
Walter Beier

Wilhelm Conrad Röntgen

Biografien hervorragender Naturwissenschaftler, Techniker und Mediziner Band 78

1985 BSB B. G. Teubner Leipzig

Abschrift und LaTeX-Satz: 2023

<https://mathematikalpha.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Röntgen und die Physik der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts	3
2	Röntgen als Schüler und Student	6
2.1	Frühe Kindheit in Lennep	6
2.2	Röntgens Schulzeit	7
2.3	Studium in Zürich	8
2.4	Begegnung mit August Kundt	10
3	Röntgen als Physiker	13
3.1	Mit 30 Jahren Professor für Physik und Mathematik	13
3.2	Berufung nach Gießen	14
3.3	Bahnbrechende Experimente	15
3.4	Wieder in Würzburg	19
4	Die Entdeckung einer neuen Art von Strahlen	21
4.1	Ein neues Arbeitsgebiet	21
4.2	Die Entdeckung der X-Strahlen	23
4.3	Die Welt horcht auf	29
4.4	Ehrungen über Ehrungen	32
4.5	Röntgens Entdeckung aus heutiger Sicht	34
5	München 1900-1923	40
5.1	Die Münchener Zeit	40
5.2	Röntgens letzte Jahre	47
6	Das Erbe	50
6.1	Röntgenstrahlen - eine physikalische Erscheinung voller Überraschungen	50
6.2	Strahlenschutz - ein weltweites Gebot	56
6.3	90 Jahre Anwendung der Röntgenstrahlen in der medizinischen Diagnostik	61
7	Chronologie	66
8	Literatur	68

1 Röntgen und die Physik der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts



1 Wilhelm Conrad Röntgen (27. 3. 1845-10. 2. 1923) (etwa 1896 aufgenommen)

Wilhelm Conrad Röntgen wurde in der Mitte eines Jahrhunderts der triumphalen Fortschritte von Wissenschaft und Technik geboren. In diesem 19. Jahrhundert wurde nicht nur die Eisenbahn, das Auto und die Photographie erfunden, sondern es war gleichzeitig das Jahrhundert, in dem Otto Lilienthal seine ersten 15 Meter in der Luft durchmessen hat und der Welt bewies, dass der Mensch fliegen kann.

Nicht zuletzt ist dieses Jahrhundert die Zeit großartiger physikalischer Entdeckungen, zu denen Röntgen die Entdeckung einer neuen Art von Strahlen hinzufügen konnte.

Die Geburt Röntgens im Jahre 1845 fällt in eine Zeit, in der eine der eindrucksvollsten Leistungen der Wissenschaft des 19. Jahrhunderts, die Ausdehnung des Energiebegriffes auf die ganze Physik erfolgte.

Für diese Erweiterung des Energiebegriffes über die Mechanik hinaus waren folgende in der Zeit von 1820 bis 1831 gemachten Entdeckungen besonders wichtig: beim Licht die Wiederaufnahme der Wellenvorstellung durch Thomas Young und ihre Vollendung durch Auguste Jean Fresnel, bei der Elektrizität die Erforschung der elektrischen Induktion und die Einführung des Begriffes der magnetischen Feldlinien durch Michael Faraday, der auch die Grundgesetze der Elektrolyse aufstellte und die Bezeichnung der Elektroden als Anode und Kathode einführte, und beim Magnetismus die durch Hans Christian Oerstedt 1820 in großer Aufmachung demonstrierte Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom.

Der Gymnasiallehrer Georg Simon Ohm hatte 1827 in Köln als erster den elektrischen Leitungswiderstand und dessen Einfluss auf die Stromstärke entdeckt. Friedrich Mohr stellte 1837 in einem unbeachtet gebliebenen Aufsatz fest, dass das Agens „Kraft“, wie damals die Energie noch genannt wurde, als Bewegung, chemische Affinität, Kohäsion, Elektrizität, Licht, Wärme und Magnetismus hervortreten könne und aus jeder dieser Erscheinungsarten die übrigen hervorgebracht werden können.

Zu der gleichen Erkenntnis der Äquivalenz von Chemischer Energie, Wärme und Arbeit war

1842 Justus v. Liebig bei seinen Studien über die Aufrechterhaltung der Körperwärme und der Hervorbringung von Kraft, d. h. Energie, durch Nahrungsaufnahme und Atmung bei Tieren gelangt.

Unmittelbar nach Liebigs Abhandlung veröffentlichte der Arzt Julius Robert Mayer seine Behauptung über die Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit. Er berechnete das mechanische Wärmeäquivalent aus den spezifischen Wärmen der Luft bei konstantem Druck und bei konstanter Temperatur.

Der englische Bierbrauer James Prescott Joule, nach dem die heutige Maßeinheit der Energie im Internationalen Maßsystem benannt ist, maß 1842 dieses Äquivalent auf mehrere sehr verschiedene Weisen und gab so dem Satz von der Äquivalenz von Wärme und Arbeit eine sichere experimentelle Grundlage.

Schließlich hat der junge Militärarzt und geniale Physiker Hermann Helmholtz den Begriff der Energie für die einzelnen Gebiete der Physik formelmäßig gefasst und die Möglichkeit geschaffen, mit ihm exakt zu rechnen.

Es war somit eine Zeit der stürmischen Entwicklung der physikalischen Wissenschaft, in die Röntgen hineingeboren wurde.

Es war aber zugleich auch eine Zeit, in der physikalische Entdeckungen fast unmittelbar ihre technische Anwendung fanden.

Physik und Technik befruchteten sich in einer bis dahin nicht gekannten Art und Weise.

Als der dreijährige Röntgen 1848 mit seinen Eltern seinen Geburtsort Lennep im Bergischen Land verlässt, um in das holländische Apeldoorn überzusiedeln, findet sich Werner v. Siemens, der als junger preußischer Leutnant während einer Festungshaft die elektrische Vergoldung erfand, mit dem Mechaniker Halske zusammen und führt im Auftrag der preußischen Regierung den Bau einer Telegraphenlinie von Frankfurt nach Berlin durch.

Hierbei trat die Frage nach der Berechnung von Leitungsnetzen auf, die Robert Kirchhoff 1849 mit der Aufstellung seiner Maschenregeln beantwortete. Schon vorher (1843) hatte Wheatstone das Verzweigungsgesetz für seine Brückenschaltung zur Bestimmung von elektrischen Widerständen angegeben.

Röntgens Schulzeit in Apeldoorn und in Utrecht fällt in die Zeit der Entwicklung der Dynamomaschine, an der Siemens führend beteiligt war.

Als Röntgen im Jahre 1865 als Gasthörer die Fächer Mathematik, Physik, Chemie, Zoologie und Botanik an der Universität zu Utrecht belegte, dienten die nach dem Glasbläser Heinrich Geißler benannten Röhren, die zunächst als Spielzeug auf den Markt kamen, bereits als Instrument für ein neues physikalisches Forschungsgebiet, der Elektrizitätsleitung in Gasen, welches in den nächsten Jahrzehnten viele bedeutende Physiker faszinieren sollte.

Diese länglichen Glasgefäße mit eingeschmolzenen Elektroden waren mit Gas gefüllt, das unter geringem Druck stand, und wurden an einen Funkeninduktor angeschlossen. Bei Stromdurchgang zeigten sie Leuchterscheinungen, ähnlich denen unserer heutigen Glimmlampen.

Am wenigsten hat wohl Röntgen zu dieser Zeit daran gedacht, dass die Beobachtung der Leuchterscheinungen in einer Geißlerschen Röhre ihn zu der Entdeckung einer neuen Art von Strahlen führen wird.

Bis dahin jedoch war es ein weiter Weg, den der Student des Maschinenbauwesens an der Eidgenössischen polytechnischen Schule in Zürich und spätere Professor der Physik, der nie ein Reifezeugnis erworben hatte und auf Empfehlung Heinrich Friedrich Webers als Professor der Physik und Mathematik an die Landwirtschaftliche Akademie zu Hohenheim in Württemberg

berufen wurde, gehen musste.

Dass Röntgen ihn gehen konnte, verdankt er seiner Begabung, seinem unermüdlichen Arbeitseifer und nicht zuletzt einer Reihe hervorragender Wissenschaftler, die seine Lehrer waren. Zu ihnen gehörte August Kundt, dem 1866 der Nachweis stehender akustischer Wellen in einem Glasrohr mit Hilfe der nach ihm benannten Staubfiguren gelang.

Feiner Staub ordnet sich in den Schwingungsknoten in eigentümlich geschichteten Häufchen an, so dass aus dem Abstand zweier aufeinander folgender Häufchen die halbe Schallwellenlänge bestimmt werden kann.

Mit Kundt begann Röntgen seinen Weg als Experimentalphysiker, mit ihm. ging er auch 1870 nach Würzburg, wo Röntgen im Dezember 1895 seine neue Art von Strahlen entdeckte.

2 Röntgen als Schüler und Student

2.1 Frühe Kindheit in Lennep

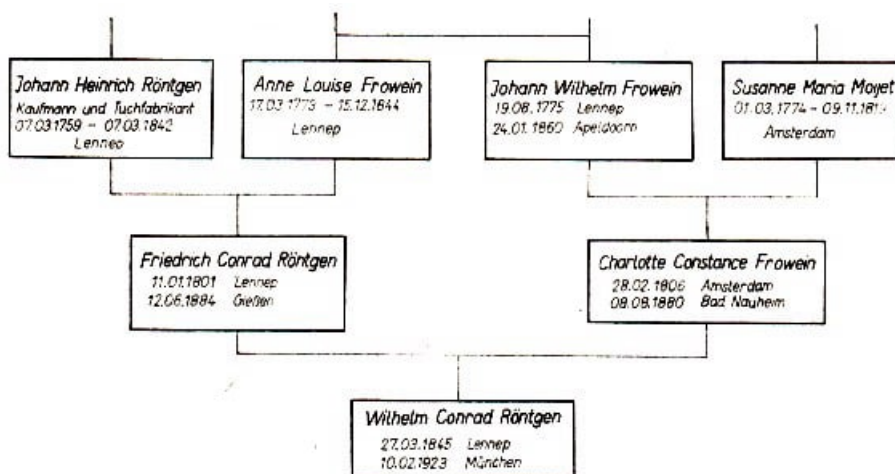
Lennep, heute ein Stadtteil von Remscheid, war ein in der rechtsrheinischen Landschaft zwischen Ruhr und Sieg im Gebiet des ehemaligen Herzogtums Berg gelegener Ort. Dort wurde Wilhelm Conrad Röntgen am 27. März 1845 geboren.



2 Geburtshaus Röntgens in Remscheid-Lennep (Aufn. 1980)

An dem noch erhaltenen Geburtshaus, einem schönen Fachwerkbau am Gänsemarkt, befindet sich seit 1920 eine Erinnerungstafel. Sein Vater, der Kaufmann und Tuchfabrikant Friedrich Conrad Röntgen, wurde ebenfalls in Lennep geboren und entstammt einer angesehenen rheinischen Kaufmannsfamilie.

Die Mutter, Charlotte Constanze geborene Frowein, kam aus einer in Holland ansässigen alten Lenneper Familie, Röntgens Vater und Mutter waren Verwandte, Vetter und Base. Wilhelm Conrad war ihr einziges Kind.



3. Auszug aus der genealogischen Tafel der Familien von Röntgens Vater und Mutter

Die französische Revolution des Jahres 1848 hatte sich auch auf Preußen ausgebreitet. In den Niederlanden waren jedoch keine Unruhen aufgetreten. Auch bestanden für westdeutsche Textilkauflleute damals in Holland günstige geschäftliche Aussichten.

Dieses veranlasste Röntgens Vater, mit seiner Familie nach Holland auszuwandern. Die Eltern verkauften das Geburtshaus und zogen nach Apeldoorn. Nach einer erhalten gebliebenen Urkunde wurde am 23. Mai 1848 dem Vater Friedrich Conrad Röntgen der beantragte Consens zur Auswanderung nach Holland ausgefertigt und mit der Bemerkung übergeben: „... dass mit der Empfangnahme desselben er der Eigenschaft als Preußischer Unterthan entsage ...“

So wurde Wilhelm Conrad Röntgen im Alter von 3 Jahren Holländer, und das einzige Andenken, welches ihn während der folgenden Jahre oft an seine Vaterstadt erinnerte, war das von seinem Vater gebaute Modell des Geburtshauses.

Am 22. Oktober 1850 konnten Röntgens Eltern sich in Apeldoorn ein neues Haus bauen. Sie ließen den Namen ihres fünfeinhalb-jährigen Sohnes in den Grundstein einmeißeln.

2.2 Röntgens Schulzeit

Röntgen hat keine autobiographischen Schriften verfasst. Deshalb sind besonders die Angaben über seine Schulzeit widersprüchlich. In Apeldoorn hat der kleine Wilhelm Conrad die Schule von Martinus Hermanus van Doorn besucht, die in der Nähe des Elternhauses gelegen war.

Am 27. Dezember 1862 verzogen die Röntgens nach Utrecht. Dort besuchte Röntgen bis 1863 die Utrechter Technische Schule, die Knaben im Alter von 14 bis 18 Jahren aufnahm. Der Hauptzweck dieser Schule bestand darin, künftigen Leitern von Fabriken und Unternehmungen die nötigen technischen Kenntnisse zu vermitteln.

Das Abschlusszeugnis dieser Lehranstalt berechtigte nicht zum Besuch einer Hochschule, entsprach also nicht einem Reifezeugnis. Wahrscheinlich beabsichtigte Röntgen, später einen technischen Beruf zu ergreifen, vielleicht der Familientradition folgend, Tuchfabrikant zu werden.

Während dieser Schulzeit wohnte Röntgen im Hause des Utrechter Universitätslektors und Lehrers an der Technischen Schule, Dr. Jan Willem Gunning, der Anfang 1865 zum Chemieprofessor des Athenaeums in Amsterdam, der späteren Universität, berufen wurde.

Aus den Zeugnissen der Technischen Schule geht hervor, dass Röntgen ein ganz hervorragender Schüler gewesen ist. Nur in Chemie und Physik waren seine Noten weniger gut, in Physik sogar „sehr schlecht“. Dieses war die schlechteste Zensur, die er jemals gehabt hat. Allerdings steht auf dem Zeugnis, dass er die Schularbeiten nicht abgegeben habe.

Die frohen Stunden, die er bei Gunnings verbrachte, wurden jedoch bald durch seine zwangsweise Entfernung aus der Utrechter Schule unterbrochen. Die Einzelheiten dieses Vorfalles konnten nie ganz aufgeklärt werden. Ein Schweizer Freund Röntgens, E. Wölfflin, berichtete 11 Tage nach Röntgens Ableben in den Basler Nachrichten von der Karikatur eines Klassenlehrers, die ein damaliger Schulfreund Röntgens auf den Ofenschirm gezeichnet habe und die Röntgen, der selbst ein schlechter Zeichner war, besonders gefiel.

Der vorzeitig eintretende Lehrer sah das Bild und geriet darüber in großen Zorn. Er verlangte von Röntgen, der das Bild betrachtete, den Namen des Missetäters.

Röntgen aber soll sich geweigert haben, den Namen des Freundes zu nennen. Auch als der Lehrer mit dem Verweis von der Schule drohte, soll Röntgen geschwiegen haben und deshalb von der Schule verwiesen worden sein.

Die Frage, ob Röntgen bei dem Konflikt mit seinem Lehrer völlig unschuldig gewesen ist, muss nach W. A. H. van Wylick, der 1975 seine Untersuchungen über Röntgen und die Niederlande vorlegte, offen bleiben. Denn aus einer Schulnotiz vom 2. Mai 1864 geht hervor, dass Röntgens Betragen „zu wünschen übrig lässt“.

Außerhalb der Schule versuchte Röntgen durch Privatstudien, in die er auch die alten Sprachen einschloss, sich die Kenntnisse anzueignen, die notwendig waren, um mit Erfolg ein Zulassungsexamen an der Universität abzulegen.

Am 14. Januar 1865 hatten sich acht Kandidaten um das Zulassungsexamen an der Utrechter Universität beworben. Der fünfte von ihnen war Wilhelm Conrad Röntgen. Zwei der acht Bewerber wurden abgewiesen. Einer davon war Röntgen.

Es ist verständlich, dass dieses Ereignis ihn, der sich gerade auf diese Prüfung mit so viel Eifer vorbereitet hatte, zeitlebens veranlasste, sich über alle Examina mit leisem Spott zu äußern. Noch im Jahre 1920 schrieb er an Frau Boveri, der Tochter seines Freundes Theodor Boveri, der ein berühmter Biologe war und eine Theorie aufgestellt hat, die als Vorläufer der heutigen Mutationstheorie gilt:

"Schülerexamen geben meistens keinen Anhaltspunkt für die Beurteilung der Befähigung für ein spezielles Fach; sie sind überhaupt ein - leider - notwendiges Übel. Überhaupt Examina! Sie sind nötig, um manchen von einem Lebensberuf abzuhalten, für den er zu faul oder sonst ungeschickt wäre, und auch das noch nicht einmal immer ... Die wirkliche Probe auf Befähigung zu einem Beruf bringt erst das spätere Leben ..."

Diese wirkliche Probe auf Befähigung hat Röntgen, wie uns sein weiterer Lebenslauf zeigt, dann auch auf das glänzendste bestanden. Vor allem hatte Röntgen ein Ziel vor den Augen: Er wollte trotz aller Schwierigkeiten Maschinenbauingenieur werden, und um dieses zu erreichen, scheute er keine Mühe und Anstrengung.

Obwohl er keine Matrikel besaß, die ihm gestattet hätte, als vollberechtigter Student eine Universität zu besuchen, finden wir ihn doch als Gasthörer im Jahre 1865 an der Universität zu Utrecht. Er belegte die Fächer Mathematik, Physik, Chemie, Zoologie und Botanik und studierte mit großem Eifer.

In dieser Zeit veröffentlichte Röntgen auch seine erste „wissenschaftliche“ Arbeit. Es war ein kleines Buch in holländischer Sprache mit dem Titel „Vragen op het anorganisch gedeelte van het Scheikundig Leerboek van Dr. J. W. Gunning door W.C.R.“. Die Schwierigkeiten, welche Röntgen beim Erwerben chemischer Kenntnisse hatte, veranlassten ihn, ein kleines Repetitorium zu schreiben, das sich auf ein Lehrbuch von Gunning bezieht und etwa tausend Fragen ohne Antworten auf 58 Textseiten enthält.

Ein noch vorhandenes Exemplar trägt die Widmung: „Herrn Prof. J. W. Gunning hochachtungsvoll überreicht vom Verfasser“.

Im Herbst des Jahres 1865 erfuhr Röntgen, dass das Eidgenössische Polytechnikum in Zürich auch Studenten ohne Reifezeugnis aufnimmt, falls sie eine allerdings sehr strenge Aufnahmeprüfung bestehen. Röntgen bewarb sich sofort um eine Ausreise aus den Niederlanden und um eine Niederlassung in der Schweiz.

Am 11. November 1865 erhielt er einen Pass für das Inland. Von der Gemeinde Utrecht bekam Röntgen eine Bescheinigung, dass er Utrecht zu verlassen wünsche, um sich in Zürich niederzulassen, und dass er der Niederländisch-reformierten Kirche angehöre, Wenige Tage nach Beginn des Wintersemesters traf Röntgen in Zürich ein.

2.3 Studium in Zürich

Röntgen war bereits 20 Jahre alt, als er Ende des Jahres 1865 am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich sein Studium der Maschinenbaukunde aufnehmen konnte. Sein reifes Alter

und seine vortrefflichen Zeugnisse, besonders in den mathematischen Fächern der technischen Schule in Utrecht, die er leider so früh verlassen musste, sowie sein einjähriger Besuch der Utrechter Universität als Gasthörer, hatten den Direktor der Züricher Anstalt bewogen, Röntgen die Aufnahmeprüfung zu erlassen.



4 Der junge Röntgen (H. Pronk, La Haye u. Utrecht)

Nun endlich konnte sich Röntgen intensiv seinem Studium widmen. Er hörte bei hervorragenden Lehrern. Viele von ihnen waren aus dem Deutschland des Jahres 1848 geflüchtet. Gustav Zeuner aus Chemnitz versuchte mit Erfolg das wissenschaftliche Fundament der sich entwickelnden Maschinenindustrie zu schaffen.

Karl Culmann, der geniale Begründer der Graphostatik, und der Chemiker Bolley formten das wissenschaftliche Weltbild des jungen Röntgen genauso wie Rudolf Imanuel Clausius, der Begründer der mechanischen Wärmetheorie, und besonders sein Nachfolger August Kundt.

Am 6. August 1868 erhielt Röntgen das Diplom als Maschineningenieur der Eidgenössischen polytechnischen Schule. Die schriftliche Diplomarbeit umfasste die Bearbeitung eines größeren Projektes einer Maschinenanlage. Der theoretische Teil der Arbeit wurde mit der Note $5 \frac{3}{4}$, der konstruktive Teil mit der Note $4 \frac{1}{2}$ bewertet.

Die Note 6 entsprach damals der besten, die Note 1 der geringsten Bewertung. Aus den vorhandenen Akten und Zeugnissen lässt sich ersehen, dass der Student Röntgen ein hervorragendes Interesse für die theoretischen Disziplinen gezeigt hat, aber Konstruktionsfragen weniger Neigung entgegenbrachte.

Er scheint ein freiheitsliebendes und etwas unruhiges Element der Züricher Schule gewesen zu sein, der sich nicht nur seinen Studien widmete, sondern in seiner Freizeit zusammen mit einem holländischen Freund viele Bergtouren unternahm und an so manchem Studentenstreich beteiligt war. Röntgens grundsätzliche Lebenseinstellung hat sich wohl während seines Aufenthaltes in den seinerzeit bereits politisch weit entwickelten Ländern Holland und der Schweiz gebildet. Dort dürfte auch seine liberale Grundhaltung geprägt worden sein, die er in seinem späteren Leben so oft bewiesen hat.

In Zürich lernte Röntgen Anna Bertha Ludwig kennen, mit der er sich im Herbst 1869 verlobte. Die sechs Jahre ältere Braut war schon zu dieser Zeit oft kränklich und weilte dann lange Zeit zur Kur auf dem Ütliberg.

Den Dokortitel konnte die damalige Eidgenössische Schule nicht verleihen; da aber im gleichen

Hause die Züricher Universität untergebracht war, blieb Röntgen ein weiteres Jahr in Zürich und arbeitete seine Studien über Gase aus, die er 1869 der Hohen philosophischen Fakultät dieser Universität vorlegte.

Die Anfertigung seiner Dissertation fällt in eine Epoche der Physik, in der die Schaffung der Thermodynamik erfolgte.

Rudolf Imanuel Clausius hatte die Bedeutung der Größe $\int \frac{dQ}{T}$ erkannt; er nannte sie Äquivalenzwert, später Verwandlungswert, schließlich Entropie. Die Vereinigung der Gesetze von Edmonte Mariotte, wonach das Volumen V einer Gasmenge dem darauf lastenden Druck p umgekehrt proportional, d.h., das Produkt $p \cdot V = \text{const.}$ ist, mit der von Louis Joseph Gay-Lussac aufgefundenen Tatsache der gleichmäßigen Ausdehnung der Gase mit steigender Temperatur, und zwar pro Grad um 0,00366 des Volumens bei 0°C , war Gegenstand vieler Forschungen der damaligen Zeit.

So ist es nicht verwunderlich, dass auch Röntgens Dissertation dieses Thema behandelte.

Das Referat seiner Arbeit übernahm Mousson, der eigentlich Experimentalphysiker war, aber durch seine Untersuchungen über Schnecken bekannt wurde. Nach einer ausführlichen Darlegung des Inhaltes der Arbeit des Doktoranden schreibt er:

"... kann dieselbe als eine größtenteils selbständige, wissenschaftlich durchgeführte und mit theoretisch interessanten Resultaten abschließende Arbeit bezeichnet werden, wenn auch der Hauptpunkt, die neue Formulierung des Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetzes noch nicht als hinlänglich erwiesen betrachtet werden kann.

Jedenfalls enthält die eingereichte Schrift mehr als genügende Beweise von gediegenen Kenntnissen selbständiger Forschungsgabe auf dem Gebiet der mathematischen Physik ..." [73]

Auf der Grundlage dieser Arbeit konnte Röntgen eine Methode zur Bestimmung des Verhältnisses der spezifischen Wärmekapazitäten für Gase entwickeln. In die von Pierre Simon Laplace aufgestellte Formel für die Schallgeschwindigkeit in Gasen geht dieses Verhältnis ein, so dass aus der gemessenen Schallgeschwindigkeit seine Größe abgeleitet werden kann.

Anstatt der Schallgeschwindigkeit kann auch die Wellenlänge für bestimmte Tonhöhen gemessen werden. Hierzu eignete sich besonders die von Kundt angegebene Methode. Röntgen bestimmte das Verhältnis der spezifischen Wärmen, wie die spezifische Wärmekapazität damals genannt wurde, für einatomige und mehratomige Gase.

Die Ergebnisse sind in seiner zweiten wissenschaftlichen Veröffentlichung dargelegt, welche 1870 in Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie erschienen ist. Sie fand sofort wissenschaftliche Anerkennung und wird noch in den Lehrbüchern des beginnenden 20. Jahrhunderts neben den Methoden von Pierre Louis Dulong, Kundt und Nicolas Leduc genannt.

2.4 Begegnung mit August Kundt

Richtungweisend für das weitere Leben Röntgens wurde seine Bekanntschaft mit August Kundt. Dieser hochbegabte Physiker war mit 29 Jahren als Nachfolger von Clausius, der 1857 den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre formulierte, auf den Lehrstuhl für Physik an das Züricher Polytechnikum berufen worden.

Kundt war ein ideenreicher Experimentalphysiker, dem es oft gelang, mit einfachen experimentellen Mitteln schwierige messtechnische Probleme zu lösen.

Ein Beispiel sind die schon erwähnten Staubfiguren, mit deren Hilfe die halbe Schallgeschwindigkeit in einer stehenden Welle in Gasen oder Flüssigkeiten bestimmt werden kann. Er erfand

auch ein nach ihm benanntes Manometer zur Untersuchung der Druckverhältnisse in einer tönenden Pfeife.

Das Kundtsche Manometer besteht aus einem kleinen mit Wasser gefüllten U-Rohr, dessen beide Öffnungen mit aus dünnem Papier oder Gummi hergestellten Ventilen versehen sind. Das eine Ventil öffnet nach innen, spricht also auf äußere Luftverdichtungen an, das andere nach außen und zeigt somit äußere Luftverdünnungen.

Das Manometer wird an einem Faden in die senkrecht stehende tönende Pfeife gesenkt und gestattet so, den Druckunterschied zwischen dem Bauch und dem Knoten der Luftschwingung in der Pfeife zu bestimmen.

Als Kundt den Lehrstuhl am Züricher Polytechnikum übernommen hatte, begann er sofort, seine Vorlesungen über Experimentalphysik mit zahlreichen Versuchen zu unterbauen. In bescheidenen Räumen richtete er „Physikalische Übungen“ ein und begründete damit das, was wir heute ein „Physikalisches Praktikum“ nennen.

Für diese Übungen suchte Kundt einen Assistenten, und seine Wahl fiel auf Röntgen. Wir wissen nicht, was Kundt bewogen haben mag, gerade Röntgen zu engagieren, der doch keine Physikausbildung, sondern ein Ingenieurstudium absolviert hatte. Eines Tages begegneten sich beide, und Kundt fragte:

„Was wollen Sie eigentlich in Ihrem Leben einmal anfangen?“



5 Der Physiker August Kundt (1839-1894)

Und als Röntgen antwortete, dass er das noch nicht wüsste, meinte Kundt, er solle es doch einmal mit der Physik versuchen.

Röntgen musste ihm bekennen, dass er sich damit so gut wie gar nicht beschäftigt habe. Darauf erwiderte Kundt, das ließe sich wohl noch nachholen. Als dieses Gespräch stattfand, war Röntgen 24 Jahre alt. Er zögerte keinen Augenblick, begann Physik zu studieren und wurde Kundts Assistent.

Mit August Kundt hatte Röntgen einen Lehrer gefunden, der in ihm die Liebe zur Experimentalphysik weckte und ihm besonders die Fähigkeit, mit selbstgebaute Apparaturen zu experimentieren, vermittelte. Vor allem aber prägte Kundt das physikalische Denken Röntgens. Unter der Leitung seines von ihm bewunderten Lehrers wurde Röntgen Experimentalphysiker. Als Kundt 1870 an die Universität Würzburg berufen wurde, nahm er seinen bewährten Assistenten mit. In Würzburg arbeitete Röntgen an seiner Habilitationsschrift, doch als er diese

dem Dekan der alten traditionsgebundenen Universität vorlegte, verweigerte ihm dieser, trotz aller Einsprüche seines Lehrers Kundt, die Habilitation.

Möglicherweise spielte dabei Röntgens fehlende lateinische Vorbildung eine Rolle. In ganz Bayern war damals die Habilitation ohne das Reifezeugnis eines Gymnasiums unmöglich.

Jedoch durfte ein Dozent, der sich bereits auswärts habilitiert hatte, übernommen werden.

Glücklicherweise dauerte diese Hemmung, die Röntgens wissenschaftlicher Laufbahn im Wege stand, nicht lange, denn Kundt wurde 1872 an die neugegründete Reichsuniversität in Straßburg berufen, wohin ihm Röntgen folgte. Zuvor hatte er am 19. Januar 1872 in Apeldoorn Bertha Anna Ludwig geheiratet. 50 Jahre sollte er mit ihr in glücklicher, aber kinderloser Ehe leben.

In Straßburg konnte sich Röntgen schließlich am 13. März 1874 habilitieren und als Privatdozent an dem neuerrichteten Physikalischen Institut niederlassen.

Seit dem ersten Gespräch mit Kundt, welches Röntgen veranlasste, Physik zu studieren, waren 6 Jahre vergangen. Röntgen hatte diese Jahre intensiv genutzt. Er war nun ein ausgezeichneter Experimentalphysiker geworden. Seiner Berufung auf eine Professur stand nichts mehr im Wege.

3 Röntgen als Physiker

3.1 Mit 30 Jahren Professor für Physik und Mathematik

Als 1875 Heinrich Friedrich Weber, Professor für Physik und Mathematik an der Landwirtschaftlichen Akademie zu Hohenheim in Württemberg, an das Polytechnikum nach Zürich berufen wurde, empfahl er der Berufungskommission seiner Universität, als seinen Nachfolger den am Physikalischen Institut der Reichsuniversität zu Straßburg tätigen Privatdozenten Wilhelm Conrad Röntgen zu berufen.

Die Kommission folgte dieser Empfehlung, und so wurde Röntgen ein Jahr nach seiner Habilitation und erst im dreißigsten Lebensjahr stehend Professor für Physik und Mathematik. Jedoch bereits am 1. Oktober 1876 verließ er die Landwirtschaftliche Akademie zu Hohenheim wieder, um auf Wunsch seines verehrten Lehrers Kundt nach Straßburg zurückzukehren und dort als zweiter Physiker das Fach der theoretischen Physik zu vertreten.

In der damaligen Zeit wart die Trennung zwischen Experimentalphysik und theoretischer Physik noch nicht vollzogen, so dass ein Experimentalphysiker durchaus die theoretische Physik vertreten konnte.

Trotz dieser neuen Aufgabe blieb Röntgen Experimentalphysiker.

Er schätzte das Experiment als Prüfstein über alles, aber er verlor sich auch nicht, wie manche Vertreter der experimentellen Richtung der Physik seiner Jahre, im einseitigen Experimentieren und in der bloßen Verbesserung der Technik.

In Straßburg konnte er zusammen mit Kundt, aber auch allein, eine Reihe wissenschaftlicher Arbeiten durchführen und veröffentlichen, die den Grundstein zu seiner im Jahre 1879 erfolgten Berufung für das Ordinariat der Physik an der Universität Gießen bildeten.

In den drei Jahren seiner Straßburger Zeit hat Röntgen 9 Veröffentlichungen verfasst, die verschiedenartige Gebiete der Physik betreffen. So studierte er das Verhältnis der Querkontraktion zur Längsdehnung bei Kautschuk. Dieses von Poisson, einem erstaunlich vielseitigen französischen Forscher auf allen Gebieten der reinen und angewandten Mathematik, eingeführte und von ihm aus einer allerdings nicht ganz zutreffenden Molekulartheorie berechnete Verhältnis ergab, dass der Zahlenwert für alle Stoffe gleich, und zwar gleich $1/4$ sein müsse.

Mit seinen Experimenten trug Röntgen dazu bei zu zeigen, dass dieser Wert nicht stoffunabhängig sein kann und auch der Wert $1/4$ nicht zutrifft. Heute ist bekannt, dass das Poissonsche Verhältnis von Stoff zu Stoff zwischen 0 und $1/2$ variieren kann.

In zunehmendem Maße widmete sich Röntgen aber auch in dieser Zeit dem Studium der elektromagnetischen Drehung der Polarisationssebene des Lichtes in Gasen. Thomas Young, der gleiche, der den demotischen Text des Steines, von Rosette übersetzte und einige ägyptische Hieroglyphen deutete, erklärte 1817 die Polarisation des Lichtes durch die Annahme, dass Licht eine transversale Welle sei.

Fresnel vollendete 1822 die Theorie durch Betrachtung transversaler Wellen in einem elastischen Äther. Michael Faraday vermutete einen Zusammenhang zwischen Licht und Elektrizität und fand seine Vermutung bestätigt, als er 1845 die Drehung der Polarisationssebene des Lichtes beim Durchgang durch einen magnetischen Körper entdeckte.

Dieser als Faradayeffekt bezeichneten Drehung der Polarisationssebene in einem magnetischen Feld galt Röntgens besondere Aufmerksamkeit. Dass er sich anschließend auch mit dem von John Kerr gefundenen elektrooptischen Effekt, wonach bestimmte Substanzen im elektrischen Feld doppelbrechend werden, beschäftigte, lässt vermuten, dass er die großen technischen

Anwendungsmöglichkeiten dieser Effekte durchaus geahnt hat.

Möglicherweise war es seine ursprüngliche ingenieurmäßige Ausbildung, die ihn immer wieder auch auf technische Probleme zurückkommen ließ, wie z.B. auch die Arbeit über ein Aneroidbarometer mit Spiegelablesung (1878) erkennen lässt.

Die Arbeiten Röntgens aus der Straßburger Zeit zeigen klar durchdachte Fragestellungen, geschickte experimentelle Durchführungen und immer wieder eine kritische Prüfung der Resultate.

Seine damaligen Schüler schildern in ihren Schriften über Röntgen vor allem seine große Vorliebe, mit selbstgebauten Apparaturen zu experimentieren. Selbständigkeit und Produktivität liebte er über alles, und er schätzte diejenigen Menschen besonders, die es verstanden, sich mit geringen Mitteln zu helfen.

Als er hörte, dass Wilhelm Wien in seinen Vorlesungen den Studenten versprochen hatte, ganz große Experimente zu zeigen, sagte er:

"Was sollen denn die Lehramtskandidaten, die später mit einfachen Mitteln vortragen müssen, mit diesen im größten Stil ausgeführten Versuchen anfangen?"

3.2 Berufung nach Gießen

Es war die Fähigkeit zur Synthese von theoretischen Betrachtungen und experimentellem Geschick, mit welcher der junge Professor für Physik, der an der Reichsuniversität zu Straßburg wirkte, in der Fachwelt seiner Zeit auf sich aufmerksam machte. Seine Veröffentlichungen erschienen in einer der wichtigsten Fachzeitschrift jener Jahre, in den von Johann Christian Poggendorff herausgegebenen Annalen der Physik und Chemie.

Poggendorff verdanken wir u.a. die Methode zur Messung kleiner Winkeländerungen mit Hilfe der Spiegelablesung. Damit darf es als sicher angesehen werden, dass Röntgens Untersuchungen den Fachkollegen seiner Zeit bekannt waren.

Dass diese Arbeiten aber auch allgemeine Anerkennung fanden, beweist nicht zuletzt die Berufung des 34 Jahre alten Wissenschaftlers für das Ordinariat der Physik an der 1607 gegründeten Universität der an der Lahn gelegenen Hauptstadt Gießen der hessischen Provinz Oberhessen. Mit dieser im Jahre 1879 erfolgenden Berufung begannen für Röntgen neue arbeitsreiche, aber auch lebensfrohe Jahre in einem sich schnell bildenden Freundeskreis. Zu diesem gehörte der Hygieniker Georg Gaffky, ein Schüler Robert Kochs und sein späterer Nachfolger, der als erster 1884 Typhusbakterien in Reinkultur züchtete und an mehreren Expeditionen nach Ägypten (1883/84) und Indien (1897) teilnahm.

Nach Gaffky ist auch eine bakteriologische Skala zur Kennzeichnung der Anzahl der Tuberkelbakterien in einem Sputum Präparat benannt worden.

Auch der Chirurg Rudolf Krönlein, der durch eine Modifikation der Magenoperation bekannt geworden ist, und der Ophthalmologe v. Hippel gehörten zu Röntgens Freundeskreis.

Die Bekanntschaft mit so hervorragenden Wissenschaftlern der verschiedensten Fachrichtungen hat den wissenschaftlichen Horizont Röntgens ganz wesentlich erweitert und befruchtend auf seine Arbeit gewirkt. Neben dieser fand Röntgen aber auch Zeit zu geselligem Beisammensein. Es war ihm jetzt möglich, eine eigene Jagd zu pachten und so manche Stunde allein oder mit Freunden dort zu verbringen. Nur die Kinderlosigkeit seiner Ehe, die besonders Frau Röntgen sehr schmerzlich empfand, trübte die frohe Gießener Zeit. Röntgen und seine Gattin entschlossen sich daher im Jahre 1887, Frau Röntgens Nichte, Josephine Bertha Ludwig, bei sich

aufzunehmen. Im Alter von 21 Jahren wurde sie von Röntgens adoptiert.

In der Gießener Zeit Röntgens entstanden 18 Veröffentlichungen, von denen besonders eine sich weit in ihrer Bedeutung hervorhebt. Kein geringerer als der Münchener theoretische Physiker Arnold Sommerfeld stellte diese Arbeit Röntgens auf die gleiche Stufe wie die Entdeckung der Röntgenstrahlen. Möglicherweise wäre Röntgen für diese Experimente auch der Nobelpreis für Physik verliehen worden, wenn er die Röntgenstrahlen gar nicht entdeckt hätte.

3.3 Bahnbrechende Experimente

Röntgens Arbeiten in Gießen fallen in eine Zeit der intensiven experimentellen und gedanklichen Durchdringung der elektrischen und magnetischen Vorgänge durch die Physik. Bis zum Auftreten des Physikers James Clerk Maxwell in den 60er Jahren des 19. Jahrhunderts basierten die theoretischen Ansichten über die elektrischen und magnetischen Erscheinungen im allgemeinen auf der Vorstellung von Fernkräften zwischen elektrisierten, magnetisierten oder von elektrischen Strömen durchflossenen Körpern.

Nur die 1831 von Faraday entwickelten Vorstellungen wichen in dieser Hinsicht von denen aller anderen Physiker ab. Faraday war der Sohn eines Hufschmiedes, der eigentlich Buchhändler werden sollte, aber schon während seiner Lehrzeit mit großem Eifer physikalische und chemische Schriften las.

Als er 1812 einige Vorträge des berühmten Chemikers Humphry Davy gehört hatte, war sein sehnlichster Wunsch, selbst Chemiker zu werden. Er wechselte den Beruf und trat 1813 bei Davy als Laborant ein. Dort entdeckte Faraday das flüssige Chlor.

Im Jahre 1827 wurde er Davys Nachfolger. Später fand er die Gesetze der Elektrolyse. Seine Hauptbedeutung für die Physik liegt darin, dass er die Kraftlinienvorstellung für die elektrischen und magnetischen Felder entwickelte. Faraday war jedoch nicht genug Mathematiker, um seiner Auffassung eine nach allen Seiten erschöpfende und widerspruchsfreie Form geben zu können, die sie zum Range einer Theorie erhoben hätte, obschon auch seine Art, die elektrischen Erscheinungen aufzufassen und zu beschreiben, eine mathematische war, ohne dass er sich der üblichen mathematischen Zeichensprache bedient hätte.

Dieses gelang 1861/62 Maxwell. Indem er die Ideen Faradays in eine strenge mathematische Form brachte, schuf er ein Lehrgebäude, das schon in der Anlage von der Fernwirkungstheorie wesentlich verschieden war, bei seinem weiteren Ausbau aber sich immer weiter von dieser entfernte. Es entstand die Maxwellsche Feldwirkungstheorie. Ihre wesentlichen Grundgedanken sind:

Alle elektrischen oder magnetischen Einwirkungen eines Körpers auf einen von ihm getrennten anderen Körper erfolgen durch Vermittlung des dazwischenliegenden leeren oder von Stoff erfüllten Raumes.

Der elektrische Strom in einer ungeschlossenen Leitungsbahn wird durch einen im Dielektrikum anzunehmenden Verschiebungsstrom ergänzt, der in derselben Weise mit der magnetischen Feldstärke verknüpft ist wie der Leitungsstrom.

Insbesondere folgt aus der Maxwellschen Theorie, dass nicht nur der Leitungsstrom von einem Magnetfeld begleitet wird, sondern auch jede mechanisch bewegte elektrische Ladung.

Der nächstliegende Versuch, die Äquivalenz zwischen bewegter Ladung und einem elektrischen Strom nachzuweisen, besteht darin, einem geladenen Körper eine große Geschwindigkeit zu erteilen und die magnetische Wirkung dieses künstlichen Stromes nachzuweisen. Henry Row-

land, dem wir außerdem eine Methode zur Herstellung von optischen Strichgittern verdanken, ließ eine geladene isolierte Metallscheibe rasch rotieren und erhielt die durch die Maxwellsche Theorie vorhergesagte magnetische Wirkung.

Damit war gezeigt, dass die im Metall vorhandenen freien Elektronen bei einer mechanischen Bewegung sich mit einem Magnetfeld umgeben. An diesen Versuch knüpfte Röntgen mit seinen Experimenten an. Er konnte nachweisen, dass auch die an der Grenzfläche eines elektrisch polarisierten Dielektrikums, d. h. an der Oberfläche eines in einem Kondensator befindlichen Isolators, sitzenden freien Ladungen bei mechanischer Bewegung einem elektrischen Strom entsprechen und sich mit einem Magnetfeld umgeben.

Zu diesem Zweck ließ Röntgen zwischen den Platten eines geladenen Plattenkondensators das Dielektrikum rotieren und konnte damit den experimentellen Nachweis für die Gültigkeit der ersten Maxwellschen Gleichung erbringen.

Mit Hilfe der aus der Maxwellschen Theorie folgenden Gleichungen lässt sich die Stärke des entstehenden magnetischen Feldes berechnen. Dazu muss die Flächendichte der Ladung (Ladung pro Fläche der Kondensatorplatten) und die Drehgeschwindigkeit des Dielektrikums bekannt sein.

Es gelang 1903 Alexander Eichenwald, alle benötigten Größen sehr exakt zu messen und mit einem Magnetometer das entstehende Magnetfeld zu bestimmen. Die Ergebnisse standen im Gegensatz zur Hertzschen Elektrodynamik bewegter Körper, aber in Übereinstimmung mit den Formeln der späteren Relativitätstheorie.

Mit einer zweiten Versuchsanordnung konnte Röntgen zeigen, dass man durch mechanische Bewegungen auch eine Änderung der elektrischen Polarisation erzeugen kann, die ebenfalls gemäß der Maxwellschen Gleichungen ein Magnetfeld hervorruft.

Bei dieser Anordnung rotiert wieder das Dielektrikum, jedoch waren jetzt jede der beiden Platten des Plattenkondensators halbiert und jede Hälfte auf entgegengesetztem Potential gehalten.

Beim Überschreiten der Trennlinie kehrt daher in jedem Augenblick die Polarisation ihr Vorzeichen um, so dass in der Trennschicht ein vertikaler Verschiebungsstrom fließt. Sein magnetisches Feld konnte mit einem Magnetometer nachgewiesen werden.

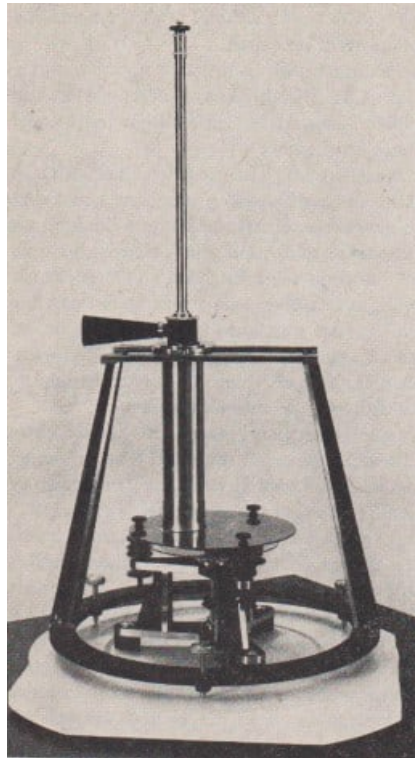
Von diesen Experimenten bis zu dem berühmten Versuch von Trouton und Noble war nur ein kleiner Schritt. Indem Trouton und Noble einen Plattenkondensator so aufhängten, dass er um eine zu den Platten parallele Achse leicht drehbar war, erwarteten sie eine durch die Translationsbewegung der Erde bedingte Drehung des geladenen Kondensators.

Sie berechneten auf Grund der damaligen Vorstellung eines alle Körper durchdringenden „Äthers“ die Größe des zu erwartenden Drehmomentes und fanden, dass dieses noch gut zu beobachten sein müsste. Aber auch die empfindlichsten Versuche, die insbesondere von Tomaschek durchgeführt wurden, ergaben keine Andeutung eines solchen Drehmomentes.

Damit widerspricht das Ergebnis des Versuches von Trouton und Noble, welcher zu den ganz wenigen Versuchen gehört, die eine Beobachtung von Größen zulassen, in denen das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit c zur Translationsgeschwindigkeit v in quadratischer Form eingeht (Größen zweiter Ordnung in v/c), der bis dahin allgemein angenommenen Theorie eines ruhenden „Äthers“.

Licht konnte damit nicht mehr, wie es Fresnel 1822 vorgeschlagen hatte, als transversale Welle in einem elastischen Äther gedacht werden, sondern als eine transversale elektromagnetische Welle, deren Geschwindigkeit sich durch eine elektromagnetisch gemessene Größe ausdrücken

lässt.



6 Rekonstruktion des Apparates zum Nachweis des „Röntgenstromes“.

Im unteren Teil des Bildes ist der Plattenkondensator mit dem drehbar angeordneten Dielektrikum zu erkennen. Der zylinderförmige Teil des Apparates ist das Magnetometer zum Nachweis des entstehenden Magnetfeldes. Die Rekonstruktion des Apparates besorgte das 1. Physikalische Institut der Universität Gießen. Die Übergabe an das Deutsche Röntgen-Museum erfolgte am 18.9.1982 durch Prof. Dr. A. Scharmann

Diese auf dem Boden der Faraday-Maxwellschen elektromagnetischen Theorie erhaltenen Ergebnisse, haben in ihren weiteren Auswirkungen indirekt nicht nur zu den Lorentzschen Transformationen und zu der Relativitätstheorie geführt, sondern auch zu den Grundlagen der modernen Elektrizitätslehre überhaupt.

Röntgen nennt in einem Brief an seinen Freund Ludwig Zehnder 91 Physiker, denen er von seinen Arbeiten Sonderdrucke zu schicken pflegte. Unter ihnen befinden sich viele bekannte Namen, so z.B. auch Hendrik Antoon Lorentz, einer der bedeutendsten theoretischen Physiker. Auch er schätzte diese Entdeckung Röntgens fast ebenso hoch ein wie die Entdeckung der Röntgenstrahlen. Lorentz nannte den von Röntgen entdeckten Effekt „Röntgenstrom“ und formulierte den Satz:

"Der totale Strom besteht aus dem Verschiebungsstrom, dem Leitungsstrom, dem Konvektionsstrom und einem vierten Vektor, den wir in Nachfolge von Poincare den Röntgenstrom nennen können, da die elektromagnetische Wirkung dieses Stromes nur dann vorhanden ist, wenn ein polarisiertes Dielektrikum sich bewegt, wie dies bei einem wohlbekannten Versuch von Röntgen festgestellt worden ist."

Nach einiger Erweiterung dieses Grundversuches der Physik durch den russischen Physiker Eichenwald wird diese Erscheinung in den heutigen Lehrbüchern der Physik als „Röntgen-Eichenwald-Versuch“ bezeichnet.

Zu den weiteren von Röntgen in seiner Gießener Zeit durchgeführten Arbeiten gehören mehrere der Kristallforschung an.

Daneben findet man aber auch Beschreibungen sehr schöner Demonstrationsversuche, wie z. B. die Arbeit: „Über einen Vorlesungsversuch zur Demonstration des Poisenleschen Gesetzes“, die Röntgen 1883 in den Annalen der Physik und Chemie veröffentlichte. Seine Liebe zu selbstgebauten Apparaturen und die Freude an einfachen Versuchsanordnungen werden bei dieser Arbeit erneut deutlich.

Röntgen hat sich in seiner Gießener Zeit aber auch mit einem Effekt beschäftigt, dessen messtechnische Bedeutung erst in den 70er Jahren unseres Jahrhunderts von Harshbarger und Robin wiederentdeckt wurde. Es handelt sich um einen von Alexander Graham Bell 1880 zuerst bemerkten optoakustischen Effekt.

Bell fokussierte ein intermittierendes (zerhacktes) Sonnenlichtbündel auf einen Körper, der sich in einer luftdicht verschlossenen Kammer befand. In einem mit der Kammer verbundenen Kopfhörer konnte er dann ein akustisches Signal wahrnehmen, welches die gleiche Frequenz besitzt, wie die aufeinanderfolgenden Lichtimpulse.

Dieser Vorgang wurde 1881 sowohl von John Tyndall, dem wir sehr schöne Untersuchungen der durch Staubteilchen verursachten Streuung des Sonnenlichtes verdanken und damit die Grundlage der heutigen Ultramikroskopie, als auch von Röntgen selbst eingehend untersucht. Beide kamen zu einer abschließenden Erklärung dieses optoakustischen Effektes, die im wesentlichen auch heute noch gültig ist. In der Sprache der heutigen Physik lautet sie folgendermaßen:

"Wenn eine Probe eines Stoffes mit Licht einer bestimmten Wellenlänge bestrahlt wird und der Stoff die Lichtenergie absorbiert, so entsteht eine Anregung dieses Stoffes. Seine Anregungsenergie vermag der Stoff auf drei unterschiedlichen Wegen wieder abzugeben: durch Lumineszenz, durch photochemische Zersetzung oder durch Umwandlung der Anregungsenergie in Wärme."

Das letztere spielt bei Festkörpern die grundlegende Rolle für das Zustandekommen des Effektes. Eine periodische Beleuchtung der Probe produziert deshalb Schwankungen der Proben-temperatur mit der gleichen Frequenz. Wird nun die Probe in eine hermetisch abgeschlossene Kammer, die mit Luft oder einer Flüssigkeit gefüllt ist, gebracht und mit intermittierendem Licht bestrahlt, so entsteht durch die Temperaturschwankungen der Probe eine periodische Expansion und Kontraktion der angrenzenden Gas- oder Flüssigkeitsschicht, so dass mit einem in der Kammerwand befindlichen Mikrophon oder piezoelektrischem Transducer die Druckschwankungen empfangen werden können.

Nachdem dieser Effekt nahezu 90 Jahre lang vergessen worden war, dient er heute als Grundlage einer optoakustischen Spektroskopie (OAS) zur Untersuchung der Struktur von Festkörpern, aber auch zur Bestimmung physikalischer Parameter, wie z.B. der Wärmeleitfähigkeit der quergestreiften Muskulatur.

Ausgezeichnete Untersuchungen und bahnbrechende wissenschaftliche Experimente waren es, welche Röntgen in die erste Reihe der Experimentalphysiker seiner Zeit aufrücken ließen. Sicher ist der Wert der von ihm in dieser Zeit erzielten Forschungsergebnisse für das große Publikum nicht so unmittelbar verständlich wie die Entdeckung der Röntgenstrahlen, die seinen Namen in aller Welt berühmt machten, und trotzdem waren es gerade diese Forschungen, welche gleich zwei Universitäten, Jena und Utrecht, veranlassten, sich um den Gelehrten zu bemühen.

Röntgen lehnte beide Berufungen ab. Als er aber am 1. Oktober 1888 das ehrenvolle Angebot erhielt, als Nachfolger von Friedrich Kohlrausch, der mit seinem Lehrbuch der Praktischen Physik bis in unsere Zeit hinein Generationen von Physikern Grundlagen des Messens vermittelt hat, nach Würzburg zu kommen, konnte er nicht ablehnen und folgte dem Ruf nach Würzburg.

3.4 Wieder in Würzburg

Der Ruf nach Würzburg muss für Röntgen in mehrfacher Hinsicht bedeutungsvoll gewesen sein. Einmal war die schöne am Main gelegene Stadt mit ihrer althehrwürdigen, seit 1402 bestehenden Universität der Ort, an dem er unter der Anleitung seines verehrten Lehrers Kundt seine Laufbahn als Experimentalphysiker begonnen hatte, zum anderen war Würzburg aber auch die Stadt, an deren Universität er sich vor nahezu 17 Jahren nicht habilitieren durfte.

Nunmehr bot ihm die gleiche Universität einen Lehrstuhl an, den einer der bedeutendsten Experimentalphysiker seiner Zeit viele Jahre innegehabt hatte. Man konnte daraus erkennen, zu welchem wissenschaftlichen Ansehen Röntgen inzwischen gelangt war. Zum zweiten Male wieder an der Universität, an der er schon als Kundts Assistent geweiht hatte, begann er zunächst den Einfluss des Druckes auf verschiedene Eigenschaften der Flüssigkeiten zu untersuchen.

Zu dieser Zeit gelang es ihm, auf Grund seiner Resultate und denen anderer Forscher, aus dem anomalen Verhalten des Wassers, d. h. aus der Tatsache, dass Wasser bei 4°C seine maximale Dichte besitzt, zu schließen, dass Wasser aus zwei verschiedenen Molekülstrukturen besteht, den voluminöseren Eisstrukturen und den sich erst bei höheren Temperaturen bildenden Strukturen mit kleinerem Volumen.

Die Wichtigkeit dieser Problematik wird deutlich, wenn man bedenkt, dass bis heute noch keine allgemein anerkannte Theorie über die Struktur des reinen Wassers existiert, die alle experimentellen Daten richtig wiedergibt.

Es war Röntgen offensichtlich im besonderen Maße gegeben, physikalische Probleme zu erkennen und solche Fragestellungen zu finden, die experimentell beantwortbar waren. So war es nicht verwunderlich, dass sich bald auch zahlreiche Schüler einfanden. Zu ihnen gehörten besonders Schneider und Zehnder, die durch ihre mit Röntgen gemeinsam durchgeführten Untersuchungen über die Kompressibilität des Wassers und den Einfluss des Druckes auf seine Brechzahl bekannt wurden.

In Würzburg stand Röntgen auf der Höhe seines Lebens. Ebenso wie in Gießen hatte er einen großen Bekanntenkreis, der nicht nur oft Gelegenheit zu wissenschaftlichen Diskussionen gab, sondern auch zu vielen fröhlichen Unternehmungen.

Die Gesundheit Frau Röntgens erlaubte ihr damals noch, an allen Veranstaltungen teilzuhaben, und so wird es verständlich, dass Röntgen und seine Frau in Würzburg die glücklichsten Jahre ihres Lebens verbrachten.

Als Röntgen in Würzburg das Amt des Rektors der Universität übernahm, sprach er in seiner Rektoratsrede über den Wert des Experimentes. Er sagte:

"Erst allmählich drang die Überzeugung durch, dass das Experiment der mächtigste und zuverlässigste Hebel ist, durch den wir der Natur ihre Geheimnisse ablauschen können, und dass dasselbe die höchste Instanz bilden muss für die Entscheidung der Frage, ob eine Hypothese beizubehalten oder zu verwerfen sei." [64]

Wenn er auch das Experiment als Prüfstein über alles schätzte, so verlor er sich doch nicht im einseitigen Experimentieren.

Denn für Röntgen war es selbstverständlich, dass einwandfreie theoretische Überlegungen der Ausgangspunkt allen experimentellen Bemühens sein müssen. Dabei ist theoretisch nicht allein im Sinne von „mathematisch“ zu verstehen - Röntgens Arbeiten enthalten kaum höhere mathematische Betrachtungen - als mehr im Sinne von „allgemein logisch“. Wenn auch seine Arbeiten das wissenschaftlich begründete Experiment in den Vordergrund stellen, so pflegt

er doch andererseits oft zu sagen: „Ein Physiker braucht zur Vorbereitung seiner Arbeit drei Dinge: Mathematik, Mathematik und nochmals Mathematik.“

Aus dieser Einstellung Röntgens heraus wird verständlich, dass er sich in Würzburg schon bald nach seinem Amtsantritt um die Einrichtung einer Professur für theoretische Physik bemüht hat. Ein Lehrstuhl für theoretische Physik hätte Röntgens Arbeitsweise sicher in wertvoller Weise ergänzt, und so sagte er in der schon erwähnten Rektoratsrede:

"Würzburg, das fast allen anderen deutschen Universitäten in der Pflege der Physik vorgegangen war, ist im Augenblick fast die einzige Universität, an welcher nur eine Professur für Physik besteht. Indessen hegen wir die begründete Hoffnung, dass dieser Ausnahmestellung Würzburgs demnächst ein Ende gemacht wird." [64]

Leider erfüllte sich diese Hoffnung Röntgens nicht. Trotzdem machen diese Bemühungen deutlich, dass Röntgen schon vor seiner großen Entdeckung einer neuen Strahlenart rege in das Universitätsleben Würzburgs eingegriffen hat.

Röntgen vermittelte in Würzburg vielen Physikern und künftigen Ärzten die ersten grundlegenden Kenntnisse der Physik. Schöne, durchdachte Vorlesungsexperimente unterstützten seinen streng logisch aufgebauten Vortrag, der allerdings denjenigen am meisten bot, die bereits mit einiger Vorbildung in Röntgens Vorlesungen kamen und bereit waren, dem zurückhaltenden und bescheidenen Mann bei seinen nicht immer einfachen Ausführungen zu folgen.

Röntgen hielt keine die Allgemeinheit begeisternden Vorlesungen, sondern sprach mit einer tiefen und weichen Stimme in der nüchternen Art des exakten Naturwissenschaftlers.

Bei den Studenten war Röntgen sehr gefürchtet. Oft brachte er schlechtvorbereitete Studenten durch seine Fragen in nicht geringe Verlegenheit. Bei den Prüfungen stellte Röntgen keine Examensfragen, die man einpauken konnte, sondern versuchte immer wieder festzustellen, ob die Kandidaten den Stoff mit Verständnis verarbeitet hatten.

Trotz seiner vielen Aufgaben hat Röntgen stets Zeit für seine Forschungen gefunden, wie die 77 Veröffentlichungen zeigen, die er vor der Entdeckung der neuen Strahlen in der Zeit von 1888 bis 1894 publizieren konnte. Es waren vor allem Untersuchungen über den Einfluss des Druckes auf die Brechzahl, die Dielektrizitätskonstante und die elektrische Leitfähigkeit von Flüssigkeiten, welche er in dieser Zeit durchgeführt hat.

Daneben wurde Röntgen aber auch sehr frühzeitig auf die an verschiedenen Orten durchgeführten Forschungen über die Gasentladungserscheinungen in den zuerst als Kinderspielzeug bekannt gewordenen Geißlerschen Röhren aufmerksam. Die in ihnen bei Stromdurchgang ablaufenden Vorgänge hatten zu dieser Zeit bereits mehrere bedeutende Physiker fasziniert.

Besonders die von Philipp Lenard durchgeführten Kathodenstrahlversuche, die er Anfang der 90er Jahre des 19. Jahrhunderts veröffentlicht hatte, weckten Röntgens Interesse. Seine gründliche Art, in ein neues Gebiet einzudringen, veranlasste ihn zunächst, diese Experimente zu wiederholen.

4 Die Entdeckung einer neuen Art von Strahlen

4.1 Ein neues Arbeitsgebiet

Gasentladungen, so hieß ein großes physikalisches Forschungsfeld des ausgehenden 19. Jahrhunderts. Gemeint waren damit die vielfältigen physikalischen Erscheinungen, welche in Abhängigkeit vom Gasdruck bei Stromdurchgang in Geißlerschen Röhren auftreten. Zunächst dominierte die Betrachtung der Leuchterscheinungen. Das dazu benötigte Forschungsgerät war ein sogenannter Entladungsapparat.

Er bestand aus einer Geißlerschen Röhre und einem von Heinrich Daniel Ruhmkorff bereits 1850 konstruierten Funkeninduktor. Dieser enthält ein Spulenpaar (Primär- und Sekundärspule) mit einem eingeschobenen, aus lackierten Drähten bestehenden Eisenkern.

Durch die aus wenigen Windungen eines dicken Kupferdrahtes bestehende Primärwindung fließt ein durch einen Unterbrecher (Wagnerscher Hammer) fortgesetzt unterbrochener Strom. Dieser Unterbrecher funktioniert ähnlich einer heutigen Hausklingel. Der unterbrochene Strom induziert, wie bei einem Transformator, in der aus sehr vielen Windungen eines dünnen Drahtes gebildeten Sekundärspule eine hohe elektrische Wechselspannung.

Durch Parallelschaltung eines Kondensators zum Unterbrecher lässt sich die Funkenbildung bei der Stromunterbrechung vermindern, und es entsteht eine hohe induzierte Spannung bei der Unterbrechung und eine wesentlich geringere bei der Schließung der Unterbrecherkontakte. Daher ist trotz der entstehenden Wechselspannung die eine Elektrode der Sekundärspule vorwiegend positiv, die andere negativ. Der Spannungsstoß, d. h. das Spannungszeitintegral, ist jedoch bei Öffnung und Schließung der Kontakte gleich groß.

Mit diesem Funkeninduktor wurden nun die Geißlerschen Röhren betrieben. Jedermann weiß, dass reine trockene Luft einen guten Isolator darstellt. Deshalb erfolgt kein Stromtransport durch eine unter Atmosphärendruck stehende luftgefüllte Entladungsröhre.

Entfernt man jedoch mit einer Saugpumpe die Luft mehr und mehr, so lässt sich in einem länglichen Entladungsrohre mit Aluminiumelektroden beim Anlegen einer Spannung und bei einem Druck von etwa 40 Torr ein schmales blaues Band erkennen, welches zwischen Anode und Kathode verläuft.

Mit einer solchen Röhre hatte 1859 Julius Plücker, der Schöpfer der Liniengeometrie, jene Strahlen entdeckt, die wir mit dem 1876 von Eugen Goldstein eingeführten Namen als „Kathodenstrahlen“ bezeichnen.

Bei geringeren Drücken (etwa 1 Torr) entstehen bestimmte Dunkelräume, die durch leuchtende Säulen getrennt sind. Die Dunkelräume tragen heute die Namen der Physiker, die sich um ihre Beobachtung verdient gemacht haben. So entsteht zwischen der Kathode und ihrer Glimmhaut der nach Francis William Aston, dem Erfinder des Massenspektrographen, mit dem der Nachweis der Existenz von Isotopen gelang, benannte Dunkelraum.

Der Glimmhaut folgt der Crookesche Dunkelraum. William Crookes hatte 1879 bemerkt, dass dort, wo die Kathodenstrahlen auf die Glaswand der Röhre auftreffen, eine grünlichgelbe Fluoreszenz entsteht.

An den Crookeschen Dunkelraum schließt sich die negative Glimmschicht an. Ihr folgt der Faradaysche Dunkelraum und schließlich die bis an die Anode reichende positive Säule. Die gesamte Erscheinung ist in dem genannten Druckbereich äußerst vielfältig und kompliziert.

Erst als die voranschreitende Pumpentechnik die Herstellung sehr niedriger Drucke ermöglichte,

ergaben sich bei etwa 0,01 Torr übersichtliche Verhältnisse. Die positive Säule verschwindet vollständig, und an der Glaswand, die der Kathode gegenüberliegt, tritt die von Crookes zuerst bemerkte Fluoreszenz auf.

Sie wird durch diejenigen Elektronen der Kathodenstrahlen hervorgerufen, welche an der Kathode durch Stoß von positiven Ionen ausgelöst werden und ohne wesentlichen Energieverlust infolge von Zusammenstößen mit Gasmolekülen bis auf die Glaswand gelangen. Crookes konnte an Hand des Schattenwurfes von Metallplatten, die er im Inneren der Röhre den Kathodenstrahlen in den Weg stellte, die geradlinige Ausbreitung der Kathodenstrahlen nachweisen.

Bereits früh wurde Lenard durch das Problem der Kathodenstrahlen gefesselt, die sich zunächst als eine geheimnisvolle Begleiterscheinung der Gasentladung darstellten und deren magnetische Ablenkbarkeit Johann Wilhelm Hittdorff 1869 zuerst erkannt hatte.

Von Anfang an meinte Lenard, man müsse die Kathodenstrahlen aus dem Entladungsraum in das Freie austreten lassen, um sie genauer untersuchen zu können. Ein erster Versuch mit einem Glasfenster misslang. 1892 zeigte ihm Heinrich Hertz in Bonn, dass dünnste Metallfolien, wie sie Buchbinder benutzen, im Entladungsraum von Kathodenstrahlen durchdrungen werden. Diese Anregung aufgreifend, glückte Lenard rasch die Konstruktion des genügend stabilen „Lenardschen Fensters“ aus Aluminiumfolie, durch das die Kathodenstrahlen in die freie Atmosphäre gelangen und dort ungestört durch die Gasentladung mit Leuchtschirm, photographischer Platte und später auch elektrisch untersucht werden konnten.

Zunächst war noch nicht bekannt, dass es sich bei den Kathodenstrahlen um einen Schwarm von Elektronen handelt. Diese Erkenntnis ergab sich für Cromwell Fleetwood Varley 1871 aus drei wichtigen Beobachtungen:

1. Ein in den Kreis Kathode - Anode eingeschalteter Strommesser zeigt einen Strom an, d. h., die Kathodenstrahlen transportieren elektrische Ladungen.
2. Bei Umkehr der angelegten Spannung fließt kein Strom, d. h., die Ladungen haben nur ein Vorzeichen: das negative,
3. Durchlaufen die Teilchen zunächst ein elektrisches Feld, dessen Richtung senkrecht zu ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung ist, und anschließend ein ebenfalls zur ursprünglichen Bewegungsrichtung senkrecht stehendes Magnetfeld, so lässt sich aus der Ablenkung der Teilchen das Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse bestimmen. Daraus ergab sich unabhängig von der Natur des Gasrestes in der Röhre ein Wert, der etwa 1840mal größer als das entsprechende Verhältnis für das Wasserstoffion ist.

Röntgen war an den ursprünglichen Lenardschen Beobachtungen interessiert und bestellte deshalb bei dem Glastechniker Müller-Unkel in Braunschweig, der Entladungsapparate konstruiert hatte, mit denen in den meisten Laboratorien der damaligen Zeit gearbeitet wurde, einen „bewährten“ Apparat.

Gleichzeitig schrieb er am 4. Mai 1894 an den siebzehn Jahre jüngeren Kollegen, den Privatdozenten Philipp Lenard, der mit Heinrich Hertz, dem leider zu früh verstorbenen Physiker, der die Faraday-Maxwellsche Betrachtungsweise der elektrischen Erscheinungen zu einem entscheidenden Abschluss brachte, zusammen an der Friedrich-Wilhelm-Universität in Bonn arbeitete:

"Sehr geehrter Herr Doctor! Ich möchte gerne Ihren wichtigen Versuch über Kathodenstrahlen in der freien Atmosphäre etc. sehen und habe mir dazu bei Müller-Unkel einen „bewährten“ Entladungsapparat bestellt. Für den Bezug der Fensterplättchen fehlt mir aber eine zuverlässige Quelle. Vielleicht haben Sie die Freundlichkeit, mir eine solche per Postkarte anzugeben.

Hochachtungsvoll Ihr ergebener
gez. Dr. W.C. Röntgen"

Schon am 7. Mai 1894 antwortet Lenard:

"Hochgeehrter Herr Professor! Die Bezugsquelle für dünne Aluminiumfolie ist auch für mich immer eine Schwierigkeit gewesen, denn die Fabrikanten geben nicht gern ungewöhnliche Dicken ab, oder verwenden doch wenig Sorgfalt auf kleine Partien, so dass die Blätter löchrig ausfallen. Es mangelt mir gegenwärtig auch an einer guten Bezugsquelle, Ich erlaube mir daher, Ihnen zwei Blätter aus meinem kleinen Vorrat zu übersenden. Die Dicke beträgt etwa 0,005 mm..."

Kurze Zeit darauf lieferte ihm Müller-Unkel auch eine fertige „Kathodenstrahlröhre nach Lenard“. Sie kostete 36,50 Mark.

Röntgen konnte nun mit der Wiederholung der Lenardschen Kathodenstrahlversuche beginnen. Schon am 21. Juni 1894 sah er die durch Kathodenstrahlen ausgelösten Erscheinungen, d. h. die grünelbe Fluoreszenz der Glaswand des Entladungsrohres, die Ablenkung der Kathodenstrahlen beim Durchgang durch ein Magnetfeld und ihre geradlinige Ausbreitung.

Möglicherweise hat Röntgen auch die Ablenkung der Kathodenstrahlen beim Durchgang durch die Aluminiumfolie gesehen, aus der Lenard geschlossen hatte, dass innerhalb der Atome nur ein verhältnismäßig kleiner Teil des verfügbaren Raumes, nämlich der, welcher später als der Atomkern erkannt wurde, wirklich mit schwerer Materie ausgefüllt ist. Doch dann unterbrachen die vielen Verwaltungsfragen, mit denen sich Röntgen als Rektor der Universität Würzburg im akademischen Jahr 1894/95 zu beschäftigen hatte, seine weiteren Untersuchungen mit dem Lenardschen Apparat.

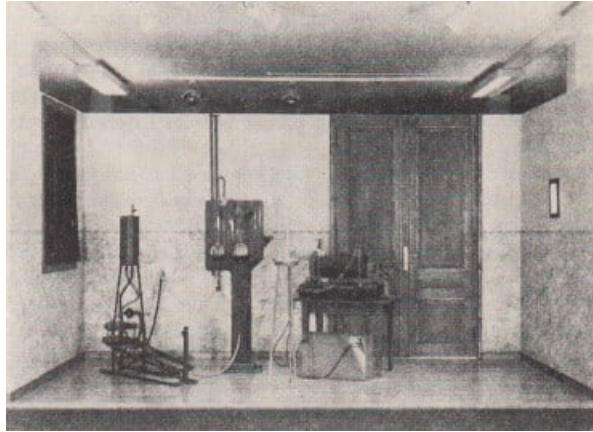
4.2 Die Entdeckung der X-Strahlen

Viel ist über den Zufall in der Geschichte der Wissenschaften geschrieben worden, und auch bei Röntgens Entdeckung hat offensichtlich der Zufall eine gewisse Rolle gespielt. Doch dieser allein hätte wohl nie zu der Entdeckung und Untersuchung der neuen Strahlungsart geführt. Röntgen hat sich vielmehr bewusst mit den Kathodenstrahlen beschäftigt, weil er der Meinung war, dass trotz der Fülle, der von vielen Forschern beobachteten Erscheinungen noch viele Zusammenhänge verborgen geblieben waren.

Als er dann gegen Ende des Jahres 1895 seine Experimente mit dem Funkeninduktor und der Gasentladungsröhre wieder aufnehmen konnte, begann er, die Röhre in einen „ziemlich eng anliegenden Mantel aus dünnem schwarzen Karton“ einzuschließen. Auch Lenard hatte bereits bei einigen seiner Experimente die Röhre in einem Gehäuse aus Zinkblech untergebracht, um die Wirkungen der aus dem Aluminiumfenster austretenden Kathodenstrahlen im verdunkelten Raum besser sehen zu können.

Ähnliche Absichten muss Röntgen gehabt haben, als er seine Röhre, mit der er gerade experimentierte, mit schwarzem Papier umhüllte.

Es war dann wohl bei einem Probeexperiment, spät am Abend des 8. November 1895, eines Freitages, als sich Röntgen von der Lichtundurchlässigkeit seiner Röhrenhülle überzeugen wollte, dass nach dem Einschalten des Funkeninduktors sein Blick plötzlich auf einige hell fluoreszierende Kristalle gelenkt wurde, die in einiger Entfernung von der Röhre auf dem Tische lagen.



7 Rekonstruktion der Entdeckungsapparatur Röntgens (Anschauungsmodell des Deutschen Röntgen-Museums).

In der Bildmitte ist die auf einem dreibeinigen Holzgestell vertikal stehende Geißlersche Röhre zu erkennen; links davon die Pumpe zur Erzeugung des Vakuums und rechts im Bild das Induktorium. Unter diesem steht der Bleiakkumulator, der als Spannungsquelle zum Betrieb des Funkeninduktors dient

Diese Beobachtung, die in keiner der Röntgen bekannten Arbeiten bisher erwähnt worden war und die ihm trotz einer gewissen Farbschwäche, an der er von Jugend an litt, nicht entging, nahm Röntgen, obwohl sie zunächst relativ unbedeutend schien, dennoch als Anregung für die weitere Erforschung des Phänomens.

Es gehört ein Wissenschaftler vom Format eines Röntgen dazu, um diese Kleinigkeit, die vielleicht manch anderer, der sich in den letzten Jahren des ausgehenden 19. Jahrhunderts mit dem aktuellen Gebiet der Gasentladungen beschäftigte, auch gesehen haben mag, sie aber nicht weiter beachtete, dennoch mit Gründlichkeit und Exaktheit nachzuspüren und ihre Ursache zu erforschen.

Röntgen gehörte nicht zu denjenigen Forschern, die sich bei ihren Untersuchungen von einem Wunschdenken leiten ließen.

Gar zu oft ist dieses Wunschdenken, wie einmal formuliert wurde, zum Massengrab vieler Entdeckungen geworden, weil man am Rande liegende Erscheinungen als unbedeutend ansah. Röntgens Vorgehen war anders. Immer wieder zweifelte er, ob nicht etwa eine übersehene Undichtigkeit des Kartons die Fluoreszenz der Kristalle verursacht habe.

Er bemühte sich, alle Fehlerquellen auszuschließen, um die weiteren Wirkungen dieser offensichtlich von der Röhre ausgehenden, aber den Pappmantel durchdringenden Strahlen zu untersuchen. Schließlich wechselte er die Versuchsmethodik, ersetzte die Kristalle durch die Photoplatte und benutzte die Photoemulsion zum Nachweis der Strahlung, nicht ahnend, dass er damit Beobachtungsverfahren und Messtechniken begründete, welche für die späteren Forschungen und Anwendungen unerlässlich waren.

Wir wissen nicht, welche Gedanken den Gelehrten in seinem einfachen Arbeitszimmer bewegt haben mögen, als er diese Untersuchungen durchführte. Wir haben leider keinen authentischen Bericht über diese ersten Beobachtungen. Röntgen selbst hat wenig darüber gesprochen. Seinem Freunde, dem Biologen Boveri, gegenüber äußerte er nach der Entdeckung: „Ich habe etwas Interessantes entdeckt, aber ich weiß nicht, ob meine Beobachtungen korrekt sind.“

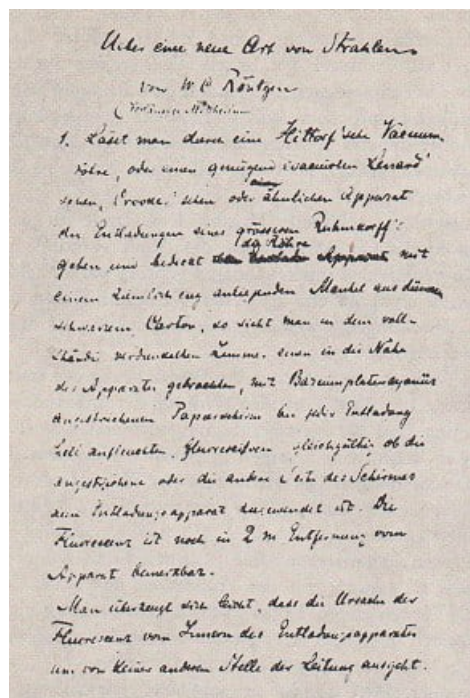
Röntgen behielt das geschilderte Phänomen so lange für sich, bis nach echt klassischer Arbeitsweise die damit verbundenen Erscheinungen gründlichst untersucht und geprüft waren.

Selbst seine Assistenten erfuhren erst nach der Veröffentlichung der „Vorläufigen Mitteilungen“, welche große Entdeckung an ihrem Institut gemacht worden war.

In den sieben Wochen, die zwischen der Beobachtung der ersten an und für sich relativ unbedeutenden Wirkung der unbekanntes Naturerscheinung und der Veröffentlichung der ersten vorläufigen Mitteilung liegen, hat Röntgen in: genialer Weise aus der Menge der Erscheinungen das Phänomen der X-Strahlen, wie er diese Strahlen zunächst nannte, klar herausgearbeitet. Röntgen muss mit äußerster Arbeitseifer diese Wochen genutzt haben, um alle Unterlagen zu gewinnen. Seine Frau berichtete, dass er in diesen Wochen sich ganz von der Außenwelt abschloss. Der Gelehrte nahm in den ersten Tagen nach der Entdeckung nicht nur die Mahlzeiten in seinem Arbeitsraum ein, sondern ließ sich für längere Zeit sogar dort seine Schlafstelle aufstellen.

Am 28. Dezember 1895 konnte er schließlich dem Sekretär der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft an der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg das Manuskript seiner Arbeit „Über eine neue Art von Strahlen“ übergeben.

Obwohl in keiner Sitzung über diese Arbeit gesprochen worden war, da in den Weihnachtsferien keine Sitzungen stattfanden, erfolgte ihre sofortige Drucklegung in den Sitzungsberichten der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft zu Würzburg, und Röntgen konnte die ersten Sonderdrucke am Neujahrstag 1896 an eine Reihe seiner Kollegen versenden. Die kleine Schrift umfasste zehn Seiten.



8 Die erste Seite der 1. Mitteilung Röntgens über seine Entdeckung

Sie war in der für Dissertationen üblichen Form geheftet und mit einem Heftstreifen aus farbigem Glanzpapier versehen. In dieser ersten vorläufigen Mitteilung beschreibt Röntgen in knapper, aber formvollendeter Darstellung gesicherte Experimente mit den von ihm entdeckten „X-Strahlen“. Der erste der 17 Abschnitte dieser denkwürdigen Veröffentlichung lautet wörtlich:

"Lässt man durch eine Hittdorffsche Vakuumröhre, oder einen genügend evakuierten Lenardschen, Crookeschen oder ähnlichen Apparat die Entladungen eines größeren Rühmkorffs gehen

und bedeckt die Röhre mit einem ziemlich eng anliegenden Mantel aus dünnerem schwarzen Karton, so sieht man in dem vollständig verdunkelten Zimmer einen in der Nähe des Apparates gebrachten mit Bariumplatinzyanür angestrichenen Papierschirm bei jeder Entladung hell aufleuchten, fluoreszieren, gleichgültig, ob die angestrichene oder die andere Seite des Schirmes dem Entladungsapparat zugewendet ist. Die Fluoreszenz ist noch in 2 m Entfernung vom Apparat bemerkbar." [51, S. 1]

Und im Abschnitt 13 seiner ersten Mitteilung über die neuen Strahlen schreibt Röntgen:

"Diese Erzeugung (der Strahlen) findet nicht nur im Glase statt, sondern, wie ich an einem mit 2 mm dicken Aluminiumblech abgeschlossenen Apparat beobachten konnte, auch in diesem Metall ..." [51, S. 9]

Eine der wichtigsten Fragen war die nach dem Wesen der X-Strahlen. Röntgen schildert bereits in seiner ersten Mitteilung ihre geradlinige Ausbreitung. Er hat auch Interferenzerscheinungen gesucht, allerdings ohne Erfolg. Die naheliegende Vermutung, dass die Strahlen ultraviolettes Licht seien, konnte er nicht bestätigen, da keine merkliche Brechung zu beobachten war. Allerdings fand er, dass eine gewisse Verwandtschaft zwischen den neuen Strahlen und den Lichtstrahlen zu bestehen schien.

Deshalb glaubte Röntgen zunächst, die neuen Strahlen longitudinalen Schwingungen im Äther zuschreiben zu müssen.

Das Auftreten von Beugungserscheinungen, so wie wir sie z. B. bei der Beugung des Lichtes an einem Spalt sehen können, hätte sofort die Wellennatur der neuen Strahlen bewiesen. Doch auch in seiner dritten Mitteilung über die Strahlen muss Röntgen feststellen:

"Seit dem Beginn meiner Arbeiten über X-Strahlen habe ich mich wiederholt bemüht, Beugungserscheinungen mit diesen Strahlen zu erhalten, aber ich habe keinen Versuch zu verzeichnen, aus dem ich mit einer genügenden Sicherheit die Überzeugung von der Existenz einer Beugung der X-Strahlen gewinnen könnte."

Über 15 Jahre lang sollte Röntgen und viele seiner Kollegen intensiv, aber erfolglos an diesem Problem arbeiten, bevor es 1912 Walter Friedrich und Paul Knipping gelang, Beugungsbilder mit der von Röntgen entdeckten Strahlungsart zu erhalten.

Als dann auch die Polarisation der Strahlen gelang, war es evident, dass die neuen Strahlen transversale elektromagnetische Wellen, also Licht, sehr kleiner Wellenlängen waren.

Bei seinen ersten Experimenten versuchte Röntgen, durch eine Tür hindurch zu photographieren, die das Labor, in dem die Entladungstemperatur stand, von ihm trennte, in welchem die in der Kassette aufbewahrte Photoplatte lag. Nach dem Entwickeln bemerkte er Streifen auf dem Negativ, deren Zustandekommen, er sich zunächst nicht erklären konnte. Später sagte Röntgen darüber:

"Diese Abschattierung fiel mir auf, und ich erkannte daran, dass nicht die Absorption durch die ungleichen Holzdicken des Türpfostens das Maßgebende war, sondern eine Oberflächenabsorption des Pfostens. Ich erkundigte mich nach der Art des Türanstriches und erfuhr, dass derselbe aus Bleiweiß bestand.

Weil Blei für diese Strahlen so schwer durchlässig ist, absorbiert eine in der Richtung der Strahlen verlaufende Bleiweißschicht dieselbe beträchtlich mehr als eine senkrecht zu den Strahlen orientierte Schicht." [52, S. 2]

Am eindrucksvollsten war aber wohl die erste „Röntgenaufnahme“ einer menschlichen Hand. Röntgen hatte die Hand seiner Frau am 22. Dezember 1895 durchleuchtet und photographiert.

Diese Aufnahme bildete die größte Überraschung in seiner ersten Mitteilung über die neuen Strahlen. Damit hat Röntgen von Anfang an die Perspektive aufgezeigt, die seine Entdeckung der Medizin gab. Mancher allerdings zweifelte auch an der Echtheit dieser Aufnahme, zu überwältigend war das Ergebnis dieser Untersuchungen. Selbst Freunde Röntgens hätten wohl Zweifel geäußert, wäre ihnen nicht Röntgens exakte und zuverlässige Arbeitsweise bekannt gewesen.



9 Röntgenaufnahme von Frau Röntgens Hand. Aufgenommen am 22.12. 1895. Diese Aufnahme ist die erste bewusst mit X-Strahlen durchgeführte Zentralprojektion eines menschlichen Körperteils

Allmählich wurde jedoch deutlich, dass Röntgen mit den von ihm entdeckten X-Strahlen der Wissenschaft und der Technik Möglichkeiten eröffnete, die bis in unsere Zeit reichen und noch längst nicht ausgeschöpft sind.

Röntgen veröffentlichte insgesamt drei Arbeiten über die von ihm entdeckten Strahlen. Nach der ersten 1895 erschienenen Mitteilung erfolgte 1896 eine zweite, in der Röntgen schrieb, dass er seit einigen Wochen einen Entladungsapparat gebrauchte, „ ... bei dem ein Hohlspiegel aus Aluminium als Kathode und ein unter 45° gegen die Spiegelachse geneigtes, im Krümmungszentrum aufgestelltes Platinblech als Anode fungiert.“ [52, S. 8]

Mit diesen Fokusröhren gelangen Röntgen wesentlich bessere Aufnahmen.

Zwischen Anode und Kathode wurde bald eine dritte scheibenförmige Elektrode, die Antikathode, so angeordnet, dass sie mit der einen Fläche direkt im Strahlengang der Kathodenstrahlen stand. Auf dieser Fläche der dritten Elektrode wurden die Kathodenstrahlen gebremst, und von dort gingen die Röntgenstrahlen aus.

Die ursprüngliche Anode wurde zur Hilfselektrode, und die Antikathode bildete von nun an einen sehr wichtigen Bestandteil der Röntgenröhre. Der Ausgestaltung der Antikathode wurde intensivste Arbeit gewidmet. So entstand die Röntgenröhre des klassischen Typus. Bei ihr trat eine Ionisation des Gasinhaltes ein. So konnte ein Strom durch die Röhre fließen, wodurch die Kathodenstrahlen entstanden und durch deren Aufprallen auf die Antikathode wieder die Röntgenstrahlen zustande kamen.

Bei den sogenannten „Modernen Röntgenröhren“ wird dagegen das Elektrodenemissionsvermögen glühender Metalloxide oder Metalle ausgenutzt. Von der Tatsache ausgehend, dass glühende Metalldrähte, z.B. der Glühfaden einer Glühbirne, bei Weißglut Elektronen emittieren, wurde eine solche Glühkathode in eine hochgradig evakuierte Röntgenröhre eingesetzt und die emittierten Elektronen mit Hilfe eines elektrischen Feldes beschleunigt und auf der Anode abgebremst.

Diese Lösung fand 1911 William D. Coolidge, der damit den Röhren die heutige Form gab. Die Ionenröhren der Entdeckerzeit wurden durch die modernen Elektronenröhren abgelöst. In einer dritten Veröffentlichung berichtete Röntgen sehr eingehend über Durchlässigkeitsversuche. Diese Arbeit enthält aber auch eine sehr wichtige Beobachtung, die als die erste Materialprüfung mit Röntgenstrahlen bezeichnet werden kann. Röntgen schreibt:

"Mit einer solchen sehr hart gewordenen Röhre habe ich von dem Doppellauf eines Jagdgewehres mit eingesteckten Patronen ein sehr schönes photographisches Schattenbild erhalten, in welchen alle Details der Patronen, die inneren Fehler der Damastläufe u. s. w. sehr deutlich und sehr scharf erkennbar sind.

Der Abstand der Platinplatte der Entladungsröhre bis zur photographischen Platte betrug 15 cm, die Expositionsdauer 12 Minuten." [53, S. 11]

Wenn man aus heutiger Sicht weiß, dass jedesmal, wenn ein Forscher der damaligen Zeit sich mit den Kathodenstrahlexperimenten beschäftigte, auch gleichzeitig X-Strahlen auftraten, so ist es erstaunlich, dass keiner vor Röntgen auf diese neue Strahlenart aufmerksam geworden ist.

Allerdings wurden schon vor Röntgens Entdeckung unerklärliche Schwärzungen auf photographischen Platten beobachtet, wenn diese in der Nähe von Kathodenstrahlröhren lagen. So beobachtete Goodspeed 1890 nach der Vorführung einer Crookeschen Röhre, bei der Entwicklung von zufällig in der Nähe liegenden Photoplatten, auf einem Negativ zwei runde helle Scheiben.

Doch niemand vermochte diese Erscheinung zu erklären. Die Platten wurden weggelegt und vergessen. Sechs Jahre später, nach der Entdeckung der X-Strahlen durch Röntgen, suchte Goodspeed die Platten wieder hervor, prüfte sie von neuem und wiederholte die damaligen Experimente. Ohne Zweifel hatte er eine „Röntgenaufnahme“ gemacht, ohne es zu beachten.

Sicher sind oftmals auch andere unerklärliche Wirkungen beim Arbeiten mit Entladungsröhren festgestellt worden. Keiner dieser Beobachter vermochte aber die Bedeutung solcher Erscheinungen zu erfassen. Dieses blieb Wilhelm Conrad Röntgen vorbehalten.

Seine Entdeckung war der vorläufige Abschluss der Arbeiten einer langen Reihe von Vorgängern, die bei dem Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke begann, der zeigte, wie man ein Vakuum erzeugt, und über viele andere führte, die man die geistigen Ahnen Röntgens nennen könnte, und zu denen Alessandro Volta, Andre Marie Ampere und Georg Simon Ohm genauso gehören wie Faraday, Plücker, Hittdorff, Crookes, Hertz und schließlich Lenard.

Natürlich war es ein Zufall, dass Röntgen gerade am Freitagabend des 8. November 1895 seine Entladungsröhre einschaltete und sein Blick auf die fluoreszierenden Kristalle fiel, und nicht am 12. oder 17. November. Dass er aber seine Untersuchungen durchführte, war einmal die notwendige Folge einer wissenschaftlichen Entwicklung, deren Einzelergebnisse sich nicht wie die Perlen auf einer Schnur aneinanderreihen, sondern vielmehr ein weit vermaschtes Netz bilden, ebenso aber auch eine Folge eines Genies, welches die Bedeutung einer anscheinend so nebensächlichen Beobachtung zu erfassen vermochte.

Obwohl Röntgen erst im Alter von 50 Jahren die Entdeckung der neuen Strahlen gelang, war es ihm doch vergönnt, noch zu Lebzeiten die Anwendung der Strahlen wachsen zu sehen. Seine Entdeckung ist aber gleichzeitig ein Beispiel dafür, dass oftmals gar nicht beabsichtigte Forschungsergebnisse der reinen Wissenschaft befruchtend auf die Technik und auf andere angewandte Wissenschaften einwirken können.

Röntgen hatte nicht beabsichtigt, Strahlen zu finden, die den menschlichen Körper zu durchdringen vermögen, sondern er freute sich an den schönen Experimenten mit Gasentladungsröhren und stellte sich die Frage nach den Zusammenhängen vieler Erscheinungen, die schon andere vor ihm beobachtet hatten.

4.3 Die Welt horcht auf

In wenigen Wochen war Röntgens Entdeckung in aller Welt bekannt geworden und hatte, wie nur selten in der Geschichte der Wissenschaften, einen tiefen Eindruck auf das Publikum gemacht. Am meisten faszinierte verständlicherweise die mit den neuen Strahlen gemachte Aufnahme einer menschlichen Hand.

Schon am 17. Januar 1896 veröffentlichte der Hamburger Physiker Voller zusammen mit einem Bericht über die Entdeckung Röntgens ebenfalls die mit den neuen Strahlen gemachte Aufnahme einer lebenden Hand in der französischen Zeitschrift „L'Illustration“. Solche und andere Bestätigungen der Röntgenschen Resultate wurden in den ersten Monaten des Jahres 1896 in größerer Zahl bekannt und trugen viel dazu bei, die Zweifel zu zerstreuen, die mancher über die Echtheit der Wunderstrahlen anfänglich hegte.

Am 23. Januar 1896 erschien Röntgens Arbeit in der Londoner Zeitschrift „Nature“ und am 14. Februar in der amerikanischen „Science“. Die französische Zeitschrift „L'Eclairage Electrique“ brachte die vorläufige Mitteilung am 8. Februar 1896.

Wenn man bedenkt, dass noch kein Radio und kein Fernsehen Röntgens Entdeckung weltweit bekannt machen konnten und trotzdem in so kurzer Zeit die Fachwelt und das große Publikum über die neue Art von Strahlen unterrichtet wurde, so wird deutlich, wie sensationell die Ergebnisse des Würzburger Physikers waren.

Insbesondere war es wohl die hohe Durchdringungsfähigkeit der X-Strahlen, welche die Öffentlichkeit tief beeindruckte. Papier, Blech, Holz und auch der menschliche Körper stellten keinen merklichen Widerstand für diese unsichtbaren Strahlen dar. Ein Platinblech jedoch vermochte die Strahlung stark abzuschwächen, auch Blei hatte eine ähnliche Wirkung. Damit war die Grundlage für einen künftigen Strahlenschutz gegeben.

Immer wieder muss man staunend feststellen, welche große Aufregung die Röntgensche Entdeckung in diesen ersten Monaten des Jahres 1896 auslöste. Der Kaiser war durch eine Zeitungsnotiz ebenfalls auf die X-Strahlen aufmerksam geworden, und er ließ sofort bei Röntgen telegraphisch anfragen, ob die in der Zeitung gemachten Angaben zutreffend seien. Als der Gelehrte ihm dieses bestätigte, ersuchte er ihn, am nächsten Tage nach Berlin zu kommen und persönlich zu berichten.

Röntgen hat dort am 12. Januar 1896 seinen ersten Vortrag über die Entdeckung der Strahlen gehalten. Ausgehend von einer Schilderung des Wesens der Geißlerschen Röhren, beschrieb er anschließend die Hittdorffschen Versuche und erläuterte die Kathodenstrahlen.

Danach ließ er die Zuhörer alle Zweifel des Forschers miterleben und erklärte, wie misstrauisch er gegen seine eigenen Sinne geworden sei und deshalb das menschliche Auge durch die photo-

graphische Platte ersetzt habe. Abschließend zeigte Röntgen Photographien und demonstrierte die Wirkung der X-Strahlen.

Als er nach Würzburg zurückkehrte, ehrten die Studenten der Universität den großen Wissenschaftler durch einen Fackelzug. Die Ansprache, mit der Röntgen dankte, lässt uns erneut seine große Bescheidenheit erleben. Er sagte:

"... Während von allen Seiten fast sinnverwirrende Glückwünsche und Ehrenbezeugungen auf mich niederprasselten und unwillkürlich der neue Eindruck zum Teil den alten verwischte, ist mir immer eine Erinnerung lebendig und frisch geblieben, die Erinnerung an die Freude, welche ich empfand, als meine Arbeit sich entwickelte und ihr Vollendung erreicht hatte. Es ist die Freude über das Gelingen einer Arbeit und über den gemachten Fortschritt.

Diese Freude können Sie alle im Leben genießen, dieses Ziel können und müssen Sie alle erreichen. Das hängt hauptsächlich von Ihnen ab. Möge diese Freude, diese innere Befriedigung Ihnen allen mehrmals zuteil werden, und mögen die äußeren Umstände sich so gestalten, dass Sie dieses Ziel auf nicht allzu schwierigen Wegen erreichen!" [64]

Nach seinem Vortrag beim Kaiser sprach Röntgen nur noch einmal vor einer größeren Zuhörerschaft über seine Entdeckung, und zwar in jener denkwürdigen Sitzung der Würzburger Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft, am Abend des 23. Januar 1896. Einfach und bescheiden dankte Röntgen für den Beifallssturm, mit dem er begrüßt wurde, um danach zu betonen, dass er es des allgemeinen Interesses wegen für seine Pflicht hielt, öffentlich über seine Arbeit zu sprechen, obwohl sich seine Versuche noch im Anfangszustand befänden.

Auch diesmal erläuterte Röntgen seinen Vortrag durch glänzende Demonstrationen. Schließlich bat er den berühmten Anatomen Rudolf Albert v. Koelliker, der den Mantel von grauer Substanz entdeckt hat, der den Zentralkanal des Rückenmarkes umgibt, dessen Hand mit den neuen Strahlen photographieren zu dürfen.

Gern kam dieser Röntgens Bitte nach, und als die gelungene Aufnahme den Anwesenden gezeigt wurde, fühlte wohl jeder die Größe dieses Augenblickes. Der greise Anatom drückte die Empfindung eines jeden aus, als er sagte, dass er in den 48 Jahren seiner Zugehörigkeit zu der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft noch keiner so bedeutungsvollen Sitzung beigewohnt habe, und er schlug unter dem Beifall der Anwesenden vor, die X-Strahlen in Zukunft Röntgensche Strahlen zu nennen. Seitdem werden die X-Strahlen im deutschsprachigen Raum als Röntgenstrahlen bezeichnet.

Gab es auf der einen Seite viele Menschen, die begeistert Röntgens Entdeckung aufgriffen, so wurden andererseits aber auch Stimmen laut, die sich ängstlich gegen die Verbreitung der Röntgenschen „Gespensterbilder“ wandten. In einem Artikel der Londoner Zeitschrift „The Electrician“ konnte man am Schluss lesen:

"Wir stimmen jedoch den Tageszeitungen nicht bei, wenn sie diese Entdeckung als eine „Revolution der Photographie“ bezeichnen. Es gibt sicherlich nur wenige Leute, die für ein Porträt sitzen wollen, welches nur die Knochen und die Ringe in den Fingern zeigt." [74]

Offenbar rührten viele der damals geäußerten Befürchtungen daher, dass man annahm, die Röntgenphotographie sei identisch mit der gewöhnlichen Photographie, nur mit dem Unterschied, dass die Röntgenstrahlen das Innere der Körper zu photographieren gestatten. Man vergaß ganz die Notwendigkeit, die Röntgenstrahlen erst zu erzeugen, ehe damit photographiert werden konnte.

Dieses Missverständnis muss wohl einen Abgeordneten des amerikanischen Staates New Jersey am 19. Februar 1896 dazu geführt haben, im Landtag zu Trenton einen Gesetzesvorschlag

einzubringen, nach dem der Gebrauch von X-Strahlen in Operngläsern im Theater verboten werden sollte.

Wenn uns auch diese Befürchtungen heute kurios erscheinen und sicher nur aus der Unkenntnis der Menschen dieser Zeit über die Natur der Röntgenstrahlen resultieren, so sollte doch die Angst mancher vor diesen neuen Strahlen, in ganz anderer Art und Weise als erwartet, sich bereits kurze Zeit nach der Entdeckung als durchaus berechtigt erweisen.

Und das Gedicht „Stoßseufzer eines Fürchtsamen“, welches im Mai 1896 in den Meggendorfer Humoristischen Blättern erschien und sich in poetischer Form gegen die Röntgenschen Schattenphotographien wandte, sollte bald eine makabre Bedeutung erlangen. Es beginnt:

Überall Professor Röntgen!
Die Begeist' rung will nicht end' gen.
Mir allein wird bei dem Klange
Dieses Namens schrecklich bange.
Und es faßt mich grauser Schrecken
Mußte er denn auch entdecken
Die memento-mori-Strahlen?
In den Blättern und Journalen
und in allen Auslagfenstern
Wimmelts heute von Gespenstern!

Und endet schließlich:

Darf, soll mich die Furcht nicht lähmen,
Kein Journal zur Hand mehr nehmen,
Und ich fühl's, dass ich zum Schluß
Noch am Gruseln sterben muss!
Schreibt sodann auf meine Truhe,
Dass in mir, der ich hier ruhe,
Ward ein Opfer hingerafft
Der modernen Wissenschaft.

Nun, am Gruseln vor den Röntgenstrahlen musste keiner sterben, wohl aber an den schwerwiegenden Wirkungen dieser Strahlen.

Daher beklagt die Wissenschaft 359 Forscher, Ärzte, Physiker, Röntgentechniker, Laboranten und Krankenschwestern, die als Pioniere der Radiologie ihr Leben lassen mussten, ehe Strahlenschutzmaßnahmen erarbeitet werden konnten, welche das gefahrlose Umgehen mit Röntgenstrahlen ermöglichten. Da zunächst keine biologischen Wirkungen der Strahlen bekannt waren, bestand auch keine Veranlassung, sich besonders dagegen zu schützen.

Röntgen hatte allerdings von Anfang an seine Experimente in einer großen Zinkkiste durchgeführt. Dabei verstärkte er die Seite der Kiste, die nach der außen stehenden Röhre wies, sehr bald mit Blei. Dieses Vorgehen war zwar nur als Schutzmaßnahme gedacht, um die photographischen Platten vor unbeabsichtigter Bestrahlung zu schützen, es bot jedoch gleichzeitig Röntgen einen Schutz gegen die Strahlen. Leider wurde diese Maßnahme von den meisten Strahlenforschern jener Zeit nicht beachtet.

4.4 Ehrungen über Ehrungen

Die Ehrungen und die Besuche, mit denen Röntgen in der Zeit nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen überhäuft wurde, stellten für den zurückhaltenden Forscher eine große Last dar.

Seinem Freunde Zehnder, mit dem er 1888 in Würzburg die schönen Untersuchungen über den Einfluss des Druckes auf die Brechzahl von Schwefelkohlenstoff und Wasser durchgeführt hatte, schrieb er, dass der ganze Rummel ihn 4 Wochen nicht zu einem einzigen Versuch kommen ließ. Dieses muss für Röntgen außerordentlich belastend gewesen sein, denn durch die Entdeckung der Strahlen hatte sich eine Fülle von neuen Fragestellungen ergeben, wie z. B. die nach der Natur der Röntgenstrahlen oder nach der Wechselwirkung der Röntgenstrahlen mit den verschiedensten Stoffen, insbesondere aber auch mit lebenden Organismen.

Dabei wurde der Grundstein für die Biophysik, eine ganz neue wissenschaftliche Disziplin, gelegt. Die Entdeckung der Strahlen führte aber auch zur Suche nach anderen, bisher nicht bekannten Strahlenarten, die ebenfalls unsichtbar waren, auf die photographische Platte einwirkten und gleichzeitig imstande waren, undurchsichtige Körper zu durchdringen.

Bei solchen Untersuchungen fand Henri Becquerel, nach dem die heutige Maßeinheit (Bq) der Aktivität eines radioaktiven Präparates benannt worden ist, dass eine derartige Strahlung vom Element Uran ausgesandt wird.

Weitere Forschungen zeigten, dass diese Strahlung nicht nur dem Uran allein eigentümlich ist, sondern in noch viel stärkerem Maße einer Reihe von anderen Elementen, die man, mit Ausnahme des Thoriums, bis dahin nicht gekannt hatte. Es ist verständlich, dass in dieser Zeit einer stürmischen Wissenschaftsentwicklung, von der wir annehmen dürfen, dass sie von Röntgen genauso aufmerksam verfolgt worden ist, wie vorher die Physik der Gasentladungen, jede Ablenkung von seinen Experimenten als sehr störend empfunden wurde. Zu dieser Art Störungen gehören nun einmal auch die Ehrungen, die einem verdienten Manne zuteil werden.

Der bekannte Röntgenbiograph Otto Glasser hat eine Liste von nicht weniger als 89 Ehrungen zusammengestellt, mit denen Röntgen aus Deutschland, England, Frankreich, Österreich, den Vereinigten Staaten, Italien, Mexiko, der Schweiz, den Niederlanden, der Türkei, Russland, Schweden, Norwegen und Portugal überhäuft wurde.

So erhielt Röntgen von der medizinischen Fakultät der Universität Würzburg die Ehrendoktorwürde. 1896 verlieh ihm seine Geburtsstadt Lennep das Ehrenbürgerrecht. Im Mai des gleichen Jahres erfolgte die Ernennung zum korrespondierenden Mitglied der Münchener Akademie.



10 Tafel an Röntgens Geburtshaus

Im gleichen Jahr modellierte der Berliner Bildhauer R. Felderhoff als erster Röntgens Kopf. Das Ausland stand diesen Ehrungen nicht nach. Die Royal Society in London verlieh ihm die goldene Rumford Medaille, und im Jahre 1900 ehrte ihn die New Yorker Columbia Universität mit der Bernard Medaille.

Der Prinzregent von Bayern, Prinz Luitpold, verlieh bereits im Jahre 1896 Röntgen den Kronenorden für seine wissenschaftliche Entdeckung. Dieser Orden war mit dem persönlichen Adel verbunden, den Röntgen aber ablehnte.

Voll Freude erwähnt Röntgen aber auch die Anerkennung seiner Arbeit durch Ludwig Boltzmann, dem Begründer der statistischen Auffassung des komplizierten Entropiebegriffes, durch Emil Warburg, dem späteren Präsidenten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, durch Friedrich Kohlrausch, als dessen Nachfolger Röntgen 1888 nach Würzburg kam, durch William Thomson, den späteren Lord Kelvin, nach dem die Maßeinheit der absoluten Temperatur benannt wurde.

Die größte Anerkennung aber wurde dem Gelehrten zuteil, als bei der erstmaligen Verleihung des Nobelpreises für Physik ihm dieser Preis zuerkannt wurde. Am 10. Dezember 1901 konnte Röntgen ihn aus den Händen des schwedischen Kronprinzen persönlich in Empfang nehmen. Gleichzeitig mit Röntgen erhielten Emil v. Behring aus Halle, der das Diphtherieserum fand, und Jacobus Henricus van't Hoff für seine bahnbrechenden Untersuchungen auf dem Gebiete der chemischen Reaktionskinetik den Nobelpreis.

Röntgen nahm zwar an dem feierlichen Akt in der Stockholmer Musikakademie teil und dankte auch auf dem anschließenden Bankett mit wenigen Worten für die erwiesene Ehrung, hielt aber keinen Nobelvortrag, wie die beiden anderen Preisträger und wie es seitdem üblich geworden ist.

Röntgen legte in seinem Testament fest, dass der Geldbetrag des Preises, es waren 50000 Kronen, der Universität Würzburg zur freien Verwendung der jährlich anfallenden Zinsen zu wissenschaftlichen Zwecken zur Verfügung stehen soll. Leider wurde dieser Geldbetrag, wie auch das persönliche Vermögen Röntgens, durch die Inflation wertlos.

Neben den vielen Ehrungen, musste Röntgen aber auch Gerüchte erfahren, wonach er gar nicht der Entdecker der Röntgenstrahlen sei. So deutete Röntgen an, dass sich auch „Neidhämmer“ über seine Entdeckung ausgelassen hätten. Es erschienen immer wieder Berichte, die den Präparator Weber als Entdecker der Strahlen nannten, obwohl dieser erst fünf Jahre nach der Entdeckung der Strahlen durch Röntgen mit ihm zusammen kam.

Auch dem alten Vorlesungsdieners Marstaller wurde die Entdeckung zugeschrieben. Röntgen habe Versuche gemacht, bei denen ein Kästchen, in dem ein Ring lag, auf dem Tisch gestanden habe,

Eines Morgens habe Röntgen seine Versuchsanordnung betrachtet, und dabei sei er von Marstaller auf zufällig in der Nähe gelegenes photographisches Papier aufmerksam gemacht worden, auf dem sich ein Bild des Ringes gezeigt haben soll.

Leider hat Röntgen solche Gerüchte unbeabsichtigt gefördert. So sahen einige Röntgens Verzicht, einen Nobelvortrag zu halten, als ein Eingeständnis an. Auch an der großen Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte, die 1896 in Frankfurt am Main stattfand, nahm Röntgen nicht teil, obwohl man ihm den Ehrenvorsitz angetragen hatte.

In den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts begann sich auch das zunächst freundliche Verhältnis zwischen Röntgen und Lenard immer mehr zu verschärfen. Wahrscheinlich hat die Verleihung des Nobelpreises an Röntgen diese Veränderung ausgelöst.

Lenard, der den gleichen Preis erst vier Jahre später erhielt, war so verbittert, dass er im Alter von über 80 Jahren in seinem letzten Buch ein Gleichnis anführte, in dem er Röntgen als die Hebamme bei der Geburt der Entdeckung der Strahlen bezeichnet, die den Vorzug habe, das Kind zuerst vorzeigen zu können und die nur Unwissende mit der Mutter verwechseln würden.

Röntgen erkannte die Lenardschen Vorstellungen über das Elektron nicht an. Dieses geschah allerdings nicht nur aus Feindschaft zu Lenard, sondern auch, weil das Wort „Elektron“, wie Röntgen sagte, ein inhaltsloses Wort sei. Die Ablehnung der Elektronenvorstellung durch Röntgen ging soweit, dass es verboten war, in seinem Institut das Wort „Elektron“ auszusprechen.

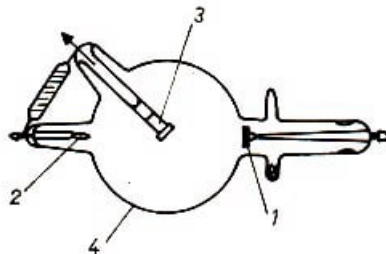
Es gehört sicher zu einem der tragischsten Ereignisse in der Geschichte der Wissenschaften, dass zwei so bedeutende Männer, die durch ihre exakten Forschungen viel zur Entwicklung der Physik beitragen durften, im Persönlichen leider nur den Weg zu einem verhängnisvollen Missverstehen fanden.

Unabhängig von diesen Querelen wurde Röntgen auch weiterhin für seine Entdeckung mit einer Vielzahl von Ehrungen und Auszeichnungen überhäuft.

Solange Röntgen in Würzburg blieb, erregte zwar die Entdeckung der Strahlen bei allen ein ungeheures Aufsehen, aber die Verhältnisse im alten Freundeskreis wurden davon nicht berührt. Röntgen blieb der Kollege und Freund, mit dem man wissenschaftlich diskutierte und mit dem man zur Jagd ging.

4.5 Röntgens Entdeckung aus heutiger Sicht

Röntgen hat bei der Entdeckung der neuen Strahlen mit einer Hittdorffschen Röhre, d.h.einer verbesserten Geißlerschen Röhre, von einfacher zylinderförmiger Gestalt gearbeitet.



11 Schematische Darstellung einer Röntgenröhre des klassischen Typus.

(1) Kathode, (2) Anode, (3) Antikathode, (4) evakuierter Glaskolben (nach F. Voltz und F. Zacher)

In seiner Veröffentlichung machte er aber keine Angaben über die Spannung, mit der er diese Röhre betrieben hat. Wie damals üblich, benutzte er ein Induktorium als Spannungsquelle, Große Geräte dieser Art mit sorgfältiger Isolierung erzeugten Spannungen von mehreren 100000 Volt.

So hohe Spannungen hat Röntgen sicher nicht benutzt. Vermutlich legte er auch gar keinen Wert auf solche, denn alle Leuchterscheinungen, besonders auch die Fluoreszenz der Glaswand gegenüber der Kathode, sind schon bei einigen 1000 Volt gut ausgebildet.

Wir wissen heute, dass Röntgenstrahlen durch Ionisationsbremsung leichter Teilchen, insbesondere Elektronen, oder durch Elektronenübergänge zwischen den Schalen der Atomhülle des bremsenden Materials entstehen, und unterscheiden deshalb Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung.

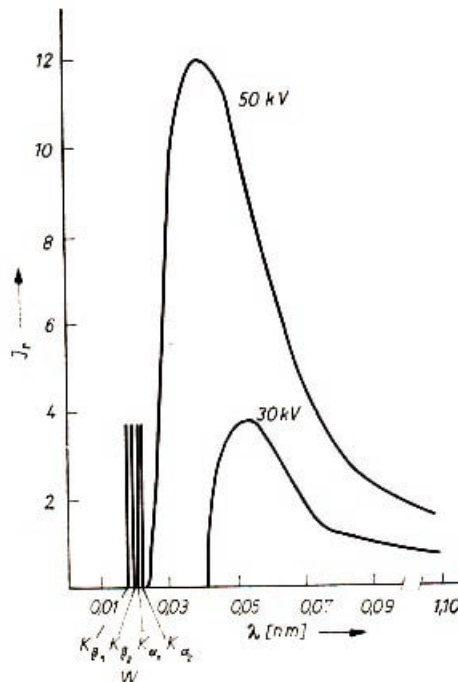
Die Bremsstrahlung besitzt ein kontinuierliches Spektrum, d. h., alle Wellenlängen bis herab zu einer minimalen Wellenlänge λ_{\min} , welche der Maximalenergie der abgebremsten Teilchen

entspricht, kommen im Spektrum vor. Für λ_{\min} , gemessen in Nanometer (nm; 1 nm = 10^{-9} m), gilt:

$$\lambda_{\min} = \frac{12,4}{U \text{ (kV)}}$$

wobei U die Röhrensprechung in kV bedeutet.

Die charakteristische Röntgenstrahlung liefert ein Linienspektrum, welches für das bremsende Material charakteristisch ist und sich dem Bremspektrum überlagert. In der Radiologie wird vornehmlich die Bremsstrahlung eingesetzt. Eine Ausnahme bildet z. B. die Mammographie mit der charakteristischen Röntgenstrahlung des Molybdäns.



12 Spektrale Energieverteilung einer Röntgenstrahlung bei einer Anodenspannung von 30 kV bzw. 50 kV.

Aufgetragen ist ein relatives Intensitätsmaß I_r , über der Wellenlänge λ in nm. (1 nm = 10^{-9} m = 0,000000001 m).

Dem kontinuierlichen Spektrum der Röntgenbremsstrahlung überlagert sich u. U. das Linienspektrum der charakteristischen Röntgenstrahlung des Anodenmaterials. Eingezeichnet sind die Linien K_{α_1} , K_{α_2} , K_{β_1} und K_{β_2} einer Wolframanode. Da die Anregungsenergie der K_{β_2} -Linie des Wolframs 69230 keV beträgt, kann diese Linie erst bei einer Röhrensprechung, die größer als etwa 70 kV ist, im Spektrum auftauchen. Die ersten Röntgenröhren, um die sich besonders ein Herr Louis Müller aus Hamburg, der eine elektrische Zentrale und eine Fabrik für elektrische Glühlampen besaß, verdient gemacht hat, waren so gebaut, dass die Kathodenstrahlen, d. h. die Elektronen, von einer Aluminiumelektrode ausgingen und auf die gegenüberliegende gewölbte Glaswand fielen, die heftig fluoreszierte und sich stark erhitzte, so dass die Röhren bei langen Belichtungszeiten mitunter platzten.

Herr Müller gründete später eine heute weltbekannte Firma für Röntgentechnik in Hamburg.

Obwohl im Prinzip auch in der Glaswand durch Ionisierungsbremung Röntgenstrahlung entstehen kann, erkannte man doch bald, dass die Röntgenstrahlung praktisch nur von der Anode ausging. Die beiden Russen Prinz Galitzine und Karnejitzky ließen die Strahlen einer Hittdorffschen Röhre durch eine Blende auf ein mit einer Reihe von parallelstehenden Nägeln gespickten

Brett fallen, unter dem eine Photoplatte lag, und erkannten so einwandfrei aus der Schattenbildung der Nägel, dass praktisch alle Strahlen von der Anode ausgingen.

Die Glasfluoreszenz sollte aber für die weitere Entwicklung der Wissenschaft trotzdem eine große Bedeutung erlangen. Sie diente Becquerel als Anregung für seine Untersuchung der Uranstrahlung und wirkte damit fördernd auf die Entdeckung der anderen radioaktiven Substanzen.

Wenn man versucht, sich eine Vorstellung zu verschaffen, mit welcher Röhrenspannung Röntgen gearbeitet haben könnte, so ist ein Hinweis aus seiner ersten Mitteilung besonders wichtig. Röntgen beschreibt darin, wie er visuell und photographisch die Absorption der Strahlen durch ein 3,5 mm dickes Aluminiumblech gemessen hat und diese annähernd gleich fand der Absorption durch die Gewebe seiner Hand und der durch eine 1 mm dicke Zinkfolie. Da die Schwächung der Strahlung eines breiten Bündels näherungsweise durch die folgende Bezeichnung beschrieben werden kann:

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

in der $I(0)$ die Energieflussdichte der ursprünglichen Strahlung, $I(x)$ die Energieflussdichte der Strahlung nach dem Durchdringen einer Stoffschicht der Dicke x und μ den von der Strahlungsenergie abhängigen Schwächungskoeffizienten des betreffenden Stoffes bedeuten ($e = 2,71828$ ist die Basis der natürlichen Logarithmen), so fordert gleiche Absorption in zwei verschiedenen Stoffen die Gleichheit der Produkte aus Schwächungskoeffizienten μ und Schichtdicke x :

$$\mu_{Al} \cdot x_{Al} = \mu_{Zn} \cdot x_{Zn}$$

Heute existieren sehr genaue Messungen der Schwächungskoeffizienten für verschiedene Stoffe in Abhängigkeit von der Quantenenergie W_γ der Röntgenstrahlung. So gelten z.B. für Zink und für Aluminium die folgenden Werte:

Zink (Zn), Dichte: 6,9 g/cm ³		Aluminium (Al), Dichte: 2,7 g/cm ³	
W_γ (keV)	μ (cm ⁻¹)	W_γ (keV)	μ (cm ⁻¹)
10	1676,70	10	69,66
15	547,17	15	20,68
20	247,02	20	8,75
30	79,35	30	2,78
40	35,40	40	1,39
50	18,84	50	0,90
		100	0,06

Da aus der Röntgenschen Veröffentlichung für das Verhältnis der Stoffdicken von Aluminium und Zink bei gleicher Absorption 3,5 mm / 1,0 mm = 3,5 folgt, so können wir die von Röntgen benutzte Röhrenspannung aus dem spannungsabhängigen Verhältnis der Schwächungskoeffizienten der beiden Stoffe erschließen:

W_γ (keV)	$\frac{\mu_{Zn}}{\mu_{Al}}$
10	3,49
15	3,83
20	4,09
30	4,14
40	3,69
50	3,03
100	1,17

Dabei wurden die Werte in der zweiten Spalte durch Division der μ -Werte von Zink und Aluminium aus den beiden vorangegangenen Tabellen erhalten. Wir erkennen, dass Röntgen mit einer Röhrensannung von 10 kV, entsprechend einer Quantenenergie von 10 keV gearbeitet haben könnte.

Nun beträgt aber der Schwächungsgrad $S(\%)$

$$S(\%) = (1 - e^{-\mu \cdot x}) \cdot 100\%$$

bei einer Röhrensannung von 10kV etwa 100 %, wie man durch Einsetzen der Werte von $\mu = 69,66 \text{ cm}^{-1}$ und $x = 3,5 \text{ mm} = 0,35 \text{ cm}$ für Aluminium leicht feststellen kann. Bei dieser Röhrensannung wären durch seine Schichten weniger als 10^{-5} seiner anfänglichen Energieflussdichte hindurchgekommen, und Röntgen hätte nichts mehr vergleichen können.

Aus der vorstehenden Tabelle sehen wir, dass Röntgens Röhrensannung aber auch zwischen 40 kV und 50 kV gelegen haben könnte, denn auch für diese Spannung ergibt sich ein Verhältnis μ_{Zn}/μ_{Al} von 3,5. Für eine Röhrensannung von 40kV beträgt aber der ungefähre Schwächungsgrad etwa 39%, d. h., es kommen 61% der ursprünglichen Energieflussdichte durch eine 3,5 mm dicke Aluminiumschicht hindurch.

Wir dürfen deshalb mit einiger Wahrscheinlichkeit annehmen, dass Röntgen mit einer Röhrensannung von etwa 40 kV gearbeitet haben wird.

Für die Röntgenaufnahme einer menschlichen Hand, die Röntgen in seiner ersten Mitteilung bekannt gemacht hat, ist es ein glücklicher Umstand gewesen, dass er nicht mit einer höheren Spannung gearbeitet hat. Hätte er z. B. seine Röhre mit 120 kV Röhrensannung betrieben, so wären die Kontraste infolge starker Mitwirkung der Streuungsstrahlung viel schwächer gewesen und die Darstellung damit viel weniger beeindruckend.

Die Streuungsstrahlung entsteht durch Wechselwirkung der Röntgenstrahlen mit der Elektronenhülle von Atomen. Dadurch kommt es zu einer Änderung der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung. Die in einem bestrahlten Objekt auftretende Streuungsstrahlung steigt mit dem bestrahlten Volumen und mit der Photonenenergie der Strahlung an.

Mit einer Röhrensannung von 40 kV betrug die minimale Wellenlänge der Bremsstrahlung, die in der von Röntgen benutzten Hittdorffschen Röhre entstanden ist,

$$\lambda_{\min} = \frac{12,4}{U} \text{ kV} = \frac{12,4}{40} = 0,3 \text{ nm} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes liegen zwischen 800 nm (rotes Licht) und 400 nm (blaues Licht). Damit ist die Wellenlänge der von Röntgen benutzten Bremsstrahlung etwa 1000 mal kürzer als die mittlere Lichtwellenlänge. Nach der heutigen Klassifizierung der Röntgenstrahlung hat es sich damit um eine sogenannte weiche Strahlung gehandelt, wie die folgende Tabelle zeigt:

Zusammenhang zwischen Strahlenhärte, Wellenlänge und Röhrensannung

Strahlenhärte	Wellenlänge λ (nm)	Röhrensannung U(kV)
sehr weich	0,6	20
weich	0,6...0,2	20...60
mittelhart	0,2...0,08	60...150
hart	0,08...0,03	150...400
sehr hart	0,03...0,004	400...3000
ultrahart	< 0,004	> 3000

Die charakteristische Strahlung dürfte bei Röntgens Experimenten keine Rolle gespielt haben. Wie wir wissen, war der wesentliche Ausgangspunkt der Strahlung die Aluminiumelektrode (Anode) der Hittdorffschen Röhre. Für Aluminium beträgt die Anregungsspannung für die sog. K_{α} -Linie seiner charakteristischen Röntgenstrahlung 1560 V. Dieses entspricht einer Photonen-Energie von 1560 eV der entstehenden Röntgenlichtquanten. Wegen der Beziehung

$$\lambda(\text{nm}) = \frac{12,4}{U(\text{kV})}$$

bedeutet dieses eine Wellenlänge von 7,95 nm, d. h., die charakteristische Strahlung der Aluminiumanode war eine extrem weiche Strahlung, die im wesentlichen bereits in der Glaswand der Röhre absorbiert worden ist.

Wir können somit aus heutiger Sicht feststellen, dass Röntgen bei seinen Experimenten mit einer Hittdorffschen Röhre eine weiche Röntgenbremsstrahlung erzeugt hat, deren minimale Wellenlänge etwa 0,3 nm betrug.

Diese Strahlung kann auf zwei verschiedene Weisen geschwächt werden: einmal durch die Vergrößerung des Abstandes zwischen Röhre und bestrahltem Objekt und zum anderen durch Absorptionsschichten aus verschiedenen Stoffen.

Röntgen hatte bereits erkannt, dass die Energieflussdichte der Röntgenstrahlen umgekehrt proportional zu dem Quadrat der Entfernung von der Röhre abnimmt. Auch die Schwächung der Strahlen durch absorbierende Schichten von Aluminium oder Zink waren ihm bekannt. Das oben erwähnte Schwächungsgesetz wurde jedoch erst später aufgestellt.

Alle Stoffe vermindern in charakteristischer Weise die Energieflussdichte der Strahlung. Dabei wird heute unter Energieflussdichte die Summe der Energie aller Photonen verstanden, die in einer bestimmten Zeit durch eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Strahlung stehende Fläche hindurchtreten. Diese Größe wurde früher als Intensität der Strahlung bezeichnet.

Bei der weichen Röntgenstrahlung, mit der Röntgen gearbeitet hat, dominieren der Photoeffekt und die Comptonstreuung als Schwächungsmechanismen der Strahlung. Beim Photoeffekt erfolgt die Umwandlung eines Photons in ein Elektron durch Ablösung eines Elektrons aus der Hülle eines Atoms.

Auch beim Compton-Effekt wird ein Elektron aus der Atomhülle abgelöst, aber es geht nur ein Teil der Photonenenergie auf dieses Compton-Elektron über, während gleichzeitig ein gestreutes Photon auftritt, dessen Energie kleiner ist, als die des ursprünglichen Photons.

Im Bereich dieser weichen Röntgenstrahlung gilt näherungsweise die folgende Absorptionsregel

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^5$$

Dabei bedeuten μ_1 und μ_2 die Schwächungskoeffizienten zweier verschiedener Stoffe und Z_1 bzw. Z_2 ihre Ordnungszahlen.

Nach dieser Regel absorbiert ein Kalziumatom oder ein Phosphoratom der Knochensubstanz etwa 20mal mehr Röntgenstrahlung, als ein Kohlenstoff-, Sauerstoff- oder Stickstoffatom des Muskelgewebes. Nun sind aber die Kalziumatome, welche im Knochen als zweifach positiv geladene Ionen vorkommen, und die Phosphoratome etwa drei- bis viermal größer als die Kohlenstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffatome, so dass sich bei Berücksichtigung des Proteingehaltes des Knochens für diese ein etwa doppelt so großer Massenschwächungskoeffizient (Schwächungskoeffizient dividiert durch die Dichte) ergibt als für das anliegende Gewebe.

Aus diesem Grunde konnte Röntgen bei der Durchleuchtung der Hand seiner Frau auf der photographischen Platte einen ausreichenden physikalischen Kontrast erhalten.

Diese Möglichkeit, mit Hilfe der Röntgenstrahlung die innere Struktur des Organismus abzubilden, lieferte die physikalische Grundlage der heutigen radiologischen Diagnostik.

Der Versuch Röntgens, die Strahlen durch brechende Substanzen so abzulenken, wie etwa das Sonnenlicht durch ein Prisma, musste scheitern, da, wie wir heute wissen, die Brechzahl n aller Stoffe für Röntgenstrahlen nur geringfügig kleiner ist als 1.

Damit ist der Brechungswinkel nur wenig größer als der Einfallswinkel (beachte $n < 1$ entspricht im optischen Bereich dem Übergang des Lichtes von Luft in Wasser und damit Brechung vom Lot weg).

Eine Konzentration der Röntgenstrahlen durch Linsen lässt sich deshalb nicht erreichen. In der Röntgentherapie benutzt man aus diesem Grunde mehrere Bündel, die sich im Zielorgan kreuzen.

Die Unmöglichkeit der Konstruktion von Röntgenlinsen ist auch die Ursache dafür, dass die üblichen Röntgenbilder stets auf einem Bildschirm entstehende Schattenbilder sind, d.h., die Abbildung erfolgt so, dass von einer flächenhaften Lichtquelle, dem Brennfleck der Röntgenröhre, ein kegelförmiges Strahlenbündel ausgeht, welches das Objekt durchsetzt. Infolge der unterschiedlichen, durch die Struktur des Objektes gegebenen Schwächungsgrade, entstehen im Bild Konturen, die eine geometrische Unschärfe aufweisen.

Diese Feinheiten spielten jedoch bei der ersten Röntgenaufnahme einer menschlichen Hand sicher noch keine Rolle. Hier stand zunächst die faszinierende Neuheit dieses Verfahrens im Vordergrund. Es bedurfte vieler Jahre intensiver Forschung aller radiologisch tätigen Physiker, Techniker und Ärzte, bis die Perfektion der heutigen radiologischen Diagnostik entstehen konnte.

5 München 1900-1923

5.1 Die Münchener Zeit

München, die an der Isar gelegene Hauptstadt Bayerns, war ein Ort, an dem Wissenschaft und Kunst sich im 19. Jahrhundert in besonderem Maße entfalten konnten. König Ludwig I. von Bayern hatte in den Jahren seiner von 1825 bis 1848 dauernden Regierungszeit aus Mitteln des Heeresbudgets viele bedeutende Kunstwerke, wie z.B. den Bau der alten Pinakothek, die einen großen Gemäldeschatz beherbergen sollte, oder die Hof- und Staatsbibliothek, veranlasst.

Er ließ aber auch für die Universität einen würdigen Bau errichten, der 1840 vollendet wurde. Erst kurz vor der Regierungszeit Ludwig I. hatte die Universität das Kleinstadtleben in Landshut aufgegeben und war nach München eingezogen. Anfangs fehlte es der Universität, die zunächst im Jesuitenkollegium untergebracht war, an geeigneten Räumen.

Um diesem Übelstand abzuhelpfen, beschloss der König, am Ende einer neuangelegten Prachtstraße, die seinen eigenen Namen führte, einen großen Universitätsbau errichten zu lassen. Diese Universität entwickelte sich zu einem Zentrum wissenschaftlichen Lebens. Um die Jahrhundertwende lehrten bedeutende Wissenschaftler an dieser Einrichtung.

Unter ihnen auch der Physiker Max von Laue, der 1914 für seine Entdeckung der Beugung und Interferenz der Röntgenstrahlen durch die Gitterstruktur der Kristalle den Nobelpreis erhielt.

Röntgen konnte hoffen, an dieser aufsteigenden Universität den Kreis von Fachkollegen zu finden, die seine Entdeckung als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen benutzen würden. Er durfte aber auch erwarten, den Kreis von Wissenschaftlern zu finden, in dem für beide Seiten fördernde Gespräche möglich waren.

Doch mit der 1900 erfolgten Übersiedlung Röntgens nach München trat in doppeltem Sinne eine Wende in seinem Leben ein. Er gelangte zwar in den Kreis hervorragender Gelehrter, aber solche freundschaftliche Beziehungen, die den Würzburger Kreis ausgezeichnet hatten, kamen in München nicht wieder zustande.

Seine Berühmtheit richtete eine Mauer um ihn auf, die es ihm, verstärkt durch seine angeborene Zurückhaltung, schwer werden ließ, neue Freunde zu finden.

Gleichzeitig verschlimmerte sich das Leiden seiner Frau immer mehr. Ihre häufigen Schmerzanfälle erlaubten keine größeren Geselligkeiten, und so trat eine Vereinsamung des großen Mannes ein, dem der Ruf nach München vorausging, dass es schwer sei, mit ihm auszukommen. Tatsächlich konnte Röntgen in dieser Zeit mitunter schroff und sogar grob werden.

Vor allem aber dürfte bei der in München entstandenen Meinung über ihn die Ablehnung des persönlichen Adels, der mit dem Kronenorden verbunden ist, den Prinz Luitpold, der 3. Sohn Ludwig I. von Bayern, Röntgen 1896 verliehen hatte, bestimmend gewesen sein.

In München war es Röntgen aber endlich möglich, den schon in Würzburg gehegten Wunsch nach Einrichtung einer Professur für theoretische Physik zu verwirklichen. Seine Wahl fiel auf Arnold Sommerfeld, der als Privatdozent in Göttingen wirkte.

Sommerfeld selbst schreibt im Vorwort seiner berühmt gewordenen, in Buchform erschienenen Vorlesung über theoretische Physik:

"... Zweier Namen möchte ich im Rückblick auf meine Vorlesungszeit dankbar gedenken; der Namen: Röntgen und Felix Klein.

Röntgen hat nicht nur, durch Berufung in einen bevorzugten Wirkungskreis, die äußeren Bedingungen für meine Lehrtätigkeit geschaffen, sondern er hat deren wachsende Auswirkung

durch lange Jahre hindurch mit förderndem Wohlwollen verfolgt ..." [68]

Felix Klein, den Sommerfeld in seinen Ausführungen neben Röntgen nennt, war der zu der Göttinger Tradition Riemann-Dirichlet-Klein gehörende bedeutende Mathematiker, der Sommerfelds mathematische Auffassung diejenige Richtung gegeben hat, die den Anwendungen in der Physik am besten angepasst war. Sommerfeld gilt heute als der Begründer der theoretischen Physik als eine selbständige Disziplin.

In den Münchener Jahren nahm Röntgen seine Experimente über die Kristalle wieder auf und veröffentlichte zum Teil mit seinem Schüler Joffe, der später zum „Vater der Physik“ in der UdSSR wurde, mehrere Arbeiten. An Röntgens Institut wurden aber auch weitere Untersuchungen über die Röntgenstrahlen durchgeführt.

Der frühere Präsident der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Walter Friedrich, arbeitete an Röntgens Institut über die Intensität und Härteverteilung der Röntgenstrahlen um die Antikathode, wie früher die Anode in den Röntgenröhren genannt wurde, und Angerer beschäftigte sich mit der Wärmeentwicklung bei der Absorption der Röntgenstrahlen.

Im Frühling jedes Jahres aber fuhren die Röntgens nach Cannobio am Lago Maggiore, wo sie sich mit alten Freunden trafen und es meistens Röntgen war, der sich die beabsichtigten Touren ausdachte. Er richtete es dann so ein, dass seine Frau mit einem Wagen das Wanderziel erreichen und somit teilnehmen konnte.

Manche Scherze waren in Cannobio an der Tagesordnung. So ereignete es sich einmal, dass Röntgen, der sehr viel Wert auf eine tadellose Kleidung legte, eines Abends versehentlich mit einem Lackschuh und einem Bergschuh und im Smoking zu einem Diner im Hotel Bellevue erschien.

Dieses Ereignis wurde sofort in Cannobio bekannt und gab Gelegenheit zu manchen Witzeleien, Am nächsten Geburtstag erhielt Röntgen dann ein Zwetschenmännchen im Smoking mit einem Lack- und einem Bergschuh an den Füßen, das er sehr sorgfältig aufbewahrte.

Auch in der Münchener Zeit blieb die Jagd für Röntgen eine Freude und Erholung. Er selbst sagte, dass es von seiner Frau ein ganz feiner Gedanke gewesen sei, die Anschaffung eines Hauses in Weilheim in Oberbayern zu veranlassen. Dieses in einer landschaftlich schönen Umgebung südlich des Ammersees gelegenen Haus ließ Röntgen zu einem Jagdhaus ausbauen. Er fühlte sich dort wohl, und gern ging er im bequemen grüngrauen Jagdanzug mit dem alten und schäbigen Jagdhut auf dem Kopf bei Wind und Wetter auf Jagd, ganz im Gegensatz zu seinen sonstigen Gepflogenheiten in der Stadt, wo er seinen großen Stadthut vor jedem Regentropfen bewahrte.

Er stand früh um 1/2 4 Uhr auf, um das Erwachen der Vögel zu beobachten, und die Freude an der Morgenstimmung hielt ihn oft davon ab, einen Schuss zu tun.

Während in Röntgens Institut und an vielen Orten in der Welt mit Röntgenstrahlen experimentiert wurde, war die Frage nach der Art dieser Strahlen noch immer unbeantwortet geblieben. Man kannte zwar viele ihrer Eigenschaften, aber es war unklar, ob es sich um eine Teilchenstrahlung oder um eine Wellenstrahlung handelte.

Um die Jahrhundertwende waren auch an zahlreichen Orten Untersuchungen über die 1896 von Becquerel entdeckte neue Erscheinung der Radioaktivität aufgenommen worden. Man gelangte dabei relativ rasch zu der Erkenntnis, dass die in der Natur vorkommenden radioaktiven Stoffe drei Arten von Strahlungen aussenden, die heute mit Alphastrahlung, Betastrahlung und Gammastrahlung bezeichnet werden.

Die Alphastrahlung besteht aus zweifach positiv geladenen Heliumatomen, was Ernest Ruther-

ford und Royds 1909 durch den Nachweis des beim Zerfall entstehenden Heliums bewiesen haben. Träger der Betastrahlung sind schnell fliegende freie Elektronen. Diese Strahlung ist damit der die Röntgenstrahlung auslösenden Kathodenstrahlung wesensgleich.

Die Gammastrahlung, so hatten P. Curie und Sagnac schon im Jahre 1900 erkannt, ließ sich, ähnlich der Röntgenstrahlung, weder von einem magnetischen Feld noch von einem elektrischen Feld von ihrer Ausbreitungsrichtung ablenken. Allerdings wurde die Gammastrahlung beim Durchgang durch einen Stoff weniger stark absorbiert als die Röntgenstrahlung. Somit entsprach die Gammastrahlung einer harten Röntgenstrahlung, die allerdings im Gegensatz zur Röntgenstrahlung eine Kernstrahlung darstellt.

Während man also über die Natur der Teilchenstrahlung in den ersten Jahren des neuen Jahrhunderts bereits gut unterrichtet war, ließ sich über die Natur der Röntgen- und der Gammastrahlung noch nichts Bestimmtes aussagen. Zwar wurde vermutet, dass es sich bei diesen Strahlungen um eine Wellenstrahlung handeln müsse, aber der entscheidende Beweis, nämlich die Erzeugung von Interferenz- und Beugungserscheinungen mit Röntgenstrahlen stand noch aus.

Wie wir wissen, hatte sich Röntgen bereits in seinen ersten Experimenten mit den neuen Strahlen allerdings vergeblich bemüht, Beugungserscheinungen mit Röntgenstrahlen nachzuweisen.

Es muss deshalb für Röntgen ein erregender Augenblick gewesen sein, als sein Kollege, der Physiker Max von Laue ihn 1912 in das Sommerfeldsche Institut bat, um sich einige mit Röntgenstrahlen erzeugte Bilder anzuschauen, welche die Assistenten Walter Friedrich und Paul Knipping auf seinen Vorschlag hin gemacht hatten und die sie für Beugungsbilder hielten.

Eines Abends holte sich Paul Ewald, ein Assistent Sommerfelds, bei Laue eine Auskunft über den Abstand der Atomebenen in Kristallen. Mit seiner Antwort verband von Laue plötzlich die Gegenfrage:

"Könnten diese Minimalabstände zwischen den Atomebenen in Kristallen nicht das gleiche tun, wie die gewöhnlichen Gitter es für Licht tun, vorausgesetzt, dass die vermutliche Wellenlänge der Röntgenstrahlen dieselbe ist wie der Gitterabstand der Kristallebenen?"

Max von Laue dachte bei seiner Frage an die bekannten Beugungsbilder, die sich mit einem feinen Strichgitter und sichtbaren Licht erhalten lassen und die bei Verwendung von Glühlicht zu einem Spektrum führen, bei dem im Gegensatz zum prismatischen Spektrum das rote Licht am stärksten abgelenkt wird. Bei Verwendung monochromatischen (einfarbigen) Lichtes entsteht auf einem Beobachtungsschirm ein Streifensystem, dessen Maximalstellen der Lichtintensität durch die Gleichung

$$\sin \alpha_k = k \frac{\lambda}{D}$$

beschrieben werden.

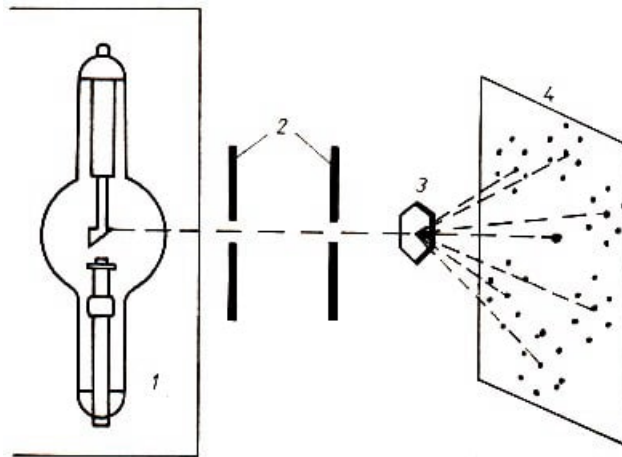
Hierbei bedeutet α_k den Ablenkungswinkel, unter dem das k -te Maximum erscheint, λ die Lichtwellenlänge und D die Gitterkonstante, d. h. den Abstand zweier aufeinanderfolgender Striche des Gitters.

Bei einer vorgegebenen Gitterkonstanten D ist der Ablenkungswinkel um so kleiner, je kleiner die Wellenlänge ist. Da die Röntgenstrahlen bei Benutzung üblicher Strichgitter in nicht beobachteten Maße durch Beugung aus ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt werden, vermutete von Laue, dass sie eine extrem kleine Wellenlänge besitzen könnten. Um in diesem Falle zu einem messbaren Ablenkungswinkel zu gelangen, müsste man Beugungsgitter mit sehr kleiner Gitterkonstante besitzen.

Solche können aber für Röntgenlicht aus technischen Gründen nicht hergestellt werden. Auf einer vollautomatischen Teilmaschine lassen sich z.B. 800 Furchen je Millimeter auf eine hochglanzpolierte Metallfläche ritzen und von dieser Platte lichtdurchlässige Abgüsse herstellen. Die Gitterkonstante würde in diesem Falle $D = 0,00125$ mm betragen.

Für eine Lichtwellenlänge von $\lambda = 600 \text{ nm} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$ ergibt sich damit ein Ablenkwinkel α_1 , für das erste Beugungsmaximum von etwa 30° . Würde man dagegen mit einer Röntgenlichtwellenlänge von 0,3 nm arbeiten, so beträgt der Beugungswinkel nur ungefähr $1/1000$ Grad.

Die geniale Idee von Laue bestand nun darin, anzunehmen, dass die bisherigen vergeblichen Bemühungen, Beugungsbilder mit Röntgenstrahlen zu erzeugen, an der Kleinheit der Wellenlängen des Röntgenlichtes, verglichen mit dem sichtbaren Licht, gescheitert seien. Da sich für extrem kleine Wellenlängen keine geeigneten Beugungsgitter herstellen lassen, die praktisch brauchbare Beugungswinkel ergeben, schlug von Laue vor, die natürlichen Gitterebenen der Kristalle zu verwenden, deren Gitterkonstante in der Größenordnung von etwa 0,1 nm liegen. In diesem Falle müssten sich messbare Beugungswinkel ergeben.



13 Prinzip der von Friedrich und Knipping benutzten Versuchsanordnung zum Nachweis der Welleneigenschaften der Röntgenstrahlen.

(1) Röntgenröhre, (2) Blenden, (3) Kristall, (4) Photoplatte, auf der das entstehende Beugungsbild angedeutet ist

Friedrich, der damals Assistent bei Sommerfeld war, und Knipping, ein Student mit gerade beendeter Doktorarbeit, begannen sofort eine einfache Apparatur aufzubauen, mit der ihnen an einem Kupfersulfatkristall das gelang, woran Röntgen und viele seiner Kollegen 15 Jahre lang intensiv, aber erfolglos gearbeitet hatten, nämlich Beugungsbilder mit Röntgenstrahlen zu erzeugen.

Wichtig für den Erfolg war die von Friedrich vorgeschlagene sehr lange Belichtungszeit.

Röntgen ließ sich von Friedrich sehr genau die benutzte Apparatur beschreiben und prüfte die Aufnahme. Schließlich gratulierte er Friedrich und Knipping zu ihrem Experiment und sagte: „Aber Beugungsbilder sind das nicht. Die sehen anders aus.“

Doch bald musste Röntgen einsehen, dass Friedrich und Knipping tatsächlich mit ihrer Apparatur die Beugung der Röntgenstrahlen an einem Kristallgitter bewiesen hatten. Die Vermutung, die von Laue ausgesprochen hatte, konnte bestätigt werden.

Allerdings hatte Röntgen mit seiner Bemerkung, dass Interferenzerscheinungen anders aussehen würden, in gewissem Sinne schon recht. So liefert die Beugung des Lichtes an einem

Spalt bei Verwendung von monochromatischem Licht als Interferenzfigur das bekannte parallele Streifensystem.

Im Gegensatz zum einfachen Strichgitter hat man es bei Verwendung von Kristallen mit einem räumlichen Kreuzgitter zu tun, und die Interferenzerscheinung besteht aus einem quadratischen Muster von Lichtpunkten mit nach außen abnehmender Größe und Helligkeit. Dieses konnte Röntgen noch nicht bekannt sein, da es erst mit Hilfe der von ihm entdeckten Strahlen möglich war, solche Interferenzerscheinungen an Kristallen zu beobachten.

Mit dem Nachweis der Interferenzerscheinungen war es gelungen, die Wellennatur der Röntgenstrahlen zu demonstrieren und aus der bekannten Gitterkonstanten des Kupfersulphatkristalls die Wellenlänge der Strahlung zu errechnen. Es ergab sich ein Wert, der, wie Laue vermutet hatte, in der Größenordnung des Abstandes der Atomebenen des Kristalles lag.

Da Interferenzerscheinungen aber sowohl bei Longitudinalwellen (die Materieteilchen schwingen in Richtung der Wellenausbreitung, wie z.B. bei den Schallwellen) als auch bei Transversalwellen (die Feldgröße schwingt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, wie z. B. bei den Lichtwellen) auftreten, bedurfte es noch des Nachweises der Polarisierung der Röntgenstrahlen, um zeigen zu können, dass es sich um transversale Wellen sehr kleiner Wellenlänge handelt. Dabei versteht man unter Polarisierung einer elektromagnetischen Welle die Herstellung einer Welle mit einer zeitlich unveränderlichen Schwingungsebene ihres elektrischen oder magnetischen Vektors.

Von den im Bereich des sichtbaren Lichtes bekannten Verfahren zur Herstellung polarisierten Lichtes, die auf der Doppelbrechung, der Reflexion oder der Streuung beruhen, hat sich die Streuung in Form der sogenannten Compton-Streuung als geeignet erwiesen, um die Polarisierung der Röntgenstrahlung nachzuweisen.

Bei der Compton-Streuung wird durch die Röntgenstrahlung ein Elektron (Compton-Elektron) von der Hülle eines Atoms abgelöst, wobei ein Teil der Photonenenergie auf dieses übergeht und außerdem ein Photon geringerer Energie auftritt. Es gelang, aus der Richtungsverteilung der durch Röntgenstrahlung erzeugten Compton-Elektronen die Polarisierung der Röntgenstrahlung zu erkennen.

Damit war evident, dass die Röntgenstrahlen transversale Lichtwellen sehr kleiner Wellenlänge sind, die man in das weite Spektrum der elektromagnetischen Wellen einzuordnen hat, das von den Rundfunkwellen mit etwa 100 m Wellenlänge über das sichtbare Licht mit Wellenlängen um 600 nm und über die Röntgenstrahlen mit Wellenlängen im Nanometerbereich bis hin zu den Gammastrahlen reicht, welche als eine besonders kurzwellige Photonenstrahlung bezeichnet werden kann, die nicht in Röntgenröhren erzeugt wird, sondern beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen entsteht.

Die Experimente, welche Friedrich und Knipping auf Anregung von Max v. Laue 1912 durchführten, hatten zunächst das Ziel, lediglich Röntgenstrahlinterferenzen zu erzeugen. Sehr bald wurde aber erkannt, dass diese Experimente auch zur Strukturaufklärung geeignet sind.

So führt ein polychromatisches Röntgenlicht, also eine Röntgenstrahlung, welche einen ganzen Spektralbereich stetig umfasst, beim Auftreffen auf einen ruhenden Kristall stets zu Interferenzerscheinungen. Ordnet man hinter dem Kristall eine Photoschicht so an, dass die Wellennormale senkrecht auf dieser steht, so erzeugt das Interferenzfeld Schwärzungen, welche in ihrer Gesamtheit das Röntgendiagramm des betreffenden Kristalls liefern.

Die auf einem Röntgendiagramm wahrnehmbare Anordnung der Interferenzpunkte lässt eine

mit der Symmetrie der Atomanordnungen im Kristall in unmittelbarem Zusammenhang stehende Symmetrie erkennen. Ein so erhaltenes Interferenzbild heißt heute auch Lauediagramm. Einen anderen Weg der Strukturaufklärung mit Röntgenstrahlen beschritten William Henry Bragg und sein Sohn William Lawrence Bragg. Sie begannen mit monochromatischem Röntgenlicht zu experimentieren und drehten während des Versuches den Kristall um eine Achse. Indem die einzelnen an den verschiedenen Netzebenen selektiv reflektierten Röntgenlichtbündel miteinander interferieren, entsteht auf einem den Kristall zylindrisch umgebenden Film eine Drehkristallaufnahme, welche besonders geeignet ist, die Gitterkonstante des Kristalles bei bekannter Wellenlänge der Röntgenstrahlung zu bestimmen.

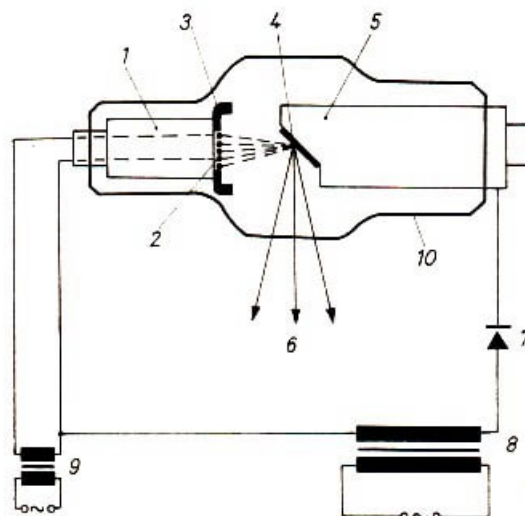
Nachdem die Wellennatur der Röntgenstrahlung erwiesen war, wurden auch bald Methoden gefunden, um die Wellenlänge der Strahlung unabhängig von der bekannten Gitterkonstanten eines Kristalles zu messen. So gelang die Wellenlängenmessung von Röntgenstrahlung dadurch, dass diese mit streifender Inzidenz auf ein sehr feines Strichgitter auffallen.

Dadurch werden die Röntgenstrahlen an diesem etwa so gebeugt, wie die 10^4 mal längeren Lichtwellen. Die hierbei auftretende Totalreflexion der Röntgenstrahlung (gegenüber Glas oder Metall ist die Brechzahl wenig kleiner als 1, d. h., Glas oder Metall sind für Röntgenstrahlen optisch dünner als Luft) verhindert den Intensitätsverlust, der sonst durch überwiegendes Eindringen in das Glas einträte.

Voraussetzung für viele dieser Versuche war eine verbesserte Röhrentechnik. Die heutigen Röntgenröhren sind Dioden, die im Sättigungsgebiet betrieben werden. In ihrem prinzipiellen Aufbau bestehen sie aus einem Vakuumgefäß mit Glühkathode und Anode.

Zwischen beiden liegt eine elektrische Gleichspannung, die Anodenspannung, an. Durch sie werden die infolge thermischer Emission durch den Heizstrom aus der Glühkathode ausgelösten Elektronen beschleunigt und treffen nach Bündelung durch einen Wehneltzylinder auf die Anode auf, wo etwa 1% ihrer kinetischen Energie in Röntgenstrahlung und der Rest in Wärme (Notwendigkeit der Anodenkühlung) sowie in sichtbares Licht umgewandelt wird.

Mit zunehmender Anodenspannung wächst die Härte der Röntgenstrahlen, mit zunehmendem Heizstrom ihre Energieflussdichte, d. h. die Summe der Energie aller Photonen, die in einer bestimmten Zeit durch eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Strahlung stehende Fläche hindurchtreten.



14 Schematische Darstellung einer Röntgenröhre des modernen Typus.

In einen evakuierten Glaskolben (10) münden die Kathode (1) und die gekühlte Anode (5) ein. Der

Heiztransformator (9) bringt den Heizfaden (2) der Kathode (1) auf Elektronenemissionstemperatur. Ein Hochspannungstransformator (8) erzeugt in Verbindung mit einem oder mehreren Ventilen (7) eine Gleichspannung, die so an der Röntgenröhre anliegt, dass die Anode positiv gegenüber der Kathode ist.

Dadurch werden die von dem Heizfaden der Kathode emittierten Elektronen im elektrischen Feld zwischen Kathode und Anode beschleunigt und treffen mit einer kinetischen Energie, die der Anodenspannung proportional ist, auf dem Wolframtarget (4) der Anode (5) auf. Eine Elektronenoptik (Wehneltzylinder (3)) sorgt für eine Bündelung des Elektronenstrahles. Auf der Anode entsteht ein Brennfleck (Fokus), von dem die Röntgenstrahlung (6) ausgeht.

Die Zeit nach der Jahrhundertwende war gekennzeichnet durch eine stürmische Weiterentwicklung der Röntgenschen Entdeckung.

Die Zahl der Veröffentlichungen über die Anwendung der Röntgenstrahlung in Physik, Medizin und Technik nahm immer mehr zu. Neue Wissenschaftsgebiete begannen sich zu etablieren. Röntgendiagnostik und Strahlenphysik sind zwei Beispiele.

Röntgen hatte diese Entwicklung zwar ausgelöst, aber es waren andere, die ihren weiteren Verlauf prägten. Als im Jahre 1912 mit Hilfe der Röntgenstrahlen in der ganzen Welt neue Erkenntnisse gewonnen wurden, bestimmte Röntgen in seinem Münchener Laboratorium den thermischen linearen Ausdehnungskoeffizienten von Cuprit und Diamant so, als ob er nie die neue Art von Strahlen entdeckt hätte.

Röntgen fand für sich kein angemessenes Forschungsthema, obwohl er danach suchte und sich der neuesten Forschungsmethoden bediente, wie z.B. des Ultramikroskopes. Dieses war zwar in seinem Laboratorium aufgestellt, aber zu einem perspektivlosen Ansammeln von experimentellen Daten wollte er sich nicht herablassen. Ungeduldig suchte er nach neuen Erscheinungen der Naturkräfte.

Daraus resultierte auch sein Interesse an den Lichteinwirkungen auf die elektrischen Eigenschaften der Kristalle. Sein Schüler Joffe bemerkte eines Tages, dass der Strom in einem Steinsalzkrystall gerade in dem Augenblick zunahm, als die Sonne aus den Wolken trat.

Es zeigte sich, dass nur jene Steinsalzkrystalle gegenüber Sonnenlicht empfindlich waren, die er vorher mit Röntgenstrahlen bestrahlt hatte. Als Joffe anschließend zu Röntgen in das Praktikum ging, wurde er mit der ironischen Frage empfangen: „Noch eine sensationelle Entdeckung?“ „Ja“.

Ohne jede weitere Erklärung führte er Röntgen zum Gerät und zeigte ihm, wie das Herablassen der Fenstervorhänge den Strom herabsetzte und das Sonnenlicht ihn tausendfach vergrößerte. „Setzen wir uns zusammen an diese Untersuchungen!“ sagte Röntgen schließlich, und fast zwanzig Jahre lang, bis zu seinem Tode, blieb dieses Gebiet das einzige Thema seiner wissenschaftlichen Arbeit.

Manche Universität versuchte in diesen Jahren, Röntgen für sich zu gewinnen. Einen Ruf an die Leipziger Universität lehnte Röntgen auf Wunsch seiner Gattin ab. Aus den Fenstern der damaligen Professorenwohnung des in der Linnestraße gelegenen Physikalischen Institutes fiel der Blick unmittelbar auf den alten Johannis-Friedhof, und es ist verständlich, dass dieses für die schwerkranke Frau nicht leicht zu ertragen gewesen wäre.

So konnte Röntgen sich nicht entschließen, München zu verlassen, und er blieb in dem Kreis bedeutender Persönlichkeiten, zu denen neben den schon genannten Physikern v. Laue und Sommerfeld auch der Anatom Johannes Rückert und der Chemiker Adolf von Baeyer, der eine Methode gefunden hatte, mit der die Synthese von Harnsäure gelang, gehörten.

Röntgen erlebte in den Jahren vor dem ersten Weltkrieg, wie sich das Weltbild der Physik zu

verändern begann. Max Planck hatte im Oktober 1900 seine berühmte Strahlungsformel in einer Diskussionsbemerkung zu einem Vortrag über neue Strahlungsmessung vorgestellt und am 14. 12. 1900 eine auf der Grundlage der von Ludwig Boltzmann gegebenen Wahrscheinlichkeitsdeutung der Entropie beruhende theoretische Begründung gefunden.

Der radikale Charakter seiner Quantenhypothese trat vor allem in der Form zutage, die ihr Albert Einstein zur Deutung des äußeren lichtelektrischen Effektes gab. 1913 begann dann der eigentliche Aufschwung der Quantentheorie, als es gelang, das Wirkungsquantum mit dem großen Erfahrungsschatz der Atomspektren zu verknüpfen. In den Händen von Niels Bohr und Sommerfeld entstand eine Quantentheorie des Atombaues, aus der eine eindrucksvolle Deutung des Periodensystems der Elemente erwuchs.

Wir wissen heute nicht, wie Röntgen, der Anschaulichkeit bei seinen Untersuchungen über alles liebte, sich zu der unanschaulichen Abänderung der klassischen Behandlung atomarer Bewegungen geäußert hat. Unbestrittene Tatsache ist jedenfalls, dass die Wirkung seiner von ihm entdeckten Strahlen auf belebte wie unbelebte Materie erst durch eine um die Quantentheorie erweiterte Physik verständlich werden konnte.

5.2 Röntgens letzte Jahre

Als im Jahre 1913 die klassische, von Rutherford 1911 gegebene Beschreibung eines Atommodells zugunsten einer quantentheoretischen Deutung aufgegeben wurde, war Röntgen 68 Jahre alt.

Sein Interesse galt nicht mehr dem stürmischen Bemühen einer neuen Physiker-Generation um die Veränderung des klassischen physikalischen Weltbildes. Er bevorzugte die Ruhe seines Laboratoriums und experimentierte mit seinen geliebten Kristallen.

Der erste Weltkrieg brachte jedoch auch in Röntgens ruhiges Leben große Veränderungen, zumal er bestrebt war, alle durch die Kriegsgesetzgebung geforderten Maßnahmen streng einzuhalten.

So ließ er das Gold der ihm verliehenen englischen Rumford-Medaille einschmelzen und verlangte, dass in seinem Haushalt der vorgeschriebene Nahrungsmittelverbrauch streng eingehalten wurde. Nicht selten kam es zu Verstimmungen, wenn seine Gattin ihm in berechtigter Sorge um seine Gesundheit ein etwas reichlicheres Essen auf-tischen wollte.

Auch hatte sich Röntgen, im Gegensatz zu Albert Einstein, dazu verleiten lassen, den Aufruf der „93 Intellektuellen“, ein Treuebekenntnis der deutschen Wissenschaftler zur Kriegsführung, mit zu unterzeichnen, was er allerdings später genauso bedauerte wie die Ablieferung der Rumford-Medaille.

Die Nachkriegsjahre brachten nicht wieder die Ruhe und Ausgeglichenheit in Röntgens Leben zurück, die ihm in der Würzburger und Münchener Zeit beschieden waren. Schon in das erste Nachkriegsjahr fällt der Tod seiner Gattin. Nach einer 47-jährigen glücklichen Ehe bedeutete ihr Tod einen schweren Verlust für Röntgen.

"Wie war sie stolz auf mich, und doch hat sie sich nicht verleiten lassen, den Ruhm ihres Mannes für sich zu missbrauchen, wie es manche Frauen tun,"

So schrieb er an Frau Boveri.

Am 1. April 1920, fünf Monate nach dem Tode seiner Frau, wurde Röntgen von seinen amtlichen Pflichten gegenüber der Universität entbunden. Wegen des Krieges hatte er diese fünf Jahre länger als üblich mit großer Treue erfüllt. Im gleichen Jahr redigierte er seine letzte

wissenschaftliche Arbeit.

Zusammen mit Joffe hatte er erneut die Elektrizitätsleitung in einigen Kristallen untersucht und den Einfluss einer Bestrahlung darauf studiert. Diese Arbeit erschien 1921 in den Annalen der Physik, einer bekannten Zeitschrift, in der Röntgen viele seiner Arbeiten publiziert hatte.

Es war ihm eine große Last gewesen, dabei einen Tag am Schreibtisch sitzend zu verbringen, wo ihm doch das Experimentieren auch im hohen Alter noch die größte Freude bereitete.

Röntgen starb am 10. Februar 1923, kurz vor Vollendung seines 78. Lebensjahres, in seiner Münchener Wohnung an einem Darmkarzinom. Nur 6 Tage vor seinem Tode hatte er ernsthafte Beschwerden, die ihn, der noch eine Reise nach dem sonnigen Sizilien geplant hatte, an das Bett fesselten.

Als dann am letzten Tag die Anzeichen eines Darmverschlusses auftraten, verstarb Röntgen, ehe der herbeigerufene Chirurg Ernst Ferdinand Sauerbruch erscheinen konnte.

Seine Testamentsvollstrecker Frau Boveri und E. Cohen schickten in alle Welt die Todesnachricht:

"Heute früh halb 9 Uhr verschied nach kurzer Krankheit im 78. Lebensjahr

Excellenz Geheimrat Professor

Dr. Wilhelm Conrad Röntgen

In tiefster Trauer

Die Verwandten und Freunde

München, den 10. Februar 1923

Die Einäscherung findet am Dienstag, dem 13. Februar 1923 vormittags 10 Uhr im östlichen Friedhof statt.

Der große Gelehrte fand auf dem Friedhof in Gießen seine letzte Ruhestätte.

Wie kaum einem anderen der Großen der Wissenschaft war es ihm vergönnt gewesen, noch zu Lebzeiten die Bedeutung der von ihm entdeckten Strahlen für viele wissenschaftliche Disziplinen wachsen zu sehen.

Er erlebte auch, dass sein Hinweis, den er bereits in seiner ersten Mitteilung gegeben hatte, die Strahlen sowohl in der medizinischen Diagnostik als auch in der Materialprüfung zur Erkennung von Materialfehlern zu verwenden, aufgegriffen und in faszinierender Art und Weise realisiert werden konnte. Was wäre eine heutige Medizin ohne die Röntgendiagnostik?

Nach seinem Tode hörten die Ehrungen durch die Errichtung von Denkmälern sowie durch den Bau von Museen und Bibliotheken, die seinen Namen tragen, nicht auf. Am 17. Februar 1928 wurde in Leningrad anlässlich des 5. Todestages des hervorragenden Gelehrten die vom Bildhauer V. A. Sinaiskij geschaffene Bronzestatue Röntgens auf einem Granitpostament in der Röntgenstraße, gegenüber dem Haupteingang zum Staatsinstitut für Röntgenologie und Radiologie, wie es damals benannt war, errichtet.

V. V. Cholin, Ordinarius für klinische Radiologie am heutigen Leningrader S.-M.-Kirow-Institut für ärztliche Fortbildung, berichtet, dass an einem Märztage des Kriegsjahres 1942 die Büste durch ein explodierendes Geschoss vom Postament heruntergerissen, aber von der Leningrader Bevölkerung schon am nächsten Tage wieder richtig postiert wurde. 1944 erfolgte eine Renovierung des Denkmals.

Besonders Röntgens Geburtsstadt Lennep, die 1929 an Remscheid angegliedert wurde, ehrte ihren großen Sohn durch das 1930 dort geschaffene Röntgen-Museum, welches in einem der schönsten Patrizierhäuser Lenneps untergebracht wurde. 1937 erfolgte die erste Erweiterung

zung des Museums durch den Bau einer Halle, an die sich der zweite 1959 beendete Neubau anschloss.



15 Das Deutsche Röntgen-Museum in Remscheid-Lennep (Aufn. 1980)

An zahlreichen Beispielen, angefangen mit der heute so primitiv anmutenden rekonstruierten Apparatur des Entdeckers (s. Abb. 7) bis zu den modernsten Röntgenanlagen unserer Zeit, vermag der Besucher die großartige Entwicklung noch einmal an sich vorüber ziehen zu lassen, welche Wilhelm Conrad Röntgen an jenem Novemberabend des Jahres 1895 auslöste.

6 Das Erbe

6.1 Röntgenstrahlen - eine physikalische Erscheinung voller Überraschungen

Als Röntgen 1895 eine neue Art von Strahlen entdeckte, welche die geheimnisvolle Eigenschaft besaß, unsichtbar zu sein und beträchtliche Schichten von Materie durchdringen zu können, beschränkte er sich in seinen Untersuchungen durchaus nicht auf die rein physikalischen Aspekte, sondern erprobte auch die Möglichkeit, Teile des menschlichen Körpers diesem von ihm als X-Strahlen bezeichneten Agens auszusetzen.

Das erste Radiogramm der Hand seiner Frau ist ein Beispiel dafür. Radiogramme dieser Art riefen sofort ein ungeheuer großes Interesse an Röntgens Entdeckung hervor, und bis zu den ersten medizinisch-diagnostischen Anwendungen vergingen nur wenige Monate.

Während sich die diagnostische Anwendung der Röntgenstrahlen sogleich weltweit verbreitete, dauerte es einige Jahre, bis die ersten Informationen über die Wechselwirkung dieser Strahlen mit der Materie bekannt wurden.

Zwar hatten bereits am 3. Februar 1896 L. Benoist und D. Hurmuzescu der Pariser Akademie der Wissenschaften berichtet, dass Röntgenstrahlen ein aufgeladenes Goldblatt-Teleskop zu entladen vermögen, und auch Röntgen hatte mit diesem aus einem Doppelpendel aus feinen Goldblättchen innerhalb einer Schutzflasche bestehenden Gerät zum Nachweis elektrischer Ladungen gearbeitet und die genannte Erscheinung in seiner zweiten Mitteilung vom 9. März 1896 beschrieben. Er bemerkte dazu, dass ihm diese Eigenschaft schon zur Zeit seiner ersten Mitteilung bekannt gewesen sei.

Der russische Physiker I. I. Borgmann von der St. Petersburger Universität schickte Anfang Februar des gleichen Jahres an den Herausgeber des Londoner „Electrician“ folgendes Telegramm:

„Röntgenstrahlen entladen schnell positive und negative Elektrizität ...“.

Doch diese wichtigen Beobachtungen wurden zunächst in ihrer Bedeutung nicht erkannt. Die faszinierende Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen lenkte alle Aufmerksamkeit auf sich. Erst in den 20er Jahren unseres Jahrhunderts begann man zu verstehen, dass die beschriebene Wirkung der Röntgenstrahlen, die auch die von radioaktiven Präparaten ausgehenden Kernstrahlungen zeigen, Äußerungen fundamentaler Wechselwirkungsprozesse dieser Art von Strahlen mit der Materie sind.

Aus heutiger Sicht gehören die Röntgenstrahlen ebenso wie die Gamma-Strahlen und die Neutronen-Strahlen zu den indirekt ionisierenden Strahlungen. Die indirekt ionisierenden Strahlen bestehen aus ungeladenen Teilchen. Im Falle der Röntgenstrahlung und der Gamma-Strahlung sind diese Teilchen die Photonen der elektromagnetischen Wellenstrahlung. Sie übertragen ihre Energie durch wenige statistische Einzelereignisse, die alle zur Erzeugung einer korpuskularen, direkt ionisierenden Sekundärstrahlung führen, auf die bestrahlte Materie.

Zu diesen statistischen Einzelereignissen gehören der von Hallwachs bereits 1888 entdeckte Photoeffekt, der 1902 von Lenard eingehend experimentell untersucht wurde und dem Albert Einstein 1905 eine theoretische Deutung geben konnte. Der Photoeffekt besteht in der Umwandlung eines Photons einer elektromagnetischen Welle in ein Elektron durch Ablösung eines Photoelektrons aus der Hülle eines Atoms. Er führt bei Gasen zu deren Ionisierung und spielt bei der Schwächung der Röntgenstrahlung beim Durchgang durch Materie eine große Rolle.

Ein zweites statistisches Einzelereignis ist der 1923 von Compton entdeckte Streueffekt von Röntgenstrahlung an Atomen mit niedriger Ordnungszahl. Dabei erfolgt ebenfalls die Ablösung eines Elektrons aus der Hülle eines Atoms, wobei ein Teil der Photonenenergie auf das Comptonelektron übergeht und außerdem ein langwelligeres gestreutes Photon auftritt.

Bei sehr energiereichen Röntgenstrahlen, deren Quantenenergie größer als 1,022 MeV ist, kommt es in der Nähe eines Atomkerns zur Umwandlung eines Photons in ein Elektron und in ein Positron (positives Elektron).

Diese Ergebnisse sind das Resultat intensiver Forschungen der Strahlenphysik, die durch Röntgens Entdeckung mit ausgelöst und ermöglicht wurden. Man erkannte auch, dass diese definierten physikalischen Vorgänge der Ausgangspunkt einer Kausalkette sind, die zu dem komplizierten Erscheinungsbild der biologischen Strahlenwirkungen führt.

An der Aufklärung dieser Vorgänge war eine wissenschaftliche Disziplin, die Biophysik, in hervorragender Weise beteiligt.

Ihre Geschichte ist durch die kurz vor der Jahrhundertwende erfolgte Entdeckung der Röntgenstrahlen und die dadurch bewirkte Umstellung im wissenschaftlichen Denken über Grundvorgänge geprägt worden.

Nachdem bereits in den ersten Monaten des Jahres 1896 Walter König, damals Dozent für Physik im Frankfurter Physikalischen Verein, viele Röntgenaufnahmen gemacht hatte, von denen eine kleine Auswahl im März 1896 publiziert wurde, begann er auch Kurse über Röntgenstrahlung für die Frankfurter Ärzte abzuhalten.

1919 wurde an der Frankfurter Universität für Friedrich Dessauer ein Lehrstuhl zur Erforschung der Krebsbekämpfung durch Röntgenstrahlen eingerichtet.

Dessauer erinnert sich, wie sein Vater am Mittagstisch den zehn Kindern, unter denen er das neunte war, die erste Zeitungsnachricht von der Entdeckung der Röntgenstrahlen vorlas. Er war damals noch nicht 15 Jahre alt, aber hatte in seinem Zimmerchen bereits ein kleines physikalisch-technisches Kabinett eingerichtet. Bald baute er sich seinen eigenen Röntgenapparat.

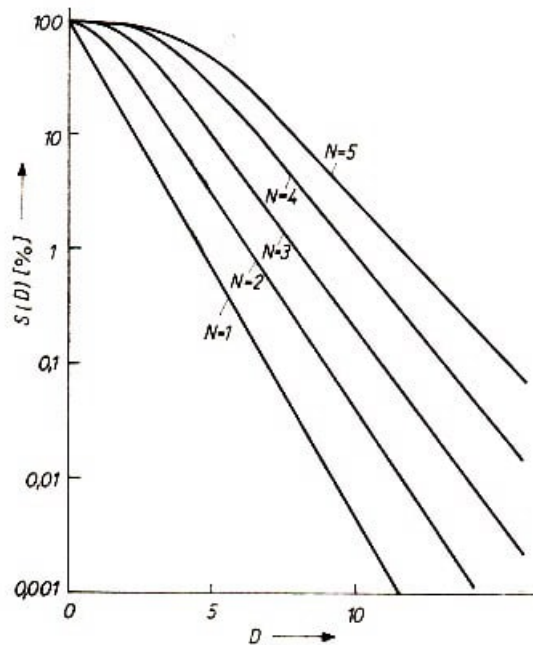
Mit diesem transportablen Gerät fuhr er von München, wo er studierte, nach Würzburg, wo sein Bruder an einer schweren, aber nicht sicher erkannten Krankheit darniederlag. Es war zu der Zeit, als Röntgen von Würzburg nach München berufen wurde. Dessauer machte die Durchleuchtung am Krankenbett, so dass die Ärzte die Diagnose stellen konnten: es war eine tödliche Krankheit.

Das machte auf die Umgebung einen so tiefen Eindruck, dass man ihm riet, Röntgenforscher zu werden. Glücklicherweise befolgte er diesen Rat. 1908 machte er dann als junger Aschaffener Ingenieur im Ärztlichen Verein in Frankfurt in einem Vortrag auf die Möglichkeit aufmerksam, mit Röntgenstrahlen therapeutisch in die Tiefe wirken zu können. 1921 gründete Dessauer das Institut für Physikalische Grundlagen der Medizin, Dessauer war vorher schon seit mehreren Jahren als Leiter der in Frankfurt ansässigen Firma „Vereinigte Elektrotechnische Institute Frankfurt/Aschaffenburg“ damit beschäftigt, elektrotechnische Geräte, vor allem für Heilzwecke, zu entwickeln und zu erproben.

Die Universität hatte zwar einen Lehrstuhl für dieses Fachgebiet eingerichtet, ihr fehlten aber für die neuen Forschungsaufgaben die notwendigen Einrichtungen und Geräte. Deshalb fand sich ein Kreis von Freunden und Stiftern, der recht erhebliche Beträge für den Ausbau eines Forschungsinstitutes zur Verfügung stellte.

Durch den Rechtsanwalt Henry Oswald wurde dann am 4. Februar 1921 eine Stiftung unter

dem Namen „Institut für Physikalische Grundlagen der Medizin“ gegründet. Dessauer, der die Leitung dieses Institutes übernahm, waren große wissenschaftliche Erfolge beschieden. Ihm verdanken wir z. B. einen interessanten Erklärungsversuch für die Dosis-Wirkungsbeziehungen, die sich bei der Bestrahlung von biologischen Objekten mit Röntgenstrahlen ergeben.



16 Dosis-Effekt-Kurven von Mehrtrefferreaktionen ($N = 1$ bis $N = 5$) in halblogarithmischer Darstellung. Aufgetragen ist die Überlebensrate einer Bakterienkultur $S(D)$ über einem relativen Dosismaß D

Beim Studium der Strahlenwirkung im biologischen Experiment stellte sich heraus, dass auch nach sehr hohen Dosen nicht alle exponierten Organismen starben. Die sich ergebende Form der Dosis-Effekt-Kurve wurde durch Streuung des biologischen Materials erklärt, bis Dessauer 1922 das Trefferprinzip aufstellte.

Mit dem Trefferprinzip fand die Lehre von der Quantennatur der Strahlung und die statistische Gesetzmäßigkeit Eingang in die Strahlenbiologie. William Crowther führte dann den Begriff des Treffbereiches ein. In Deutschland waren an der Weiterentwicklung dieser Theorie vor allem Timofeeff-Resovsky, Zimmer, Kurt Sommermeyer, Holthusen, Richard Glocker und Boris Rajewsky beteiligt, der die indirekte Treffertheorie aufstellte.

Wenn man auch heute erkannt hat, dass die Einwirkung von Röntgenstrahlen auf Lebewesen ein wesentlich komplizierterer Vorgang ist, so haben diese ersten Gedanken doch folgenreiche Experimente veranlasst.

Insbesondere führten diese Vorstellungen weg von den zunächst ungezielten medizinischen Anwendungen der Röntgenstrahlen bei dem Versuch der Beeinflussung von Krebserkrankungen und hin zu den systematischen Studien an mikroskopischen Objekten. Dabei waren die Versuche zur Inaktivierung von Enzymen, Viren und Bakterien von besonderer Bedeutung. Mit diesen Untersuchungen wurde die moderne Biophysik begründet, die von deutschen Forschungsstätten ihren Ausgang nahm.

Boris Rajewsky, der 1934 als Schüler und Mitarbeiter in das von Dessauer geleitete Institut für Physikalische Grundlagen der Medizin eintrat und 1937 als Direktor ein von der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft für ihn begründetes Institut übernahm, antwortete auf die Frage des

damaligen Präsidenten der Gesellschaft, Geheimrat Karl Bosch, wie das neue Institut heißen sollte: „Herr Geheimrat, es soll Kaiser-Wilhelm-Institut für Biophysik heißen.“

Damit wurde der heute so geläufig gewordene Begriff „Biophysik“ geprägt. Es war die Geburtsstunde eines neuen Faches, welches seine ersten Impulse aus der mit Hilfe der Röntgenstrahlen möglich gewordenen strahlenmedizinischen Praxis entnahm. Dort ergaben sich dringende Fragestellungen, die zunächst nur physikalisch bearbeitet werden konnten.

Sehr bald zeigte es sich aber auch, dass die Biophysik, als Grenzgebiet zwischen Physik, Medizin und Biologie, für die Rolle einer Vermittlerin zwischen diesen wissenschaftlichen Disziplinen prädestiniert ist. Die biophysikalische Forschung ist fast immer Grundlagenforschung und angewandte Forschung zu gleicher Zeit. Durch die Verfolgung ihres großen Zieles, das Erkennen des Platzes der Physik im Weltbild der Biologie und ihrer großen Anwendungsgebiete der Agrikultur und der Medizin, wird die Biophysik zu einer unentbehrlichen Hilfsdisziplin. Auf dem molekularen Gebiet begegnet sie unmittelbar der Biochemie. Hier gehen beide Wissenschaften zum Teil ineinander über.

Die Bedeutung der Röntgenstrahlen für das neue Gebiet der Biophysik, welches in den 30er Jahren unseres Jahrhunderts entstand, wird noch einmal deutlich, wenn man das große Verzeichnis der wissenschaftlichen Arbeiten dieses Faches betrachtet. Es beginnt mit zwei Themen: „Untersuchungen über die Krebserzeugung durch Strahlen“ und „Mikrokinematographische Studien über die Wirkung von Röntgenstrahlen auf normale und Tumorzellen in Gewebekulturen“.

Als im Jahre 1927 Hermann Joseph Muller in den USA gefunden hatte, dass Röntgenstrahlen künstliche Mutationen, d.h. qualitative oder quantitative Veränderungen des genetischen Materials der Lebewesen, auslösen können, und sich später zeigte, dass alle ionisierenden Strahlen und das ultraviolette Licht ähnliche Wirkungen haben, wurde eine neue Gefahrenstufe der Strahleneinwirkung auf Lebewesen sichtbar.

Die Biophysik der damaligen Zeit griff diese Problematik sofort auf und erarbeitete zusammen mit anderen wissenschaftlichen Disziplinen die Grundlagen des Strahlenschutzes und studierte die Beziehungen zwischen Strahlendosis und Strahlenwirkungen.

Damit entstanden die Voraussetzungen für einen gezielten Einsatz der Röntgenstrahlen und der anderen ionisierenden Strahlungen in der klinischen Therapie der Geschwulsterkrankungen. Die messtechnische Erfassung der applizierten Strahlenmenge erforderte den Begriff der Dosis. Der Schweizer Arzt und Physiker Th. Christen war einer der ersten, der bereits 1913 klare Vorstellungen über den Dosisbegriff entwickelte. 1924 wurde durch Zusammenarbeit zwischen der Physikalisch-Technischen-Reichsanstalt und der Deutschen Röntgengesellschaft eine auf der Ionisation der Luft beruhende Dosiseinheit, das „Röntgen“ (R), in Deutschland eingeführt und auf dem zweiten Internationalen Kongress für Radiologie 1928 in Stockholm mit einer kleinen Änderung (bezogen auf 0°C an Stelle von 18°C) als international verbindliche Dosiseinheit für Röntgenstrahlen übernommen.

Mit dem „Röntgen“ wurde zwar eine Einheit definiert, jedoch nicht, wie sonst in der Physik allgemein üblich, vorher eine Definition der zu messenden Größe gegeben. Dieses geschah erst 1953 durch die Einführung der „Energiedosis“ auf dem 7. Internationalen Kongress für Radiologie in Kopenhagen und durch die Definition der „Ionendosis“ auf Grund der z. Z. noch gültigen Empfehlungen der Internationalen Kommission für radiologische Einheiten und Messungen (ICRU) von 1971.

Dabei ist die Energiedosis die durch die Masse eines bestrahlten Gewebevolumentes dividierte und von diesem absorbierte Strahlenenergie, Die Maßeinheit der Energiedosis ist Joule je Kilo-

gramm oder Gray (Gy) (früher: Rad (rd); $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rd}$). Da die Energiedosis selbst schwer messbar ist, wird sie meistens mit Hilfe geeigneter Formeln berechnet.

Die Ionendosis oder Exposition knüpft an die ionisierende Wirkung der Röntgenstrahlung an. Sie stellt das Verhältnis der von der ionisierenden Strahlung in einem Luftvolumen erzeugten Ladungsmenge zur Masse des Luftvolumens dar. Die heutige Maßeinheit ist das Coulomb je Kilogramm. Ursprünglich trug diese Maßeinheit den Namen des Entdeckers der Röntgenstrahlung.

Im neugeschaffenen internationalen Maßsystem (SI-System) gilt zwischen der Maßeinheit „Röntgen“, abgekürzt R, und der SI-Einheit C/kg die Umrechnung:

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg} = 0,000258 \text{ C/kg}.$$

Bei konsequenter Benutzung der neuen Maßeinheit verschwindet dann leider der Name „Röntgen“ aus den Dosierungsangaben der Strahlentherapie, was im Hinblick auf die Anwendungen der Röntgenstrahlen gerade in der Medizin bedauert werden kann.

Im Gegensatz zur Energiedosis lässt sich die Ionendosis messtechnisch unmittelbar erfassen. Sie ist die wichtigste Maßgröße der Dosimetrie. Die Messung der Ionendosis war eine der Voraussetzungen für die quantitativen Untersuchungen der Strahlenwirkungen durch die Biophysik.

Auf dem Dosisbegriff aufbauend konnte auch ein ausreichender Strahlenschutz für alle Menschen, die aus beruflichen oder anderen Gründen Umgang mit ionisierenden Strahlen haben, begründet und so weitere Opfer der Röntgenstrahlung als die schon erwähnten 359 Forscher, Ärzte, Physiker, Röntgentechniker, Laboranten und Krankenschwestern vermieden werden.

Trotz unserer auch heute noch begrenzten Kenntnisse von der Wirkung geringer Strahlendosen auf niedrige Lebewesen und der beinahe nicht vorhandenen Kenntnisse der Wirkung kleiner Strahlendosen auf Menschen, gelang es doch, die zulässige Strahlenbelastung der mit Strahlen arbeitenden Menschen so niedrig festzulegen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Strahlenschädigung von Einzelpersonen gering ist.

Für den praktischen Einsatz der Röntgenstrahlen bei der Geschwulstbehandlung war die Erkenntnis wesentlich, dass schnell wachsendes Gewebe, wie z. B. das Tumorgewebe, im allgemeinen strahlenempfindlicher ist als normal wachsendes Gewebe.

Dadurch hat der Strahlentherapeut die Möglichkeit, das krankhafte Gewebe gezielt stärker zu schädigen als das gesunde Gewebe. Allerdings gibt es verschiedene Faktoren, welche die Erreichung dieses Zieles erschweren. Eine Schwierigkeit besteht darin, dass in vielen Bestrahlungssituationen die Dosis so von der Tiefe im bestrahlten Gewebe abhängt, dass einerseits die vor dem Tumor liegenden Gewebereiche beträchtliche Dosen erhalten, andererseits noch hinter dem Tumor liegende Organe mitbestrahlt werden.

Auch besitzt der Tumor häufig anoxische, d. h. sauerstoffarme und damit strahlenresistente Zellbereiche, die erst bei höheren Strahlendosen ausgeschaltet werden können und damit einen selektiven Überlebensvorteil gegenüber gesundem Gewebe haben.

Es war eine frühe klinische Erfahrung, dass sich in den meisten Fällen eine erfolgreiche Strahlentherapie nur durch vielfache Fraktionierung, d. h. Aufteilung der Dosis über mehrere Wochen hinweg, erreichen lässt. Je größer die Anzahl der Einzelfraktionen und je länger die Gesamtdauer der Bestrahlung ist, um so stärker ist dabei die Gesamtdosis zu erhöhen. Trotz dieser Erfahrung hat es jedoch viele Jahre intensiver Forschung bedurft, bis Regeln gefunden wurden, die diese Abhängigkeit quantitativ ausdrücken.

Ein exaktes Verstehen der biologischen Wirkungen der von Röntgen entdeckten Strahlen gibt

es heute, fast 90 Jahre nach ihrer Entdeckung, trotz vieler Einzelerkenntnisse noch immer nicht. So überrascht z.B. nach wie vor die Tatsache, dass zur Inaktivierung eines bestimmten Prozentsatzes von Viren einer Population eine Exposition von 10000 R bis 100000 R erforderlich ist, zur Abtötung des gleichen Prozentsatzes von Zellen einer Zellpopulation jedoch bereits 1000 R genügen und bei einer Ganzkörperbestrahlung, d. h. bei einer Bestrahlung des ganzen menschlichen Körpers, bereits eine Einzeldosis von 200 R in einem erheblichen Prozentsatz eine tödliche Wirkung zur Folge haben kann.

Wenn wir davon ausgehen, dass eine Energie von etwa 30 Elektronenvolt (eV) notwendig ist, um ein Atom eines gewebeäquivalenten Gases zu ionisieren, so entspricht die Dosis bei der oben genannten Ganzkörperbestrahlung einer Erwärmung des gesamten Organismus um etwa $1/1000^\circ$ Celsius. Dieses könnte als ein überraschend geringer Wert erscheinen, wenn wir bedenken, dass diese Einzeldosis bei einer Ganzkörperbestrahlung bereits den Tod des ganzen Organismus zur Folge haben kann.

Jedoch ist der Vergleich mit der Wärmeenergie insofern irreführend, als diese eine völlig disperse, d.h. völlig gleichmäßig verteilte und daher relativ unwirksame Form der Energie darstellt.

Die statistische Energielokalisation war es aber gerade, die Dessauer veranlasst hatte, von einem Trefferereignis bei der Strahlenwirkung zu sprechen. Er machte über die Art des „Treffers“ zunächst keine weiteren Annahmen, sondern sprach ganz allgemein von „Punktwärme“, um das Trefferereignis zu charakterisieren.

Growther, der etwa gleichzeitig mit Dessauer den Formalismus der Treffertheorie entwickelte, nahm statt dessen an, es handle sich bei den Treffern um einzelne Ionisationen, die in empfindlichen Strukturen der Viren oder Bakterien erfolgen.

Diese Auffassung hat sich später bei vielen strahlenbiologischen Untersuchungen an Viren, Phagen und Bakterien bestätigt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Ablösung einzelner Elektronen aus dem Atomverband direkt oder indirekt über die Bildung von freien Radikalen zur Inaktivierung der biologischen Objekte führen kann.

Die Tatsache, dass ein quantenmechanisches Elementarereignis, wie die Ablösung eines einzelnen Elektrons, ein komplexes, aus vielen Milliarden Atomen bestehendes System inaktivieren kann, war für den Physiker ebenso faszinierend wie für den Biologen. Allerdings ist es sowohl vom physikalischen als auch vom biologischen Standpunkt aus zu verstehen, dass der Versuch, die Strahlenwirkungen allein durch gleichartige, statistische, unabhängige Trefferereignisse zu erklären, scheitern musste.

Es ist zwar richtig erkannt worden, dass die Energieübertragung vom Strahlungsfeld der Röntgenstrahlen oder anderer Strahlen auf die bestrahlte Materie in direkten, zufälligen Akten erfolgt, jedoch ist dieser Prozess weitaus komplizierter als die Treffertheorie postuliert. Tatsächlich entsteht beim Durchgang einer Strahlung durch eine Zelle ein komplexes mikrogeometrisches Muster von Anregungen und Ionisationen, welches für alle Arten ionisierender Strahlungen sehr unterschiedlich ist. Daraus resultiert eine unterschiedliche biologische Wirksamkeit der verschiedenen Strahlenarten.

Bezüglich ihrer biologischen Wirksamkeit ist, die Röntgenstrahlung eine locker ionisierende Strahlung, d. h., die von ihr pro Wegstrecke auf das Gewebe übertragende Energie ist geringer als bei der dicht ionisierenden Teilchenstrahlung, wie etwa der Alpha-Strahlung. Dieser Wirkungsunterschied ist am größten bei geringen Dosen und weit weniger ausgeprägt bei hohen Dosen.

Deshalb lässt sich einer bestimmten Strahlenart relativ zu einer anderen kein bestimmter Wert

ihrer relativen biologischen Wirksamkeit zuordnen. Es lässt sich aber sagen, dass die Röntgenstrahlung in ihrer Wirkung auf einzelne Zellen weniger wirksam ist als etwa die Alpha-Strahlung oder die Neutronenstrahlung.

So beträgt die Energiedosis für Röntgenstrahlen, die nötig ist, um die Hälfte aller Zellen einer Zellpopulation menschlicher Nierenzellen abzutöten, etwa 400 Rad (rd) oder 4 Gray (Gy).

Den gleichen Effekt erzielt man bei Alpha-Strahlen (Alpha-Strahlen sind zweifach positiv geladene Heliumkerne) bereits bei etwa 50 rd oder 0,5 Gy. Nehmen wir an, dass der Kern der Zelle ein Volumen von etwa $300 \mu\text{m}^3$ hat ($1 \mu\text{m} = 1/1000 \text{ mm}$), so sind bei Verwendung einer Röntgenstrahlung von 250 keV Röhrenspannung im Mittel etwa 240000 Ionisationen pro Kern erforderlich, ehe die Zelle inaktiviert wird, während bei Alpha-Strahlen nur etwa 30000 Ionisationen benötigt werden.

Neutronen stoßen im Gewebe wie Billardkugeln an die gleichschweren Wasserstoffkerne, wobei diese die Energie der Neutronen übernehmen und durch direkte Ionisationen bis zu 20mal effektiver als Röntgenstrahlen im Gewebe wirksam werden.

Als Röntgen in seinem Laboratorium mit Hittdorffschen Röhren experimentierte und dabei eine neue Art von Strahlen entdeckte, hat er viele Eigenschaften dieser Strahlen bereits erkannt und in seinen Mitteilungen beschrieben. Was er nicht wissen konnte, waren die überraschenden Wirkungen dieser Strahlen, die sie auf lebende Materie ausüben.

Unbewusst hat Röntgen dazu beigetragen, Fragestellungen für Generationen von Wissenschaftlern zu liefern, die sich z.B. im Rahmen der Biophysik das Ziel gestellt haben, die Wirkungen der Strahlungen auf den Menschen verstehen zu lernen und damit dem Strahlentherapeuten auf den Ergebnissen der Zellkinetik und der experimentellen Tumorthherapie beruhende Möglichkeiten zur Schaffung optimaler Fraktionierungsschemata zu liefern, und die so helfen, Röntgens Entdeckung zum Wohle erkrankter Menschen zu nutzen.

Dieses Anliegen ist sicher ganz im Sinne des Forschers Röntgen, der aus seiner Entdeckung keinen persönlichen Vorteil zog.

Dr. Max Levy, der von der AEG, einer großen Elektrofirma, beauftragt war, an Röntgen heranzutreten und mit ihm einen Vertrag abzuschließen, wonach Röntgen seine künftigen Erfindungen und Entdeckungen unter gewissen Bedingungen der AEG überlassen sollte, schreibt, dass Röntgen keinesfalls die Vorteile einer Zusammenarbeit mit einem so großen Unternehmen verkannte, aber der guten Tradition deutscher Professoren entsprechend seine Entdeckung der Allgemeinheit überlassen wollte.

6.2 Strahlenschutz - ein weltweites Gebot

Bereits am 3. Oktober 1896 beschrieb der Glasgower Arzt J. McIntyre schwere Schädigungen seiner Hand, die durch lange Bestrahlungszeiten verursacht worden waren. Einen Einblick in den Verlauf einer Strahlenschädigung gab der 1896 durchgeführte Selbstversuch des Erfinders und Forschers Elihu Thomson.

Er bestrahlte den kleinen Finger seiner linken Hand, den er dicht an die Platinanode einer damaligen Röntgenröhre hielt, eine halbe Stunde lang. Erst nach einer Woche begann sich der Finger zu röten, schwoll an und wurde stoß- sowie druckempfindlich. Thomson machte damit nicht nur andere Forscher auf die Gefahren der Röntgenstrahlung aufmerksam, sondern gab auch bereits im Jahre 1896 erste „Strahlenschutznormen“ an.

Doch leider wurden seine Darlegungen wie auch zahlreiche andere Beschreibungen sehr schwer-

wiegender Röntgenstrahlenwirkungen nicht genügend verbreitet oder von manchen der früheren Forscher nicht beachtet.

Auch Dessauer verstarb 1963 an einem Leiden, das er sich vor vielen Jahren bei Versuchen mit Röntgenstrahlen zugezogen hatte. Diese Schäden erstreckten sich nicht nur auf das Leben und die Gesundheit der Betroffenen, sondern ihre schwersten und unheimlichsten Folgen sind die Erbschädigungen, die in den nachfolgenden Generationen zu vorzeitigem Tod, zu Krankheit und Missbildungen führen können.

Röntgens Entdeckung hat ebenso wie die Entdeckung der anderen energiereichen Strahlungen nicht nur positive Folgen gehabt. Die erstmals in Hiroshima und Nagasaki in Erscheinung getretenen Strahlenwirkungen der Nuklearwaffen hat die gesamte Menschheit tief erschrocken. Heute stehen sich atomar hochgerüstete Weltmächte gegenüber, und es muss der einheitliche Wille aller Verantwortung tragenden Menschen sein, dass dieses Vernichtungspotential nie zur Auslösung komme!

Aber auch die heutigen Kernkraftwerke und letzten Endes auch alle medizinischen Anwendungen der Strahlungen bedeuten ein erhöhtes Risiko, denn es konnte gezeigt werden, dass energiereiche Strahlungen und insbesondere die Röntgenstrahlung in einem weiten Organismenbereich von den Bakterien bis zu den Säugetieren Mutationen hervorrufen können.

Veränderungen an der Erbmasse aber betreffen den ganz einzigartigen und wertvollen Besitz des Menschen, welcher für die Gesundheit und die normale Entwicklung künftiger Generationen entscheidend ist.

Nun ist es aber keinesfalls so, als ob erst durch die Entdeckung und friedliche Nutzung der Röntgenstrahlen und der anderen energiereichen Strahlung eine Strahlenbelastung besonders exponierter Personen entstanden ist, vielmehr war die gesamte menschliche Population von je her einer bestimmten natürlichen Umgebungsstrahlung ausgesetzt. Zu dieser Umgebungsstrahlung gehört die sogenannte kosmische Strahlung.

Ihre Erforschung hat mit Beobachtungen am Elektroskop begonnen. Trotz bester Isolierung entladen sich Elektroskope im Laufe einiger Zeit. Diese Erscheinung, die Röntgen auch bei der Bestrahlung eines Elektroskopes mit Röntgenstrahlen beobachtet hatte, wird im ersteren Falle auf Ionen zurückgeführt, die sich überall in der Atmosphäre befinden.

Man nahm an, dass diese Ionen als Folgeerscheinung der in der Erdoberfläche verteilten radioaktiven Substanzen entstehen. Bald jedoch stieß man auf Unstimmigkeiten. So enthält Wasser in viel geringerem Maße gelöste radioaktive Stoffe als die feste Erde. Hiernach sollte der Ionengehalt der Luft über großen Wasserflächen unter den Beträgen liegen, die für das Festland gelten. Elektroskope entladen sich aber in beiden Fällen ohne merkliche Unterschiede.

Noch eindringlicher gegen die terrestrischen Deutungsversuche der Luftionisation sprach eine weitere Tatsache. Die Entladung der Elektroskope erfolgt nämlich um so schneller, je weiter man sich über die Erdoberfläche erhebt.

Dieses bestätigen in vollem Umfange sowohl die Ballonaufstiege, die Victor Francis Hess 1912 und 1913 bis in 5000 m Höhe durchführte als auch die Höhenflüge Kohlhörsters (1914 bis 1919) bis 9200 m. Es wurde ein Anwachsen der Ionisation mit der Höhe bis zum achtfachen Betrag beobachtet,

Deshalb nahm der Physiker Hess als Ursache für die nach oben zunehmende Ionisation der Atmosphäre Strahlen an, die aus dem Weltraum stammen. Kohlhörster erkannte die bedeutende Durchdringungsfähigkeit dieser Höhenstrahlen oder kosmischen Strahlen, wie sie heute genannt werden. L. Mysowski konnte sie noch im Onega-See bei Leningrad in 1000 m Was-

sertiefe nachweisen.

Mit der Entwicklung der Raumfahrttechnik und der Konstruktion selbständig registrierender Apparate konnte in der Folgezeit diese Strahlung sehr genau erforscht werden. Heute ist bekannt, dass die kosmische Strahlung von der Sonne und aus dem Weltraum stammt und primär Röntgenstrahlen sowie sehr energiereiche Protonen, d. h. Wasserstoffkerne, enthält. Durch Wechselwirkung mit den äußeren Luftschichten entstehen zahlreiche Folgeprodukte, die z. T. schon in der Atmosphäre absorbiert werden, teilweise die Erdoberfläche erreichen oder auch tief in die Erde eindringen können.

Eine zweite Komponente der Umgebungsstrahlung ist die terrestrische Strahlung. Sie stammt von den Nukliden Kalium 40, Uran 238 und Thorium 232, die Halbwertszeiten von über einer Milliarde Jahren haben. Die Nuklide des Uran und des Thoriums sind die Ausgangssubstanzen radioaktiver Zerfallsreihen, die kurzlebige feste und gasförmige Elemente enthalten, so dass sie auch in der Luft als Aerosol vorkommen können.

Da zwischen der Energiedosis und der biologischen Wirkung der ionisierenden Strahlungen kein einfacher Zusammenhang besteht und dieser von der Strahlenart, der Strahlenenergie, der räumlichen und zeitlichen Dosisverteilung sowie von dem physiologischen Zustand des bestrahlten Organismus abhängt, wurde der Begriff der Äquivalenzdosis eingeführt.

Sie fasst bestimmte Haupteinflussgrößen auf die biologische Wirkung ionisierender Strahlen beim Menschen zusammen. Als Maßeinheit wurde früher das Rem (rem), heute aber das Sievert (Sv) benutzt. Es gilt: $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} = 1 \text{ Joule/Kilogramm}$.

Die Umweltstrahlung führt auf eine natürlich Strahlenexposition der Weltbevölkerung, die in Millirem pro Jahr angegeben wird. Sie liegt in der Größenordnung von $100 \text{ mrem/Jahr} = 1 \text{ mSv/Jahr}$.

Dieser Wert hängt stark von der geographischen Region ab. So steigt er z. B. in den Monazitgebieten in Indien und Brasilien, deren Böden hohe Thoriumgehalte aufweisen, bis zu einem Wert von $10000 \text{ mrem/Ja} = 100 \text{ mSv/Jahr} = 0,1 \text{ Sv/Jahr}$ an.

Die natürlichen Radionuklide und ihre Folgeprodukte können sowohl über die Nahrungskette als auch über die Atemluft in den Körper aufgenommen werden. Sie bewirken dort eine zusätzliche innere Bestrahlung.

Seit über 80 Jahren werden in der Medizin Röntgenstrahlen und seit etwa 40 Jahren auch Radionuklide diagnostisch und therapeutisch eingesetzt. In zunehmendem Maße wird die von der Industrie benötigte Elektroenergie in Kernkraftwerken erzeugt.

Mit diesen Errungenschaften haben wir gelernt zu leben, obwohl wir wissen, dass damit zusätzliche Gefahren für die Einzelperson und für die gesamte Population verbunden sind. Aus diesen Anwendungen der Strahlen resultiert eine zusätzliche „zivilisatorische“ Strahlenbelastung.

Erhebungen in Großbritannien haben ergeben, dass die medizinische Strahlenanwendung eine mittlere Äquivalentdosis von 34 mrem/Jahr für das Knochenmark und von 19 mrem/Jahr für die Fortpflanzungsorgane bewirkt.

In der Umgebung von Kernkraftwerken werden im allgemeinen 2 mrem/Jahr nirgendwo überschritten, und die medizinische Anwendung von Radionukliden belastet weniger als $1/100$ der Bevölkerung mit $0,5 \text{ rem/Jahr}$. Die bisher durchgeführten Kernwaffenteste werden bis zum Jahre 2000 insgesamt eine Strahlenbelastung der Weltbevölkerung von etwa 120 mrem ergeben.

Daraus wird deutlich, dass an der gegenwärtigen zivilisatorisch bedingten Strahlenbelastung

der Menschheit die medizinische Anwendung ionisierender Strahlen in hohem Maße beteiligt ist. Aufgrund der Tatsache, dass es für genetische Strahlenwirkungen keine Schwellendosis gibt, unterhalb derer keine Schäden zu erwarten sind, stellt jede Erhöhung der natürlichen Strahlenbelastung ein genetisches Risiko dar.

Es ist deshalb verständlich, dass weltweite Bemühungen zur Verhütung und Begrenzung unerwünschter Strahlenwirkungen existieren. Diese Bemühungen bilden den Gegenstand des Strahlenschutzes.

Eine internationale Kommission, die ICRP (International Commission on Radiological Protection), ist mit der Ausarbeitung von Empfehlungen beauftragt, die sich mit den Grundproblemen des Strahlenschutzes befassen. Den nationalen Strahlenkommissionen obliegt die Verantwortlichkeit für die Einführung von speziellen Vorschriften und Arbeitsrichtlinien, die den Bedürfnissen der einzelnen Länder entsprechen. Jedoch sind die Euratom-Richtlinien zur Festlegung der Grundnormen für den Schutz der Bevölkerung und der Arbeitskräfte gegen die Gefahren ionisierender Strahlung hinsichtlich des zu erreichenden Zieles für die Mitgliedsstaaten verbindlich.

In der DDR sind die Strahlenschutzmaßnahmen für Röntgenstrahlen in der Verordnung über den Schutz vor den schädigenden Einwirkungen ionisierender Strahlungen vom 26. 11. 1969 geregelt.

Eine wesentliche Aufgabe des Strahlenschutzes besteht darin, für die Gesamtbevölkerung und für beruflich strahlenexponierten Personen Höchstgrenzen der Strahlenbelastung festzulegen. So beträgt die höchstzulässige Äquivalentdosis gegenwärtig für den zuletzt genannten Personenkreis $5 \cdot 10^{-2}$ Sv je Jahr oder 5 rem je Jahr.

Experimentelle Beobachtungen an Zellkulturen könnten aber in Zukunft eine Revision der maximal zulässigen Äquivalentdosis bewirken.

Aus physikalischer Sicht ergeben sich drei Möglichkeiten, strahlenexponierte Personen vor einer Röntgenstrahlung so zu schützen, dass die maximal zulässige Äquivalentdosis nicht überschritten wird. Von zwei dieser Möglichkeiten hatte Röntgen schon unbewusst Gebrauch gemacht. So lesen wir bereits in seiner ersten Mitteilung über eine neue Art von Strahlen, dass die Intensität der Strahlen umgekehrt proportional zu dem Quadrat der Entfernung von der Röhre abnimmt.

Diese Erkenntnis hat zum sogenannten geometrischen Strahlenschutz geführt. Ist bei einer Röntgenröhre das Verhältnis vom geometrischen Brennfleckdurchmesser zum Objektabstand wesentlich kleiner als eins, so verhalten sich die Dosisleistungen, d.h. die Verhältnisse von der jeweiligen Dosis zur Bestrahlungsdauer, in zwei verschiedenen Abständen vom Fokus umgekehrt wie die Quadrate der zugehörigen Abstände. Dadurch lassen sich bei einer Vergrößerung des Abstandes von der Strahlenquelle unerwünschte Strahleneinwirkungen vermindern.

Auch die zweite Möglichkeit eines physikalischen Strahlenschutzes hatte Röntgen bereits genutzt, indem er allerdings nur, um seine photographischen Platten vor unbeabsichtigter Bestrahlung zu schützen, seine Experimente in einer großen Zinkkiste durchführte und die Seite der Kiste, die nach der außen stehenden Röhre wies, sehr bald mit Blei verstärkte.

Da die Dosisleistung einer Röntgenstrahlung mit zunehmender Dicke der Abschirmung näherungsweise exponentiell abnimmt, gelingt keine Totalabschirmung. Auch ist zu beachten, dass die hinter der Abschirmung auftretende Dosisleistung durch Streuung in der Schutzschicht beeinflusst werden kann.

Für den Strahlenschutz ist die sogenannte Zehntelwertdicke einer Schutzschicht besonders

wichtig. Darunter wird diejenige Schichtdicke verstanden, die die Dosisleistung in einem breiten Bündel von Röntgenstrahlen auf $1/10$ des Anfangswertes herabsetzt. Dabei ist zu beachten, dass hierbei häufig Schichtdicken in der Maßeinheit Gramm je Quadratcentimeter (g/cm^2) angegeben werden. Durch Division der Schichtdicke in g/cm^2 durch die Dichte der Abschirmung in g/cm^3 wird die geometrische Schichtdicke in cm erhalten.

So beträgt z.B. für eine Röntgenstrahlung, die durch eine mit 50 kV betriebene Röntgenröhre erzeugt wird, die Zehntelwertdicke für Beton $4 \text{ g}/\text{cm}^2$. Um dieses zu erreichen, wäre eine Betonabschirmung (Dichte $2,0 \text{ g}/\text{cm}^3$) mit einer geometrischen Schichtdicke von $4 \text{ g}/\text{cm}^2 / 2 \text{ g}/\text{cm}^3 = 2,0 \text{ cm}$ erforderlich. In der folgenden Tabelle sind einige Angaben über die geometrische Schichtdicke einer Bleiabschirmung (Dichte $11,34 \text{ g}/\text{cm}^3$) zusammengestellt, welche in Abhängigkeit von der Röhrenspannung einen bestimmten Schwächungsgrad der Röntgenstrahlung - für ein breites Strahlenbündel bewirken.

Geometrische Dicke in cm einer Bleischutzschicht für verschiedene Schwächungsgrade eines breiten Röntgenstrahlungsbündels

Schwächungsgrad	Röhrenspannung in kV, Schichtdicke in cm	
	100	200
1/2	0,1	0,2
1/10	0,3	0,6
1/100	0,5	1,0
1/1000	0,7	1,5

Der Schwächungsgrad gibt das Verhältnis der Dosisleistung nach der Schutzschicht zu der Dosisleistung vor der Schutzschicht an.

Über die Röntgenschen Maßnahmen als Grundlage eines Strahlenschutzes hinausgehend ist heute noch eine dritte Möglichkeit des physikalischen Strahlenschutzes durch zeitliche Begrenzung der Strahleneinwirkung bekannt.

Unter allen Umständen muss beim Umgang mit Röntgenstrahlen eine direkte Bestrahlung des Personals vermieden werden. In jedem Fall ist eine Strahlenschutzkleidung aus Bleigummi zu tragen.

Alle strahlenexponierten Personen müssen dosimetrisch überwacht werden. Auch dazu hat Röntgen, wenn auch unbewusst, bereits die physikalische Grundlage in seiner ersten Mitteilung gelegt, indem er die photographische Platte zum Nachweis der von ihm entdeckten neuen Art von Strahlen benutzte.

Heute werden Filmdosimeter zur Erfassung der von außen auf den menschlichen Körper einwirkenden Strahlen verwendet.

Diese Filmdosimeter müssen von dem beruflich strahlenexponierten Personal am Arbeitsplatz getragen werden. Je nach der Gefährdungssituation werden die Filme dieser Dosimeter nach einem Monat oder nach drei Monaten ausgetauscht und entwickelt.

Durch die Messung der von der Röntgenstrahlung verursachten Schwärzung der Photoschicht ergibt sich ein Maß für die Dosis, die in der betreffenden Person während des jeweiligen Zeitraumes durch die Bestrahlung erzeugt worden ist.

Die Dosimetrie verfügt über weitere sehr präzise Messverfahren zur Bestimmung der Dosis oder der Dosisleistung der Röntgenstrahlen. Die benutzten Strahlendetektoren beruhen auf genau bekannten Wechselwirkungsprozessen der Strahlung mit gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffen. Mit Hilfe elektronischer Bausteine werden die jeweiligen Strahlendetektoren zu Strahlenmeßgeräten vervollständigt, die dem vorgesehenen Verwendungszweck angepasst sind.

Diese Messgeräte erlauben die Einhaltung eines für die Anwendung der Röntgenstrahlen und aller anderen ionisierenden Strahlen wichtigen Grundsatzes: Setzen Sie sich selbst und andere Personen niemals einer unkontrollierten Strahleinwirkung aus!

Mit der Entdeckung seiner neuen Art von Strahlen hat uns Röntgen ein schwieriges Erbe hinterlassen. Es bietet einerseits Vorteile, ohne die wir uns heute eine medizinische Diagnostik kaum noch vorstellen können, und auch zahlreiche Wissenschaftsgebiete, wie z.B. die Molekularbiologie, hätten ohne die Röntgenstrahlung wesentliche Erkenntnisse nicht gewinnen können, andererseits stellt Röntgens Erbe aber auch bei nichtkontrollierter Anwendung eine große Gefahr dar, die besonders in Verbindung mit den anderen ionisierenden Strahlen zu einer nicht unwesentlichen Erhöhung der natürlichen Umgebungsstrahlung geführt hat.

Deshalb tragen alle Personen, die mit diesen Strahlen aus beruflichen Gründen umzugehen haben, eine große Verantwortung, eine Verantwortung gegenüber ihrem eigenen Leben und ihrer eigenen Gesundheit, aber auch gegenüber der gesamten Menschheit, deren Überleben von der friedlichen und sinnvollen Anwendung der ionisierenden Strahlen in einer nicht mehr rückgängig zu machenden Art und Weise abhängt, an die Röntgen bei der Entdeckung seiner Strahlen wohl kaum gedacht hat.

6.3 90 Jahre Anwendung der Röntgenstrahlen in der medizinischen Diagnostik

Die heutige Medizin ist gekennzeichnet durch die Verwendung zahlreicher Apparate und Geräte, die häufig unter Verwendung elektronischer Bausteine dem Arzt Daten für seine Diagnostik liefern oder, wie z. B. in Form der Diathermiegeräte, unmittelbar in der Therapie eingesetzt werden können. Auf den Intensivstationen dienen medizinisch-technische Geräte zur Überwachung der Pulsfrequenz, des Blutdruckes und vieler anderer wichtiger Größen des Kreislaufsystems schwer erkrankter Patienten.

Manche dieser Systeme beruhen auf den Möglichkeiten der heutigen Elektronik, insbesondere der Mikroelektronik, und sind erst seit wenigen Jahren im Einsatz. Gemessen an der Dauer ihrer medizinischen Anwendung werden sie alle von den Röntgenstrahlen übertroffen.

Seit nahezu 90 Jahren wird in der Medizin mit den von Röntgen entdeckten Strahlen gearbeitet. Sie finden in der Diagnostik genauso Anwendung wie in der Therapie. Ein spezielles Fachgebiet der Medizin, die Radiologie, konnte durch und mit diesen Strahlen begründet werden.

So richteten in Frankfurt am Main die Ärzte Kratzenstein und Feuchtwanger 1898 medizinische Röntgenkabinette ein, und in den Frankfurter Städtischen Krankenanstalten wurde unter Carl von Noorden, Karl Herxheimer, Louis Rehn und Gustav Spiess erfolgreich mit Röntgenstrahlen gearbeitet. Im Jahre 1909 übernahm Walter Alwens die Röntgenabteilung der Schwenkenberschen Klinik, und Franz Groedel baute 1910 am Hospital zum Heiligen Geist eine zentrale Röntgenabteilung auf.

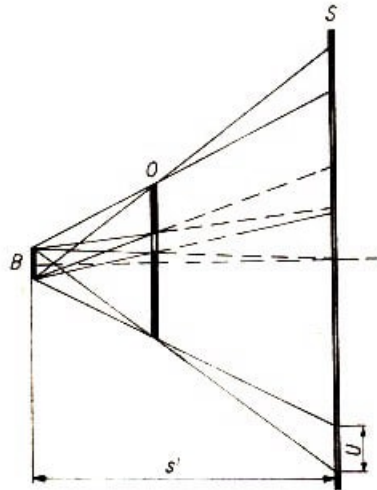
Ähnlich wie in Frankfurt verlief die Entwicklung an vielen anderen Orten. An den medizinischen Fakultäten konnten sich die ersten Vertreter des Faches Röntgenkunde, des Vorläufers der heutigen Radiologie, habilitieren.

Das Anliegen dieses neuen Faches galt in erster Linie der Diagnostik, wie sie Röntgen bereits in seiner ersten Mitteilung über die neue Art von Strahlen durch die Röntgenaufnahme der Hand seiner Frau aufgezeigt hatte.

Das Prinzip besteht darin, mit Hilfe der durchdringenden Röntgenstrahlung ein Schattenbild

des menschlichen Körpers oder seiner Teile zu erzeugen, wobei die Schattenbildung durch das unterschiedliche Schwächungsvermögen der Organe, Weichteile und Knochen des Körpers entsteht. Da die Röntgenstrahlen für das menschliche Auge nicht sichtbar sind, bedarf es eines Bildwändlers. Als solchen benutzte Röntgen die photographische Platte.

Auf ihr erzeugten die Röntgenstrahlen ein latentes Bild, welches nach der Entwicklung diejenigen Stellen, an denen das Röntgenlicht geschwächt auftrat, weniger geschwärzt erkennen lässt als die ungeschwächten Bereiche, so dass es zu einem Kontrast des Röntgenbildes kommt.



17 Prinzip der Röntgenbilderzeugung (reale Zentralprojektion)

Die von dem optischen Brennfleck B einer Röntgenröhre ausgehende Röntgenstrahlung durchsetzt geradlinig ein Objekt O mit Bereichen unterschiedlicher Schwächung. Auf dem Schirm S im Abstand s' vom Brennfleck entsteht ein Schattenbild des Objektes, dessen Konturen infolge der Brennfleckgröße eine geometrische Unschärfe U besitzen.

Diese Methode besitzt verschiedene Nachteile. So entsteht bei zu großem Brennfleckdurchmesser der Röntgenröhre eine geometrische Bildunschärfe. Sie kann durch geometrische Maßnahmen verringert werden. Dazu muss der Abstand des Fokus, d.h. des Brennfleckes auf die Anode der Röhre, vom Objekt möglichst groß und der Abstand der Photoplatte vom Objekt möglichst klein gewählt werden.

Allerdings wird durch diese Maßnahmen der Abbildungsmaßstab verringert.

Heute können Diagnostik-Röntgen-Röhren mit einem, sehr kleinen optischen Brennfleck hergestellt werden. Darunter versteht man die rechtwinklige Parallelprojektion des elektrischen Brennfleckes auf eine zum Zentralstrahl senkrechte Ebene.

Die häufigsten Brennfleckgrößen liegen zwischen $0,3 \text{ mm} \times 0,3 \text{ mm}$; und $2,0 \text{ mm} \times 2,0 \text{ mm}$.

Der andere Nachteil besteht in den für eine Röntgenaufnahme benötigten relativ langen Belichtungszeiten, die eine hohe Strahlenbelastung des Patienten bedeuten.

Zu einer nutzbringenden Verkürzung der Belichtungszeit führte der geniale Gedanke, direkt hinter der photographischen Platte einen fluoreszierenden Leuchtschirm anzuordnen. Diese Eigenschaft einiger Kristalle, bei Bestrahlung mit Röntgenstrahlen sichtbares Licht auszusenden, war es ja gewesen, welche Röntgens Aufmerksamkeit auf die neuen Strahlen gelenkt hatte.

Die Fluoreszenz für die Verbesserung der Röntgenaufnahme-technik zu nutzen, beruht darauf, dass die photographische Schicht für sichtbares Licht wesentlich empfindlicher ist als für Röntgenstrahlung.

Wie so oft bei wichtigen Erfindungen wurde diese Idee an vielen Stellen gleichzeitig verwirklicht. In Italien waren es Batelli und Garbasso, in Frankreich Henry, in Amerika Michael Pupin und in England Stroud, die einen „Verstärkungsschirm“ beschrieben.

Heute besteht die Verstärkerfolie aus einem Schichtträger, der mit einer Schicht aus Calciumwolframat-Leuchtstoffkristallen belegt ist. Da Röntgenfilme beidseitig eine Photoemulsion tragen, werden während der Aufnahme beide Seiten mit je einer Verstärkerfolie in engen Kontakt gebracht. Mit diesen Verstärkerfolien gelingt es, die für die Aufnahme notwendige Belichtungszeit und damit die Strahlendosis wesentlich herabzusetzen.

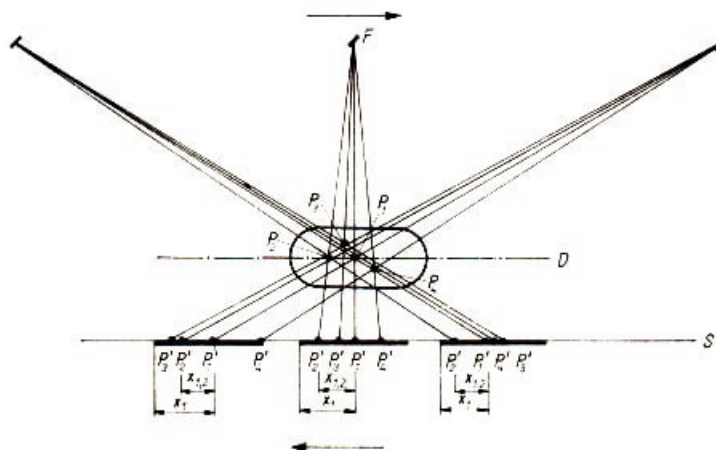
Eine weitere Reduzierung der Strahlenbelastung durch die Röntgendiagnostik ermöglichen die Bildverstärker. Sie setzen aufgrund eines elektronischen Vorganges das Röntgenlicht in sichtbares Licht um, wobei gleichzeitig ein Leuchtdichtegewinn, d. h. eine Steigerung der Bildhelligkeit, erreicht wird.

Der Bildverstärker ist ein Vakuumrohr mit einer Photokathode. Diese transformiert das Röntgenbild in eine entsprechende Verteilung von Photoelektronen, die durch ein elektrisches Feld beschleunigt und durch ein System von Elektronenlinsen auf einen verkleinerten Ausgangsleuchtschirm abgebildet werden.

Bei der Lupenbetrachtung des Ausgangsbildes bleibt der Leuchtdichtegewinn erhalten.

Die Anwendung der Röntgenstrahlen in der medizinischen Diagnostik ist lange Zeit trotz großer technischer und medizinischer Vervollkommnung im wesentlichen unverändert geblieben. Es handelt sich bei diesem Anwendungsgebiet um die Verwendung von Röntgenstrahlen, die Röntgenröhren mit einer Betriebsspannung zwischen 60 kV und 120 kV entstammen. Die Energie der Strahlenquanten für diagnostische Zwecke beträgt damit rund 100 keV.

Leider ermöglichte das Prinzip der Zentralprojektion nicht die getrennte Darstellung einer in der Dicke wählbaren Körperschicht von den übrigen in der Röntgenaufnahme dargestellten Schichten, denn die vor oder hinter einer besonders interessierenden Schicht liegenden Bereiche werden von der Zentralprojektion in mehr oder weniger starkem Maße mit erfasst.



18 Prinzip der Röntgentomographie.

Bewegen sich Brennfleck F (d.h. die Röntgenröhre) und Filmkassette S parallel und gegenläufig zu einander, so bleiben die in der Drehpunktebene D liegenden Strukturen P_1 und P_2 des Körpers K mit ihren Bildpunkten P'_1 und P'_2 immer an der gleichen Stelle x_1 bzw. x_2 des Filmes, während die Bildpunkte P'_3 und P'_4 der außerhalb der Ebene D liegenden Strukturen P_3 und P_4 auf dem Film an jeweils andere Stellen wandern, so dass sie infolge der Bewegungsunschärfe verwischt werden. Eine Abhilfe schafft erst das Prinzip der Tomographie. Es besteht darin, alle unter oder über der

zu untersuchenden Körperschicht liegenden Strukturen durch eine gekoppelte Bewegung von Röhre und Film zu verwischen. Nur die in der Drehpunktebene, d. h. in der Ebene, in welcher der scheinbare Drehpunkt des Röntgenlichtbündels bei einer gekoppelten Bewegung von Röhre und Film liegt, enthaltenen Strukturen werden dabei scharf abgebildet. Durch Verlagerung der Drehpunktebene kann die jeweils gewünschte Schichttiefe gewählt werden.

Nachdem mehr als 70 Jahre eine erfolgreiche Röntgendiagnostik betrieben worden war und kaum jemand daran dachte, dass die bekannten Routineverfahren in irgendeiner Form durch eine neue Methode ergänzt werden könnten, da entstand mit Hilfe der heutigen schnellen Rechenanlagen die Computer-Tomographie und entwickelte sich zu einer neuen wertvollen diagnostischen Möglichkeit, die auf der elektronischen Bildrekonstruktion beruht.

Damit erfuhren die Röntgenstrahlen viele Jahrzehnte nach ihrer Entdeckung eine erneute klinisch-diagnostische Bedeutung. Das Prinzip beruht darauf, den abzubildenden Körperquerschnitt während einer Kombination von geradliniger und Drehbewegung der Strahlungsquelle und eines Detektorsystems um eine auf dem Körperquerschnitt senkrecht stehende Achse mit einem schmalen Strahlenbündel senkrecht zu dieser zu durchstrahlen.

Das Detektorsystem registriert die durch den Körper geschwächte Strahlung, während gleichzeitig eine rechnerische Bestimmung des jeweiligen Schwächungskoeffizienten erfolgt.

Aus diesen Daten berechnet ein schneller Computer die Verteilung der Schwächungskoeffizienten über die durchstrahlte Schicht. Mit Hilfe eines Digital-Analog-Umsatzes und einer Fernseh-anlage erfolgt anschließend eine Umwandlung dieser Verteilung in ein Farb- oder Schwarz-Weiß-Bild. Unterschiedliche Schwächungskoeffizienten entsprechen dabei unterschiedlichen Grautönen oder unterschiedlichen Farben.

Die Bedeutung der Computer-Tomographie beruht auf der damit möglichen Unterscheidbarkeit kleiner Objektkontraste und auf der Möglichkeit der magnetischen Speicherung der Bilder, die ohne den Umweg über die Photographie jederzeit elektronisch wieder abrufbar sind.

Das Verfahren, aus einzelnen punktuellen Informationen über ein Objekt das Bild des Objektes zu rekonstruieren, ist nicht auf die mit Röntgenstrahlen gewonnenen Informationen beschränkt. Die durch sehr kurze Schallwellen (Ultraschall) gewonnenen Informationen können mit ähnlichen Methoden zu einem Bild zusammengefügt werden. So entstand die Ultraschall-Tomographie. Mit Hilfe der Kernresonanz wurde in neuerer Zeit die Kernresonanz-Tomographie (NMR-Tomographie) entwickelt.

Hierbei kommen starke magnetische Felder zur Anwendung, in denen sich Atomkerne und Protonen mit ihrem Drehimpuls, Spin genannt, in bestimmte Richtungen einstellen können. Bei Absorption einer elektromagnetischen Hochfrequenzstrahlung ändern diese Teilchen ihre Orientierung im Magnetfeld.

Aus der dazu benötigten Energie lässt sich ein Protonendichtebild des Objektes gewinnen, mit dem, ähnlich wie bei der Computer-Tomographie, eine Bildrekonstruktion des Objektes erfolgen kann.

Gegenwärtig sind jedoch unsere Kenntnisse über die Wirkung starker magnetischer Felder auf den menschlichen Organismus noch sehr gering. Wenn auch nicht zu erwarten ist, dass starke Magnetfelder ähnlich dramatische Wirkungen wie die Röntgenstrahlen auslösen werden, so ist doch, gerade wegen der mit ihnen gemachten Erfahrungen, eine genaue Untersuchung der Wirkungsmöglichkeiten erforderlich, um eine gefahrlose Anwendung dieser neuen diagnostischen Möglichkeit zu sichern.

Beinahe ein Jahrhundert ist vergangen, seitdem Röntgens Strahlen der medizinischen Diagno-

stik neue Wege gewiesen haben.

Die heutige bestechende Perfektion der Röntgendiagnostik wäre trotz aller neuen Entwicklungen und Erkenntnisse nicht möglich gewesen, wenn nicht Physiker wie Hittdorff, Lenard, Röntgen und viele andere sich mit einem Phänomen beschäftigt hätten, welches zunächst kaum mehr als eine schöne farbige Naturscheinung war, die bei Stromdurchgang durch Gasentladungsröhren auftrat.

Unvorstellbar erscheint es in unserer Zeit, in denen die physikalischen Laboratorien voller teurer komplizierter Geräte stehen, dass die Physiker des ausgehenden 19. Jahrhunderts einmal in der Lage waren, mit einfachen, wie Kinderspielzeug anmutenden Apparaturen Erkenntnisse zu gewinnen, die, wie im Falle der Röntgenschen Strahlen, den Beginn des modernen physikalischen Denkens mit prägen konnten.

7 Chronologie

- 1817 Thomas Young erklärt Licht als transversale Welle.
- 1820 Hans Christian Oerstedt demonstriert die Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom.
- 1822 Michael Faraday vermutet Zusammenhang zwischen Licht und Elektrizität.
- 1827 Georg Simon Ohm entdeckt das nach ihm benannte Gesetz,
- 1831 Faraday entwickelt die Feldvorstellung,
- 1842 Justus v. Liebig erkennt die Äquivalenz von chemischer Energie, Wärme und Arbeit. Julius Robert Mayer behauptet die Gleichwertigkeit von Wärme und Arbeit. James Prescott Joule bestimmt das mechanische Wärmeäquivalent. Hermann v. Helmholtz formuliert den Energiebegriff.
- 1845 27. 3.: Wilhelm Conrad Röntgen wird geboren,
- 1848 Familie Röntgen wandert nach Apeldoorn in Holland aus. Werner v. Siemens baut Telegraphenleitung von Frankfurt nach Berlin,
- 1849 Robert Kirchhoff formuliert die Maschenregeln für elektrische Leitungsnetze.
- 1850 Heinrich Daniel Rühmkorff konstruiert Funkeninduktor,
- 1856 Heinrich Geißler erfindet die nach ihm benannten Röhren,
- 1857 Rudolf Imanuel Clausius formuliert den 2. Hauptsatz.
- 1859 Julius Plücker entdeckt Kathodenstrahlen.
- 1862 James Clerk Maxwell bringt die Ideen Faradays in eine mathematische Form. Familie Röntgen verzieht nach Utrecht.
- 1865 Röntgen beginnt das Studium der Maschinenbaukunde in Zürich.
- 1866 August Kundt demonstriert stehende akustische Wellen.
- 1868 6.8.: Röntgen erhält das Diplom als Maschinenbauingenieur,
- 1869 22. 6.: Promotion Röntgens. Verlobung mit Bertha Ludwig. Röntgen wird Assistent bei Kundt. Johann Wilhelm Hittdorff entdeckt die magnetische Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen.
- 1870 Röntgen geht mit Kundt nach Würzburg,
- 1871 Cromwell Fleetwood Varley entdeckt negative Ladung der Kathodenstrahlen.
- 1872 19. 1.: Röntgen heiratet Bertha Ludwig. Übersiedlung nach Straßburg.
- 1874 Habilitation für das Fach Experimentalphysik.
- 1875 Berufung als Professor für Physik und Mathematik an die Landwirtschaftliche Akademie zu Hohenheim.
- 1876 Ruf nach Straßburg als Professor für theoretische Physik.
- 1879 Berufung nach Gießen, William Crookes beschreibt durch Kathodenstrahlen ausgelöste Fluoreszenz.
- 1880 Alexander Graham Bell entdeckt optoakustischen Effekt (OAE).
- 1881 John Tyndall gibt eine Deutung des OAE. Röntgen untersucht den OAE experimentell.
- 1888 Röntgen beweist die Äquivalenz von mechanisch bewegten Ladungen und dem elektrischen Strom. Berufung Röntgens nach Würzburg. Hallwachs entdeckt Photoeffekt.
- 1890 Goodspeed beobachtet Schwärzung einer Photoplatte nach Vorführung einer Kathodenstrahlröhre,
- 1892 Heinrich Hertz zeigt, dass Kathodenstrahlen dünne Metallfolien durchdringen.
- 1894 Philipp Lenard arbeitet mit Kathodenstrahlen. Röntgen wird Rektor in Würzburg.
- 1895 8.11.: Entdeckung der X-Strahlen, Erste Röntgenaufnahme einer menschlichen Hand,

- 1895 28. 12.: Veröffentlichung der.1. Mitteilung.
- 1896 Vortrag beim Kaiser, Vortrag vor der Würzburger Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft. Rudolf Albert v. Koelliker schlägt vor, die X-Strahlen als Röntgensche Strahlen zu bezeichnen. Verleihung des Kronenordens. Verleihung des Ehrenbürgerrechtes der Stadt Lennep.
- Henri Becquerel entdeckt Radioaktivität,
- 1900 Röntgen erhält Bernard-Medaille. Übersiedlung nach München.
Max Planck stellt Strahlungsformel auf.
- 1901 10. 12.: 1. Nobelpreis für Physik an Röntgen verliehen.
- 1902 Philipp Lenard untersucht Photoeffekt.
- 1905 Albert Einstein gibt eine Deutung des Photoeffektes.
- 1908 Friedrich Dessauer demonstriert therapeutische Wirkung der Röntgenstrahlung.
- 1911 Ernest Rutherford stellt Atommodell auf. Calvin Coolidge erfindet Glühkathode.
- 1912 Walter Friedrich und Paul Knipping demonstrieren Beugung der Röntgenstrahlen,
- 1913 Bragg (Vater und Sohn) bestimmen Wellenlänge der Röntgenstrahlen. Niels Bohr entwickelt quantenmechanisches Atommodell,
- 1919 Bertha Röntgen gestorben.
- 1920 Röntgen veröffentlicht zusammen mit Joffe seine letzte Arbeit.
- 1922 Dessauer formuliert Trefferprinzip der Strahlenwirkung.
- 1923 10. 2.: Wilhelm Conrad Röntgen gestorben.
- 1923 Arthur Holly Compton entdeckt Streueffekt der Röntgenstrahlen.
- 1923 10. 11.: Beisetzung der Urne Röntgens im Grabe seiner Frau und seiner Eltern in Gießen,
- 1927 Hermann Joseph Muller beobachtet durch Röntgenstrahlen ausgelöste Mutationen.
- 1930 30.11.: Gründung des Deutschen Röntgen-Museums in Remscheide Lennep.
- 1937 Boris Rajewsky gründet erstes Institut für Biophysik.
- 1957 8.12.: Namensgebung „Deutsches Röntgen-Museum“,
- 1959 20. 7.: Eröffnung des erweiterten Museums.

8 Literatur

Röntgens wissenschaftliche Veröffentlichungen

- [1] Vragen op het anorganisch gedeelte van het scheikundig leerboek van Dr. J. W. Gunning. Schoonhoven 1865.
- [2] Studien über Gase. Inaugural Dissertation zur Erlangung der Doctorwürde vorgelegt der hohen philosophischen Fakultät der Universität Zürich. 1869.
- [3] Über die Bestimmung des Verhältnisses der spezifischen Wärmen der Luft. Ann. Phys. u. Chem. 141 (1870) 552.
- [4] Bestimmung des Verhältnisses der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck zu derjenigen bei konstantem Volumen für einige Gase. Ann. Phys. u. Chem. 148 (1873) 580.
- [5] Über das Löten von platinirten Gläsern. Ann. Phys. u. Chem. 150 (1873) 331.
- [6] Über fortführende Entladungen der Elektrizität. Ann. Phys. u. Chem. 151 (1874) 226.
- [7] Über eine Variation der Senarmontschen Methode zur Bestimmung der isothermen Flächen in Kristallen. Ann. Phys. u. Chem. 151(1874) 603.
- [8] Über eine Anwendung des Eiskalorimeters zur Bestimmung der Intensität der Sonnenstrahlung. (mit Exner). Wien, Ber. 69 (1874) 228.
- [9] Über das Verhältnis der Querkontraktion zur Längsdilatation bei Kautschuk Ann, Phys. u. Chem. 159 (1876) 601.
- [10] A telephonic alarm, Nature (Lond.) 17 (1877) 164.
- [11] Mitteilung einiger Versuche aus dem Gebiet der Kapillarität. Ann, Phys. u. Chem., N. F,3 (1878) 321.
- [12] Über ein Aneroidbarometer mit Spiegelablesung. Ann. Phys. u. Chem, N. F.4 (1878) 305.
- [13] Über eine Methode zur Erzeugung von Isothermen auf Kristallen, Z. Krist. 3 (1878) 17.
- [14] Über Entladungen der Elektrizität in Isolatoren, Göttinger Nachr. 1878, S. 390.
- [15] Nachweis der elektromagnetischen Drehung der Polarisationssebene des Lichtes im Schwefelkohlenstoffdampf (mit Kundt). Münch. Ber. 8 (1878) 546.
- [16] Nachtrag zu 15. (mit Kundt). Münch. Ber. 9 (1879) 30.
- [17] Über die elektromagnetische Drehung der Polarisationssebene in Gasen (mit Kundt). Ann. Phys. u. Chem., N. F. 8 (1879) 278.
- [18] Über die von Herrn Kerr gefundene neue Beziehung zwischen Licht und Elektrizität. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 10 (1880) 77.
- [19] Über die elektromagnetische Drehung der Polarisationssebene des Lichtes in Gasen. 2, Abhandlung (mit Kundt). Ann, Phys. u. Chem., N. F. 11 (1880).
- [20] Über die durch Elektrizität bewirkten Form- und Volumenänderungen von dielektrischen Körpern. Ann. Phys. u. Chem, N. F. 11 (1880) 771.
- [21] Über Töne, welche durch intermittierende Bestrahlung eines Gases entstehen. Ann. Phys. u. Chem., N.F. 12 (1881) 155,
- [22] Versuche über die Absorption von Strahlen durch Gase, nach einer neuen Methode ausgeführt. Ber. d. Oberhess, Ges, £, Nat. u. Heilk. 20 (1881) 52.

- [23] Über die durch elektrische Kräfte erzeugte Änderung der Doppelbrechung des Quarzes, Ann. Phys. u. Chem., N. F, 18 (1883) 213,
- [24] Bemerkungen zur Abhandlung des Herrn A, Kundt: Über das optische Verhalten des Quarzes im elektrischen Feld. Ann. Phys. u. Chem., N. F.19 (1883) 319.
- [25] Über die thermo-, aktino- und piezo-elektrischen Eigenschaften des Quarzes. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 19 (1883) 513.
- [26] Über einen Vorlesungsapparat zur Demonstration des Poiseuilleschen Gesetzes, Ann. Phys. u. Chem, N. F, 20 (1883) 268.
- [27] Über den Einfluß des Druckes auf die Viskosität der Flüssigkeiten, speziell des Wassers. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 24 (1884) 519.
- [28] Neue Versuche über die Absorption von Wärme durch Wasserdampf. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 23 (1884) 259,
- [29] Versuche über die elektromagnetische Wirkung der dielektrischen Polarisation. Math. u. Naturw. Mitt. a. d. Sitzungsber, preuß. Akad. Wiss. Physik.-math. Kl. 89 (1885).
- [30] Über die Kompressibilität und Oberflächenspannung von Flüssigkeiten (mit Schneider). Ann. Phys. u. Chem., N. F. 29 (1886) 165.
- [31] Über die Kompressibilität von verdünnten Salzlösungen und die des festen Chlornatriums (mit Schneider). Ann. Phys. u. Chem.,N.F, 31(1887) 1000.
- [32] Über die durch Bewegung eines im homogenen elektrischen Feld befindlichen Dielektrikums hervorgerufene elektrodynamische Kraft. Math. u. Naturw. Mitt. a. d. Sitzungsber. preuß. Akad. Wiss., Physik.- Math. Kl. 7 (1888).
- [33] Über die Kompressibilität des Wassers (mit Schneider). Ann. Phys. u. Chem., N. F. 33 (1888) 644.
- [34] Über die Kompressibilität des Sylvins, des Steinsalzes und der wässrigen Chloralkaliumlösungen (mit Schneider). Ann, Physu.. Chem,, N. F. 34 (1888) 531.
- [35] Über den Einfluß des Druckes auf die Brechungsexponenten von Schwefelkohlenstoff und Wasser (mit Zehnder). Ber. d. Oberhess. Ges. f. Nat. u, Hulk, 28 (1888) 58. .
- [36] Elektrische Eigenschaften des Quarzes. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 39 (1889) 16.
- [37] Beschreibung des Apparates, mit welchem die Versuche über die elektrodynamische Wirkung bewegter Dielektrika ausgeführt wurden, Ann. Phys. u. Chem., N.FE. 40 (1890) 93.
- [38] Einige Vorlesungsversuche, Ann. Phys.u. Chem., N.F. 40 (1890) 109.
- [39] Über die Dicke von kohärenten Ölschichten auf der Oberfläche des Wassers. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 41 (1890) 321.
- [40] Über die Kompressibilität von Schwefelkohlenstoff, Benzol, Äthyläther und einigen Alkoholen. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 44 (1891) 1.
- [41] Über den Einfluß des Druckes auf die Brechungsexponenten von Wasser, Schwefelkohlenstoff, Benzol, Äthyläther und einigen Alkoholen (mit Zehnder). Ann. Phys. u. Chem., N. F. 44 (1891) 24.
- [42] Über die Konstitution des flüssigen Wassers. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 45 (1892) 91.
- [43] Kurze Mitteilung von Versuchen über den Einfluß des Druckes auf einige physikalischen Erscheinungen. Ann. Phys. u. Chem., N, F. 45 (1892) 98.

- [44] Über den Einfluß der Kompressionswärme auf die Bestimmung der Kompressibilität von Flüssigkeiten. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 45 (1892) 560.
- [45] Verfahren zur Herstellung reiner Wasser- und Quecksilberoberflächen, Ann. Phys. u. Chem., N. F. 46 (1892) 152.
- [46] Über den Einfluß des Druckes auf das galvanische Leistungsvermögen von Elektrolyten. Nach, Ges, Wiss, Göttingen., Math.-Phys, Kl. 1893, S. 505.
- [47] Zur Geschichte der Physik an der Universität Würzburg. Würzburg 1894.
- [48] Notiz über die Methode zur Messung von Druckdifferenzen mittels Spiegelablesung. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 51 (1894) 414.
- [49] Mitteilung einiger Versuche mit einem rechtwinkligen Glasprisma. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 52 (1894) 589.
- [50] Über den Einfluß des Druckes auf die Dielektrizitätskonstante des Wassers und des Äthylalkohols. Ann. Phys. u. Chem., N. F. 52 (1894) 593,
- [51] Über eine neue Art von Strahlen. Sitzungsber, physik.-med. Ges. Würzburg 1895.
- [52] Eine neue Art von Strahlen, 2. Mitteilung. Sitzungsber. physik.-med. Ges. Würzburg. 1896,
- [53] Weitere Beobachtungen über die Eigenschaften der X-Strahlen. Mathu.. naturw. Mitt. a. d. Sitzungsber,preuß, Akad. Wiss, Physik.-math. Kl. 1897.
- [54] Erklärung. Physik Z.5 (1904) 168.
- [55] Über die Leitung der Elektrizität in Kalkspat und über den Einfluß der X-Strahlen darauf, Sitzungsber. bayer. Akad, Wiss, Math.-physik. Kl. 37 (1907) 113.
- [56] Friedrich Kohlrausch, Sitzungsber, bayer. Akad. Wiss, Math.-physik, Kl. 40 (1910) 26.
- [57] Bestimmung des thermischen linearen Ausdehnungskoeffizienten von Duprit und Diamant, Sitzungsber, bayer. Akad, Wiss., Math.-physik, Kl. 42 (1912) 381.
- [58] Über die Elektrizitätsleitung in einigen Kristallen und über den Einfluß der Bestrahlung darauf (mit Joffe). Ann. Phys. u. Chem., Ann, Phys. IV. 41 (1913) 449.
- [59] Pyro- und piezo-elektrische Untersuchungen. Ann. Phys. IV. 45 (1914) 737.
- [60] Über die Elektrizitätsleitung in einigen Kristallen und über den Einfluß der Bestrahlung darauf (mit Joffe). Ann. Physik. IV. 64 (1921) 1.

Die Arbeiten [32], [51], [52], [53] sind Röntgens wichtigste Werke.

Literatur über Röntgen

- [61] Boveri, M.: Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923). Aus der Reihe „Die großen Deutschen“. Berlin 1956.
- [62] Dessauer, F.: Wilhelm Conrad Röntgen. Die Offenbarung einer Nacht, Olten 1946.
- [63] Glasser, O.: Wilhelm Conrad Röntgen als Physiker. Röntgenblätter 5 (1952) 147.
- [64] Glasser, O.: Wilhelm Conrad Röntgen und die Geschichte der Röntgenstrahlen mit einem Beitrag „Persönliche Erinnerungen an Röntgen“ von Dr. Margret Boveri. Berlin 1958.
- [65] Laue, M. v.: Zum Gedächtnis Wilhelm Conrad Röntgens. Die Naturwissenschaften 1 (1946) 3,

- [66] Schinz, H. R.: Röntgen und Zürich. Aus alten Akten. Acta radiologica XI (1934) 162.
- [67] Sommerfeld, A.: Zu Röntgens 70. Geburtstag. Physikalische Zeitschrift 16 (1915) 162.
- [68] Sommerfeld, A.: Vorlesungen über theoretische Physik, Band I, S. VII. 3, Auflage. Leipzig 1947.
- [69] Streller, E.: Physikerbriefe in W.C. Röntgens Nachlaß. Röntgenblätter 18 (1965) 220.
- [70] Streller, E.: Röntgens Leben und Werk. München 1973.
- [71] Wölfflin, E.: Persönliche Erinnerungen an Wilhelm Conrad Röntgen. Ciba Symposium 5 (1957) 111.
- [72] Zehnder, L.: Wilhelm Conrad Röntgen. Würzburg 1930 (Lebensläufe aus Franken IV).
- [73] Gutachten von Prof, Dr. A. Mousson über Röntgens Dissertation. Polytechnikum Zürich, 22.6. 1869.
- [74] The Electrician, 1896, S. 1.

Danksagung

Für wertvolle Hinweise, Überlassung von Bildmaterial und förderndes Interesse bin ich Herrn E. Streller, Direktor des Röntgen-Museums in Remscheid-Lennep, den Gutachtern Frau Prof. Dr. sc. D. Goetz, Lehrstuhl für Geschichte der Naturwissenschaften an der Pädagogischen Hochschule Potsdam, Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. W. Stolz, Wissenschaftsbereichsleiter an der Bergakademie Freiberg, und Herrn Dipl. Ing. G. Feth aus Wuppertal zu großem Dank verpflichtet.

W. Beier