einem in die Röhrenwand eingestülpten Glaszylinder anzubringen und den Raum zwischen Zylinder und Quecksilbergefäss mit Metallpulver [...] auszufüllen. [...] Das Quecksilbergefäss steht eine angegebene Zahl von Millimetern vom Boden ab, enthält die Grade von 0 bis 80 °C" ¹⁶⁷

Die Röhre wurde u.A. auf dem ersten Kongress der Deutschen Röntgengesellschaft (1905) ausgestellt, bei einer Bestellung wurde jeweils Köhlers Aufsatz von 1905 sowie eine Tabelle zur Dosierung mitgeliefert. Köhler gab zusätzlich verschiedene Hinweise für die Verwendung "seiner" Röntgenröhre. So sollte diese nur bei "rationeller Belastung" ¹⁶⁸ betrieben werden, worunter Köhler eine Primärstromstärke von einem bis vier Ampère verstand. "Um aber bei geringer Stromstärke dennoch eine Bestrahlung, die eine zur sichtbaren Reaktion genügende Dosis geben soll, nicht übermässig lang zu gestalten, bringe ich meine Röhren stets auf 5 cm an den Körper heran." ¹⁶⁹ Eine Begründung für den Wert von genau 5 cm gab Köhler nicht, jedoch schrieb Christen später:

"Eben so wichtig ist, daß die vorgeschriebene Glas-Haut-Distenz [sic] von 5 cm genau eingehalten werde, weil bei einem Röhrendurchmesser von 15 cm (dies ist die Größe des bisherigen Modelles) jeder Fehler von 1 cm auf die Dosis einen Fehler von ca. 10% ihres Wertes ausmacht." 170

Die Umgebung des zu bestrahlenden Gewebes empfahl Köhler mit "1/3 mm dicke[m] Blei auf mindestens 35 cm Entfernung zu schützen."¹⁷¹

Zum Gebrauch des Thermometers zur Dosierung von Röntgenstrahlen gab Köhler detaillierte Anweisungen:

¹⁶⁷Köhler [1905], S. 78

¹⁶⁸Köhler [1905], S. 79

¹⁶⁹Köhler [1905], S. 79

¹⁷⁰Christen [1913a], S. 80

¹⁷¹Köhler [1905], S. 79

Temperaturdifferenz 5. bis 10. Minute (° C)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5
Gesamtdauer d. Bestrahlung (min)	45	40	36	32	28,5	25,5	23,5	21,5	19,5	18	16,5	15

Tabelle 5.4: Köhlersche Dosierungstabelle: verschiedenen in der Röhre gemessenen Temperaturdifferenz zwischen der fünften und zehnten Bestrahlungsminute wurde je eine Gesamtbestrahlungsdauer zugeordnet. Nach einer Bestrahlung dieser Länge sollte bei Lupuspatienten eine "Reaktion zweiten Grades" auftreten. Werte nach Christen [1913a], S. 81.

"Das Steigen des Thermometers in den ersten 5 Minuten lässt man [...] vollständig unbeachtet, aber dann wird die Erhöhung der Temperatur von Beginn der 6. Minute bis zum Schluss der 10. Minute wertvoll und wichtig, weil sie uns einen genauen Masstab für die Arbeitsleistung der Röhre angibt. Von der 11. Minute an wird dann noch so lange weiterbelichtet, als der jeder Röhre beiliegende Prospekt es in der Rubrik angibt, welche der betreffenden, in der 6. bis 10. Minute erfolgten Temperatursteigerung entspricht. Es braucht also nach der 10. Minute nicht mehr nach dem Thermometer gesehen zu werden [...] Die Belichtungszeiten sind vom Verfasser an seiner eigenen Haut, an Lupus- und Kankroidpatienten ausprobiert worden. Die auf dem Prospekt angegebenen Zahlen beziehen sich auf Reaktionen 2. Grades bei Lupuskranken, sie geben die mittleren Werte der Belichtungszeiten an."¹⁷²

Die erwähnte Zuordnung von Temperatursteigerungen und Bestrahlungsdauer ist in Tab. 5.4 wiedergegeben.

Köhler ging davon aus, dass er für unterschiedlich harte Röhren durch Anpassen der Primärstromstärke gleiche Temperatursteigerungen erreichen konnte. Nach seinen Erfahrungen war auch der "an lebendem Gewebe gesetzte Reaktionsgrad der gleiche"¹⁷³, weshalb er seine Dosierungstabelle für universal anwendbar hielt. Auch zwei Jahre später hatte sich an dieser Auffassung nichts geändert¹⁷⁴. Es wäre jedoch auch erstaunlich gewesen, wenn Köhler zu negativen Ergebnissen mit seiner Röhre gekommen wäre, da er von ihrer Funktionalität komplett überzeugt war, wie folgender Abschnitt zeigt:

"Verfasser verwendet diese Röhren seither jeden Tag und immer, wo es geboten schien, wurde damit in einer einzigen Sitzung die ganze Dosis verabreicht

¹⁷²Köhler [1905], S. 79

¹⁷³Köhler [1905], S. 79

¹⁷⁴Köhler [1907], S. 8

mit immer richtig eintretender Reaktion, die niemals zu einer Schädigung oder Verbrennung führte, andererseits mit einer einzigen Ausnahme auch niemals ganz ausblieb. [...] Diese in zwei Jahren stets richtig erhaltenen therapeutischen Resultate können nicht als Zufall bezeichnet, sondern nur als Beweis dafür angesehen werden, dass das zu Grunde liegende Princip das richtige ist."¹⁷⁵

Die Thermometerröhre ist eines aus einer ganzen Reihe von Dosierungsinstrumenten, das auf Bestreben und nach Dosierungsvorstellungen eines Arztes entwickelt wurden. Dies spiegelte sich in dem Anspruch wider, den Köhler an das Instrument hatte: "Die soeben beschriebene Röhre soll und kann nicht zur feineren wissenschaftlichen Messung der Röntgenstrahlen dienen, wie z.B. die Freundsche Methode. Sie ist nur zum praktischen Gebrauche bestimmt."¹⁷⁶ Im praktischen Gebrauch hatte sie dennoch den bereits vorhandenen Methoden gegenüber den Vorteil, dass das Ablesen einer Temperatur an einem Thermometer leichter durchzuführen war als die Unterscheidung von Farbnuancen, wie sie z.B. beim Chromoradiometer durchgeführt werden musste. Weiterhin konnten die Bestrahlungen bei Tageslicht bzw. ohne Verdunklung durchgeführt werden, da nicht zu befürchten war, dass die Ergebnisse durch Sonnenlicht verfälscht werden könnten. Als Nachteile sah Köhler, das die Thermometerröhre "wohl nicht mit elektrolytischem Unterbrecher zu verwenden ist, ferner dass sie nicht an mehreren Tagen verabfolgte Röntgenlichtmengen messen lässt"¹⁷⁷.

Christen stellte später in seiner Zusammenstellung von Vor- und Nachteilen verschiedener Dosimeter außerdem fest, dass "die Köhlersche Methode […] bisher auf den Härtegrad nicht ausführlich Rücksicht [nimmt]. Es werden bloß die Grenzen angegeben, innerhalb welcher die Eichung gültig sein soll, nämlich 5 und 8 Grad Benoist, entsprechend 7 und 9,5 mm Halbwertschicht."¹⁷⁸

5.8 Widerstandsänderung von Selen

Im Jahr 1873 ließ Willoughby Smith (1828 – 1891), Angestellter der englischen Telegraph Construction Company, über die Zeitschrift Nature berichten, dass sich die Leitfähigkeit von stromdurchflossenem Selen änderte, wenn es Licht ausgesetzt wurde. Darüber hinaus wurde beobachtet "that the resistance altered materially according to the intensity of light to which it was subjected."¹⁷⁹ 23 Jahre später stellte der Nie-

¹⁷⁵Köhler [1907], S. 11

¹⁷⁶Köhler [1905], S. 79

¹⁷⁷Köhler [1905], S. 79

¹⁷⁸Christen [1913a], S. 80

¹⁷⁹Smith [1873], S. 303

derländer Hermann Haga¹⁸⁰ (1852 – 1936) fest, dass ähnliches galt, wenn Selen nicht sichtbarem Licht, sondern Röntgenstrahlen ausgesetzt wurde: der Widerstand einer Selenzelle sank während der Röntgenbestrahlung. Der französische Physiker Eugène François Perreau (*1868) beschrieb zusätzlich, dass der Widerstand nach Beendigung der Bestrahlung wieder zum Anfangswert¹⁸¹ zurückkehre. Nach diesen Darstellungen dauerte es einige Jahre, bis versucht wurde, die Beziehungen zwischen den verschiedenen Größen systematisch zu quantifizieren. Franz Himstedt (1852 – 1933) schlug 1901 den Gebrauch von Selenzellen zu Intensitätsmessungen vor¹⁸², weitere Physiker schlossen sich der Idee an. Ein Instrument zur "Bestimmung der Intensität von Röntgen- und ähnlichen kurzwelligen Strahlen"¹⁸³ wurde im folgenden Jahr von Ernst Ruhmer (1878 – 1913) patentiert, es scheint jedoch nicht in der medizinischen Röntgenmesstechnik verwendet worden zu sein.

Obwohl also spätestens im Jahre 1902 der Transfer von Intensitätsmessungen von Licht- zu Röntgenstrahlen mittels Selen geleistet worden war, dauerte es noch mehrere Jahre und benötigte "systematische Beobachtungen an Hunderten von Selenzellen"¹⁸⁴, bis aus dem Messprinzip ein Messinstrument hervorging, das eine gewisse Verbreitung fand. Ein erstes Messinstrument von Robert Fürstenau, das die Widerstandsänderung von Selen verwendete, wurde 1909 patentiert¹⁸⁵, es finden sich allerdings keine Spuren dieses Instruments in der einschlägigen Literatur. Das später so genannte Fürstenausche Intensimeter wurde 1913 patentiert. Konkret handelte es sich um ein

"Meßgerät für Röntgenstrahlen, bei welchem die Röntgenstrahlen auf eine Zelle aus Selen oder ähnlichem, den elektrischen Widerstand unter Einfluß von Belichtung änderndem Material einwirken, wobei die Zelle als der eine Zweig einer Wheatstoneschen Brücke¹⁸⁶ angeordnet ist, dadurch gekenntzeichnet, daß die übrigen Brückenzweige so verbunden und bemessen sind, daß bei unbelichteter Zelle ein elektrischer Strom das Brückenmeßinstrument durchfließt, dessen Richtung derjenigen des bei belichteter Zelle durch das Meßinstrument fließenden Stromes entgegengesetzt ist." ¹⁸⁷

Zusätzlich ging das Patent explizit auf die medizinische Nutzung des Instruments ein:

"[es hat] sich als zweckmäßig erwiesen, die Selenzelle in einem nur an seiner oberen Seite strahlendurchlässigen Gehäuse anzuordnen und durch einen beweg-

 $^{^{180}}$ Gilray [1896], S. 109

¹⁸¹Perreau [1899], S. 957

¹⁸²Himstedt [1901], S. 535

¹⁸³Ruhmer [1902]

¹⁸⁴Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 533-534

¹⁸⁵s. Fürstenau [1909]

¹⁸⁶benannt nach Charles Wheatstone (1802 – 1875), Anm. d. Verf.

¹⁸⁷Fürstenau [1913], S. 2

lichen Leiter von großer Länge mit dem Meßinstrument zu verbinden, so daß die strahlenempfindliche Zelle jeweils an den Ort gebracht werden kann, an welchem die Röntgenstrahlen wirken, also in der Nähe der Röntgenröhre, auf die Hautoberfläche des bestrahlten Patienten usw."¹⁸⁸

Die Funktionsweise des Fürstenauschen Intensimeters beruht auf dem Effekt, dass sich das Verhältnis der Widerstände in der Wheatstoneschen Brücke ändert, wenn die Selenzelle von Strahlung getroffen wird. So entsteht eine Potentialdifferenz und ein

"Stromfluß durch das Deprez d'Arsonval-System hindurch, der Zeiger schlägt aus, und die Größe des Ausschlages ist ein Maß für die Größe der Widerstands- änderung des Selens und damit gleichzeitig ein Maß für die auf die Selenzelle treffende Strahlenintensität." ¹⁸⁹

Im Jahr 1914 erfolgte ein Zusatz zu Fürstenaus Patent, der eine Abhängigkeit des Messergebnisses von der Höhe der "Höhe der an die Wheatstonesche Brücke gelegten Spannung"¹⁹⁰ zu beseitigen suchte.

In der medizinphysikalischen Fachliteratur wurde das Fürstenausche Intensimeter (s. Abb. 5.7) nicht von seinem Erfinder, sondern von dessen Kollegen des gleichen Instituts – Max Immelmann (1864 – 1923) und Johannes Schütze (1875 – 1938) – veröffentlicht. Interessant ist außerdem, dass der Aufsatz von der Redaktion der Zeitschrift Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen angefordert war¹⁹¹, und nicht der Entwickler von sich aus an die Öffentlichkeit trat. Dies könnte allerdings auch durch den Beginn des Ersten Weltkriegs bedingt sein.

Der genaue Selenzellentyp, der im Fürstenauschen Intensimeter Verwendung findet, wurde weder von Fürstenau noch von Immelmann und Schütze beschrieben. Dies ist insbesondere interessant, da später in der *Physikalischen Zeitschrift* eine Diskussion geführt wurde, die thematisierte, dass nicht alle Zellentypen für "Intensitätsmessungen" geeignet seien (s.u.) – jedoch wurden auch hier keine technischen Details preisgegeben. Eine allgemeine Beschreibung einer Selenzelle lieferte Grann: "[eine Selenzelle] ist eine dünne Schicht Selen zwischen zwei Metallen, die in Scheiben, Drahtform oder anderer Form sein können [...] die Zelle hat je nach Form und Größe der Selenschicht einen gewissen Widerstand in der Größenordnung von 10,000 bis 500,000 Ohm"¹⁹².

Der Artikel von Immelmann und Schütze nahm Bezug auf Veröffentlichungen von G. Athanasiadis, hielt jedoch dessen Vorschlag, Röntgenstrahlenintensitäten in "Ker-

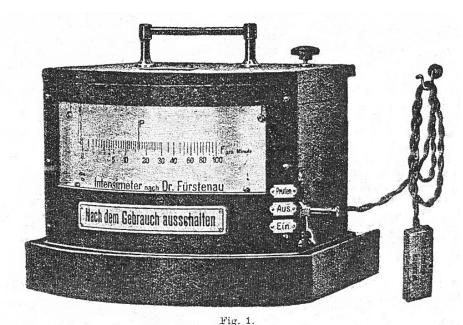
 $^{^{188}}$ Fürstenau [1913], S. 2

¹⁸⁹Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 535

 $^{^{190}}$ Fürstenau [1914], S. 1

¹⁹¹Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 533

¹⁹²Grann [1915-1916a], S. 268



Außenansicht des Intensimeters.

Abbildung 5.7: Das Fürstenausche Intensimeter. Der eigentliche Detektor – die Selenzelle – war in einer sog. Auffangdose verpackt und mit einem Kabel mit dem Messgerät verbunden. Das Intensimeter zeigte die Widerstandsänderungen in "F pro Minute" an. Abbildung aus Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 534

zen"¹⁹³ zu messen, für nicht praktisch umsetzbar, da "eine Zelle, welche sich gut für Lichtmessungen eignet, also dem Lichte gegenüber "hochempfindlich" ist, [...] für die Benutzung bei Röntgenstrahlenmessungen absolut ungeeignet"¹⁹⁴ sei. Stattdessen wurde eine eigene Einheit eingeführt, die mit weiteren bereits existierenden Einheiten in Beziehung gesetzt wurde. Die Intensimeterskala war in 1 F-Schritten – F wie Fürstenau – geteilt, wobei 1 F "eine ursprünglich willkürlich gewählte Einheit"¹⁹⁵ war. Mit dem Intensimeter sollte die "Flächenenergie (nach Christen) pro Minute [...], was identisch ist mit der Strahlenintensität"¹⁹⁶ gemessen werden.

Die Handhabung des Intensimeters bestand laut Immelmann und Schütze darin, vor einer Bestrahlungssitzung eine Messung durchzuführen, indem die Auffangdose in Fokus-Haut-Distanz positioniert und bestrahlt wurde. Hatte sich ein konstanter Ausschlag des Intensimeters eingestellt, so konnte berechnet werden, wie lange mit gleichen Röhreneinstellungen – konstante Dosisleistung stillschweigend vorausgesetzt –

¹⁹³Athanasiadis [1908], S. 894

¹⁹⁴Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 533

¹⁹⁵Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 536

¹⁹⁶Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 536

bestrahlt werden musste, um die jeweils erwünschte Dosis zu erhalten. Daraus ergibt sich, dass die Intensimeterskala genau genommen nicht in F, sondern in "F pro Minute" eingeteilt war. Beziehungen zu den bestehenden Einheiten Holzknecht (H), Kienböck (x) und Sabouraud-Noiré (Teinte B) gaben Immelmann und Schütze ebenfalls an:

"die Kienböckeinheit 1 x [ist] ungefähr identisch [...] mit 6 F (Intensimetereinheiten). Will man also die Sabouraud-Volldosis = 5 Holzknecht = 10 Kienböck bei weichen Strahlen applizieren, so gibt man $10 \times 6 = 60 \text{ F}$. [...] bei Applikation einer Volldosis [mit harten gefilterten Strahlen sind] in diesem Fall $25 \times 6 = 150 \text{ F}$ zu applizieren. Liefert also [...] die konstant arbeitende Röhre nach Angabe des Intensimeters 10 F pro Minute, so hat man in $10 \text{ Minuten } 150 \text{ F} = 25 \times 5 \text{ H} = 1 \text{ Volldosis nach Sabouraud-Noiré appliziert."}$

Ein beachtenswerter Umstand bei der Verwendung von Selenzellen als Messmittel war die Änderung des Widerstands in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit, was häufig mit "Trägheit" bezeichnet wurde. Ebenfalls berücksichtigt werden musste auch die "Ermüdung" der Zellen, wie Fürstenau beschrieb: "Jede Bestrahlung verringert die Trägheit der Zelle für die zeitlich darauf folgende Bestrahlung."¹⁹⁸. Die Ermüdung war für verschiedene Zellentypen unterschiedlich und musste insbesondere bei Zellen mit geringem Widerstand berücksichtigt werden, da "der Widerstand im Laufe einiger Wochen auf ein Vielfaches des ursprünglichen Anfangswiderstandes steigen"¹⁹⁹ konnte. Für Ermüdung, die durch mehrere kurz hintereinander liegende Bestrahlungen hervorgerufen wurde, führte ein Wissenschaftler namens Robert Mayer systematische Messungen durch: "Betrachtet man diese Reihe näher, so ergibt sich, daß sie in den F.-Sekunden um je 600 steigt, und in den zugehörigen Ermüdungsbeträgen ebenfalls in einer gewissen Regelmäßigkeit anwächst, nämlich so, daß jede Zahl mit 1,2 multipliziert die nächstfolgende gibt. Es liegt eine steigende geometrische Reihe vor"²⁰⁰. Aus diesem Grund sag sich Mayer im Stande, "durch die Gesetzmäßigkeit der Ermüdung der Selenzelle [...] die abgelesenen Zahlen mühelos zu korrigieren."²⁰¹

Nach der Entdeckung der selektiven Absorption²⁰² im Allgemeinen und für Silber²⁰³, das ja u.a. in Fotopapier und -platten als Röntgenstrahlen-Messmittel Verwendung fand, im Speziellen, wurde die Vermutung geäußert, dass dieses Phänomen auch bei

¹⁹⁷Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 540

 $^{^{198}}$ Fürstenau [1915], S. 277

¹⁹⁹Grann [1915-1916a], S. 271-272

²⁰⁰Mayer [1915-1916], S. 285

²⁰¹Mayer [1915-1916], S. 286

²⁰²Barkla und Sadler [1908b], S. 245

²⁰³Barkla und Martyn [1913]

Selen auftreten könnte²⁰⁴. Die Vermutung konnte bestätigt werden²⁰⁵. Berücksichtigt wurde die selektive Absorption beim Fürstenauschen Intensimeter jedoch nicht; Grann hielt dies auch für nicht nötig: "Dabei brauchen wir die eigentliche selektive Absorption, wie man sie bei Metallen hat, gar nicht in Betracht zu ziehen, diese soll im übrigen beim Selen einer sehr weichen Strahlung angehören"²⁰⁶.

Bereits Athanasiadis soll Selenzellen zur "Strahlenvergleichung" verwendet und deren Güte mit der von Skiametern (s. Kap. 4.1.1), also Härtemessern, verglichen haben²⁰⁷. Auch im ersten Artikel über das Fürstenausche Intensimeter wurden Überlegungen genannt, dieses nicht nur für Intensitäts- sondern auch für Strahlenhärtemessungen zu verwenden²⁰⁸. Ihre Vielseitigkeit wurde auch von anderen Autoren erwähnt. So nannte u.a. Grann die Verwendung von Selenzellen zur Messung von "Intensität, Dosis, Härte oder was man sonst an ihnen messen will"²⁰⁹. Immelmann und Schütze beschrieben die Verwendung des Intensimeters zur Messung von Absorptionskurven. Aus diesen konnte dann "ohne weiteres die Halbwertschicht der verwendeten Strahlung für das betreffende Material"²¹⁰ abgelesen werden, was einer Bestimmung der Strahlenhärte nach Christen entsprach (s. Kap. 4.4).

Auch nach Abschluss der Konstruktion des Fürstenauschen Intensimeters war die Frage nach Abhängigkeiten des Selenwiderstandes außer von der Strahlungsintensität nicht abgeschlossen, verschiedene weitere Einflussfaktoren wurden genannt. Diese wurden z.T. für so gewichtig befunden, dass durch Selen "eine einwandfreie Messung auf diesem Wege nicht erreicht werden"²¹¹ konnte. Grann nannte die Temperatur als Einflussfaktor ("und zwar steigt der Widerstand bei weichem Selen mit zunehmender Temperatur. Es ist im übrigen bekannt, daß die verschiedenen Modifikationen des Selens teils positiven, teils negativen Temperaturkoeffizienten haben"²¹²), außerdem "Beleuchtungsstärke, [...] Feuchtigkeitsgehalt, Dauer der Beleuchtung und ihre Stärke und Dauer der Beleuchtung, welche der Messung vorhergegangen ist. Es gehen sehr starke Veränderungen des Selenwiderstandes im Laufe der Zeit vor sich"²¹³. Voltz führte weiterhin eine Abhängigkeit vom Absorptionskoeffizienten der Röntgenstrahlen²¹⁴ an und wies auf die Problematik hin, dass man es bei Röntgenstrahlung mit einem inhomogenen

²⁰⁴Holzknecht und Weissenberg [1915-1916], S. 262

 $^{^{205}\}mathrm{Holzknecht}$ und Weissenberg [1915-1916], S. 262

²⁰⁶Grann [1915-1916a], S. 273-274

 $^{^{207}}$ Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 533

²⁰⁸Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 537

²⁰⁹Grann [1915-1916a], S. 267

²¹⁰Immelmann und Schütze [1914-1915], S. 537

²¹¹Grann [1915-1916a], S. 271

²¹²Grann [1915-1916a], S. 270

²¹³Grann [1915-1916a], S. 271-272

²¹⁴Voltz [1915], S. 308

Gemisch zu tun hat, hin²¹⁵. Er hielt daher Selen nur unter bestimmten Umständen für ein geeignetes Mittel zur Intensitätsmessung, und zwar u.a. bei homogener Röntgenstrahlung, da dann die Widerstandsänderung nur von der Intensität abhängig sei²¹⁶. Weiter wurde als indirekte Abhängigkeit die Unterbrechungsfrequenz genannt: von der Unterbrechungsfrequenz war die Endladungskurve und damit die Zusammensetzung des Röntgenstrahlengemisches abhängig²¹⁷.

Glasser wies 1941 darauf hin, dass das Fürstenausche Intensimeter zu einer gewissen Popularität gelangte, jedoch nicht nach 1930^{218} verwendet wurde.

5.9 Milliampèremeter

Die Idee, ein Milliampèremeter als Instrument zur Dosierung von Röntgenstrahlen zu verwenden, lässt sich auf einen Beitrag in den Pariser Comptes rendus de l'Académie des Sciences²¹⁹ zurückführen²²⁰. Dieser Beitrag, als dessen Autor oft ein Herr Gaiffe referenziert wird, weicht vom üblichen Präsentationsschema – note de A (eigentlicher Autor), présentée par B (präsentierendes Mitglied der Académie des Sciences) – insofern ab, als dass sie nur mit "note de M. d'Arsonval" [Jacques-Arsène d'Arsonval (1851 – 1940)] betitelt ist, der Physiker d'Arsonval aber ausdrücklich schrieb, ein Herr Gaiffe [George Gaiffe (1857 – 1943)] habe dieses oder jenes getan: "Pour comparer entre elles [sic] les quantités des rayons émis, M. Gaiffe a pensé que le procédé le plus simple était de mesurer l'intensité du courant circulant dans le tube. Il a donc construit spécialement un milliampèremètre, type d'Arsonval"²²¹. Mit Hilfe dieses Milliampèremeters zeigte Gaiffe zunächst, dass die Menge der emittierten Röntgenstrahlen dem Röhrenstrom proportional war²²². Weiterhin konnte er feststellen, dass

"für verschiedene Angaben des Milliamperemeters – aber sonst gleiche Verhältnisse – die Wirkung der Röhre proportional mit jenen Angaben wächst, so daß man also z.B. bei doppelt so starkem Röhrenstrom aus gleichem Abstande nur die Hälfte der Zeit zu exponieren braucht, um die gleiche Wirkung zu erzielen."²²³

Diese Feststellung gelang dadurch, dass mehrere gleich harte Röhren verschieden lange, mit verschiedenen Strömen aber gleichem Strom-Zeit-Produkt betrieben wurden und

 $^{^{215}}$ Voltz [1915], S. 310

²¹⁶Voltz [1915], S. 310

²¹⁷Voltz [1915], S. 311

²¹⁸Glasser [1941], S. 222

²¹⁹Arsonval [1904]

²²⁰Walter [1905], S. 129

²²¹Arsonval [1904], S. 1142

²²²Arsonval [1904], S. 1144

²²³Walter [1905], S. 129

auf Fotoplatten den gleichen Effekt erzielten.

Damit war das Prinzip der Dosierung mit dem Milliampèremeter gefunden, mit dem sich bald auch andere Wissenschaftler beschäftigten. Zu ihnen gehörte der Hamburger Physiker Bernhard Walter. Dieser plädierte, analog zu Gaiffes Experimenten, für eine Dosierung nach Milliampèreminuten. Er schlug vor, "daß man für jedes zu bestrahlende Leiden allmählich die günstigste Röhrenhärte ausprobieren und dann für diese feststellen wird, wieviel Milliampèremeterminuten man aus der Abstandseinheit (etwa 10 cm) zu geben hat, um eine bestimmte Reaktion zu erhalten"²²⁴. Die Angaben sollten anschließend tabellarisiert werden. Die Tabelle galt jedoch nur unter Voraussetzung einer konstanten Röhrenleistung und -last, da sonst keine konstante Beziehung zwischen "der sekundären Stromstärke und der gleichzeitig erzeugten Röntgenstrahlenintensität"²²⁵ herrschte. Walter gab auch Werte einer Anschlussmessung der Milliampère-Methode an das Holzknechtsche Chromoradiometer bei einer einzigen Röhrenhärte an (s. Tab. 5.5).

Bestrahlungszeit (min)	8	12	16	20
Dosis (H)	3,5	4,5	5-8	10

Tabelle 5.5: Anschlussmessung der Milliampère-Methode an das Holzknechtsche Chromoradiometer bei Röhrenhärte 7 Walter, Fokus-Messkörper-Abstand 20 cm und Stromstärke 1,0 mA. Nach Walter [1905], S. 131.

Später veröffentlichte Walter weitere Tabellen²²⁶, die weitere Variablen berücksichtigten: Glasdicke der Röhre, Fokus-Haut-Abstand und Röhrenhärte. Je nach Konfiguration enthielten diese Tabellen zur Erreichung einer Sabouraud-Noiré-Erythemdosis Werte zwischen etwa 1 mAmin und fast 200 mAmin! Außer den genannten Größen sah Walter keine weiteren Abhängigkeiten, der die Milliampèremethode hätte unterliegen können und nannte die Faktoren, von denen er eine Unabhängigkeit gezeigt zu haben glaubte:

"die Milliamperemethode [ist] nicht bloß unabhängig von der Art der primären Stromquelle (Gleich- oder Wechselstrom), sondern ferner auch unabhängig von der Art der Röntgenröhre, von der Größe des Induktors, von der Art des Unterbrechers, von der Zahl der Unterbrechungen, von der Größe der primären Selbstinduktion des Induktors sowie [...] [in einem Spezialfall] auch unabhängig von der Länge des Platinstiftes"²²⁷.

²²⁴Walter [1905], S. 131

²²⁵Walter [1905], S. 131

²²⁶Walter [1909-1910], S. 342

²²⁷Walter [1905], S. 129

Diese Angaben erregten jedoch die Kritik des niederländischen Radiologen Johannes Karel Augus Wertheim-Salomonson (1864 – 1922), der einen Einfluss der Unterbrecherzahl sah und auch die Form der Stromkurve nicht außer Acht lassen wollte. Daher folgte für ihn,

"dass die Milliampèremeterangabe ein Dosierungsmittel ist, welches nur mit Vorsicht und Kritik zu verwenden ist. Allein in bestimmten Fällen, wo ein und derselbe Apparat mit nur wenig ändernder Unterbrechungszahl gebraucht wird, liefert das Milliampèremeter gute Angaben, die bei der Dosierung ohne Weiteres gebraucht werden dürfen, wenn die Stromstärken innerhalb der Grenzen von 1-3 oder von 2-5 Milliampère bleiben."

Einen besonderen Vorteil hatte die Milliampèremethode jedoch gegenüber den meisten anderen Dosierungsinstrumenten – zumindest zu Beginn ihrer Verwendung: die Berücksichtigung der Röhrenhärte²²⁹, die sonst häufig unbeachtet blieb.

5.10 Bestimmung der Therapie-Dosen

Die Entwicklung zahlreicher Dosimeter, wie sie in den letzten Abschnitten beschrieben wurden, änderte nichts an der Tatsache, dass lange Zeit keine Standards existierten, welche Erkrankung mit welcher Strahlendosis behandelt werden sollte. Es bestand daher die Frage, wie man die "richtige" Dosis, die es zu applizieren galt, ermitteln konnte. Ebenso herrschte Uneinigkeit, welche physikalischen Größen zur Dokumentation einer Bestrahlung festgehalten werden sollten, um ggf. mit anderen Ärzten oder Naturwissenschaftlern Dosis und Effekt vergleichen zu können.

Es wurden mit der Zeit mehrere Verfahren der Dosisermittlung vorgeschlagen. Eine Idee bestand darin, z.B. alle Tumore, gleich welcher Entität, Lage, Größe etc., mit der gleichen Dosis – der "Tumordosis" zu bestrahlen. Dieser Ansatz war eine Weiterführung der Vorstellung, dass menschliches Gewebe, insbesondere die Haut, auf die gleichen Dosen gleich reagieren würde. Ein Ansatz der Definition der "richtigen" Dosis bestand darin, bis zu einer "Hauteinheitsdosis" zu bestrahlen, der Dosis, bei der die bestrahlte Haut eine bestimmte Rötung erreicht hatte. Weitere Ansätze waren das Ablesen aus Tabellen (s. Kap. 5.9 sowie Artikel von Richard Glocker (1890 – 1978)),Glocker [1918-19], u.a.) oder Graphen²³⁰ sowie das Berechnen der Dosis nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten. Christen nannte auch Tabellen "mit doppeltem Eingang für die Härtegrade und für die Fokaldistanzen"²³¹, also Tabellen, die offenbar auf Formeln basierten. Auch wenn er

 $^{^{228} \}mbox{Wertheim-Salomonson}$ [1910-1911], S. 296

²²⁹Walter [1907], S. 107

²³⁰s. Christen [1913a], Tafel III, zwischen S. 50 und 51

²³¹Christen [1911-1912], S. 153

mehrere Einflussgrößen dieser Tabellen – Härtegrad, Fokaldistanz, Belastung (Strom), Bestrahlungszeit – anführte, so nannte er doch keine Formel explizit. Glasser benannte in seinem Dosimetriegeschichte-Rückblick folgende Formel²³²:

$$Dosage = \frac{Milliamperes \times (Spark Gap)^2 \times Time}{(Focal Skin Distance)^2}$$
(5.2)



Abbildung 5.8: Schiebelineal nach Christen zur Berechnung von Therapiedosen: Stromstärke und Fokaldistanz mussten jeweils an der Röhre gemessen und dann die Skalen des Schiebelineals so verschoben werden, dass die jeweiligen Messwerte nebeneinander standen. Anschließend konnten Härte und Bestrahlungsdauer abgelesen werden. Abbildung aus Christen [1913b], S. 186

Als Referenz hierfür wurde ein Röntgen-Handbuch der *U.S. Army* genannt. Dort wurde die Spannungs-Größe jedoch nicht als Funkenstrecke (*spark gap*), sondern als "effective voltage in K.V. [sic]"²³³ angegeben. Zusätzlich wurde in einem Graphen die lineare Beziehung zwischen Funkenstrecke und Spannung verdeutlicht, so dass die abgelesenen Werte schnell und einfach konvertiert werden konnten. Die Wirkung der berechneten Dosis wurde durch ihren fotografischen Effekt gemessen, was u.a. die von Christen formulierte weit verbreite Meinung illustrierte:

"Nichts anderes als eine Dosierungsfrage ist auch die Berechnung der Expositionszeit bei photographischen Aufnahmen." 234

Um den Ärzten die Arbeit der Berechnung und des aus-Tabellen-Suchens zu ersparen, konstruierte Christen $1909/10^{235}$ ein Schiebelineal (s. Abb. 5.8), welches von *Reiniger*, *Gebbert & Schall* hergestellt und vertrieben wurde. Hierauf konnten verschiedene Messgrößen eingestellt und die Bestrahlungzeit abgelesen werden:

²³²Glasser [1941], S. 221

²³³Shearer [1917], S. 37

²³⁴Christen [1910a], S. 32

²³⁵Christen [1911-1912], S. 153

"Das Lineal wird nun einfach so eingestellt, daß man die gemessene Fokaldistanz auf die abgelesene Stromstärke schiebt. Dann steht jeweilen neben der Expositionszeit die zugehörige Walterzahl."²³⁶

5.11 Phantome

Mit den ersten Überlegungen, bei der Dosierung von Röntgenstrahlen nicht allein über die oberflächliche Reaktion der Haut zu gehen, gingen Überlegungen einher, wie man die Dosis in größerer Tiefe bestimmen könnte. Der erste und nächstliegendste Ansatz war, die Schicht lebendigen menschlichen Gewebes für Messungen durch (totes) Fleisch zu ersetzen. Gegenstände, die als Ersatz für durchstrahltes Gewebe dienen sollten, wurden "Phantome" genannt. Hierbei sollte es sich nicht um einen Ersatz im Sinne eines komplexen Patientensimulators handeln²³⁷, sondern lediglich die Bestrahlungsbedingungen am oder im Patienten mehr oder weniger grob nachstellen. Eine Phantom-Messung als Vorwegnahme einer Bestrahlung, wie es in der Gegenwart in bestimmten Fällen üblich ist, wurde noch nicht angestrebt.

Eine frühe und recht ausführliche Abhandlung über das Absorptionsverhalten verschiedener Materialien lieferte Perthes. Er ging bereits, ohne den Grund zu spezifizieren, von Wasser als Referenzmaterial aus und verglich die "Durchlässigkeit" diverser Materialien mit der von Wasser (s. Kap. 4.4). Außerdem erstellte Perthes Tabellen, die Angaben über Schichtdicken verschiedener Gewebe – Muskulatur, Leber, Milz, Gehirn, Haut und Subkutangewebe sowie Blut²³⁸ und Dicken gleich stark absorbierender Aluminiumschichten machten.

An dieser Stelle taucht im Jahr 1904 erstmals Aluminium als Referenzmaterial auf. Verschiedene Autoren²³⁹ gaben Veröffentlichungen von Perthes als Ursprung der Idee an, 1 mm Aluminium als Phantommaterial für 10 mm Wasser zu verwenden. In der angeführten Tabelle taucht Wasser als Vergleichsmaterial jedoch nicht auf. Auch wird ein Absorptionsverhältnis von 1:10 lediglich für 1,9 cm Milz, 1,8 cm Gehirn und 2,6 cm "Haut, Subkutangewebe und Muskelschicht"²⁴⁰ aufgeführt, was sich aber bei größeren Gewebedicken nicht bestätigt. Insbesondere Kienböck war ein Verfechter der Verwendung von Aluminium, wie sich in seiner Tiefendosismessmethode (s. Kap. 5.5.1) widerspiegelte. Als sich jedoch das Wissen um die filternde und aufhärtende Wirkung von Aluminium im Strahlengang immer weiter verbreitete, wurde vermehrt auf andere

²³⁶Christen [1913b], S. 186

²³⁷für deren Entwicklung s. z.B. Canavas [2009]

²³⁸Perthes [1904-1905], S. 19

²³⁹z. B. durch Kienböck [1914-1915a], S. 585; Krönig und Friedrich [1918], S, 42

²⁴⁰Perthes [1904-1905], S. 19

5.11. PHANTOME 119

Phantommaterialien zurückgegriffen. Die Verwendung von Fleisch erwies sich als ungeeignet²⁴¹, da es zu schwer zu konservieren und zu handhaben war. Alternativ dazu wurde Talg oder Ebenholz²⁴² vorgeschlagen.

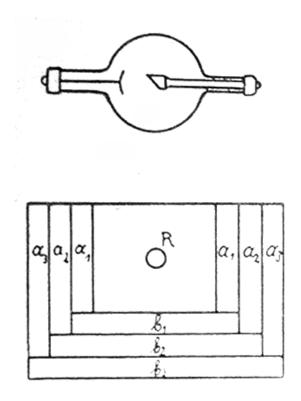


Abbildung 5.9: Versuchsanordnung zur Bestimmung des Einflusses der Phantomgröße: Es werden so viele Phantomteile a_x und b_x entfernt, dass keine merkliche Verminderung der im Phantom gemessenen Reaktion stattfindet. Abbildung aus Christen [1918-1919], S. 40.

Bald setzte sich also die Verwendung von Wasser als Referenzmaterial durch, was bis heute der Fall ist. Über das Gefäß, in dem das Wasser während der Bestrahlung aufbewahrt werden sollte, herrschte noch nicht so schnell Einigkeit. Perthes beschrieb die von ihm verwendeten Gefäße bezüglich ihres Aufbaus – "Kästen, deren Wände oder deren Boden aus paraffingetränktem Papier bestanden"²⁴³ – machte jedoch keine Angaben über ihre Größe. Kienböck beschrieb im Jahr 1914: "Man verwendet am besten eine Glaswanne mit 10: 10 cm Grundfläche und 11 cm Höhe, welche mit Wasser bis zu der Höhe von 10 cm gefüllt wird"²⁴⁴.

Einige Jahre später war die Berücksichtigung der Streuung weiter fortgeschritten. Christen beschrieb 1918 einerseits den Einfluss der Phantomgröße und -form: durch

²⁴¹Kienböck [1914-1915a], S. 585

²⁴²Holzknecht und Weissenberg [1915-1916], S. 264

²⁴³Perthes [1904-1905], S. 17

²⁴⁴Kienböck [1914-1915a], S. 588

mangelnde Streuung in zu kleinen Gefäßen konnten Messergebnisse verfälscht werden. Zusätzlich beschrieb er, wie dieser Einfluss bei Messungen minimiert werden konnte.

"Der Einfluß der Körperform […] wird dadurch ausgeschaltet, daß man die Messung am unendlich großen Körper vornimmt. Das ist so zu verstehen, daß man zuerst bestimmt, auf welche Dimensionen man den absorbierenden Körper beschränken darf, ohne mit solcher Abweichung vom unendlich großen Körper einen merklichen Fehler zu begehen. Man wird praktisch etwa so vorgehen, daß man, entsprechend Fig. 1 [hier: Abb. 5.9], das Reagens R in den absorbierenden Körper $a_0+a_1+a_2+\ldots+b_1+b_2+b_3+\ldots$ versenkt und dann soviel von den Zusatzstücken wegnimmt, bis eine merkliche Verminderung der Reaktion eintritt. Der gerade noch ohne merkliche Verminderung verbleibende Teil des absorbierenden Körpers darf dann praktisch als unendlich groß betrachtet werden."²⁴⁵



Abbildung 5.10: Fotografie eines Wasserphantoms: ein zylindrisches Gefäß aus Zinkblech mit 35 cm Durchmesser, in das eine Ionisationskammer von der Seite eingebracht werden konnte. Abbildung aus Krönig und Friedrich [1918], S. 101.

Während Christen – zumindest im Rahmen der Zeichnung – vor allem auf die laterale Ausdehnung des Phantoms hinwies, wurde später laut Glocker et al. auch auf eine ausreichende Tiefe der Wasserphantome Rücksicht genommen: "Wichtig ist

²⁴⁵Christen [1918-1919], S. 40

dabei, daß die Wasserschicht in der Strahlrichtung genügend weit ausgedehnt ist."²⁴⁶ Als laterale Ausdehnung sprach er von einer "40: 80 cm Oberfläche"²⁴⁷.

Von Phantomen existieren aus dem im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Zeitraum deutlich weniger Abbildungen als von den Messinstrumenten selbst. Eine verhältnismäßig detaillierte Darstellung ist bei Krönig und Friedrich zu finden (s. Abb. 5.10). Bei diesem Phantom handelte es sich um ein "zylindrische[s] Gefäß G aus Zinkblech von 35 cm Durchmesser und 25 cm Höhe, das meist bis zu einer Höhe H von 20 cm mit Wasser gefüllt war."²⁴⁸ Das Besondere dieses Wasserphantoms ist jedoch besser in der Schemazeichnung (s. Abb. 5.11) zu erkennen: die Höhe des Messortes war variabel, da das Wasserphantom einen seitlichen Schieber hatte, in den ein Messinstrument eingespannt werden konnte und der in gewissen Grenzen hoch- und runter gefahren werden konnte:

"Die Dimensionen des Schiebers gestatteten es, die Kammer von der Oberfläche des Wasserspiegels bis zu einer Tiefe von 10 cm zu verstellen. Die Tiefeneinstellung konnte an einer Skala, die an dem Schieber angebracht war, abgelesen werden. Außerdem befand sich zur schnellen Einstellung einer gewünschten Tiefe eine Schnappvorrichtung an dem Schieber, die von Zentimeter zu Zentimeter einsprang."²⁴⁹

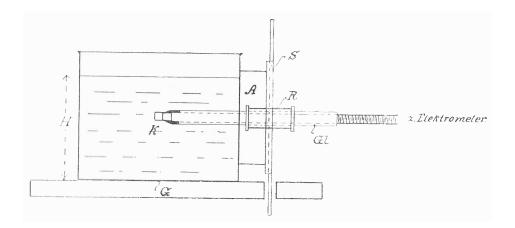


Abbildung 5.11: Schemazeichnung eines Wasserphantoms: das Zinkblechgefäß besaß an einem Ansatzstück A einen seitlichen Schieber S, mit dem die Höhe H der Ionisationskammer K variiert werden konnte. Kammer und Elektrometer wurden durch ein Messing- und ein mit Gummiringen ausgekleidetes Glasrohr Gl verbunden. Abbildung aus Krönig und Friedrich [1918], S. 100.

 $^{^{246}}$ Glocker et al. [1923], S. 393

²⁴⁷Glocker et al. [1923], S. 400

²⁴⁸Krönig und Friedrich [1918], S. 101

²⁴⁹Krönig und Friedrich [1918], S. 102

Trotz der Weiterentwicklung von Phantomen wurden sich die Messenden immer stärker der Tatsache bewusst, dass sie die Therapiebedingungen nur annähernd nachstellen, aber nie genau simulieren konnten. Daher schrieb der Arzt Lothar Heidenhain (1860 – 1940) schlussendlich, ohne dies als Manko wahrnehmen zu müssen: "Phantommessungen sind nur Schätzungen."²⁵⁰

²⁵⁰Heidenhain [1920], S. 421

Kapitel 6

Strahlungsmessung durch Ionisation

Die Entwicklung von Einheiten und Messinstrumenten für Röntgenstrahlung in Deutschland sind anfänglich – mindestens bis Ende der 1920er Jahre – untrennbar miteinander verbunden. Ebenso ist es jedoch auch kaum möglich, die Entwicklung von Messinstrumenten und Einheiten von ihrer Standardisierung zu trennen. Es existiert eine Vielfalt an Gründen, weshalb die Entwicklung so verlief. Ehrgeiz einzelner Personen hat vermutlich eine nicht zu vernachlässigende Rolle gespielt. Am wichtigsten war jedoch der auch in anderen Fachgebieten zu dieser Zeit zunehmende Wunsch nach Vergleichbarkeit, der sich praktisch in zunehmend ähnlicheren und schließlich standardisierten Instrumenten niederschlug. Damit ist diese Entwicklung als wissenschaftsinduziert einzuorden. Die Standardisierung von Messinstrumenten und -einheiten innerhalb Deutschlands fand als dritte Phase der Dosimetrie-Entwicklung statt. Sie bildet einen Teil der zweiten Phase, der therapeutische Anwendung von Röntgenstrahlung sowie der Entwicklung von Quantitäts-Messinstrumenten, begann jedoch erst einige Jahre nach Anfang der zweiten Phase.

Die Deutsche Röntgengesellschaft war ein wichtiger Befürworter der Standardisierung: sie förderte durch verschiedene Kommissionen das Verständnis für die Notwendigkeit von Vergleichbarkeit und Normen. Zusätzlich wurde die Entwicklung von Instrumenten und Einheiten durch die Tatsache beeinflusst, dass entscheidende Beiträge von nationalen Institutionen ausgingen, zu deren Aufgaben explizit die Standardisierung gehörte. Im diesem Zusammenhang tauchen insbesondere die Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Berlin-Charlottenburg) mit Hermann Behnken sowie das der Chirurgischen Klinik unterstehende Laboratorium für Medizinische Physik der Universität Göttingen mit Hans Küstner (1887 – 1946) mit jeweils starkem Einfluss auf die Standardisierung auf.

Die Bemühungen der DRG um eine Standardisierung waren zwar letztendlich formal von Erfolg gekrönt, dieser Erfolg hatte jedoch nicht viel mit den Zwischenschritten

zu tun. Die DRG setzte im Laufe der Jahre verschiedene Kommissionen ein, die sich mit Standardisierung im weitesten Sinne beschäftigten: so z.B. die Sonderkommission f "ur Dosimetervergleich" 1, die später auch <math>Sonderausschuss f "ur R"ontgenstrahlenmessung" 2 genannt wurde, sowie die Standardisierungskommission der Deutschen <math>R"ontgengesell-schaft" 3. Der Zeitpunkt der Gründung der Standardisierungskommission ist unklar; die achte Sitzung der Kommission – deren Ergebnisse im Gegensatz zu den anderen Sitzungen in den R"oFo veröffentlicht wurden – fand am 29. Mai 1925 statt. Sie sah ihre "Aufgabe [in] der Vereinheitlichung der Dosimetrie" 4 – wobei nicht spezifiziert wurde, ob es sich dabei um Ger"ate, Methoden oder Einheiten handeln sollte. Zu vermuten ist, dass auf Grund der in den vorangehenden Kapiteln geschilderten Entwicklungen diese drei Ebenen noch nicht scharf getrennt werden konnten und dass sich erst im Nachhinein terminologische Klärungen ergeben konnten.

Die verschiedenen Kommissionen hatten zahlreiche namhafte Mitglieder: der Sonderkommission für Dosimetervergleich gehörten u.a. Bauer, Christen, Fürstenau, Holzknecht und Wertheim-Salomonson, zur Standardisierungskommission u.a. Behnken, Friedrich, Leonhard Grebe (1883 – 1967), Hermann Holthusen (1886 – 1971), Heinrich Martius (1885 – 1965), Meyer und Rump (teils als Vertreter für Wintz). Viele der Genannten hatten bereits aktiv Beiträge zur Einheiten- und insbesondere zur Gerätentwicklung geleistet, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurde.

Trotz oder vielleicht aufgrund der Ansammlung bekannter Wissenschaftler ergab sich zunächst kein sehr zielgerichteter Prozess der Vereinheitlichung. Stattdessen enthielten Berichte der ersten Kommissionen eine Ansammlung von Darstellungen der einzelnen Mitglieder, in denen zumeist die eigene Sichtweise propagiert und nicht an einem Kompromiss gearbeitet wurde. Eine einheitliches Messprinzip ergab sich erst, als sich viele der bis dahin experimentierenden Ärzten durch den Ersten Weltkrieg anderen Aufgaben widmen mussten. In diesem Zeitraum nahm anstatt der bis dahin genutzten chemischen Messmittel die Verwendung von Ionisationskammern in der medizinischen Strahlungsmessung zu; es waren zunehmend Physiker in der Medzinphysik tätig. Es wurde deutlich, dass letzteren das bis dahin weit verbeitete Prinzip "überhaupt messen ist schon gut" nicht ausreichte: die Naturwissenschaftler strebten exakt quantifizierbare, vergleichbare Messungen statt individuellen Einschätzungen von Farbänderungen an.

In diesem Zusammenhang arbeiteten vor allem die genannten Physiker Küstner und Behnken an einer Vereinheitlichung der Messung. Dass diese Arbeit nicht gemeinsam

¹Deutsche Röntgengesellschaft [1915-1916]

²Deutsche Röntgengesellschaft [1916-1917]

 $^{^3}$ Holthusen [1925]

⁴Holthusen [1925], S. 643

durchgeführt wurde, zeigt folgendes Zitat von Küstner:

"Aus diesem Mangel an einer geeigneten Einheit schlug ich [Fußnote: H. Küstner, Strahlentherapie 15, 611, 1923] auf dem Röntgenkongreß im vergangenen Jahre vor, die Empfindlichkeit des Standardgeräts selbst bei jeder Wellenlänge der Röntgenstrahlen vorläufig als Einheit zu wählen, bis eine praktisch brauchbare Einheit gefunden wäre. Unter diesem Gedanken wurden die im folgenden beschriebenen Untersuchungen angestellt. Als sie abgeschlossen waren, veröffentlichte Behnken seine Arbeit über seine elektrostatische Dosiseinheit "1 Röntgen". Dem Bedürfnis nach einer physikalisch scharf definierten und meßbaren und praktisch brauchbaren Einheit ist damit Genüge getan."⁵

Als Reaktion auf die Arbeit der *PTR* bzw. von Behnken beschloss die *Deutsche Rönt-gengesellschaft* einige Zeit später die Adaption der Einheit "Röntgen" (s. Kap. 7.5). Das Problem der Einheitenstandardisierung schien daraufhin vorläufig für den deutschsprachigen Raum gelöst (bis es kurz darauf auf internationaler Ebene wieder aufgegriffen wurde).

Da es praktisch kaum möglich ist, die Entwicklung von Messgeräten und Einheiten getrennt von ihrer Standardisierung darzustellen, werden die folgenden Kapitel auf eine andere Art geteilt: zunächst wird in diesem Kapitel die Entwicklung von Ionisations-Messinstrumenten untersucht, bevor in Kap. 7 die Entwicklung der Einheiten inklusive ihrer Standardisierung behandelt wird.

6.1 Erste auf Ionisation beruhende Messinstrumente

Schon bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen waren deren Eigenschaften, insbesondere die Ionisation von Luft, ins Zentrum des Interesses vieler Wissenschaftler gerückt. Benoist und Hurmuzescu berichteteten 1896, dass Röntgenstrahlen ein Elektroskop "sofort und direkt" entladen konnten. Gleiches galt auch für planparallele Kondensatoren⁷, wie durch Perrin verdeutlicht wurde (s. Abb. 6.1):

"un conducteur plan, et sans le toucher, un pinceau de rayons. [...] Un des armatures est liée à l'aiguille d'un electromètre, en sorte qu'on peut mesurer la quanitité d'électricité qu'elle perd sous l'influence des rayons."⁸

 $^{^{5}}$ Küstner [1924b], S. 57-58

⁶Benoist und Hurmuzescu [1896], S. 235

⁷Perrin [1896a], S. 352

⁸Perrin [1896b], S. 879

Auch Marie Curie (1867 – 1934) benutzte – wie Perrin – für ihre Messungen mit radioaktiven Stoffen Plattenkondensatoren⁹. Ein anderer Versuchsaufbau, in diesem Fall als Nachweis der Ionisierung von Gas durch Röntgenstrahlen, wurde von Rutherford und Thomson verwendet.

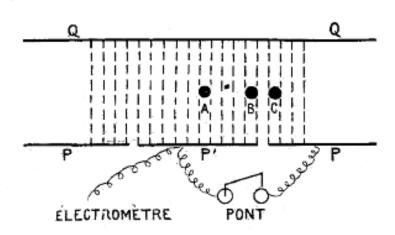


Abbildung 6.1: Plattenkondensator zur Ionisationsmessung nach Perrin. Abbildung nach Perrin [1896a], S. 351.

"Take an insulated wire charged up to a high potential and surrounded by a tube made of a non-conducting substance: let this tube lead into a large insulated metallic vessel connected with an electrometer. If now air which has been exposed to Röntgen rays is blown through the tube into this vessel the electrometer will be deflected. This proves that the gas inside the vessel is charged with electricity." ¹⁰

Perrins Apparat wurde z.B. von Glasser [1941] als "first large open air ionization chamber"¹¹ dargestellt. Obwohl also bereits 1896 die Grundlagen der Strahlungsmessung mittels Ionisationskammern gelegt waren, blieb ihre Verwendung zunächst für mehr als ein Jahrzehnt auf den Bereich der reinen Physik beschränkt. Erst 1908 hob Villard die Vorteile von Ionisations-Messinstrumenten auch im medizinphysikalischen Gebrauch hervor. Die folgenden Abschnitte sollen einen Überblick über wichtige Schritte der Ionisationskammer-Entwicklung und verschiedene Kammertypen geben.

⁹Curie [1898], S. 1101

¹⁰Thomson und Rutherford [1896], S. 394

¹¹Glasser [1941], S. 224

6.2 Villardsches Quantitometer

Gemeinsam mit seinem Radiosklerometer zur Härtemessung (s. Kap. 4.3.3) schlug Villard ein auf Ionisation beruhendes Strahlungsquantiätsmessgerät vor. Er selbst nannte es "compteur de quantité", also einen "Zähler" für die Strahlungsmenge, oder Quantitometer.

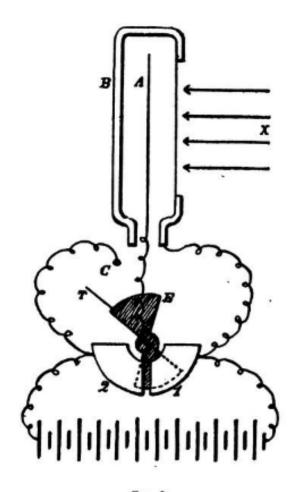


Fig. 3. Schéma du Quantitomètre.

Abbildung 6.2: Schemazeichnung des Villardschen Quantitometers: In einer Kammer B befand sich eine Elektrode A, die mit einem Zeiger verbunden war. Ein Ausschlag des Zeigers wurde hervorgerufen, wenn durch die Eintrittsöffnung der Kammer Strahlung eindrang und sich dadurch das Verhältnis der Potentiale von Elektrode und Zeiger sowie der Kammer änderte. Abbildung aus Villard [1908b], S. 697.

Das Gerät basierte auf einer in einer Kammer platzierten Elektrode (s. Abb. 6.2), die mit konstantem Potential betrieben wurde. Die Elektrode war mit einem Zeiger eines Elektrometers verbunden, so dass ein Ausschlag angezeigt wurde, wenn durch die mit einer dünnen, leitenden Folie bedeckten Eintrittsöffnung Strahlung in die Kammer eintrat. Der Ausschlag wurde hervorgerufen, wenn durch Ionisation das gemeinsame Potential von Elektrode und Zeiger sich dem der umgebenden Kammer näherte.¹² Es handelte sich dabei um eine Serie von Schwingungen "dont chacune correspond à une dose constante de rayons, dose qui dépend uniquement de la capacité électrique du système et des dimensions de la boîte."¹³ Die Bewegung wurde mit Hilfe eines Uhrwerks als Anzahl von Schwingungen pro Zeitintervall gemessen; diese Größe sah Villard als "direkt proportional"¹⁴ zur Strahlungsmenge, die die Kammer erhielt. Obwohl die von Villard vorgeschlagene Einheit wegweisend war (siehe dazu im Detail unten Kap. 7.4) und die Grundlage für die Entwicklung auf Ionisation basierender Einheiten bildete, wurde auf Villards Instrument kaum Bezug genommen: es wurde nie kommerziell hergestellt¹⁵.

6.3 Iontoquantimeter (Szilard)

Wie Villards Quantitometer war auch der nächste wichtige Schritt in der Entwicklung der Ionisationsmessinstrumente, Béla Szilards Iontoquantimeter, ein Gesamtsystem aus einem Strahlungsrezeptor und einer Auswertungseinheit (s. Abb. 6.3). [Es handelt sich hier um Béla Szilard (1884 – 1926), nicht um – wie z.B. von Loon und Tiggelen [2004] angegeben – den durch die Mitarbeit am Manhatten-Projekt bekannten Léo Szilárd (1898 – 1964).] Das Instrument erschien 1913 in Deutschland auf dem Markt – Christen erwähnte es in seinem Übersichtswerk "Messung und Dosierung der Röntgenstrahlen" im Anhang als "neues Instrument"¹⁶. Die Konstruktionsweise eines weiteren, speziell auf Radioaktivitätsmessungen ausgelegten Gerätes¹⁷ lässt sich bei Szilard bis 1910¹⁸ zurückverfolgen. Die beiden verschiedenen Instrumente hatten jedoch nur die Technik der Übertragung der Elektroskop-Bewegung in eine Skala-Anzeige gemein.

Szilard beschrieb den Strahlungsrezeptor als "nichts weiter als eine kleine Ionisationskammer"¹⁹. Diese hatte jedoch – bis auf die Tatsache, dass in ihr Luft ionisiert wurde – nicht viel mit anderen Instrumenten dieses Namens gemeinsam. Sie hatte eine zylindrische Form, ein Volumen von einem Kubikzentimeter und eine stielförminge Elektrode in der Mitte der Kammer. Die Kammer hatte "sehr dicke" Wände aus Metall

¹²Villard [1908b], S. 696

¹³Villard [1908b], S. 697

¹⁴Villard [1908b], S. 698

¹⁵Béclère [1927], S. 67

¹⁶Christen [1913a], S. 118

¹⁷beschrieben in Szilard [1914]

¹⁸Szilard [1910]

¹⁹Szilard [1915], S. 757

und an einer Seite ein Eintrittsfenster aus einer dünnen Aluminiumschicht.

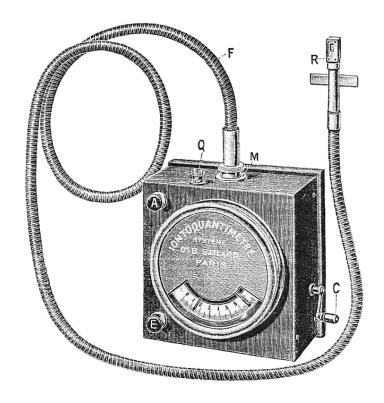


Abbildung 6.3: Iontoquantimeter nach Szilard aus Rezeptor (Ionisationskammer) und Auswertungseinheit (Elektrometer), verbunden durch ein Kabel (F). Abbildung aus Szilard [1915], S. 757.

Weiterhin benötigte das Iontoquantimeter eine "Stromquelle C, welche die Ladung für den Kondensator liefert und dem Meßsystem B, welches jederzeit die Gesamtzahl der sukzessive durch die Strahlung am Rezeptor R freigewordenen Ionen"²⁰ angab (s. Abb. 6.4). Das Messsystem bestand aus einem Sektor-Elektrometer: ein auf einer Spiralfeder gelagerter Nadelzeiger besaß an einem Ende einen "Rohrsektor, und diesem gegenüber ist exzentrisch ein anderer Sektor fest angebracht, und zwar so, daß sie sich an der Seite des maximalen Zeigerausschlages schneiden. Der Sektor ist mit der Kammer verbunden"²¹. Auf der Skala konnte dann die "Voltzahl des Kondensators" abgelesen werden konnte, wenn durch zwei Hebel der Kontakt zwischen Elektrometer und Kammer-Kabel hergestellt war.

"Dieses Kabel besteht aus einem Metalldocht, der aus feinen Metallfäden besteht, die in der Achse einer weichen, isolierenden Kautschukmasse eingebettet sind, welche wiederum von einem biegsamen Metallrohr bedeckt ist."²²

²⁰Szilard [1915], S. 755

²¹Szilard [1915], S. 755

²²Szilard [1915], S. 756-757

Außerdem schlug Szilard alternativ zur Skala in Spannungseinheiten eine weitere Einheit zur Graduierung vor, nämlich die Anzahl von durch die Strahlung gebildeten Ionen: "man konstatiert, daß die Zahl der in der Zeiteinheit gebildeten Teilchen proportional ist mit der Intensität der Strahlung, welche sie erzeugt"²³. Auf diese Einheit wird in Kap. 7.4 genauer eingegangen.

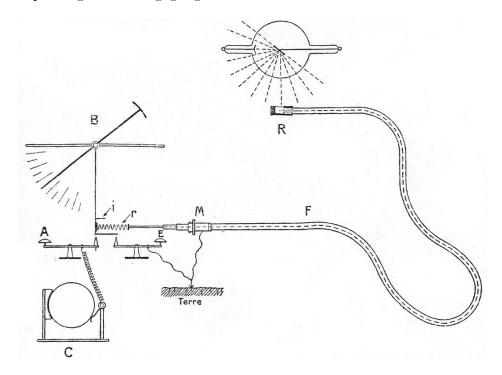


Abbildung 6.4: Schemazeichnung des Szilard-Iontoquantimeters: eine Ionisationskammer (Rezeptor R) ist durch ein Kabel (F) mit einem Sektor-Elektrometer mit Skala (B) verbunden; dieses wird durch eine Stromquelle (C) versorgt. Abbildung aus Szilard [1915], S. 756.

Nach der Einführung von Szilards Iontoquantimeters trat in Europa – bedingt durch den Ersten Weltkrieg – eine Pause in der Entwicklung bzw. Veröffentlichung verbesserter Messinstrumente ein. Ab 1918 finden sich wieder vermehrt Veröffentlichungen über Ionisationskammern, insbesondere sind in diesem Zusammenhang das Buch "Physikalische und biologische Grundlagen der Strahlentherapie"²⁴ der Freiburger Wissenschaftler Bernhard Krönig (Gynäkologe, 1863 – 1917) und Walter Friedrich (Physiker; vorher Kollege von M. von Laue (1879 – 1960) und Paul Knipping (1883 – 1935) bei Röntgeninterferenz-Experimenten), sowie Hermann Holthusens Artikel "Über die Bedingungen der Röntgenstrahlenenergiemessung bei verschiedenen Impulsbreiten auf luftelektrischem Wege"²⁵ zu nennen. Auf einige Messgeräte, die das Prinzip der Io-

²³Szilard [1915], S. 745

²⁴Krönig und Friedrich [1918]

 $^{^{25}}$ Holthusen [1918-1919]

nisation zur Strahlungsmessung einsetzen, soll im Folgenden gesondert eingegangen werden.

6.4 Integral-Iontometer

Das Integral-Iontometer gehört zu den Instrumenten, die Christen im Rahmen seiner Tätigkeit bei Reiniger, Gebbert & Schall entwickelte. Das Integral-Iontometer sollte ein auf Ionisation beruhendes Verfahren darstellen, das außerdem härteunabhängig war. Die Härteunabhängigkeit wollte Christen dadurch herstellen, dass ein Absorptionskörper im Strahlengang direkt vor bzw. auf der Ionisationskammer montiert wurde. Christen hielt einen Absorptionskörper für notwendig, da er folgende Voraussetzungen machte:

- "1. Je härter die Strahlung, desto mehr geht durch den Absorptionskörper A hindurch.
- 2. Je härter die Strahlung, desto weniger wird in der Luft der Ionisationskammer absorbiert, desto geringer ist die ionisierende Wirkung."²⁶

Christen wies ausdrücklich darauf hin, dass sich diese beiden Eigenschaften nicht automatisch aufhoben. Er gab daher dem Absorptionskörper eine spezielle Form – es sollte ein "rotationsparabolische[r] Hohlkörper über eine[r] kreiszylindrische[n] Kammer"²⁷ sein (s. Abb. 6.5) – weshalb das Integral-Iontometer auch für inhomogene Strahlung verwendbar sein sollte. Letztendlich wurde durch den Hohlkörper das Strahlprofil verändert.

Auf den aus heutiger Sicht interessantesten Punkt des Integral-Iontometers, den Absorptionskörper, ging Christen nur aus theoretischer Sicht ein, er nannte auch kein Beispielmaterial für eine konkrete Energie.

"Einzige Vorbedingung für die richtige Funktion des Apparates ist eine solche Auswahl des absorbierenden Materials, daß alle Änderungen der Absorption in diesem Material der Absorption in Luft proportional sind. Mit anderen Worten: wenn die Halbwertschicht der Strahlung in Luft um p % zunimmt, so muß auch ihre Halbwertschicht in dem Material des Absorptionskörpers um p % zunehmen."²⁸

Wahrscheinlich bedingt durch den Ersten Weltkrieg findet sich kaum ein Echo auf das Integral-Iontometer in der medizinphysikalischen Literatur.

²⁶Christen [1915-1916b], S. 521

²⁷Christen [1915-1916b], S. 522

²⁸Christen [1915-1916b], S. 522-523

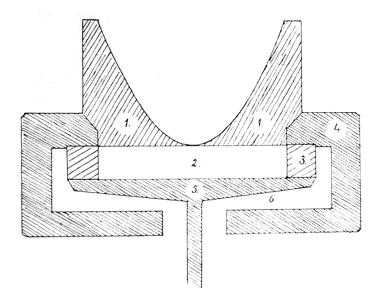


Abbildung 6.5: Querschnitt eines Integral-Iontometers. Das Instrument sollte nach Christens Vorstellung durch einen speziellen Absorptionskörper (1.) über der Ionisationskammer (2.) eine härteunabhängige Dosismessung ermöglichen. Abbildung aus Christen [1915-1916b], S. 522.

6.5 Iontoquantimeter von Reiniger, Gebbert & Schall

Etwa zum gleichen Zeitpunkt wie Christens Integral-Iontometer entstand das ebenfalls von Reiniger, Gebbert & Schall²⁹ produzierte Iontoquantimeter. Letzteres hatte mit Szilards Iontoquantimeter außer dem Namen wenig gemein und wird zur Unterscheidung im Folgenden mit RGS-Iontoquantimeter abgekürzt. Eine Originaldarstellung des RGS-Iontoquantimeters lässt sich weder in den einschlägigen Strahlentherapie-Zeitschriften noch in den Patentdatenbanken DEPATISnet [2014] und Espacenet [2014] finden. Die beste Beschreibung stammt von Krönig und Friedrich [1918]. Diese bezogen sich auf das "im Handel befindlich[e] Iontoquantimeter"³⁰, "es besteht, wie bekannt, aus einem Elektrometer, das durch eine gegen Strahlen geschützte Zuleitung mit einer Ionisationskammer in Verbindung steht."³¹.

Die Ionisationskammer (s. Abb. 6.6) hatte eine Quaderform³², ein Innenvolumen von einem Kubikzentimeter und eine stielförminge Elektrode in der Mitte der Kammer. Die Kammerwände bestanden von außen nach innen aus ca. 0,5 mm Messing, 3 mm Blei

²⁹Krönig und Friedrich [1918], S. 62

³⁰Krönig und Friedrich [1918], S. 68

³¹Krönig und Friedrich [1918], S. 62

³²Krönig und Friedrich [1918], S. 68

und 1 mm Silber 33 ; es gab ein Eintrittsfenster, das aus einer dünnen Aluminiumfolie bestand. Als Innenelektrode diente ein "bernstein-isolierter Messingstift E von 2 mm Durchmesser und etwa 1 cm Länge." 34

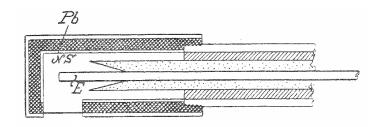


Abbildung 6.6: Schemazeichnung der Ionisationskammer des Iontoquantimeters von Reiniger, Gebbert & Schall: Die Wände der Kammer bestanden (von außen nach innen) aus Messing, Blei und Neusilber, das Eintrittsfenster aus Aluminiumfolie. In der Kammer befand sich eine Messingelektrode, die mit Bernstein isoliert war. Abbildung aus Krönig und Friedrich [1918], S. 68.

6.6 Material der Ionisationskammer

Auch wenn während des Krieges verstärkt Artikel zu eher kriegsrelevanten Themen – Röntgendiagnostik von Verletzungen und Geschossen o.dgl. – erschienen, beschäftigten sich doch verschiedene Wissenschaftler mit den verschiedenen Iontoquantimetern und deren Vor- und Nachteilen. Obgleich die Messung von Ionisation in Luft insbesondere durch Physiker begrüßt und als die potentiell genauestmögliche Messmethode angesehen wurde, so zeigte sich doch schnell, dass die Auslösung von Sekundärelektronen in der Kammerwand die Genauigkeit der Messung stark beeinträchtigte. Um diese Fehlerquelle auszuschalten, gab es zwei verschiedene Lösungsansätze: entweder das Wandmaterial von kleinen Kammern so zu verändern, dass die Sekundärelektronenentstehung signifikant vermindert wurde, oder aber die Kammer derart zu vergrößern, dass die in der Wand entstandenen Elektronen nicht bis zum Messort in der Kammermitte gelangten. Auf beide Ansätze soll im Folgenden eingegangen werden.

Die frühen Ionisationskammer-Typen setzten auf Metall als Kammermaterial. Dies lag u.a. an der Entwicklung der Ionisationskammer aus dem Kondensator, hatte jedoch auch Stabilitätsgründe. So wird z.B. für das RGS-Iontoquantimeter beschrieben, es bestünde aus einem Messingrohr, umgeben Blei- sowie Silberschicht als Stabilisator der sonst zu leicht eindrückbaren Kammer³⁵. Blei wurde verwendet, um das Messsystem

³³Krönig und Friedrich [1918], S. 68

³⁴Krönig und Friedrich [1918], S. 68

³⁵Krönig und Friedrich [1918], S. 68

vor Strahlung aus anderen Richtungen als der vorgesehenen zu schützen.

Eine starke Schirmung hatte jedoch auch zur Folge, dass die Außenmaße der Kammer wuchsen, was nicht immer wünschenswert war: für In-Vivo-Messungen wurden Kammern benötigt, die in Körperöffnungen eingeführt werden konnten. So entstand der Kammertyp "Fingerhutkammer" (engl. "thimble type chamber"), der die Form und das Volumen eines Fingerhuts hatte, sodass die Einbringung in den Patienten gut durchführbar war.

Grossmann schlug vor, dass das Sekundärelektronen-Problem dadurch zu umgehen, dass Messmaterialien mit einem geringen Atomgewicht verwendet werden sollten. Er argumentierte hierfür folgendermaßen: aus den Versuchen von Barkla und Sadler folge, dass Halbwertschichten zweier Stoffe in den Gebieten, in denen jeweils keine selektive Absorption stattfände, proportional seien. Für Stoffe mit einem Atomgewicht kleiner 27 (also kleiner als dem von Aluminium) gäbe es eine Fluoreszenz-Sekundärstrahlung, die weicher als die von Aluminium sei. Der Halbwertschicht-Kurvenverlauf müssen stetig und gleichartig sein, also müsse auch die Halbwertschicht-Kurve eines Stoffes mit Atomgewicht kleiner 27 stetig und gleichartig sein und könne daher als "eindeutiges Maß" der Strahlenhärte angesehen werden. 36 In der Zusammenfassung des entsprechenden Artikels fügte Grossmann diesem Resümee noch hinzu, dass nur ein solcher Stoff mit Atomgewicht kleiner 27 "zur einwandfreien Bestimmung der in den Weichteilen des menschlichen Körpers aufgenommenen Dosis"³⁷ geeignet sei. In einem etwas später eingereichten Patent für Ionisationskammern hieß es, es sei "vorteilhaft, an dem Strahlenempfänger nur Stoffe von ähnlicher chemischer Natur wie das lebende Gewebe zu verwenden, als etwa die Kammerkapsel [...] aus einem tierischen Stoffe von vernachlässigbarem Absorptionsvermögen³⁸ herzustellen. So sollte gewährleistet werden, dass sich der "Strahlenempfänger [...] dann in allen seinen Teilen praktisch nicht von den Geweben des lebenden Körpers [unterschied], in dessen Höhlen eingeführt er beispielsweise zur Messung"³⁹ diente.

Zur praktischen Umsetzung der Verringerung der an den Wänden ausgelösten Sekundärstrahlung gab es nun verschiedene Strategien: entweder wurden die gesamten Kammerwände aus bestimmten Materialien hergestellt, oder es wurden die Innenräume der Kammern mit einem entsprechenden Material beschichtet. Beispiele für verwendete Materialien waren Schellack, Gelatine, Paraffin⁴⁰, Zelluloid oder Büffelhorn⁴¹,

³⁶Grossmann [1914-1915], S. 122

³⁷Grossmann [1914-1915], S. 142

³⁸Reiniger, Gebbert und Schall A.G [1917], S. 2

³⁹Reiniger, Gebbert und Schall A.G [1917], S. 2

⁴⁰Holthusen [1918-1919], S. 221

⁴¹Reiniger, Gebbert und Schall A.G [1917], S. 1 bzw. 2

Elfenbein⁴², Holz und Pressspahn⁴³ sowie "Kohle oder Graphit"⁴⁴. Zusätzlich wurden Kombinationen dieser Materialien verwendet.

Konstruktionsbeispiele für Fingerhutkammern aus speziellen Materialien gab ein im Jahr 1917 in Österreich eingereichtes Patent (s. Abb. 6.7 und Abb. 6.8) von Reiniger, Gebbert & Schall. Die in Abb. 6.7 dargestellte Kammer bestand aus Glas und hatte eine spiralförmig im Inneren der Kapsel angebrachte Elektrode aus dünnem Draht⁴⁵. Alternativ schlug der Hersteller vor, der Draht könne zu einem "Traggestell" umgebaut werden, sodass die Kammerwand aus einem "nachgiebigen Stoffe beispielsweise Gummi"⁴⁶ bestehen konnte und doch Form und Volumen gleich blieben.

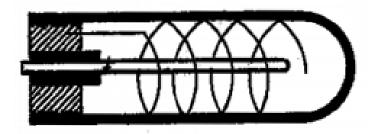


Abbildung 6.7: Schemazeichnung einer Fingerhutkammer: die Kammerhülle bestand aus Glas und besaß als äußere Elektrode einen dünnen spiralförmig gewickelten Draht. Abbildung nach Reiniger, Gebbert und Schall A.G [1917], S. 3.

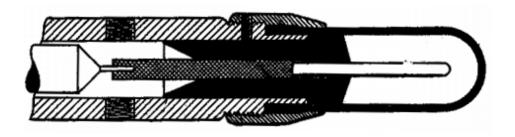


Abbildung 6.8: Schemazeichnung einer Fingerhutkammer: die Kammerhülle bestand aus einem "tierischen Stoffe" wie Büffelhorn und war von innen dünn mit Graphit beschichtet. Als innere Elektrode wurde ein Graphitstift verwendet. Abbildung nach Reiniger, Gebbert und Schall A.G [1917], S. 3.

Die in Abb. 6.8 dargestellte Kammer besaß Wände aus einem "tierischen Stoffe"

⁴²Fricke und Glasser [1925b], S. 463

⁴³Krönig und Friedrich [1918], S. 72

⁴⁴Krönig und Friedrich [1918], S. 70

⁴⁵Reiniger, Gebbert und Schall A.G [1917], S. 1

⁴⁶Reiniger, Gebbert und Schall A.G [1917], S. 1

sowie an deren Innenseite eine dünne leitende Beschichtung mit Graphit⁴⁷ und sollte so ein geringes Absorptionsvermögen bieten. Der Boden der Kammer wurde aus Bernstein hergestellt.

Ausgehend von Untersuchungen des RGS-Iontoquantimeters variierten auch Krönig und Friedrich die Materialien, aus denen sie Ionisationskammern herstellten, da sie festgestellt hatten, dass "ein [...] schwerer Konstruktionsfehler der Ionisationskammer [...] in der Wahl des Materials" 48 lag. Eine Variante (s. Abb. 6.9 oben) ähnelt in ihrer Konstruktion sehr stark einer der vorgestellten Kammern von Reiniger, $Gebbert \, \mathcal{E} Schall$ (s. Abb. 6.8), ohne jedoch auf diese Firma oder das Patent Bezug zu nehmen.

In Hinblick auf das Wandmaterial schrieben Krönig und Friedrich:

"Wir können aber den Fehler der Wandstrahlung auch dadurch beseitigen, daß wir nicht, wie bei der käuflichen Ionisationskammer, Metalle von hohem Atomgewicht als Wandbekleidung wählen, sondern ein leitendes Material von niedrigem Atomgewicht, zum Beispiel Kohle oder Graphit. Die zwar auch hier vorhandene Wandstrahlung wird deshalb nicht zur Fehlerquelle, weil die von der Kohle ausgehende Sekundärstrahlung proportional der Absorption der Primärstrahlung in der Kohle und somit auch proportional der Absorption in dem biologischen Objekt ist."⁴⁹

Die oberste in Abb. 6.9 dargestellte Ionisationskammer bestand aus Büffelhorn mit einer Wandstärke von ca. 0,8 mm⁵⁰. Kammerbeschichtung und Elektrode waren aus Graphit. In Bezug auf die Maße gaben Krönig und Friedrich an: "Als zweckmäßige Größenmaße der Ionisationskammer benutzten wir einen lichten Durchmesser von 10 mm und eine lichte Länge von 20 mm. Die Graphitelektrode war 2 mm stark und 15 mm lang."⁵¹

Die in der Mitte und unten in Abb. 6.9 dargestellten Ionisationskammern bestanden aus unterschiedlich dickem Aluminium, je nach Verwendungszweck:

"Bei dem einen Modell bestand die Kammerwand aus einem Aluminiumrohr mit konischer Spitze von 2 mm Wandstärke. Dieses Modell wurde von uns besonders bei der Messung in Körperhöhlen verwandt, wo eine größere Stabilität der Kammer erforderlich ist. Für oberflächliche Messung verwandten wir noch ein zweites Modell, bei dem die Wandstärke möglichst dünn gewählt wurde. Sie betrug nur 1/10 mm."⁵²

⁴⁷Reiniger, Gebbert und Schall A.G [1917], S. 2

⁴⁸Krönig und Friedrich [1918], S. 69

⁴⁹Krönig und Friedrich [1918], S. 70

⁵⁰Krönig und Friedrich [1918], S. 72

⁵¹Krönig und Friedrich [1918], S. 74

⁵²Krönig und Friedrich [1918], S. 74-75

Auch einige Jahre später wurden für Fingerhutkammern laut Küstner ähnliche Größendimensionen wie von Krönig und Friedrich angegeben: eine von Küstner verwendete Kammer bestand aus einem "Kohletiegel von 14 mm lichter Weite, 19 mm Länge und 1 mm Wandstärke"⁵³ mit Graphitelektrode (s. Abb. 6.10).

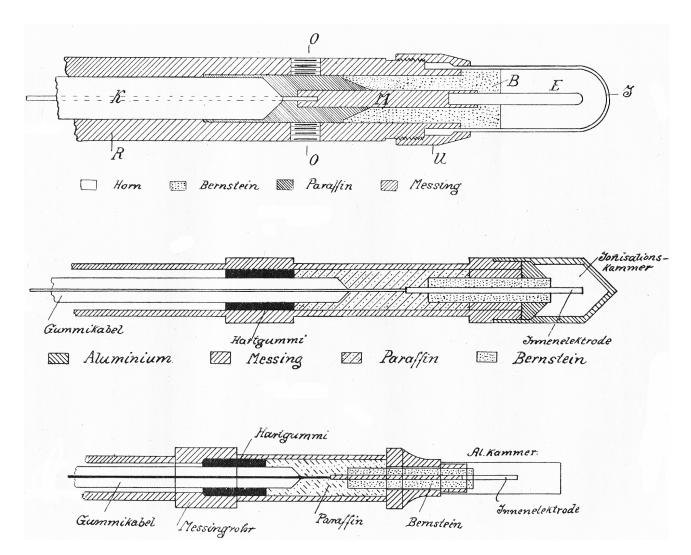


Abbildung 6.9: Konstruktionsbilder von Ionisationskammern aus verschiedenen Materialien. Oben: Kammer aus mit Graphit beschichtetem Büffelhorn. Mitte: Kammer aus Aluminium zur Messung in Körperhöhlen. Unten: Kammer aus Aluminium für Messungen auf einer Oberfläche. Abbildung aus Krönig und Friedrich [1918], S. 73.

Anfang der 1920er Jahre wurde der Materialvariations-Ansatz – etwas von der vorigen Darstellung abweichend – so formuliert⁵⁴, dass nicht mehr eine Gewebe- sondern eine Luftäquivalenz der Kammer hergestellt werden sollte. Dies sollte umgesetzt werden,

⁵³Küstner [1924a], S. 17

⁵⁴z.B. durch Friedrich und Glasser [1923], S. 363

indem als Wandmaterial ein Material verwendet wurde, dessen effektive Ordnungszahl der von Luft $(Z = 7, 78)^{55}$ entsprach.

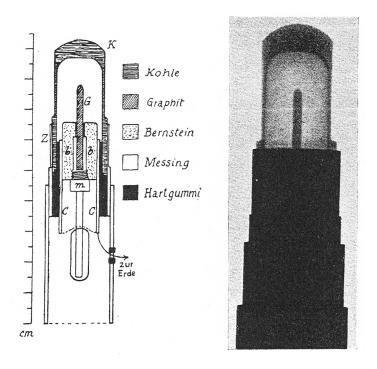


Abbildung 6.10: Konstruktionsbild (links) und Röntgenaufnahme (rechts) einer "Fingerhutkamera" aus "einem Kohletiegel von 14 mm lichter Weite, 19 mm Länge und 1 mm Wandstärke" mit Graphitelektrode. Abbildung und Bildunterschrift aus Küstner [1924a], S. 16-17.

Friedrich und Glasser erwähnten, dass nicht nur die Kammerwände, sondern auch die Elektroden aus diesen "leichten" Materialien hergestellt wurden, auch wurde eine "Elektrode in Form eines graphitierten Papierringes"⁵⁶ verwendet. Des Weiteren wurden Experimenten mit Kammern aus Papier- und Papphülsen⁵⁷ durchgeführt.

Insbesondere die frühe Forschung Krönigs und Friedrichs hatte jedoch nicht nur zum Ziel, die Messung mit Ionisationskammern physikalisch exakt durchführen zu können, sondern auch, eine Messung zu erhalten, die der "biologischen Wirkung" proportional sein sollte. Durch eine recht schwammige, wenig exakte Definition der biologischen Wirkung und durch die Vermischung von physikalischen und biologischen Methoden war es insgesamt schwierig, ein eindeutiges Ergebnis zu erreichen. Zeitgenossen schlossen dennoch, dass eine "Kammer aus Horn mit Graphitüberzug im Inneren weitgehend proportional der biologischen Wirkung anspricht."⁵⁸ Auch wenn die Richtigkeit dieser

⁵⁵Johns und Cunningham [1983], S. 243

⁵⁶Friedrich und Glasser [1923], S. 364

⁵⁷Wels [1922], S. 176

⁵⁸Küpferle und Seemann [1920], S. 1065

Aussage schwer beurteilbar ist, so war doch das Ergebnis der Konstruktion der Kammer für die weiteren Kammerverbesserungen förderlich.

6.7 Größe der Ionisationskammer

Um die Effekte der Ionisationskammerwände auf die Messung möglichst gering zu halten, wurde – teils alternativ, teils zusätzlich zur Anpassung des Wandmaterials – das Kammervolumen variiert. Im deutschsprachigen Raum wird die Entwicklung der theoretischen Grundlagen solcher Kammern insbesondere auf Holthusen zurückgeführt. Dieser stellte aufgrund eigener Messungen und wohl aufbauend auf spezielle Experimente Philipp Lenards⁵⁹ (1862 – 1947) folgende Forderungen an eine Ionisationskammer auf:

- "1. Sättigung: d.h. alle erzeugten Ionen müssen, ehe sie sich wiedervereinigen können, restlos zur Messung gelangen.
- 2. Die Kammer muß solche Dimensionen haben, daß die von den Röntgenstrahlen primär ausgelösten Elektronen die Kammerwände nicht erreichen.
- 3. Es dürfen nur die von den Röntgenstrahlen an Luft ausgelösten Elektronen wirksam sein." 60

Die erste Forderung beinhaltete, dass ein ausreichend großer Strom an die Kammer angelegt werden musste. Dieser stieg mit der Kammergröße; mit zunehmender Kammergröße wurde es außerdem schwieriger, ein homogenes elektrisches Feld zu erzeugen.

Die zweite Forderung implizierte eine Energieabhängigkeit, da die Reichweite der Sekundärelektronen von der Energie der Primärstrahlung abhängig war. Schon bei einer mit 260 kV betriebenen Röntgenröhre betrug die Reichweite der Elektronen bis zu 70 cm⁶¹. Wurden die Kammerdimensionen zu klein gewählt und war daher die Reichweite der Sekundärelektronen größer als die Kammer, ergab sich ein zu geringer Messwert⁶² und damit eine zu geringe Sensitivität der Kammer. Daher führte der Wunsch nach Genauigkeit zu einer wachsenden Kammergröße⁶³.

Ein Typ von Ionisationskammer, bei dem sich die Größe der Kammer nach der Energie richtete, wurde von Holthusen verwendet und beschrieben.

"Für die Konstruktion des Meßraumes selber war die Forderung der maximalen Ausnutzung der sekundären Kathodenstrahlen maßgebend. Am praktischten

⁵⁹Küstner [1923], S. 617 bezieht sich auf Holthusen [1918-1919]; es wird kein Beitrag Lenards spezifiziert

 $^{^{60}}$ Küstner [1923], S. 617, Bezug nehmend auf Holthusen [1918-1919]

⁶¹Siemens & Halske AG [1920], S. 1

⁶²Grebe und Martius [1919-1921], S. 512

⁶³Küstner [1924a], S. 9

erwies sich die Konstruktion nach Art des Zylinderkondensators [s. Abb. 6.11]. Seine Achse bildete eine Aluminiumstabelektrode von 2 mm Durchmesser, welche durch einen ebenso dünnen, senkrechten, mit den inneren Teilen des Elektrometers in Verbindung stehender und gegen die äußeren Teile durch Bernstein isolierten Aluminiumstab gehalten wurde. Es wurde darauf Wert gelegt, daß das Strahlenbündel außer bei seinem Ein- und Austritt in den Meßraum weder die Wand noch die Innenelektrode streifte. [...] An der Stelle des Ein- und Austritts des Strahlenbündels hatte der Meßraum ein Fenster von paraffiniertem Papier. Der Meßraum und das ganze Elektrometer waren durch 2 mm dickes Blei vollständig gegen Strahlung von außen geschützt. Die Dimension des Meßraumes (Länge und Durchmesser) hatten sich nach der Länge der Flugbahn der von Röntgenstrahlen ausgelösten Kathodenstrahlen zu richten."

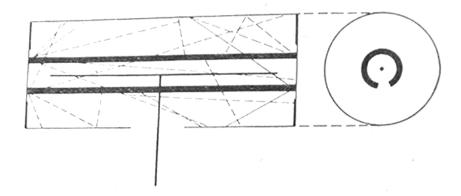


Abbildung 6.11: Ionisationskammer nach Holthusen. Die Kammer bestand aus einem Zylinderkondensator mit Aluminiumstabelektrode. Linke Seite der Abbildung: Längsschnitt der Kammer; rechte Seite der Abbildung: Querschnitt von Kammer und Strahlenbündel. Die Form des Strahls wurde durch Bleiblenden vorgegeben. Abbildung aus Holthusen [1918-1919], S. 217.

Als Beispiele für Dimensionen einer Kammer und verwendete Strahlenergie nannte Holthusen: "Ein Meßraum von 20 cm Durchmesser und 25 cm Länge dürfte sich praktisch für Strahlen mit einer Halbwertschicht bis 15 mm Aluminium als ausreichend erweisen."

Die Forderungen nach Genauigkeit, Ausnutzung der Sekundärelektronen und Vermeidung von Wandstrahlung führten also bei immer größeren erreichbaren Energien zu Kammergrößen, die in der klinischen Routine kaum noch handhabbar waren. Da eine

⁶⁴Holthusen [1918-1919], S. 217

⁶⁵Holthusen [1918-1919], S. 219-220

Luftdruckabhängigkeit jedoch schon seit kurz nach Entdeckung der Röntgenstrahlen bekannt war⁶⁶ konnten die Kammerdimensionen zu Beginn der 1920er Jahre dadurch wieder reduziert werden, dass der Innendruck erhöht wurde: "In demselben Verhältnis, wie der Druck in der Ionisationskammer wächst, nimmt die Reichweite der ausgelösten Elektronen ab, so daß eine Kammer mit handlichen Abmessungen bei geeignetem Gasdruck für Strahlen jeder Härte verwendbar ist."⁶⁷

Heute werden ab einer Strahlenergie von etwa 3 MeV keine "größenangepassten" Ionisationskammern zu Zwecken der Standarddosimetrie eingesetzt, da die Sekundärelektronenreichweite zu groß ist. Stattdessen verwendet die *Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)* Wasserkalorimetrie⁶⁸ als Primärnormal, also als genaueste nationale Kalibrierung.

6.8 Druckluft-Ionisationskammern

Um die Problematik von mit der Strahlenergie steigenden Kammergrößen zu umgehen, ließ sich die Firma Siemens & Halske im Jahr 1920 eine besondere Form der Ionisationskammer patentieren. Es handelte sich dabei um eine sog. Druckluftionisationskammer, welche die Abhängigkeit der Sekundärelektronenreichweite vom Gasdruck ausnutzte (s. Abb. 6.12). Die Patentschrift beschrieb die Funktionsweise der Druckregelung:

"An der einen Stirnwand der Kammer ist eine mit Hahn r' versehene Zuleitung für das unter Druck stehende Gas angebracht, an der anderen ein Manometer, das aus einem am Ende zugeschmolzenen und mit einer Skala versehenen Kapillarrohr k besteht, in dem ein Quecksilberfaden q sich befindet. Bei Drucksteigerung der Kammer wird der Quecksilberfaden nach dem abgeschlossenen Ende der Kapillarröhre hingedrängt, so daß an der Skala s der Druck ohne weiteres ablesbar ist. Man kann somit den Gasdruck im Inneren der Kammer auf einen der ungefähren Härte der verwendeten Strahlen angepaßten Wert einstellen."⁶⁹

Leider enthielt das Patent keine Beschreibung der nötigen Kammerinnedruckregelung für steigende Energien.

Auf dem gleichen Prinzip wie *Siemens* aufbauend konstruierte Behnken an der *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt* eine weitere Ionisationskammer, die er als "brauchbare Standardapparatur"⁷⁰ vorgesehen hatte (s. Abb. 6.13) und die als Eichnormal⁷¹.

⁶⁶Perrin [1896a], S. 353

⁶⁷Siemens & Halske AG [1920], S. 2

⁶⁸Physikalisch-Technische Bundesanstalt [2005]

⁶⁹Siemens & Halske AG [1920], S. 2

⁷⁰Behnken [1924a], S. 7

⁷¹Behnken [1923-1924], S. 480

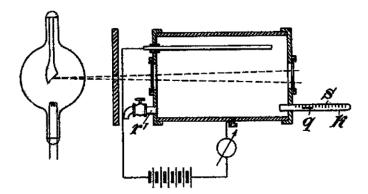


Abbildung 6.12: Schemazeichnung der Siemens-Druckluftkammer: durch eine Blende und ein Eintrittsfenster fiel die Röntgenstrahlung in die Ionisationkammer, die die Form eines Plattenkondensators hatte. Der Druck der Kammer konnte mit einem an eine Druckluftflasche angeschlossenen Hahn mit angeschlossenem Manometer geregelt werden. Abbildung nach Siemens & Halske AG [1920], S. 3.

Diese unterschied sich von der *Siemens*-Druckluftkammer vor allem darin, dass sie drei Elektroden hatte und von innen mit einer Schicht graphitiertem Papier ausgekleidet war⁷². Der Innendruck der Kammer betrug 6 Atmosphären⁷³.

Gemessen wurde mit Behnkens Druckluftkammer die über den Gesamtwiderstand abfallende Spannung. Aus Widerstand und Spannung wurde der Ionisationsstrom berechnet.

Zusätzlich zu einer detaillierten Beschreibung des Kammeraufbaus veröffentlichte Behnken in der Zeitschrift für technische Physik eine Darstellung der Abhängigkeit zwischen Druck und Ionisationsstrom: Waren Luftdruck und Temperatur bekannt, so konnte aus Tabellenwerken wie "dem Kohlrausch" die Luftdichte abgelesen werden. ("Kohlrausch" bezieht sich auf ein Standardlehrbuch der Physik, das von 1870 bis 1996 in 24 Auflagen erschien⁷⁴, zuerst herausgegeben von Friedrich Kohlrausch (1840 – 1910).) Eine graphische Darstellung der Ionisationsstrom-Luftdichte-Beziehung ist in Abb. 6.14 wiedergegeben; für welche Strahlenergie diese Kurve erstellt wurde, ist nicht mit angegeben.

⁷²Behnken [1924a], S. 8

⁷³Behnken [1927], S. 74

⁷⁴Physikalisch-Technische Bundesanstalt [2011]

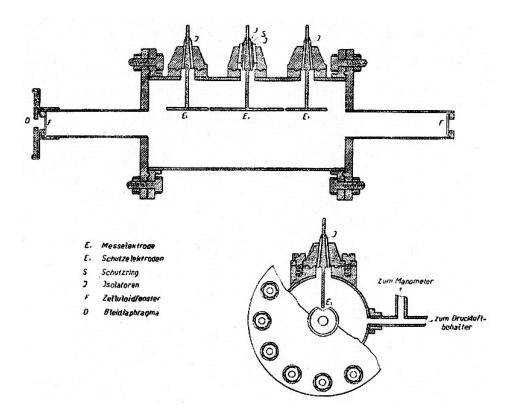


Abbildung 6.13: Die Druckluftkammer nach Behnken besaß zwei Schutzelektroden sowie eine zentrale Messelektrode. Ähnlich wie bei der Siemens-Kammer konnte der Innendruck mit einem Manometer reguliert werden. Oben: Längsschnitt der Kammer, unten: Querschnitt der Kammer. Abbildung nach Behnken [1925], S. 117.

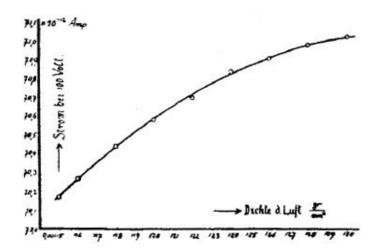


Abbildung 6.14: Abhängigkeit des Ionisationsstroms (in 10^{-12} A) einer Druckluftkammer bei einer Spannung von 100 V in Abhängigkeit der Luftdichte (in $\frac{g}{cm^3}$). Abbildung aus Behnken [1924a], S. 10.

Insgesamt war Behnken überzeugt davon, durch erhöhten Kammerinnendruck die Sekundärelektronenreichweite zu verringern und die durch Wandstrahlung auftretenden Effekte deutlich zu vermindern (s. Abb. 6.15):

"Die Füllung der Kammer mit Druckluft hat zur Folge, daß die Bahnen der im Meßvolumen in der Druckluft selbst ausgelösten schnellen Elektronen abgekürzt werden, so daß sie nicht bis an die Kammerwände gelangen und somit ihre volle Ionisierungsfähigkeit entfalten."⁷⁵

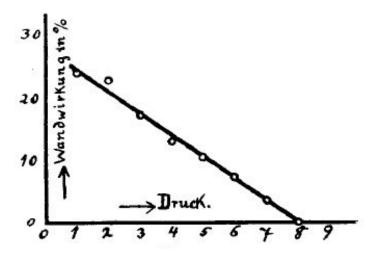


Abbildung 6.15: Wandwirkungs-Druck-Abhängigkeit einer Druckluftkammer: mit steigendem Luftdruck sinkt die relative Wandwirkung annähernd linear. Abbildung aus Behnken [1924a], S. 12.

6.9 Hammer-Dosimeter

Parallel zu Entwicklungen großer kasten- oder fassförmiger Ionisationskammern (Fasskammer, engl. "barrel type chamber") wurden weiterhin auch kleine Instrumente gebaut. Bei diesen waren ein kleiner Detektor und die Elektrometereinheit meist mit einem bis zu mehrere Meter langen Kabel verbunden und ermöglichten so eine räumliche Trennung von Messung und Auswertung.

Ein Dosimeter, das in diese Gruppe fällt, ist das sog. Hammer-Dosimeter, benannt nach dem Freiburger Physiker Wilhelm Hammer (1885 – 1945). Hammer kooperierte mit seinem Kollegen Walter Friedrich, so dass ersterer von den Erfahrungen Friedrichs mit Ionisationskammern profitieren konnte. Es wurde ein Dosimeter entwickelt, dessen Produktion den Grundstein der heutigen Firma PTW (Physikalisch-Technische Werkstätten Freiburg)⁷⁶ legte – einer der beiden größten deutschen Dosimetrieinstrumenten-

⁷⁵Behnken [1925], S. 118

⁷⁶Physikalisch-Technische Werkstätten Freiburg GmbH [2012]

Hersteller.

Für das spätere Hammer-Dosimeter wurde im Jahr 1921 ein Patent in Deutschland und Österreich⁷⁷ eingereicht, das sich auf Patentansprüche von 1916⁷⁸ bezog. Anfang 1923 wurde die Patentschrift veröffentlicht, im selben Jahr stellte Hammer das neue "Dosimeter für ionisierende Strahlen, insbesondere Röntgenstrahlen"⁷⁹ beim Kongress der *Deutschen Röntgengesellschaft* vor.

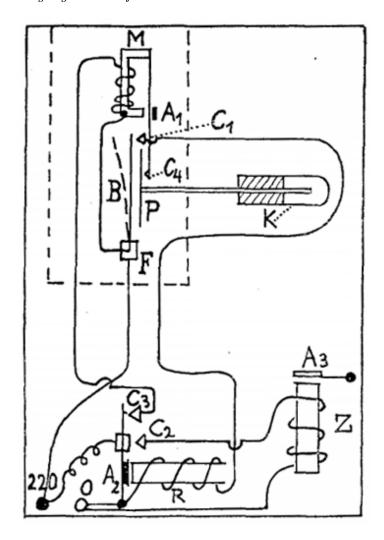


Abbildung 6.16: Das "Hammer-Dosimeter" beruhte auf einer Ionisationskammer (K) mit einem Messrelais (R) und Zähler (Z). Abbildung aus Hammer [1923], S. 99.

Das Hammer-Dosimeter zeichnete sich nicht durch eine spezielle Konstruktion der Ionisationskammer an sich aus, sondern durch die Schaltung der Messvorrichtung mit integriertem Zähler. Einzelheiten über die Ionisationskammer wurden im Rahmen von

⁷⁷Hammer [1921a], Hammer [1921b]

⁷⁸Hammer [1921b], S. 1

 $^{^{79}}$ Hammer [1923]

Hammers Vortrag nicht besonders genannt; aus der gleichzeitig präsentierten Schaltzeichnung des gesamten Instruments (s. Abb. 6.16) geht jedoch hervor, dass es sich um eine Fingerhutkammer handeln muss. Mit der inneren Elektrode dieser Kammer war eine Platte verbunden, in geringem Abstand dazu war ein als Elektrometer fungierendes elastisches Blättchen einseitig eingespannt, das dauerhaft mit einer 220 V Gleichstromquelle verbunden war. Da auch die Platte geladen war, ergab sich im unbestrahlten Zustand eine Abstoßung zwischen Blättchen und Platte. Traf Strahlung auf die Kammer, entlud sich die Platte und die Abstoßung ließ nach, bis das Blättchen einen bestimmten Kontakt berührte. Die Berührung schloss dann den Stromkreis eines Messrelais, was einerseits ein Schalten des Relais und Wiederaufladen der Platte, andererseits ein Weiterspringen eines Zählers zur Folge hatte.⁸⁰

Der eingebaute Zähler konnte gegen andere Quantimeter – wie z.B. das von Hammers Kollegen Friedrich verwendete – kalibriert werden. Hammer gab an, dass unter Einsatz der von ihm verwendeten Kammer "sieben Sprünge des kleinen Zeigers [...] einer elektrostatischen Einheit"⁸¹ entsprachen. Der Zähler hatte außerdem den Vorteil, dass man mit einem zusätzlichen Kontakt eine "Weckuhr"⁸² einbauen konnte, die entweder bei einer jeweils eingestellten Dosis ein akustischen Signal gab oder aber die Röntgenröhre abschaltete.

6.10 Eichstandgerät (Küstner)

Die Bestrebungen von H. Küstner aus dem Laboratorium für Medizinische Physik der Universität Göttingen beim Bau einer Ionisationskammer waren, anders als die vieler anderer Physiker, nicht dahingehend, eine Ionisationskammer für den unmittelbaren Einsatz im klinischen Alltag zu konstruieren. Vielmehr war sein Ziel, eine möglichst genaue Referenz zu erstellen, gegen die andere – kleinere, handlichere, im klinischen Alltag leicht einsetzbare – Ionisationskammern geeicht werden sollten: "Auf diesem Wege können alle Röntgeninstitute, die an die Standardkamera A angeschlossen sind, ihre Dosen mit einander vergleichen."⁸³ Küstners Hauptkritikpunkt an existierenden kleinen Ionisationskammern war eine mangelnde Zuverlässigkeit und mit der Zeit schwankende Empfindlichkeit⁸⁴. Seine Ergebnisse verglich Küstner z.B. mit den Messergebnissen einer Fingerhutkammer (s. Abb. 6.10).

⁸⁰Hammer [1923], S. 99-100

⁸¹Hammer [1923], S. 100

⁸²Hammer [1923], S. 100

⁸³Küstner [1923], S. 616

⁸⁴Küstner [1923], S. 614

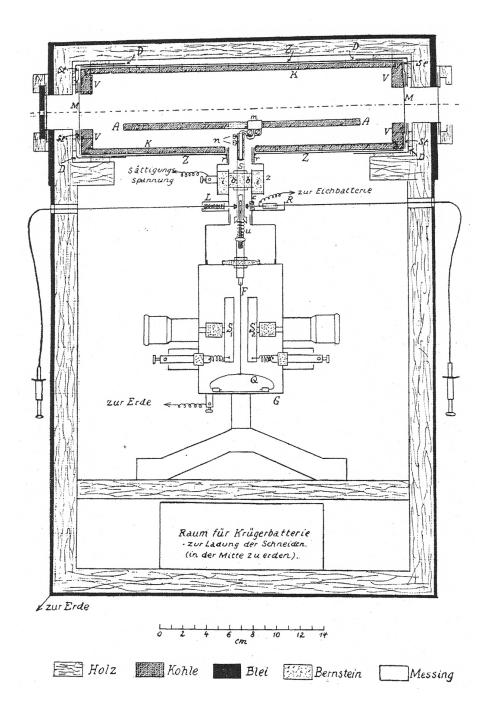


Abbildung 6.17: "Standardgerät" nach Küstner: In eine Holzkiste waren ein großvolumiger Zylinderkondensator aus Kohle mit ebensolcher Elektrode eingebaut, darunter befanden sich Elektrometer und Batterie. Abbildung aus Küstner [1924a], S. 11.

Im Laufe weniger Jahre schlug Küstner verschiedene Konstruktionsformen von Standardgeräten vor. Die erste Form (s. Abb. 6.17), vorgestellt im Jahr 1924, zeichnete sich vor allem dadurch aus, dass sie Messkammer, Elektrometer und Batterie in eine große metallgeschirmte Holzkiste integrierte. Die Messkammer, die aus einem Kohle-

zylinder mit Elektrode bestand, hatte ein großes Volumen; Küstner erwähnte Längen des Zylinders zwischen 25,5 und 30,5 cm⁸⁵.

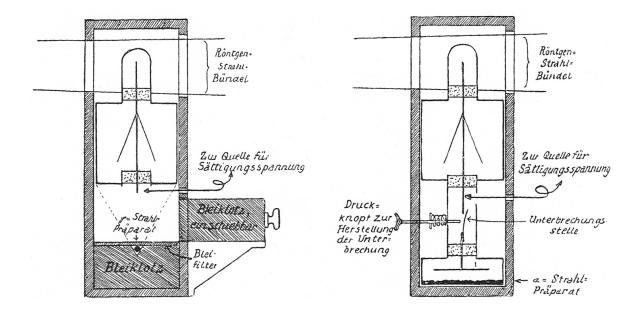


Abbildung 6.18: Eichstandgeräte nach Küstner (1925). Links: Gerät mit γ -Strahlpräparat. Die Ionisationskammer konnte mit einem einschiebbaren Bleiklotz vom Referenzpräparat abgeschirmt werden. Rechts: Gerät mit α -Strahlpräparat. Abbildung aus Küstner [1925], S. 126.

Die nächste von Küstner veröffentlichte Form des Standardgeräts (s. Abb. 6.18 links) wurde "Eichstandgerät" genannt und unterschied sich grundlegend von seinem Vorgänger. Es hatte eine andere Kammerform: der Zylinderkondensator war durch einen eher einen langgezogenen Kugelkondensator ersetzt. Die Röntgenstrahlen traten nicht mehr parallel, sondern senkrecht zur Elektrode in die Kammer ein. Eine weitere Neuerung war, dass der die Kammer umgebende Kasten ein Präparat eines γ -Strahlers enthielt. Dieses war in einen Bleiklotz eingebettet, ein weiterer Bleiklotz konnte über das Präparat geschoben werden, sodass die Messkammer von den γ -Strahlen abgeschirmt wurde. War der Bleiklotz hinausgezogen, wirkte die Strahlung auf die Messkammer, sodass diese mithilfe der γ -Strahlen geeicht werden konnte. Durch die regelmäßige Eichung gegen γ -Strahlen erhoffte sich Küstner, eine zeitliche Konstanz der Messkammer aufrechterhalten zu können. Eine Modifikation des Eichstandgeräts enthielt statt eines γ - einen α -Strahler (s. Abb. 6.18 rechts).

Für die nachfolgende Form des Eichstandgeräts aus dem Jahr 1926 (s. Abb. 6.19) empfahl Küstner, abwechselnd Messungen an Röntgenstrahlen und einem Radiumprä-

⁸⁵Küstner [1924a], S. 9

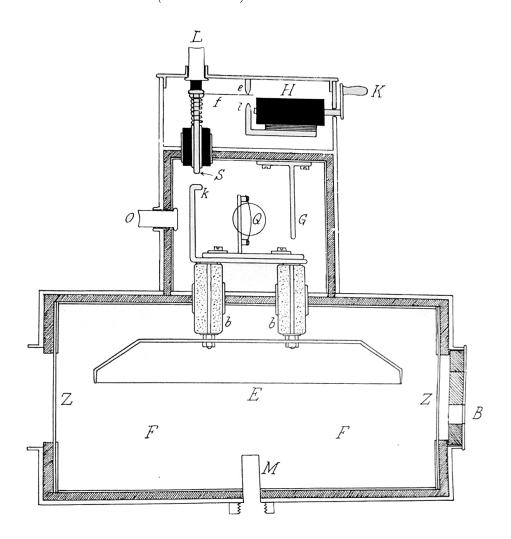


Abbildung 6.19: Eichstandgerät nach Küstner (1926). Die Fasskammer wurde in axialer Richtung durch ein Zelloneintrittsfenster Z bestrahlt, die Elektrode E bestand aus einem dünnen Aluminiumdraht. Zur Eichung konnte ein Radiumpräparat an den Stab G montiert werden; sonst wurde es in eine abschirmende Halterung geschraubt und in den Zylinder M geschoben. Abbildung aus Küstner [1926], S. 160.

parat durchzuführen. So sollte u.a. der Einfluss von Temperatur- und Luftdruckschwankungen ausgeglichen werden. Dieses Eichstandgerät hatte als Messvolumen eine sog. Fasskammer, einen Zylinder mit 30 cm Länge und 15 cm Durchmesser. Die Fasskammer, die von innen mit Graphit beschichtet war, sollte aufgrund des großen Volumens besonders sensitiv sein. Sie wurde wieder – wie das Gerät von 1924 – in axialer Richtung bestrahlt. Die Ein- und Austrittsfenster bestanden aus je 1 mm dicken Zellonscheiben (Zellon oder Cellon war ein dem Celluloid ähnlicher Stoff u.a. aus Acetylcellulose⁸⁶), während die Elektrode aus einem 0,5 mm dicken Aluminiumdraht bestand⁸⁷. Küstner

 $^{^{86}}$ Ullmann [1928], S. 138-139

⁸⁷Küstner [1926], S. 159

beschrieb, wie das Eichstandgerät verwendet werden sollte:

"Die Handhabung eines solchen Geräts ist denkbar einfach: die Dosis D, welche die Röntgeneinrichtung pro Minute an dem Punkte liefert, in dem sie auf das Gerät fällt, beträgt, in "R"-Einheiten ausgedrückt,

$$D = K \cdot \frac{\text{Radiumsekunden}}{\text{R\"ontgensekunden}}, \text{R\'e.}$$

Hierin ist K eine Eichkonstante, die jedem Gerät mitgegeben wird; die Radiumsekunden und Röntgensekunden stoppt man [...] am Elektrometer [...], indem man das Gerät abwechselnd beiden Strahlungen aussetzt."⁸⁸

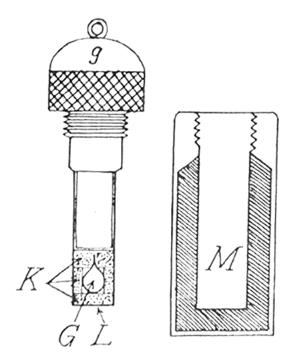


Abbildung 6.20: Referenzpräparat des Eichstandgeräts. Links: in Halterung eingelassenes Radiumpräparat G; rechts: Bleischutz, in den das Präparat zur Lagerung eingeschraubt werden konnte. Abbildung aus Küstner [1926], S. 160.

Anders als das Eichstandgerät von 1925 enthielt das neue Eichstandgerät nicht dauerhaft eine Referenzquelle. Sie konnte bei Bedarf in einen an der Unterseite der Kammer eingelassenen Zylinder (in Abb. 6.19 mit M bezeichnet) eingeschraubt oder aber in einem Schutzgefäß aufbewahrt werden (s. Abb. 6.20).

⁸⁸Küstner [1926], S. 159

6.11 Problembewusstsein für Fehlerquellen

Im Falle von Dosismessinstrumenten, die auf Farbveränderungen beruhen, wurde von verschiedenen Autoren auf eine mögliche mangelnde Genauigkeit hingewiesen. Beispiele hierfür sind für das Kienböck-Quantimeter die Erläuterungen zu selektiver Absorption und die Untersuchungen zu verschiedenen Einflüssen wie der Temperatur auf die Entwicklung der Streifen. Bei Sabouraud-Noiré-Pastillen trugen z.B. wiederholte Verwendung der Pastillen, Feuchtigkeit sowie uneinheitliches Licht bei der Ablesung zu möglichen Fehlablesungen bei. Die Diskussion von Fehlerquellen für die Messung mit Ionisationskammern ist in Publikationen deutlich weniger präsent. Eine Ausnahme hierbei bilden die die Messung beeinflussenden baubedingten Faktoren Kammermaterial und -größe, die oben bereits behandelt worden sind (s. Kap. 6.6 und 6.6).

Bei verschiedenen Strahlungsmessverfahren taucht das Wort "absolut" im Zusammenhang mit dem Messergebnis auf: schon in Artikel-Titeln finden sich z.B. "absoluter Härtemesser⁸⁹, die "absolute Meßung der Röntgen- und γ -Strahlen⁹⁰ und die "Eichung von Dosismessern in absolutem Maße"91. Diese Formuliereungen erwecken den Anschein, als wäre noch nicht bei allen Diskussionsbeteiligten ein ausgeprägtes Bewusstsein für Fehlerquellen, die dem jeweiligen Verfahren den Anspruch, "absolut" zu sein, abgesprochen hätten, vorhanden gewesen. Andererseits soll das Wort "absolut" vermutlich vor allem darauf hinweisen, dass das einschlägige Verfahren (Härtemessung bzw. die Dosismessung über Ionisation) das zum damaligen Zeitpunkt jeweils überlegene weil genaueste Verfahren darstellte. Interessant – für den vermuteten Überlegenheitsanspruch – ist in jedem Fall, dass Formulierungen mit dem Wort "absolut" an prominenter Stelle sowohl von Christen als auch von Behnken – also zwei der kritischsten Wissenschaftler, die an der frühen Entwicklung der Dosimetrie beteiligt waren - verwendet wurden. Allerdings stammt von Behnken in der Tat auch ein wichtiger Beitrag für die Fehlerquellendiskussion. Für die von Friedrich verwendete Ionisationskammer wies er ausdrücklich darauf hin, dass "das eigentlich gesteckte Ziel, zu einem absoluten Maße der Strahlendosis zu gelangen, damit noch nicht erreicht worden"⁹² sei. Für weitere Kammertypen ging er in einem Artikel aus dem Jahr 1924 ausführlich auf Ursachen, Dimensionen und Verringerung von Messfehlern ein. Behnkens Überlegungen sollen im Folgenden dargestellt werden.

Eins der von Behnken untersuchten Messinstrumente war die Druckluftkammer, bei der er insbesondere den Einfluss des Drucks auf verschiedene Parameter betrachtete. So

⁸⁹Christen [1912]

⁹⁰Szilard [1915]

⁹¹Behnken [1924b]

⁹²Behnken [1924a], S. 7

stellte er fest, dass es keine Linearität in der Abhängigkeit von Druck und Sättigungsspannung gab. Diese Tatsache machte sich besonders deutlich bemerkbar, wenn man die Kammer bei unterschiedlichen Strahlungsqualitäten⁹³ verwendete. In Abb. 6.21 sind die Strom-Spannungs-Beziehungen und die jeweiligen Sättigungsspannungen (durch Pfeile gekennzeichnet) bei verschiedenen Drücken für die Druckluftkammer dargestellt.

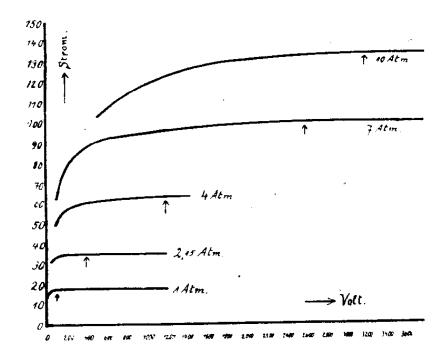


Abbildung 6.21: Strom-Spannungs-Beziehungen bei verschiedenen Drücken für die Druckluftkammer: es existierte keine Linearität in der Abhängigkeit von Druck und Sättigungsspannung (dargestellt durch Pfeile). Abbildung aus Behnken [1924a], S. 11.

Beim Einsatz harter Strahlung sah Behnken ab einem Druck von 8 atm (entsprechend 8,106 bar) Messungen mit der Druckluftkammer als "absolut richtig" an, während für "extrem weiche Strahlung dagegen […] Drucke [sic] von 8 at [sic] bereits zu hoch [sind], da die Absorption der Druckluft bewirkt, daß die Intensität der Strahlung innerhalb der ganzen Kammer nicht mehr genügend konstant bleibt."⁹⁴ Um auch bei einem Druck von mehr als 8 atm bzw. bei weicher Strahlung ein korrektes Messergebnis zu erreichen schlug Behnken vor, die Wandwirkungs-Druck-Abhängigkeit zu beachten. Hierfür sollte dann der "[Absorptionskoeffizient] besonders bestimmt und bei der Auswertung berücksichtigt"⁹⁵ werden, wobei das "besondere" Verfahren jedoch nicht näher konkretisiert wurde.

⁹³Behnken [1924a], S. 11

⁹⁴Behnken [1924a], S. 12

⁹⁵Behnken [1924a], S. 13

Weiterhin wies Behnken auf die – auch von anderen Autoren behandelte – Streuung innerhalb von Ionisationskammern und den Einfluss des Kammerwandmaterials hin. Er kam jedoch zu dem Schluss, dass "bei der Auskleidung mit Papier [...] also eine Fälschung der Messungen durch die Streustrahlung bis auf einen zu vernachlässigenden Betrag [kleiner 0,5 %] vermieden" sei. Dann folgerte Behnken:

"Damit sind alle in Frage kommenden Einflüsse untersucht mit dem Ergebnis, daß die Druckkammer geeignet ist, Röntgenstrahlungen von der hier benützten Art in absolutem Maße auszumessen." ⁹⁷

Neben Druckluftkammern beschäftigte sich Behnkens Artikel auch mit Fingerhutkammern (die er mit "Kleinkammer" bezeichnete). Da dieser Kammertyp auch zu Messung in Körperhöhlen verwerdet wurde, forderte Behnken eine Konstruktionsweise, bei der die Kammern "die Strahlung möglichst aus allen Richtungen gleichmäßig aufzunehmen vermögen und zudem die Strahlungsverteilung in ihrer Umgebung möglichst wenig beeinflussen."⁹⁸ Diese beiden Punkte – die Richtungsabhängigkeit und die Auswirkungen einer Störung des Strahlenfeldes durch die Kammer (insbesondere bei kleinen Feldern) – werden auch bei der Untersuchung moderner Dosimeter berücksichtigt⁹⁹. Behnken sah jedoch im Jahr 1924 die von Friedrich vorgeschlagene Konstruktionsweise als "ziemlich [gute] Annäherung" an und wies auf die Umsetzung "als 'Jontoquantimeter' [sic] oder ähnlich [bezeichnete] Apparate"¹⁰⁰ hin.

Mit einer "solche[n] Kleinkammer" von der Firma Siemens & Halske (die nicht näher konkretisiert wurde) sezte sich Behnken ebenfalls detailliert auseinander und prüfte sie auf Abhängigkeiten von der Strahlungsqualität¹⁰¹ sowie von der Filterung der Strahlung¹⁰². Für diese Fingerhutkammer schlug Behnken eine Korrektur über ein besonderes Eichblatt vor (s. Abb. 6.22), da bereits ein Eichblatt für die Konversion von "Skalenteilen" in Dosisleistung notwendig war.

[Das Verfahren] "läßt sich vereinfachen, indem man auf dem an zweiter Stelle zu benützenden Eichblatt nicht die Ionenströme, sondern die Skalenablesungen zu Abszissen macht. Natürlich werden dann die Eichkurven gekrümmt werden, aber sämtlich im Nullpunkt zusammenlaufen. Besonders bequem erscheint auch hier die nomographische Darstellungsweise mit Hilfe von drei Skalen [...], von denen

⁹⁶Behnken [1924a], S. 13

⁹⁷Behnken [1924a], S. 13

⁹⁸Behnken [1924a], S. 14

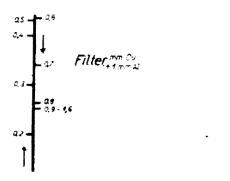
 $^{^{99}{\}rm Angelis}$ et al. [2002], S. 249; Das et al. [2008], S. 208; Palmans [2011], S. 162

¹⁰⁰Behnken [1924a], S. 14

¹⁰¹Behnken [1924a], S. 14

¹⁰²Behnken [1924a], S. 15

die eine die Filterdicke, die zweite die Skalenablesung und die dritte die gesuchte Dosisleistung in \mathfrak{e}/sec darstellt." 103



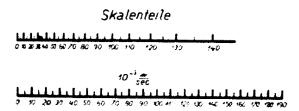


Abbildung 6.22: Eichblatt nach Behnken für eine Siemens-Fingerhutkammer. Mit Hilfe des Eichblattes sollte nicht nur die Konversion von Ionisationsstrom (bzw. "Skalenteilen") in Dosisleistung erfolgen, sondern zusätzlich die Korrektur der Filterdickenabhängigkeit stattfinden. Abbildung aus Behnken [1924a], S. 16.

Um von der Dosisleistung zur applizierten Dosis zu gelangen, musste zusätzlich die Applikationszeit gemessen werden, was eine weitere Fehlerquelle darstellte. Zusätzlich barg und birgt die Verwendung von Eichblättern die Gefahr des Verrutschens innerhalb der Koordinatensysteme sowie – je nach Auflösung der Achsen – einer zusätzlichen Ungenauigkeit dadurch, dass auf den Achsen nur schwer genau abgelesen werden kann. Der Einsatz solcher "starrer" Eichblätter wirft – unabhängig von Behn-

kens Veröffentlichung – zusätzlich die Frage nach der Konstanz der Eichungen auf. Es schein auch schon in den 1920er Jahren getrennte Eichungen sowohl für Elektrometer als auch für Ionisationskammern gegeben zu haben, obwohl diese Tatsache in Publikationen nur implizit erwähnt wird. Beide Eichungen konnten durch den Nutzer selber durchgeführt werden und sorgten für eine Art der zeitlichen Konstanzprüfung bzw. Nachkalibrierung. Küstner empfahl zur Sicherstellung einer Sensitivitätskonstanz

¹⁰³Behnken [1924a], S. 16

jeder Röntgeneinrichtung die Verwendung eines Eichstandgeräts¹⁰⁴. Diese Maßnahme hielt er für angebracht, da die Empfindlichkeit der verschiedenen Komponenten innerhalb eines einzelnen Dosimeters sowohl nicht einheitlich als auch zeitlich nicht konstant war: "Die Spannungsempfindlichkeit des Elektrometers ist bei jeder einzelnen Meßreihe durch Sondereichung festzustellen. Die Konztanz der Empfindlichkeit des ganzen Geräts läßt sich von Zeit zu Zeit durch ein Radiumpräparat kontrollieren"¹⁰⁵. Radium wurde aufgrund der großen Halbwertszeit (des verwendeten Isotops, das jedoch nicht spezifiziert wurde – da Küstner eine Halbwertszeit von etwa 2000 Jahren¹⁰⁶ nannte, handelte es sich wahrscheinlich um ²²⁶Ra, das eine Halbwertszeit von 1600 Jahren¹⁰⁷ hat) als Referenzstrahlung verwendet. Die Energie des Gamma-Zerfalls, der zu geringen Prozentsätzen beim Radiumzerfall vorkommt, beträgt $E_{\gamma} = 186 \text{ keV}^{108}$.

Die zeitliche Konstanz der Anzeige einer Ionisationskammer nicht mit einem radioaktiven Präparat, sondern mit Röntgenstrahlung zu überprüfen, war in den 1920er Jahren praktisch unmöglich. Die Ursache hierfür war die nicht gewährleistbare "Reproduzierbarkeit der Röntgenstrahlenintensität bei gleicher Einstellung der Maschine"¹⁰⁹. Einige Jahre zuvor hatten Krönig und Friedrich zu diesem Thema geschrieben:

"Die Röntgenröhre ist nicht ohne weiteres eine konstante Strahlenquelle. Die Intensität und die Zusammensetzung der Strahlung hängt von vielen Faktoren ab, von der Konstruktion des Betriebsapparates, von seiner augenblicklichen Betriebsweise, von dem Zustand der Röhre usw., also von Faktoren, die sich zum Teil unkontrollierbar während des Betriebs ändern können."¹¹⁰

Eine Illustration für variierende Betriebsbedingungen und Messergebnisse ist in Abb. 6.23 gegeben. Küstner wies darauf hin, dass schon durch Änderungen der Röhren-Betriebsbedingungen – Netzspannung, Ein- und Zweiröhrenbetrieb, Gleichrichtervorrichtung, Sinken der Röntgenstrahlenintensität im Dauerbetrieb – "Ionisations- oder Dosenfehler bis nahezu 100 %"¹¹¹ entstehen konnten. Diese Fehler sah er jedoch als vermeidbar an, wenn folgende Regeln beachtet wurden:

"Bei Umformermaschinen Vorschalten eines Regulierwiderstandes vor die Maschine zur Konstanthaltung einer erzwungenen Netzspannung. [...] Gesondertes

 $^{^{104}}$ Küstner [1925], S. 126

 $^{^{105}}$ Küstner [1924a], S. 20

¹⁰⁶Küstner [1924a], S. 20

¹⁰⁷Krieger [2013], S. 408

¹⁰⁸Krieger [2013], S. 408

¹⁰⁹Küstner [1924a], S. 22

¹¹⁰Krönig und Friedrich [1918], S. 58

¹¹¹Küstner [1924a], S. 26

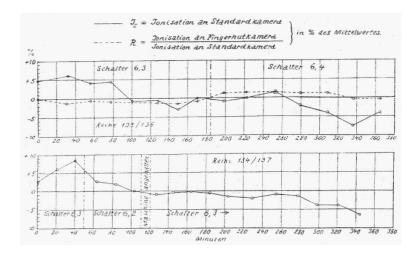


Abbildung 6.23: Änderung der Ionisationskammer-Messung bei Dauerbetrieb einer Röntgenröhre. Abbildung aus Küstner [1924a], S. 25.

Eichen der Maschine bei Ein- und Zweiröhrenbetrieb sowie bei verschiedener M.-A.-Belastung. [...] dauernde Kontrolle der Intensität während des Betriebs."¹¹²

Häufig wurde also für Ionisationskammern implizit Konstanz angenommen und sie zur Überprüfung der Röhreneinstellungen verwendet; ihre eigenen Unzulänglichkeiten wurden nicht berücksichtigt. Damit waren Ionisationskammern trotz einer nicht genau zu prüfenden Konstanz also ggf. auch ausschlaggebend dafür, dass Einstellungen an der Röntgenröhre nachgeregelt werden mussten, und konnten so sowohl für eine Verkleinerung als auch zu einer (unbewussten) Vergrößerung der Fehler führen.

6.11.1 Messfehler-Korrekturen

Im Gegensatz zum Stand der Technik in den 1920er Jahren sind heute wesentlich mehr Einflussfaktoren auf Dosismessungen verschiedener Dosimeter bekannt. In modernen Veröffentlichungen werden u.a. folgende Faktoren berücksichtigt: "Polarization, current-voltage characteristic, and time stability [...] Absorbed dose response and beam quality dependence [...] Dose rate dependence [...] directional dependence of response"¹¹³, "linearity [...] Interchamber sensitivity variation"¹¹⁴. Einige dieser Faktoren waren schon bekannt, wie z.B. Behnkens Beschäftigung mit der Strom-Spannungs-Charakteristik bei verschiedenen Drücken zeigt. Andere Einflussfaktoren sollen in den folgenden Abschnitten behandelt werden.

Die Einflüsse werden heute meist durch Korrektionsfaktoren berücksichtigt, die

¹¹²Küstner [1924a], S. 26

¹¹³Angelis et al. [2002], S. 249-250

¹¹⁴Poppe et al. [2013], S. 082106-4

teils empirisch, teils mit Hilfe theoretischer Modelle und teils mittels Monte-Carlo-Simulationen ermittelt werden. Im Folgenden soll thematisiert werden, wann ein Bewusstsein für diese Fehlerquellen aufkam (sofern dies im Rahmen des in dieser Arbeit betrachteten Zeitraums lag, was häufig nicht der Fall ist) sowie wie die Fehler heute berücksichtig und korrigiert werden.

Abhängigkeit von der Strahlungsqualität

Die Abhängigkeit der Dosismesssung von der Strahlungsqualität (bzw. im damaligen Sprachgebrauch Härte) ist einer derjenigen Faktoren, die schon in den 1920er Jahren bekannt waren. Küstner wies darauf hin, dass "die Eichung von Dosimetern für Strahlungen verschiedener Härte vorgenommen werden muß. Die Eichungen haben [...] nur dann Sinn, wenn über die Härte eine präzise Angabe gemacht werden kann."¹¹⁵ Anders formuliert sollte pro Härte jeweils eine spezielle Eichung verwendet werden.

Dieses Verfahren hat Ähnlichkeiten mit dem heute angewendeten: in der Gegenwart wird nach Vorgabe der entsprechenden DIN-Norm anstelle eines für die Strahlungsqualität spezifischen Eichblatts ein für die jeweilige Strahlungsqualität ermittelter Korrektionsfaktor k_Q verwendet. Der Korrektionsfaktor soll "die Änderung des Ansprechvermögens der Ionisationskammer infolge der Verwendung bei der Strahlungsqualität Q [...] anstelle der Bezugs-Strahlungsqualität 60 Co-Gammastrahlung" 116 berücksichtigen.

 k_Q kann lediglich dann experimentell bestimmt werden, wenn dem Nutzer ein Dosimetriesystem zur Verfügung steht, das selbst keine Abhängigkeit von der Strahlungsqualität besitzt. Lezteres ist z.B. bei einem Wasser-Energiedosiskalorimeter¹¹⁷ der Fall. Auf ein solches Messgerät haben jedoch die allerwenigsten klinischen Nutzer Zugriff, weshalb im Regelfall auf Tabellenwerke zurückgeriffen wird, in denen k_Q in Abhängigkeit vom Strahlungsqualitätsindex Q und Ionisationskammer-Bauart aufgeführt ist. k_Q berücksichtigt zwei Aspekte: eine Komponente geht darauf ein, dass das Sondenmaterial der Ionisationskammer Luft ist und nicht im umgebenden Bezugsmaterial Wasser gemessen wird. Die zweite Komponente kalkuliert mit ein, dass der reale Detektor die für die Berechnung angenommenen idealen Bedinungen nur näherungsweise erfüllt¹¹⁸.

Polaritätseffekt

Nominell existieren Hinweise auf einen mit "Polarität" verbundenen Messeffekt schon zur Zeit des Ersten Weltkriegs: in Krönig und Friedrich [1918] findet sich im Kapitel

¹¹⁵Küstner [1924a], S. 26

¹¹⁶Deutsches Institut für Normung e.V. [2008], S. 21

¹¹⁷Deutsches Institut für Normung e.V. [2008], S. 21

¹¹⁸Deutsches Institut für Normung e.V. [2008], S. 49

"Untersuchungen über die Zuverlässigkeit und Empfindlichkeit des Iontoquantimeters" ein Abschnitt zur dort so genannten elektrischen Polarisation.

"Eine gleichfalls auf dem Isolationsmaterial beruhende Fehlerquelle, die meist unberücksichtigt bleibt, liegt in der elektrischen Polarisation des Isolationsmaterials. Die Ladung des Elektrometersystems kriecht mit der Zeit langsam in das Isolationsmaterial hinein, bis dieses vollständig polarisiert ist. Bei der Entladung des Elektrometersystems dagegen kriecht dieser Teil der Ladung wiederum aus dem Dielektrikum heraus. Wenn man daher [...] wenn das Dosimeter eine längere Zeit nicht aufgeladen war, eine Dosis bestimmen will, wird diese Dosis zu klein bemessen"¹¹⁹

Die Beschreibung stellt also einen Effekt dar, den man durch ausreichend langes Anschließen der Kammer an das Elektrometer, Vorbestrahlen und Nulleffektkorrektur zu minimieren versucht. Trotz Verwendung des Wortes "Polarisation" hat die Beschreibung jedoch kaum mit dem zu tun, was heute unter "Polaritätseffekt" verstanden wird (obgleich es viele verschiedene mögliche Ursachen für Polaritätseffekte gibt¹²⁰). Aktuell wird unter "Korrektion des Polaritätseffekts" die Berücksichtigung des Effekts, dass mit unterschiedlichen Polaritäten der Kammerspannung "die Anzahl der Elektronen, die aus dem umgebenden Material in die Messelektrode einschließlich Zuleitung einund aus ihr austreten, verschieden ist"¹²¹, verstanden. Der Effekt lässt sich nicht durch schlichte Bildung des Mittelwerts von Messungen bei positiver und negativer Polarität korrigieren¹²².

In Deutschland wird heute nach DIN-Norm das im Folgenden beschriebene Verfahren zur Bestimmung des Korrektionsfaktors verwendet. Als Referenzpolarität – durch den Index 1 gekennzeichnet – wird diejenige verwendet, die im Kalibrierschein der Kammer als Referenz gegeben ist¹²³. Für den aus den Beträgen M_1 und M_2 der Messwerte ermittelten Korrektionsfaktor gilt¹²⁴:

$$k_P = \frac{\left(\frac{M_1 + M_2}{M_1}\right)_{Q,E}}{\left(\frac{M_1 + M_2}{M_1}\right)_{Co}} \tag{6.1}$$

Der Index Q, E bezeichnet die Strahlungsqualität, für die k_P bestimmt werden soll. Der Nenner der Gleichung, indiziert mit Co, bezieht sich auf Messungen der Referenz-

¹¹⁹Krönig und Friedrich [1918], S. 63

¹²⁰Boag [1968], S. 39-41

¹²¹Deutsches Institut für Normung e.V. [2008], S. 17

¹²²Boag [1968], S. 40

¹²³Deutsches Institut für Normung e.V. [2008], S. 17

¹²⁴Deutsches Institut für Normung e.V. [2008], S. 18

strahlung, die üblicherweise bei der Kalibrierung durch den Hersteller verwendet wird: 60 Co. Steht keine Kobaltstrahlung zur Ermittlung des Korrektionsfakors zur Verfügung, so soll stattdessen "näherungsweise die Photonenstrahlungsqualität mit der niedrigsten verfügbaren Grenzenergie (möglichst im Bereich von 4 MeV bis 6 MeV) verwendet werden. [...] Die Kontrolle des Polaritätseffekts und die Ermittlung von k_P sollten nach Herstelleranweisung durchgeführt werden." 125

Die Anweisung eines großen deutschen Dosimeterherstellers wiederum weist darauf hin, dass bei unterschiedlich großem Einfluss der Normierung auf die ⁶⁰Co-Werte jeweils verschiedene rechnerische Korrekturen vorgenommen werden sollten.

"If the effect of this value [der Einfluss der 60 Co-Werte] is smaller than 0.3 % for 6 MV photon beams (or lower energy), the denominator in [Gleichung 6.1] can be set to 1, otherwise it must be taken into account $^{\circ}$ 126.

Bei einem Einfluss größer gleich 0,3 % wird auf die Handhabung nach Anweisung der American Association of Physicists in Medicine (AAPM) verwiesen. Das dort beschriebene Korrektionsverfahren unterstellt, dass M_1 und M_2 für ⁶⁰Co gleich sind¹²⁷, weshalb sich Gleichung 6.1 wie folgt reduziert¹²⁸:

$$k_P = \left| \frac{M_1 + M_2}{2M_1} \right| \tag{6.2}$$

Die AAPM geht, anders als die Herstelleranweisung, nicht auf den Sonderfall eines geringen Einflusses der ⁶⁰Co-Werte ein. Hingegen wird auf einen weiteren Spezialfall verwiesen, der weder in DIN-Norm 6800-2 noch in der Herstelleranweisung berücksichtigt wird:

"In the unlikely event that the polarity correction is more than 0.3 % different from unity in a photon beam of 6 MeV or lower energy, then one must establish what the value of $[k_P]$ is in the calibration laboratory's beam."¹²⁹

Es zeigt sich also insgesamt für die Berücksichtigung des Polaritätseinflusses eine enge Verzahnung verschiedener nationaler Normen, jedoch keine ganz einheitliche Handhabung. Auch ist beim Kombinieren der verschiedenen Protokolle Vorsicht geboten, da einzelne Bestandteile der Formeln unterschiedlich definiert sein können: so steht z.B. M_x in den USA für den absoluten Messwert, in Deutschland jedoch für den Betrag des Messwerts.

¹²⁵Deutsches Institut für Normung e.V. [2008], S. 17

¹²⁶Physikalisch-Technische Werkstätten Freiburg GmbH [2014a], S. 81

¹²⁷Krieger [2011], S. 249

¹²⁸ Almond et al. [1999], S. 1853; die Schreibweise wurde aus Konsistenzgründen angepasst.

¹²⁹Almond et al. [1999], S. 1853

Abhängigkeit vom Eintrittswinkel

Die Abhängigkeit vom Dosis-Messergebnis einer Ionisationskammer vom Eintrittswinkel der Strahlung relativ zur Kammer ist ein Problem, das in den 1920er Jahren noch nicht berücksichtigt wurde. Zwar forderte Behnken eine Ionisationskammer-Konstruktionsweise, bei der die Kammern "die Strahlung möglichst aus allen Richtungen gleichmäßig aufzunehmen vermögen"¹³⁰. Welche Konsequenzen eine Nichterfüllung der Forderung mit sich brachte, wurde jedoch nicht evaluiert. Das Ausbleiben einer Evaluation könnte teilweise dadurch bedingt sein, dass für diverse Ionisationskammer-Typen bauartbedingt ein definierter Eintrittswinkel durch ein "Fenster" notwendig war und so andere Winkel kaum möglich waren, wie z.B. bei Druckluftionisationskammern oder den verschiedenen Eichstandgeräten. Für letztere bemerkte Küstner lediglich: "Wurde das Strahlenbündel durch Verschieben der Lochblende um einige Millimeter aus seiner axialen Zentrierung gebracht, so ergab sich ein Ionisationsunterschied von 1 %, der sich allein aus Beobachtungsfehlern erklären lässt."¹³¹ Dieser Fehler wurde jedoch offenbar als vermeidbar angesehen; Küstner empfahl die Verwendung einer optischen Bank¹³² zur Ausrichtung von Röntgenröhre, Blenden und Kammer.

Mögliche Fehler bei anderen Kammertypen wie Zylinder- oder Fingerhutkammern wurden nicht behandelt. Heute geht man davon aus, dass beide

"wegen ihrer Bauart (Zylindersymmetrie) bei ordentlichen Fertigungstechniken bezüglich ihrer Anzeigen weitgehend unempfindlich gegen Rotationen um ihre Längsachse [sind], für Präzisionsmessungen und die Ermittlung der Kontrollanzeige empfiehlt sich dennoch die Einhaltung standardisierter Positionen."¹³³

Die standardisierten Positionen sind dadurch gegeben, dass die bei der Kalibrierung "oben" befindliche Stelle auf der Kammeraußenseite markiert wird und diese Markierung bei späteren Messungen nach oben ausgerichtet wird. Hanno Krieger (*1942) betont zusätzlich, dass "seriöse Hersteller [...] jeder Ionisationskammer neben dem Prüfprotokoll über die Kammerkalibrierung auch Datenblätter zu den Abmessungen der Ionisationskammer, dem effektiven Messort, dem Bezugsort für die Kalibrierung und Diagramme über die Richtungsabhängigkeit der Dosimeteranzeige" beilegen.

Besonders wichtig wird die Behandlung von Winkelabhängigkeiten bei Flachkammern oder sog. Ionisationskammer-Arrays, bei denen viele kleine Kammern in einer Matrix angeordnet sind. Beispiele hierfür sind die 2D-Arrays 729 und Seven29 von PTW,

¹³⁰Behnken [1924a], S. 14

¹³¹Küstner [1924a], S. 21-22

¹³²Küstner [1924a], S. 15

¹³³Krieger [2011], S. 256-257

¹³⁴Krieger [2011], S. 257

die aus 729 "plane-parallel vented ionization chambers"¹³⁵ bestehen, sowie die Detektoren *Matrixx* und *Matrixx Evolution* von *IBA Dosimetry*, die aus 1020 "vented pixel ionization chambers"¹³⁶ zusammengesetzt sind. Die genannten Kammer-Arrays weisen keine radiale Symmetrie auf, weshalb es zu abweichenden Messergebnissen führt, wenn die Strahlung nicht mehr senkrecht auf die Oberfläche der Kammern auftrifft. Nachdem die Problematik für frühe Typen dieser Messgeräte beschrieben worden war¹³⁷, wurde der aktuellen Generation von Kammer-Arrays Zubehör beigefügt, das hilft, den Einfluss der Winkelabhängigkeit zu reduzieren: entweder können die Kammer-Arrays am Beschleunigerkopf montiert werden, sodass sie eventuelle Rotationen mit ausführen, oder aber das Kammer-Array wird drehbar gelagert, sodass es die Bewegungen des Beschleunigers, die mittels Sensor übertragen werden, nachvollzieht¹³⁸. Bei beiden Möglichkeiten bleibt ein senkrechter Eintrittswinkel erhalten. Alternativ wird bei anderen Systemen das Messsignal innerhalb des Messprogramms winkelabhängig korrigiert¹³⁹, sodass der Nutzer keinerlei Einflussmöglichkeit auf die Korrektur hat.

Die heutzutage erfolgende Korrektur aller bekannten Einflüsse bildet einen deutlichen Fortschritt gegenüber dem Verfahren Anfang der 1920er Jahre: obwohl damals schon einige mögliche Fehlerquellen bekannt waren, wurden häufig kleine Fehler in der medizinschen Messtechnik ignoriert und nicht korrigiert. Es wurde jedoch nicht für alle Fehlerquellen und -arten einheitlich korrigiert oder vernachlässigt. Für einige Kammern wurden Korrekturen durch Ablesungen aus Eichblättern vorgenommen.

Möglicherweise wurde das Vorgehen nach Art des Instruments unterschieden: z.B. für Kammern wie die Druckluftkammer, an die der Anspruch des "absolut-Seins" gestellt wurde, wurden die Korrekturen als vernachlässigbar klein angesehen, während für kleinvolumige Ionisationskammern wie Fingerhutkammern so viele und so große Einflussfaktoren bekannt waren, dass diese nach Möglichkeit berücksichtigt wurden.

Dennoch war selbst im Falle einer Korrektur zu diesem Zeitpunkt die (eher praktisch als theoretisch durchgeführte) Bestimmung eines Korrektionfaktors meist fehlerträchtig oder -anfällig, da viele Einflussfaktoren noch nicht oder nur grob bekannt waren. Im Nachhinein ist es zudem fraglich, ob der Aufwand einer ggf. noch fehlerbehafteten Korrektur in der klinischen Routine (und damit explizit nicht für präzise wissenschaftliche Messungen!) sinnvoll oder machbar war, da trotz Korrektur die Messungen noch relativ ungenau waren.

Einige nicht durch die Messkammer selbst, sondern durch das dahinter geschaltete

¹³⁵Physikalisch-Technische Werkstätten Freiburg GmbH [2014a], S. 35

¹³⁶IBA Dosimetry GmbH [2014], S. 11

¹³⁷Esch et al. [2007], S. 3830-3831; Shimohigashi et al. [2012], S. 203

¹³⁸Physikalisch-Technische Werkstätten Freiburg GmbH [2014b], S. 2

¹³⁹IBA Dosimetry GmbH [2014], S. 6

Elektrometer möglicherweise verursachten Fehlerquellen zählte der Physiker Küstner in einem Artikel aus dem Jahr 1924 auf: seiner Meinung nach handelte es sich um mögliche Probleme bei der Zeitmessung durch Stoppuhren, der Eichkurven der Elektrometer sowie Sättigung, Dunkeleffekt und Justierfehler. Eine verhältnismäßig ausführliche Diskussion von Kammer-verursachten Fehlerquellen bildete erst einige Jahre später die Dissertation des schwedischen Physikers Rolf Sievert (veröffentlicht 1932). In dieser Arbeit sind mehrere Kapitel den "Formeln für die Bestimmung der Ionisation und des Einflusses von Fehlerquellen verschiedener Art" gewidmet, u.a. aufgeteilt in "Fehlerquellen, die auf Veränderungen von Form und Grösse [sic] der Kammern zurückgeführt werden können" "Fehlerquellen, die durch Veränderungen der Mess- und Ladungsvorrichtungen bedingt sind" sowie "Fehler der bei jeder Messung beobachteten Skalenwerte" 144.

Weiterere Fortschritte in der Fehlerberücksichtigung erfolgte durch das zunehmende theoretische Verständnis der Strahlenwirkung. Die damit gegebenen Anfänge der Entwicklung eines Formalismus zur Berechnung der Dosis mit kleinen Ionisiationskammern – der Bragg-Gray-Theorie – werden im Rahmen eines Ausblicks in Kap. 8 thematisiert.

 $^{^{140}}$ Küstner [1924a], S. 21-22

¹⁴¹Sievert [1932], S. 9

¹⁴²Sievert [1932], S. 20

¹⁴³Sievert [1932], S. 22

¹⁴⁴Sievert [1932], S. 26

Kapitel 7

Entwicklung der Einheiten

Die Wirkung von Röntgenstrahlen auf den menschlichen Körper wurde, wie oben erwähnt, zuerst an Hautreaktionen bemerkt. Es handelte sich hierbei um Schädigungen meist der Hände derjenigen, die mit Röntgenröhren umgingen, also zunächst Ärzten, Technikern und Physikern, später auch Röntgenschwestern. Unter den Schädigungen waren insbesondere Hautrötungen, Haarausfall (Depilation) und Entzündungen der oberen Hautschichten (Dermatitis) der bestrahlten Regionen. Wurde nach Auftreten der ersten Beschwerden die Arbeit mit Röntgenstrahlen dauerhaft fortgesetzt, wurden die Beschwerden meist chronisch. Zusätzlich zu einer Zunahme entstanden Veränderungen der Nägel, dauerhafte Verfärbungen der Haut sowie Geschwüre, die später als strahleninduzierter Krebs erkannt wurden.

Die leichteste Reaktion, die Hautrötung, trat nach einer gewissen Latenzzeit am Häufigsten auf, manchmal auch bei Patienten nach der Aufnahme einzelner Bilder (deren Exposition sich häufig über deutlich mehr als 15 Minuten hinzog). Das Phänomen wurde spätestens 1897 das erste Mal beschrieben, und zwar durch Paul Richer (1849 – 1933) und Albert Londe (1858 – 1917) vor der Pariser Académie des Sciences¹. Der Beitrag hatte den Titel "Erythème radiographique des mains"; hiervon ausgehend² wurde der Name Erythem oder Hauterythem zur Beschreibung o.g. Veränderungen in verschiedenen Sprachen – u.a. Französisch, Englisch und Deutsch – in den allgemeinen Gebrauch übernommen.

Ein einflussreicher Beitrag zum Thema Hautreaktion durch Röntgenstrahlen stammt von Kienböck aus dem Jahr 1900. Zu diesem Zeitpunkt bestand laut Kienböck noch kein wissenschaftlicher Konsens darüber, dass die Strahlen selbst die beschriebenen Wirkungen hervorriefen:

"Die Hautveränderungen sollen nach der einen Theorie durch die von der Röh-

¹Richer und Londe [1897]

²Kienböck [1900], S. 1154

re ausgehenden Röntgen-Strahlen erzeugt werden, nach der anderen Auffassung sollen die Röntgen-Strahlen nicht im Stande sein, Hautentzündungen hervorzurufen, vielmehr nur die elektrischen Entladungen der Röhre auf die Haut. (Manche beschuldigen die elektrischen Wellen in der Umgebung der Röhre oder das elektrische Feld.)"³

Kienböck stellte daher Versuche mit Kaninchen und Menschen (!) an, die er jeweils sowohl mit härteren als auch mit weicheren Röntgenröhren bestrahlte. Aus diesen Versuchen ergab sich, dass sich bei Anwendung der weichen Röhren jeweils "Röntgen-Dermatitis mit ausgebreiteter vollständiger Alopecie" (Glatzenbildung) ergaben, während harte Röhren keinen Haarausfall bewirkten. Aus diesen Versuchen schloss Kienböck, dass

"gar nicht mehr daran zu zweifeln [sei], dass die Wirkung nach Massgabe der Menge des auf die Haut auftreffenden Röntgenlichtes sich einstellte, wobei ferner noch die Qualität der Röntgenröhre, ihr Penetrationsvermögen geltend machte. Die Wirkung auf die Haut entsprach offenbar nahezu der Wirkung auf den Fluoreszenzschirm und die photographische Platte."⁵

Individuelle Unterschiede der Empfindlichkeit der Haut traten laut Kienböck zwar auf, schienen für ihn jedoch ein kaum nennenswertes Ausmaß zu haben. Insgesamt berichtete er, dass die Empfindlichkeit mit steigendem Alter sank und dass verschiedene Bereiche der Haut unterschiedliche Sensitivitäten vorwiesen. Schleimhäute sollten die größte und die Haut am Rumpf die geringste Empfindlichkeit besitzen.⁶ Individuelle Überempfindlichkeiten (Idiosynkrasie) waren Kienböck nicht bekannt, weshalb er davon ausging, dass sie "auch kaum existiren [sic]" durften; dieser Meinung schloss sich auch Holzknecht wenig später an⁸.

Die Darstellungen Kienböcks zu Korrelation von applizierter Dosis und Hautreaktion legten die Grundlagen für die ersten Dosierungstechniken und -einheiten, deren jeweilige Entwicklungen nun nachgezeichnet werden sollen. Das nachfolgende Kapitel gliedert sich in mehrere Teile: zunächst die Entwicklung der Einheiten, die sich auf ein Hauterythem als Normierung bezogen, anschließend die Entwicklung der Einheit "Hauteinheitsdosis" (HED), sowie anschließend die von beiden relativ unabhängige Entwicklung der Einheiten, die durch Ionisation definiert wurden. Abschließend wird auf die Standardisierung von Ionisationseinheiten in Deutschland eingegangen.

³Kienböck [1900], S. 1154

⁴Kienböck [1900], S. 1160

⁵Kienböck [1900], S. 1160

⁶Kienböck [1900], S. 1163

⁷Kienböck [1900], S. 1165

⁸Holzknecht [1902a], S. 686

7.1 Auf Hautreaktion geeichte Dosen

Lange bevor die später so genannte Hauteinheitsdosis (HED, manchmal auch Hauterythemdosis genannt) auch nur annähernd einheitlich festgelegt wurde, entstanden Dosis, mess"systeme, die sich normierend auf eine bestimmte Hautreaktion bezogen. Diese gründeten auf den genannten Forschungen Kienböcks und seine Formulierung

"Es besteht also ein Parallelismus zwischen der Wirkung auf die Haut und der auf die photographische Platte"⁹,

die bald auf andere Messsysteme übertragen wurde. An dieser Stelle soll exemplarisch auf die Einheiten einiger in Kap. 5 beschriebener Dosimeter eingegangen werden.

Die erste Einheit, die sich auf eine Hautreaktion bezog, war die Einheit H des Holzknechtschen Chromoradiometers (s. Kap. 5.1). Diese war durch Holzknecht recht ungenau definiert:

"Als Einheit der Röntgenlichtmenge (H) ist eine Menge gewählt, deren Dreifaches genügt, auf der Haut des Gesichtes eine leichte Reaktion hervorzubringen."¹⁰

Da die Inhaltsstoffe des Chromoradiometers von Beginn an geheim gehalten wurden (s. Kap. 5.1) ist es schwer, eine mögliche Umdefiniton der H-Einheit im Wandel der Reagenzien nachzuvollziehen. Dass eine Umdefinition stattgefunden hat, wird dadurch nahe gelegt, dass sich Holzknecht auf eine "III. Type des Radiometers"¹¹ sowie "11, später 6 Stufen"¹² des Chromoradiometers bezog.

7.1.1 Einheiten der Dosimeter aus Bariumplatincyanür

Etwas genauer als Holzknecht beschrieben Sabouraud und Noiré die Reaktion, die als Vergleich für ihr "Dosimeter" diente (s. Kap. 5.3.1). Es war keine Hautrötung, sondern "une dépilation totale d'une région donnée du cuir chevelu, sans radiodermite, sans érythème et sans alopécic définitive."¹³ Die Dosis, die diese Reaktion hervorrief, sollte also keine langfristige Wirkung, zwar eine Enthaarung, aber kein dauerhaftes Kahlbleiben haben. Wurde Bariumplatincyanür-Papier mit dieser Dosis bestrahlt, verfärbte es sich zu einer Farbe, die "Teinte B" genannt wurde. Der Farbton des unbestrahlten Reagenzkörpers hieß nach Konvention Teinte A. Wie sich die Farbangaben je nach Autor unterschieden, wurde bereits in Kap. 5.3.1 dargelegt.

⁹Kienböck [1900], S. 1160

¹⁰Holzknecht [1902-1903], S. 108

¹¹Holzknecht [1910], S. 374

¹²Holzknecht [1910], S. 374

¹³Sabouraud und Noiré [1904], S. 826

Sabouraud und Noiré behaupteten, die zu Teinte B gehörige Dosis würde 5 Holz-knecht-Einheiten H entsprechen, gaben aber keine verwendete Röhrenhärte an, weshalb dieser Vergleich nur eine bedingte Aussagekraft hat – lediglich durch das technisch bedingt noch relativ geringe, mögliche Energiespektrum würden sich grobe Aussagen treffen lassen.

In Deutschland beschäftigte sich mit der Sabouraud-Noiré-Pastille zunächst insbesondere H.E. Schmidt, der die Wirkung von Teinte B jedoch deutlich anders auffasste als Sabouraud und Noiré. Schmidt erwartete "nach einer Röntgen-Bestrahlung, welche eine der Teinte B entsprechende Färbung des Reagenspapiers zur Folge hat, [...] eine mehr oder weniger starke Rötung der Haut"¹⁴.

Das Bordiersche Radiometer hingegen (s. Kap. 5.3.2), das ebenfalls aus Bariumplatincyanür bestand, hatte eine Reaktions-Abstufung, die für verschiedene Dosen stand. Mihran Krikor Kassabian (1870 – 1910) zitierte in seinem Buch über Röntgenstrahlen und Elektrotherapie Bordier wie folgt:

"Tint No. 1, a pale yellowish-green, is the shade that the pastille takes when exposed to the maximum dose of rays compatible with the complete integrity of the normal skin. [...] Tint No. 2, of a sulphur-yellow shade, is that color that the pastille assumes when the skin has been exposed to an irradiation calculated to produce a strong reaction, *viz.* erythema [...] Tint No. 3 is almost of the color of gamboge. It corresponds to a reaction of the skin of the second degree; it is a true dermatitis [...] Tint No. 4 is of a chestnut color, and corresponds to a reaction of the third degree, which is accompanied by necrosis and ulceration of the skin."¹⁵

7.1.2 Einheit des Kienböck-Quantimeters

Das Kienböck-Quantimeter (s. Kap. 5.5) bezog sich, anders als seine Vorgänger, nur indirekt auf Hautreaktionen. Den "Schwärzungsgrad 1" des Fotopapiers bezeichnete Kienböck mit "1x"; er war "so gewählt, dass sie die Hälfte der Holzknechtschen chromoradiometrischen beträgt, 2x = 1H, 10×0 oder 5×1 entsprechen einer Sabouraud-Noiréschen Maximaldosis." Die den Holzknecht- und Sabouraud-Noiré-Einheiten entsprechenden Hautreaktionen sind oben angegeben.

Zum Quantimeter gehörte jedoch nicht nur eine einzelne Einheit, sondern eine Skala mit "ansteigenden Schwärzungsgraden" (s. Abb. 5.4), die von $\frac{1}{4}$ x bis 15x reichte. 1x war hierbei lediglich eine "kleine" Dose, Normaldosen lagen zwischen 6 und 10x. Hierbei

¹⁴Schmidt [1904-1905], S. 263

¹⁵Bordier [1906], S. 6, zit. nach Kassabian [1910], S. 433-434

¹⁶Kienböck [1905-1906], S. 287

ist zu beachten, dass Kienböck eine "Dermatitis ersten Grades"¹⁷ als Normalreaktion betrachtete. Eine Dosis von 10x wurde mit – zu diesem Zeitpunkt mit "mittelweichem Licht" bezeichneter – ungefilterter Röntgenstrahlung innerhalb von 20 Minuten erreicht¹⁸. Nachdem es üblich geworden war, Aluminiumfilter für die Strahlung zu verwenden, musste die Skala jedoch umdefiniert werden: "die neue durchschnittliche Maximaldose ist jetzt nicht mehr 10x, sondern 40 - 60x."¹⁹

Die verschiedenen Schwärzungen der Skala entstanden durch unterschiedliche Belichtungszeiten. Die Skala wurde jedoch nicht mit einer Röntgenröhre, sondern mit "Glühlicht" hergestellt, da Kienböck noch davon ausging, dass "die Schwärzungen […]bei Glühlicht und Röntgenlicht in fast vollkommen gleichem Masse"²⁰ stiegen.

7.1.3 Kalomel-Einheit

Die Einheit des Kalomel-Radiometers von Schwarz (s. Kap. 5.6) wurde im Laufe der Jahre verschieden definiert. Zunächst stand ein "Kalom" für "diejenige Röntgenlichtmenge, die notwendig [war], um das wasserklare Kalmelogen in die Trübung 1 zu überführen"²¹. In einem fünf Jahre später veröffentlichten Artikel gab Schwarz jedoch eine abweichende Definition an: "Ein Kalom in halber Fokushautdistanz gemessen, ist das Drittel derjenigen Dosis, welche auf der behaarten Kopfhaut appliziert, nach 14tägiger Latenzzeit temporäre Epilation ohne jede anderen Reaktionserscheinungen hervorruft."²²

7.2 Einheiten ohne Hautreaktions-Bezug

7.2.1 Jodoform-Einheiten

Das Jodoform-Radiometer von Freund (s. Kap. 5.2.1) hatte als eins der wenigen frühen Dosimeter eine Einheit, die nicht mit einer Hautreaktion in Korrelation gesetzt wurde. Stattdessen mutet sie fast willkürlich an:

"Die für therapeutische Zwecke zu verwendende Minimaldosis von sechs Minuten Bestrahlung gibt einen Effekt, welcher durch die Jodzahl 0,59 Milligramm freigemachtem Jod pro 5 ccm Radiometerflüssigkeit ausgedrückt ist."²³

¹⁷Kienböck [1905-1906], S. 281

¹⁸Kienböck [1912], S. 72

¹⁹Kienböck [1914-1915b], S. 593

²⁰Kienböck [1905-1906], S. 283

²¹Schwarz [1907a], S. 119

²²Schwarz [1912], S. 97

²³Freund [1903-1904], S. 217

Ob die bestrahlte Lösung die "Minimaldosis" erhalten hatte oder nicht, wurde bestimmt, indem bestrahlte und Referenzlösung verglichen wurden.

Weil ihnen die Genauigkeit eines Farbvergleich der bestrahlten Lösung mit genau einem Vergleichsfarbton nicht ausreichte, entwickelten Bordier und Galimard 1906 eine Farbskala mit zwölf verschiedenen Farbtönen bzw. Jodkonzentrationen (s. Kap. 5.2.2). [Der Artikel erschien im November 1906 auf Englisch, war jedoch, wie aus der Fußnote zur Artikelüberschrift hervorgeht, schon "einige Monate zuvor"²⁴ bei der Redaktion eingegangen.] Die verschiedenen Lösungen sollten laut Bordier und Galimard folgendermaßen hergestellt werden:

"The first solution, which we will call A, was made by dy dissolving 0.2 gramme of iodine in 100 c.c. of chloroform slightly aciduated. Each cubic centimetre of this solution contained 2 milligrammes of iodine. The second solution, B, was made by taking 80 c.c. of A and adding 20 c.c. of chloroform; it therefore contained 16 [sic] milligrammes of iodine per c.c. Solution C was made by diluting 80 c.c. of B with 20 c.c. of chloroform, and so on, the last solution, L, containing only $3\cdot088$ iodine per c.c."²⁵

Der Anstieg von 2 mg/cm³ zur Angabe 16 mg/cm³, der im zitierten Text für die größere Verdünnung genannt wird, und als Dezimalstellenfehler zu betrachten ist, regt zur Nachrechnung aller Angaben an. Wenn man die von Bordier und Galimard gegebene Rechenvorschrift befolgt und die Jodkonzentrationen nachrechnet, fällt auf, dass sich die Autoren nicht für alle Lösungen an ihre eigenen Vorgaben gehalten haben (s. Abb. 7.1). Stattdessen bestehen die Lösungen 4 bis 8 jeweils aus 90 Vol.-% der Vorgängerlösung und 10 Vol.-% zusätzlichem Chloroform. Für die Lösungen 9 bis 12 stimmen die Werte wieder etwa mit der Mischungsvorschrift überein.

Zusätzlich zu ihrer Farbskala führten Bordier und Galimard eine Einheit für das Jodoform-Radiometer ein, die sich erstaunlicherweise nicht an der Farbskala orientierte:

"The quantity of X ray which, when falling normally on a 2 per cent. solution of iodoform in chloroform, will liberate from it 1/10 milligramme of iodine, the solution being so placed that the area of the irradiated surface is 1 square centimetre, and the depth of the solution 1 centimetre. This unit we propose to call the quantity "I"." 26

Damit lag die Einheit I um 18 % höher als die von Freund vorgeschlagene Einheit der Minimaldosis.

²⁴Bordier und Galimard [1906], S. 164

²⁵Bordier und Galimard [1906], S. 165

²⁶Bordier und Galimard [1906], S. 166

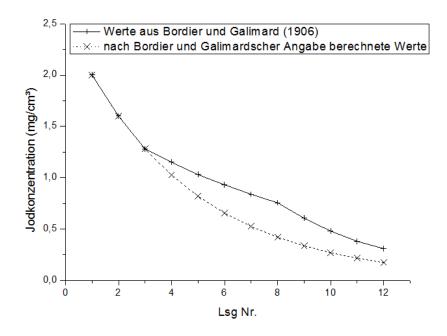


Abbildung 7.1: Jodkonzentrationen der Vergleichslösungen des Jodoform-Radiometers. Die von Bordier und Galimard angegebenen Werte (durchgezogene Linie) weichen für die Lösungen 3 bis 12 deutlich von den nach der ebenfalls angegeben Rechenvorschrift berechneten Werten (gestrichelte Linie) ab. Werte und Rechenvorschrift aus Bordier und Galimard [1906], S. 165.

7.3 Biologische Dosisdefinitionen

7.3.1 Erythemdosis

Der Begriff der Erythemdosis bzw. die Konvention, die Strahlungsmenge, die ein Erythem hervorrief, "Erythemdosis" zu nennen, scheint – zumindest in Deutschland – auf H.E. Schmidt zurückzuführen sein. Dieser Verwendung begegnet man nicht nur bei ihm selbst²⁷, sondern auch z.B. Kienböck gibt in seinem Artikel "Über die Nomenklatur in der radiotherapeutischen Technik"²⁸ dieser Begrifflichkeit entsprechende Wertschätzung.

Es erfolgte zunächst keine genaue Definition, unter welchen Bedingungen die Bestrahlung stattfinden musste, um eine "Erythemdosis" hervorzurufen. Trotz der Tatsache, dass sich zahlreiche Einheiten auf die Entstehung eines Hauterythems bezogen, wurde lange keine einheitliche Nomenklatur verwendet, es gab eine Vielzahl von verwendeten Begriffen. Kienböck schrieb:

"Die Dosen, welche zu Erythem der gesunden Haut führen, wurden vom Ver-

²⁷Schmidt [1914-1915a], S. 416

²⁸Kienböck [1912-1913], S. 294-295

fasser "Normaldosen" genannt, sie entstehen durch eine "Normalexposition". Der Terminus "Normaldose" wurde allgemein akzeptiert, daneben wurden später auch die guten, denselben Begriff bezeichnenden Ausdrücke "Maximaldose" (in Frankreich) und "Erythemdose" (H.E. Schmidt) verwendet. Es gibt – innerhalb gewisser Grenzen – verschieden hohe Normaldosen; die "durchschnittliche", "mittlere Normaldose" heißt auch "französische Maximaldose" (nach Sabouraud & Noiré), sie ist zugleich "Epilationsdose". Es gibt aber nicht etwa nur eine "Normaldose", vielmehr den verschiedenen Empfindlichkeitsstufen der Haut angepasste kleine, mittlere und grosse Normaldosen. Wenn man von Normal-, Maximal- oder Erythemdose schlechtweg spricht, so meint man meist die mittlere N.D., man darf aber dabei nicht erwarten, dass diese Lichtmenge stets Erythem erzeugen werde."²⁹

Obwohl Kienböcks "Über die Einwirkung des Röntgenlichtes auf die Haut" von 1900 bereits auf eine mögliche Abhängigkeit der Hautreaktion von der "Qualität der Röntgenröhre, ihr[em] Penetrationsvermögen"³⁰ hinwies, wurde dieser Möglichkeit lange nicht nachgegangen. Erst nach über zehn Jahren scheint das Thema wieder aufgegriffen worden zu sein. Zu diesem Zeitpunkt konnten nicht nur zufällig, sondern gezielt - durch Variation der Spannung sowie der Verwendung von unterschiedlichen Filtern - verschiedene Strahlungsqualitäten erreicht werden. Heinrich Wachtel gab an, [Carl Joseph] "Gauß [1875 – 1957, Anm. d. Verf.] (Verhdlg. d. Ges. d. deutsch. Naturf. u. Ärzte 1911, S. 249) [habe als erster] in Deutschland darauf hingewiesen [...], daß man bei gefilterter Strahlung eine größere Dosis, als die übliche Erythemdosis, nach Kienböck gemessen, der Haut, ohne daß ein Erythem entsteht, applizieren kann"³¹. Dieser Beobachtung folgte die Überlegung, dass die Festlegung "einer Erythemdosis" nur für eine bestimmte Strahlungsqualität gelten könne. Zu diesem Thema folgten bald Untersuchungen, die z.T. sogar im Selbstversuch stattfanden. So berichtete H.E. Schmidt, er habe "festgestellt, daß die Teinte B nur bei mittelweicher Strahlung (5-7 We.) der "Erythemdosis" entspricht, bei weicherer Strahlung dagegen eine stärkere, bei härterer Strahlung eine schwächere Hautreaktion zur Folge hat."³²

7.3.2 Hauteinheitsdosis

Eine der einflussreichsten deutschen Arbeiten zum Thema Dosis und Hautreaktion stammt aus der Erlanger Frauenklinik und wurde im Jahr 1920 von Ludwig Seitz (1872

²⁹Kienböck [1912-1913], S. 294-295

³⁰Kienböck [1900], S. 1160

³¹Wachtel [1915-1916], S. 250

³²Schmidt [1914-1915a], S. 416

– 1961) und Wintz veröffentlicht. Die Autoren beschäftigten sich mit Hauterythemen unter verschiedenen Bedingungen und versuchten, Erytheme messbar zu machen. Dabei sahen sie grundsätzlich durchaus eine gewisse Problematik in der Verwendung der Hautrötung als maximale Dosis:

"Es ist aber doch die Frage, ob die Reaktion der Haut konstant genug ist, um als biologisches Testobjekt verwendet zu werden: denn nur dann, wenn eine gewisse Konstanz der Stärke der Reaktion vorhanden ist, ist die Reaktion als Maßstab brauchbar."³³

Aus diesem Grund stellten Seitz und Wintz systematische Versuche an, bei denen sie jeweils einen der Faktoren Patient, Hautregion, Intensität oder Härte³⁴ variierten, während die anderen konstant gehalten wurden. Die auftretenden Hautreaktionen wurden kategorisiert (s.u.) und später mit jeweils während der Bestrahlung mit Messungen, die mit einem stark modifizierten Iontoquantimeter durchgeführt waren, korreliert. Das verwendete Iontoquantimeter besaß eine andere Ionisationskammer und eine andere Skala als von Szilard vorgeschlagen³⁵. Insgesamt kamen die Autoren zu dem Fazit,

"daß die Reaktion der gesunden Haut gegen Röntgenstrahlen nur in geringen Breiten, die ca. 10-15 % ausmachen, schwankt. Abnorm starke Reaktionen beruhen auf Erkrankung der Haut selbst oder auf Allgemeinerkrankungen des Körpers. Damit ist auf zuverlässiger Grundlage nachgewiesen, daß die Haut zum biologischen Testobjekt geeignet ist [...] Die Erythemdosis kann also als ein in der Praxis brauchbarer biologischer Maßstab angesehen werden."³⁶

Damit sprachen sich Seitz und Wintz aufgrund einer leichteren Verwendbarkeit in der klinischen Praxis für die Dosierung nach bestimmten Hautrötungen aus, obwohl zu diesem Zeitpunkt bereits genauere physikalische Messmethoden vorhanden waren³⁷. Dennoch setzten sie ihre quantitativen Messergebnisse mit der biologischen Reaktion in Relation und definierten die sog. Hauteinheitsdosis (HED):

"Es ist jene Hautveränderung, die durch harte Strahlung entsteht, sich alsbald nach der Bestrahlung in einer Rötung, drei Wochen später in einer leichten hellbraunen Verfärbung, nach sechs Wochen in einer deutlichen Bräunung der bestrahlten Hautstelle äußert. [...] Wir setzen die Hauteinheitsdosis (von 35 Sektoreinheiten [des modifizierten Iontoquantimeters]) als Einheit = 100%."³⁸

³³Seitz und Wintz [1920], S. 119

³⁴Seitz und Wintz [1920], S. 119

³⁵Seitz und Wintz [1920], S. 28 und S. 30

³⁶Seitz und Wintz [1920], S. 133-134

³⁷Seitz und Wintz [1920], S. 134

³⁸Seitz und Wintz [1920], S. 134-135

Immerhin waren sich Seitz und Wintz der Tatsache bewusst, dass nicht alle Anwender des Iontoquantimeter nun 35 Sektoreinheiten für eine HED applizieren konnten, denn sie bemerkten: "Ein anderer Untersucher, der ein anders geeichtes Instrument hat, vermag mit diesen Werten nichts anzufangen, sie sind nicht miteinander vergleichbar"³⁹. Sie galten zusätzlich nur unter folgenden Bedingungen: "selbsthärtende Siederöhre, Filter 0,5 mm Zink, 2,5 Milliampère sekundäre Stromstärke, Härte 76, Unterbrechungen 2400 pro Minute, Symmetrieinstrumentarium"⁴⁰ und bei einem Fokushautabstand von 25 cm⁴¹.

7.3.3 Kritik der Hauteinheitsdosis

Die Hauteinheitsdosis erfreute sich schnell einer großen Beliebtheit. Fast genauso schnell wurde jedoch auch – zumindest einigen – Anwendern deutlich, dass sich die HED-Angaben verschiedener Nutzer stark unterscheiden mussten. Die erste größere Studie zu diesem Thema stammt aus dem Jahr 1922 und umfasste fünf Kliniken: Bonn, Düsseldorf, Berlin sowie die Frankfurter Haut- und Frauenkliniken. Sie wurde von dem damals in Frankfurt arbeitenden Physiker Albert Bachem (1888 – 1957) durchgeführt. Dieser bestimmte mittels eines Elektroskops einen Faktor, den er für aussagekräftig über die biologische Wirkung hielt.

"Der von der Intensitätsangabe des Instruments für biologische Wirkung führende Faktor K wurde dadurch gewonnen, daß die Zeit, welche zur Erzeugung einer HED oder eines Erythems notwendig ist (in Minuten angegeben), durch die Abfallszeit des Elektroskops (in Sekunden angegeben) dividiert wurde. Dadurch wurde ein von der Härte sowohl wie von der Art des Erythems abhängiger Faktor gewonnen"⁴².

Bachems graphische Darstellung der Messergebnisse ist in Abb. 7.2 wiedergegeben, dort ist der Faktor K für drei verschiedene Fokushautabstände gegen den mit der Strahlhärte in Korrelation stehenden Abschwächungskoeffizienten⁴³ μ aufgetragen. Die Ergebnisse interpretierte und kommentierte Bachem folgendermaßen:

"Die K-Werte, welche für die HED der Frankfurter Frauenklinik und Hautklinik gefunden wurden, liegen etwa 30 % resp. 20 % tiefer als die vorigen und zeigen damit die physikalischen Unterschiede an, die zwischen einem normalen Erythem

³⁹Seitz und Wintz [1920], S. 134

⁴⁰Seitz und Wintz [1920], S. 74

⁴¹Seitz und Wintz [1920], S. 52

⁴²Bachem [1922], S. 606

⁴³Bachem [1922], S. 607

(Beispiel Bonn) und der HED (zwei Beispiele Frankfurt) bestehen. Die K-Werte, welche für die stärkeren Erytheme der genannten Düsseldorfer und Berliner Kliniken gefunden wurden und welche fast an die Hautmaximaldosis heranreichen, gehen um etwa 25 % über die Bonner Werte ähnlicher Härte hinaus."

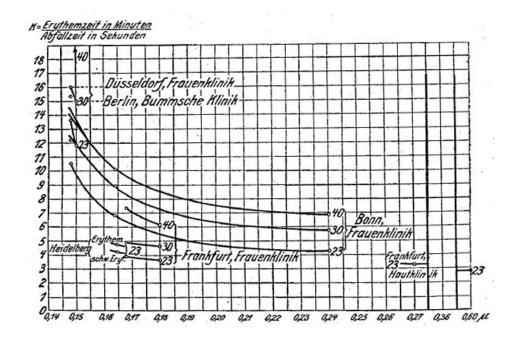


Abbildung 7.2: Abhängigkeit des biologischen Wirkungsfaktors K von der "Abschwächung" μ . Es sind pro Klinik jeweils Werte für den Fokushautabstand 23 cm, 30 cm und 40 cm gegeben. Abbildung aus Bachem [1922], S. 608.

Trotz dieser Beurteilung war sich Bachem der beschränkten Aussagefähigkeit des Faktors K bewusst und nannte beispielhaft die Faktoren Feldgröße und bestrahlte Hautstelle als Faktoren, die nicht berücksichtigt wurden und die die Ergebnisse weiterhin hätten beeinflussen können⁴⁵. Insgesamt verwendeten insbesondere Physiker, aber auch Ärzte die Untersuchungen Bachems als Argument gegen eine "biologische" Dosierung bzw. eine Verwendung der Hauteinheitsdosis.

7.4 Ionisations-Einheiten

Seit Perrin im Jahr 1896 beschrieben hatte, welcher Messaufbau zur Messung der Quantität ionisierender Strahlung verwendet werden konnte, wurden vergleichbare Aufbauten von Physikern verwendet. Als Einheit der gemessenen Strahlungsgröße galt hierbei

⁴⁴Bachem [1922], S. 607

⁴⁵Bachem [1922], S. 610

zunächst, wie auch beim Elektroskop, die Zeit, in der der Zeiger eines angeschlossenen Elektrometers einen bestimmen Skalenabschnitt überstrich.

Der erste⁴⁶ Vorschlag, eine auf Ionisation beruhende Einheit in der Strahlentherapie einzuführen, geht auf Joseph Belot zurück. Er schlug vor, eine Apparatur analog zu der von Marie und Pierre Curie (1867 – 1934 und 1859 – 1906) zur Messung der Radium-Strahlung verwendeten einzuführen. Dieser habe "the advantage of furnishing a unit, X, which is based on the C[entimetre].G[ram].S[econd]. system."⁴⁷ Belot erläuterte nicht, wie der Bezug zwischen Radium-Einheit und CGS-System genau aussehen sollte. Ein Bezug zu einem existierenden Einheitensystem ist an sich jedoch bereits beachtenswert.

7.4.1 Einheit e: Villardsche Formulierung

Das erste Messinstrument, das ausschließlich zur Messung ionisierender Strahlung in der Medizin vorgesehen war und den Ionisationseffekt ausnutzte, war das Quantitometer von Villard (s. Kap. 6.2). Auch Villard bezog sich zunächst auf Schwingungen eines Zeigers pro Zeitintervall. Da er jedoch eine Proportionalität⁴⁸ zwischen Schwingungsanzahl und Strahlungsmenge in der Messkammer annahm, teilte er die Skala in Holzknechteinheiten (H) ein.

Zusätzlich schlug Villard jedoch noch eine weitere - wegweisende - Graduierung der Skala vor, indem er einen Vorschlag einer Einheit machte, die er eher für "vernunftgemäß" und "logisch" hielt:

"L'unité de quantité de rayons X es celle qui libère par ionisation une unité électrostatique par centimètre cube d'air dans les condition normales de température et de pression." 49

Diese Einheit wurde aufgrund des Bezugs zur elektrostatischen Einheit auch mit e bezeichnet.

7.4.2 Einheit Megamegaion: Szilardsche Formulierung

Auch die nächste etwas bekannter gewordene Einheit für Strahlungsmengen, die sich auf Ionisation bezog, stellte einen Bezug zur "elektrostatischen Einheit" her. Hierbei handelte es sich um die Einheit, die Szilard gemeinsam mit dem Iontoquantimeter (s. Kap. 6.3) vorstellte. Er schlug vor, durch die Wahl der Einheit des Iontoquantimeters

⁴⁶Jennings [2007], S. 7

⁴⁷Belot [1906], S. 39

⁴⁸Villard [1908b], S. 698

⁴⁹Villard [1908b], S. 699

den Effekt der Ionisation deutlich zu machen: die Einheit sollte "die Strahlenergie, welche fähig ist, in der Luft unter normalen Bedingungen ein Ion zu erzeugen"⁵⁰ darstellen. Szilard beschrieb die Einheit auch als "das Ion selber".

Da diese Energie und damit die Einheit sehr klein gewesen wäre, modifizierte Szilard sie durch einen Faktor und gab ihr den Namen Megaion⁵¹. Als das Iontoquantimeter drei Jahre später auch in Deutschland durch *Reiniger*, *Gebbert & Schall* auf den Markt gebracht wurde, hatte Szilard diesen Faktor nochmals um den Faktor 10⁶ vergrößert: die Einheit hieß nun Megamegaion:

```
"10^{12}=1 Mega-megaion. Ein Mega-megaion entspricht deshalb 3,4\times10^{10}\times10^{12}. V.S.E., eine Ladung, welche von Ionen getragen wird, welche 340 elektrostatischen Einheiten = 1,1\times10^{-7} Ampére = 340 000 M.E. = ungefähr 4000 Uraneinheiten entsprechen."^{52}
```

Das Iontoquantimeter und seine Einheit tauchten zwar in diversen Artikeln auf, anders als z.B. bei der Sabouraud-Noiré-Pastille und ihrer Einheit waren dies keine Anwendungsberichte, die Vor- bzw. Nachteile des Instruments herausstrichen oder einen Vergleich mit anderen Dosimetern darstellten. Insbesondere wurde das Iontoquantimeter in den wenigen rückblickend zusammenfassenden Publikationen als Zwischenschritt zu anderen Ionisations-Messgeräten und -Einheiten erwähnt⁵³.

7.4.3 Einheit E: Duanesche Formulierung

Etwa zeitgleich mit Szilard beschäftigte sich auch der amerikanische Physiker William Duane (1872 – 1935) mit einer Einheit zur quantitativen Röntenstrahlenmessung mittels Ionisation. Er verwendete eine Ionisationskammer⁵⁴ zum Auffangen der Strahlung sowie ein Galvanometer zu deren Messung. Als Einheit definierte Duane eine Größe, die der durch Villard angegebenen ähnelte:

"an ionization current of one electrostatic unit in each cubic centimeter of air, if the rays strike not any of the electrodes in the ionization chamber, and if all of the secondary radiation from the molecules of the air were absorbed in the air. This unit we call E." 55

⁵⁰Szilard [1915], S. 746

⁵¹Szilard [1910], S. 224

⁵²Szilard [1915], S. 748

⁵³Glasser [1941], S. 224; Mould [1995b], S. 179

⁵⁴auf seinen Vortrag bei der American Roentgen Ray Society in Cleveland 1914 konnte leider nicht zugegriffen werden, weshalb nicht auf technische Details eingegangen werden kann.

⁵⁵Duane [1922], S. 787

Duanes Einheit war spezifischer gefasst als jene Villards, da sie genauere Bedingungen vorgab. Allerdings ist es durchaus vorstellbar, dass diese spezielle Formulierung erst aus dem Jahr 1922 stammt, zum Zeitpunkt des erwähnten Vortrages von 1914 lediglich die Verwendung des Ionisationsstroms festgelegt war und die Bedingungen später hinzugefügt wurden.

Auch der Einfluss von Duanes Einheit auf die weitere Entwicklung von Ionisationseinheiten ist schwer weiterzuverfolgen. Dies ist teils darin begründet, dass sich kaum rekonstruieren lässt, ob und wenn ja, inwieweit europäische Ärzte bzw. im medizinischen Feld Tätige während des Ersten Weltkrieges Zugang zu amerikanischer wissenschaftlicher Literatur im Allgemeinen und Kongressliteratur im Speziellen hatten. Andererseits ist es durchaus wahrscheinlich, dass es einen direkten Austausch zwischen Duane und verschiedenen europäischen Wissenschaftlern gab, da sich Duane von 1895 bis 1897 in Berlin und Göttingen sowie von 1907 bis 1913 in Paris (im *Institut Curie*)⁵⁶ aufgehalten hatte – diese letzte Tatsache legt auch nahe, dass Duane Villards Instrumente sowie seine Einheit kannte. Insgesamt lässt sich jedoch festhalten, dass es für die Standardisierung der Röntgenstrahlenmessung ein nicht unwesentlicher Schritt war, dass sowohl in Europa als auch in Amerika ähnliche Einheiten – wenn häufig auch nur von wenigen Wissenschaftlern .- verwendet wurden.

7.4.4 Einheit :: Friedrichsche Formulierung

Etwa zur gleichen Zeit wie Szilard und Duane beschäftigen sich in Freiburg i. Br. der Gynäkologe Krönig und der Physiker Friedrich ebenfalls mit Ionisationsmessungen sowie einer möglichen Einheit hierfür. Kriegsbedingt erschien ihr Buch erst im Jahr 1918; seine Erstellung hatte sich über die "letzten Jahre" (laut Vorwort des Buches) erstreckt.

Krönig und Friedrich beschäftigten sich explizit mit Szilards Iontoquantimeter sowie der Einheit Megamegaion. Sie schlossen sich der Verwendung dieser Einheit nicht an, da sie "möglichst bei schon vorhandenen zahlreichen Einheiten nicht wieder eine neue Bezeichnung einführen"⁵⁷ wollten und auf vorhandene grundlegende Einheiten zurückgriffen: Krönig und Friedrich maßen die absorbierte Dosis über die Zeit, die nötig war, um die Kondensatorplatten des Strahlungsdetektors zu entladen. Da das Potential, die Geometrie und die Ladung der Platten bekannt waren, konnte aus der abgelaufenen Zeit eine Ladungsdifferenz ermittelt werden. Unter Berücksichtigung des Kammervolumens könnte man also eigentlich eine Größe erhalten, die der heutigen Ionendosis entfernt ähnelt. Krönig und Friedrich gingen diesen Weg jedoch nicht, sondern

⁵⁶Bridgman [1936], S. 24

⁵⁷Krönig und Friedrich [1918], S. 78

verwendeten

"als Einheit der Dosis diejenige Strahlenmenge, die in 1 ccm Luft durch die Ionisation eine Elektrizitätsmenge von einer elektrostatischen Einheit bei Sättigungsstrom transportiert, wobei unter elektrostatischer Einheit diejenige Elektrizitätsmenge verstanden wird, die einen Leiter von der Kapazität 1 (1 cm) auf die Einheit des Potentials (300 Volt) auflädt. Sie wird nach Kohlrausch mit einem kleinen deutschen $\mathfrak e$ [Frakturbuchstabe] bezeichnet."58

In der zehnten Kohlrausch-Auflage (1905) wird die Einheit $\mathfrak k$ wie folgt definiert:

"Elektrizitätsmenge $\mathfrak{e}=[l^{1/2}m^{1/2}t^{-1}]$. "Elektrostatische" oder "mechanische" Einheit der E.-M. ist die Menge, welche eine ihr gleiche Menge aus der Entfernung Eins mit der Kraft Eins abstößt; $[cm^{1/2}gr^{1/2}/sek=333\cdot 10^{-12}$ Amperesekunde oder "Coulomb"]"59

Die Formulierung von Krönig und Friedrich (häufig wird nur der Physiker Friedrich und nicht auch der bereits 1917 verstorbene Arzt Krönig als Urheber genannt) bildete zwar einen wichtigen weiteren Punkt bei der Entwicklung einer Ionisationseinheit. Sie bot jedoch auch Angriffspunkte für Kritik. Diese ergab sich teilweise aus den Ergebnissen eines etwa zeitgleich erschienen Artikels Holthusens. In diesem Artikel beschäftigte sich Holthusen mit dem für eine korrekte Messung benötigten Volumen einer Ionisationskammer:

"Daß die Ionisation der sekundären, bei Röntgenstrahlenabsorption entstehenden Kathodenstrahlen in kleinen Meßräumen nicht voll ausgenutzt wird, wurde schon 1906 von Herweg⁶⁰ [August Julius Herweg, (1879 – 1936); Anm. d. Verf.] experimentell dadurch bewiesen, daß er durch Anlegen eines Magnetfeldes an die Meßkammer die Elektronen auf Zykloiden ablenkte und dadurch die Ionisation unter Umständen auf mehr als das Doppelte steigen ließ. Auf einfachem Wege läßt sich dasselbe dadurch zeigen, daß man ohne Veränderung des Strahlenbündels und des bestrahlten Luftvolums die Dimension des Meßraumes verändert, als bei gleichbleibender Länge des Meßraumes seinen Durchmesser verkleinert."⁶¹

Holthusen plädierte insgesamt für ein Kammervolumen, das groß genug sein musste, alle Sekundärstrahlen aufzufangen und damit mitzumessen. Gemeinsam mit dem Einfluss des Kammermaterials sprach dieses Argument Holthusens gegen die Verwendung

⁵⁸Krönig und Friedrich [1918], S. 77

⁵⁹Kohlrausch [1905], S. 590

⁶⁰s. Herweg [1906]

⁶¹Holthusen [1918-1919], S. 217

eines Kammervolumens von nur einem Kubikzentimeter, "da sich die Vorgänge im Wesentlichen in der Umgebung dieses durchstrahlten Kubikzentimeters abspielen."⁶²

7.5 Einheiten-Standardisierung in Deutschland

Der Wunsch nach einer Standardisierung von Einheiten zur Dosismessung innerhalb Deutschlands existierte lange vor deren praktischen Umsetzung. Er rührte von einem Wunsch nach Vergleichbarkeit von Messungen her und ist damit wissenschaftsinduziert einzuordnen. Eine Standardisierung wurde sowohl von Ärzten als auch von Physikern gefordert und durch die beide Berufsgruppen vereinenden Deutschen Röntgengesellschaft unterstützt, während die Physikalisch-Technische Reichsanstalt die Realisierung einer gemeinsamen Einheit umsetzte. Stärker noch als die DRG setzte sich die PTR zusätzlich zu einer einheitlich definierten Einheit für ein einheitliches Messverfahren dieser Einheit ein: Während die DRG zur Zeit des Ersten Weltkriegs eine Sonderkommission für $Dosimetervergleich^{63}$ einsetzte, um so eine Vergleichbarkeit zu schaffen, schlug die PTR zusammen mit einer Einheit auch ein Standard-Messverfahren 64 vor. Letztendlich waren die frühen Bemühungen der DRG jedoch zum Scheitern verurteilt, weil den verschiedenen Messverfahren kein einheitliches Verständnis des Begriffs "Dosis" zugrunde lag. Die Standardardisierung der Dosiseinheit war erst erfolgreich, als sich ein Standard-Messprinzip – die Messung durch Ionsiations-Verfahren – durchgesetzt hatte.

Die Vorschläge einer deutschlandweit verwendeten Einheit zur Dosismessung mittels Ionsiationsmessung fielen in den Zeitraum kurz nach Röntgens Tod (10. Februar 1923); daher lag es nahe, eine neue Einheit nach dem Entdecker der "X-Strahlen" zu benennen. Von wem dieser Vorschlag initial kam, ist heute nicht mehr nachzuvollziehen; dennoch soll versucht werden, die Einführung der Einheit selbst nachzuzeichnen.

Am 7. November 1923 gab die PTR über die Zeitschrift R"oFo eine Bekanntmachung⁶⁵ heraus, die in groben Zügen sowohl ein Messmittel (eine Druckluftkammer) sowie eine Einheit definierte.

In dieser und anderen Mitteilungen wird der Friedrichsche Vorschlag der Einheit \mathfrak{e} als bedeutender Schritt auf dem Weg zum Auffinden einer Dosiseinheit gewürdigt. Hermann Behnken von der PTR hielt die Formulierung jedoch für noch nicht ausgereift und kritisierte an Friedrichs Definition, dass die Dichte der Luft⁶⁶ – und damit die Einflüsse von Luftdruck und Temperatur – nicht berücksichtigt wurden. Behnken schlug

⁶²Küstner [1924b], S. 57

⁶³Deutsche Röntgengesellschaft [1915-1916], Deutsche Röntgengesellschaft [1916-1917]

⁶⁴Behnken [1924a]

 $^{^{65}}$ Physikalisch-Technische Reichsanstalt [1923-1924]

⁶⁶Behnken [1923-1924], S. 480

daher eine modifizierte Formulierung vor:

"Die absolute Einheit der physikalischen Röntgenstrahlendosis ist diejenige Strahlungsmenge, die bei der Bestrahlung von 1 ccm Luft von Temperatur 18 °C und dem Druck 760 mm Quecksilber bei voller Ausnützung der in der Luft ausgelösten Elektronen und bei Ausschaltung von Wandwirkung eine so starke Ionisierung erzeugt, daß bei Sättigungsstrom eine Elektrizitätsmenge von einer elektrostatischen Einheit transportiert wird. Die Einheit der Dosis wird im Anschluß an Friedrich mit "t" bezeichnet." ⁶⁷

Diese Formulierung wurde in o.g. Mitteilung der PTR – ebenso wie die in Kap. 6.8 erwähnte Veröffentlichung (Behnken [1924a]) in der Zeitschrift für Technische Physik – als technische Konkretisierung der Eichanordnung dargestellt⁶⁸. In der Veröffentlichung von Anfang 1924 bezog Behnken auch die Dichte der Luft direkt mit ein ("0, 00121 g/cm [sic] Dichte"⁶⁹), diese Modifikation fehlt jedoch in der finalen Formulierung (s.u.).

Im Rahmen einer Kommission der Deutschen Röntgengesellschaft arbeitete auch Hans Küstner an einem eigenen Standardinstrument. Er gehörte dem Laboratorium für Medizinische Physik der Chirurgischen Universitätsklinik Göttingen an und war nach eigenen Angaben von der DRG "mit der experimentellen Durchführung des Problems [der Standardisierung der Röntgendosimetrie]"⁷⁰ betraut worden. [In der von ihm angegebenen Quelle, "Bericht über die Sitzungen des 14. Kongresses der Deutschen Röntgengesellschaft, Verh. d. Deutschen Röntgenges. 14, 4, 1923" lässt sich jedoch kein Nachweis für diese Beauftragung finden. Auf Seite 4 befinden sich die Eröffnungsvorträge von Georg Fedor Haenisch (1874 – 1952) und Albert Döderlein (1860 – 1941), es werden weder Hans Küstner noch die Standardisierung auf dieser Seite erwähnt. Auch im restlichen Band sind keine Beschlüsse der DRG festgehalten.]

Küstners Ergebnisse in Bezug auf Messinstrumente wurden in Kap. 6.10 dargestellt, die Vorbereitung einer eigenen Einheit gab er nach der Veröffentlichung von Behnkens Vorschlägen zu dessen Gunsten auf⁷¹. Dennoch verwendete Küstner nicht wie Behnken "1 $\mathfrak{t}^{"72}$, sondern – ebenfalls Anfang 1924 – bei gleicher Definition den Namen "1 R" (für "Röntgen")⁷³.

Vermutlich in den ersten Monaten des Jahres 1924 muss die Standardisierungskommission der Deutschen Röntgengesellschaft beschlossen haben, die Einheit Röntgen

⁶⁷Behnken [1923-1924], S. 480

⁶⁸Physikalisch-Technische Reichsanstalt [1923-1924], S. 566

⁶⁹Behnken [1924a], S. 11

⁷⁰Küstner [1924a], S. 2

⁷¹Küstner [1924b], S. 57-58

⁷²Behnken [1924a], S. 11

⁷³Küstner [1924a], S. 7

einzuführen. Hierüber lassen sich jedoch in den Fortschritten auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen dieses Jahres keine Veröffentlichungen finden. Nachforschungen bei der Deutschen Röntgengesellschaft ergaben, dass Mitschriften von Sitzungen, Protokolle usw. nicht mehr vorhanden sind. Wahrscheinlich sind diese in den Wirren des Zweiten Weltkriegs zerstört worden, verloren gegangen⁷⁴ oder vernichtet worden. Auch im Deutschen Röntgenmuseum Remscheid-Lennep sind keine Unterlagen aus dieser Zeit erhalten⁷⁵.

Der nächste Schritt zur Einführung der Dosiseinheit war der Kongress der *Deutschen Röntgengesellschaft* im April 1924. Der erste maßgebliche Vortrag zum Thema Standardisierung wurde von Küstner gehalten und nahm u.a. Bezug auf "Die Behnkensche Einheit "1 Röntgen"."⁷⁶ In der Abfolge der Vorträge war auch Behnken später an der Reihe, der sein Standardisierungskonzept – Messungen mit der oben beschriebenen Druckluftionisationskammer und der diskutierten Einheit – vorstellte:

"Der Wortlaut der Definition der absoluten Dosiseinheit, wie er gemeinsam mit der Standardisierungskommission der Deutschen Röntgengesellschaft formuliert wurde, ist folgender: "Die absolute Einheit der Röntgenstrahlendosis wird von der Röntgenstrahlenenergiemenge geliefert, die bei der Bestrahlung von 1 ccm Luft von 18 °C Temperatur und 760 mm Quecksilberdruck bei voller Ausnutzung der in der Luft gebildeten Elektronen und bei Ausschaltung von Wandwirkungen eine so starke Leitfähigkeit erzeugt, daß die bei Sättigungsstrom gemessene Elektrizitätsmenge eine elektrostatische Einheit beträgt. Die Einheit der Dosis wird ein 'Röntgen' genannt und mit 'R' bezeichnet.""⁷⁷

Laut dem Kongressbericht, der im American Journal of Roentgenology veröffentlicht wurde, fand der entscheidende Entschluss im Anschluss an diesen Vortrag statt: "The German Roentgen Society voted unanimously to designate "One Roentgen" ("R") as the unit of measurement, and to use this henceforth in publications."⁷⁸ Analog zu den Beschlüssen der Standardisierungskommission lassen sich auch für diesen Beschluss keine Belege in den Verhandlungen der Deutschen Röntgengesellschaft finden. Der einzige Verweis des Kongressband-Schlagwortverzeichnisses zum Wort "Einheit" zeigt auf S. 93, also auf Behnkens Beitrag. Erstaunlicherweise gibt es auch in den Fortschritten auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen keinen Hinweis auf einen Beschluss zur Annahme der Einheit. Zwar wurden zu dieser Zeit auch andere Beschlüsse der Versammlung nicht in den Verhandlungen dokumentiert, jedoch tauchen einzelne wichtige Beschlüsse in den

⁷⁴Telefonat mit Florian Schneider (Pressestelle der *Deutschen Röntgengesellschaft*) am 25.1.2013

 $^{^{75}\}mathrm{Mitteilung}$ per email von Monika Radau (Bibliothek des Deutschen R"ontgenmuseums)am 6.2.2013

⁷⁶Küstner [1924b], S. 70

⁷⁷Behnken [1924b], S. 93

⁷⁸Haenisch [1925], S. 189

"Mitteilungen" der *RöFo* auf, so z.B. die "Leitsätze für die Arbeit mit Röntgenstrahlen gemäß Beschluß der *Deutschen Röntgen-Gesellschaft* vom 28. April 1924"⁷⁹.

Dass der Standardisierungsbeschluss der *Deutschen Röntgengesellschaft* stattgefunden hat, kann man insgesamt trotz der fehlenden Beschluss-Dokumentation als gesichert ansehen. Dennoch war durch den Beschluss noch lange keine einheitliche Linie der Verwendung gegeben: Röntgen und Hauteinheitsdosis wurden weiterhin zeit-parallel zueinander verwendet.

7.6 Konversion Hauteinheitsdosis in Röntgen

Auch nach der Einführung der Einheit "Röntgen" durch die Deutsche Röntgengesellschaft wurde die Hauteinheitsdosis als praktische Einheit weiterhin geschätzt und verwendet. Eine Umrechnung der HED in Röntgen-Einheiten schien daher sinnvoll und wünschenswert. Eine Studie zu diesem Thema, die deutlich mehr Institute umfasste als die HED-Vergleichsstudie von Bachem, stammt aus dem Jahr 1924 und wurde von Leonhard Grebe und Heinrich Martius durchgeführt. Die Bonner Wissenschaftler maßen die Hauteinheitsdosis an 14 deutschen Röntgen-Institutionen mit 27 größtenteils verschiedenen Röntgengeräten, um

"die Brauchbarkeit der Hautreaktion als Strahlenmaß nach einer anderen Richtung hin zu prüfen, insofern nämlich, als wir die an verschiedenen Instituten tatsächlich im Gebrauch befindlichen sog. "Hauteinheitsdosen" vergleichenden Messungen [unterziehen], um festzustellen, wie groß ihre Unterschiede sind."⁸⁰

Auf eine Uneinheitlichkeit der Ergebnisse waren die beiden Wissenschaftler aufgrund der verschiedenen Erythem-Definitionen eingestellt, sie wollten jedoch die sich mit demselben Messinstrumentarium ergebenden Werte vergleichen.

Für die Messungen verwendeten Grebe und Martius ein Elektroskop mit vorgeschalteter Ionisationskammer, welche kleiner war als die von Bachem verwendete:

"Seine Messungen waren dadurch kompliziert, daß das genannte Elektroskop eine große Ionisationskammer besitzt und deshalb die Strahlengemische verschiedener Wellenlänge nicht entsprechend ihrer biologischen Wirkung mißt. Es mußte deshalb für die verschiedenen Strahlenhärten erst ein Umrechnungsfaktor ermittelt werden."⁸¹

⁷⁹Deutsche Röntgengesellschaft [1924]

⁸⁰Grebe und Martius [1924], S. 396

⁸¹Grebe und Martius [1924], S. 398

Grebe und Martius sahen die Messungen mit ihrer Ionisationskammer als wellenlängenunabhängig an und gaben ihre Ergebnisse (s. Abb. 7.3) in R-Einheiten an.

Graphische Darstellung der verschiedenen Erythemdosen in R-Einheiten und in % der Bonner Erythemdosis.

0 100	200 300 400 500 600 700 800 000 1000 1100 R
258% des	s Erythems der Bonner Frauenklinik Giessen I. Strahlung
220%	970 R Frauenklinik Giessen II. Strahl.
188 %	820 R I. med. Klinik der Charité
185%	805 R Chirurg. Klinik Bonn (früher)
175%	800 R Frauenklinik Bumm, Bertin
151%	660 R Chirurg. Klinik, Frankfurt 240 KV, 4 M.Amp.
146%	640 R Chirurg, Klinik Frankfurt 200 KV, 8 M. Amp. u. Chirurg, Klinik , Bonn (jetzt)
139%	610 R Frauenklinik Franz, Berlin
130%	570 R Bürgerhospital Köln 1.0 Zn
116%	505 R Bürgerhospital Köln 0.5 Zn
112 %	490 R Hautklinik Bonn, Apex.
103%	447 R Hautklinik Bonn, Symmetrie
100%	435 R Frauenklinik Bonn u. Krankenhaus Moabit
93%	405 R Frauenklinik Frankfurt 176 KV. 08 Cu
89%	390 R Frauenklinik Frankfurt 220 KV. 1.3 Cu
86 %	370 R Frauenklinik Frankfurt 220 KV. 0.8 Cu
86 %	375 R Frauenklinik Düsseldorf Multivolt
70%.	305 R Frauenklinik Düsseldorf Neointensiv
66%	285 R Frauenklinik Marburg

Abbildung 7.3: Graphische Darstellung der Erythemdosen verschiedener Kliniken in R-Einheiten, normiert auf die in der von Grebe und Martius in Bonn verwendete Erythemdosis. Abbildung aus Grebe und Martius [1924], S. 406.

Die graphische Darstellung der Messergebnisse zeigt deutlich, über welch großen Reaktionsbereich die Interpretation einer Haut, einheits"dosis reichte. Grebe und Martius schlossen der Darstellung dieser Ergebnisse folgende Bemerkung an:

"Es möge noch einmal betont werden, daß es sich bei unseren Untersuchungen nicht etwa um die Feststellung von individuellen Verschiedenheiten in der Röntgenhautreaktion handelt, sondern um die verschiedene Auffassung der einzelnen Therapeuten davon, was als mittlere Hauterythemdosis zu bezeichnen ist, also um Verschiedenheiten, die nicht von dem Untersuchten, sondern vom Untersucher abhängen."82

Abschließend schlugen die Autoren der Studie vor, eine "mittlere Gebrauchserythemdosis" von 600 R zu definieren. Dieser Wert ergab sich aus dem großzügig aufgerundeten Mittelwert von Grebe und Martius' Messungen – 580 R⁸³ – sowie der Tatsache, dass ein breiter Dosisbereich eine Rötung und Pigmentierung der Haut hervorrief, ohne dass hierfür starre Grenzen gesetzt werden konnten.

Zur HED-Röntgen-Studie von Grebe und Martius analoge Studien wurden – wenn auch in kleinerem Maßstab – u.a. auch von Krönig und Friedrich in Freiburg sowie in den USA von Duane und Glasser durchgeführt. Die weiteren Studien kamen jedoch zu deutlich abweichenden Ergebnissen: zwischen 170 und 1800 R⁸⁴. In seinem Vortrag auf dem ersten internationalen Radiologiekongress 1925 versuchte Grebe, diese starken Diskrepanzen zu erklären. In Friedrichs Berechnungen sollte ein – nicht näher spezifizierter – Fehler vorliegen und der Wert noch korrigiert werden. Die Abweichung zu den amerikanischen Werten erklärte Grebe dadurch, dass Martius und er selbst bei ihren Messungen die Streustrahlung nicht berücksichtigt hätten⁸⁵. Um diesen Fehler zu korrigieren versuchten sie, die prozentuale Verstärkung der Gesamtwirkung durch den Einfluss der Streustrahlung zu bestimmen, und kamen auf Werte zwischen 50 und 100 %. Als Durchschnitt nahmen Grebe und Martius 80 % zusätzliche Wirkung durch Streustrahlung an. Erhöht durch einen Faktor 1,8 ergaben sich aus den ursprünglichen HED-Messergebnissen zwischen 300 und 1100 R Werte, die die amerikanischen Werte einschlossen⁸⁶. Grebe sah daher den ursprünglichen Widerspruch als weitgehend gelöst an. Die verbleibenden Abweichungen wurden später durch nicht genauer spezifizierte Reparaturen, die Behnken an den amerikanischen Apparaturen durchführte, beseitigt⁸⁷.

7.7 Solomonsche R-Einheit

Nach der Einführung der Einheit "Röntgen" durch die Deutsche Röntgengesellschaft schien das Problem der mangelnden Dosis-Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Anwendern vorübergehend gelöst. Es zeigte sich jedoch bald, dass dies nur bedingt der Fall war: in Frankreich wurde inzwischen eine Einheit verwendet, die ebenfalls "Röntgen" benannt, jedoch grundsätzlich anders definiert war. Die Einheit war durch Iser

⁸²Grebe und Martius [1924], S. 407

⁸³Grebe und Martius [1924], S. 409

⁸⁴Grebe und Martius [1927], S. 79

⁸⁵Grebe und Martius [1927], S. 79-80

⁸⁶Grebe und Martius [1927], S. 80

⁸⁷Serwer [1976], S. 223

Solomon (1880 – 1939), der zu dieser Zeit als Assistent von Béclère am Pariser *Hôpital Saint Antoine* arbeitete⁸⁸, vorgeschlagen worden und wurde zur Unterscheidung von der deutschen R-Einheit auch französische oder Solomonsche R-Einheit genannt. Einige Quellen bezeichnen die französische Einheit mit kleinem "r", dies steht aber nicht im Einklang mit Solomons Veröffentlichungen, wo ein großes "R" verwendet wird⁸⁹.

Die französische R-Einheit war definiert als "la quantité de rayons X produisant la même ionisation que 1 gramme de radium-élément à la seconde"⁹⁰. Die Bedingungen, unter denen diese Definition gelten sollte, nannte Solomon erst in einem späteren Artikel: die Radiumquelle sollte 2 cm von der Ionisationskammer entfernt sein, außerdem forderte Solomon eine "Filtrierung der Strahlung durch 0,5 mm Platin."⁹¹

Solomon wies ausdrücklich darauf hin, dass er erst nach seiner ersten Veröffentlichung zur französischen R-Einheit erfahren habe, dass eine über die von einem Gramm Radium erzeugten Ionen definierte Einheit bereits von anderen Wissenschaftlern vorgeschlagen worden war⁹². Hierbei handelte es sich um zwei Physiker von den Frankfurter Veifa-Werken, Bruno Winawer (1883 – 1943) und S. Sachs, die 1915 folgenden Vorschlag zur Definition einer Dosiseinheit gemacht hatten:

"Die Einheit der Energie führt eine Röntgenstrahlung mit sich, die bei ihrer vollständigen Absorption in Luft dieselbe Anzahl Ionen erzeugt, welche die γ -Strahlen von 1 g Radium (B plus C) bei ihrer vollständigen Absorption in Luft (c.p.) erzeugen würden." ⁹³

Für die Messungen verwendeten Winawer und Sachs Elektroskope. Sie argumentierten, "die elektroskopische Messung [böte] keine Schwierigkeiten, ein Radiumpräparat als 'Etalon der Energie' [sei] praktisch unveränderlich und jetzt in den meisten Instituten, Kliniken usw. vorhanden"⁹⁴. Trotz dieser praktischen Begründungen erhielt der Vorschlag wenig Resonanz. Das mag teils daran liegen, dass zu diesem Zeitpunkt immer noch recht wenige Physiker in den Kliniken arbeiteten und die jeweiligen Ärzte die für Physiker "einfachste Methode"⁹⁵ und die damit verbundene Umrechnung ablehnten. Andererseits wird der Ablauf des Ersten Weltkriegs eine noch wichtigere Rolle bei der (Nicht-) Verbreitung von Winawer und Sachs' Vorschlag gespielt haben. Hierauf ist vermutlich auch zurückzuführen, dass Solomon der Artikel nicht bekannt war. Auch

⁸⁸Béclère [1927], S. 70

⁸⁹Solomon [1921], S. 200; Solomon [1925], S. 645

⁹⁰Solomon [1921], S. 200

⁹¹Solomon [1925], S. 645

⁹²Solomon [1921], S. 200-201

⁹³Winawer und Sachs [1915], S. 264

⁹⁴Winawer und Sachs [1915], S. 258-259

⁹⁵Winawer und Sachs [1915], S. 258

in umgekehrter Richtung – von Frankreich nach Deutschland – war der Wissenschaftstransfer noch stark eingeschränkt, wie Behnken nach der Einführung der deutschen R-Einheit berichtete:

"Der Solomonsche Vorschlag […] wurde aber in Deutschland, das damals von der ausländischen Literatur, besonders von der französischen, praktisch abgeschnitten war, kaum bekannt und konnte daher die deutschen Bemühungen um die Standardisierung der Dosismessung nicht beeinflussen." ⁹⁶

Außer der Solomonschen R-Einheit gab es – insbesondere in Frankreich – verschiedene weitere, sich auf Radium beziehende Dosierungs-Einheiten, deren Entwicklung sich aus den genannten Gründen weitgehend unabhängig von der der Röntgen-Einheiten abspielte. Die Solomonsche Einheit soll daher nur ein exemplarisches Beispiel für die Radium-Dosimetrie darstellen, wie sie vor Einführung einer gemeinsamen Einheit für Röntgen- und Gamma-Strahlen 1937⁹⁷ durchgeführt wurde.

7.8 Internationale Standardisierung

Die vierte Phase der Dosimetrie-Entwicklung – die internationale Standardisierung von Messinstrumenten und insbesondere Einheiten zur Strahlungsmessung – begann in den 1920er Jahren und dauert bis heute an. Die internationale Standardisierung ist geprägt durch die Handlungen von Organisationen: den jeweiligen nationalen Röntgengesellschaften (wie der Deutschen Röntgengesellschaft) und den nationalen Stellen, die für Standards zuständig waren (wie der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt) einerseits sowie andererseits internationalen Organisationen wie dem Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), der International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), der International Atomic Energy Agency (IAEA) sowie den Fachkomittees verschiedener internationaler Kongresse.

In Deutschland begann die interationale Standardisierung quasi mit Abschluss der nationalen Standardisierung: mit dem Beschluss einer nationalen Einheit für Dosismessungen. Der Abschlusssatz von Behnkens Vortrag vor der *Deutschen Röntgengesellschaft* 1924, in dessen Anschluss wohl die Einführung der Einheit Röntgen beschlossen wurde, lautete:

"Als nächstes Ziel ist dann die internationale Standardisierung der Dosismessung ins Auge zu fassen, für welche nunmehr die technischen Vorbedingungen gegeben sind." 98

 $^{^{96} \}mathrm{Behnken}$ und Jäger [1926], Fußnote S. 570

⁹⁷International Committee for Radiological Units [1937], S. 634

⁹⁸Behnken [1924b], S. 94

Die Motivationen bzw. Gründe für eine internationale Standardisierung der Dosismessungs-Einheiten waren vielfältig. Obwohl dieses in keiner der Standardisierungs-Veröffentlichungen explizit als Grund genannt wird, wird die in den 1920er Jahren allgemein verstärkt vorangetriebene Standardisierung – insbesondere durch Institutionen wie Fachgesellschaften oder nationale Äquivalente der *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt* – gewesen sein. 1921 war auf der *Conférence Générale des Poids et Mesures* – der in mehrjährigem Abstand stattfindenden Versammlung der Delegierten des *BIPM* beschlossen worden, die Arbeit der des *BIPM* auszudehnen. Dies war dokumentiert durch die Erweiterung des Artikels 7 der *Convention du Mètre* ⁹⁹. Ein Teilnehmer dieser *Conférence Générale* war "W. Kösters, Membre de l'*Institut des Poids et Mesures à Charlottenburg* ¹⁰⁰ [Wilhelm Köster (1876 – 1950)], also ein Mitglied der *PTR*. [Die Tatsache des Involviertseins der *PTR* macht auch verständlich, weshalb die Standardisierungsbemühungen der *DRG* bzw. von Hans Küstner aufgegeben wurden: die nationale Regelung der *PTR* machte eine Regelung durch eine Fachgesellschaft überflüssig.]

Über internationale Beschlüsse zur Standardisierung hinaus war ein weiterer Grund für international einheitliche Dosismessungs-Einheiten, dass – wie in den vorangegangen Kapiteln erläutert – in Deutschland und Frankreich Einheiten gleichen Namens – "Röntgen" bzw. "R" – existierten, die jedoch grundsätzlich anders definiert waren. Während sich das deutsche R auf die Ionisation in einem Kubikzentimeter Luft bezog, setzte das französische R eine Aktivität einer bestimmten Radiummenge als Maßstab. Zwar wurde eine Umrechnung vorgenommen, sodass man die Einheiten leicht ineinander konvertieren konnte: 2,25 französische R sollten einem deutschen R entsprechen¹⁰¹. Dennoch war nicht sicher, ob diese Umrechnung für alle Härtebereiche galt.

Andere europäische Länder und die USA hatten zwar jeweils Komitees, die sich mit der Definition von nationalen Standards beschäftigten, die Deutsche Röntgengesellschaft kam jedoch mit großem zeitlichen Vorsprung zu einem Beschluss, wie das folgende Zitat zweier in die USA ausgewanderte Physiker, Hugo Fricke (1892 – 1972) und Otto A. Glasser (1895 – 1964), von 1925 zeigt:

"We have accepted this unit [german R] since it is the only one which has been officially recognized by a roentgen-ray society." 102

Aus diesem Grund schien es sowohl aus ärztlicher als auch aus naturwissenschaftlicher Sicht sinnvoll, eine einheitliche internationale Einheit zu schaffen, bevor jedes Land sei-

⁹⁹Bureau International des Poids et Mesures [1921], S. 42, Bureau International des Poids et Mesures [1875-1921]

¹⁰⁰Bureau International des Poids et Mesures [1921], S. 1

 $^{^{101}}$ Béclère [1927], S. 71

¹⁰²Fricke und Glasser [1925b], S. 462

ne eigenen Standards beschlossen und eingeführt hatte. Auch eine Vergleichbarkeit der Behandlungsbedingungen in Bezug auf Qualität und Quantität wurde angestrebt¹⁰³.

Den ersten Meilenstein der internationalen Standardisierung der medizinischen Strahlungsmessung stellte der erste internationale Radiologiekongress dar, der Ende Juli 1925 in London durchgeführt wurde. Im Rahmen des Kongresses wurde eine Sitzung zum Thema "Discussion on International Units and Standards" abgehalten. Die Vorsitzenden dieser Sitzung waren Thurstan Holland (1863 – 1941), ein englischer Radiologe, sowie C.E.S. Phillips (1871 – 1945), ein Naturwissenschaftler, der sich in England für die Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen der Strahlentherapie sowie Standardisierung einsetzte.

Der erste Redner der "Units and Standards"-Sitzung war Sir William Henry Bragg (1862 – 1942). Er teilte die in der gesamten in der Sitzung zu diskutierende Thematik in drei Blöcke auf, die seiner Meinung nach getrennt voneinander betrachtet werden sollten:

"There is, first of all, the determination of a unit, a scientific unit. Then there is the determination of a standard, namely the description of apparatus which shall be used for comparison. Lastly, there is the comparison of the standard with the results that are obtained in treatment. Those three things are really separable one from the others; they are almost carried out by different bodies. The determination of a unit is a matter of physics pure and simple. The determination of a standard of test for comparison with the unit is a matter which is carried out by physicists who have made a special attempt to work at X-rays and to understand the questions that are involved in X-ray treatment. And, lastly, there is the comparison of the use of this standard with the results obtained, which is entirely a hospital matter."¹⁰⁴

Diese Aufteilung schien, vor allem im Lichte der nachfolgenden Vorträge und Diskussionen sinnvoll und weitsichtig, da immer wieder medizinische und physikalische Fragestellungen vermischt und die eine als der anderen überlegen präsentiert wurden. Eine Vermischung der Fragestellungen stellte u.a. die Hauteinheitsdosis dar, da eine (vom Betrachter und in gewissen Grenzen vom Patienten abhängige) Hautrötung als Dosierungsmaßstab gelten sollte. Zwar gab es von keiner Seite einen formalen Beschluss zur Verwendung der Hauteinheitsdosis, sie wurde aber allgemein verwendet¹⁰⁵. Teile des

¹⁰³Béclère [1927], S. 72

¹⁰⁴Bragg [1927], S. 65

¹⁰⁵Behnken [1927], S. 77

Vortrags von A. Béclère können als Beispiel für die Auffassung der Dosimetrie vieler Ärzte gesehen werden:

"The precision that we require is essentially a practical precision. [...] For [reproduction of treatment conditions] it is necessary to know exactly as well the quality of the radiation used as the quantity of the dose given. This modest aim is for us physicians, [sic] much more important than the aim of the physicists who are looking towards the determination of the quantity of radiant energy absorbed by a cubic centimetre of a given substance, but who will certainly never be able to tell us the quantity of energy absorbed by each living cell and no more the fraction transformed into biological reaction."¹⁰⁶

Im Anschluss an die Vorträge (die bis auf Bragg und Phillips¹⁰⁷ von Wissenschaftlern vom europäischen Festland gehalten wurden) schlug der Vorsitzende, Phillips, vor "that an international dosage committee should be formed and it was carried unanimously."¹⁰⁸ Da Details zu diesem Komitee erst zum Abschluss der Sitzung beschlossen wurden, brachten viele – z.T. auch außereuropäische – Teilnehmer der Diskussion eigene Vorschläge oder Wertungen für Einheiten ein. Während Glasser und der Engländer Sidney Russ (1879 – 1963) sich für die Verwendung einer Röntgenstrahlen-Einheit und Ionisationskammern einsetzten und lediglich ihre Kammern näher beschrieben¹⁰⁹ schlug der französische Radiologe Lucien Mallet (1885 – 1981) eine weitere auf Radium als Referenz basierende Einheit vor. Diese sollte unter den gleichen Bedingungen wie die Solomonsche R-Einheit bestimmt und daher leicht in diese umrechenbar sein.¹¹⁰

Mehrere Diskussionsteilnehmer – z.B. Glasser und Holthusen – wiesen darauf hin, dass eine Trennung zwischen Eichstandard und Standardinstrument einerseits und Instrumenten, die im Rahmen von Patientenmessungen verwendet wurden, andererseits sinnvoll erscheine¹¹¹. Phillips, der Vorsitzende, sah sich genötigt, die Versammlung an den bereits gefassten Beschluss zur Schaffung eines Standardisierungskomitees zu erinnern. Anschließend machte er einen Vorschlag für das weitere Vorgehen, der einstimmig angenommen wurde:

"Everyone would understand and agree that at that Congress it was not practicable to suggest the names of such a committee. It would have to be a large and very representative committee, and a great amount of consideration and care

 $^{^{106}}$ Béclère [1927], S. 72

¹⁰⁷das Herkunftsland von H. Moore konnte bislang noch nicht verifiziert werden.

¹⁰⁸Phillips [1927], S. 97

¹⁰⁹Phillips [1927], S. 97-98

¹¹⁰Phillips [1927], S. 99

¹¹¹Phillips [1927], S. 98, S. 100

would have to be given to its composition. But what could be done was to nominate a small committee, which would unitmately call together the larger committee after communicating with the various representative scientific bodies throughout the world. [...] The Committee suggested were: Sir Wm. Bragg (Chairman), Prof. Porter, Prof. Russ, Dr. Owen, Mr. C.E.S. Phillips and Prof. Hopwood. [...] Dr. Owen read the resolution as follows: "That in order to give effect to the resolution at a joint meeting of the whole Congress the British X-ray Unit Committee (formed in February 1923) be requested to communicate dicrectly with the Physical and Radiological Societies of the principal contries throughout the world, with a view to the nomination by these Societies of representatives to constitute such an International Committee." 113

Das Auswahl-Komitees bestand damit komplett aus britischen Physikern. Die Wahl der Gastgebernation hatte den Vorteil, dass die Wissenschaftler nicht direkt in die eher deutsch-französische Rivalität Röntgen- versus Radium-Einheit involviert waren.

Der 1928 auf dem zweiten *internationalen Radiologiekongress* in Stockholm gefasste Einheiten-Beschluss war letztendlich stark durch die deutschen Vorarbeiten geprägt. Der Wortlaut des Beschlusses lautete

- 1. "That an International Unit of X radiation be adopted.
- 2. That this international unit be the quantity of X radiation which, when the secondary electrons are fully utilised and the wall effect of the chamber is avoided, produces in one cubic centimeter of atmospheric air at 0 °C. [sic] and 76 cm. [sic] mercury pressure, such a degree of conductivity that one electrostatic unit of charge is measured at saturation current.
- 3. That the international unit of X radiation be called the "Röntgen" and that it be designated by the letter small "r.""¹¹⁴

Dies war, wie Holthusen später betonte, fast derselbe "Wortlaut [...] wie in der Definition des "Röntgen" von 1924. Eine geringe Verkleinerung der Einheit bedeutete die Bezugnahme auf eine Temperatur von 0 °C statt von 18 °C."¹¹⁵

Auf den weiteren und komplexen Prozess einer Einheiten-Kompromissfindung soll und kann im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden; es wäre sinnvoll, die Entwicklung des International X-Ray Unit Committee, später International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), und seiner Beschlüsse im Rahmen

 $^{^{112}} Alfred$ William Porter (1863 – 1939); Edwin Augustine Owen (1887 – 1973); Frank Lloyd Hopwood (1884 – 1954), Anm. d. Verf.

¹¹³Phillips [1927], S. 101

¹¹⁴International X-ray Unit Committee [1928], S. 363

¹¹⁵Holthusen [1959], S. 748

einer groß angelegten internationalen Literatur- und Archivrecherche als eigenständige Arbeit umzusetzen. Für den Bereich Strahlenschutz (auf internationaler Ebene organisiert durch die *International Commission on Radiological Protection*, *ICRP*) ist dies bis zu einem gewissem Grad schon durch Serwer¹¹⁶ und Taylor¹¹⁷ geschehen, es wäre jedoch noch eine wissenschaftshistorische Aufarbeitung erforderlich. Hier wäre das Augenmerk insbesondere auf die Unterschiede der teils zuvor bestehenden nationalen Regelungen sowie deren Abhängigkeiten und Einflüsse aufeinander und auf die finale gemeinsame Regelung zu legen.

 $^{^{116}}$ Serwer [1976]

¹¹⁷Taylor [1979] und Taylor [1981]

Kapitel 8

Ausblick

Bis zum Beginn der 1930er Jahre waren viele wichtige Entwicklungsschritte der Messverfahren in der medizinischen Physik vollzogen worden. Es waren Instrumente entwickelt worden, die auf physikalischen Grundlagen beruhende, verhältnismäßig exakte sowie reproduzier- und vergleichbare Messungen ermöglichten. Viele mögliche Fehlerquellen dieser ersten Instrumente waren entweder schon behoben worden oder bekannt und teilweise berücksichtigt. Der Prozess einer internationalen Einheiten-Standardisierung war zwar noch in den Kinderschuhen, hatte aber bereits erste Erfolge erzielt.

Mit der Festlegung auf eine Dosis-Einheit war zwischen Naturwissenschaftlern und Ärzten zwar eine Einigung auf das Messprinzip "Ionisationsmessung" erfolgt. Dennoch interessierten sich Ärzte letztlich nicht für die gemessene Ionisation, sondern für die in einem Volumenelement Gewebe absorbierte Dosis – die Energiedosis, die den therapeutischen Effekt hervorrief. Ein wichtiger Schritt, um Ärzte und Physiker also gemeinsam zufrieden zu stellen, war daher die Verbindung zwischen der mit einer Ionisationskammer gemessenen physikalischen Größe – der Ionendosis – und der Energiedosis. Diese Verbindung wurde mit Hilfe der Hohlraumtheorie geschaffen. Hierunter ist der Formalismus zu verstehen, der zur Berechnung der Ionisation in einem gasgefüllten Hohlraum, welcher in ein Medium eingebracht und stellvertretend für den Innenraum einer Ionisationskammer steht, eingesetzt wird.

Die früheste Form der Hohlraumtheorie wird Bragg-Gray-Theorie genannt; sie wurde zwischen ca. 1910 und 1935 entwickelt und soll im Rahmen eines Ausblicks an dieser Stelle vorgestellt werden. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde die Hohlraumtheorie verfeinert und ihre Anwendungsbedingungen eingeschränkt; aufgrund des Entwicklungszeitpunkts wird an dieser Stelle lediglich auf die Bragg-Gray-Theorie eingegangen.

An der Entstehung der Bragg-Gray-Theorie waren (zumindest bezogen auf die Anzahl von Autoren der entsprechenden Artikel) recht wenige Personen beteiligt. Der Physiker Harold Gray (1905 – 1965) nannte 1937 in einem zusammenfassenden Artikel

mehrere Wissenschaftler, die wesentliche Anteile an der Entwicklung dieser Theorie, wie sie bis zu diesem Zeitpunkt stattgefunden hatte, getragen haben: [William Henry] Bragg, Fricke und Glasser, sowie sich selber¹.

Bragg legte 1912 dar, dass das Einbringen einer kleinen Sonde bzw. eines kleinen Hohlraums in ein bestrahltes Medium das Verhalten der Sekundärelektronen nicht störe. Zudem legte er die Grundlagen zur Bestimmung des linearen Bremsvermögens für β -Strahlen. Letztere wurde auch von Fricke und Glasser 13 Jahre später – unabhängig von Bragg – dargelegt und auf die Thematik der Dosimetrie angewendet. Auch Gray selbst war unabhängig von Bragg, Fricke und Glasser auf der Suche nach einer Messmethode für Gammastrahlen. Auf die Beiträge eben genannter sowie einiger weiterer Wissenschaftler zur Bragg-Gray-Theorie soll im Folgenden eingegangen werden.

8.1 Braggs Beiträge zur Hohlraumtheorie

Einer der Namensväter der Hohlraumtheorie war William Henry Bragg. Zwar geben Quellen wie LH Gray Memorial Trust [2012] William Lawrence Bragg (1890 – 1971), den Sohn von William Henry Bragg, als Mitbegründer der Bragg-Gray-Theorie an, belegen dies jedoch nicht. Es ist allerdings nicht wahrscheinlich, dass sich Bragg jun. in den 1930er Jahren mit der Hohlraumtheorie beschäftigte, da sein Hauptaugenmerk in diesem Jahrzehnt auf Kristallstrukturanalyse lag, wie z.B. durch Nachrufe, die seine Arbeiten zusammenfassen, bestätigt wird². Weiterhin spricht für die Namensvaterschaft William Henry Braggs, dass dieser aktiv an mehreren Radiologie-Kongressen teilnahm – z.B. am Congrès International de Radiologie et Électricité 1910 in Brüssel³ und am ersten internationalen Radiologiekongress 1925 in London, bei dem er zudem als Vorsitzender der Gründungsform des Einheiten-Komitees⁴ gewählt wurde. Gray erwähnte zusätzlich, "[that] Bragg's work was recognised as providing a rational basis for the measurement of X-ray energy in terms of ionisation by the International Congress of Radiology, at Stockholm (1928)⁴⁵.

William Henry Bragg beschäftigte sich in seinem Buch "Studies in Radioactivity" von 1912 mit verschiedensten Aspekten von α -, β -, γ - sowie Röntgenstrahlung. Hierzu gehörte – neben der Beschreibung, wie Sekundärelektronen bzw. nach Braggs Nomenklatur β -Strahlen durch γ - oder Röntgenstrahlen hervorgerufen werden – u.a.

¹Gray [1937a], S. 601

²s. z.B. Phillips [1979] und Gay [1974]; eine Beschäftigung mit der Hohlraumtheorie wurde in keinem der beiden erwähnt

³Bragg [1910], S. 240

⁴British Medical Journal [1925], S. 72

⁵Gray [1937a], S. 601

ein Kapitel über den Energieverlust von β -Strahlen⁶. Diesen versuchte Bragg nicht nur zu erklären, sondern auch berechenbar zu machen.

Um den β -Strahlen-Energieverlust in einem einheitlich bestrahlten Medium berechnen zu können, schlug Bragg vor, als Hilfkonstruktion einen kleinen Hohlraum in diesem Medium zu untersuchen. Die in diesem Zusammenhang gemachten über den Hohlraum gemachte Annahmen sind besonders interessant, da sie die Grundlage der später entwickelten Berechnungen von Vorängen im Hohlraum bilden.

"Suppose the cavity to be made in the substance. This makes no difference whatever in the value of kd [k: Massenabsorptionskoeffizient für γ -Strahlen in einem bestimmten Material; d: Reichweite der β -Strahlen] anywhere within the boundary of the substance including the cavity once filled by the substance. This follows from the fact that every β particle has to cross a weight d of the substance; crossing the cavity does not count in the total path because there is no material in the cavity for the β particle to cross. [...] We may say, therefore, that just as many β rays would cross each unit volume of the cavity as would cross were the cavity filled with substance like the rest of the body or any substance having the same kd. The shape of the cavity is immaterial. We may in fact take it to be the inside space of an ionisation vessel"7.

Diese Formulierung stellt eine Vorläuferform der Formulierung der heute sog. Bragg-Gray-Bedingungen – dem Herzstück der Hohlraumtheorie – dar.

Die von Gray angesprochene Bestimmung des relativen Bremsvermögens für Betastrahlen in den "Studies in Radioactivity" wiederzufinden, ist etwas schwieriger. Zwar enthielt Braggs Buch eine ausführliche Auseinandersetzung mit der Ionisation durch Sekundärelektronen. Hauptaugenmerk lag jedoch nicht auf dem Bremsvermögen, sondern auf der direkt messbaren Größe, die hiervon abhing: die durch die Sekundärelektronen auftretende Ionisation in der Sonde. Erschwerend bei der Suche kam hinzu, dass Bragg nicht die heute übliche Definition von Absorptionskoeffizienten für ein bestimmtes Material und Bremsvermögen für bestimmte Strahlung, sondern Absorptionskoeffizienten für Material- / Strahlenkombinationen verwendete. Diese bezeichnete er im Wandmaterial der Sonde mit k für Röntgen- oder γ -Strahlen und mit k für k-Strahlen. Die jeweiligen Größen in Gas wurden mit k bzw. k bezeichnet.

Für die Berechnung der Ionisation ging Bragg von der Betrachtung eines zylinderförmigen Volumens aus. Hierbei bezeichnete er das Produkt aus Kammerlänge und Gasdichte mit D, I stand für die Anzahl der "X corpuscles", die in β -Strahlen umgewandelt wurden.

⁶Bragg [1912], Kapitel 9, S. 91-99

⁷Bragg [1912], S. 96-97

"We find that the energy spent in the chamber by β rays that came from the walls is equal to

$$Ik(1 - e^{-\lambda' D})/\lambda. \tag{8.1}$$

We have now to take account of the ionisation due to the β rays produced by the X rays in the gas of the chamber. If the walls and the gas were formed of the same atoms, the energy absorbed and spent on ionisation would be IDk', for the energy is spent and the ioniation is produced uniformly along the track of the X rays [...] the whole ionization in the vessel is represented by⁸"

$$I\left(Dk' + \left(\frac{k}{\lambda} - \frac{k'}{\lambda'}\right)(1 - e^{-\lambda'D})\right). \tag{8.2}$$

8.2 Beiträge weiterer Wissenschaftler zur Hohlraumtheorie

Die in die USA ausgewanderten deutschen Physiker Hugo Fricke und Otto Glasser beschäftigten sich in ihren Veröffentlichungen aus dem Jahr 1925 (die sowohl in den USA als auch in Deutschland erschienen) insbesondere mit den Effekten von Volumen und Wandmaterial auf den Ionisationsstrom. Diese beiden Faktoren wurden auch von vielen anderen Wissenschaftlern variiert, um ihren Einfluss auf Messungen zu minimieren, wie in Kap. 6.1 beschrieben wurde. Anders als die meisten ihrer Zeitgenossen suchten Fricke und Glasser jedoch, die Einflüsse theoretisch zu ergründen und in Formeln zu fassen: Der Ionisationsstrom sollte einerseits von der effektiven Ordnungszahl des Wandmaterials in der dritten Potenz⁹ abhängig sein, andererseits vom Volumen. Die direkte Volumenabhängigkeit sahen Fricke und Glasser aber nur unter bestimmten Bedingungen als gegeben an: Sie sollte entweder vorhanden sein, wenn das Volumen so klein war, dass das Vorhandensein der Ionisationskammer die Elektronenatmosphäre nicht störte - diese Bedingung war ebenfalls durch Bragg aufgestellt worden -, oder aber bei großen Ionisationskammern die effektive Ordnungszahl der der umgebenden Luft entsprach.¹⁰ Dies wäre allerdings nur bei einer unendlich ausgedehnten Ionisationskammer exakt zu erreichen gewesen.

In seinen Artikeln von 1929 und 1936 erwähnte Harold Gray eine Dissertation, die sich aus theoretischer Sicht mit der Ionisation in einer Ionisationskammer beschäftigte. Diese wurde nach Grays Angaben im November 1928 in Paris¹¹ eingereicht und stammt

⁸Bragg [1912], S. 169-170

⁹Fricke und Glasser [1925a], S. 457

¹⁰Fricke und Glasser [1925a], S. 459-460

¹¹Gray [1929], S. 651; Gray [1936], S. 578

von einem Physiker namens Marc Bruzau¹². Gray schrieb über den Inhalt der Arbeit:

"Attempts have been made [...] to estimate separately the contribution to the ionization in an enclosed volume, from the gas, from the corpuscular radiations emerging from the several walls, the effect of the reflexion of these particles from the opposite faces of the volume, and so on, but the simplifying assumptions necessarily introduced to render the calculations possible, rob the result of any exact quantitative significance."¹³

Qualtitativ konnte zumindest eine Proportionalität festgestellt werden: "the ionisation produced by radiation of a given wave-length in a small chamber is proportional the the energy absorbed per unit volume of the material of the walls, but the proportionality factor is left undetermined."¹⁴

Von der Dissertation Bruzaus erfuhr Gray nach eigenen Angaben erst nach dem Einreichen seines Artikels (21. Dezember 1928); der Bezug zu Bruzaus Arbeit wurde erst in der Korrekturversion ("proof") hinzugefügt¹⁵. Dies ist zwar zeitlich gesehen durchaus realistisch, zumal die Dissertation vermutlich auf Französisch verfasst war, macht jedoch in Bezug auf die Gründlichkeit von Grays Recherchen stutzig, da er in einem späteren Artikel zusätzlich angibt, das berühmte Werk des Nobelpreisträgers Bragg, "Studies in Radioactivity", nicht gekannt zu haben. Wörtlich schrieb Gray:

"Essentially the same relation had been enunciated in slightly different terms as long ago as 1912 by Sir William Bragg [Fußnote: 'Studies in Radioactivity' (1912), p. 94 et seq. I am indepted to Professor L.F. Hopwood for bringing this treatment of the problem to my notice.], but this treatment of the problem has unfortunately only recently been brought to my notice. I deeply regret having overlooked Sir William Bragg's admirable treatment, and I am glad of this opportunity of apologizing to him for having published a discussion of the problem without any reference to this work."¹⁶

8.3 Grays Beiträge zur Hohlraumtheorie

Harold Grays erste große Veröffentlichung zur Hohlraumtheorie stammt aus dem Jahr 1929. Dort stellt Gray Vergleiche der Ionisation, die in einem Volumen B eines Mediums geschah, mit der Ionisation in einem luftgefüllten Hohlraum A an, wenn das

¹²Bruzaus Dissertation konnte leider im Rahmen dieser Arbeit nur als Sekundärquelle berücksichtigt werden, da kein Zugang zum Originaldokument bestand.

¹³Gray [1936], S. 578-579

¹⁴Grav [1929], S. 651

¹⁵Grav [1929], S. 651

¹⁶Gray [1936], S. 578

Volumenverhältnis von A:B wie ρ^3 : 1 war. ρ war dabei keine Dichte, sondern ein Proportionalitätsfaktor, den Gray später als "ratio of the energy lost by an electron in traversing a certain distance (a small fraction of its range) in two different media"¹⁷ definierte. Der Energieverlust eines β -Teilchens im Hohlraum A betrug daher das $1/\rho$ -fache des Energieverlustes im Volumen B. Die Beziehung beschrieb Gray durch

$$J_v \cdot W = \frac{1}{\rho} \cdot E_v \tag{8.3}$$

wobei W für die "average energy lost by an electron per pair of ions formed"¹⁸, J_v für die Anzahl der gebildeten Ionenpaare im Gas und E_v für die " γ -ray energy absorbed per unit volume of the medium"¹⁹ stand.

Gray betrachtete den Energieverlust eines β -Teilchens im Hohlraum A als gleichbedeutend mit der Ionisation pro Einheitsvolumen. Für einen luftgefüllten Hohlraum, in dem das Bremsvermögen (stopping power) S(Air) galt, in einem Medium mit der Ordnungszahl Z und Bremsvermögen S(Z) bedeutete dies²⁰

$$\frac{\Delta E(Z)}{W\rho} = \frac{\Delta E(Z)}{W} \cdot \frac{S(Air)}{S(Z)}.$$
(8.4)

Explizit wies Gray darauf hin, dass sich das Bremsvermögen auf Elektronen in verschiedenen Medien bezog²¹. Zur Bestimmung des Faktors W verwies Gray auf eine Literaturauswertung seiner Zeitgenossen und nannte vier verschiedene experimentelle Vorgehensweisen. Der von Hans Bethe (1906 – 2005) theoretisch bestimmte Wert belief sich auf $W = 31,5 \text{ Volt}^{22}$ – Gray zitierte aus dem gleichen Artikel und nannte bei identischer Seitenzahl " $W = 32 \text{ volts/ion pair}^{(23)}$ – während Gray als Mittelwert aus der Literatur W = 33 V berechnete. Das Experiment von Anton Eisl zur Bestimmung von W hielt Gray für am Besten, und daher schlug er vor, den dort bestimmten Wert W = 32,5 V pro Ionenpaar – im Original bei Eisl²⁴ $32,2 \pm 0,5 \text{ V}$ – zu übernehmen²⁵.

Auch Gray formulierte – ebenso wie vor ihm Bragg, Fricke und Glasser – die Bedingung oder Annahme, unter der die Berechnung wie vorgestellt durchgeführt werden konnte:

"by supposing that the introduction of an air cavity into the solid has not alte-

¹⁷Gray [1936], S. 583

¹⁸Gray [1936], S. 580

¹⁹Gray [1936], S. 596

²⁰Gray [1936], S. 586

²¹Gray [1936], S. 583

²²Bethe [1930], S. 397

²³Gray [1936], S. 592

²⁴Eisl [1929], S. 310

²⁵Gray [1936], S. 593

red the distribution, as regards velocity and direction, of the β -particles crossing the boundary surface of the cavity ²⁶.

Dennoch betonte er, dass die vorgestellte Berechnung impliziere, dass die Ionisation pro Einheitsvolumen von der Hohlraumgröße unabhängig sei, und dass die Annahme, auf der die Berechnung beruhe, am besten für sehr kleine Hohlräume erfüllt sei²⁷.

1937 veröffentlichte Gray zwei zusammenfassende Artikel über Dosimetrie²⁸, in denen er seine Hauptaussage zur in einem Medium absorbierten Energie folgendermaßen darstellte:

"On the basis of certain assumptions, it may be shown that the γ -ray energy absorbed in any medium is related to the ionization produced in a gas filled cavity in that medium in the following manner.

$$E_v = J_v \cdot W \cdot \rho$$

where E_v is the γ -ray energy absorbed per unit volume of the medium, J_v is the ionization per unit volume in the gas, W is the average energy lost by the secondary electrons per pair of ions formed in the gas, ρ is the ratio of the stopping powers of the medium and the gas for the secondary electrons 29 .

Diese Zusammenfassung ähnelt sehr stark der modernen Formulierung im Standard-Lehrbuch von Faiz M. Khan (*1938):

"According to the Bragg-Gray theory, the ionization produced in a gas-filled cavity placed in a medium is related to the energy absorbed in the surrounding medium. When the cavity is sufficiently small so that its introduction into the medium does not alter the number or distribution of the electrons that would exist in the medium without the cavity, then the following Bragg-Gray relationship is satisfied:

$$D_{med} = J_g \frac{\bar{W}}{e} (\bar{S}/\rho)_g^{med}$$

where D_{med} is the absorbed dose in the medium (in absence of the cavity), J_g is the ionization charge of one sign produced per unit mass of the cavity gas, and $(\frac{\bar{S}}{\rho})_g^{med}$ is a weighted mean ratio of the mass stopping power of the medium to that of the gas for the electrons crossing the cavity. The product $J_g(\frac{\bar{W}}{e})$ is the energy absorbed per unit mass of the cavity gas."³⁰

²⁶Gray [1929], S. 653

²⁷Gray [1936], S. 582

²⁸Gray [1937a], Gray [1937b]

²⁹Gray [1936], S. 596

³⁰Khan [2009], S. 101

Der Vergleich von Grays und Khans zeigt starke strukturelle Ähnlichkeiten in der Berechnung der absorbierten Dosis. Die Definitionen der Proportionalitätsfaktoren haben sich geändert, der Hauptunterschied ist jedoch, dass sich Grays Defition auf die "per unit volume" absorbierte Dosis bezieht, während "unit mass" die Bezugsgröße der modernen Formulierung ist. Khan fügte der modernen Definition die Ergänzung bei, dass sich Veränderungen der Hohlraumtheorie nach Bragg und Gray – entstanden in den 1950er und 1960er Jahren – im Wesentlichen auf eine Verfeinerung der Berechnung des Massenbremsvermögens beziehen³¹.

 $^{^{31}}$ Khan [2009], S. 101

Kapitel 9

Abschließende Betrachtungen

9.1 Zusammenfassung

Die Geschichte der Entdeckungen von Radioaktivität und Röntgenstrahlen im Ausgang des 19. Jahrhunderts ist von globaler Bedeutung. Insbesondere der nutzbringende Einsatz des neugewonnenen Wissens für die Medizin stellte vor wichtige Herausforderungen, die naturgemäß nicht sofort in globalen Dimensionen erfasst werden konnten. Vielmehr stehen am Anfang einer längeren Entwicklung die Bemühungen einzelner Personen und Institutionen, die Neuentdeckungen nutzbar zu machen und sie auch theoretisch zu durchdringen. Diese wissenschaftsgeschichtlichen Entwicklungen von einer pluralen Vielfalt der Nutzung (und auch des Wettbewerbs zwischen den Erforschenden) hin zu einer theoretisch begründbaren, über Sprachgrenzen hinweg akzeptierten und international vereinheitlichenden Normierung sind besonders am Problem der ersten Phasen der beginnenden Dosimetrie von Röntgenstrahlen nachvollziehbar. Sie bilden den Fokus dieser Untersuchung: "X-Strahlen, Radiometer und Hauteinheitsdosis – die Entwicklung der Messverfahren und Maßeinheiten für Röntgenstrahlung in der medizinischen Physik von den Anfängen bis zur internationalen Standardisierung".

Wie ist es von einer Vielfalt an Geräten und Verfahren zur Messung von X-Strahlen Ende des 19. / zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu ersten Standardisierungen in den 1920er Jahren gekommen?

Durch umfangreiche systematische Recherchen in gedruckten Publikationen, insbesondere in den Zeitschriften Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen und Strahlentherapie, konnten auf die Frage "Wie ist es von einer Vielfalt an Geräten und Verfahren zur Messung von X-Strahlen Ende des 19. / zu Beginn des 20. Jahrhunderts zu ersten Standardisierungen in den 1920er Jahren gekommen?" hin vier Entwicklungsphasen von Röntgenstrahlen-Messinstrumenten und -Einheiten herauskristallisiert werden: zunächst die Phase der diagnostischen Anwendung von Röntgenstrahlen, in der

auch Instrumente zur Strahlen-Qualitätsmessung entwickelt wurden; dann die nur wenig später beginnende Phase der therapeutischen Anwendung, in der Instrumente und Einheiten zur Messung von Strahlenmengen ("Dosis") ausgearbeitet wurden. Aufgrund der Vielzahl und Diversität von Instrumenten und Einheiten entstand eine dritte Phase der Standardisierung innerhalb Deutschlands. Mit deren Abschluss – dem Beschluss einer Einheit zur Dosismessung – begann die bis heute andauernde Phase der internationalen Standardisierung.

Zusammenfassend ergab sich durch die diagnostische und therapeutische Anwendung von Röntgenstrahlung schon kurz nach deren Entdeckung ein großes Interesse (nicht nur) der Fachöffentlichkeit, das sich aufgrund der hohen Anzahl Partizipierender in zahlreichen verschiedenen Messmethoden und -Instrumenten niederschlug. Mit der zunehmenden Wissenschaftsorientierung von radiologischer Diagnostik und Strahlentherapie wurden gemeinsame Standards in Terminologie, Methodik, Instrumenten und Einheiten notwendig. Diese wurden zunächst auf nationaler, dann auf internationaler Ebene durchgeführt. Die wesentlichen Errungenschaften der einzelnen Phasen sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

Bevor ein Bewusstsein für die Notwendigkeit der Kenntnis der applizierten Röntgenstrahlenmenge entstand, wurden Instrumente zur Bestimmung von Röntgenstrahlungsqualität entwickelt (s. Tab. 9.1). Dies lag an der Tatsache, dass die Strahlungsqualität unmittelbare Auswirkungen auf die Qualität der Röntgenaufnahmen hatte, und daher besonders von ärztlicher Seite her ein großes Interesse an einer Erforschung bestand. Die ersten "Qualimeter" waren menschliche Hände – die Hände der Experimentatoren – deren Abbild auf Fluoreszenzschirmen begutachtet wurde. Die Hände wurden bald ersetzt durch Handskelette und Gegenstände aus Metall (später zusammenfassend "Kontrastphantome" genannt), bei denen eine Graduierung entweder durch verschiedene Metalle oder unterschiedlich dicke Schichten erreicht wurde. Als im weiteren Verlauf der Entwicklung die Problematik von Sekundärstrahlung und selektiver Absorption von Metallen bekannt wurde, wurden "Treppen" aus anderen Materialien (Bakelit und Wasser) konstruiert, um die sog. Halbwertschicht zu bestimmen. Hierunter wurde die Schichtdicke eines bestimmten Materials verstanden, die die Hälfte der Strahlung absorbierte.

Ein anderer Ansatz war, zu versuchen, über den an der Röntgenröhre anliegenden Strom oder die Röhrenspannung (hierbei war die Anoden- / Beschleunigungsspannung und nicht die meist konstante Heizspannung gemeint) Rückschlüsse auf die Strahlungsqualität zu ziehen. Zur Zeit des Ersten Weltkriegs beschloss die *Deutsche Röntgengesellschaft* die Grundform des noch heute verwendeten Qualitätsindex: dem Quotienten aus den in definierten Tiefen gemessenen und den elektrischen Werten.

Einführungsjahr	Name / Beschreibung	Veröffentlichungen
1895	menschliche Hand	Röntgen [1895], Kienböck [1900]
vor 1897	${ m Skiameter}$	Parzer-Mühlbacher [1897]
1897	Platin-Aluminiumfenster	Röntgen [1897]
1900	${f Spintermeter}$	Béclère [1900]
	parallele Funkenstrecke	
1902	Benoist-Skala	Benoist [1902]
1902	Walter-Skala	Walter [1902-1903]
1902	Benoist-Walter-Skala	Walter [1902-1903]
1903	Kryptoradiometer	Wehnelt [1904]
1905	Härtemesser nach Schilling	Schilling [1905-1906]
	(Handskelett in Wachs)	
1907	Beez-Skala	Beez [1907]
1907	Elektrostatisches Voltmeter	Bergonié [1907a], Bergonié [1907b]
1908	${ m Sklerometer}$	Klingelfuß [1908]
1908	${ m Radiosklerometer}$	Villard [1908a], Villard [1908b]
1910	Wassertreppe	Christen [1910-1911]
1911	Bauer-Qualimeter	Bauer [1911]
1912	Universalhärtemesser	Rzewuski [1912-1913]
1912	Absoluter Härtemesser	Christen [1912], Christen [1913a]
1917-18	Qualitätsindex	Wintz [1917], Christen [1918-1919]

Tabelle 9.1: Übersicht über die Einführung verschiedener Härtemessinstrumente

Die quantitative Röntgenstrahlenmessung geriet durch die therapeutische Applikation am Patienten in den Fokus der Wissenschaft. Während die frühen, häufig chemisch basierten Dosismessinstrumente von Ärzten entwickelt wurden, reichte den zunehmend in der Strahlentherapie eingesetzen Physikern die Genauigkeit dieser Messungen nicht mehr aus. Stattdessen kam im Bereich der Strahlentherapie zunehmend die Ionisations-Messmethode zur Anwendung. Eine Übersicht über Instrumente zur Messung der Strahlenmenge / Dosis ist in Tab. 9.2 gegeben.

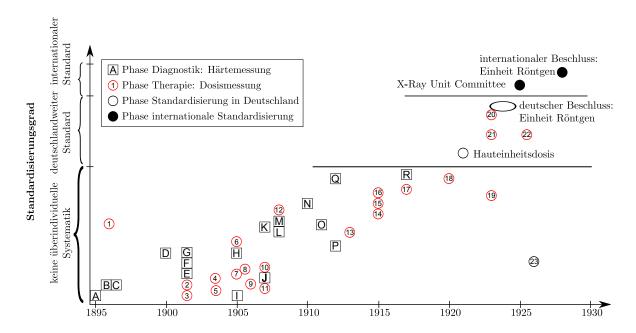
Das erste stark verbreitete Hilfsmittel zur quantitativen Röntgenstrahlenmessung, das sog. Chromoradiometer, bestand aus einer Mischung verschiedener Salze. Allerdings sind die Bestandteile und ihr Mischungsverhältnis bis heute nicht eindeutig geklärt und so ein theoretisches Nachvollziehen der Quantifizierung nicht möglich. Das Chromoradiometer verfärbte sich unter Bestrahlung. War ein bestimmter Farbgrad erreicht, wurde die Erreichung einer definierten Dosis ebenfalls angenommen. Ein ähnliches Messprinzip, verbessert durch eine Skala aus immerhin drei Farben, wurde mit einer Pastille aus Bariumplatincyanür genutzt. Dieses Material wurde bereits zuvor für Fluoreszenzschirme bei der Durchleuchtung mit Röntgenröhren verwendet. Weitere Messmittel entstanden aus dem gleichen Material; sie boten durch eine größere Anzahl Farbtöne eine genauere Abstufung. Sowohl aus Bariumplatincyanür als auch aus Zinksilikat wurden Leuchtschirme hergestellt, die vereinzelt als Quantitätsmessinstrument verwendet wurden.

Die Wurzeln eines auch heute noch an einigen Stellen verwendeten Verfahrens, die Verwendung von photographischen Filmen, geht auf ca. 1905 zurück. Kienböck schlug damals vor, die Schwärzung von Fotopapierstreifen (dem sog. Kienböck-Quantimeter) zur Messung der – modern formuliert – absorbierten Dosis zu verwenden. Dieses Verfahren spielte eine wichtige Rolle in der Dosimetrie, insbesondere bevor sich das Ionisations-Messprinzip durchsetzte. Kienböck regte nach einiger Zeit zusätzlich an, die Dosis in bestimmten "Gewebs"-Tiefen zu messen, die er durch Aluminiumblöcke simulierte. Diese sollten die gleiche Strahlenmenge absorbieren, die eine zehnmal dickere Schicht Wasser oder Gewebe absorbiert hätte. Obwohl dieses Verfahren fehlerbehaftet war, legte es den Grundstein für Phantommessungen, bei denen der menschliche Körper durch verschiedene Materialien simuliert wurde. Während diese zunächst Festkörper waren, wurden später auch Wasserphantome verwendet – große wassergefüllte Behälter, in die die Messinstrumente eingebracht wurden und mithilfe derer auch die Streustrahlung mitgemessen werden konnte.

Das heute in der medizinischen Physik wichtigste Messverfahren – die Messung mittels Ionisationskammern – fand erst ab der Mitte des zweiten Jahrzehnts des 20. Jahrhunderts breitere Verwendung in der Röntgenstrahlen-Dosimetrie. Zuvor waren

Einführungs-	Name oder	Veröffentlichungen
jahr	Beschreibung	
1896	Luftkammer	z.B. Perrin [1896a]
	(Plattenkondensator)	. ,
1902	`Chromoradiometer ´	Holzknecht [1902a]
1902	Fluoreszenz-Radiometer	Contremoulins [1902]
	(Bariumplatincyanür)	
1904	Sabouraud-Noiré-	Sabouraud und Noiré [1904]
	Radiometer	
1904	Jodoform-Radiometer	Freund [1904]
1905	Kienböck-Quantimeter	Kienböck [1905-1906]
1905	Thermometer-Röhre	Köhler [1905]
1905-06	Radiometer	Bordier [1906]
	(Bariumplatincyanür)	
1906	Jodoform-Radiometer	Bordier und Galimard [1906]
1907	Kalomel-Radiometer	Schwarz [1907b], Schwarz [1912]
1907	Fluoreszenz-Radiometer	Guilleminot [1907]
	(Bariumplatincyanür)	
1908	Quantitometer	Villard [1908b]
1913-14	Fürstenausches Intensimeter	Fürstenau [1913]
1915	${\bf Iontoquantimeter}$	Szilard [1915]
1915	Integral-Iontometer	Christen [1915-1916b]
ca. 1915	RGS-Iontoquantimeter	Krönig und Friedrich [1918]
1917	Fingerhutkammer	z.B. Krönig und Friedrich [1918]
		Reiniger, Gebbert und Schall A.G [1917]
1920	Druckluftkammer	Siemens & Halske AG [1920]
1923	Hammer-Dosimeter	Hammer [1923]
1923	${ m Druckluftkammer}$	Behnken [1923-1924]
1923	"Standardgerät"	Küstner [1923]
1925	Eichstandgerät	Küstner [1925]
1926	Eichstandgerät	Küstner [1926]
1926	Röntgen-Photometer	Wintz und Rump [1926]
	$({ m Zinksilikat})$	

Tabelle 9.2: Übersicht über die Einführung verschiedener Dosismessinstrumente



	Härtemessung		Dosismessung
A	menschliche Hand	1	Luftkammer (Plattenkondensator)
В	Skiameter	2	Chromoradiometer
С	Platin-Aluminiumfenster	3	Fluoreszenz-Radiometer (Contremoulins)
D	Spintermeter / parallele Funkenstrecke	4	Sabouraud-Noiré-Radiometer
E	Benoist-Skala	5	Jodoform-Radiometer (Freund)
F	Walter-Skala	6	Kienböck-Quantimeter
G	Benoist-Walter-Skala	7	Thermometer-Röhre
Н	Kryptoradiometer	8	Bordier-Radiometer
I	Handskelett (Schilling)	9	Jodoform-Radiometer (Bordier / Galimard)
J	Beez-Skala	10	Kalomel-Radiometer
K	Elektrostatisches Voltmeter	11	Fluoreszenz-Radiometer (Guilleminot)
L	Klingelfuß-Sklerometer	12	Quantitometer
M	Radiosklerometer	13	Fürstenau-Intensimeter
N	Wassertreppe	14	Iontoquantimeter (Szilard)
О	Bauer-Qualimeter	15	Integral-Iontometer
P	Universalhärtemesser	16	RGS-Iontoquantimeter
Q	Absoluter Härtemesser	17	Fingerhutkammer
R	Qualitätsindex	18	Druckluftkammer (Siemens & Halske)
		19	Hammer-Dosimeter
		20	Druckluftkammer (Behnken)
		21	Standardgerät (Küstner)
		22	Eichstandgerät
		23	Röntgen-Photometer

Abbildung 9.1: Übersicht über die Entwicklung von Messverfahren und Maßeinheiten zwischen 1895 und 1930. Abszisse: zeitliche Einordnung der Entstehung von Härte- und Dosismessinstrumenten sowie Schlüsselereignissen der deutschen und internationalen Standardisierung. Ordinate: Standardisierungsgrad, einerseits geteilt in Kategorien ("keine überindividuelle Standardisierung", "deutschlandweiter Standard", "internationaler Standard"), andererseits innerhalb einer Kategorie. Messinstrumente, deren Ablesungen numerische Werte ergeben, haben einen höheren Standardisierungsgrad als solche, die auf der individuellen Einschätzung des Nutzers beruhen.

bereits Ionisationsmessinstrumente in der Radium-Dosimetrie (v.a. in Frankreich) verwendet worden. Nach Ende des Ersten Weltkrieges nahm die Anzahl der beschriebenen Ionisationskammern verschiedener Bauart schnell zu. Es erschienen einige Arbeiten, die starken Einfluss auf die Ionisationskammer-Entwicklung hatten, so z.B. "Physikalische und biologische Grundlagen der Strahlentherapie" von Krönig und Friedrich sowie Holthusens "Über die Bedingungen der Röntgenstrahlenenergiemessung bei verschiedenen Impulsbreiten auf luftelektrischem Wege". Diese beiden Arbeiten standen stellvertretend für grundsätzlich unterschiedliche Ansätze der Vermeidung des Sekundärelektroneneinflusses: Friedrich durch die Verwendung von Kammermaterialien, die ähnliche Streuverhältnisse wie der menschliche Körper bzw. Wasser boten; Holthusen hingegen durch die Anpassung (also Vergrößerung) des Kammervolumens. Ein weiterer Ansatz, der u.a. von der *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt* verfolgt wurde, versuchte, durch Erhöhung des Kammerdrucks alle Sekundärelektronen zu berücksichtigen.

Für fast alle vor der großflächigen Verwendung von Ionisationskammern beschriebenen Messinstrumente existierten eigene Maßeinheiten, die meist nur schwierig ineinander umgerechnet werden konnten. Die Einführung von Ionisationskammern brachte wiederum neue Einheiten mit sich, die sich nur noch geringfügig voneinander unterschieden. Diese Problematik führte zu einem Prozess der Standardisierung in Deutschland. Die *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* führte Ende 1923 eine Einheit für Röntgenstrahlendosis ein. Deren Verwendung unter dem Namen "Röntgen" wurde 1924 von der *Deutschen Röntgengesellschaft* beschlossen. Vier Jahre später wurde diese Einheit mit nur geringen Modifikationen auf dem zweiten *internationalen Radiologiekongress* übernommen wurde. Da es trotz einer vor Jahrzehnten beschlossenen gemeinsamen Einheit deutliche Unterschiede zwischen den *Codes of Practice* verschiedener Länder gibt, ist die internationale Standardisierung ist bis heute als nicht als abgeschlossen, sondern als "Work in Progress" anzusehen.

Die vierphasige Entwicklung der Messverfahren und Maßeinheiten für Röntgenstrahlung in der medizinischen Physik zwischen 1895 und 1930 ist in Abb. 9.1 zusammenfassend dargestellt. Hierbei werden die in Tab. 9.1 und Tab. 9.2 aufgelisteten Härte- und Dosismessinstrumente in ihrer Entstehung ebenso zeitlich einsortiert wie Schlüsselereignisse der Standardisierung in Deutschland und auf internationaler Ebene. Zusätzlich erfolgt eine Einordnung der Geräte und Beschlüsse nach Standardisierungsgrad. Hierbei ist die "Standardisierung" in verschiedenen Feinheitsgraden zu verstehen: einerseits eine Einteilung in Kategorien – hier: "keine überindividuelle Standardisierung", "deutschlandweiter Standard" und "internationaler Standard" – andererseits die Einordnung innerhalb einer Kategorie. So haben Messinstrumente, deren Ablesungen

numerische Werte ergeben (z.B. durch die Position eines Zeigers auf einer Skala), einen höheren Standardisierungsgrad als solche, die auf der individuellen Einschätzung des Nutzers wie z.B. der Beurteilung einer Verfärbung beruhen.

9.2 Diskussion

Die Entwicklung der Röntgenstrahlen-Dosimetrie war in ihren ersten drei Jahrzehnten stark geprägt von den Leistungen einzelner Ärzte und Naturwissenschaftler. Dies lässt sich an verschiedenen Beispielen aufzeigen, angefangen mit Kienböcks Quantimeter über die Leistungen Christens – sowohl in der Qualitätsmessung als auch in der theoretischen Formulierung des Begriffs "Dosis"- bis zu den Standardisierungsbemühungen von Behnken. Auch im Anschluss an eine nationale Standardisierung lässt sich das Prinzip auf internationaler Ebene weiter verfolgen. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass gerade die Leistungen dieser einzelnen Wissenschaftler ihre Wirkung bis heute zeigen: das von Kienböck genutzte Messprinzip, die Färbung von Fotopapier bei Bestrahlung wird heute noch verwendet; ähnliches gilt auch für den Qualitätsindex, dessen Wurzeln auf Christen zurückgehen. Ebenfalls von Christen stark beeinflusst war die Entwicklung des Dosisbegriffs weg von der medizinisch-pharmazeutisch geprägten Vorstellung der von einer Röntgenröhre abgegebenen Energie hin zur tatsächlich im Gewebe absorbierten Dosis. Weiterhin auffällig in der Entwicklung der Röntgenstrahlen-Messinstrumente ist, dass die meisten frühen Instrumente in der klinischen Praxis und nicht in Firmen entwickelt wurden. Diese Tatsache schlägt sich einerseits darin nieder, dass sich die Veröffentlichungen zu den jeweiligen Instrumenten hauptsächlich in medizinisch-physikalischen Fachzeitschriften finden lassen. Weiterhin ist der Entwicklungsort auch in der Anzahl der Patente sichtbar: etwa bis zum Ersten Weltkrieg finden sich praktisch keine Messinstruments-Patente in der Patentdatenbank des Deutschen Patent- und Markenamtes. Die Patent-Anzahl steigt deutlich mit der Einführung von Ionisationskammern in die Strahlentherapie. An dieser Stelle tritt als wichtige Hersteller-Firma insbesondere Reiniger, Gebbert & Schall auf, später auch die Physikalisch-Technischen Werkstätten Freiburg.

Nach der Messung des Ionisationsstroms ist heute zur Berechnung der absorbierten Dosis die Hohlraumtheorie unerlässlich. Ihre Grundlagen gehen wieder auf einzelne Personen – William Henry Bragg und Harold Gray – zurück und haben seit den ersten Formulierungen in "Studies in Radioactivity" zahlreiche Erweiterungen erfahren. Die ersten Stufen dieses Entwicklungsprozesses – vom ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts bis in die 1930er Jahre wurden oben in Form eines Ausblicks dargestellt. Weitere Verbesserungen der Genauigkeit, die in den 1950er bis 1970er Jahren entwickelt wurden verbesserungen der Genauigkeit, die in den 1950er bis 1970er Jahren entwickelt wurden verbesserungen der Genauigkeit, die in den 1950er bis 1970er Jahren entwickelt wurden verbesserungen der Genauigkeit, die in den 1950er bis 1970er Jahren entwickelt wurden verbesserungen der Genauigkeit, die in den 1950er bis 1970er Jahren entwickelt wurden verbesserungen der Genauigkeit, die in den 1950er bis 1970er Jahren entwickelt wurden verbesserungen der Genauigkeit, die in den 1950er bis 1970er Jahren entwickelt wurden verbesserungen der Genauigkeit, die in den 1950er bis 1970er Jahren entwickelt wurden verbesserungen der Genauigkeit verbesserungen der Genau

9.3. ABSCHLUSS 207

den und mit der Entwicklung weiterer wissenschaftlicher Erkenntnis und Theorien zur Atom- und Kernphysik zusammenhängen, gehen über den Fokus dieser Arbeit hinaus und bilden ein eigenes Thema, das lohnt, in einer gesonderten Studie betrachtet zu werden.

Die von der PTR und insbesondere Behnken propagierte Formulierung und Definition der Einheit "Röntgen" ist zwar heute nicht mehr aktuell. Das der Einheit zugrunde liegende Prinzip lässt sich jedoch in der Definition der Größe "Exposure" wiederfinden:

"Die Exposure X gibt den Betrag der Ladungen eines Vorzeichens an, die von den durch Photonen ausschließlich im Massenelement dm_a ausgelösten Sekundärelektronen in Luft insgesamt erzeugt werden, sofern diese Sekundärelektronen vollständig in Luft abgebremst werden. Als zu betrachtendes Luftvolumen dient dabei ein Volumen, das den praktischen Reichweiten der Sekundärelektronen entspricht."¹

9.3 Abschluss

Die vorliegende Arbeit bietet eine wissenschaftshistorische Aufarbeitung der ersten Jahrzehnte der Dosimetriegeschichte, die dem Überschneidungsbereich von Medizin und Physik mit ihren z.T. unterschiedlichen Sichtweisen auf Alltagstauglichkeit und Exaktheit von Definitionen gewidmet ist. Ausgehend von den ersten Beschreibungen von Röntgenstrahlen und Radioaktivität werden die ersten Versuche, Strahlung in einem medizinischen Kontext messbar zu machen, nachgezeichnet. (Der medizinische Kontext impliziert in diesem Zusammenhang, dass Messmethoden und Messmittel nur zu einem geringen Teil von Physikern stammten. Mindestens bis zur Zeit des Ersten Weltkriegs war ein wichtiges, wenn nicht gar entscheidendes Kriterium bei der Wahl der Messmethode, dass die Messung unkompliziert war und das Ergebnis möglichst ohne zusätzliche Rechnung erreicht werden sollte, um auch von Ärzten umsetzbar zu sein. Wären die klinischen Messmethoden nur von Physikern umgesetzt und die Messungen nur von Physikern durchgeführt worden, hätte die Entwicklung vermutlich anders ausgesehen.) Es wird gezeigt, dass die Entwicklung von Röntgenstrahlenmessinstrumenten und -einheiten in vier Phasen stattgefunden hat: zunächst wurden Röntgenstrahlen diagnostisch angewendet und es wurden die hierfür nötigen Messinstrumente geschaffen. Mit beginnender therapeutischer Anwendung wurden weitere Messinstrumente sowie Maßeinheiten notwendig. In einer dritten Phase fand eine Standardisierung in Deutschland statt, die sich teils auf Messinstrumente, hauptsächlich jedoch auf Einheiten bezog. Danach begann eine internationale Standardisierung, die bis heute andauert.

¹Krieger [2011], S. 197

Die systematische Beschreibung verschiedener Messinstrumente, ihrer Vor- und Nachteile sowie ihrer meist individuellen Maßeinheiten stellt den Hauptteil der Arbeit dar. Die Einheiten der Messverfahren werden kategorisiert, da in der Strahlentherapie grundlegend verschiedene Herangehensweisen an die Messtechnik existierten, nämlich: Bezug auf sichtbare Reaktion am Patienten (z.B. die Hautrötung) versus Messung von physikalischen Größen. Der Prozess der Herausbildung einer zunächst in Deutschland, später auch international verwendeten Röntgenstrahlendosis-Einheit wird dargestellt. Es wird nicht nur ein Überblick über die wichtigsten bis zum Beginn der 1920er Jahre in Deutschland existierenden Röntgenstrahlenmessmethoden geschaffen, sondern es werden auch die Verbindungen zwischen den Messgeräten sowie durch sie ermöglichten -methoden und den korrespondierenden Maßeinheiten aufgezeigt.

Nur wenn auf allen Seiten, von Medizinern genauso wie von Physikern, Übereinstimmung über diese Zusammenhänge – und ggf. Beschränkungen – existiert, kann Kommunikation gelingen. Das war zumindest in den ersten Jahrzehnten nach der Entdeckung der X-Strahlen nicht der Fall. Auch in der Gegenwart, in der notwendigerweise eigene Ausbildungswege für beide Berufsfelder bestehen, ist ein Verständnis für unterschiedliche Perspektiven und interdisziplinäre Infragestellung überkommener einseitiger Sichtweise nötig. Zu wünschen bleibt, dass die vorliegende Arbeit Hilfestellungen für diesen Lern- und Kommunikationsprozess und für ein tieferes Verständnis ermöglicht. Denn nur dann kann der auch heute noch nicht vollkommen einheitliche Ist-Zustand in der Dosimetrie und in der internationalen Einheiten-Verwendung zu vollständiger Standardisierung gebracht werden. Insofern bedarf es einer wissenschaftsgeschichtlichen Aufarbeitung, um diese Uneinheitlichkeit, die auch im Zeitraum seit der Einführung eines internationalen Standards Ende der 1920er Jahre bis heute verbleibt, zumindest erklär- und nachvollziehbar zu machen.

Quellenverzeichnis

- Adler, Erich. Versuche über das Kienböcksche und das Holzknechtsche dosimetrische Verfahren. Strahlentherapie, 5:465 470, 1915.
- Albers-Schönberg, Heinrich. Beitrag zur therapeutischen Verwendung der Röntgenstrahlen in der Behandlung des Lupus. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 1:16 18, 1897-1898.
- Albers-Schönberg, Heinrich. Die Röntgentechnik. Lehrbuch für Ärzte und Studierende. Gräfe & Sillem, Hamburg, 1. Auflage, 1903.
- Angelis, Cinzia de, Sandro Onori, Massimiliano Pacilio, G. A. Pablo Cirrone, Giacomo Cuttone, Luigi Raffaele, Marta Bucciolini, und Silvia Mazzocchi. An investigation of the operating characteristics of two PTW diamond detectors in photon and electron beams. *Medical Physics*, 29(2):248 254, 2002.
- Arsonval, Jacques-Arsène d'. Dispositiv permettant de rende identiques les tubes à rayons X. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 138:1142 1145, 1904.
- Athanasiadis, G. Wirkung der Rötgenstrahlung auf dem elektrischen Widerstand des Selens. Annalen der Physik, 332(14):890 896, 1908.
- Bachem, Albert. Zur praktischen Dosierung der Röntgenstrahlen verschiedener Härte. Strahlentherapie, 13:605 – 610, 1922.
- Barkla, Charles Glover und George Herbert Martyn. The Photographic Effect of X-rays and X-ray Spectra. *Philosophical Magazine Series* 6, 25(146):296 300, 1913.
- Barkla, Charles Glover und Charles A. Sadler. Classification of Secondary X-ray Radiators. *Nature*, 77(1998):343 344, 1908a.
- Barkla, Charles Glover und Charles A. Sadler. Absorption of X-rays. *Nature*, 78(2020): 245, 1908b.

- Bauer, Heinz. Das Qualimeter. Verhandlungen der Deutschen Röntgengesellschaft, 7: 137 138, 1911.
- Baumeister, Leonhard und Richard Glocker. Beitrag zur Kenntnis der Wirkung der Röntgenstrahlen auf Jodoform-Chloroformlösungen. Zeitschrift für physikalische Chemie, Stöchiometrie und Verwandtschaftslehre, 97:368 375, 1921.
- Béclère, Antoine. La mesure indirecte du pouvoir de pénétration des rayons de Röntgen à l'aide du spintermètre. Archives d'électricité médicale, 8:153 157, 1900.
- Béclère, Antoine. On international standardisation of measures in Röntentherapy. British Journal of Radiology, Röntgen Society Section, 23:66 72, 1927.
- Becquerel, Henri. Sur les radiations émises par phosphorescence. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 122:420 421, 1896a.
- Becquerel, Henri. Sur les radiations émises par les corps phosphorescents. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 122:501 503, 1896b.
- Beez, Carl. Ein neuer Härtemesser für Röntgenröhren. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 11:285 287, 1907.
- Behnken, Hermann. Vereins- und Kongreßberichte, Röntgen-Vereinigung zu Berlin: Die Eichung von Dosismessern an der Physikalisch-Technischen Reichanstalt. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 31:479 482, 1923-1924.
- Behnken, Hermann. Die Vereinheitlichung der Röntgenstrahlen-Dosismessung und die Eichung von Dosismessern. Zeitschrift für technische Physik, 5:3 16, 1924a.
- Behnken, Hermann. Die Eichung von Dosismessern in absolutem Maße in der Physikalisch-technischen Reichsanstalt. Verhandlungen der deutschen Röntgengesellschaft, 15:92 94, 1924b.
- Behnken, Hermann. Maßnahmen zur Standardisierung der Röntgendosismessung in Deutschland. Strahlentherapie, 20:115 120, 1925.
- Behnken, Hermann. The German Unit of X-Radiation. British Journal of Radiology, Röntgen Society Section, 23:72 77, 1927.
- Behnken, Hermann und Robert Jäger. Die deutsche Einheit der Röntgenstrahlendosis. Zeitschrift für technische Physik, 7:563 570, 1926.
- Belot, Joseph. Radiotherapy in Skin Disease. Rebman Ltd., London, 1905a.

- Belot, Joseph. Traité de Radiothérapie. G. Steinheil, Paris, 2. Auflage, 1905b.
- Belot, Joseph. The principal factors in radiotherapy and radiumtherapy. Archives of the Roentgen Ray, 11(2):36 41, Juli 1906.
- Benoist, Louis. Lois de transparence de la matière pour les rayons X. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 132:324–327, 1901a.
- Benoist, Louis. Lois de transparence de la matière pour les rayons X. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 132:545-548, 1901b.
- Benoist, Louis. Méthode de détermination des poids atomiques fondée sur les lois de transparence de la matière pour les rayons X. Poids atomique de l'indium. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 132:772–774, 1901c.
- Benoist, Louis. Définition expérimentale des diverses sortes de rayons X par le radiochromomètre. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 134:225–227, 1902.
- Benoist, Louis und Dragomir Hurmuzescu. Nouvelles proprietés des rayons X. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 122:235–236, 1896.
- Bergonié, Jean Alban. Mesure du degré radiochromométrique par le voltmètre électrostatique dans l'utilisation en médicine des rayons de Röntgen. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 144:28 29, 1907a.
- Bergonié, Jean Alban. De l'indication permanente du degré radiochromométrique du faisceau émanent d'un tube de Crookes par le voltmètre électrostatique. Archives d'électricité médicale, 15:123 135, 1907b.
- Bethe, Hans. Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie. Annalen der Physik, 397(3):325 400, 1930.
- Bordier, Henry. Radiometric Methods. Archives of the Roentgen Ray, 11:4 13, 1906.
- Bordier, Henry und Joseph Galimard. Action des rayons X sur les platino-cyanures et en particulier sur celui de baryum. Archives d'électricité médicale, 13:323 326, 1905.
- Bordier, Henry und Joseph Galimard. A new unit for measuring X-rays. Archives of the Roentgen Ray, 11(6):164 167, November 1906.

- Bottler, Max. Ueber Neuerungen in der Analyse und Fabrikatien von Lacken und Firnissen im Jahre 1909. Chemische Revue über die Fett- und Harz-Industrie, 17(9): 209 212, 1910.
- Bragg, William Henry. L'ionisation des gaz par les rayons X et les rayons gamma. Le Radium, 7:240, 1910.
- Bragg, William Henry. Studies of Radioactivity. Macmillan and co., ltd, London, UK, 1912.
- Bragg, William Henry. Opening Address to the Discussion on International Units and Standards for X-Ray Work. British Journal of Radiology, Röntgen Society Section, 23:64 66, 1927.
- British Medical Journal. First International Congress of Radiology, London Meeting. The British Medical Journal, S. 67 – 73, July 11 1925.
- Bureau International des Poids et Mesures. Convention du Mètre et Règlement Annexe. http://www.bipm.org/utils/common/documents/official/metre-convention.pdf, Zugriff am 30.10.2013, 1875-1921.
- Bureau International des Poids et Mesures. Comptes Rendus des Scéances de la Sixième Conférence Générale des Poids et Mesures, Réunie à Paris en 1921. Gauthier-Villars, Paris, 1921.
- Büttner, Oskar und Kurt Müller. Technik und Verwertung der Röntgen'schen Strahlen im Dienste der ärztlichen Praxis und Wissenschaft. Verlag von Wilhelm Knapp, Halle, (2), 1899.
- Christen, Theophil. Zur Dosierungsfrage. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 15:31 – 34, 1910a.
- Christen, Theophil. Röntgenphotographie und Röntgentherapie, zwei komplementäre Probleme. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 15:348 359, 1910b.
- Christen, Theophil. Einige Anwendungen der Absorptionsgesetze auf die Röntgentherapie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 16:273 279, 1910-1911.
- Christen, Theophil. Beitrag zur Einführung der direkten Dosimetrie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 18:149 154, 1911-1912.
- Christen, Theophil. Der absolute Härtemesser. Strahlentherapie, 2:325 332, 1912.

- Christen, Theophil. Direkt oder Indirekt? Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 19:93 – 94, 1912-1913a.
- Christen, Theophil. Das Lastkonto der Sabouraudpastille. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 19:161 166, 1912-1913b.
- Christen, Theophil. Messung und Dosierung der Röntgenstrahlen. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, Ergänzungsband 28, 1913a.
- Christen, Theophil. Maße und Messungen in der Röntgenkunde. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 20:182 187, 1913b.
- Christen, Theophil. Über einige aktuelle Fragen der Röntgenphysik. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 20:1 22, 1914.
- Christen, Theophil. Zur Theorie und Technik der Härtemessung. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 22:247 253, 1914-1915.
- Christen, Theophil. Messung heterogener Röntgenstrahlen. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 23:214 228, 1915-1916a.
- Christen, Theophil. Das Integral-Iontometer. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 23:520 526, 1915-1916b.
- Christen, Theophil. Antrag an die Deutsche Röntgengesellschaft betreffend der Einführung eines praktischen Maßes für die Durchdringungsfähigkeit von Strahlen hohen Härtegrades. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 26:38 40, 1918-1919.
- Contremoulins, Gaston. Recherche d'une unité de mesure pour la force de pénétration des rayons X et pour leur quantité. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 134:649 651, 1902.
- Curie, Marie Sklodowska. Rayons émises par les composés de l'uranium et du thorium. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 126:1101 1103, 1898.
- Dam, Henry Jackson Wells. The new marvel in photography. A visit to Professor Röntgen at his laboratory in Würzburg. *McClure's Magazine*, 6(5):403 415, 1896. URL http://www.gutenberg.org/files/14663/14663-h/14663-h.htm.
- Das, Indra J., George X. Ding, und Anders Ahnesjö. Small fields: Nonequilibrium radiation dosimetry. *Medical Physics*, 35(1):206 215, 2008.

- Deutsche Röntgengesellschaft. Arbeiten und Verhandlungen der Sonderkommission für Dosimetervergleich. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 23:213 300, 1915-1916.
- Deutsche Röntgengesellschaft. Arbeiten und Verhandlungen der Sonderkommission für Dosimetervergleich der Deutschen Röntgengesellschaft. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 24:373 423, 1916-1917.
- Deutsche Röntgengesellschaft. Leitsätze für die Arbeit mit Röntgenstrahlen gemäß Beschluß der Deutschen Röntgen-Gesellschaft vom 28. April 1924. Verhandlungen der deutschen Röntgengesellschaft, 15:515, 1924.
- Doelter, Cornelio. Das Radium und die Farben. Verlag von Theodor Steinkopff, Dresden, 1910.
- Dorn, Ernst. Ueber die erwärmende Wirkung der Röntgenstrahlen. Annalen der Physik und der physikalischen Chemie, 63:160 176, 1897.
- Duane, William. The scientific basics of short wave-length therapy. American Journal of Roentgenology, 9:781 791, 1922.
- Eisl, Anton. Über die Ionisierung von Luft durch Kathodenstrahlen von 10–60 kV. Annalen der Physik, 395(3):277 313, 1929.
- Esch, Ann van, Christian Clermont, Magali Devillers, Mauro Iori, und Dominique Pierre Huyskens. On-line quality assurance of rotational radiotherapy treatment delivery by means of a 2D ion chamber array and the Octavius phantom. *Medical Physics*, 34(10):3825 3837, 2007.
- Faraday, Michael. Experimental researches in Electricity Seventh Series. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 124:77 122, 1834.
- Freund, Leopold. Ein mit Röntgen-Strahlen behandelter Fall von Naevus pigmentosus piliferus. Wiener medizinische Wochenschrift, 47(10):428 434, 1897a.
- Freund, Leopold. Nachtrag zu dem Artikel Ein mit Röntgen-Strahlen behandelter Fall von Naevus pigmentosus piliferus. Wiener medizinische Wochenschrift, 47(19):856 860, 1897b.
- Freund, Leopold. Grundriss der gesammten Radiotherapie für Ärzte. Urban und Schwarzenberg, Berlin, Wien, 1903.

- Freund, Leopold. Sitzung der k.k. Gesellschaft der Aerzte in Wien am 8. April 1904. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 7:216 217, 1903-1904.
- Freund, Leopold. Ein neues radiometrisches Verfahren. Wiener klinische Wochenschrift, 17(15):417 – 418, 1904.
- Fricke, Hugo und Otto Glasser. A theoretical and experimental study of the small ionization chamber. American Journal of Roentgenology, 13:453 461, 1925a.
- Fricke, Hugo und Otto Glasser. Standardization of rhe roentgen-ray dose by means of the small ionization chamber. American Journal of Roentgenology, 13:462 464, 1925b.
- Friedrich, Walter. Über die Bedeutung des Dosimeterverfahrens für die Beantwortung biologischer Fragen der Strahlentherapie. Strahlentherapie, 11:1076 1078, 1920.
- Friedrich, Walter und Otto A. Glasser. Untersuchungen und Betrachtungen über das Problem der Dosimetrie. Strahlentherapie, 14:362 388, 1923.
- Fürstenau, Robert. Vorrichtung zur Messung der Härte von Röntgenstrahlen durch die Einwirkung der Röntgenstrahlen auf eine Zelle aus Selen oder änlichem, den elektrischen Widerstand unter Einfluß von Belichtung änderndem Material. *Patentschrift Nr. 224114, Deutsches Reich*, 25. Juli, 1909.
- Fürstenau, Robert. Meßgerät für Röntgenstrahlen. Patentschrift Nr. 280709, Deutsches Reich, 22. Mai, 1913.
- Fürstenau, Robert. Meßgerät für Röntgenstrahlen. Zusatz zu Patent 280709. Patent-schrift Nr. 282619, Deutsches Reich, 18. Februar, 1914.
- Fürstenau, Robert. Über die Verwendbarkeit des Selens zu Röntgenstrahlenenergiemessungen. *Physikalische Zeitschrift*, 16:276 279, 1915.
- Fuchs, Georg und Josef Hofbauer. Das Spätresultat einer vor 70 Jahren durchgeführten Röntgenbestrahlung. Strahlentherapoe, 130:161 166, 1966.
- Gassmann, Albert und Hans Schenkel. Ein Beitrag zur Behandlung der Hautkrankheiten mittelst Röntgenstrahlen. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 2: 121 132, 1898-1899.
- Geyser, Albert G. The medico-legal relations of X-rays and skiagraphs. In: Witthaus, Rudolph August (Hrsg.), *Medical jurisprudence, forensic medicine and toxicology* (Volume 3), S. 771 806. W. Wood, New York, 1909.

- Gilray, W.J. Röntgen Rays and the Resitance of Selenium. Nature, 54(1388):109, 1896.
- Glocker, Richard. Eine neue Meßmethode zur Untersuchung der Zusammensetzung von Röntgenstrahlungen. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 26:363 390, 1918-19.
- Glocker, Richard, O. Rothacker, und W. Schönleber. Neue Methoden zur Messung der Tiefendosis im Wasserphantom. *Strahlentherapie*, 14:1389 422, 1923.
- Goldstein, Eugen. Über die Einwirkung von Kathodenstrahlen auf einige Salze. Sitzungsberichte der königlich preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1894(2):937 945, 1894.
- Goldstein, Eugen. Über die durch Kathodenstrahlen hervorgerufenen Färbungen einiger Salze. Sitzungsberichte der königlich preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1895(2):1017 1024, 1895.
- Goldstein, Eugen. Über Nachfarben und die sie erzeugenden Strahlungen. Sitzungsberichte der königlich preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1901(1): 222 229, 1901.
- Grann, Richard. Prinzipielles über die Selenzelle als Mittel zur Messung der Röntgenstrahlen. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 23:267 282, 1915-1916a.
- Grann, Richard. Über die Benützung des photochemischen Vorgangs der Kalomelausscheidung zur Messung der Röntgenstrahlen und über die photochemische Methoden überhaupt. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 23:289 296, 1915-1916b.
- Gray, Louis Harold. The Absorption of Penetrating Radiation. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 122(790):647 668, 1929.
- Gray, Louis Harold. An Ionization Method for the Absolute Measurement of gamma-Ray Energy. *Proceedings of the Royal Society London, Series A*, 156(889):578 596, 1936.
- Gray, Louis Harold. Radiation Dosimetry, Part I. British Journal of Radiology, 10 (116):600 612, 1937a.
- Gray, Louis Harold. Radiation Dosimetry, Part II. British Journal of Radiology, 10 (118):721 742, 1937b.

- Grebe, Leonhard und Heinrich Martius. Röntgenstrahlenmessung mit großer und kleiner Ionisationskammer. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 27:512 514, 1919-1921.
- Grebe, Leonhard und Heinrich Martius. Vergleichende Messungen über die Größe der zur Erreichunng des Hauterythems gebräuchlichen Rötgenstrahlenmengen. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 18:395 409, 1924.
- Grebe, Leonhard und Heinrich Martius. Röntgen-ray measurements in absolute units and ray-dosis necessary for skin-erythema. British Journal of Radiology, Röntgen Society Section, 23:78 81, 1927.
- Grossmann, Gustav. Grundprinzipien der Dosimetrie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 22:101 142, 1914-1915.
- Guilleminot, Hyacinthe. Nouveau quantitomètre pour rayons X. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 145:711 – 713, 1907.
- Günther, Paul, H. D. von der Horst, und Georg Cronheim. Die Einwirkung von Röntgenstrahlen auf Chloroform und ähnliche Verbindungen. Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie, 34(9):616 625, 1928.
- Haenisch, Georg Fedor. Eröffnungssitzung des 14. Kongresses der Deutschen Röntgengesellschaft. Verhandlungen der Deutschen Röntgengesellschaft, 14:1 4, 1923.
- Haenisch, Georg Fedor. Fifteenth Convention of the German Roentgen Society held in Berlin, April 27 to 29, 1924. American Journal of Roentgenology, 12:185 195, 1925.
- Hahn, Rudolf. Durch Röntgenstrahlen geheiltes Chronisches Ekzem. Kasuistischer Beitrag für die weitere Verwendung von Röntgenstrahlen in der Dermatotherapie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 2:16 18, 1898-99.
- Hammer, Wilhelm. Einrichtung zur Messung der Dosis von Strahlen (Röntgen-, Radium-, Lichtstrahlen usw.). Patentschrift Nr. 366858, Deutsches Reich, 13. Januar, 1921a.
- Hammer, Wilhelm. Einrichtung zur Messung und Dosierung kleiner Elektrizitätsmengen nd Strömen. *Patentschrift Nr. 89854, Österreich*, 25. März, 1921b.
- Hammer, Wilhelm. Über ein neues Dosimeter für ionisierende Strahlen, insbesondere Röntgenstrahlen. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 30, Kongressband:99 100, 1923.

- Hardy, William Bate und Edith Gertrude Willcock. On the oxidising action of the rays from radium bromide as shown by the decomposition of iodoform. *Proceedings of the Royal Society of London*, 72:200 204, 1903-1904.
- Hardy, William Bate und Edith Gertrude Willcock. Über die oxydierende Wirkung der Strahlen von Radiumbromid, gezeigt an der Zersetzung des Jodoforms. Zeitschrift für physikalische Chemie, 47:347 352, 1904.
- Heidenhain, Lothar. Dosierung der Röntgenstrahlen. Strahlentherapie, 10:414 436, 1920.
- Herweg, Julius. Beiträge zur Kenntnis der Ionisation durch Röntgen- und Kathodenstrahlen. Annalen der Physik, 324(19):333 370, 1906.
- Himstedt, Franz. Ueber einige Versuche mit Becquerel- und Röntgenstrahlen. Annalen der Physik, 309(3):531 536, 1901.
- Holthusen, Hermann. Über die Bedingungen der Röntgenstrahlenenergiemessung bei verschiedenen Impulsbreiten auf luftelektrischem Wege. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 26:211 231, 1918-1919.
- Holthusen, Hermann. Bericht über die achte Sitzung der Standardisierungskommission der Deutschen Röntgengesellschaft in Bonn a. Rh. vom 29. Mai 1925. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 33:643 645, 1925.
- Holzknecht, Guido. Die photochemischen Grundlagen der Röntgographie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 5:235 245, 1901-1902a.
- Holzknecht, Guido. Die photochemischen Grundlagen der Röntgographie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 5:317 326, 1901-1902b.
- Holzknecht, Guido. Eine neue, einfache Dosirungsmethode in der Radiotherapie. (Das Chromoradiometer). Wiener klinische Rundschau, 16:685 687, 1902a.
- Holzknecht, Guido. Eine neue einfache Dosierungsmethode in der Röntgotherapie. Wiener klinische Wochenschrift, 15:1180 1182, 1902b.
- Holzknecht, Guido. Eine neue einfache Dosierungsmethode in der Röntgentherapie (das Chromoradiometer). Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 6:106 108, 1902-1903.
- Holzknecht, Guido. Das Chromoradiometer. In: Comptes rendus des scéances du 2e congres international d'électrologie et de Radiologie médicales, S. 377 379. Office Polytechnique d'Édition S.A., Berne, 1903.

- Holzknecht, Guido. Weitere Mitteilungen über die Skala zum Sabouraud. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 15:372 376, 1910.
- Holzknecht, Guido. Über das Bauersche Qualimeter. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 18:269 271, 1911-1912.
- Holzknecht, Guido und Carl Weissenberg. Zur speziellen technischen Strahlenmessung. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 23:257 267, 1915-1916.
- Immelmann, Max und Johannes Schütze. Absorptionsmessungen mit dem Fürstenauschen Intensimeter. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 22:533 541, 1914-1915.
- International Committee for Radiological Units. Recommendations of the International Committee for Radiological Units (Chicago, 1937). Radiology, 29(5):634 635, 1937.
- International X-ray Unit Committee. Recommendations of the international X-ray unit committee The second international congress of Radiology, Stockholm, July 23-27, 1928. British Journal of Radiology, 1:363 364, 1928.
- Ishii, Rie, Akira Yoshida, Mie Ishii, Shiho Fujimoto, und Noriko Henmi. The Precision of Half-value Layer Measurement on Mammography. *Japanese Journal of Radiological Technology*, 67(12):1533 1539, 2011.
- Kassabian, Mihran Krikor. Rontgen rays and electro-therapeutics, with chapters on radium and phototherapy. J.B. Lippincott Company, Philadelphia, London, 2. Auflage, Hamburg, Germany, 1910.
- Kienböck, Robert. Ueber die Einwirkung des Röntgenlichtes auf die Haut. Wiener klinische Wochenschrift, 1900(50):1153 1166, 1900.
- Kienböck, Robert. Eine neue Methode in der Röntgentherapie. Verhandlungen der Deutschen Röntgengesellschaft, 1:197 198, 1905.
- Kienböck, Robert. Über Dosimeter und das quantimetrische Verfahren. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 9:276 295, 1905-1906.
- Kienböck, Robert. Radiotherapie: ihre biologischen Grundlagen, Anwendungsmethoden und Indikationen. Mit einem Anhang: Radiumtherapie. Enke, Stuttgart, 1907.
- Kienböck, Robert. Über das Quantimeter. Strahlentherapie, 1:68 87, 1912.
- Kienböck, Robert. Über die Nomenklatur in der radiotherapeutischen Technik. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 19:294 296, 1912-1913.

- Kienböck, Robert. Ueber die Verwendung der photochemischen Radiometer zur Bestimmung der Hautdosen. Strahlentherapie, 3:687 710, 1913.
- Kienböck, Robert. Über Dosimetrie. Strahlentherapie, 4:794 795, 1914.
- Kienböck, Robert. Über Härtemessung des Röntgenlichts. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 22:567 594, 1914-1915a.
- Kienböck, Robert. Über die Verwendung der Radiometerangaben. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 22:593 594, 1914-1915b.
- Kirstein, Friedrich. Zur Frage der direkten Dosimetrie. *Strahlentherapie*, 4:788 793, 1914.
- Klieneberger, Carl. Buchbesprechung: H. Guilleminot, Radiométrie fluoroscopique. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 16:297, 1910-1911.
- Klingelfuß, Friedrich Wilhelm. Über ein neues Verfahren zur kontinuierlichen Ablesung der Härte einer Röntgenröhre; über ein neues Meßverfahren zur Dosierung der Röntgenstrahlen mittels Strom- und Spannungsmesser an der gedämpften Welle. Verhandlungen der Deutschen Röntgengesellschaft, 4:145 149, 1908.
- Klingelfuß, Friedrich Wilhelm. Die Aenderung der Röntgenstrahlenhärte durch die elektrische Spannung bei einer Röntgenröhre. Verhandlungen der Deutschen Röntgengesellschaft, 5:62 66, 1909.
- Klingelfuß, Friedrich Wilhelm. Ein Sklerometer. Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, 93:328–329, 1910a.
- Klingelfuß, Friedrich Wilhelm. Die Einrichtung zur Messung der Röntgenstrahlen mit dem Sklerometer. Zeitschrift für Röntgenkunde und Radiumforschung, 12:381–383, 1910b.
- Köhler, Alban. Röntgenröhre mit Vorrichtung zur therapeutischen Dosierung der Röntgenstrahlen. Münchener medizinische Wochenschrift, 52(2):76 80, 1905.
- Köhler, Alban. Über Dosierung in der Röntgentherapie und Vorgänge im Inneren der Röntgenröhre. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 11:1 12, 1907.
- Kohlrausch, Friedrich. Lehrbuch der praktischen Physik. B.G. Teubner, Leipzig, Berlin, 10. Auflage, 1905.
- Küpferle, Leopold und Hugo Seemann. Die Spektralanalyse der Röntgenstrahlen im Dienste der Strahlentherapie. Strahlentherapie, 10:1064 1104, 1920.

- Krönig, Bernhard und Walter Friedrich. Physikalische und biologische Grundlagen der Strahlentherapie. Urban & Schwarzenberg, Berlin, Wien, 1918.
- Krüger, R. Beitrag zur Anwendung des Sabouraudschen Dosimeters. *Strahlentherapie*, 2:349 355, 1913.
- Küstner, Hans. Tagesfragen der Dosimetrie. Strahlentherapie, 15:611 619, 1923.
- Küstner, Hans. Die Standardisierung der Röntgendosismessung. Strahlentherapie, 17: 1-48, 1924a.
- Küstner, Hans. Die Standardisierung der Röntgendosismessung. Verhandlungen der deutschen Röntgengesellschaft, 15:56 73, 1924b.
- Küstner, Hans. Das Göttinger Laboratorium für medizinische Physik und die Standardeichungen. Strahlentherapie, 20:121 – 127, 1925.
- Küstner, Hans. Das Göttinger Eichstandgerät, ein neues Dosimeter zeitlich konstanter Empfindlichkeit. Verhandlungen der deutschen Röntgengesellschaft, 17:158 163, 1926.
- Lüppo-Cramer, Hinricus. Empfindlichkeitssteigerung der Quecksilberoxalatlösung für das Schwarzsche Fällungsradiometer. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 22:601, 1914-1915.
- Mayer, Robert. Zur praktischen Anwendung der Selenzelle unter Vermeidung ihrer Fehler. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 23:283 289, 1915-1916.
- Meyer Verlag. Qualität. Lexikoneintrag. In: Meyer Verlag (Hrsg.), Meyers Großes Konversations-Lexikon, Band 16, S. 493. Bibliographisches Institut, Leipzig und Wien, 6. Auflage, 1905-1909.
- Moyers, Michael F. EDR-2 film response to charged particles. *Physics in Medicine and Biology*, 53:N165 N173, 2008.
- Nogier, Th. Das Radiochromoskop, ein Apparat, der eine exakte Schätzung der Röntgenstrahlendosen unter immer vergleichbaren Bedinungen gestattet. Vortrag, gehalten auf dem 4. Internationalen Kongreß für Physiotherapie, Berlin, 1913. Strahlentherapie, 3:165 171, 1913.
- Palmans, Hugo. Small and composite field dosimetry: the problems and recent progress. In: International Atomic Energy Agency (Hrsg.), International Symposium on Standards, Applications and Quality Assurance in Medical Radiation Dosimetry (2010:

- Vienna, Austria) Standards, applications and quality assurance in medical radiation dosimetry (IDOS): proceedings of an international symposium, Vienna, 9–12 November 2010, S. 161 180. International Atomic Energy Agency Publishing Section, Wien, 2011.
- Parzer-Mühlbacher, Alfred. Photographische Aufnahmen und Projektion mit Röntgenstrahlen mittelst der Influenz-Elektrisiermaschine. *Photographische Bibliothek*, 6, 1897.
- Perreau, Eugène François. Influence des rayons X sur la résistance diélectrique du sélénium. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 129:956 957, 1899.
- Perrin, Jean-Baptiste. Rôle du diélectrique dans la décharge par les rayons de Röntgen. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 123:351 354, 1896a.
- Perrin, Jean-Baptiste. Décharges par les rayons de Röntgen; influence de la pression et de la température. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 123:878 880, 1896b.
- Perthes, Georg Clemens. Versuch einer Bestimmung der Durchlässigkeit menschlicher Gewebe für Röntgenstrahlen mit Rücksicht auf die Bedeutung der Durchlässigkeit der Gewebe für die Radiotherapie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 8:12 25, 1904-1905.
- Phillips, Charles Edmund Stanley. Discussion on International Units and Standards.

 British Journal of Radiology, Röntgen Society Section, 23:97 101, 1927.
- Physikalisch-Technische Reichsanstalt. Bekanntmachung betreffend die Eichung von Röntgenstrahlen-Dosismessern an der Physikalisch-Technischen Reichanstalt. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 31:565 566, 1923-1924.
- Poppe, Björn, Tenzin Sonam Stelljes, Hui Khee Looe, Ndimofor Chofor, Dietrich Harder, und Kay Willborn. Performance parameters of a liquid filled ionization chamber array. *Medical Physics*, 40(8):82106–1 82106–14, 2013.
- Reiniger, Gebbert und Schall A.G. Strahlenempfänger für Einrichtungen zur messenden Untersuchung von Röntgen- oder anderen ionisierenden Strahlen. *Patentschrift Nr.* 87583, Österreich, 16. März, 1917.

- Richer, Paul und Albert Londe. Sur un cas d'érythème radiographique des mains. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 124:1256–1257, 1897.
- Röntgen, Wilhelm Conrad. Ueber eine neue Art von Strahlen. (Vorläufige Mittheilung.). Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaft, Würzburg, 1895.
- Röntgen, Wilhelm Conrad. Ueber eine neue Art von Strahlen. (Fortsetzung.). Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaft, Würzburg, 1896.
- Röntgen, Wilhelm Conrad. Weitere Beobachtungen über die Eigenschaften der X-Strahlen. (Dritte Mittheilung.). Aus den Sitzungsberichten der k. preuss. Akad. der Wisschensch. zu Berlin, S. 18 37, 1897.
- Ruhmer, Ernst. Strahlenempfindliche Zelle zur Bestimmung der Intensität von Röntgen- und änlichen kurzwelligen Strahlen. *Patentschrift Nr. 142871, Deutsches Reich*, 1. Oktober, 1902.
- Rzewuski, Alexander. Eine neue Form der Härtemesser für Röntgenröhren nach Benoistschem Prinzip? Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 19:296 271, 1912-1913.
- Sabouraud, Raymond und Henri Noiré. Traitement des teignes tondantes par les rayons X. La Presse médicale, 140:825 827, 1904.
- Schilling, Theodor. Ein einfacher Härtegradmesser. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 9:312 314, 1905-1906.
- Schmidt, Hans Erwin. Erfahrungen mit einem neuen Radiometer von Sabouraud und Noiré. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 8:260 263, 1904-1905.
- Schmidt, Hans Erwin. Zur Dosierung der Röntgenstrahlen. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 10:41 46, 1906-1907.
- Schmidt, Hans Erwin. Untersuchungen über die Bedeutung der Röntgenstrahlen-Qualität für die direkte Dosimetrie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 15:38 – 40, 1910.
- Schmidt, Hans Erwin. Bisher nicht bekannte Fehlerquellen bei der direkten Dosimetrie. Strahlentherapie, 4:467 – 470, 1914a.
- Schmidt, Hans Erwin. Erwiderung. Strahlentherapie, 4:796 797, 1914b.

- Schmidt, Hans Erwin. Zur Dosierung in der Röntgentherapie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 22:415 417, 1914-1915a.
- Schmidt, Hans Erwin. Zur Dosierung in der Röntgetherapie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 22:594 595, 1914-1915b.
- Schwarz, Gottwald. Über die Einwirkung der Röntgenstrahlen auf Ammoniumoxalat-Sublimatlösung. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 11:114 – 119, 1907a.
- Schwarz, Gottwald. Über die Ammoniumoxalat-Sublimatreaktion der Röntgenstrahlen und das Fällungsradiometer. Verhandlungen der Deutschen Röntgengesellschaft, 3: 118 119, 1907b.
- Schwarz, Gottwald. Forderung nach einer staatlichen Kontrollstelle für Röntgenstrahlenmessinstrumente (sog. Dosimeter). Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 18:67 70, 1911-1912.
- Schwarz, Gottwald. Die Kalomelreaktion der Röntgenstrahlen und ihre Anwendung zur Dosimetrie. Strahlentherapie, 1:88 99, 1912.
- Schwarz, Gottwald und Hugo Sirk. Die nephelometrische Bestimmung der durch Röntgenstrahlen berwirkten Kalomelabscheidung in der Ederschen Lösung. Ein Beitrag zur Dosimetrie. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 23:451 452, 1915-16.
- Seitz, Ludwig und Hermann Wintz. Unsere Methode der Röntgen-Tiefentherapie und ihre Erfolge. Urban und Schwarzenberg, Berlin, 1920.
- Shearer, John Sanford. X-ray Physics. In: U.S. Army (Hrsg.), X-ray Manual U.S. Army, S. 5 126. L. Middleditch Co., New York, 1917.
- Shimohigashi, Yoshinobu, Fujio Araki, Hirofumi Tominaga, Junichi Sakata, Keiichi Kawasaki, Nagisa Kanetake, Yuki Iwashita, Saori Yoshimura, Tamami Kawakami, Terunobu Ishihara, Tomoko Okuda, und Kasei Kogo. Angular dependence correction of matrixx and its application to composite dose verification. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 13(5):198 214, 2012.
- Siemens & Halske AG. Einrichtung für Strahlungsmessungen mit Ionisationskammer, vorzugsweise Röntgenstrahlen. *Patentschrift Nr. 362456*, *Deutsches Reich*, 7. Juli, 1920.

- Sievert, Rolf Maximilian. Eine Methode zur Messung von Röntgen, Radium-und Ultrastrahlung nebst einige Untersuchungen über die Anwendbarkeit derselben in der Physik und der Medizin. *Acta Radiologica*, Suppl. 14, 1932.
- Smith, Willoughby. Effect of light on selenium during the passage of an electric current. Nature, 7(173):303, 1873.
- Solomon, Iser. L'ionométrie radiologique. *Journal de radiologie et d'electrologie*, 29(5): 193 201, 1921.
- Solomon, Iser. Über die Wahl einer quantimetrischen Einheit. Strahlentherapie, 20:642 650, 1925.
- Szilard, Béla. Apparail pour la mesure de la quantite de rayons X. Le Radium, 7:223 224, 1910.
- Szilard, Béla. Über einen Meßapparat für Radioaktivität mit direkter Ablesung. Strahlentherapie, 4:728 733, 1914.
- Szilard, Béla. Über die absolute Meßung der Röntgen- und Gamma-Strahlen in der Biologie. Strahlentherapie, 5:742 771, 1915.
- Thomson, Joseph John und Ernest Rutherford. On the Passage of Electricity through Gases exposed to Röngtgen Rays. *Philosophical Magazine Series* 5, 42(258):392 407, 1896.
- Ullmann, Fritz. Enzyklopädie der technischen Chemie. Urban und Schwarzenberg, Berlin, 2. Auflage, 1928.
- Villard, Paul. Sur une proprieté des écrans flourescents. Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des sciences, 126:1414 1415, 1898.
- Villard, Paul. Instrument nouveau: Radioscléromètre. Archives d'électricité médicale, 16:236 – 238, 1908a.
- Villard, Paul. Instrument de mesure à lecture directe pour les rayons X. Archives d'électricité médicale, 16:692 699, 1908b.
- Voltz, Friedrich. Zur Frage der Härtemessung der Röntgenstrahlen auf photographischem Wege. *Physikalische Zeitschrift*, 16:306 311, 1915.
- Voltz, Friedrich. Röntgenstrahlen-Meßeinrichtungen und deren Vergleich. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 23:465 488, 1915-1916.

- Wachtel, Heinrich. Über die instrumentelle Bestimmung der Erythemgrenze statt der üblichen Messung der verabreichten Lichtmenge. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 23:248 257, 1915-1916.
- Walsham, Hugh. The seventy-ninth annual meeting of the British Medical Association. Proceedings of Sections. Section of Electrotherapeutics and Radiology. *The British Medical Journal*, 2:885 920, October 14 1911.
- Walter, Bernhard. Physikalisch-technische Mitteilungen. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 1:238 242, 1897-1898.
- Walter, Bernhard. Physikalisch-technische Mitteilungen. über die Becquerelstrahlen, eine den Röntgenstrahlen nahe verwandte Erscheinung. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 3:66 76, 1899-1900.
- Walter, Bernhard. Zwei Härteskalen für Röntgenröhren. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 6:68 74, 1902-1903.
- Walter, Bernhard. Über die Messung der Intensität der Röntgenstrahlen. Verhandlungen der Deutschen Röntgengesellschaft, 1:126 134, 1905.
- Walter, Bernhard. Zur Dosierungsfrage. Verhandlungen der Deutschen Röntgengesellschaft, 3:106 – 109, 1907.
- Walter, Bernhard. Das Milliampéremeter als Dosierungsinstrument. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 14:342 345, 1909-1910.
- Walter, Bernhard. Über das Bauersche Qualimeter. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 17:212 225, 1911.
- Walter, Bernhard. Über das Bauersche Qualimeter. (Zweite Mitteilung). Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 18:359, 1911-1912.
- Walter, Bernhard. Beugungsfransen an Spaltaufnahmen mit Röntgenstrahlen. Annalen der Physik, 380(18):184 194, 1924.
- Walter, Bernhard und Richard Pohl. Zur Frage der Beugung der Röntgenstrahlen. Annalen der Physik, 330(4):715 – 724, 1908.
- Walter, Bernhard und Richard Pohl. Weitere Versuche über die Frage der Beugung der Röntgenstrahlen. Annalen der Physik, 334(7):331 354, 1909.

- Wehnelt, Arthur Rudolph Berthold. Über eine Röntgenröhre mit veränderlichem Härtegrad und über einen neuen Härtemesser. In: Meyer, Stefan (Hrsg.), Festschrift Ludwig Boltzmann gewidmet zum sechzigsten Geburtstage 20. Februar 1904, S. 160 167. Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1904.
- Wels, Paul. Untersuchungen über die Brauchbarkeit des Sabouraud-Dosimeters. Strahlentherapie, 13:174 196, 1922.
- Wertheim-Salomonson, Johannes K. August. Milliampèremeter und Röntgenlicht. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 16:291 296, 1910-1911.
- Winawer, Bruno und St. Sachs. Energiemessungen an Röntgenstrahlen. *Physikalische Zeitschrift*, 16:258 264, 1915.
- Wintz, Hermann. Die wirksame Röntgenenergie in der Tiefentherapie und ihre Messung. Münchener medizinische Wochenschrift, 28:901 903, 1917.
- Wintz, Hermann und Walther Rump. Das Röntgenphotometer. Strahlentherapie, 22: 444 450, 1926.

Literaturverzeichnis

- Almond, Peter R., Peter J. Biggs, Bert M. Coursey, William F. Hanson, M. Saiful Huq, Ravinder Nath, und David W. O. Rogers. AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Medical Physics*, 26 (9):1847 1870, 1999.
- Boag, J.W. Ionization Chambers. In: Attix, Frank H., William C. Roesch, und Eugene Tochilin (Hrsg.), Radiation Dosimetry Volume II: Instrumentation. 2. Auflage, S. 1 72. Academic Press Inc., New York, 1968.
- Braun, Dietrich und Gerd Collin. 100 Jahre Bakelit. Chemie in unserer Zeit, 44:190 197, 2010.
- Bridgman, Percy Williams. Biographical Memoir of William Duane 1872-1935. Biographical Memoirs of the National Academy of Sciences, 18(2):23 41, 1936.
- Busch, Uwe und Werner Bautz. Pioniere der Medizinischen Physik Theophil Christen (1873–1920). Zeitschrift für Medizinische Physik, 15:59 60, 2005.
- Camilleri, Jean-Pierre und Jean Coursaget. *Pionniers de la radiothérapie*. EDP Sciences, Les Ulis Cedex A, 2005.
- Canavas, Constantin. Wie viel Computer steckt unter der Haut? Zur Geschichte der Patientensimulatoren. In: Fischer, Stefan, Erik Maehle, und Rüdiger Reischuk (Hrsg.), INFORMATIK 2009. Im Focus das Leben. Beiträge der 39. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V., 28.9. 2.10.2009, S. 802 809. Köllen Druck+Verlag GmbH, Bonn, 2009.
- Case, James T. Gottwald Schwarz 1880-1959. American Journal of Roentgenology, Radium Therapy and Nuclear Medicine, 82(1):148 149, 1959.
- DEPATISnet. Deutsches Patent- und Markenamt: Deutsches Patentinformationssystem. https://depatisnet.dpma.de/, 2014.

- Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 6800-2: Dosismessverfahren nach der Sondenmethode für Photonen- und Elektronenstrahlung Teil 2: Dosimetrie hochenergetischer Photonen- und Elektronenstrahlung mit Ionisationskammern. Beuth Verlag, Berlin, März 2008.
- Drosdowski, Günther, Paul Grebe, Rudolf Köster, und Wolfgang Müller. Duden Ethymologie: Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache. Bibliographisches Institut AG, Mannheim, 1963.
- Espacenet. European Patent Office: espacenet patent search. http://www.epo.org/searching/free/espacenet.html, 2014.
- Frame, Paul W. A history of radiation detection instrumentation. *Health Physics*, 87 (2):111 135, 2004.
- Frame, Paul W. Health Physics historical instrumentation collection. http://www.orau.org/ptp/museumdirectory.htm, Zugriff am 07.04.2013, 2012.
- Frühling, Susanne und Hermann Vogel. Die Röntgenpioniere Hamburgs: vom Selbstversuch zur medizinischen Fachdisziplin. ecomed, Landsberg, 1995.
- Gay, Peter. Memorial of Sir (William) Lawrence Bragg March 31, 1890-July 1, 1971.

 American Mineralogist, 59:408 411, 1974.
- Glasser, Otto A. The Evolution of Dosimeters in Roentgen Ray Therapy. *Radiology*, 37(2):221-227, 1941.
- Glasser, Otto A. Wilhelm Conrad Röntgen und die Geschichte der Röntgenstrahlen. Springer, Berlin, Heidelberg, 3. Auflage, 1995.
- Glessmer, Simone. Röntgen- und Becquerelstrahlen und die Farben. In: Wolfschmidt, Gudrun (Hrsg.), Farben in Kulturgeschichte und Naturwissenschaft. Begleitbuch zur Ausstellung in Hamburg 2010-2012 anläβlich des 50jährigen Jubiläums des IGN, S. 227 245. tredition, Hamburg, 2011a.
- Glessmer, Simone. Röntgen Rays, Becquerel Rays and Colours. In: Wolfschmidt, Gudrun (Hrsg.), Colours in Culture and Science. 200 Years Goethe's Colour Theory. Proceedings of the Interdisciplinary Symposium in Hamburg, Oct. 12-15, 2010, S. 435 453. tredition, Hamburg, 2011b.
- Heilmann, Hans-Peter. Radiation oncology: Historical development in Germany. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 35(2):207 217, 1996.

- Heilmann, Hans-Peter. Geschichte der deutschen Radioonkologie. Strahlentherapie und Onkologie, 188(Suppl. 3):220 226, 2012.
- Hoffmann, Dieter. Biographische Notizen zu Hermann Behnken. http://www.behnken-berger.de/de-DE/310/ueber-hermann-behnken, Zugriff am 12.06.2014, 2001.
- Holthusen, Hermann. G. Holzknecht. Klinische Wochenschrift, 10(50):2326 2327, 1931.
- Holthusen, Hermann. Zur Geschichte der Einheit Röntgen und der Möglichkeiten ihrer Weiterentwicklung. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, 89(12):746 752, 1959.
- IBA Dosimetry GmbH. MatriXX Evolution System The Solution for Rotational Treatment QA.
 - http://www.iba-dosimetry.com/sites/default/files/RT-BR-E-MatriXX-Evolution_Rev.2_0813_3.pdf, Zugriff am 08.09.2014, 2014.
- Jantsch, Marlene. Freund, Leopold, Röntgenologe. In: Historische Kommission bei der Bayrischen Akademie der Wissenschaften (Hrsg.), Neue Deutsche Biographie, Band 5, S. 413. Duncker und Humblot, Berlin, 1961.
- Janus, Friedrich. Ein Gedenkblatt für Dr. med. et phil. Th. Christen. *Strahlentherapie*, 12:917 920, 1921.
- Jennings, W. Alan. Evolution over the past century of quantities and units in radiation dosimetry. Journal of Radiological Protection, 27(1):5-16, 2007.
- Jäger, Robert. In memoriam Hermann Behnken. Strahlentherapie, 139(1):113–115, 1970.
- Johns, Harold Elford und John Robert Cunningham. *The Physics of Radiology*. Charles C Thomas Publisher, Springfield, Illinois, USA, 4. Auflage, 1983.
- Khan, Faiz M. The Physics of Radiation Therapy. Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, USA, 4. Auflage, 2009.
- Kneschaurek, Peter und Fridtjof Nüsslin. Entwicklung von Bestrahlungsmethoden und Geräten. Strahlentherapie und Onkologie, 188(Suppl. 3):245 252, 2012.
- Kogelnik, Horst Dieter. The history and evolution of radiotherapy and radiation oncology in Austria. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 35 (2):219 – 226, 1996.

- Krieger, Hanno. Strahlungsmessung und Dosimetrie. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- Krieger, Hanno. Strahlungsquellen für Medizin und Technik, 2. Auflage. Springer Verlag, Wiesbaden, 2013.
- Kütterer, Gerhard. Ach, wenn es doch ein Mittel gäbe, den Menschen durchsichtig zu machen wie eine Qualle! Books on Demand GmbH, Norderstedt, Germany, 2005.
- LH Gray Memorial Trust. Rays instead of scalpels. http://www.lhgraytrust.org/lhgraybiography.html, Zugriff am 06. Juli 2012, 2012.
- Lindell, Bo. Strålningens, radioaktivitetens och strålskyddets historia. Herkules storverk Del 3. Åren 1950-1966. Atlantis, Stockholm, 2003.
- Lindell, Bo. Geschichte der Strahlenforschung. Teil 1: Pandoras Büchse die Zeit vor dem Zweiten Weltkrieg. Universitätsverlag Aschenbeck & Isensee, Oldenburg, 2004.
- Lindell, Bo. Geschichte der Strahlenforschung. Teil 2: Das Damokelsschwert Jahrzehnt der Atombombe: 1940-1950. Universitätsverlag Aschenbeck & Isensee, Oldenburg, 2006.
- Loon, Ronny van und René van Tiggelen. Radiation Dosimetry In Medical Exposure A Short Historical Overview. http://www.radiologymuseum.be/images/PDFdocs/pdf/RADIATIONDOSIMETRY.pdf, Zugriff am 12.11.2014, 2004.
- Mould, Richard F. A century of X-rays and radioactivity in medicine with emphasis on photographic records of the early years. Institue of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia, 1995a.
- Mould, Richard F. The early years of radiotherapy with emphasis on x-ray and radium apparatus. *British Journal of Radiology*, 68:567 582, 1995b.
- Mukherjee, Siddhartha. The Emperor of all Maladies a Biography of Cancer. Scribner, New York, 2011.
- Nyary, Josef. Das Johanneum hier war die Wiege der Radiologie. *Hamburger Abend-blatt*, 24.05.2005, 2005.
- Österreichische Röntgengesellschaft. Die Geschichte der österreichischen Röntgengesellschaft.
 - http://www.oerg.at/index.php/geschichte.html, Zugriff am 03.04.2013, 2013.

- Phillips, David. William Lawrence Bragg. 31 March 1890-1 July 1971. Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, 25:74 143, 1979.
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Wasserkalorimeter (Primärnormal). http://www.ptb.de/de/org/6/ index.htm, Zugriff am 18.02.2013, 2005.
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Praktische Physik, Bände 1-3, Friedrich Kohlrausch, 24. Auflage (erschienen 1996 im Teubner-Verlag). http://www.ptb.de/cms/publikationen/buecher/der-kohlrausch-praktische-physik/praktische-physik-band-1.html, Zugriff am 17.12.2012, 2011.
- Physikalisch-Technische Werkstätten Freiburg GmbH. About PTW: Our History. http://www.ptw.de/history.html, Zugriff am 18.04.2013, 2012.
- Physikalisch-Technische Werkstätten Freiburg GmbH. Ionizing Radiation Detectors. Including Codes of Practice.

 http://www.ptw.de/1818.html?&no_cache=1&tx_bitptwdwlplus_pi1[id]=data_2 &tx_bitptwdwlplus_pi1[pdf]=50e0b68bfb5ed16f18611a5ab22251c2, Zugriff am 30.08.2014, 2014a.
- $\label{lem:physikalisch-Technische Werkstätten Freiburg GmbH. Octavius 4D Turnkey Solution for 4D Patient Plan Verification. \\ $http://www.ptw.de/1818.html?&no_cache=1&tx_bitptwdwlplus_pi1[id]=data_21&tx_bitptwdwlplus_pi1[pdf]=815fbe7b94b99a20605a90f786851141, Zugriff am 09.09.2014, 2014b. \end{tabular}$
- Pilz, Katrin. "Die Institutionalisierung der Radiologie in Wien 1895-1930. Eine Bildgeschichte". Diplomarbeit, Universiät Wien, 2010.
- Pychlau, Peter. Ein Beitrag zur Geschichte der Dosimeter. Medizinische Physik, S. 289 309, 1983.
- Quimby, Edith. The history of dosimetry in roentgen therapy. American Journal of Roentgenology, Radium Therapy and Nuclear Medicine, 54:688 703, 1945.
- Regal, Wolfgang und Michael Nanut. Komme mir keiner und sage, das geht nicht (Narrenturm 67). Ärzte Woche, (37): http://www.springermedizin.at/artikel/7696-komme-mir-keiner-und-sage-das-geht-nicht-narrenturm-67, 2006.
- Regato, Juan Angel del. Guido Holzknecht. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 2:1201 1208, 1977.

- Roth, Heinz D. A brief history of photoinduced electron transfer and related reactions. In: Mattay, Jochen (Hrsg.), *Photoinduced Electron Transfer I*, S. 1 – 19. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- Ruckensteiner, Ernst. Dem Gedenken von Robert Kienböck (1871-1953) und Josef Palugyay (1890-1953). Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen vereinigt mit Röntgenpraxis, 81(Supplement):20 23, 1954.
- Scherer, Eberhard. Chronik der Strahlentherapie: 1900-1960; ausgewählte Kapitel aus der deutschsprachigen radioonkologischen Literatur. Band 1: Der Zeitraum von 1900 bis 1925. Urban und Vogel, München, 1992.
- Scherer, Eberhard. Chronik der Strahlentherapie: 1900-1960; ausgewählte Kapitel aus der deutschsprachigen radioonkologischen Literatur. Band 2: 1926-1936. Urban und Vogel, München, 1994a.
- Scherer, Eberhard. Chronik der Strahlentherapie: 1900-1960; ausgewählte Kapitel aus der deutschsprachigen radioonkologischen Literatur. Band 3: 1937 bis 1960. Urban und Vogel, München, 1994b.
- Schweizerische Gesellschaft für Strahlenbiologie und Medizinische Physik. Dr. Theophil Friedrich Christen Arzt, Mathematiker, Physiker. http://www.sgsmp.ch/honmem/christen.htm, Zugriff am 20.03.2013, 2011.
- Sedlmayer, Felix. Geschichte der deutschen Radioonkologie. Strahlentherapie und Onkologie, 188(Suppl. 3):350 – 352, 2012.
- Serwer, Daniel Paul. The rise of radiation protection: science, medicine and technology in society, 1896-1935. Biomedical and Environmental Assessment Division, National Center for Analysis of Energy Systems, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, 1976.
- Taylor, Lauriston S. Organization for Radiation Protection. The Operation of the ICRP and NCRP 1928-1974. National Technical Information Service, Springfield, Virginia, 1979.
- Taylor, Lauriston S. X-Ray Measurement and Protection 1913-1964. The role of the National Bureau of Standards and the National Radiological Organizations. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1981.
- Tragl, Karl H. Chronik der Wiener Krankenanstalten. Böhlau Verlag, Wien, 2007.

- Tubiana, Maurice, Jean Dutreix, und Bernard Pierquin. One century of radiotherapy in France 1896-1996. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 35(2):227 242, 1996.
- Wagner, Jared P. und Kevin C. Chung. A Historical Report on Robert Kienböck (1871–1953) and Kienböck's Disease. *The Journal of Hand Surgery*, 30A(6):1117 1121, 2005.
- Willers, Henning, Hans-Peter Heilmann, und Hans-Peter Beck-Bornholdt. Ein Jahrhundert Strahlentherapie Geschichtliche Ursprünge und Entwicklung der fraktionierten Bestrahlung im deutschsprachigen Raum. Strahlentherapie und Onkologie, 174(2):53 63, 1998.
- Wolfschmidt, Gudrun. Von der Röhre zum Röntgenteleskop. In: Brachner, Alto und Gudrun Wolfschmidt (Hrsg.), Röntgenstrahlen: Entdeckung, Wirkung, Anwendung. Zum 100. Jubiläum der Entdeckung der X-Strahlen, S. 81 100. Deutsches Museum München, 1995.
- Wolfschmidt, Gudrun. Archiv der Geschichte der Naturwissenschaften. http://www.hs.uni-hamburg.de/DE/GNT/research/archiv.htm, Zugriff am 29.11.2013, 2013.

Abbildungsverzeichnis

4.1	Röhrenhärte und Qualität von Röntgenaufnahmen	39
4.2	Härtemesser nach Schilling	40
4.3	Schematische Darstellung der Walter-Skala	42
4.4	Die Benoist-Skala und ihr Röntgenbild	45
4.5	Schichtdickengraphen verschiedener Härteskalen	47
4.6	Kryptoradiometer nach Wehnelt	48
4.7	Spintermeter nach Béclère	50
4.8	Beziehung zwischen Röhrenspannung und paralleler Funkenstrecke	51
4.9	Elektrostatisches Voltmeter nach Bergonié	53
4.10	Skala des Bergonié-Voltmeters	54
4.11	Skala des Klingelfuß-Sklerometers	56
4.12	Bauersches Qualimeter	58
4.13	Villardsches Radiosklerometer	61
4.14	Wassertreppe zur Bestimmung der Halbwertschicht	63
4.15	Schemazeichnung des absoluten Härtemessers	65
4.16	Vergleich verschiedener Härteskalen (1912)	67
4.17	Vergleich verschiedener Härteskalen (1914)	68
4.18	Vergleich der Sklerometergrad-Halbwertschichtrelationen	69
5.1	Vergleich der Holzknecht-Chromoradiometerpastille mit der Farbskala .	76
5.2	Holzknecht-Skala zum Radiometer von Sabouraud und Noiré	86
5.3	Strahlengang im Röntgen-Photometer nach Wintz und Rump	92
5.4	Kienböck-Quantimeterkästchen mit Normalskala	95
5.5	Aufbau bei Messungen mit Kalmelogen-Röhrchen	101
5.6	Trübungsskala des Kalomel-Radiometers	102
5.7	Fürstenausches Intensimeter	111
5.8	Schiebelineal nach Christen zur Berechnung von Therapiedosen	117
5.9	Größeneinfluss bei Phantomen	119
5.10	Fotografie eines Wasserphantoms	120

5.11	Schemazeichnung eines Wasserphantoms	121		
6.1	Plattenkondensator zur Ionisationsmessung nach Perrin	126		
6.2	Villardsches Quantitometer	127		
6.3	Iontoquantimeter nach Szilard	129		
6.4	Schemazeichnung des Szilard-Iontoquantimeters	130		
6.5	Integral-Iontometer nach Christen			
6.6	Schemazeichnung der Ionisationskammer des RGS -Iontoquantimeters .	133		
6.7	Fingerhutkammer 1 von $Reiniger$, $Gebbert & Schall \dots \dots \dots$	135		
6.8	Fingerhutkammer 2 von Reiniger, Gebbert & Schall	135		
6.9	Konstruktionsbilder von Ionisationskammern aus verschiedenen Mate-			
	rialien	137		
6.10	Konstruktionsbild und Röntgenaufnahme einer Fingerhutkammer $$	138		
6.11	Ionisationskammer nach Holthusen	140		
6.12	Siemens-Druckluftkammer	142		
6.13	Druckluftkammer nach Behnken	143		
6.14	$Ionisations strom\mbox{-}Dichte\mbox{-}Abh\"{a}ngigkeit\ einer\ Druckluft kammer\ .\ .\ .\ .\ .$	143		
6.15	Wandwirkungs-Druck-Abhängigkeit einer Druckluftkammer	144		
6.16	Hammer-Dosimeter	145		
6.17	Standardgerät nach Küstner	147		
6.18	Eichstandgerät nach Küstner (1925)	148		
6.19	Eichstandgerät nach Küstner (1926)	149		
6.20	Referenzpräparat des Eichstandgeräts	150		
6.21	Strom-Spannungs-Beziehung der Druckluftkammer	152		
6.22	Eichblatt für Siemens-Kleinkammer	154		
6.23	Änderung der Kammermessung bei Dauerbetrieb	156		
7.1	Jodkonzentrationen der Vergleichslösungen des Jodoform-Radiometers .	169		
7.2	Abhängigkeit des biologischen Wirkungsfaktors von der Abschwächung	173		
7.3	$Graphische \ Darstellung \ verschiedener \ Erythemdosen \ in \ R\text{-}Einheiten \ . \ .$	182		
9.1	Übersicht: Entwicklung von Messverfahren und Maßeinheiten	204		

Adler, Erich 1889 – 1982, Arzt. 88, 95

Ahnesjö, Anders zeitgen. Physiker. 153

Albers-Schönberg, Heinrich Ernst 1865 – 1921, Arzt. 28, 34, 38

Almond, Peter R. zeitgen. Medizinphysiker. 159

Angelis, Cinzia d'zeitgen. Medizinphysikerin. 153, 156

Araki, Fujio zeitgen. Medizinphysiker. 161

Arsonval, Jacques-Arsène d' 1851 – 1940, Physiker. 114

Athanasiadis, G. fl. 1908. 110, 111, 113

Bachem, Albert J. 1888 – 1957, Physiker. 172, 173, 181

Baekeland, Leo Hendrik 1863 – 1944, Chemiker. 64

Barkla, Charles Glover 1877 – 1944, Physiker. 96, 112, 134

Bauer, Heinz 1879 – 1915, Ingenieur. 57–60, 67, 124, 201

Baumeister, Leonhard 1874–1953. 81

Bautz, Werner 1949 – 2008, Arzt. 29, 70

Beck-Bornholdt, Hans-Peter *1950, Physiker. 14, 78

Béclère, Antoine 1856 – 1939, Arzt. 50, 51, 128, 184, 186–188, 201

Becquerel, Antoine Henri 1852 – 1908, Physiker. 22, 23, 94

Beez, Carl fl. 1907, Ingenieur. 42, 43, 67, 201

Behnken, Hermann 1889 – 1945, Physiker. 30, 31, 123–125, 141–144, 151–154, 156, 160, 178–180, 183, 185, 187, 203, 206, 207

Belot, Joseph 1876 – 1953, Arzt. 45, 50, 51, 76, 174

Benoist, Louis *1856, fl. 1902, Physiker (?). 23, 37, 44–46, 49, 54, 67, 125, 201

Berger, Wilhelm 1875 – 1952, Ingenieur. 93

Bergonié, Jean Alban 1857 – 1925, Arzt. 52–55, 201

Bethe, Hans 1906 – 2005, Physiker. 196

Biggs, Peter J. zeitgen. Medizinphysiker. 159

Boag, John (Jack) Wilson 1911 – 2007, Physiker. 158

Bordier, Léonard Henry 1863 – 1942, Arzt. 72, 74, 75, 80, 81, 89, 166, 168, 169, 203

Bottler, Max fl. 1910, Chemiker. 64

Bragg, William Henry 1862 – 1942, Physiker. 187–189, 192–196, 198, 206

Bragg, William Lawrence 1890 – 1971, Physiker. 192

Braun, Dietrich *1930, Chemiker. 64

Bridgman, Percy Williams 1882 - 1961, Physiker. 176

Bruzau, Marc fl. 1928, Physiker. 195

Bucciolini, Marta zeitgen. Medizinphysikerin. 153, 156

Busch, Uwe *1960, Physiker. 29, 70

Büttner, Oskar 1863 – 1923, Arzt. 74

Camilleri, Jean-Pierre *1936, Arzt. 14

Canavas, Constantin *1956, Ingenieur, Wissenschafts- und Technikhistoriker. 118

Case, James Thomas 1882-1960, Arzt. 27, 28

Chofor, Ndimofor zeitgen. Medizinphysiker. 156

Christen, Theophil 1873 – 1920, Arzt, Mathematiker, Physiker. 29, 30, 33–37, 44, 45, 48, 49, 55, 56, 60, 62–70, 88, 96–98, 105–108, 111, 113, 116–120, 124, 128, 131, 132, 151, 201, 203, 206

Chung, Kevin C. zeitgen. Arzt. 27

Cirrone, G. A. Pablo zeitgen. Physiker. 153, 156

Clermont, Christian zeitgen. Medizinphysiker. 161

Collin, Gerd *1934, Chemiker. 64

Contremoulins, Gaston 1869 – 1950, Künstler, Röntgentechniker. 72, 90, 91, 203

Coursaget, Jean 1921 – 2011, Arzt. 14

Coursey, Bert M. zeitgen. Medizinphysiker. 159

Cronheim, Georg 1906 – 2004, Chemiker. 81

Cunningham, John Robert *1927, Physiker. 138

Curie, Marie Sklodowska 1867 – 1934, Physikerin. 126, 174

Curie, Pierre 1859 – 1906, Physiker. 174

Cuttone, Giacomo zeitgen. Physiker. 153, 156

Dam, Henry Jackson Wells 1856 – 1906, Journalist. 21, 82

Das, Indra J. zeitgen. Medizinphysiker. 153

Dessauer, Friedrich 1881 – 1963, Ingenieur. 63

Devillers, Magali zeitgen. Medizinphysikerin. 161

Ding, George X. zeitgen. Physiker. 153

Döderlein, Albert 1860 – 1941, Arzt. 179

Doelter, Cornelio 1850 – 1930, Mineraloge. 73, 74, 79

Dorn, Friedrich Ernst 1848 – 1916, Physiker. 104

Drault, Louis fl. 1900, Mechaniker. 50

Drosdowski, Günther 1926-2000, Germanist. 33

Duane, William 1872 – 1935, Physiker. 175, 176, 183

Dutreix, Jean *1916, Arzt. 14

Eder, Josef Maria Ludwig 1855 – 1944, Photochemiker. 99

Eisl, Anton fl. 1929, Physiker (?). 196

Esch, Ann van zeitgen. Medizinphysikerin. 161

Faraday, Michael 1791 – 1876, Experimentalphysiker. 20

Fowler, Gilbert John 1868 – 1953, Chemiker. 99

Frame, Paul W. zeitgen. Physiker. 15

Freund, Leopold 1868 – 1943, Arzt. 25, 26, 33, 72, 79–81, 108, 167, 168, 203

Fricke, Hugo 1892 – 1972, Physiker. 135, 186, 192, 194, 196

Friedrich, Walter 1883 – 1969, Physiker. 35, 88, 118, 120, 121, 124, 130, 132, 133, 135–138, 144, 146, 151, 153, 155, 157, 158, 176–179, 183, 203, 205

Frühling, Susanne zeitgen. Zahnärztin. 14, 28

Fuchs, Georg 1908 – 1986, Arzt. 25

Fujimoto, Shiho zeitgen. Arzt (?). 69

Fürstenau, Robert *1887, fl. 1925, Physiker. 72, 109–112, 124, 203

Gaiffe, George 1857 – 1943, Gerätehersteller. 114, 115

Galimard, Joseph *1860, fl. 1906, 80, 81, 89, 168, 169, 203

Gassmann, Albert fl. 1898, Arzt. 34

Gauß, Carl Joseph 1875 – 1957, Arzt. 170

Gay, Peter 1927 – 1985. 192

Geyser, Albert *1864, fl. 1909, Physiker. 75, 91

Giesel, Friedrich Oskar 1852 – 1927, Chemiker. 74

Gilray, J.W. fl. 1896. 109

Glasser, Otto A. 1895 – 1964, Physiker. 15, 21, 32, 75, 91, 114, 117, 126, 135, 137, 138, 175, 183, 186, 188, 192, 194, 196

Glocker, Richard 1890 – 1978, Physiker. 81, 82, 95, 116, 120, 121

Goldstein, Eugen 1850 – 1930, Physiker. 73, 74, 78

Grann, Richard fl. 1915, Physiker (?). 103, 110, 112, 113

Gray, Louis Harold 1905 – 1965, Physiker. 191–198, 206

Grebe, Leonhard Christian Friedrich 1883 – 1967, Physiker. 124, 139, 181–183

Grebe, Paul Ernst 1908-1987, Germanist. 33

Grossmann, Gustav 1878 – 1957, Physiker. 33–36, 134

Guilleminot, Edmé Hyacinthe 1869 – 1922, Arzt. 90, 91, 203

Günther, Ernst Gustav Paul 1892 – 1969, Physikochemiker. 81

Haenisch, Georg Fedor 1874 – 1952, Arzt. 21, 179, 180

Haga, Hermann 1852 – 1936, Physiker. 109

Hahn, Rudolf 1863 – 1934, Arzt. 34

Hammer, Wilhelm 1885 – 1945, Physiker. 144–146, 203

Hanson, William F. zeitgen. Medizinphysiker. 159

Harder, Dietrich *1930, Medizinphysiker. 156

Hardy, William Bate 1864 – 1934, Biologe, Biochemiker. 78, 79

Heidenhain, Lothar 1860 – 1940, Arzt. 66, 122

Heilmann, Hans-Peter *1935, Arzt. 14, 78

Henmi, Noriko zeitgen. Arzt. 69

Herweg, August Julius 1879 – 1936, Physiker. 177

Himstedt, **Franz** 1852 – 1933, Physiker. 109

Hirschmann, Alfred *1868, fl. 1905, Röntgenröhrenhersteller. 106

Hofbauer, Josef fl. 1966, Arzt. 25

Hoffmann, Dieter *1948, Physiker, Wissenschaftshistoriker. 30, 31

Holland, Charles Thurstan 1863 – 1941, Arzt. 187

Holthusen, Hermann 1886 – 1971, Arzt. 26, 124, 130, 134, 139, 140, 177, 188, 189, 205

Holzknecht, Guido 1872 – 1931, Arzt. 25, 26, 28, 33, 59, 66, 72, 74–78, 82–87, 90, 92–94, 103, 112, 113, 115, 119, 124, 164–166, 203

Hopwood, Frank Lloyd 1884 – 1954, Physiker. 189, 195

Horn fl. 1905, Mitarbeiter von Reiniger, Gebbert & Schall. 93

Horst, H.D von der fl. 1928, Chemiker (?). 81

Huq, Mohammed Saiful zeitgen. Medizinphysiker. 159

Hurmuzescu, Dragomir 1865 – 1954, Physiker. 23, 125

Huyskens, Dominique Pierre zeitgen. Medizinphysiker. 161

Immelmann, Max 1864 – 1923, Arzt. 109–113

Iori, Mauro zeitgen. Medizinphysiker. 161

Ishihara, Terunobu zeitgen. Medizinphysiker. 161

Ishii, Mie zeitgen. Physiker (?). 69

Ishii, Rie zeitgen. Physiker (?). 69

Iwashita, Yuki zeitgen. Medizinphysiker. 161

Jäger, Robert 1893 – 1987, Physiker. 30, 31, 185

Jantsch, Marlene 1917-1994, Ärztin, Medizinhistorikerin. 25, 26

Janus, Friedrich 1875 – 1951, Ingenieur. 30

Jennings, W. Alan zeitgen. Physiker. 15, 174

Johns, Harold Elford 1915 – 1998, Physiker. 138

Kanetake, Nagisa zeitgen. Medizinphysiker. 161

Kassabian, Mihran Krikor 1870 – 1910, Arzt. 75, 82, 166

Kawakami, Tamami zeitgen. Medizinphysiker. 161

Kawasaki, Keiichi zeitgen. Medizinphysiker (?). 161

Khan, Faiz Mohammad *1938, Medizinphysiker. 197, 198

Kienböck, Robert 1871 – 1953, Arzt. 25, 27, 33, 38, 39, 42, 52, 62, 63, 70–72, 74, 76–80, 82, 85, 87–90, 92–95, 97–99, 105, 112, 118, 119, 163–167, 169, 170, 201–203, 206

Kirstein, Friedrich 1880 – 1937, Arzt. 95, 96

Klieneberger, Joseph Carl 1876 – 1938, Arzt. 90

Klingelfuß, Friedrich Wilhelm 1859 – 1932, Ingenieur (?). 48, 54–57, 68, 201

Kneschaurek, Peter zeitgen. Medizinphysiker. 14

Knipping, Paul Karl Moritz 1883 – 1835, Physiker. 130

Kogelnik, Horst Dieter *1938, Arzt. 14, 25, 26, 78

Kogo, Kasei zeitgen. Arzt. 161

Köhler, Alban 1874 – 1947, Arzt. 72, 77, 104–108, 203

Kohlrausch, Friedrich 1840 – 1910, Physiker. 142, 177

Kölliker, Rudolf Albert von 1817 – 1905, Arzt. 21

Köster, Rudolf *1913, Germanist. 33, 186

Kösters, Wilhelm 1876 – 1950, Physiker. 186

Krieger, Hanno *1942, Physiker. 155, 159, 160, 207

Krönig, Bernhard 1863 – 1917, Arzt. 35, 118, 120, 121, 130, 132, 133, 135–138, 155, 157, 158, 176, 177, 183, 203, 205

Krüger, R. fl. 1913. 84, 85

Küpferle, Leopold 1877 – 1944, Arzt. 138

Küstner, Johannes (Hans) Reinhard Richard 1887 – 1946, Physiker. 35, 123–125, 137–139, 146–150, 154–157, 160, 162, 178–180, 186, 203

Kütterer, Gerhard *1938, Ingenieur. 14, 38, 41

Laue, Max von 1879 – 1960, Physiker. 130

Lenard, Philipp Eduard Anton 1862 – 1947, Physiker. 23, 139

Levy-Dorn, Max 1863 – 1929, Arzt. 105

Lindell, Bo Gustaf *1922, Physiker. 15

Londe, Albert 1858 – 1917, Fotograf. 163

Looe, Hui Khee zeitgen. Medizinphysiker. 156

Loon, Ronny van 1940-2012, Physiker. 128

Lüppo-Cramer, Hinricus 1871 – 1943, Photochemiker. 103

Mallet, Lucien 1885 – 1981, Arzt. 188

Martius, Heinrich 1885 – 1965, Arzt. 124, 139, 181–183

Martyn, George Herbert fl. 1913, Physiker (?). 96, 112

Mayer, Robert fl. 1915. 112

Mazzocchi, Silvia zeitgen. Medizinphysikerin. 153, 156

Meyer, Hans 1877 – 1964, Arzt. 85, 124

Mould, Richard Francis *1939, Physiker. 14, 75, 89, 175

Moyers, Michael F. zeitgen. Medizinphysiker. 97

Mukherjee, Siddhartha zeitgen. Arzt. 24

Müller, Wolfgang zeitgen. Germanist. 33

Müller, Kurt 1867 – 1919, Arzt. 74

Nanut, Michael zeitgen. Arzt. 26

Nath, Ravinder zeitgen. Medizinphysiker. 159

Nogier, Th. 1874 – 1944, Arzt. 84, 85

Noiré, Henri 1878 – 1937, Arzt. 33, 72, 77, 82, 83, 85–87, 112, 115, 165, 166, 170, 203

Nüsslin, Fridtjof zeitgen. Medizinphysiker. 14

Nyary, Josef *1944, Journalist. 28

Okuda, Tomoko zeitgen. Arzt. 161

Onori, Sandro zeitgen. Medizinphysiker. 153, 156

Owen, Edwin Augustine 1887 – 1973, Physiker. 189

Pacilio, Massimiliano zeitgen. Medizinphysiker. 153, 156

Palmans, Hugo zeitgen. Physiker. 153

Parzer-Mühlbacher, Alfred *1868, fl. 1908. 40, 41, 201

Perreau, Eugène François *1868, fl. 1899. 109

Perrin, Jean-Baptiste 1870 – 1942, Physiker. 23, 125, 126, 141, 173, 203

Perthes, Georg Clemens 1869 – 1927, Arzt. 62, 64, 97, 118, 119

Phillips, Charles Edmund Stanley 1871 – 1945, Experimental Physiker. 187–189

Phillips, David Chilton 1924 – 1999, Biologe. 192

Pierquin, Bernard 1920 – 2011, Arzt. 14

Pilz, Katrin zeitgen. Historikerin. 26

Pohl, Robert Wichard 1884 – 1976, Physiker. 29

Poppe, Björn zeitgen. Medzinphysiker. 156

Porter, Alfred William 1863 – 1939, Physiker. 189

Pychlau, **Peter** fl. 1959, †1983, Physiker. 15

Quimby, Edith Smaw Hinkley 1891 – 1982, Physikerin. 15

Raffaele, Luigi zeitgen. Medizinphysiker. 153, 156

Regal, Wolfgang zeitgen. Arzt. 26

Regato, Juan Angel del 1909 – 1999, Arzt. 26

Richer, Paul Marie Louis Pierre 1849 – 1933, Anatom, Künstler. 163

Rogers, David W. O. zeitgen. Medizinphysiker. 159

Roloff, Friedrich Max *1870, fl. 1908, Physikochemiker. 100

Röntgen, Anna Bertha 1839 – 1919. 32

Röntgen, Wilhelm Conrad 1845 – 1923, Physiker. 18, 21, 23, 32, 37, 38, 43, 44, 82, 104, 105, 178, 201

Roth, Heinz D. *1936, Chemiker. 73

Rothacker, O. fl. 1923, Physiker (?). 81, 82, 95, 120, 121

Ruckensteiner, Ernst 1899 – 1970, Arzt. 25, 27

Ruhmer, Ernst Walter 1878 – 1913, Physiker. 109

Rump, Walther 1878 – 1965, Physiker. 72, 91, 92, 124, 203

Russ, Sidney 1879 – 1963, Physiker. 188, 189

Rutherford, Ernest 1871 – 1937, Physiker. 104, 126

Rzewuski, Alexander 1861 – 1943, Arzt. 46, 49, 201

Sabouraud, Raymond 1864 – 1938, Arzt. 33, 72, 77, 82, 83, 85–87, 112, 115, 165, 166, 170, 203

Sachs, St. fl. 1915, Mitarbeiter der Veifa-Werke Frankfurt. 184

Sadler, Charles Albert 1886 – 1921, Physiker. 96, 112, 134

Sakata, Junichi zeitgen. Arzt. 161

Schenkel, Hans 1869 – 1926, Mathematiker, Physiker. 34

Scherer, Eberhard 1918 – 2007, Arzt. 14

Schilling, Theodor Rudolf 1875 – 1921, Arzt. 38, 40, 201

Schmidt, Hans Erwin 1874 – 1919, Arzt. 82–85, 87, 88, 166, 169, 170

Schönleber, W. fl. 1923, Physiker (?). 81, 82, 95, 120, 121

Schütze, Johannes 1875 – 1938, Arzt. 109–113

Schwarz, Gottwald 1880 – 1959, Arzt. 25, 27, 28, 72, 95, 99–104, 167, 203

Sedlmayer, Felix zeitgen. Arzt. 14

Seemann, Hugo 1884 – 1974, Physiker. 138

Seitz, Ludwig 1872 – 1961, Arzt. 170–172

Serwer, Daniel Paul *1945, Physiker. 15, 30, 75, 183, 190

Shearer, John Sandford 1865 – 1922, Physiker. 51, 52, 117

Shimohigashi, Yoshinobu zeitgen. Medizinphysiker. 161

Sievert, Rolf Maximilian 1896 – 1966, Physiker. 15, 162

Sirk, Hugo Victor Carl 1881 - 1959, Physiker. 103, 104

Smith, Willoughby 1828 – 1891, Ingenieur. 108

Solomon, Iser 1880 – 1939, Arzt. 184, 185, 188

Stelljes, Tenzin Sonam zeitgen. Medzinphysiker. 156

Szilard, Béla 1884 – 1926, Physiker. 128–130, 132, 151, 171, 174–176, 203

Szilárd, Léo 1898 – 1964, Physiker. 128

Taylor, Lauriston S. 1902 – 2004, Physiker. 15, 190

Thomson, Joseph John 1856 – 1940, Physiker. 104, 126

Tiggelen, René van zeitgen. Arzt. 128

Tominaga, Hirofumi zeitgen. Medizinphysiker. 161

Tragl, Karl Heinz *1936, Arzt. 28

Tubiana, Maurice 1920 – 2013, Arzt, Physiker. 14

Ullmann, Fritz 1875 – 1939, Chemiker. 149

Villard, Paul 1860 – 1934, Physiker, Chemiker. 18, 60, 61, 82, 90, 126–128, 174–176, 201, 203

Vogel, Hermann *1942, Arzt. 14, 28

Voltz, Friedrich 1891 – 1938, Physiker. 36, 113, 114

Wachtel, Heinrich fl. 1915. 170

Wagner, Jared P. zeitgen. Arzt. 27

Walsham, Hugh 1856 – 1924, Arzt. 46

Walter, Bernhard 1861 – 1950, Physiker. 28–30, 33, 34, 37, 41–43, 46, 49, 58–60, 67, 72, 114–116, 201

Wehnelt, Arthur Rudolph Berthold 1871 – 1944, Physiker. 47–49, 67, 201

Weissenberg, Carl 1893 – 1976, Physiker. 113, 119

Wels, Paul 1890 – 1963, Arzt, Pharmakologe, Strahlenbiologe. 85, 138

Wertheim-Salomonson, Johannes Karel August 1864 – 1922, Arzt. 116, 124

Wheatstone, Charles 1802 – 1875, Physiker. 109, 110

Willborn, Kay zeitgen. Arzt und Medizinphysiker. 156

Willcock, Edith Gertrude 1879 – 1953, Biochemikerin. 78, 79

Willers, Henning *1969, Arzt. 14, 78

Williams, Francis Henry 1852 – 1936, Arzt. 91

Winawer, Bruno 1883 – 1943, Physiker. 184

Wintz, Hermann 1887 – 1947, Arzt. 70, 72, 91, 92, 124, 171, 172, 201, 203

Wolfschmidt, Gudrun *1951, Astronomin, Wissenschaftshistorikerin. 14, 29

Yoshida, Akira zeitgen. Arzt. 69

Yoshimura, Saori zeitgen. Medizinphysiker (?). 161

Index

Absoluter Härtemesser, 63–65, 70, 151, 201 Absorptionskoeffizient, 62, 113, 152, 193 Académie des Sciences, 22, 23, 90, 114, 163 American Association of Physicists in Me-	70, 106, 123–125, 145, 178–181, 183, 185, 186, 200, 205 Deutsches Röntgenmuseum, 180 Dichte, 35, 36, 103, 142, 143, 178, 179, 193,
dicine, 159	196
American Journal of Roentgenology, 180 American Roentgen Ray Society, 175 Archives d'électricité médicale (Zeitschrift), 54	DIN-Norm, 71, 157–159 Dosierung, 12, 25, 27, 29, 34, 35, 52, 59, 77, 81, 85, 87, 91, 104–108, 114– 118, 128, 164, 171, 173, 185, 187
Bakelit, 64, 65, 200 Bariumplatincyanür, 18, 21, 22, 72, 82, 84, 85, 88–91, 165, 166, 202, 203 Bauer-Qualimeter, 57–60, 67, 201 Beez-Skala, 43, 67, 201 Benoist-Skala, 44–47, 49, 54, 55, 60, 67, 68, 108, 201 Benoist-Walter-Skala, 46, 47, 49, 58, 67, 201 Bestrahlungsdauer, 25, 35, 73, 79–81, 85, 107, 113, 117, 118 Bordier-Radiometer, 72, 84, 85, 89, 90, 166,	Dosimetrie, 13, 15, 17, 18, 24, 30, 32, 34, 91, 96, 117, 124, 141, 145, 151, 185, 188, 192, 197, 202, 205–207 Dosis, 13, 19, 26, 29, 33, 35, 36, 59, 79–81, 85, 87, 88, 93, 97, 102–104, 106, 107, 112, 113, 115–118, 134, 146, 150, 164–168, 170, 176–180, 183–185, 198, 200, 202, 204–206 Dosisleistung, 111, 153, 154, 156 Dosisquotient, 30, 70, 71 Druckluftkammer, 141–144, 151–153, 160, 161, 178, 180, 203
203 Bragg-Gray-Bedingungen, 193 Bragg-Gray-Theorie, 162, 191, 192, 197 Bremsvermögen, 192, 193, 196–198 British X-ray Unit Committee, 189 Bureau International des Poids et Mesures, 185	E (Einheit), 175 e (Einheit), 174, 177–179 Edersche Lösung, 99, 100, 103 Eichblatt, 153, 154, 157, 161 Eichstandgerät nach Küstner, 148–150, 155, 160, 203 Eichung, 91, 108, 148, 149, 151, 154, 155,
CGS-System, 174 Chromoradiometer, 26, 72, 74–78, 80, 102, 108, 115, 165, 202, 203 Comptes rendus hebdomadaires des scéances de l'Académie des Sciences, 54, 114 Conférence Générale des Poids et Mesures, 186	157 Elektrode, 127, 128, 132, 133, 135–138, 140, 142, 143, 146–149, 158 Elektrometer, 23, 60, 121, 127, 129, 130, 132, 140, 144, 146, 147, 150, 154, 155, 158, 162, 174 Elektroskop, 23, 125, 128, 172, 174, 181, 184 elektrostatische Einheit, 146, 174, 175, 177,
Deutsche Röntgengesellschaft, 16, 29, 30,	179, 180, 189

INDEX 249

elektrostatisches Voltmeter, 52–55, 201 Energiedosis, 33, 191 Erwärmung der Röntgenröhre, 72, 104, 105 Erythemdosis, 87, 115, 165, 169–171, 182, 183 F (Einheit), 111, 112

F (Einheit), 111, 112 Farbveränderung, 22, 72, 73, 78, 79, 82, 83, 90, 124, 151

Fasskammer, 144, 149

Fingerhutkammer, 134, 135, 137, 138, 146, 153, 154, 160, 161, 203

Flächenenergie, 35, 36, 88, 111

Fluoreszenz, 21, 39, 72, 82, 83, 90–92, 134, 203

Fluoreszenzschirm, 23, 27, 37, 39, 41, 43–48, 64, 82, 83, 86, 91, 92, 164, 200, 202

Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen (Zeitschrift), 16, 28, 29, 58, 59, 78, 84, 85, 110, 124, 178, 180, 181, 199

Fotopapier, 94, 96, 112, 166, 202, 206 Fotoplatte, 22, 23, 27, 92–94, 112, 115, 164, 165

Fürstenausches Intensimeter, 72, 109–111, 113, 114, 203

Galvanometer, 175

Göttinger Laboratorium für Medizinische Physik, 123, 146, 179

H (Einheit), 75, 83, 90, 102, 103, 112, 165, 166, 174

Halbwertschicht, 62–70, 88, 96, 98, 99, 108, 113, 131, 134, 140, 200

Hammer-Dosimeter, 145, 203

Härtemesser nach Schilling, 40, 201

Hauteinheitsdosis, 87, 116, 164, 165, 171–173, 181, 182, 187

Hauterythem, 105, 163, 164, 169–173, 187, 208

Hautreaktion, 18, 27, 87, 89, 103, 163–167, 170, 171, 181, 182

HED (Einheit), 91, 164, 172, 173, 181–183 Hohlraumtheorie, 13, 19, 36, 191, 192, 195, 198, 206 I (Einheit), 168 IBA Dosimetry, 161 Institut Curie, 176

Integral-Iontometer, 30, 131, 132, 203 Intensität, 23, 34–36, 41, 60–62, 64, 66, 79, 81, 82, 88, 91, 92, 97, 104, 109–111, 113–115, 130, 152, 155, 171, 172

International Atomic Energy Agency, 185 International Commission on Radiation Units and Measurements, 12, 18, 185, 189

International Commission on Radiological Protection, 190

International X-Ray Unit Committee, 12, 189

Internationaler Kongress für medizinische Elektrologie und Radiologie, 75, 192

Internationaler Radiologiekongress, 18, 28, 183, 187, 189, 192, 205

Ionendosis, 176, 191

Ionisationskammer, 13, 27, 30, 34, 73, 120, 121, 124, 126, 128–134, 136–142, 144–146, 148, 151, 153–157, 160–162, 171, 175, 177, 181, 182, 184, 188, 191, 194, 202, 205, 206

Ionisationsstrom, 142, 143, 153, 154, 176, 194, 206

Iontoquantimeter, 128–130, 132, 133, 136, 153, 171, 172, 174–176, 203

Jodoform, 25, 72, 78–81, 167–169, 203 Jodzahl (Einheit), 80, 167

k.k. Gesellschaft der Aerzte, 77, 79 Kalom (Einheit), 102, 103, 167 Kalomel, 28, 72, 99–103, 167, 203

Kammer-Wandmaterial, 133, 134, 136–139, 151, 153, 177, 193, 194

Kammergröße, 139–141, 151

Kerze (Einheit), 84, 111

Kienböck-Quantimeter, 27, 88, 93–98, 151, 166, 202, 203, 206

Kondensator, 23, 57, 60, 125, 126, 129, 133, 140, 142, 147, 148, 176

Korrektionsfaktor, 156–159, 161

Kryptoradiometer, 47-49, 67, 201

Leitfähigkeit, 103, 108, 180

250 INDEX

Sättigungsspannung, 152 Luftdruck, 23, 141, 142, 144, 149, 152, 178– 180, 205 Seifert & Co., 42 Sekundärelektronen, 133, 134, 139–141, 144, Megamegaion (Einheit), 175, 176 189, 192, 193, 197, 205, 207 Milliampèremeter, 57, 59, 72, 114–116 Selektive Absorption, 96, 112, 113, 134, 151, Münchener medizinische Wochenschrift (Zeit-200 schrift), 104 Selen, 33, 72, 104, 108–114 Siemens & Halske, 141, 142, 153, 154 Nachfarben, 73, 74, 77, 80, 82 Skiameter, 40–42, 113, 201 Nature (Zeitschrift), 108 Sklerometer nach Klingelfuß, 55–57, 67, 68, parallele Funkenstrecke, 50–52, 117, 201 201 Phantom, 40, 73, 98, 118, 119, 121, 122, Spintermeter, 50, 51 200, 202 Standardgerät nach Küstner, 147, 148, 203 Phantommaterial, 70, 118, 119 Standardisierung, 12, 13, 15, 18, 19, 73, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 141 123-125, 164, 176, 178, 180, 185-Physikalisch-Technische Reichsanstalt, 30, 187, 191, 200, 204–207 31, 123, 125, 141, 178, 179, 185, Strahlenschaden, 26, 38, 108, 163 186, 205, 207 Strahlenschutz, 14, 15, 190 Physikalisch-Technische Werkstätten Frei-Strahlentherapie (Zeitschrift), 14, 16, 29, burg, 144, 160, 206 125, 199 Physikalische Zeitschrift, 110 Streustrahlung, 70, 183, 202 Système international d'unités, 11 Qualitätsindex, 30, 71, 157, 200, 201, 206 Quantitometer nach Villard, 18, 127, 128, Teinte B (Einheit), 83–85, 87, 88, 112, 165, 174, 203 166, 170 Telegraph Construction Company, 108 R (Einheit), 91, 125, 150, 179–186, 189, Temperatur, 23, 94, 96, 103–105, 107, 108, 205, 207 113, 142, 149, 151, 178–180, 189 r (Einheit), 189 Tiefendosis, 27, 70, 97–99, 118 R (Solomonsche Einheit), 184–186, 188 Tierfellnaevus, 25 Radioaktivität, 12, 18, 22, 23, 92, 128, 199 Trübung, 28, 101–103, 167 Radiosklerometer nach Villard, 60, 61, 127, 201 Veifa-Werke, 184 Radium, 27, 61, 78, 79, 82, 90, 94, 149, 150, Versammlung deutscher Naturforscher und 174, 184–186, 188, 189, 205 Ärzte, 76, 77 Reiniger, Gebbert & Schall, 29, 49, 64, 66, 93, 100, 117, 131–133, 135, 136, 175, Walter-Skala, 28, 42, 43, 46, 47, 67, 68, 201 206 Wasserkalorimetrie, 141, 157 Wasserphantom, 71, 120, 121, 202 Röntgenröhre, 14, 28, 29, 33, 38, 39, 41, 45, 49–52, 54, 55, 58, 63, 65, 70, Wiener klinische Rundschau (Zeitschrift), 72, 92, 104–106, 115, 139, 146, 155, 75 156, 160, 163, 164, 167, 170, 200, x (Einheit), 94, 98, 112, 166, 167 202, 206 Royal Society of London, 78 Zeitschrift für Technische Physik, 142, 179 Rzewuski (Firma), 49 Zinksilikat, 72, 91, 202 Sabouraud-Noiré-Radiometer, 82, 85–89, 151,

166, 175, 203

Abkürzungsverzeichnis

AAPM American Association of Physicists in Medicine

BIPM Bureau International des Poids et Mesures

CGS Centimetre-Gram-Second-Einheitensystem

DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DRG Deutsche Röntgengesellschaft

HED Hauteinheitsdosis

IAEA International Atomic Energy Agency

ICRP International Commission on Radiological Protection

ICRU International Commission on Radiation Units and Measurements

k.k. kaiserlich-königlich

PTB Physikalisch-Technische Bundesanstalt

PTR Physikalisch-Technische Reichsanstalt

PTW Physikalisch-Technische Werkstätten Freiburg

RGS Reiniger, Gebbert & Schall

RöFo Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen

SI Système international d'unités

Liste der aus dieser Dissertation hervorgegangenen Vorveröffentlichungen

- Glessmer, Simone. Röntgen- und Becquerelstrahlen und die Farben. In: Wolfschmidt, Gudrun (Hrsg.), Farben in Kulturgeschichte und Naturwissenschaft. Begleitbuch zur Ausstellung in Hamburg 2010-2012 anlässlich des 50jährigen Jubiläums des IGN, S. 227-245. tredition, Hamburg, 2011.
- Glessmer, Simone. Röntgen Rays, Becquerel Rays and Colours. In: Wolfschmidt, Gudrun (Hrsg.), Colours in Culture and Science. 200 Years Goethe's Colour Theory. Proceedings of the Interdisciplinary Symposium in Hamburg, Oct. 12-15, 2010, S. 435-453. tredition, Hamburg, 2011.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Mein Dank gilt vor allem meinen Gutachtern, Frau Prof. Dr. Gudrun Wolfschmidt, Herrn Prof. Dr. Constantin Canavas und Herrn Prof. Dr. Florian Grüner, für die Übernahme der Betreuung sowie die hilfreiche Unterstützung.

Ebenso danke ich den Mitarbeitern der Bibliothek Mathematik und Geschichte der Naturwissenschaften sowie der Ärztlichen Zentralbibliothek des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf, die mir immer wieder Material aus den hintersten Winkeln der Archive hervorgeholt haben, sowie Monika Radau vom Deutschen Röntgenmuseum und Florian Schneider von der Deutschen Röntgengesellschaft.

Zusätzlich danke ich dem Strahlenzentrum Hamburg für die Ermöglichung eines flexiblen Zeitmanagements sowie meinen Arbeitskolleginnen und -kollegen und Freunden für konsequente Nachfragen nach dem Status dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie: meinen Schwestern, meinem Mann und insbesondere meinen Eltern, die mich stets ermutigt und tatkräftig unterstützt haben.

Eidesstattliche Versicherung
Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.
Hamburg, den 3. Februar 2015
Simone Gleßmer-Junike