LEHRBUCH DER PHYSIK

FÜR DIE OBERSCHULE

ZWÖLFTES SCHULJAHR

ZWEITER TEIL

02916-1

LEHRBUCH DER PHYSIK

FÜR DIE OBERSCHULE

ZWÖLFTES SCHULJAHR

Teil

Röntgenwellen – Das elektromagnetische Spektrum
Die atomistische Struktur der Materie

Mit 75 Abbildungen

Ausgabe 1955

VOLK UND WISSEN VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN

1955

Verfaßt von

Franz Eichler, Helmut Mucke, Prof. Dr. Karl Werner

Redaktionelle Bearbeitung:

Georg Sprockhoff, Alfred Schubert

Zeichnungen von

Kurt Dornbusch und Helmut Mucke

Das vorliegende Buch umfaßt die Abschnitte Röntgenwellen, das elektromagnetische Spektrum und die atomistische Struktur der Materie. Es ist der zweite Teil des Lehrbuches der Physik für das 12. Schuljahr. Die Numerierung der Seiten, Kapitel und Paragraphen wurde daher im Anschluß an den ersten Teil (Best.-Nr. 02 915) fortgeführt.

Bestell-Nr. 02 916-1 · 2,15 DM

Lizenz Nr. 203 · 1000-P-02 55 10 (E)

Satz und Druck: VEB Leipziger Druckhaus, Leipzig (III/18/203)

C. (VII.) Röntgenwellen

§ 23. Röntgenröhren 113
§ 24. Medizinische und technische Anwendungen der Röntgenstrahlung 117
§ 25. Die Wellennatur der Röntgenstrahlen 123
§ 26. Die Beugung von Röntgenwellen an Kristallen 126
§ 27. Feinstrukturuntersuchungen 131

D. (VIII. § 28) Das elektromagnetische Spektrum 134

DIE ATOMISTISCHE STRUKTUR DER MATERIE

IX. Die Grundlagen der Lehre von den Atomen 138
§ 29. Atome, Moleküle, Ionen 138
§ 30. Der zusammengesetzte Bau der Atome 140
§ 31. Das Rutherfordsche Atommodell 144

X. Quantentheorie der Atome 147
§ 32. Gesetze der Linienspektren 147
§ 33. Die Grundlagen der Quantentheorie der Atome 149
§ 34. Das Bohrsche Atommodell 155
§ 35. Das Periodensystem der Elemente 157
§ 36. Der Schalenaufbau der Atome 162

XI. Der Bau des Atomkerns 166
§ 37. Radioaktivität 166
§ 38. Die Ursachen der Radioaktivität 170
§ 39. Isotope 173
§ 40. Der Bau der Atomkerne – Künstliche Kernumwandlungen 175
§ 41. Die künstliche Radioaktivität 180
§ 42. Moderne Verfahren der Kernumwandlung 181
§ 43. Der Energieumsatz bei Kernumwandlungen – Die Kernspaltung 185
§ 44. Erzeugung und Anwendung der Atomenergie 188
§ 45. Kosmische Strahlung 194

XII. (§ 46) Die Korpuskular- und Wellennatur des Lichtes und der Elektronen — Das Elektronenmikroskop 199

Namen- und Sachverzeichnis 203

Quellenverzeichnis der Abbildungen 207

C. (VII.) RÖNTGENWELLEN

§ 23. Röntgenröhren

1. Die Entdeckung der Röntgenstrahlen. Im Jahre 1895 entdeckte der 1845 zu Lennep geborene deutsche Physiker *Wilhelm Conrad Röntgen*, der um diese Zeit an der Universität Würzburg lehrte, eine bis dahin ganz unbekannte Strahlenart. *Röntgen* war mit der Untersuchung von Gasentladungsröhren verschiedener Bauart beschäftigt. Dabei fand er eines Tages, daß ein in der Nähe der Röhre liegender Leuchtschirm aufleuchtete, obwohl die Röhre mit dickem schwarzem Papier umwickelt war. Durch frühere Untersuchungen war klar erwiesen worden, daß weder die Kathodenstrahlen der Röhre noch die Fluoreszenzstrahlung der Glaswand imstande sind, das schwarze Papier zu durchdringen.



Wilhelm Conrad Röntgen (1845—1923)

Es mußte sich also um eine bisher nicht bekannte Art von Strahlen handeln, die *Röntgen* als *X-Strahlen* bezeichnete. *Röntgen* erforschte sie sehr gründlich und veröffentlichte seine Ergebnisse dann in einer knappen und klaren Denkschrift mit dem Titel: *Über eine neue Art von Strahlen*. Darin beschreibt er das Zustandekommen der neuen Strahlung und die Durchlässigkeit der verschiedenen Materialien. Im Jahre 1896 hielt er in seiner sachlichen, schlichten Art einen Vortrag über die neuentdeckten Strahlen vor der Würzburger Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft. Zum Schluß wurde von den begeisterten Zuhörern der Vorschlag gemacht, die neuen Strahlen **Röntgenstrahlen** zu nennen.

Für seine hervorragende wissenschaftliche Leistung wurde *Röntgen* im Jahre 1901 mit dem ersten Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Er starb 1923 im Alter von 78 Jahren in München, wo er den Lehrstuhl für theoretische Physik innehatte.

2. Die Ionenröntgenröhre. Die ersten *Röntgenröhren*, die aus der von *Röntgen* benutzten hervorgegangen sind und auch heute noch zu Demonstrationszwecken verwendet werden, sind Kathodenstrahlröhren mit einer kalten Kathode (Abb. 113/1). Der Luftdruck beträgt in ihnen etwa 0,001 Torr. Wie aus der Elektrizitätslehre

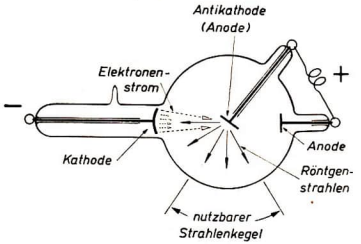


Abb. 113/1. Ionenröntgenröhre, alte Bauart (schematisch)

bekannt ist, setzt beim Anlegen einer genügend hohen Spannung eine Gasentladung ein (vgl. LB 11, § 23). Aus der Kathode werden durch die auftreffenden Ionen Elektronen herausgeschlagen, die die Kathodenoberfläche als Kathodenstrahlen senkrecht verlassen. Die Glimmhaut auf der Kathode und die positive Säule treten bei diesem geringen Druck nicht mehr auf. Indem man die Kathode hohlspiegelartig ausbildet, werden die austretenden Elektronen so gebündelt, daß sie sich in einem Brennpunkt vereinigen. In diesen Brennpunkt legt man die Anode. Beim Aufprall der von der angelegten Spannung beschleunigten Elektronen auf die Anode und beim Abbremsen entsteht außer einer starken Wärmeentwicklung die *Röntgenstrahlung*. Diese Anode, die der Kathode unmittelbar gegenübersteht, wurde früher auch als *Antikathode* bezeichnet. Sie besteht bei den modernen Röntgenröhren aus dem schwer schmelzbaren Wolframmetall, ist wassergekühlt und schräg gestellt, damit die Röntgenstrahlen seitlich durch die Glaswand nach außen fallen. Eine zweite mit der Antikathode verbundene Anode hat sich als vorteilhaft erwiesen. Die benötigte hohe Spannung von 10 bis 100 kV wurde früher durch Funkeninduktoren erzeugt, während man heute mit Hochspannungstransformatoren arbeitet. Die richtige Polung wird durch eine Ventilröhre, eine Art Gleichrichterröhre, bewirkt.

Die älteste Form der Röntgenröhre ist die Ionenröhre. Sie ist eine Kathodenstrahlröhre mit kalter Kathode. Durch die hohlspiegelartige Form der Kathode wird der Elektronenstrahl auf den Brennfleck der Anode gerichtet. Von diesem geht die Röntgenstrahlung aus.

3. Eigenschaften der Röntgenstrahlen. Schon *Röntgen* suchte das Wesen der neuentdeckten Strahlung zu erforschen. Da sie sich weder elektrisch noch magnetisch ablenken ließ, konnte es sich nicht um geladene Teilchen handeln. Es gelang *Röntgen* jedoch nicht, Erscheinungen zu finden, die auf eine Wellennatur der neuen Strahlung hindeuteten, wie Beugung u. a. Spätere Forscher wiesen aber einwandfrei nach, daß *die Röntgenstrahlen elektromagnetische Wellen sind*, wesensgleich dem Licht, jedoch mit viel kürzeren Wellenlängen. Wir werden auf die für Röntgenstrahlen charakteristischen Wellenerscheinungen im § 25 ausführlich zurückkommen.

Die Entstehung der Röntgenstrahlen wird in dem Buchabschnitt über die atomistische Struktur der Materie besprochen werden (§ 34, 2). Hier genügt es zu wissen, daß sie stets entstehen, wenn *schnelle Elektronen beim Aufprall auf Materie plötzlich gebremst* werden.

Die auffallendste Eigenschaft der Röntgenstrahlen ist ihre große *Durchdringungsfähigkeit*.

Wie schon *Röntgen* in seinen ersten Untersuchungen nachgewiesen hatte, sind die Röntgenstrahlen imstande, alle Stoffe in mehr oder minder dicken Schichten zu durchdringen. Es stellte sich heraus, daß die Durchdringungsfähigkeit um so geringer ist, je größer die Dichte der durchstrahlten Materie und je größer die Schichtdicke ist. Man gibt für die verschiedenen Materialien *Halbwertschichten* an, das sind diejenigen Schichtdicken, durch die die Röntgenstrahlung gerade bis zur Hälfte ihrer ursprünglichen Stärke geschwächt wird. Die bei einer bestimmten Röntgenstrahlung für einzelne Metalle geltenden Halbwertschichten gibt die beigefügte Tabelle wieder:

Tabelle der Halbwertschichten einiger Stoffe

Stoff	Pb	Cu	Fe	Al	H_2O
mm	0,1	1,5	2,0	15	40

Im übrigen nimmt die Schwächung exponentiell zu. Eine 60 mm dicke Aluminiumschicht, das heißt das Vierfache der Halbwertschicht, bewirkt eine Schwächung auf nahezu ein Neuntel.

Man bezeichnet die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen als ihre *Härte*. Diese ist um so größer, je kürzer die Wellenlänge der Strahlen ist, und wächst mit zunehmender Spannung. Man unterscheidet heute die in der beigefügten Tabelle angegebenen Gruppen.

Härte der Röntgenstrahlen in Abhängigkeit von der angelegten Spannung

Bezeichnung	Erzeugungsspannung kV	Dicke der Halbwertschicht mm Al
Überweiche Röntgenstrahlen	5– 20	0,1
Weiche Röntgenstrahlen	20– 60	1
Mittelharte Röntgenstrahlen	60–120	10
Harte Röntgenstrahlen	120–250	30
Überharte Röntgenstrahlen	über 250	bis 100

Nachdem man die Wellennatur der Röntgenstrahlung erkannt hatte, war man auch bald imstande, die Härte der Strahlung auf die Wellenlänge der Strahlen zurückzuführen. Darüber werden wir im § 25 Näheres erfahren.

Die Röntgenstrahlen sind dem Auge nicht unmittelbar sichtbar. Man muß sie deshalb auf eine Photoplatte fallen lassen, die dadurch geschwärzt wird, oder auf einen meist aus Bariumplatinzyanür bestehenden Leuchtschirm, der aufleuchtet. Auf die Luft üben die Röntgenstrahlen eine starke ionisierende Wirkung aus (vgl. LB 11, § 20, 2c).

Die Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen. Sie durchdringen einen Stoff um so stärker, je kleiner die Schichtdicke des durchstrahlten Stoffes und je kleiner seine Dichte ist.

4. Die Glühkathodenröhre. Da man mit der Ionenröhre die Härte und die Intensität der Röntgenstrahlung nur in geringen Grenzen ändern konnte, genügte sie sehr bald den wachsenden Anforderungen der Medizin und der Technik nicht mehr. Der amerikanische Physiker *William Coolidge*[1] konstruierte deshalb eine *Glühkathoden-Röntgenröhre*, in der die Elektronen im Hochvakuum aus einer geheizten Kathode austreten. Eine Röhrentype dieser Art zeigt die Abb. 115/1. Der spiralförmig gewundene Wolframglühdraht befindet sich inmitten der hohlspiegelartig ausgebildeten Kathode. Durch die Form der

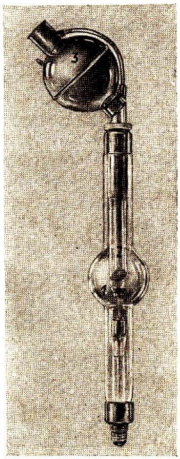


Abb. 115/1. Glühkathoden-Röntgenröhre
1 Glühkathode, *2* Anode, *3* Kühlwasserzu- und -abfluß

[1] William Coolidge (geb. 1873), amerikanischer Physiker

Kathode werden die vom Heizfaden ausgestrahlten Elektronen auf der gegenüberliegenden, aus Wolfram bestehenden Anode in einem Brennfleck vereinigt, von dem die Röntgenstrahlung ausgeht. Damit die Anode im Brennfleck nicht schmilzt, wird sie von innen mit Wasser gekühlt.

Die an die Röhre gelegte Spannung beschleunigt die Elektronen. Sie bestimmt dadurch die Härte der Strahlung. Zum Unterschied von der Ionenröhre ist diese bei der Glühkathodenröhre in weiten Grenzen veränderlich. Die Spannung liegt je nach der Röhrenart zwischen 10 kV und 400 kV.

Die Spannung wird heute aus dem Wechselspannungs-Lichtnetz über einen Transformator entnommen. Bei kleineren Anlagen wird die Röhre direkt an die hochtransformierte Wechselspannung gelegt und dient selbst als Gleichrichter. Die Elektronen können aus der geheizten Kathode nur immer dann austreten, wenn der negative Pol an der Kathode liegt. Dabei wird nur die eine Halbwelle des Wechselstromes ausgenutzt. Größere Anlagen arbeiten mit besonderen Hochspannungsgleichrichtern, die als *Glühventile* bezeichnet werden.

Die Stärke der Strahlung wird in der Glühkathodenröhre durch Verändern der Heizspannung und damit der Heizstromstärke geregelt. Mit steigender Temperatur des Heizfadens wächst die Anzahl der ausgeschleuderten Elektronen. Dadurch nimmt die Stromstärke zwischen der Kathode und der Anode und somit auch die Intensität der Röntgenstrahlung zu. Die Geschwindigkeit der Elektronen, die die Härte der Strahlung bestimmt, hängt dagegen nur von der zwischen der Kathode und der Anode herrschenden Spannung ab.

Der *Heizfaden* hat heute meist die Form einer kurzen geradlinigen Wendel. Die Bündelung des ausgesandten Elektronenstromes erfolgt ganz ähnlich wie in der Kathodenstrahlröhre durch die elektrostatische Abstoßung besonders geformter Kathodenbleche. Der Brennfleck auf der Anode wird durch diese Maßnahmen klein gehalten. Dadurch steigen die Anforderungen an die Kühlung. Die von der Anode ausgestrahlte Wärme wird bei den modernen Röhren meist von einer die Röhre umgebenden Ölfüllung aufgenommen. Eine besondere Form der Kühlung wird unter den medizinischen Anwendungen besprochen werden.

Will man die mit den Röhren ständig arbeitenden Menschen nicht gefährden, so muß man die Röhren in spannungs- und strahlensicher konstruierten Geräten unterbringen. Die Ölkühlung und eine zuverlässige Isolation verhindern eine Berührung mit den lebensgefährlichen hohen Spannungen. Schutzhüllen und -hauben aus Blei, die die Röhre umgeben, lassen die Strahlung nur in einem bestimmten Strahlenkegel austreten. Die Schutzvorrichtungen halten vor allem die schädliche und unkontrollierbare Röntgenstrahlung zurück, die von der Anode außerhalb des Brennflecks ausgeht (Abb. **116**/1).

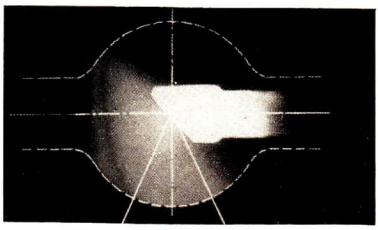


Abb. **116**/1. Die Entstehung der Röntgenstrahlen im Brennfleck und im Bereich der ganzen Anode

5. Fragen und Aufgaben:

1. Welche Entladungserscheinungen zeigt eine Gasentladungsröhre bei Drucken von 30, 1, 0,001 und 0,000001 Torr? Erklären Sie das Zustandekommen der Erscheinungen!
2. Beschreiben Sie die Arbeitsweise einer Ionenröntgenröhre!
3. Beschreiben Sie den Aufbau und die Vorzüge einer Glühkathoden-Röntgenröhre!
4. Wovon hängt die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlung ab?

§ 24. Medizinische und technische Anwendungen der Röntgenstrahlung

Die in diesem Paragraphen genannten Anwendungen beruhen lediglich auf der unterschiedlichen Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen. Auf die Wellennatur einzugehen, ist in diesem Zusammenhange noch nicht erforderlich. Wir werden darüber erst im nächsten Paragraphen Näheres erfahren.

1. Die Röntgendiagnostik. Die Durchleuchtung des menschlichen Körpers mit Röntgenstrahlen dient dem Zwecke, Fremdkörper oder krankhafte Veränderungen im Innern des Organismus zu erkennen; sie dient der *Diagnose*[1]. Die vom Brennfleck der Röhre ausgehenden Strahlen entwerfen auf dem Leuchtschirm ein Bild des durchstrahlten Körpers nach den Gesetzen der Zentralprojektion. Das Bild wird darum zunächst um so schärfer sein, je kleiner die Ausdehnung des Brennflecks ist. Andererseits wird bei photographischen Aufnahmen des Röntgenbildes eine kurze Belichtungszeit zweckmäßig sein, um eine Unschärfe des Bildes durch Bewegungen des Patienten zu vermeiden. Kurze Belichtungszeiten sind nur bei großer Intensität der Röntgenstrahlung möglich. Durch diese beiden Forderungen wurde die Entwicklung der *Diagnostikröhren* bestimmt.

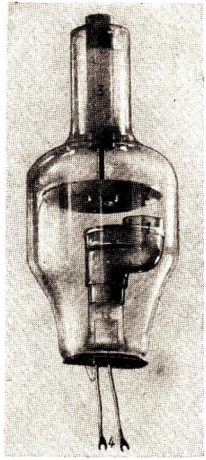


Abb. 117/1. Drehanodenröhre
1 Kathode, *2* Drehanode, *3* Antriebsmotor, *4* Anschlußklemmen für die Heizung

Die *Drehanodenröhre* ist die heute allgemein zur Röntgendiagnostik verwendete Röhre (Abb. 117/1). Die Kathode mit der Heizwendel ist seitlich der Röhrenachse angeordnet. Das Durchschmelzen der Anode im Brennfleck wird dadurch vermieden, daß die als Kreisscheibe ausgebildete Anode durch einen kleinen Elektromotor gedreht wird, so daß immer andere Stellen der Anode erhitzt werden. Die Anode erhitzt sich dabei in ihrer Gesamtheit auf etwa 1500° C. Die Wärme wird bei dieser hohen Temperatur gut abgestrahlt, von der die Röhre umgebenden Ölkühlung aufgenommen und weitergeleitet.

[1] diá (griech.) = auseinander; gignóskein (griech.) = erkennen; Diagnose = Krankheitserkennung

Der Kurzschlußläufer des Antriebsmotors befindet sich in der Röhre und sitzt mit der Drehanode auf einer Achse. Die Ständerwicklung umgibt den Läufer außerhalb der Röhre.

Der Brennfleck hat eine wirksame Größe von reichlich 1 mm². Maßgebend ist die Brennfleckgröße, wie sie in der Durchstrahlungsrichtung erscheint (Abb. 118/1).

Man unterscheidet im wesentlichen die folgenden drei Verfahren der Röntgendiagnostik:

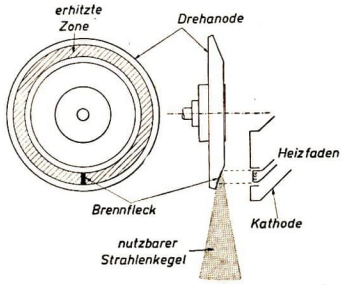


Abb. 118/1. Der Brennfleck auf einer Drehanode

a) Die Durchleuchtung. Bei dieser Untersuchungsmethode beobachtet der Arzt das Röntgenbild auf einem Leuchtschirm. Der Schirm ist zum Schutze des Arztes mit einer dicken Bleiglasplatte abgedeckt. Der Patient tritt zwischen den Röntgenapparat und den Schirm. Infolge ihrer verschiedenen Dichte heben sich innere Organe und Knochen, Fremdkörper, krankhafte Ablagerungen u. ä. im Röntgenbild ab. *Hohlorgane* wie Magen und Darm werden mit einem breiartigen *Kontrastmittel*, etwa Bariumsulfat, Kalziumsulfat, gefüllt, wodurch sich das Organ im Röntgenbild durch seine dunkle Tönung von der Umgebung unterscheidet und die Form und die Lage des Organs gut zu erkennen sind (Abb. 118/2).



Abb. 118/2. Schirmbild eines mit Kontrastbrei gefüllten Magens

Fremdkörper, die durch die Atemwege, durch den Verdauungskanal oder durch die Haut in den Körper eingedrungen sind, werden durch das Röntgenbild lokalisiert. Dadurch erhält der Chirurg die besten Unterlagen für die Operation. *Knochenverletzungen*, wie Brüche u. dgl., lassen sich mit Hilfe der Röntgenstrahlen in allen Einzelheiten erkennen und im Heilungsprozeß verfolgen (Abb. 119/1).

Die größte Bedeutung hat die Röntgendiagnostik für die rechtzeitige *Erkennung der Lungentuberkulose* erlangt. Bei einer tuberkulösen Erkrankung der Lunge bilden sich Hohlräume, die auf dem Röntgenschirmbild als helle Flecke zu erkennen sind.

Auch die abgeheilten, vernarbten Stellen, in denen sich Kalk abgesetzt hat, sind im Schirmbild zu erkennen. Die Geräte für die Röntgendurchleuchtung sind heute so weit entwickelt, daß sie schnelle und gründliche Reihenuntersuchungen der Bevölkerung insbesondere auf Lungenkrankheiten ermöglichen (Abb. **119**/2).

b) Die Röntgenaufnahme. An die Stelle des Leuchtschirmes wird bei der *Röntgenaufnahme* ein großer Planfilm gebracht. Damit die Belichtungszeiten niedrig gehalten werden, ist der Röntgenfilm auf beiden Seiten mit der photographischen Emulsion begossen. Außerdem werden von beiden Seiten *Verstärkerfolien* auf den Film gelegt, aus denen die Röntgenstrahlen Elektronen auslösen. Diese Elektronen tragen zur Schwärzung des Films bei. Die Röntgenfilme werden in lichtsicheren schwarzen Papierumschlägen verwendet. Die entwickelten Negative werden vom Arzt unmittelbar ausgewertet.

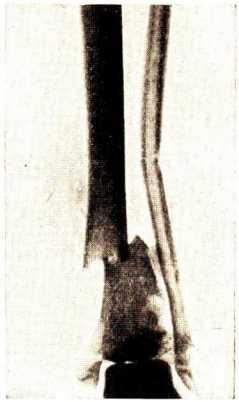


Abb. **119**/1. Röntgenaufnahme eines Unterschenkelbruchs

Die Röntgenaufnahme ist heute u. a. ein unentbehrliches Diagnostikmittel des Zahnarztes. Die nur wenige Quadratzentimeter großen, in Papier eingewickelten Filme werden im Mund des Patienten innen an den zu durchleuchtenden Zahn gehalten. Der Röntgenapparat wird von außen her dicht an die Stelle herangeführt.

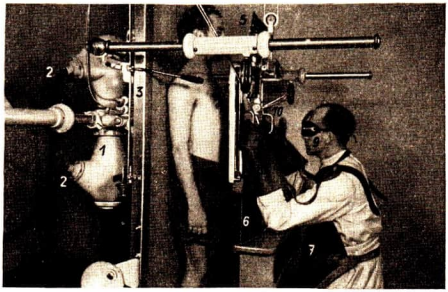


Abb. **119**/2. Anlage für Röntgendurchleuchtungen

1 Röntgenröhre, *2* Zuleitungskabel, *3* Stützplatte, *4* Leuchtschirm, *5* Hustenschutzschirm, *6* Bleigummibahn, *7* Bleigummischürze, *8* Bleigummihandschuhe, *9* Schutzbrille, *10* Handgriffe zum Bewegen des Leuchtschirmes

c) **Die Schirmbildaufnahme.** Bei diesem Verfahren wird das große Schirmbild mit einer fest angebauten Kamera photographiert (Abb. **120**/1). Die auf Feinkornfilm im Format 24 × 24 mm oder im Technikformat 63 × 63 mm aufgenommenen Negative werden zur Auswertung vergrößert projiziert. Das Verfahren stellt einen bedeutenden Fortschritt der Röntgentechnik dar; denn es arbeitet mit geringem Materialverbrauch und zeitsparend und ist deshalb für die vorbeugenden Reihenuntersuchungen der gesamten Bevölkerung, die in der Deutschen Demokratischen Republik seit mehreren Jahren regelmäßig durchgeführt werden, hervorragend geeignet. Der Durchleuchtung gegenüber besitzt die Schirmbildaufnahme den Vorteil, daß in dem Film stets ein exakter Untersuchungsbefund vorliegt, an dem der Verlauf der Erkrankung verfolgt werden kann.

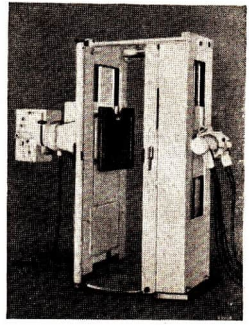


Abb. **120**/1. Röntgenanlage für Schirmbildaufnahmen, hergestellt vom VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden. Rechts außerhalb der Kabine die Röntgenröhre, links die Mittelformatkamera 63 × 63 mm

Die Röntgendiagnostik ermöglicht das Erkennen innerer Verletzungen und Erkrankungen. Die drei wichtigsten Verfahren der Röntgendiagnostik sind die Durchleuchtung, die Röntgenaufnahme und die Schirmbildaufnahme.

2. Die Röntgentherapie. Die Menge der in der Medizin zu einem bestimmten Zweck aufgewandten Röntgenstrahlung wird als *Dosis* bezeichnet. Die Einheit der Dosis ist das **Röntgen** (r). Sie ist festgelegt durch die ionisierende Wirkung einer bestimmten Strahlenmenge. Dabei ist es für die Dosisangabe von Bedeutung, ob eine Strahlung geringer Intensität für längere Zeit erfolgt oder eine intensive Strahlung nur kurze Zeit einwirkt.

Eine geringe Dosis ruft im Organismus keine Veränderungen hervor. Eine Dosis von über 600 r kann verbrennungsartige Hautschädigungen herbeiführen, die im allgemeinen aber wieder ausheilen. Besonders empfindlich sind die Keimzellen gegenüber Röntgenschädigungen. Hier liegt die schädigende Dosis wesentlich niedriger, wobei auch kleinste Strahlungsmengen auf Jahrzehnte verteilt sich summieren. Für eine Durchleuchtung oder eine Aufnahme eines Patienten wird weniger als 1 r benötigt.

Dosen, die 600 r wesentlich überschreiten, rufen krebsartige Röntgenverbrennungen hervor. Da diese zellschädigenden Wirkungen anfangs nicht genügend bekannt waren, haben derartige Verbrennungen vielen Pionieren der Röntgentechnik das Leben gekostet.

Andererseits hat sich herausgestellt, daß Röntgenstrahlen krankhaftes, insbesondere krebsartiges Gewebe stärker schädigen als gesundes, vor allem, wenn die Dosis auf längere Zeit verteilt wird. Auf dieser Erkenntnis beruht die *Röntgentherapie*[1], das heißt die Heilung mittels Röntgenstrahlen.

[1] therapeía (griech.) = Heilung

Zur Tiefenbestrahlung von inneren Organen werden Röhren bis zu 200 kV Spannung benutzt. Die Röhren haben etwa den Aufbau der in Abb. 115/1 gezeigten Röhre.

Zur Bestrahlung der Haut oder dicht unter der Haut liegender Gewebe dienen die Oberflächentherapieröhren mit Spannungen um 100 kV.

Zur Bestrahlung lediglich der obersten Hautschichten werden ganz weiche Strahlen, die man als *Grenzstrahlen* bezeichnet, verwendet. Die Röhren sind Spezialkonstruktionen mit einem aus besonderem Glas angefertigten Austrittsfensterchen für die Strahlen (Abbildung 121/1), weil das übliche Glas die Strahlung vollständig absorbieren würde. Die zum Betrieb der Röhre erforderlichen Spannungen liegen um 10 kV.

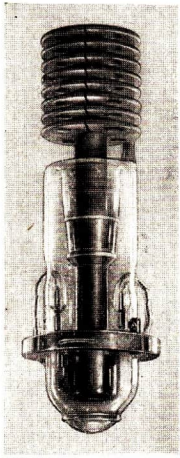


Abb. 121/1
Grenzstrahlen-Röntgenröhre, angelegte Spannung 10 kV

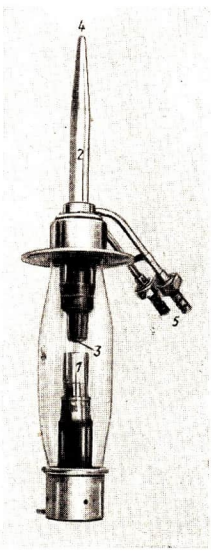


Abb. 121/2
Nahbestrahlungs-Röntgenröhre
1 Kathode, *2* Hohlanode, *3* Eintrittsöffnung für die Elektronen, *4* Brennflecken, *5* Wasserkühlung

Besondere Bedeutung haben die *Nahbestrahlungsröhren*, die wegen der Eigenart ihrer Konstruktion auch *Hohlanodenröhren* genannt werden (Abb. 121/2). Die Anode ist nämlich in Form eines Metallzylinders aus der Röhre herausgeführt. Die Elektronen dringen in den Zylinder ein und erregen beim Auftreffen auf die Abschlußplatte die Röntgenstrahlung, die sich nach allen Seiten, vor allem auch nach außen, ausbreitet. Die Anode ist geerdet und mit fließendem Wasser gekühlt. Die Kathode besitzt ihr gegenüber eine Spannung bis 60 kV. Durch diese Konstruktionsmaßnahmen kann man die Anode, mithin den Aussendungsort der Strahlung, dicht an die erkrankten Körperstellen heranbringen (Abb. 121/3).



Abb. 121/3. Nahbestrahlungs-Röntgenanlage des VEB Transformatoren- und Röntgenwerkes Dresden

3. Grobstrukturuntersuchung von Werkstücken. Die große Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlung macht sie auch zur Untersuchung von Werkstücken auf innere Fehlerstellen geeignet. Zum Unterschied von den später zu besprechenden Feinstrukturuntersuchungen, mit denen der Molekülbau der durchstrahlten Stoffe geklärt werden kann, läßt die *Grobstrukturuntersuchung* makroskopische Unregelmäßigkeiten innerhalb der Werkstücke erkennen. Der Vorzug dieses Prüfverfahrens liegt vor allem darin, daß es eine zerstörungsfreie Werkstoffprüfung ermöglicht und deshalb auf sämtliche Werkstücke der Fertigung erstreckt werden kann, falls es erforderlich ist. Bei den mechanischen Prüfverfahren werden einzelne Probestücke bis zur Grenze ihrer Festigkeit beansprucht. Damit ist noch keine Gewähr gegeben, daß alle hergestellten Werkstücke fehlerfrei sind. Der Grobstrukturuntersuchung werden vor allem solche Werkstücke unterworfen, die im Falle einer fehlerhaften Beschaffenheit großen Schaden anrichten können. Insbesondere gilt dies für die Achsen der Verkehrsmittel, der Schwermaschinen u. a. Auch Werkstücke, die einen langwierigen Bearbeitungsprozeß vor sich haben, werden vorteilhafterweise zu Anfang einer Grobstrukturuntersuchung unterzogen.



Abb. 122/1. Lunker in einem Werkstück

Zeigen sich im Röntgenbild des durchstrahlten Werkstückes helle Flecken, dann sind es *Gaseinschlüsse* im Material, beispielsweise runde Gasblasen in Gußstücken oder unregelmäßig geformte hohle Stellen, die man als *Lunker* bezeichnet (Abb. 122/1). Auf dem Röntgenfilm, der ein photographisches Negativ liefert, heben sich die Gaseinschlüsse dunkel von der Umgebung ab. Es ist klar, daß das Werkstück an diesen Stellen besonders der Bruchgefahr ausgesetzt ist. Feinere Risse im Material treten in der Röntgendurchleuchtung im allgemeinen nur undeutlich hervor. Dagegen liefert sie wertvolle Ergebnisse bei der Prüfung von Schweißnähten, wobei gut zu erkennen ist, ob die beiden Metallteile einwandfrei verbunden sind oder ob noch spaltenartige Hohlräume zwischen ihnen geblieben sind (Abb. 122/2). Auch Schlacken und andere Abscheidungen innerhalb von Gußteilen sind im Röntgenbild zu erkennen.

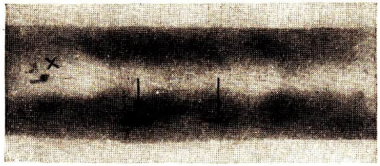


Abb. 122/2. Fehlerhafte Schweißnaht im Röntgenbild
× Lunker, → schlechte Verbindung

Die Härte der anzuwendenden Röntgenstrahlung richtet sich nach dem zu untersuchenden Material und nach seiner Dicke. Bei einer Röhrenspannung von 200 kV und einstündiger Belichtung des Films liegt die Grenze der Durchstrahlbarkeit etwa bei 35 cm Al, 8 cm Fe und 6 cm Cu.

Geräte zur Grobstrukturuntersuchung sind von der Industrie als transportable Anlagen entwickelt worden (Abb. **123**/1). Die Apparatur des VEB Transformatoren- und Röntgenwerkes Dresden besteht aus einem fahrbaren Röhrenstativ mit der strahlungs- und spannungssicher eingebauten Röntgenröhre für 200 kV Gleichspannung, aus dem Schalttisch, aus den Geräteteilen für die Spannungserzeugung und aus der Ölkühlung.

Zum Zwecke der Untersuchung von Bohrungen in Werkstücken verwendet man Hohlanoden, die ähnlich den Therapie-Nahbestrahlungsröhren konstruiert sind (vgl. Abb. **121**/1).

Röntgenapparate zur Grobstrukturuntersuchung ermöglichen die zerstörungsfreie Prüfung der Werkstücke auf innere Fehlerstellen.

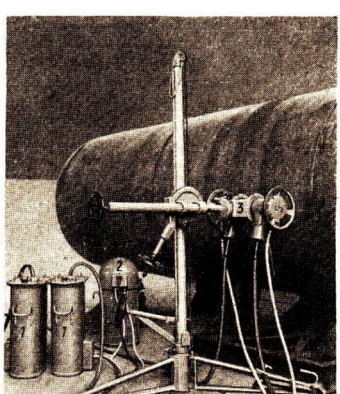


Abb. **123**/1
Röntgenanlage aus dem VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden für Grobstrukturuntersuchungen
1 Hochspannungserzeuger, *2* Ölkühlung, *3* Stativ mit Röntgenröhre

4. Fragen:

1. Welche Verletzungen und Erkrankungen lassen sich vorwiegend mit Hilfe der Röntgendiagnostik erkennen?
2. Welcher Verfahren bedient sich die moderne Röntgendiagnostik?
3. Auf welchen biologischen Wirkungen beruht die Röntgentherapie?
4. Welchem Zwecke dient die Röntgen-Grobstrukturuntersuchung und wo wird sie angewandt?

§ 25. Die Wellennatur der Röntgenstrahlen

1. Röntgenwellen. Schon *Röntgen* hatte bei seinen Bemühungen, die Natur der neuentdeckten Strahlung zu erforschen, nach Beugungs- und Interferenzerscheinungen gesucht. Erst im Jahre 1912 gelang es, einen schwachen Beugungseffekt beim Durchgang von Röntgenstrahlen durch einen sehr engen Spalt nachzuweisen. Später wurden einwandfreie Beugungsstreifen bei Verwendung eines Spaltes mit einer Breite von etwa 6 μ (Abb. **123**/2) und

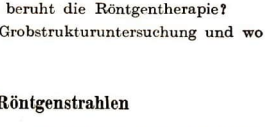


Abb. **123**/2. Interferenzen bei einer Beugung von Röntgenstrahlen an einem 0,0055 mm breiten Spalt

bei sehr feinen Reflexionsgittern, auf die die Röntgenstrahlen streifend auffielen, beobachtet. Auch Interferenzstreifen zeigten sich bei Anordnungen nach Art des Fresnelschen Spiegelversuchs. Dadurch war *der Wellencharakter der Röntgenstrahlung einwandfrei erwiesen.*

Als Wellenlänge der Röntgenstrahlung ergab sich der Bereich etwa zwischen 0,01 Å und einigen hundert Å. Die weiche Strahlung entspricht der langwelligen Seite des umrissenen Gebiets. Die Strahlung um 1 bis 2 Å, die für die Medizin Bedeutung hat, hat die Bezeichnung *Grenzstrahlung* erhalten. Die harte Strahlung weist Wellenlängen um 0,1 Å auf.

2. Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung. Mit Hilfe der Interferenz- und Beugungsverfahren wurden die Wellenlänge und die Intensität der Röntgenstrahlung in Abhängigkeit von der an die Röhre gelegten Spannung (Abb. **124**/1) und vom Anodenmaterial eingehend untersucht. Es ergeben sich *Spektren*, die den optischen Spektren außerordentlich ähneln. Es stellte sich heraus, daß von der Anode zwei unterschiedliche Röntgenstrahlungen ausgehen.

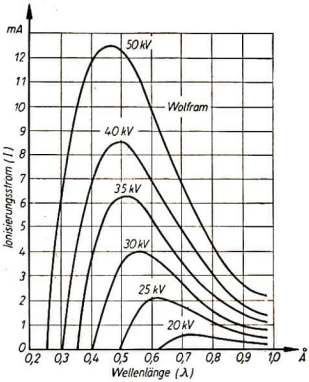


Abb. **124**/1. Abhängigkeit der Intensität der Röntgenstrahlung von der Spannung und von der Wellenlänge (gemessen an der ionisierenden Wirkung)

a) Die Bremsstrahlung besteht aus Röntgenwellen, deren Wellenlängen sich kontinuierlich über einen großen Bereich erstrecken. Sie ist auf das Eindringen schnell fliegender Elektronen in die Atome der Anode zurückzuführen. Jedes bewegte Elektron ist mit einem elektrischen Strom vergleichbar. Wenn der Stromfluß mit dem Abbremsen des Elektrons aufhört, bricht das ihn umgebende Magnetfeld zusammen. So erklärt sich die Bezeichnung *Bremsstrahlung*. Diese plötzliche Änderung des Magnetfeldes löst eine elektromagnetische Welle aus, die sich um die Entstehungsstelle herum ausbreitet. Dieser elektromagnetischen Strahlung ist keine bestimmte Wellenlänge zuzuordnen. Sie liefert ein kontinuierliches Spektrum, wie wir es vom Licht glühender fester Körper kennen. Die Zusammensetzung der Strahlung hängt nur von der Spannung ab, nicht vom Anodenmaterial. Auffallend ist die scharfe Grenze, mit der die Strahlung nach der kurzwelligen Seite jedesmal abbricht. Die Erklärung dafür kann erst auf der Grundlage der Atomtheorie gegeben werden.

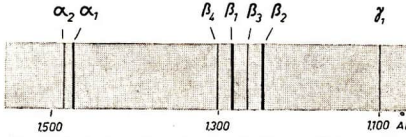


Abb. **124**/2. Linienspektrum der charakteristischen Röntgenstrahlung

b) Die charakteristische Strahlung als der zweite Anteil der vom Brennfleck ausgehenden Röntgenstrah-

lung liefert ein Linienspektrum (Abb. 124/2). Die auftretenden Wellenlängen sind für das Material der Anode charakteristisch. Beim Eindringen in die Atome der Anode treten die Elektronen in Wechselwirkung mit diesen und regen sie zur Eigenstrahlung an. Näheres darüber werden wir in § 35, 4 erfahren. Es läßt sich mit Hilfe absorbierender Metallschichten erreichen, daß die Strahlung praktisch nur eine Wellenlänge enthält; man spricht dann in Analogie zur Optik von *monochromatischer Strahlung* oder auch in übertragenem Sinne von *monochromatischem Röntgenlicht*. Das charakteristische Röntgenspektrum weist Gesetzmäßigkeiten auf, die einen bedeutenden Beitrag zur Erforschung der Struktur der Materie leisteten. Sie werden im Abschnitt *Die atomistische Struktur der Materie* besprochen werden.

3. Primärstrahlen und Sekundärstrahlen. Zur Kennzeichnung der Röntgenstrahlen muß noch eine andere Unterscheidung gemacht werden. Man bezeichnet als *Primärstrahlen* diejenigen Röntgenstrahlen, die vom Brennfleck ausgehen, die also von den mit großer Geschwindigkeit auftreffenden Elektronen ausgelöst werden. Sie enthalten sowohl Brems- als auch charakteristische Strahlung. Will man die charakteristische Strahlung benutzen, dann arbeitet man vorwiegend mit Röhrenspannungen von 20 bis 30 kV. Bei diesen Spannungen ist die zugleich erzeugte Bremsstrahlung noch nicht intensiv.

Von den Primärstrahlen sind die *Sekundärstrahlen* zu unterscheiden. Sie werden außerhalb der Röhre durch auftreffende Röntgenstrahlung aus irgendwelchen Stoffen ausgelöst.

4. Polarisation der Röntgenwellen. Die dem Licht wesensgleiche Natur der Röntgenwellen, insbesondere ihre Transversalität wird weiter erhärtet durch das Auftreten von *Polarisationserscheinungen*. Durchdringt ein Bündel Röntgenstrahlen beispielsweise ein Stück Paraffin, dann ist die senkrecht zum Strahl austretende Streustrahlung linear polarisiert. Die Ursache liegt in der Streuung an den Molekülen der durchstrahlten Materie. Auf die Zusammenhänge kann hier nicht näher eingegangen werden. Bei der Streuung des sichtbaren Lichts in einem trüben Medium beobachtet man die gleiche Erscheinung. Beim Licht hat die Polarisation durch Streuung jedoch nur geringe Bedeutung gegenüber der Polarisation durch Reflexion und Brechung und durch Doppelbrechung. Durch die zuletzt genannten Verfahren lassen sich Röntgenwellen aber nicht polarisieren. Die Brechung der Röntgenwellen ist für alle Stoffe sehr gering, das Brechungsverhältnis gegen Luft ist nahezu 1. Damit hängt eng zusammen das fast völlige Fehlen der Reflexion beim Übertritt der Röntgenwellen in einen anderen Stoff.

Die Wellennatur der Röntgenstrahlung erweist sich aus Beugungs-, Interferenz- und Polarisationserscheinungen. Die Wellenlängen liegen zwischen 0,01 und 100 Å.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Welchen Wellenlängenbereich umfaßt die Röntgenstrahlung?
2. Wodurch sind die charakteristische und die Bremsstrahlung gekennzeichnet?
3. Erläutern Sie die Begriffe Primärstrahlung und Sekundärstrahlung!

§ 26. Die Beugung von Röntgenwellen an Kristallen

1. Beugung von Röntgenwellen an Kristallen. Im gleichen Jahre, in dem die erste zunächst nur angenäherte Bestimmung von Röntgenwellenlängen ausgeführt wurde, faßte der deutsche Physiker *Max von Laue*[1] den Gedanken, *Kristalle zur Erzeugung von Röntgeninterferenzen* zu verwenden, da die Dimensionen der Kristallgitterstrukturen in dieser Größenordnung liegen mußten. Die Versuchsanordnung, mit der dieser Nachweis gelingt, ist in Abb. 126/1 schematisch dargestellt. Durch zwei Lochblenden von höchstens 1 mm Durchmesser, die im Abstand von einigen Zentimetern voneinander angeordnet sind, wird ein schmales Bündel Röntgenwellen ausgeblendet. Das Bündel durchstrahlt den Kristall und trifft auf eine dahinter angebrachte photographische Schicht. Auf dem Film zeigen sich rund um den Schwärzungsfleck, den das direkte unabgelenkte Bündel hervorgerufen hat, punktförmige *Beugungsbilder* in regelmäßiger Anordnung (Abb. 126/2). Man nennt dieses Beugungsbild ein *Laue-Diagramm*. Es gibt einerseits Aufschluß über das Wesen der Röntgenwellen und andererseits über die Struktur der Kristalle.

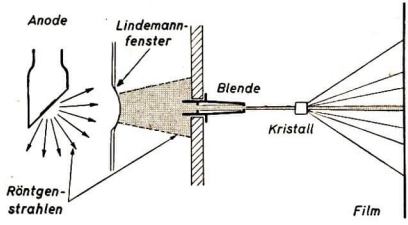


Abb. 126/1. Versuchsanordnung zur Beugung der Röntgenwellen an einem Kristall (schematisch)

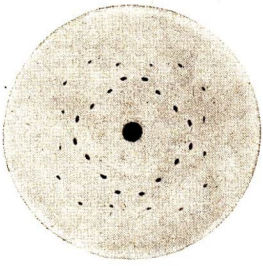


Abb. 126/2. Beugung von Röntgenwellen beim Durchgang durch einen Kristall — Laue-Diagramm

Zur Erklärung der Erscheinung untersuchen wir die Beugung der Röntgenwellen an den Bausteinen des Kristallgitters. Wir nehmen an, das Bündel treffe senkrecht auf eine Fläche eines kubischen Kristalls (Abb. 127/1), und betrachten zunächst einmal nur die Wirkung der senkrecht durchsetzten Fläche F_1 mit ihren regelmäßig angeordneten Ionen. Die Fläche wirkt ganz ähnlich einem Kreuzgitter im Gebiet des sichtbaren Lichts.

Ein Kreuzgitter besteht aus zwei gekreuzt übereinandergelegten Strichgittern. Es erzeugt von monochromatischem Licht das in Abb. 80/2 gezeigte Beugungsbild. Verwendet man weißes Licht, so zeigen sich kontinuierliche Spektren in zwei zueinander senkrechten sowie in diagonalen

[1] Max von Laue (geb. 1879), ein bedeutender deutscher Physiker, Professor in Zürich, Frankfurt a. M. und Berlin, erhielt 1914 den Nobelpreis

Richtungen. Das flächenhafte Punktgitter F_1 ist im Grunde auch ein solches Kreuzgitter.

In der Optik sind wir zur Erklärung der Gitter von der Beugung innerhalb der Gitter-Öffnungen ausgegangen. Bei großen Zwischenräumen und kleinen Hindernissen, wie es in den Kristallen der Fall ist, geht man zur Erklärung besser von den Hindernissen aus. Sie wirken als Beugungszentren, an denen sich die Elementarwellen ausbilden. Man kann das durch einen Wellenwannenversuch modellartig wiedergeben (Abb. 127/2).

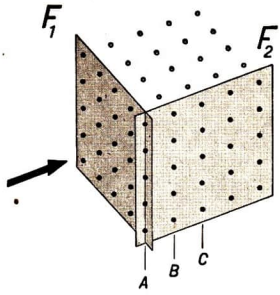
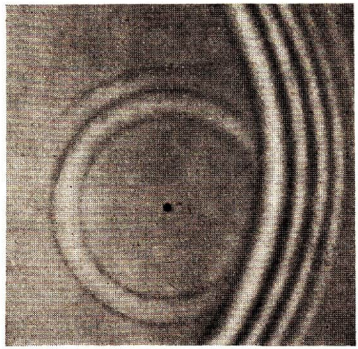


Abb. 127/1. Modell eines kubischen Kristallgitters

Um das Zustandekommen des Laue-Diagramms zu verstehen, müssen wir vom flächenhaften zum räumlichen Punktgitter übergehen, indem wir die Wirkung der unzähligen hintereinandergeschichteten Flächengitter untersuchen. Eine solche räumliche, regelmäßige Anordnung von beugenden Teilchen bezeichnet man als ein *Raumgitter*. Wir legen darum durch den Kristall einen Schnitt F_2 in der Durchstrahlungsrichtung (Abb. 127/1). Die vorderste Punktreihe A wirkt wie ein ebenes Gitter (Abb. 128/1). Treffen geradlinige Wellenfronten beispielsweise senkrecht auf die Beugungszentren A, dann gibt es einige Richtungen, in denen sich alle gebeugten Elementarwellen gegenseitig verstärken, wie uns vom Gitter her bekannt ist (vgl. Abb. 74/2). Das sind die Richtungen, in denen je zwei benachbarte Elementarwellen einen Gangunterschied von λ oder 2λ usw. haben. In allen übrigen Richtungen löschen sich die Elementarwellen aus.


Abb. 127/2. Beugung einer Wasserwelle an einem punktförmigen Hindernis

Im weiteren Fortschreiten treffen die einfallenden geradlinigen Wellenfronten auf die zweite Punktreihe B, das sind tiefer im Kristall gelegene Beugungszentren. Sie wirken in der gleichen Weise wie die Zentren A und erzeugen ebenfalls gebeugte Wellenfronten in den gleichen Richtungen. Diese Wellenfronten sind jedoch mit den an den Zentren A entstandenen nicht in Phase. Man sieht die Phasenverschiebung entlang der Linie B. Die an den Zentren C

gebeugten Wellen haben wieder eine Phasenverschiebung gegenüber den anderen und so fort.

Insgesamt werden sich deshalb in dieser Richtung die gebeugten Wellen gegenseitig auslöschen, wenn genügend viele Punktreihen vorhanden sind. In den

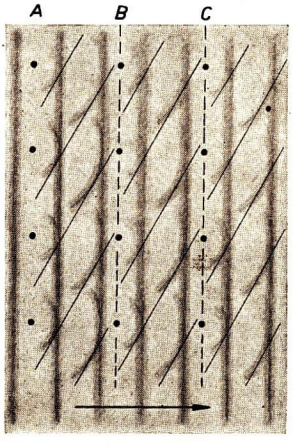


Abb. 128/1. Die Beugung von Röntgenwellen am Kristallgitter. Die an den Ionen der Reihe A des Gitters gebeugten Elementarwellen sind mit den an den Reihen B und C gebeugten nicht in Phase; sie löschen sich gegenseitig aus.

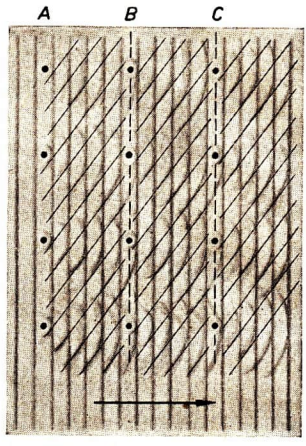


Abb. 128/2. Die Beugung von Röntgenwellen am Kristallgitter. Die Wellenlänge ist kürzer als die in Abb. 128/1 wiedergegebene. Die gebeugten Elementarwellen sind sämtlich in Phase.

anderen Richtungen löschen sich, wie gesagt, die Elementarwellen schon innerhalb einer Punktreihe aus.

Es stellt sich heraus, daß die auf ein Raumgitter fallenden Wellenfronten im allgemeinen keine seitlich gebeugten Wellenfronten liefern. Nur für wenige Wellenlängen wird es zutreffen, daß sich sämtliche an den Beugungszentren des Kristalls gebeugten Elementarwellen in einer bestimmten Richtung verstärken (Abb. 128/2). Man erhält demnach beim Raumgitter ziemlich scharf begrenzte *Beugungspunkte*, in denen die wenigen sich verstärkenden gebeugten Wellen den Film treffen.

2. Das Drehkristallverfahren. Wenn man die Gitterabstände der Kristalle willkürlich verändern könnte, würde man für jede beliebige Wellenlänge Beugungserscheinungen hervorrufen können. Die englischen Physiker *William Henry Bragg*[1]

[1] William Henry Bragg (1862–1942), Professor der Mathematik und Physik in Adelaide (Australien), von 1915 an Professor am University College in London

und *William Lawrence Bragg*[1] sprachen 1912 den Gedanken aus, daß durch Drehen des Kristalls die Gitterabstände zwar nicht tatsächlich, wohl aber in ihrer Wirkung auf die Röntgenwellen verändert würden, und entwickelten das nachfolgend beschriebene *Drehkristallverfahren*.

Das Drehkristallverfahren unterscheidet sich vom Laue-Verfahren dadurch, daß monochromatische Röntgenstrahlung verwendet wird, daß ein Motor den kleinen Kristall langsam dreht und daß der Film im Abstand von einigen Zentimetern zylindrisch um den Kristall gelegt wird (Abb. 129/1). Es zeigen sich die vom Laue-Diagramm her bekannten punktförmigen Beugungsbilder, und zwar nicht nur senkrecht zur Kristall- und Drehachse, sondern auch in anderen Richtungen, in denen die *Braggsche Reflexionsbedingung* erfüllt ist. Abb. 129/2 zeigt einen belichteten Film, den man sich um den rotierenden Kristall gelegt denken muß.

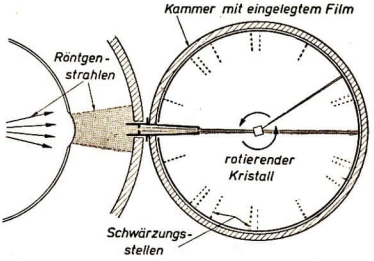


Abb. 129/1. Versuchsanordnung für das Drehkristallverfahren (schematisch)

3. Das Debye-Scherrer-Verfahren. Das Drehkristallverfahren hat durch die Forscher *Peter Debye*[2] und *Paul Hermann Scherrer*[3] eine wichtige Abänderung erfahren. Sie benutzten zur Beugung pulverisierte Kristalle in einem dünnen Röhrchen aus Spezialglas und erreichten dadurch, daß infolge der regellosen Lage der kleinen Kristallsplitter im Mittel alle Lagen des Kristalls zum Röntgenstrahl vorhanden sind, ohne daß der beugende Körper gedreht zu werden braucht. Das ist vor allem von Bedeutung für die Untersuchung der Metalle, die nicht in großen wohlausgebildeten Kristallen, den *Einkristallen*, vorkommen, sondern aus mikroskopisch kleinen Kristallkörnchen, den *Kristalliten*, zusammengesetzt sind. Bei Brüchen von Metallteilen beobachtet man keine glatten Bruchflächen, sondern eine oft nur mikroskopisch erkennbare Körnigkeit. Man braucht also nur einen Metalldraht an die Stelle des Drehkristalls zu bringen, wenn

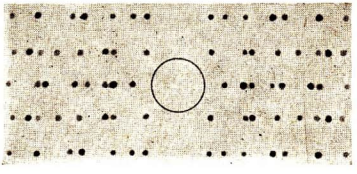


Abb. 129/2. Drehkristallaufnahme

[1] William Lawrence Bragg (geb. in Adelaide 1890), Sohn des William Henry Bragg, seit 1919 Professor der Physik an der Victoria-Universität in Manchester. Beide erhielten 1915 den Nobelpreis für Physik.

[2] Peter Debye (geb. 1884), ein holländischer Physiker (sprich Debai)

[3] Paul Hermann Scherrer (geb. 1890), deutscher Physiker

man Beugungserscheinungen erhalten will.

Die zu einem bestimmten Winkel gehörigen gebeugten Strahlenbündel bilden einen Kegelmantel, weil die Kristallite in allen Raumrichtungen orientiert sind (Abb. **130**/1). Je nach Anordnung des Films erhält man bei den Debye-Scherrer-Aufnahmen zwei verschiedene Arten von Beugungsbildern (Abb. **130**/2).

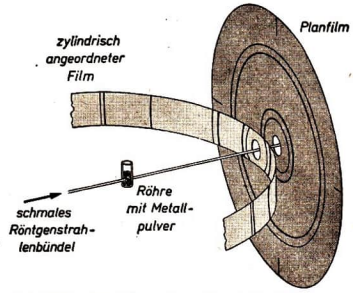
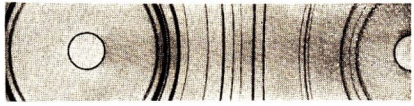


Abb. **130**/1. Versuchsanordnung für Debye-Scherrer-Aufnahmen (schematisch)

Bei den Debye-Scherrer-Aufnahmen erübrigt sich das Drehen des Kristalls, weil sich die Kristallite eines Metalls oder eines Kristallpulvers dem monochromatischen Strahl in allen Raumrichtungen darbieten.



a) auf einem zylindrisch angeordneten Film

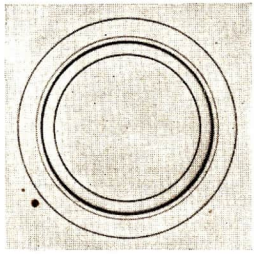


Abb. **130**/2. Debye-Scherrer-Aufnahmen

b) auf einem ebenen Film

4. Fragen:

1. Wie kommen die Beugungserscheinungen des Laue-Diagramms zustande?
2. Wodurch unterscheiden sich die Versuchsanordnungen nach Laue, Bragg und Debye-Scherrer?
3. Welcher Gedanke führte von der Laueschen Anordnung zur Drehkristallmethode für monochromatische Röntgenstrahlung?
4. Wie ist es zu erklären, daß bei dem Debye-Scherrer-Verfahren monochromatische Röntgenwellen Interferenzerscheinungen zeigen, ohne daß der Kristall gedreht wird?

§ 27. Feinstrukturuntersuchungen

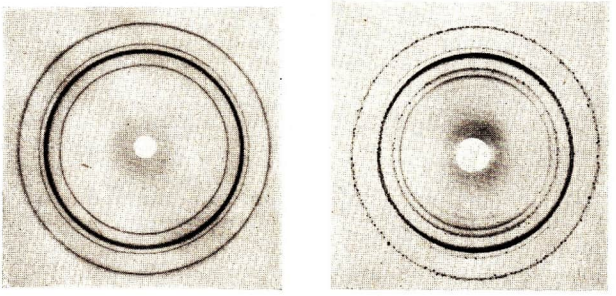
1. Die Aufgaben der Feinstrukturuntersuchungen. Zum Unterschied von den im § 24 beschriebenen Grobstrukturuntersuchungen hat man die Anwendungen der im letzten Paragraphen behandelten Interferenzerscheinungen von Röntgenwellen, da man mit ihnen die molekulare Struktur der Materie erforschen kann, als *Feinstrukturuntersuchungen* bezeichnet.

Sie bieten dem Wissenschaftler die Möglichkeit, den kristallinen oder amorphen Zustand eines Stoffes, seine Kristallisationsform, die Abstände der Ionen, die das Kristallgitter bilden, und anderes mehr zu bestimmen. Darüber hinaus zeigen Feinstrukturuntersuchungen in vielen Fällen die durch die verschiedenen Erzeugungs- und Bearbeitungsverfahren hervorgerufenen Veränderungen der Stoffe, so daß sie dem Techniker ein wertvolles Hilfsmittel zur Werkstoffprüfung geworden sind.

Die Feinstrukturuntersuchung wird mit Vorteil in Verbindung mit mikroskopischen und chemischen Verfahren angewandt. Ihr kommt als einem zerstörungsfreien Werkstoffprüfverfahren zunehmende Bedeutung zu.

2. Die Größe der Kristallite. Von großer Bedeutung insbesondere für die Metallurgie ist die Körnigkeit eines Stoffes. Wie schon erwähnt, kommt bei den Metallen die Körnigkeit durch die *Kristallite* zustande. Die Größe dieser Kristallite beeinflußt oft ganz entscheidend die Eigenschaften eines Werkstoffes.

Die Körnigkeit eines Stoffes äußert sich in einer Debye-Scherrer-Aufnahme darin, daß bis zu einer gewissen Grenze *die gleichmäßige Schwärzung und die Schärfe der Interferenzringe immer mehr zunehmen, je kleiner die Kristallite sind.* Diese besondere Feinheit der Kristallite tritt häufig beim Härten und Schleifen von Metallen ein. Der Einfluß der Kristallitgröße auf das Interferenzbild ist in Abb. **131/1** an zwei Debye-Scherrer-Aufnahmen gezeigt. In Abb. **131/1 b** erscheinen punktförmige Schwärzungsstellen, da sich durch Glühen des Pulvers größere Kristallite gebildet haben.

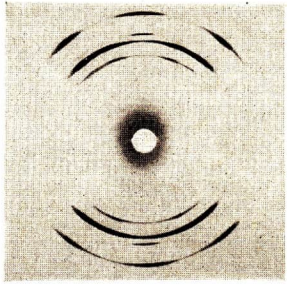


a) ungeglüht b) geglüht

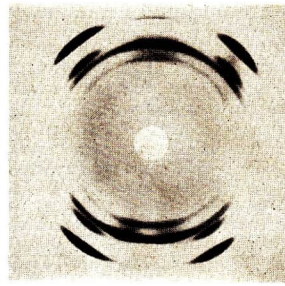
Abb. **131/1.** Debye-Scherrer-Aufnahmen von Kupferpulver
Der innen neu aufgetretene Ring ist auf Oxydbildung zurückzuführen.

Besondere Bedeutung hat die Feinstrukturuntersuchung in der Erforschung der Struktur von Legierungen erlangt, da komplizierte Kristallisationsvorgänge, mit denen die elastischen Eigenschaften dieser Legierungen eng verknüpft sind, oft durch keine anderen Methoden geklärt werden konnten.

3. Texturen. Eine andere für die Werkstoffprüfung wichtige Erscheinung zeigt sich bei Drähten und Walzblechen. Infolge einer bevorzugten Raumorientierung, die die Kristallite bei der Bearbeitung erhalten, weist die Debye-Scherrer-Aufnahme statt der gleichmäßigen Ringe symmetrisch angeordnete Schwärzungsstellen auf (Abb. 132/1). Diese Erscheinung wurde zuerst an Zellulosefasern beobachtet. Wie auch in den gezogenen Metalldrähten liegen die Kristallite dieser



a) eines Kupferdrahtes



b) eines Kupferbleches

Abb. 132/1. Debye-Scherrer-Aufnahmen
Die Kreise haben die gleichen Radien wie in Abb. 131/1.



organischen Verbindung längs der Fadenachse ausgerichtet. Diese Ausrichtung nennt man *Textur*. Für die Festigkeit von Drähten ist die Textur günstig. Beim Glühen eines Drahtes wird seine Textur weitgehend aufgehoben. Bei Walzerzeugnissen ist die Textur im allgemeinen nachteilig für die Festigkeit und die weitere Bearbeitung.

Auch starke Spannungen in Werkstücken geben sich in der Debye-Scherrer-Aufnahme zu erkennen.

Abb. 132/2. Feinstruktur-Untersuchungsgerät des VEB Transformatoren- und Röntgenwerkes Dresden
1 Schalttisch, *2* Strahlungsaustrittsfenster, *3* Wasserkühlung, *4* Röhrenkopf, *5* Arbeitstisch

4. Geräte zur Feinstrukturuntersuchung. Der VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden hat ein universelles Gerät entwickelt, das den Wissenschaftlern und den Technikern alle im § 26 behandelten Interferenzverfahren rationell und gefahrlos durchzuführen ermöglicht (Abb. **132**/2). Die Röntgenröhre ist senkrecht angeordnet. Sie liefert überwiegend charakteristische Strahlung, die noch durch Metallplättchen zu monochromatischer Strahlung ausgefiltert wird. Die Strahlung tritt durch vier Lindemannfenster (vgl. § 26/1) seitlich aus der Röhre aus. Die Metallhaube hat an den entsprechenden Stellen vier Öffnungen, in die die zugehörigen Kammern eingehängt werden (Abb. **133**/1). Die Kammern sind je nach dem anzuwendenden Verfahren unterschiedlich konstruiert. Sie enthalten

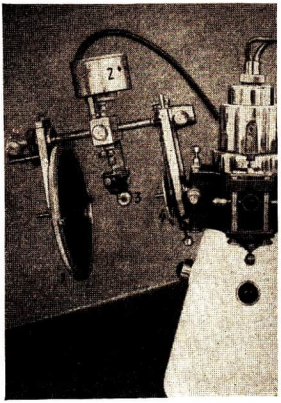


Abb. **133**/1. Ansatz an das Feinstruktur-Untersuchungsgerät
1 Filmkassette, *2* Motor, *3* Kristall, *4* Blende

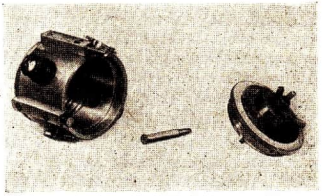


Abb. **133**/2. Kammer für Debye-Scherrer-Aufnahmen bei zylindrischer Filmanordnung
1 Eintrittsöffnung, *2* auswechselbare Blende, *3* Deckel für die Haltevorrichtung des Kristallpulvers

den Film und das zu untersuchende Material. Für Drehkristallaufnahmen wird der Kristall mit Hilfe eines kleinen Elektromotors langsam gedreht. In dem kurzen Rohr, mit dem die Kammer in einer der vier Austrittsöffnungen befestigt wird, befindet sich die Blende, die nur einen feinen Röntgenstrahl passieren läßt (Abb. **133**/2).

5. Fragen:

1. Wie unterscheiden sich die Versuchsanordnungen für die Grob- und für die Feinstrukturuntersuchung von Werkstoffen?
2. Wie äußert sich die Größe von Kristalliten in der Debye-Scherrer-Aufnahme?
3. Was versteht man unter Textur und wie erkennt man sie in einer Debye-Scherrer-Aufnahme?

D (VIII. § 28) DAS ELEKTROMAGNETISCHE SPEKTRUM

1. Die elektromagnetischen Wellen. Der große englische Physiker *Michael Faraday* hatte zunächst die elektrischen und magnetischen Erscheinungen, die in den Raum hinaus wirksam werden, auf Fernwirkungskräfte zurückgeführt, sie aber später durch die von ihm aufgestellte Feldtheorie als Nahwirkung erklärt. Der nicht minder bedeutende englische Physiker *James Clerk Maxwell* vertiefte später die Vorstellungen über das elektrische und magnetische Feld noch wesentlich. Er bewies, daß bei sich ändernden elektrischen und magnetischen Feldern die beiderseitigen Feldlinien miteinander verkettet sind und die Felder sich gegenseitig beeinflussen.

Die Änderungen der Felder erfolgen nicht gleichzeitig im gesamten Feldraum, sondern breiten sich mit einer endlichen, wenn auch außerordentlich großen Geschwindigkeit, nämlich der Lichtgeschwindigkeit, im Raum aus. Es kommt zu einer elektromagnetischen Welle. Das Vorhandensein elektromagnetischer Wellen wurde im Jahre 1888 von dem deutschen Physiker *Heinrich Hertz* experimentell bestätigt.

Hertz verwendete zu ihrer Erzeugung einen mit einem Dipol verbundenen elektrischen Schwingungskreis. Infolgedessen werden alle rein elektrisch hervorgerufenen elektromagnetischen Wellen, wie man sie vorzugsweise zur drahtlosen Nachrichtenübermittlung verwendet, als *Hertzsche Wellen* bezeichnet.

Schon 23 Jahre, bevor *Heinrich Hertz* die nach ihm benannten Wellen entdeckte, hatte *Maxwell* auf Grund einer rein gedanklichen Überlegung erkannt, daß auch das Licht nichts anderes ist als eine elektromagnetische Welle. Die Tatsache, daß die Lichtstrahlen durch elektrische und magnetische Felder beeinflußt werden können, war als ein erster experimenteller Beweis der Richtigkeit der Maxwellschen Vermutung anzusehen (vgl. § 22, 1).

Aber erst durch den im Anschluß an die Hertzschen Versuche erbrachten Nachweis, daß die Hertzschen Wellen und die optischen Wellen in allen ihren wichtigen Eigenschaften übereinstimmen, *wurde es zur Gewißheit, daß Lichtwellen elektromagnetische Wellen sind.* Sie haben ihre Ursache in einer von den Atomen ausgehenden Energieausstrahlung, über die wir Näheres in dem Abschnitt über die atomistische Struktur der Materie erfahren werden.

Von gleicher Art wie die Lichtstrahlen, wenn auch außerhalb des sichtbaren Bereichs des Lichtes liegend, ist die *ultrarote Wellenstrahlung.* Dieser Teil elektromagnetischer Wellen vermittelt insbesondere den Transport von Wärmeenergie in Form von sogenannten Wärmestrahlen und wird auf thermischem Wege erzeugt. Auch die über das violette Ende des Spektrums hinausgehende *ultraviolette Strahlung* schließt sich qualitativ lückenlos den Lichtwellen an und unterscheidet sich lediglich von ihnen in der Wellenlänge.

Den beiden genannten Teilgebieten reiht sich ein drittes an, das ebenfalls durch die elektromagnetischen Wellen sein Gepräge erhält. Es sind das die *Röntgen-*

strahlen. Wir haben erst in den vorangegangenen Paragraphen erfahren, daß es sich bei den Röntgenstrahlen um elektromagnetische Wellen von außerordentlich kurzer Wellenlänge handelt. Sie entstehen durch unmittelbare Energieumwandlung beim Eindringen der Elektronen in die Atome.

Und schließlich werden wir im letzten, von der atomistischen Struktur der Materie handelnden Buchabschnitt noch zwei weitere sich als elektromagnetische Wellen erweisende Strahlenarten kennenlernen: die *Gammastrahlen*, die nach dem griechischen Buchstaben γ ihren Namen erhalten haben, und die *sekundären Höhenstrahlen.* Die Gammastrahlen treten beim radioaktiven Zerfall mancher Elemente auf; die Höhenstrahlen sind kosmischen Ursprungs.

2. Die Verteilung der Frequenzen im Wellenbereich. Sämtliche genannten Arten elektromagnetischer Wellen stimmen in ihren wesentlichen Eigenschaften überein. Man kann sie als zu einem einzigen Wellenbereich gehörend ansehen. Er beginnt bei einer Frequenz von $16\frac{2}{3}$ Hz; noch langsamere Schwingungen sind technisch bedeutungslos. Die höchste zur Zeit bekannte Frequenz ist 10^{24} Hz. Die elektromagnetischen Wellen aller Frequenzen breiten sich im freien Raum mit Lichtgeschwindigkeit aus. Dabei sind die Frequenz f und die Wellenlänge λ der elektromagnetischen Wellen mit der Lichtgeschwindigkeit c durch die Gleichung

$$c = f \cdot \lambda$$

verbunden. Es entsprechen somit den genannten Frequenzen Wellenlängen von rund $18 \cdot 10^6$ m bzw. $3 \cdot 10^{-16}$ m. Innerhalb dieser außerordentlich großen Spanne unterscheidet man im einzelnen je nach der Art der Erzeugung und des Nachweises die schon im vorangehenden Abschnitt genannten Wellenbereiche, die sich stellenweise überschneiden. Die nachstehend abgedruckte Tabelle gibt die Frequenzen und Wellenlängen wieder, zwischen denen die Bereiche liegen.

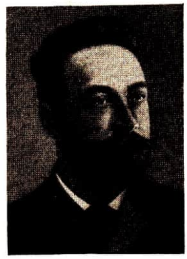
Frequenzen und Wellenlängen der einzelnen Wellenbereiche

Wellenart		Frequenzen Hz	Wellenlängen
Technische Wechselströme		$16\frac{2}{3}$ ... 10^2	18000 km ... 3000 km
Wechselströme der Leitungstelephonie		10^2 ... 10^4	3000 km ... 30 km
Hertzsche Wellen, insgesamt		10^4 ... 10^{13}	30 km ... 0,03 mm
Rundfunk und Fernsehwellen	Langwellen	$1{,}5 \cdot 10^5$ ... $3 \cdot 10^5$	2000 m ... 1000 m
	Mittelwellen	$0{,}5 \cdot 10^6$ ... $2 \cdot 10^6$	600 m ... 150 m
	Kurzwellen	$0{,}6 \cdot 10^7$ ... $2 \cdot 10^7$	50 m ... 15 m
	Ultrakurzwellen	$0{,}2 \cdot 10^8$ ... $3 \cdot 10^8$	15 m ... 1 m
	Mikrowellen	$3 \cdot 10^8$ ... 10^{13}	1 m ... 0,03 mm
Ultrarotes Licht		10^{12} ... $3{,}8 \cdot 10^{14}$	0,3 mm ... 790 mμ
Sichtbares Licht		$3{,}8 \cdot 10^{14}$ ... $7{,}7 \cdot 10^{14}$	790 mμ ... 390 mμ
Ultraviolettes Licht		$7{,}7 \cdot 10^{14}$ ... $3 \cdot 10^{16}$	390 mμ ... 10 mμ
Röntgenwellen		$3 \cdot 10^{16}$ ... $3 \cdot 10^{20}$	100 Å ... 0,01 Å
Gammastrahlen		10^{18} ... 10^{22}	3 Å ... 0,3 X
Sekundäre Höhenstrahlen		10^{22} ... 10^{24}	0,3 X ... 3 mX

Zum Messen sehr kurzer Wellenlängen verwendet man die sich an das Millimikron (mμ) anschließende **Ångströmeinheit** (Å) und für extrem kurze Wellen die **X-Einheit** (X). Es ist

$$1\,\text{Å} = \frac{1}{10}\,\text{m}\mu,$$

$$1\,\text{X} = \frac{1}{1000}\,\text{Å}.$$



Petr Nikolajewitsch Lebedew (1886—1912)

3. Die Wellenskala von Lebedew. Man kann das Spektrum des sichtbaren Lichtes nach beiden Seiten durch Angliedern der übrigen elektromagnetischen Wellen ergänzen und erhält so ein vollständiges *elektromagnetisches Spektrum*, das man auch als *Wellenskala* bezeichnet. Die Wellenskala wurde von dem russischen Physiker *Petr Nikolajewitsch Lebedew*[1] eingeführt. Um die Breite der Wellenskala zu verkürzen und gleichzeitig einen besseren Überblick über die einzelnen Bereiche zu erhalten, legte er eine logarithmische Teilung zugrunde. *Lebedew* erreichte dadurch, daß der Zuwachs von einer Zehnerpotenz der Frequenzreihe zur anderen durch Strecken gleicher Länge dargestellt wird (Abb. **136**/1).

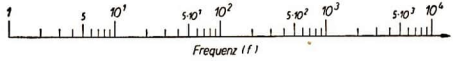


Abb. **136**/1
Logarithmische Frequenzskala

Das gleiche gilt für die Skala der Wellenlängen, die zur Frequenzskala gegenläufig ist. Legt man die Einheit Meter zugrunde, so erscheinen in der logarithmischen Skala die Abstände zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Zehnerpotenzen des Meters in auf- und absteigender Linie ebenfalls als Strecken gleicher Länge (Abb. **136**/2).

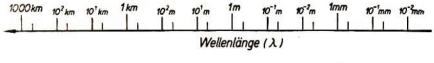


Abb. **136**/2
Logarithmische Wellenlängenskala

Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen wird dadurch zu einem verhältnismäßig kurzen Bande zusammengedrängt (Abb. **137**/1). An den Stellen, an denen sich zwei benachbarte Wellenbereiche überdecken, beginnt zur Erhöhung der Anschaulichkeit eine neue Stufe.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Geben Sie gemeinsame Eigenschaften der Hertzschen Wellen und der Lichtwellen an!
2. Beschreiben Sie die Wellenskala von Lebedew!

[1] Petr Nikolajewitsch Lebedew (1886–1912), ein bedeutender russischer Physiker, erbrachte den Nachweis des Lichtdruckes und erklärte damit die Schweifbildung der Kometen.

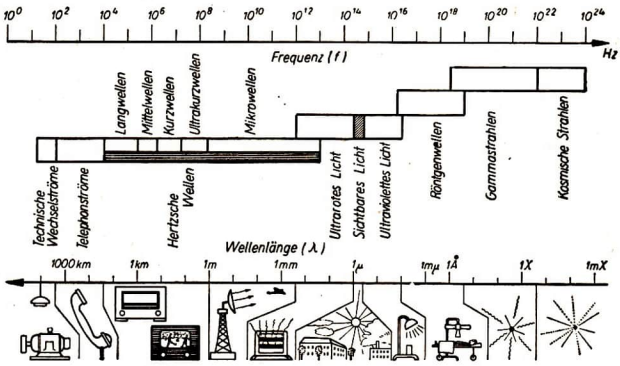


Abb. 137/1. Elektromagnetisches Spektrum. Die kleinen Bildchen am Fuße der Darstellung deuten symbolisch die Hauptanwendungen bzw. Hauptgeltungsbereiche der Wellenarten an.

3. Welche Vorteile bietet die Anwendung der logarithmischen Teilung auf die Wellenskala und die Frequenzskala?
4. Geben Sie die Grenzen der einzelnen Wellenbereiche an!
5. In welcher Frequenzbreite überschneiden sich die einzelnen Wellenbereiche?
6. Was stellen die kleinen der Abb. **137/1** beigefügten Bildchen dar?

DIE ATOMISTISCHE STRUKTUR DER MATERIE

IX. Die Grundlagen der Lehre von den Atomen

§ 29. Atome, Moleküle, Ionen

1. Atome. Schon in der alten griechischen Philosophie ist eine Lehre von den **Atomen**, die Atomistik, geschaffen worden. Ihr Begründer ist *Leukipp*, als ihr hervorragendster Vertreter gilt *Leukipps* Schüler *Demokrit* (um 400 v. u. Z.). Er gelangte auf rein spekulativem Wege zu der Vorstellung von Atomen; es kam ihm lediglich darauf an, durch die Atomistik das Werden und Vergehen zu erklären. Im leeren Raume nimmt *Demokrit* unendlich viele Stoffteilchen an, die qualitativ gleich, der Gestalt nach verschieden sind. Er nennt sie *Atome*[1]. Sie sind unveränderlich, unteilbar, obwohl ausgedehnt, und wegen ihrer Kleinheit mit den Sinnen nicht wahrnehmbar. Die Mannigfaltigkeit der Welt erklärt *Demokrit* aus der verschiedenen Gestalt und der verschiedenen Anordnung der Atome in den Körpern. Alles Werden ist nach seiner Ansicht nur eine lokale Veränderung der Atome. Qualitätsänderungen sind nur Änderungen der Quantität und der räumlichen Verhältnisse. *Epikur* griff um 300 v. u. Z. die Lehre *Demokrits* auf und hat sie weiterentwickelt. In einem großen Lehrgedicht *Von der Natur der Dinge* von *Lucretius Carus* (55 v. u. Z.) wurde sie uns ausführlich überliefert.

Nach Beginn der Neuzeit wurde die Atomistik des Altertums von dem französischen Philosophen und Physiker *Petrus Gassendi* (1592–1655) gemäß der Lehre *Epikurs* erneuert. Schon *Baco von Verulam* (1561–1626) vertrat ebenfalls die Ansicht, daß sich ohne die Annahme von Atomen die Natur nicht erkennen lasse; dagegen wendete sich der französische Mathematiker und Naturforscher *René Descartes* (1596–1650) gegen die Annahme von Atomen. *Isaac Newton* (1643–1724) hat sich die Lehre von den Atomen nach der Darstellung *Gassendis* zu eigen gemacht. Auch der bedeutende russische Naturforscher *Lomonossow* (1711–1765) hat schon klare Vorstellungen über das Vorhandensein von Atomen gehabt. Er unterschied bereits die *Atome*, die er Elemente nannte, von den von ihm als Korpuskeln bezeichneten *Molekülen*.

In die experimentelle Erfahrungswissenschaft wurde die Atomistik aber erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts einbezogen, als *John Dalton*[2] (1802) und *Amadeo Avogadro*[3] (1808–1811) die Atomlehre benutzten, um Erfahrungstatsachen der Chemie, das Gesetz der Gewichtsverhältnisse chemischer Verbindungen und das Gesetz der einfachen Gasvolumina, zu erklären. Jedes der in der Natur vorkommenden Elemente besteht nach ihren Vorstellungen aus stoffeigenen Atomen,

[1] átomos (griech.) = unteilbar

[2] John Dalton (1766–1844), ein erfolgreicher englischer Naturforscher, legte durch die von ihm gefundenen Gesetze den Grund zur modernen Atomtheorie.

[3] Amadeo Avogadro di Quaregna e Ceretto (1776–1856), bedeutender italienischer Naturforscher, Professor der Physik in Turin

deren es so viel Arten wie Elemente gibt. Eine Umwandlung eines Atoms in ein anderes ist auf dieser Grundlage unvorstellbar.

Über die Größe der Atome konnten zunächst keine Angaben gemacht werden. Man lernte jedoch, die Massen der verschiedenen Atome miteinander zu vergleichen. Aus Zweckmäßigkeitsgründen setzte man in der Chemie für die Masse eines Atoms Sauerstoff die Zahl 16 fest und bezeichnete sie als das *Atomgewicht*[1] des Sauerstoffs.

Wegen der praktischen Bedeutung dieser als Atomgewicht bezeichneten Verhältniszahlen ist eine internationale Atomgewichtskommission gebildet worden, die die Atomgewichte mit immer verfeinerten Methoden nachprüft und jedes Jahr verbesserte Tafeln mit Atomgewichten herausgibt. Die Genauigkeit erstreckt sich heute meist auf die vierte und in manchen Fällen bis auf die sechste Dezimalstelle.

2. Moleküle. *Avogadro* hat auch die Vorstellung entwickelt, daß die Atome der meisten gasförmigen Grundstoffe zu größeren Gebilden zusammentreten. Auf Grund der Gewichts- und Volumverhältnisse der Gase erkannte er, daß die kleinsten Teile der Gase vielfach nicht die Atome sind, sondern *Vereinigungen von Atomen zu größeren Teilchen*, die er **Moleküle** nannte. Die nähere Begründung für diese Tatsache gibt der Chemieunterricht.

So bestehen die Gase Wasserstoff, Sauerstoff, Chlor aus Molekülen, die sich aus zwei Atomen aufbauen. Ihre chemischen Bezeichnungen sind H_2, O_2, Cl_2. Demgegenüber treten die Edelgase atomar auf.

Man darf aber nicht, wie es vielfach üblich ist, behaupten, daß schlechthin alle Stoffe aus Molekülen bestehen. An einem Beispiel sei gezeigt, daß der Molekülbegriff, der aus den Erscheinungen der Gase und Lösungen entwickelt wurde und bei ihnen unentbehrlich ist, bei festen kristallinischen Stoffen seinen Sinn verlieren kann. Für das Natriumchlorid hat sich bei Strukturuntersuchungen mit Hilfe von Röntgenstrahlen folgender *Gitteraufbau* ergeben (Abb. 139/1).

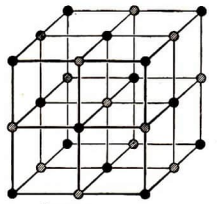


Abb. 139/1
Ionengitter eines Kochsalzkristalls

Jedes Teilchen steht in gleichen Beziehungen zu den benachbarten Teilchen der anderen Art. Irgendwelche Einzelmoleküle lassen sich nicht abgrenzen. Insbesondere sind die Einzelmoleküle NaCl, die man gemeinhin als Natriumchloridmoleküle bezeichnet, im Kristall nicht vorhanden, obwohl sie beim Verdampfen festgestellt werden können.

Wollte man ein Elementarwürfelchen als Molekül herausgreifen, so müßte ihm die Formel Na_4Cl_4 zugesprochen werden. Aber jedes solches Herauslösen aus dem Gitterverband würde ganz willkürlich erfolgen.

Wenn Moleküle nachgewiesen werden können, ist das *Molekulargewicht gleich der Summe der Atomgewichte.*

[1] In der Chemie ist es üblich, unter dem Wort Atomgewicht die relative Massenzahl des Atoms zu verstehen. Nach physikalischem Sprachgebrauch müßte man besser von Atommasse sprechen; doch soll an dem in der Chemie üblichen Ausdruck nichts geändert werden.

3. Ionen. Früher haben wir gelernt, daß Salze, Säuren und Basen beim Lösen in Wasser in Teilchen, Atome und Atomgruppen, zerfallen, die elektrisch geladen sind (vgl. LB 10, § 55, 2). Man nennt die sich bildenden Teilchen **Ionen.** So zerfällt z. B. Ammoniumchlorid in komplexe Ammoniumionen und Chlorionen:

$$(NH_4Cl) \rightleftarrows (NH_4)^+ + Cl^-.$$

Die Ionen sind mit den frei beweglichen Molekülen in Gasen vergleichbar. Mit Hilfe der Röntgenspektralanalyse hat man nachgewiesen, daß es feste Körper gibt, die aus Ionen aufgebaut sind, die sogenannten *Ionenkristalle.* So bedeuten im Raumgitter des Natriumchlorids die angegebenen Punkte die Ladungsschwerpunkte von Na- und Cl-Ionen. Ein Salzkristall erweist sich demnach als Ionengitter, auf das der Molekülbegriff nicht anwendbar ist. Elektrostatische Kräfte sind die Ursache eines solchen Gefüges. Beim Verdampfen eines Salzes entsteht ein Gas, dessen Teilchen aus Paaren positiver und negativer Ionen zusammengesetzt sind. Solche Teilchen sind als Moleküle aufzufassen und werden als *Dipole* bezeichnet. Beim Abkühlen des Gases lagern sie sich wieder zu einem Gitter zusammen.

Bei Stoffen, die bei niedrigen Temperaturen verdampfen, kann man die im Gaszustand auftretenden Moleküle auch als Einheiten im Gitterbau des festen Zustandes wiedererkennen. Das gilt für alle Stoffe, die bei gewöhnlicher Temperatur gasförmig sind. Aber auch einzelne schwerer verdampfbare Stoffe, beispielsweise Zinnchlorid $SnCl_4$, zeigen ein Molekülgitter.

4. Fragen und Aufgaben:

1. Kennzeichnen Sie die Atomlehre des Altertums und des beginnenden 19. Jahrhunderts!
2. Warum kann der Molekülbegriff auf das Kochsalz nicht angewandt werden?
3. Welche Beziehung besteht zwischen dem Molekular- und dem Atomgewicht?
4. Wodurch unterscheidet sich ein Ionengitter von einem Atomgitter?

§ 30. Der zusammengesetzte Bau der Atome

1. Die Entdeckung der Bausteine der Atome. Die Erforschung des Atombaus wurde im Zusammenhang mit der genauen Kenntnis der Kathodenstrahlen möglich. Die moderne Atomtheorie war auf chemischen Erfahrungen aufgebaut worden (*Dalton*), der Atomismus der Elektrizität gründete sich auf elektrochemische Erfahrungen (*Faraday*). *Helmholtz* erkannte, daß sich die Elektrizität aus Elementarteilchen zusammensetzt. *Philipp Lenard*[1] gelang der Nachweis, daß *Kathodenstrahlen Korpuskularstrahlen solcher negativer Elementarteilchen, der Elektronen, sind.* Die gleichen allerdings sehr langsamen Elektronen wies er beim lichtelektrischen Effekt nach. Sie stammen aus den Atomen der belichteten Metallplatten; demnach war der Schluß berechtigt, daß Elektronen Bestandteile der Metallatome sind.

[1] Philipp Lenard (1862–1947), Professor der Physik in Heidelberg, erhielt 1905 den Nobelpreis für seine Arbeiten über die Kathodenstrahlen

Die weiteren Erkenntnisse wurden aus Versuchen gewonnen, bei denen man Kathodenstrahlen in verschiedene Stoffe eindringen ließ. Dazu war es nötig, die Kathodenstrahlen aus dem Entladungsrohr ins Freie gelangen zu lassen. Dies ermöglichte *Lenard* dadurch, daß er die Vakuumröhre gegenüber der Kathode mit mehreren 1,7 mm weiten Öffnungen versah. Er kittete darüber eine fehlerfreie Aluminiumfolie in der Stärke von 1 bis 2 μ, die dem von außen wirkenden Luftdruck standhielt (Abb. 141/1).

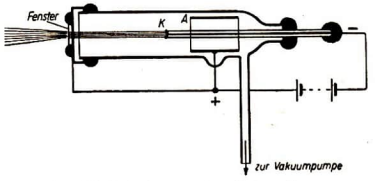


Abb. 141/1. Entladungsröhre mit Lenardfenster

Die experimentelle Erfahrung, daß die von der Kathode geradlinig fortfliegenden Elektronen das Aluminiumhäutchen durchdringen, ist bereits sehr aufschlußreich. Sie müssen durch mindestens 10000 Atomschichten hindurchgegangen sein. Es ist unwahrscheinlich, daß sie durch lauter Lücken geschlüpft sind; denn diese müßten dann ganz geradlinig angeordnet sein. Wahrscheinlicher ist es, daß die Elektronen eine Menge von Atomen durchquert haben. Dann können diese aber nicht undurchdringlich sein. Man kann sie sich aber auch nicht zerspalten vorstellen, wenn man an der ursprünglichen Annahme des unteilbaren Teilchens festhält. Vor dem Fenster in der Luft bilden die Strahlen kein paralleles Bündel, sondern sie sind nach allen Seiten diffus zerstreut und auf eine Entfernung von einigen Zentimetern wahrnehmbar. Das zeigt sich auch, wenn die Strahlen in einen Raum mit verdünnter Luft eintreten. Demnach müssen die Moleküle oder Atome bereits Hindernisse für die Kathodenstrahlen sein.

Ein lehrreicher Versuch zeigt aber, daß die Streuung nicht immer auftritt (Abb. 141/2). Läßt man die Elektronen durch das Lenardfenster in einen mit Wasserstoff von 40 Torr gefüllten Raum eintreten, in dem vor dem Fenster ein Schirm mit Loch aufgestellt ist, so tritt die Abweichung von der geraden Linie erst nach etwa 10 cm auf. Nach der kinetischen Gastheorie treffen die Elektronen unter den genannten Versuchsbedingungen schon nach 0,02 mm auf ein Molekül. Tausende von Molekülen sind also durchquert worden, ohne daß die Ausbreitung der Strahlen merklich beeinflußt worden ist. Mit allmählich zunehmender Dicke der durchstrahlten Schicht lassen sich keine Elektronen mehr nachweisen. Man sagt: Sie werden *absorbiert*.

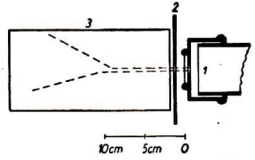


Abb. 141/2. Streuung von Elektronenstrahlen in Wasserstoff
1 Lenardfenster, *2* Schirm mit Blende, *3* Gasbehälter

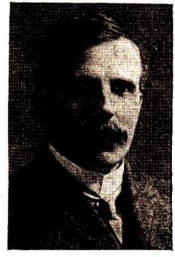
Systematische Untersuchungen der Absorption führten zu einem wichtigen Ergebnis:

Die undurchdringlichen, absorbierenden Querschnitte aller Atome sind für sehr schnelle Elektronen, die $\frac{9}{10}$ *der Lichtgeschwindigkeit erreichen, außer-*

ordentlich klein. Ihre Summe ist nur der $3 \cdot 10^6$-te Teil der aus der kinetischen Gastheorie berechneten Querschnitte, die sich bei der dort vorausgesetzten gegenseitigen Undurchdringlichkeit der Atome und Moleküle ergeben.

Lenard schloß 1903 daraus, daß der größte Teil des Atominnern leer ist. Er berechnete, daß in einem Volumen V nicht mehr als 10^{-9} des Volumens V an undurchdringlicher Substanz vorhanden ist. In 1 m³ Platin, das außerordentlich dicht erscheint, ist also höchstens 1 mm³ undurchdringliches Volumen. *Rutherford* hat das einmal scherzhaft so ausgedrückt, daß die Atome in der Hauptsache „aus nichts" bestehen.

2. Verfahren zur Beobachtung und Zählung von α-Teilchen. Durch neue experimentelle Erfahrungen wurde 1913 der englische Physiker *Ernest Rutherford*[1] zu ähnlichen, aber vertieften Auffassungen geführt. Sie stützen sich auf Beobachtungen beim Durchgang von α-*Strahlen* durch einen Stoff. Die α-Strahlen sind sehr schnelle ionisierte Heliumatome mit zwei positiven Elementarladungen; wir werden über sie Näheres bei der Behandlung der Radioaktivität in § 37 und in § 38 erfahren.



Ernest Rutherford (1871—1937)

Wir lernen zunächst Verfahren zur Beobachtung und Zählung solcher und anderer *Elementarteilchen* kennen.

a) Der Szintillationsschirm. Bei dem ältesten Beobachtungsverfahren verwendet man einen mit Bariumplatincyanür oder Zinksulfid bestrichenen Leuchtschirm, der beim Auftreffen von α- und Elektronenstrahlen genauso phosphoresziert wie bei Röntgenlicht. Wird ein solcher Schirm durch eine Lupe oder ein lichtstarkes Mikroskop im Dunkeln beobachtet, so werden die einzelnen eindringenden α-Teilchen als Lichtblitze, *Szintillationen*[2], wahrgenommen. Es ist dabei möglich, diese zu zählen. Das Auge ermüdet allerdings sehr rasch. Neuerdings sind *Szintillationszähler* entwickelt worden, die es ermöglichen, schwächste Lichtblitze, die mit einem Zeitunterschied der Größenordnung 10^{-9} s aufeinander folgen, sicher zu registrieren.

b) Das photographische Verfahren. Es wird dadurch ermöglicht, daß jedes α-Teilchen genau wie das Licht die getroffenen Bromsilberteilchen entwicklungsfähig macht. Man mißt die Bahnen streifend eingefallener α-Teilchen unter einem Mikroskop aus und kann so die Reichweite der Teilchen in der photographischen Schicht bestimmen.

c) Das Zählrohr. Heute wird meist das *Geiger*[3]*-Müllersche Zählrohr* verwendet. Es besteht aus einem mit verdünntem Gas gefüllten dünnwandigen Metallrohr

[1] Ernest Rutherford (1871–1937), ein bedeutender englischer Naturforscher, Professor in Cambridge. Er machte grundlegende Entdeckungen zum Bau der Atome und erhielt 1908 den Nobelpreis.

[2] scintílla (lat.) = der Funke

[3] Hans Geiger (1882–1945), Schüler und Assistent Rutherfords, zuletzt Professor in Berlin

oder einem mit einem Metallbelag versehenen Glasrohr, durch das axial ein dünner Draht gespannt ist (Abb. **143**/1). Dieser ist gegen das Gehäuse auf etwa 1200 Volt aufgeladen, so daß gerade noch keine selbständige Entladung eintritt. Schnelle Teilchen vermögen die Wandung zu durchdringen und ionisieren das Gas. In dem elektrischen Felde, besonders in der Nähe des Drahtes, werden die Ionen so stark beschleunigt, daß sie beim Zusammenstoß mit den Atomen des Gases wiederum Ionen bilden. Die sich im Bruchteil einer Sekunde bildende Aufladung fließt über einen sehr hohen Widerstand zur Erde ab. Der am Widerstand entstehende Spannungsstoß wird über einen Kondensator einem Verstärker und einem Lautsprecher oder einem Zählwerk zugeführt (Abb. **143**/2).



Abb. **143**/1. Schematische Wiedergabe eines Zählrohres

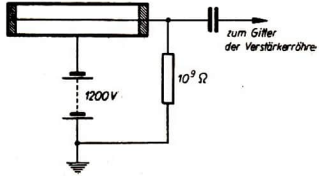


Abb. **143**/2. Schaltung eines Zählrohres

Neuerdings verwendet man auch *Kristallzähler*. Die Ionisation löst im Kristall Elektronen ab, die in einem elektrischen Felde nach der Anode wandern. Nach Verstärkung werden die Stromstöße registriert.

d) Die Wilsonsche Nebelkammer. Ein sehr einfacher Versuch zeigt die Grundlage des Verfahrens.

In einen Kolben füllt man etwas Wasser und bläst ein wenig Rauch hinein. Dann verschließt man den Kolben mittels eines Stopfens, durch dessen Bohrung ein mit einem Hahn versehenes Glasrohr führt. Durch das Rohr bläst man kräftig Luft ein und verschließt dann sofort den Hahn. Durch Schütteln und unter Umständen durch leichtes Erwärmen sorgt man dafür, daß sich der Luftraum mit Wasserdampf sättigt. Öffnet man dann rasch den Hahn, so zeigt sich deutliche Nebelbildung (Abb. **143**/3). Bläst man keinen Rauch ein, so tritt die Nebelbildung nicht oder nur sehr schwach ein. Durch die plötzliche Entspannung tritt Abkühlung und Übersättigung der Luft mit Wasserdampf ein. Die feinen Rauchteilchen wirken als Kondensationskerne, an denen sich kleine Wassertröpfchen bilden.

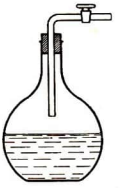


Abb. **143**/3. Vorversuch zur Nebelkammer

Ebensolche Kondensationskerne sind Ionen, die durch α-Strahlen oder Elektronen erzeugt werden. Der englische Physiker *Wilson*[1] hat 1912 die ersten Nebelkammern gebaut. Sie bestehen meist aus zylindrischen Glasgefäßen, in denen ein mit Wasserdampf gesättigter Raum durch Bewegung eines dicht schließenden Kolbens oder einer Membran plötzlich

[1] Charles Thomson Rees Wilson (geb. 1869), ein bedeutender englischer Physiker, Professor in Cambridge, bekannt durch die von ihm geschaffene Nebelkammer. Er erhielt 1927 den Nobelpreis.

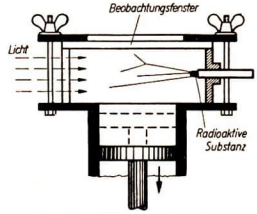
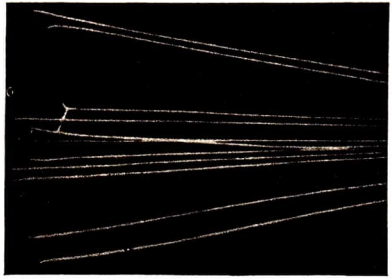


Abb. 144/1. Wilsonsche Nebelkammer (schematisch)

vergrößert wird (Abb. 144/1). Die Abkühlung darf nicht so weit gehen, daß Nebelbildung allgemein eintritt. Durchquert bei der Entspannung ein schnelles Teilchen die Kammer, so wird die Spur der dabei erzeugten Ionen durch deutliche Nebelbahnen sichtbar, da sich die Ionen nicht sofort verschieben. Die Kammer wird von der Seite beleuchtet. Die Tröpfchen zerstreuen das Licht, so daß man die Bahnen durch die Deckplatte der Kammer hindurch photographieren kann (Abb. 144/2).

Abb. 144/2
Nebelbahnen in einer Wilsonschen Nebelkammer



3. Fragen:

1. Welche Beobachtungen wiesen auf den zusammengesetzten Bau des Atoms hin?
2. Welche Verfahren zur Beobachtung von α-Teilchen kennen Sie?
3. Zeichnen Sie die Schaltung eines Zählrohres!

§ 31. Das Rutherfordsche Atommodell

1. Atomkern und Elektronenhülle. Die Nebelkammer vermag die Bahnen der schnellen Teilchen sichtbar zu machen. *Rutherford* und seine Mitarbeiter haben damit begonnen, Zehntausende von Beobachtungen und Photographien der Spuren von α-Teilchen genau zu studieren. Die übergroße Mehrzahl der Fälle zeigten geradlinige Spuren, aber bei einigen unter rund 8000 Teilchen traten plötzliche Ablenkungen bis zu 180° gegen die Strahlenrichtung auf. Ein berühmtes Bild einer Nebelkammeraufnahme zeigt Abb. 144/3.

Rutherford zog daraus folgende Schlüsse: Die sehr große Anzahl der geradlinigen Spuren zeigt, daß die α-Teilchen Zehntausende von Atomen ohne Ablenkung durchqueren. Somit ist, wie schon die Kathodenstrahl-

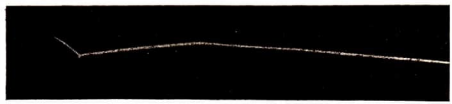


Abb. 144/3. Knickung der Bahn eines α-Teilchens

versuche lehrten, *die Masse eines Atoms nicht über sein gesamtes Volumen verteilt. Rutherford* dachte sich die undurchdringlichen Teile eines Atoms zu einem Kern vereinigt. Die beobachteten Ablenkungen der positiv geladenen α-Teilchen werden auf die Abstoßung durch die ebenfalls positiven Kerne zurückgeführt. Die Ablenkungen sind je nach der Entfernung, in der das Teilchen am Kern vorbeifliegt, verschieden stark (Abb. 145/1). Ablenkungen unter großem Winkel sind nur möglich, wenn α-Teilchen in Kernnähe vorbeifliegen; das ist sehr selten, da die Kerne nur einen winzigen Bruchteil des Raumes einnehmen. Schematisch wird die Ablenkung von α-Teilchen durch einen Kern in Abb. 145/1 dargestellt. Die genaue Durchrechnung ergab, daß der Durchmesser des Kernes in der Größenordnung von 10^{-13} bis 10^{-12} cm liegt. Die Ablenkungsmessungen ermöglichen es auch, die Größe der in den Kernen enthaltenen Ladungen zu ermitteln.



Abb. 145/1. Ablenkung eines α-Teilchens durch einen Kern (schematisch)

Ein Atomkern enthält eine Zahl von positiven Elementarladungen, die gleich ist seiner Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente.

Genaueres darüber werden wir in § 35, 3 kennenlernen.

Da die Atome elektrisch neutral sind und Elektronen als Bestandteile der Materie erwiesen waren, so nahm *Rutherford* an, daß sich die Elektronen außerhalb des Kernes in einem Abstand von der Größenordnung 10^{-8} cm befinden. Ihre Anzahl muß gleich der Anzahl der positiven Kernladungen sein, damit das Atom nach außen hin neutral wirkt. Sie können nicht ruhen; denn dann würden sie in den Kern stürzen. Man vermutete, daß sie sich in Kreisen oder Ellipsen bewegen, in deren einem Brennpunkt sich der Kern befindet. Ihre Geschwindigkeit wird so groß angenommen, daß die Anziehungskraft des Kerns durch die Fliehkraft des Elektrons ausgeglichen wird.

Diese anschauliche *Modellvorstellung der Atome* wirkt zunächst sehr verlockend, weil sie an die Verhältnisse in unserem Sonnensystem erinnert. Die Elektronen entsprechen den Planeten, die deshalb nicht in die Sonne fallen, weil die Fliehkräfte der Schwereanziehung das Gleichgewicht halten. Ein α-Teilchen, das einen Stoff durchfliegt, kann mit einem Kometen verglichen werden. Dieser wird von den Planeten und Planetoiden des Sonnensystems nur wenig aus seiner geraden Bahn abgelenkt. In Sonnennähe erfährt er aber eine jähe und starke Ablenkung, so daß er eine Hyperbelbahn beschreibt. Solche Bahnen zeigt die Abb. 145/1 bei der Ablenkung von α-Teilchen.

2. Mängel des Rutherfordschen Modells. Das *Rutherfordsche Atommodell* führt jedoch, so einleuchtend es auch zunächst scheint, zu Widersprüchen mit der Erfahrung. Ein um einen Punkt kreisendes Elektron führt eine beschleunigte Bewegung aus. Es ist von einem ständig wechselnden elektromagnetischen Felde umgeben, dessen Veränderungen sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Dadurch verringert sich ständig seine kinetische Energie, so daß es schließlich in den Kern stürzen müßte, dem es sich auf spiraliger Bahn nähert. Tatsächlich geschieht das nicht. Gibt es vielleicht Ausnahmen von den Gesetzen der Elektro-

dynamik? Wenn ein umlaufendes strahlendes Elektron sich dem Kern nähern würde, so müßte seine Umlaufsfrequenz wachsen. Die ausgesandte Lichtstrahlung müßte also ein veränderliches Spektrum mit stetig wachsender Frequenz ergeben. Wir wissen aber aus der Optik, daß das Licht einer bestimmten Atomart scharfe einzelne Spektrallinien liefert. Also scheint es trotz Energieabgabe auf seiner Bahn zu bleiben. Wenn auch das Rutherfordsche Atommodell das Verhalten der Atome in mancher Hinsicht gut wiedergibt, so bestehen doch andererseits noch schwerwiegende Widersprüche zur Wirklichkeit. Offenbar bedarf das Atommodell noch einer Umgestaltung, wenn es mit der experimentellen Erfahrung in Einklang stehen soll. Wir werden darüber im § 34 Näheres erfahren.

3. Fragen:

1. Auf welche Erfahrungen gründete Rutherford die Lehre vom Atomkern?
2. Von welcher Größenordnung ist der Durchmesser der Atomkerne?
3. Zu welchen Widersprüchen führt das Rutherfordsche Atommodell?

X. Quantentheorie der Atome

§ 32. Gesetze der Linienspektren

1. Die Balmergleichung des Wasserstoffspektrums. Die stärksten Antriebe erhielt die Weiterentwicklung der Atomtheorie auf dem Gebiet der Spektralforschung. Seit 1860 sind mit zunehmender Genauigkeit die Spektrallinien aller verfügbaren glühenden Gase untersucht worden. Jede einzelne Spektrallinie entspricht einer genau bestimmbaren Schwingungszahl, deutet daher auf periodische Bewegungen im Atom hin.

Um eine Ordnung in die Vielzahl der Linien zu bringen, hat man zunächst eine Analogie zu den Tönen gesucht. Der Ton einer Saite oder einer Luftsäule ist uns als zusammengesetzter Klang bekannt, der aus Grundton und Obertönen besteht. Die Schwingungszahlen der harmonischen Obertöne erweisen sich als ganzzahlige Vielfache der Schwingungszahl des Grundtones. Bei der Untersuchung der Linienspektren konnte keine derartige Gesetzmäßigkeit der Linienordnung festgestellt werden.

Es ist das Verdienst des Baseler Lehrers *Johann Jakob Balmer*[1], zum ersten Male 1885 eine *Gleichung für die Wellenlängen der Spektrallinien* des Wasserstoffes gefunden zu haben. Sie bildet auch heute noch die sichere Grundlage für die Theorie der Spektrallinien.

Im sichtbaren Spektrum waren zunächst nur die von *Fraunhofer* entdeckten Linien bekannt, die heute als H_α, H_β, H_γ, H_δ bezeichnet werden. Die erste liegt im Rot, die zweite im Blau, die dritte und vierte findet man im Violett. Ihre Wellenlängen wurden gemessen zu 6562,79 Å, 4861,33 Å, 4340,47 Å, 4101,74 Å.

Balmer zeigte nun, daß die Wellenlängen der vier Linien sich in der Form

$$\frac{9}{5}k, \quad \frac{16}{12}k, \quad \frac{25}{21}k, \quad \frac{36}{32}k$$

wiedergeben lassen, worin k die Konstante 3645,98 Å bedeutet. Die Zähler sind gleich 3^2, 4^2, 5^2, 6^2; die Nenner gleich den Quadratdifferenzen $3^2 - 2^2$, $4^2 - 2^2$, $5^2 - 2^2$, $6^2 - 2^2$.

Balmer konnte demnach seine Gleichung folgendermaßen schreiben:

$$\lambda = k \cdot \frac{m^2}{m^2 - n^2},$$

wobei $n = 2$, $m = 3, 4, 5, 6$ ist.

Bei geeigneter Verdünnung des Wasserstoffs in einer Leuchtröhre fand man eine fünfte Linie H_ε im äußersten Violett. Ihre Wellenlänge paßt in die Gleichung, wenn $m = 7$ gesetzt wird.

Später wurden im Ultraviolett weitere 24 Spektrallinien des Wasserstoffs entdeckt.

---

[1] Johann Jakob Balmer (1825–1898), Lehrer am Gymnasium zu Basel

Ihre Wellenlängen genügen der *Balmerschen Gleichung*, wenn $m = 8, 9, \ldots, 31$ gesetzt wird.

Diese 29 Linien nennt man eine *Serie*. Es erwies sich als vorteilhaft, statt der Wellenlänge die Schwingungszahlen einzuführen. Bekanntlich ist

$$\frac{c}{\lambda} = f.$$

In der fachwissenschaftlichen Literatur über die Atomphysik ist es üblich, die Frequenz mit ν[1] zu bezeichnen. Die Gleichung nimmt daher die Form

$$\frac{c}{\lambda} = \nu$$

an.

Wählen wir für die Umrechnung wie vorhin die Längeneinheit 10^{-8} cm = 1 Å, so ist

$$c = 3 \cdot 10^{10}\ \text{cm} \cdot \text{s}^{-1} = 3 \cdot 10^{18}\ \text{Å} \cdot \text{s}^{-1}$$

und

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{3 \cdot 10^{18}\ \text{Å} \cdot \text{s}^{-1}}{3645{,}98\ \text{Å} \cdot \left(\frac{m^2}{m^2 - 2^2}\right)} \\ &= \frac{3 \cdot 10^{18}}{3645{,}98} \cdot \left(1 - \frac{2^2}{m^2}\right) \text{s}^{-1} \\ &= \frac{3 \cdot 10^{18} \cdot 4}{3645{,}98} \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right) \text{s}^{-1} \\ &= 3{,}290 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right) \text{s}^{-1}.\end{aligned}$$

2. Die Rydbergfrequenz[2]. Der Faktor $3{,}290 \cdot 10^{15}\ \text{s}^{-1}$ trägt das Formelzeichen R und wird **Rydbergfrequenz** genannt, da der schwedische Physiker *Rydberg* zuerst 1890 erkannte, daß ihr eine Bedeutung für alle Spektren zukommt. Für die *Balmerserie* gilt somit die Gleichung

$$\nu = R \cdot \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Balmer hatte sich schon überlegt, ob es nicht auch Linien gibt, für die in der Balmergleichung die 2 durch die Zahl 3 zu ersetzen ist. Die Frage konnte zu seinen Lebzeiten experimentell nicht beantwortet werden. Erst 1908 gelang es dem deutschen Experimentalphysiker *Friedrich Paschen*[3], im Ultrarot des Wasserstoffspektrums Linien mit den Wellenlängen 18751,1 Å und 12818,1 Å aufzufinden, die genau den Gleichungen

$$\nu = R \cdot \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2}\right)$$

und

$$\nu = R \cdot \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{5^2}\right)$$

entsprechen.

[1] ν = griech. Buchstabe (sprich: nü)

[2] Johannes Robert Rydberg (1854–1919), ein bedeutender schwedischer Physiker

[3] Friedrich Paschen (1865–1947), Professor der Physik in Tübingen, Bonn und Berlin

Schließlich wurden in den Jahren 1906–1914 von dem englischen Physiker *Lyman* Linien nachgewiesen, für die in der Balmergleichung die Zahl 1 im ersten Nenner auftritt. Die kleinste gemessene Wellenlänge $\lambda = 1215{,}7$ Å entspricht dann der Gleichung

$$\nu = R \cdot \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right).$$

Damit war die endgültige Gestalt der *Balmergleichung für das Wasserstoffspektrum* gewonnen:

$$\nu = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right).$$

Sie wurde durch später gefundene und nach ihren Entdeckern benannte Serien bestätigt.

Es sind dies 1922 *Bracketserie* für $n = 4,\ m = 5,\ 6,\ 7,\ \ldots$
1924 *Pfundserie* für $n = 5,\ m = 6,\ 7,\ \ldots$

In spektroskopischen Tabellen ist es heute üblich, nicht $\nu = \frac{c}{\lambda}$ anzugeben, sondern die Anzahl von Wellenlängen, die auf 1 cm des Wellenzuges entfallen, die *Wellenzahl* $\frac{1}{\lambda}$ cm^{-1}; denn λ ist genauer meßbar als c. Da $\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$ ist, muß die Balmergleichung durch c dividiert werden. Man erhält

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{R}{c} \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$$

oder

$$\frac{1}{\lambda} = \nu' = R' \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) = \frac{R'}{n^2} - \frac{R'}{m^2}.$$

Hierin sind $\nu' = \frac{\nu}{c}$ und $R' = \frac{R}{c} = 109737\ \mathrm{cm}^{-1}$.

R' wird als **Rydbergkonstante** bezeichnet.

Die Werte $\frac{R'}{n^2}$ und $\frac{R'}{m^2}$ bezeichnet man als *Terme*. Der zweite Term, der eine ganze Reihe von Werten annimmt, heißt *Laufterm*.

Spätere Untersuchungen haben gezeigt, daß die Linien des Balmerspektrums eine Feinstruktur besitzen, das heißt, sie sind in zwei dicht beieinander liegende Linien, *Dubletts*[1], gespalten.

Eine gesetzmäßige Anordnung der Spektrallinien in Serien wurde noch für viele andere Atome gefunden.

3. Fragen und Aufgaben:

1. Unterscheiden Sie die Schwingungs- und Wellenzahl!
2. Geben Sie eine Form der Balmergleichung an!
3. Welche Serien im Wasserstoffspektrum kennt man?

§ 33. Die Grundlagen der Quantentheorie der Atome

So weit gingen die Erkenntnisse um 1913. Eine Fülle von experimentellen Forschungen über Spektrallinien, in denen rein empirisch Gesetzmäßigkeiten gefunden worden waren, lag vor. Aber keine der Spektralgleichungen ließ sich

[1] Dublette = etwas doppelt Vorhandenes

aus den vorhandenen physikalischen Kenntnissen ableiten. Die Widersprüche im Rutherfordschen Atommodell sind uns bekannt. Man konnte aber das Modell nicht einfach fallen lassen, da es einen Teil der Realität in befriedigender Weise wiedergab. Den entscheidenden Schritt zur Verbesserung des Rutherfordschen Atommodells tat der dänische Physiker *Niels Bohr*[1].

Um diesen Schritt zu verstehen, müssen wir uns mit grundlegend neuen Gedanken vertraut machen, die seit 1900 in die Physik eingeführt wurden.

1. Die experimentellen Grundlagen der Quantentheorie. Wir haben schon früher die Photozellen, die auf dem lichtelektrischen Effekt beruhen, kennengelernt (vgl. LB 11, § 29). Jetzt werden wir uns genauer mit ihnen befassen. Ein zunächst unerwartetes Ergebnis erhält man, wenn man eine monochromatische Einstrahlung benutzt und die Geschwindigkeit der ausgelösten Elektronen mißt.

Allgemein wird die Geschwindigkeit eines Teilchens mit der Masse m und der Ladung e, das aus der Ruhe durch die Spannung U beschleunigt wird, durch folgende Gleichung bestimmt:

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = k \cdot e \cdot U.$$

Die Größe der Konstanten k hängt von den benutzten Einheiten ab. Die rechte Seite ermöglicht die Festsetzung einer Energieeinheit, die die Masse nicht enthält, nämlich

1 Elektronenvolt (eV).

1 eV ist die Energie, die ein mit einer Elementarladung e geladenes Teilchen erhält, wenn es durch die Spannung von 1 Volt beschleunigt wird.

1 eV ist eine sehr kleine Energieeinheit. 10^6 eV nennt man ein **Mega-Elektronenvolt** (1 MeV).

Den Zusammenhang mit anderen Energieeinheiten erhält man, da man die Ladung des Elektrons $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb kennt. Da

$$1\ \mathrm{C} = 1\ \mathrm{As} \quad \text{und} \quad 1\ \mathrm{VAs} = 1\ \mathrm{Ws}$$

ist, so gilt

$$1\ \mathrm{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{Ws} = 1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot 0{,}239\ \mathrm{cal} \approx 3{,}83 \cdot 10^{-20}\ \mathrm{cal}.$$

Will man die Geschwindigkeit messen, mit der Elektronen durch auffallende Strahlung aus einem Metall ausgestoßen werden, so führt die umgekehrte Überlegung zu einer Versuchsanordnung (Abb. 150/1). Durch eine Gegenspannung, die eine Bremsung statt einer Beschleunigung hervorruft, kann man die Anfangsgeschwindigkeit bis zum Werte Null abbremsen.

In einer lichtelektrisch nicht empfindlichen luftleeren Hohlkugel H befindet sich die Kugel K mit lichtelektrisch empfind-

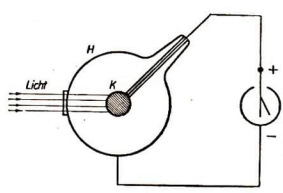


Abb. 150/1. Versuchsanordnung zur Messung der Elektronengeschwindigkeit

[1] Niels Bohr (geb. 1885), Professor in Kopenhagen, 1922 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet

licher Außenschicht. K wird durch ein Fenster mit monochromatischem Licht bestrahlt. Die dadurch aus K losgelösten Elektronen gelangen nach H. Dieser Elektronenstrom wird durch die Aufladung eines Elektrometers angezeigt. Durch die auf H gelangten Elektronen wird ein elektrisches Gegenfeld aufgebaut.

Die Gegenspannung, bei der der Elektronenstrom zu fließen aufhört, mißt somit die Höchstgeschwindigkeit der Elektronen. Dabei zeigt sich, daß die Höchstgeschwindigkeit durch stärkere Einstrahlung in keiner Weise beeinflußt wird. Zu einer bestimmten Wellenlänge gehört eine bestimmte Höchstgeschwindigkeit. Soll diese anwachsen, so ist es erforderlich, Licht von kleineren Wellenlängen, mithin von höherer Frequenz ν_g, die man deswegen auch als *Grenzfrequenz* bezeichnet, auf K zu richten. Unterhalb einer bestimmten Frequenz treten überhaupt keine Elektronen aus.

2. Das Plancksche Wirkungsquantum. Zwischen der Energie der Elektronen und der Frequenz des ausgestrahlten Lichts ergibt sich eine strenge Proportionalität. Bezeichnet man die Energie mit E und die Proportionalitätskonstante mit h, so läßt sich das Ergebnis durch die folgende Gleichung wiedergeben:

$$E = h\,(\nu - \nu_g)$$

oder

$$h = \frac{E}{\nu - \nu_g}.$$

Für die Dimension von h erhält man somit folgende Beziehung:

$$h = \left[\frac{\text{Energie}}{\text{Frequenz}}\right] = \left[\frac{\text{Energie}}{\text{Zeit}^{-1}}\right] = [\text{Energie} \cdot \text{Zeit}].$$

Eine Größe, die diese Dimension besitzt, wird in der Physik als *Wirkung* bezeichnet.

ν ist die bekannte Frequenz der monochromatischen Einstrahlung, beispielsweise gegeben durch eine bestimmte Linie des Spektrums. Die Grenzfrequenz ν_g läßt sich aus zwei Messungen eliminieren. Man ersetzt dazu E durch das Produkt $e \cdot U$ und stellt unter Verwendung der erhaltenen Meßwerte zwei Gleichungen auf:

$$e \cdot U_1 = h \cdot (\nu_1 - \nu_g),$$
$$e \cdot U_2 = h \cdot (\nu_2 - \nu_g).$$

Hierin ist h die einzige Unbekannte, die man aus den Gleichungen errechnen kann. Wird die zweite Gleichung von der ersten subtrahiert, so ergibt sich

$$e\,(U_1 - U_2) = h\,(\nu_1 - \nu_2)$$

oder

$$h = e \cdot \frac{U_1 - U_2}{\nu_1 - \nu_2}.$$

h hat sich als eine Naturkonstante erwiesen und wird das **elementare Wirkungsquantum** genannt. Es wurde in einem anderen Zusammenhange im Jahre 1900 von *Max Planck* entdeckt. Als genauester Wert für h gilt heute

$$h = 6{,}623 \cdot 10^{-34}\ \text{Watt} \cdot \text{s}^2$$

oder

$$h = 6{,}623 \cdot 10^{-27}\ \text{erg} \cdot \text{s}.$$

Sehr bemerkenswert ist ein weiteres Ergebnis der Versuche. Liegt die Frequenz der Einstrahlung höher als die Grenzfrequenz, so tritt der lichtelektrische Effekt auch bei schwächster Lichtintensität sofort ein. Man hat keine auch noch so kurze Zeitdifferenz zwischen dem Beginn der Belichtung und dem Elektronenaustritt messen können.

3. Experimentelle Bestimmung des elementaren Wirkungsquantums h. Man läßt das Licht einer Bogenlampe L durch ein Lichtfilter F, das eine genau festgelegte Lichtfrequenz ν hindurchläßt, auf eine Photozelle fallen. Der erzeugte Photostrom wird durch ein Spiegelgalvanometer A bei Stellung *1* des Spannungsabnehmers gemessen. Durch eine genau zu bestimmende Gegenspannung bei Stellung *2* wird der Ausschlag kompensiert (Abb. 152/1).

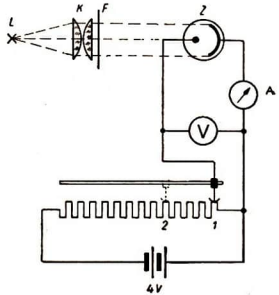


Abb. 152/1. Versuchsanordnung zur Bestimmung des Wirkungsquantums (schematisch)
L Lichtquelle, K Kondensor, F Lichtfilter, Z Photozelle

Es werden zwei Versuche mit verschiedenen Lichtfrequenzen durchgeführt. Dann läßt sich h aus der Gleichung

$$h = e \cdot \frac{U_1 - U_2}{\nu_1 - \nu_2}$$

errechnen.

Beispiel:

$$\lambda_1 = 450\ \mathrm{m\mu},\ \lambda_2 = 500\ \mathrm{m\mu},\ U_1 - U_2 = 0{,}25\ \mathrm{Volt}.$$

Zur Durchführung der Rechnung müssen die Einheiten aufeinander abgestimmt werden. Die Energie wird zunächst in Elektronenvolt eV ausgedrückt. Will man sie in Wattsekunden erhalten, so ist zu beachten, daß die Elementarladung $e \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Amperesekunden ist. Demnach gilt

$$1\ \mathrm{eV} \approx 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{Wattsekunden},$$
$$0{,}25\ \mathrm{eV} \approx 0{,}4 \cdot 10^{-19}\ \text{Wattsekunden}.$$

Da $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ist, gilt

$$\nu_1 - \nu_2 = \left(\frac{c}{4{,}5 \cdot 10^{-5}} - \frac{c}{5 \cdot 10^{-5}}\right) \mathrm{s}^{-1} \approx \frac{3 \cdot 10^{10}}{45 \cdot 10^{-5}}\ \mathrm{s}^{-1} = \frac{10^{15}}{15}\ \mathrm{s}^{-1}.$$

Somit ist $h \approx \frac{0{,}4 \cdot 10^{-19} \cdot 15}{10^{15}} = 6 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{W \cdot s^2}$.

Dieser Wert stimmt der Größenordnung nach gut mit dem oben genannten Wert von h überein.

4. Deutung des experimentellen Befundes. Aus dem experimentellen Ergebnis hat man gefolgert, daß sich der Elektronenaustritt sprunghaft vollzieht.

> **Zur Herbeiführung der Elektronenablösung ist eine ganz bestimmte Energiemenge erforderlich, die nicht aus kleineren Energiemengen zusammengesetzt sein kann.**

Dieser Frage ist eine 1905 von *Albert Einstein* veröffentlichte Arbeit[1] gewidmet.

[1] „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" – heuristisch (aus dem Griechischen) = der Forschung dienend

Einstein nahm an, daß eine Einstrahlung von der Frequenz ν aus einzelnen Energieelementen oder Energiequanten $E = h \cdot \nu$ bestimmter Größe besteht. Dadurch wird verständlich, daß der Elektronenaustritt sofort mit der Bestrahlung einsetzt. Diese einfache Deutung schien ihm aber wenig wahrscheinlich, da offenbar zunächst eine bestimmte Arbeit verrichtet werden muß, wenn das Elektron aus dem Atom befreit werden soll. Nennen wir diese Austrittsarbeit A, so kommen wir zu der Gleichung

$$h \cdot \nu = A + \frac{m \cdot v^2}{2} .$$

Dies entspricht der schon im zweiten Abschnitt benutzten Gleichung

$$E = h \cdot \nu - h \cdot \nu_g = h \cdot (\nu - \nu_g).$$

Daraus folgt, daß Licht von höherer Frequenz wie Ultraviolett oder Röntgenlicht aus kräftigeren Energiequanten $h \cdot \nu$ besteht, die einem Elektron eine größere Geschwindigkeit verleihen. Man muß mit der früher für selbstverständlich gehaltenen Auffassung brechen, daß von einem leuchtenden Punkt das Licht nur in kontinuierlichen Wellen ausgeht. Dann würde sich die Energie auf den wachsenden Kugelflächen immer weiter verteilen; bei größerer Entfernung von einer Strahlungsquelle stünden dann nur noch winzige Energiebeträge zur Verfügung. Im Gegensatz dazu lassen sich die lichtelektrischen Erscheinungen leicht erklären, wenn man sich die Einsteinschen Gedanken zu eigen macht. Sie führten zu folgender Erkenntnis:

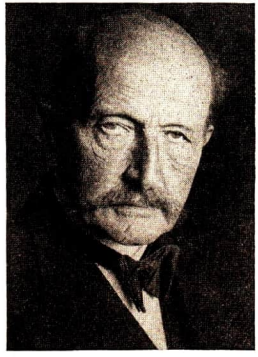
Das Licht besteht aus Energiequanten. Diese übertragen ihre Energie auf die Elektronen.

Einstein bezeichnete diese Energiequanten als *Photonen*.

Der *Quantencharakter der Strahlung* ist seitdem durch viele experimentelle Erfahrungen *gesichert*.

5. Max Planck und Albert Einstein. *Max Planck* wurde am 23. April 1858 in Kiel als Sohn eines Universitätsprofessors geboren, der später nach München berufen wurde. Hier verbrachte *Max Planck* seine Schulzeit und die ersten Universitätsjahre. Schon als Schüler wies er besondere Leistungen in Physik und Mathematik auf. Großes musikalisches Können ließ ihn noch nach Beginn seines mathematisch-physikalischen Studiums schwanken, ob er sich nicht ganz der Musik widmen sollte. Er blieb der Physik treu, ist aber immer auch ein großer Musikkenner und bedeutender Pianist gewesen.

In der Physik fesselte ihn schon als Student die Theorie der Wärme, insbesondere der 2. Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. Darüber promovierte er 1879 in München, nachdem er zwei Jahre in Berlin bei *Helmholtz*



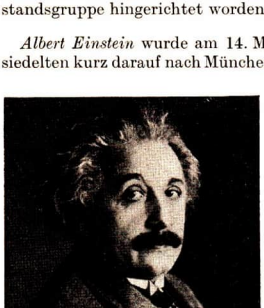
Max Planck (1858–1947)

und *Kirchhoff* studiert hatte. 1885 wurde *Planck* Professor für theoretische Physik in Kiel und 1889 der Nachfolger *Kirchhoffs* in Berlin. Seine wissenschaftliche Arbeit galt besonders den Anwendungen des 2. Hauptsatzes auf neue Gebiete. Von 1896 bis 1900 wandte er sich dabei der Theorie der Strahlung zu. Hier gelang ihm die Ableitung eines alle Fälle umfassenden Gesetzes dadurch, daß er die bis dahin als selbstverständlich angesehene Annahme fallen ließ, die Energie sei stetig veränderlich. *Planck* erkannte, daß *der Energieaustausch bei der Strahlung quantenhaft erfolgt und ein Energiequant durch das Produkt aus einer Konstanten h und der Frequenz ν bestimmt ist.*

Er nannte *h* das *elementare Wirkungsquantum.* Die Entdeckung dieser Größe im Jahre 1900 gilt als der Beginn der neuzeitlichen Physik. Die Anwendung der Quantenlehre auf die Atomphysik hat diese zu ihrer großartigen Entwicklung geführt. 1918 erhielt *Max Planck* den Nobelpreis. In den folgenden Jahren wurde er aller Ehrungen teilhaftig, die einem Gelehrten erwiesen werden können.

In der Zeit des Faschismus ist er für die Erhaltung einer echten wissenschaftlichen Forschung unbeirrbar eingetreten. Sein Sohn ist als Mitglied einer Widerstandsgruppe hingerichtet worden. 1947 starb *Max Planck* in Göttingen.

Albert Einstein wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren. Seine Eltern übersiedelten kurz darauf nach München, wo er seine Kindheit verlebte. Mit 15 Jahren kam er auf das Gymnasium nach Aarau in der Schweiz. In Zürich studierte er Mathematik und Physik bis zum Jahre 1902. *Einstein* hatte die Schweizer Staatsbürgerschaft erworben und wurde am Patentamt in Bern angestellt. In rascher Folge schuf er bedeutende molekularphysikalische Arbeiten über die Brownsche Bewegung, 1905 veröffentlichte er die spezielle Relativitätstheorie. Sie ist maßgebend für Längen- und Zeitmessung und bietet die theoretische Grundlage für die Bewegungsgesetze von Körpern, deren Geschwindigkeit jeden irdischen Erfahrungsmaßstab übersteigt.



Albert Einstein (1879–1955)

Sehr bald wandte *Einstein* die Plancksche Quantentheorie auf das Licht an und schuf die *Lehre von den Lichtquanten.* Von 1909 an war *Einstein* Professor in Zürich, Prag und wieder in Zürich. 1914 wurde er nach Berlin berufen. Während des ersten Weltkrieges und danach suchte er der Verhetzung der Völker entgegenzuwirken.

1933 wurde Einstein durch die Faschisten gezwungen zu emigrieren und ging zunächst nach Belgien und dann nach Amerika. Hier war er längere Zeit als Professor in Princeton tätig. Am 18. April 1955 starb er.

Einstein ist unbeirrbar gegen jede Rassen- und Kriegshetze aufgetreten. Auch für die Ächtung der Massenvernichtungswaffen hat er seine Stimme erhoben.

Die Physik verdankt ihm u. a. schwierige Theorien, die sich auf die *Gravitations-* und *elektromagnetischen Felder* beziehen.

6. Fragen und Aufgaben:

1. Welche Überlegungen führten zur Einführung des Wirkungsquantums?
2. Schildern Sie einen Versuch zur Bestimmung von h!
3. Welche Dimension hat h?
4. Was versteht man unter Photonen?

§ 34. Das Bohrsche Atommodell

1. Das Wasserstoffatommodell. *Niels Bohr* wandte die Erkenntnisse der Quantenphysik zunächst auf das Atommodell des Wasserstoffs an. Er hielt nicht beliebige Kreisbahnen der Elektronen um den Kern für möglich, sondern unterwarf sie besonderen Bedingungen. Auf den Bahnen, die diese Bedingungen erfüllen, sollten die Elektronen umlaufen können, ohne eine Strahlung auszusenden. Mit der Einschränkung auf diese Bahnen waren für die Energie, die Geschwindigkeit und den Impuls des umlaufenden Elektrons nur ganz bestimmte Werte möglich.

Bohr führte zur Auswahl der möglichen beständigen Zustände des Atoms mathematisch formulierbare Bedingungen ein. Er folgerte aus ihnen mit mathematischer Notwendigkeit:

Die Radien der strahlungsfreien Bahnen sind den Quadraten der ganzen Zahlen proportional.

Man bezeichnet diese Zahlen als *Quantenzahlen* (n). Für $n = 1$ erhält man bei den bekannten Werten von e, h, m als kleinsten Radius für eine mögliche Bahn

$$r_{min} = 0{,}53 \cdot 10^{-8}\ \text{cm}.$$

Dieser Wert paßt zu den aus der kinetischen Gastheorie berechneten Werten. Danach ergibt sich Abb. 155/1 als schematisches Bild eines Wasserstoffatoms.

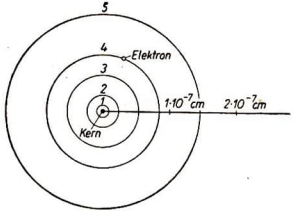


Abb. 155/1
Bohrsches Modell eines Wasserstoffatoms

2. Die Energiezustände des Bohrschen Atommodells. Nun muß die Frage beantwortet werden: Wie geht die Lichtausstrahlung eines Atoms vor sich?

Das geschieht, wenn ein Elektron eine der strahlungsfreien Bahnen verläßt und auf eine energieärmere, kernnähere Bahn übergeht. *Die Energiedifferenz wird als elektromagnetische Welle ausgestrahlt.*

Die *Lichtstrahlung* ist also keine Folge des Umlaufs der Elektronen um den Kern oder einer Schwingung der Elektronen, sondern sie *kommt durch sprunghafte Änderung der Energiezustände* des Atoms zustande.

Geht ein Elektron von einer äußeren auf eine kernnähere Bahn über, so erfolgt die Abstrahlung einer elektromagnetischen Welle.

Die Energieverhältnisse im Atom pflegt man durch ein Stufenschema zu veranschaulichen, wie es die Abbildung für das H-Atom angibt (Abb. 156/1). Die den Termen entsprechenden Energiestufen, die *Energieniveaus*, werden durch horizontale Geraden dargestellt. Die Pfeile stellen die Sprünge des Elektrons zwischen den Stufen dar. Die Sprünge erfolgen bei Energieabgabe nach unten, bei Energieaufnahme nach oben.

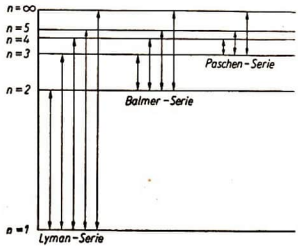


Abb. 156/1. Energiestufen im Wasserstoffatom

Der Quantenzustand mit dem geringsten Energiegehalt wird als *Grundzustand* eines Atoms bezeichnet. Ein Atom, das sich in einem anderen, also einem energiereicheren Zustand befindet, heißt ein *angeregtes Atom*. Beim Übergang aus dem Grundzustand in einen angeregten Zustand wird ein Elektron aus einer inneren Bahn in eine äußere gedrängt. Dies ist nur durch Energiezufuhr von außen möglich, während der umgekehrte Übergang in Gestalt von Licht- oder Röntgenwellen von selbst durch eine Energieabgabe erfolgt. Dabei entsteht eine *Lichtwelle*, wenn der Übergang eines Elektrons von einer äußeren Bahn auf näher zum Atomkern gelegene Bahnen erfolgt. Beim Quantensprung auf die innerste Bahn wird eine *Röntgenwelle* ausgestrahlt.

Die Zahlen n und m der Balmergleichung werden hier einheitlich durch n bezeichnet. Je größer n wird, desto dichter liegen die Stufen. Stellt man die Balmerserie schematisch als ein Linienspektrum dar, so ergibt sich Abb. 156/2.

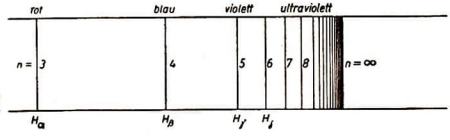


Abb. 156/2
Darstellung der Balmerserie durch ein Linienspektrum

Für $n = \infty$ erhält man die *Seriengrenze* mit dichter Häufung der Linien. Sie entspricht einem Quantensprung aus dem Atom heraus, bei dem ein Elektron das Atom verläßt. Die stationären Zustände des Atoms, wie sie die Bohrsche Spektraltheorie eingeführt hat, sind durch Versuche bestätigt worden.

3. Die Verfeinerung des Wasserstoffatommodells. Die Tatsache, daß die Bohrsche Spektraltheorie auf klassischen und quantentheoretischen Unterlagen aufgebaut ist, daß also im Atominnern ein Teil der klassischen Physik gelten sollte, der andere aber nicht, ließ immer wieder Zweifel an der Richtigkeit der Bohrschen Vorstellungen aufkommen. Man wurde skeptisch, als sich bei der Benutzung von Spektralapparaten mit einem hohen Auflösungsvermögen zeigte, daß die Wasserstofflinien nicht einfach sind, sondern aus dicht beieinander

liegenden Linien bestehen. Es mußte offenbar mehr Bahnen geben, als im Bohrschen Modell vorhanden sind.

So ging man daran, das Modell zu verfeinern. Den Anfang machte *Bohr* selbst. *Er dachte sich den Kern nicht mehr als ruhend, sondern nahm an, daß der Kern und das Elektron sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen.* In den Rechnungen mußte die elektrostatische Anziehung gleich der Fliehkraft des Elektrons und auch des Kerns gesetzt werden. Als Ergebnis fand Bohr, daß die bekannte Rydbergfrequenz R für Wasserstoff einen kleinsten Wert annimmt, sich aber mit wachsendem Atomgewicht einer oberen Grenze nähert. Die Wirklichkeit entsprach den Berechnungen.

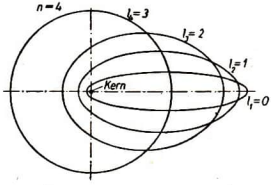


Abb. 157/1
Schematische Darstellung einiger möglicher Elektronenbahnen eines Wasserstoffatoms

Der deutsche Physiker *Arnold Sommerfeld*[1] *löste die Aufgabe, die Dublettstruktur aus einem verfeinerten Modell abzuleiten, indem er Ellipsenbahnen für die Elektronen einführte* (Abb. 157/1). Zur ersten Quantenzahl n, der *Hauptquantenzahl*, fügte er eine zweite Quantenzahl l hinzu, die der Nebenachse der Ellipse quantenmäßige Bedingungen auferlegt. Es erwies sich, daß l nach experimentellen Erfahrungen kleiner als n sein muß. *Friedrich Paschen* konnte zeigen, daß die von Sommerfeld vorausberechneten Linien im Spektrum des Wasserstoffs und des Heliums wirklich vorhanden sind. Dazu traten im Laufe der Zeit noch weitere Verfeinerungen des Atommodells, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann.

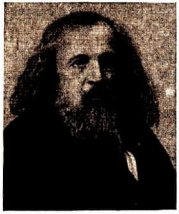
4. Fragen:

1. Auf welchen Grundvorstellungen beruht das Bohrsche Atommodell?
2. Wie erklärt Bohr die Wellenstrahlung eines Atoms?
3. Unter welchen Umständen strahlt ein angeregtes Atom a) eine Lichtwelle, b) eine Röntgenwelle aus?
4. Welche Verfeinerungen, die das Bohrsche Atommodell erfuhr, sind Ihnen bekannt?

§ 35. Das Periodensystem der Elemente

1. Die Ordnung der Elemente nach dem Atomgewicht. Nach den Erfolgen beim Wasserstoffspektrum und den ihm ähnlichen Spektren stand die Bohrsche Theorie vor der Aufgabe, die Spektren der übrigen Elemente zu erklären. Wenn sie gelöst wurde, konnten Einblicke in den Bau der Stoffe und die Kenntnis der chemischen Bindekräfte gewonnen werden. Die Chemie hatte bereits Gesetzmäßigkeiten in den Grundstoffen entdeckt, die eine Anordnung der Elemente im Periodensystem ermöglichte. Sie mußten in Beziehung zu den neuen quantentheoretischen Kenntnissen des Atombaus gebracht werden.

[1] Arnold Sommerfeld (1868–1951), Professor in München, einer der führenden theoretischen Physiker



Dimitri Iwanowitsch Mendelejew (1834—1907)

Schon 1869 nahmen der russische Chemiker *Mendelejew*[1] und unabhängig von ihm der deutsche Chemiker *Lothar Meyer*[2] die übersichtliche Anordnung aller damals bekannten Elemente nach steigenden Atomgewichten so vor, daß verwandte Elemente untereinanderstehen. Mendelejew fand dadurch das *Periodensystem der Elemente*, das die Tabelle auf Seite 159 in der heute üblichen Form wiedergibt. Über die überragende Bedeutung der Mendelejewschen Gedanken und ihre Fruchtbarkeit bei der Entdeckung bisher unbekannter Elemente haben wir im chemischen Unterricht Näheres erfahren.

Die waagerechten Reihen heißen *Perioden*, die senkrechten *Gruppen*. Diese trennt man in *Untergruppen*. Die Längen der Perioden sind verschieden. Durch Auszählen findet man in den ersten 6 Perioden 2, 8, 8, 18, 18, 32 Elemente. *Rydberg* schrieb als erster diese Zahlenreihe in der Form:

$$2 = 2 \cdot 1^2,\ 8 = 2 \cdot 2^2,\ 18 = 2 \cdot 3^2,\ 32 = 2 \cdot 4^2.$$

Das ist ein Hinweis darauf, daß die Periodenlänge durch den Aufbau der Atome gesetzmäßig bedingt ist.

Bei genauer Nachprüfung der steigenden Atomgewichte findet man an vier Stellen eine Abweichung, da ein größeres Atomgewicht vor einem kleineren steht:

$$\text{A vor K } \left(\begin{array}{c|c} 18 & 19 \\ 39{,}944 & 39{,}096 \end{array}\right), \quad \text{Co vor Ni } \left(\begin{array}{c|c} 27 & 28 \\ 58{,}94 & 58{,}69 \end{array}\right),$$

$$\text{Te vor J } \left(\begin{array}{c|c} 52 & 53 \\ 152{,}61 & 126{,}92 \end{array}\right), \quad \text{Th vor Pa } \left(\begin{array}{c|c} 90 & 91 \\ 232{,}12 & 231 \end{array}\right).$$

Von den in den Klammern stehenden Zahlen gibt die obere die Stelle des betreffenden Elements im Periodensystem an, man bezeichnet sie daher als *Ordnungszahl*. Die untenstehende Zahl bedeutet jeweils das *Atomgewicht*.

Aus dem Vorangehenden folgt:

> *Das Atomgewicht stellt nicht vollständig die chemisch notwendige Ordnung her.*

Bis zum Ca ist die Ordnungszahl, die in der wissenschaftlichen Literatur durchweg mit Z bezeichnet wird, annähernd gleich dem halben Atomgewicht. Von da an steigt dieses stärker an als die Ordnungszahl.

2. Die wichtigsten periodischen Eigenschaften der Elemente. Wir betrachten einige periodisch wiederkehrende Schwankungen chemischer Eigenschaften im System. Die höchstmögliche Wertigkeit gegen Sauerstoff steigt von links nach rechts an. Damit wächst der Säurecharakter. Deutlich zeigt das die zweite Periode:

$$\mathrm{Na_2^{I}O},\ \mathrm{Mg^{II}O},\ \mathrm{Al_2^{III}O_3},\ \mathrm{Si^{IV}O_2},\ \mathrm{P_2^{V}O_5},\ \mathrm{S^{VI}O_3},\ \mathrm{Cl_2^{VII}O_7}.$$

[1] Dimitri Iwanowitsch Mendelejew (1834–1907), Professor in Petersburg, dem heutigen Leningrad

[2] Lothar Meyer (1830–1895), Professor in Tübingen

Periodensystem der Elemente

Die vor den Atomsymbolen stehenden Zahlen sind die Ordnungszahlen, die darunterstehenden die Atomgewichte

Gruppe / Periode	0	I a	I b	II a	II b	III a	III b	IV a	IV b	V a	V b	VI a	VI b	VII a	VII b	VIII
0	0 n 1,0087	1 H 1,0080														
1	2 He 4,003	3 Li 6,940		4 Be 9,02		5 B 10,82		6 C 12,010		7 N 14,008		8 O 16,0000		9 F 19,00		
2	10 Ne 20,183	11 Na 22,997		12 Mg 24,32		13 Al 26,97		14 Si 28,06		15 P 30,98		16 S 32,066		17 Cl 35,457		
3	18 Ar 39,944	19 K 39,096		20 Ca 40,08			21 Sc 45,10		22 Ti 47,90		23 V 50,95		24 Cr 52,01		25 Mn 54,93	26 Fe 27 Co 28 Ni 55,85 58,94 58,69
			29 Cu 63.54		30 Zn 65,38	31 Ga 69,72		32 Ge 72,60		33 As 74,91		34 Se 78,96		35 Br 79,916		
4	36 Kr 83,7	37 Rb 85,48		38 Sr 87,63			39 Y 88,92		40 Zr 91,22		41 Nb 92,91		42 Mo 95,95		43 Tc* (99)	44 Ru 45 Rh 46 Pd 101,7 102,91 106,7
			47 Ag 107,880		48 Cd 112,41	49 In 114,76		50 Sn 118,70		51 Sb 121,76		52 Te 127,61		53 J 126,92		
5	57 X 131,3	55 Cs 132,91		56 Ba 137,36		57 bis 71 Seltene Erden[1]		72 Hf 178,60		73 Ta 180,88		74 W 183,92		75 Re 186,31		76 Os 77 Ir 78 Pt 190,2 193,1 195,23
			79 Au 197,2		80 Hg 200,61	81 Tl 204,39		82 Pb 207,21		83 Bi 209,00		84 Po 210		85 At* (211)		
6	86 Rn 222	87 Fr (223)		88 Ra 226,05		89 bis 101 Actiniden[2]										

[1] Seltene Erden (Lanthaniden):

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm*	62 Sm	63 Eu	64 Ga	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Gs
138,92	140,13	140,92	144,27	(147)	150,43	152,0	156,9	159,2	162,46	164,94	167,2	169,4	173,04	174,99

[2] Actiniden:

89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 E	100 Fm	101 Mv	
227,05	232,12	231	238,07	(237)	(239)	(241)	(242)	(243)	(244)	(254)	(256)	(257)	

* Künstliche radioaktive Isotope

Gegenüber dem Wasserstoff steigt die Wertigkeit zunächst an und nimmt dann wieder ab:

$$Na^{I}(OH),\ Mg^{II}(OH)_2,\ Al^{III}(OH)_3,\ Si^{IV}H_4,\ P^{III}H_3,\ H_2S^{II},\ HCl^{I}.$$

In den großen Perioden findet das An- und Abschwellen der Wertigkeit mehrfach statt.

Auch *physikalische Eigenschaften* sind periodisch veränderlich, z. B. das Atomvolumen, der Schmelzpunkt, der Siedepunkt, das magnetische Verhalten. Sehr eindrucksvoll ist die Kurve der Atomvolumina. Unter dem *Atomvolumen* versteht man den Quotienten aus dem Atomgewicht und der Dichte des flüssigen Elementes beim Siedepunkt. Anschaulich kann man es sich als das Volumen vorstellen, das ein Grammatom des flüssigen Elements beim Siedepunkt ein-

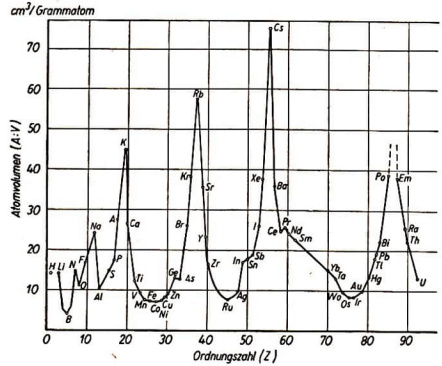


Abb. 160/1
Kurve der Atomvolumina

nimmt (Abb. 160/1). Die Hauptmaxima liegen bei den Anfangselementen der einzelnen Perioden. Das sind die Alkalien, deren Verwandtschaft dadurch gekennzeichnet wird.

3. Die Ordnungszahl der Elemente im Periodensystem. Die vier erwähnten Unstimmigkeiten in der Anordnung nach steigenden Atomgewichten hatten dazu Anlaß gegeben, daß bei Beachtung der chemischen Verwandtschaft jedem Element als Ordnungszahl seine Stellenzahl, die *Atomnummer* im System, zugewiesen wurde. Präzisionsmessungen der Kernladungen zeigten, daß *die Kernladungszahl mit der Ordnungszahl des betreffenden Elements übereinstimmt. Rutherford* bestätigte, daß die Kernladungszahl tatsächlich gleich der Ordnungszahl ist. Da die Anzahl der sich um den Kern bewegenden Elektronen gleich der Anzahl der positiven Elementarladungen des Kerns sein muß, damit das ganze Atom elektrisch neutral ist, gilt die Beziehung

$$Z = \textit{Ordnungszahl} = \textit{Kernladungszahl} = \textit{Elektronenzahl}.$$

4. Die Beziehung der Röntgenspektren zum Periodensystem. Der englische Physiker *Charles Glover Barkla*[1] untersuchte systematisch die Röntgenspektren der verschiedenen Elemente nach dem Drehkristallverfahren (vgl. § 26, 2). Er hat zwei Serien von Eigenstrahlung nachgewiesen, die er *K*- und *L*-Strahlung nannte. Die *K*-Strahlung, die aus sehr kurzen Wellen besteht, stellte er bei den leichteren Elementen bis zum Silber, die *L*-Strahlung bei den Schwermetallen fest. Beide Strahlungen nannte er *Fluoreszenzstrahlung*, da sie nur durch Bestrahlung mit kürzeren Wellenlängen erregt werden konnten (vgl. § 25, 3). Der englische Physiker *William Henry Bragg* identifizierte die Röntgenstrahlen, deren Linienspektren er fand, mit der Barklaschen *K*- und *L*-Strahlung. Der schwedische Physiker *Manne Siegbahn*[2] entdeckte noch eine dritte, sehr weiche Strahlung, die er *M*-Strahlung nannte.

Es galt nun, die neuen Erfahrungen in Beziehung zum Periodensystem der Elemente und zum Atommodell zu setzen. Hier verdanken wir dem englischen Physiker *Moseley*[3] grundlegende Messungen, die er im Jahre 1913 durchführte. Er brachte die einzelnen Elemente als auswechselbare Antikathode in der Röntgenröhre an und stellte auf Photographien folgendes fest:

a) Die Röntgenspektren aller Elemente sind aus ähnlich angeordneten Liniengruppen, den K-, L-, M-Spektren, aufgebaut.

b) Die Röntgenspektren chemischer Verbindungen setzen sich aus den Röntgenspektren ihrer Elemente zusammen.

c) Die einzelnen Linien verschieben sich mit wachsender Ordnungszahl auf kürzere Wellenlängen zu.

Damit war eine ganz neuartige Gesetzmäßigkeit entdeckt, die auf eine nicht periodisch veränderliche Eigenschaft der im System aufeinanderfolgenden Atome hinweist.

Der Zusammenhang wird besonders deutlich bei einer von *Moseley* gewählten graphischen Darstellung der kräftigsten Linie K_α der *K*-Serie (Abb. 161/1).

Auf der Abszissenachse ist die Ordnungszahl, auf der Ordinatenachse die Quadratwurzel aus der Frequenz abgetragen.

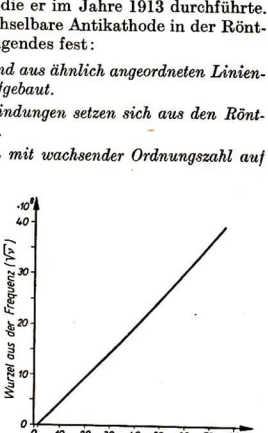


Abb. 161/1
Moseley-Diagramm der K_α-Linien

Man erkennt deutlich den angenähert linearen Zusammenhang der Quadratwurzel aus der Frequenz der K_α-Linien und der Ordnungszahl. Die gleiche Gesetzmäßigkeit gilt auch für die anderen Linien und wird als *Moseleysches Gesetz* folgendermaßen formuliert:

$$\sqrt{\nu} = a\,(Z - b).$$

[1] Charles Glover Barkla (1877–1944), ein englischer Physiker, Professor in Edinburgh, wurde 1917 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet

[2] Manne Siegbahn (geb. 1886), ein schwedischer Physiker, Professor in Upsala, erhielt 1924 den Nobelpreis

[3] Henry Moseley (1887–1915), ein englischer Physiker, fiel im ersten Weltkrieg

Die Ordnungszahl ist somit als die das Periodensystem beherrschende Größe bestätigt.

Dadurch war die Unstimmigkeit in der Reihenfolge der Elemente beseitigt, die sich bei einigen Elementen ergab, wenn man das Periodensystem nach dem Atomgewicht anordnete.

Daß nicht Z selbst, sondern $Z - b$ auftritt, wo b wie auch a eine für die verschiedenen Serien wechselnde Konstante ist, erklärt sich aus der abschirmenden Wirkung der Elektronen auf die Kernladung.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Unterscheiden Sie die Perioden und die Gruppen im Periodensystem!
2. Nennen Sie periodische Eigenschaften der Elemente!
3. Wieviel Elemente enthält jede der ersten sechs Perioden?
4. Geben Sie die Rydbergsche Darstellung der Länge der Perioden an!
5. Wie erzeugten Barkla und Moseley die charakteristischen Röntgenwellen?
6. Nennen Sie das Moseleysche Gesetz und erläutern Sie seine Bedeutung!

§ 36. Der Schalenaufbau der Atome

1. Periodizität und Elektronenhülle. Der Kern besitzt, wie wir wissen, eine mit der Ordnungszahl identische *Kernladungszahl*, die im Periodensystem von Element zu Element regelmäßig um 1 zunimmt. Diese Veränderung läßt darauf schließen, daß der Kern bzw. seine engste Umgebung der Sitz der nichtperiodischen Eigenschaften ist. Da wir aber wissen, daß die Anordnung der Atome im Mendelejewschen System eine auffallende Periodizität in vielen Eigenschaften aufweist, so müssen wir den Grund dazu in den Außenbezirken des Atoms suchen. Es ist anzunehmen, daß die Anordnung der Elektronen eine Periodizität aufweist.

Jede Periode des Systems schließt mit einem chemisch indifferenten Edelgas. Wir nehmen an, daß sich die Elektronen dann völlig symmetrisch zum Kern angeordnet haben. Sie bilden, wie man sagt, *eine symmetrisch besetzte Schale*. Das ist bereits beim Helium der Fall.

Man muß daraus folgern, daß die innerste Schale, die man die *Kernschale* oder die *K-Schale* nennt, mit zwei Elektronen voll besetzt ist. Beim Lithium lagert sich ein drittes Elektron außerhalb der Schale an. Das Beryllium hat zwei Elektronen in der neu aufzubauenden äußersten Schale. Über Bor, Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Fluor wächst die Zahl um je ein Elektron. Beim Neon ist die zweite Schale, die mit dem nächsten Buchstaben des Alphabets als *L-Schale* bezeichnet wird, mit acht Elektronen voll besetzt.

Da die Wertigkeit offenbar durch die Anzahl der Elektronen bestimmt wird, die in der unfertigen äußeren Schale vorhanden sind, nennt man diese Elektronen *Valenzelektronen*. Die Ursache für die Ähnlichkeit der Alkalimetalle ist demnach das eine Valenzelektron, das zu der vorangehenden fertig abgeschlossenen *Edelgaskonfiguration* hinzutritt. Man kann für das Spektrum Ähnlichkeit mit dem des Wasserstoffs erwarten, wenn auch mit Einschränkungen. Das eine Valenzelektron kann wie beim Wasserstoff die Sommerfeldschen Ellipsen durchlaufen, die wir in § 34, 3 kennengelernt haben.

Um die Vervollständigung des Schalenaufbaus erklären zu können, war man gezwungen, zwei weitere Quantenzahlen einzusetzen. Wir müssen es uns versagen, hierauf näher einzugehen, da diese Zusammenhänge zu schwierig sind, als daß sie mit schulischen Mitteln verständlich gemacht werden können.

2. Das Pauliprinzip. Der deutsche Physiker *Wolfgang Pauli*[1] fand, daß beim Zustandekommen bestimmter Linien verschiedene Elektronen die gleichen Quantenzahlen haben müßten, und sah darin die Ursache für die noch vorhandenen Schwierigkeiten. Er stellte daraufhin als Leitgedanken für die Forschung folgenden Satz auf:

> **In keinem Atom können mehrere Elektronen in allen Quantenzahlen übereinstimmen.**

Man nennt diesen Satz das *Paulische Ausschließungsprinzip* oder auch kurz das *Pauliprinzip*. Es hat sich hervorragend bewährt und hat den Aufbau des Periodensystems verständlich gemacht. In einer Energiestufe ist die Höchstzahl der Elektronen gleich der Anzahl möglicher Zusammensetzungen von Quantenzahlen.

3. Die Periodenlänge.

Die innerste Schale, die K-Schale mit der Hauptquantenzahl $n = 1$ und der Nebenquantenzahl $l = 0$, kann nur zwei Elektronen aufnehmen, die nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen.

Die L-Schale mit der Hauptquantenzahl $n = 2$ kann die Nebenquantenzahlen $l_1 = 0$ oder $l_2 = 1$ haben. Bei ihr kommen sechs weitere Möglichkeiten für die Unterbringung der Elektronen hinzu. Es können demnach acht Elektronen in der L-Schale vorhanden sein.

Die M-Schale mit der Hauptquantenzahl $n = 3$ und den Nebenquantenzahlen $l_1 = 0$, $l_2 = 1$, $l_3 = 2$ ermöglicht den Hinzutritt zehn weiterer Elektronen; sie kann somit achtzehn Elektronen aufnehmen, die nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen.

Bei der vierten Schale, der N-Schale mit der Hauptquantenzahl $n = 4$ und den Nebenquantenzahlen $l_1 = 0$, $l_2 = 1$, $l_3 = 2$, $l_4 = 3$, sind vierzehn weitere Elektronen denkbar. Diese Schale kann demnach bis zu zweiunddreißig Elektronen enthalten.

Die Zahlen 2, 8, 18 und 32 sind aber die gleichen, die die Anzahl der Elemente in den Perioden des Systems der Elemente bestimmen. Zu den genannten Schalen tritt noch eine *O-Schale*, eine *P-Schale* und eine *Q-Schale* hinzu, die in ähnlicher Weise mit Elektronen besetzt sind.

Man ist in der Lage, die Besetzungszahlen der Elektronenschalen für alle Elemente anzugeben, wie die folgende Tabelle auszugsweise zeigt:

[1] Wolfgang Pauli (geb. 1900), ein deutscher Physiker, Professor in Zürich, erhielt 1945 den Nobelpreis

Besetzung der ersten vier Elektronenschalen einiger Elemente

Gruppe / Periode	Ia Alkali-	IIa Erdalkali-Metalle	III Erd-	VIIa Halogene	IX Edelgase	Name der Schale
1	**1 H** *1*				**2 He** *2*	K
2	**3 Li** *2* *1*	**4 Be** *2* *2*	**5 B** *2* *3*	**9 F** *2* *7*	**10 Ne** *2* *8*	K L
3	**11 Na** *2* *8* *1*	**12 Mg** *2* *8* *2*	**13 Al** *2* *8* *3*	**17 Cl** *2* *8* *7*	**18 Ar** *2* *8* *8*	K L M
4	**19 K** *2* *8* *8* *1*	**20 Ca** *2* *8* *8* *2*	**21 Sc** *2* *8* *9* *2*	**35 Br** *2* *8* *18* *7*	**36 Kr** *2* *8* *18* *8*	K L M N

Innerhalb einer Periode des Systems wächst die Anziehung zwischen Kern und Hülle, da die Anzahl der Ladungen zunimmt. Infolgedessen wird der Atomradius kleiner. In einer senkrechten Gruppe dagegen wird er größer, weil von Periode zu Periode eine neue Schale hinzukommt (Abb. **164/1**).

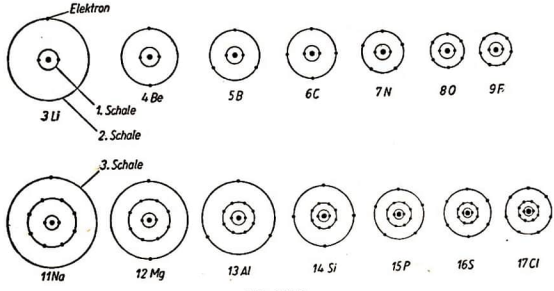


Abb. **164/1**
Schematische Darstellung der Atommodelle in den beiden ersten Perioden des Periodensystems

In der Außenschale weisen die chemisch ähnlichen Elemente einer senkrechten Gruppe die gleiche Anzahl von Elektronen auf. Die chemischen Eigenschaften werden wesentlich von den Außenelektronen bestimmt.

4. Die Vorzüge und die Grenzen des Bohrschen Atommodells. Fassen wir das, was das Bohrsche Atommodell an Vorteilen bietet, kurz zusammen, so ist folgendes festzustellen:

1. *Das Bohrsche Atommodell steht im Einklang mit der experimentellen Forschung. Der ganze Bereich zwischen den Elektronenbahnen und dem Kern ist leer, fast die gesamte Masse ist in dem Kern konzentriert.*
2. *Es macht das Zustandekommen von Linienspektren verständlich, die sich aus dem Rutherfordschen Modell nicht ergeben konnten, und liefert quantitativ richtig das Wasserstoffspektrum und die wasserstoffähnlichen Spektren. Durch die Einführung von vier Quantenzahlen kann auch die Feinstruktur erklärt werden.*
3. *Es vermag den Aufbau des Periodensystems verständlich zu machen.*

Diesen großen Erfolgen stehen jedoch beträchtliche Bedenken gegenüber, die vor allem in folgender Frage gipfeln:

Warum strahlen die Elektronen nicht auf den stationären Bahnen? Man kann zunächst nur annehmen, daß im Innern der Atome die Gesetze, die aus dem sonstigen Erfahrungsbereich der Physik abgeleitet sind, nicht gelten.

Auch das Springen von einer Bahn zur anderen führt zu ungeklärten Fragen: Wie verhält sich das Elektron im Gebiet zwischen den stationären Bahnen? Wann beginnt die Strahlung? Wie lange dauert der Sprung?

Alle diese Schwierigkeiten führten zu der Auffassung, daß das Bohrsche Atommodell nur eine vorläufige Arbeitshypothese sei, die wesentliche Züge der Wirklichkeit zeigt, ihr aber in vielen Einzelheiten nicht gerecht wird.

Die neueste Entwicklung der Physik hat gezeigt, daß das Innere der Atome nur mit Hilfe ganz neuartiger Vorstellungen und Forschungsmethoden erkennbar ist. Man kann die Atome durch einfache mechanistische Modellvorstellungen nicht widerspruchslos veranschaulichen, sondern muß zu diesem Zweck verwickelte mathematische Hilfsvorstellungen heranziehen, über die hier nichts Näheres mitgeteilt werden kann. Mag für uns im Augenblick auch noch manches verborgen sein, so ist doch nicht daran zu zweifeln, daß wir immer tiefer in die Erkenntnis der Natur eindringen werden.

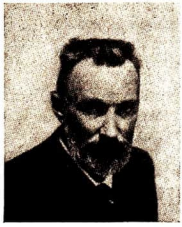
5. Fragen und Aufgaben:

1. Warum schließt man auf Periodizität in der Elektronenhülle?
2. Erläutern Sie die Ihnen bekannten Quantenzahlen!
3. Wie groß ist die Höchstzahl an Elektronen, die eine Schale aufnehmen kann?
4. Erklären Sie den Edelgaszustand!
5. Geben Sie einen Überblick über die Vorzüge des Bohrschen Atommodells!

XI. Der Bau des Atomkerns

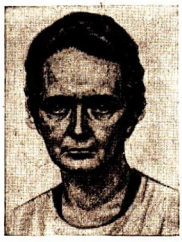
§ 37. Radioaktivität

1. Die Entdeckung der Radioaktivität. Bald nachdem man erkannt hatte, daß die Atome keine strukturlosen Teilchen sind, wurde bekannt, daß sich auch in ihrem Kern noch Umsetzungen abspielen können. Nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen setzte allerorts eine lebhafte Strahlenforschung ein.



Pierre Curie (1859–1906)

Der französische Physiker *Henri Becquerel*[1] untersuchte fluoreszierende Stoffe daraufhin, ob sie Strahlen mit ähnlichen Eigenschaften aussenden, wie sie *Röntgen* an den von ihm aufgefundenen Strahlen nachgewiesen hatte. Dabei entdeckte *Becquerel* 1896, daß alle Uransalze auch dann Strahlen emittieren, wenn sie nicht zum Fluoreszieren angeregt sind. Die Strahlen wirken genau wie die Röntgenstrahlen durch schwarzes Papier und durch Metallfolien auf photographische Platten ein und machen die Luft leitend. *Becquerel* konnte feststellen, daß sie dauernd von den Uransalzen ausgehen, ohne daß diese einer Anregung bedürfen.



Marie Curie-Sklodowska (1867–1934)

Die weitere Forschung war ebensosehr eine Aufgabe der Chemie wie der Physik. Die strahlenden Stoffe wie auch die Strahlen selbst mußten genau analysiert werden. Hervorragende Ergebnisse verdanken wir dem französischen Forscherehepaar *Pierre Curie*[2] und *Marie Curie-Sklodowska*[3] sowie *Ernest Rutherford*.

In mühseligen Versuchen stellte *Marie Curie* fest, daß auch Thoriumsalze das gleiche Strahlungsvermögen zeigen und daß reines Uran und reines Thorium stärker strahlen als ihre Verbindungen. Sie benutzte zur Untersuchung die Ionisierung der Luft und beobachtete diese mit Hilfe der Entladung eines aufgeladenen Elektroskops.

Folgenreich war die Beobachtung, daß das Erz Uranpechblende intensiver strahlte als das reine Uran.

---

[1] Henri Becquerel (1852–1908), ein erfolgreicher französischer Physiker, Professor in Paris, dem 1903 der Nobelpreis verliehen wurde

[2] Pierre Curie (1859–1906), ein bedeutender französischer Physiker, bei einem Verkehrsunfall tödlich verunglückt, erhielt zusammen mit seiner Ehefrau Marie Curie-Sklodowska 1903 den Nobelpreis

[3] Marie Curie-Sklodowska (1867–1934), gebürtige Polin, Gattin von Pierre Curie, wegen ihrer hervorragenden Forschungsergebnisse 1903 und 1911 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet

Marie Curie schloß daraus, daß in dem Erz Stoffe mit stärkerem Strahlungsvermögen enthalten sein müssen. Unter schwierigen äußeren Arbeitsbedingungen konnten *Pierre* und *Marie Curie* zwei bis dahin unbekannte Elemente aus der Uranpechblende abscheiden. Das eine wurde zu Ehren der polnischen Heimat seiner Entdeckerin *Polonium* (Po), das andere wegen seiner enormen Strahlungsintensität *Radium* (Ra) genannt. Es erwies sich als dem Barium chemisch verwandt.

Die Eigenschaft, die von *Becquerel* entdeckten Strahlen auszusenden, wurde von ihren Erforschern als **Radioaktivität** bezeichnet. Will man die Größe der Leistung, die mit der Entdeckung des Radiums vollbracht wurde, richtig würdigen, muß man bedenken, daß in der Pechblende auf drei Millionen Uranatome nur ein Atom Radium kommt, mithin 7 t Erz für eine Ausbeute von 1 g Radium verarbeitet werden mußten.

2. Die Eigenschaften der Strahlung radioaktiver Stoffe. Die wichtigsten Eigenschaften der radioaktiven Stoffe werden durch folgende Sätze wiedergegeben:

1. *Die von ihnen ausgesandten Strahlen beeinflussen photographische Platten auch durch die Verpackung hindurch.*
2. *Sie ionisieren die Luft.*
3. *Sie üben eine Reizwirkung auf Organismen aus.*
4. *Sie rufen an fluoreszierenden Stoffen ein Aufleuchten hervor.*
5. *Sie durchdringen die einzelnen Stoffe mehr oder weniger stark.*

3. Die Natur der von radioaktiven Stoffen ausgehenden Strahlen. Die Eigenschaften der Strahlen lassen ihre physikalische Beschaffenheit noch nicht erkennen. Die Erforschung ihrer Natur wurde von *Pierre* und *Marie Curie* sofort begonnen. Es zeigte sich zunächst, daß die Strahlungsfähigkeit des Radiums durch keinerlei äußere Beeinflussung geändert werden konnte, weder durch Erhitzen oder äußerste Abkühlung noch durch Druck, elektromagnetische Felder oder chemische Einwirkung.

In der bei Strahlenuntersuchungen üblichen Weise untersuchte das Ehepaar *Curie* den Einfluß eines Magnetfeldes auf ein Strahlenbündel, das es aus einer von einer dicken Bleiwand abgeschirmten Kammer durch eine Blende austreten ließ. Das Bündel wurde in drei Teile gespalten, von denen der eine genauso abgelenkt wurde wie Kathodenstrahlen in einem Magnetfelde. Durch Bestimmen des Verhältnisses von Ladung zur Masse $\frac{e}{m}$ mit Hilfe magnetischer und elektrischer Felder konnte dieser Teil als *sehr schnell bewegte Elektronen* identifiziert werden (vgl. LB 11, § 24, 4).

Den andern nicht abgelenkten Teil untersuchte der englische Physiker *Rutherford* an Hand angereicherter Radiumpräparate mit sehr starken Magnetfeldern und konnte ihn ebenfalls aufspalten in einen nicht abgelenkten und in einen nach der den Elektronen entgegengesetzten Richtung abgelenkten Anteil. Dieser Teil der Strahlung mußte somit positive Ladungen enthalten. Sein Bündel war wenig aufgelöst, während das Elektronenbündel sich breit aufspaltete. Die

drei Strahlengruppen werden gemäß der Abb. 168/1 durch die griechischen Buchstaben α, β, γ bezeichnet.

α-Strahlen sind Strahlen positiver Ladung (enges Bündel),
β-Strahlen sind Strahlen negativer Ladung (aufgelöstes Bündel),
γ-Strahlen sind nicht ablenkbare Strahlen.

Die weitere Untersuchung erstreckte sich wesentlich auf die Messung der Reichweite der drei Strahlengruppen, wenn sie auf andere Stoffe treffen.

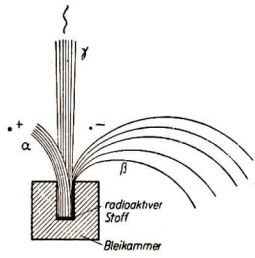


Abb. 168/1 Aufspaltung der radioaktiven Strahlung durch ein starkes Magnetfeld in α-, β- und γ-Strahlen

4. Die α- und die β-Teilchenstrahlung. Auch bei α-Teilchen läßt sich die spezifische Ladung $\frac{e}{m}$ durch Ablenkungsmessungen in magnetischen und elektrischen Feldern in der gleichen Weise ermitteln wie bei den Kathodenstrahlen. *Rutherford* fand für $\frac{e}{m}$ den 3680ten Teil wie bei den Kathodenstrahlen. Da eine Ladung nicht kleiner als die Elementarladung eines Elektrons sein kann, so muß *die Masse der α-Teilchen mindestens 3680 mal so groß sein wie die eines Elektrons.* Das stimmt zu der geringen Ablenkbarkeit genauso wie die erhebliche Geschwindigkeit, die aus Ablenkungsversuchen berechnet werden kann. Sie beträgt im Mittel 20000 km/s.

Vergleicht man den Wert $\frac{e}{m}$ mit der spezifischen Ladung der H-Ionen, die sich aus elektrolytischen Versuchen ergibt, so ist der Wert bei α-Strahlen halb so groß.

Man dachte deshalb an die Möglichkeit, daß die α-Teilchen H_2-Ionen seien. Doch wiesen Versuche, bei denen man die Strahlen in ein Vakuum eintreten ließ, auf eine andere Erklärung hin. *Spektraluntersuchungen von elektrischen Entladungen*, die man in diesem Vakuum vor sich gehen ließ, *zeigten das Vorhandensein von Helium.*

Läßt man α-Strahlen von Blei absorbieren, das dann im Vakuum geschmolzen wird, so entweicht ebenfalls Helium. Da sich in allen radioaktiven Mineralien auch stets Helium findet, so konnte *Rutherford* die Hypothese aufstellen, daß *die α-Strahlen aus Heliumionen bestehen.* Zur Bestätigung mußten Ladung und Masse der α-Teilchen einzeln bestimmt werden. Das geschah nach folgendem Gedankengang:

Durch besondere Versuche wurde die Anzahl der α-Teilchen bestimmt, die 1 g Radium in einer Sekunde aussendet. Ihre gesamte Ladung konnte durch Auffangen auf einer Metallplatte ermittelt und daraus die Ladung des einzelnen Teilchens berechnet werden. Sie ergab sich zu zwei Elementarladungen. Aus dem bekannten Verhältnis $\frac{e}{m}$ ließ sich nun m feststellen. Der Wert stimmte befriedigend mit dem für Helium bekannten Wert überein.

So wurde es zur gesicherten Erkenntnis, daß *die α-Strahlen aus doppelt positiv geladenen Heliumteilchen bestehen.* Nach unserer Kenntnis des Heliumatombaus sind dies Heliumkerne, die aus dem Atom nach Verlust der beiden Hüllenelektronen entstanden sind.

Die α-Teilchen können gezählt werden.

Die β-Strahlen haben sich als Elektronenstrahlung erwiesen. Vor den Kathodenstrahlen, die wir von früher her kennen (vgl. LB 11, § 24, 3), zeichnen sie sich dadurch aus, daß sie sehr große, an die Lichtgeschwindigkeit heranreichende Geschwindigkeiten erreichen können. Die Geschwindigkeit ist aber nicht bei allen Teilchen einheitlich, sondern zwischen weiten Grenzen verteilt.

5. Die γ-Strahlen. *Dieser nicht ablenkbare Teil der radioaktiven Strahlung erwies sich als eine elektromagnetische Wellenstrahlung.* Die Wellenlängen sind nicht einheitlich, ihre kleinsten Werte liegen unter denen der Röntgenstrahlen. Deshalb gelang es lange Zeit nicht, ihre Wellenlänge zu bestimmen, bis Kristallgitter dazu verwendet wurden. Energie und Frequenz können auch aus dem lichtelektrischen Effekt ermittelt werden. Dabei ergeben sich für die einzelnen Quanten $h \cdot \nu$ sehr hohe Energiebeträge bis 2,60 MeV. Ihnen entsprechen Frequenzen von $6 \cdot 10^{20}$ Hz. Um das Auftreten der γ-Strahlung zu erklären, denken wir daran, daß die Lichtstrahlung durch Quantensprünge, das heißt durch Übergänge der Hüllelektronen von einem energiereicheren in einen energieärmeren Zustand, bewirkt wird. Man versucht heute, auch für die Atomkerne ein Energiestufenschema aufzustellen. Übergänge eines angeregten Kerns in einen tieferen Energiezustand sind dann die Ursache der γ-Strahlung.

Die Absorption der drei Strahlenarten beim Eindringen in die Stoffe ist sehr verschieden, so daß man sie gut trennen kann. α-Strahlen werden am stärksten absorbiert; sie vermögen Luftschichten von etwa 7 cm Dicke, Papier, dünne Aluminiumfolien nicht zu durchdringen. Die stärkste Durchdringungsfähigkeit haben die γ-Strahlen. Genau wie bei den Röntgenstrahlen sind die γ-Strahlen mit den kürzesten Wellen am härtesten.

6. Die Radiumemanation. Zu der Feststellung der α-, β-, γ-Strahlen kam eine weitere interessante, zunächst nicht erklärbare Beobachtung. 1899 fand das Ehepaar *Curie*, daß die Luft in der Umgebung von Radiumpräparaten und anderen radioaktiven Körpern im gleichen Raume selber radioaktiv wurde. Eine Erklärung wurde von *Rutherford* und *Soddy*[1] gegeben. Sie äußerten zunächst die Vermutung, daß Radium dauernd ein Gas aussende, und gingen dann daran, seine Existenz durch Verflüssigung nachzuweisen. Die radioaktive Luft wurde durch eine in flüssige Luft getauchte Röhre in ein Gefäß geleitet, das einen fluoreszierenden Belag hatte. Es trat kein Aufleuchten des Belages ein, wohl aber dann, wenn die Röhre aus der flüssigen Luft herausgenommen wurde. Das verflüssigte Gas verdampfte und gelangte in das Gefäß; seine Strahlung bewirkte das Fluoreszieren.

Das bis dahin unbekannte Gas wurde von *Rutherford Radiumemanation* (RaEm) genannt. Es erweist sich chemisch als ein Edelgas mit dem Atomgewicht 222 und wird heute als *Radon* (Rn) bezeichnet.

[1] Frederik Soddy (geb. 1877), englischer Chemiker und Physiker, Professor in Oxford, entdeckte zusammen mit Ernest Rutherford die Umwandelbarkeit der Atomkerne. Er erhielt 1921 den Nobelpreis.

7. Fragen und Aufgaben:

1. Wer entdeckte und erforschte die Radioaktivität?
2. Nennen Sie Eigenschaften der Strahlen radioaktiver Stoffe!
3. Woraus bestehen die einzelnen Strahlenarten?
4. Wie kann man die verschiedenen Arten radioaktiver Strahlung voneinander trennen?
5. Was versteht man unter Radiumemanation?

§ 38. Die Ursachen der Radioaktivität

1. Die Ausstrahlung von Energie. Jahrelange Beobachtungen radioaktiver Substanzen zeigten, daß diese ununterbrochen strahlten, ohne sich merkbar zu ändern. Man stand vor einem Rätsel; denn die dauernde Energieabgabe, die man feststellen konnte, ohne daß dabei eine Veränderung der Intensität der Strahlen erfolgte, widersprach dem Grundgesetz von der Erhaltung der Energie. Dazu kam die Unmöglichkeit, die radioaktiven Vorgänge von außen zu beeinflussen.

Die *Größe der Energie*, die mit der Strahlung abgegeben wird, konnte genau gemessen werden. Das radioaktive Präparat wurde in einer Hülle, die alle Strahlen absorbiert, in ein Eiskalorimeter gebracht, so daß die ausgestrahlte Energie als Wärme meßbar wurde. Auf diese Weise konnte ermittelt werden, daß 1 g Radium in einer Stunde reichlich 100 cal abgibt. Das ist nicht viel, aber da die Energieabgabe kontinuierlich über lange Zeiträume erfolgt, so ergeben sich erstaunlich große Werte.

Die Gültigkeit des Energiesatzes konnte man nicht aufgeben. Man bemühte sich eifrig um eine Lösung des in der Radioaktivität liegenden Widerspruches zum Energieprinzip und fand sie in dem *radioaktiven Zerfall der Atome*.

Die Meinung, daß die Radioaktivität auf einer Veränderung der Atomkerne beruhe, ist als Vermutung zuerst von *Elster* und *Geitel*[1] ausgesprochen worden. Die große Leistung einer experimentell gesicherten Erklärung des radioaktiven Zerfalls erbrachten um 1903 *Rutherford* und *Soddy* zusammen mit *Ramsay*[2].

2. Der radioaktive Atomzerfall. Die erste Tatsache, die mit einem Atomzerfall in Einklang stand, war die Identifizierung der α-Strahlen mit ionisierten Heliumatomen. Spektralanalytische Untersuchungen zeigten, daß nach dem Aufhören der Strahlungsfähigkeit des Radons ebenfalls Helium entstanden ist. Die glänzende Leistung *Ramsays*, aus winzigsten Mengen das Atomgewicht des Radons mit 222 zu bestimmen, ermöglichte den Nachweis, daß das Atomgewicht des Radiums mit rund 226 gleich der Summe der Atomgewichte der aus ihm entstandenen Elemente Helium mit dem Atomgewicht 4 und Radon mit dem Atomgewicht 222 ist. Wenn ein He-Atom aus einem radioaktiven Atom entweicht, so muß ein Atom eines Elements mit einem um 4 geringeren Atomgewicht entstehen. Die

[1] Julius Elster (1854–1920) und Hans Geitel (1855–1923) waren beide Lehrer am Gymnasium in Wolfenbüttel und bedeutende physikalische Forscher.

[2] William Ramsay (1852–1916), ein bedeutender englischer Chemiker, Professor der Chemie in London, entdeckte die Edelgase. 1904 erhielt er den Nobelpreis.

Abgabe eines Elektrons hat wegen seines geringen Gewichts kaum einen Einfluß. Daß die ausgestrahlten Partikel dem Kern entstammen, ist daraus zu schließen, daß die Eigenschaften der Atome beim Zerfall sich ändern und α-Teilchen in der Atomhülle nicht bekannt sind.

Mit der Lehre vom Kernzerfall steht die Tatsache im Einklang, daß sämtliche stark radioaktiven Elemente ein hohes Atomgewicht über 206 haben. *Kerne mit größeren Massen sind labilere Gebilde als Kerne mit geringerer Masse.*

3. Das Zeitgesetz des radioaktiven Zerfalls. Die anscheinende Unveränderlichkeit des Radiums und die nachweisbare Umwandlung des Radons weisen auf eine verschiedene Zerfallsgeschwindigkeit hin. Wir erfuhren, daß man die von einer gewogenen Radiummenge ausgesandten α-Teilchen zählen und damit die Anzahl der zerfallenen Kerne ermitteln kann. Die Gesamtzahl der Atome läßt sich aus dem Gewicht und dem absoluten Atomgewicht berechnen. So ergibt sich, daß in einer Sekunde der Bruchteil $1{,}37 \cdot 10^{-11}$ der Gesamtzahl zerfällt. Die Zahl $1{,}37 \cdot 10^{-11}$ heißt *Zerfallskonstante*; sie ist eine Konstante des Radiums.

Für das Radon ergab sich die Zerfallskonstante $2{,}1 \cdot 10^{-6}$. Wenn mithin immer der gleiche konstante Bruchteil der vorhandenen Menge je Sekunde zerfällt, so sinkt die Menge nach einem einfachen Exponentialgesetz.

Es ist üblich, die Geschwindigkeit des Zerfalls durch die *Halbwertszeit* T anzugeben. Man versteht darunter *die Zeit, in der von einer beliebigen Menge die Hälfte zerfällt.*

Mathematisch läßt sich diese Tatsache folgendermaßen ausdrücken:

Zu einer Zeit t mögen n radioaktive Atome vorhanden sein. Zerfallen in einem Zeitelement dt gerade dn Atome, so ist

$$-\frac{dn}{dt} = \lambda \cdot n,$$

wobei λ die Zerfallskonstante ist und das Minuszeichen die Abnahme von n mit wachsender Zeit andeutet. Durch Umwandeln der Gleichung in

$$-\frac{dn}{n} = \lambda \cdot dt$$

und Integration ergibt sich

$$-\ln n = \lambda \cdot t + \text{const.} \tag{1}$$

Falls zur Zeit $t = 0$ gerade n_0 Atome vorhanden sind, gilt

$$-\ln n_0 = \text{const.}$$

Durch Zusammenfassen erhält man

$$\ln n_0 - \ln n = \lambda \cdot t$$

oder

$$\ln \frac{n_0}{n} = \lambda \cdot t.$$

Daraus folgt

$$\frac{n_0}{n} = e^{\lambda \cdot t}$$

und

$$n_0 = n \cdot e^{+\lambda \cdot t} \quad \text{oder} \quad n = n_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}.$$

Ist n dann gleich $\frac{n_0}{2}$, so erhält man

$$\frac{1}{2} n_0 = n_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T},$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot T}$$

oder

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda}.$$

Für das Radium ergibt sich folgende Überschlagsrechnung:

$$T = \frac{0{,}693}{1{,}37 \cdot 10^{-11}} \text{ s} \approx 0{,}5 \cdot 10^{11} \text{ s} \approx 1600 \text{ Jahre}.$$

Dieser Wert macht es verständlich, daß von einer Veränderung des Radiums innerhalb der sich über ein Menschenleben erstreckenden Beobachtungszeiten nichts zu bemerken ist. Es ist zu beachten, daß bei jeder beliebigen Menge Radium die Hälfte immer 1600 Jahre bestehen bleibt.

4. Zerfallsreihen, radioaktive Familien. In der Natur sind rund vierzig radioaktive Atomarten festgestellt worden. Sie bilden drei *Zerfallsreihen*, bei denen jedes folgende Glied aus dem vorangehenden entsteht. Die sehr langsam zerfallenden Muttersubstanzen sind Uran, Thorium, Aktinium. Wir betrachten zunächst die Zerfallsreihe des Urans. Nach unseren Kenntnissen können α-, β-, γ-Strahlen ausgesendet werden. Da ein α-Teilchen sich als doppelt positiv geladener Heliumkern erwiesen hat, muß sein Entweichen die positive Kernladungszahl, die gleich der Ordnungszahl ist, um zwei Einheiten erniedrigen. Gleichzeitig sinkt die Massenzahl, das Atomgewicht, um vier, da dieses für Helium vier beträgt.

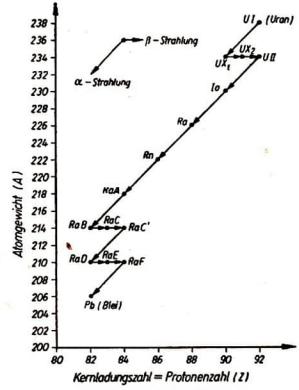


Abb. 172/1. Diagramm der Zerfallsreihe des Urans

Durch β-Zerfall erhöht sich die positive Kernladung um eine Einheit, während sich die Massenzahl nicht merkbar ändert. Durch die γ-Strahlung wird weder die Kernladungszahl noch die Massenzahl geändert.

Als Beispiele für die α- und β-Strahlung seien zwei typische Fälle angegeben:

α-Strahlung:		Ra	$\xrightarrow{\alpha}$	Rn
	A	226		222
	Z	88		86
β-Strahlung:		RaB	$\xrightarrow{\beta}$	RaC
	A	214		214
	Z	82		83

Die Zerfallsreihe des Urans wird durch Abb. 172/1 schematisch wiedergegeben. Auf der Abszissenachse ist die Kernladungszahl Z, auf der Ordinaten-

achse das Atomgewicht A abgetragen. Die α-Strahlung wird durch einen schräg nach unten verlaufenden Pfeil, die β-Strahlung durch einen waagerechten Pfeil angedeutet. Die Reihe beginnt beim Uran und endet beim Blei.

Man kann die beiden anderen Zerfallsreihen durch ähnliche schematische Darstellungen wiedergeben. Die neueste Forschung mit künstlich hergestellten Kernen (vgl. §42) hat eine weitere Zerfallsreihe und einige Zweigreihen der bereits bekannten drei Reihen entdeckt.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Welchen Forschern verdankt man die Erklärung der Radioaktivität?
2. Wie wirken α- und β-Strahlung beim Kernzerfall?
3. Was versteht man unter Halbwertszeit?
4. Erläutern Sie das Zeitgesetz des radioaktiven Zerfalls!

§ 39. Isotope

1. Entdeckung der Isotope. Bei den drei Zerfallsreihen zeigt sich eine Erscheinung, auf die man erstmals 1907 aufmerksam wurde. Sechs verschiedene Elemente, die nach ihren Zerfallsprodukten, nach ihrem Atomgewicht und nach ihrer Lebensdauer verschieden sind, weisen die Ordnungszahl 90 auf. Chemisch sind sie gleich und nicht zu trennen.

Man nennt solche physikalisch verschiedenen, chemisch aber gleichen Elemente, die im Periodensystem an gleicher Stelle stehen, *Isotope*[1].

Die Isotope haben gleiche Kernladungszahlen, aber verschiedene Atomgewichte.

Um 1913 entdeckten *Thomson*[2] und *Aston*[3], daß auch bei nicht radioaktiven Elementen Isotope vorkommen. Bei der Untersuchung von Kanalstrahlen, bei denen das Verhältnis der Ladung e zur Masse m bestimmt werden sollte, stellte *Thomson* bei gleichzeitiger Ablenkung durch elektrische und magnetische Felder fest, daß die positiven Neonionen nicht durchgängig die gleiche Masse besitzen. Das Element Neon besteht demnach aus verschiedenen Isotopen, die bei verschiedenem Atomgewicht doch chemisch identisch sind. Man fand drei Isotope mit den Atomgewichten 20, 21, 22.

Von sämtlichen Elementen haben sich nur 22 als einheitlich zusammengesetzt erwiesen.

Diese Entdeckungen waren für den Atombegriff sehr folgenreich. Bei den meisten Elementen sind *die Atomgewichte Mittelwerte, die sich aus den Atomgewichten und dem Mischungsverhältnis der Isotope ergeben.*

[1] ísŏs (griech.) = gleich; tŏpŏs (griech.) = Ort

[2] Lord Joseph John Thomson (1856–1940), ein angesehener englischer Physiker, der sich auf dem Gebiete der Isotopenforschung verdient machte. Er erhielt 1906 den Nobelpreis.

[3] Francis William Aston (geb. 1877), ein jüngerer Mitarbeiter Thomsons, führte die Massenspektrographie ein und wurde 1922 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Die Atomgewichte der Isotope sind durchgängig nahezu ganzzahlig, bezogen auf das Atomgewicht 16 des Sauerstoffs. Die Abweichungen von einer ganzen Zahl, die sich bei Messungen immer ergeben, sind kleiner als 1%. Deswegen gibt man stets ganze Zahlen für die Atomgewichte an und bezeichnet sie als *Massenzahlen* der Kerne.

Zur Kennzeichnung eines Atomkerns versieht man sein Atomsymbol mit zwei Indizes. Links oben gibt man die Massenzahl an, links unten die Kernladungszahl oder Ordnungszahl.

So bedeuten

$^{238}_{92}U$ einen Uranatomkern mit der Ordnungszahl 92 und der Massenzahl 238,
$^{235}_{92}U$ den Kern eines Isotops mit der gleichen Ordnungszahl und der Massenzahl 235.

Soll ein Mischelement genau gekennzeichnet werden, so muß seine Zusammensetzung aus den durch die Massenzahlen gekennzeichneten Isotopen angegeben werden.

Das Mischungsverhältnis der Isotope in den Mischelementen hat sich als konstant erwiesen.

2. Bestimmung der Massenzahlen der Isotope. Die schon erwähnte, von *Thomson* und *Aston* geschaffene Methode, das Verhältnis $\frac{e}{m}$ zu bestimmen, wird als *Massenspektroskopie* bezeichnet und dient besonders zur Isotopenuntersuchung. Sie ist heute so verfeinert worden, daß sich Atomgewichte auf $\frac{1}{10000}$ Massen-

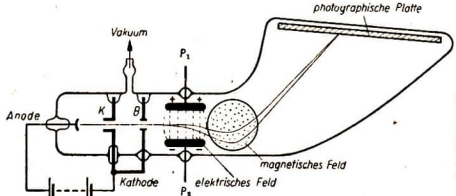


Abb. 174/1
Massenspektrograph (schematische Darstellung)
P_1 und P_2 sind die Platten eines Kondensators; die Punkte innerhalb des Kreises stellen die magnetischen Feldlinien dar, die die Zeichenebene senkrecht durchsetzen.

einheit genau bestimmen lassen. Die Grundzüge der Massenspektroskopie sollen im folgenden geschildert werden (Abb. 174/1).

Durch den Kanal K und die Blende B wird ein feines Bündel von Kanalstrahlen ausgesondert und geht durch zwei dicht hintereinander angeordnete elektrische und magnetische Felder hindurch, deren Feldlinien zueinander senkrecht stehen.

Die Strahlen werden im elektrischen Felde entsprechend den verschiedenen Werten der relativen Ladung gespalten. Im dahinterliegenden Magnetfeld erfahren sie eine Krümmung, durch die sie wieder an einem Punkt gesammelt werden. Sie werden, wie man sagt, *fokussiert*. Durch genaue Berechnung der Konstruktionsteile des Gerätes und Abgleichung der elektrischen und magne-

tischen Feldstärken ist es gelungen, Teilchen gleicher Masse trotz verschiedener Geschwindigkeit und Richtung auf einen Punkt der Platte zu richten. Man erhält so Spektrogramme, die an Schärfe den optischen Spektren nicht nachstehen. Zur Festlegung der Meßskala dienen die Ionen mit bekannten Massenzahlen. Die erwähnte Genauigkeit von 10^{-4} Masseneinheiten ist von hoher Bedeutung für die Kernphysik gewesen (vgl. § 43, 2).

3. Isotopentrennung. Aus theoretischen und praktischen Gründen ist die *Reindarstellung von Isotopen* erforderlich. Deshalb sind eine Reihe geeigneter Verfahren zur Trennung ausgearbeitet worden. Grundsätzlich ist jeder Massenspektrograph verwendbar. Speziell zur Isotopentrennung bestimmte Geräte verwenden starke Ionenquellen und kräftige elektrische und magnetische Felder, die auf die Ionenstrahlen ähnlich wirken wie Sammellinsen auf Lichtstrahlen. Man kann mit ihnen je Stunde 10^{-3} bis 10^{-1} mg reine Isotope gewinnen.

Ein anderes Verfahren benutzt die stärkere *Diffusion* eines leichteren Isotops gegenüber einem schwereren. Bei allen Gasen kann man nach *Gustav Hertz*[1] durch wiederholte Diffusion durch Tonröhren oder Quecksilberdampf eine erhebliche Anreicherung leichter Isotope erzielen. Ein sehr wirksames Mittel zur Trennung ist die *Thermodiffusion*. Man versteht darunter die Erscheinung, daß in einem Raum mit verschiedener Temperatur die leichteren Isotope nach der Stelle höherer, die schweren nach der Stelle tieferer Temperatur diffundieren.

Neuerdings verwendet man dazu ein senkrechtes Rohr von 20 m und mehr Länge und einem Durchmesser von einigen Zentimetern, in dessen Achse ein elektrisch auf mehrere hundert Grad erhitzter Draht angebracht ist. Am Draht sammelt sich der leichte Anteil, an der Rohrwand der schwere. Der leichte steigt nach oben, der schwere sammelt sich unten. An den Enden können die Isotope abgenommen und gegebenenfalls einer weiteren Trennung unterworfen werden. Dieses Verfahren wird für gasförmige und flüssige Isotopengemische angewendet.

4. Fragen:

1. Was versteht man unter Isotopen?
2. Was bedeuten die Zahlen am Symbol eines Elements?
3. Wie arbeitet ein Massenspektrograph?
4. Wie kann man Isotope trennen?

§ 40. Der Bau der Atomkerne — Künstliche Kernumwandlungen

1. Die Protonen. Im Jahre 1919 wurden die Physiker und Chemiker der ganzen Erde durch eine Mitteilung *Rutherfords* überrascht. Danach war es ihm gelungen, Stickstoff unter Abspaltung von positiv geladenen Wasserstoffkernen in Sauerstoff umzuwandeln. Damit war die bis dahin als unumstößlich geltende Ansicht widerlegt, daß die Elemente nicht ineinander umgewandelt werden können.

[1] Gustav Hertz (geb. 1887), Professor in Leipzig, Nobel- und Stalinpreisträger, erhielt 1955 den Nationalpreis

Die uns bekannten Ablenkungen von α-Teilchen beim Durchgang durch Metallfolien zeigen bei eingehenden Untersuchungen, daß bei Elementen mit kleiner Kernladung die α-Teilchen den Kernen sehr nahe kommen. Sehr energiereiche Teilchen können sogar in einen Kern eindringen. *Rutherford* ließ schnellste α-Teilchen mit einer Geschwindigkeit von fast 20000 km/s, die von RaC, einem Zerfallsprodukt des Radiums, ausgehen, auf Stickstoff auftreffen, der sie absorbierte. Dadurch wurden vom Stickstoff positiv geladene Strahlen ausgelöst, die auf einem geeigneten Schirm Szintillationen hervorriefen. *Rutherford* bestimmte die Ladung und die Masse der ausgestrahlten Teilchen und zeigte, daß diese aus Wasserstoffkernen bestanden. Nach den Versuchsbedingungen konnten diese Teilchen nur aus den Stickstoffatomen stammen.

Damit wurde gleichzeitig die Erkenntnis über die Zusammensetzung der Atomkerne wesentlich gefördert. Man war schon vorher zu der Überzeugung gekommen, daß die Atomkerne ihrerseits wieder aus noch kleineren Bausteinen, die man auch *Elementarteilchen* nennt, zusammengefügt seien. Als solche hatte man die Kerne des Elementes mit der geringsten Masse, des Wasserstoffs, angenommen. Diese Vermutung wurde nunmehr zur Gewißheit. Es ergab sich:

Alle Atomkerne enthalten als Elementarteilchen positiv geladene Wasserstoffkerne, die man als *Protonen* bezeichnet.

Die Massenzahl des Wasserstoffkernes wurde zu 1,0075 bestimmt. Es ist üblich, den Wasserstoffkern durch das Symbol p wiederzugeben:

$$^{1}_{1}\mathrm{H} = \mathrm{p}.$$

Der Vorgang, der sich beim Eindringen eines α-Teilchens oder, was dasselbe ist, eines Heliumteilchens in den Stickstoffkern abspielt, läßt sich in folgender Weise formelmäßig wiedergeben:

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{17}_{8}\mathrm{O}.$$

Dafür wird oft auch die kürzere Darstellung

$$^{14}_{7}\mathrm{N}\ (\alpha, \mathrm{p})\ {}^{17}_{8}\mathrm{O}$$

gewählt. In der Klammer deutet man dabei an, daß ein α-Teilchen in den Kern aufgenommen und ein Proton ausgestoßen wird.

Die Summen der Massenzahlen und der Kernladungszahlen müssen auf beiden Seiten gleich sein. Zur Ordnungszahl 8 gehört Sauerstoff. Hier handelt es sich um ein Isotop mit der Massenzahl 17 gegenüber dem üblichen Sauerstoffkern mit der Massenzahl 16.

2. Die Neutronen. Reichlich 10 Jahre lang waren nur (α, p)-Umwandlungen bekannt. Da entdeckten die beiden deutschen Physiker *Bothe*[1] und *Becker*[2], daß bei α-Beschuß von Beryllium eine durchdringende Strahlung auftrat. Man hielt sie zunächst für eine Gammastrahlung. Merkwürdigerweise gingen aber die Strahlen

[1] Walther Bothe (geb. 1891), ein deutscher Physiker, Professor in Heidelberg, erhielt 1953 den Nobelpreis

[2] August Becker (geb. 1879), ein deutscher Physiker in Heidelberg, Mitarbeiter von Philipp Lenard

durch Blei mit geringerer Schwächung hindurch als durch wasserstoffhaltige Substanzen, beispielsweise durch Paraffin. Es zeigte sich, daß aus diesem bei der Bestrahlung Protonen ausgelöst wurden, deren Energie zu 5,7 MeV gemessen wurde. Aus stickstoffhaltigen Stoffen löste die vermeintliche α-Strahlung Stickstoffkerne mit einem Energiegehalt von 1,2 MeV aus.

Der englische Physiker *Chadwick*[1] gab die Erklärung für diese rätselhaften Erscheinungen. Er fand, daß durch den α-Beschuß ein Kernteilchen ausgelöst wird, das keine elektrische Ladung besitzt und deswegen **Neutron** genannt wurde.

Seine Massenzahl bestimmte *Chadwick* durch Anwendung der Stoßgesetze auf das Neutron, das Proton und den Stickstoffkern zu rund 1,0089. Sie ist demnach annähernd gleich der des Protons. Man kennzeichnet das Neutron, da es die Kernladungszahl 0 und angenähert die Massenzahl 1 hat, durch das Symbol $^{1}_{0}n$.

Aus der elektrischen Neutralität erklärt sich die große Durchdringungsfähigkeit der Neutronen. Mit elektrischen Ladungen können sie nicht in Wechselwirkung treten.

Nach der Entdeckung des Neutrons konnte auch das Formelschema der Reaktion angegeben werden, die zu der Entdeckung führte:

$$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n$$

oder

$$^{9}_{4}Be\ (\alpha, n)\ ^{12}_{6}C.$$

Es ist also eine Kernumwandlung von Beryllium in Kohlenstoff eingetreten.

3. Nachweis der Neutronen. Das Neutron kann beim Durchgang durch einen Stoff nicht ionisiert werden, da es keine Ladung trägt. Mit Hilfe der Nebelkammer und des Zählrohres läßt es sich also nicht direkt nachweisen. Wohl aber wirken die von einem Neutron aus wasserstoffhaltigen Stoffen ausgelösten Protonen ionisierend. Deshalb füllt man Nebelkammern mit Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffen oder überstreicht die Wände der Zählrohre mit Paraffin.

Da die Neutronen wegen ihrer Ladungslosigkeit von den Kernen nicht abgestoßen werden, können sich auch langsame Neutronen an Kerne anlagern und dabei (n, α)- oder (n, γ)-Reaktionen bewirken.

Im ersten Falle weist man die α-Teilchen nach, im zweiten erweisen sich die neuen Kerne als radioaktiv.

4. Die Positronen. Im Jahre 1932, also zwei Jahre nach Entdeckung des Neutrons, wurde ein neues Elementarteilchen entdeckt. Der amerikanische Physiker *Anderson* untersuchte die Einwirkung der kosmischen Strahlung, auf die wir noch näher zurückkommen werden, auf die Atmosphäre.

In ihr wird eine Sekundärstrahlung ausgelöst, die in der Nebelkammer Ionisationsspuren zeigt. Einzelne Spuren zeigten im Magnetfeld eine Ablenkung, die auf positive Ladung schließen ließ. Aus der Bahnkrümmung, der Weglänge und der Dicke der Spur errechnete *Anderson*, daß die Masse der positiv geladenen Teilchen gleich der eines Elektrons und der Betrag seiner Ladung gleich dem der Ladung eines Elektrons ist. Man bezeichnet dieses neue Teilchen als **Positron,** bisweilen auch als *positives Elektron.*

[1] James Chadwick (geb. 1881), Nobelpreis 1935

5. Die Bausteine der Atomkerne. Bis 1932 nahm man an, daß der Kern aus Protonen und Elektronen aufgebaut sei. Doch führte die Annahme der Existenz von Elektronen im Kern bald zu Widersprüchen. Daraufhin entwickelten unabhängig voneinander der deutsche Physiker *Werner Heisenberg*[1] und der sowjetische Physiker *Dmitri Dmitrijewitsch Iwanenko*[2] die Lehre, daß *der Kern aus Protonen und Neutronen besteht.* Damit wurden alle genannten Widersprüche beseitigt. Beide Kernbausteine werden **Nukleonen**[3] genannt.

Die Ordnungszahl Z oder die Kernladungszahl wird allein durch die Anzahl der Protonen bestimmt; sie wird daher auch *Protonenzahl* genannt. Es gilt der Satz:

> **Die Massenzahl A eines Kerns ist gleich der Summe aus der Protonenzahl Z und der Neutronenzahl N:**

$$A = Z + N.$$

Die Massen beider Kernbausteine sind nahezu gleich groß, nämlich angenähert gleich 1.

Aus den Kernsymbolen berechnet man demnach die Neutronenzahl, indem man den unteren Index vom oberen subtrahiert. Der Aluminiumkern, der beispielsweise durch das Zeichen $^{27}_{13}\mathrm{Al}$ wiedergegeben wird, enthält $27 - 13 = 14$ Neutronen.

6. Die Atomkerne der Isotope — Der schwere Wasserstoff. Aus dem Vorangehenden ergeben sich wichtige Folgerungen für den Bau der Isotope. Da die Isotope die gleiche Ordnungszahl haben, haben sie auch die gleiche Anzahl von Protonen im Kern; sie unterscheiden sich dagegen in der Anzahl der Neutronen. Wir können also definieren:

> **Isotope sind Elemente, deren Kerne aus gleich viel Protonen, aber aus einer verschiedenen Anzahl von Neutronen bestehen.**

Der gewöhnliche Wasserstoff $^{1}_{1}\mathrm{H}$ besitzt beispielsweise als Kern nur ein Proton. Der Kern seines Isotops $^{2}_{1}\mathrm{H}$ besteht aus einem Proton und einem Neutron. Dieses Isotop wird auch **Deuterium** genannt und wird durch das Zeichen $^{2}_{1}\mathrm{D}$ wiedergegeben. In Verbindung mit Sauerstoff liefert es das *schwere Wasser* $\mathrm{D_2O}$, das etwas dichter ist als gewöhnliches Wasser, einen etwas höheren Schmelz- und Siedepunkt hat und seine größte Dichte bei 11,6° C erreicht. Der Kern des schweren Wasserstoffs heißt Deuteron und hat das Symbol d.

Ein weiteres Isotop des Wasserstoffs ist das **Tritium**, dessen Kern außer einem Proton zwei Neutronen enthält. Sein Symbol ist $^{3}_{1}\mathrm{H}$.

7. Kernbindungskräfte. Eine naheliegende wichtige Frage ist die nach den Kräften, die die einzelnen Teilchen zusammenhalten. Zwischen den gleichartig

---

[1] Werner Heisenberg (geb. 1901), deutscher Physiker, Professor in Göttingen, Nobelpreisträger, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft

[2] Dmitri Dmitrijewitsch Iwanenko (geb. 1904), sowjetischer Physiker, Stalinpreisträger 1950, Professor an der Lomonossow-Universität Moskau

[3] núcleus (lat.) = Kern

elektrisch geladenen Protonen wirken bekanntlich abstoßende Kräfte. *Die Massenanziehungskräfte*, die wir aus makrophysikalischer Erfahrung kennen, *sind trotz der geringen Entfernung der Kernteilchen nicht groß genug, um* diese Abstoßung auszugleichen und *die tatsächlich vorhandene feste Bindung zu bewirken.* Auch magnetische Kräfte können zur Erklärung nicht herangezogen werden. Es ist auch möglich, daß für die im Kern wirksamen Kräfte andere Gesetze gelten als im makrophysikalischen Erfahrungskreis. Eine gesicherte Kenntnis darüber besitzen wir noch nicht. Experimentelle Erfahrungen geben aber einige Hinweise.

Wir betrachten den Zerfall von radioaktivem Stickstoff und Natrium:

$$^{13}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{13}_{6}\mathrm{C} + ({}^{0}_{+1}\mathrm{e}) \qquad \text{und} \qquad {}^{24}_{11}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + ({}^{0}_{-1}\mathrm{e}).$$

In beiden Fällen sind die Massenzahlen und demnach auch die Summen aus Protonen- und Neutronenzahlen gleich geblieben. Da im ersten Beispiel die Zahl der Protonen von 7 auf 6 gesunken ist, hat sich offenbar ein Proton in ein Neutron verwandelt. Bei der damit verbundenen Verminderung der Kernladung um eine Einheit ist ein Positron entstanden:

$$\mathrm{p} \rightarrow \mathrm{n} + \mathrm{e}^{+}.$$

Beim radioaktiven Zerfall des Natriums ist umgekehrt ein Neutron zu einem Proton geworden und es hat sich dabei ein freies Elektron gebildet.

$$\mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e}^{-}.$$

Damit ist zugleich die beim radioaktiven Zerfall auftretende β-Strahlung erklärt.

Diese Verwandlungsmöglichkeiten werden auch so erklärt, daß *Proton und Neutron zwei verschiedene Zustände desselben Nukleons sind.* Den Zustandswechsel versucht man durch den Austausch von Ladungen zwischen benachbarten Teilchen zu deuten und spricht daher von *Austauschkräften*, ohne daß damit Näheres über ihre Natur gesagt werden soll.

8. Fragen und Aufgaben:

1. Geben Sie das Formelschema für die Umwandlung des Stickstoffs in Sauerstoff an!
2. Was versteht man unter a) einem Proton, b) einem Neutron?
3. Wie ist die Massenzahl eines Kernes mit der Protonenzahl und der Neutronenzahl verknüpft?
4. Wie kann man die Neutronenzahl aus der Massenzahl errechnen? Geben Sie beispielsweise die Neutronenzahl von ${}^{39}_{19}\mathrm{K}$, ${}^{52}_{24}\mathrm{Cr}$, ${}^{80}_{35}\mathrm{Br}$, ${}^{190}_{76}\mathrm{Os}$, ${}^{200}_{80}\mathrm{Hg}$, ${}^{222}_{86}\mathrm{Rn}$ an!
5. Wie erklärt sich die große Durchdringungskraft der Neutronen?
6. Kennzeichnen Sie das Positron!
7. Wie erklärt man sich heute die Kernbindungskräfte?

§ 41. Die künstliche Radioaktivität

1. Die Entdeckung der künstlichen Radioaktivität. Im Jahre 1934 beobachtete das französische Physikerehepaar *Joliot-Curie*[1] den ersten Fall, daß ein durch Kernumwandlung entstandenes Element radioaktiv wieder zerfiel, mithin instabil war.

Durch α-Beschuß von Aluminium wurde ein in der Natur nicht vorkommendes Isotop des Phosphors nach folgender Reaktion gebildet:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}\,(\alpha,\,\mathrm{n})\,^{30}_{15}\mathrm{P}.$$

Das Forscherehepaar *Joliot-Curie* stellte fest, daß $^{30}_{15}$P mit einer Halbwertszeit von reichlich 3 Minuten unter Abgabe von Positronen radioaktiv zerfiel:

$$^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + ({}^{0}_{+1}\mathrm{e}).$$

Seither sind von allen Elementen radioaktive Isotope hergestellt worden. Sie senden entweder Elektronen oder Positronen aus, in einigen Fällen auch α-Teilchen. Bei der Aussendung von Elektronen und Positronen bleibt die Massenzahl erhalten, während die Ordnungszahl um 1 wächst oder sinkt.

2. Anwendung der künstlichen Radioaktivität. a) Medizin und Biologie. Wie die natürlichen radioaktiven Stoffe werden die künstlichen in der Heilkunde zu Bestrahlungen verwendet. Sie haben den Vorzug, daß sie verhältnismäßig leicht zu beschaffen und leicht zu dosieren sind. Besonders bedeutungsvoll sind sie als *Indikatoren* in der biologischen und chemischen Forschung.

Es ist eine wichtige Aufgabe, den Weg der von den Verdauungsorganen aufgenommenen Nährstoffe im Körper zu verfolgen. Da sich die Atome der Nährstoffe von den im Körper bereits befindlichen nicht unterscheiden, läßt sich ihr Verbleib im einzelnen nicht ohne weiteres feststellen. Man setzt daher der Nahrung kleinste Mengen radioaktiver Isotope etwa von Phosphor oder Natrium zu, die chemisch nicht anders wirken als die inaktiven Atome. Mit einem Zählrohr tastet man dann von außen den Körper ab. Aus der Zahl der Impulse läßt sich die Verteilung der radioaktiven Atome im Körper ermitteln. Ähnlich kann man den Verbleib radioaktiver Salze, die dem Dünger beigemischt wurden, in Pflanzen studieren. Schnitte durch Pflanzenteile werden auf photographische Platten gelegt. Nach der Entwicklung zeigen sich die Stellen, auf denen radioaktive Atome lagen, stärker geschwärzt als die andern. Abb. 181/1 gibt den photographischen Abzug einer solchen Platte wieder.

Wenn man weiß, welche Stoffe sich vorzugsweise in bestimmten Organen sammeln, so bietet sich auch die Möglichkeit, diese *Organe von innen her durch Strahlung radioaktiver Isotope zu behandeln.* Man verwendet dazu Isotope mit so

[1] Frédéric Joliot (geb. 1900), ein um die Erforschung der Atomenergie und ihre Verwendung zu friedlichen Zwecken sehr verdienter französischer Physiker, Professor in Paris. Er erhielt zusammen mit seiner Ehefrau Irene Curie (geb. 1897), der Tochter von Pierre und Marie Curie, 1935 für seine Arbeiten den Nobelpreis. Er setzte sich mannhaft für die Ächtung der Atombombe ein und wurde daraufhin von den imperialistischen Machthabern seines Amtes als Leiter des Pariser Forschungsinstituts für Atomenergie und des dort befindlichen Uranmeilers enthoben. Er wurde 1950 mit dem Stalinfriedenspreis ausgezeichnet und ist seit 1950 Präsident des Weltfriedensrates

kleiner Halbwertszeit, daß die Radioaktivität nach kurzer Zeit erloschen ist. So bekämpft man Gehirntumor, indem man dem Kranken arteigenes, mit radioaktivem Jod beladenes Bluteiweiß eingibt.

Es ist wahrscheinlich, daß auch die *Konservierung von Lebensmitteln* mit Hilfe der Strahlen künstlicher Isotope möglich sein wird. Besonders scheint das Kobalt 60 hierfür geeignet zu sein.

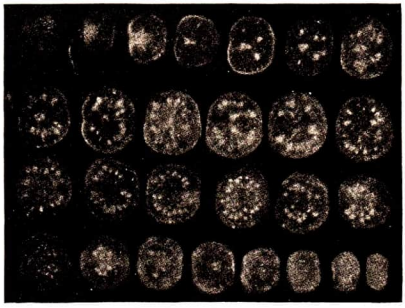


Abb. 181/1. Scheiben von Tomatenfrüchten einer mit radioaktivem Chlorzink gedüngten Pflanze. Man erkennt deutlich, daß sich das radioaktive Chlorzink insbesondere in den Samenkörnern abgelagert hat.

b) Chemie. Bei der *quantitativen Analyse* läßt sich die Vollständigkeit der Trennung durch Zusatz radioaktiver Isotope prüfen. In manchen Fällen gelingt es, durch die Beimengung von radioaktiven Isotopen über die *Anordnung bestimmter Atome* in einer Verbindung Auskunft zu erhalten.

c) Industrie. Röntgenstrahlen zur *Materialprüfung*, die komplizierte Apparate voraussetzen, können durch γ-Strahlen von Radioisotopen ersetzt werden. Das ist möglich bei der Dickenprüfung in der Papier-, Textil- und Kunststoffherstellung. Unterhalb des Werkstoffs sind Radioisotope, oberhalb Zählrohre angebracht, die jede Abweichung registrieren.

Die *Abnutzung von Reifen* läßt sich an der Bremsspur mit Zählrohren ermitteln, wenn dem Material Radioisotope zugesetzt werden.

In *Hochöfen* läßt sich die Höhe der Schmelze ermitteln, wenn man außen eine Strahlenquelle und auf der entgegengesetzten Seite ein Zählrohr bewegt.

3. Fragen und Aufgaben:

1. Was versteht man unter radioaktiven Isotopen?
2. Erläutern Sie die Verwendung der radioaktiven Isotope als Indikatoren in der Ernährungsforschung!
3. Wie können Radioisotope in der Industrie verwendet werden?

§ 42. Moderne Verfahren der Kernumwandlung

1. Kernumwandlungen durch Einwirkung von Elementarteilchen. Seit 1919 hat man gelernt, Kernumwandlungen mit verschiedenem *Beschuß* durchzuführen, nämlich mit α-Teilchen, Protonen (p), Deuteronen (d), Neutronen (n) und mit γ-Quanten.

Theoretisch bedeutsam ist die Möglichkeit, Quecksilberkerne in Goldkerne zu verwandeln, weil damit das Problem der Alchimisten gelöst wird, freilich nur für Spurenmengen.

$$^{198}_{80}\mathrm{Hg} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{198}_{79}\mathrm{Au} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}.$$

$^{198}_{79}$Au ist allerdings instabil und zerfällt unter β-Strahlung wieder zu Quecksilber. Auch ein Platinkern läßt sich in Gold umwandeln, und zwar nach folgendem Schema:

$$^{196}_{78}\mathrm{Pt}\ (\mathrm{n}, \gamma)\ {}^{197}_{78}\mathrm{Pt} \rightarrow {}^{197}_{79}\mathrm{Au} + ({}^{0}_{-1}\mathrm{e}).$$

Mit Hilfe sehr energiereicher Teilchen ist es möglich, einen Kern zu verdampfen, das heißt ihn in Protonen, Neutronen, Deuteronen und leichte Kerne zu zersplittern.

2. Das Zyklotron. Ein technisches Problem ist die Erzeugung möglichst energiereicher Geschosse; denn die α-Teilchen der radioaktiven Stoffe stehen nur in geringer Menge zur Verfügung. Deswegen sind *Einrichtungen konstruiert worden, mit deren Hilfe man geladene Teilchen beschleunigen kann.* Für α-Teilchen, Protonen und Deuteronen verwendet man heute das von *Lawrence*[1] konstruierte *Zyklotron* (Abb. 182/1). Es besteht aus einer in der Mitte durch einen Spalt in zwei Teile zerlegten flachen Metalldose, die sich in einem Hochvakuum befindet. Die beiden Teile sind voneinander isoliert, sie werden wegen ihrer D-förmigen Gestalt die *D-Elektroden* oder kurz die $\mathcal{D}$s genannt. Die Dose liegt zwischen den Polen eines riesigen Elektromagneten, dessen bis auf beabsichtigte Randabweichungen homogenes Magnetfeld in der Abb. 182/1 senkrecht zur Zeichenebene wirkt. An den beiden $\mathcal{D}$s liegt eine hochfrequente Wechselspannung, die durch einen Hochfrequenzgenerator erzeugt wird. Im Spalt besteht demnach ein elektrisches Wechselfeld.

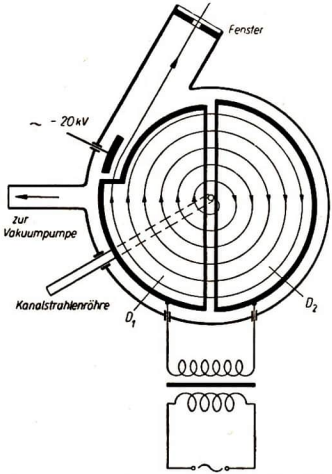


Abb. 182/1. Anordnung eines Zyklotrons (schematisch)

In der Mitte der Dose liegt als Ionenquelle eine Kanalstrahlenröhre. Wenn die Wechselspannung von etwa 10000 V eingeschaltet ist, so wird ein Ion in das entsprechend geladene $\mathcal{D}$ hineingezogen und beschreibt unter der Einwirkung des Magnetfeldes eine halbkreisförmige Bahn. In dem Augenblick, da es den Spalt

[1] Ernest Orlando Lawrence (geb. 1901), ein bedeutender amerikanischer Physiker, der für seine Forschungen 1941 den Nobelpreis erhielt

zwischen den Ds erreicht, wechselt das Feld seine Richtung. Das Teilchen wird durch das elektrische Feld des Spaltes jedesmal beschleunigt, wenn es ihn passiert, und durchläuft das andere D mit größerer Geschwindigkeit und demnach auf einer Bahn mit größerem Radius. Da die Bahngeschwindigkeit und die Bahnlänge verhältnisgleich sind, ist die Zeit konstant, die zwischen zwei Durchgängen durch den Beschleunigungsspalt verstreicht. Der Feldwechsel zwischen den Ds muß genau auf die Umlaufsfrequenz der Teilchen abgestimmt sein. Diese beschreiben dann beschleunigt eine sich öffnende Spirale, bis sie am Rande anlangen. Durch eine an einem kleinen Kondensator liegende Hilfsspannung U wird der Ionenstrahl abgelenkt. Er tritt durch ein Fenster in den Außenraum und wird dort zur Bestrahlung verwendet.

Ein Zyklotron erfordert einen großen Aufwand an Material, da die Magneten bei einem Felddurchmesser von 5 m bis zu 5000 t wiegen. Es liefert aber Energien von mehreren 100 MeV. Abb. 183/1 zeigt das Zyklotron des Instituts für Kernphysik der Akademie der Wissenschaften der UdSSR. Es ist das größte seiner Art.

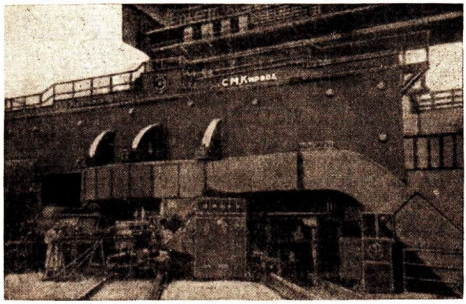


Abb. 183/1 Zyklotron. Durchmesser des homogenen Feldes 6 m, Masse des Elektromagneten 7000 t, erreichbare Geschwindigkeit der Teilchen 250 000 km/s

Außer dem Zyklotron sind noch andere Beschleunigungsgeräte für Elementarteilchen entwickelt worden, von denen das *Betatron* am bekanntesten ist. Es werden dadurch Elektronen mit einem Energiegehalt bis zu 1000 MeV erzeugt. Auf die Konstruktion des Betatrons kann hier nicht näher eingegangen werden.

3. Kernumwandlungen durch Neutronen. Besonderes Interesse beanspruchen die Kernumwandlungen durch Neutronen. Neutronen hoher Energie kann man nicht unmittelbar in Beschleunigungsanlagen gewinnen, da sie keinerlei Ladung besitzen. Wohl aber entstehen *sehr schnelle Neutronen* beim Beschuß von Lithium, Beryllium, Bor und Kohlenstoff mit schnellen, im Zyklotron beschleunigten Deuteronen, nach dem Schema

$$^{9}_{4}\mathrm{Be}\,(\mathrm{d},\mathrm{n})\,^{10}_{5}\mathrm{B} \quad \text{oder} \quad ^{7}_{3}\mathrm{Li}\,(\mathrm{d},\mathrm{n})\,^{8}_{4}\mathrm{Be}.$$

Die bei dem letzten Vorgang gebildeten Neutronen haben eine Energie von 14,2 MeV.

Mit solchen schnellen Neutronen ist es möglich, auch aus schweren Kernen α-Teilchen und Protonen loszulösen und die Kerne somit durch Neutronenbeschuß radioaktiv zu machen. Dagegen genügen schon Neutronen von geringer Geschwindigkeit zum Verursachen von Kernumwandlungen, indem sie beim Aufprall auf einen Kern in diesen eintreten und dadurch eine Kernumwandlung vorbereiten.

Will man *langsame Neutronen* erhalten, so benutzt man die Tatsache, daß unelastische Zusammenstöße mit den massegleichen Wasserstoffkernen zu großen Energieverlusten der Neutronen führen. Man umgibt die Ausgangsstelle der Neutronen mit einer Wasser- oder Paraffinschicht von der Dicke einiger Zentimeter. Dadurch wird die Geschwindigkeit der Neutronen so verringert, daß sie der Geschwindigkeit bei der Wärmebewegung von Atomen oder Molekülen gleichkommt. Man spricht dann von *Wärmeneutronen*.

Langsame Neutronen werden von Protonen unter Bildung von Deuteronen absorbiert:

$$^{1}_{1}\mathrm{H} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{2}_{1}\mathrm{H}\,.$$

Deshalb darf die Bremsschicht nicht zu dick sein. Stoffe, die nur abbremsen, aber nicht absorbieren, sind schweres Wasser und Kohlenstoff in Form von Graphit. Man nennt sie *Moderatoren*[1].

Der italienische Physiker *Fermi*[2] fand, daß diese Wärmeneutronen besonders bei Indium, Rhodium, Silber künstliche Radioaktivität hervorrufen. Man benutzt daher diese Stoffe als Indikatoren für Neutronen. Bei manchen Stoffen wird das Neutron nur eingefangen, ohne daß künstliche Radioaktivität eintritt. Dann entsteht ein inaktives Isotop des ursprünglichen Elements. Diese Umwandlung durch langsame Neutronen gelingt fast bei allen Elementen; es sind über 220 Fälle bekannt.

4. Transurane. Die Möglichkeit der Umwandlung von Kernen führte zu der *künstlichen Erzeugung von Elementen mit höherer Kernladungszahl als 92*. Man nennt diese Elemente *Transurane*. 1936 gelang den deutschen Forschern *Otto Hahn*[3], *Lise Meitner*[4] und *Fritz Straßmann* der Nachweis des Elements 93, das später Neptunium (Np) genannt wurde. Die formelmäßige Wiedergabe des Vorganges ist:

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{239}_{92}\mathrm{U} \rightarrow ^{239}_{93}\mathrm{Np} + (^{0}_{-1}\mathrm{e})\,.$$

Durch Neutronenbeschuß entsteht demnach aus gewöhnlichem Uran ein radioaktives Isotop. Dieses ist ein β-Strahler und verwandelt sich in ein Element mit der Ordnungszahl 93. Auch dieses Element ist instabil und geht unter β-Strahlung in ein Element mit der Ordnungszahl 94 über:

$$^{239}_{93}\mathrm{Np} \rightarrow ^{239}_{94}\mathrm{Pu} + (^{0}_{-1}\mathrm{e})\,.$$

Das entstandene Element wurde Plutonium (Pu) genannt.

[1] moderátor (lat.) = Mäßiger, Lenker

[2] Enrico Fermi (1901–1955), ein italienischer Physiker von Bedeutung, erhielt 1938 den Nobelpreis

[3] Otto Hahn (geb. 1879), ein bedeutender deutscher Physiker, erhielt 1944 den Nobelpreis, Professor in Göttingen, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft

[4] Lise Meitner (geb. 1878), eine deutsche Physikerin und Mitarbeiterin von Otto Hahn

Es wurden weitere Elemente z. T. mit Isotopen hergestellt, die über die Ordnungszahl 94 hinausgehen. Sie sind alle radioaktiv. Ihre Bezeichnungen sind

Americium ($_{95}$Am), Curium ($_{96}$Cm),
Berkelium ($_{97}$Bk), Californium ($_{98}$Cf).

Das Plutonium wird bereits in technischer Großdarstellung gewonnen.

Darüber hinaus gelang es in jüngster Zeit, ein Element mit der Ordnungszahl 99 zu erzeugen, das 1955 den Namen Einsteinium ($_{99}$E) erhielt. Nach 1954 wurden noch zwei als Fermium ($_{100}$Fm) und als Mendelevium ($_{101}$Mv) bezeichnete Elemente mit den Ordnungszahlen 100 und 101 entdeckt.

5. Fragen und Aufgaben:

1. Mit welchen Teilchen können Kernumwandlungen durchgeführt werden?
2. Welche Wirkung hat das elektrische Feld im Spalt der D-Elektroden eines Zyklotrons?
3. Warum eignet sich ein Zyklotron nicht zur Beschleunigung von Neutronen?
4. Nennen Sie die bisher bekannten Transurane!

§ 43. Der Energieumsatz bei Kernumwandlungen — Die Kernspaltung

1. Der Massendefekt. Wenn man die genauen Atomgewichte der Kerne mit der Summe der Massenzahlen der im Kern enthaltenen Protonen und Neutronen vergleicht, so ergibt sich stets, daß die Masse des Kerns kleiner ist als die Summe der Massen seiner Bestandteile. Diese Differenz heißt **Massendefekt.**

So beträgt das Atomgewicht des Heliumkerns 4,0038, die Summe der Massenzahlen je zweier Protonen und Neutronen 4,0338. Beim Aufbau des Kerns nimmt demnach die Masse um 0,03 Atomgewichtseinheiten ab.

Aus Erfahrungen, die in der Schule nicht behandelt werden können, weiß man, daß die Veränderung einer Masse stets mit einer entsprechenden Änderung der Energie verbunden ist. Es besteht zwischen beiden Größen eine zahlenmäßig angebbare Beziehung, nämlich die *Einsteinsche Gleichung*

$$E = m \cdot c^2.$$

Hierin bedeutet c die Lichtgeschwindigkeit. Wählen wir als Einheiten g, cm, s, so würde beispielsweise der Masse 1 g die Energie

$$E = 1 \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 \text{ erg} = 9 \cdot 10^{20} \text{ erg}$$

entsprechen.

Für 1 mg ergibt sich

$$E = 9 \cdot 10^{17} \text{ erg} = 9 \cdot 10^{17} \cdot 0{,}239 \cdot 10^{-7} \approx 2{,}15 \cdot 10^{10} \text{ cal} = 2{,}15 \cdot 10^{7} \text{ kcal}.$$

Bei der Bildung des Grammatoms Helium wird demnach die Energie von

$$E = 30 \cdot 2{,}15 \cdot 10^{7} \text{ kcal} = 6{,}45 \cdot 10^{8} \text{ kcal}$$

frei. Die Massendefekte entsprechen der Tatsache, daß der Energiegehalt eines Atomkerns kleiner ist als die Summe der Energien der ihn bildenden Teilchen im freien Zustand.

2. Die Bindungsenergie der Atomkerne. Da Massendefekte massenspektrographisch sehr genau bestimmt werden können, lassen sich aus den Massendefekten genaue Energieerrechnungen durchführen. So sind heute die *Bindungsenergien* vieler Atomarten bekannt. Es hat sich dabei herausgestellt, daß diese Energien den Massenzahlen annähernd proportional sind. Sie wachsen also ungefähr linear mit der Zahl der Nukleonen und betragen je Nukleon etwa 8 MeV.

Auch bei Kernumwandlungen unterscheidet man wie bei chemischen Vorgängen exotherme Umwandlungen, bei denen Energie frei wird, und endotherme Umwandlungen, bei denen Energie verbraucht wird.

Bei der formelmäßigen Wiedergabe aller Kernvorgänge stehen auf der linken Seite Ausgangskern und stoßendes Teilchen, auf der rechten Seite Endkern und eventuell ausgeschleudertes Teilchen. Ergibt sich links eine größere Summe der Massen als rechts, so ist die Kernreaktion exotherm. Als Äquivalent des Massendefektes tritt die kinetische Energie der rechts stehenden Teile auf, die nach Umwandlung als Wärme meßbar wird.

Als Beispiel untersuchen wir die Heliumsynthese, bei der aus Lithium und Wasserstoff Helium entsteht.

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} + \text{Energiebetrag}$$

$$7{,}0165 + 1{,}0076 \rightarrow 2 \cdot 4{,}0028 + \text{Energiebetrag}$$

Der frei werdende Energiebetrag von 17,2 MeV entspricht 0,0185 ME

Der berechnete Wert stimmt genau mit gemessenen Werten überein.

Ist jedoch die Summe der Massen auf der linken Seite kleiner als die Summe der Massen auf der rechten Seite, so handelt es sich um einen endothermen Vorgang. Die der Massendifferenz äquivalente Energie muß zugeführt werden, damit die Umwandlung in Gang kommt. Unterhalb einer Mindestenergie findet diese Kernumwandlung überhaupt nicht statt.

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + \text{Energiebetrag} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

$$14{,}0037 + 4{,}0028 + \text{Energiebetrag} \rightarrow 17{,}0001 + 1{,}0076$$

Die zugeführte Energiemenge von 1,018 MeV entspricht 0,0012 ME

Einen anschaulichen Vergleich mit den Energiebeträgen bei chemischen Vorgängen liefert unser exothermes Beispiel, wenn man es vom Einzelkern auf ein kg-Mol umrechnet. Man hat dann die Energie mit $6 \cdot 10^{26}$ zu multiplizieren und erhält $103{,}2 \cdot 10^{26}$ MeV. Diese Energie entspricht annähernd $4 \cdot 10^{11}$ kcal.

1 kg Steinkohle hat einen Heizwert von knapp 8000 kcal.

Eine Überschlagsrechnung ergibt, daß 7 kg Lithium theoretisch so viel Energie liefern können wie

$$\frac{4 \cdot 10^{11}}{8 \cdot 10^{3}} = 0{,}5 \cdot 10^{8} = 50 \cdot 10^{6}\ \text{kg Steinkohle.}$$

Da Kohlenstoff das Atomgewicht 12 besitzt, liefert die auf 1 kg-Mol bezogene Kernreaktion eine rund $4 \cdot 10^{6}$mal so große Energie wie der chemische Vorgang der Verbrennung.

Es hat sich allgemein ergeben, daß bei Kernreaktionen etwa das Millionenfache der Energiebeträge auftritt wie bei chemischen Vorgängen.

3. Kernspaltung. Ganz besondere Bedeutung ist im Hinblick auf den Energieumsatz der *Spaltung schwerer Atomkerne* beizumessen.

Fermi hatte als erster versucht, ein Transuran mit der Ordnungszahl 93 durch Beschuß von Uran mit Neutronen herzustellen. Schon 1934 glaubte er, am Ziele zu sein, als er bei seinen Versuchen neue β-strahlende Stoffe erhielt. Nähere Untersuchungen zeigten, daß sich Umwandlungsreihen komplizierter Art feststellen ließen. Unter den neuen Stoffen wurde überraschenderweise von den deutschen Forschern *Otto Hahn* und *Fritz Straßmann* 1939 ein solcher gefunden, der chemisch nicht von Barium zu trennen war. Dieses Element finden wir im periodischen System etwas oberhalb der Mitte, während Uran am Ende steht.

Die deutsche Physikerin *Lise Meitner* sprach als erste die Vermutung aus, daß hier zum ersten Male eine *Kernspaltung* nachgewiesen sei. Man hat diese von einer Kernumwandlung zu unterscheiden, bei der es sich nur um die Aufnahme oder den Austritt einzelner Protonen handelt. Im Gegensatz dazu zerfällt der Kern bei einer Kernspaltung in zwei nahezu gleich große Teile.

Weitere Untersuchungen bestätigten die Richtigkeit dieses Gedankens. Der Urankern zerfällt in zwei Spaltstücke, auf die sich seine Ladung verteilt. Die Summe ihrer Ordnungszahlen muß demnach immer 92 sein, zum Beispiel

$$\begin{aligned} {}_{92}\mathrm{U} &= {}_{56}\mathrm{Ba} + {}_{36}\mathrm{Kr}, \\ {}_{92}\mathrm{U} &= {}_{38}\mathrm{Sr} + {}_{54}\mathrm{X}, \\ {}_{92}\mathrm{U} &= {}_{35}\mathrm{Br} + {}_{57}\mathrm{La}, \\ {}_{92}\mathrm{U} &= {}_{41}\mathrm{Nb} + {}_{51}\mathrm{Sb}. \end{aligned}$$

Es sind mehr als 30 verschiedene Elemente als Spaltstücke nachgewiesen worden.

Nähere Untersuchungen der mit Hilfe des Massenspektrographen getrennten Isotopen zeigten, daß *nur das seltene Uranisotop* $^{235}_{92}\mathrm{U}$ *gespalten wird*, nicht aber das viel häufigere $^{238}_{92}\mathrm{U}$. $^{235}_{92}\mathrm{U}$ und $^{238}_{92}\mathrm{U}$ sind in natürlichem Uran im Verhältnis 1:140 vorhanden. Die Spaltung des $^{235}_{92}\mathrm{U}$ erfolgt durch langsame Neutronen.

Zunächst bildet sich durch Neutronenaufnahme $^{239}_{92}\mathrm{U}$, dieses Isotop zerfällt weiter unter enormer Wärmeentwicklung. Sie beträgt $3{,}7 \cdot 10^9$ kcal je Grammatom Uran. Das entspricht einer Energie von 160 MeV bei jeder einzelnen Kernspaltung.

$^{238}_{92}\mathrm{U}$ geht durch Neutroneneinfang in das Isotop $^{239}_{92}\mathrm{U}$ über, das unter β-Strahlung zum Transuran Neptunium wird.

Kernspaltungen durch Neutronenbeschuß sind inzwischen auch bei anderen schweren Isotopen, beispielsweise bei

$$^{232}_{90}\mathrm{Th}, \quad ^{231}_{91}\mathrm{Pa}, \quad ^{239}_{94}\mathrm{Pu}$$

durchgeführt worden.

Mit sehr hohen Energien der Neutronen konnte man auch Blei, Wismut, Platin, Tantal spalten. *Die Wärmeentwicklung beruht darauf, daß die Summe der Massendefekte der Spaltprodukte größer ist als der Massendefekt des gespaltenen Elements.*

Bei der Uranspaltung ist die folgende Beobachtung von größter Bedeutung gewesen. Da im Urankern $236 - 92 = 144$ Neutronen vorhanden sind, haben wir $144 - 92 = 52$ überschüssige Neutronen. Diese Zahl ist viel größer als bei den Kernspaltstücken, wenn sie ihren stabilen Zustand erreicht haben.

Wohin geraten die Neutronen?

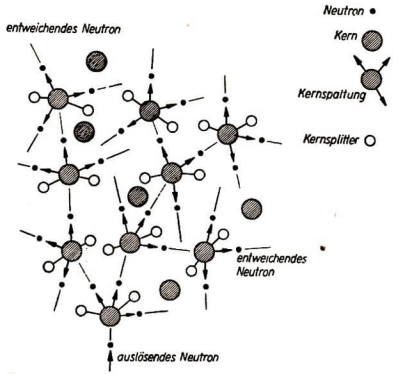


Abb. 188/1. Schematische Darstellung der Kettenreaktion beim Zerfall eines Urankerns. Die bei der ersten Spaltung frei werdenden Neutronen werden durch Zusammenstöße gebremst, bis sie als langsame Neutronen neue Kerne spalten können.

Bei jeder Spaltung werden ein bis drei Neutronen frei, und die Spaltstücke gleichen ihren außerdem noch verbleibenden Überschuß an Neutronen durch β-Strahlen aus, indem sie Neutronen in Protonen umwandeln. Die Spaltstücke sind demnach radioaktiv bis zur Umwandlung in stabile Kerne, und die bei der Spaltung auftretende Neutronenemission vermag weitere Urankerne zu spalten. Ein solcher Vorgang mit dauerndem Anstoß zur gleichen Reaktion heißt *Kettenreaktion*. Durch Abb. 188/1 ist er schematisch veranschaulicht. Damit eröffnete sich die Möglichkeit, auf diesem Wege eine Energieerzeugung praktisch durchzuführen.

4. Fragen:

1. Was versteht man unter dem Massendefekt?
2. Was wissen Sie über den Zusammenhang zwischen Energie und Masse?
3. In welcher Größenordnung liegt die Bindungsenergie eines Atomkerns?
4. Wie kann bei einer Kernspaltung eine Kettenreaktion auftreten?

§ 44. Erzeugung und Anwendung der Atomenergie

1. Maßnahmen zur Einleitung einer Kettenreaktion. Es hat sich gezeigt, daß das Freiwerden von Neutronen bei der Kernspaltung durchaus nicht zu einer Kettenreaktion führen muß.

Man muß folgende Maßnahmen treffen, wenn man eine Kettenreaktion auslösen will:

1. Es sind alle Beimischungen aus dem Uran zu entfernen, die langsame Neutronen stark absorbieren.
2. Die Uranmenge muß so groß sein, daß frei werdende Neutronen möglichst auf einen Kern stoßen.

Wenn die Bedingungen so gewählt sind, daß die bei einer Kernspaltung entstandenen Neutronen mindestens je einen neuen Urankern spalten, so wird eine Kettenreaktion einsetzen, die bei jeder einzelnen Kernspaltung 160 MeV an

Energie frei macht. Wäre es möglich, 1 g Uran, das rund $4 \cdot 10^{21}$ Atome enthält, in einer Sekunde zu spalten, so würde eine Energie von

$$E \approx 4 \cdot 160 \cdot 10^{21}\,\text{MeV} \approx 640 \cdot 10^{27}\,\text{eV} \approx 640 \cdot 10^{27} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\text{Ws}$$

$$\approx 1000 \cdot 10^{8}\,\text{Ws} \approx 10^{11}\,\text{Ws} \approx \frac{10^{11}}{3{,}6 \cdot 10^{6}}\,\text{kWh} \approx 3 \cdot 10^{4}\,\text{kWh}$$

verfügbar werden.

Die physikalische Wissenschaft hat mit der Kernspaltung der Menschheit ungeheure Möglichkeiten zur Energieentfaltung in die Hand gegeben. An den Menschen liegt es, sie zu ihrem Wohle zu verwenden. Man kann die Zahl der Kernspaltungen je Sekunde steuern und so eine gleichbleibende Energiegewinnung erreichen. Man kann aber auch diese Spaltung lawinenartig in kürzester Zeit durch eine spaltbare Masse sich ausbreiten lassen und damit eine Explosion von ungeheurer Wirkung hervorrufen.

2. Die Verwendung der Atomenergie für friedliche Zwecke. Will man die bei Kernspaltungen frei werdenden Energiemengen wirtschaftlich verwerten, so muß man die Kern-Kettenreaktion steuern können. Das heißt, es ist notwendig, die Zahl der Spaltungen nach Bedarf zu regeln. Das gelingt durch besondere Einrichtungen in einem *Kernreaktor*, den man auch *Atommeiler*, *Uranbrenner* oder *Uranbatterie* nennt. Man hat sich darunter eine Anlage von einigen Kubikmetern Rauminhalt vorzustellen. Sie enthält eine gitterartige Anordnung von gleichmäßigen Stücken reinen natürlichen Urans in Mengen von 10 bis 100 t, die in Graphit eingebettet sind (Abb. 189/1). Sobald eine Kernspaltung von U 235 durch ein Neutron eingeleitet worden ist, entstehen etwa drei neue Neutronen. Sie werden durch die Graphitmasse stark gebremst. Als Moderator eignet sich auch schweres Wasser; Graphit läßt sich aber leichter in genügender Menge und Reinheit gewinnen. Die verlangsamten Neutronen können wieder einen Kern U 235 spalten, sie werden möglicherweise aber auch nach außen entweichen oder von U 238 absorbiert werden:

$$^{238}_{92}\text{U} + \text{n} \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U} + \gamma.$$

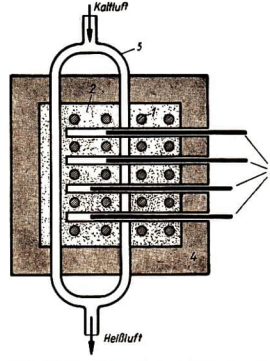


Abb. 189/1. Schematische Wiedergabe eines Kernreaktors. *1* Uranstäbe, 2 Graphit, 3 Cadmiumstäbe als Regulatoren, *4* Schutzmantel zur Abschirmung, 5 Leitungssystem zur Abführung der Wärme

Diese Absorption erfolgt vorzugsweise bei ganz bestimmtem Energieinhalt der Neutronen (etwa 25 eV), während die Spaltung von U 235 am leichtesten durch noch langsamere Neutronen ausgelöst wird. Da das Volumen des Uranbehälters mit der 3. Potenz des Radius, die Oberfläche mit der 2. Potenz wächst, so gibt es eine bestimmte Größe, bei der das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen günstig ist, so daß relativ wenig Neutronen entweichen und sich die Kettenreaktion fortsetzen kann.

Die Anzahl der je Zeiteinheit frei werdenden wirksamen Neutronen regelt man dadurch, daß man *Regulatoren* oder *Absorbenten* für langsame Neutronen in die Uranbatterie mehr oder weniger tief einschiebt. Am geeignetsten sind Cadmiumstäbe, mit denen man eine entsprechende Anzahl langsamer Neutronen abfängt.

Mit den Stäben kann die Reaktion auch zum Stillstand gebracht werden. Die Regulierung erfolgt während des Betriebes automatisch mit Hilfe einer *Ionisationskammer*. Bei der gewünschten Reaktionsstärke wird durch die Strahlung ein Ionisierungsstrom erzeugt, der mit Hilfe eines Automaten die Eintauchtiefe der Cadmiumstäbe regelt. Eine Uranbatterie erfordert starke Abschirmeinrichtungen gegen Neutronen und γ-Strahlen. Gegen ausgestrahlte Neutronen

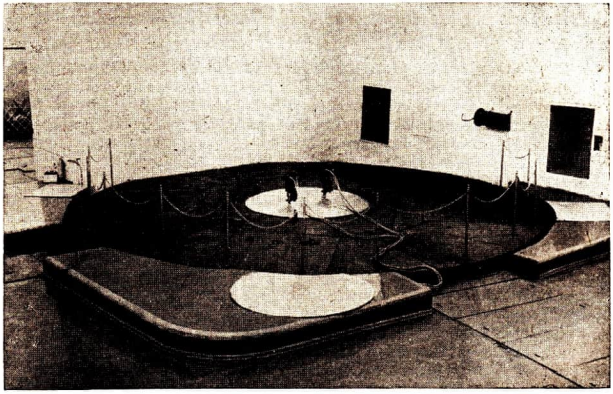


Abb. 190/1. Kernreaktor in einem sowjetischen Atomkraftwerk

schützen starke Schichten wasserstoffhaltiger Stoffe, gegen γ-Strahlen Schichten aus Blei und anderen schweren Elementen. Die Energieentwicklung in der Batterie gibt die Möglichkeit, Atomkraftwerke zu schaffen, die der Energiewirtschaft eine ganz neue Grundlage geben. Abb. 190/1 zeigt den oberen Teil eines Kernreaktors in einem sowjetischen Atomkraftwerk. Die Abb. 191/1 gibt die Anlage eines solchen *Atomkraftwerkes* schematisch wieder. Durch die Schaffung solcher Atomkraftwerke erwachsen der Menschheit ungeahnte Möglichkeiten der *Energiegewinnung für friedliche Zwecke*.

Die bisher fast ausschließlich als Kesselfeuerung dienende Kohle könnte dann ganz der chemischen Industrie zugeführt und die Elektrizitätsversorgung außerordentlich erweitert werden. Es ist außerdem bei der relativen Kleinheit der für den Betrieb eines Kraftwerkes erforderlichen Uranmengen ein wesentlicher Vorteil, von der Wahl des Standortes ganz unabhängig zu sein. Physik und Technik

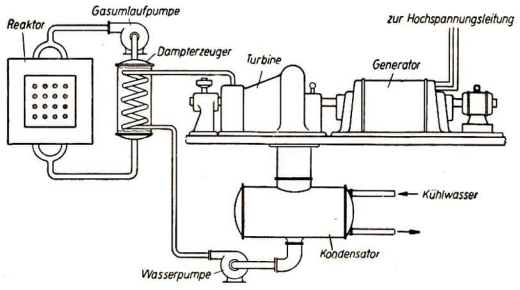


Abb. 191/1 Schematische Darstellung eines Atomkraftwerkes (stark vereinfacht)

stehen vor ganz großen friedlichen Aufgaben, denen sich kein Volk versagen darf. Beispielgebend ist dabei die Sowjetunion vorangegangen. Seit 1954 arbeitet dort ein Atomkraftwerk mit einer Leistung von 5000 kW (Abb. 191/2). Zehn- und

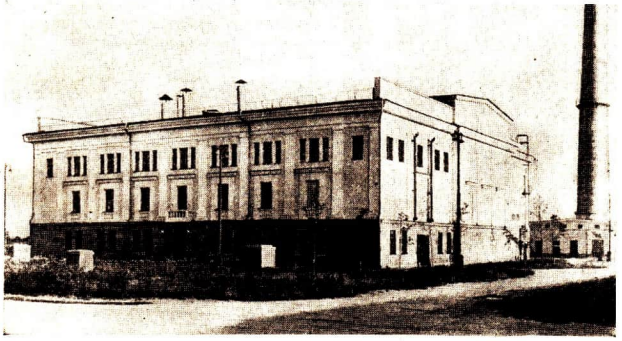


Abb. 191/2. Atomkraftwerk in der Sowjetunion

zwanzigmal so leistungsfähige Werke sind im Bau. Damit hat das Atomzeitalter wirklich begonnen. Gleichzeitig hat die Sowjetunion auch den anderen Ländern des Friedenslagers ihre Erfahrungen auf diesem Gebiet zur Verfügung gestellt. Sie leistet auch der Deutschen Demokratischen Republik wissenschaftlich-technische Hilfe beim Aufbau eines Kernreaktors und anderer Anlagen zur friedlichen Verwendung der Atomenergie.

3. Die Atombomben. Dem friedlichen Verwendungszweck der Atomkraftwerke steht die verabscheuungswürdige Verwendung der Atomenergie in *Atombomben*

als Massenvernichtungsmittel gegenüber. Wir wissen, daß natürliches Uran ein Isotopengemisch darstellt. Da es in der Natur überall umherirrende Neutronen gibt, so würde es auf der Erde kein Uran mehr geben, wenn das spaltbare U 235 in ihm nicht in dem außerordentlich geringen Verhältnis 1:140 zum U 238 enthalten wäre.

Die erste Aufgabe bei der Herstellung einer Uranbombe war die Reindarstellung von U 235. Da dieses Uranisotop von U 238 chemisch nicht zu unterscheiden ist, kamen nur physikalische Trennungsmethoden in Frage. Auf der Grundlage der Massenspektrographie können täglich mehrere Kilogramm gewonnen werden.

Die ersten Atombomben sind aus reinem U 235 hergestellt worden. Ist der Uranblock zu klein, also von *unterkritischer Größe*, so entweichen nach außen so viele Neutronen, daß eine Kettenreaktion nicht zustande kommt. Erst von einer bestimmten *kritischen Größe* an setzt eine Kettenreaktion ein. Unterhalb der kritischen Größe ist ein Urankörper harmlos. Beim Einsatz der Bombe werden zwei solche Stücke durch eine Zündvorrichtung zusammengeschossen (Abb. 192/1). Dann erfolgt durch stets vorhandene Neutronen die auf lawinenartiger Kettenreaktion beruhende Explosion. Sie ist je nach der im einzelnen nicht bekannten Bombengröße begleitet von einer auf einen kleinen Raum konzentrierten Energieentfaltung, die nach mehreren Hundert Millionen kWh zählt. Dabei wird aber nur ein Bruchteil des Urans gespalten. Die Hauptmenge wird durch die Explosion zerstreut. Neben der momentanen Hitze- und Druckerzeugung wirkt auf längere Zeit die lebensgefährdende Verseuchung durch radioaktive Stoffe.

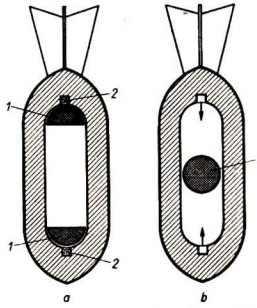


Abb. 192/1. Schema einer Uranbombe
a) vor und b) nach der Zündung *1–1* zwei Urankörper unterkritischer Größe, *2–2* Sprengkapseln, *3* ein durch Zündung der Sprengkapseln entstandener Urankörper kritischer Größe

Außer dem U 235 ist auch reines Plutonium, Pu 239, für Atombomben verwendet worden.

Später hat man die *Wasserstoffbombe*, die *H-Bombe*, hergestellt. Man weiß über ihren Aufbau nur etwa folgendes: Eine Uran- oder Plutoniumbombe ist von einer Hülle umgeben, deren wesentlicher Bestandteil das Wasserstoffisotop Tritium ist, und zwar wohl in flüssiger Form. Die im Innern befindliche Uranbombe wird in üblicher Weise durch Zusammenschießen der beiden Teile von unterkritischer Größe zur Detonation gebracht.

Im Bruchteil einer Sekunde steigt die Temperatur auf ungeheure Werte an. Dadurch erhalten die Tritiumkerne eine solche Geschwindigkeit, daß Helium aus ihnen aufgebaut wird.

$$^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,\mathrm{n}.$$

Diese Heliumsynthese ist infolge des Massendefekts von extremer Wärmeentwicklung begleitet.

Bei dieser Gelegenheit sei darauf hingewiesen, daß diese soeben beschriebene Kernreaktion der Heliumsynthese sich dauernd in größtem Ausmaße auf der Sonne abspielt. Auf diese Weise ist der Weiterbestand der Sonne als Energiequelle für das gesamte Planetensystem zu erklären.

Dem Gewicht einer Uranbombe ist durch das Bestehen der kritischen Größe von 235 U eine Grenze gesetzt. Die H-Hülle hingegen kann beliebig groß gemacht werden, da es für sie eine kritische Größe nicht gibt. Eine Schranke ist nur durch die Tragfähigkeit der Flugzeuge gesetzt, die die Bombe zu transportieren haben.

Die H-Bombe ist eine Massenvernichtungswaffe fürchterlicher Art. Wie die 1954 im Stillen Ozean unternommenen Versuche gezeigt haben, übertrifft die Wirkung einer H-Bombe die der Uranbomben um ein Vielfaches. Durch eine Hitze- und Druckwelle vermag sie im Umkreise von vielen Kilometern alles Leben zu töten und auf etwa 100 km totale Zerstörungen zu bewirken. Die Neutronen erregen in der hochgeschleuderten Materie eine Radioaktivität, deren Wirkungsradius schwer zu ermessen ist.

Wenn die H-Bombe noch mit einem Mantel aus Kobalt umgeben wird, so entsteht durch die vielen Neutronen aus dem gewöhnlichen Kobalt mit der Massenzahl 59 durch Einlagern eines Neutrons das Kobalt 60. Dies ist ein künstlich radioaktives Element mit der sehr großen Halbwertszeit von über 5 Jahren, das sehr kurzwellige Gammastrahlen von hohem Durchdringungsvermögen aussendet. Wenn der Kobaltmantel durch die Explosion in feinster Zerstäubung in die Atmosphäre geschleudert wird, so können durch den sich niederschlagenden Staub weite Gebiete auf Jahre verseucht werden.

Es unterliegt keinem Zweifel, daß der Einsatz solch fürchterlicher Massenvernichtungswaffen ein Verbrechen ganz ungeheuren Ausmaßes ist. Deshalb fordert die Sowjetunion mit Nachdruck ein Abkommen, das die Atomwaffen ächtet und verbietet. Sie wird dabei nicht nur von den Regierungen der Volksdemokratien, sondern auch von den Regierungen anderer Länder, die für friedliche Koexistenz eintreten, unterstützt. Insbesondere setzt sich die Indische Union stärkstens für ein solches Abkommen ein.

Dank der Initiative der Sowjetunion im Kampfe um die Erhaltung des Friedens bricht sich der Gedanke an eine Einschränkung der Rüstung und an ein Verbot der Atomwaffen jetzt auch bei den kapitalistischen Ländern Bahn. Nur wenn durch den weltumspannenden Friedenskampf aller Völker ein Abkommen erzwungen wird, das die Herstellung solcher Kampfmittel ächtet, und wenn die Vernichtung der vorhandenen Atomwaffen erfolgt, kann die Menschheit vor einer schweren Katastrophe bewahrt werden.

4. Fragen:

1. Wie regelt man die Anzahl der wirksamen Neutronen in einem Kernreaktor?
2. Wie wirken Moderatoren?
3. Welcher Unterschied besteht zwischen den Spaltungsvorgängen im Kernreaktor und in der Atombombe?

§ 45. Kosmische Strahlung[1]

1. Grundlegende Beobachtungen. Wenn irgendein Elektroskop aufgeladen wird, so bleibt trotz aller Isolierung die Ladung niemals dauernd erhalten. Das ist deswegen nicht verwunderlich, weil die atmosphärische Luft dauernd eine geringe Leitfähigkeit zeigt. Sie wird durch Ladungsträger, nämlich durch Ionen, bewirkt, die durch verschiedene Ursachen in die Luft geraten. Besonders wirksam sind die vom Erdboden aus in die Luft dringenden radioaktiven Strahlen der Erdrinde. Das ultraviolette Licht der Sonne, Verbrennungsvorgänge, Vulkane und Regen ionisieren die Luft ebenfalls.

Aber auch wenn die Luft von Ionen und Emanation gefiltert und das Elektroskop durch genügend dicke Bleiwände abgeschirmt ist, entlädt es sich. Die Leitfähigkeit der Luft vermindert sich aber etwas, wenn die Abschirmung verstärkt wird. Daraus kann man schließen, daß die Leitfähigkeit durch eine von außen kommende durchdringende Strahlung verursacht wird. Sie kann nicht aus dem Erdboden stammen, da die Entladung eines Elektroskops mit zunehmender Entfernung von der Erde schneller erfolgt. Erste genauere Untersuchungen verdanken wir dem österreichischen Physiker *Heß*[2], der 1912 bei einer Reihe von Ballonaufstiegen Höhen bis etwa 5 km erforschte und eine beachtliche stetige Zunahme der Strahlung feststellte. Die außerordentliche Durchdringungskraft ergab sich daraus, daß sich die Strahlung auch in tiefen Bergwerken und bis zu einer Tiefe von 1000 m im Wasser nachweisen ließ. Seit 1910 bis heute ist die Erforschung der **kosmischen Strahlung**, die man auch *Höhenstrahlung* oder *Ultrastrahlung* nennt, eine wichtige noch nicht völlig gelöste Aufgabe der Physik. Die Untersuchung größerer Höhen ist mit Registrierballonen bis 35 km und mit unbemannten Raketen bis über 200 km durchgeführt worden. Das Maximum der Strahlung liegt in einer Höhe von rund 22 km; bis zu 50 km ist die Intensität konstant. Hilfsmittel der Forschung waren zunächst mit einem Elektrometer verbundene Ionisierungskammern, heute sind es das Geigersche Zählrohr, die Wilsonkammer und die photographische Platte mit besonderer Schicht.

2. Die Natur der kosmischen Strahlung. Die Anschauungen über die Höhenstrahlung und die von ihr in der Atmosphäre ausgelösten Vorgänge waren starken Wandlungen unterworfen. Wir stellen hier die von den meisten Forschern heute vertretene Ansicht dar.

Danach besteht die aus dem Weltraum stammende Strahlung aus geladenen Teilchen, und zwar im wesentlichen aus Protonen, daneben α-Teilchen und einigen positiv geladenen schwereren Teilchen. Messungen haben ergeben, daß sie Energien bis zu 10^{10} MeV haben.

Die kosmische Strahlung fällt aus dem Weltraum zunächst von allen Seiten gleichmäßig ein. Die Teilchen geraten in das Magnetfeld der Erde, wo sie entsprechend ihrer Ladung aus der ursprünglichen Flugbahn abgelenkt werden. Diese Ablenkung tritt bereits außerhalb der Atmosphäre ein, da das Magnetfeld

[1] Dieser Paragraph geht über den verbindlichen Lehrstoff hinaus. Er ist zum Selbststudium für interessierte Schüler bestimmt.

[2] Viktor Franz Heß (geb. 1883), ein österreichischer Physiker, Professor in Graz, 1936 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet

sich wesentlich weiter als diese erstreckt. Die Einwirkung des Magnetfeldes verursacht zwei Erscheinungen, aus deren Beobachtung man schließen konnte, daß die kosmische Strahlung aus Teilchen mit positiver Ladung besteht und nicht eine Wellenstrahlung ist. In einer bestimmten geographischen Breite erreichen nur diejenigen Teilchen die Erde, die eine bestimmte Mindestenergie haben, während energieärmere an der Erde vorbeigelenkt werden. Diese Mindestenergie ist am Äquator sehr groß und nimmt nach den Polen zu stark ab. Nach höheren Breiten hin wächst demnach die Quantität der Strahlung. Man nennt diese Erscheinung den *Breiteneffekt*.

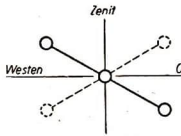


Abb. 195/1. Schematische Wiedergabe der Anordnung der Zählrohre bei der Messung der kosmischen Strahlen

Außerdem beobachtet man eine unterschiedliche Intensität, je nachdem, ob man die aus dem Osten oder aus dem Westen einfallende Strahlung mißt.

Die Abb. 195/1 zeigt schematisch ein System aus drei Zählrohren. Die Verbindungslinie ist immer um 60° gegen die Zenitrichtung geneigt, wurde aber automatisch während gleicher Zeiten nach Ost und West gekippt. Angezeigt wurden nur Teilchen, die alle Zählrohre zum Ansprechen brachten (*Koinzidenzschaltung*). Im Mittel liegt die Strahlungsintensität aus West um 60% höher als die aus Ost (Abb. 195/2). Diese Ost-West-Asymmetrie spricht für vorwiegend positive Ladung, wie man mit Hilfe der *UVW*-Regel für die Ablenkung eines elektrischen Stromes im Magnetfeld feststellt.

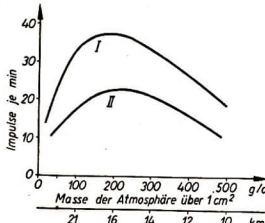


Abb. 195/2. Graphische Darstellung der Ergebnisse bei der Messung der kosmischen Strahlung. Kurve *I* zeigt die Intensität der aus Westen, Kurve *II* die Intensität der aus Osten einfallenden Strahlen

Die Untersuchung der kosmischen Strahlung wird dadurch sehr erschwert, daß die Teilchen beim Eindringen in die Atmosphäre mit Stickstoff- und Sauerstoffkernen der Luft zusammenstoßen und dadurch eine *sekundäre Strahlung* hervorrufen. Bei den Zusammenstößen werden im allgemeinen mehrere Teilchen verschiedener Art frei, von denen die meisten instabil sind und schnell zerfallen. Ebenso werden bei derartigen Kernprozessen *Lichtquanten* ausgesandt. Einige der Bruchstücke können selbst wieder Kernprozesse auslösen. Wenn die Lichtquanten genügend Energie haben, vermögen sie sogenannte *Kaskaden* zu bilden. Hierbei entstehen aus den Quanten Elektron-Positron-Paare, und die Elektronen und Positronen erzeugen wiederum Lichtquanten, bis die Teilchenenergie für diese Prozesse nicht mehr ausreicht.

Beim Durchlaufen der Atmosphäre wird die Strahlung nach und nach absorbiert, so daß die Intensität nach der Erde zu wieder abnimmt. An der Erdoberfläche besteht die Strahlung fast ausschließlich aus sekundären Teilchen.

3. Kernprozesse und Kernteilchen. Von besonderem Interesse sind die bei den erwähnten Zusammenstößen der Primärteilchen mit Kernen der Luft ausgelösten Kernprozesse. Zur Untersuchung dieser Prozesse dienen heute eigens für diesen

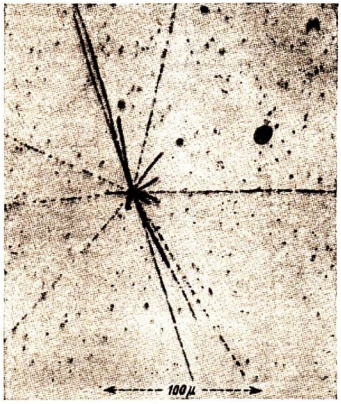


Abb. 196/1. Explosionsartige Zertrümmerung eines Kerns durch ein Teilchen aus kosmischer Strahlung. Aus den Bahnen erkennt man sieben Protonen, fünf α-Teilchen und einige schwere Kernsplitter

Zweck geschaffene, spezielle photographische Emulsionen. Die Teilchen machen das Silber aus dem Bromsilber, das sie durchdringen, frei, so daß nach dem Entwickeln die Bahnspuren sichtbar werden. Das Bild eines solchen Kernprozesses in der Photoplatte erscheint dann unter dem Mikroskop als mehr oder weniger komplizierter *Stern*. Die Abb. 196/1 bringt ein Beispiel eines solchen Sterns, derdurch Zertrümmerung eines Kerns, wahrscheinlich eines Silberatoms, durch ein Teilchen aus kosmischer Strahlung entstanden ist. Aus der Dichte und dem Verlauf der einzelnen Spuren lassen sich Angaben über die beim Prozeß frei werdenden Teilchen, insbesondere über deren Masse, gewinnen. Systematische Untersuchungen solcher Sterne erbrachten in der jüngsten Vergangenheit wesentliche Aufschlüsse über die Atomkerne. Ähnliche Untersuchungen können auch mit Nebelkammern durchgeführt werden.

Bereits 1935 hat der japanische Physiker *Hideki Yukawa*[1] auf Grund theoretischer Überlegungen die Existenz von Kernteilchen vorhergesagt, die eine Masse von etwa 200 ... 300 Elektronenmassen haben sollten. Diese Teilchen erhielten den Namen **Mesonen** wegen ihrer zwischen Elektron und Proton liegenden Masse. Der amerikanische Physiker *Anderson*[2] hatte 1938 Teilchen etwa dieser Masse in der Höhenstrahlung entdeckt, die zunächst mit den Yukawaschen Teilchen identifiziert wurden. Diese Interpretation stieß jedoch bald auf beträchtliche Schwierigkeiten.

1947 fand der englische Physiker *Powell*[3] Teilchen, die den Yukawa-Mesonen entsprechen. Sie erhielten den Namen π-*Mesonen*. Sie können sowohl positiv als auch negativ geladen und auch elektrisch neutral auftreten. Die Masse der geladenen π-Mesonen beträgt 276 ± 2 Elektronenmassen, die des neutralen π-Mesons 265 ± 3 Elektronenmassen. Die π-Mesonen haben eine mittlere Lebensdauer der Größenordnung 10^{-8} s. Die geladenen π-Mesonen zerfallen in kleinere Teilchen, das μ-*Meson* und ein neutrales Teilchen sehr kleiner Masse, das

[1] Hideki Yukawa (geb. 1902), japanischer Physiker, Professor in Tokio, erhielt 1949 den Nobelpreis.

[2] Carl David Anderson (geb. 1905), ein amerikanischer Physiker, Träger des Nobelpreises von 1936.

[3] Cecil Frank Powell (geb. 1902), ein englischer Physiker, erhielt 1950 den Nobelpreis.

Neutrino (ν). Dieses μ-Meson wurde von Anderson in der Höhenstrahlung entdeckt. Es tritt mit beiden Ladungen auf. Seine mittlere Lebensdauer beträgt etwa 10^{-6} s, seine Masse 210 ± 5 Elektronenmassen. Es zerfällt in ein Elektron und zwei Neutrinos.

Neben diesen beiden Mesonenarten ist bis heute mit Sicherheit die Existenz eines Mesons von etwa 963 Elektronenmassen, des *τ-Mesons* erwiesen, das wahrscheinlich in drei π-Mesonen zerfällt.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der jüngsten Forschungen in vielen Ländern, daß wahrscheinlich noch eine ganze Anzahl weiterer Mesonen mit Massen, die z. T. größer sind als die des Protons, existieren. Diese Teilchen sind sämtlich instabil und gehen teilweise durch Zerfall ineinander über. Sichere Aussagen hierüber können jedoch heute noch nicht gemacht werden.

4. Die Elementarteilchen. Es ist durchaus zu erwarten, daß die weitere Erforschung der kosmischen Strahlung noch wesentliche Ergebnisse, vor allem in der Physik der sogenannten Elementarteilchen, bringen wird. Es ist heute noch nicht möglich, eine Zusammenstellung von *Elementarteilchen* zu geben, ohne zugleich darauf hinzuweisen, daß die bisherigen Forschungsergebnisse noch sehr problematisch sind. Fassen wir das Vorhergehende zusammen, so ergibt sich folgende Liste von Elementarteilchen.

Tabelle der Elementarteilchen

Partikel	Symbol	Ladung	Massenzahl	Masse in Elektronenmassen
Proton	p	+1	1,0075	1836,3
Neutron	n	0	1,0089	1838,9
Elektron	e^-	−1	0,00055	1
Positron	e^+	+1	0,00055	1
Neutrino	ν	0	0	$\ll 1$, wahrscheinlich 0
μ-Meson	$\mu^\pm$	± 1	116	210
neutr. π-Meson ...	π^0	0	146	265
gelad. π-Meson ..	$\pi^\pm$	± 1	0,152	276
τ-Meson	$\tau^\pm$	± 1	0,530	963
schwerere Mesonen		± 1	bis 1,21	bis 2200
Wellenquant, Photon.....	γ	0	0	0

Dabei ist sicher, daß durchaus nicht alle Elementarteilchen normalerweise im Atomkern vorhanden sind. Vielmehr werden sie erst während eines Kernprozesses gebildet, ähnlich wie etwa die Lichtquanten bei Energieübergängen in der Elektronenhülle entstehen.

Es ist bis heute nicht gelungen, das Auftreten aller erwähnten Teilchen und die bekannten experimentellen Ergebnisse in befriedigender Weise theoretisch zu deuten.

XII. (§46.) Die Korpuskular- und Wellennatur des Lichtes und der Elektronen — Das Elektronenmikroskop

1. Die Entwicklung der Lehre vom Licht. Die geradlinige Ausbreitung des Lichtes wird am einfachsten durch die Annahme erklärt, daß das Licht aus winzigen Teilchen besteht, die von der Lichtquelle ausgeschleudert werden. Diese *Emissionstheorie*[1] ist von *Isaak Newton* 1704 in seinem Werk *Die Optik* vertreten worden. Er dachte sich die Teilchen als so kleine Korpuskeln, daß sie durchsichtige Körper fast ungehindert durchdringen können. Will man dieser Annahme Ausdruck verleihen, so spricht man von einer *Korpuskulartheorie*. Die Reflexion des Lichtes läßt sich dann wie die Reflexion elastischer Körper an einer festen Wand erklären. Um die Brechung des Lichtes verständlich zu machen, nahm *Newton* an, daß ein dichterer Stoff gemäß dem Gravitationsgesetz die Teilchen stärker anzieht als ein dünnerer. Die Lichtteilchen mögen mit einer Geschwindigkeit schräg auf die Grenzfläche zweier durchsichtiger Stoffe fallen. Dann wächst nach *Newton* die senkrecht zur Grenzfläche stehende Komponente der Geschwindigkeit, während die parallel gerichtete unverändert bleibt (Abb. 198/1). Eine Messung der Lichtgeschwindigkeit in anderen Stoffen als in Luft war zu *Newtons* Zeiten allerdings noch nicht möglich.

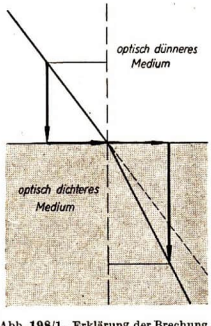


Abb. 198/1. Erklärung der Brechung des Lichtes beim Übergang von einem optisch dünneren zu einem optisch dichteren Medium nach der Annahme Newtons

Im Gegensatz zu *Newton* faßte sein großer Zeitgenosse *Christian Huygens* (1629–1695) das Licht als *Wellenerscheinung* auf. Da Wellen eines Trägers bedürfen, nahm *Huygens* einen die Welt erfüllenden und alle Körper durchdringenden *Äther* an. Ähnlich wie die Luft durch eine Glocke in Schwingungen versetzt wird, sollte dies beim Äther durch Lichtquellen wie die Sonne oder eine Flamme der Fall sein. Wie die Reflexion und die Brechung eines Mediums aus der Wellennatur erklärt werden können, haben wir schon früher kennengelernt (vgl. LB 10, § 8).

Da sowohl die Korpuskulartheorie wie die Wellentheorie des Lichtes Vorteile und Nachteile bei der Deutung der experimentellen Ergebnisse boten, blieben die Meinungen darüber bis in das 19. Jahrhundert geteilt. Erst die Interferenz- und Beugungsversuche von *Young* (1773–1829), *Fresnel* (1788–1827) und *Fraunhofer* (1787–1826) sowie die Entdeckung der Polarisation im Jahre 1808 durch *Malus*, dazu die 1862 durch *Foucault* experimentell bewiesene Tatsache, daß die

[1] emíttere (lat.) = aussenden

Lichtgeschwindigkeit im optisch dichteren Medium kleiner ist als im optisch dünneren, führten zur allgemeinen *Anerkennung der Wellentheorie des Lichtes.*

Die Unmöglichkeit, den Lichtäther nachzuweisen und Widersprüche zu den mechanischen Eigenschaften, die man ihm beilegen mußte, führten zu neuen Erkenntnissen.

Die von *Maxwell* nach den Vorarbeiten von *Faraday* geschaffene *elektromagnetische Lichttheorie* zeigt, daß das Licht eine elektromagnetische Welle ist und nicht des Ätherbegriffs bedarf. *Heinrich Hertz* konnte an den elektromagnetischen Wellen Reflexion, Brechung, Beugung, Interferenz und Polarisation genauso nachweisen wie beim Licht. Die Tatsache, daß starke magnetische und elektrische Felder Spektrallinien aufspalten können, sicherte die elektromagnetische Lichttheorie.

Erneute Widersprüche zu experimentellen Befunden, die bei der Untersuchung der Strahlung und des lichtelektrischen Effekts beobachtet wurden, führten zur *Quantentheorie des Lichtes.* Nach unseren heutigen Kenntnissen zeigt das Licht eine Doppelnatur. Manche Beobachtungen lassen sich nur aus den Quanteneigenschaften des Lichts erklären, andere nur aus seiner Wellennatur.

Wohin uns der dialektische Ablauf der wissenschaftlichen Forschungsarbeit in Zukunft führen wird, läßt sich noch nicht absehen.

2. Die Welleneigenschaften des Elektrons. Das Elektron ist nach seiner Entdeckung jahrzehntelang als *Korpuskel* aufgefaßt worden, ohne daß sich zunächst Widersprüche zur Erfahrung ergaben. Theoretische Erwägungen und später hinzutretende experimentelle Untersuchungen ließen jedoch Zweifel aufkommen, daß ein Elektron ein einheitliches Korpuskel sei. Dem französischen Physiker *Louis de Broglie*[1] erschienen die ganzen Zahlen auffällig, die wir als Hauptquantenzahlen der Atomtheorie kennengelernt haben. Er erinnerte daran, daß ganze Zahlen in der Physik bei den Obertönen in der Akustik und bei Interferenzerscheinungen, mithin bei Wellenvorgängen von besonderer Bedeutung sind. Denn die Auslöschung von Wellen durch Interferenz tritt dort auf, wo kohärente Wellenzüge mit einer Phasendifferenz von einem ungeraden Vielfachen einer halben Wellenlänge zusammenwirken.

In Analogie zur Optik, bei der die Doppelnatur des Lichtes als Welle und Korpuskel hervortrat, verknüpfte *de Broglie* das zunächst als körpuskular gedachte Elektron mit einem Wellenvorgang. Wir können allerdings im Unterricht hierauf nicht näher eingehen. Wenn *de Broglies* Annahmen richtig waren, so mußten auch bei den Elektronen Beugungs- und Interferenzerscheinungen zu erwarten sein.

Der Nachweis gelang 1927 den amerikanischen Physikern *Davisson*[2] und *Germer*[3]. Sie ließen ein enges Elektronenbündel auf eine aus einem Nickelkristall geschnittene Scheibe fallen und maßen die Streuung der Elektronen. Dabei

[1] Louis Victor Duc de Broglie (geb. 1892), ein bedeutender französischer Physiker, Professor der Physik in Paris, erhielt 1929 den Nobelpreis.

[2] Clinton Joseph Davisson (geb. 1881), ein amerikanischer Physiker, der 1937 den Nobelpreis erhielt

[3] Lester Halbert Germer (geb. 1896), amerikanischer Physiker, Mitarbeiter Davissons

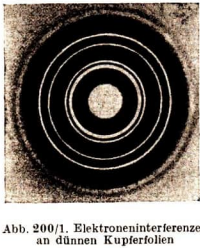


Abb. 200/1. Elektroneninterferenzen an dünnen Kupferfolien

ergaben sich Maxima in bestimmten Richtungen (Abb. **200**/1). Später erhielt man die gleichen schönen Beugungsbilder, wie sie von den Laue-diagrammen her bekannt sind. Man vermochte auch aus der bekannten Gitterstruktur der Kristalle und der Beugungsfiguren die Längen der Wellen zu berechnen. Für Elektronen mit einer Energie von 80000 eV ergab sich eine Wellenlänge von etwa 0,005 mμ; das ist rund $\frac{1}{100000}$ der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes. Abb. **200**/1 zeigt Interferenzringe von gestreuten Elektronen, die beim Durchgang eines Elektronenbündels durch eine dünne Kupferfolie entstanden sind.

Da die Theorie der Mikroskope gelehrt hatte, daß *das Auflösungsvermögen um so größer ist, je kürzer die Wellenlänge ist*, lag der Gedanke nahe, mit Hilfe von Elektronenbündeln statt mit Lichtbündeln neue Mikroskope zu schaffen.

3. Das Elektronenmikroskop. Schon 1926 wies *Hans Busch*[1] nach, daß eine stromdurchflossene Spule es durch ihr Magnetfeld vermag, Elektronen, die von einem Punkte aus in die Spule eindringen, wieder in einem Punkte zu sammeln. Eins dieser Elektronen schneide die Spulenachse unter dem Winkel ψ (Abb. **200**/2). Wenn das Elektron nur seiner Querkomponente folgte, so würde es in eine zur Spulenachse senkrechte Kreisbahn abgelenkt. Längs- und Querkomponente zusammen ergeben eine Schraubenlinie.

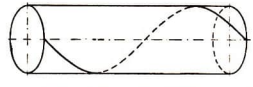


Abb. 200/2. Bahn eines Elektrons beim Durchlaufen einer Spule

Unabhängig von ihrer Geschwindigkeit durchlaufen alle Elektronen eine volle Windung ihrer Schraubenlinien in der gleichen Zeit. Elektronen gleicher Geschwindigkeit werden dann in einem Achsenpunkte vereinigt, wenn ψ klein ist. Die Spule wirkt demnach auf Elektronenstrahlen so wie eine Glaslinse auf Lichtstrahlen (Abb. **200**/3).

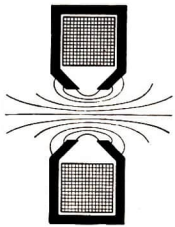


Abb. 200/3. Schnitt durch eine elektromagnetische Linse

Später ist es gelungen, elektrische Felder herzustellen, die auf Elektronenstrahlen wie Sammel- oder Zerstreuungslinsen wirken. Diese elektrostatischen Linsen sind scheibenförmigen bzw. zylindrischen Kondensatoren vergleichbar, die in axialer Richtung von Elektronen durchdrungen werden. Von einem Punkte herkommende Elektronen werden auf die Achse hin abgelenkt und wieder in einem Punkte gesammelt.

Mit Hilfe magnetischer oder elektrischer Linsen ist es gelungen, ein dem Lichtmikroskop weit überlegenes *Elektronenmikroskop* zu bauen. Der schematische Aufbau ist bei beiden Systemen gleich und dem des Lichtmikroskops ähnlich (Abb. **201**/1 und Abb. **201**/2).

Mit dem Lichtmikroskop kann man zwei Punkte noch getrennt wahrnehmen, wenn sie einen Abstand von der Größe der halben Wellenlänge des benutzten

[1]) Hans Busch (geb. 1884), ein deutscher Physiker, Professor in Darmstadt

Lichtes, mithin von etwa $4 \cdot 10^{-5}$ cm haben. Das Elektronenmikroskop ermöglicht es, noch zwei Punkte zu unterscheiden, die etwa $4 \cdot 10^{-7}$ cm voneinander entfernt sind. Die Leistung des Lichtmikroskops wird damit um etwa das 100fache übertroffen.

Die Objekte werden auf eine 10 bis 100 mμ dicke Trägerfolie aus Zelluloid aufgebracht und von schnellen Elektronen mit mehr als 100000 eV durchstrahlt. Das Bild wird elektronenoptisch auf einem Leuchtschirm entworfen. Wenn es dann noch lichtoptisch vergrößert wird, sind bereits Vergrößerungen auf das 500000-fache erreicht worden. Auf diese Weise

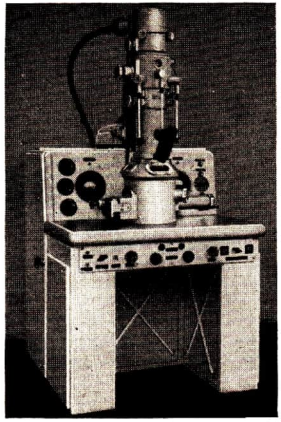


Abb. 201/1
Elektronenmikroskop vom VEB Carl Zeiss, Jena

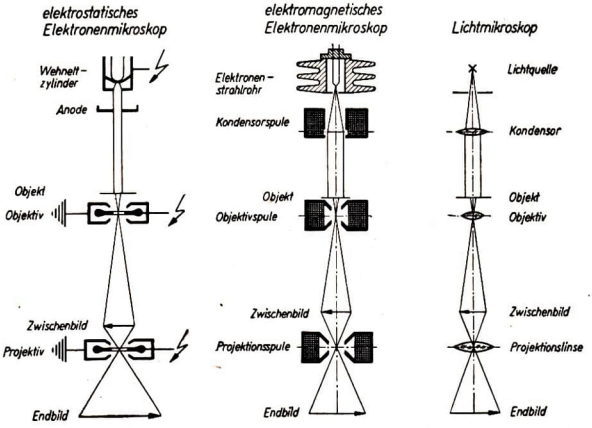
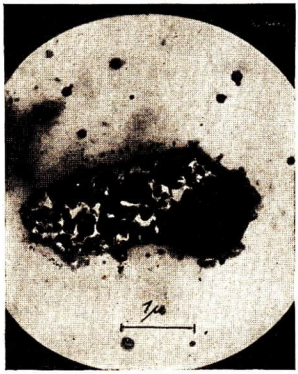


Abb. 201/2. Vergleich zwischen einem Elektronenmikroskop und einem Lichtmikroskop (schematisch)



kann man einzelne große Moleküle und Molekülgruppen sichtbar machen (Abb. 202/1). Darunter befinden sich auch die Erreger verschiedener Krankheiten, die noch kleiner sind als Bakterien und die man als Virus bezeichnet.

Abb. 202/1. Elektronenmikroskopisches Bild von Bromsiberkörnern. Vergrößerung 14000:1

4. Fragen und Aufgaben:

1. Wodurch unterscheiden sich die geometrische Optik und die Wellenoptik?
2. Nennen und kennzeichnen Sie die verschiedenen Lichttheorien!
3. Welche Elektronenlinsen verwendet man?
4. Setzen Sie die Teile eines Lichtmikroskops in Parallele zu denen eines Elektronenmikroskops!

Namen- und Sachverzeichnis

Alphastrahlen 142, 168 u. f.
Amplitudenmodulation 39 u. ff.
Amplitudensieb 56
Analysator 98, 103
Anderson, Carl David 177, 196
Ångströmeinheit (Å) 136
Anlauffarben 90 u. f.
Antenne 31 u. f.
Appleton, Edward Viktor 36
Arago, Dominique François 106
Aston, Francis William 173 u. f.
Atom 138 u. ff.
Atombombe 192 u. ff.
Atomgewicht 139, 158 u. ff., 173 u. f.
Atomkraftwerk 190 u. f.
Atommeiler 189 u. f.
Atommodell, Bohrsches 155 u. ff., 165
—, Rutherfordsches 144 u. ff.
Atomvolumen 160
Audion 44 u. f.
Avogadro di Quaregna e Ceretto, Amadeo 138 u. f.

Baco von Verulam 138
Balmer, Johann Jakob 147
Balmergleichung 147 u. ff.
Balmerserie 148, 156
Barkla, Charles Glover 161
Becker, August 176
Becquerel, Henri 166 u. f.
Beugung 62 u. f., 69 u. ff., 74 u. ff., 123 u. f., 126 u. ff.
Beugungsgitter 77
Beugungsspektrum 78 u. ff.
Betastrahlen 168 u. f.
Betatron 183
Bildröhre 56 u. f.
Bildschirm 52 u. f.
Bildwechsel 53
Bindungsenergie 186
Biprisma, Fresnelsches 83 u. f.
Bodenwellen 35 u. ff.
Bohr, Niels 112, 150, 155, 157
Bothe, Walther 176
Bracketserie 149
Bragg, William Lawrence 129
Bragg, William Henry 128, 161
Breiteneffekt 195
Bremsstrahlung 124 u. f.
Brennfleck 114, 116, 118, 125
Brewster, David 100
Brewstersches Gesetz 100
Broglie, Louis de 199
Busch, Hans 200

Carus, Lucretius 138
Chadwick, James 177
Coolidge, William 115
Curie, Marie 166 u. ff., 169
Curie, Pierre 166 u. ff., 169

Dämpfung 6, 37
Dalton, John 138, 140
Davisson, Clinton Joseph 199
Debye, Peter 129
Debye-Scherrer-Verfahren 129 u. f.
Demodulation 42 u. ff.
Demokrit 138
Descartes, René 138
Detektorempfang 43 u. f.
Deuteron 178
Diagnostikröhre 117
Dipol 27 u. ff., 30 u. f., 33 u. ff., 54 u. f.
Direktor 55
Doppelbrechung 86 u. ff., 105 u. ff.
Doppelspiegel, Fresnelscher 82 u. f.
Drehanodenröhre 117 u. f.
Drehkristallverfahren 128 u. f.
Dreipunktschaltung 17, 20, 40
Dubletts 149

Echolotung 21
Edelgaskonfiguration 162
Einstein, Albert 152 u. ff.
Einsteinsche Gleichung 185
Elektronenmikroskop 200 u. f.

Elektronenvolt (eV) 150
Elektrostriktion 19
Elementarteilchen 176 u. ff., 197
Elster, Julius 170
Entladung, oszillatorische 8
Epikur 138

Fading 37
Faraday, Michael 26, 110, 140, 199
Faraday-Effekt 110
Feddersen, Berend Wilhelm 8
Feinstrukturuntersuchung 131 u. ff.
Feld, elektromagnetisches 29 u. ff.
Fermi, Enrico 184, 187
Fernsehen 50 u. ff., 57
Fernsehempfänger 54 u. ff.
Fernsehsender 54
Fluoreszenzstrahlung 161
Foucault, Léon 198
Fraunhofer, Joseph von 147, 198
Frequenzmodulation 47
Fresnel, Augustin Jean 82, 198
Fresnelsches Biprisma 83 u. f.
Fresnelscher Doppelspiegel 82 u. f.
Funkmeßgerät 49

Gammastrahlen 135
Gangunterschied 60 u. ff., 74 u. ff., 87 u. ff.
Gassendi, Petrus 138
Geiger, Hans 142
Geiger-Müllersches Zählrohr 142 u. f., 194
Geitel, Hans 170
Geradeausempfänger 44 u. ff.
Germer, Lester Halbert 199
Gitter, optisches 74 u. ff., 80
Gittergleichrichtung 44 u. f.
Gitterkonstante 75 u. f.
Glühkathoden-Röntgenröhre 115 u. f.
Glühventil 116
Grenzstrahlen 121
Grobstrukturuntersuchung 122 u. f.

Hahn, Otto 184, 187
Halbwertschicht 114 u. f.
Halbwertszeit 171 u. f.
Hauptquantenzahl 157, 163
Hauteffekt 10
Heaviside, Oliver 36
Heavisideschicht 36 u. f.
Heisenberg, Werner 178
Helmholtz, Hermann von 140
Hertz, Gustav 175
Hertz, Heinrich 26 u. f., 111, 134, 199
Heß, Viktor Franz 194
Hilfsfrequenz 46
Hochfrequenz-Erwärmung 23
Hochfrequenzgenerator 17 u. f.
Hochfrequenzschmelzofen 22 u. f.
Höhenstrahlen, sekundäre 135, 195
Höhenstrahlung 194
Hohlanodenröhre 121
Huygens, Christian 81, 97, 198
Huygenssches Prinzip 61, 63, 66

Ikonoskop 51 u. ff.
Interferenz 59 u. ff., 123 u. f.
Interferenzgleichung 65, 68, 70 u. f., 73, 75 u. ff., 78 u. f., 83
Interferenzhyperbel 60 u. f., 64 u. f.
Interferenzstreifen 60 u. ff., 72 u. f., 74 u. ff., 83, 86 u. ff., 90, 124
Interferometer 85
Ion 140
Ionenröntgenröhre 113 u. f.
Ionisationskammer 190, 194
Isotop 173 u. ff., 178
Isotopentrennung 175
Iwanenko, Dmitri Dmitrijewitsch 178

Joliot-Curie, Frédéric 180

Kernladungszahl 160, 162
Kernreaktor 189 u. ff.
Kernschale 162 u. f.
Kernspaltung 187 u. ff.
Kernumwandlung, künstliche 175 u. ff.
Kerr, John 108
Kerreffekt 108 u. f.
Kettenreaktion 188 u. ff.
Kippgerät 56
Kippschwingung 52
Kohärenz 84 u. f.
Koinzidenzschaltung 195
Kopplung 13
—, galvanische 13 u. f.
—, induktive 13 u. f., 17
—, kapazitive 13 u. f.
Korpuskulartheorie 198
Kosmische Strahlung 194 u. ff
Kreuzgitter 80, 126 u. f.
Kristalldetektor 43 u. f.
Kristallgitter 127 u. f.
Kristallit 129 u. ff.
Kurzwellen 36 u. f.

Langwellen 36 u. f.
Laue, Max von 126
Laue-Diagramm 126 u. f., 129
Lawrence, Ernest Orlando 182
Lebedew, Petr Nikolajewitsch 136
Lenard, Philipp 140 u. ff.
Lenardfenster 141
Leukipp 138
Licht, inkohärentes 85
—, kohärentes 85
—, polarisiertes 95 u. ff.
Lodge, Oliver Joseph 13
Lomonossow, Michail Wassiljewitsch 138
Lyman, Theodore 149
Lymanserie 149

Maluz, Etienne Louis 95, 198
Marconi, Guglielmo 27
Massendefekt 185 u. ff., 187
Massenspektrograph 174 u. f.
Massenspektroskopie 174
Massenzahl 174 u. f., 178
Maxwell, James Clerk 26, 111, 134, 199
Megaelektronenvolt (MeV) 150
Meißner, Alexander 14
Meitner, Lise 184, 187
Mendejelew, Dimitri Iwanowitsch 158
Meson 196 u. f.
Meyer, Lothar 158
Mikrowellen 36 u. ff.
Mittelwellen 36 u. f.
Moderator 184
Modulation 39 u. ff., 50
Modulatorröhre 40
Molekül 138
Molekulargewicht 139
Moseley, Henry 161
Moseleysches Gesetz 161 u. f.

Nachrichtenübermittlung, drahtlose 25 u. ff.
Nahbestrahlungsröhre 121
Nebenquantenzahl 157, 163
Neutrino 196 u. f.
Neutron 177, 183 u. f.
Newton, Isaac 138, 198
Newtonsche Ringe 91
Nicol, William 98
Nicolsches Prisma 98
Nipkow, Paul 51
Nipkowscheibe 51
Nukleon 178

Oberflächenvergütung 91 u. f.
Oberflächenwellen 35 u. ff.
Ordnungszahl 158, 160 u. ff., 178

Paschen, Friedrich 148, 157
Paschenserie 148
Pauli, Wolfgang 163
Pauliprinzip 163
Periodensystem 157 u. ff.
Pfundserie 149
Phasensprung 87 u. ff., 91 u. f.
Photon 153
piezoelektrischer Effekt 19
Planck, Max 151, 153 u. f.
Polarisation 95 u. ff., 99 u. ff., 125
Polarimeter 104
Polarisationsfilter 94 u. f., 99, 101, 105
Polarisator 98 u. f., 101 u. f., 103, 105
Popow, Alexander Stepanowitsch 27
Positron 177, 179 u. f.
Powell, Cecil Frank 196
Proton 176
Punktgitter 127

Quantensprung 156
Quantentheorie 149 u. ff., 199
Quantenzahl 155, 157, 163

Radar 37, 49 u. f.
Radioaktivität, natürliche 166 u. ff., 170 u. ff.
—, künstliche 180 u. f.
Radiumemanation 160
Rahmenantenne 32, 48
Ramsay, William 170
Raumgitter 127 u. f.
Raumwellen 35 u. ff.
Reflektor 55
Reflexionsgitter 80
Resonanz 11 u. f., 14, 18, 29
Richtstrahler 31 u. f.
Röhrengenerator 14 u. ff., 20, 23, 27 u. f.
Röntgen, Wilhelm Conrad 113 u. f., 123
Röntgen (r) 120
Röntgenaufnahme 119
Röntgenbild 117 u. ff., 122
Röntgendiagnostik 117 u. ff.
Röntgeninterferenz 126 u. ff.
Röntgenröhre 113 u. ff.
Röntgenspektrum 124 u. f., 161
Röntgentherapie 120 u. f.
Rückkopplung 14 u. ff., 46

Rutherford, Ernest 142, 144 u. f., 160, 166, 168 u. ff., 175 u. f.
Rydberg, Johannes Robert 148, 158
Rydbergfrequenz 148 u. f.
Rydbergkonstante 149

Saccharimeter 104
Scherrer, Paul Hermann 129
Schwingquarz 19
Schwingungen, hochfrequente 8, 17 u. ff.
—, erzwungene 11
—, freie 6
—, gedämpfte 5, 6, 7
—, niederfrequente 8
—, tonfrequente 16
—, ungedämpfte 11, 14 u. ff.
Schwingungskreis, elektrischer 5 u. ff., 11 u. ff., 25 u. ff.
Senderöhre 40 u. f.
Siegbahn, Manne 161
Skineffekt 10
Soddy, Frederick 169 u. f.
Sommerfeld, Arnold 157
Sommerfeldellipsen 157
Spannungsdoppelbrechung 108 u. f.
Sperrkreis 12
Sprossenschrift (beim Tonfilm) 109
Stark, Johannes 111
Stark-Effekt 111
Straßmann, Fritz 184, 187
Szintillation 142
Szintillationszähler 142

Telegraphie, drahtlose 42
Telegraphiesender 42
Telephoniesender 40 u. f.
Term 149, 156
Tesla, Nicola 9, 27
Tesla-Transformator 9 u. f.
Thermodiffusion 175
Thomson, William 12, 173 u. f.
Thomsonsche Schwingungsgleichung 12
Tonfilm 108 u. f.
Tonfrequenzgenerator 16, 42
Trägerfrequenz 39, 53
Transurane 184 u. f.
Turmalin 99

Überlagerungsempfänger 46
Ultrakurzwellen 36 u. ff.
Ultrakurzwellengerät 22
Ultraschall 20 u. ff.
Ultraschallgenerator 20 u. ff.
Ultraschall-Materialprüfgerät 21
Ultrastrahlung 194

Valenzelektron 162

Wärmeneutron 184
Wasserstoffbombe 192 u. f.
Wasserstoffspektrum 147 u. ff.
Weber, Wilhelm Eduard 111
Wehneltzylinder 56
Weiche, elektrische 56
Welle, elektromagnetische 29 u. ff., 33 u. ff., 112, 135
Wellenwanne 59
Wilson, Charles Thomson Rees 143
Wilsonsche Nebelkammer 143 u. f., 194
Wirkungsquantum, Planckssches 151 u. ff.

X-Einheit 136

Young, Thomas 198
Yukawa, Hideki 196

Zackenschrift (beim Tonfilm) 109
Zeeman, Pieter 110
Zeeman-Effekt 110
Zenneck, Jonathan 36
Zerfallskonstante 171 u. f.
Zerfallsreihe 172 u. f.
Zündspannung 8
Zworykin, Vladimir 52
Zyklotron 182 u. f.

Quellenverzeichnis der Abbildungen:

VEB Agfa, Berlin: Abbildung 10/1 · Cherité Berlin: Abbildungen 118/2, 118/3. Werkphoto Freiberger Präzisionsmechanik VEB: Abbildung 133/2 · Werkphoto RFT Funkwerk Erfurt VEB: Abbildung 21/2 · Werkphoto VEB Funkwerk Köpenick, Bln.-Köpenick: Abbildungen 21/1, 23/1, 24/1, 41/3, 54/2 · Institut für Röntgenographie der Technischen Hochschule Dresden: Abbildungen 122/1, 122/2, 129/2, 130/2, 131/1, 132/1 · Werkphoto VEB Lokomotivbau Elektrotechnische Werke „Hans Beimler", Hennigsdorf: Abbildung 22/2 · Werkphoto G. Lorenz AG i. V., Leipzig: Abbildung 23/2 · Werkphoto VEB(K) Metallbau u. Labormöbelwerke Apolda: Abbildungen 59/1, 59/2, 66/1 · Helmut Mucke, Dresden: Abbildungen 60/1, 63/1, 63/2, 63/3, 64/1, 70/1, 71/1, 72/2, 73/1, 80/2, 82/2, 86/2, 90/1, 91/1, 91/2, 92/2, 96/1, 98/2, 101/1, 108/1, 123/2, 127/2 · Werkphoto VEB Phönix Rudolstadt: Abbildungen 115/1, 116/1, 117/1, 121/1, 121/2 · Photokino Krütgen, Halle: Abbildung 27/1 · Prawda (Reproduktion), Moskau: Abbildung 183/1 · Werkphoto VEB Sachsenwerk Radeberg: Abbildung 57/1 · B. G. Teubner, Leipzig: Abbildungen 8/1, 126/2 · Thielemann, Leipzig: Abbildungen 6/1, 16/1 · Werkphoto VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden: Abbildungen 22/1, 120/1, 121/3, 123/1, 132/2, 133/1 · Volk und Wissen, Volkseigener Verlag Berlin, Bildarchiv: Abbildung 119/1 · Werkphoto VEB Werk für Fernmeldewesen, Bln.-Oberschöneweide: Abbildungen 54/1, 41/2, 55/1, 202/1 · Zentralbild Berlin: Abbildungen 190/1, 191/2 · Werkphoto VEB Carl Zeiss Jena: Abbildungen 85/1, 104/1, 108/2, 201/1 · Haas, „Polarisationsoptik"; Verlag Technik: Abbildung 107/1 · Korsunski, „Atomkern"; VEB Wilhelm Knapp Verlag: Abbildungen 144/3, 181/1, 196/1 · Schpolski, „Atomphysik" Teil I; VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Physiker-Bildnisse: Dewag, Berlin: Heinrich Hertz · Sokolow, „Lehrgang für Physik": Augustin Jean Fresnel, Alexander Stepanowitsch Popow · B. G. Teubner, Leipzig: Ernest Rutherford · Zentralbild, Berlin: Marie Curie-Sklodowska, Pierre Curie, Albert Einstein, Petr Nikolajewitsch Lebedew, James Clerk Maxwell, Max Planck, Wilhelm Conrad Röntgen, Dimitri Iwanowitsch Mendelejew.