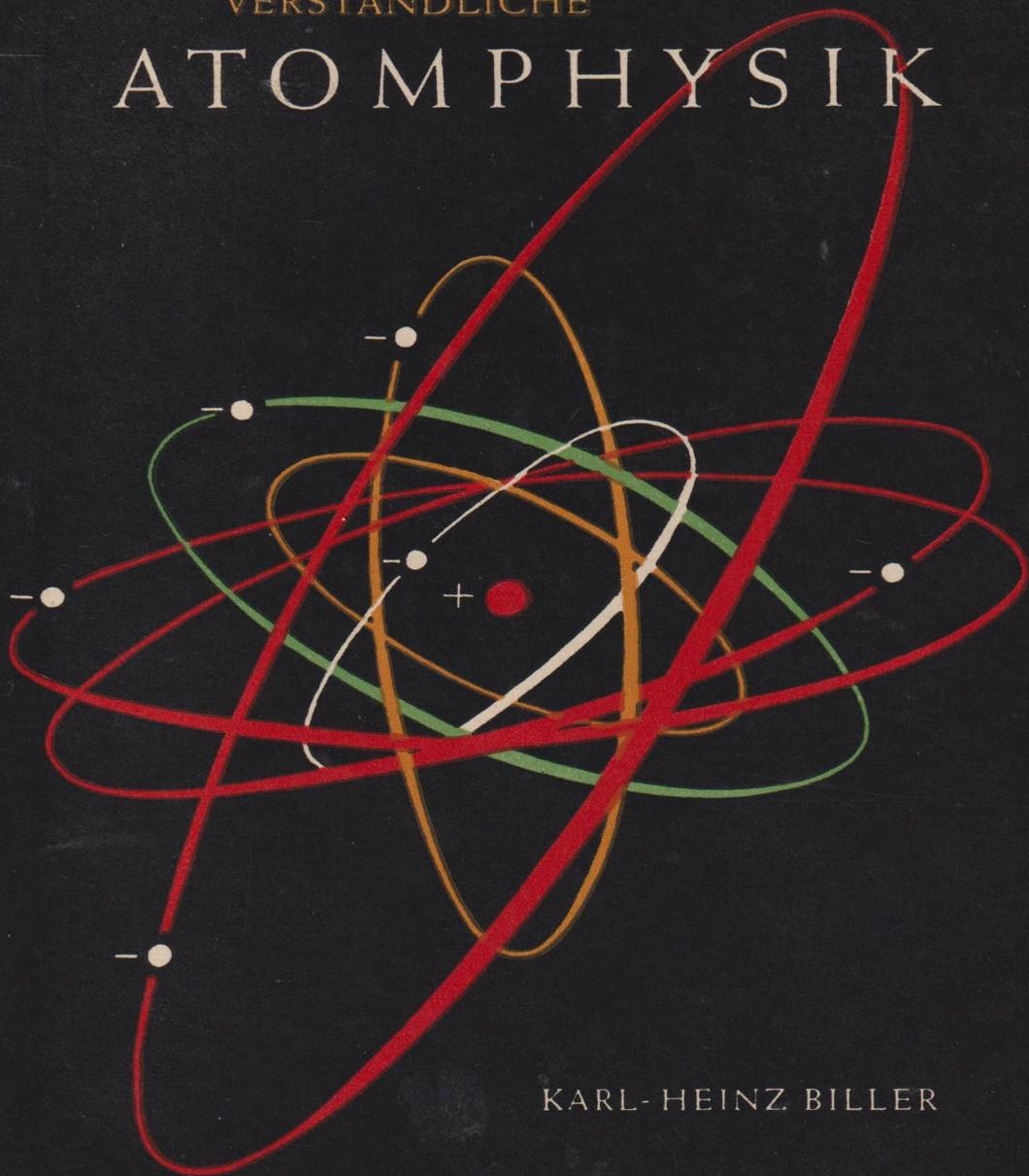


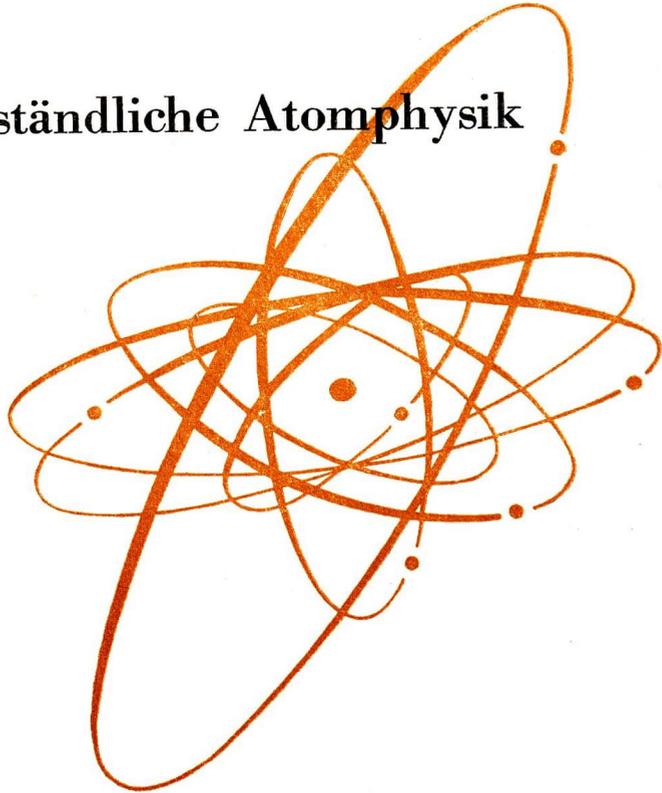
VERSTÄNDLICHE  
ATOMPHYSIK



KARL-HEINZ BILLER

*KARL-HEINZ BILLER*

# Verständliche Atomphysik



1954

*VERLAG NEUES LEBEN  
BERLIN*

***D**as vorliegende Werk soll eine elementare Einführung in die „Welt im Kleinen“ sein. Aus der ungeheuren Vielfalt des Stoffes wurde nur einiges ausgewählt, um daran das Wesentliche zu erläutern; denn eine auch nur annähernd erschöpfende populäre Darstellung würde einige Bände füllen. Das Buch setzt nur das Notwendigste voraus und hält sich in bescheidenem Rahmen.*

## INHALTSVERZEICHNIS

I. Physik der Hülle		
1. Einleitung .....	7	
2. Stoffe und ihre Erscheinungsformen .....	10	
3. Moleküle und Atome ....	13	
4. Elektronen – die Atome der Elektrizität .....	22	
5. Bau der Atome – Atommodelle .....	24	
6. Welle und Korpuskel ....	46	
7. Periodisches System der Elemente .....	55	
8. Magnetisches Moment und Elektronenspin .....	61	
9. Chemische Bindung – Molekülbildung .....	67	
10. Quantenzahlen – Pauliprinzip .....	73	
II. Physik der Kerne		
11. Elementarteilchen .....	83	
12. Kerngröße .....	86	
13. Kernstruktur und Zeichnungen.....	89	
14. Kernmassen.....	92	
15. Die Beziehung zwischen Masse und Energie .....	93	
16. Kernmomente .....	95	
17. Radioaktivität .....	97	
18. Strahlungsarten .....	105	
19. Teilchennachweis .....	127	
20. Teilchenbeschleuniger ...	135	
21. Kernreaktionen.....	150	
22. Schlußbetrachtungen ...	178	
Anhang:		
Kleines Fachlexikon .....	183	
Tafel I .....	192	
Tafel II .....	193	
Tafel III .....	194	
Tafel IV .....	195	
Tafel V .....	198	

# I. PHYSIK DER HÜLLE

## 1. Einleitung

Der Begriff vom Atom gehört mit zu den ältesten in unserer Wissenschaft. Er taucht zum erstenmal vor mehr als zweieinhalbtausend Jahren in der antiken griechischen Philosophie auf. Es ist aber auch möglich, daß die Griechen ihn in einer weniger ausgeprägten Form von anderen Kulturvölkern vorhergehender Zeiten übernommen hatten. Sie gelangten zu diesem Begriff im Zusammenhang mit der Vorstellung von der Entstehung der Welt, ihrem Werden und Sein. Diese Vorstellung war im Vergleich mit unserer heutigen äußerst mystisch und beide haben nur den Kern mit der Tatsache gemeinsam, daß die Welt aus Elementen aufgebaut sein müsse. Darunter verstand man solche wie Wasser, Luft, Feuer und Erde, doch scheint es eben darum nicht ausgeschlossen, daß die Denker vor der griechischen Antike bereits ähnliche Gedanken hatten.

Nachweislich tauchte der Gedanke, daß die Welt sich aus materiellen Substanzen aufbaut, zum erstenmal bei Thales von Milet im 6. Jahrhundert v. u. Z. auf, der im besonderen das Wasser als den Ursprung aller Dinge ansah. Thales war ein berühmter Geometer. Von ihm stammt der Satz, daß in einem Kreis die Umfangswinkel über dem Durchmesser alle gleich  $90^\circ$  sind.

Aber erst über hundert Jahre später wurde zum erstenmal vom Atom gesprochen, und zwar von Leukipp und seinem Schüler Demokrit. Ihre Vorstellung vom Aufbau der Welt war schon ausgeprägter; wir können sagen, sie war materialistischer. Nach ihrer Ansicht bestand die Welt aus dem „Vollen“ und aus dem „Leeren“, das Volle waren die Atome, und zwischen den Atomen lag oben das Leere, der leere Raum. Aber die Atome (aus dem Griechischen: *atomon* = das Unteilbare) waren bei ihnen schon die kleinsten, nicht mehr unterteilbaren Bausteine der Welt, alles Stoffliche bestand aus ihnen. Man dachte sich unendlich viele Atome über den ganzen Raum verteilt; jedes hatte eine bestimmte Lage im Raum und führte auch bestimmte Bewegungen aus. Daß man sie wahrnehmen konnte, war nur ihrer sich ständig ändernden Lage und der gleichfalls sich ändernden Bewegung zuzuschreiben. Sonst besaßen die Atome keinerlei

physikalische Eigenschaften. Man sieht, die Geometer und Philosophen damaliger Zeit waren noch keine Physiker. Wir haben hiervon nur berichtet, um zu zeigen, aus welchen, heute als primitiv zu bezeichnenden Vorstellungen heraus sich die Atomtheorie entwickelt hat.

Dann kümmerte sich über eineinhalbtausend Jahre lang niemand mehr um die Theorie von den Atomen; die Menschen hatten andere Sorgen, und außerdem war es auch nicht ratsam, sich ausgerechnet mit einer materialistischen Interpretation der Welt zu befassen. Erst im 17. Jahrhundert bemühten sich einige Denker wieder darum; den Anfang machte der Franzose Gassendi. Er lebte zur Zeit Keplers und Galileis, und diese Zeit war der Beginn einer neuen Epoche in der Naturwissenschaft.

In den nächsten beiden Jahrhunderten nahm die Naturwissenschaft und mit ihr die Atomtheorie einen großen Aufschwung. Sie war keine selbständige Disziplin, sondern gehörte zur Chemie, und ein großer Teil der Fortschritte wurde von den Chemikern erzielt. Im 19. Jahrhundert entwickelte sich auch die Physik rascher, und die Physiker beteiligten sich nun in hervorragender Weise am Ausbau der Atomtheorie. Wir erwähnen hier nur die Engländer Maxwell und Faraday, die Deutschen Boltzmann und Clausius sowie den Österreicher Loschmidt. Kurz vor Beginn des 20. Jahrhunderts wurden einige entscheidende Entdeckungen gemacht. Im Jahre 1896 fand der Franzose Becquerel, daß verschiedene Uranverbindungen ganz von selbst Strahlen hoher Durchdringungsfähigkeit ausstrahlen. Zwei Jahre später gelang es dem französischen Forscherehepaar Curie, aus Uranerzen einen Stoff zu isolieren, der eine ungeheure Strahlungsintensität hatte. Dieser Stoff erhielt die Bezeichnung Radium, das heißt das Strahlende, und der Vorgang, von selbst Strahlen dieser Art auszusenden, wurde Radioaktivität genannt. Diese Strahlen übertrafen in ihrer Durchdringungsfähigkeit die 1895, also ein paar Jahre zuvor entdeckten Röntgenstrahlen um ein Vielfaches. Eine ganz neue Entwicklungsphase bahnte sich damit an. Im 20. Jahrhundert begann eine stürmische Vorwärtsentwicklung der gesamten Atomphysik; ganz neue Wissensgebiete entstanden, so die ältere Quantentheorie, die Quantenmechanik und die Kernphysik. Von der großen Zahl der maßgeblich beteiligten Forscher aus der ganzen Welt wollen wir nur einige nennen, so M. Planck, die Engländer E. Rutherford und P. M. Dirac, den Dänen N. Bohr; E. Schrödinger, W. Heisenberg, W. Pauli, P. Jordan, M. Born, A. Einstein, den Italiener E. Fermi, den Japaner H. Yukawa. Die Zahl derer, die heute in der Atomphysik tätig sind, ist sehr groß und beträgt einige Zehntausend. Man sieht daran, welche enorme Bedeutung diese Wissenschaft erlangt hat. Das Interesse der Menschheit an der Ausnutzung der in den Atomen zusammengeballten riesigen Energien wird immer größer. Es hat sich noch ein anderer Zweig der Atomphysik entwickelt, man kann ihn Atomtechnik nennen, der sich mit der Ausnutzung dieser großen Energien befaßt. Wir wissen bereits, daß man die

Atomenergie auch dazu ausnutzen kann, uns selbst und die von uns geschaffenen Werte recht gründlich und im „Handumdrehen“ zu vernichten, in Bruchteilen einer Sekunde zu zerstäuben.

Wir brauchen jedoch keine Atombomben, sondern Atommotore oder Atomturbinen; Maschinen, welche die ungeheuren Energien des Atominneren in eine für uns brauchbare Form umwandeln. Energien begegnen uns in verschiedenen Formen. Am bekanntesten sind wohl die beiden mechanischen Energieformen, die Bewegungsenergie und die potentielle Energie, weiter die Wärmeenergie, die Elektroenergie und die chemische Energie. Unter Energie versteht man ganz allgemein die Fähigkeit, Arbeit zu leisten. Außer den angeführten gibt es noch einige andere Arten von Energie, und unter ihnen auch die Atomenergie, die der Wissenschaftler Kernenergie nennt. Die einzelnen Arten sind dadurch gekennzeichnet, daß sie sich ineinander umwandeln lassen. Jedoch gilt dies nicht uneingeschränkt. Man kann eine Energieart nicht in jede andere umwandeln. Chemische Energie läßt sich in Wärmeenergie umwandeln und diese wieder in Bewegungsenergie, doch ist diese Reihenfolge nicht umkehrbar. Das sehen wir zum Beispiel beim Verbrennungsmotor. Die chemische Energie des Brennstoffes setzt sich beim Verbrennungsvorgang in Wärmeenergie um, und diese wird über Kolben und Kurbelwelle zu mechanischer Energie, zu Bewegungsenergie. Die Kernenergie ist eine andere Energieform, aber auch sie kann sich in verschiedene Arten umwandeln. Am besten läßt sich die bei Kernprozessen auftretende Wärmeenergie verwenden; sie übertrifft die bei chemischen Umsetzungen gleichen Umfangs auftretende Wärmeenergie um das Millionenfache. Die Wärmekraftmaschine wird es also sein, die uns die Kernenergie in mechanische Energie umformt. Natürlich wird diese Maschine etwas anders aussehen müssen, als wir es bisher bei derartigen Maschinen gewöhnt sind.

Im Moment haben wir aber noch eine große Schwierigkeit zu überwinden. Die ausgelösten Kernprozesse laufen ungewöhnlich rasch ab und entwickeln sehr hohe Temperaturen. Bei der Atombombe betrug die umgesetzte Menge einige Milligramm, und sie entwickelte Temperaturen, die ein Hundert- bis Tausendfaches der Sonnenoberflächentemperatur betragen, das heißt, Temperaturen zwischen 700000 bis 7 Millionen °C bei einer Umsetzungszeit in der Größenordnung von millionstel Sekunden. Bei entsprechend kleinen Mengen sind die Temperaturen natürlich geringer, und außerdem muß auch die Dauer der Reaktionsprozesse verlängert werden. So gibt es hier noch eine Menge Probleme zu lösen. Bei Raketen, wie sie für die Weltraumfahrt Verwendung finden könnten, braucht man allerdings gerade größere Energien. Es werden auch schon Raketenantriebe im Anfangsstadium ihrer Entwicklung erprobt. Man ist sehr optimistisch und glaubt bis 1960 schon einige Flugversuche damit ausführen zu können. Die Möglichkeiten der Anwendung von Kernenergien sind die gleichen, wie wir sie bisher bei anderen Prozessen gewöhnt sind. Es ließen sich große

Elektrokraftwerke bauen, die weitaus mehr Strom liefern würden als die jetzigen; man brauchte weniger kleine Kraftwerke und könnte die Energieerzeugung an wenigen Stellen konzentrieren. Kohle brauchte man dann nicht mehr zur Energieerzeugung zu verwenden. Haushalt und Industrie würden dann nur elektrisch arbeiten, was mit einer angenehmen Sauberkeit verbunden ist. Man denke auch an die Möglichkeiten für Verkehrsmittel wie Schiffe, Autos und Flugzeuge. Gigantische Maschinen könnten zum Beispiel für die Bauindustrie entstehen. Aus dem Zeitalter der Dampfmaschine und der Verbrennungsmaschine kämen wir in das Zeitalter der Atommaschine, in das Atomzeitalter.

Mancher wird zweifelnd sagen: Solche riesigen Energien sollen in den winzigen Atomen schlummern, das ist kaum vorstellbar! Allerdings kann man sich in den atomaren Bereichen manches nicht mehr so recht vorstellen. Was wir bisher aus makroskopischen Betrachtungen gewöhnt sind, hat in der mikroskopischen Welt nicht immer Gültigkeit, wie wir noch sehen werden. Hier in dieser kleinen Welt kommen wir mit unserer Vorstellung an eine Grenze: die Abmessungen werden unvorstellbar klein, die Mengen der Teilchen unvorstellbar groß. Schließlich versagt auch das normale Anschauungsvermögen des Menschen noch bei vielen anderen Dingen, und man ist gezwungen, will man weitere Fortschritte erzielen, von einer „Naturerklärung“ zu einer „Naturbeschreibung“ überzugehen (Quantenmechanik). Zunächst wollen wir uns aber in ziemlich unvoreingenommener Weise mit dem Bau der Materie befassen.

## *2. Stoffe und ihre Erscheinungsformen*

Die Materie spielt im Leben des Menschen eine große Rolle. Sie umgibt uns ständig und in vielerlei Form. So sind Erde, Wasser und Luft drei besondere ihrer Formen, desgleichen unser Körper und die der Tiere und Pflanzen. Es gibt mehrere Gesichtspunkte, nach denen man die ungeheure Vielfalt der Stoffe einteilen kann. Wir haben bei unserer Aufzählung schon davon Gebrauch gemacht. Die ersten drei Arten sind tote Materie, während man die anderen zur lebenden Materie rechnet. Mit den Letztgenannten beschäftigt sich im wesentlichen die Biologie und die Medizin, mit der ersten Form die Physik und Chemie. Entsprechend der Abgrenzung unseres Themas haben wir es hier nur mit toter Materie zu tun.

In unserer obigen Aufzählung der Stoffe haben wir aber noch ein weiteres ordnendes Prinzip gleichzeitig benutzt. Die Erde ist ein fester Stoff, hingegen ist die Luft ein Gas und das Wasser eine Flüssigkeit. Dieser Art, alle Stoffe einzuteilen, liegen physikalische Prinzipien zugrunde. Man teilt hier ein nach der verschiedenen Größe des Widerstandes, den diese Stoffe einer Gestalt- und Volumenänderung bei Einwirkung äußerer Kräfte entgegensetzen. Der Wider-

stand, den ein fester Stoff einer solchen Änderung entgegengesetzt, ist im allgemeinen groß. Anders ist das bei einer Flüssigkeit. Einer Gestaltänderung wirkt nur die äußere und innere Reibung entgegen; will man jedoch das Volumen ändern, so ist der Aufwand großer Kräfte erforderlich. Ein Gas schließlich bietet bis zu einer gewissen Grenze beiderlei Änderungen sehr viel weniger Schwierigkeiten; es füllt jeden vorgegebenen Raum aus und setzt einer Volumenveränderung in weiten Grenzen keinen nennenswerten Widerstand entgegen.

Diese verschiedenen Erscheinungsformen der Stoffe nennt man Aggregatzustände. Es ist aber nicht so, daß ein Stoff etwa nur in einem Aggregatzustand vorkommt. Betrachten wir beispielsweise das Wasser. Bei Temperaturen zwischen  $0$  und  $100^{\circ}\text{C}$  kommt es in flüssiger Form vor, über  $100^{\circ}$  ist es Dampf, also ein Gas, und unter  $0^{\circ}$  ein fester Stoff. Es sei bemerkt, daß die beiden Werte nur für normalen Luftdruck gelten; ändert sich dieser, so verschieben sich die beiden sogenannten Fixpunkte entsprechend nach oben oder unten. Die Form, in der uns ein Stoff begegnet, ist also wesentlich von zwei Faktoren abhängig: vom Luftdruck, oder allgemein vom äußeren Druck, und von der Temperatur. Wir werden daher erwarten, daß sich alle Stoffe in jeden Aggregatzustand bringen lassen. Dies ist im allgemeinen der Fall, technisch jedoch keineswegs immer zu realisieren. Diejenige Temperatur, bei der ein fester Stoff flüssig wird, nennt man seinen Schmelzpunkt, diejenige, bei der die flüssige Form schließlich verdampft, den Siedepunkt. Für chemisch reines Wasser sind diese beiden Punkte als Festpunkte einer Temperaturskala, der Celsiusskala, genommen worden. Der Schmelzpunkt des Eises oder der Gefrierpunkt des Wassers hat in dieser Skala den Wert  $0$  bekommen, der Siedepunkt den Wert  $100$ . Man teilt diese Skala in einhundert Teile und nennt den Abstand zweier Teilstriche einen Celsius-Grad. Alle Temperaturen unter dem Gefrierpunkt des Wassers sind daher negativ, und es drängt sich unwillkürlich die Frage auf, wie weit diese Skala wohl nach unten reicht, das heißt, welches die tiefsten Temperaturen sind, und ob es nicht schließlich einen von der Natur gegebenen Nullpunkt gibt. Aus rein theoretischen Betrachtungen der Physik, speziell der Thermodynamik, ergibt sich, daß der sogenannte absolute Nullpunkt  $273,16$  Celsiusgrade unter dem Gefrierpunkt des Wassers liegt. Diese Temperatur wird sich aber experimentell niemals erreichen lassen, wir können ihr nur sehr nahe kommen. Betrachten wir beispielsweise das Edelgas Helium. Es hat einen sehr tief liegenden Siedepunkt, der bei normalem Luftdruck  $-268,82^{\circ}\text{C}$  beträgt, das heißt, bei dieser Temperatur verflüssigt sich das Gas. Um das flüssige Helium nun zu verfestigen, muß man zu noch niedrigeren Temperaturen übergehen. Das ist jedoch ein sehr schwieriges Problem. Je näher wir dem absoluten Nullpunkt kommen, um so schwieriger wird es. Mit den der modernen Wissenschaft zur Verfügung stehenden Mitteln ist das flüssige Helium noch weiter unterkühlt worden; dabei hat es sich aber

nicht verfestigt, sondern ist in eine andere flüssige Form, das Helium II, übergegangen, die bis zu den derzeit tiefsten erreichbaren Temperaturen erhalten bleibt. Man hat geschätzt, daß sich diese Form des Heliums selbst am absoluten Nullpunkt nur unter 25 Atmosphären Druck verfestigen lassen würde. Im allgemeinen läßt sich aber sagen, daß bei Abkühlung unter eine bestimmte Temperatur und eventuell durch Anwendung hoher Drucke die Flüssigkeiten sich verfestigen lassen.

Feste Stoffe lassen sich im allgemeinen ebenfalls in alle drei Aggregatzustände bringen, sofern das eben heute technisch möglich ist. Ebenso wie wir nicht beliebig tiefe Temperaturen erzeugen können, ist dies auch bei beliebig hohen Temperaturen nicht möglich. Die Siedepunkte verschiedener Stoffe liegen sehr hoch, und es ist allein durch Temperatursteigerung nicht möglich, sie vollständig in Gasform zu bringen. Als Beispiel wollen wir Platin anführen, das einen Schmelzpunkt von  $1767^{\circ}\text{C}$  und einen Siedepunkt von etwa  $3800^{\circ}\text{C}$  hat. Auch hier lassen sich, wie bei der Gasverflüssigung, die Temperaturen durch Änderung des auf der Flüssigkeitsoberfläche ruhenden Druckes im günstigen Sinne beeinflussen. Mit einer Verringerung desselben sinkt auch die Siedetemperatur.

Die verschiedenen Erscheinungsformen der Materie lassen sich auf diese Weise unter einem einheitlichen Gesichtspunkt betrachten und einordnen. Letztlich stellen sie verschiedene Temperaturbereiche dieser Stoffe dar, wenn man von der Einwirkung des Druckes absieht, der ja prinzipiell nur eine untergeordnete Rolle spielt, wenn er auch in technischer Hinsicht von entscheidender Bedeutung ist. Die einzelnen Aggregatzustände stellen also nichts Festes oder Unveränderliches dar, sondern sind ineinander umwandelbar, was schon durch die Benennung „Erscheinungsform“ zum Ausdruck gebracht werden soll. Das heißt etwa, daß sie uns unter bestimmten Bedingungen in einer bestimmten Form erscheinen, deren Umwandelbarkeit aber nicht ausgeschlossen ist.

Ob uns ein Stoff in flüssiger oder gasförmiger Form vorliegt, ist leicht zu entscheiden. Der Übergang von der Flüssigkeit in Dampf oder Gas ist meist sehr scharf und sprunghaft. Die Entscheidung, ob ein Stoff als fest oder flüssig anzusehen ist, kann hingegen nicht immer leicht getroffen werden. Man unterscheidet bei den festen Stoffen kristalline und amorphe. Zu den Stoffen mit Kristallstruktur gehören zum Beispiel die Metalle, aber auch die Salze und das Eis. Sie zeigen einen scharfen Übergang von fest in flüssig. Die amorphen Stoffe, was wörtlich soviel wie gestaltlose Stoffe bedeutet – gestaltlos gegenüber den kristallinen Stoffen, die eine ganz bestimmte Kristallform haben –, zeigen keinen sprunghaften, sondern einen stetigen Übergang von der festen in die flüssige Form. Zu ihnen gehören manche Kunstharze und vor allem die Gläser. Diese Stoffe werden bei ständiger Abkühlung immer zähflüssiger, so daß man sie schließlich als feste Stoffe ansieht. Beim Glas wird im allgemeinen niemand behaupten, daß es kein fester Stoff wäre, im Gegenteil, es erscheint äußerst hart.

Spröde und hart aber verhält es sich nur kurzzeitigen Kraftereinwirkungen gegenüber. Bei kleinen Kraftereinwirkungen, die über eine große Zeitdauer wirken, verformt es sich. Legt man eine etwa einen Quadratmeter große Glasplatte so auf, daß sie nur am Rande gestützt ist, so wird man nach einigen Wochen eine merkliche Durchsenkung in der Mitte der Platte feststellen. Derartige Stoffe rechnet man zu den plastischen Materialien.

Über die Materie ließe sich noch eine Menge durchaus nicht überflüssiger Dinge sagen. Die vorstehenden Ausführungen sollten hier dem Zweck einer allgemeinen Orientierung über die Stoffe dienen, so, wie man sie wohl in der gewöhnlichen Physik zu sehen pflegt, wenn man sie und ihre Eigenschaften vom makroskopischen Standpunkt her betrachtet und gewissermaßen ihre Feinstruktur, ihren mikroskopischen Bau, außer Betracht läßt. Man wird aber leicht einsehen, daß sich bei dieser Art der Betrachtung viele Dinge nicht erfassen lassen. Wir wenden uns nun einer tiefer gehenden Betrachtung der Struktur der Stoffe zu.

### 3. Moleküle und Atome

Nimmt man etwa einen Tropfen Wasser auf eine Glasplatte und zerlegt ihn durch Auseinanderblasen in kleinere Tröpfchen, so wird man sich fragen, wie weit dieser Zerteilungsprozeß fortgesetzt werden kann. Daß dieser Prozeß einmal beendet sein muß, erscheint uns heute als eine Denknöwendigkeit. Die erhaltenen Teilchen mögen schließlich noch so klein sein, sie bleiben trotzdem Materie; denn wenn ich Materie teile, muß ich auch wieder Materie erhalten. Nehmen wir an, daß wir einen Wassertropfen in der angegebenen Art zerlegt hätten, so daß wir ein letztes, schließlich nicht mehr weiter unterteilbares kleines Teilchen erhalten. Ist dies nun schon ein Atom? Nein. Um das zu verstehen, machen wir noch einen anderen Versuch.

Bild 1 zeigt einen Hoffmannschen Wasserzersetzungsapparat. Er besteht aus zwei untereinander verbundenen Glasröhren, die oben durch einen Hahn verschlossen sind. In jede Röhre ist ein Draht eingeschmolzen, der mit einem in der Röhre befindlichen Platinblech, der Elektrode, verbunden ist. Die beiden herausführenden Drähte werden an eine Batterie angeschlossen, darauf wird der

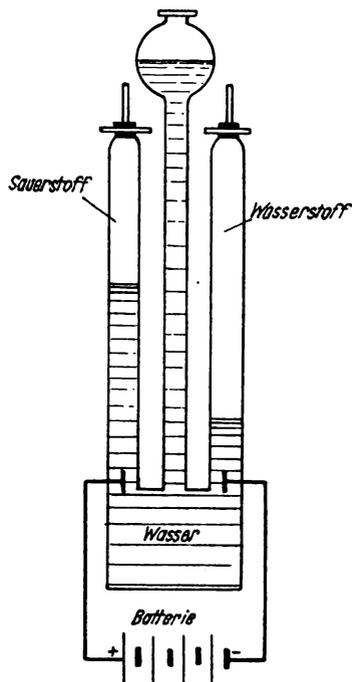


Bild 1

Apparat mit Wasser gefüllt, dem etwas Schwefelsäure zugesetzt ist. Diese hat nur den Zweck, den anschließenden Prozeß zu beschleunigen; es geht auch ohne Säure, aber man braucht dann größere Spannungen. Nachdem das Wasser eingefüllt ist, setzt eine lebhaft Gasentwicklung an beiden Elektroden ein. Man sieht nach einiger Zeit, daß sich in der einen Röhre doppelt soviel Gas bildet wie in der anderen. Es läßt sich nun leicht nachweisen, daß es sich bei den Gasen um Wasserstoff und Sauerstoff handelt, wir übergehen das hier. Der Wasserstoff entwickelt sich in doppelter Menge. Während wir nach unserem ersten Gedankenexperiment keinen neuen Stoff erhalten haben, sondern ein winziges Teilchen, das aber immer noch Wasser ist, bringt das zweite Experiment den Nachweis, daß sich Wasser noch weiter zerlegen läßt, nämlich in zwei andere Stoffe, Wasserstoff und Sauerstoff. Wenn aber die Atome die letzten, nicht mehr teilbaren Bestandteile der Stoffe (Materie) sind, dürfen sie sich also nicht weiter zerlegen lassen. Das zuerst erhaltene kleinste Wasserteilchen ist demzufolge kein Atom, denn es läßt sich in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegen. Darum nennt der Chemiker einen Stoff wie das Wasser eine Verbindung; das Wasser ist also eine Verbindung von Wasserstoff (zwei Volumenteile) und Sauerstoff (ein Volumenteil). Diese beiden Bestandteile lassen sich chemisch nicht weiter zerlegen, wie man festgestellt hat, und man nennt daher solche Stoffe Elemente oder Grundstoffe. Wir haben somit folgenden Sachverhalt: Wasser ist eine chemische Verbindung und besteht aus (zwei) Elementen. Was wir hier für das Wasser festgestellt haben, gilt ganz allgemein für alle chemischen Verbindungen. Davon kennt man heute rund eine halbe Million. Die kleinsten Teile einer chemischen Verbindung heißen Moleküle. Mit chemischen Mitteln gelingt es, die Verbindungen in ihre Elemente zu zerlegen. Diese sind die letzten, chemisch nicht mehr zerlegbaren Bestandteile aller Stoffe. Unsere im „Großen“ vorgenommene Trennung der Verbindung Wasser ( $H_2O$ ) in ihre Elemente Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O), bei der man beliebige Mengen einer Analyse unterwerfen kann, läßt sich auch auf die kleinen Dimensionen (Mikrokosmos) übertragen. Würde man also mit physikalischen Mitteln das Wasser in seine kleinsten Bestandteile zerlegen, so wären dieselben noch immer Wasser, eben seine Moleküle. Wendet man nun chemische Hilfsmittel an, so spaltet sich jedes Molekül in seine elementaren Bestandteile, nämlich in Atome auf. Eine Aufspaltung der Atome in noch kleinere Teile gelingt mit diesen Mitteln nicht, da, wie wir bereits bemerkt haben, sich die Elemente chemisch nicht weiter zerlegen lassen.

Verbindungen gibt es also in sehr großer Zahl. Der Chemiker stellt sogar solche her, die in der Natur nicht vorhanden sind. Manche sind uns aus dem täglichen Leben bekannt: die Kunstfasern, die Kunstharze, synthetische Farbstoffe, synthetischer Gummi usw. Elemente kennt man hingegen nur in geringer Anzahl; oder anders ausgedrückt, man kennt nur eine geringe Zahl Atomsorten. Es ist vielleicht schon bekannt, daß es 92 sind. Neuerdings sind noch einige dazu-

gekommen, so daß es jetzt im ganzen 98 Elemente sind, unter denen sich auch wieder einige befinden, die in der Natur nicht vorkommen. Die mögliche Zahl schätzt man heute auf 104. Darüber werden wir noch an anderer Stelle berichten. Wenn man die aus dem Hoffmannschen Wasserzersetzungsapparat erhaltenen Elemente des Wassers durch Öffnen der beiden Hähne in ein darüber liegendes Gefäß einströmen läßt, so kann man sie wieder zu Wasser vereinigen. Allerdings geschieht dies nicht von selbst. Man läßt dazu zwischen zwei Drahtelektroden einen Funken überspringen, und erst dann vereinigen sich die beiden Gase wieder zu Wasser. Es läßt sich ferner feststellen, daß sich beide Gase nur in ganz bestimmten Mengenverhältnissen wieder miteinander verbinden; hier verbinden sich immer gerade ein Liter Wasserstoff und ein halbes Liter Sauerstoff zu einem Liter Wasserdampf oder zu einer Wassermenge, die verdampft gerade ein Liter ergibt. Würde man zu der gleichen Wasserstoffmenge ein Liter Sauerstoff zugeben, so bliebe ein halbes Liter davon nach der Synthese, wie man eine Vereinigung von Elementen nennt, übrig. Die Wassersynthese ist kein Ausnahmefall, fast alle Verbindungen bestehen aus ganz bestimmten Mengenverhältnissen der anteiligen Elemente. Man kann zur Synthese anderer Verbindungen ebenfalls beliebige Mengen der beteiligten Elemente in einem Gefäß zusammenbringen, aber es werden sich hiervon immer nur ganz bestimmte Mengenverhältnisse vereinigen. Dieses Naturgesetz hat der Engländer Dalton schon kurz nach 1800 gefunden. Man nennt es das Gesetz der konstanten Proportionen (der unveränderlichen Verhältnisse). Es ist nicht immer notwendig, von den aufeinander reagierenden Stoffen die Volumenverhältnisse anzugeben, wie wir das eben getan haben, man kann auch die Gewichtsverhältnisse betrachten. Bei der Wassersynthese reagieren gerade immer 6 g Wasserstoff mit 48 g Sauerstoff und ergeben 54 g Wasser, oder 2 g Wasserstoff mit 16 g Sauerstoff, was 18 g Wasser ergibt. Wir finden hierin gleich noch ein weiteres wichtiges Gesetz, nämlich das Gesetz von der Erhaltung der Masse. Bei den angegebenen Reaktionen geht weder Masse verloren noch kommt welche hinzu. So gilt es in der klassischen Physik und in der Chemie. Dieses Gesetz spielt eine ganz fundamentale Rolle; man sieht es als eine glatte Selbstverständlichkeit an. In der Kernphysik ist es jedoch nicht mehr in dieser Form gültig. Dort bleiben bei den stattfindenden Reaktionen die Massen nicht erhalten, es treten Massenverluste ein.

Bei unseren bisherigen Betrachtungen haben wir festgestellt, daß die Flüssigkeit Wasser eine Verbindung ist aus den zwei Gasen Sauerstoff und Wasserstoff. Weiter haben wir gesehen, daß alle Stoffe, seien sie nun fest, flüssig oder gasförmig, aus kleinsten Teilchen bestehen. Sehen wir uns zunächst einmal ein Gas an, das in ein Gefäß eingeschlossen ist. Dann hat es eine bestimmte Temperatur, einen bestimmten Druck und auch ein genau bestimmbares Volumen. Man erklärt nun das Wesen eines Gases folgendermaßen: Seine kleinsten Teilchen, die Moleküle, sind im ganzen Raume verteilt und befinden sich in ungeordneter,

regelloser Bewegung. Sie fliegen durcheinander, als suchten sie einen Ausweg aus einem Käfig. Dabei prallen sie natürlich mit den Wänden und mit anderen Teilchen fortwährend zusammen. Der Zusammenprall ist vollkommen elastisch, das heißt, der sogenannte Impuls und die kinetische Energie bleiben dabei erhalten. Unter Impuls versteht man das Produkt aus Masse mal Geschwindigkeit. Trifft ein Teilchen zum Beispiel genau senkrecht auf die Wand auf, so wird es genau senkrecht mit der gleichen Geschwindigkeit zurückgeworfen, bei schrägem oder schieferm Aufprall wird es so reflektiert, wie ein gegen eine Wand unter einem Winkel geworfener Gummiball. Ähnlich sind die Verhältnisse beim Zusammenstoß der Moleküle untereinander. Die Bewegungsenergie des gesamten Systems bleibt dabei im ganzen erhalten, auch wenn einzelne Teilchen durch den Stoß an Geschwindigkeit verlieren, da ja die gestoßenen Teilchen entsprechend schneller geworden sind. Die andauernden Stöße auf die Wand nehmen wir als Druck des Gases wahr, und je mehr Teilchen pro Sekunde auf eine Wandfläche auftreffen, um so größer ist der Druck des Gases. Erhitzt man ein Gas, so steigt der Druck an. Dies erklärt man damit, daß eine Erwärmung die Bewegungsenergie der Partikel vergrößert. Sie werden rascher und treffen nun in derselben Zeit häufiger auf die Wände auf. Wie wir wissen, ist die Wärme eine Form der Energie und die Bewegungsenergie eine andere. Die Wärme teilt sich den einzelnen Molekülen mit, und diese wandeln die aufgenommene Wärmeenergie in Bewegungsenergie um. Wie dieser Prozeß vor sich geht, wissen wir nicht. Um die verschiedenen Arten von Bewegungsenergien am Molekül zu erklären, müssen wir uns zunächst kurz über seinen Bau informieren. Die Moleküle bestehen aus einer bestimmten Anzahl von Atomen, mindestens müssen es zwei sein. Ein Molekül ist aber nicht nur dadurch gekennzeichnet, daß sich in ihm eine für jeden Stoff charakteristische Anzahl verschiedener oder auch gleicher Atome zusammenlagert, sondern auch durch deren räumliche Anordnung. Es ist also nicht etwa ohne Belang, wie die Atome im Molekül angeordnet sind; sie besitzen eine ganz bestimmte räumliche Anordnung. Man hat festgestellt, daß Wasserdampfmoleküle beispielsweise die in Bild 2a gezeigte Form eines gleichschenkligen Dreiecks haben, in dessen Eckpunkten sich die Atome befinden. Jedoch sind sie dort nicht fest angeordnet, sondern führen kleine, schnelle Schwingungen aus. Die Eckpunkte des Dreiecks sind die Schwingungsmittelpunkte. Die Schwingungen können dabei beliebige Richtung haben. Würde man von dem Molekül eine Momentaufnahme mit einem Photoapparat machen können, so würden sich die einzelnen Atome mit allergrößter Wahrscheinlichkeit nicht gerade in den Eckpunkten befinden, also nicht gerade in den Schwingungsmittelpunkten. Würden wir aber statt einer einzelnen Aufnahme tausend in einer Sekunde machen und diese alle auf ein einziges Bild kopieren, dann würde dies etwa wie Bild 2b aussehen. Das Molekül rotiert außerdem als Ganzes noch um den gemeinsamen Massenmittelpunkt, so daß wir schließlich drei Arten

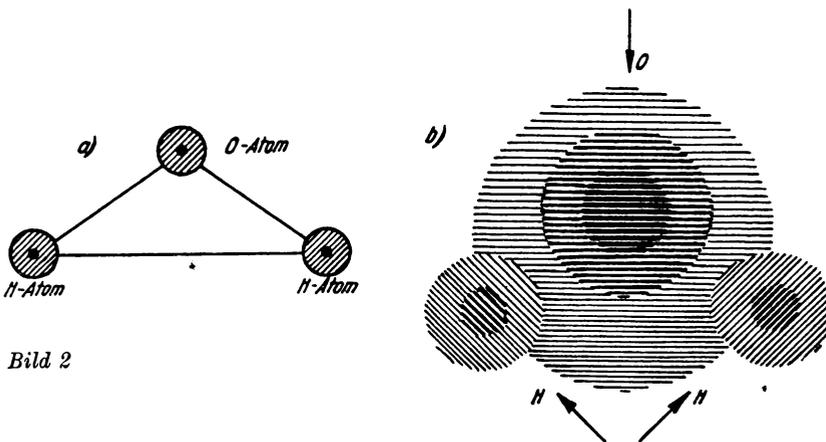


Bild 2

von Bewegungen haben, die geradlinige Bewegung in jeder Raumrichtung (Translation), die schwingende Bewegung der Atome gegeneinander (Oszillation) und die Drehung um die gemeinsame Schwerachse (Rotation). Auf diese drei Bewegungsarten verteilt sich die gesamte kinetische Energie; die bereits vorhandene und auch die dem Molekül zugeführte. Erwärmt man das Gas, so wandelt sich die von den Molekülen aufgenommene Wärmeenergie in kinetische, das heißt Bewegungsenergie um. Sie werden also rascher fliegen, sich schneller drehen und auch schneller schwingen. Hiermit haben wir eine Erklärung für die maßgebliche Rolle der Wärme für die kleinsten Teile der Materie gefunden. Nun ist das Wassermolekül natürlich nur ein Spezialfall aus der riesigen Zahl aller Moleküle. Andere Stoffpartikel haben selbstverständlich einen anderen Bau, schon deswegen, weil sie eine andere Anzahl von Atomen besitzen. Die Möglichkeiten der Anordnung der Teilchen im Molekül sind recht vielfältig und steigen mit der Zahl derselben sehr rasch an. Bekannt sind die komplizierten Moleküle der organischen Chemie, wo sich bis zu einige Tausend Atome zu Molekülen aneinanderlagern. Jedoch handelt es sich dann im allgemeinen nicht mehr um Gase, sondern um Flüssigkeiten oder feste Stoffe.

Vor mehr als hundert Jahren stellte der italienische Physiker Avagadro eine kühne Behauptung auf, die sich später aber bestätigte: Gleiche Raumeile verschiedener Gase enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl von Molekülen. Das bedeutet also, daß ein Liter von jedem Gas immer die gleiche Anzahl Teilchen enthält, wenn der Druck und die Temperatur gleich sind. Diese Hypothese beruht auf derselben Vorstellung vom Wesen der Gase, wie wir sie hier entwickelt haben. Die Temperatur der Gase kommt in der Bewegungsenergie der Moleküle zum Ausdruck, das heißt, der Druck in der Zahl

der Zusammenstöße mit den Gefäßwänden. Wenn also dieser immer gleich sein soll (gleiche Volumina vorausgesetzt), so muß die Zahl der Stöße auf die Wände pro Sekunde die gleiche sein. Setzt man aber noch voraus, daß auch die mittlere Bewegungsenergie die gleiche ist, daß also gleiche Temperaturen herrschen, so kann dies nur möglich sein, wenn die Zahl der Teilchen die gleiche ist. Avagadros Hypothese war in der Tat sehr sinnvoll. Sie führte schließlich dazu, daß der Österreicher Loschmidt im Jahre 1865 die Größe der Moleküle und damit letztlich die Zahl der Teilchen in einer bestimmten Volumeneinheit berechnen konnte. Diese Zahl war zunächst noch nicht ganz richtig und wurde später mit den Hilfsmitteln der Quantentheorie genauer berechnet. Für  $1 \text{ cm}^3$  eines Gases ergibt sich die ungeheuer große Zahl von  $2,68 \cdot 10^{19}$  (rund 27 Trillionen) Molekülen. Wollte man die Teilchen abzählen, die in dem kleinen Würfel enthalten sind, so brauchte man dazu, selbst bei einer ununterbrochenen Zählung von tausend Stück in der Sekunde, gut eine Milliarde Jahre. Auch wenn man nur einen Würfel von  $\frac{1}{10}$  mm Kantenlänge nehmen würde, brauchte man noch immer etwa tausend Jahre. Dies gibt wohl einen Begriff von der Winzigkeit der Teilchen. Die Größe der einzelnen Moleküle und der Atome ist natürlich verschieden, doch haben sie alle etwa die Größenordnung von einigen  $10^{-8}$  cm (hundertmillionstel cm). Legt man davon 10 Millionen aneinander, so ergibt das eine Strecke von einem Millimeter; man kann sich das nicht mehr vorstellen. Die in einem Gefäß durcheinanderfliegenden Moleküle haben, auf ihre eigene Größe bezogen, einen großen Abstand voneinander. Es läßt sich berechnen, wie lange im Durchschnitt ein Teilchen braucht, bis es mit einem anderen zusammenstößt. Die entsprechende Strecke nennt man die mittlere freie Weglänge, sie beträgt etwa  $10^{-5}$  cm, das ist  $\frac{1}{10\,000}$  mm. Diese Strecke können die Teilchen im Durchschnitt durchfliegen, bevor sie auf ein anderes treffen. Mit ihren eigenen Maßen gemessen heißt das, sie stoßen erst in einer Entfernung von 1000 „Teilchenlängen“ zusammen, beziehungsweise, diese Entfernung haben sie im Durchschnitt voneinander. Dies ist auf keinen Fall dicht; würden wir uns die Molekeln als Kugeln von einem Meter Durchmesser vorstellen, so hätten sie also einen Abstand von gut einem Kilometer voneinander. Es ist wohl klar, wie das zu verstehen ist. Hätten sie ständig einen solchen Abstand, dann könnten sie auf keinen Fall zusammenstoßen, sie befinden sich ja in stetiger Bewegung, und viele Teilchen haben einen weit größeren Abstand voneinander, andere wiederum stoßen gerade zusammen oder haben einen sehr geringen Abstand. Die Aussagen, die sich über derartig große Mengen machen lassen, haben nur statistischen Wert, das heißt, man kann die Betrachtungsweise nicht auf einzelne Partikel anwenden.

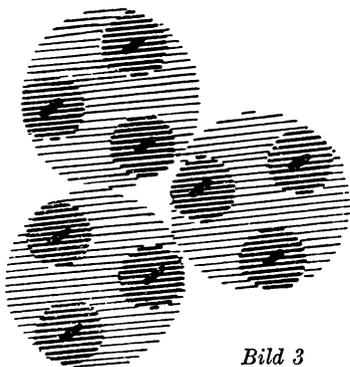
Betrachtet man nur zwei Partikel, so werden sie alle möglichen Abstände haben können, vom größtmöglichen bis zum kleinsten. Sie können sich in einem Augenblick gerade in den gegenüberliegenden Ecken des Gefäßes befinden, sie

können aber auch gerade zusammenstoßen. Die Wahrscheinlichkeit, daß zwei Moleküle, die sich ganz allein in einem kleinen Gefäß befinden und dort hin und her fliegen, innerhalb einer Sekunde zusammenstoßen, ist sehr gering. Ihre mittlere freie Weglänge ist also sehr groß, größer als die Gefäßdimensionen. Bringt man nun in das gleiche Gefäß aber zum Beispiel eine Million Teilchen, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß in der nächsten Sekunde zwei zusammenstoßen, so groß geworden, daß wir dies schon mit Gewißheit behaupten können. Dann ist die Wahrscheinlichkeit mathematisch gleich 1. Fordere ich hingegen, daß zwei ganz bestimmte Teilchen innerhalb einer Sekunde zusammenstoßen sollen, so ist die Wahrscheinlichkeit dafür wiederum sehr klein. Aus der mittleren freien Weglänge eines Gases und der durchschnittlichen Geschwindigkeit der Moleküle läßt sich die Zeit berechnen, in der zwei Teilchen zusammenstoßen werden, oder auch wie viele im Zeitraum von einer Sekunde zusammenstoßen. Bei einem Gas von 1 Atmosphäre Druck treffen sich während dieser Zeit etwa 1–10 Milliarden Partikel, das heißt, im Durchschnitt erfolgt jede ein-milliardstel bis zehnmilliardstel Sekunde ein Zusammenstoß.

Aus diesen Betrachtungen ist wohl klargeworden, daß man hier keine Aussage mehr über das Schicksal eines einzelnen Teilchens machen kann, als höchstens die, daß es sich im Durchschnitt mit einer gewissen Geschwindigkeit bewegen wird, im Durchschnitt soundsoviel mal in einer Sekunde mit anderen zusammenstößt usw. Alle unsere Aussagen besitzen nur einen statistischen Wert, das heißt, sie gelten nur für eine riesige Anzahl von Partikeln, ein einzelnes Teilchen hat immer eine davon abweichende Geschwindigkeit (eine andere freie Weglänge), und alle Aussagen weichen für einzelne Moleküle immer von den Werten ab, die wir oben nannten. Aber deswegen sind diese Werte nicht etwa „ungenau“ oder nicht „wirklich“, sondern als Durchschnittsaussagen verlieren sie eben für Einzelindividuen ihren Sinn. Wollte man zum Beispiel angeben, wo sich ein Molekül, das eben gegen eine Wand gestoßen ist, in der nächsten Sekunde befinden wird, so könnte dies nur eine Wahrscheinlichkeitsaussage sein. Wo es sich tatsächlich befindet, läßt sich niemals genau vorhersagen. Das wird ohne Schwierigkeit einleuchten, wenn man bedenkt, wie oft das Teilchen mit anderen in diesem Zeitraum zusammenstößt, und daß es dabei in irgendwelche Richtungen abgelenkt wird.

Unsere bisherigen Ausführungen bezogen sich nur auf die Moleküle eines Gases; nur hier haben die Partikel den großen Abstand voneinander. Anders liegen die Verhältnisse bereits bei einer Flüssigkeit, und die Verhältnisse bei festen Stoffen sind hiervon wiederum verschieden. Die Verhältnisse in Gasen kann man im gewissen Sinne als bekannt und erklärbar ansehen. Die Theorie der Gasmoleküle ist heute schon weitgehend entwickelt. Für Flüssigkeiten haben wir eine ähnliche Theorie wie die Gastheorie noch nicht. Hier hat man etwa folgende Situation: Eine Flüssigkeit kann nur unter Anwendung sehr großer Kräfte in

geringem Maße zusammengedrückt werden, woraus der naheliegende Schluß zu ziehen ist, daß die Moleküle in der Flüssigkeit sehr dicht nebeneinander liegen oder sehr dicht gepackt sind, wie man sagt. Es ist in gewissem Sinne schon fraglich, was man als Molekül bezeichnen will. Die Atome zweier verschiedener Moleküle haben jetzt schon denselben Abstand voneinander wie die Atome im Molekül (Bild 3), und die mittlere freie Weglänge ist praktisch gleich Null. Jetzt treten auch insofern andere Verhältnisse auf, als die Moleküle



*Bild 3*

gewisse Kräfte aufeinander ausüben, die man bei Gasmolekülen infolge des großen Abstandes vernachlässigen kann. Trotzdem befinden sich auch hier die Teilchen in einer ständigen Wärmebewegung, genau wie wir das bei den Gasen erläutert haben. Man kann einen gewissen Vergleich mit einem belebten kleinen Platz anstellen, über den nach allen Seiten hin die Menschen zu- und abströmen, nur muß man sich ein sehr dichtes Gedränge vorstellen. Außer dieser Vorwärtsbewegung, bei der sich die Nachbarn ständig berühren und auch zusammenstoßen, behalten sie auch die übrigen Bewegungen bei, die wir beim Gas schon

angegeben haben. Daß man eine Flüssigkeit trotzdem noch etwas zusammendrücken kann, führt zu dem Schluß, daß sich die Atome im Molekül noch dichter zusammenschieben lassen. Man hat auch ein experimentelles Hilfsmittel, um die Struktur der Materie näher zu untersuchen. Die Stoffe werden mit Röntgenstrahlen durchstrahlt, und aus der Ablenkung, die diese erfahren, kann man Rückschlüsse auf den Bau des Stoffes ziehen. Würde man also Wasser mit den Strahlen behandeln, so müßte sich das Molekül in der angegebenen Dreiecksform zeigen. In den Eckpunkten des durchstrahlten Partikels werden die Strahlen durch die dort befindlichen Atome aus ihrer Richtung etwas abgelenkt, hingegen werden sie den zwischen den Teilchen befindlichen leeren Raum ungehindert durchqueren. Bei diesen Strukturuntersuchungen hat man eine gewisse Regelmäßigkeit im Bau der Flüssigkeiten beobachten können: Die Atome bevorzugen einige ganz bestimmte Abstände voneinander, die sich gruppenweise wiederholen. Eine Anzahl von Atomen lagert sich in meßbaren Abständen so, daß man die Gruppenbildung durchaus noch zu unterscheiden vermag. Man kann also sagen, daß hier noch Molekülbildung vorliegt, was nämlich nicht bei allen Flüssigkeiten zutrifft. In der großen Zahl der Flüssigkeiten gibt es auch solche, die in rein atomarem Zustand vorkommen, bei denen man keine unter-

scheidbare Anordnung von verschiedenen Atomen zu einer sich ständig wiederholenden Gruppe feststellen kann. Ein Beispiel hierfür ist das Element Quecksilber, bei dem die Atome sich nicht zu Molekülen aneinanderlagern. Den Unterschied zwischen atomaren und molekularen Flüssigkeiten kann man im Strukturbild feststellen. Die Strahlen werden in molekularen Flüssigkeiten einmal gewisse Ablenkungen durch die Moleküle erfahren, andererseits aber auch durch die einzelnen Atome im Molekül abgelenkt werden. Man spricht dann von sogenannter intermolekularer Ablenkung (durch die einzelnen Moleküle) und von intramolekularer Ablenkung (innerhalb der Moleküle). So läßt sich beispielsweise beim Tetrachlorkohlenstoff ( $\text{CCl}_4$ ) noch eine Molekülbildung nachweisen. Bei atomaren Flüssigkeiten dagegen wird eine intramolekulare Ablenkung nicht mehr festzustellen sein. Bei einer größeren Anzahl von Atomen besitzt ein Molekül schließlich keine Kugelsymmetrie mehr, das heißt, die Teilchen haben keine Kugelform mehr, sondern eine mehr gestreckte Form; man spricht dann von Ketten oder Stäben. Wir haben weiter oben schon auf die Riesenmoleküle der organischen Chemie hingewiesen, bei denen dies gerade der Fall ist.

Bei festen Stoffen herrscht im allgemeinen ein streng regelmäßiger Bau vor; man spricht vom Kristallbau. Wir kennen alle die Schnee- oder Eiskristalle und ebenso die Zucker- und Salzkristalle. Ein Kristall fällt schon durch seine regelmäßige Form auf; doch was wir gewöhnlich einen Kristall nennen, ist eine Zusammenballung von winzigen kleinen Kriställchen. Seine Begrenzung besteht aus Ebenen, die unter einem für jede Kristallform charakteristischen Winkel zusammenstoßen. Bild 4 zeigt einen typischen Vertreter. Man kennt die vielfältigsten Formen und teilt sie nach geometrischen Gesichtspunkten ein. Die Eckpunkte der Mikrokristalle sind von den Atomen besetzt, die hier im allgemeinen als einzige Bewegung nur noch Schwingungen um die Ruhelage ausführen und sich mit dem Kristall (der hier gewissermaßen ein erstarrtes Molekül ist) nicht mehr bewegen, wie dies noch bei den Gasmolekülen und Flüssigkeitsmolekülen der Fall ist. Man nennt das so

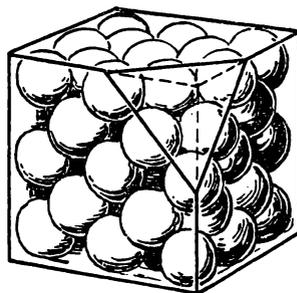


Bild 4

erstarrte Gerüst eine Elementarzelle des Kristalls, der sich somit aus einer großen Zahl von diesen Zellen zusammensetzt, die alle die gleiche Form haben. Die sogenannte Gitterstruktur der festen Stoffe unterscheidet diese also ganz wesentlich von den beiden anderen Aggregatzuständen.

#### 4. Elektronen – die Atome der Elektrizität

Die kleinsten Teilchen der Elektrizität nennt man Elektronen. Sie sind von kaum vorstellbarer Kleinheit. Der sogenannte klassische Elektronenradius beträgt  $r_e = 2,81 \cdot 10^{-13}$  cm, der Durchmesser also  $5,62 \cdot 10^{-13}$  cm. Klassisch heißt der Elektronenradius deswegen, weil er sich mit den Methoden der klassischen Physik so errechnet. Nach heutiger Ansicht kommt dem Begriff Radius eine völlig andere Bedeutung zu. Der Atomdurchmesser ist im Vergleich dazu riesig, er ist etwa 100000 mal größer. Legt man 10 Millionen Atome auf einem Millimeter aneinander, so braucht man für diese Strecke also etwa 100000 mal soviel Elektronen. Hätte das Elektron einen Durchmesser von 10 Zentimeter, so wäre das Atom schon eine Kugel von 10 Kilometer Durchmesser. Diese Teilchen tragen eine ebenso winzige sogenannte Elementarladung und haben eine Masse, die nur  $\frac{1}{1836}$  der Masse des leichtesten Atoms, nämlich des Wasserstoffatoms, beträgt. Freie Elektronen beobachtete man zuerst bei Gasentladungserscheinungen. Dazu werden in eine mit einem Gas gefüllte Glasröhre zwei Elektroden eingeschmolzen, die Katode und die Anode. Ferner wird ein Stutzen zum Anschluß einer Vakuumpumpe angebracht (Bild 5). Die Pumpe wird in Tätigkeit gesetzt und das Gas abgepumpt. Gleichzeitig legt man eine Spannung an die Elektroden. Bei genügend hoher Spannung (1000 Volt)

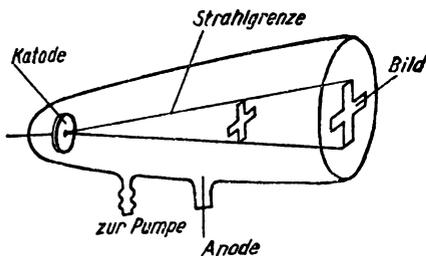


Bild 5

und hinreichend niedrigem Druck ( $\frac{1}{10}$ –1 Millimeter Quecksilbersäule) beobachtet man in der Röhre eine Leuchterscheinung. Das Gas leuchtet in einer Farbe auf, die von dem verwendeten Gas abhängt. Senkt man den Druck in der Röhre nach und nach bis auf einige hundertstel Millimeter Quecksilbersäule, die Spannung erreicht dabei Werte von etwa 20000 Volt, so ist das Gasleuchten fast vollständig verschwunden; dafür leuchtet aber die Glaswand gegenüber der Katode in einem grünlichen Lichte auf. Man sieht von der Katode einen Lichtkegel ausgehen, der die gegenüberliegende Wand erreicht. Dieser „Lichtstrahl“ läßt sich mit einem Magneten ablenken. Man kann ihn mehr nach oben oder unten „ziehen“. Stellt man in den Strahlengang einen Gegenstand, so sieht man auf der Glaswand seinen Schatten. Die Strahlen müssen elektrisch geladen sein, da man sie mit dem Magneten ablenken kann. Man nannte sie,

und hinreichend niedrigem Druck ( $\frac{1}{10}$ –1 Millimeter Quecksilbersäule) beobachtet man in der Röhre eine Leuchterscheinung. Das Gas leuchtet in einer Farbe auf, die von dem verwendeten Gas abhängt. Senkt man den Druck in der Röhre nach und nach bis auf einige hundertstel Millimeter Quecksilbersäule, die Spannung erreicht dabei Werte von etwa 20000 Volt, so ist das Gasleuchten fast vollständig verschwunden; dafür leuchtet aber die Glaswand gegenüber der Katode in einem grünlichen Lichte auf. Man sieht von der Katode einen

weil sie von der Katode ausgingen, Katodenstrahlen. Sie lassen sich auch mit elektrischen Feldern ablenken. Man stellte fest, daß es sich hierbei um kleine, negativ geladene Teilchen handelte, also um frei vorkommende Elektrizität. Wie wir heute wissen, sind es die aus dem Katodenmaterial herausgelösten Elektronen, die auf Grund ihrer gleichartigen Ladung (die Katode ist bekanntlich negativ geladen) von der Katode weggeschleudert werden und auf die gegenüberliegende Wand aufprallen. Dort rufen die aufschlagenden Partikel das Leuchten des Glases hervor.

Um die Jahrhundertwende wurde von Ph. Lenard folgender Versuch gemacht: Er nahm eine Röhre von derselben Art und brachte auf der gegenüberliegenden Seite eine Öffnung in der Wand an, die er mit einer sehr dünnen Aluminiumfolie (etwa 5 tausendstel Millimeter) verschloß. Ließ er nun die Strahlen gerade auf das Fenster fallen, so traten sie durch die Folie hindurch und brachten die Luft in der Umgebung einige Zentimeter weit zum Leuchten (Bild 6). Hält man einen Fluoreszenzschirm vor das Fenster, so leuchtet dieser noch stärker auf. Wir haben hier eine ähnliche Erscheinung wie bei Röntgenstrahlen; die Katodenstrahlen vermögen die Stoffe zu durchdringen. Daß sie auf ihrem Wege eine große Zahl von Teilchen hätten treffen müssen, wird uns leicht klar. Die Folie war ungefähr 5 tausendstel Millimeter stark, auf dieser Länge liegen aber immerhin gut 10000 Atome in Schichten übereinander. Man kann auch nicht gut annehmen, daß die Katodenstrahlen sich vielleicht durch Lücken hindurchgewunden hätten. Daraus mußte man aber den Schluß ziehen, daß die Elektronen die Atome durchquerten, und aus diesem Grunde konnten die Stoffe nicht undurchdringlich sein wie beispielsweise feste Kugeln. Daraus folgte auch noch, daß die Elektronen viel kleiner sein mußten als die Atome. Die Entdeckung der Elektrizitätsatome brachte also gleich noch eine weitere Entdeckung mit sich, nämlich die, daß die Atome nicht vollständig mit Materie ausgefüllt sein

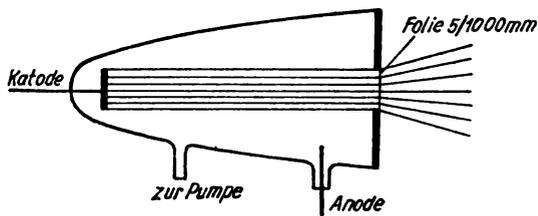


Bild 6

konnten. In den Katodenstrahlen, den sehr schnell fliegenden Elektronen, hatte man damit ein Hilfsmittel zur Untersuchung atomarer Verhältnisse in der Hand. Die Elektronen stellen einen Stoff von ganz besonderer Feinheit dar, man bezeichnet sie häufig als reine, konzentrierte Elektrizität; ihre Ladung ist eine negative Elementarladung. Stets fand man nur negative Elektronen, positive

schien es nicht zu geben. Positive Ladungen fand man immer nur an Teilchen von atomarer Größe gebunden, also an die gewöhnliche Materie. Das legte den Schluß nahe, daß die Elektronen Bausteine der Materie sein könnten. Das positive Gegenstück des Elektrons, das Positron, ist in neuerer Zeit auch noch aufgefunden worden (1932 von Anderson). Es ist äußerst kurzlebig und verschwindet, kaum daß es entstanden ist, schon wieder. Wir werden ihm später beim Bau der Atomkerne noch begegnen, dort spielt es eine Rolle.

### *5. Bau der Atome – Atommodelle*

Die bei den Gasentladungserscheinungen festgestellten Elektrizitätsatome, die Elektronen, hatte man bis zur Entdeckung der Katodenstrahlen noch nie in freiem Zustand beobachten können. Da sie in Erscheinung treten, wenn man sehr starke elektrische Felder anwendet, schloß man, daß sie Bausteine der Atome sein müssen, aus denen sie durch Anwendung großer Kräfte herausgerissen werden. Wir haben festgestellt, daß die Elektronen aus der Katode herauskamen. Das Katodenmaterial bestand aber aus Metallen, die ihrerseits aus Atomen bestehen. Bisher hatte man jedoch an Metallen noch keine freien Elektronen beobachtet, so daß der vorgenannte Schluß sehr naheliegend war. In der Folgezeit wurde versucht, aus diesen Erkenntnissen Nutzen zu ziehen, um Näheres über den Bau der Atome zu erfahren, im besonderen, wie man sich die Anordnung von Elektronen im Atom vorzustellen hatte und woraus dasselbe wohl noch bestand. Nach den Lenardschen Versuchen war ja schon klar, daß das Atom, so grotesk es erschien, zum überwiegenden Teil aus leerem Raum bestehen mußte, wenn man die Durchquerung mit Elektronen sinnvoll erklären wollte.

Der Engländer Rutherford und seine Mitarbeiter begannen daraufhin, an die Erforschung des Atominnern mit Hilfe von  $\alpha$ -Strahlen heranzugehen. Diese Strahlen standen in genügender Menge zur Verfügung; wir werden in einem besonderen Abschnitt näher auf sie eingehen. Die  $\alpha$ -Strahlen bestehen aus kleinen Teilchen von ähnlicher Größe wie die Elektronen, sie werden von den sogenannten radioaktiven Stoffen ausgesandt. Die ausgeschleuderten Teilchen haben zwei positive Elementarladungen, aber eine 7360mal größere Masse als die Elektronen. Auf Grund der viel größeren Masse werden sie beim Zusammenstoß mit einem Elektron so gut wie gar nicht abgelenkt. Verwendet man also die  $\alpha$ -Teilchen zum Beschuß von Atomen, so können sie in merklichem Maße nur von der (trägen) Masse des Atoms abgelenkt werden; vorausgesetzt, daß sie dieser nahe genug kommen. Da der größte Teil der Elektronen unbehindert durch das Atom hindurchgeflogen war, diese Korpuskel (Teilchen) aber einen

sehr kleinen Durchmesser im Vergleich zum Atomdurchmesser besitzen, so mußte, selbst bei Anwesenheit vieler Elektronen im Atom, dessen gesamte Masse an einer Stelle konzentriert sein. Stellt man sich das Atom kugelförmig vor, so mußte fast die gesamte Masse im Zentrum, dem Atomkern, vereinigt sein. Wenn man weiter annahm, daß die Elektronen auch im Atom frei vorkommen, dann mußte der Kern ebensoviel positive Elementarladungen tragen, wie Elektronen vorhanden waren. Diese tragen nachweisbar immer nur eine negative Elementarladung, und da die Atome gewöhnlich elektrisch neutral sind, mußten daher gleich viele positive Ladungen vorhanden sein. Schießt man in ein Atom  $\alpha$ -Teilchen, also Korpuskeln von der Größe der Elektronen, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß dabei ein Elektron getroffen wird, sehr klein, da der größte Teil des Atoms leer ist. Die Wahrscheinlichkeit den Kern zu treffen, ist ebenfalls sehr gering. Die  $\alpha$ -Partikel tragen positive Ladung, und der Kern ist ebenfalls positiv geladen. Bei einer gewissen Annäherung müssen sich die beiden daher abstoßen. In Bild 7 haben wir einen möglichen Annäherungsvorgang des  $\alpha$ -Teilchens an den Kern des Atoms dargestellt, bei dem der Ablenkwinkel  $90^\circ$  beträgt. Dieser ist auch tatsächlich beobachtet worden. Das Teilchen nähert sich bis zu einer gewissen Entfernung zunächst unbeeinflusst, dann werden die abstoßenden Kräfte wirksam, und es biegt allmählich um, bis es schließlich unter demselben Winkel weggeschleudert wird. Diesen Vorgang bezeichnet man als Streuung, was völlig gleichbedeutend mit Ablenkung ist. Rutherford entwickelte seinerzeit eine Streuformel, nach der man aus dem beobachteten Streuwinkel (im Bild als  $\varphi$  bezeichnet) und der bekannten Geschwindigkeit der Korpuskel die

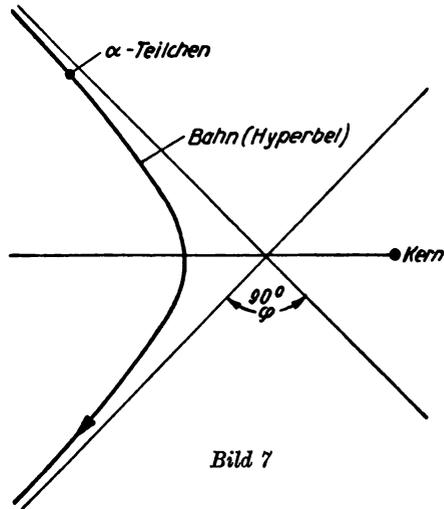


Bild 7

Größe des abstoßenden Kernes ermitteln konnte. Für den genannten Ablenkwinkel von  $90^\circ$  ergab sich ein Kerndurchmesser der Größe  $10^{-12}$  cm (ein billionstel Zentimeter). Hier auf diesem kleinsten Raum ist also praktisch die gesamte Masse des Atoms konzentriert, im übrigen Raum des Atominneren bewegen sich die Elektronen.

Aus der Elektrostatik ist bekannt, daß sich alle geladenen Teilchen mit einem elektrostatischen Feld umgeben, wovon man sich etwa folgende Vorstellung

machen kann: Von einer geladenen Korpuskel (Kugelform) gehen nach allen Richtungen strahlenförmig Kraftlinien aus (Bild 8), und in jedem Punkte des umgebenden Raumes wird auf eine dorthin gebrachte andere Ladung eine ganz

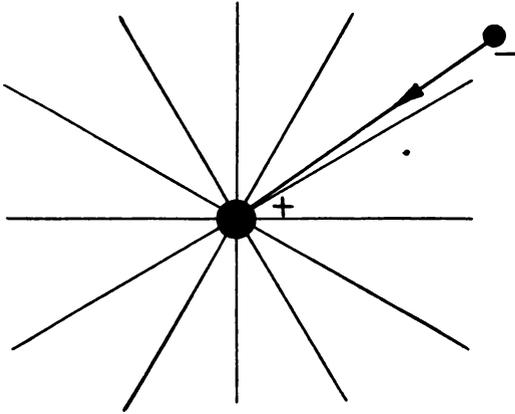


Bild 8

bestimmte Kraft ausgeübt. Der andere Ladungsträger wird je nach dem Vorzeichen seiner Ladung angezogen oder abgestoßen. Die Kraft, mit der das geschieht, ist von der Größe der aufeinander wirkenden Ladungen abhängig. Je größer die Ladungen sind, um so größer sind die Kräfte. Gleichnamige Ladungen (das heißt, beide Korpuskel sind negativ beziehungsweise positiv) stoßen sich ab und ungleichnamige (eine Korpuskel positiv und die andere negativ) ziehen sich an. Es wird verständlich sein, daß die aufeinander ausgeübten Kräfte um so geringer sind, je

weiter die Teilchen voneinander entfernt sind. Die Kräfte nehmen nach einem Gesetz mit der Entfernung ab. Nach dem Coulombschen Gesetz (nach dem französischen Physiker) nehmen die Kräfte mit dem umgekehrten Quadratwert der Entfernung der Partikel ab, also wie  $1/r^2$  ( $r$  = Entfernung). Das bedeutet, daß die Kräfte sehr rasch abnehmen. In der doppelten Entfernung ist die Kraft schon auf den vierten Teil zurückgegangen, in der zehnfachen Entfernung schon auf den hundertsten Teil. Solche Kräfte, die mit der Entfernung quadratisch abnehmen, werden allgemein Coulombkräfte genannt.

Fliegt also ein  $\alpha$ -Teilchen auf einen Kern zu, so wird die abstoßende Kraft mit der Annäherung stark zunehmen. Schreiben wir dem Kern einen Durchmesser von rund  $10^{-12}$  cm zu und geben dem Atom einen Durchmesser von  $10^{-8}$  cm, so würde die abstoßende Kraft vom Eintritt in das Atom bis zum Kern hin auf das Hundertmillionenfache angewachsen sein (siehe Bild 9). Um also mit einem Kern zusammenzustößen, muß die  $\alpha$ -Korpuskel seine sehr große kinetische Energie besitzen, damit sie erfolgreich gegen das Coulombfeld anlaufen kann. Will man die Existenz von freien Elektronen im Atom erklären, so muß man ihnen eine Bewegung zuschreiben, weil sie sonst infolge ihrer negativen Ladung sofort in den Kern hineingezogen würden. Rutherford entwarf daher vom Atom als einem stabilen Gebilde folgende Modellvorstellung: Fast die gesamte Masse des Atoms

ist in seinem Kern konzentriert, und die vorhandenen Elektronen bewegen sich auf Kreisbahnen um den Kern herum. Das war ein Planetensystem im Kleinen, der Kern entsprach der Sonne und die Elektronen den Planeten, die Vorstellung war der Himmelsmechanik entlehnt. Damit das Elektron nicht in den Kern stürzen konnte, mußte es um diesen mit einer solchen Geschwindigkeit laufen, daß die Zentrifugalkraft der elektrostatischen Anziehung des Kernes Gleichgewicht hielt (Bild 10), das heißt Zentrifugalkraft  $Z$  gleich Coulombkraft  $C$ .

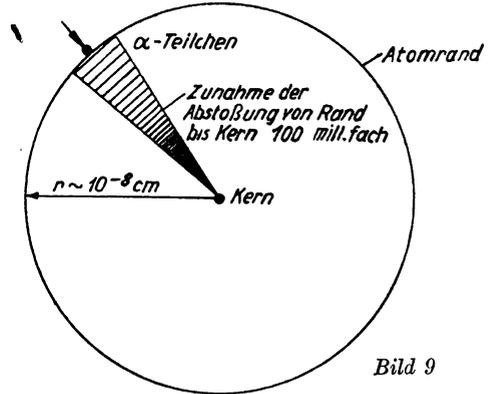


Bild 9

Die Rutherford'schen Versuche, die dann von seinen Mitarbeitern Geiger und Marsden fortgeführt wurden, erlaubten aber auch noch die Bestimmung der Kernladungszahl, das heißt die Zahl der positiven Elementarladungen des Kernes mit Hilfe der Streuformel. Nun kannte man zu der Zeit schon das periodische System der Elemente, das der Russe Mendelejew im Jahre 1869 aufgestellt hatte. Es war damals noch sehr unvollständig, aber die ihm zugrunde liegende Idee war vollkommen richtig. Er ordnete die Elemente nach steigendem Atomgewicht und gliederte sie in gewisse Gruppen, je nach der Ähnlichkeit ihrer chemischen Eigenschaften (siehe Tafel V). In diesem System hat jedes Element eine bestimmte Nummer, je nach dem Platz, den es darin einnimmt. Das leichteste (Wasserstoff) hat die Nummer 1, das schwerste (Uran) die Nummer 92; scherzhaft spricht man von den „Hausnummern“ der Elemente. Man entdeckte, daß die Kernladungszahl übereinstimmend mit der Ordnungszahl, der „Hausnummer“ des betreffenden Elementes im periodischen System war. Das konnte selbstverständlich kein Zufall sein. Die Anzahl der Kernladungen bestimmt also einerseits die Zahl der Elektronen und andererseits die Ordnungszahl des Elementes. Die Ordnungszahl eines Elementes bestimmt aber dessen chemischen Charakter. Mendelejew ordnete sie in Gruppen, und wie man aus der Tafel ersieht, gehören zu einer solchen immer die untereinanderstehenden Elemente. So bilden zum Beispiel die Elemente in der ersten Spalte eine Gruppe

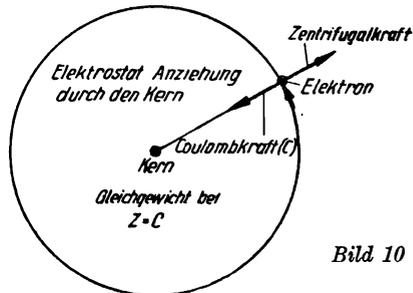


Bild 10

und sind in ihren chemischen Eigenschaften verwandt. Würde das Element 3, Li (Lithium), an einer anderen Stelle stehen, so müßte es mit anderen Elementen verwandt sein und hätte auch andere Eigenschaften. Daraus folgt, daß die Art des Elementes von der Kernladungszahl abhängig ist. Stellen wir also auf Grund von Ablenkungsversuchen die Kernladungszahl 92 fest, so wissen wir auch ohne daß wir eine chemische Analyse durchgeführt haben, daß es sich um Uran handelt. Es sei hier schon vorweggenommen, daß die Zahl der Elektronen, die ja normalerweise gleich der Ordnungszahl ist, im Grunde das chemische Verhalten eines Elementes bestimmt. Sie legt fest, mit welchen Elementen es sich leicht oder auch überhaupt nicht verbindet und mit welchen Elementen es verwandt ist. Nach diesen Darlegungen würde sich für die beiden leichtesten Elemente, Wasserstoff und Helium, folgendes ergeben: Wasserstoff hat die Ordnungszahl 1, es ist das leichteste aller Elemente und steht darum an erster Stelle im System, damit hat es auch die Kernladungszahl 1 und dadurch wiederum bedingt ein Elektron. Helium hat die Ordnungszahl 2, es ist schwerer als Wasserstoff, aber leichter als die übrigen Elemente, deshalb hat es die Kernladungszahl 2 und somit 2 Elektronen (Bild 11a und 11b).

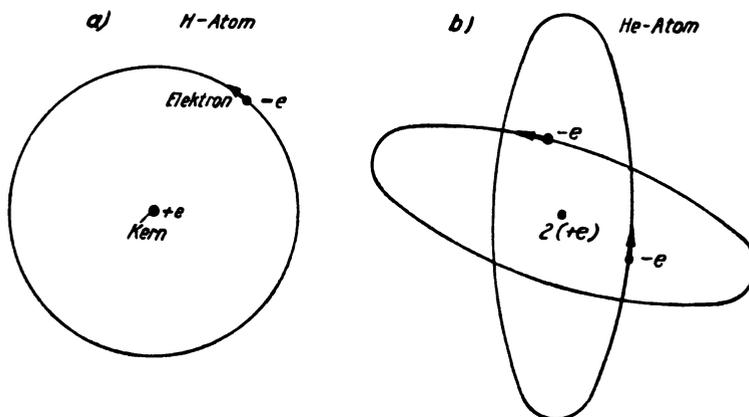


Bild 11

Bisher haben wir mehr geometrische Betrachtungen über den Bau der Atome angestellt, und es ergab sich bis jetzt auch ein recht zufriedenstellendes Bild. Leider befriedigt das Ganze aber nicht mehr, sobald man zu einer energetischen Betrachtung des bisherigen Modells kommt. Man hatte also angenommen, daß sich das Elektron auf einer Kreisbahn um den Kern herum bewegt; besser wäre,

wir würden sagen: im nicht mehr vorstellbaren Tempo um den Kern rast. Es ergeben sich durch Berechnung Umlaufzahlen in der Größenordnung von einigen  $10^{15}$  Umläufen pro Sekunde, das heißt Geschwindigkeiten von, grob gerechnet, 2000 Kilometer pro Sekunde, ein recht beachtliches Tempo, wenn man noch bedenkt, daß dieses Tempo auf einer winzigen Bahn von etwa 60 millionstel Millimeter Länge eingehalten wird. Würde das Elektron um den Erdball rasen müssen, so würde es schon nach 20 Sekunden seinen Ausgangspunkt wieder erreicht haben. Die schnellsten Läufer haben in dieser Zeit gerade knapp 200 Meter zurückgelegt. Selbst die schnellsten Flugzeuge, die heute durch die Luft rasen, legen in einer Sekunde „nur“ 400 Meter zurück. Ein Elektron, das mit dieser Geschwindigkeit um den Kern rast, müßte aber nach den Gesetzen der Elektrodynamik eine elektrische Welle ausstrahlen. Das Abstrahlen einer Welle bedeutet aber die Abgabe von Energie. Ein Teil der Bewegungsenergie müßte dabei in Wellenenergie umgewandelt werden, was eine Verminderung der Umlaufgeschwindigkeit zur Folge hätte, womit die Zentrifugalkraft abnehmen würde. Die elektrostatische Anziehung würde schließlich überwiegen und das Elektron Bruchteile von Sekunden später schon im Kern zu finden sein.

Wir wollen noch eine weitere Schwierigkeit kennenlernen, die mit dem Rutherford'schen Modell verbunden ist. Das Wasserstoffatom stellt ein System aus zwei Massenpunkten dar, das sich in Bewegung befindet. Die Art seiner Bewegung im Molekül und mit dem Molekül wollen wir jetzt einmal außer acht lassen. Das bedeutet, daß wir den Kern als in Ruhe befindlich ansehen, jedenfalls hinsichtlich seiner räumlichen Fortbewegung. Dann hat dieses System einen gewissen Energievorrat, der sich aus kinetischer und potentieller Energie zusammensetzt. Würde diesem System von außen Energie zugeführt werden, wobei wir uns im Augenblick keine Gedanken machen, wie das geschieht, so würde sich die Bewegungsenergie des Elektrons zunächst erhöhen. Das Elektron würde durch die aufgenommene Energie schneller um den Kern kreisen und damit würde seine Zentrifugalkraft vergrößert werden. Um wieder in einen Gleichgewichtszustand mit der elektrostatischen Anziehung des Kerns zu kommen, müßte sich das Elektron weiter nach außen entfernen, mit anderen Worten, sein Bahnradius würde sich vergrößern. Die Energieaufnahme wollen wir Absorption nennen. Nun kann aber auch umgekehrt das System Energie abgeben, was eine Verkleinerung des Bahnradius zur Folge hat. Die abgegebene Energie wird in Form von Wellenenergie abgestrahlt, und die abgestrahlte Welle kann man als Licht beobachten. In Bild 12 haben wir einen solchen Vorgang schematisch dargestellt, wobei die Wellenlinie das ausgesandte Licht andeuten soll. Den Vorgang der Energieabgabe durch Abstrahlen einer Lichtwelle wollen wir Emission nennen.

Nun ist jedoch das, was wir im Alltag mit Licht bezeichnen, durchaus kein einheitliches Ganzes. Das sogenannte weiße Licht setzt sich, wie viele sicher schon

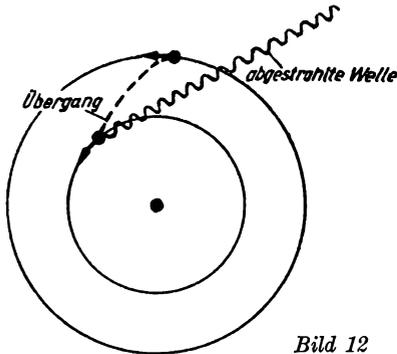


Bild 12

wissen, aus verschiedenen Farben zusammen. Nach dem Engländer Newton, dem Begründer der Himmelsmechanik, kann man weißes Licht in sieben Grundfarben zerlegen: rot, orange, gelb, grün, blau, indigo und violett. Da das Licht eine elektromagnetische Welle ist, kommt den einzelnen Farben eine ganz bestimmte sogenannte Wellenlänge zu, und weißes Licht entsteht durch Mischung der genannten sieben Grundfarben. Unser Auge vermag das Tages-

licht nicht in die Grundfarben zu zerlegen. Das ist aber mit einem Glasprisma möglich, und man kann dann im „Spektrum“ (vom lat. spektrare = zerlegen) diese Farben alle tatsächlich sehen (Bild 13). Jede Welle hat eine genau bestimmte Wellenlänge, die man mit besonderen Apparaten messen kann. Jede Lichtfarbe stellt für sich genommen schon eine Lichtwelle dar, man nennt sie monochromatische Lichtwelle, das heißt Welle von einer Farbe, und die verschiedenen „Farbwellen“ geben, übereinandergelagert, wieder weißes Licht.

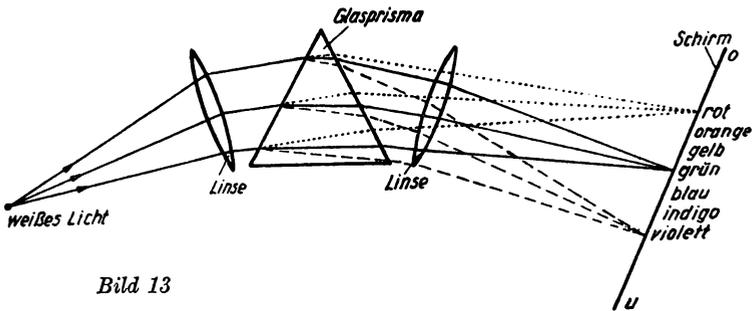


Bild 13

Man kann daher die einzelnen Lichtfarben ganz einfach dadurch charakterisieren und festlegen, daß man ihre Wellenlänge angibt. Das heißt, wenn ich die Wellenlänge einer beliebigen Lichtwelle bestimme, so kann ich danach sagen, was für eine Farbe das Licht hat, ohne es gesehen zu haben. Die einzelnen Farben lassen sich allerdings nicht scharf voneinander trennen, man kann nicht sagen, rotes Licht hat die und die Wellenlänge und grünes jene, sondern die Wellenlängen verteilen sich von rot bis violett ohne scharfe Übergänge, und jede



Bild 14

Farbe hat auch eine gewisse „Breite“ (Bild 14). Es gibt also verschiedenes Rot und Grün oder Blau. Innerhalb jeder Farbe gibt es Unterschiede, es gibt verschiedene Farbtönungen, wie man sagt. Das bedeutet schließlich wieder, daß die diesen Unterschieden entsprechenden Wellenlängen stetig und ohne Sprung „nebeneinanderliegen“, etwa so, wie sämtliche Zahlen nebeneinanderliegen. Würde es nur die Wellenlängen 1, 2, 3, 4 usw. geben und nicht die dazwischenliegenden, wie etwa 1,11, 2,45 oder 3,51, so wäre die Verteilung der Wellenlängen unstetig oder sprunghaft; dies wird aber im Spektrum nicht beobachtet. Die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes liegen alle zwischen  $\frac{36}{100\,000}$  mm (violette Grenze, kurzwellig) und  $\frac{78}{100\,000}$  mm (rote Grenze, langwellig), siehe Bild 15. Sie sind also sehr klein, aber wir wollen nochmals nachdrücklich darauf hinweisen, daß zwischen diesen beiden Begrenzungen alle Wellenlängen möglich sind, das heißt alle zwischen 36 und 78 möglichen Zahlen, und das sind unendlich viele. Jede Farbtönung hat eine bestimmte Wellenlänge aus diesem Bereich.

$\lambda$  Wellenlängen des sichtbaren Lichtes in hunderttausendstel mm

rot	orange	gelb	grün	blau	indigo	violett
77 bis 60		60-57	57-49	49 bis 43		43-39

Bild 15

Man beobachtete aber bei den früher erwähnten Gasentladungen, daß die leuchtenden Gase nur Licht ganz bestimmter Wellenlängen aussandten, die dazwischenliegenden Wellen wurden nicht beobachtet. Diese für jede Atomsorte ganz charakteristischen Wellenlängen gestatteten ohne weiteres, die Atomsorte und damit die chemischen Elemente zu bestimmen. Da aber die einzelnen Atomarten nur immer ganz bestimmte Wellenlängen aussandten, die dazwischenliegenden jedoch nie, so gab es schließlich nur eine Erklärung dafür: Die

Elektronen konnten im Atom nicht in jeder beliebigen Bahnentfernung um den Kern kreisen. Wir wollen uns das genauer überlegen.

Das Elektron befinde sich in einer Entfernung 10 vom Kern; 10 soll eine in irgendeinem Maß gemessene Größe sein, die wir hier ganz willkürlich annehmen. Geht nun das Elektron von der Bahn mit der Entfernung 10 auf die weiter innen liegende Bahn mit der Entfernung 9 über, so wird dabei eine gewisse Energiemenge frei, die in Form einer Lichtwelle von ganz bestimmter Wellenlänge abgestrahlt wird. Beobachten wir nun zwar nicht dauernd gerade dasselbe Atom (das ist praktisch auch gar nicht möglich), sondern dieselbe Atomart und notieren immer wieder nur Wellenlängen, die der Energie des Elektrons beim Übergang von Bahn 10 nach Bahn 9 entsprechen und niemals eine Länge, die einer Bahn, sagen wir, von 9,8 oder 9,65 entspricht, so legt das den Schluß nahe, daß sich das Elektron eben nie auf dazwischenliegenden Bahnen befindet. Dann muß es aber diese Zwischenbahnen überspringen. Warum es dies tut, bleibt ungeklärt. Die Beobachtungstatsachen, daß das Elektron stets nur ganz bestimmte Wellenlängen aussandte und niemals solche, die dazwischenliegenden Bahnen entsprachen, konnte aber mit dem Rutherford'schen Atommodell und überhaupt mit der klassischen Physik, die immer nur stetige Übergänge gewisser Erscheinungen kennt, nicht mehr erklärt werden. In der Physik oder in der Natur geht es immer ohne Sprünge zu, so forderte man bis dahin in der Physik und jeglicher Naturwissenschaft.

Um aus diesem Dilemma herauszukommen, führte der Däne N. Bohr im Jahre 1913 zwei Postulate ein, die in der Lage waren, die Lichtemission der Atome zu deuten. Die eine Schwierigkeit im Atommodell von Rutherford entsteht dadurch, wir haben das schon angeführt, daß ein um einen Kern umlaufendes Elektron eine Antenne darstellt, die gemäß den Gesetzen der Elektrodynamik elektromagnetische Wellen aussendet, zu denen auch die Lichtwellen zählen. Die mit diesem Energieverlust verbundene Verringerung der kinetischen Energie würde das Elektron also zwangsläufig in den Kern stürzen lassen. Zur Beseitigung dieser ersten Schwierigkeit führte Bohr folgende Forderung ein: Für jedes Atom gibt es gewisse Zustände, das heißt gewisse Elektronenbahnen, in denen es nicht strahlt, und wenn sich seine Energie ändert, dann geht also das Elektron von einer solchen Bahn auf eine andere über, auf der es wiederum, ohne Strahlung auszusenden, um den Kern läuft. Man nennt die Bahnen, auf denen sich das Elektron bewegen darf, ohne Strahlung auszusenden, „stationäre Bahnen“. Man sagt, wenn sich ein Elektron auf einer dieser Bahnen bewegt, das Atom befinde sich in einem „stationären Zustand“. Gemeint ist eben damit, daß das sich auf diesen Bahnen bewegende Elektron keine Strahlung aussendet und seinen Zustand zeitlich nicht ändert. Daher die Bezeichnung stationär, das heißt ohne zeitliche Änderung; räumlich ändert es seinen Zustand infolge seiner Fortbewegung dauernd. Diese Forderung besagt also, daß ein Elektron ohne

Energieverlust im Atom kreisen kann. Sie drückt aber weiterhin aus, daß die Elektronenbahnen nicht stetig aufeinanderfolgen, sondern in gewissen Abständen. Daraus folgt, daß die ausgestrahlten Wellen nur ganz bestimmte Wellenlängen haben können, die dem jeweiligen Übergang des Elektrons von einer stationären Bahn auf eine andere stationäre Bahn und der dadurch frei werdenden Energie entsprechen. Wie groß nun diese Energieunterschiede im einzelnen waren, mußte noch geklärt werden.

Wird einem Atom, das sich in einem stationären Zustand befindet, eine gewisse Energiemenge durch Einstrahlung einer Welle zugeführt, so begibt sich das Elektron auf eine weiter außen liegende Bahn, man sagt, es wird in einen höheren Zustand „gehoben“. Es folgt daraus aber auch, daß ein Atom nur Energie in bestimmten Mengen (Quanten) aufnehmen kann. Um das Elektron von einer stationären Bahn in die nächsthöhere zu heben, ist eine ganz bestimmte Energie erforderlich; wird ihm ein etwas größerer oder kleinerer Betrag zugeführt, so treten keine Änderungen ein.

Zur Erklärung dieser Beobachtungstatsachen, und in Übereinstimmung mit ihnen, führte Bohr daher noch eine zweite Forderung ein: Die Energieabgabe oder die Energieaufnahme des Atoms erfolgt immer nur in ganz bestimmten Beträgen. Will man das Atom vom Grundzustand, der innersten Elektronenbahn, in einen angeregten Zustand mit höherer Energie, eine weiter außen liegende Elektronenbahn, bringen, so braucht man dazu, je nach der Nummer der Bahn eine entsprechend große Energiemenge. Man sagt daher, die Energieaufnahme oder Energieabgabe erfolge in gequantelten Beträgen, in Energiequanten (von Quantum = Menge). Geht ein Elektron von einer stationären Bahn auf eine andere über, so ist dies mit der Abgabe eines Energiequants verbunden. Zur weiteren Klärung der Dinge müssen wir noch einige neue Begriffe anführen.

Wir haben schon früher dargestellt, daß es vielerlei Formen von Energie gibt und daß man die einzelnen Arten ineinander umwandeln kann. Wir haben gleichfalls bemerkt, daß dies nicht uneingeschränkt möglich ist. An mechanischen Energieformen haben wir die kinetische und die potentielle Energie genannt. Die kinetische Energie ist die Energie der Bewegung eines Teilchens. Da es drei Arten der Bewegung gibt, die Drehung (Rotation), die Verschiebung (Translation) und die Schwingung (Oszillation), unterscheidet man entsprechend auch drei kinetische Energiearten. Sie sind infolge ihrer Erklärung stets mit der Bewegung von Teilchen gekoppelt. Alle übrigen Arten von Energie sind nicht an die Bewegung der Partikel gebunden, obwohl sie natürlich im Zusammenhang damit auftreten können. Die Umwandlungsfähigkeit der Energieformen ist gleichbedeutend mit ihrer Übertragbarkeit.

Nun wollen wir aber noch eine Größe betrachten, durch die man den Transport von Materie mißt, also in Bewegung befindliche Materie erfaßt. Diese Größe ist der Impuls, in der älteren Literatur zutreffender

Bewegungsgröße genannt; er ist das Produkt aus Masse mal Geschwindigkeit einer Partikel ( $I = mv$ ). Ein Produkt ist bekanntlich gleich Null, wenn einer seiner Faktoren gleich Null ist. Befindet sich eine Masse in Ruhe, dann ist der Impuls gleich Null, weil die Geschwindigkeit gleich Null ist. Eine Aussage über den Impuls eines Systems ist immer gleichbedeutend mit der Charakterisierung des Bewegungszustandes dieses Systems. Kenne ich nur die Größe oder den Wert des Impulses, so kann ich damit jedoch noch keine Aussage über die Geschwindigkeit machen, wenn ich die Masse nicht kenne. Das hat seinen einfachen Grund darin, daß man einem Produkt, also einer Zahl, nicht ansehen kann, aus welchen Faktoren es besteht, auch wenn die Zahl der Faktoren auf zwei beschränkt ist. Da die kinetische Energie immer an die Bewegung von Teilchen gebunden ist, so ist zu erwarten, daß der Impuls, als Charakterisierung eines Bewegungszustandes, sich durch diese Energie ausdrücken läßt und umgekehrt. Der Zusammenhang ist auch sehr einfach, manche werden ihn schon kennen. Die kinetische Energie ist das Produkt aus der halben Masse mal dem Quadrat der Geschwindigkeit. ( $E_{\text{kin}} = m/2 \cdot v^2$ ). Daraus ist ebenfalls zu ersehen, daß die kinetische Energie dann Null ist, wenn die Geschwindigkeit diesen Betrag annimmt (logischerweise, sie ist ja Energie der Bewegung). Darin stimmt sie mit dem Impuls überein. Doch ist dieser einfacher gebaut, und der Zusammenhang ist folgender:

$$I = 2E_{\text{kin}}/v, \text{ oder } E_{\text{kin}} = I/2 \cdot v.$$

Wir brauchen noch den Begriff der Frequenz. Diesen wollen wir uns am einfachsten am Umlauf des Elektrons klarmachen. Auf irgendeiner stationären Bahn umläuft das Elektron den Kern; das geht aber sehr rasch, in einer Sekunde etwa tausend Billionen mal. Der Umlauf ist also ein sich ständig wiederholender Vorgang, und für solche sich in gewissen Zeiten beständig wiederholende Vorgänge führt man ein Charakteristikum ein, das heißt einen für den betreffenden Vorgang eigentümlichen Begriff. Die Eigentümlichkeit besteht hier darin, daß der Umlaufvorgang sich im Zeitraum einer Sekunde soundso oft wiederholt. Die Anzahl der sich in einer Sekunde wiederholenden Erscheinungen nennt man die Frequenz des Vorganges. Man kann das kurz etwa so ausdrücken: Frequenz gleich Anzahl der Wiederholungen in einer Sekunde.

Als nächstes wollen wir uns mit dem Wellenbegriff bekannt machen. In der Physik gibt es dafür auch eine mathematische Definition. Eine Welle ist ein Vorgang, der die Eigenschaft der Periodizität (Wiederholungseigenschaft) besitzt und sich den Punkten eines Raumes mitteilt, jedoch in zum Teil unterschiedlichen Zeiten. Darin steckt alles, was wir jetzt brauchen. Wenn es also ein Vorgang ist, der sich ständig wiederholt, der periodisch ist, so kommt ihm eine Frequenz zu. Da er sich den Punkten des Raumes zu verschiedenen Zeiten mitteilen soll, muß dieser Vorgang eine gewisse Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzen und, falls er alle Punkte des Raumes erreicht, bis ins Unendliche fort-

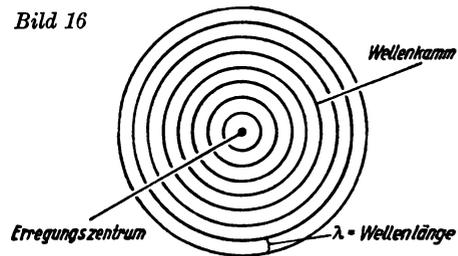
laufen. Ein Vorgang, der sich mit endlicher Geschwindigkeit im Raume ausbreitet (die endliche Geschwindigkeit folgt daraus, daß alle Punkte zu verschiedenen Zeiten erreicht werden, was bei einer unendlichen Geschwindigkeit nicht der Fall wäre) und dessen Eigenschaften sich in bestimmten Zeitabständen beständig wiederholen, ein Vorgang also, der eine gewisse Frequenz hat, dem kommt schließlich auch noch eine ganz bestimmte Wellenlänge zu. Diese läßt sich sehr einfach erklären: Sie ist der Abstand zweier Punkte des Raumes, in denen der Ausbreitungsvorgang gewisse gleiche Wirkungen hervorruft. Wir wollen nun ein Beispiel anführen, damit die Dinge nicht zu abstrakt bleiben.

Wenn man einen Stein in ein ruhendes Gewässer wirft, so beobachtet man, wie sich von der Einschlagstelle eine kreisförmige Oberflächenwelle mit einer bestimmten Geschwindigkeit nach allen Seiten hin ausbreitet. Dabei wird im allgemeinen nach einer gewissen Laufzeit jede Stelle des Sees von der Welle erreicht. Jede Welle führt eine gewisse Energie mit sich, was man in diesem Falle daran erkennt, daß kleinere Korkstückchen bis zur Wellenkammhöhe angehoben oder in der Nähe des Ufers befindliche Stückchen an den Rand geworfen werden. Man nennt das, was wir mit einem Steinwurf erzeugt haben, einen Wellenzug. Nimmt man eine längere Stange, taucht sie leicht mit der Spitze ein und bewegt sie gleichzeitig ein wenig hin und her, so erscheinen die hintereinander laufenden Wellenzüge (Bild 16). Den Abstand zwischen den einzelnen

Zügen kann man verändern, je nach dem Rhythmus, in dem man die Stange bewegt. Hier haben wir die typischen uns interessierenden Wellencharakteristiken alle beisammen. Die Frequenz ist gleich der Zahl der in einer Sekunde entstehenden Wellen oder der Zahl der Stockbewegungen in einer Sekunde. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist klar, auf sie haben wir keinen Einfluß. Die Wellenlänge ist der Abstand von Wellenkamm zu Wellenkamm. Bewegen wir unseren

Stock schneller, erhöhen wir also die Frequenz, dann folgen die Wellen rascher aufeinander und ihr Abstand verkleinert sich, das heißt, die Wellenlänge wird geringer. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit bleibt aber immer die gleiche. Man kann das etwa so ausdrücken: In demselben Maße, wie die Frequenz zunimmt, nimmt die Wellenlänge ab, das Produkt jedoch von Wellenlänge  $\lambda$  und Frequenz  $\nu$  bleibt immer konstant. Diese Konstante ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen  $c$ . Die entsprechende Formel lautet also:  $c = \lambda \cdot \nu$ . Wellen, die in verschiedenen Medien laufen, haben auch eine verschiedene Fortpflanzungs-

Bild 16



geschwindigkeit, das heißt, konstant ist jene immer nur für ein einheitliches oder, wie man sagt, homogenes Medium. So ist beispielsweise die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in Gasen, Flüssigkeiten oder festen Stoffen sehr unterschiedlich, sie beträgt bei einer Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$  in Luft  $331,6\text{ m/sec}$ , in Wasser  $1485\text{ m/sec}$  und in Eisen  $5100\text{ m/sec}$ . Es gibt auch Stoffe, in denen sich solche Wellen nicht mit gleicher Geschwindigkeit nach allen Richtungen hinausbreiten, dies ist vor allem bei den Kristallen der Fall. Die Wellengeschwindigkeit ist dann richtungsabhängig, das betreffende Medium nennt man anisotrop. Schließlich ist auch noch der Fall möglich, daß die Geschwindigkeit nicht nur in jeder Richtung verschieden ist, sondern auch in einer ganz bestimmten Richtung nicht die gleiche ist, daß sie sich also von Raumpunkt zu Raumpunkt ändert. Dies wird bei den inhomogenen Stoffen eintreten, die eine ungleichförmige Zusammensetzung zeigen.

Elektromagnetische Wellen pflanzen sich im Vakuum mit einer Geschwindigkeit von fast  $300000\text{ Kilometern}$  in der Sekunde fort, genau mit  $299790 \pm 6\text{ km/sec}$ . Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Luft ist, strenggenommen, hiervon verschieden, doch weicht der Wert im Rahmen der meßtechnischen Genauigkeit so wenig vom Vakuumwert ab, daß man stets mit diesem rechnet. Der Luftwert ist, genaugenommen, auch keine Konstante, sondern hängt vom jeweils herrschenden Druck und von der Temperatur ab, so daß allein die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Vakuum eine Konstante, eine sogenannte Fundamentalkonstante, ist, die man mit  $c_L$  bezeichnet. Der Index  $L$  bezieht sich auf Licht, da ja die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtwellen mit der elektromagnetischer Wellen übereinstimmt, was ein Ausdruck für die Wesensgleichheit beider ist.

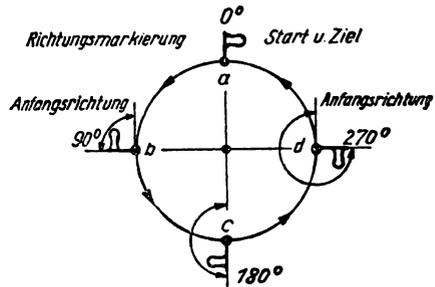
Kehren wir zum Atom zurück. Das Wasserstoffatom hat ein Elektron, das verschiedene stationäre Bahnen durchlaufen kann, je nach dem Energiezustand, in welchem sich das Atom gerade befindet. Bei der formelmäßigen Festlegung der vom Elektron besetzbaren stationären Bahnen müssen wir natürlich mit den Beobachtungstatsachen in Übereinstimmung bleiben, das heißt, unsere Formel muß den beobachteten Frequenzen oder Wellenlängen gewisse Bahnen zuordnen, die durch den Abstand vom Kern gekennzeichnet sind. Die in einer Gasentladungsröhre zum Leuchten gebrachten Atome von Wasserstoffgas senden nur ganz bestimmte Wellenlängen oder, wie wir jetzt auch sagen können, ganz bestimmte Frequenzen aus. Kennen wir die Wellenlänge, so kennen wir auch die zugehörige Frequenz bei Anwendung der zuvor angegebenen Formel. Ist der Wert eines Produktes und eines Faktors bekannt, so folgt daraus die Kenntnis des anderen Faktors, in unserem Falle also  $c/\lambda = \nu$  oder auch  $c/\nu = \lambda$ . Jede Welle führt auch einen bestimmten Energiebetrag mit sich, der von der Frequenz oder der Wellenlänge abhängig ist, und so ordnet schließlich eine gemessene Frequenz den Elektronen gewisse Bahnen zu, zwischen denen sie übergehen können,

und gleichfalls damit ist die Energiedifferenz zwischen den Bahnen bestimmt. Dies bedeutet aber auch, daß die kinetische Energie der Elektronen auf den einzelnen Bahnen festliegt. Nach der von Bohr angegebenen Regel bewegen sich die Elektronen auf Bahnen, auf denen ihr Drehimpuls ein ganzzahliges Vielfaches einer gewissen Naturkonstante ist. Diese Größe  $\hbar$ , das sogenannte Plancksche Wirkungsquantum, spielt eine ganz fundamentale Rolle in der modernen Physik, sie ist schließlich überhaupt der Anlaß zu dieser gewesen.

Der Drehimpuls entsteht ganz einfach dadurch, daß sich das Elektron beim Umlauf um sich selbst dreht. Man denke an einen Läufer, der auf einer Stadionbahn läuft. Bei einem vollständigen Umlauf hat er sich einmal um sich selbst gedreht, auf gegenüberliegenden Punkten der Bahn ist die Drehung gerade um  $180^\circ$  verschieden, für einen vollständigen Umlauf beträgt die Gesamtdrehung dann  $360^\circ$  (Bild 17). Da sich die Bewegung des Elektrons auf einer geschlossenen Bahn vollzieht, auf der es einen bestimmten

Impuls besitzt, das heißt also eine bestimmte Geschwindigkeit, und sich gleichzeitig dabei auch dreht, nennt man den Impuls eben Drehimpuls. Er muß stets ein ganzzahliges Vielfaches des Planckschen Wirkungsquantums sein. Der Bahndrehimpuls bestimmt also eindeutig die Geschwindigkeit der Korpuskel, denn aus dessen gegebenem Wert folgt bei bekannter Masse immer die Geschwindigkeit ( $I = mv$ ;  $v = I/m$ ), diese legt wieder die Zentrifugalkraft eindeutig fest, und somit ist die Bahn bestimmt, auf der sich die beiden Kräfte, die Zentrifugalkraft

und die Anziehung, das Gleichgewicht halten. Der Drehimpuls legt also die Elektronenbahnen fest und dadurch gleichzeitig die Energiedifferenzen zwischen diesen Bahnen, das heißt, die Frequenz der abgestrahlten Welle ist somit gleichfalls bestimmt. In der Praxis ist die Reihenfolge umgekehrt. Die Frequenz wird gemessen und daraus auf die Bahnen geschlossen, zwischen denen das Elektron gewechselt hat. So werden die Beobachtungstatsachen zur Konstruktion des Modelles vom Atom verwendet. Man spricht von Bahnen, obgleich man noch nie eine hat unmittelbar feststellen können, man spricht vom Umlauf um den Kern und hat trotzdem noch nie einen solchen festgestellt oder gesehen. Wir deuten uns also die Beobachtungen auf unsere Weise. Wenn der Impuls stets ein ganzzahliges Vielfaches von  $\hbar$  ist, zum Beispiel ein Dreifaches, Vierfaches oder Fünffaches ( $I = n \cdot \hbar$ ,  $n = 1, 2, 3, 4$  usw.), so ist der Abstand von einer Bahn zur nächsten durch den Drehimpuls



Drehung in a -  $0^\circ, 360^\circ$     b -  $90^\circ$   
                   c -  $180^\circ$             d -  $270^\circ$

Bild 17

eindeutig bestimmt. Die Zahl  $n$  legt die Bahnnummer fest, und man nennt sie daher die Bahnquantenzahl oder die Hauptquantenzahl. Ändert sich der Drehimpuls durch Energieabgabe zum Beispiel um  $3\hbar$ , so hat das Elektron drei Bahnen übersprungen, es ist von einer weiter außen liegenden Bahn drei Bahnen tiefer gegangen. Wir müssen hier gleich noch bemerken, daß ein Elektron nicht sofort von einer Außenbahn bei Ausstrahlung auf die innerste Bahn (in den Grundzustand) zurückkehren muß, es kann auch erst auf eine dazwischenliegende Bahn kommen und später schließlich in den Grundzustand zurückkehren.

Max Planck hatte im Jahre 1900 aus anderen Überlegungen herausgefunden, daß in gewissen Systemen aus vielen kleinen Teilchen die einzelnen Partikel immer nur Strahlungsenergie in bestimmten kleinen Beträgen aufnehmen oder abgeben können, daß aber dieser Betrag nicht mehr unterteilbar ist, etwa so, wie man früher immer annahm, daß die Atome die letzten nicht mehr weiter unterteilbaren Teilchen der Materie sind. Diese kleinsten Energiebeträge haben die Größe  $E = h \cdot \nu$ . Dabei ist  $h$  die Plancksche Konstante und  $\nu$  die Frequenz oder Schwingungszahl der eingestrahnten oder abgestrahlten Welle. Die Energie nimmt also zu, wenn die Frequenz größer wird, und umgekehrt. Die Größe  $E$  ist damit ein Maß für die zugeführte oder abgeführte Strahlungsenergie eines Systems. Kurzwelliges Licht hat somit eine größere Energie als langwelliges, weil kurzwelliges Licht ein größeres  $\nu$  hat, was aus der Beziehung zwischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge  $c = \lambda \cdot \nu$  folgt. Vergrößert sich  $\nu$ , wird  $\lambda$  kleiner und umgekehrt; lange Wellen schwingen langsamer und kurze schneller, so kann man sich das leicht merken.

Geht ein System, im besonderen also ein Atom, von einem Zustand höherer Energie in einen Zustand geringerer Energie über, so entspricht dieser Energiedifferenz eine Wellenenergie von  $E_m - E_n = h \cdot \nu$ . Wir haben zu wiederholten Malen erklärt, daß sich die einzelnen Energiearten ineinander umwandeln, und hier haben wir wieder ein Beispiel dafür. Die innere Energie des Atoms wandelt sich in Strahlungs- oder Wellenenergie um. Unsere eben angegebene Gleichung bedeutet also folgendes: Das System geht von einem Energiezustand mit der Quantenzahl  $m$  (erster Index) in einen Energiezustand mit der Quantenzahl  $n$  (zweiter Index) über, unter Aussendung einer Lichtwelle der Energie  $h\nu$  oder, anders gesagt, unter Aussendung der Wellenfrequenz  $\nu$ . Dies sind also einfache energetische Aussagen über ein System.

Wir deuteten bereits an, daß Sonnenlicht, welches durch ein Glasprisma fällt, in seine Grundfarben zerlegt wird. Die entstehende Farbskala bezeichnet man als Spektrum. Es ist zusammenhängend oder stetig oder, wie man mit völlig gleicher Bedeutung sagt, es ist kontinuierlich; alle Wellenlängen sind vertreten. In diesem Spektrum fehlt keine Wellenlänge, denn das würde sich durch eine Unterbrechung der Farben bemerkbar machen, durch einen dunklen Strich von mehr

oder weniger großer Breite. In Umkehrung des Sachverhaltes heißt das also: Das weiße Licht besteht aus unendlich vielen Wellen unterschiedlicher Wellenlängen, die sich übereinander gelagert haben und im Endeffekt gerade solches Licht ergeben, wie wir es alltäglich sehen. Will man aus diesem Spektrum nur einige Wellenlängen herausziehen, dann müssen die übrigen weggefiltert werden. Das geschieht, wie angedeutet, durch Filter. Das sind Vorrichtungen, die nur bestimmte Wellenlängen durchlassen und die übrigen sperren. Wie wirkt sich dies nun auf das Spektrum aus? Das Spektrum besteht jetzt nur aus einer mehr oder weniger großen Zahl dünner, schwacher Linien, dem Abbild der betreffenden Wellenlängen, mit ungleichmäßigem Abstand. Diese Art von Spektrum bezeichnet man zutreffend als Linienspektrum. Den Begriff des Linienspektrums brauchen wir jetzt bei der Erklärung der Atomspektren. Füllen wir einmal in eine Gasentladungsröhre Wasserstoffgas ein, evakuieren das Gefäß mit der Vakuumpumpe und legen eine hohe Gleichspannung an, so erhalten wir im Gefäß eine Leuchterscheinung: Das Gas leuchtet, es sendet Licht aus. Die Lichtausendung (Emission) ist aber ein Vorgang, den wir nun bereits deuten können. Die Atome befinden sich in diesem Gas in einem angeregten Zustand, das heißt, die Elektronen befinden sich auf Außenbahnen und gehen unter Aussendung von Strahlung auf weiter innen liegende Bahnen herunter. Beobachtet man mit einem Spektralapparat das ausgesandte Licht, so stellt man im Spektrum nur einige Linien fest; es handelt sich also nicht um ein kontinuierliches, sondern um ein Linienspektrum. Die einzelnen Wellenlängen kann man bestimmen, und man ordnet sie in einem Schema an (Bild 18). Für die ausgesandten Energiebeträge hat man

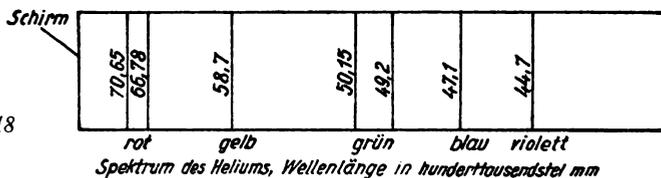


Bild 18

Spektrum des Heliums, Wellenlänge in hunderttausendstel mm

ein ähnliches Schema; man zeichnet hierin die verschiedenen Energiestufen ein, denen die einzelnen Übergänge der Elektronen entsprechen. Dazu wäre aber noch zu bemerken, daß man aus einer einfachen Rechnung für den Gleichgewichtszustand zwischen Zentrifugalkraft und elektrostatischer Anziehung durch den Kern den Radius der Elektronenbahn bestimmen kann und sich dieser in Abhängigkeit von der Quantenzahl  $n$  ergibt. Natürlich hängt der Radius auch noch von anderen Größen ab, wie der Masse des Elektrons, seiner Ladung und von  $h$ , aber von der Zahl  $n$  ist er quadratisch abhängig, derart, daß sich der Bahnradius

vervierfacht, wenn sich die Quantenzahl verdoppelt (also  $r$  proportional  $n^2$ ). Bei der Berechnung der Energie erscheint  $n^2$  im Nenner, das heißt, mit zunehmender Quantenzahl wird die Energie immer kleiner, und zwar nimmt sie sehr rasch in demselben Sinne wie die Coulombkräfte ab. Die ausgestrahlte Energie berechnet sich immer als die Differenz zweier Energiezustände.

Im Bild 19 sind die Energien als Niveauschema aufgetragen. Hier entspricht die unterste Niveaulinie, durch den eV-Wert Null gekennzeichnet (über den Begriff eV siehe Seite 43), der innersten Elektronenbahn im Wasserstoffatom, die nächste Linie liegt bei einem eV-Wert von etwas mehr als 10 und entspricht der Elektronenbahn  $n = 2$ , die darauffolgende Niveaulinie dem Wert  $n = 3$  usw. Die Übergänge von einer Bahn auf eine andere sind durch Pfeile angedeutet, die den bisher beobachteten Übergängen entsprechen. Man ersieht daraus, daß nicht alle denkbaren Übergänge auch tatsächlich beobachtet werden; so ist der Übergang von  $n = 4$  auf  $n = 1$  nicht beobachtet worden, obwohl er vom unvoreingenommenen Standpunkt aus denkbar wäre. Die Übergänge, die auf demselben Grundniveau enden, nennt man eine Serie; so bilden die Übergänge von  $n = 4, 3, 2$  auf  $n = 1$  eine Serie (man nennt sie nach ihrem Entdecker Lyman-Serie), in unserem Bild sind sie durch die Pfeile 1, 2, 3 markiert. Die auf  $n = 2$  endenden Übergänge bilden gleichfalls eine Serie, im Bild durch die Pfeile 4, 5, 6 und 7 markiert; hierbei handelt es sich um die am längsten bekannte und von Balmer erstmals beobachtete Serie, die im sichtbaren Bereich liegt. Die vorgenannte Lyman-Serie liegt im ultravioletten Spektralbereich und kann daher im Spektralapparat nicht ohne weiteres beobachtet werden. Aus dem Bild ist gleichfalls noch zu ersehen, daß der Übergang von  $n = 4$  auf  $n = 1$  der energiereichste ist; ihm entspricht etwa eine ausgesandte Energie von 12,5 Elektronenvolt (eV). Man sieht weiter, daß die den Außenbahnenübergängen entsprechenden Energien sehr klein sind (die Übergänge 11 und 12). Weiter als 13,53 eV kann sich ein Elektron aber vom Kern nicht entfernen, denn dann ist es bereits vom Atom abgelöst, das heißt, eine Bahn, die vom Kern einen Energieabstand von 13,53 eV hat, gehört nicht mehr zum Atom.

Im Schema rücken mit zunehmender Quantenzahl die Niveaus immer enger zusammen, das heißt, die Energieunterschiede zweier weit außen liegender Bahnen werden also immer geringer. Das hat einen sehr einfachen Grund.

Die Gesamtenergie eines mechanischen Systems setzt sich zusammen aus der kinetischen und der potentiellen Energie. Die erste haben wir hinreichend besprochen. Über die zweite Art aber haben wir uns noch keine Gedanken gemacht. Wir werden in der Folge feststellen, daß sie eine ganz wesentliche Rolle spielt.

Es ist bekannt, daß alle Massen von der Erde angezogen werden. Diese sogenannte Massenanziehung kommt ganz beliebigen Massen zu. Betrachten wir beispielsweise zwei kleine Eisenkugeln, die eine gewisse Entfernung voneinander

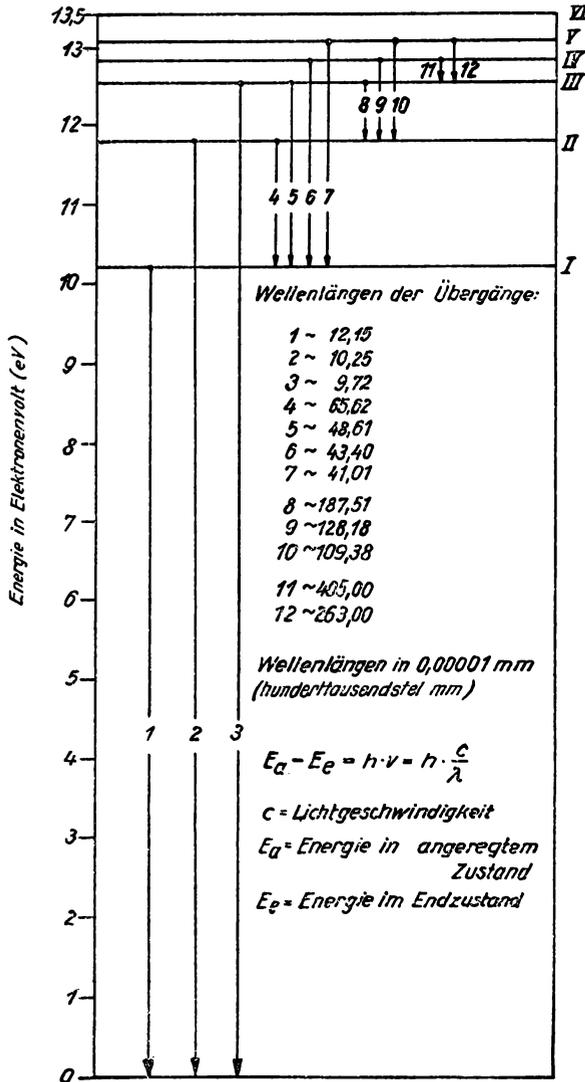


Bild 19

haben, so ziehen sie sich allein auf Grund des Vorhandenseins ihrer Massen ebenfalls an, doch ist die Anziehung so gering, daß man sie nicht messen kann. Im Falle der Erde macht es uns aber keine Schwierigkeiten, diese Massenanziehung

festzustellen. Werfen wir nur einen Stein hoch, dann haben wir schon recht deutlich den Effekt vor Augen. Die Erde hat eine derart große Masse im Vergleich zu den gewöhnlich vorkommenden Massen, daß die Anziehung schon der leichtesten Körper bemerkbar ist. Jede Masse, die sich in einiger Entfernung von der Erde befindet und von dieser angezogen wird, erfährt somit eine Kraft bestimmter Größe. Die Erde ist von einem Kraftfeld umgeben, sie hat die Fähigkeit, noch in beliebigiger Entfernung auf die Massen einzuwirken, unabhängig vom jeweiligen Bewegungszustand, das heißt, ob sich die Massen bewegen oder ruhen. Schließlich kommt allen Körpern erst durch die Massenanziehung seitens der Erde ein Gewicht zu, oder umgekehrt, das Gewicht von Körpern oder Massen ist ein Beweis für die gegenseitige Massenanziehung oder Gravitation, wie der Fachausdruck lautet. Hebt man irgendeinen Körper (Masse) hoch, um ihm eine bestimmte Lage über dem Erdboden zu geben, so ist dazu eine gewisse Arbeit notwendig. Die hineingesteckte Energie (Arbeit) speichert sich in ihm auf, wie man gewöhnlich sagt. Wir wollen aber sagen, die Bewegungsenergie, sie entsteht beim Bewegen des Körpers in die neue Lage, hat sich in Energie der Lage umgewandelt. Diese wird beim Herunterfallen des Körpers wieder in Bewegungsenergie umgesetzt und wandelt sich beim Aufschlag auf die Erde über Reibung in Wärme um. Neben der Massenanziehung kennen wir auch noch die Einwirkung elektrischer Ladungen aufeinander.

Die potentielle Energie ist ganz allgemein der Ausfluß dessen, daß die Massen, die geladenen und die ungeladenen, durch den Raum hindurch gewisse Kräfte aufeinander ausüben, sich anziehen oder abstoßen. So ist auch im Atom eine gegenseitige Einwirkung von Kern und Elektron zu bemerken; auf Grund ihrer ungleichartigen Ladung ziehen sie sich an. Das Elektron bleibt aber stets infolge der durch den Umlauf hervorgerufenen Zentrifugalkraft in einer bestimmten Entfernung vom Kern, in der sich Anziehung und Zentrifugalkraft das Gleichgewicht halten. Durch diese gegenseitige Lage bedingt, haben sie eine gewisse potentielle Energie gegeneinander, die von der Entfernung abhängt. Diese Energie läßt sich nach dem Coulombschen Gesetz ermitteln; sie ist immer negativ. Das hat seine Ursache darin, daß bei der *Heranziehung* des Elektrons *vom System Arbeit geleistet* wird und wir diese Arbeit (Energie) gewinnen. Man könnte dadurch beispielsweise eine winzige Maschine betreiben. Weil so bei der Annäherung Energie für uns gewonnen, vom System aber abgegeben wird und man sich immer auf das System bezieht, so erhält der Energiebetrag ein negatives Vorzeichen als Ausdruck dafür, daß diese Energie für das System verloren ist. Wollte man die beiden Partikel entfernen, so müßten wir jetzt Arbeit leisten, und das bedeutet positives Vorzeichen der Energie (man könnte jetzt wieder eine Vorrichtung in Bewegung setzen). Obwohl das Elektron schnell um den Kern rast, ist seine kinetische Energie nicht sehr groß. Jedenfalls überwiegt die potentielle Energie diese um das Doppelte.

Will man das Elektron aus dem Atom herauslösen, so muß man Energie aufwenden. Für diese Arbeit hat man eine besondere Bezeichnung eingeführt; es ist dies ein Begriff, der in der Atomphysik ständig benutzt wird. Aus diesem Grund wollen wir ihn ebenfalls anführen. Statt die Energie in mechanischen Einheiten auszudrücken, gibt man sie in elektrischen Einheiten an. Die betreffende Größe ist ein Elektronenvolt (1 eV). Man versteht darunter diejenige Energie, die ein Elektron erlangt, wenn es die Spannungsdifferenz ein Volt durchläuft. 100 Elektronenvolt sind gleich der kinetischen Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von 100 Volt erlangt. Um ein Elektron aus dem Grundzustand ins Unendliche zu bringen, es also aus dem Atom abzulösen, muß eine gewisse Energie zur Verfügung stehen, die man in eV ausdrückt und Ionisierungsenergie nennt. In Wirklichkeit brauchte man das Elektron natürlich nur aus dem Atom zu entfernen, das heißt aus dem Anziehungsbereich des Kernes heraus. Dann ist praktisch die potentielle Energie zwischen Kern und Elektron gleich Null; sie wirken nicht mehr aufeinander ein.

Die Ionisierungsarbeit oder -energie kann dem System Kern-Elektron auf verschiedene Weise zugeführt werden. Wir kommen darauf noch zurück. Die kinetische Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannung  $V$  erhält, läßt sich natürlich auch in potentielle Energie umrechnen. Dann kann man also auch den Abstand zweier Energieniveaus in Elektronenvolt angeben, was in diesem Falle also nur eine neue Maßeinheit bedeutet und unmittelbar nichts mit der Bewegung eines Elektrons in einem Spannungsfeld zu tun hat, durch welche die Maßeinheit erklärt wurde. Die Maßeinheiten lassen sich ineinander umrechnen, was hier gleichbedeutend mit der Umwandelbarkeit der zugehörigen Energiearten ist.

Weiter vorn haben wir erwähnt, daß die Energiedifferenz zweier weit außen liegender Bahnen immer geringer wird, und zwar rücken die Energieniveaus sehr rasch dicht zusammen (Bild 19). Die innere Energie des Atoms wird im wesentlichen durch dessen potentielle Energie bestimmt, wie wir oben erklärt haben. Da nun diese Energie nach dem Coulombschen Gesetz mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, so nehmen infolgedessen auch die Energieunterschiede mit dem Quadrat der Entfernung ab, und dies ist also der Grund dafür, warum die Niveaulinien als Sinnbilder der Energiewerte schließlich so dicht zusammenrücken.

Blicken wir jetzt von dieser Stelle aus noch einmal ganz kurz auf die bisherige Entwicklung zurück. Nachdem also das Rutherfordsche Atommodell nicht in der Lage war, die einfachsten Erscheinungen der Lichtaussendung, die Atomspektren, zu erklären, konnten diese Erscheinungen mit Hilfe des Bohrschen Atommodells zunächst befriedigend erklärt werden. Dieses Modell sieht einen positiv geladenen Kern mit einer der Kernladungszahl entsprechenden Anzahl von Elektronen vor. Das Kräftegleichgewicht wird durch den Umlauf der Elektronen gesichert; wirkende Kräfte sind die Zentrifugalkraft, die am Elektron

angreift, und die Coulombkraft des Kerns, die gleichfalls an dieser Partikel wirkt. Das Elektron kann aber, um in Übereinstimmung mit den Beobachtungstatsachen zu bleiben, nicht auf beliebigen Bahnen um den Kern kreisen. Nur ganz bestimmte Bahnen darf es benutzen; die Benutzung von anderen ist nicht erlaubt. Die Auswahl der Bahnen geschieht, nach der Bohrschen Annahme, durch die Festlegung des Drehimpulses als ganzzahliges Vielfaches einer gewissen Naturkonstanten, nämlich des Planckschen Wirkungsquantums  $h$ . Die Zahl  $n$ , die angibt, um wievielfach größer der Impuls als das Wirkungsquantum jeweils sein darf, heißt Quantenzahl und ist gleichbedeutend mit der Bahnnummer. Der Impuls kann sich jetzt nicht mehr stetig ändern, sondern nur sprungweise; er ist gequantelt, das heißt, er kann nicht mehr die Zahlenwerte annehmen, die zwischen zwei bestimmten Werten liegen. Die Radien der Bahnen werden mit zunehmender Zahl  $n$  immer größer. Die dritte Bahn hat bereits den neunfachen Radius der ersten, die vierte Bahn den sechzehnfachen; in diesem Sinne steigert sich der Abstand (das ist nicht zu verwechseln mit den Abständen der Energieniveaus). Die innere Energie des Systems (Atom = Kern + Elektron) besteht aus der kinetischen Energie des Elektrons (der Kern soll in Ruhe sein) und aus der potentiellen Energie zwischen dem Kern und dem Elektron. Dabei überwiegt die potentielle Energie die kinetische um das Doppelte. Da die erste aber mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, ist die Energiedifferenz zweier weit außen liegender Elektronenbahnen um so geringer, je größer die Quantenzahl  $n$  wird. Das System kann durch besondere Umstände in einen angeregten Zustand kommen, das heißt, das Elektron befindet sich dann nicht auf der innersten Bahn, sondern auf einer weiter außerhalb liegenden, aber stationären Bahn. Gehtes von dieser wieder auf eine weiter innen liegende über, so ist dies mit dem Aussenden einer ganz bestimmten Wellenlänge verbunden; das Atom (als System) gibt damit Energie nach außen ab, es wird energieärmer. Umgekehrt kann ein Atom auch von außen Energie aufnehmen. Stets ist aber die Aufnahme oder Abgabe von Energie mit dem Übergang des Elektrons von einer stationären Bahn auf eine andere ebenfalls stationäre Bahn verbunden, und die zwischen den zwei Energiezuständen erfolgte Emission oder Absorption von Lichtwellen erfolgt nach der Gleichung

$$E_m - E_n = h \cdot \nu \quad (m \text{ und } n \text{ sind die Bahnzahlen}).$$

Daraus ist zu ersehen, daß die abgestrahlte Energie um so größer ist, je größere Werte  $\nu$  annimmt, das heißt, je schneller die Welle schwingt. Kurze Wellen haben demnach eine größere Energie als lange Wellen. Weiter folgt daraus noch, daß die Energie auch um so größer ist, je weiter die Bahnen auseinanderliegen. Jedoch ist sie zwischen zwei weiter außen liegenden Bahnen kleiner als zwischen zwei mehr innen liegenden. Strahlt man dem System Energie zu, so muß sie mindestens so groß sein, daß ein Elektron von einer stationären Bahn auf die nächste gelangen kann, wozu für die Atome derselben Art stets der gleiche, ganz be-

stimmte Energiebetrag notwendig ist. Gelangt weniger Energie in das System, so bleibt das Atom im gleichen Zustand.

Dies ist also die Bedeutung der quantenhaften Energieaufnahme oder -abgabe im Bereich atomaren Geschehens. Hierin unterscheidet sich die Quantentheorie sehr wesentlich von der übrigen Physik, für die man zur Kennzeichnung des Unterschiedes den Begriff klassische Physik benutzt. Dort geht es im allgemeinen nur stetig zu, der Zustand eines Systems kann sich immer nur stetig und nicht sprunghaft ändern. Zum Beispiel werden sich die Temperatur oder der Druck eines Gases nie sprungweise, sondern stetig ändern. Das Gas enthält eine ungeheure große Zahl von Atomen oder Molekülen, und für solche großen Systeme scheinen andere Gesetze zu gelten als für die kleinen Mikrosysteme der atomaren Welt. Was in jenen unvorstellbar ist, hat in diesen seine Gültigkeit. Der nicht genügend physikalisch geschulte Leser wird hierin unter Umständen gar nichts Bewegendes sehen, er nimmt die Dinge mit der gleichen Selbstverständlichkeit hin, als wenn man ihm gerade das Gegenteil erklärt hätte. Es verhält sich aber doch so, daß wir hier etwas Eigenartiges vor uns haben.

Die Größenverhältnisse beim Wasserstoffatom liegen etwa so, daß der Kern einen Radius von einigen  $10^{-12}$  cm (billionstel Zentimeter) und die erste stationäre Bahn einen solchen von rund  $0,5 \cdot 10^{-8}$  cm (100millionstel Zentimeter) hat. Dieses Modell kann man hundertbillionenmal vergrößern und erhält dann ungefähr folgendes Bild: Hat der Kern einen Durchmesser von 2–3 Metern, dann kreist das Elektron in einer Entfernung von etwa 5 Kilometern um ihn herum; sein Durchmesser beträgt ungefähr 50 Zentimeter. Das gibt ein drastisches Bild von den ungeheuren Zwischenräumen und davon, daß die Materie im wesentlichen aus leerem Raum besteht, was reichlich paradox erscheint.

Man wird einen gewissen Zweifel an der „Richtigkeit“ solcher Modellvorstellungen hegen dürfen. Trotzdem läßt sich wohl sagen, daß dem Modell eine gewisse Bedeutung zukommt, aber nicht derart, daß man berechtigt wäre, dieses als ein getreues Abbild der Wirklichkeit anzusehen. Es ist vielmehr eine Konstruktion, die, wäre sie ausführbar, sich in vieler Hinsicht etwa so verhalten würde, wie es die Quantentheorie aussagt. Es scheint auch durchaus möglich, daß man mit einem „idealen“ Mikroskop zwei Massen- oder Ladungskonzentrationen im „Atominneren“ beobachten könnte, die dem Atomkern und einem Elektron zuzuschreiben wären. Der Vorgang der Elektronenbewegung um den Kern wird sich aber grundsätzlich niemals beobachten lassen. Das hat weniger seinen Grund darin, daß uns ein geeignetes Übermikroskop fehlt; wir stehen hier vielmehr vor einer prinzipiellen Schwierigkeit. Die Beobachtung der betreffenden Bewegung bedeutet grundsätzlich einen Eingriff in deren Ablauf; denn nur durch „Sehen“ könnten wir uns schließlich von der Bewegung überzeugen. Die Verwendung eines Mikroskops stört aber durch die in Anwendung gebrachten Strahlen das System Elektron — Kern derart, daß man es dadurch stört und

deshalb auch nicht im alten Zustand beobachten kann. Alle Arten von Mikroskopen, die wir kennen und die man noch konstruieren wird, beruhen auf der Anwendung von Strahlen oder auch Wellen zum Durchleuchten des Untersuchungsobjektes. Dabei treten die Partikel oder Wellen stets in Wechselwirkung mit dem Elektron und auch mit dem Kern, wodurch das System in unkontrollierbarer Weise verändert, das Elektron aus der „Bahn“ geworfen und eventuell aus dem Atom vollständig entfernt wird. Das Elektronenmikroskop benutzt beispielsweise einen scharf gebündelten „Elektronenstrahl“ zum Durchleuchten des Objektes; dabei fliegen die Elektronen durch die Atome hindurch, wie wir schon bei den Versuchen von Lenard mit der Aluminiumfolie gesehen haben, und beim Hindurchfliegen beeinflussen sie auf Grund ihrer Ladung das Atomelektron. Es besteht eine Wahrscheinlichkeit dafür, daß das Elektron durch Stoß aus der Bahn geschleudert wird. Bei der ungeheuren Zahl der im Strahl befindlichen Elektronen ist die Wahrscheinlichkeit hierfür größer als bei den Lenardschen Versuchen. Man könnte beliebige Teilchen, beispielsweise Protonen oder Neutronen, zu Strahlen bündeln und durch die Materie schicken, immer tritt eine Beeinflussung ein, ob die Partikel geladen sind oder nicht. Diese prinzipielle Schwierigkeit läßt sich nicht meistern; wir können sie auch nicht etwa dadurch umgehen, daß wir besonders behutsam und feinfühlig arbeiten.

## 6. Welle und Korpuskel

Es gibt gewisse Erscheinungen in der Physik, die rätselhaft anmuten und sich so gar nicht mit unserer gewöhnlichen Auffassung vom Wesen der Dinge in Einklang bringen lassen wollen. Jedoch die Experimente lassen uns nicht zwischen dieser oder jener Auffassung die freie Wahl, sondern gerade sie sind es, die uns in Verlegenheit bringen.

Da ist zunächst das Licht. Seit der Holländer Huygens seine sogenannte Ondulationstheorie, das heißt Wellentheorie, des Lichtes aufstellte, waren in der Physik zwei Auffassungen über das Wesen des Lichtes vorhanden. Zuvor hatte der Engländer Newton behauptet, das Licht bestehe aus kleinen Teilchen, gewissermaßen aus Korpuskeln, die sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raume bewegen. Beide Auffassungen führten einen Streit miteinander; nach damaliger Anschauung konnte das Licht ja nur Welle oder nur Korpuskel sein. So gab es verständlicherweise Anhänger beider Auffassungen und entsprechende Kontroversen.

Gegen Ende des vorigen Jahrhunderts hatte aber wohl endgültig die Sterbestunde für die Korpuskel geschlagen, so schien es wenigstens. Kein Geringerer als der deutsche Physiker Heinrich Hertz behauptete, daß die Wellennatur des Lichtes absolute Gewißheit sei und daß man wohl kaum jemals wieder von der

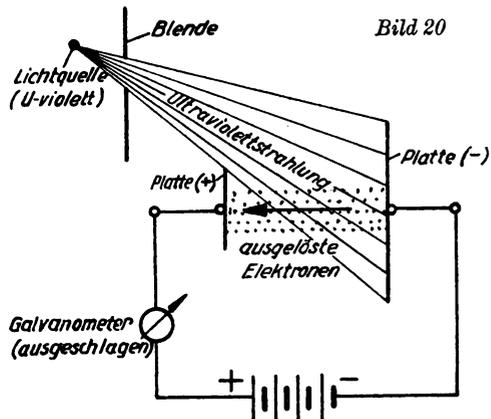
Wellentheorie abkommen werde. Es hat sich aber gezeigt, daß sie keine absolute Gewißheit darstellte, wenn wir diesen Begriff überhaupt zunächst als sinnvoll annehmen. Heute sind wir mit solchen Äußerungen vorsichtiger, weil wir schon sehr viel dazugelernt haben. Keineswegs war Hertz mit seinen Worten etwa frivol, denn nach dem damaligen Stand der Dinge war es nicht weiter verwunderlich, wenn jemand von absoluter Gewißheit sprach.

Da ist eine Erscheinung, die sich unter keinen Umständen einer Wellenauffassung eingliedern lassen will, das ist der Photoeffekt. Bestrahlt man ein Metall mit genügend kurzwelligem Licht, zum Beispiel mit ultraviolett Licht oder mit Röntgenlicht, so treten aus ihm Elektronen aus, deren kinetische Energie aber nur von der Frequenz der eingestrahelten Wellen abhängt, wie man experimentell feststellte (Bild 20). Man kann die Intensität der Strahlung steigern, ohne daß deshalb die Elektronen an

Energie gewinnen, das bedeutet, daß ihre kinetische Energie gänzlich unabhängig davon ist, ob viel oder wenig Strahlung auf das Metall fällt. Das ist zunächst unerwartet und läßt sich auch nicht im Rahmen einer wellenmäßigen Auffassung des Lichtes verstehen. Wir wissen bereits, daß Licht eine elektromagnetische Welle ist, das heißt, so haben wir es bisher gedeutet. Als solche wird es erklärlicher Weise einen Einfluß auf Elektronen nehmen können; das ist nicht schwer einzusehen. Aber es läßt sich andererseits nicht einsehen, zumindest im Rahmen der

üblichen Auffassung nicht, wie die Elektronen die sehr großen Energien sofort aufnehmen können. Kaum, daß die Bestrahlung einsetzt, werden auch schon die Partikel ausgelöst. Man hat errechnet, daß bei wellentheoretischer Auffassung des Lichtes das Elektron tagelang unter der Einwirkung einer elektromagnetischen Strahlung stehen müßte, bevor es dann jenen notwendigen Energiebetrag aufgenommen hätte, der es aus dem Metall herauslöst. Tatsächlich setzt die Elektronenemission jedoch sofort ein, und dies steht also im Widerspruch zur Wellenauffassung.

Betrachtet man hingegen die dem Elektron zugeführte Energie  $h \cdot \nu$  als ein Teilchen, so läßt sich der Effekt in gewissem Sinne zwangloser deuten. Das Elektron



nimmt die auffallende Korpuskel in sich auf, es verschluckt dieses Teilchen gewissermaßen und erhöht dadurch sprunghaft seine eigene Energie um den Betrag  $h \cdot \nu$  der Lichtkorpuskel. Zum Verschlucken einer Partikel genügt der zur Verfügung stehende Zeitraum ohne weiteres, das heißt, die sofortige Elektronenemission wird verständlich. Man nennt die Lichtkorpuskel Photonen.

Doch es besteht andererseits kein Zweifel an der Wellenstruktur des Lichtes, und so sollte man sich die Photonen nicht so vorstellen, wie vielleicht die Elektronen oder Alphapartikel oder andere Teilchen, sondern vielmehr als Gebilde, die sich bei gewissen Prozessen etwa wie die uns bekannten Partikel verhalten.

Um den Begriff des Photons werden heute noch zum Teil widersprechende Ansichten laut, die sich neben seiner Struktur auch auf sein sonstiges Verhalten ausdehnen. Einerseits ist es nämlich nicht möglich, ein Photon zu isolieren, es also allein darzustellen oder seinen Ort in einem Strahl anzugeben, ohne es zu zerstören, andererseits kann man sich von seinem tatsächlichen Vorhandensein durch Experimente überzeugen. Es gibt Geräte, die es gestatten, den Teilchencharakter der Photonen in schwachen Lichtstrahlen nachzuweisen. Wir wollen jedoch unsere Ausführungen nicht mit solchen Auseinandersetzungen belasten und nehmen den korpuskularen Charakter des Photons als erwiesen an, wobei nur hinsichtlich seiner Vorstellung eine gewisse Vorsicht angebracht ist.

Wir haben schon in den vorausgegangenen Teilen Prozesse behandelt, bei denen sich das Licht gleichfalls wie eine korpuskulare Strahlung verhielt, ohne daß wir allerdings auf diesen Umstand hingewiesen haben. Wenn sich ein Elektron in einem vom Grundzustand verschiedenen Zustand befindet, kann es unter Emission einer Lichtwelle in einen energetisch tieferen Zustand übergehen. Die ausgesandte Energie ist vom Betrage  $h \cdot \nu$  und entspricht genau in der eben entwickelten Vorstellung dem Photon, das heißt also, daß Licht und Elektronen durch Photonen miteinander in Wechselwirkung treten. Jedoch können die Atome eines Elementes beziehungsweise ihre Elektronen stets nur ganz bestimmte Photonen aufnehmen oder abgeben, nämlich die zu den Übergängen gehörende Energie  $h \cdot \nu$ ; andere Photonen werden mit den Teilchen nicht in Wechselwirkung treten können. Für die Lichtemission oder -absorption ergibt sich danach etwa folgendes Bild: Nehmen wir an, wir hätten in einem Gefäß die Atome einer Sorte A, zum Beispiel in einer Gasentladungsröhre Wasserstoffgas, die sich in angeregten Zuständen befinden, das heißt, die an die Atome gebundenen Elektronen befinden sich nicht im energetisch tiefsten Zustand. In diese angeregten Zustände haben wir sie durch Anlegen sehr großer Spannungen gebracht, wie wir dies in vorhergehenden Abschnitten schon kurz erwähnt haben. Die innere Energie des Atoms ist größer geworden, was sich eben darin äußert, daß sich das Elektron nicht mehr auf der innersten Bahn befindet. Würden nun sämtliche Elektronen auf den neu eingenommenen Bahnen verbleiben, so könnten

wir kein Leuchten des Gases wahrnehmen. Der größte Teil jedoch geht in sehr kurzer Zeit von diesen Außenbahnen wieder auf die weiter innen liegenden herunter. Manche Elektronen gehen gleich auf die Grundbahn, manche fallen aber stufenweise nach innen.

Das ist uns klar, denn würden alle Elektronen sogleich von den angeregten Bahnen auf die Grundbahn herunterfallen, und dies bei jeder Art von Anregung, so dürften wir im Spektrum ja nicht solche Linien beobachten, wie sie zum Beispiel in Bild 19 den Übergängen 4 bis 12 entsprechen. Die Elektronen gewinnen bei diesen Übergängen an Energie, und aus dieser formen sie die Photonen, allerdings erst im Moment des Ausschleuderns. Wir können diesen Prozeß auch so deuten, daß wir sagen, die Elektronen sind in der Lage, aus ihrem Energievorrat neue Partikel zu erzeugen und sie dabei in Freiheit zu setzen. Verfügen sie nicht über die hierzu notwendige Energie, so kann es natürlich nicht zur Erzeugung von Photonen kommen. Damit ist auch gleich gesagt, daß der Grundzustand der energieärmste Zustand ist und daß jedes Atom stets das Bestreben hat, in den Zustand mit der kleinsten Energie zu gelangen. Das ist ein Naturprinzip, denn sonst wäre es nicht zu verstehen, warum ohne unser Zutun die einmal auf äußere Bahnen gehobenen Elektronen wieder spontan auf innere und schließlich auf die innerste zurückfallen, wofür doch offensichtlich keinerlei Notwendigkeit besteht.

Setzen also die Atome der Art A eine riesige Zahl Photonen in Freiheit, so durch-eilen diese den ihnen zur Verfügung stehenden Raum mit Lichtgeschwindigkeit. Diese Photonen können nun in mehr oder weniger kurzer Zeit mit Materie in Wechselwirkung treten, was dadurch geschieht, daß sie von Atomelektronen wieder verschluckt werden und deren Energie erhöhen. Es besteht aber keine Notwendigkeit, daß die erzeugten Photonen in sehr kurzer Zeit wieder eingefangen werden. Es besteht auch keinerlei Notwendigkeit, daß ein vom Photon getroffenes Elektron dieses *unbedingt* verschlucken muß; jedenfalls ist hiervon nichts zu bemerken. Im Abschnitt über Gammastrahlen werden wir den Comptoneffekt kurz erwähnen, der eine andere Möglichkeit der Wechselwirkung Photon—Elektron darstellt.

Die von der Atomsorte A emittierten und von einer Atomsorte B absorbierten Photonen treiben so etwas wie ein Ballspiel; denn die Atome von B werden nun ihrerseits wieder Photonen emittieren, und es besteht die Möglichkeit, daß von diesen wiederum ein Teil oder fast alle von den Atomen A verschluckt werden.

Es besteht aber kein Grund, anzunehmen, daß die Photonen schon im Elektron vorhanden sind, wie wohl klargeworden sein dürfte. Diese seltsamen Korpuskel führen ein ruheloses Dasein, wenn wir ihr Vorhandensein in der geschilderten Weise annehmen. Niemals sind sie in Ruhe, wir finden sie nur stets mit Lichtgeschwindigkeit den Raum durch-eilen, anders können sie nicht

existieren. Aus diesem Grunde kommt ihnen auch keine sogenannte Ruhemasse zu; ihre Ruhemasse ist Null, was schließlich nur eine andere Formulierung für den eben erwähnten Sachverhalt ist.

In den allermeisten Fällen zeigt sich uns aber das Licht nicht als Korpuskel, sondern als Welle. Dafür sprechen die sogenannten Beugungserscheinungen, das heißt Ablenkungserscheinungen. Lassen wir das Licht einer nahezu punktförmigen Lichtquelle  $L$  auf einen Schirm  $S_1$  fallen, der einen Schlitz  $Sz$  besitzt, der so fein ist, daß seine Breite etwa die Größenordnung der auffallenden Lichtwellenlänge hat, also die Größenordnung von zehntausendstel Millimetern, so finden

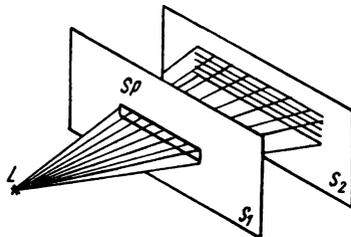


Bild 21

wir auf einem hinter den ersten gestellten Schirm  $S_2$  keine scharfe Abbildung des Schlitzes mehr (Bild 21). Es ziehen sich mehr oder weniger helle Streifen über diesen Schirm. Die Beugungserscheinungen lassen sich gut mit der Wellentheorie beschreiben und bilden deren wichtigste Stütze. Wellen, die von derselben Lichtquelle ausgehen, nennt man kohärent, das heißt zusammenhängend, und solche Wellen können miteinander interferieren. Diese Eigenschaft äußert sich darin, daß sich die Teilwellen einer aufgespaltenen Welle übereinanderlagern lassen und sich je

nach den Wirkungen, die sie einzeln in einem Raumpunkte auslösen, mehr oder weniger verstärken oder auch bis zur Wirkungslosigkeit abschwächen. Bild 22 zeigt eine Lichtquelle  $L$  und einen Spiegel  $Sp$ , der nicht plan, sondern aus zwei unter einem kleinen Winkel gegeneinander geneigten Teilebenen besteht. Vor dem Spiegel

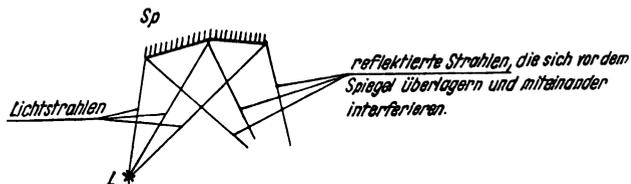


Bild 22

werden sich die von den verschiedenen Teilpunkten beider Ebenen ausgehenden Teilwellen überlagern, miteinander interferieren, wie man sagt, sich so in manchen Punkten auslösen, in anderen wieder verstärken, das heißt, eine größere Wirkung auf dorthin gebrachte Partikel ausüben. Eine Welle hat eine

bestimmte Wellenlänge oder Frequenz und auch eine ganz bestimmte sogenannte Amplitude, wie dies in Bild 23a angedeutet ist. Die Amplitude gibt den größten Ausschlag der Welle, die Höhe der „Berge“ oder die Tiefe der „Täler“ an. Mehrere Wellen, die in demselben Punkt beginnen und die gleiche Frequenz haben, brauchen deswegen noch nicht die gleiche Amplitude zu besitzen, wie man in Bild 23b sieht. So hat dort die Welle 1 die kleinste, die Welle 3 die größte Amplitude bei gleicher Wellenlänge und gleicher Phase, womit gemeint ist, daß verschiedene Wellen am gleichen Punkt beginnen, sie also nicht gegeneinander verschoben sind.

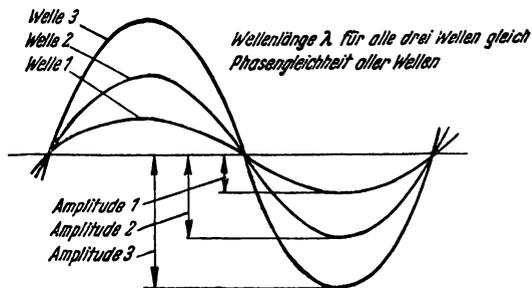
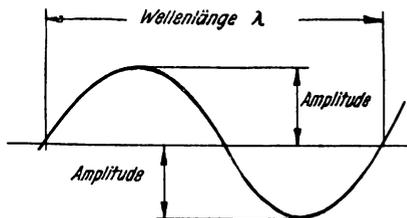


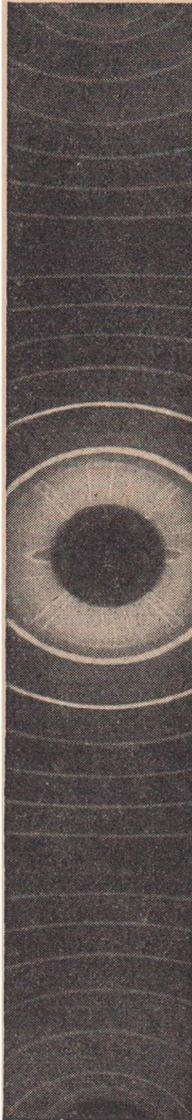
Bild 23

Auf Grund dieser Übereinanderlagerungsfähigkeit oder der Superposition, wie das der Physiker

nennt, ist also zu erklären, wieso in einem Raumpunkt keine Wirkung erzielt wird, obgleich verschiedene Wellen zu ihm gelangen. In ihrer Gesamtwirkung heben sie sich gerade gegenseitig auf. Wenn sich an dieser Stelle gerade ein Korn einer entwicklungsfähigen Photoemulsion befindet, so wird dieses keinerlei Wirkung erfahren und bei der Filmentwicklung nicht geschwärzt, hingegen werden die Körner eine Schwärzung zeigen, die sich in Raumpunkten befinden, wo sich die Gesamtwirkung nicht annulliert.

Wir wollen hier hinzufügen, daß das Licht als elektromagnetische Welle natürlich eine gewisse elektrische Wirkung auf die Emulsion eines Filmes hat, das heißt ja nichts anderes, als daß die Photonen mit den Atomelektronen der Emulsionskörner in Wechselwirkung treten, was sich bei der Entwicklung des Filmes schließlich in der Schwärzung der getroffenen Körnchen zeigt.

Der sogenannte Dualismus Welle—Korpuskel ist aber nicht nur auf die Lichterscheinungen beschränkt, sondern zeigte sich auch in solchen Gebieten, in denen man ihn gleichfalls nicht vermutet hatte. Das Licht besitzt vorherrschend einen Wellencharakter und zeigt nur bei gewissen Prozessen eine Teilchenstruktur, woraus wir aber nicht folgern dürfen, daß es Welle und Korpuskel zugleich wäre. Man muß sich vor einer solchen Verquickung der Erscheinungen hüten; sie verwirren nur die Vorstellung und führen schließlich zu absurden



Folgerungen. Die gewöhnlichen Partikel hingegen, wie zum Beispiel Elektronen, Alphateilchen, Protonen und Mesonen, zeigen sich uns in einer mehr teilchenhaften Struktur, also mehr mit Partikelcharakter versehen. Man hegte bislang keinen Zweifel an dieser Erscheinung, bis der Franzose Louis de Broglie auf die Idee kam, jeder Partikel eine Welle zuzuordnen, diese gewissermaßen als Welle aufzufassen. Nach dieser revolutionären Idee begann man nach einem experimentellen Beweis zu suchen und fand schließlich auch so etwas wie einen Beweis dafür. Man nannte diese Wellen Materiewellen und interpretierte die Dinge manchmal sehr verworren. Man behauptete etwa, auch die Partikel seien keine reinen Partikel, sondern besäßen einen dualistischen Charakter, genau, wie wir dies beim Licht hervorgehoben haben, sie seien Welle und Korpuskel zugleich. Dies ist aber eine unmögliche Vermengung, die weder beobachtet wird noch Anspruch auf eine etwa vorhandene Wirklichkeit er-

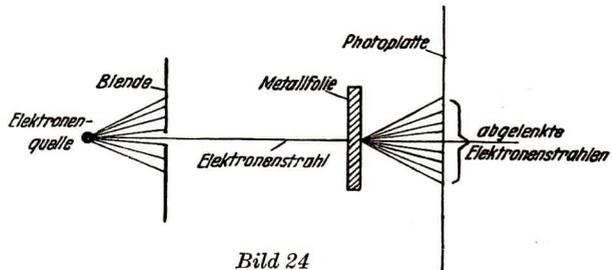


Bild 24

heben kann. Wir wollen uns zunächst kurz mit den Beobachtungen vertraut machen.

Man baut folgende Apparatur auf: eine Elektronenquelle, davor in einer kurzen Entfernung eine Metallfolie, das heißt ein dünnes Metallblättchen, und hinter diese Folie eine Photoplatte. Bild 24 zeigt diese Anordnung. Setzt man die Elektronenquelle in Tätigkeit und richtet den Strahl auf die Folie, so treten die Partikel durch sie hindurch und treffen auf die Platte. Läßt man diesen Prozeß eine Zeitlang laufen und entwickelt dann die Platte, so stellt man über-

Bild 25

rasch fest, daß dieses Bild einer durch Licht hervorgerufenen Beugungsaufnahme gleicht (Bild 25). Das Bild entsteht also auch, wenn man Licht auf einen Schirm auffallen läßt, der ein kleines Loch enthält, dessen Durchmesser in der Größenordnung der verwendeten Lichtwellenlänge liegt. Beim Licht ist uns diese Erscheinung bekannt und läßt sich nur durch seine Wellennatur begreifen. Hier aber haben wir Partikel auf die Folie geschossen und erhalten auf dem Auffangschirm das Bild einer Wellenbeugung, das heißt eine nur für Wellen charakteristische Erscheinung. Nun können aber Partikel zweifellos keine Wellen sein.

Wir wiederholen jetzt den Versuch noch einmal in einer etwas anderen Form. Die Apparatur bleibt so stehen, nur bauen wir noch eine Vorrichtung an, die es gestattet, die Elektronen einzeln auf die Folie zu schießen. Dies ist experimentell leicht möglich. Nach einer geringen Anzahl von Schüssen wechseln wir die Photoplatte gegen eine neue aus und senden nochmals etwa die gleiche Zahl von Elektronen gegen die Folie. Entwickeln wir nun beide Platten, so zeigen sie ungefähr beide dasselbe Bild: Eine entsprechende Zahl von Schwärzungsstellen ist auffallend gleichmäßig über die Platte verteilt. Von Beugungsringen wie im ersten Versuch ist nichts zu sehen. Unsere Partikel sind also keine Wellen, sie sind Partikel geblieben und haben jedes für sich die Platte an der Auftreffstelle geschwärzt. Wir haben beim letzten Versuch zwei Platten verwendet, um zu zeigen, daß unser Ergebnis keine Zufallserscheinung darstellt; beide Male haben wir einander gleichende Bilder. Worin bestand aber der Unterschied zwischen den Versuchen? Beim ersten Versuch haben wir riesige Mengen von Elektronen gegen die Folie geschossen und beim zweiten nur sehr wenige, etwa einige Hundert oder vielleicht auch nur einige Dutzend. Sollten sich vielleicht riesige Mengen wie Wellen verhalten, kleine jedoch wie Korpuskel?

Wir machen noch einen dritten und letzten Versuch. Zunächst wechseln wir nach jedem Schuß die Platte aus und entwickeln sie. Die Platten zeigen uns schließlich, nachdem wir so eine Anzahl „belichtet“ haben, daß jedes Elektron andere Punkte des Raumes hinter der Folie getroffen hat, das heißt, jedes Elektron wurde beim Durchgang durch die Folie in einer anderen Richtung abgelenkt. Lassen wir nun noch einmal die Elektronen auf die Folie prasseln, so zeigt uns die Aufnahme wiederum die Beugungsringe, genau wie beim ersten Versuch und wie man sie auch durch Lichtwellen erhält. Nun aber wissen wir, wie es kommt, daß ein solches Bild entsteht.

Beim Durchgang durch die Folie wird jedes Teilchen in einer anderen Richtung gestreut; aber es gibt gewisse Richtungen, in die es mit Vorzug gelangt, und solche, in die es offensichtlich nicht abgelenkt wird. Betrachten wir daraufhin noch einmal das Bild 25. Die geschwärzten Teile sind von Elektronen getroffen. Man sieht in der Mitte der Aufnahme eine halbdunkle Scheibe und um diese einen sehr kräftigen dunklen Ring. Dann folgen in etwas größerer Entfernung zwei verhältnismäßig dünne, aber auch kräftige Ringe; nach außen zu werden die Ringe

schließlich dünner und immer schwächer. Daraus ist offensichtlich, daß die Partikel keineswegs etwa wahllos in den Raum gestreut worden sind, sondern gewissen Regeln gehorchen; das zeigt auch die vorhandene Symmetrie. Es gibt also für das einzelne Teilchen keine bestimmte Voraussage, wo es nach dem Durchgang zu finden sein wird; aber für die große Menge existiert doch ein Gesetz, das die Teilchen in bestimmte Richtungen zwingt.

Lassen wir statt Elektronen auf einen Kristall Röntgenstrahlen fallen, so erhalten wir ein ähnliches Bild. Röntgenstrahlen besitzen, wie wir wissen, den typischen Wellencharakter. Sie haben daher eine angebbare Frequenz. Reguliert man diese nun so lange, bis auf einer Photoplatte das gleiche Bild wie bei der Elektronenbeugung entsteht, so läßt sich eine Beziehung zwischen Wellenlänge und Elektronenbewegung herausfinden. Es besteht da augenscheinlich eine gewisse Analogie.

Das Charakteristische für eine Partikelbewegung ist vor allem der Impuls  $I$  der Teilchen. Sein Wert ist definiert durch  $I = m \cdot v$ , dabei ist  $m$  die Partikelmasse und  $v$  die Geschwindigkeit, die in dem Fall, daß keine Kräfte auf das Teilchen einwirken, konstant ist. Von den gegen die Folie geschossenen Elektronen kann man aber die Geschwindigkeit messen und, da die Masse bekannt ist, den Impuls errechnen. Ändert sich der Impuls der Elektronen, so erhält man ein anderes Bild; die Beugungserscheinung ist also vom Impuls abhängig. Bei der Wellenstrahlung ist das Beugungsbild von der Frequenz oder Wellenlänge abhängig und ändert sich mit diesen. Aus der Gleichheit oder Kongruenz der entsprechenden Bilder ist also ein Zusammenhang zwischen Impuls der Elektronenbewegung und Wellenlänge der Wellenstrahlung zu erwarten. Es ergibt sich, daß das Produkt aus Teilchenimpuls und Wellenlänge gerade die Plancksche Konstante  $h = 6,61 \cdot 10^{-27}$  erg sec ist, also  $mv \cdot \lambda = h$ . Auf Grund dieser Analogie kann man daher einer Korpuskelbewegung eine gewisse Wellenlänge zuordnen, wobei man seitens der Partikel deren Masse und die Bewegungsgeschwindigkeit kennen muß, mit anderen Worten ihren Impuls. Dann ergibt sich die „Wellenlänge“ der Partikelbewegung zu  $\lambda = h : I = h : mv$ .

Es wird uns deswegen aber gewiß nicht einfallen, die Partikel als eine Welle anzusehen. Wir haben ja auch nur gezeigt, daß sich bei gewissen Erscheinungen, die durch Partikel hervorgerufen werden, diese wie Wellen verhalten beziehungsweise sich durch eine Wellenbewegung erfassen oder, wie der Physiker sagt, beschreiben lassen. Damit haben wir schon zum Ausdruck gebracht, daß wir nicht der Meinung sind, eine Partikelbewegung sei eine Welle, sondern wir beschreiben sie einfach durch eine Welle, und das ist ein großer Unterschied.

In der Physik handelt es sich vor allem darum, aus den gemessenen Anfangsdaten eines Systems, also zum Beispiel aus dem Ort und Impuls eines Elektrons, seine Zukunft vorherzusagen. Das bedeutet, daß wir etwa sagen können, an welcher Stelle des Raumes das Elektron nach dem Durchgang durch die

Folie wieder anzutreffen ist, das heißt eben, seine Zukunft vorhersagen. Der Wissenschaftler oder der Techniker betätigt sich also hier als „Wahrsager“. Unser Beugungsexperiment und viele andere, die wir nicht erwähnen, zeigen uns, daß für ein einzelnes Teilchen nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich sind. Von dem einzelnen auf die Folie mit einer gewissen Geschwindigkeit auffallenden Elektron können wir nicht vorhersagen, wo es danach anzutreffen sein wird. Das widerspricht einer streng kausalen Naturbeschreibung. Eine solche ist dann kausal, wenn sie gestattet, aus den Anfangsdaten eines Systems seine Zukunft vorauszusagen, also beispielsweise aus dem angebbaren Impuls und der Einfallsrichtung die Ausfallsrichtung zu bestimmen.

Das Geschehen eines *einzelnen* Teilchens verläuft akausal, das heißt nicht kausal. Aber die Elektronenbeugungsaufnahme zeigt uns, daß es dabei doch gewisse Regeln gibt. Man kann eine Wahrscheinlichkeitsaussage darüber machen, wo sich die Teilchen nach dem Durchgang finden werden. Dort, wo die Platte nicht geschwärzt wurde, sind keine Partikel hingelangt, daher wird die Wahrscheinlichkeit, daß ein Teilchen nach dem Durchgang in die entsprechende Richtung abgelenkt wird, sehr klein sein (sie ist nicht Null). Die Teilchenbewegung unterliegt gewissen statistischen Gesetzen und ist in diesem Sinne nicht völlig zufallsbedingt und somit nicht völlig akausal. Aber sie ist nicht mehr kausal nach der üblichen Auffassung, sondern man spricht von statistischer Kausalität. Insofern herrscht daher in der Natur niemals der reine Zufall.

## 7. *Periodisches System der Elemente*

Wir kennen heute 98 Elemente, nachdem es gelang, die kurzlebigen Elemente 93–98 künstlich zu erzeugen. Einige Elemente sind instabil, sie zerfallen ohne äußere Einwirkung und bilden unter Aussendung bestimmter Strahlen andere, stabile Elemente niedrigerer Ordnungszahl.

Ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften unterscheiden die Elemente grundsätzlich voneinander, doch zeigen sie in gewisser Weise sich ähnelnde Merkmale, so daß man schon frühzeitig nach einer durchgehenden Systematik suchte, nach einer Ordnung, in der verwandte Elemente in Gruppen zusammengefaßt waren. Daß irgendwelche „Verwandtschaftsgrade“ eine Rolle spielen, folgt schon aus der Tatsache, daß einige Elemente für bestimmte Verbindungen mit anderen eine Vorliebe zeigen, während andere mit diesen Elementen keine Verbindungen eingehen.

Nach langem Suchen gelang es im Jahre 1869 Mendelejew, die Systematik zu finden. Sie war nach den damaligen Verhältnissen nur durch genaue Kenntnis der chemischen Eigenschaften der Elemente möglich. Heute können wir das

periodische System ohne diese chemischen Kenntnisse aufbauen, und durch die Quantentheorie findet die Mendelejewsche Ordnung vollends ihre Begründung. Als Grundordnungsprinzip des Systems diene zunächst das (verschiedene) Atomgewicht der Elemente. Zu dessen Bestimmung war es jedoch nicht etwa notwendig, ein Atom zu wiegen, was auch gänzlich unmöglich ist.

Wir wollen einmal speziell die Gase betrachten. Nach der genannten Avogadro'schen Hypothese enthalten ja alle Gase bei gleicher Temperatur und gleichem Druck in einem Liter dieselbe Zahl von Molekülen. Sind die Molekeln aber nur aus einer Atomsorte gebildet, wie etwa  $H_2$  und  $O_2$ , dann enthalten die miteinander verglichenen Raunteile verschiedener Gase die gleiche Zahl von Atomen. Das heißt, wir betrachten nur die Gase der Elemente, nicht die von Verbindungen. Wir haben also je einen Liter Wasserstoff, Sauerstoff, Helium, Chlor, Stickstoff, Neon usw. vor uns. Bestimmt man das Litergewicht und dividiert durch die Zahl der Atome, so erhält man schließlich das Gewicht eines einzelnen Atoms. In der Physik werden Gewichte in Gramm angegeben, und wollte man ebenso die „Atomgewichte“ in dieser Einheit angeben, so wären die Zahlen sehr klein. Aber man braucht bei den Berechnungen das absolute Gewicht eines Atoms überhaupt nicht. Man führt Verhältniszahlen als sogenannte Atomgewichte ein. Dabei wird das Verhältnis der Gewichte von einem Liter eines Gases zu einem Liter Wasserstoff gebildet, oder was dasselbe ist, das Verhältnis des Gewichtes vom Atom irgendeines Elementes zu dem des Wasserstoffatoms. Dadurch werden die entsprechenden Zahlen größer und einprägsamer. Ein Liter Sauerstoff wiegt 1,429 Gramm und ein Liter Wasserstoff 0,08995 Gramm. Bildet man das Verhältnis vom Sauerstoff zum Wasserstoffgewicht (1,429 : 0,08995), so erhält man das Atomgewicht des Sauerstoffs zu 15,9, wobei das Gewicht des Wasserstoffes mit 1 angenommen wird. Das Sauerstoffatom ist demnach 15,9mal schwerer als das Wasserstoffatom. Für den Stickstoff ergibt sich auf diesem Wege ein Gewicht von etwa 13,9. Es erwies sich jedoch auf Grund der überwiegenden Anzahl von Sauerstoffverbindungen als zweckmäßiger, diesem ein ganzzahliges Atomgewicht zuzuordnen, nämlich 16. Dadurch ändert sich dann das Atomgewicht des Wasserstoffes etwas ab in 1,0078, und die Atomgewichte sind nun nicht mehr Vielfache des Wasserstoffgewichtes, sondern von  $\frac{1}{16}$  des Sauerstoffgewichtes, das jetzt die Einheit bildet.

Das Atomgewicht eines Elementes ist also diejenige Zahl, die angibt, wievielmals schwerer ein Atom des betreffenden Elementes ist als ein Atom Wasserstoff, oder genauer, wievielmals schwerer ein Atom eines Elementes ist als  $\frac{1}{16}$  vom Gewicht eines Sauerstoffatoms. Das Atomgewicht ist dimensionslos.

In der auf Seite 15 erläuterten Wassersynthese haben wir unter anderem festgestellt, daß sich ein Molekül Wasser aus zwei Atomen Wasserstoff und einem Atom Sauerstoff zusammensetzt. Die beiden Wasserstoffatome haben an dem

Gewicht des Moleküls den Anteil 2 (keine Dimension), jedes Atom wiegt 1, beide zusammen also 2. Das Sauerstoffatom wiegt 16, und so ergibt sich schließlich das Molekulargewicht des Wassers zu  $18 (2 \cdot 1 + 16 = 18)$ . Das Molekulargewicht ist somit ganz einfach die Summe der Atomgewichte aller am Bau des Moleküls beteiligten Atome. Aus Gründen der Zweckmäßigkeit benutzt man in der Chemie noch das sogenannte Gramm-Mol und auch das Gramm-Atom, das sind die in Gramm ausgedrückten Molekular- oder Atomgewichte. Ein Mol (beim Gramm-Mol läßt man das „Gramm“ häufig weg) Wasser wiegt demnach 18 Gramm, ein Gramm-Atom Sauerstoff 16 Gramm und ein Gramm-Atom Wasserstoff 1 Gramm.

Mendelejew ordnete zunächst die Elemente nach steigendem Atomgewicht. Das erste Element im periodischen System (siehe Tabelle V) ist also der Wasserstoff, daneben stellte er das Helium. Mit diesen beiden war aber bereits eine sogenannte Periode zu Ende; das nächste Element kam schon in einer neuen Reihe unter dem Wasserstoff zu stehen. Es war dies das Element Lithium, und auf dieses folgten nun aber sieben weitere Elemente, so daß diese Reihe insgesamt acht Elemente enthält. Nach dem achten wird die Periode mit dem Neon abgebrochen, und es beginnt mit dem Natrium eine neue Reihe oder Periode. Aus der Tabelle ersehen wir, daß es insgesamt sieben solcher Perioden gibt. Die in einer Vertikalreihe untereinander stehenden Elemente bilden eine sogenannte Gruppe oder Familie, von denen insgesamt acht vorhanden sind. Alle untereinander stehenden Elemente sind miteinander verwandt, sie besitzen mindestens eine übereinstimmende Wertigkeit oder Valenz. In der Chemie stellt man sich von einem Atom der Wertigkeit 3 vor, daß es drei „Arme“ hat, mit denen es sich drei einwertige oder ein dreiwertiges Atom heranholen kann und festhält. Sauerstoff hat die Wertigkeit 2, ein Atom davon kann also ein zweiwertiges oder zwei einwertige Atome an sich binden. Die Valenzen sind also gewisse Kräfte, mit denen sich die Atome zum Molekül aneinanderbinden. Diese Kräfte deutet der Chemiker durch Striche an den Symbolen der Elemente an. Für das Wasser sieht dies etwa so aus:

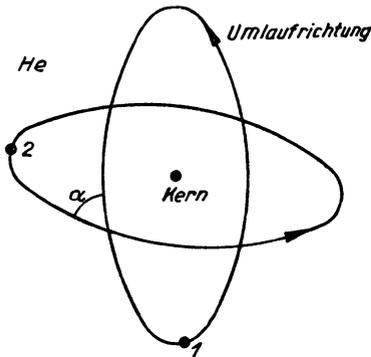


Wie man sieht, hat das Sauerstoffatom zwei „Arme“, es ist zweiwertig; das Wasserstoffatom hat nur einen Arm, es ist also einwertig. Ein Element, das die Wertigkeit 5 hat, kann sich mit einem Element verbinden, das zweiwertig ist, und gleichzeitig mit einem, das dreiwertig ist; dann sind seine Valenzen abgesättigt. Zu dem so gebildeten Molekül kann kein weiteres Atom hinzutreten; es würde nicht gebunden, nicht festgehalten werden. Die Valenzkräfte zeigen die Eigenart der Absättigung. Ein Element, das zum Beispiel in der Gruppe VI steht, hat aber nicht nur die Wertigkeit 6; so kommt der Schwefel zum Beispiel auch noch in verschiedenen anderen Wertigkeiten vor. Die Elemente der Gruppe VII haben eine größte Wertigkeit von 7.

Die Zahlen der zu einer Periode gehörenden Elemente zeigen ein merkwürdiges Spiel. Die erste Periode hat 2 Elemente, die nächsten beiden haben je 8, die beiden nächsten je 18, die sechste Periode hat 32 Elemente, und die siebente ist unvollständig mit derzeit 12 Elementen. Diese Periodenzahlen, also 2, 8, 18 und 32, lassen sich folgendermaßen schreiben:  $2 \cdot 1^2$ ,  $2 \cdot 2^2$ ,  $2 \cdot 3^2$  und  $2 \cdot 4^2$ . Schon früher wurde man darauf aufmerksam, ohne die Dinge aber erklären zu können. Durch die Quantentheorie fanden sie jedoch ihre Aufklärung. Wir kommen deshalb auf den Bau der Atome nochmals zurück.

Nach der Bohrschen Auffassung haben wir uns also das Atom als einen Kern vorzustellen, um den die Elektronen auf gewissen Bahnen (wir haben nur Kreisbahnen angenommen) umlaufen. Der Kern trägt positive Ladung, und zwar gerade soviel, wie die Hausnummer im periodischen System angibt. Entsprechend hierzu muß die Zahl der Elektronen mit zunehmender Ordnungszahl beständig ansteigen. Sauerstoff hat die Ordnungszahl 8, was einer Kernladungszahl von 8 positiven Ladungen und entsprechend 8 Elektronen gleichkommt. Wie hat man sich nun die Vielzahl der Elektronen nach dem Bohrschen Modell angeordnet vorzustellen?

Nach diesem Modell ist jede Bahn durch die „Hauptquantenzahl“  $n$  bestimmt. Diese Zahl  $n$  stimmt aber mit der Periodenzahl im periodischen System überein.



$\alpha \sim$  Bahnneigungswinkel  
1, 2  $\sim$  Elektronen

Bild 26

Man denkt sich nun die Elektronen in gewissen Gruppen um den Kern angeordnet, und zwar in Form von Schalen oder Hüllen; man spricht von Elektronenschalen oder Elektronenhüllen. Das Helium besitzt zwei Elektronen, die aber nicht etwa hintereinander herlaufen. Jedes Elektron hat seine eigene Bahn, das gilt grundsätzlich für alle Elektronen. Im Grundzustand haben beide Elektronen den gleichen Abstand vom Kern, daher müssen ihre Bahnen gegeneinander geneigt sein, etwa so wie in Bild 26 gezeigt. Die beiden Bahnen liegen somit auf einer Kugelschale, diese ist aber mit den zwei Elektronen bereits voll besetzt. Käme ein weiteres Elektron hinzu, so kann es nicht mehr in dieser Schale Platz finden, also nicht in demselben Abstand vom Kern wie die anderen

beiden umlaufen. Beim Element Lithium muß bereits eine neue Schale angebaut werden, auf der nun das eine neu hinzugekommene Elektron Platz findet. Die

hinzugekommene Schale kann jetzt aber mehr Elektronen aufnehmen, gerade soviel, wie die Periode umfaßt; das sind 8 Elektronen. Man gibt den einzelnen Schalen noch einen Namen; so heißt die innerste die K-Schale, die darauf folgende die L-Schale, dann folgt die M-Schale, die N-Schale usw. Die einzelnen Schalen unterscheiden sich durch den verschiedenen Abstand, den sie vom Kern haben, und durch die verschiedene Anzahl der Elektronen, die sich auf ihnen befinden.

In Tabelle IV (s. Anhang) sind die Zahlen der Elektronen in den einzelnen Schalen angegeben. Die K-Schale enthält ein Elektron, das ist beim Wasserstoff der Fall, oder 2 Elektronen beim Helium. Element Nummer 3, Lithium, hat 3 Elektronen, von denen 2 in der K-Schale kreisen und das dritte sich in einer neuen Schale, der L-Schale, befindet. Mit 2 Elektronen ist nämlich die innerste Schale bereits abgesättigt oder voll besetzt. Die Anlagerung von weiteren Teilchen geschieht durch die Hinzunahme von neuen Schalen. Die L-Schale kann bis zu 8 Elektronen aufnehmen, dann ist sie gleichfalls abgesättigt. Das entspricht dem Element Neon. Der Abstand oder die Bahnentfernung der einzelnen Schalen vom Kern wird durch die schon erwähnte Hauptquantenzahl  $n$  bestimmt oder charakterisiert. Dem Wert  $n = 1$  entspricht die innerste Schale (K), dem Wert  $n = 2$  die L-Schale, der Zahl  $n = 3$  die M-Schale usw. Aus der Tabelle ist zu ersehen, daß die Edelgase eine besondere Rolle hinsichtlich des Schalenbaus spielen. Die sogenannte Edelgaskonfiguration, so nennt man den Elektronenaufbau dieser Elemente, zeigt eine gewisse Sättigungserscheinung. Beim Helium ist die Schale mit 2 Elektronen abgeschlossen, beim Neon mit 8. Beim Argon tritt nochmals eine Schale (M) mit 8 Elektronen auf, in Übereinstimmung damit, daß die zweite und dritte Periode je acht Elemente enthalten. Die nächste Edelgaskonfiguration wird mit dem Element 36, dem Krypton erreicht, dessen Schalen allerdings, wie schon beim Argon die M-Schale, nicht vollständig besetzt sind. Die M-Schale kann insgesamt 18 und die N-Schale sogar 32 Elemente aufnehmen. Das hat seinen Grund darin, daß die vierte und fünfte Periode gleich viele Elemente enthalten und vom Element 19 (Kalium) an beide Schalen, die M- und N-Schale, weiter aufgefüllt werden, bis mit der Nummer 36 die erstere schließlich gefüllt ist. Von Nummer 37 an, dem Rubidium, wird gleichzeitig an der N- und O-Schale gebaut, bis die erste wiederum mit dem Xenon einen gewissen Abschluß erreicht. Es werden also nicht immer nur die äußersten Schalen aufgefüllt, sondern hier in der letzten und vorletzten Schale zusammen die Elektronenzahlen gesteigert. Die Rolle der Edelgase ist dem Chemiker schon lange bekannt; sie sind reaktionsträge und gehen keine Verbindungen mit anderen Elementen ein, was durch die Abgeschlossenheit ihrer Schalen zu erklären ist.

Die Schalen stellen nur ein anschauliches Hilfsmittel dar, denn man kann aus manchen Gründen nicht von einer Schale im eigentlichen Sinne sprechen. Die

Elektronen kreisen auf Bahnen, und selbst bei vielen davon, wie zum Beispiel in der N-Schale, wo sich ab Element 72 (Hafnium) 32 Elektronen in einer Schale befinden, gibt es nun 32 verschiedene Bahnen; eine Schale ist aber eine Fläche und eine Bahn nur eine Linie. Trotzdem ist der Begriff nicht abwegig, wenn man sich die Kleinheit des Ganzen und das somit dichte Gewimmel mit unseren Maßen gemessen vorstellt. Nur uns erscheint es, als ob die vielen Elektronenbahnen sehr dicht zusammenliegen und dadurch einen flächenhaften Charakter haben. Wenn man sich jedoch einmal an die atomaren Größenverhältnisse erinnert, bei denen sich auf der innersten Schale in unseren auf Seite 45 angegebenen Größenverhältnissen die beiden Elektronen von etwa 50 Zentimeter Durchmesser in 5 Kilometer Entfernung um den kleinen Kern bewegen, so wird das auch noch kein Gewimmel, wenn sich 32 Elektronen in noch größerer Entfernung (dadurch ist ja die Schale noch aufgebläht) um den winzigen Kern drehen. Der Begriff dieser Elektronenschalen oder Elektronenhüllen ist also nicht besonders glücklich gewählt, wenn er auch anschaulich ist. Beim Element Nummer 92 bewegen sich auf insgesamt 7 Schalen 92 Elektronen um den Kern, eine Feststellung, die allerdings einen gewissen Reiz in sich birgt; man möchte sich dieses Rennen direkt einmal ansehen. Die Atome zeigen hinsichtlich der Abtrennung ihrer Elektronen ein durchaus unterschiedliches Verhalten. Will man beispielsweise dem Lithium das eine Elektron der L-Schale entreißen, so ist hierzu eine wesentlich geringere Ionisierungsenergie notwendig als zur Abtrennung eines der beiden Elektronen des Heliums. Für den ersten Prozeß sind etwa 5,4 eV und für den zweiten schon etwa 24,5 eV notwendig, also fast fünfmal soviel Energie. Auch daraus kann man ersehen, daß die Edelgaskonfiguration sehr stabil ist. Hingegen läßt sich allen einwertigen Metallen das sogenannte Valenz- oder Leuchtelektron, das sich immer in der äußersten Schale befindet, am leichtesten entreißen. Ein elektrisch neutrales Atom, dem eine gewisse Anzahl Elektronen entrissen wird, das also positiv geladen zurückbleibt, nennt man Ion, genauer positives Ion. Es gibt auch Fälle, in denen ein Atom Elektronen in die nicht aufgefüllten Schalen aufnimmt, so daß es dadurch negativ geladen erscheint; ein solches Ion nennt man dann im Gegensatz zu dem vorigen ein negatives Ion. Auf eine Besonderheit des periodischen Systems der Elemente müssen wir noch näher eingehen. An der Stelle 57 des Systems steht das Element Lanthan; die darauffolgenden Elemente Nummer 58 bis 71 stehen aber nicht in den nächsten Vertikalreihen, sondern mit dem Lanthan in derselben Gruppe; diese Elemente nehmen also gewissermaßen die gleiche Stelle im System ein. Dazu war man bei der Aufstellung des periodischen Systems gezwungen, wollte man nicht die Periodizität wieder zerstören, die sich auf Grund der chemischen Ähnlichkeit ergab. Diese sogenannten seltenen Erden zeigen eine feinere Abstufung in ihrem Verhalten als die übrigen Elemente. Die Bezeichnung dieser

Metalle als seltene Erden ist historisch bedingt und besitzt heute keine sachliche Gültigkeit mehr. Viele der seltenen Erden kommen weit häufiger vor als zum Beispiel Zinn oder Jod. Heute nennt man diese Elemente nicht mehr seltene Erden, sondern Lanthaniden, weil sie auf das Element Lanthan folgen.

Das übereinstimmende Verhalten läßt sich an Hand des Schalenbaus dieser Elemente erklären. Vom Lanthan ab befinden sich in den aufgefüllten K-, L-, M-Schalen 2, 8 und 18 Elektronen, die N-Schale hat bei diesem Element ebenfalls 18 Partikel und die O- und P-Schale 9 beziehungsweise 2 Elektronen. Statt daß nun bei den folgenden Elementen, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium usw., die äußerste Schale, also die P-Schale weiter aufgefüllt wird, geschieht dies mit der drittletzten, der N-Schale, also weiter innen, in größerer Nähe des Kerns. Dadurch sind die Elektronen, die sich bis zum Element 71, dem Cassiopeium, auf insgesamt 32 erhöhen und sich somit in der am stärksten besetzten Schale befinden, auch fester an den Kern gebunden. Die Coulombkraft des Kernes ist in geringerer Entfernung natürlich größer. In den beiden weiter außen liegenden Schalen, der O- und P-Schale, bleibt die Elektronenzahl ständig bis zum Cassiopeium hin gleich. Das chemische Verhalten eines Elementes wird nun aber weitgehend durch die in der äußersten Schale befindlichen Elektronen bestimmt. Die Zahl der Elektronen in den beiden letzten Schalen ist aber wie gesagt bei den seltenen Erden genau gleich, woraus sich ihr sehr wenig unterschiedliches chemisches Verhalten erklären läßt.

### *8. Magnetisches Moment und Elektronenspin*

Während seiner Bewegung um den Kern gibt das Elektron nach der Bohrschen Forderung keine elektromagnetische Energie ab, solange es sich auf den stationären Bahnen befindet und kein Übergang vorkommt. Im Innern des Atoms besteht jedoch ein elektrisches Feld zwischen dem Kern und dem Elektron. Nach den elementaren Gesetzen der Elektrodynamik bedeutet die Bewegung von Elektrizitätsatomen das Fließen eines Stromes. Der Transport von elektrischer Ladung wird von uns als Strom wahrgenommen. Wenn das Elektron bei seiner Bewegung auch nicht strahlt, so stellt es doch einen winzigen Strom im Atom dar (man nennt das gewöhnlich inneratomare Ströme); denn die mitbewegte Ladung wird ja in einer Sekunde einige Tausend Billionen Mal durch jeden Bahnpunkt hindurchgetragen. Der Elektrizitätstransport in metallischen Leitern wird nach unserer heutigen Auffassung durch die freien Elektronen, das heißt an die nicht an die Atome gebundenen Elektronen des betreffenden Metalls besorgt. Die Stromstärke ist die je Sekunde durch den Querschnitt des Leiters transportierte Ladung. Durch einen Punkt einer Elektronenbahn kommt in jeder Sekunde immer die gleiche Ladungsmenge hindurch. Eine Elementarladung multipliziert mit der Anzahl der Umläufe ergibt den

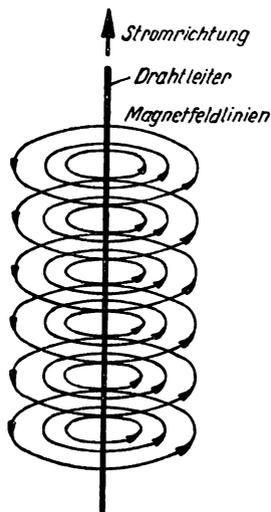


Bild 27

herum, also entgegen dem Uhrzeiger, so treten die Kraftlinien von oben nach unten durch, sie sind nach unten gerichtet; läuft der Strom rechtsherum, also im Uhrzeigersinn, so haben die Kraftlinien die Richtung von unten nach oben, wie Bild 28 zeigt. Die Drahtschleife wirkt jetzt wie ein kleiner Stabmagnet. In einiger Entfernung von der Fläche kann man die Wirkung dieser stromdurchflossenen Drahtschleife durch einen auf der Fläche senkrecht stehenden Stabmagneten ersetzen, mit anderen Worten, unsere Schleife verhält sich wie ein Stabmagnet mit Nord- und Südpol. Man kann die aus einem Stabmagneten austretenden Kraftlinien genau wie elektrische Kraftlinien sichtbar machen. So stellen die Atome durch die bewegte elektrische Ladung des Elektrons einen kleinen atomaren

inneratomaren Strom  $i = f \cdot e$ . Darin ist  $f$  die Zahl der Umläufe in einer Sekunde, die Bahnfrequenz, und  $e$  die Elektronenladung. Man kann das mit einer Drahtschleife vergleichen, in der ein konstanter Strom fließt.

Nun ist aber dem Leser sicher bekannt, daß sich ein elektrischer Leiter, in dem ein Strom fließt, stets mit einem magnetischen Feld umgibt. Wir zeigen in Bild 27 einen geraden Draht, der von einem zeitlich konstanten Strom durchflossen wird. Die letztgenannte Einschränkung ist notwendig, weil sich bei zeitlicher Änderung eines Magnetfeldes eine elektromagnetische Welle vom Draht ablöst und im Raum ausbreitet. Dann hätten wir also eine kleine Antenne vor uns, ein System, das Energie abstrahlt. Biegt man den geraden Leiter zu einer Schleife zusammen, so wird die in der Schleife liegende Fläche von den magnetischen Kraftlinien durchsetzt, die von unten nach oben oder umgekehrt gerichtet sind, je nach der Richtung des Stromdurchganges. Läuft dieser links-

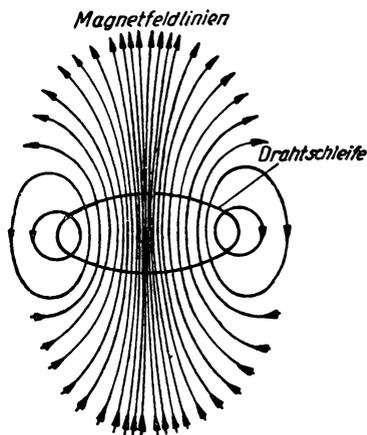


Bild 28

Magneten dar, und je nach der Umlauf-  
richtung des Elektrons, ob links- oder  
rechts herum, zeigen die Magnetlinien  
nach oben oder unten (Bild 29). Ein  
magnetischer Körper vermag aber andere  
magnetische Körper anzuziehen oder  
abzustoßen, je nach den Polen, die sich  
gerade gegenüberstehen. Gleichnamige  
Pole stoßen sich ab und ungleichnamige  
ziehen sich an, ähnlich wie bei den  
elektrischen Ladungen. Würde ein

Elektron auf einer bestimmten Bahn schneller werden, wobei der Bahnradius  
derselbe bleiben soll, so würde damit die Stromstärke und zugleich die  
magnetische Feldstärke ansteigen, das Magnetchen wäre in der Lage, etwas  
größere magnetisierte Körper als zuvor anzuziehen. Daß ein Atom ein magneti-  
sches Moment besitzt, läßt sich experimentell nachweisen.

Wenn wir uns einer Kompaßnadel mit einem anderen Magneten nähern, so stellt  
sich diese immer in einer ganz bestimmten Richtung ein. Die Richtung, aus der  
wir uns mit dem Stabmagneten nähern, ist dabei völlig gleichgültig; immer  
dreht sich die Nadel so, daß eine der Spitzen auf den angenäherten Pol des  
Magneten hinweist. Die kleine Kompaßnadel umgibt sich mit einem magnetischen  
Feld, und nähern wir uns mit dem gleich-  
falls von einem Magnetfeld umgebenen  
Stabmagneten, so treten die beiden  
Magnetfelder in Wechselwirkung mit-  
einander. Ist nun, wie in unserem Fall,  
einer der Magneten drehbar gelagert, so  
übt der andere eine Richtwirkung auf  
ihn aus; die beiden Magnete stellen sich  
immer in die gleiche Richtung ein.

Ähnlich liegen die Verhältnisse beim Atom.  
Läßt man auf die Atome in einem atoma-  
ren Gas, beispielsweise Silberdampf, ein  
äußeres Magnetfeld einwirken, so werden  
die kleinen Magnete eine gewisse Ein-  
stellung zum äußeren Felde zeigen. Sehr  
bekannt geworden sind die Versuche von  
Stern und Gerlach. Sie brachten einen  
Silberdampfstrahl (die Silberatome bil-  
den keine Moleküle) in ein sehr starkes,  
aber ungleichförmiges Magnetfeld. Man

Bild 29

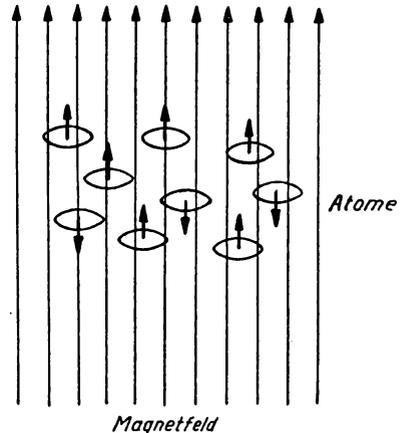
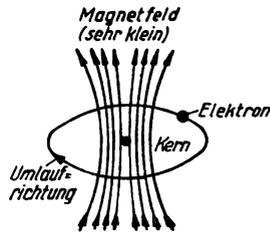


Bild 30

versteht darunter ein Feld, dessen Feldstärke sich zwischen den Polen in Richtung auf diese zu ändert, also je nach dem Betrachtungsstandpunkt in Richtung auf den einen Pol zu abnimmt oder umgekehrt in Richtung auf den anderen hin zunimmt. Die Silberatome zeigten nur zwei Einstellungsrichtungen der Atome, und zwar die parallele mit dem Feld verlaufenden Richtung und die antiparallele, die dem wirkenden Feld entgegengesetzt ist (Bild 30).

Wir wollen diese Verhältnisse etwas näher betrachten. Als weitere Erscheinung, die durch den Elektronenumlauf bedingt ist, haben wir also die Magnetwirkung kennengelernt. Stellen wir uns wieder die Atome eines atomaren Gases vor, wie sie in einem Gefäß durcheinanderschwirren. Wir wollen annehmen, daß es Wasserstoffatome sind (das soll nur zur Vereinfachung des Nachfolgenden angenommen werden; denn Wasserstoffatome lagern sich ja gewöhnlich zu zweit zu Molekülen zusammen). Die Atome selbst denken wir uns also als kleine Scheibenaggregate, wie im Bild 31 gezeigt. Dreht sich das Elektron links

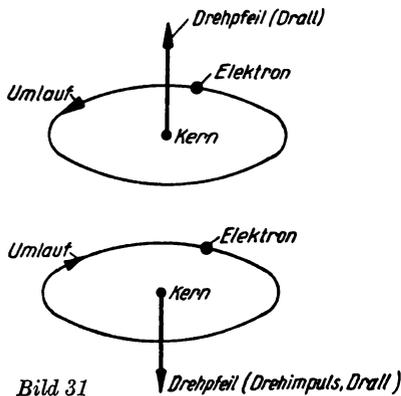


Bild 31

um den Kern, so ordnen wir ihm einen Pfeil zu, der nach oben zeigt; dreht es sich rechtsherum, dann geben wir ihm einen nach unten zeigenden Pfeil. Dieser stellt also gewissermaßen die Drehachse dar, die durch den Mittelpunkt des Kerns geht (der Kern soll sich innerhalb des Atoms nicht drehen). Gleichzeitig legt der Pfeil in der vereinbarten Weise stets die Drehrichtung des Elektrons fest; das Elektron umkreist diesen Pfeil, wenn man in Pfeilrichtung blickt, immer im „Rechtsdrall“. In der Physik und noch mehr in der Technik hat man die Gewohnheit, mit der Länge eines Pfeiles die Größe seines Darstellungswertes zu kennzeichnen, man denke an die Kraft-

pfeile. Je länger dort ein Pfeil ist, um so größer ist die Kraft, die er versinnbildlicht. Auf unseren Fall angewendet heißt das: Die Länge des Pfeiles legt die Größe des Drehimpulses fest. Die Pfeile sollen uns hier nicht weiter interessieren; im besonderen benutzen wir ihre Länge (Größe) nicht. Dies wurde nur erwähnt, um zu zeigen, daß man mit Pfeilen nicht nur die Richtung irgendeiner Größe (Kraft, Geschwindigkeit, Drehachse), sondern auch ihren Wert festlegen kann. -

Von zwei Elektronen hat dasjenige den größten Drehimpuls, das bei gleicher Entfernung vom Kern eine größere Geschwindigkeit besitzt, oder dasjenige,

welches bei gleicher Geschwindigkeit beider Partikel weiter vom Kern entfernt ist. Durch den Drehimpuls wird aber das magnetische Moment des Elektrons mitbestimmt. Dieses ist von der umschlossenen Fläche und vom Strom abhängig. Dreht sich das Elektron schneller auf gleicher Bahn, so kommt in einer Sekunde durch einen Punkt der Bahn mehr Ladung hindurch; der Strom steigt an, und die magnetische Wirkung wird somit größer. Es erhöht sich die Zahl der durch die umlaufende Fläche hindurchtretenden magnetischen Kraftlinien und damit die Feldstärke. Man sagt, die Kraftliniendichte wird größer. Dreht sich das Elektron aber mit derselben Geschwindigkeit auf einer weiter entfernten Bahn, so ist die umschlossene Fläche bei gleicher Stromstärke größer geworden, und somit erhöht sich die magnetische Wirkung ebenfalls. Es gilt die Beziehung  $m = i \cdot F$ . Dabei bedeutet  $i$  die Stromstärke,  $F$  stellt die umschlossene Fläche und  $m$  das magnetische Moment, die Magnetwirkung dar. Zwischen dem Drehimpuls und dem magnetischen Moment besteht also ein direkter Zusammenhang.

Die Gasatome nehmen aber im Raum eine beliebige Orientierung ein; ihre Impulspeile zeigen in alle möglichen Raumrichtungen. In Bild 32 werden mehrere Atome mit verschiedenen Orientierungen im Raum angedeutet. Schaltet man nun ein magnetisches Feld von außen ein, etwa indem man das Gefäß zwischen die Polschuhe eines großen Elektromagneten bringt, so stellen sich die Achsen der Atome bezüglich des eingeschalteten Feldes in bestimmte Richtungen ein. Zur Vereinfachung haben wir in Bild 32 Wasser-

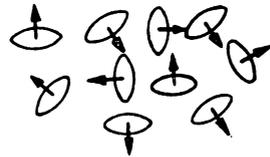


Bild 32

stoffatome gezeigt; diese stellen sich im äußeren Magnetfeld ebenso wie die Silberatome nur in zwei Richtungen ein, parallel und entgegen dem Felde. Für die weiteren Ausführungen legen wir daher andere Atome zugrunde, erlauben uns aber bei den folgenden Bildern, das Atom nur einfach durch den Kern und eine Elektronenbahn darzustellen, ohne damit Wasserstoffe zu meinen.

Diese Einstellung der Atomachsen gegen die Richtung eines äußeren Magnetfeldes, also der Winkel zwischen Feldrichtung und Achsenrichtung, wird durch eine Zahl charakterisiert, die sogenannte Magnetquantenzahl  $m$ . Wir haben schon die Hauptquantenzahl  $n$  kennengelernt, welche die Energie eines atomaren Systems kennzeichnet. Nach unserer elementaren Darstellung gibt sie auch die Schalen an, in denen sich die einzelnen Elektronen gerade befinden. Die Magnetquantenzahl  $m$  legt die Orientierung des kreisenden Atomsystems gegen die Magnetfeldrichtung fest, die jenes beim Einschalten eines Magnetfeldes annimmt. Wir hatten vorausgesetzt, daß die Achsen im ungestörten Zustand des Systems, also ohne äußeres Magnetfeld, alle möglichen Richtungen im

Raum annehmen und durch das äußere Feld in bestimmter Weise ausgerichtet werden. Dabei kommen nur ganz bestimmte Richtungen gegen das Magnetfeld in Frage. Die Zahlen  $m$  sind gequantelt, das heißt nur einzelner Werte fähig, die voneinander einen bestimmten Abstand haben. Man nennt die durch das Magnetfeld vorgenommene Orientierung der Drehimpulsachsen Richtungsquantelung. Wir wollen auf diese Dinge im einzelnen nicht näher eingehen und noch kurz einen weiteren Begriff der Atomphysik erläutern. Es ist dies der sogenannte Spin, ein Wort, das aus dem Englischen kommt und als Verb soviel wie „sich drehen“ bedeutet.

An einem Beispiel der Himmelsmechanik wollen wir uns den Begriff etwas veranschaulichen. Die Erde bewegt sich um die Sonne auf einer elliptischen, nahezu kreisförmigen Bahn. Dabei hat sie also einen gewissen Bahndrehimpuls, hervorgerufen auf Grund der Drehung um die Sonne. Die Drehachse charakterisieren wir wieder durch einen Pfeil (Bild 33). Außerdem führt die Erde während des Umlaufs noch eine Drehung um ihre eigene Achse aus. Sie dreht sich

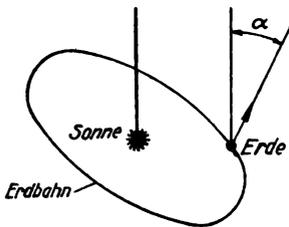


Bild 33

auf ihrer Bahn in einem Jahr einmal um die Sonne herum, dazu an einem Tag einmal um ihre eigene Achse. Den Eigendrehimpuls der Erde kann man nun als Spin bezeichnen; jedenfalls stellt er das dar, was man im Falle des Elektrons als den Spin bezeichnet. Dieser ist also der Eigendrehimpuls des Elektrons. Dem Eigendrehimpuls läßt sich wieder ein Drehpfeil zuordnen, der Größe und Richtung der Rotation des Elektrons kennzeichnet. Es gilt auch hier ähnliches wie für die Umlaufbewegung des Elektrons; der Spin hat ein magnetisches Moment zur Folge. Beim Einschalten eines äußeren Magnetfeldes zeigt auch

das Elektron gewisse Einstellungen zum Feld, in der gleichen Weise wie zuvor geschildert. Der Spin ist also gleichfalls gequantelt und nur ganz bestimmter Werte fähig, je nach der Größe des Eigendrehimpulses. Das bedeutet schließlich, daß sich die Elektronen nicht mit beliebiger Geschwindigkeit drehen können. Es ist an dieser Stelle abermals notwendig, darauf hinzuweisen, daß die Eigenrotation eines Elektrons noch niemals beobachtet worden ist, so daß man schwerlich behaupten darf, der Spin sei hierdurch verursacht. Das Elektron verhält sich nach unserer Feststellung wie ein kleiner Kreisel; die jetzige Physik zweifelt aber daran, daß es sich dabei um einen Kreisel handelt.

Alle Partikel, und im besonderen das Elektron, bereiten heute hinsichtlich ihrer Auffassung noch allergrößte Schwierigkeiten. Die Theorie vereinfacht sich zunächst den Sachverhalt durch Annahme punktförmiger Teilchen und verstrickt sich damit in nicht gerade kleine Schwierigkeiten. Manche von uns

werden der Meinung sein, daß es aber doch punktförmige Korpuskel nicht geben kann, daß die Teilchen doch eine, wenn auch sehr kleine Ausdehnung besitzen, nur können wir die Größe im Moment noch nicht feststellen. Daran mag schon etwas Wahres sein. Beide Vorstellungen führen aber zu Schwierigkeiten und somit zu keiner befriedigenden Lösung der Frage, ob eine Partikel eine Ausdehnung besitzt oder nicht.

Wird das Teilchen als punktförmig angenommen, so ergibt sich seine sogenannte Selbstenergie als unendlich groß, was einer unendlich großen Masse gleich käme und sich somit als absurd erweist. Nach der Relativitätstheorie ist jede

Masse einer gewissen Energie äquivalent, nämlich  $E = m \cdot c \frac{2}{L}$ . Dabei ist  $E$  die Energie und  $m$  die Masse des Systems,  $c_L$  die Lichtgeschwindigkeit. Wird daher  $E$  unendlich groß, so muß  $m$  unendlich groß sein, wie vorhin erwähnt. Die Theorie hilft sich heute mit gewissen Finessen aus dem Dilemma, die aber gekünstelt sind und früher oder später verworfen werden müssen, denn sie befriedigen nicht.

Gibt man hingegen der Partikel eine Ausdehnung, so verliert sie dadurch den Charakter einer unteilbaren Einheit; denn wenn das Elektron eine Ausdehnung hat, die noch so winzig ist, muß die Ladung auf ihm ausgebreitet sein und sich daher noch weiter unterteilen lassen. Die sogenannte Elementarladung stellt dann jedenfalls nicht die kleinste Einheit dar. Der Begriff der Ausdehnung im makroskopischen Sinne widerspricht der Unteilbarkeit in diesem Sinne offensichtlich. Dies alles gilt nicht nur für das Elektron, sondern für jede Art von Partikel, die bekannten und die noch zu entdeckenden.

Wir haben dies nur angeführt, um nicht den Eindruck zu erwecken, als wären alle Probleme gelöst oder zumindest ihre Lösung leicht möglich. Die Schwierigkeiten sind sehr tiefgehend und prinzipieller Natur. Die Eigenrotation eines Elektrons, sein Spin also, ist auch ein Begriff, der keinesfalls zu anschaulich gedeutet werden darf, wenn man sich nicht in große Schwierigkeiten verstricken will.

## 9. Chemische Bindung – Molekülbildung

Wir haben das Atom als ein System erkannt, das aus Kern und Elektronen besteht, und wollen uns nun kurz einige Gedanken darüber machen, wie sich die Atome zu Molekülen verketteten.

Der Kern vereinigt in sich fast die gesamte Masse des Atoms und hat im Normalzustand so viel positive Elementarladungen, wie Elektronen vorhanden sind. In dem von der Kernladung ausgehenden elektrostatischen Feld bewegen sich

die Elektronen. Nach außen hin stellt in diesem Falle das Atom ein elektrisch neutrales Gebilde dar. Die erste Schale enthält immer nur 2 Elektronen (bei voller Besetzung natürlich), die zweite immer nur 8 usw. Die Elektronen umgeben sich gleichfalls mit einem elektrostatischen Feld. Die Elektronen der innen liegenden Schalen üben eine gewisse abschirmende Wirkung auf die in den äußeren Schalen befindlichen Elektronen aus, die der Bindung an den Kern etwas entgegenwirkt; diese Partikel sind daher gewöhnlich weniger fest an das Atom gebunden. Dies trifft besonders für die sogenannten Alkalimetalle zu; das sind die in der ersten Gruppe stehenden Elemente Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium, Cäsium. Diese Elemente haben in der äußersten Schale jeweils nur ein einziges Elektron. Man nennt es das Valenzelektron. Die Ionisierungsenergie fällt in der aufgezählten Reihenfolge vom Lithium zum Cäsium etwas ab. Um also das äußerste Elektron aus dem Atom zu entfernen, es zu ionisieren, braucht man mit steigender Schalenanzahl ständig weniger Energie. So sind beim Lithium 5,37 eV notwendig, beim Cäsium nur noch 3,88 eV. Das bestätigt die zunehmende Wirkung der Abschirmung durch die inneren Elektronenschalen. Beim Lithium liegt zwischen dem Kern und dem Außenelektron nur die K-Schale mit 2 Elektronen, beim Cäsium hingegen sind es 5 Schalen mit insgesamt 54 Elektronen. Auch bei der nächsten Gruppe des periodischen Systems, den sogenannten Erdalkalien Beryllium, Magnesium, Calcium, Strontium und Barium, läßt sich die Abnahme der Ionisierungsenergie mit steigender Schalenanzahl feststellen. Die genannte Energie ist ein Maß dafür, wie fest die einzelnen Außenelektronen an den Kern gebunden sind. Spaltet man auf irgendeine Weise eins oder mehrere der äußeren Elektronen ab, so bleibt das Atom mit entsprechender positiver Ladung zurück. Die zurückbleibenden Elektronen bezeichnet man als Rumpfelektronen. Es ist auch eine Ionisierung derart möglich, daß sämtliche Elektronen weggerissen werden und nur der nackte Kern zurückbleibt. Solche Atome (Ionen) sind hochionisiert; sie haben eine starke elektrische Wirkung infolge der großen positiven Ladung.

Die Außenelektronen bestimmen die chemischen Eigenschaften eines Elementes. Man wird also leicht einsehen, daß alle Alkalimetalle oder alle Erdalkalien hinsichtlich ihrer chemischen Eigenschaften eine gewisse Übereinstimmung zeigen. Die übereinstimmende Zahl der Außenelektronen ist für die Gruppenzugehörigkeit der Elemente maßgebend. Die Edelgase zeichnen sich dadurch vor anderen Elementen aus, daß ihre Schalen voll besetzt sind, und als Folge davon sind sie chemisch träge Elemente, die keine Verbindungen eingehen. Die Edelgaskonfiguration ist von größter Stabilität, das zeigt sich in der Ionisierungsenergie. Diese ist von allen Elementen einer Periode am größten bei den Edelgasen. Ein Vergleich von Lithium und Neon zeigt, daß man zur Abtrennung eines Außenelektrons hier bereits 21,5 eV braucht gegenüber 5,73 eV beim Lithium. Der „Abschirmungseffekt“ macht sich aber auch bei

den Edelgasen bemerkbar; für das Radon (Element 86) beträgt die Ablöseenergie nur noch 10,68 eV.

Alle Elemente zeigen ein bemerkenswertes Verhalten. Diejenigen, die am Anfang einer Periode stehen, die also verhältnismäßig wenig Elektronen in der Außenschale haben, geben diese Elektronen leicht ab und gehen gern in die Edelgaskonfiguration über, das heißt in den Zustand der vollbesetzten Außenschalen. Entreißt man dem Lithium also das eine Valenzelektron, so bleibt die K-Schale mit den beiden Rumpfelektronen übrig. In der Elektronenzahl und Anordnung der Elektronen stimmt der Rest jetzt mit dem Edelgas Helium überein. Trennt man vom Beryllium die zwei Außenelektronen ab, dann bleibt ebenfalls nur die K-Schale übrig, also die Helium-Schale. Die Elemente, deren letzte Schale fast voll besetzt ist, haben gleichfalls die Neigung, in die Edelgaskonfiguration überzugehen, was durch Aufnahme einer entsprechenden Anzahl von Elektronen möglich ist.

Betrachten wir einmal die beiden Elemente Natrium (11) und Chlor (17). Beim ersteren befindet sich in der M-Schale gerade ein einziges Elektron, das Valenzelektron, beim letzteren fehlt gerade ein solches, um diese Schale aufzufüllen und somit die Edelgaskonfiguration zu erlangen. Würden diese beiden Atome einmal einen „Austausch“ vornehmen, indem das Natrium das eine Elektron dem Chlor überläßt, so hätten sie beide das erstrebte Ziel erreicht, beide hätten eine den Edelgasen entsprechende Schale, das Natrium die vom Neon und das Chlor die vom Argon. Dadurch würden sie beide entgegengesetzt geladen erscheinen, das erste einfach positiv und das zweite einfach negativ. Die Ionen müßten sich auf Grund ihrer verschiedenen Ladungen gegenseitig anziehen und so eine haltbare Verbindung miteinander bilden. Dies ist in der Tat beim Kochsalz der Fall; es stellt die Verbindung von Natrium und Chlor dar. Sehen wir uns den Kochsalzkristall einmal

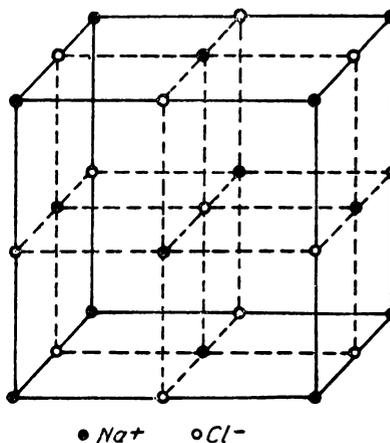
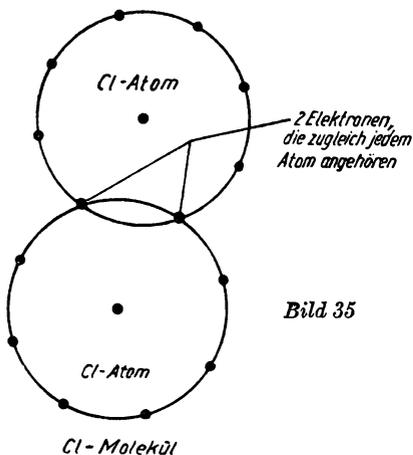


Bild 34

näher an. Die Atome sind regelmäßig angeordnet, so wie es in Bild 34 zu sehen ist. Jedes Ion ist von 6 anderen umgeben, ein Na-Ion von 6 Chlorionen und ein Cl-Ion von 6 Natriumionen. Bei dieser Kristallstruktur ist kein Ion vor

dem anderen ausgezeichnet; man kann nicht sagen, daß ein Na-Ion von 6 Cl-Ionen umgeben ist, wenn man diesen Kristall charakterisieren will; denn jedes Cl-Ion ist genau so von 6 Na-Ionen umgeben.

Diese Anordnung ist aber nicht die allein mögliche; es gibt Kristalle, bei denen ein Ion eine besondere räumliche Stellung einnimmt. Man nennt den Bau der Kristalle Gitter, im besonderen Ionengitter, weil die Bausteine in Ionenform vorliegen. Die Gitterpunkte sind mit den betreffenden Ionen in bestimmter Weise besetzt. Die eingelagerten Ionen halten sich auf Grund der elektrostatischen Anziehungskräfte in ihrer jeweiligen Lage; es gehören schon relativ große Kräfte dazu, um diesen Bau zu zerstören. Derartige Bindungen bezeichnet man als Ionenbindungen oder heteropolare Bindungen (Bindungen mit verschiedener Polarität), da die eine Ionensorte immer positiv und die andere immer negativ ist. Das Element Natrium ist bei Abgabe des äußeren Elektrons einfach positiv geladen; dies bedingt die Wertigkeit oder Valenz eins. Das Magnesium ist bei Abgabe der Außenelektronen zweifach positiv geladen und hat die Wertigkeit zwei. Chlor erscheint nach Aufnahme eines Elektrons in die äußere Schale einfach negativ geladen und hat in dieser Form gleichfalls die Wertigkeit eins.



Eine andere Art der chemischen Bindung ist die, bei der sich gleiche Atome zu einem Molekül zusammenlagern. Ein Chloratom kann auch noch dadurch die Edelgaskonfiguration annehmen, daß sich ein anderes Chloratom mit ihm verbindet, so daß von jedem Atom je ein Elektron gleichzeitig die beiden Atome umkreist. Man sieht dies im Bild 35 schematisch dargestellt, muß aber daran denken, daß die einzelnen Elektronen auf verschiedenen räumlichen Bahnen umlaufen. Die Atome haben also ein gemeinsames Elektronenpaar. Diese Art der Bindung bezeichnet man als homöopolare Bindung oder Atombindung. Homöopolar soll hier soviel bedeuten wie gleichpolarig oder von

gleicher Polarität. Ein typisches Beispiel einer homöopolaren Bindung stellt das  $H_2$ -Molekül dar, bei dem sich zwei Wasserstoffatome zu einem Molekül zusammenlagern. Auch Chlorgas oder Sauerstoff sind weitere Beispiele für diese Bindungsart. Die Kräfte, die in der homöopolaren Bindung wirksam sind, lassen sich nicht mit einfachen Mitteln darstellen. Hier wirken sogenannte Austausch-

kräfte, die dadurch entstehen, daß die erwähnten beiden Elektronen sowohl zu dem einen als auch zu dem anderen Atom gehören. Die Austauschkräfte lassen sich nicht anschaulich darstellen, und wir wollen deshalb hier nicht näher darauf eingehen. Es wird aber einleuchten, daß zwei Wasserstoffatome nicht ohne einen triftigen Grund zusammentreten und zusammenhalten; es müssen natürlich gewisse Kräfte wirksam werden. Sie zu erfassen ist eine Angelegenheit der Quantenmechanik; der klassischen Physik oder der Bohrschen Quantentheorie ist dies nicht möglich.

Neben der heteropolaren Bindung, wie sie bei den Ionengittern der Kristalle auftritt, und der homöopolaren Bindung, die bei den Molekül-gittern zu finden ist, gibt es noch eine dritte, sehr wesentliche Bindungsart oder Kristallgitterart, das ist die sogenannte metallische Bindung oder das Atomgitter.

Im Gegensatz zu den beiden anderen Gitterarten sind hier die Gitterpunkte nicht von Molekülen oder Ionen besetzt, sondern von Atomen, das heißt in diesem Falle von Metallatomen. Es sind hier vor allem drei Arten von Raum-

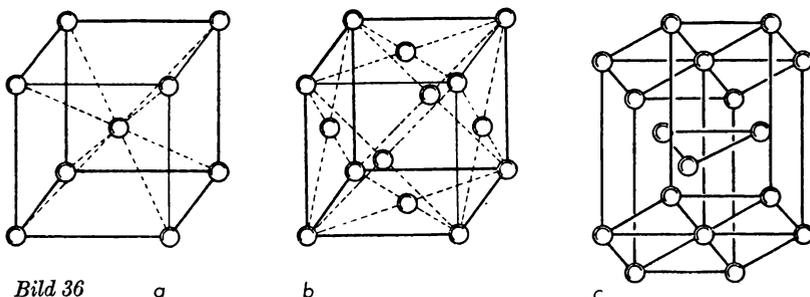


Bild 36

a

b

c

gittern, die sehr häufig vorkommen und die wir in Bild 36 zeigen. Da ist zunächst das kubisch raumzentrierte Gitter 36a; die Atome sind durch Punkte angedeutet. Die geometrische Form ist ein Würfel, in seinem Zentrum ist auch ein Atom angeordnet, und dies ist für das Gitter charakteristisch und gibt ihm seinen Namen. Beispiele für diesen Gittertyp sind die Alkalien Li, Na, K, Rb, Cs.

Der zweite Gittertyp ist das kubisch flächenzentrierte Gitter (Bild 36 b). Seine Kantenlängen sind wie beim ersten Typ gleich, aber das im Zentrum angeordnete Atom fehlt an dieser Stelle. Dafür befinden sich in den Kubusflächen jeweils zentral angeordnete Atome, womit der Name des Gitters seine Erklärung findet. Vor allem die Edelmetalle kristallisieren in dieser Form, also Pt, Au, Ag, aber auch solche Metalle wie Cu, Ni, Pb, Al und verschiedene andere.

Der dritte Gittertyp weicht nun etwas von den beiden vorhergehenden ab; er hat die Gestalt einer Sechsecksäule, wie in Bild 36c zu sehen ist. Man nennt dies hexagonales Gitter, das ist vom griechischen Hexa = sechs abgeleitet und heißt sechseckiges Gitter. Einige Vertreter dieser Gitterart sind Mg, Zn und Ti. Stellt man sich die Atome als Kugeln vor, so sind die genannten Gitter dichteste Kugelpackungen, das heißt, die Mittelpunkte der Atomkugeln befinden sich in den Eckpunkten des Raumgitters, und sie berühren sich gegenseitig so, daß es nicht möglich ist, sie noch weiter zusammenzudrängen, ohne die Gitterform zu zerstören.

Ein wesentliches Merkmal der Metallbindungen ist vor allem darin zu sehen, daß die am Gitter beteiligten Atome nicht sämtliche Elektronen fest an sich binden, sondern nur eine sehr lockere Beziehung zwischen dem Metallelektron, das ist das Valenzelektron, und dem Restatom besteht. Relativ locker sind ja die äußeren Elektronen an den Kern gebunden, was noch durch die abschirmende Wirkung der inneren Elektronenschalen begünstigt wird. So sind es daher auch diese Elektronen, die Valenzelektronen, die ein sehr lockeres Dasein führen und im Metall eine Art Gas bilden; man spricht vom Elektronengas. Gemeint ist eben damit, daß diese Partikel eine große Beweglichkeit zwischen den Metallatomen besitzen und sich etwa so wie ein Gas verhalten. Sie sind für die Elektrizitätsleitung verantwortlich, das heißt, sie bewegen sich zwischen den Gitteratomen hindurch und bewirken so den Ladungstransport. Man nimmt allgemein an, daß jedes Atom etwa ein Elektron abgibt; dadurch bleiben die Atome positiv geladen zurück, und man hat so gewissermaßen ein Ionengitter oder Atomrestgitter, das sich in Wechselwirkung mit dem Elektronengas befindet. Aber auch die Atome liegen nicht in Ruhe an ihren Gitterpunkten; sie führen kleine schnelle Schwingungen aus, die sogenannte Temperaturbewegung. Das Kräftespiel in einem solchen Metall ist kompliziert und auch nicht vollständig erfaßt; wir wollen hierzu keine näheren Ausführungen machen.

Bezüglich der Ionenbildung kann man folgende Feststellung treffen. Es gibt zwei Arten der Wertigkeit, die positive und die negative. Man sagt, daß ein Atom in einer Verbindung positiv  $k$ -wertig ist, wenn es  $k$ -Elektronen aus der äußeren Schale abgegeben hat, oder es ist negativ  $k$ -wertig, wenn es  $k$ -Elektronen aufnimmt. Ein Beispiel ist das Wasser; hier sind die beiden H-Atome positiv einwertig und das O-Atom entsprechend negativ zweiwertig. Die beiden Wasserstoffatome haben ihre Elektronen an das Sauerstoffatom abgegeben, das durch die Aufnahme dieser beiden zweifach negativ geladen wird und den Schalencharakter des Argons besitzt. Die Elemente der ersten Gruppen werden also im allgemeinen ihre Außenelektronen leichter abgeben; man sagt, diese Atome besitzen elektropositiven Charakter. Die Elemente der höheren Gruppen werden im allgemeinen eher Elektronen aufnehmen, um in den Edelgaszustand zu

kommen; man sagt, sie besitzen elektronegativen Charakter. Für die Elemente in den mittleren Gruppen trifft im allgemeinen beides zu. Ihre Atome zeigen sowohl negativen als auch positiven Charakter in den Ionenbindungen. Nimmt beispielsweise der Sauerstoff zwei Elektronen auf, wie bei der Bildung des Wassers, so erscheint er negativ geladen, besitzt also die Wertigkeit zwei. Reißt man ihm sämtliche Außenelektronen ab, so erscheint er sechsfach positiv geladen, also mit der Wertigkeit sechs.

Ein Molekül, das aus Ionen besteht, vereinigt die Ladungen natürlich nicht an einer einzigen Stelle; sie haben einen gewissen Abstand. Wir erinnern uns an das Wassermolekül. Die positiven und negativen Ladungen befinden sich in geringem Abstand von der Größenordnung ihrer Atomdurchmesser voneinander. Zwei Ladungen entgegengesetzter Vorzeichen oder auch gleicher Vorzeichen, die sich ja praktisch nie auf einer Stelle anhäufen lassen, sondern immer einen bestimmten Abstand halten, bilden einen sogenannten Dipol. Wir haben schon einen Dipol kennengelernt; die Kompaßnadel ist ein magnetischer Dipol. Der eine Pol ist der Nordpol, bei dieser Nadel zeigt er ständig nach Norden, jedenfalls solange er allein unter dem Einfluß des Erdfeldes steht; der andere Pol ist der Südpol, der in die entgegengesetzte Richtung weist. Die Nadel verhält sich wie ein frei drehbarer Dipol; bringt man ihn in ein anderes Magnetfeld, beziehungsweise nähert man ihn dem Pol eines Stabmagneten, so dreht er sich in dessen Richtung ein. Genau der gleiche Effekt ergibt sich bei einem drehbaren elektrischen Dipol, wenn man ihn in ein elektrisches Feld bringt. Bei freier Drehbarkeit zeigt er einen Richteffekt. Bringt man die Moleküle einer Flüssigkeit in ein elektrisches Feld, so kann man die molekularen Dipole gleichfalls in gewisser Weise ausrichten.

Die Atome, die durch Ionisation in den Schalen einen Edelgaszustand erreicht haben, zeigen danach eine chemische Trägheit bezüglich neutraler Moleküle, ähnlich wie die Edelgase selbst. Mit solchen nichtelektrischen Molekülen reagieren sie erst, nachdem man ihnen die Elektronen wieder entrissen beziehungsweise die äußere Schale entsprechend aufgefüllt hat. Die Edelgase stellen hinsichtlich ihrer sehr geringen chemischen Reaktionsfähigkeit einen besonders ausgezeichneten Zustand der Elemente dar.

### *10. Quantenzahlen – Pauliprinzip*

Zum Abschluß unserer quantentheoretischen Betrachtungen wollen wir noch einige Ergänzungen hinzufügen, die das Vorangegangene in gewisser Weise vervollständigen und im besonderen eine Erklärung für die Systematik des periodischen Systems der Elemente geben. Wir werden dabei gleichzeitig Gelegenheit haben, bereits früher Angeführtes im Zusammenhang zu wiederholen. Die Theorie von N. Bohr diente der Erklärung der beobachteten Erschei-

nungen in der Mikrowelt und gleichzeitig der Aufklärung der Struktur der Atome. Daß sie heute mehr historischen Wert besitzt, ändert nichts an ihrem Verdienst, der heutigen Quantenmechanik als Grundlage und Führer gedient zu haben. Wenn wir heute besser zu wissen glauben, daß die Atome keine kleinen Planetensysteme sind, wie ursprünglich angenommen, daß man nicht von Elektronenbahnen sprechen darf im üblichen, gewöhnlichen Sinne dieses Begriffes, oder nicht vom Eigendrehimpuls, dem Spin eines Elektrons in der Weise, daß ein Elektron sich um seine eigene Achse dreht wie ein makroskopischer Körper, so kommen wir trotzdem nicht umhin, den Weg der Erkenntnisse über die Bohrsche Theorie zu nehmen. Jeder, der sich mit Atomphysik befaßt, wird sich, bevor er tiefer in die Zusammenhänge eindringt, schon allein wegen ihres methodischen Wertes mit den Modellvorstellungen der Frühzeit quantentheoretischer Betrachtungen auseinandersetzen müssen. Wir wollen hiermit gewissen auftretenden Zweifeln begegnen, die dazu verleiten können, den Wert der Modellvorstellungen für gering zu achten, nur weil sich inzwischen herausgestellt hat, daß diese Dinge sich den neuen Erkenntnissen nicht mehr anpassen lassen und man gezwungen ist, will man dem Experiment folgen oder ihm auch schon etwas vorausseilen, der Anschauung ab zu sagen und sich mit einem bedauernden Achselzucken von ihr zu verabschieden. Als Vorstufe zur eigentlichen Thematik werden die Modelle sicher ihren Wert behalten.

Die Rutherford'schen Versuche hatten gezeigt, daß die Hauptmasse des Atoms in dessen Kern konzentriert ist und der weitaus geringere Teil diesen Kern in irgendeiner Art umgibt. In den Gasentladungen der Geißleröhren (erstmalig von Geißler hergestellt) hatte man es mit dem Leuchten eines Gases zu tun, das sich unter der Einwirkung einer verhältnismäßig hohen elektrischen Spannung, das heißt eines starken elektrischen Feldes, befand. Füllt man diese Röhre zum Beispiel mit Wasserstoffgas, so leuchtet es auf; es gibt nach außen eine Lichtstrahlung ab. Mit den Lichterscheinungen konnte man gut experimentieren; spektrale Untersuchungen waren bereits in großer Zahl angestellt. Beim kontinuierlichen Sonnenspektrum sind die bekannten Farben alle vertreten; sie bilden ein Band stetig ineinander übergehender Farben. Jeder Farbe kommt eine bestimmte Wellenlänge zu, so daß im Sonnenlicht alle Wellenlängen zwischen  $36 \cdot 10^{-8}$  und  $78 \cdot 10^{-8}$  cm vertreten sind. Die Wellenlängen liegen lückenlos nebeneinander, was man als kontinuierlich bezeichnet. Im angegebenen Bereich wird keine Wellenlänge ausgelassen. Anders ist dies bei der von den Atomen ausgesandten Lichtstrahlung. Hier beobachtet man Linienspektren, das heißt, das Spektrum besteht nur aus einzelnen in geringem Abstand nebeneinanderliegenden sehr dünnen Linien, die man teils im Spektralapparat beobachten kann. Jede Linie ist die Abbildung einer Welle. Jeder Linie kommt eine ganz bestimmte Wellenlänge zu. Die Spektroskopie ist das Teilgebiet der Atomphysik, das sich mit der Erforschung aller möglichen Spektren befaßt, die von leuchtenden Stoffen oder Kör-

pern ausgesandt werden. Dies Gebiet ist sehr umfangreich; es senden nicht nur einzelne Atome Strahlungen aus, auch die Moleküle besitzen ihre Spektren. Unterschiede entstehen wieder durch die verschiedene Anzahl von Atomen, die zu einem Molekül gehören; denn dadurch, daß die Atome im Molekül Schwingungen ausführen und diese Schwingungen gequantelt sind, sowie durch die Quantelung der Molekülrotation entsteht bei Anregung ebenfalls ein Linienspektrum. Die Molekülspektren sind äußerst linienreich; man nennt sie Bandenspektren, die vielen Linien geben schon fast ein Band. Die Lichtemission und die Absorption sind die vorliegenden experimentellen Befunde, die also durch die Theorie erklärt werden müssen. Angesichts dieser Tatsachen stellte nun Bohr seine Quantentheorie auf.

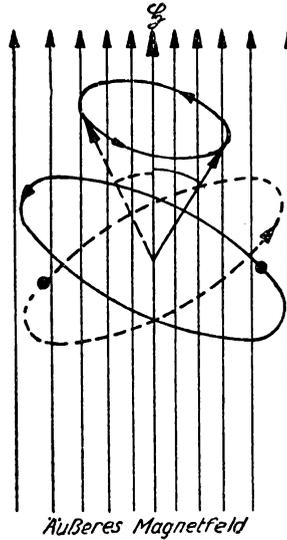
Das Atomsystem Kern-Elektronen befindet sich stets in einem bestimmten energetischen Zustand, das heißt, ihm kommt eine gewisse Energie zu, ganz gleich, ob es sich nun im Grundzustand (dem energieärmsten Zustand) oder in einem angeregten Zustand befindet. Wir können stets sagen, das System hat diesen oder jenen Energiewert. Bohr nahm zunächst als Elektronenbahnen Kreise an; Sommerfeld zeigte, daß dies eine nicht gerechtfertigte Spezialisierung war und man mit derselben Berechtigung Ellipsenbahnen zulassen mußte. Die Analogie zu unserem Planetensystem ist offensichtlich; denn bekanntlich bewegen sich die Planeten auch auf Ellipsenbahnen um die Sonne. Die Atome besitzen mit wachsender Ordnungszahl eine ständig größer werdende Zahl von Elektronen, die man sich, zu Gruppen zusammengefaßt, auf den einzelnen Schalen untergebracht dachte. Die Schalen werden durch die Hauptquantenzahl  $n$  charakterisiert; der innersten Schale (K) entspricht die Zahl  $n = 1$ , der nächsten (L) die Zahl  $n = 2$  usw. Ein Elektron kann sich also in verschiedenen Schalen befinden; sein Zustand läßt sich durch die Zahl  $n$  charakterisieren. Doch ist dies keine eindeutige Festlegung; innerhalb einer Schale kann es noch viele mögliche Bahnen einnehmen, das heißt, durch Angabe der Schale allein ist seine Bahn nicht festgelegt. Es gibt daher noch eine zweite Quantenzahl  $l$ , durch welche die Schalen nochmals unterteilt werden. Die Zahl kann gleichfalls nur ganzzahlige Werte annehmen, natürlich nicht beliebige; denn das würde bedeuten, daß eine Schale beliebig viele Elektronen aufnehmen kann. Das stünde im Gegensatz zu der durch das periodische System bedingten endlichen Anzahl, wobei immer vorausgesetzt ist, daß sich niemals zwei Elektronen zugleich auf einer Bahn befinden. Soweit wäre also der energetische Zustand des Atoms und die Lage der Elektronen eigentlich bestimmt. Es zeigte sich jedoch, wenn man ein atomares Gas zwischen die Polschuhe eines Magneten, also in ein Magnetfeld bringt, daß dann einzelne Spektrallinien nicht mehr an derselben Stelle liegen. Genauer gesagt, es sind mehr Linien geworden; sie scheinen sich aufgespalten zu haben. Für die Aufspaltung spricht der Umstand, daß einzelne Linien schwächer geworden sind und sich in ihrer nächsten Umgebung neue Linien gebildet haben; die Intensität

ist also aufgeteilt. Dann muß aber das Magnetfeld eine energetische Änderung im Atomsystem veranlassen; im System müssen Änderungen stattgefunden haben.

Die Spektrallinien sind nur der Ausdruck dessen, daß eine quantenhafte Änderung der Systemenergie vorliegt, was ja mit dem Aussenden einer dieser Energie entsprechenden Strahlung verbunden ist. Die Energiequanten haben immer die Größe  $h \cdot \nu$  und sind gleich der Energiedifferenz, die der Zustandsänderung entspricht. Der Wellenfrequenz kommt nach der Formel  $c/\nu = \lambda$  eine ganz bestimmte Wellenlänge zu. Da man im Spektrum eine ganze Reihe von Wellenlängen beobachtet, so bedeutet dies, daß in der riesigen Zahl der Atome eben eine ganze Reihe von dementsprechenden Energieänderungen stattfinden. Nicht etwa an jedem Atom die gleichen, sondern es finden in manchen Atomen jene und in anderen wieder eine Anzahl von teils denselben und teils anderen Übergängen statt. Jede Spektrallinie und damit jede Wellenlänge entspricht nur einem möglichen Übergang im System, und die Anzahl der Linien ist somit gleich der Anzahl der Übergänge, vorausgesetzt, daß man sie alle beobachten kann. Treten beim Einschalten eines äußeren Magnetfeldes neue Spektrallinien auf, so ist dies eben ein Zeichen dafür, daß zusätzliche quantenhafte Änderungen der Systemenergie entstanden sind.

Der Grund für das Auftreten neuer Linien ist uns schon bekannt. Wir haben erwähnt, daß durch Anlegen eines Magnetfeldes eine Richtungsquantelung des Atoms als Ganzes und des Elektronenspins hervorgerufen wird. Die vorher im Raum irgendwie liegenden Atomsysteme zeigen mit der Drehachse in irgendwelche vom Zufall abhängende Richtungen. Bei der riesigen Zahl der Atome sind auch hier alle „Himmelsrichtungen“ möglich. Das Magnetfeld bringt diesen Schwarm in „Marschkolonne“. Das äußere Magnetfeld kann mit dem Atom in Wechselwirkung treten, da durch den Elektronenumlauf ein magnetisches Moment entsteht und so äußeres und inneres Magnetfeld sich wechselseitig beeinflussen können. Die Systemachsen können dann nur noch ganz bestimmte Winkel gegen das äußere Feld einnehmen; dabei rotiert das System aber weiter, und zwar um die eigene Drehachse (die Elektronen laufen ja weiterhin um den Kern) und um die Feldrichtungsachsen zugleich, so daß eine kreiselartige Bewegung zustande kommt (Bild 37). Eine solche Bewegung nennt man eine Präzessionsbewegung; hier in unserem Falle wird sie nach einem Physiker Larmorpräzession genannt. Durch das Magnetfeld wird also die Systemenergie geändert, was sich im Auftreten von zusätzlichen Spektrallinien äußert; das Magnetfeld leistet am System Arbeit. Diese eigenartige Taumelbewegung kennen wir alle schon bei einem Spielkreisel. Wenn so ein Kreisel sehr rasch rotiert, dann zeigt seine Drehachse ständig nur in eine Richtung. Wird er jedoch langsamer, dann führt er die Taumelbewegung aus; er rotiert zwar noch, aber er dreht sich jetzt zusätzlich um die vorher allein angenommene Drehrichtungs-

Bild 37

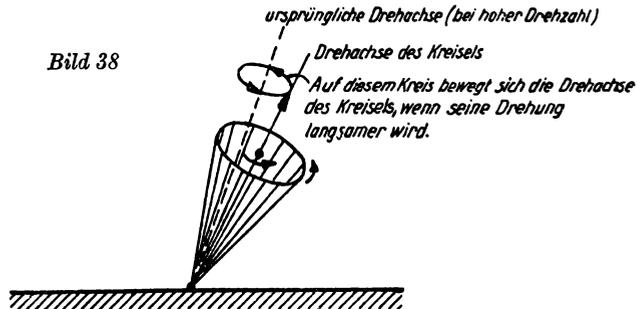


Auf diesem Kreis läuft der Drehpfeil um die Magnetfeldlinie herum, er bleibt aber immer senkrecht auf der Bahnebene

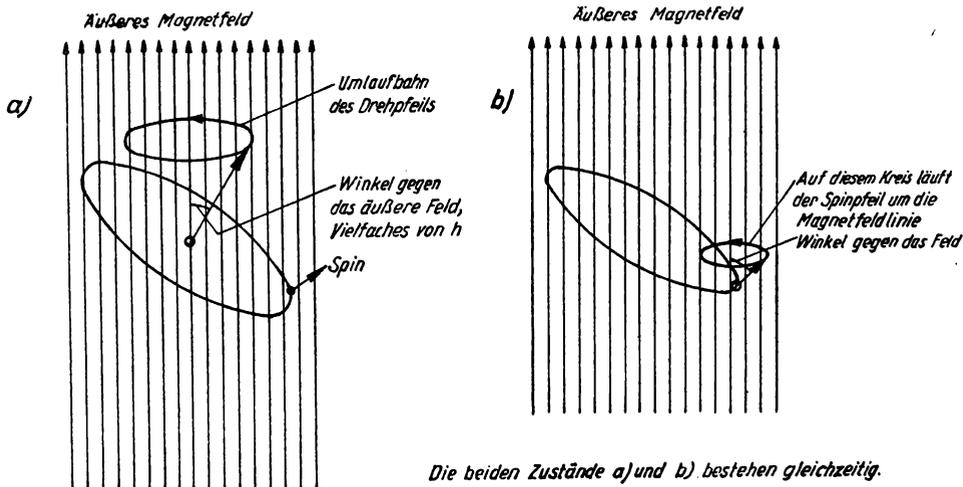
Befindet sich der Drehpfeil gerade in der gestrichelten Stellung, so liegt die Bahn in der ebenfalls gestrichelten Stellung im Raum.

achse; er führt also zwei Bewegungen gleichzeitig aus (seine Spitze verbleibt dabei an derselben Stelle). Dies sieht dann aus, als taumele der Kreisel; seine Drehachse, sie ist gleichzeitig Kreiselachse, läuft auf einem Kreis um die ursprüngliche Drehrichtungachse herum. Wir zeigen dies in nebenstehendem Bild 38 und können natürlich nur eine Momentaufnahme wiedergeben; man muß sich die Drehbewegung um die Achse in der durch die Pfeile angegebenen Richtung vorstellen. Die Elektronen laufen in einer bestimmten Schale auf einer bestimmten Bahn; die Bahnrichtung ist dabei gegen die Feldrichtung etwas geneigt und rotiert um die betreffende durch den Kern gehende Feldlinie als Dreh-

Bild 38



Auf diesem Kreis bewegt sich die Drehachse des Kreisels, wenn seine Drehung langsamer wird.



Die beiden Zustände a) und b) bestehen gleichzeitig.

Bild 39

achse. Das Elektron führt seinerseits neben der Umlaufbewegung die Eigenrotation um sich selbst und um die betreffende, jeweils in seinen Mittelpunkt gehende Feldlinie aus. Wir bauen das ganze System nochmals in aufeinanderfolgenden Phasen auf (Bild 39). Die beiden Winkel der Bahndrehachse und der Spinachse gegen das Magnetfeld können sich aber nur sprungweise ändern; sie können nicht alle Werte zwischen 0 und  $180^\circ$  annehmen, sondern, wie schon erwähnt, nur ganz bestimmte Vielfache des Planckschen Wirkungsquantums  $\hbar$ . Die Verhältnisse zwischen Spin und Bahndrehimpuls sind weit komplizierter und anders gelagert, als wir hier angeben. Wir haben absichtlich die Probleme in dieser Weise vereinfacht, um sie wenigstens für unseren Rahmen etwas verständlich zu machen. Die beiden Quantenzahlen, welche diese Vielfachheit angeben, die Magnetquantenzahl  $m$  und die Spinmagnetquantenzahl  $s$ , kennzeichnen weitere mögliche Zustandsänderungen im Atomsystem. Die Spinzahl  $s$  bleibt für das Elektron auf die beiden Werte  $+\frac{1}{2}$  und  $-\frac{1}{2}$  beschränkt. Insgesamt finden wir also 4 Quantenzahlen, die auf bestimmte ganzzahlige oder halbzahlige Werte beschränkt sind und den Zustand des Atoms beziehungsweise seiner Elektronen charakterisieren. 4 Zahlen (zum Beispiel  $n_1, l_1, m_1, s_1$ ) geben also genau einen energetisch möglichen Elektronenzustand an; ändert sich auch nur eine von ihnen, so ist dies mit einem anderen Elektronenzustand gleichbedeutend.

Es ist nun nicht so, daß beliebig viele Elektronen in den 4 Quantenzahlen übereinstimmen können. Die Natur trifft darin eine gewisse Auswahl. Die Elektronen besetzen im Atom nur solche Zustände, in denen sie nicht in allen 4 Zahlen übereinstimmen, oder, mit anderen Worten, sie müssen sich mindestens in einer Quantenzahl voneinander unterscheiden. In einem durch die 4 Quantenzahlen charakterisierten energetischen Zustand des Atoms kann sich jeweils nur ein Elektron befinden. Da die Zahlen aber nicht nur je einen Wert annehmen können, sondern eine ganze Reihe von Werten, so ergeben sich eine Menge Möglichkeiten für die verschiedenen Elektronenbesetzungszustände im Atom.

Die Hauptquantenzahl  $n$  kann alle ganzzahligen Werte von  $n = 1, 2, 3$  bis  $n = 7$ , die Quantenzahl  $l$  die Werte  $l = 0, 1, 2$  bis  $n - 1$  annehmen, das heißt  $l$  ist stets gleich  $n - 1$  ( $l = n - 1$ ).

Für die Magnetquantenzahl  $m$  stehen  $2l + 1$  Werte zur Verfügung, nämlich  $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$  bis  $\pm l$ , und die Quantenzahl  $s$  kann nur die Werte  $+\frac{1}{2}$  oder  $-\frac{1}{2}$  annehmen. Wir wollen nun nochmals das periodische System der Elemente betrachten (vgl. hierzu Tabelle 3).

Die K-Schale hat die Hauptquantenzahl  $n = 1$ , für die Quantenzahl  $l$  ergibt sich dann der Wert  $l = 0$ ; denn  $1 - 1 = 0$ . Die zugehörige Magnetquantenzahl ist  $m = 0$ ; denn die Zahlen beginnen stets mit ihren kleinsten Werten. Die Spinzahl ist immer  $+\frac{1}{2}$  oder  $-\frac{1}{2}$ . Es sind also im ganzen 2 Möglichkeiten für die unterzubringenden Elektronen. Diese beiden Besetzungszahlen werden in der K-Schale auch erschöpft durch den Wasserstoff mit einem und das Helium mit 2 Elektronen. Weitere Möglichkeiten ergeben sich erst, wenn man zur Zahl  $n = 2$  übergeht, also zur nächsten Schale.

Die L-Schale hat die Hauptquantenzahl  $n = 2$ , die Zahlen  $l = 0$  und  $l = 1$ , somit die Magnetzahlen  $m = 0$  und  $m = \pm 1$  (das heißt  $+1$  und  $-1$ ); denn die Anzahl der  $m$ -Werte ist stets gleich  $2l + 1$ , in diesem Fall also gleich 1 (für  $l = 0$ ) und 3 (für  $l = 1$ ). Zu  $l = 0$  gehören wie vorher 2 Möglichkeiten der Besetzung (2 Elektronen) und zu  $l = 1$  gehören 3 Möglichkeiten durch die Magnetzahl  $m$ . Für jeden dieser Werte sind aber wieder 2 Spinwerte möglich. Anschaulich kann man sich das etwa so vorstellen, daß die Zahl  $m$  angibt, welche Bahn vom Elektron gerade durchlaufen wird, was aber 2 Möglichkeiten für dessen eigene Drehung offenläßt, nämlich, ob es sich linksherum oder rechtsherum um seine eigene Achse dreht. Dies wird durch die Spinzahl festgelegt (2 Möglichkeiten:  $+\frac{1}{2}$  oder  $-\frac{1}{2}$ ). Das ergibt also für  $l = 1$  zusammen 6 Möglichkeiten und insgesamt also (mit den beiden aus  $l = 0$ ) 8 Besetzungsmöglichkeiten, also 8 Elektronen. Damit sind sämtliche Möglichkeiten der Besetzung erschöpft. Die L-Schale ist also mit 8 Elektronen bereits abgesättigt, was mit dem periodischen System auch gut übereinstimmt. Diese Schale enthält die Elemente mit der Hausnummer 3 bis 10, und dies sind gerade 8 Elemente, die sich also in der verschiedenen Anzahl der Elektronen unterscheiden.

Die nächste Schale besitzt die Hauptquantenzahl  $n = 3$ . Zu den  $l$ -Werten müssen wir jetzt also neben den beiden anderen,  $l = 0$  und  $l = 1$ , noch einen weiteren hinzunehmen, den Wert  $l = 2$ . Für die Magnetquantenzahlen ergeben sich daraus  $2 \cdot 2 + 1 = 5$ , also 5 Werte, nämlich  $m = 0, \pm 1, \pm 2$  (d. h.  $0, +1, -1, +2, -2$ ); der Spin hat wieder nur die beiden Werte  $+\frac{1}{2}$  und  $-\frac{1}{2}$ . Für  $l = 2$  ergeben sich folgende Möglichkeiten: 5  $m$ -Werte mit je 2  $s$ -Werten, das sind 10 Werte, die nun zu den mit  $l = 0$  und  $l = 1$  wiederum hinzukommen, das macht insgesamt 18 Werte und somit für diese Schale 18 Elektronen bis zur vollen Besetzung. Vom Kalium (Element 19) an sind aber die Elektronen nicht mehr nur in der M-Schale untergebracht, sondern, wie aus unserer Tabelle Seite 4 zu ersehen ist, werden die Elektronen von diesem Element an teils in der M- und teils schon in der N-Schale untergebracht; es werden zwei Schalen zugleich aufgebaut.

Aus dem chemischen Verhalten des Kaliums und aus seinem Spektrum geht hervor, daß es ein einziges Außenelektron haben muß. Außer den in der K- und L-Schale stationierten Elektronen stehen dem Kalium neun Elektronen zur Verfügung, und man muß, will man mit dem Experiment in Übereinstimmung bleiben, annehmen, daß sich auf der M-Schale beim Kalium nur acht Elektronen befinden und das neunte bereits den Aufbau der N-Schale beginnt. Diesen Aufbau der N-Schale setzt das auf das Kalium folgende Calcium fort. Hier befinden sich, dem Charakter des Calciums als einem Erdalkalimetall entsprechend, zwei Elektronen auf der äußeren, der N-Schale. Erst nach dem Calcium wird der Aufbau der M-Schale fortgesetzt, die beim Zink voll aufgefüllt ist. Da zwei Elektronen sich also zusätzlich auf der N-Schale befinden, wäre statt des Nickels mit der Elementnummer 28 das Zink mit der Nummer 30 das Element, bei dem der Aufbau der M-Schale abgeschlossen ist. Diese Anschauung deckt sich jedoch nicht ganz mit den chemischen Tatsachen, und man ist gezwungen, noch eine kleine Korrektur vorzunehmen. Danach ist der Aufbau der M-Schale bereits beim Kupfer beendet, und in der N-Schale des Kupfers befinden sich nicht, wie bei den Elementen Calcium bis Nickel, zwei, sondern nur ein Elektron.

Wir haben aus dem Vorgenannten ersehen, daß zwar die Quantenzahlen die Besetzungszahlen der einzelnen Schalen charakterisieren, jedoch läßt sich aus ihnen nicht unmittelbar erkennen, welche Elemente zu den einzelnen Schalenbesetzungszahlen gehören. Dazu ist nähere Kenntnis der Spektren und der chemischen Eigenschaften nötig, die Aufschluß über die Elektronen in den Elementen geben. Was man jedoch erkennt, ist die Tatsache, daß die größtmögliche Anzahl der auf der Schale befindlichen Elektronen durch die Beziehung  $N = 2n^2$  gegeben ist, was also seine Erklärung in den Kombinationsmöglichkeiten der vier Quantenzahlen findet. Die Kombinationsmöglichkeiten der Quantenzahlen werden durch das Pauliprinzip in sinnvoller Weise dadurch beschränkt, daß sich ein Elektron nur in einem durch ein Zahlenquadrupel (Zahlenvierheit)  $n, l, m, s$

gegebenen Zustand befinden darf. Im Atom unterscheiden sich alle Elektronen um mindestens eine Quantenzahl; stimmen zwei Elektronen zum Beispiel in  $n$ ,  $l$  und  $m$  überein, so muß ihre Spinzahl  $s$  verschieden sein. Stimmen die Magnetzahlen  $m$ , der Spin  $s$  und  $l$  überein, so befinden sich die beiden Elektronen auf jeden Fall in verschiedenen Schalen; sie haben dann verschiedene Hauptquantenzahlen  $n$ .

Man muß stets beachten, daß mit der Hinzunahme einer neuen Zahl  $n$ , also einer weiteren Schale, die vorhergehenden Schalen gleichfalls mit ihren Elektronenzahlen hinzuzurechnen sind, das heißt, die Kombinationsmöglichkeiten der vorangegangenen Zahlen  $l$ ,  $m$  und  $s$  müssen gleichfalls mit berücksichtigt werden. Das Gebäude wird daher ständig aufgestockt. Die neuen Zahlen erweitern in Verbindung mit den schon vorhandenen Zahlen die Kombinationsmöglichkeiten beider Gruppen.

Im Abschnitt über das periodische System hatten wir darauf hingewiesen, daß die in den einzelnen Perioden enthaltenen Elemente sich durch die Zahlen  $2 \cdot 1^2$ ,  $2 \cdot 2^2$ ,  $2 \cdot 3^2$  und  $2 \cdot 4^2$  darstellen lassen, das heißt durch die Zahlen 2, 8, 18 und 32. Wir haben nun für die ersten Schalen festgestellt, daß die Quantenzahlenkombinationen ebenfalls diese Werte als höchste Besetzungszahlen der einzelnen Schalen ergeben. Dies gilt aber nur für die ersten 4 Schalen, die K-, L-, M- und N-Schale, die in dieser Reihenfolge 2, 8, 18 und 32 Elektronen besitzen. Die übrigen Schalen erreichen ihre Sättigungswerte bei weitem nicht; die O-Schale enthält (bei 96 Elementen) nur 25 Elektronen, die P-Schale nur 9 und die Q-Schale nur 2 Elektronen als höchste Besetzungszahlen. Die Kombinationsmöglichkeiten für diese Schalen sind wesentlich größer, nämlich 50, 72 und 98, wenn man annimmt, daß der Schalensättigungswert nach der Formel  $N = 2 \cdot n^2$  berechnet wird, wobei  $n$  die Schalennummer beziehungsweise die Hauptquantenzahl darstellt.

Durch das Prinzip von Pauli läßt sich also die Systematik der Elemente verständlich machen, wenn man die inneren Zustände eines Atoms durch vier sogenannte Quantenzahlen kennzeichnet und damit alle energetischen Zustände erfaßt, in denen sich Atome befinden können. Die heutige Quantenmechanik kommt mit diesen vier Zahlen aus, das heißt, alle Zustandsänderungen im Atom lassen sich mit Hilfe der vier Quantenzahlen erfassen, die gewissermaßen die Sprünge angeben, zu denen die Elektronen innerhalb eines Atoms fähig sind. Springt ein Elektron von einer Schale auf eine andere, so läßt sich dieser Sprung durch die Zahl  $n$  charakterisieren, die sich je nach der Größe des Sprunges ganzahlig ändert. Dabei müssen sich keineswegs auch die anderen drei Quantenzahlen ändern, wenn sie das auch im allgemeinen tun werden. Ein Elektron kann beim Sprung von der N-Schale ( $n = 4$ ) auf die L-Schale ( $n = 2$ ) noch in den übrigen Zahlen gleichbleibende Werte haben, also zum Beispiel  $l = 1$ ,  $m = +1$  und  $s = +\frac{1}{2}$ ; denn diese Werte sind auch in der L-Schale noch möglich.

Springt ein Elektron der N-Schale mit dem Quantenzustand  $l = 1$ ,  $m = +2$  und  $s = +\frac{1}{2}$  in die L-Schale, so muß sich zwangsläufig  $m$  ändern; denn der Wert  $+2$  ist in der L-Schale nicht vorhanden. Der aufmerksame Leser wird bemerken, daß die Spinwerte in allen Schalen möglich sind ( $+\frac{1}{2}$  oder  $-\frac{1}{2}$ ), nur die Magnetquantenzahl  $m$  und die Zahl  $l$  können nicht in jeder Schale beliebige Werte annehmen. Man könnte sich dies etwa so vorstellen, daß in jeder Schale eine gewisse Anzahl von Unterschalen möglich sind, die durch die Zahl  $l$  bestimmt werden; in diesen Unterschalen liegen die durch die Zahl  $m$  angegebenen Bahnen, auf denen schließlich das Elektron die Möglichkeit hat, sich links herum oder rechtsherum zu drehen.

Wir wollen uns noch einmal vor Augen halten, daß man es sich so vorstellen kann, daß jedoch nicht behauptet wird, daß die Vorgänge im Atom so verlaufen, wie wir das dargelegt haben. Man darf das Ganze nur als ein Bild aufnehmen, das entworfen wurde, um die Vorgänge mit uns gewohnten Vorstellungen zu verbinden. Die Dinge in der Mikrowelt laufen so ab, daß sie nicht unbedingt eine makroskopische Auslegung zulassen. Wir sind folgedessen gezwungen, ein abstraktes mathematisches „Bild“ zu entwerfen und die Vorgänge auf diese Weise zu „beobachten“. Man wäre nicht weitergekommen, hätte man sich ängstlich an die gewohnten Anschauungen geklammert und deshalb auf ein tieferes Eindringen in die Physik der Atome verzichtet, um nicht diese Anschauungen über Bord werfen zu müssen.

Wir haben natürlich nicht ohne Absicht öfter auf die Unzulänglichkeit der modellmäßigen Anschauung hingewiesen. Schließlich besteht kein Grund, dies dem Leser vorzuenthalten und in ihm den Eindruck entstehen zu lassen, daß die Atome eben doch kleine Planetensysteme sind, wie dies bisweilen behauptet wird. Gerade um ihn nicht „falsch“ zu orientieren, mußten die Hinweise erfolgen, mußte betont werden, daß der „Anschauung“ Grenzen gesetzt sind, die aber in diesem Falle nicht darin bestehen, daß wir uns vielleicht einen hundertmillionstel Zentimeter nicht mehr vorstellen können, sondern darin, daß die Mikrowelt ihre eigenen Gesetzmäßigkeiten hat, die in der Welt, in der wir stehen, schließlich keine oder nur sehr wenige Gegenstücke besitzt. Der Unterschied zwischen der atomaren Welt und der Welt, die wir mit unseren Sinnen oder mit Hilfe von Apparaten durch unsere Sinne wahrnehmen, die sich aber noch von der atomaren unterscheidet, ist eben prinzipiell und nicht durch unsere Unzulänglichkeit bedingt.

## II. PHYSIK DER KERNE

### 11. *Elementarteilchen*

Die Vorstellung von der Unteilbarkeit der Atome hatte sich also als unzutreffend erwiesen. Sie bestehen vielmehr aus einer positiv geladenen Massenkonzentration im Inneren und aus einer sporadisch verteilten Restmasse in beachtlicher Entfernung vom Kern, die durch winzige negativ geladene Partikel gebildet wird. Der Kern des Wasserstoffs hat schon allein eine Masse, die bei etwa gleicher Größenordnung (Radius) der von 1836 Elektronen gleichkommt. Alle Systeme (Kern-Elektronen = Atom) scheinen dabei in erster Linie dem allmächtigen Gesetz von der unaufhörlichen Bewegung folgen zu müssen; hier herrscht niemals Ruhe. Im Inneren des Atoms gibt es stets Bewegung, im Verbands mit anderen Atomen ist jedes dieser Teilchen immer in Bewegung, ja, sie kommen sogar am absoluten Nullpunkt ( $-273,16^{\circ}\text{C}$ ) nicht vollständig zur Ruhe. Wenn ein Gesetz für alles Materielle gilt, so ist es das der unaufhörlichen Bewegung. Das von dem Griechen Heraklit geprägte „panta rhei“, alles ist im Fluß, scheint von allumfassender Gültigkeit zu sein. In der Physik der Kerne wird wieder in recht anschaulicher Weise das Gesetz offenbar, daß außer dem Wechsel nichts ewig ist.

Wir werden sehen, daß es doch schwierig ist, anzugeben woraus der Kern besteht, oder welches nun eigentlich die Elementarteilchen, die letzten Urbausteine der Materie sind.

Nachdem sich also die Teilbarkeit der Atome herausgestellt hatte, war die Frage nach den letzten Bausteinen wieder akut geworden. Erst seit etwa dreißig Jahren kann man von einer eigentlichen Kernphysik sprechen. Seit dieser Zeit bemüht man sich also um die Klärung dieser Frage. In diesem Zeitraum ist von der Menschheit mit geballter Kraft ein Vorstoß unternommen worden, wie er in der Wissenschaft bisher kaum seinesgleichen kennt. Die Kernphysik ist jedoch ein Forschungsgebiet, das große Aufwendungen erfordert. Instrumentelle Ausrüstungen und qualifizierte wissenschaftliche Kader werden in einem Ausmaß benötigt, wie man es in anderen Zweigen der Wissenschaft selten kennt.

Wir wollen das an einem herausgegriffenen Beispiel zeigen. Ein etwas größerer Zyklotron von rund 200 Tonnen Gewicht erfordert für seine Installation allein  $\frac{1}{2}$  Million Mark, und die jährlichen Betriebskosten betragen etwa 150000 bis 200000 Mark. Das sind alles nur rohe Summen; hier treten noch die enormen Gebäudekosten usw. hinzu. Dabei stellt ein solcher Apparat keineswegs einen Giganten dar und amortisiert sich auch nicht im Sinne industrieller Produktion. Auch ist noch zu bedenken, daß man mit einem Zyklotron allein noch keine erschöpfenden Forschungen treiben kann. Darum geht man jetzt dazu über, große Anlagen zu bauen und diese von mehreren Staaten zugleich zu finanzieren und zu betreiben. Einige europäische Staaten errichten derzeit in Genf ein großes kernphysikalisches Laboratorium zur gemeinsamen Benutzung.

Die Zahl der als Elementarteilchen bezeichneten kleinsten Bausteine der Materie hat sich inzwischen auf rund ein Dutzend erhöht; es werden aber von der Theorie noch Teilchen gefordert, deren Vorhandensein bisher noch nicht nachgewiesen werden konnte. Auch sind in der Höhenstrahlung noch eine Anzahl weiterer Teilchen festgestellt worden, so daß wir die Zahl der Elementarpartikel nicht genau angeben können. Einige Elementarbausteine kennen wir schon, so das Elektron, den Wasserstoffkern, der den Namen Proton führt, und das Photon der Lichtstrahlung. Alle diese Teilchen sind nun nicht mehr weiter teilbar; sie stellen die letzten Bausteine der Materie dar.

Bei den rund hundert Sorten von Atomen ist man von vornherein nicht leicht geneigt, in ihnen die letzten Bausteine der Materie zu sehen; dazu scheint ihre Anzahl zu groß. Die Hoffnung auf eine geringe Zahl kleinster Bausteine ist aber offensichtlich auch bei den Elementarteilchen nicht erfüllt worden. Ohne eine gewisse Willkür ist es gar nicht möglich, alle bekannten Elementarpartikel als solche anzusehen; sie haben nämlich die Eigenschaft, sich ineinander umzuwandeln. Nicht ohne Absicht haben wir am Anfang des Buches die Umwandelbarkeit der verschiedenen Energiearten ineinander behandelt; das sollte mit der fundamentalen Gegebenheit des beständigen Wechsels, mit der fundamentalen Eigenschaft der verschiedenen Erscheinungsformen der Energie vertraut machen. Bei den Elementarteilchen finden wir nun ein Analogon, eine Ähnlichkeit. So wie sich eine Energieform in eine andere umwandelt, so kann sich eine Elementarpartikel in eine andere umwandeln, und genau wie dort die Umwandlung nicht uneingeschränkt möglich ist, so kann sich auch hier eine Partikel nicht in jede beliebige andere verwandeln. Die Umwandlungsarten oder -formen sind beschränkt, aber so wie wir die potentielle und die kinetische Energie als verschieden ansehen, obgleich sie sich ineinander umwandeln lassen, so kann man auch die einzelnen Partikel trotz der Umwandelbarkeit als verschiedene Elementarteilchen ansehen. Wir wollen uns von vornherein daran gewöhnen, daß die Umwandlung oder der Wechsel etwas ganz Grundsätzliches, etwas Fundamentales in der Natur darstellt und auf keinen Fall außergewöhnlich ist.

Es gibt jedoch einen Unterschied bezüglich des Problems der Umwandelbarkeit von Eigenschaften. Wir beobachten in der Natur einerseits Prozesse, die ohne unser Zutun ablaufen, die sogenannten *spontanen* Prozesse, und andererseits die *erzwungenen* Prozesse, die erst durch unser Zutun erfolgen. In der Atomphysik sind das die Vorgänge der natürlichen und der künstlichen Radioaktivität. Die Aussendung von  $\alpha$ -Teilchen oder von  $\gamma$ -Strahlung erfolgt ohne einen Eingriff von seiten des Menschen. Dabei wandeln sich die Elemente ineinander um; aus Thorium wird zum Beispiel schließlich Blei. Das ist ein Vorgang, der zu allen Zeiten so abläuft. Der größte Teil der Elemente ist aber über lange Zeiten hin stabil und zerfällt nicht. Diese Elemente können wir aber zum Zerfall bringen, das heißt, wir helfen gewissermaßen nach. Prinzipiell lassen sich alle Elemente ineinander umwandeln; aus unedlen Elementen läßt sich beispielsweise auch Gold gewinnen, eine Sache, die natürlich keinerlei praktische Bedeutung besitzt. Aber nicht nur die Elemente wandeln sich ineinander um, sondern auch ihre Bestandteile tun dies mit und ohne unser Zutun. Wenn sich beispielsweise ein Neutron unter Aussendung von Elektronenstrahlung ( $\beta$ -Strahlen) und Neutrinostrahlung in ein Proton verwandelt, so wird man deswegen nicht behaupten dürfen, daß es aus einem Proton, einem Elektron und einem Neutrino besteht. Verwandelt sich das Proton in ein Neutron durch Aussenden eines Neutrinos und eines Positrons, so wird man nicht sagen können, es bestehe aus einem Neutron, einem Neutrino und einem Positron. Hat man in diesem Sinne die Umwandelbarkeit verstanden, ist man in der Naturerkenntnis schon ein gutes Stück weiter vorgedrungen.

Der natürliche Zerfall der Elemente erfolgt in sehr verschiedenen Zeiträumen; manche von ihnen sind in Sekundenbruchteilen zerfallen, wieder andere brauchen Milliarden von Jahren. Wann ein bestimmtes Atom beziehungsweise sein Kern zerfällt, hängt vollständig vom Zufall ab. Hier regiert kein gewöhnlich kausales Gesetz mehr, sondern nur noch ein statistisches Gesetz; mit anderen Worten, auch hier sind wiederum nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich. Ein Gesetz ist ja dann kausal, wenn sich mit seiner Hilfe der künftige Zustand *eines* Systems mit Bestimmtheit voraussagen läßt. Der Zerfall *eines* Atoms läßt sich aber nicht mit Bestimmtheit (oder Gewißheit) vorhersagen; er ist nur wahrscheinlich mit einem gewissen Wert. Man betrachtet jedoch nie ein einzelnes Atom, sondern eine sehr große Anzahl; davon zerfällt in einer bestimmten Zeit eine gewisse mehr oder weniger große Zahl, die auch keineswegs ständig die gleiche bleibt. Einige Elemente lassen sich nur künstlich erzeugen und leben oft kaum eine Sekunde; genauer gesagt, nach Ablauf einer Sekunde ist von einer ursprünglich nicht allzu großen Menge keine wägbare oder sonstwie nachweisbare Menge mehr vorhanden.

Der natürliche Zerfall beschränkt sich im wesentlichen auf die schweren Elemente am Ende des periodischen Systems.

Wir sahen also, daß die Elementarteilchen, die wir bereits kennen, und diejenigen, die wir noch kennenlernen werden, in gewissem Sinne die letzten Bausteine der Materie darstellen; aus ihnen setzt sich die Materie zusammen.

## 12. Kerngröße

Die Atome der Elemente unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer Elektronenzahl, sondern auch durch das verschiedene Atomgewicht. So ist das Wasserstoffatom mit seinem einen Elektron und dem Proton natürlich bei weitem leichter als zum Beispiel das Argonatom, und aus diesem Grunde kann auch der Kern des Wasserstoffs nicht die gleiche Größe haben wie der Argonkern. Die Dimensionen des Kernes lassen sich selbstverständlich nicht unmittelbar messen; man kann ihn oder auch das ganze Atom nicht unter ein Mikroskop legen und dort etwa seine Größe feststellen, wie man dies mit einem makroskopischen Körper tut; dies ist nach dem bisher Gesagten wohl leicht einzusehen. Die Abmessungen der Kerne ergeben sich aus verschiedenartigen Untersuchungen. Die älteste und bekannteste Art zur Bestimmung der Kerndimensionen sind die Streuversuche (sie dienen daneben auch noch anderen Zwecken), die schon Rutherford anwandte. Wir haben sie auf Seite 25 kurz behandelt. Man kann aus der Größe des Ablenkungswinkels unter anderem auf die Größe des streuenden Objektes schließen. Die Kernradien betragen im allgemeinen nur einige Zehntausendstel der Atomradien. Sie lassen sich annäherungsweise nach der Formel berechnen:

$$r = r_0 \cdot \sqrt[3]{A}, \quad (\text{I})$$

worin eine  $r_0$  Konstante mit dem Wert  $1,5 \cdot 10^{-13}$  cm ist und  $A$  die Massenzahl darstellt. Unter der Massenzahl versteht man diejenige *ganze* Zahl, die dem entsprechenden Atomgewicht am nächsten liegt (siehe periodisches System, Tafel 3). Wasserstoff hat also die Massenzahl 1, Stickstoff die Massenzahl 14 Sauerstoff 16, Radium 226 und Uran 238. Für den stabilen Kupferkern ergibt sich auf diese Weise ein Radius von

$$r = 1,5 \cdot 10^{-13} \cdot \sqrt[3]{64} \qquad (\sqrt[3]{64} = 4, \text{ da } 4^3 = 64)$$

$$= 4 \cdot 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ cm} = 6 \cdot 10^{-13} \text{ cm.}$$

Wir fügen eine kleine graphische Darstellung in Bild 40 bei, aus welcher der Leser die Werte für einzelne Kernradien, gemessen in der Einheit  $10^{-13}$  cm, entnehmen kann. Setzen wir in der Formel  $A = 1$ , so erhalten wir den Radius des Protons (Wasserstoffkerns) zu  $1,5 \cdot 10^{-13}$  cm; der Radius des Atoms ergibt sich aus der Bohrschen Theorie zu  $0,53 \cdot 10^{-8}$  cm.

Wir wollen uns hier einmal mit der stark abkürzenden und übersichtlichen Potenzschreibweise vertraut machen. Die Zahl  $1,5 \cdot 10^{-13}$  bedeutet, die Zahl 1,5

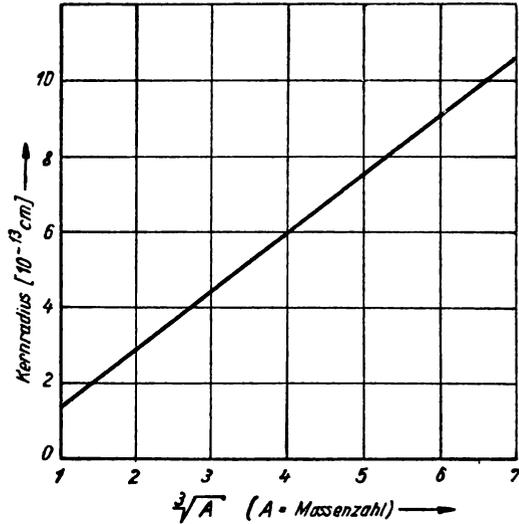


Bild 40

soll durch eine 1 mit 13 Nullen *dividiert* werden, darauf deutet das *negative* Zeichen im Exponenten (der hochstehenden Zahl) hin. Soll dieselbe Zahl mit einer 1 mit 13 Nullen *multipliziert* werden, so schreibt man einfach  $1,5 \cdot 10^{13}$ ; das *Pluszeichen*, das eigentlich vor der 13 stehen müßte, ist dann weggelassen. Eine positive Zahl im Exponenten der 10 bedeutet, die vorstehende Zahl (in diesem Falle 1,5) ist mit einer 1 mit soviel Nullen zu *multiplizieren*, wie der Exponent (hier die 13) angibt; eine negative Zahl im Exponenten der 10 bedeutet, daß die vorstehende Zahl durch eine 1 mit soviel Nullen zu *dividieren* ist, wie der Exponent angibt.

Man könnte die erwähnte Zahl auch so schreiben: 1,5/10 000 000 000 000, aber diese platzraubende und leicht zu Irrtümern Anlaß gebende Nullenschreibweise ist aus begreiflichen Gründen in Wissenschaft und Technik nicht gebräuchlich. Die Potenzschreibweise ist im allgemeinen dann zweckmäßig, wenn es sich um Zahlen handelt, die in irgendeiner Form eine größere Anzahl von Nullen aufweisen, oder, mit anderen Worten, die als gewöhnliche ganze Zahlen nach rechts zu oder als Dezimalbruch hinter dem Komma mehrere Nullen haben. Im übrigen kann man natürlich die Zahl  $1,5 \cdot 10^{-13}$  auch als Dezimalbruch schreiben, wozu die Ausführung der geforderten Division, also 1,5 dividiert durch 10 Billionen, notwendig ist; es stehen dann die Nullen hinter dem Komma: 0,000 000 000 000 15.

Will man wissen, wie viele Protonen aneinandergereiht gerade 1 cm ergeben, so ist folgende Aufgabe zu lösen:

$$1,5 \cdot 10^{-13} \text{ cm} \cdot x = 1 \text{ cm.}$$

Dies ist also nur ein anderer Ausdruck für das eben formulierte Problem: Wie oft muß man die Strecke  $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$  aneinanderlegen, um einen Zentimeter zu erhalten. Daraus folgt  $x = 1 \text{ cm} / 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ cm} = 2/3 \cdot 10^{13} = 0,66 \cdot 10^{13}$ . Multipliziert man 0,66 mit 10, um statt 0,66 die Zahl 6,6 zu erhalten, so muß  $10^{12}$  durch 10 dividiert werden, damit die Gleichung richtig bleibt; das ergibt  $6,6 \cdot 10^{13}$  oder 6,6 Billionen. Diese Anzahl von Protonen muß man also nebeneinander legen, um eine Strecke von 1 cm zu erhalten. Genau auf die gleiche Art läßt sich berechnen, wie viele Wasserstoffatome vom Radius  $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$  auf 1 cm Länge entfallen, und man erhält den Wert von 200 Millionen Teilchen ( $2 \cdot 10^8$ ).

Bildet man das Verhältnis Wasserstoffatomradius zu Protonradius, so gibt diese Zahl an, wievielfach der erste größer ist als der zweite:

$$0,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm} : 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ cm} = \frac{1}{3} \cdot 10^5 = \text{rd. } 33000.$$

Wie man sieht, ein recht beträchtlicher Wert; bei 1 m Kernradius (das heißt 2 m Kerndurchmesser) würde der Atomradius schon 33 km betragen.

Wir wollen auch noch das spezifische Gewicht des Protons berechnen. Dies errechnet sich als Verhältnis von Masse zum Volumen; in unserem Falle also von Protonenmasse zu Protonenvolumen. Die Masse beträgt  $1,7 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ , das Volumen berechnen wir als Kugelvolumen nach der Formel  $V = 4/3 \cdot \pi \cdot r^3$ . Bei  $r = 1,7 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$  ergibt sich  $r^3 \sim 5,0 \cdot 10^{-39} \text{ cm}^3$ ; multiplizieren wir diesen Wert mit 4 (das ist rund der Wert  $4/3 \cdot \pi$ ), so erhalten wir rund  $20,0 \cdot 10^{-39} \text{ cm}^3$ . Führen wir dann die Division zur Bildung des Verhältnisses durch, so ergibt das rund  $10^{14} \text{ g/cm}^3$ , oder anders gesagt, wiegt 1 mm<sup>3</sup> (bei Berücksichtigung der Abrundung) nicht ganz 100000 Tonnen, was in der Größenordnung dem Gewicht von zwei schweren Schlachtschiffen entspricht. Ein lächerlicher Kubikmillimeter Kernmasse wiegt also schon soviel wie diese Stahlgiganten. Man stelle sich einmal vor, man müßte dieses Stecknadelköpfchen Kernmasse transportieren. Kein Kran der Welt wäre in der Lage, dieses Bröckchen anzuheben; selbst ein Splitterchen von der Kantenlänge der Rasierklingenstärke würde noch einem 100-Tonnen-Kran viel zu schaffen machen. Die angegebene Formel (I) läßt aber noch einen weiteren Schluß zu: Die Massenzahl wächst proportional dem Volumen der Kerne an, das heißt,

$$A = \left( \frac{r}{r_0} \right)^3 = \frac{V}{\frac{4}{3} \pi r_0^3} = \frac{V}{\text{Konst.}},$$

oder umgekehrt, das Kernvolumen wächst proportional der Massenzahl. Das bedeutet, daß das Kernvolumen nicht dichter wird mit zunehmender Kernmasse, oder das spezifische Gewicht bleibt konstant. Dies ist keineswegs selbstver-

ständig, den Grund hierfür werden wir noch einsehen. Da bei einem Flüssigkeitstropfen ähnliche Verhältnisse herrschen – er wird gleichfalls mit Vergrößerung seines Volumens nicht dichter, da bei ihm schon die dichteste Packung der Moleküle oder Atome vorliegt –, bezeichnet man den Kern als einen mit „Kernflüssigkeit“ angefüllten „Tropfen“, was natürlich nur die Ähnlichkeit andeuten soll und nicht bedeutet, daß der Kern aus einer Flüssigkeit besteht.

### *13. Kernstruktur und Bezeichnungen*

Die historische Entwicklung, die zur Theorie über den Kernaufbau führte, wollen wir übergehen. Man machte sich von der Struktur der Kerne anfänglich etwas andere Vorstellungen, als wir sie entwickeln werden. Man glaubte, daß neben den Protonen auch Elektronen im Kern eingebaut wären, und zwar sollte der Kern wegen seiner positiven Ladung weniger Elektronen als Protonen enthalten. Diese Ansicht lag nahe; denn man hatte festgestellt, daß die radioaktiven Elemente  $\beta$ -Strahlen aussenden, die nichts weiter sind als Elektronen. Wir haben hier gleich noch einen weiteren Namen für Elektronenstrahlen, bei den Gasentladungen nannte man sie bekanntlich Katodenstrahlen, hier also  $\beta$ -Strahlen; dies sind alles historisch bedingte Bezeichnungen für dieselben Dinge und bringen nur die Erzeugungsart zum Ausdruck. Man stellte fest, daß die ausgesandten Elektronen nicht aus der Atomhülle stammten, und so war die Annahme der im Kern eingebauten Elektronen naheliegend.

Heute hat man folgende Ansicht über den Bau der Atomkerne: Die Kerne bestehen aus Protonen mit einer positiven Ladungseinheit und der Massenzahl 1 sowie aus Neutronen, gleichfalls mit der Massenzahl 1, aber ohne jegliche Ladung. Der Name des Neutrons kommt also daher, daß es keine Ladung trägt; es ist elektrisch neutral, weder positiv noch negativ geladen. Im Jahre 1932 wurde es von dem Engländer Chadwick bei Kernumwandlungsvorgängen zum ersten Male bemerkt. Beide Teilchen, Proton und Neutron, bezeichnet man als Nukleonen, das heißt, man faßt sie als verschiedene Erscheinungsformen ein und derselben Partikel, des Nukleons, auf. Weshalb man dazu berechtigt ist, haben wir im Abschnitt über Elementarteilchen schon angedeutet. Das Wort ist vom lateinischen nucleus = der Kern abgeleitet; das Wort Proton kommt aus dem Griechischen und bedeutet „das Erste“. Es gibt auch noch das Deuteron, das heißt „das Zweite“ und das Triton „das Dritte“. Wir werden darüber noch etwas zu sagen haben.

Zur Bezeichnung der Kerne führte man folgendes Schema ein: Das chemische Symbol erhält je zwei Zahlen; die eine wird an das Symbol unten links angeschrieben und die andere oben rechts. Die erste Zahl unten links gibt die Ladung an,

also die Zahl der Protonen, die mit der Elektronenzahl im nicht ionisierten Zustand übereinstimmt, und ist also gleich der Atomnummer im periodischen System; die zweite Zahl oben rechts gibt die Massenzahl an, das heißt, wie viele Protonen und Neutronen zum Kern gehören. Die Differenz zwischen beiden Zahlen ergibt die Anzahl der Neutronen. Einige Beispiele werden dies erläutern.

Der Wasserstoffkern bekommt die Bezeichnung  ${}^1_1\text{H}$ , 1 Proton unten links und die Massenzahl 1 oben rechts und ist also gleichbedeutend mit dem Proton selbst. Der Heliumkern hat 2 Ladungen, also 2 Protonen und die Massenzahl 4, was so aussieht:  ${}^4_2\text{He}$ . Dieser Kern erweist sich als mit den  $\alpha$ -Teilchen identisch; zu ihm gehören 2 Protonen und 2 Neutronen. Der Stickstoffkern trägt die Bezeichnung  ${}^{14}_7\text{N}$ , das bedeutet also 7 Protonen und  $14 - 7 = 7$  Neutronen; der Urankern,  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , hat 92 Protonen und  $238 - 92 = 146$  Neutronen, besteht also schon aus einer recht beachtlichen Anzahl Nukleonen.

Aus dieser Art der Bezeichnung kann man aber nicht erkennen, welcher Kern radioaktiv ist, das heißt, welcher spontan, also ohne äußere Einwirkung, Teilchen oder Strahlungen aussendet. Für die Radioaktivität ist im allgemeinen der Kern allein verantwortlich; nur bei der inversen  $\beta$ -Strahlung und bei der  $\gamma$ -Strahlung ist die Elektronenhülle indirekt oder mittelbar mit am Prozeß beteiligt. Zu den 98 Elementen gehören zunächst auch 98 Kerne, die sich untereinander durch die verschiedene Zahl der Protonen unterscheiden werden. Aber nach dem bisher Gesagten ist wohl klar, daß auch die Zahl der Neutronen eine Rolle spielen wird. Der unvoreingenommene Leser wird erwarten, daß es nur so viele Kernsorten wie Atomsorten geben wird, also auch 98. An dieser Stelle wollen wir nochmals darauf hinweisen, daß man, strengenommen, nicht sagen kann, es gibt 98 Elemente, sondern nur, daß 98 Elemente bekannt sind. Die Zahl ist keine Konstante; sie wird vielmehr weitgehend davon abhängen, inwieweit es uns gelingen wird, die Registrierinstrumente und Analysenmethoden nach und nach zu verfeinern sowie die kernphysikalischen Geräte zu verbessern.

Die Kernsorten besitzen eine große Variationsmöglichkeit infolge der Zusammensetzung aus den beiden Nukleonenformen, den Protonen und den Neutronen. Die Neutronen müssen keineswegs in der gleichen Anzahl wie die Protonen vorhanden sein; dies ist vielmehr selten der Fall. Beim Sauerstoff  ${}^{16}_8\text{O}$  und beim Calcium  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  beispielsweise stimmen beide Zahlen überein; oberhalb der Ordnungsnummer 20 gibt es aber keinen derartigen Fall mehr, von da an sind die Neutronen in der Überzahl. Die Kernladungszahl, die ja mit der Protonenzahl identisch ist, wird in der Atomphysik mit  $Z$  bezeichnet, und wir werden in Zukunft statt von der Nummer im periodischen System von der Kernladungszahl  $Z$  sprechen. Die stabilen Kerne  $Z = 2, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16$  und 20 sind die *symmetrischen Kerne*; sie haben die gleiche Anzahl von Protonen und Neutronen. Bis heute sind fast zehnmal soviel Kernarten bekannt wie Elemente; bis einschließlich 1948 zählte man etwa 950 verschiedene Kerne. Davon sind allerdings

etwa 670 radioaktiv und nur etwa 280 stabile Kerne. Unter einem stabilen Kern versteht man einen, der keine  $\alpha$ -Strahlung,  $\beta$ -Strahlung oder  $\gamma$ -Strahlung und auch keine Positronenstrahlung aussendet, der also keinerlei Strahlung emittiert. Man überlegt sich leicht, wieso es zu der Vielzahl von Kernen kommt.

Die Zahl der Protonen bestimmt, nach dem bisher Gesagten, die Kernladungszahl  $Z$  und somit das Element. Ein Kern mit  $Z = 20$  ist immer Calcium, auch wenn ihm seine beiden Außenelektronen abgerissen werden, oder wenn er noch stärker ionisiert wird. Die Zahl der Elektronen hat keinen Einfluß auf die Art eines Elementes; diese wird nur durch die Kernladung bestimmt. Der Calciumkern hat für gewöhnlich 20 Neutronen. Er kann aber auch 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 und 29 Neutronen haben; dann nimmt zwar seine Massenzahl von 40 bis 49 ständig zu, aber trotzdem bleibt er Calcium. Die Kernladung ist ja dabei ständig die gleiche (wir setzen jetzt voraus, daß sie gleichbleiben soll). Selbstverständlich steigt auch das Atomgewicht an. Es gibt also gewissermaßen etliche Sorten Calcium; sechs dieser Kerne sind stabil und drei sind Betastrahler. Sie senden von selbst  $\beta$ -Strahlen, das heißt Elektronen aus. Wir finden also in der Natur gewissermaßen Unterarten der Elemente, und es gibt von jedem Element einige Sorten, die sich im Atomgewicht unterscheiden. Man nennt sie Isotope, das ist wieder einmal aus dem Griechischen und soll bedeuten, daß es sich um Elemente handelt, die an derselben Stelle im periodischen System stehen (isos = gleich; topos = Ort, Platz); das läuft faktisch auf eine gewichtsmäßige Unterteilung aller Elemente hinaus.

Eine ganz hervorragende Rolle spielen die Kerne von drei Wasserstoffisotopen  ${}_1\text{H}^1$  = Proton,  ${}_1\text{H}^2$  = Deuteron und  ${}_1\text{H}^3$  = Triton; sie unterscheiden sich durch die Zahl der Neutronen. In der genannten Reihenfolge besitzen sie 0, 1 und 2 Neutronen. Entreißt man den entsprechenden Atomen das eine Elektron, so hat man Geschosse verschiedenen Gewichtes zur Verfügung; denn diese geladenen Teilchen lassen sich in einem elektrischen Feld beschleunigen und erlangen dabei große Geschwindigkeiten und Energien.

Aber das Spiel mit den Protonen und Neutronen ist noch nicht erschöpft; es gibt noch mehr Möglichkeiten einer gewissen Übereinstimmung am Kern. Alle Kerne mit der gleichen Massenzahl nennt man Isobare, z. B.  ${}_{20}\text{Ca}^{40}$  und  ${}_{18}\text{A}^{40}$ ; das Calciumisotop und das Argonisotop sind zueinander isobar. Die Eigenschaft isobar zu sein ist natürlich eine gegenseitige; nur mehrere Kerne können zueinander isobar sein, mindestens gehören zwei zu dieser Eigenschaft. Alle isobaren Kerne haben die gleiche Nukleonenzahl und sind auch etwa gleich schwer. Genau kann dies natürlich nicht der Fall sein; denn infolge der verschiedenen Masse von Proton und Neutron können Kerne nur dann gleich schwer sein, wenn sie die gleiche Zahl von Protonen und Neutronen enthalten, das heißt, nur die Kerne derselben Art sind genau gleich schwer.

Es gibt noch mehrere übereinstimmende Eigenschaften an den Atomkernen, doch sind sie schon zu speziell für eine allgemeine Darstellung. Zu erwähnen wäre noch, daß die radioaktiven Kerne auch einen besonderen Namen tragen; man nennt sie Radionukliden, von denen, wie bereits gesagt, gegen 670 existieren.

Über die Struktur eines Atomkernes läßt sich also sagen, daß er aus Nukleonen besteht, deren Erscheinungsformen man Protonen und Neutronen nennt. Den Kern kann man sich als Tropfen vorstellen, also von kugelförmiger Gestalt, jedoch scheint der Innenraum nicht vollständig ausgefüllt zu sein; die Nukleonen lassen noch etwas Platz. Die mittlere Dichte des Kernes ist unwahrscheinlich groß und übertrifft jedes makroskopische Maß.

Die einzelnen Bestandteile werden durch gewisse Kräfte zusammengehalten, die nicht elektrischer Natur und von äußerst kurzer Reichweite sind. So besteht zwischen den Protonen nicht nur die elektrostatische Abstoßung, sondern auch noch eine andere Kraft, die sie und die Neutronen zum Kern zusammenhält. Die Art dieser Kräfte ist noch recht unsicher, wenn gleich man auch schon so viel weiß, daß es sogenannte Austauschkräfte sein müssen. Sie entstehen offenbar dadurch, daß sich die Nukleonen gegenseitig mit Partikel bewerfen oder beschießen, die man Mesonen nennt. Es handelt sich vermutlich dabei nur um ganz bestimmte Mesonensorten, und zwar um  $\pi$ - und  $\tau$ -Mesonen, und dieser Partikelaustausch hat eine Wechselwirkung zwischen Protonen unter sich und Neutronen unter sich und schließlich auch zwischen Protonen und Neutronen zur Folge. Die hierfür in Frage kommenden Mesonen sind geladen und neutral; sie bestätigen das Gesetz der Ladungserhaltung, das in der Atomphysik eine wesentliche Rolle spielt, ähnlich dem Energieerhaltungsgesetz in der klassischen Physik. Wir werden in einem folgenden Abschnitt noch darauf zurückkommen.

#### 14. Kernmassen

Die Kernmassen sind unendlich klein; wollte man die in Gramm ausgedrückten Gewichte hinschreiben, so würde man sich vor Nullen schließlich nicht mehr zurechtfinden, sofern man nicht die stark abkürzende Potenzschreibweise benutzt, wie wir sie im Abschnitt über die Kerngröße angegeben haben. Die Protonenmasse haben wir dort schon bei der Berechnung des spezifischen Gewichtes dieser Kernmasse benutzt; danach wiegt so ein „Stäubchen“  $1,7 \cdot 10^{-24}$  g, das heißt, 1,7 dividiert durch die Zahl 1 mit 24 Nullen. In der Physik benutzt man als Dimension die sogenannte Masseneinheit (ME) an Stelle des Gramms sehr häufig. Die ME ist der sechzehnte Teil der Masse eines Sauerstoffatoms mit dem Kern  $O^{16}$  und ist in Gramm angegeben gleich  $1,6599 \cdot 10^{-24}$  g. Diese Masseneinheit stimmt nicht genau (für die Rechnung ist dies von Bedeutung) mit

der chemischen Einheit überein, die ja definiert wird als der sechzehnte Teil eines Sauerstoffatoms. Das hat seinen Grund darin, daß der gewöhnliche vom Chemiker betrachtete Sauerstoff vom kernphysikalischen Standpunkt aus ein Isotopengemisch aus verschiedenen Sauerstoffen ist, und zwar besteht irgendeine Menge Sauerstoff aus einem Gemisch mit den Komponenten  $O^{16}$  zu 99,76 Prozent und  $O^{17}$  zu 0,04 Prozent und  $O^{18}$  zu 0,20 Prozent. Die chemische Masseneinheit ist also eine „mittlere“ Einheit und um 0,03 Prozent größer als die kernphysikalische. Der Leser wird sicher nicht annehmen, daß dies ohne Bedeutung ist. Man darf hier natürlich keinen allgemein makroskopischen Standpunkt einnehmen; in der Welt der Atome können kleine Unterschiede von erheblicher Bedeutung sein, sofern man genaue Rechnungen anstellt. In diesem neuen Wert ausgedrückt, hat das Proton 1,00813 ME und das Elektron 0,000584 ME, das Neutron 1,008937 ME und das Photon hat keine Masse, oder genauer gesagt, keine Ruhemasse. Die hier angegebenen Massen stellen im allgemeinen keine konstanten Werte dar; sie gelten, genau genommen, nur, solange sich die Partikel in Ruhe befinden.

### *15. Die Beziehung zwischen Masse und Energie*

Der Physiker Albert Einstein stellte eine bedeutsame Theorie auf, die er Relativitätstheorie nannte. In unserem Zusammenhang können wir nicht einmal andeutungsweise darauf eingehen, da uns dies zu weit vom eigentlichen Thema abführen würde.

Einstein stellte fest, daß Masse und Energie auch nichts absolut Konstantes darstellen, sondern sich ineinander umwandeln können. Wir sehen also wieder an einem Beispiel, wie weittragend das Wort des Heraklit oder auch der Ausspruch Goethes im „Faust“ ist: „Nichts ist ewig, denn der Wechsel“. Energieformen wandeln sich ineinander um, Materie kann sich umwandeln, und so fehlte eigentlich nur noch die Umwandlung dieser beiden ineinander. Aber alles scheint doch nicht im Fluß und umwandelbar zu sein; ein paar sogenannte Naturkonstanten fallen aus dem Rahmen, so unter anderem die Plancksche Konstante  $h$ , die Lichtgeschwindigkeit  $c_L$  und noch etliche andere. Es ist aber keineswegs sicher, ob sich diese Naturkonstanten nicht etwa doch ändern; dazu fehlt letztlich der Nachweis der Konstanz über riesige Zeiträume. Wenn sich eine Größe im Verlaufe von ein paar Millionen Jahren nicht ändert, so ist dies noch kein Beweis für ihre Konstanz.

Die Gleichheit (Äquivalenz) von Masse und Energie ist eine ganz fundamentale Beziehung. Einstein kam bezüglich der Äquivalenz zu folgender Gleichung:

$$E = m \cdot c_L^2 \quad (\text{II})$$

Darin bedeuten  $E$  die gesamte Energie eines Systems,  $m$  die Masse desselben und  $c_L$  die Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum). Da die Geschwindigkeit  $c_L$  aber eine Konstante ist, so folgt daraus, daß das Verhältnis von  $E/m = c_L^2$  konstant sein muß, das heißt, das Verhältnis vom Energieinhalt eines Systems zu seiner Masse bleibt immer konstant. Vergrößert sich die Energie, so hat sich auch die Masse vergrößert, und umgekehrt, vergrößert sich die Masse eines Systems, so hat damit sein Energievorrat zugenommen. Zieht man also seine Armbanduhr auf, so ist sie schwerer geworden, der Energievorrat hat sich, ja vergrößert und damit auch die Masse. Die in der Feder aufgespeicherte Energie ist einer gewissen Masse äquivalent oder gleich, das soll damit zum Ausdruck gebracht werden.

Die Konstante  $c_L$  ist sehr groß, nämlich  $c_L = 3 \cdot 10^{10}$  cm/s oder auch 300 000 km/s, demnach ist  $c_L^2 = 9 \cdot 10^{20}$  cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> oder 90 Milliarden km<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. Für die Masse eines Systems ergibt die Gleichung (II) aber  $E/c_L^2 = m$ , der Nenner ist eine sehr große Zahl, und nimmt nun der Zähler um einen kleinen Betrag zu, wie dies beim Aufziehen einer Uhr der Fall ist, so macht dies infolge des großen Nenners kaum eine Zunahme der Masse, also der rechten Gleichungsseite, aus; jedenfalls ist sie winzig und in diesem Falle überhaupt nicht meßbar. Man wird daher nicht plötzlich nach dem Aufziehen einer Armbanduhr „Schlagseite“ zu befürchten haben.

Ein anderes Beispiel für die Massenzunahme hat man, wenn einem Stück Metall eine gewisse Wärmemenge zugeführt wird; dadurch wird der Körper gleichfalls schwerer; denn die Wärmeenergie ist ja eine Form der Energie, und in der Einsteinschen Gleichung (II) soll  $E$  die Systemenergie bedeuten, also die mechanische, chemische, thermische Energie usw. insgesamt. Ganz gleich in welcher Form man einem festen, flüssigen oder gasförmigen Körper Energie zuführt, seine Masse wird dabei zunehmen, und bei Energieabgabe wird sie abnehmen. Nimmt man einen chemischen Prozeß, bei dem Wärme frei wird, einen sogenannten exothermen Vorgang (exotherm ist eine Kombination aus den beiden griechischen Wörtern *thermos* = Wärme und *ex*, was hier soviel wie „hinaus“ bedeutet), so stimmen nach der Reaktion die Massen nicht mehr genau überein, das heißt, die Masse vor der Reaktion ist größer als die nach der Reaktion verbleibende Masse des neuen Stoffes, ein Teil der Masse ist in Form von Energie abgegeben worden.

In der Physik und Chemie gibt es zwei fundamentale Gesetze: das Gesetz von der Erhaltung der Masse und als weiteres Grundgesetz das von R. Meyer ausgesprochene Gesetz von der Konstanz der Energie. Beide besagen in ihrer Form dasselbe; sie fordern die Erhaltung einer bestimmten physikalischen Größe, einmal der Masse und ein andermal der Energie. Bei irgendwelchen Prozessen müssen zu Beginn und am Ende desselben die Massen genau die gleichen sein, das heißt, es kann weder Masse entstehen, noch kann sie ver-

nichtet werden. Weiter muß die Energie eines Systems am Anfang und am Ende einer Reaktion die gleiche sein. Energie kann weder erzeugt werden, noch kann sie vergehen; sie wird nur beständig von einer Form in eine andere umgewandelt. Diese beiden Gesetze müssen wir nach heutiger Auffassung in ein einziges zusammenziehen und verlangen, daß *bei irgendwelchen Prozessen Energie und Masse erhalten* bleiben, wobei es also *nicht notwendig ist, daß eine der beiden Größen konstant* bleibt (Energiesatz). Als Einstein seine Masse-Energie-Gleichung aufstellte, waren noch keine Prozesse beobachtet worden, bei denen Masse umgewandelt wurde. Erst im Jahre 1932 beobachtete man die sogenannte Zerstrahlung von Materie. Ein Elektronenzwilling, das heißt ein negatives und ein positives Elektron, setzt bei seiner Vernichtung die gesamte Masse in Strahlungsenergie um. Der Vorgang läßt sich in die „Teilchensprache“ übersetzen: Ein Negatron tritt mit einem Positron zu einem Elektronenzwilling zusammen, und sie erzeugen dadurch ein Quantenpaar. Es handelt sich um Gammaquanten, wie die Frequenzbestimmung ergibt. Umgekehrt lassen sich Gammaquanten genügend hoher Energie in Elektronenzwillinge umwandeln. Die Energie muß dabei natürlich mindestens so groß sein, daß sich daraus gemäß der Einsteinschen Gleichung die Masse zweier Elektronen erzeugen läßt. Dieser Prozeß ist aber nicht aus sich heraus möglich, sondern erfordert die Anwesenheit eines Kernes. Nur in Wechselwirkung mit einem Atomkern können Gammastrahlen genügend hoher Energie Elektronen erzeugen.

Durchgängig können wir heute feststellen, daß Ladungen und Lichtquanten oder Photonen etwas Komplementäres sind; das Vorhandensein der einen bedingt das der anderen. Ohne Ladungen gäbe es keine Lichtquanten; die Ladungen wirken durch elektromagnetische Felder aufeinander ein, und die Photonen sind die Quanten dieser Felder. Diese beiden Erscheinungsformen, Ladungen und elektromagnetische Felder, sind untrennbar miteinander verbunden; sie repräsentieren sich uns nur in ihrer Gesamtheit, eine Form allein ist für uns völlig undenkbar.

## 16. Kernmomente

In der im ersten Abschnitt behandelten Bohrschen Modelltheorie haben wir schon den Begriff des Momentes benutzt; er ist untrennbar mit dem Begriff der Drehung eines Körpers oder eines ganzen Systems verbunden. So hat ein Molekül, das ja ein System aus Kernen und Elektronen darstellt, ein Moment; es dreht sich nämlich um die Schwerachse des Systems. Da die zu ihm gehörenden Massen nicht in einem Punkt konzentriert sind, was ja in keinem physikalischen System der Fall ist, hat ein Molekül zum Beispiel ein sogenanntes

Trägheitsmoment, das eine gewisse Rolle spielt. Im Atom lassen wir das Elektron auf einer geschlossenen Bahn um den Kern laufen, was ein auf die Bahn bezogenes Moment ergibt: das Bahnmoment oder den Bahndrehimpuls, markiert durch einen Pfeil, der senkrecht auf der durch die Bahn gehenden Ebene steht. Da das kreisende Elektron einen Strom darstellt, ist mit dieser Bewegung eine magnetische Wirkung verbunden, das magnetische Bahnmoment. Ferner besitzt das Elektron einen Eigendrehimpuls, den Spin, der gleichfalls ein Moment darstellt. Banal ausgedrückt, heißt ein Moment haben, daß sich etwas drehen muß, um sich selbst oder auch um andere Massen, und einen Impuls haben bedeutet, sich in Bewegung befinden, wobei dieselbe auf irgendeiner ganz beliebigen Bahn erfolgen kann; die Hauptsache ist, die Masse bewegt sich. Dreht sie sich dabei auch noch in der oben angegebenen Art, so besitzt sie also einen Drehimpuls oder ein Drehmoment. Ein Auto, das sich auch nur mit der geringsten Geschwindigkeit bewegt, hat einen Impuls, seine Masse bewegt sich; fährt es noch in einer Kurve, so hat es bezüglich dieser Bahn einen Drehimpuls; es dreht sich mehr oder weniger während des Durchfahrens der Kurve. Ein Körper, der sich geradlinig bewegt, hat nur einen Impuls. Sobald er aber auch nur ganz wenig seine Richtung ändert, hat er während der Richtungsänderung einen Drehimpuls; seine sich bewegende Masse dreht sich gleichzeitig während der Vorwärtsbewegung etwas. Während dieser Zeit tritt eine Kraft auf, die ganz erhebliche Werte erreichen kann, die Zentrifugalkraft, die im Gleichgewichtszustand durch eine dieser entgegenwirkenden Kraft kompensiert werden muß. Im Falle des umlaufenden Elektrons ist dies die elektrostatische Anziehungskraft durch den Kern, die Coulombkraft.

Einen Drehimpuls hat aber auch ein Körper, der sich um seine Symmetrieachse dreht, der also eine Rotationsbewegung ausführt. Je schneller er sich dabei dreht, um so größer wird der Drehimpuls sein; er wird aber auch dann vergrößert, wenn sich das sogenannte Trägheitsmoment vergrößert. Ein Beispiel hierfür bietet ein Eisläufer, der eine sogenannte Pirouette dreht. Hebt er die Arme, dann vergrößert er das Trägheitsmoment und verringert dadurch seine Drehgeschwindigkeit; verkleinert er hingegen sein Trägheitsmoment, erhöht sich die Drehgeschwindigkeit. Dabei tritt natürlich gleichfalls die Zentrifugalkraft auf.

Diese beiden eingestreuten Schilderungen sollten uns einen Begriff vom Drehimpuls geben, wie er makroskopisch zu denken ist. Rotiert nun eine elektrische Ladung, so wird dadurch ein magnetisches Feld erregt. Dieses Feld wiederum läßt sich durch das ersetzen, welches ein Stabmagnet erzeugt, der in die Rotationsachse fällt, das heißt, in seinen Wirkungen kommt es jenem gleich. Ein Stabmagnet besitzt ein magnetisches Moment; das wissen wir von der Kompaßnadel her. Die physikalisch meßbare und darum interessierende Größe eines solchen Magneten ist sein magnetisches Moment; es dient uns als Maß für die

Größe der magnetischen Wechselwirkung mit einem anderen Magnetfeld, das man auf jenen einwirken läßt.

Wie man nun festgestellt hat, zeigen die Kernbestandteile ein magnetisches Moment, das Proton sowohl als auch das Neutron. Wollen wir dies also makroskopisch interpretieren, so würde das bedeuten, daß die Nukleonen im Kern auch eine Rotationsbewegung ausführen. Davon können wir jedoch nichts bemerken. Auf Grund des gemessenen magnetischen Momentes kommen wir jedoch nicht umhin, den Nukleonen einen Spin zuzuordnen, etwa so, wie wir dies schon beim Elektron getan haben. Aber so, wie sich schon dort kein Beweis für eine tatsächliche Rotation angeben läßt, ist es auch mit dem Kernspin. Nichts deutet darauf hin, daß wir es hier mit einer tatsächlichen Rotation zu tun haben. Es ist aus diesem Grunde nicht angebracht, sich unter dem Kernspin eine Rotation seiner Bestandteile vorzustellen, nur weil dies makroskopisch keine andere Deutung zuläßt.

Wir wollen auch darauf hinweisen, daß nicht sämtliche Kerne ein Magnetmoment zeigen; viele Kerne mit geradzahligem Atomgewicht haben ein solches nicht. In den Atomspektren macht sich das Vorhandensein des Kernspins durch die sogenannte Hyperfeinstruktur bemerkbar. Beim Einschalten eines äußeren Magnetfeldes tritt dies nicht nur in Wechselwirkung mit den durch Elektronenspin und Elektronenumlauf bedingten Magnetfeldern, sondern auch mit den durch den Kernspin verursachten. Das äußere Magnetfeld leistet also an mehreren Stellen des Systems Arbeit und verändert dessen innere Energie. Die Änderung des Kernspins ruft infolge sprunghafter oder gequantelter Änderungen neue Linien im Spektrum der ausgesandten Wellen oder Lichtquanten hervor. Die Intensität der Linien ist gering, da das Kernmagnetmoment größenordnungsmäßig nur etwa  $1/2000$  des durch die Elektronen verursachten Momentes beträgt, und infolgedessen ist die entsprechende Wechselwirkung mit dem angelegten Feld wesentlich kleiner.

### *17. Radioaktivität*

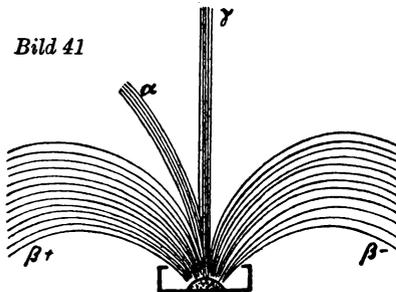
Als im Jahre 1895 Röntgen seine X-Strahlen entdeckt hatte, so nannte er sie, begann eine große Suchaktion nach weiteren für das Auge nicht sichtbaren Strahlen, die gleichfalls für unser Auge undurchsichtige Stoffe zu durchdringen vermochten. Der Franzose Becquerel hatte das Glück, weitere zu finden. Es handelte sich um Strahlen, die vom Uran ausgesandt wurden und sehr durchdringend waren. Man fand später, daß einige andere Stoffe, die als Begleit-elemente des Urans auftraten, in noch stärkerem Maße Strahlen aus-sandten. Das Uran findet man nicht in reinem Zustand, sondern mit anderen Stoffen und Elementen verunreinigt. Die Reindarstellung radioaktiver Elemente war bis in die jüngste Zeit ein chemisches Problem; die einzelnen Elemente

lassen sich nicht gerade einfach voneinander trennen. Dem Ehepaar Curie war es gelungen, zwei der radioaktiven Elemente zu isolieren. Man nannte sie Polonium, nach Polen, dem Heimatland von Madame Curie, und Radium, was so viel heißt wie „das Strahlende“. Besonders das letzte spielte in der dann folgenden Zeit eine hervorragende Rolle.

Heute wissen wir, daß es in der Natur viele Elemente gibt, die von selbst Strahlen verschiedener Art aussenden und daß es sich dabei um spontane Kernreaktionen handelt, bei denen diese Strahlung entsteht und ausgesandt wird. Zunächst stellte man drei Arten von Ausstrahlungen fest und gab ihnen die Namen  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung, wobei man die drei ersten Buchstaben des griechischen Alphabets benutzte. Diese Strahlung trat bei den natürlich radioaktiven Elementen auf; heute kennt man auch künstlich radioaktive Elemente, das heißt solche, die, nachdem sie mit irgendwelchen Partikeln beschossen wurden, gleichfalls radioaktive Strahlen aussenden. Hierbei hat man schließlich noch eine weitere Art von Strahlung feststellen können, die Positronenstrahlung.

Wir sagten bereits, daß die Strahlung ein Kerneffekt ist. Nach dem Aussenden einer Partikel erscheint der Kern umgewandelt; aus einem bestimmten Atom hat sich eine andere Sorte gebildet. Wir haben es also mit einer selbsttätigen Elementumwandlung zu tun.

Die Strahlenarten pflegt man im Magnetfeld zu trennen. Ein solches wirkt aber nur auf geladene Teilchen ein, also auf Protonen, Elektronen und Alphateilchen, das heißt Heliumkerne  ${}^2\text{He}^4$ . Das Bild der Strahlentrennung gehört heute schon



in jedes Buch über Atomphysik hinein, es wird sich also auch bei uns finden müssen (Bild 41). Wir sehen die nach rechts abgelenkten Betastrahlen sowie die etwas schwächer abgelenkten Alphastrahlen. Die Alphapartikel ist weit schwerer als das Elektron und wird darum nicht so stark vom Magnetfeld abgelenkt. Schließlich ist die nicht ablenkbare Gammastrahlung zu sehen. Sie wird durch die nach oben verlaufenden Strahlen angedeutet. Bei den Gammastrahlen

handelt es sich um elektromagnetische Wellen, die aber durch das Magnetfeld nicht beeinflußt werden und deren Quanten man Gammaquanten nennt. Gammaquanten sind also wie alle Photonen ungeladen und können nur mit Ladungen in Wechselwirkung treten. Es sind in unserem Bild noch die gleich

falls durch das Feld abgelenkten Positronenstrahlen eingezeichnet; Positronen sind Partikel von der gleichen Größe und Masse wie die Elektronen, aber entgegengesetzter Ladung. Für die beiden Elektronenstrahlungen benutzt man die Bezeichnungen  $\beta^-$ -Strahlung für die negativen Elektronen und  $\beta^+$ -Strahlung für die positiven Elektronen. Will man den Teilchencharakter besonders zum Ausdruck bringen, so kennzeichnet man die erste Art durch  $e^-$  und die zweite Art durch  $e^+$ . Um nicht fortwährend von positiven oder negativen Elektronen sprechen zu müssen, schließen wir uns den üblichen Bezeichnungen für diese beiden wichtigen Partikel an; das negative Elektron heißt also in Zukunft nur noch Negatron, das andere Positron. Soll aber der Wellencharakter mehr betont werden, unterscheiden wir sie also durch die verschiedenen Beta, mit Minus- oder Pluszeichen.

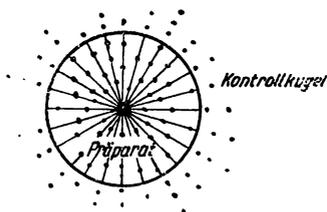
Diese Strahlungen sind für das Auge nicht sichtbar, das heißt, wenn wir etwa ein Gramm Radium in einer Kapsel haben, so kann man mit dem Auge von außen nichts wahrnehmen, was auf eine Ausstrahlung hinweist. Man kann sie mit verschiedenen Hilfsmitteln unserer Sinnenwelt zugänglich machen; im Laufe der Zeit hat man dazu einige Instrumente beziehungsweise einige Verfahren der Registrierung entwickelt.

Das älteste und hinsichtlich der Durchführung einfachste Verfahren benutzt einen Fluoreszenzschirm. Das kann eine Glasplatte sein, die hauchdünn mit einem Fett bestrichen und anschließend mit Zinksulfidpulver bestreut wird (Schwefel-Zink-Verbindung in Pulverform). Wird eine solche Platte von einer Partikel getroffen, so gibt das einen kleinen Lichtblitz. Man muß aber die Beobachtung in einem möglichst dunklen Raum vornehmen, um auch die schwachen Effekte zu erkennen. Ein anderes Verfahren besteht darin, das Präparat, also das die Strahlung aussendende radioaktive Element, mit einem photographischen Film zu umgeben, das heißt, ihn außen herumzulegen oder auch nur in kurzer Entfernung in der Dunkelkammer gegenüberzustellen. An den getroffenen Stellen findet eine Umwandlung in der lichtempfindlichen Schicht statt, die man nach der Entwicklung als Schwärzung sehen kann. Teilchen, die an dem Film entlangstreichen, also unter kleinerem Winkel gegen ihn einfallen, erzeugen eine Schwärzungsspur, deren kleine nebeneinanderliegende Pünktchen wie eine winzige Perlenkette aussehen.

Ein weiterer Nachweis der radioaktiven Strahlung ist die Ionisation von Gasen. Wir wissen schon, das Ionisieren bedeutet, daß den Atomen Elektronen aus der Hülle entrissen werden. Beim Durchqueren eines Gasraumes, zum Beispiel des in einem Glasgefäß eingeschlossenen Gases, entreißen die Partikel den auf ihrem Wege getroffenen Gasatomen ein oder mehrere Elektronen durch Stoß; man nennt das Stoßionisation. Das Gas wird ionisiert, es wird in eine gewisse Anzahl positiver und negativer Ionen zerlegt. Natürlich werden nicht alle Gasatome ionisiert, die Menge hängt von der Strahlungsintensität des Präparates

ab. Unter Strahlungsintensität versteht man die von einer Strahlungsquelle in einer bestimmten Zeit ausgesandte Teilchenzahl. Denkt man sich um ein kugelförmiges Präparat (dies nur zur Vereinfachung der Anschauung, es muß keineswegs kugelförmig sein) in kurzer Entfernung eine Kugel gelegt (Bild 42), so wird je Sekunde eine gewisse Zahl Partikel durch dieselbe hindurchtreten,

*Ausgeschleuderte Partikel*



*Bild 42*

und wir nehmen an, daß man die Zahl bestimmen kann. Denkt man sich um ein anderes Präparat, das heißt, um ein Präparat eines anderen radioaktiven Stoffes, wiederum eine Kugel in kurzer Entfernung gelegt, so wird in einer Sekunde nicht dieselbe Zahl von Teilchen wie im erstgenannten Fall durch diese hindurchtreten. Ist die Zahl größer, dann strahlt das Präparat stärker, es hat eine größere Intensität, im umgekehrten Fall hat es eine geringere Intensität.

Die Ionisation eines Gases wird selbstverständlich von der Intensität der Strahlungsquelle abhängen müssen. Besteht nun die Möglichkeit, die Zahl der ionisierten Teilchen eines Gases, also

der Ionen, zu bestimmen oder zu messen, so ist dies jeweils ein Maß für die Intensität der Strahlungsquelle. Läßt man Strahlung zum Beispiel durch einen mit Dampf übersättigten Raum hindurchtreten, so hinterlassen die Teilchen eine Nebelspur. Dieses Verfahren wendet man in der sogenannten Nebelkammer von Wilson an. Auf Grund der aufgezählten Eigenschaften der Strahlung hat man eine Reihe von Registrier- und Zählvorrichtungen entwickelt, die Intensitätsmessungen der ausgesandten Strahlung ermöglichen. Wir wollen sie in einem besonderen Abschnitt behandeln, so daß wir also vorerst nicht näher darauf einzugehen brauchen.

Der Zerfall von Elementen ist in der Hauptsache bei den schweren Kernen zu finden, in der Thorium-, Neptunium-, Aktinium- und Uran-Radiumreihe. Wir haben hier die Namen der vier bekannten Zerfallsketten oder -reihen angegeben, man nennt sie auch radioaktive Familien. Den Namen haben diese Reihen nach dem langlebigsten Element der einzelnen Ketten erhalten. Der Zerfall eines Elementes ist durch das Ausschleudern einer Partikel oder in wenigen Fällen auch von zwei Partikeln gekennzeichnet, also etwa Heliumkernen, Negatronen, Positronen oder Gammaquanten, also Photonen. Im allgemeinen schleudert ein Kern nur eine Partikel heraus, doch es gibt auch einige Kerne, die nach der Aussendung von Alpha- oder Betastrahlung nach einiger Zeit ein Gammaquant aussenden.

Es gibt auch mehrere leichte Kerne, die radioaktiv sind, zum Beispiel Kaliumkerne ( $K^{40}$ ), Rubidiumkerne ( $Rb^{87}$ ), und Samariumkerne ( $Sm^{152}$ ) sowie einige andere. Diese zeichnen sich vor allem durch ihre große Zerfallszeit aus. Die

Halbwertszeiten liegen in der Größenordnung von einigen Milliarden bis zu einigen Billionen Jahren. Man bezeichnet als Halbwertszeit den Zeitraum, in dem eine bestimmte Menge des Elementes zur Hälfte zerfallen ist. Von einem Gramm dieser Stoffe ist also in einigen Milliarden bis Billionen Jahren noch immer ein halbes Gramm vorhanden, was von einer geringen Strahlungsintensität zeugt. Ein Element strahlt um so stärker, je geringer die Halbwertszeit ist. Von einem Gramm Radium ist in 1600 Jahren nur noch ein halbes Gramm vorhanden, was auf eine ungleich stärkere Strahlung schließen läßt. Unter den schweren Kernen gibt es auch einige von riesiger Zerfallszeit, die Halbwertszeiten liegen in der Größenordnung von einigen Millionen Jahren bis zu einigen zehn Milliarden Jahren. So hat der Uran  $U^{238}$ -Kern eine Halbwertszeit von  $4\frac{1}{2}$  Milliarden Jahren, also eine geringe Strahlungsintensität. Aus den Zerfallszeiten der Elemente lassen sich Rückschlüsse auf das Alter der Erde ziehen; wir kommen dabei zu rund 3 Milliarden Jahren. Die Zahl ist noch umstritten; man findet häufig, aus anderen Erscheinungen berechnet, das Alter unseres Planeten mit 4 bis 9 Milliarden Jahren angegeben.

Wir wollen uns nun mit dem Begriff einer Zerfallsreihe näher befassen. Eine Menge eines Radionukliden  $A$  zerfällt in der Halbwertszeit  $t_A$  zur Hälfte in einen neuen Radionukliden  $B$ , dieser wiederum zerfällt in einer von der ersten verschiedenen Halbwertszeit  $t_B$  zur Hälfte in einen anderen Nukliden  $C$ , der seinerseits wiederum in der ihm eigentümlichen Zeit  $t_C$  in einen anderen Nukliden  $D$  zerfällt, usw. Der Zerfall findet schließlich sein Ende bei einem Kern, der seinerseits stabil ist, also keine Strahlung mehr aussendet. Diese zusammenhängende Reihe bezeichnet man als Zerfallsreihe oder radioaktive Familie, wie dies bei der Uran-Radiumreihe der Fall ist, die wir jetzt betrachten wollen. Die Uran-Radiumreihe beginnt mit dem sogenannten UI (U römisch eins) als Ausgangselement (siehe Bild 43). Dort ist dieses Element doppelt umrandet. Auf den geneigten Linien liegen die Isotopen, das heißt die Kerne mit dem gleichen  $Z$ ; auf der unteren Seite sind die Massenzahlen angegeben und auf der linken Seite die sogenannten Isotopenzahlen  $A - 2Z$ . Sie geben den Neutronenüberschuß an, das heißt, wieviel Neutronen mehr als Protonen vorhanden sind; ein Wert, der auf die Stabilität des Kernes schließen läßt. Für UI mit  $A = 238$  und  $Z = 92$  ergibt sich ein Wert von 54 (siehe auch Bild 43). Wir haben die vollständige Reihe angegeben, brauchen aber nur einen Zweig davon, den man leicht herausfinden kann (es ist der oben links verlaufende Zweig). Der horizontale Übergang von einem Kern zum nächsten ist mit dem Aussenden einer Alphapartikel verbunden, der senkrechte Übergang von oben nach unten ist verbunden mit einer Negatronenemission und der Übergang von unten nach oben mit einer Positronenemission.

Der Kern UI zerfällt unter Alphaemission in einen Kern  $UX_1$ . Die Bezeichnungen sind historisch bedingt, der Kern  $UX_1$  ist natürlich kein Uran mehr, sondern



nuten,  $RaD = 22$  Jahre,  $RaE = 5$  Tage,  $Po = 140$  Tage und schließlich das Endprodukt, das Bleisotop  $Pb^{206}$ , hier  $RaG$  genannt, mit einer Halbwertszeit von unendlich. Dieses Element zerfällt also nicht, es ist stabil.

Wie soll man nun die Zerfallsreihe verstehen. Zerfällt ein Urankern immer in dieser Weise? Nein, aber der Kern  $U^{238}$  nimmt diesen Weg. Es gibt auch noch andere Kerne des Urans mit anderer Massenzahl, diese gehören einer anderen Zerfallsreihe an und nehmen deshalb auch ihren Weg über andere Kerne. Wir haben nur eine Familie betrachtet. Die schweren Kerne gehören verschiedenen Zerfallsreihen mit etwas anderen Wegen zum Endprodukt an.

Ob nun ein langlebiger Kern in der nächsten Sekunde oder in einem Jahre oder erst in tausend Jahren zerfällt, kann man nicht vorausbestimmen, über einen *einzelnen* Kern läßt sich in diesem Sinne nichts sagen. Nur wenn man eine riesige Anzahl betrachtet, wie sie in der Praxis immer vorliegt, kann man statistische Aussagen machen. Es läßt sich dann eine Wahrscheinlichkeit dafür angeben, ob eine bestimmte Menge Uran oder Radium oder eines anderen radioaktiven Elementes innerhalb eines gewissen Zeitraumes eine weitere Partikel aussendet wird. Auch der Zerfallsprozeß unterliegt statistischen Gesetzen, bestimmte Einzelaussagen sind nicht möglich.

Hat man eine Menge eines Radionuklids, so kann man sagen, nach welcher Zeit nur noch die Hälfte davon vorhanden sein wird; diese restliche Hälfte zerfällt aber wiederum innerhalb der Halbwertszeit zur Hälfte, so daß nach der doppelten Zeit nur noch ein Viertel der Menge übrig ist. Ein Gramm Radium zerfällt in 1600 Jahren auf die Hälfte, auf ein halbes Gramm, in weiteren 1600 Jahren, also nach insgesamt 3200 Jahren, ist aber noch ein viertel Gramm vorhanden, das heißt, die Hälfte des halben Grammes; nach nochmals 1600 Jahren (4800 insgesamt) ist von diesem viertel Gramm noch ein achtel Gramm übrig, nämlich wiederum von der vorangegangenen Menge die Hälfte, und so läuft der Prozeß immer weiter. Der Zerfall nimmt also nicht nach einem linearen Gesetz ab, nicht etwa so, daß nach 3200 Jahren nichts mehr vorhanden ist. Das bedeutet, daß ein Präparat nicht gleichmäßig strahlt, sondern mit der Verringerung der Menge wird auch die Strahlung immer schwächer, wie man sich leicht überlegt.

Die zerfallenden Atome sinken durch die Teilchenemission auf der Stufenleiter immer weiter nach unten, sie kommen mit jedem Schritt ihrem Endprodukt immer näher. Wenn man also einen Uranblock hat, so befinden sich darin in Spuren noch alle möglichen Elemente, die innerhalb der betreffenden Zerfallsreihe vorkommen, wie dies unser Bild 43 zeigt. Wie schnell ein einzelnes ganz bestimmtes Atom, das vielleicht gerade eben vom  $UI$ -Zustand in den  $UX_1$ -Zustand übergegangen ist, weiter zerfällt, und wann es schließlich in das Endprodukt übergegangen ist, läßt sich nicht mit Bestimmtheit sagen. Darüber kann man höchstens eine Wahrscheinlichkeitsaussage machen; aber es leuchtet

unmittelbar ein, daß die Wahrscheinlichkeit dafür, das Endprodukt in soviel Sekunden zu erreichen, wie Stufen bis dorthin möglich sind, sehr gering ist. Eine Wahrscheinlichkeit hierfür ist gewiß vorhanden, sie ist nicht etwa gleich Null. Es besteht umgekehrt aber auch eine Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Atom, das eben aus dem UI-Zustand in den  $UX_1$ -Zustand übergegangen ist, das Endprodukt in einer Zeit erreicht, die weit größer ist, als die Summe der Halbwertszeiten für die einzelnen Zwischenkerne bis zum Endprodukt, das heißt, daß es in den einzelnen Zwischenkernstadien länger verbleibt, als die Halbwertszeit angibt.

Heute unterscheidet man zwei Arten der Radioaktivität und infolgedessen auch zwei Sorten von Radionukliden. Der natürlichen Radioaktivität unterliegen vor allem die schweren Elemente am Ende des periodischen Systems oberhalb von  $Z = 83$ . Das läßt im Hinblick auf die Zukunft dieser Elemente den für sie betrüblichen Schluß zu, daß ihre Tage gezählt sind. Sämtliche schweren Kerne sind instabil, sie zerfallen mehr oder weniger schnell, jedoch unaufhaltsam, und es läßt sich unschwer die Zeit angeben, in der man diese Elemente in der Natur nicht mehr vorfinden wird. Von diesem Zeitpunkt an gibt es auch keine natürliche Radioaktivität mehr, dann kann man also kein Radiumpräparat mehr nehmen, um es als Strahlungsquelle für kernphysikalische Untersuchungen zu benutzen. Doch ist dies für uns und auch für die dann lebenden Menschen kein Grund zur Beunruhigung, wir erzeugen uns die notwendigen Strahlen selbst.

Das Endprodukt der Zerfallsreihen ist Blei ( $Z = 82$ ) oder Wismut ( $Z = 83$ ), damit reichert sich schließlich das Weltvorkommen dieser Elemente langsam an. So ist es denn auch erklärlich, daß man aus der Anreicherung eines ungestört gelagerten Uranerzvorkommens mit dem Zerfallsendprodukt, in diesem Fall ist das ein Bleiisotop, auf das Alter der Erde Rückschlüsse ziehen kann. Man kennt ja den Zerfallsweg und die Halbwertszeiten der Zwischenkerne bis zum Endkern und kann so mit Hilfe des Gesetzes über den radioaktiven Zerfall die Zeit berechnen, die zur Bildung der vorgefundenen Menge des Endproduktes notwendig ist. Man nennt den Uranzerfallsprozeß auch die Uranuhr der Erde, sie gibt etwa die Erdzeit an, das heißt die Zeit, die seit der Bildung des Planeten schon verstrichen ist. Natürlich bedeutet dies nicht, daß die Erde seit dieser Zeit schon in der jetzigen Form existiert, sondern nur, daß die zur Bildung des heutigen Planeten zusammengetretenen Stoffe und Elemente sich seit dieser Zeit beieinander befinden.

Um die verschiedenen Strahler miteinander vergleichen zu können und um ein Maß für die radioaktive Strahlung zu haben, führte man den Begriff der Aktivität ein. Sie kennzeichnet einen Strahler in seiner augenblicklichen Verfassung, das heißt, wieviel Teilchen pro Zeiteinheit zerfallen. So ist die alte Aktivitätseinheit das Curie (sprich küri), mit den Unterteilungen Millicurie (mc) und Mikrocurie ( $\mu c$ ), dies sind  $3,7 \cdot 10^{10}$  Zerfallsprozesse je Sekunde (37 Milliarden),

beziehungsweise  $3,7 \cdot 10^7$  Prozesse je Sekunde oder  $3,7 \cdot 10^4$  Prozesse je Sekunde. Diese „schiefe“ Zahl kommt daher, daß ein Curie früher etwas anders definiert wurde, nämlich als diejenige Menge des Edelgases Radon, die im radioaktiven Gleichgewicht mit 1 g Radium steht. Betrachten wir uns nochmals Bild 43, so sehen wir, daß dem Radium in dem von uns zuvor betrachteten Zweig der Uran-Radiumzerfallsreihe das Radon folgt (Rn), nach der Alphaemission geht der Radiumkern in den Radonkern über. Diejenige Radonmenge, bei der in einer Sekunde gerade so viel Kerne in Radium  $A$  zerfallen, wie durch den ( $\alpha$ -) Zerfall von 1 g Radium wieder ergänzt werden, strahlt genau ein Curie ab, dessen Aktivität ist gleich 1c. Wenn von einem Element der Zerfallsreihe gerade je Zeiteinheit so viel Kerne zerfallen, wie ihm durch das vorhergehende Element bei dessen Zerfall wieder zugeführt werden, so sagt man, die beiden stehen im radioaktiven Gleichgewicht. Die mit 1 g Radium im Gleichgewicht stehende Radonmenge strahlt die oben angegebene Zahl von Alphateilchen ab, das heißt, in einer Sekunde zerfallen  $3,7 \cdot 10^{10}$  Radiumkerne.

Als neue Einheit wird das Rutherford benutzt, dessen Wert genau eine Million Zerfallsprozesse in einer Sekunde sind,  $\text{Ird} = 10^6$  Zerfallseinheiten/Sekunde; im allgemeinen rechnet man aber noch immer mit der Curieeinheit. Die Aktivität von 1 g  $\text{U}^{238}$  beträgt  $0,3 \mu\text{c}$ , das sind rund 120000 Zerfallseinheiten je Sekunde, also  $0,12 \text{ rd}$  gegenüber 1 g  $\text{Ra}^{222}$  mit  $3,7 \cdot 10^4 \text{ rd}$ . Ein Gramm  $\text{U}$  befindet sich aber gerade mit  $3,3 \cdot 10^{-7}$  g Radium im Gleichgewicht, woraus in beiden Fällen zu ersehen ist, wie ungleich stärker das Radium bei gleichen Mengen der verglichenen Elemente strahlt.

## 18. Strahlungsarten

### 1. $\alpha$ -STRAHLUNG

Die mit dem ersten Buchstaben des griechischen Alphabets bezeichnete Strahlungsart besteht aus winzig kleinen Partikeln, die mit großer Geschwindigkeit vom Zerfallszentrum weggeschleudert werden. Sie sind etwa von der Größe der Elektronen und werden schon von recht dünnen Metallfolien absorbiert, das heißt nicht mehr durchgelassen. Elemente, die Alphapartikel aussenden, nennt man in der Fachsprache der Physiker Alphastrahler. Es fällt auf, daß fast ausschließlich die schweren Elemente am Ende des periodischen Systems solche Alphastrahler sind; im Bild 43 haben wir ein Beispiel dafür. Unterhalb der Kernladungszahl 82 kommen nur in ein paar Ausnahmefällen Strahler dieser Art vor.

Zur Erforschung des Wesens der Strahlung sind mancherlei Versuche angestellt worden; denn es ist gar nicht so einfach, die den Physiker interessierenden

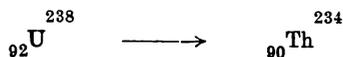
Eigenschaften und Merkmale festzustellen. Man kann ja leider nicht ein einzelnes dieser Teilchen einfangen und untersuchen, wie man eben makroskopische Körper zu untersuchen pflegt. Einer unmittelbaren Beobachtung entziehen sie sich durch ihre Kleinheit; ein einzelnes Teilchen wird man natürlich ebenso wenig sehen können, wie man ein einzelnes Elektron oder einen Kern sehen kann. Es gibt aber eine Reihe von Experimenten, die es uns ermöglichen, den notwendigen Einblick zu gewinnen. So wollen wir uns zunächst mit einer recht interessanten Beobachtung bekannt machen.

Bringt man eine kleine Menge Radium oder eines anderen Alphastrahlers in eine Gasentladungsröhre, aus der man das Gas zum größten Teil abpumpt, so stellt man nach einer gewissen Zeit (bis zu einigen Tagen) fest, wenn man durch Anlegen einer Spannung das Gas zum Leuchten bringt, daß sich in der Röhre Heliumgas befindet. Nach Lage der Dinge kann es von außen nicht in das Gefäß gekommen sein, also muß es sich in ihm gebildet haben. Diese Beobachtung legt den Gedanken nahe, daß sich das Helium nur durch die ausgesandte Alphastrahlung gebildet haben kann. Tatsächlich ist dies so. Aus vielen anderen Experimenten hat sich schließlich ergeben, daß es sich bei den Alphapartikel um Heliumkerne handelt, also um zweifach ionisierte Heliumatome, He-Atome, denen die beiden Elektronen fehlen. Als Gleichung geschrieben sieht das so aus:  
 ${}^4_2\text{He} = \alpha\text{-Teilchen}$ .

Mit dieser Erkenntnis läßt sich die obige Beobachtung leicht erklären. Die vom Präparat ausgeschleuderten Partikel prallen auf die Gefäßwände auf, das heißt, sie dringen etwas in die Oberfläche der Wände ein, dabei schlagen sie Elektronen heraus, mit denen sie Heliumatome bilden. Die Alphateilchen lagern sich die ihnen fehlenden zwei Elektronen also dadurch an, daß sie diese dem Gefäßmaterial entnehmen. Bei der großen Aktivität eines Radiumpräparates (die so wenig nachläßt, daß dies nur über sehr große Zeiträume feststellbar ist) hat sich schon nach einer verhältnismäßig kurzen Zeit eine meßbare Heliummenge gebildet, wenigstens ist diese Menge dann schon so groß, um bei Anregung der Heliumatome durch die angelegte Spannung die typischen Heliumlinien auszusenden.

Um Alphapartikel beobachten zu können, benutzt man seit Rutherford den Fluoreszenzschirm, wie wir ihn auf Seite 99 geschildert haben. Sobald der Schirm von einem Alphateilchen getroffen wird, gibt dies einen kleinen Lichtblitz, und tatsächlich erzeugt jedes einzelne Teilchen einen solchen Blitz. Es leuchtet ohne weiteres ein, daß man bei einem intensiven Strahler natürlich nicht die Zahl der auffallenden Partikel zählen kann, bei nicht allzu starken gelingt dies jedoch. Es sei bemerkt, daß ein Strahler mit einer großen Aktivität die Teilchen natürlich in jede Raumrichtung schleudert, so daß, wenn man einen ebenen Schirm in einiger Entfernung vom Präparat aufstellt, keineswegs etwa alle Teilchen auf diesen Schirm fallen werden, wie man sich leicht

überlegt. Die Zahl der auftreffenden Partikel wird immer geringer, je weiter man mit dem Schirm vom Zerfallszentrum weggeht und je kleiner er wird. Die Strahlung hat keine große Reichweite, sondern liegt nur in der Größenordnung von einigen Zentimetern. In Luft von 1 Atmosphäre Druck reichen die vom Radium ausgesandten Strahlen gerade 3,39 Zentimeter weit, beim Th C' sind die längsten Strahlen mit 11,6 Zentimeter beobachtet worden. Die Aussendung von Alphastrahlen wandelt die betreffenden Elemente in neue Elemente um, wie wir schon wiederholt betont haben. Im besonderen vermindert sich also bei der Alphaemission die Kernladung um zwei und die Masse um vier Einheiten. Hat man eine bestimmte Menge eines radioaktiven Elements, etwa Radium C oder C', so emittiert die Hälfte aller Atome innerhalb der Halbwertszeit je eine Alphapartikel und wandelt sich in die Atome von Radium C'' beziehungsweise Radium D um. Jedes Teilchen entführt dem betreffenden Kern zwei Protonen und zwei Neutronen und hinterläßt ein ionisiertes Atom, sofern das ursprüngliche Atom neutral war, das dann einen Überschuß von zwei Elektronen hat. Aus Bild 43 ist zu ersehen, daß der Kern und somit das entsprechende Atom oder Element  ${}_{92}\text{U}^{238}$  ein Alphastrahler ist, der sich infolge dieser Emission in den Kern  ${}_{90}\text{Th}^{234}$  umwandelt, also in ein Isotop des Thoriums. Man kann diesen Prozeß etwa durch die folgende Schreibweise darstellen:



In Bild 43 steht allerdings noch immer die alte Bezeichnung für das Thoriumisotop  $\text{UX}_1$ . Die Halbwertszeit für diesen Zerfallsprozeß ist sehr groß, was auf geringe Aktivität des Strahlers schließen läßt; sie beträgt 4,6 Milliarden Jahre, entspricht also dem Erdalter. Von diesem Uranisotop ist heute kaum noch die Hälfte der ursprünglichen Menge vorhanden, die andere Hälfte ist demnach schon zum Thoriumisotop  $\text{UX}_1$  oder  ${}_{90}\text{Th}^{234}$  zerfallen.

Alle Alphastrahler zeigen eine Eigenschaft, die gestattet, die Zerfallszeit experimentell zu bestimmen, wenn es sich um einen noch unbekanntem Strahler handelt. Die von den Atomen einer Sorte emittierten Partikel haben alle die gleiche Reichweite; dies trifft für die Betastrahler allerdings nicht zu. Die Reichweite hängt jeweils vom Medium ab, in dem sich die Teilchen bewegen, und ist selbstverständlich in dünneren größer als in dickeren oder dichteren Stoffen. Somit besitzen bei Atomen der gleichen Art die Alphapartikel auch gleiche kinetische Energie, was ja eine unmittelbare Folge der gleichen Reichweite ist.

Die Halbwertszeit eines Strahlers läßt Rückschlüsse auf die Zerfallsaktivität zu und dadurch auch auf die beim Prozeß frei werdende Energie. Ein Strahler mit einer kleinen Halbwertszeit weist eine größere Aktivität auf, und damit werden bei seinem Zerfall auch größere Energiemengen frei. Das erscheint

einleuchtend, wenn man bedenkt, daß Halbwertszeit bedeutet, daß während dieses Zeitraums die Hälfte einer vorgegebenen Substanz radioaktiv unter Teilchenemission zerfällt. Je geringer die Halbwertszeit von Strahlern ist, um so mehr Atome zerfallen bei gleichen Mengen in gleichen Zeiten. Es kommt hierbei natürlich auf die verwendeten gleichen Mengen an und selbstverständlich auch auf die gleiche Zeit; denn es ist offensichtlich möglich, für zwei verschiedene Strahler die doch unterschiedlichen Mengen zu bestimmen, bei denen in gleichen Zeiten etwa die gleiche Zahl von Atomen zerfällt. Dabei wird natürlich trotz der unterschiedlichen Aktivität die gleiche Energie pro Zeiteinheit frei.

Bei gleichen Mengen der Substanz hat also der Stoff eine kürzere Halbwertszeit, bei dem in gleichen Zeiträumen eine größere Energiemenge in Freiheit gesetzt wird. Diese Energie kann man kalorimetrisch bestimmen, das heißt mit wärmetechnischen Mitteln. Man läßt den Zerfallsprozeß in einer genau bemessenen Flüssigkeit ablaufen und bestimmt den durch den Zerfall frei werdenden Energiebetrag durch Messung der Temperaturerhöhung der Flüssigkeit. Nun nützt natürlich die genaueste Messung nichts, wenn nicht ein Gesetz vorliegt, das die zu ermittelnde Größe mit der gemessenen verknüpft. Die Gesetze, welche die Zerfallsenergie mit der Halbwertszeit in Beziehung bringen, sind empirisch ermittelt worden, das heißt gemäß den gemachten Erfahrungen. Es handelt sich vor allem um zwei, die sich jedoch nicht allzu wesentlich unterscheiden (die Gesetze von Geiger-Nuttall und von Swinne).

Der radioaktive Zerfall ist ein statistischer Prozeß und unterliegt Wahrscheinlichkeitsgesetzen. Er ist ein typisches Kennzeichen der Mikrowelt, die sich nicht streng kausal verhält, wie wir im Abschnitt über Wellen und Korpuskel bereits erwähnt haben. Diese Struktur mikroskopischen Geschehens ist offenbar dessen Attribut. So ist es also zum Beispiel gar nicht möglich, den Zerfall eines Atoms oder seines Kernes präzise vorauszusagen. Hierfür gibt es einfach kein kausales Gesetz, das heißt kein Gesetz, das den Zeitpunkt des Zerfalls zu bestimmen erlaubt. Wann ein einzelner Kern zerfällt, hängt völlig vom Zufall ab, das drückt sich mathematisch darin aus, daß die Wahrscheinlichkeit seines Zerfalls immer die gleiche ist und bleibt, solange er existiert.

Betrachten wir zum Beispiel das Radium mit einer Halbwertszeit von rund 1600 Jahren. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Kern einer bestimmten Menge dieses Elementes jetzt oder erst in 1600 Jahren zerfällt, ist stets die gleiche, sie ist aber auch für die nächsten 1600 Jahre um nichts größer geworden. Dieser Satz stammt aus der Erfahrung. Es hat sich gezeigt, daß sich von einer einheitlichen radioaktiven Substanz in gleichen Zeiten immer die gleiche Teilmenge in das Folgeprodukt der Zerfallsreihe umwandelt. Von 1 g Radium ist in 1600 Jahren nur noch ein  $\frac{1}{2}$  g vorhanden, in weiteren 1600 Jahren ist dann von diesem  $\frac{1}{2}$  g nur noch die Hälfte vorhanden, also ein  $\frac{1}{4}$  g, und so geht es fort. Nach jeweils 1600 Jahren ist immer von der Ausgangsmenge stets noch die Hälfte

vorhanden, die jeweils vorhandenen Mengen halbieren sich im Zeitraum der sogenannten Halbwertszeit, die daher ihren Namen hat. Theoretisch dauert dieser Prozeß unbegrenzt lange, praktisch dürfte er nach geraumer Zeit zu Ende sein, nämlich dann, wenn sich keine Mengen des Stoffes mehr nachweisen lassen. Sobald es uns nicht mehr möglich ist, Spuren eines Elementes nachzuweisen, wissen wir auch nichts von seiner Existenz. Aus diesem Grund ist die Zahl der bekannten Elemente in gewissem Sinne von der Subtilität unserer Nachweisinstrumente abhängig. Von einem schweren Element oberhalb  $Z = 104$  dürften bei vorausgesetzter geringer Halbwertszeit und geringer Ausgangsmenge heute nur noch schwer nachweisbare Spuren vorhanden sein, wenn außerdem noch die Verteilung der anfänglichen geringen Mengen über den Planeten berücksichtigt wird. Das bedeutet, anders ausgedrückt, die Möglichkeit, daß außer den vier radioaktiven Zerfallsreihen früher noch andere vorhanden waren.

Für den vorher angegebenen und erläuterten Erfahrungssatz ist die gleichbleibende Zerfallswahrscheinlichkeit nur eine mathematische Formulierung dieses Satzes, nur eine Folgerung aus ihm. Bei einem Menschen ist dies anders, die Wahrscheinlichkeit seines Ablebens nimmt mit seinem Alter zu, und ähnlich ist es auch mit Maschinen und Bauwerken oder anderen menschlichen Konstruktionen. Die Endlichkeit der genannten Individuen oder ihrer Schöpfungen ist ein aus der Erfahrung entnommener Satz, und die hierauf angewandte Statistik muß diesen Satz also in ihrem Gewande wiedergeben, das heißt, die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines gewissen Ereignisses muß mit zunehmender Zeit gleichfalls zunehmen.

Wir haben gesagt, daß *der Zerfall eines einzelnen Kernes* einer radioaktiven Substanz *nicht kausal* ist und vom Zufall dirigiert wird. Es ist von größter Wichtigkeit, hierzu nähere Ausführungen zu machen, da gerade dieses Faktum stets Anlaß zur Konfusität oder bewußt schlechten Auslegung war und ist.

Der Physiker bestreitet also nicht, daß es in der Makrowelt kausal zugeht, er bezweifelt nicht, daß sich aus den gemessenen Anfangsdaten die zukünftigen eines Makrokörpers voraussagen lassen. Aus den gemessenen und feststellbaren Abweichungen eines Planeten von seiner Bahn kann man zweifellos auf die Ursache zurückschließen oder aus dem Vorhandensein der Planeten und der gegenseitigen Einwirkung die zukünftige Konstellation vorhersagen. Sobald wir uns aber in das Reich der Elementarpartikel begeben, ist jegliches Einzelgeschehen akausal, so wird andererseits behauptet. Der radioaktive Zerfall der Elemente ist ein treffendes Beispiel dafür. Keineswegs aber wird damit behauptet, daß in der Natur der Zufall regiert; denn wäre dies der Fall, dürften sich ja zum Beispiel über den Zerfall der Elemente überhaupt keine Aussagen machen lassen; den Zufall kann man auch mit der Mathematik nicht einfangen. Es lassen sich aber doch Gesetze angeben, die recht gut das Geschehen wiedergeben.

Es wird behauptet, daß innerhalb der sogenannten Halbwertszeit genau die Hälfte aller ursprünglich vorhandenen Kerne zerfallen ist, und die Erfahrung hat dies bestens bestätigt. Das ist ein Naturgesetz und sogar ein genaues, keines von dem man sagt, es stimme nur so ungefähr. Je größer die in Betracht kommenden Mengen sind, um so genauer ist dies Gesetz erfüllt. Durch die letzte Formulierung ist wohl schon zum Ausdruck gebracht, woraufes hier ankommt.

Von einem *einzelnen* Atom kann man also nicht voraussagen, wann es zerfällt, aber von einer *großen Anzahl*, wie sie ja praktisch fast immer vorliegt, läßt sich sogar ziemlich genau voraussagen, wann hiervon nur noch die Hälfte vorhanden sein wird. Sobald Mengen ins Spiel kommen, werden die gemachten Aussagen kausal. Sage mir, welches radioaktive Element du hast, und ich sage dir dann, in welchem Zeitraum davon nur noch die Hälfte vorhanden ist. Aus den Anfangsdaten, der Art des Elementes, kann man seine Zukunft vorher-sagen, wann nur noch ein bestimmter Bruchteil vorhanden sein wird; dies ist Kausalität.

Das Einzelgeschehen in der Mikrowelt verläuft akausal, aber es herrscht keinesfalls der blinde Zufall, sondern statistische Kausalität. Die Zukunft eines einzelnen Teilchens hängt vom Zufall ab, das Verhalten eines Teilchenkollektivs jedoch ist bestimmt, genau bestimmt. Hier gibt es keinen Zufall mehr. Es kann nicht passieren, daß etwa nach 1600 Jahren doch noch hin und wieder mehr als die Hälfte der Ausgangsmenge vorhanden ist, daß die Gültigkeit des Gesetzes eben doch vom Zufall bedingt ist. Wenn wir an die Elektronenbeugungsaufnahme auf Seite 52 zurückdenken, so kann es also nicht sein, daß sich die Elektronen einmal so über die Photoplatte verteilen und beim nächstemal etwas anders (bei gleichen Bedingungen natürlich). Das Ergebnis des Experimentes ist also nicht zufällig so, es ist nicht zufallsbedingt, sondern fällt stets so und nur so aus. Das ist für uns der Beweis einer strengen Kausalität, aber einer anderen als der gewöhnlichen, die man im Gegensatz hierzu als klassische Kausalität bezeichnet.

Das Geschehen in der Mikrowelt ist statistisch kausal. Die Physik ist also nicht in Widerspruch zu sich selbst geraten. Ein sehr wichtiges mathematisches Werkzeug der Physik für die statistische Kausalität ist die Quantenmechanik, die also auch nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über das Verhalten von Partikeln und Systemen aus solchen macht. Warum sie keine kausalen Aussagen der gewöhnlichen Art machen kann, scheint nach unseren bisherigen Ausführungen wohl leicht verständlich: Wo keine klassische Kausalität herrscht, lassen sich auch keine entsprechenden Aussagen machen. Wenn die Mikrowelt statistisch kausaler Struktur ist, muß auch die Beschreibungsmethode von derselben Struktur sein, das ist selbstverständlich.

Nach diesem Exkurs über die Kausalität wollen wir uns wieder der Alpha-partikel zuwenden. Dieses Teilchen besteht aus zwei Protonen und zwei Neu-

tronen, ist also zweifach positiv geladen. Da der Kern gleichfalls aus Nukleonen besteht, nimmt er diese Teilchen aus seinem Vorrat, um sie auszuschleudern. Man hat aber noch keinen Protonen- oder Neutronenstrahler beobachten können, also einen, der diese Teilchen ohne äußere Anregung emittiert. Der Kern entläßt Negatronen, Positronen, Gammaquanten und Alphapartikel. Es liegt jedoch kein Grund vor anzunehmen, daß diese Partikel schon im Kern existieren, vielmehr sind wir der Ansicht, daß die Korpuskel erst im Moment des Ausschleuderns entsteht, daß heißt, erst in diesem Moment vom Kern gebildet wird. Es ergibt sich auch die Frage, warum er ausgerechnet eine symmetrische Gruppe von vier Partikeln zusammenbaut und wegschleudert und nicht einfach Protonen oder Neutronen oder zwei Protonen usw.

Wir wollen die Problematik dazu nicht entwickeln, sondern nur bemerken, daß der Kern keine andere Möglichkeit hat, will er in einen energetisch tieferen Zustand gelangen, als die Emission der genannten Partikel oder von Gammastrahlung. Die Alphapartikel stellt eine besonders stabile Korpuskel dar und wird deswegen auch vorzugsweise von bestimmten Strahlern emittiert. Es ist daher auch noch kein natürlicher Deuteronenstrahler beobachtet worden.

Für ganz bestimmte Kernsorten besteht also die Möglichkeit, durch Aussendung einer Alphapartikel in einen energetisch tiefer liegenden Zustand überzugehen. Hiervon machen diese Elemente Gebrauch, und zwar erfolgt der Prozeß nach statistischen Gesetzen. Nach diesen Gesetzen gelingt es einer gewissen Zahl von Partikeln, den Gewalten der Kernkräfte zu entgehen und sich über den Anziehungsbereich oder die Reichweite derselben vom Kern zu trennen. Sind sie aber erst aus der „Festung Kern“ heraus und selbständig, geraten sie noch einmal kurz unter die Wirkung des zurückbleibenden Kernes, diesmal aber zu ihrem Zweck und Vorteil; sie werden von den abstoßenden Kräften, das heißt den Coulombkräften der Protonen, mit Vehemenz hinweggeschleudert. Dabei erlangen sie recht beachtliche Geschwindigkeiten, etwa bis zu  $\frac{1}{15}$  der Lichtgeschwindigkeit, das sind bis zu 20000 Kilometer in der Sekunde; die Protonen verhelfen den Teilchen zur raschen Flucht. Die Reise geht zwar für unsere Begriffe nicht sehr weit, für die kleinen Partikel ist es aber, gemessen an ihrer eigenen Größe, schon eine recht weite Strecke, die sie da zurücklegen. Nehmen wir ihre Größe zu etwa  $10^{-13}$  Zentimeter an und eine zurückgelegte Strecke von 10 Zentimetern, so machen sie eine Reise, die hundertbillionenmal ihrer eigenen „Länge“ entspricht. Wollten wir etwa eine Fahrt unternehmen, die das Hundertbillionenfache unserer „Länge“ beträgt (unsere größte Dimension ist die Körpergröße, die wir hier mit 150 Zentimeter annehmen), so müßten wir eine Strecke von 150 Milliarden Kilometer zurücklegen. Das ist etwa tausendmal die Entfernung Erde-Sonne, die rund 150 Millionen Kilometer beträgt, oder fast 4 Millionen mal die Länge des Erdumfanges. Man sieht also, daß die Partikel proportional ihrer Größe eine enorme Reichweite haben.

Kein Mensch legt während seines ganzen Lebens eine dementsprechende Strecke zurück; nur die Flugkapitäne der großen Luftverkehrslinien erreichen in ihrem Leben Strecken von einigen Millionen Kilometern.

Die Reichweite der Teilchen ist natürlich in den einzelnen Medien verschieden; in einem dichteren Stoff werden sie weniger weit als in einem dünneren reichen. Schießt man sie auf eine Aluminiumfolie von einigen hundertstel Millimetern Dicke, so gibt es kein Teilchen, das diese Barriere durchfliegt, sie werden alle in der Folie stecken bleiben. Man sagt, daß sie von dieser Folie absorbiert werden, was ja wörtlich bedeutet, daß sie verschluckt werden. Obwohl die Partikel mit einer großen Geschwindigkeit vom Kern weggeschleudert werden, besitzen sie nur ein geringes Durchdringungsvermögen. Betastrahlen werden dagegen erst von 1—2 Millimetern Aluminium absorbiert; Gammastrahlen gehen auch hier noch hindurch, sie haben ein noch größeres Durchdringungsvermögen. In der Luft reichen alle Strahlungsarten ganz erheblich weiter, jedoch hängt die Reichweite auch hier merklich von der Dichte ab. In Blei werden sie von wesentlich dünneren Folien absorbiert, einige Zentimeter davon genügen schon, um auch die harten Gammastrahlen zu absorbieren.

Wie hat man sich den Absorptionsprozeß etwa in der Luft vorzustellen? Die Moleküle der in der Luft enthaltenen Gase befinden sich ja in ständiger Wärmebewegung, wie wir bereits erwähnt haben. — Es sei hier nachdrücklich betont, daß es im eigentlichen Sinne des Wortes keine Luftmoleküle gibt; denn Luft ist keine Verbindung, sondern ein Gemenge verschiedener Gase, beziehungsweise verschiedener Gasmoleküle. Die einzelnen das Medium Luft bildenden Gase sind in molekularer Form vorhanden als  $O_2$ -Moleküle,  $H_2$ -Moleküle und  $N_2$ -Moleküle, und nur in diesem Sinne kann man also von Luftmolekülen sprechen. — Schießt man in den ruhelosen Schwarm von verschiedenartigen Molekülen Alphateilchen hinein, so werden sie natürlich in Wechselwirkung mit den Molekülen treten. Die Art der Einwirkung ist nicht immer die gleiche, führt jedoch im Endeffekt zu den gleichen Ergebnissen; die Bewegungsenergie der Teilchen wird umgewandelt, sie wird auf die Moleküle übertragen.

Die im Vergleich zu den Molekülen sehr schnellen Partikel durchfliegen in vielen Fällen die Atome. Dabei werfen sie getroffene Elektronen aus den Atomen heraus, sie ionisieren die H-Atome, O-Atome oder N-Atome. Wie wir wissen, muß aber zur Abtrennung von Elektronen aus den Atomen ein ganz bestimmter Energiebetrag zur Verfügung stehen, die sogenannte Ionisierungsenergie. Um diesen Energiebetrag wird jeweils bei einem Zusammenstoß die kinetische Energie der stoßenden Partikel vermindert, die sich so nach einer gewissen Anzahl von Zusammenstößen der genannten Art im Sinne der Teilchen langsam, für unsere Begriffe jedoch rasch aufzehrt. Die Ionisierungsenergie für die H-Atome beträgt 13,53 eV, für die N-Atome 14,47 und für die O-Atome 13,56 eV, also im Mittel etwa 14 Elektronenvolt. Die kinetische Energie der Teilchen ist fast

eine Million mal größer; sie beträgt für die von Radium C ausgesandten Teilchen etwa 7,6 Mev (Geschwindigkeit etwa 20000 km/sec.). Das entspricht der Energie, die ein Elektron erlangt, wenn die durchlaufene Spannungsdifferenz 7,6 Millionen Volt beträgt (die Geschwindigkeit der Elektronen ist dabei größer als die der Alphapartikel mit gleicher Energie). Nehmen wir an, die gesamte Energie der Partikel wird nur zur Ionisation der Atome verbraucht, so könnten also fast 500000 Atome ionisiert werden, bevor das Teilchen auf die Geschwindigkeit Null abgebremst ist (eine genauere Rechnung ergibt einen Wert von  $2,2 \cdot 10^5$  ionisierten Teilchen, also 220000).

Der Elektronenstoß ist aber nicht die einzige Art der Energieumwandlung der Alphapartikel; sie können auch mit einem Atomkern zusammenstoßen. Dieses Ereignis wird weniger oft vorkommen, ein  $H_2$ -Molekül hat 2 Elektronen und 2 Kerne, ein  $N_2$ -Molekül hat schon 14 Elektronen und nur 2 Kerne, ein  $O_2$ -Molekül hat schließlich 16 Elektronen und gleichfalls nur 2 Kerne; allein aus dieser Verteilung der „Zielscheiben“ ist das wohl einleuchtend. Doch selbst diejenigen Teilchen, die in unmittelbare Nähe des Kernes gelangen, stoßen

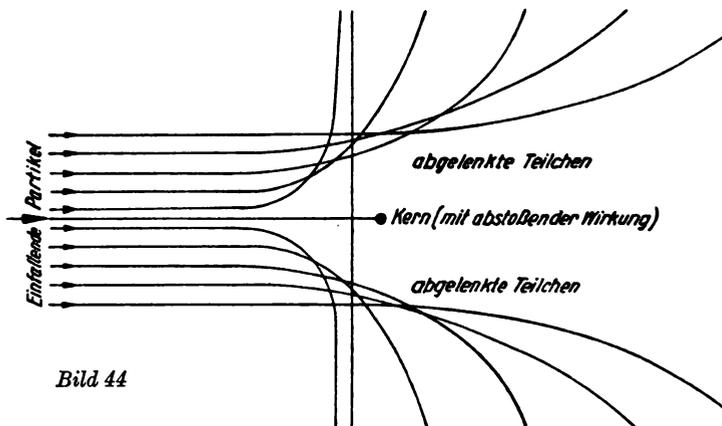


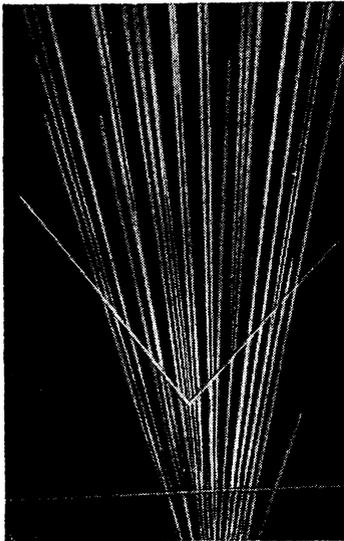
Bild 44

ja keineswegs immer mit ihm zusammen. Im Bild 44 zeigen wir die Situation für ein Bündel aus der gleichen Richtung auf einen Kern einfallender Alphateilchen. Nur bei zentralem Stoß gelangt die Korpuskel auch wirklich in den Kern, vorausgesetzt, daß sie die nötige Energie dazu hat, das heißt, daß sie gegen das durch die Protonen verursachte Coulombfeld des Kernes anlaufen kann. Infolge der gleichartigen Ladung stoßen sich ja Kern und Partikel schon in einiger Entfernung vom Atom beziehungsweise Kern ab, und die kinetische

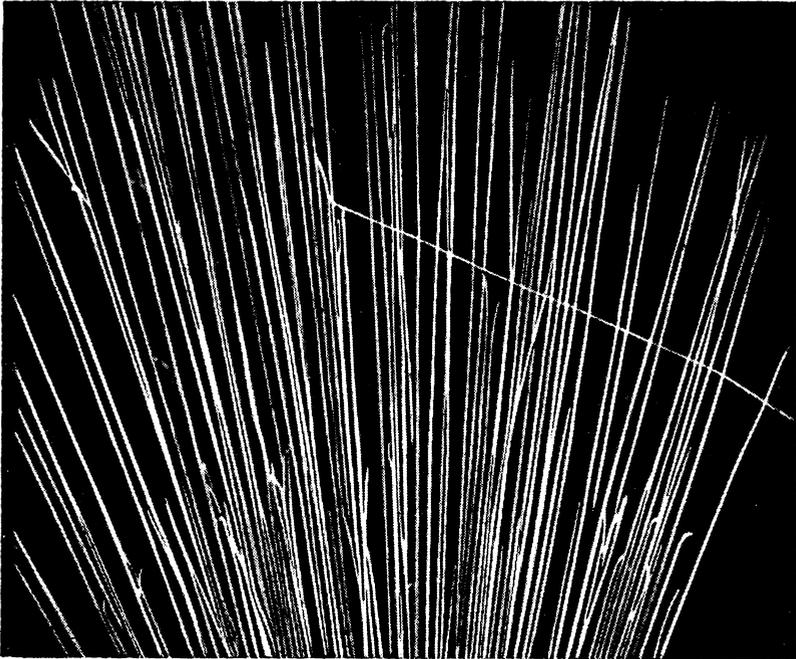
Energie des stoßenden Teilchens muß bis auf einige  $10^{-18}$  Zentimeter an den Kern heran (das heißt, bis auf die Reichweite der Kernkräfte) größer sein als die potentielle Energie infolge der Coulombabstoßung. Trifft die Korpuskel aber nicht zentral auf, so wird sie durch das Coulombfeld des Kernes in der angedeuteten Weise abgelenkt, man sagt, sie wird gestreut. Je näher sie am Kern vorüberstreift, um so stärker wird sie abgelenkt; weiter draußen ist die Partikelbahn nur noch leicht gekrümmt (im Bild die beiden äußersten Bahnen). Auch der Prozeß der Streuung von Teilchen am Kern ist, strenggenommen, mit einem Geschwindigkeitsverlust und damit auch mit einem Energieverlust der stoßenden Teilchen verbunden, jedoch ist er bei der schweren Alpha-partikel sehr klein und kann vernachlässigt werden.

Die genannten beiden Arten der Energieaufzehrung lassen sich recht gut in der Wilsonschen Nebelkammer sichtbar machen, auf die wir im nächsten Abschnitt noch näher im Zusammenhang mit anderen Geräten eingehen werden. Im Bild 45a und 45b zeigen wir, was man als Folge der beiden Prozesse beobachten kann. Das erste der beiden Bilder zeigt die Spuren der von Radium C und C' ausgeschleuderten Alphapartikel mit ihrer verschiedenen Reichweite. Die Teilchen ionisieren, wie oben angeführt, auf ihrem Wege die in der Kammer enthaltenen Atome, bis schließlich ihre Energie verbraucht ist. An diesen ionisierten

*Bild 45a*



Atomen schlägt sich Wasserdampf nieder und macht so den Weg der Alphapartikel als Dampfspur kenntlich. Man beobachtet also nicht etwa unmittelbar den Elektronenstoß, sondern nur seine Folgen. Die Masse der Heliumkerne ist 7360 mal größer als die Elektronenmasse, die aus diesem Grunde die Alphakorpuskel nicht abzulenken vermag, was sich in der gradlinigen Spur der Strahlen äußert. Anders liegen die Verhältnisse wieder beim Kernstoß, den Bild 45b zeigt. Bild 45a stellt den Zusammenstoß einer Alphapartikel mit einem Heliumatom dar, also von zwei etwa gleichartigen Teilchen. Es sind die infolge dieses Ereignisses auftretenden zwei Spuren zu erkennen; die eine gehört dem stoßenden Teilchen und die andere dem getroffenen, dem sogenannten Rückstoßkern. Beim Zusammenprall der



*Bild 45b*

gleich großen Partikel erleidet das getroffene einen Rückstoß und verursacht durch Ionisation gleichfalls eine Nebelspur. Im Bild 45b ist der Stoß gegen ein Stickstoffatom beziehungsweise gegen einen Stickstoffkern gezeigt. In diesem Fall ist der getroffene Kern um einiges größer als der stoßende, und dies ist im Bild auch leicht zu erkennen: Der schwerere Rückstoßkern fliegt nicht so weit, seine Bahn ist kürzer. Infolge von Elektronenstößen oder von Kernstößen verlieren die Alphapartikel also ihre kinetische Energie vollkommen und werden zu Heliumatomen. Im allgemeinen werden sie sich freie Elektronen einfangen; solche sind entweder durch die Ionisation und bisweilen auch aus anderen Prozessen herrührend in den Gasen vorhanden. In den Metallen (elektrischen Leitern) sind überdies noch genügend freie Elektronen gegenwärtig, die für den Ladungstransport verantwortlich sind. Dadurch bildet sich in sehr geringen Mengen Helium. Stößt jedoch einmal eine Alphapartikel mit einem Wasserstoffkern (Proton) zusammen, so erfährt das leichtere Teilchen eine größere Geschwindigkeit, als sie

das stoßende besitzt, und zwar ist sie bis zu 40 Prozent größer; man bezeichnet die weggeschleuderten Protonen als  $H$ -Strahlen. Die von diesen erreichten Geschwindigkeiten liegen in der Größenordnung von etwa einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit; ihre Reichweite in der Luft beträgt etwa bis zu 28 Zentimeter, sie ist also entschieden weiter als die der Alphastrahlen. Es wird sicher dem Leser plausibel erscheinen, daß beim Stoß eines schweren Teilchens gegen ein leichtes dieses sich mit größerer Geschwindigkeit wegbewegt. Man kann sich die Situation mit zwei an Fäden aufgehängten Stahlkugeln klarmachen, indem man die größere gegen die ruhende kleinere Kugel schwingen läßt.

Die Alphapartikel dienten vor allem zur Zeit Rutherfords als Geschosse zur Kernuntersuchung. Die gemachten Streuversuche gaben einigen Aufschluß über die Ladung, Masse und die Reichweite der Coulombkräfte. Heute sind diese Strahlen jedoch in ihrer Bedeutung für Kernuntersuchungen weit zurückgegangen, was seine Gründe zum Teil darin hat, daß ihre Energie für die entsprechenden Versuche viel zu gering ist; sie liegt in der Größenordnung von einigen Mev (etwa bis zu 9 Mev). Es stehen uns heute weit energiereichere und wirkungsvollere Partikel zur Verfügung, und so beschränkt sich die Verwendung der Alphastrahlung nur noch auf gewisse Versuche, bei denen kleinere Energien ausreichend sind. In den modernen Großgeräten lassen sich Alphapartikel auf wesentlich größere Energien künstlich beschleunigen, die in der Größenordnung von einigen 100 Mev liegen. Erst mit solchen Energien sind wirkungsvollere Experimente möglich, so zum Beispiel künstliche Partikelerzeugung.

## 2. $\beta^-$ -STRAHLUNG

Ein Teil der schweren Elemente sind  $\beta^-$ -Strahler; sie schleudern beim Zerfallsprozeß ein Negatron aus. Dieses Teilchen ist aber nicht im Kern von vornherein vorhanden; es wird erst während des Zerfallsprozesses gebildet. Weiter vorn haben wir bereits einmal erwähnt, daß man ursprünglich annahm, der Kern enthalte auch Elektronen. Die Annahme wurde durch den  $\beta^-$ -Zerfall nahegelegt und erschien auch höchst plausibel. Doch verschiedene Erscheinungen sprachen gegen diese Annahme, die sich schließlich in der Folgezeit als unhaltbar erwies und durch die Hypothese der Partikelerzeugung während des Zerfalls ersetzt wurde.

Wie ändern sich nun die beiden wichtigsten Kerncharakteristiken Masse und Ladung infolge der Negatronenemission? Der Kern allein besitzt nur positive Ladung, und würde er ein Proton aussenden, so wäre dies mit dem Verlust einer positiven Elementarladung verbunden. Das emittierte Teilchen trägt aber eine negative Elementarladung aus dem Kern hinweg, und, das ist das Seltsame, diese Ladung ist im Kern anscheinend gar nicht vorhanden. Man klärt die Situation aber leicht durch Anwendung des Ladungserhaltungsgesetzes, wonach bei sämtlichen Vorgängen stets die Ladung erhalten bleibt; Ladung kann also

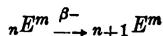
weder erzeugt noch vernichtet werden. Wenn der Kern  $n$  Protonen besitzt, so bedeutet dies eine  $n$ -fache positive Ladung. Verliert er eine negative Ladung durch Emission eines Negatrons, so ist dies gleichbedeutend mit dem Auftauchen einer positiven Ladung. In Form einer Gleichung sieht es so aus:

$$n \cdot (+) - 1 \cdot (-) = n + 1 \cdot (+)$$

und bedeutet also: Nehme ich von  $n$ -positiven Ladungen eine negative weg (daher das Minuszeichen vor der 1, es wird eine negative Ladungseinheit weggenommen), so bleiben zunächst  $n$ -positive Ladungen zurück, aber es erscheint jetzt noch eine positive Ladung mehr, und zwar diejenige, die sich vorher mit der Negatronenladung gerade neutralisiert hatte. Da Ladungen stets an Massen gebunden sind, muß also im Kern als Träger der neu aufgetauchten positiven Ladung ein Proton erschienen sein. Es wäre natürlich denkbar, daß irgendein anderes neues Elementarteilchen mit positiver Ladung sich gebildet hätte; doch widerspricht dies unmittelbar der Auffassung vom Aufbau des Kernes aus Protonen und Neutronen, die wir heute als gültig annehmen. Die Zahl der Protonen im Kern hat um eins zugenommen, obwohl von außen kein derartiges Teilchen hineingelangt ist, aber es sind ja auch noch Neutronen anwesend. Nimmt man daher an, daß sich ein Neutron in ein Proton verwandeln kann unter Aussendung eines Negatrons, so wäre dem Satz von der Ladungserhaltung Genüge getan. Wir wollen deshalb vorläufig den  $\beta^-$ -Zerfall erklären als den Übergang eines Neutrons in ein Proton, wobei ein Negatron ausgesendet wird.

Auch hier ist wieder, wie beim Alphazerfall, die Umwandlung eines Neutrons vom Zufall abhängig; es läßt sich also keine Aussage darüber machen, wann ein ganz bestimmtes Atom ein Negatron emittiert, ob dies schon innerhalb der nächsten Sekunde oder erst nach Ablauf einer sehr großen Zeitspanne erfolgt. Das Neutron wandelt sich spontan, also ohne äußere Anregung und Beeinflussung, in ein Proton um.

Durch die Emission eines Negatrons nimmt die Kernladung eines Elementes um eine Ladungseinheit zu; es steigt im periodischen System der Elemente um einen Schritt nach oben. Die Massenzahl ändert sich dabei nicht; denn die Masse des Elektrons ist so gering, daß sie ohne merklichen Fehler vernachlässigt werden kann. Der Zerfallsprozeß läßt sich etwa so andeuten:

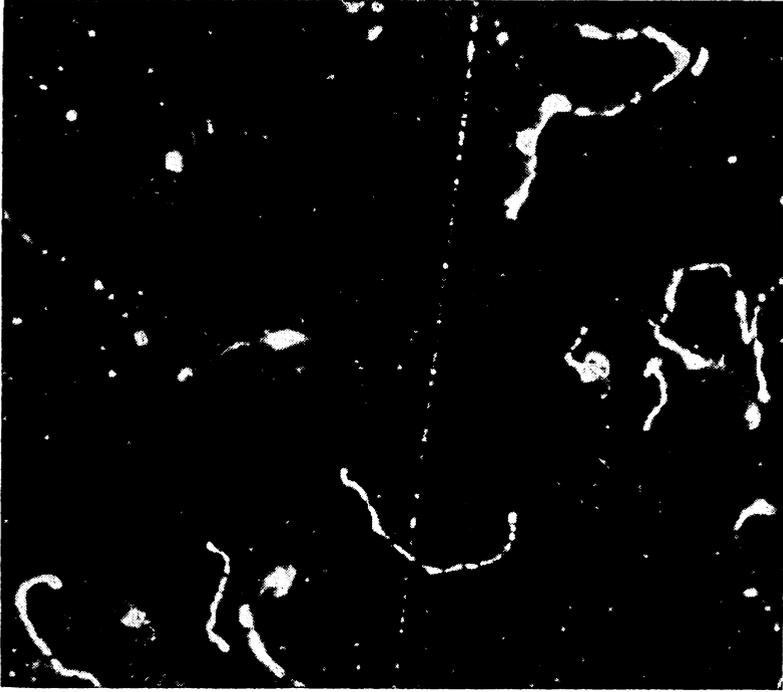


( $E$  = Element). In Bild 43 befinden sich unter den Zerfallsprodukten der Uran-Radiumreihe auch einige Negatronenstrahler; so sind zum Beispiel Radium C und Radium C'' Negatronenstrahler, ferner  $UX_1$  und  $UX_2$ .

Die Negatronenstrahlen unterscheiden sich in mancher Hinsicht von den zuvor besprochenen Alphastrahlen. So haben die Alphastrahlen als typisches Merkmal die für ein Element konstante genau festliegende Reichweite; diese Eigenschaft fehlt der Negatronenstrahlung. Beobachtet man den Zerfall in einer Nebel-

kammer, so kann man an den Nebelspuren die verschiedene Länge der Bahnen erkennen. Aber nicht nur die Länge ist unterschiedlich, sondern auch die Bahnform. Dazu wollen wir einige Überlegungen anstellen. Die Partikel werden vom Präparat mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ausgesandt und treffen auf die Moleküle oder Atome des umgebenden Mediums, also auf die Moleküle des in der Nebelkammer enthaltenen Gases. Nun ist das Negatron aber eine sehr leichte Korpuskel; seine Masse beträgt nur den 7360. Teil der Alphapartikelmasse. Aus diesem Grund werden sie auch schon von den Elektronen in den Schalen oder Hüllen der Atome abgelenkt, sobald sie sich in genügender Entfernung von ihnen befinden. Infolge der zumeist je nach dem betreffenden Element sehr großen Anzahl der Hüllenelektronen ist auch die Wahrscheinlichkeit für den Negatron-Elektron-Stoß nicht allzu klein. Die Streuung und der Stoß sind jedoch beide ganz wesentlich von der Geschwindigkeit der stoßenden Partikel abhängig. Bewegen sich die Negatronen mit verhältnismäßig kleiner Geschwindigkeit durch die Materie, so werden sie in stärkerem Maße von den zahlreichen Elektronen gestreut, die sie aber nur jeweils um einen kleinen Betrag ablenken, so daß die entstehende Bahn eine geschlängelte Form annimmt. Bei hohen Geschwindigkeiten ist ihre Bahn geradlinig. In Bild 46 sehen wir diese durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten hervorgerufenen Bahnformen recht gut; die wurmartigen Gebilde sind Spuren von Negatronen geringer Energie, die von den Hüllenelektronen des jeweils durchquerten Atoms mehrfach abgelenkt wurden. Die in der Mitte zu sehende Spur stammt dagegen von einem Teilchen mit größerer Energie, das entsprechend weniger abgelenkt wurde.

Wie erklärt sich nun aber die verschiedene Reichweite der vom jeweils gleichen Element emittierten Negatronen? Beim Zerfall eines Atomkernes wird ein bestimmter Energiebetrag frei, der dem ausgeschleuderten Teilchen als kinetische Energie übertragen wird. Nun ist gewiß nicht zu bezweifeln, daß bei jedem Zerfallsprozeß die gleiche Menge an Energie frei wird. Demnach müßten aber die Negatronen genau wie die Alphapartikel eine ganz bestimmte Reichweite besitzen, die jedoch nicht beobachtet wird. Diese Diskrepanz wird durch folgende Hypothese überbrückt: Nimmt man an, daß bei der spontanen Umwandlung eines Neutrons in ein Proton neben dem Negatron noch ein weiteres Teilchen emittiert wird, so ermöglicht dies die Erklärung für die verschiedene Energie oder Reichweite. Ein Teil der Zerfallsenergie wird danach auf das Negatron und der Rest auf das neue Teilchen übertragen. Die aus der Reichweite errechnete Energie der beiden Partikel müßte dann gleich der vom Kern freigesetzten sein. Leider hat man ein zweites Teilchen jedoch noch nie beobachtet und kann infolgedessen natürlich seine Reichweite nicht messen. Dieses Neutrino genannte neue Teilchen hat sich bisher jeder Beobachtung entzogen; es ist ein von der Theorie gefordertes hypothesisches Ding. Aus



*Bild 46*

der Tatsache, daß man es noch nicht beobachten konnte, darf man aber natürlich nicht seine Existenz leugnen; es versteht sich eben gut zu tarnen.

Mit dem Namen Neutrino soll schon zum Ausdruck gebracht werden, daß es sich um ein kleines ungeladenes Teilchen, ähnlich dem Neutron, handelt. Derartige Partikel sind durch elektrische oder magnetische Felder nicht zu beeinflussen. Über den Verbleib der restlichen Zerfallsenergie und damit über den Charakter des Neutrinos macht man sich daher folgende Vorstellung: Die beim Negatronenzерfall nicht auf das Negatron übertragene Energie wird in Form einer Wellenstrahlung ausgesandt, die eine Ähnlichkeit mit der Lichtstrahlung haben soll. Jedoch im Gegensatz zu dieser besitzt sie kein elektromagnetisches Wellenfeld; sonst müßte sie auf die Hüllenelektronen der Atome eine Wirkung ausüben, die aber nicht beobachtet wird. Die Neutrinos sind die Quanten dieser Strahlung und bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum. Diese Strahlung tritt also mit den Teilchen nicht in Wechselwirkung und ist deshalb auch nicht zu beobachten.

Für die Existenz des Neutrinos sprechen auch einige Beobachtungen des Rückstoßeffektes beim Ausschleudern dieses Quants. In der Wilsonschen Nebelkammer beobachtet man bei besonders langsamen Negatronen, das heißt solchen, die mit geringer Energie den Kern verlassen, am Anfang ihrer Nebelspur eine größere Tröpfchendichte, als dies infolge der Emission dieser Teilchen zu erwarten ist. Im Falle der sehr langsamen oder energiearmen Negatronen muß das emittierte Neutrino den größten Teil der frei gewordenen Energie übernommen haben. Der durch das Wegschleudern von beiden Partikeln verursachte Rückstoß ist in diesem Fall also größer als der durch das Negatron allein erzeugte und läßt sich nur erklären, wenn man die Emission eines zweiten Teilchens annimmt. Es gibt noch weitere Vorgänge, die auf die Existenz eines Teilchens vom Charakter des Neutrinos schließen lassen, und so scheint bisher die Neutrinohypothese allgemein anerkannt zu sein. Auf Grund dieser Hypothese läßt sich, wie wir gesehen haben, die unterschiedliche Reichweite und Energie der Negatronenstrahlung sinnvoll erklären.

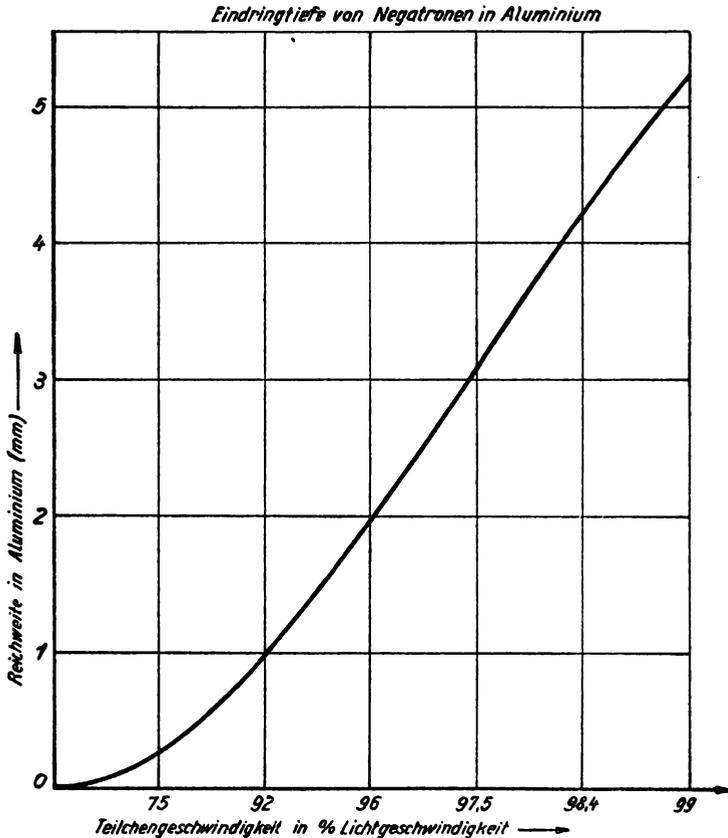
Im folgenden wollen wir noch kurz auf einen besonderen Effekt eingehen, der sich zwischen Kern und Schale abspielt und dem man den Namen inverse Betastrahlung (invers = umgekehrt) gegeben hat. Der Name rührt daher, daß dieser Prozeß in gewisser Hinsicht eine Art umgekehrter Betazerfallsprozesse ist. Beim Negatronenzerfall sendet der Kern ein Negatron, das heißt ein Elektron aus, und beim inversen Prozeß fängt er ein Elektron ein. An verschiedenen Kernen beobachtete man eine Röntgenstrahlung, die ausgesandt wird, obgleich man an dem Kern von außen keinen Eingriff vornimmt. Dies ist bei Röntgenstrahlung sehr verwunderlich, da sie gewöhnlich nicht ohne unser Zutun entsteht.

Der beobachtete Effekt erklärt sich folgendermaßen: Bei gewissen Elementen fängt der Kern sich aus seiner eigenen Elektronenhülle ein Elektron aus der K-Schale, also der dem Kern am nächsten liegenden Schale, ein. Dabei müßte eine Strahlung entstehen, die aber nicht beobachtet wird. Man nimmt deshalb auch hier wieder an, daß die Energie als Neutrinostrahlung emittiert wird, die sich ja durch ihre „unsichtbare“ Eigenschaft auszeichnet. Dieses Loch in der K-Schale (wir erinnern uns, daß sie nur zwei Elektronen hat) bleibt aber nicht lange unbesetzt. Ein Atom hat immer das Bestreben, in den niedrigst möglichen Energiezustand zu kommen. Durch das entstandene „Loch“ bietet sich aber hierzu eine Gelegenheit, und dieses wird bald wieder von einem anderen Elektron besetzt. Durch das Heruntergehen eines Elektrons von einer äußeren auf eine innere Bahn wird die dieser Energiedifferenz entsprechende Strahlung emittiert, wie in den Abschnitten über das Atommodell schon ausgeführt wurde. Die Wellenlänge der ausgesandten Strahlung läßt sich messen, und sie entspricht der üblichen Röntgenstrahlung. Wir haben es hier mit einem spontanen Prozeß zu tun, der also ohne äußere Einwirkung erfolgt und zur Emission von so-

nannter K-Strahlung führt (über den Namen braucht wohl nichts gesagt zu werden).

Die Geschwindigkeit der Negatronen kann der größtmöglichen Geschwindigkeit, das heißt der Lichtgeschwindigkeit, sehr nahe kommen. Während Alphapartikel etwa 6 bis 7 Prozent davon erlangen, haben die energiereichsten Negatronen Geschwindigkeiten bis zu 99,8 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, also fast 300 000 Kilometer in der Sekunde. Dadurch bedingt, ist ihre Reichweite in

Bild 47

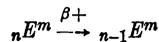


großen Maßen schwankend. In dem Diagramm von Bild 47 ist die Reichweite in Aluminium für die verschiedenen Geschwindigkeiten dargestellt. Für Teilchen mit 75 Prozent  $C_L$  beträgt die Eindringtiefe etwa 0,3 Millimeter und für solche mit nahezu  $C_L$  schon gut 5 Millimeter, also wesentlich mehr als bei Alphateilchen, deren größte Energie bei rund 9 Mev liegt, während die Negatronen höchstens etwas mehr als 2 Mev kinetischer Energie erlangen. Die Reichweite der Negatronen ist etwa hundertmal größer als die von Alphateilchen.

### 3. $\beta^+$ -STRAHLUNG

Diese Art von Strahlung gehört nicht in den Rahmen der natürlichen Radioaktivität. Die Positronen werden nicht von selbst, oder, wie man sagt, spontan ausgeschleudert, sondern nur nach vorheriger Anregung des betreffenden Kernes. Es gibt eine verhältnismäßig große Zahl dieser künstlich radioaktiven Positronenstrahler. Im Abschnitt über Kernreaktionen werden wir näher auf die künstlich eingeleiteten, das heißt auf die von uns in Gang gesetzten Anregungen von Atomkernen eingehen. Die Aussendung von Positronen erfolgt oft im Anschluß an den Beschuß eines Elementes mit Neutronen, wenn also der ursprüngliche Kern durch Neutronen angeregt wird, das heißt, durch sie in einen Zustand mit größerer Energie gelangt.

Durch das Ausschleudern eines Positrons verringert sich die Kernladungszahl um eins. Das Element fällt im periodischen System der Elemente um einen Platz zurück, was sich durch die folgende Schreibweise ausdrücken läßt



( $E$  = Element). Der Prozeß erklärt sich durch die Anwendung des Satzes von der Erhaltung der Ladung, ähnlich wie bei der Negatronenemission. Allerdings geht die Ladung nicht durch die Aussendung eines Protons verloren, obgleich diese Partikel dieselbe Ladungseinheit trägt. Deshalb nehmen wir an, daß sich ein Proton in ein Neutron verwandelt unter Aussendung eines Positrons und eines Neutrinos. Der Grund für die gleichzeitige Emission eines Neutrinos liegt, genau wie im Falle der Negatronenstrahlung, in der unterschiedlichen Reichweite der Positronenstrahlung. Auch hier übernimmt dieses Quantenteilchen einen Teil der Zerfallsenergie und stellt die Energiebilanz richtig, das heißt frei werdende Energie = kinetische Energie der emittierten Partikel, die ohne das Neutrino nicht erfüllt wäre.

Die benutzte Umwandelbarkeit der Nukleonen ineinander berechtigt uns jedoch nicht, daraus zu folgern, daß sie aus den emittierten Teilchen zusammengesetzt sind, wie wir schon früher betont haben. Nimmt man einmal an, die Teilchen sind schon vor ihrer Emission in den Nukleonen vorhanden, so läßt sich dies durch folgenden bekannten Gedanken widerlegen:

1. Neutron = Proton + Negatron,

2. Proton = Neutron + Positron.

Setzt man 2. in 1. ein, ergibt

3. Neutron = Neutron + Negatron + Positron.

Setzt man nun in 3. zunächst 1. nochmals ein für Neutron = Proton + Negatron, erhält man

4. Neutron = Proton + 2 Negatronen + Positron,

und, wird hierin das Proton nochmals durch 2. ersetzt, schließlich

5. Neutron = Neutron + 2 Negatronen + 2 Protonen.

Der Prozeß ließe sich weiter fortsetzen; das würde bedeuten, daß die Nukleonen eine unbegrenzte Menge Negatronen und Positronen enthalten müßten. Es kann daher nur so sein, daß die emittierten Teilchen erst während des Emissionsaktes erzeugt werden. Doch ist auch diese Ansicht nicht ganz zutreffend, wie uns die neueren Kerntheorien zeigen. Die Nukleonen erzeugen keine Leptonen, das heißt leichte Teilchen, das ist der Gattungsname für Negatronen und Positronen, sondern Mesonen. Die Mesonen tauschen sie unter sich aus, und dabei passiert es also einmal, daß ein Meson zerfällt, und zwar in ein Negatron und Neutrino oder in ein Positron und Neutrino. Wir kommen im Abschnitt über Kernreaktionen nochmals darauf zurück.

Ein Beispiel für einen Positronenstrahler ist der Kern  ${}_6\text{C}^{10}$ , also ein Kohlenstoffisotop (der gewöhnliche Kohlenstoffkern ist  ${}_6\text{C}^{12}$ ) mit einer Halbwertszeit von 9 Sekunden, der in den Kern  ${}_5\text{B}^9$  übergeht.

Bei dem 1932 von Anderson entdeckten Positron handelt es sich um ein Teilchen von gleicher Größe und Masse wie das Elektron oder Negatron, das jedoch mit einer positiven Ladungseinheit versehen ist und eine äußerst kurze Lebensdauer hat. Es vereinigt sich in der kurzen Zeit mit einem Negatron, und dieser Prozeß ist mit der Zerstrahlung der beiden Partikel verbunden; ihre Masse wird vollständig in Strahlung umgewandelt. Wir haben schon an anderer Stelle darauf hingewiesen, daß sich nach der Einsteinschen Annahme Masse in Energie umwandeln kann, eine Annahme, die hier bewiesen wird. Die dabei entstehende Strahlung ist die vierte bei radioaktiven Prozessen auftretende Strahlungsart, die wir jetzt besprechen wollen.

#### 4. $\gamma$ -STRAHLUNG

Die unter 1 bis 3 besprochenen Strahlen zeigten den typischen Korpuskelcharakter, und wir sprachen von Korpuskularstrahlung. Jedes Teilchen hinterläßt in der Nebelkammer eine gut sichtbare Spur, die durchlaufene Bahn, die uns den Eindruck des Strahles vermittelt. Anders ist dies jedoch bei der Gammastrahlung; sie ist eine typische Wellenstrahlung. Ihr Charakter ist völlig analog der Lichtstrahlung, die bei Zustandsänderungen in der Elektronenhülle der Atome auftritt. Hier haben wir es genau wie dort mit einer elektromagnetischen

Strahlung zu tun, die aber außerordentlich kurzwellig ist. Infolgedessen ist ihre Durchdringungsfähigkeit größer als die der Röntgenstrahlung. Die  $\gamma$ -Strahlen sind gewöhnlich noch kurzwelliger als Röntgenstrahlen.

Geht ein Hüllenelektron aus einem energiereicheren Zustand in einen energieärmeren über, so ist dies bekanntlich mit dem Aussenden einer elektromagnetischen Welle verbunden, deren Energie  $E = h \cdot \nu$  der Energiedifferenz zwischen diesen beiden Zuständen entspricht. Die Größe  $h \cdot \nu$  bezeichnet man als Energiequant oder auch nur als Quant. Durch diese Vorstellung erhält die Wellenstrahlung gleichzeitig ihren korpuskularen Charakter. Das ausgeschleuderte Quant ist um so energiereicher, je kurzwelliger die Strahlung ist, das heißt je schneller sie schwingt. Die Energie hängt von der Wellenlänge  $\lambda$  oder von der Frequenz  $\nu$  ab, und je größer die letztere ist, um so größer ist das ausgesandte Quant, da in der Formel  $E = h \cdot \nu$   $h$  eine Konstante ist und bei Vergrößerung des Faktors  $\nu$  der Wert  $E$  sich entsprechend vergrößert. Wir haben diese Verhältnisse nochmals angeführt, weil sie sich auf die Gammastrahlung sinngemäß übertragen lassen. Auch hier schreiben wir der Strahlung gleichzeitig durch Einführen der Quantenvorstellung einen korpuskularen Charakter zu. Im besonderen nennt man die Quanten hier Gammaquanten.

Ein kurzer Vergleich mit der sichtbaren Lichtstrahlung und der Röntgenstrahlung soll uns die Unterschiede zur Gammastrahlung verdeutlichen. Die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes liegen zwischen 3900 und 7700 Å, die der Röntgenstrahlen zwischen 0,16 und 660 Å, die Längen der Gammastrahlen liegen etwa zwischen 0,001 und 0,4 Å (Å = Angströmeinheit, beträgt  $10^{-8}$  cm, das heißt ein zehnmillionstel mm). Die kürzesten sichtbaren Wellen übertreffen die Wellenlänge der kürzesten Röntgenstrahlen um mehr als das 20000fache; entsprechend haben die Röntgenstrahlen eine über 20000mal größere Frequenz, und somit sind die Quanten dieser Strahlung auch um das gleiche Maß energiereicher. Die Quanten der Gammastrahlen sind bis zu 160mal energiereicher als die Röntgenquanten, woraus sich ihre größere Durchdringungsfähigkeit ergibt. Man nennt die Strahlen mit größerer Frequenz, also größerer Energie und Durchdringungsfähigkeit, harte Strahlen, im Vergleich zu den langwelligeren, die man als weiche Strahlung bezeichnet. Zwischen sogenannter harter Röntgenstrahlung und weicher Gammastrahlung besteht demnach kein Unterschied; die Wellenlängenbereiche überdecken sich hier (0,16 bis 0,4 Å).

Wie kommt es nun zur Aussendung von Gammaquanten, wie hat man sich die Entstehung der Strahlung vorzustellen? Die Verhältnisse im Kern, die zur Aussendung der Gammastrahlung führen, ähneln denen, die in der Hülle zur Aussendung einer Wellenstrahlung führen. Auch der Kern kann sich in einem angeregten Zustand befinden, so zum Beispiel, wenn er eine Alphapartikel, ein Negatron oder ein Positron ausgeschleudert hat. Die Bildung und die anschließende Emission von Alphateilchen versetzt den Restkern in einen angeregten

Zustand, aus dem er sich durch die Aussendung von Gammaquanten befreit und so in einen Zustand geringerer Energie übergeht, der aber noch nicht der energieärmste zu sein braucht. In diesem Fall erfolgt eine weitere Gammaemission ( $\gamma$ -Quant), bis er schließlich diesen Zustand erreicht hat. Das jeweils ausgesandte Quant entspricht dem Energieunterschied zwischen zwei Zuständen. Insofern sind also die Vorgänge im Kern denen in der Hülle durchaus analog. Es bestehen aber auch einige Unterschiede. In der Hülle gehen die Elektronen von einem Besetzungszustand in den anderen über; im besonderen ein ganz bestimmtes Elektron. Irgendeine der vier Quantenzahlen für diese Partikel ändert sich; wir erinnern daran, daß jeder Elektronenzustand durch diese vier Zahlen vollständig bestimmt ist. Für den Kern fehlt bis jetzt eine derartig entwickelte Vorstellung. Zwar ist in neuester Zeit die Kenntnis vom Aufbau des Kernes aus Neutronen und Protonenschalen weiterentwickelt worden, doch beschränkt sie sich vorerst noch auf ganz bestimmte Kerne. Wir werden deswegen hierzu keine näheren Ausführungen machen.

Ist man in der Lage, die ausgesandten Energien zu messen, so läßt sich ein Energieschema aufstellen, das dem der Elektronenhüllen völlig analog ist. Die Energieniveaus stellen die im Kern möglichen angeregten Zustände dar, und die Differenz zwischen zwei Termen (so nennt man die einzelnen Energiewerte) entspricht dem ausgesandten Gammaquant. Da das Termschema eine gewisse Anzahl von Linien enthält und rein äußerlich einem Linienspektrum ähnlich sieht, so hat sich auch hierfür und für das entsprechende Wellenlängenschema gleichfalls der Name Spektrum eingebürgert; man nennt es Gammapektrum.

Es besteht ein Unterschied zwischen den Gamma- und Alphastrahlen und eine gewisse Übereinstimmung mit den Negatron- und Positronstrahlen. Die Alphapartikel einer Kernart haben alle die gleiche Energie, die emittierten Negatronen und Positronen einer Kernart besitzen unterschiedliche Energie (und damit unterschiedliche Reichweiten). Dies trifft auch für die Gammaquanten einer Kernsorte zu; nur können sie nicht wie jene alle Werte bis zu einem maximalen annehmen, sondern nur ganz bestimmte diskrete, den Übergängen entsprechende. Die vom Kern ausgesandte Strahlung ist aber auch in der Lage, aus den eigenen oder aus fremden Atomen Elektronen herauszulösen. Um die Hüllenelektronen aus dem Atomverband zu entfernen, ist die Ionisierungsenergie erforderlich, und ein Gammaquant muß mindestens eine dementsprechende Energie besitzen. Im Abschnitt über das Bohrsche Atommodell haben wir schon darauf hingewiesen, daß die Elektronen der Atomhüllen elektromagnetische Energie aufnehmen können. Die ihnen dabei durch die Wellen zugestrahlte Energie ist in den meisten Fällen so gering, daß die Elektronen noch innerhalb des Atoms verbleiben. Erst die sehr kurzwelligigen Gammastrahlen mit ihrer großen Energie vermögen die Ionisierungs-

arbeit zu leisten und Elektronen über die äußerste Bahn hinweg zu heben, sie aus dem Atom zu entfernen, oder, wie wir auch sagen, das Atom zu ionisieren. Bei diesem Ionisierungsprozeß geben die Quanten ihre Energie völlig an das Elektron ab, das sich nun seinerseits mit der ihm übertragenen Energie durch das Medium bewegt; in gewissen Fällen, nämlich bei kleinen Energien, kann man besser sagen, durch das Medium schlängelt. In Bild 48 sehen wir die durch Gammaquanten herausgeworfenen Elektronen in einer Nebelkammer. Infolge der gegenseitigen Einwirkung der gebundenen Hüllenelektronen auf die freien Elektronen



*Bild 48*

sind die Bahnen sehr unregelmäßig und geschlängelt. Die herausgerissenen Elektronen erfahren eine mehrfache Streuung; sie werden jeweils nur um einen kleinen Betrag abgelenkt, was gut zu erkennen ist.

In diesem Zusammenhang wollen wir noch kurz auf einen Vorgang eingehen, bei dem nicht die ganze Energie des stoßenden Gammaquants aufgebraucht wird, so daß es nach dem Stoß mit verringerter Energie weiterläuft. Denken wir uns ein Gammaquant, das auf ein Elektron auftrifft (siehe Bild 49); dabei ist es möglich, daß das Elektron nicht alle Energie übernimmt, sondern nur einen Teil, und der Rest verbleibt dem Quant, das jedoch nun in eine andere Richtung abgelenkt wird. Es handelt sich also um einen Stoß zwischen Quant und Elektron. Da das Quant Energie verloren hat, muß seine Wellenlänge größer geworden sein. Es gilt die Beziehung  $E = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda$ .

Man erkennt sofort, daß eine Vergrößerung des Nenners eine Verkleinerung von  $E$  bedeutet. Im Experiment wirkt sich dies so aus, daß zum Beispiel die in

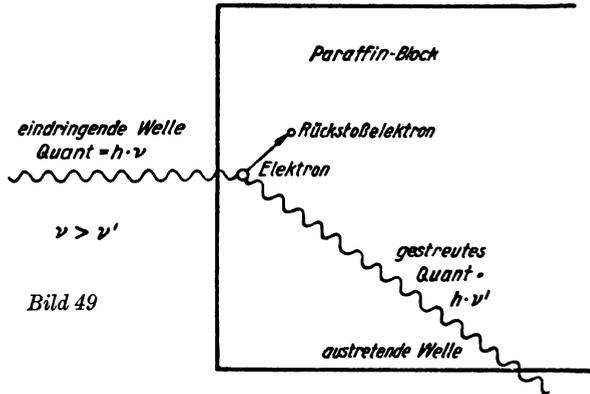


Bild 49

einen dünnen Paraffin-Block einfallende Gammastrahlung seitlich wieder herausgestreut wird, wobei sie aber jetzt eine größere Wellenlänge hat als ursprünglich. Dieser Vorgang wird Comptoneffekt genannt, nach dem Physiker, der dies zum erstenmal beobachtete. Man kann in diesem Effekt einen weiteren Beweis für die korpuskulare Struktur der Wellen sehen.

Gammastrahlung tritt aber nicht nur bei den natürlich radioaktiven Kernen auf, sondern auch bei solchen Kernen, die erst durch Beschuß in einen angeregten Zustand gelangen. Dies sind die sogenannten künstlich radioaktiven Kerne, die ja in ihrer Zahl die natürlichen bei weitem übertreffen. Im Abschnitt über Kernreaktionen werden wir einige Umwandlungen von Kernen betrachten, bei denen die Gammastrahlung eine Rolle spielt.

### 19. Teilchennachweis

Um Aufschluß über die in der Atomphysik auftretenden Reaktionen zu erhalten, ist es unter anderem auch notwendig, gewisse Prozesse in ihrer räumlichen Lage und Anordnung beobachten zu können, oder aber ihre zeitliche Aufeinanderfolge oder die Reaktionszeit zu messen. Es ist leicht einzusehen, daß die Messungen oder die Experimente die Unterlage für eine erfolgreiche Bearbeitung der auftauchenden Probleme bilden. Wir wollen das nicht falsch verstehen. Es ist teilweise auch möglich, ohne Kenntnis irgendwelcher zweckdienlicher Experimente beziehungsweise ihrer Ergebnisse eine Theorie über gewisse Erscheinungen aufzustellen, die dann nachträglich durch das Experi-

ment bestätigt oder auch nicht bestätigt wird. Keineswegs muß das Experiment immer der Theorie vorausgehen; vielmehr ergänzen sie sich, so regt die Theorie ihrerseits zu neuen Experimenten an.

In der Frühzeit der modernen Atomphysik benutzte man den schon einige Male erwähnten Leuchtschirm, um die von den radioaktiven Elementen ausgesandten Strahlen zu beobachten und sich so unmittelbar von ihrer Existenz zu überzeugen. Man konnte auch bei gewissen Strahlen und in einigen Versuchsanordnungen die Zahl der Teilchen zählen, was dazu beitrug, die radioaktiven Zerfallsgesetze herauszufinden. Die Bedeutung des Leuchtschirmes ist aber heute geringer geworden, und wir wollen uns deswegen auch nicht weiter mit ihm befassen.

Eine zweite Methode, die man photographische Methode nennen kann, hat dafür in außerordentlichem Maße an Bedeutung gewonnen. Wie aus der Bezeichnung hervorgeht, werden hierbei Photoplatten verwendet. Sie ermöglichen es, auch solche Prozesse noch zu registrieren, für welche die weiter unten besprochene Nebelkammer nicht mehr zu verwenden ist. Die Platte besteht aus Glas, auf die eine Emulsion aus Bromsilbergelatine aufgetragen wird. Der Nachweis der einfallenden Teilchen wird möglich durch deren ionisierende Wirkung innerhalb der Gelatineschicht. Das Bromsilber ist in feinen

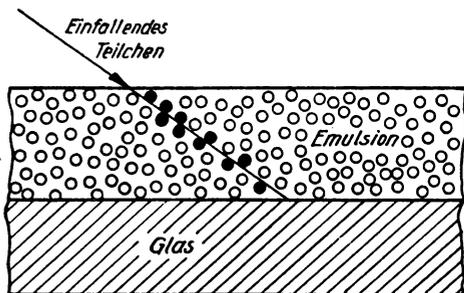


Bild 50

kleinen Kristallen in der Gelatine, die als Bindemittel dient, eingelagert (siehe Bild 50). Beim Durchqueren der Schicht werden die getroffenen Atome der Kristalle ionisiert, und die ausgelösten Elektronen lagern sich an die Silberionen an, die dadurch neutralisiert werden. Bei einer anschließenden Entwicklung der Platte schwärzen sich die Stellen in der Nähe der Ag-Atome und bilden kleine Körnchen. Sie haben etwas unterschiedliche Durchmesser, etwa in der Größe von  $\frac{1}{1000}$  Millimetern bis zu  $\frac{3}{10000}$  Millimetern und liegen in geringen

Abständen wie eine Perlenkette nebeneinander und machen so die Spur des Teilchens sichtbar.

In der entwickelten Platte sieht man also die Bahnspur des Teilchens, man nennt seine Reichweite in der Schicht die photographische Reichweite. Ein weiteres wichtiges Merkmal ist die sogenannte Korndichte. Darunter versteht man die Anzahl der geschwärzten Silberkörnchen, bezogen auf die Bahnlänge oder auf ein kleines Stück von ihr. Es ist wohl klar, daß ein Teilchen um so energiereicher ist, je dichter die Konzentration der Silberkörner ist, je stärker die Kristalle also ionisiert wurden. Eine Platte wird offensichtlich dadurch empfindlicher, daß man sehr feinkörnige Emulsionen verwendet, die außerdem einen hohen Gehalt an Bromsilber aufweisen und bei denen daher der Gelatinegehalt entsprechend verringert ist. Natürlich kann der Korngehalt nicht übertrieben werden, etwas Gelatine muß schließlich zwischen den Körnern noch verbleiben. Die für kernphysikalische Untersuchungen verwendeten Platten unterscheiden sich von den üblichen für optische Zwecke benutzten; sie haben ein Gewichtsverhältnis Bromsilber zu Gelatine von 80 : 20, während es bei photographischen Platten bei 50 : 50 liegt.

Auch die Schichtdicke der aufgetragenen Emulsionen ist bei den Platten unterschiedlich; die optische hat meist Schichtdicken von etwa 10 bis 20 tausendstel Millimeter, während man für die kernphysikalischen Dicken von etwa 100 bis 500 tausendstel Millimeter, das sind  $\frac{1}{10}$  bis  $\frac{5}{10}$  Millimeter, verwendet. Für alltägliche Begriffe sind dies noch immer sehr dünne Schichten. Die Erhöhung der Schichtdicke auf diese in der Optik ungewöhnlichen Maße erfolgt, weil man sonst die energiereichen Teilchen bei Schrägeinfall nicht bis an das Ende der Spur verfolgen kann. Jedes in die Emulsion eindringende Teilchen hat natürlich eine gewisse Reichweite, die merklich geringer ist als die in dem dünneren Medium Luft. Die Strecken sind allerdings so gering, daß sie nur mit dem Mikroskop ausgemessen werden können. Ein Alphateilchen mit einer mittleren kinetischen Energie von 5 Mev (5 Megaelektronenvolt = 5 Millionen Elektronenvolt; wir erinnern daran, daß die energiereichsten etwa 9 Mev haben) hat nur eine Spurlänge von  $\frac{25}{1000}$  Millimetern in der Schicht, was einer Reichweite in Luft von etwas mehr als 4 Zentimetern entspricht. Die durch die eindringenden Teilchen verursachte Schwärzung der Körner läßt sich mit dem Mikroskop erkennen; man bestimmt zum Beispiel die Korndichte je  $\frac{1}{1000}$  Millimeter Weglänge und kann daraus Rückschlüsse auf die Energie der Teilchen ziehen. Es sind verschiedenartige Platten beziehungsweise Emulsionen entwickelt worden, je nachdem ob es sich um Prozesse mit größeren oder kleineren Energiebeträgen handelt.

Das Hauptanwendungsgebiet der Photoplatten liegt derzeit etwas mehr in der kosmischen Strahlung, worunter man von außen in den Erdbereich einfallende sehr energiereiche Strahlung versteht. Doch finden sie auch in der gewöhnlichen

Kernphysik Verwendung. Ihr Vorteil gegenüber der Nebelkammer liegt in der Fähigkeit, unmittelbar hintereinander ablaufende Ereignisse längerer Dauer zu registrieren und festzuhalten, für welche die Nebelkammer nicht benutzt werden kann.

Das universellste Gerät zur Teilchenbeobachtung ist zweifellos die von dem Engländer Wilson entwickelte sogenannte Nebelkammer, die auch oft Wilsonkammer genannt wird. Im Verein mit der Photoplatte ist sie das Gerät, das die Ereignisse nachträglich zu beobachten gestattet und einen unmittelbaren Eindruck von der Bahn eines Teilchens gibt. Von der Photoplatte wiederum unterscheidet sie sich dadurch, daß man die Reaktionen nur für äußerst kurze Zeit beobachten kann, während die Platte diese beinahe unbegrenzt lange aufbewahrt. Ganz grob kann man vielleicht sagen, die Kammer macht eine Momentaufnahme und die Platte eine Daueraufnahme.

Sehen wir uns nun die Konstruktion der Wilsonkammer einmal etwas näher an. Unser Bild 51 gibt nur eine Systemskizze. Die Kammer besteht aus einem

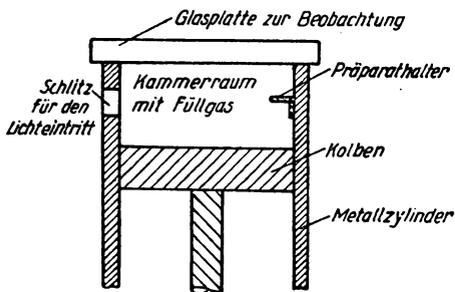


Bild 51

Metallzylinder, in dem sich ein Kolben bewegen kann. Oben ist sie durch eine Glasplatte verschlossen. Außerdem befinden sich in der oberen Zylinderwand ein kleines Fensterchen zum Lichtdurchtritt und, falls die Kammer zur Messung radioaktiver Strahlung benutzt werden soll, an einer Stelle der Innenwand des oberen Raumes ein kleiner Halter zur Aufnahme des Strahlungspräparats. In Bild 45a sehen wir die von dieser Stelle des Innenraumes ausgehende Strahlung besonders gut, auf dem Halter liegt dort das Thorium-C-Präparat. Der Kolben kann nicht bis dicht unter die Glasplatte

geführt werden, sondern läßt einen genügend großen Raum frei, in dem sich eine mit Wasserdampf oder Alkoholdampf gesättigte Atmosphäre befindet.

Die atmosphärische Luft kann bei einer bestimmten Temperatur nur eine ganz bestimmte Menge an Wasserdampf aufnehmen, bis sie gesättigt ist. Führt man ihr durch Verdampfen von Wasser weiterhin Dampf zu, so kann sie wohl davon noch etwas aufnehmen, scheidet aber etwa die gleiche Menge wieder als Wasser, also als kondensierten Dampf aus. Kühlt man sie andererseits etwas ab, so ist sie für diese niedrigere Temperatur bereits mit Wasserdampf übersättigt und wird, wenn sich nur irgendwelche Partikel in ihr befinden, an diesen als Tau, wie man dies gewöhnlich nennt, niederschlagen. Den gleichen Vorgang haben wir bei der Nebelbildung vor uns. Die Luft hat sich plötzlich durch Zustrom kalter

Luftmassen abgekühlt und ist nicht mehr in der Lage, den Wasserdampf, den sie bei höherer Temperatur aufzunehmen vermochte, weiterhin zu halten. Die ständig in der Luft schwebenden Staubteilchen oder auch ionisierte Luftmoleküle oder andere in die Luft gelangte Ionen oder Partikel bieten jetzt dem überschüssigen Wasserdampf eine Möglichkeit, sich niederzuschlagen, und reduzieren so den Wasserdampfgehalt der Luft. Diese feinen, mit Wasserdampf umgebenen Schwebeteilchen nehmen wir als Nebel wahr. Erwärmt sich die Luft etwa anschließend gleich wieder, so verdunstet ein Teil oder auch die gesamte Menge des Nebels, und der entstandene Wasserdampf wird von der Luft wieder aufgenommen. Kühlt sich die Luft jedoch weiterhin ab, so sinkt der Nebel langsam zu Boden und verursacht hier den Tau oder bei größerer Kälte den Reif. Diese Vorgänge macht man sich in der Nebelkammer zunutze.

Zieht man nämlich den Kolben ganz plötzlich nach unten, so kühlt sich die gesättigte Atmosphäre daher etwas ab und ist infolge der Expansion mit Dampf übersättigt, sie kann jetzt die gesamte Dampfmenge nicht mehr aufnehmen. Sind nun in der Kammer, dem oberen Zylinderraum, irgendwelche Ionen enthalten, so schlägt sich ein Teil des Dampfes an ihnen nieder; sind eine genügende Anzahl Ionen da, so schlägt sich der überschüssige Dampf völlig an ihnen ab, es bildet sich dann in unserer Kammer Nebel. Der so gebildete Nebel stört aber in der Folge, er muß beseitigt werden, was dadurch geschieht, daß die Möglichkeiten für eine Ionenbildung in der Kammeratmosphäre ausgeschaltet werden. Man sorgt zunächst dafür, daß sich in der Kammer keine Staubkörnchen mehr befinden; denn an diesen schlägt sich der Dampf ja gleichfalls nieder. Sodann entfernt man etwa gebildete Ionen durch Anlegen eines elektrischen Felde; dabei sammeln sich die Ionen an den Elektroden. Zieht man nach diesen notwendigen Vorbereitungen den Kolben nach unten, und treten in diesem Moment gerade Partikel durch die Kammerwände ein, oder werden sie durch die Kammer geschleudert, so ionisieren sie auf ihrem Wege die Gasmoleküle, und an diesen Ionen schlägt sich jetzt etwas Dampf nieder und macht so den Weg der Partikel als Nebelspur sichtbar. Die Dauer des Vorganges beträgt etwa  $\frac{1}{10}$  Sekunde, dann ist schon nichts mehr zu sehen; die Spuren sind wie Traumbilder verschwunden. Die Kammer wird dabei durch das kleine Glasfenster mit einer schwachen Lichtquelle beleuchtet, sonst wäre ohnehin nichts oder fast nichts zu sehen. Blickt man nämlich von oben auf die Glasplatte der Kammer, so erscheint das Innere dunkel, und die feinen Nebelspuren wären im Augenblick der Kammerauslösung gar nicht zu erkennen. Die von uns eingefügten Bilder 45 sind Nebelkammeraufnahmen und zeigen das gespenstische Dunkel des Kammerinneren und die schwach von der Seite beleuchteten Strahlen. Die Wilsonkammer arbeitet also nur sehr kurzzeitig und ist nach ihrer Auslösung auch nicht sofort wieder schußfertig, es vergehen erst ein paar Sekunden. Durch eine besondere Art der Kolbenbewegung ist es möglich, die Spuren für etwa 3 Sekunden in der

Kammer sichtbar zu machen. Mit der Kammerauslösung meinen wir das ruckartige Herunterreißen des Kolbens; gleichzeitig damit wird auch stets erst die Beleuchtung eingeschaltet. Man betrachtet aber nicht nur die Effekte in der Wilsonkammer, sondern in den weitaus meisten Fällen werden sie fotografiert, mit der Kammerauslösung wird auch die Kamera ausgelöst.

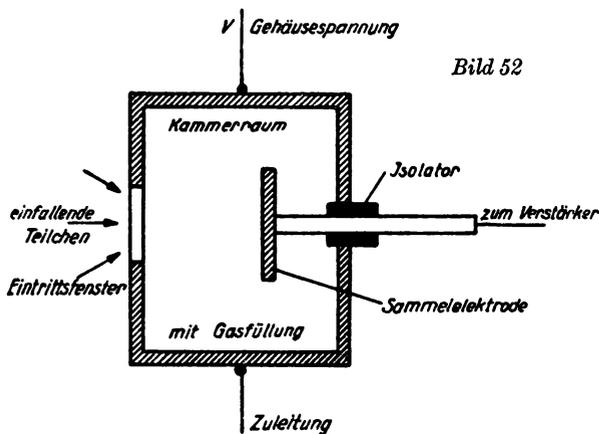
Die Kammer haben einen Durchmesser von etwa 10 bis 20 Zentimetern; für besondere Zwecke, wie bei der Untersuchung der kosmischen Strahlung, sind sie sehr flach und ihr Durchmesser beträgt bis zu 50 Zentimeter. Um von außen eindringende Strahlung abzuhalten, wird die Kammer mit entsprechender Bleiabschirmung umgeben, sobald man die Strahlung im Inneren der Kammer erzeugt und beobachtet. Die kosmischen Strahlen durchdringen die Wände der Kammer ohne Bleischutz ziemlich mühelos, und würden so das Bild stören. Weiß man von vornherein, mit welchen Teilchenenergien man zu rechnen hat, bei kosmischer Strahlung ist das nicht immer vorher zu sagen, kann man den Kammerdruck entsprechend einregulieren; bei höherem Druck sind die Reichweiten geringer, und umgekehrt. Will man also energiereiche Teilchen beobachten, so wird man den Kammerdruck erhöhen, wenn die Reichweite der Strahlung den Kammerdurchmesser überschreiten sollte. Aus den fotografierten Spuren von Teilchen läßt sich den gemessenen Daten nach entsprechender Rechnung zumeist das Wichtigste über die Partikel, wie Masse, Ladung und Energie, entnehmen.

Von den bereits erwähnten Methoden zum Nachweis schneller Korpuskel unterscheiden sich die elektrischen Nachweismethoden. Es handelt sich dabei um eine Reihe von Geräten, die teils dem Nachweis von Einzelteilchen und teils der Zählung größerer Mengen von Partikeln dienen. Es ist nicht möglich, sie alle

hier zu behandeln, und wir werden uns auf einige beschränken.

Eines der Geräte ist die Ionisationskammer. Wie der Name schon zum Ausdruck bringt, arbeitet die Apparatur infolge Ionisation von Gasmolekülen der Kammer durch die einfallenden Teilchen. Das Prinzip gleicht also dem der Wilsonkammer. In Bild 52 sehen wir wieder eine Systemskizze. Am äußeren metallischen Gehäuse der

Bild 52



Kammer liegt der eine Pol einer Gleichspannung und an der isoliert durch die rechte Wand geführten großen Sammelelektrode der andere Pol. Die Kammer ist mit einem Gas gefüllt und die angelegte Spannung beträgt einige hundert bis tausend Volt. Auf der linken Seite des Gehäuses ist ein kleines Fensterchen angebracht, ein Wanddurchbruch, der durch eine dünne Metallfolie verschlossen wird. Man verwendet dazu meist Aluminium- oder Goldfolien. Durch dieses Fensterchen treten die Partikel ein und durchfliegen die Kammer. Sie sollen natürlich durch die Folie einen möglichst minimalen Geschwindigkeitsverlust erfahren, und diese muß in einer entsprechenden Dicke gehalten werden. Die Gasmoleküle werden auf dem Wege ionisiert, und die entstandenen Ionen werden durch das elektrische Feld auf die Sammelelektrode geworfen. Die gleichfalls erzeugten Elektronen sammeln sich natürlich auf der anderen Elektrode. Dieses Fließen von Ladungsträgern zwischen den Elektroden ergibt einen kurzen Stromstoß. In Bruchteilen einer Sekunde sind die Ionen auf die Elektrode geschleudert, und damit ist der Stromfluß beendet; es fließt von diesem Moment an kein Strom mehr. Mit einem an die Kammer angeschlossenen anderen Gerät läßt sich dieser Stromstoß durch Zeigerausschlag oder als Lichtpinsel auf einem Leuchtschirm, einem sogenannten Oszillographen, sichtbar machen und beurteilen. Die Ströme sind aber so klein, daß man zwischen Kammer und Anzeigegerät einen Elektronenröhrenverstärker einschalten muß. Mit der Ionisationskammer lassen sich so die einfallenden Teilchen in ihrer Menge erfassen und in ihrer Energie beurteilen. Zwei zeitlich kurz hintereinander eintretende Partikel verursachen jeweils zwei kurz hintereinander erfolgende Stromstöße, die man also durch entsprechende Geräte auch als zwei unterschiedliche Stöße wahrnehmen kann oder durch Zählwerke als zwei Partikel registriert.

Zwei weitere Geräte zum Nachweis von Elementarteilchen sind die von dem Physiker Geiger (einem Mitarbeiter von Rutherford) entwickelten und nach ihm benannten Zähler; der eine heißt Spitzenzähler, der andere Zählrohr. In den Bildern 53 und 54 sehen wir die Systemskizzen beider Geräte. Das Prinzip ist auch hier wieder das gleiche wie bei der Ionisationskammer; die einfallenden Partikel ionisieren die Moleküle des Füllgases (oft Luft) und werden durch eine angelegte Spannung gegen

Bild 53

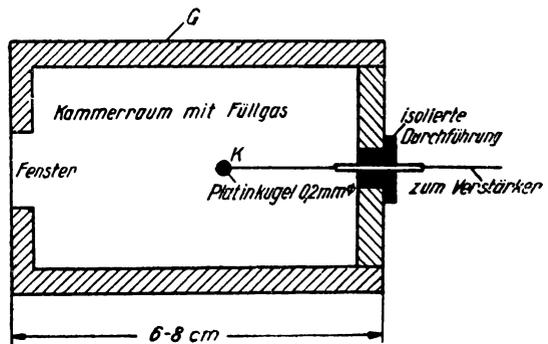
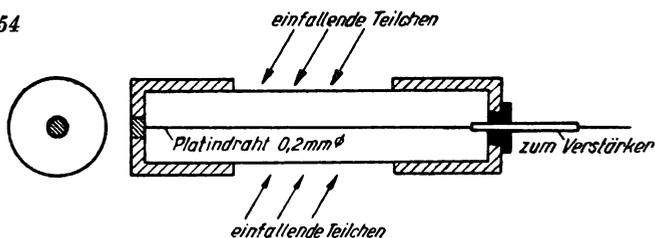


Bild 54



die Elektroden beschleunigt. Aber man wendet jetzt einen kleinen Kunstgriff an. An einem Beispiel wollen wir das kurz erläutern. Wir stellen zwei Aluminiumplatten in der Größe von 10 mal 10 Zentimeter in nicht zu großem Abstand einander gegenüber (Bild 55). Die Platten verbinden wir mit den Polen einer Gleichstromquelle von einigen hundert Volt Spannung. Dann bildet sich zwischen diesen beiden Platten oder Elektroden ein elektrisches Feld aus, die elektrischen Feldlinien greifen von einer Elektrode zur anderen hinüber, wie wir dies in dem Bild angedeutet haben. Diese Feldlinien sind analog den magnetischen, die sich zwischen zwei Magnetpolen ausbilden und dort mit Eisenfeilspänen nachgewiesen werden können. Je dichter die Feldlinien sind, um so größer ist die Feldstärke an den betreffenden Stellen. Die Feldlinien haben immer die Richtung der wirkenden Kraft und münden oder entspringen auf jeder Fläche eines Leiters oder Nichtleiters stets senkrecht. Dies ist einleuchtend; denn Kräfte greifen immer senkrecht zu einer Fläche an. Ersetzt man eine Platte durch eine kleine Metallkugel mit einem Durchmesser von etwa 2 Zentimeter, so verlaufen die Feldlinien auch jetzt noch senkrecht zu den Flächen. Infolge der gekrümmten Kugel­fläche treten die Linien jedoch unter verschiedenem Winkel in die Kugel ein (Bild 56) und sind in der unmittelbaren Umgebung stark konzentriert; die Feldstärke ist in Kugelnähe bedeutend größer als im übrigen Raum. Wenn

Bild 55

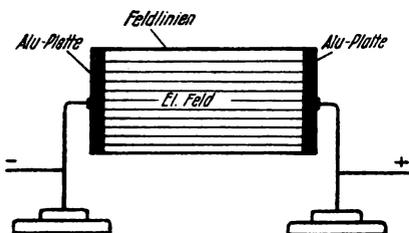
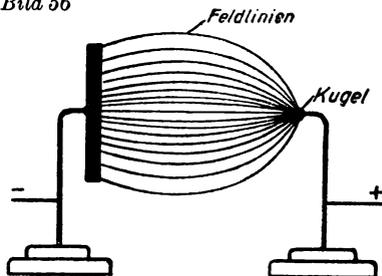


Bild 56



die Feldstärke in einem Punkt des Raumes aber größer ist, so wird auf eine dort befindliche Ladung, zum Beispiel auf eine geladene Korpuskel, auch eine größere Kraft ausgeübt.

Diesen Umstand macht sich Geiger bei seinen Zählern zunutze. Die durch die eindringenden Teilchen erzeugten Ionen werden im Feld in Richtung auf die Elektrode beschleunigt, bis sie in das stärkere Feld vor der Kugel geraten. In diesem Feld erfahren sie eine weitere sehr starke und kurzzeitige Beschleunigung auf die kleine Kugelelektrode zu. Dabei erzeugen sie infolge der erlangten höheren Geschwindigkeit zusätzlich Ionen. Die Ionen verstärken sich also selbst, es entsteht eine Ionenlawine, die sich als ein wesentlich stärkerer Stromstoß als bei der Ionisationskammer bemerkbar macht. Bild 53 zeigt den Spitzenzähler, die kleine Kugel *K* ist aus Platin angefertigt und hat hier einen Durchmesser von  $\frac{1}{10}$  bis  $\frac{2}{10}$  Millimeter, die Kantenlänge des Gerätes beträgt nur etwa 6 bis 8 Zentimeter, es ist also nicht sehr groß. Die Gegenelektrode ist das Gehäuse des Zählers *G*, links befindet sich in der Kammerwand das kleine, durch eine Folie verschlossene Fenster *F*. Bei dem in Bild 54 gezeigten Zählrohr verwendet man an Stelle der Kugelelektrode einen ausgespannten Draht, der zumeist aus Platin oder Wolfram besteht und etwa den gleichen Durchmesser wie die Kugel des Spitzenzählers hat. Die durch einfallende Teilchen verursachten Impulse werden auf elektrische Verstärker übertragen, die sie dann auf Zählwerke oder Meßgeräte übertragen. Die ersteren zählen die einfallenden Teilchen und sind meist so gebaut, daß man deren Anzahl wie bei einem Kilometerzähler ablesen kann. Bei den Meßgeräten kann man aus der Stärke der Stöße Rückschlüsse über die Art der einfallenden Teilchen und auf ihre Energie ziehen. Es lassen sich mit den Geräten alle ionisierenden Teilchen nachweisen, also Protonen, Alphateilchen und stark ionisierende Negatronen.

Die in diesem Abschnitt besprochenen Geräte dienen dem Nachweis von einzelnen Elementarteilchen, ihrer Ladung und ihrer Energie. Der in ihnen ausgenutzte Effekt ist die Ionisierung von Molekülen eines Gases durch schnellbewegte geladene Partikel. Sie lassen sich in gewissem Sinne direkt beobachten, wie in der Nebelkammer oder bei längerer Einwirkungszeit auf einer Photoplatte sichtbar machen. Man kann auch ihre Anzahl feststellen und die Zeit zwischen verschiedenen Ereignissen messen, wie mit dem Zählrohr und der Ionisationskammer.

## 20. Teilchenbeschleuniger

Im Verlauf der bisherigen Ausführungen haben wir es immer mit Partikeln zu tun gehabt, die wir vorfinden und die wir für unsere Zwecke, der Erforschung der Materie, so benutzen, wie sie uns entgegenreten. Die Teilchen werden von

gewissen Atomkernen ausgeschleudert und wandeln diese dadurch um. Sie erlangen große Geschwindigkeiten und verhältnismäßig große Energien, sie sind jedoch winzig klein und treten in riesiger Anzahl auf. Da die selbstzerfallenden Elemente auf der Erde stets dicht mit Materie umgeben sind, rufen die kleinen Geschosse in ihrer Umgebung gewisse Veränderungen hervor. Sie beeinflussen das Geschehen um sich herum, indem sie alles durch ihre Aktion zu Reaktionen veranlassen. Diese von Natur aus gegebenen Verhältnisse haben wir für uns ausgenutzt, wir haben die wahllos in die Gegend geschleuderten winzigen Nichtigkeiten mit den doch so großen Energien nicht nur auf ihre natürliche Umgebung einwirken lassen, sondern auch auf eine solche, die wir gewählt haben. Die Aktionen werden gewissermaßen von uns in eine gewünschte Richtung gelenkt, die Präparate werden in unserer Hand zu Kanonen, die wir jedoch stets nur zum Wohl der Menschheit anwenden wollen. Daß man sie auch zu anderen Zwecken benutzen kann, hat die Welt zu ihrem Entsetzen und allergrößten Schaden leider auch schon erfahren müssen.

Die von uns bisher besprochenen Partikelarten waren an Zahl gering; die Alpha-Teilchen, Negatronen und Positronen und auch die Gammaquanten, sie alle traten im Zusammenhang mit der sogenannten natürlichen Radioaktivität auf. Sie haben weitgehend bekannte Geschwindigkeiten und Energien. Als Maß für die letzten dient das Elektronenvolt ( $eV$ ). In dem Abschnitt über die Strahlungsarten haben wir die Energiebereiche der einzelnen Partikelsorten angegeben. Wozu wurden und werden die Teilchen nun in der Kernphysik verwendet?

Man wollte Aufschluß über die Reichweite und die Art der Kernkräfte erhalten, man wollte die Größe und den Bau des Kernes feststellen. Dazu dienten die ersten Versuche von Rutherford, Geiger, Marsden und anderen, dazu dienen auch heute noch viele Versuchsprojekte. Schließlich gelang Rutherford bei seinen Versuchen auch der Nachweis, daß der Kern nicht der letzte unzerlegbare Bestandteil des Atoms ist. Es war ein Vorgang, den man Atomzertrümmerung nannte, eine Bezeichnung, die absolut nicht die Sache trifft; denn das Atom, oder besser der Kern, wurde gar nicht zertrümmert, sondern höchstens umgewandelt. Seit dieser Zeit etwa weiß man, daß sich mit Hilfe schneller Korpuskel, die in einen Stoff geschossen werden, Kernumwandlungsprozesse herbeiführen lassen. Die Reaktionen heißen Kernreaktionen und sollen im nächsten Abschnitt näher besprochen werden. Hier kam es uns darauf an festzustellen, daß man zur Auslösung von Kernumwandlungsprozessen Teilchen genügend großer Energie braucht, wie sie uns anfänglich in den von radioaktiven Elementen ausgeschleuderten Partikeln zur Verfügung standen. In der Folge erwies sich jedoch, daß diese Energien nicht für alle Umwandlungsprozesse ausreichen und daß man für manche Reaktionen weit größere Intensitäten benötigt.

Das zu diskutierende Problem heißt also: Wie erhält man Teilchen mit größeren Energien als die bei den radioaktiven Umwandlungen auftretenden? Die größte Energie haben die vom Thorium  $C'$  ausgesandten Alphapartikel mit etwa 9 Mev. Das kommt einer Energie gleich, wie sie ein Elektron in einem Feld erlangt, in dem die Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden 9 Millionen Volt beträgt. Eine derartig hohe Spannung läßt sich praktisch nicht herstellen. Allerdings hat eine Alphapartikel der gleichen kinetischen Energie nur etwa den 85. Teil der Elektronengeschwindigkeit; denn seine Masse ist ja 7360mal größer. In den vorstehenden Erläuterungen ist auch gleich die Möglichkeit einer Erhöhung der Teilchenenergie ersichtlich geworden. Die Partikel tragen die Energie als kinetische Energie vom Kern hinweg. Will man also ihre Energie erhöhen, so muß die Geschwindigkeit vergrößert werden. Zu diesem Zweck sind einige Anlagen entwickelt worden, die man schlecht noch als Geräte bezeichnen kann. Sie unterscheiden sich zum Teil von den vorgenannten kleinen Geräten recht erheblich in der Größe und Anzahl der Einzelteile.

Es gibt verschiedene Methoden der Teilchenbeschleunigung, die auch zu einer entsprechenden Anzahl von Konstruktionen geführt haben. Auch auf diesem Gebiet war man nicht müßig, und besonders während der Kriegs- und Nachkriegszeit sind erhebliche Fortschritte erzielt worden. Von all den Problemen und Apparaturen werden wir uns nur mit einigen befassen und an ihnen das

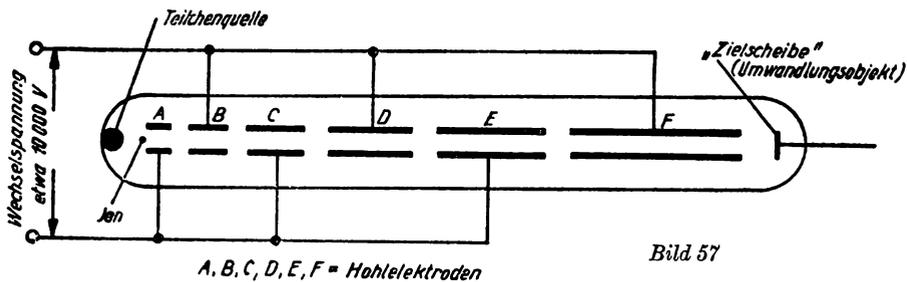


Bild 57

Wichtigste erklären. So interessant die hiermit verbundenen Probleme auch sein mögen und so sehr sie für uns auch den Vorteil haben, anschaulicher und weniger abstrakt als die übrigen Teilgebiete der Kernphysik zu sein, so ist doch die ganze Thematik sehr umfangreich und hindert schon allein aus diesem Grund eine ausführliche Besprechung.

Zur Überleitung in die anschließenden Betrachtungen und als Vorstufe zu diesen wollen wir uns kurz mit einem Gerät befassen, das zwar in der Kernphysik kaum eine beachtenswerte Rolle gespielt hat, das aber zur Konstruktion des anschließend zu besprechenden Zyklotrons führte. Es ist der sogenannte Viel-

fachbeschleuniger des Physikers Wideröe. In Bild 57 sehen wir die Systemskizze. Sein Zweck bestand eigentlich darin, gewisse Ionen zu beschleunigen. Die rechts stark gezeichneten Doppellinien sind zylindrische Hohlelektroden, also Metallkörper, die eine zentrale Bohrung besitzen. Sie sind aus Blech oder Guß gefertigt und werden nach rechts zu immer länger. Die Bohrung hat nur einen Durchmesser von wenigen Millimetern. Zwischen den durch *A, B, C, D, E* und *F* bezeichneten Elektroden herrscht die gleiche Spannungsdifferenz oder, genauer gesagt, die gleiche Potentialdifferenz als Folge der entgegengesetzten Aufladung. Die Hohlelektroden *A* und *C* und *E* sind an dem einen Pol, die mit *B, D* und *F* bezeichneten Hohlelektroden an dem anderen Pol einer Wechselspannungsquelle angeschlossen.

Für diejenigen, die nicht so genau wissen, was eine Wechselspannung ist, wollen wir den Begriff kurz erläutern. Wenn wir uns eine Steckdose im Haushalt ansehen, so sehen wir ihre beiden Pole. Vom Gleichstrom wissen wir sicher schon, daß ein Pol positiv und der andere negativ ist; wir meinen damit, ein Pol trägt negative und der andere positive Ladungen. Verbinden wir die beiden Pole, indem wir den Stecker irgendeines Gerätes hineinstecken, fließt ein elektrischer Strom. Innerhalb des Leiters, das heißt innerhalb der Zuleitungen und der Verbrauchswiderstände, schieben sich die Ladungen schnell durch den Draht, besser gesagt, die Ladungsträger schieben sich hindurch, also die Elektronen, und dazu sagen wir ja, es fließt ein Strom. Dabei fließt der Strom in einer ganz bestimmten Richtung, und polt man um, dann fließt er in der umgekehrten Richtung. Dieses Umpolen haben wir beim Wechselstrom selbsttätig, er polt sich in einer Sekunde hundertmal um. Jeder Steckdosenpol ist also in einer Sekunde fünfzigmal positiver und ebensooft negativer Pol. In einem Wechselstromleiter pendeln die Elektronen einmal in der einen und blitzschnell danach in der anderen Richtung, ihre Fortbewegungsrichtung wechselt gleichfalls in einer Sekunde hundertmal, so daß ein regelrechter Schwingungsvorgang entsteht. Obwohl dies alles sehr rasch geht, hat aber jeder Pol immer eine Polarität (plus oder minus). Mit dem Strom ist aber stets die ihn treibende Spannung vorhanden, und die wechselt im Rhythmus des Stromes, also des Polwechsels mit. Gleichfalls fünfzigmal in einer Sekunde hat ein Pol eine Spannung von 220 Volt bei positiver Polarität und fünfzigmal bei negativer. Dies alles zum Begriff der Wechselspannung.

Die Spannung zwischen den Hohlelektroden des Vielfachbeschleunigers wechselt also auch im Rhythmus des Stromrichtungswechsels. Benutzt man den üblichen 50periodigen Wechselstrom, so ist jede der Elektroden  $\frac{1}{50}$  Sekunde positiv mit der angelegten Spannung und  $\frac{1}{50}$  Sekunde mit der gleichen Spannung negativ. Die Elektroden schalten also selbsttätig um, ihre Polarität wechselt jede  $\frac{1}{50}$  Sekunde, weshalb man diesen Strom auch 50periodigen Wechselstrom nennt.

Taucht an der Hohlelektrode *A* ein negatives Ion auf, und hat in diesem Moment die Elektrode *B* gerade positive Polarität, so wird die Korpuskel in Richtung auf diese Elektrode zu beschleunigt. Während dieser Zeit ist die nächste Elektrode *C* gerade negativ geladen. In der Zeit, die das Ion braucht, um den feldfreien Innenraum der Hohlelektrode *B* zu durchfliegen, wird die Polarität gewechselt, schaltet sich der Strom um. Nun ist die Elektrode *C* auch positiv, und die aus *B* austretende Korpuskel wird wiederum zwischen *B* und *C* beschleunigt. Jetzt ist sie nun schon schneller geworden und würde daher bei gleicher Elektrodenlänge *C* schneller am Ausgang dieser Elektrode erscheinen, bevor also der Strom umgepolt wäre, der sich ja immer im gleichen Rhythmus und damit auch in gleichen Zeiträumen umschaltet. Um dies zu vermeiden, ist aber *C* länger als *B*, und zwar so viel, daß auch jetzt die Korpuskel gerade wieder im richtigen Augenblick erscheint, nämlich dann, wenn die Elektrode *D* umgepolt ist und gleichfalls positive Polarität zeigt. Hier beginnt das Spiel von neuem, aber die Elektroden müssen nun immer länger werden, da die Korpuskel immer schneller wird und die feldfreien Innenräume der Elektroden immer rascher durchquert. Wäre die Korpuskel schon vor dem Umpolen am Ausgang der jeweiligen Elektrode, so würde sie infolge der entgegengesetzten Ladung der gegenüberliegenden Elektrode mehr oder weniger stark abgebremst und der eigentliche Zweck in sein Gegenteil verkehrt. Um den Teilchen eine nennenswerte Energie zu geben, sie also hinreichend zu beschleunigen, gehören schon viele solcher Stufen zu einem Apparat. Der Vorläufer des Zyklotrons hatte 30 solcher Stufen; die erreichte Teilchenenergie lag etwas über 1 Million Elektronenvolt (1 Mev). Das verwendete Prinzip ist also denkbar einfach, die Partikel werden zwischen den Elektroden kurzzeitig beschleunigt, wobei man mit der Elektrodenlänge die zunehmende Geschwindigkeit berücksichtigt. Die beschleunigten Teilchen verlassen durch die Bohrung der letzten Elektrode das Aggregat und können nun auf eine Zielscheibe gerichtet werden. In diesem Falle würde es sich aber nicht lohnen, dieses Gerät einzusetzen, da uns die Alphastrahler bedeutend größere Energien liefern.

Der Vielfachbeschleuniger diente als Vorläufer der Entwicklung des Zyklotrons, das auch ein Vielfachbeschleuniger ist, sich aber doch ganz wesentlich vom vorhergehenden unterscheidet. Ein Nachteil des Widerörschen Beschleunigers, der besonders ins Gewicht fällt, ist seine zunehmende Länge, sobald die Teilchen in nennenswertem Maße beschleunigt werden sollen. Die aufeinanderfolgenden Elektroden müssen ständig länger und länger werden, und das Problem, die Teilchen genau im Zentrum der Elektroden zu halten, wird in gleichem Maße immer schwieriger oder sogar unlösbar.

Im Zyklotron biegt man nun die Elektroden gewissermaßen zu einem Kreis und erhält damit einen bedeutend größeren Weg, wenn die Teilchen die Bahn sehr oft durchlaufen.

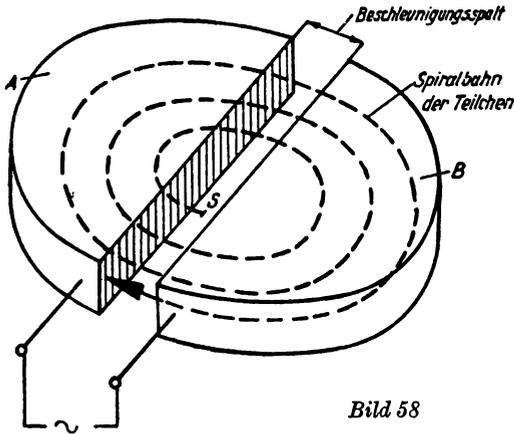


Bild 58

Die Beschleunigung auf einer Geraden wird zu einer Beschleunigung auf Kreisbahnen, man läßt die Partikel statt einer geraden Bahn eine Kreisbahn durchlaufen.

Die beschleunigten Teilchen werden sich aber nicht von selbst auf einer Kreisbahn bewegen, dazu bedarf es äußerer Kräfte. Die Elektroden sind beim Zyklotron nur zwei Halbschachteln, wie in Bild 58 zu sehen ist. Die Wechselspannung wird durch zwei Zuführungselektroden an zwei elektrisch voneinander isolierte innen hohle Blechschachteln gelegt. Zwischen diesen beiden Hohlelektroden ist ein kleiner Abstand, er entspricht etwa dem Abstand der einzelnen Elektroden beim Wideröseschen Gerät. In diesem Raum werden die Teilchen beschleunigt. Im Zentrum  $S$  der Schachtelhälfte befindet sich die Teilchenquelle. Tritt eine Partikel in den Raum ein, so wird sie zwischen den halbkreisförmigen Schachtelhälften, den sogenannten Halbelektroden, in Richtung auf die eine Hälfte zu beschleunigt. Wir nehmen an, die eintretende Korpuskel wäre positiv geladen (sie taucht in der Nähe von  $S$  auf) und die linke Elektrode  $A$  sei in diesem Augenblick gerade negativ mit einer ganz bestimmten Spannung; dann hat die Elektrode  $B$  gerade die entgegengesetzte Polarität bei gleicher Spannung. Zwischen den beiden Hälften bildet sich also ein elektrisches Feld aus und in diesem wird nun das Teilchen nach  $A$  zu beschleunigt. Die Verhältnisse sind hier denen beim geradlinigen Beschleuniger völlig gleich. Während es den feldfreien Innenraum von  $A$  durchfliegt, polt der Wechselstrom um; die eben noch positive Elektrode  $B$  wird damit negativ. Erscheint nun die Korpuskel nach Durchlaufen eines sehr engen Kreises um das Zentrum der ganzen Apparatur wieder an dem Schlitz zwischen  $A$  und  $B$ , so wird sie jetzt auf die Elektrode  $B$  zu beschleunigt. Die Geschwindigkeit ist natürlich größer

geworden. Um aber die gleiche Durchlaufzeit innerhalb der Elektroden zu erzielen, braucht nur der Radius der momentanen Bahn sich im richtigen Maße zu vergrößern, dadurch wird der Umfang des durchlaufenden Kreises entsprechend größer. Das Teilchen wird also trotz der größeren Geschwindigkeit nicht früher an dem Schlitz erscheinen, um sich von  $B$  nach  $A$  zu begeben. Das Feld ist natürlich inzwischen wieder umgepolt worden, die Korpuskel wird jetzt von  $B$  nach  $A$  zu beschleunigt, und so geht dies Spiel eine Weile fort. Wir müssen aber noch klären, warum das Teilchen sich auf einer Kreisbahn bewegt. Über und unter den beiden Hälften der horizontal liegenden Schachteln befinden sich die beiden Pole eines starken Elektromagneten. Die magnetischen Kraftlinien, die von dem einen Pol zum anderen hinübergreifen, durchsetzen die Schachteln. Ein Magnetfeld tritt mit einer geladenen Partikel in Wechselwirkung, es übt eine Kraft darauf aus. Infolge dieser Einwirkung krümmt sich die Teilchenbahn, je nach der Stärke des angelegten Feldes, mehr oder weniger. Bei ständiger Einwirkung ergibt sich eine Umlaufbewegung des Teilchens in diesem Feld. Die Einwirkung von Magnetfeldern auf geladene Partikel haben wir auch im Bild 40 gezeigt. Dort wurden die Strahlungsarten damit „sortiert“. Es wird ein sehr starkes Magnetfeld gebraucht, um die geladenen Teilchen auf eine Kreisbahn zu zwingen und sie auf der Kreisbahn zu halten; denn infolge der ständigen Beschleunigung haben die Teilchen das Bestreben, geradlinig und nicht auf einem Kreis weiterzufliegen. Das Magnetfeld dient also hier als Führungsfeld, es führt die Korpuskel immer auf einer Kreisbahn durch die Schachtelektroden. Der Bahnradius muß aber beständig größer werden, sonst erscheinen die schneller werdenden Teilchen vor der Umpolung schon am Spalt. Die auf einem Kreis umlaufenden Partikel erfahren in Richtung der Bahn und auch senkrecht dazu eine Beschleunigung, die nach außen gerichtete Zentrifugalbeschleunigung, das heißt eine durch diese wiederum verursachte Zentrifugalkraft, die mit zunehmender Geschwindigkeit immer größer wird und dadurch das Teilchen auch ständig mehr und mehr nach außen zieht. So vergrößert sich also der Radius und damit die Bahnlänge von selbst. Dies soll aber gerade erreicht werden. Ganz so einfach, wie wir dies hier eben geschildert haben, liegen die Verhältnisse in der Praxis allerdings nicht; uns genügt aber hier das Schema.

Der technischen Verwirklichung des Prinzips stehen eine Anzahl kleinerer und größerer Schwierigkeiten gegenüber, die beim Bau eines Zyklotrons zu beachten sind und seine Leistungsfähigkeit sehr beeinträchtigen können. Da ist zum Beispiel die Schwierigkeit, die in den Schachtelektroden umlaufenden Partikel ständig in der Mittelebene, also auf der in halber Schachtelhöhe liegenden gedachten Kreisfläche zu halten. Der Innenraum der Schachteln hat nur eine Höhe von wenigen Zentimetern (2 bis 3 Zentimeter), und Abweichungen von der Mittelfläche nach oben oder unten von 1 bis 1,5 Zentimeter bringen die

Partikel schon an die Elektrodenwände, wo sie natürlich abgebremst oder aufgehalten werden. Dies ist unbedingt zu vermeiden; die Teilchen müssen möglichst in der Mitte dieser Fläche gehalten werden, man sagt, sie müssen fokussiert werden. Dieser Ausdruck ist aus der Optik entlehnt und bedeutet dort soviel wie nach dem Brennpunkt werfen. Der Brennpunkt einer Linse heißt Fokus, und wenn also Strahlen fokussiert werden, so richtet oder bündelt man sie auf den Brennpunkt der Linse. Hier in unserem Falle müssen die Teilchen nach der Mittelfläche geworfen werden, sobald sie nach oben oder unten daraus abweichen. Die Fokussierung wird beim Zyklotron durch das verwendete Magnetfeld erreicht.

Mit diesem Großgerät können Ionen und Elementarpartikel beschleunigt werden; meistens verwendet man Protonen, Alphapartikel und Deuteronen. Es gibt heute etwas mehr als zwei Dutzend dieser Anlagen in der Welt, größere und kleinere Geräte. Man braucht zum Bau etwa bis zu 25 Tonnen Kupfer für die Wicklungen des Elektromagneten und etwa bis zu 300 Tonnen Stahl. Die neuesten Apparate brauchen noch wesentlich mehr von den genannten Materialien. Außerdem müssen umfangreiche Kühl- und Schutzanlagen gebaut werden, um einerseits die großen entstehenden Wärmemengen abzuführen und andererseits die Mitarbeiter vor der während des Betriebes entstehenden durchdringenden Gamma- und Neutronenstrahlung zu schützen. Die größten erreichbaren Energien liegen bei etwa 500 Mev für Alphateilchen. Die beschleunigten Teilchen treten nach Erreichen der äußersten Bahn durch ein mit einer Folie versehenes kleines Fenster aus und werden auf das zur Umwandlung vorgesehene Objekt gerichtet. In Bild 59 sehen wir den aus der Vakuumkammer austretenden Strahl sehr gut. Es handelt sich hier um Deuteronen, also um die Kerne von schwerem Wasserstoff,  ${}_1\text{H}^2$ . Den schweren Wasserstoff nennt man bekanntlich Deuterium, wir kennen auch noch überschweren Wasserstoff. Die austretenden Deuteronen haben eine Energie von 7 Mev und bringen die Luft zum Leuchten. In der Höhe des Strahles sehen wir die Wände der Vakuumkammer, in der die beiden Elektrodenhälften liegen. Der Elektrodenraum wird evakuiert, um einen Zusammenstoß der beschleunigten Partikel mit den Gasmolekülen zu vermeiden. Diese würden die Teilchen aus ihrer Bahn werfen und abbremsen. Ober- und unterhalb der Kammer sind die Wicklungen des Magneten zu sehen.

Während der Tätigkeit des Zyklotrons darf sich niemand in dessen unmittelbarer Nähe aufhalten. Die Schaltpulte befinden sich in größerer Entfernung (etwa 10 Meter); die schützende Wassermauer ist 60–80 Zentimeter dick, bei sehr großen Geräten noch stärker. Die Umlaufzahlen der Partikel liegen in der Größenordnung von mehreren hundert bis tausend Umläufen, bis sie auf der äußersten Bahn ankommen. Der derzeit größte Zyklotron hat einen Schachteldurchmesser von etwa 4,30 Meter; mit ihm lassen sich Deuteronen auf 195 Mev und Alphapartikel auf 390 Mev bringen. Mit diesen Leistungen

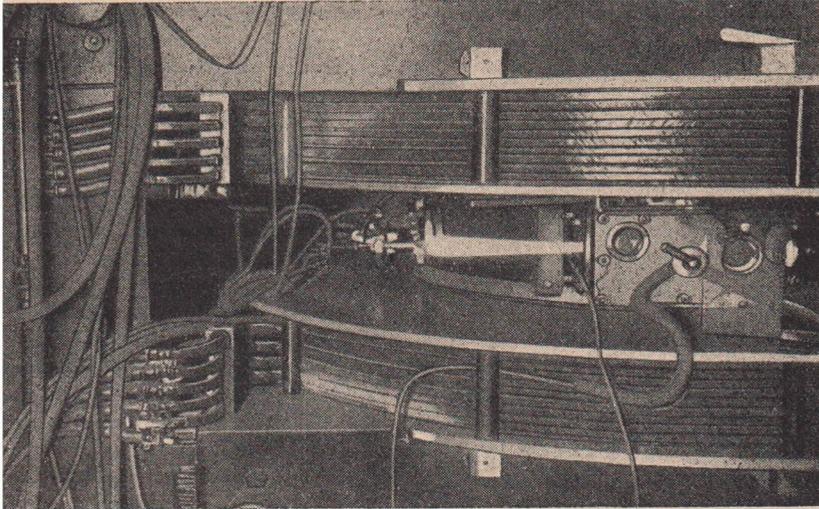


Bild 59

noch nicht zufrieden, will man ein Riesenzyklotron bauen, das Energien von mehreren tausend Mev liefert.

Es wird sicher aufgefallen sein, daß wir bei der Aufzählung der im Zyklotron beschleunigten Teilchen das Negatron nicht erwähnt haben. Es ist in der Tat nicht gut möglich, diese gleichfalls geladene Korpuskel im Zyklotron elektrisch zu beschleunigen, wie dies mit den schweren Teilchen geschieht. Dies liegt vor allem daran, daß unser Elektron ein ganz außergewöhnliches Teilchen ist, es wiegt nämlich sehr wenig, es hat eine zu geringe Masse. Die anderen Teilchen sind dagegen sehr schwer. Das Proton ist 1840mal schwerer, das Deuteron über 3680- und das Alphateilchen mehr als 7360mal. Nun besteht aber die Energie der Geschosse im wesentlichen in kinetischer Energie, und die ist bekanntlich gleich der halben Masse, multipliziert mit dem Geschwindigkeitsquadrat:

$$\frac{m}{2} \cdot v^2 = E_{\text{kin}} .$$

Um die gleiche kinetische Energie zu erreichen, brauchen Alphateilchen daher nur etwa  $\frac{1}{85}$  der Elektronengeschwindigkeit zu haben, oder umgekehrt müssen Negatronen zur Erzielung gleicher Energie 85mal schneller sein.

Nach der Relativitätstheorie ist die Masse eines Körpers oder einer Partikel von seiner Geschwindigkeit abhängig. Beträgt die Körpergeschwindigkeit etwa  $\frac{1}{10}$  Lichtgeschwindigkeit ( $c_L$ ), so kann der Massenzuwachs gewöhnlich noch ver-

nachlässigt werden; ist sie gleich  $\frac{1}{2} c_L$ , so beträgt der Massenzuwachs schon etwa 15 Prozent. Die Masse eines Körpers bei der Geschwindigkeit Null nennt man seine Ruhemasse. Um also leichten Partikeln hohe Energien zu erteilen, muß man sie schon auf recht beachtliche Geschwindigkeiten bringen, die bei den leichten Negatronen schon in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit liegen, wobei ihre Masse dann allerdings beträchtlich zunimmt. Die viel schwereren anderen Partikel brauchen für dieselbe Energie längst nicht auf derart hohe Geschwindigkeiten beschleunigt zu werden, und dies ist ein unbedingter Vorzug. Ihre Massenzunahme kann dann also noch immer vernachlässigt werden. Es kommt sehr darauf an, ob man dies vermeiden kann oder nicht; denn eine Massenzunahme hätte für die beschleunigten Teilchen im Zyklotron unangenehme Folgen. Das magnetische Führungsfeld, das die Teilchen auf einer etwa kreisförmigen Bahn hält, dessen Radius sich beständig erweitert, müßte von der Zyklotronmitte nach außen gleichfalls in genau bestimmtem Maße zunehmen. Es müßte in ganz bestimmter Weise veränderlich sein, und zwar in einer Art, die sich mit diesem Magnetfeld nicht verwirklichen läßt. Unser Elektron würde den zwischen den Halbschalen liegenden Raum nach einigen Umläufen nicht mehr im richtigen Rhythmus erreichen und mehr und mehr abgebremst werden, es würde aus dem Takt geraten. Infolge der Massenzunahme vermindert sich die Geschwindigkeit ein wenig, und es würde dadurch hinter dem elektrischen Wechselfeld zurückbleiben, es wäre nicht mehr in Phase mit ihm, wie der Physiker sagt. Während es sich gerade zwischen den Schachteln befindet, könnte das Feld zum Beispiel gerade umpolen und das Teilchen abbremsen, statt es zu beschleunigen. Im Betatron werden diese und andere Schwierigkeiten umgangen. Hier werden die Partikel nicht durch elektrische Felder, sondern durch magnetische beschleunigt. Wir müssen zur Erläuterung ein klein wenig ausholen. Nimmt man einen elektrischen Leiter, zum Beispiel einen Kupferdraht, und biegt ihn zu einem

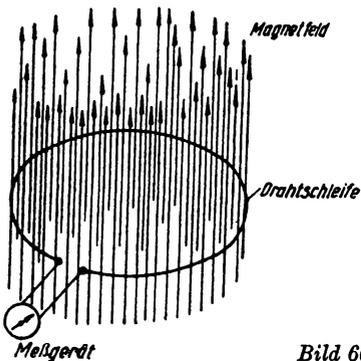


Bild 60

Kreis von etwa 10 Zentimeter Durchmesser, versieht ihn mit zwei Anschlüssen, wie in Bild 60 gezeigt, und läßt ein Magnetfeld von unten nach oben (oder umgekehrt) durchtreten, so erzeugt dieses in der Schleife einen Stromstoß. Durch ein wechselndes Magnetfeld kann man aber einen Wechselstrom erzeugen. Der Strom entsteht nur, wenn die Schleife in das Magnetfeld geführt wird, oder bei ruhender Schleife, wenn das Magnetfeld eingeschaltet wird, also nur in dem Moment, wenn die Magnetlinien die Fläche, welche die Schleife umschließt, zum erstenmal

durchsetzen. Verbleibt die Schleife im Feld, so erzeugt dieses keinen Strom mehr. Ein stationäres Magnetfeld erzeugt also keinen Strom; dazu ist nur ein zeitlich veränderliches, man sagt ein instationäres Feld in der Lage. Läßt man die Schleife im Feld eines stetig zunehmenden Magnetflusses, so entsteht eine stetig zunehmende EMK (Elektromotorische Kraft) und ein ansteigender Strom. Dieses Prinzip verwendet man beim Betatron. Die Drahtschleife entfällt aber hier; die Bahnen der Elektronen sind jetzt die Drahtschleifen. Die Teilchen bewegen sich also nicht in einem Draht, wie beim vorgenannten Beispiel, sondern in einer Vakuumkammer; sie umkreisen die Magnetlinien (Bild 61). Natürlich würden sie sich nicht von allein in einer gekrümmten Bahn um dieses Feld bewegen. Auch hier muß, genau wie beim Zyklotron, ein Führungsfeld zu Hilfe genommen werden, das sie in eine Kreisbahn zwingt und darin hält. Die Bedingungen werden hier etwas komplizierter; das eine Magnetfeld beschleunigt und führt die Elektronen zugleich. Ferner müssen die Partikel ebenfalls wieder fokussiert werden; das macht dasselbe Magnetfeld. Wir wollen uns nicht um Einzelheiten kümmern; die Probleme sind beim Betatron etwas schwer zu übersehen. Es kommt uns hier nur auf das Prinzip an. Die Elektronen umkreisen also ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld, das sie stetig in einer Richtung, der Umlaufsrichtung, beschleunigt, wobei sie durch dasselbe Magnetfeld auch stets auf denselben Bahnen gehalten werden, also nicht wie beim Zyklotron eine Spirale durchlaufen. Der Durchmesser ihrer Bahn liegt, je nach Bauart des Aggregates, bei einigen Dezimetern, und die Umlaufzahlen betragen mehrere Millionen Umläufe, bis sie die entsprechende Energie erlangt haben. Die Partikel kommen also hier nicht von allein an die Außenwand der Vakuumkammer, sondern müssen, nachdem sie eine genügende Energie erlangt haben, von ihrer Bahn weggezogen werden. Das magnetische Führungsfeld, das die Partikel immer auf die Kreisbahnen zwingt, muß bestän-

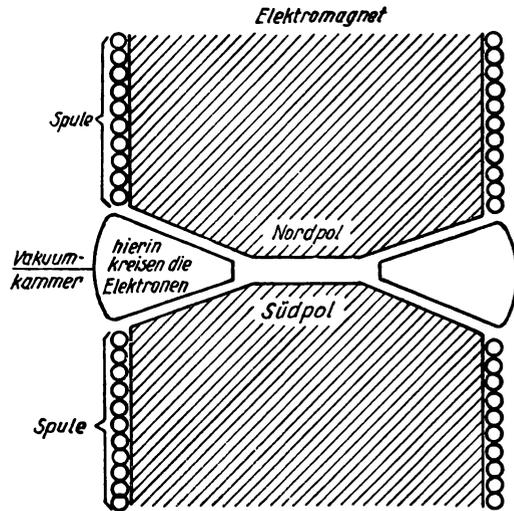


Bild 61

an. Die Elektronen umkreisen also ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld, das sie stetig in einer Richtung, der Umlaufsrichtung, beschleunigt, wobei sie durch dasselbe Magnetfeld auch stets auf denselben Bahnen gehalten werden, also nicht wie beim Zyklotron eine Spirale durchlaufen. Der Durchmesser ihrer Bahn liegt, je nach Bauart des Aggregates, bei einigen Dezimetern, und die Umlaufzahlen betragen mehrere Millionen Umläufe, bis sie die entsprechende Energie erlangt haben. Die Partikel kommen also hier nicht von allein an die Außenwand der Vakuumkammer, sondern müssen, nachdem sie eine genügende Energie erlangt haben, von ihrer Bahn weggezogen werden. Das magnetische Führungsfeld, das die Partikel immer auf die Kreisbahnen zwingt, muß bestän-

dig größer werden, da sonst die Elektronen mit zunehmender Energie nicht mehr auf derselben Bahn bleiben würden. Läßt man dieses Feld im geeigneten Moment abnehmen, wenn also die Elektronen genügend Energie besitzen, dann gelangen die Partikel nach außen, weil dann die Zentrifugalkraft größer ist als die nach innen gerichtete magnetische Kraftkomponente des Führungsfeldes, die sonst der Zentrifugalkraft das Gleichgewicht hält. Nun unterscheidet sich der Zweck des Betatrons noch etwas von dem des Zyklotrons. Beim Zyklotron werden die beschleunigten Partikel unmittelbar als Geschosse verwendet; sie werden auf eine Zielscheibe geschossen und rufen dort die gewünschten Umwandlungen hervor. Die durch das Betatron beschleunigten Negatronen eignen sich jedoch trotz der erreichten Energie nicht gut für Kernumwandlungsprozesse. Man läßt die Negatronen vielmehr auf Materie auffallen, wobei sie infolge der starken Abbremsung harte Röntgenstrahlung erzeugen, die sich für manche Prozesse als geeigneter erweist.

Röntgenstrahlung entsteht auf zwei Arten. Einmal dann, wenn Elektronen der innersten Schalen durch Stoß aus dem Atom herausgeworfen werden und diese Stelle daraufhin von einem weit außen laufenden Elektron oder von einem freien nicht zum Atom gehörigen Elektron besetzt wird. Dieser Prozeß ist relativ selten. Die zweite Art ist die allein zur technischen Erzeugung angewandte. Man läßt in einer Vakuumröhre die aus einem Glühdraht austretenden Elektronen ein starkes elektrisches Feld durchlaufen, das sie mit großer Wucht auf die sogenannte Antikatode schleudert. Das ist eine meist aus Wolfram bestehende Scheibe. Dabei dringen die Elektronen durch die Hüllen der Atome und gelangen in Kernnähe. Infolge der auf sie wirkenden Kräfte werden sie aus ihrer Richtung stark abgelenkt und erfahren dabei eine Bremsung. Wird eine bewegte geladene Korpuskel sehr stark beschleunigt oder gebremst, so induziert dieser Vorgang eine elektromagnetische Welle. Nach ihrer Frequenz gehört sie in den Bereich der Röntgenstrahlung, nach dem Vorgang ihrer Erzeugung heißt sie auch Bremsstrahlung.

Außer den bereits genannten Beschleunigern gibt es noch verschiedene andere, die jedoch prinzipiell nichts Neues darstellen, sondern auf einer Kombination des Zyklotron-Betatron-Prinzips beruhen. Da ist der sogenannte Synchrozyklotron zu nennen, ferner das Synchrotron zur Beschleunigung von Negatronen, der Protonensynchrotron und der Zyklosynchrotron. Drei Aggregate von Synchrotronen sind bereits fertig, einige sind noch im Bau. Es handelt sich dabei um Mammutaggregate im Vergleich zu den gewöhnlichen Zyklotronen. Eines der Geräte nennt sich Kosmotron, eines Bevatron. Die höchste erreichbare Energie mit Protonen wird beim Bevatron auf 10 Bev, das sind 10000 Mev, geschätzt. Derart große Energien sind nicht zu Kernumwandlungen notwendig, wie wir sie im Abschnitt Kernreaktionen noch besprechen werden, sondern mit diesen Energien kann man künstlich Teilchen erzeugen. Gemeint sind solche Teilchen,

wie sie in der kosmischen Strahlung beobachtet werden und in gewisser Weise auch für die Kerne eine beachtliche Rolle spielen. Es sind dies die Mesonen; wir erwähnen sie nochmals im Abschnitt über Kernreaktionen.

Für den technisch interessierten Leser wollen wir kurz einige Daten zum Größenvergleich der einzelnen Geräte angeben. Manche dieser Werte stellen, wie man leicht erkennt, die Höchstwerte der betreffenden Größen dar.

#### ZYKLOTRON MITTLERER GRÖSSE

##### Leistungen:

Deuteronenenergie 16 Mev

Protonenenergie 8 Mev

Deuteronenstrahl, austretender 20  $\mu$  A

##### Magnet:

Gewicht 180 t

Polschuhdurchmesser 120 cm

Luftspalt zwischen den Schachteln 12 cm

Strom zur Erregung des Magneten 80 A, 200 Volt

##### Sonstiges:

Höhe des Raumes in den Schachteln 2,5 cm

Schachteldurchmesser 55 cm

Größte Spannung zwischen den

Schachtelhälften 200000 V

Strahlungsschutz 120 cm Wasser

Vakuum in der Schachtel  $10^{-6}$  mm Hg

#### GROSSER SYNCHROZYKLOTRON

##### Leistungen:

Alphaenergie 405 Mev

Deuteronenenergie 200 Mev

Mittlere Stromdichte für Deuteronen 0,9  $\mu$ A

##### Magnet:

Gewicht um 5000 t

Polschuhdurchmesser 4,7 m

Abstand der Magnetpole 23 cm

##### Sonstiges:

Höhe des Raumes in der Schachtel 12,7 cm

Betriebsspannung zwischen den Schachteln 15000 V

Mögliche Spannung 4000 kV (Kilovolt)

Zeit für Teilchen zur Erreichung der maximalen Energie 1/1000 s (Sekunden)

Zahl der Umläufe (Deuteron, Alpha) 10000

#### BETATRON

Leistung	100 Mev
Magnetgewicht	130 t
Polschuhdurchmesser	195 cm
Teilchenbahndurchmesser	170 cm
Vakuum im Beschleunigungsring	$10^{-6}$ mm Hg
Anzahl der Umläufe (bei 100 Mev)	240000
Energiegewinn pro Umlauf	420 eV
Energieverlust pro Umlauf (durch Strahlung)	11 eV

#### PROTONENSYNCHROTRON

Leistung	3,6 Bev (3600 Mev)
Magnetgewicht	10000 t
Teilchenbahndurchmesser	29,6 m
Anzahl der Umläufe	3,8 Mill.
Beschleunigungszeit auf 3,6 Bev	1,75 s

#### BEVATRON

Leistung	10 Bev
Magnetgewicht	13000 t
Bahndurchmesser (Protonen)	fast 50 m

Bei den zuletzt aufgeführten Großgeräten ist das Magnetfeld nur noch ringförmig, wie in Bild 62 angedeutet; der Mittelraum ist fast völlig feldfrei. Wir haben im Vorstehenden nur die Daten angegeben, die leicht verständlich erscheinen. Natürlich gehören noch eine Menge anderer zur Vervollständigung, im besonderen elektrische und magnetische Angaben über die verwendeten Wechsel frequencies für das Beschleunigungsfeld und auch für das Magnetfeld usw.

Beim Betatron haben wir noch den Strahlungsverlust angegeben. Man versteht darunter den Verlust an Energie, der durch Strahlung des beschleunigten Teilchens entsteht. Wir haben schon darauf hingewiesen, daß eine geladene und beschleunigte Korpuskel strahlt; allerdings müssen die Beschleunigungen große Werte haben. Da Strahlung aber auch eine Form der Energie ist, muß also hierdurch notwendigerweise ein Energieverlust eintreten. Der Strahlungsverlust spielt bei im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit kleinen Geschwindigkeiten praktisch keine Rolle; er ist winzig. Im Bereich großer Geschwindigkeiten ist dies aber anders; die angegebenen 11 eV Strahlungsverlust sind etwa 2,6 Prozent vom Energiegewinn je Umlauf. Für die im Synchrotron beschleunigten Protonen liegt der Strahlungsverlust noch unter einem nennenswerten Betrag.

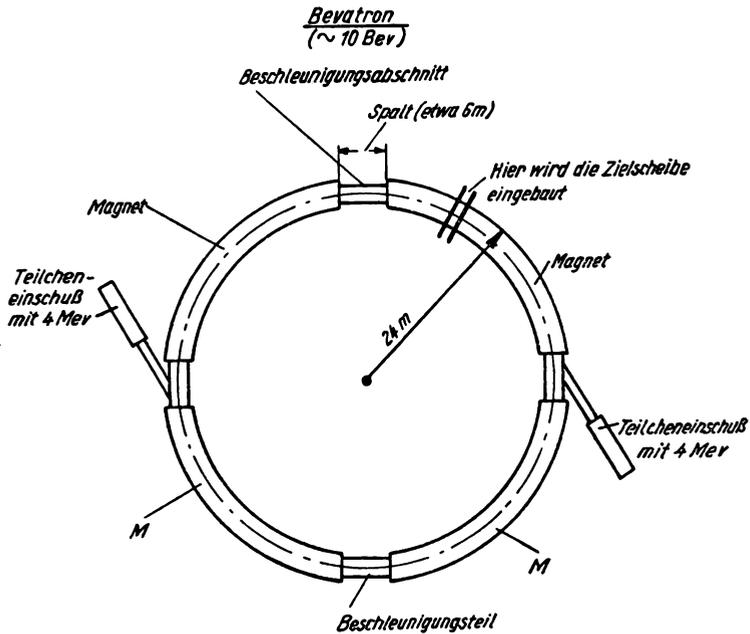
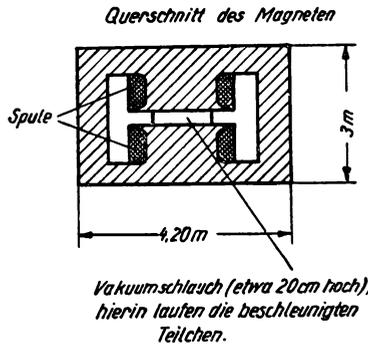


Bild 62



Aus dem angestellten Vergleich ist wohl ersichtlich, daß es sich um unterschiedliche Geräte handelt. Man kann ihre Größe und die erreichbaren Leistungen schon nach dem Magnetgewicht beurteilen; denn es ist ein Unterschied, ob man zu einem Gerät 130 Tonnen oder 13 000 Tonnen Stahl für den Magneten benötigt.

Der Unterhalt solcher Apparate ist kostspielig und erfordert viel Bedienungs- und Wartungspersonal sowie umfangreiche Schutzmaßnahmen usw. Auch der Energieverbrauch ist nicht gerade klein.

## 21. Kernreaktionen

Die bisherigen Ausführungen dienten dazu, uns in gewissem Maße mit den einfachsten Gegebenheiten aus der Welt der Atome bekannt zu machen. Wir fanden eine Welt, der wir als Neulinge mehr oder weniger hilflos gegenüberstehen, besonders dann, wenn wir uns auf unsere gewöhnliche Anschauung aus dem Alltagsleben stützen; aber auch der Wissenschaftler steht ihr noch keineswegs souverän gegenüber. Wir haben gesehen, wie man die Erscheinungen in ihrer Vielfalt zu ordnen und zu beschreiben versucht, wie man ihnen aus dem beschränkten menschlichen Anschauungs- und Ideenbereich heraus konstruierte Modelle oder Bilder und Funktionsmechanismen zuordnet, sie mit diesen vergleicht und schließlich nach und nach Widersprüche und Unzulänglichkeiten beseitigt. Wenn dieser Prozeß noch keineswegs zum vollen Erfolg geführt hat, so liegt das daran, daß es dem Menschen eben nicht möglich ist, die Stufen einer Entwicklung zu überspringen.

Die wissenschaftliche Forschung vermittelt uns Naturerkenntnisse, und uns bleibt es überlassen, sie folgerichtig zu beschreiben.

Im Verlauf unserer Betrachtungen wurde schon einige Male betont, daß die Mikrowelt, die Welt des unendlich Kleinen, ihre eigenen Gesetzmäßigkeiten hat, die von denen der uns vertrauten Welt abweichen. Dies scheint in vielen Fällen einleuchtend und widerstrebt auch der unverbildeten Anschauung nicht. Wenn die winzigen Moleküle eines Gases in der Wechselwirkung mit ihrer unmittelbaren Umgebung, das heißt den einzelnen Partikeln selbst, sowie mit ihrer mittelbaren Umgebung, also den Gefäßwänden oder Flüssigkeitsoberflächen oder anderen Gasen, bei mikroskopischer Betrachtung sich anders verhalten als in ihrer Gesamtheit, so liegt das eben daran, daß 10, 100 oder auch 1000 oder mehr Moleküle noch nicht das sind, was wir gewöhnlich als Gas ansehen. Dazu gehört eine derart große Zahl von Teilchen, daß der individuelle Charakter eines einzelnen durch die Art unserer Betrachtung völlig verwischt wird. Wir beobachten nicht einzelne Moleküle, sondern ungeheuer riesige Zahlen von Partikel, Gesamtheiten, die bei dieser Betrachtung gewisse mittlere Eigenschaften zeigen, das heißt, wir beobachten schließlich nur ein mittleres Verhalten großer Mengen und keine konkreten Einzelprozesse. Es werden beispielsweise nicht die Bewegungen einzelner Moleküle beobachtet, nicht die Stöße untereinander und auf irgendwelche Begrenzungen, nicht der fortwährende Austausch von Bewegungsenergie, nicht das Abbremsen und Beschleunigen durch den Zusammenstoß usw. – Wir haben

natürlich vorausgesetzt, daß sich die Partikel mikroskopisch so verhalten, wie wir es angegeben haben. –

Diese Erscheinungen in Form von Gesetzen exakt zu erfassen, ist mit unserer Einsicht und unseren Mitteln auch unmöglich. Wenn man die Bewegungsgleichung eines einzelnen Teilchens aufstellen will, muß man seine Bewegung beschreiben können; das ist aber gar nicht möglich. Es läßt sich nicht vorhersagen, wie das Teilchen sich bewegen wird, ob es mit dieser oder jener Geschwindigkeit durch den Raum fliegt, oder ob es diesen oder jenen Impuls hat, und an welchen Stellen es anzutreffen ist, da sämtliche der genannten Größen sich ständig in unkontrollierbarer Weise ändern. Die Bewegung *eines* Teilchens ist akausal. Unsere Beobachtung des Verhaltens eines Gases ist also statistisch; wir messen nur Mittelwerte, einzelne Ereignisse werden nicht beobachtet. Aus den Mittelwerten schließen wir auf die uns geläufigen Gesetze, die Gasgesetze, die Gesetze über die Temperatúrausbreitung, über die Ausbreitung kleiner Störungen, das sind die Schallwellen, und vieles andere. Diese so aufgestellten Gesetze beschreiben aber nicht das Verhalten einer Partikel, sondern nur das Verhalten von riesigen Gesamtheiten; für ein Teilchen oder auch für wenige besitzen sie keine Gültigkeit. Einzelne Teilchen verhalten sich nicht so, wie das die makroskopischen Gesetze angeben; ihr Verhalten ist in gewissem Sinne zufallsbedingt. Aber nicht nur das zufallsbedingte Verhalten einzelner Partikel ist ein Charakteristikum mikroskopischen Geschehens, sondern auch die Sprunghaftigkeit, die Unstetigkeit oder, wie der Fachausdruck hierfür lautet, die Diskontinuität. Unter einem Kontinuum versteht man eine lückenlose Aufeinanderfolge, unter einem Diskontinuum also eine Folge mit Lücken, mit Sprüngen oder mit Zwischenräumen.

Wir haben gesehen, daß die beobachtete Energieausstrahlung in gewissen Beträgen erfolgt, den sogenannten Quanten, die nicht jeden beliebigen Wert haben können, sondern nur die durch den sprunghaften Wechsel der Elektronenzustände im Atom bedingten Werte annehmen, die dazwischenliegenden Werte aber nicht. Die Quanten sind Vielfache einer gewissen universellen Wirkungsgröße, der Planckschen Konstanten  $h$ , die in der Atomphysik eine fundamentale Rolle spielt. Jede Energieänderung in einem atomaren System läßt sich als Produkt dieser Konstanten mit einem Faktor, der Frequenz  $\nu$  der Welle, darstellen. Das gibt es bei makroskopischen Verhältnissen aber nicht. Die Energie eines Systems ändert sich hier immer nur stetig, also ohne Sprünge. Auch wenn etwa ein Auto mit hoher Geschwindigkeit gegen ein Hindernis prallt, ändert sich seine kinetische Energie stetig; die Abnahme der Geschwindigkeit auf Null geschieht allerdings dabei in einer äußerst kurzen Zeit. In der Natur makroskopischer Erscheinungen werden oft sprunghafte Änderungen dadurch vorgetäuscht, daß sie in Bruchteilen von Sekunden oder auch in einem räumlich unscheinbar kleinen Volumen erfolgen. Die heutige Quantenmechanik erreicht die Erfassung des

Unstetigen durch in geeigneter Weise vorgenommene Quantisierung der von ihr behandelten physikalischen Größen, wie Impuls und Ort eines Teilchens, des Spins usw. Wir haben darauf beispielsweise beim Spin schon hingewiesen. Die Quantenmechanik hatte ursprünglich den Zweck, die Erscheinungen der Atomhülle zu beschreiben beziehungsweise zu erfassen. Doch hat sie sich auch schon in manchen Teilen der Kernphysik aufs beste bewährt, obwohl wir noch nicht ganz davon überzeugt sind, daß ihr für den Bereich des Kernes unbedingte Anwendbarkeit zukommt.

Die Probleme der Kernphysik sind vielfältig, schwierig und noch in ein gewisses Dunkel gehüllt. Wir kennen noch recht wenig aus der Welt der Kerne. Wir haben die als gesichert angesehene Deutung des Kernaufbaus aus Protonen und Neutronen schon angegeben. Nach heutiger Auffassung sind diese Teilchen nur verschiedene Erscheinungsformen einer Partikel, des Nukleons.

An einer Stelle haben wir erwähnt, daß man dem Kern eine Tröpfchenstruktur nachsagt. Seine Dichte nimmt bei den größeren Kernen nicht oder fast nicht zu; sie ist etwa annähernd gleichbleibend. Bei einem Flüssigkeitstropfen liegen die Verhältnisse ebenso. Seine Dichte nimmt mit der Größe auch nicht zu, daher kommt der Vergleich. Neuere Arbeiten haben diesen ursprünglich von Bohr geäußerten Vergleich wieder aufgegriffen, und man darf gespannt sein, ob es so gelingen wird, mehr Licht in das Dunkel zu bringen. Danach wird unser Kern tatsächlich als mit Flüssigkeit gefüllt angesehen, allerdings nicht mit normaler Flüssigkeit im Sinne der Hydromechanik. Man nennt sie Quantenflüssigkeit und schreibt ihr ganz besondere Eigenschaften zu.

Die Kerne der Atome sind von sehr geringer Größe; ihr Radius beträgt etwa nur  $\frac{1}{10\,000}$  vom Atomradius. Ähnlich wie schon bei der Hülle darf man sich auch hier die Begrenzung des Kernes nicht zu anschaulich als eine starre Fläche vorstellen. Der Kernradius ist auch nicht direkt gemessen worden, sondern die Reichweite der Kernkräfte wurde mit Hilfe von Streuversuchen oder aus der beim Alphazerfall frei werdenden Energie bestimmt. Innerhalb der Reichweite befinden sich nun die Nukleonen in einer unaufhörlichen Bewegung. Jedes Teilchen hat einen Spin und ein magnetisches Moment, ohne daß man ihm deswegen unbedingt eine Eigendrehung zuschreibt.

Die von selbst erfolgenden Kernumwandlungsprozesse finden wir in der Hauptsache bei den schweren Elementen. Die betreffenden Kerne sind instabil und zerfallen unter Aussendung von Teilchen und in manchen Fällen unter unmittelbarer oder nachfolgender Emission von Gammaquanten. Im besonderen beim Betazerfall wandeln sich die Nukleonen ineinander um. Ein Neutron geht über in ein Proton und emittiert dabei ein Negatron und ein Neutrino. Dieses Modell des Betazerfalls hat heute einige Änderungen erfahren im Zusammenhang mit der Erklärung der Kernkräfte, welche die einzelnen Nukleonen aneinander binden. Wir haben im Abschnitt Strahlungsarten darauf hingewiesen. Den selbst-

tätigen oder spontanen Umwandlungen stehen solche gegenüber, die durch Energiezufuhr beziehungsweise durch äußere Eingriffe in den Kern hervorgerufen werden. Hierbei handelt es sich aber zumeist nicht um Kernzertrümmungen. Es finden aber auch solche statt. Am bekanntesten ist wohl die Uranspaltung geworden; dabei bricht ein Urankern in nahezu zwei gleich große Stücke auseinander, die nach verschiedenen Seiten weggeschleudert werden. Dieser Prozeß wurde zum erstenmal 1939 von den Atomphysikern Otto Hahn, Lise Meitner und Straßmann in Berlin beobachtet und führte dann nach fieberhaften weiteren Untersuchungen an anderer Stelle zu der gefürchteten Neutronenlawine, die in der Atombombe eine praktische Anwendung fand. Außer dieser Kernspaltung sind heute auch schon Prozesse beobachtet worden, bei denen nicht nur zwei, sondern drei Bruchstücke wegfliegen. Man schießt Teilchen sehr großer Energie (einigen Hundert Mev), zum Beispiel Alpha- oder Deuteronenpartikel, auf Kerne, die sich dann in eine gewisse Anzahl von Neutronen und eine Anzahl Protonen zerlegen, einen Vorgang, den man Kernzersplitterung nennt. Bei all den im Labor vorgenommenen Reaktionen werden sehr kleine Mengen der jeweiligen Elemente verwendet. Die durch die modernen Partikelschleudern erzielten Kernveränderungen treten gewöhnlich nur bei einer sehr kleinen Anzahl von Atomen auf. Die Ausbeute steigt natürlich mit der Zahl der verwendeten Geschosse an, und diese ist aber verhältnismäßig klein. Die aus dem Zyklotron oder Zyklosynchrotron austretenden geladenen Partikel stellen einen nur sehr kleinen elektrischen Strom dar, der sich meist in der Größenordnung von einigen Hundert Mikroampere ( $\mu A$ , also einigen Zehntausendstel Ampere) bis höchstens einigen Tausend  $\mu A$  bewegt. Es handelt sich also um relativ kleine Ströme. Wollen wir einen ungefähren Anhaltspunkt für die Stromstärke haben, so erinnern wir uns, daß der im Haushalt verwendete Strom gewöhnlich 6 Ampere hat, also pro Sekunde durch den Querschnitt eines Drahtes mehr als das Zehntausendfache an Ladung transportiert wird. Das bedeutet, daß bei Deuteronenverwendung im Strahl der Beschleuniger pro Sekunde durch diesen Strahlquerschnitt nur der zehntausendste Teil jener Partikelmenge durchtritt, die durch die Haushaltsleitung in unsere Geräte strömt. Die Wahrscheinlichkeit einer Kernreaktion steigt mit der Zahl der auf eine kleine Probe aufgeschossenen Korpuskeln an, jedoch gehören oft viele Millionen oder mehr Teilchen dazu, um einen einzigen Kern überhaupt zu treffen. Wenn der Kern nicht getroffen wird, kann keine Umwandlung stattfinden. Trotzdem ist aber die Zahl der Partikel in solch einem Strahl für unsere Maße noch unwahrscheinlich groß. Die durch die künstlich beschleunigten Teilchen hervorgerufenen Effekte erfordern eine sehr empfindliche Meßapparatur, um sie nachzuweisen. Es ist keineswegs damit getan, daß man die Kanonen zur Verfügung hat und die Zielscheiben. Sehr sinnreiche Experimente müssen gerade heute ersonnen werden, um den Charakter neuer oder noch wenig bekannter Teilchen zu ermitteln und ihre Reaktionen zu studie-

ren. Dies gilt besonders für die Mesonenforschung; hier herrscht noch allergrößtes Dunkel. Die Mesonen rechnet man mit zu den Elementarteilchen. Es gibt davon eine ganze Reihe: positive, negative und auch neutrale mit verschiedenen Massen. Ferner sind in allerneuester Zeit noch eine Reihe sogenannter  $V$ -Teilchen hinzugekommen und vergrößern die Zahl der Elementarpartikel.

Mesonen wurden zuerst theoretisch gefordert und später auch in der kosmischen Strahlung vorgefunden. Ursprünglich nahm man nur die Existenz eines Mesons an, dem man eine Masse zuschrieb, die zwischen der Masse des Elektrons und der Masse des Protons lag, etwa in der Mitte, woher denn auch der Name Meson, das heißt das Mittlere, kommt. Verwendet man als Bezugseinheit statt der absoluten Masse in Gramm oder der Masseneinheit ME die Elektronenmasse  $m_e$ , so beträgt die Masse des Protons  $1836,5 m_e$ ; die Neutronenmasse ist etwa 1,16mal größer ( $m_n = 1,16 \cdot m_p$ ). Zwischen diesen Massen war bisher ein großes Loch; es gab anscheinend keine weiteren Teilchen mit einer anderen Masse. Heute wissen wir, daß dies nur scheinbar der Fall war, daß die Massenskala zwischen Elektron und Proton, als der bisher schwersten geladenen Elementarpartikel, doch verhältnismäßig viel Werte aufzuweisen hat. Der Name Mesonen wurde zum Teil für diese Teilchen beibehalten, zum Teil, wie in der Sowjetunion, der Name Varitronen eingeführt. Der Ursprung dieses Namens liegt in dem Verb variieren, zu deutsch etwa ändern.

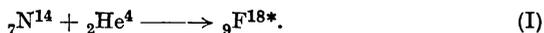
Die Massen der Mesonen ändern sich zwischen den genannten Grenzen, man kennt heute eine ganze Reihe dieser Partikel. Es haben sich dafür folgende Bezeichnungen eingebürgert (nach griechischen Buchstaben): mü-, pi-, zeta-, tau-, kappa-, psi-, chi-Mesonen, deren Massen etwa in der angegebenen Reihenfolge, zwischen 200 und  $1837,5 m_e$ , der Protonenmasse, liegen. Es scheint, als ob die Protonenmasse eine gewisse Schranke für die Bildung elementarer Massen ist; die gefundenen Mesonen liegen auffallenderweise alle unter diesem Wert. Doch sind in neuester Zeit Partikel bekannt geworden, deren Masse oberhalb dieser Schranke liegt; es sind die sogenannten  $V$ -Partikel mit Massen von mehr als  $2000 m_e$ . Offensichtlich scheint die Skala doch eine Fortsetzung zu haben. Die Mesonen kommen fast alle in geladenem und ungeladenem Zustand vor, also positiv, negativ und neutral. Die weitere Entwicklung wird gerade hier auf diesem Gebiet noch sehr interessante Ergebnisse zeitigen.

Um Kernreaktionen auszulösen, bedarf es schon verhältnismäßig großer Energien. Als Geschosse für diese Zwecke stehen uns einerseits die von den radioaktiven Elementen ausgeschleuderten Partikel und andererseits die in Beschleunigungsaggregaten auf hohe Energien gebrachten Teilchen zur Verfügung. Jede Kernreaktion erfordert eine bestimmte Energiemenge, welche die eingeschossenen Teilchen besitzen müssen, um an den Kern heranzukommen und die gewünschte Reaktion auszulösen. Es gibt Umwandlungen, die sich mit Alpha-partikel oder Negatronen oder auch mit den Gammastrahlen der natürlich radio-

aktiven Elemente erreichen lassen. Da die Energien dieser Teilchen aber alle unterhalb von 9 Mev liegen, so lassen sich damit Kernreaktionen mit einem höheren Energiebedarf nicht erzielen. Viele Prozesse der Kernphysik erfordern aber höhere Energien, die sich mit den im vorhergehenden Abschnitt besprochenen Großgeräten gewinnen lassen. Hier ist allerdings auch die Einschränkung zu machen, daß keineswegs etwa alle denkbaren Kernänderungen auch zu wirklichen sind. Mit großen Zyklotronen hat man mit Alphateilchen Energien von etwa 400 Mev erzielt, doch sind auch Umwandlungen mit weit größeren Energien bekannt. Man glaubt mit dem sogenannten Synchrozyklotron (nicht zu verwechseln mit dem Zyklosynchrotron) bis auf einige Tausend Mev zu kommen und, nach neuesten Verlautbarungen, mit dem Riesenzyklosynchrotron mehrere Billionen Elektronenvolt zu erreichen.

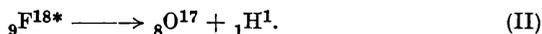
Nach diesen teils zusammenfassenden und teils ergänzenden Vorbemerkungen wollen wir uns mit dem eigentlichen Gegenstand dieses Abschnittes befassen, mit den Kernreaktionen.

Wieder einmal muß der Name Rutherfords genannt werden; er war der erste, der eine Kernumwandlung erzielte, von der man fälschlicherweise damals behauptete, daß sie eine Atomzertrümmerung wäre. Er benutzte Stickstoffgas der Kernsorte  ${}^7\text{N}^{14}$  und ließ die Alphastrahlung eines radioaktiven Elementes darauf einwirken. Während des Beschusses wurde auch tatsächlich ein Kern getroffen, wie dies in Bild 45b zu sehen ist. Einer der Stickstoffkerne wurde getroffen, und man sieht, wie er eine sehr kurze Bahnspur erzeugt hat, während die nach rechts unten führende Nebelspur durch ein Proton verursacht wird, das aus dem Kern herausgeschleudert wurde. Wie erklären wir diesen Vorgang? In der Kernphysik schreibt man die Reaktionsgleichungen ähnlich wie der Chemiker, man verwendet dazu eine Formelsprache. Für die Stickstoffreaktion erhalten wir folgende Beziehung:



Dies bedeutet also, daß der Stickstoffkern durch Beschuß mit Alphateilchen in einen Fluorkern übergegangen ist. Wie wir sehen, stimmen Ladungen und Massen auf beiden Seiten der „Gleichung“ überein; die Ladung der linken Seite  $7 + 2 = 9$  und der rechten Seite  $= 9$ , die Massen der linken Seite  $14 + 4 = 18$  und der rechten Seite  $= 18$ , also Ladung und Masse sind erhalten geblieben. Nun wurde aber das Alphateilchen nicht langsam auf den Kern geschleudert, sondern mit ziemlicher Geschwindigkeit oder kinetischer Energie auf den Stickstoffkern geschossen. Der entstandene Fluorkern ist durch die Energieübertragung und Massenaufnahme in einen angeregten Zustand versetzt worden, was man durch einen Stern oben rechts kenntlich macht. Das bedeutet, daß sich die Systemenergie erhöht hat, was zum Beispiel dadurch möglich ist, daß sich der Spin der Nukleonen vergrößert.

In makroskopischer Auslegung würden wir sagen: Die Kernbestandteile rotieren rascher. Im eben genannten Beispiel ist allerdings die Erhöhung der inneren Energie des Kernes nicht durch Spinvergrößerung geschehen. Nun hat aber der Kern das Bestreben, sich aus diesem Zustand zu befreien; er will stets in einen stabilen Zustand übergehen. Dieser Zustand ist für ihn derjenige mit der geringsten inneren Energie. In diesem ist er nämlich äußeren Einflüssen gegenüber immuner; kleine auf ihn einwirkende Störungen verändern dann nichts an seiner inneren Struktur. Hier zeigt uns die Natur eines ihrer fundamentalsten Prinzipien, das der Selbsterhaltung. Die Atome und Kerne sind diesem Prinzip unterworfen und demonstrieren uns dies in recht deutlicher Weise. Der Fluorkern befreit sich aus dem instabilen Zustand durch die Emission eines Protons. Diese zweite Reaktion sieht in unserer Schreibweise so aus:



Durch diesen Prozeß ist schließlich ein Sauerstoffisotop entstanden. Beide Seiten stimmen sowohl in den Ladungen als auch in den Massen überein, wie man leicht feststellt. Hier haben wir es mit einer ganz typischen Kernreaktion zu tun. Es wird ein Teilchen eingeschossen, ein anderes herausgeschleudert, und der umgewandelte Kern bleibt zurück. Jetzt können wir auch das Bild 45b etwas genauer erklären. Die kleine kurze Spur gehört also dem Fluorkern, der durch den Ausstoß des Protons einen kleinen Rückstoß erleidet und das leichtere Proton mit großer Energie wegschleudert. Dies ist ein Zeichen dafür, daß beim Prozeß eine gewisse Energiemenge frei wird, die nun das Proton mit hinwegführt. Ein Grund, dies als Kernzertrümmerung zu bezeichnen, besteht um so weniger, als hier mehr hineingeschossen wurde als herauskam, der Kern sich also vergrößert und eine ihm nicht genehme Partikel herausgeworfen hat. Diese Prozesse nennt man daher besser Kernumwandlung. Unsere „Gleichungen“ (I) und (II) sind noch etwas zu umständlich in der Schreibweise, man schreibt sie auch im allgemeinen nicht mehr so, sondern verwendet Abkürzungen. Dann sieht der Prozeß so aus:



Ohne Zweideutigkeit kann man auch noch die Kernladungszahlen weglassen; ein Kern mit Ladung 7 ist stets nur Stickstoff und einer mit Ladung 8 immer nur Sauerstoff. Durch die verwendeten chemischen Symbole ist die Kernladung einwandfrei gekennzeichnet. Von dieser letzten Vereinfachung wollen wir aber im allgemeinen keinen Gebrauch machen, sondern die Ladung mit anschreiben. Das erste in der Klammer stehende Symbol kennzeichnet die vom Kern aufgenommene Partikel, das zweite die ausgesandte Korpuskel beziehungsweise das als Welle ausgestrahlte Quant. Vor der Klammer steht der Anfangs- oder Ausgangskern, von dem ausgegangen wird, hinter der Klammer der Endkern.

Die Zwischenreaktion ist so nicht mehr unmittelbar zu ersehen, doch macht es keine Schwierigkeiten, sich diese abzuleiten. Die Ladungszahlen links und rechts der Symmetrieachse, also der Mitte der Klammer, sowie die Massenzahlen beider Seiten müssen die gleichen sein; sie ergeben die Massen- und Kernladungszahl des Zwischenkernes. Bei der Addition der linken Seite im eben erklärten Sinne erhält man in unserem Fall also  $7 + 2 = 9$ , also die Ladung des Zwischenkernes, und  $14 + 4 = 18$ , die Massenzahl. Für die rechte Seite ergibt sich nach dem gleichen Verfahren derselbe Kern  ${}_9\text{F}^{18}$ .

Diese Reaktion ist beobachtet worden, und wir wollen uns einmal durch eine grobe Annäherungsrechnung davon überzeugen, daß sie auch mit Alphapartikeln möglich ist. Der Stickstoffkern trägt 7 positive Elementarladungen und wird den Heliumkern natürlich nicht ohne genügend Energie an sich herankommen lassen. Schießen wir also Teilchen mit ungenügender Energie ein, so wird der Prozeß, den wir oben angegeben haben, nämlich die Umwandlung von Stickstoff in Sauerstoff, nicht stattfinden. Würden wir einmal vor die Aufgabe gestellt, die Möglichkeit für den Prozeß zu untersuchen (wir nehmen an, es wäre darüber nichts bekannt und es ständen nur die radioaktiven Alphastrahler zur Verfügung), so müßte man zunächst natürlich erst wissen, ob deren Energie für eine Umwandlung überhaupt ausreichend ist. Wir wollen eine kurze Rechnung anstellen, um uns hiervon zu überzeugen. Die Rechnung wird auch zum weiteren Verständnis derartiger Vorstellungen förderlich sein; sie ist nicht schwierig.

Sollen zwei Partikel zusammenstoßen, dann müssen sie sich einander mindestens so weit nähern, daß die Mittelpunkte ihrer Massen in eine Entfernung voneinander kommen, die der Summe ihrer Radien entspricht. Bei gleichartig geladenen Teilchen wirken aber bis an den Kern heran die Coulombschen Kräfte, also abstoßende Kräfte, die ja von innen nach außen nach der Beziehung  $1/r^2$  abnehmen oder in demselben Maße nach innen zunehmen. Verringert sich also zum Beispiel die Entfernung auf ein Zehntel, so wächst die Kraft schon um das Hundertfache. Verringert sie sich auf ein Hundertstel, so wächst die abstoßende Coulombkraft der Kernprotonen auf das Zehntausendfache. Wir sehen hieran schon, daß diese Kräfte eine gewaltige Wirkung haben. Der positiv geladene Kern umgibt sich also mit einem elektrostatischen Coulombfeld, das ihn gegen die Annäherung unliebsamer Gäste aufs beste schützt. Auf jede geladene Partikel, die sich in diesem theoretisch bis ins Unendliche reichende Feld befindet, wirkt eine bestimmte Kraft, die sich nach dem Coulombschen Gesetz ermitteln läßt. Etwa am Rande des Kernes ist die Coulombkraft für die anlaufende Korpuskel am größten; die kinetische Energie der anlaufenden Partikel muß also mindestens so groß sein, daß sie diese Kraft überwinden kann. Wäre sie kleiner oder nur gerade so groß, daß sie am Kern die Wirkung der abstoßenden Kraft egalisiert, könnte die Korpuskel nicht in den Kern eindringen, sondern

würde zur Umkehr gezwungen. Um also bis an den Kern zu gelangen, muß die kinetische Energie einer Partikel, des Geschosses, außerhalb des Atoms, des Ziels, so groß sein wie die potentielle Energie zwischen ihm und dem Kern am Rande desselben. Das folgt einfach daraus, daß in einem abgeschlossenen System die Gesamtenergie eine Konstante ist. Vereinfacht man unser System auf anlaufende Partikel und Kern, wobei das eindringende Teilchen sich also bereits im Atom befindet, und schließen wir eine Einwirkung des Geschosses auf die Hülle aus, so besteht die Systemenergie aus folgenden Anteilen:

1. kinetische Energie des Geschosses  $E_{\text{kin}}$ ,
2. potentielle Energie zwischen Kern und Partikel  $E_{\text{pot}}$ ,
3. innere Energie des Kernes  $E_{\text{inn}}$ ,
4. die den Massen äquivalente Energie von Kern und Geschöß

$$E_M = c^2 (M_1 + M_2); M_1 = \text{Geschößmasse}, M_2 = \text{Kernmasse} \\ (\text{Protonen und Neutronen}):$$

$$E_{\text{Gesamt}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} + E_{\text{inn}} + E_M = \text{Konst.}$$

Während des Annäherungsvorganges sind aber die letzten beiden Summanden konstant und können also mit nach rechts in die Konstante einbezogen werden. Es verbleibt also:

$$E_{\text{Gesamt}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \text{Konst} \quad (\text{mit neuer Konst.}).$$

Infolge der abstoßenden Wirkung des Kernes nimmt die kinetische Energie der stoßenden Partikel ständig ab, daher muß also, nach obiger Gleichung, die potentielle Energie beständig zunehmen, damit die Summe konstant bleibt. Da jetzt nur noch das Wechselspiel zwischen diesen beiden Energien interessiert, das heißt ihr gegenseitiges Zahlenverhältnis, setzen wir die Konstante und damit die Gesamtenergie, einfach gleich Null. Dann ergibt sich aus unserer Gleichung für die zu ermittelnde kinetische Energie:

$$E_{\text{kin}} = - E_{\text{pot}}$$

Nun kann man ja den Wert der potentiellen Energie zwischen Partikel und Kern für die Annäherung bis an den Kernrand nach dem Coulombschen Gesetz berechnen, und diesen Wert muß die kinetische Energie der eingeschossenen Partikel mindestens haben, um eben gerade an den Kern heranzukommen. Im folgenden werden wir eine Rechnung ausführen.

Die Mittelpunkte der beiden Kerne, des Alphateilchens und des Stickstoffkernes, müssen sich für den Zusammenstoß mindestens bis auf die Summe beider Radien nähern, die wir nach der Formel  $r = r_o \cdot \sqrt[3]{A}$  berechnen ( $A$  ist die Massenzahl,  $r_o = 1,5 \cdot 10^{-13}$  cm), worin  $A$  einmal = 4 und einmal = 14 zu setzen ist. Man erhält nach dieser Rechnung für  $N^{14}$  einen Radius von etwa  $3,6 \cdot 10^{-13}$  cm und für  $He^4$  einen solchen von rund  $2,4 \cdot 10^{-13}$  cm; die Summe beträgt also rund

$6,0 \cdot 10^{-13}$  cm. Der Wert einer Elementarladung in elektrostatischen Einheiten des *cgs*-Systems (das ist das System von Dimensionen, in dem das Zentimeter, das Gramm und die Sekunde als jeweilige Maßeinheiten benutzt werden) beträgt  $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$  Einheiten. Der Stickstoffkern hat also  $7 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10}$  Ladungseinheiten, und der Heliumkern hat  $2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10}$  Ladungseinheiten. Das gegenseitige elektrische Potential beider Partikel, die potentielle Energie also, errechnet sich nach der Formel

$$U = \frac{(Z_1 \cdot e)(Z_2 \cdot e)}{r} = \frac{e^2 (Z_1 \cdot Z_2)}{r}$$

Dabei ist für  $Z_1$  die Ladungszahl des einen Kernes und für  $Z_2$  die Ladungszahl des zweiten Kernes einzusetzen;  $r$  ist die Entfernung, auf die sie sich annähern sollen, also der Abstand der Kernmittelpunkte.

$Z_1 \cdot e$  sei die Ladung des Stickstoffkernes, das heißt  $7 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10}$  Einheiten ( $Z_1 = 7$ ), und  $Z_2 \cdot e$  sei die Ladung des Heliumkernes, das heißt  $2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10}$  Einheiten ( $Z_2 = 2$ ). Die potentielle Energie beträgt dann:

$$U = 7 \cdot 2 \cdot (4,8)^2 \cdot (10^{-10})^2 : 6,0 \cdot 10^{-13} = 53,6 \cdot 10^{-7} \text{ erg.}$$

Die Dimension erg ist die Arbeitseinheit im *cgs*-System, eine Energie ist dimensionsmäßig einer Arbeit gleich. Nach den von uns zuvor angegebenen Einheiten müßte  $U$  die Dimension elektrostatische *cgs*-Einheiten zum Quadrat, dividiert durch Zentimeter besitzen; diese Dimension ist aber der Arbeitseinheit erg gleich, die wir im Ergebnis schon eingesetzt haben. Diese Arbeitseinheit ist im Vergleich zu den uns gewohnten mkg (Meterkilogramm) natürlich sehr klein. An den kleinen Zahlen der Energie  $U$  sehen wir aber, daß sie noch immer für atomphysikalische Begriffe reichlich groß ist. Der Wert von  $53,6 \cdot 10^{-7}$  erg oder  $5,36 \cdot 10^{-6}$  erg ergibt in mkg umgerechnet die Hälfte eines zehnbillionstel mkg; sie entspricht also einer Energie, die man aufwenden müßte, um einen Körper von einem Kilogramm Gewicht 5 hundertbillionstel Meter zu heben, oder um einen Körper von 5 millionstel Milligramm Gewicht einen Zentimeter zu heben. Wie man sieht, sind die potentiellen Energien von Kernen in den angegebenen Entfernungen winzig. Sie liegen gewöhnlich alle in annähernd derselben Größenordnung wie in unserem obigen Beispiel. Man vergesse aber nicht, daß es sich um Teilchen handelt, die selbst sehr klein sind.

Die kinetische Energie eines Alphateilchens muß also mindestens  $5,36 \cdot 10^{-6}$  erg betragen, wenn es überhaupt bis an den Stickstoffkern herankommen will. Wir rechnen diesen Wert in Elektronenvolt um, in einen Wert also, der zur Bezeichnung der Energien in der Atomphysik verwendet wird. 1 Mev ist der mechanischen Energie von  $1,602 \cdot 10^{-6}$  erg gleich, so daß unser Energiebetrag umgerechnet 3,3 Mev ergibt. Für den Prozeß der Stickstoffumwandlung durch Alphateilchen benötigt man nach unserer groben Rechnung Teilchenenergien von *mehr*

als 3,3 Mev; denn diese reichen ja gerade nur aus, um an den Kern heranzukommen. Solche Energien stehen nun aber durchaus zur Verfügung. Mit einem Radiumpräparat (dem gewöhnlichen Radium) ließe sich der Prozeß schon ausführen; die Energie dieses Alphastrahlers liegt bei rund 5,6 Mev. Eine weitere Rechnung ergibt dann noch, daß bei unmittelbarer Berührung des Stickstoffkernes mit dem Alphateilchen sich diese beiden Partikel mit einer Kraft von etwa 9 Kilogramm abstoßen. Wenn man sich die Kleinheit der Partikel vergegenwärtigt, so bekommt man einen Begriff von den riesigen zwischen ihnen wirkenden Kräften. Diese winzigen Nichtigkeiten, von denen auf einen Zentimeter schon mehr als eine Billion Teilchen gehen, stoßen sich mit solchen großen Kräften ab! Die Kraft übertrifft die durch das Eigengewicht der Partikel hervorgerufene Kraft, also den Druck auf eine Unterlage, in einem nicht mehr vorstellbaren Ausmaß, etwa um das Vielfache einer Eins mit mehr als 30 Nullen. Solche Kräfte existieren in der uns gewohnten Welt nirgends; sie sind eine Folge elektrostatischer Abstoßung.

Die Stickstoffumwandlung durch Alphateilchen ist eine mögliche Art von Kernreaktionen. Die Partikel dringt in den Kern ein, und nach einer sehr kurzen Zeit wird ein anderes Teilchen ausgeschleudert. Man stellt sich dies so vor, daß infolge der Aufnahme des Teilchens ein sogenannter Zwischenkern gebildet wird, daß also der ursprüngliche Kern mit dem eingedrungenen Teilchen verschmilzt. Das bedeutet, daß die Alphapartikel in das Kerngefüge eingebaut wird, daß sie also ihre Selbständigkeit verliert. Es bestünde durchaus die Möglichkeit des weiteren Fortbestandes innerhalb des getroffenen Kernes. Der so neu entstandene Kern hat durch die Teilchenaufnahme Energie gewonnen; ein kleiner Teil der kinetischen Energie ist infolge des Stoßes auf ihn übertragen worden (Rückstoß), der größere Teil jedoch wird ihm als innere Energie zugeführt. Durch den Einbau und die Energieaufnahme befindet sich der Zwischenkern in einem angeregten Zustand; er besitzt mehr Energie als im Grundzustand. Der Zwischenkern emittiert nun ein Proton, und damit wird ihm Ladung, Masse und Energie entführt. Einen bestimmten Betrag der inneren Energie nimmt die ausgestoßene Korpuskel als kinetische Energie mit. Es hat sich so wiederum ein neuer Kern gebildet ( ${}_8\text{O}^{17}$ ), der nun dadurch jedoch nicht unbedingt in seinen Grundzustand gelangt ist. In vielen Fällen erfolgt nach der Emission eines Teilchens noch die Aussendung eines Gammaquants, wodurch dann schließlich der Kern in seinen Grundzustand gelangt. Die Gammastrahlung entsteht immer dann, wenn sich der Spin des Kernes verändert hat. Da ja der Kernspin ebenfalls gequantelt ist, wird bei seiner Änderung eine diesem Betrag äquivalente Energie abgestrahlt, und das ist ein Gammaquant.

Eine weitere Möglichkeit für einen Kernumwandlungsprozeß besteht darin, daß die aufgenommene Korpuskel unter Bildung des Zwischenkernes gleichfalls im Kern verbleibt, dieser aber kein Teilchen ausschleudert, sondern die

Anregungsenergie als Gammastrahlung emittiert. In diesem Fall ist die Anregungsenergie dazu verwandt worden, den Kernspin zu ändern. Wir sehen daran, daß es die Kerne anscheinend nicht unbedingt nötig haben, auf den Beschuß mit dem Ausschleudern von Teilchen zu antworten.

Außer diesen genannten Kernumwandlungsprozessen gibt es noch zwei Kernprozesse, die aber nicht mit einer Umwandlung verbunden sind. Es handelt sich um sogenannte Streuvorgänge. Dabei dringen die Geschosse in den Kern ein und werden in einem Fall ohne Energieverlust und im anderen Fall mit einem solchen wieder hinausgeworfen. Wir haben bereits an einer anderen Stelle über die Streuung von Teilchen gesprochen, nämlich über die Streuung von Alphapartikeln. Die gestreuten Partikel verlassen die Kerne unter Winkeln, die von denen verschieden sind, welche Teilchen erfahren, die sich durch das Coulombfeld des Kernes bewegt haben, das heißt solchen, die sich nur im Atom, aber nicht im Kern befunden haben. Man bezeichnet diesen Streuvorgang als anomale Streuung, da sie nicht nach der Rutherford'schen Streuformel verläuft, die nur für Streuung in Coulombfeldern gilt. Das Coulombfeld des Kernes wird durch die Protonenladungen verursacht; jede einzelne mit Ladung versehene Korpuskel umgibt sich mit einem elektrostatischen Feld. Die im Kern angehäuften Protonen ergeben ein um so stärker wirkendes Feld, je mehr Teilchen sich darin befinden. Das Kraftfeld reicht theoretisch bis ins Unendliche; denn dort wird auf eine Ladung keine Kraft mehr ausgeübt. Die Coulombkraft  $K = Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2/r^2$  ist also gleich Null für  $r = \infty$ . Sie wirkt etwa bis an den Kern heran; dort beginnt die Kernkraft die Coulombkraft an Stärke zu übertreffen, sie wirkt in jedem Fall (auf geladene oder ungeladene Teilchen) anziehend. Ist also eine Partikel in den Kern eingedrungen, dann erfolgt die Streuung unter einem anderen Winkel, als man dies infolge der Coulombkraft erwarten müßte. Man kann beim Auftreten dieses Effektes sagen, daß sich die Partikel innerhalb des Kernfeldes befunden hat. Erst infolge dieses anomalen Verhaltens bei der Streuung ist man berechtigt anzunehmen, daß die Korpuskel in den Kern eingedrungen war. Tritt sie danach mit der Energie wieder aus, die sie beim Eindringen hatte, so spricht man von elastischer Streuung. Hat sich jedoch die Energie vermindert, so spricht man von unelastischer Streuung; dann hat die Korpuskel einen gewissen Energiebetrag an den Kern abgegeben, sie hat ihn in einen angeregten Zustand versetzt. Die Bezeichnungen elastische und unelastische Streuung sind aus der Mechanik entlehnt. Dort nennt man einen Stoß zwischen zwei Körpern elastisch, wenn die mechanische Energie beim Zusammenstoß erhalten bleibt, im anderen Fall unelastisch, wenn also ein Teil der Energie durch Reibung verbraucht, das heißt in Wärme umgewandelt wird.

Nach der unelastischen Streuung strahlt der angeregte Kern die Energie als Gammastrahlung ab.

Neben den beiden Kernumwandlungsprozessen haben wir also noch zwei sogenannte Streuprozesse, von denen der eine offensichtlich keinen Einfluß auf das Geschehen im Kern hat, während der andere den Kern zur Gammastrahlung veranlaßt. Bei den Umwandlungsprozessen hingegen haben wir folgende Fälle: Ein Prozeß wandelt den Kern durch Einbau der eingedrungenen Partikel um und veranlaßt ihn zur Gammastrahlung; der andere Prozeß wandelt den Kern gleichfalls um, veranlaßt aber den Kern neben einer möglichen Gammastrahlung zur Aussendung eines Teilchens. Wir wollen noch bemerken, daß der Zwischenkern sich aus der Rechnung ergibt und nicht beobachtet wird, da er sich sofort in die beiden Bruchstücke neuer Kern und ausgeschleudertes Teilchen zerlegt.

Die Reaktion  $\alpha$ - $p$  stellt aber nur einen möglichen Reaktionstyp dar. Man kann auch andere Teilchen einschießen und erhält auch andere ausgesandte Partikel; die Reaktionsmöglichkeiten sind recht zahlreich. Wir geben nachstehend eine Übersicht über die möglichen Reaktionen.

REAKTIONSTABELLE

Nummer der Reaktion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
eingeschossen	$\alpha$	$\alpha$	$p$	$p$	$p$	$p$	$n$	$n$	$n$	$n$	$d$	$d$	$d$	$\gamma$	$\gamma$
ausgesandt	$p$	$n$	$d$	$\alpha$	$n$	$\gamma$	$p$	$\alpha$	$\gamma$	$2n$	$p$	$\alpha$	$n$	$n$	$2n$
$p = \text{Proton}, n = \text{Neutron}, d = \text{Deuteron}$															

Wir ersehen aus dieser Zusammenstellung, daß es auch Prozesse gibt, bei denen Neutronen, Deuteronen, Alphapartikel und Gammaquanten ausgeschleudert werden. Weiter erkennen wir auch gleichzeitig, welche Partikel gewöhnlich zur Auslösung von Kernreaktionen in Frage kommen. Die Verwendung dieses oder jenes Teilchens zur Auslösung eines Kernprozesses ist weitgehend davon abhängig, was man beobachten will oder was man im Labor an Hilfsmitteln zur Verfügung hat, und schließlich auch davon, welche Energien für den jeweiligen Prozeß erforderlich sind. Hat man nur radioaktive Stoffe zur Hand (Alphastrahler), so kann man jedenfalls keine Reaktionen auslösen, bei denen die Teilchen mehr als 9 Mev Energie haben müssen. Verfügt man nur über einen kleineren Zyklotron, der Alphateilchen auf 32 Mev beschleunigt, so kann man keine Prozesse auslösen, bei denen die eindringenden Teilchen mindestens eine Energie von beispielsweise 40 Mev haben müssen. Stehen aber größere Beschleuniger zur Verfügung, so lassen sich damit mehr Kernumwandlungen hervorrufen. Natürlich darf man dabei nicht vergessen, daß dies stets nur in

kleinem oder kleinstem Umfang möglich ist. Wollte man etwa mit einem Zyklotron bedeutende Mengen von schwerem Wasser erzeugen, so dürfte dies den gleichen Erfolg haben wie der Versuch, das Meer mit einem Wassereimer auszuschöpfen.

Dem aufmerksamen Leser ist vielleicht schon aufgefallen, daß wir noch keine Neutronenbeschleuniger erwähnt haben und daß diese Teilchen nicht mit unter denen genannt wurden, die im Zyklotron oder im Synchrotron beschleunigt werden. Daß sie mit den letztgenannten Großgeräten nicht beschleunigt werden können, ist verständlich, da diese nur geladene Korpuskel beschleunigen können, also solche, die mit elektrischen oder magnetischen Feldern in Wechselwirkung treten. Diese Eigenschaft fehlt aber dem Neutron; es zeigt keine Wechselwirkung mit solchen Feldern und ist deshalb auch erst sehr spät entdeckt worden. Wie wir heute wissen, trifft dies, genau genommen, nicht zu. Das Neutron besitzt ja ein Magnetmoment, und wenn man Neutronen auf Folien gewisser magnetischer Materialien fallen läßt, so treten sie in Wechselwirkung mit den atomaren Magnetfeldern und sind nach dem Durchtritt in bestimmter Weise ausgerichtet. Ohne Wechselwirkung wäre dies natürlich nicht möglich. Ähnlich ist dies ja auch beim Neutrino und den ungeladenen Mesonen, deren Nachweis mit einigen Schwierigkeiten verbunden ist. Ein Neutronenbeschleuniger kann daher auch nicht gebaut werden.

Benötigen wir Neutronen, so müssen wir sie uns anderweitig erzeugen. Wir brauchen sie ja nur in Freiheit zu setzen; denn als Nukleonen sind sie in den Kernen ständig vorhanden, hingegen hat man noch *keine freien Neutronen beobachtet* können. Wir haben allen Grund anzunehmen, daß ihre Lebensdauer unwahrscheinlich kurz ist (einige Mikrosekunden  $\sim 10^{-6}$  sec).

Eine Reaktion mit einer großen Neutronenergiebigkeit ist die durch Alphastrahlung hervorgerufene Berylliumumwandlung:



Diese Reaktion stellt eine ausgezeichnete Neutronenquelle dar. Man verfährt dabei einfach so, daß in einem kleinen Glasröhrchen etwas Radiumsalz mit Berylliumpulver vermischt und die Luft weitgehend abgepumpt wird; man schmilzt dann das Röhrchen zu und hat die gewünschte Neutronenquelle. Die Energien der ausgesandten Neutronen sind allerdings nicht homogen, die Teilchen haben unterschiedliche Energien; die größte kinetische Energie liegt etwa bei 14 Mev, sie ist also schon um etliches größer als die der Alphastrahlung.

Da sie keine Ladung tragen, stellen die Neutronen Geschosse dar, die den Abwehrwall der Coulombkräfte überwinden, ohne davon Notiz zu nehmen, das heißt, die Neutronen werden durch das Coulombfeld eines Kernes nicht beeinflusst, sie kommen bis an den Kern ziemlich ungehindert heran. In Reichweite der Kernkräfte treten sie mit diesen oder, genauer gesagt, mit dem Kernfeld

in Wechselwirkung. Alle geladenen Teilchen, wie Negatronen, Positronen, Protonen, Alphateilchen, alle Ionen (wozu ja die Alphapartikel auch zählen, wenn wir sie auch aus leicht einzusehenden Gründen stets als besondere Teilchen aufführen) umgeben sich infolge dieser Ladung mit einem elektrostatischen Feld. Jede in dieses Feld gelangende geladene Korpuskel unterliegt dessen Einwirkung, das heißt der Coulombkraft, die durch das Feld vermittelt wird. Nur durch dieses Feld als Vermittler treten die Teilchen in Beziehung zueinander. Eine Partikel stößt die andere ab oder zieht sie an; sie wirken aufeinander, ohne sich zu berühren. Das erscheint uns selbstverständlich. Wir sind diesen Effekt zum Teil gewöhnt und machen uns meist keine Gedanken darüber, wie die Einwirkungen zustande kommen. Zwischen elektrischen Ladungen und den durch sie induzierten elektrischen Feldern und den Nukleonen und den durch diese induzierten Kernfeldern besteht aber eine volle Analogie. Man kann sich die Kern- oder Nukleonenfelder durch die Anwesenheit „nuklearer Ladungen“ entstanden denken. Träger elektrischer Ladungen sind alle geladenen Partikel, und Träger der nuklearen Ladungen sind die Protonen und Neutronen. So wie die elektrisch geladene Materie durch elektromagnetische Wellen miteinander in Wechselwirkung tritt, so kann auch die nuklear geladene Materie durch Wellen miteinander in Wechselwirkung treten. Die elektromagnetischen Wellen quantisieren sich in den Photonen, und man wird erwarten, daß sich die Analogie auch hierauf erstreckt, das heißt, daß die zwischen den nuklearen Ladungen vermittelnden Wellen gleichfalls Quanten besitzen. Diese Quanten hat man offenbar in den Mesonen zu sehen, und so ist denn die Analogie auch hier vollständig.

Die Coulombkräfte zwischen elektrischen Ladungen ließen sich zum Beispiel auch dadurch verständlich machen, daß man ein „Ballspiel“ einführt. Die Ladungen erzeugen in einem Elementarakt Photonen und schießen sie sich gegenseitig zu, wobei diese Lichtkorpuskel beim Absorbieren von der betreffenden Ladung wieder vernichtet werden, das heißt, sie dürfen keine statische Existenz haben. Das würde der gerechtfertigten Annahme der Ruhemasse Null widersprechen. Durch dieses Wechselspiel üben sie aber gewisse Kräfte aufeinander aus, und die müssen dann jeweils gerade so groß sein wie die gemessene Coulombkraft. Die so hervorgerufenen Kräfte sind sogenannte Austauschkräfte. Die rein statische Coulombkraft ließe sich also auch dynamisch darstellen.

Ähnlich denkt man sich die Verhältnisse gerade im Kern. Die Träger der nuklearen Ladungen, also Protonen und Neutronen, bewerfen sich mit in Elementarakt erzeugten Teilchen und vernichten diese bei der Absorption wieder; man spricht von sogenannten virtuellen Mesonen. Durch diesen ständigen Austausch wird eine Kraft von der Größe der Kernkräfte hervorgerufen. Im Gegensatz zu den Photonen muß man aber den Mesonen eine Ruhemasse zuschreiben. Nun,

das ist natürlich ein Modell; man nehme das Ganze nicht etwa als sogenannte Wirklichkeit. Da würden wir schnell in Widersprüche mit der Anschauung geraten. Die statischen Kernkräfte lassen sich also gleichfalls dynamisch deuten oder beschreiben. Sie haben den Charakter von Austauschkräften und lassen keine gewöhnliche anschauliche Deutung zu. Nachweisbar hängen aber die Kernkräfte von der Entfernung ab; außerhalb des Kernes ist von ihnen nichts mehr zu bemerken. Unser Modell ist auch in der Lage, die Abhängigkeit von der Entfernung wiederzugeben, was wir aber hier nicht ausführen können und uns daher nur auf diese Feststellung beschränken. Die Austauschkräfte der Nukleonen wirken auch nur auf die jeweils benachbarten Teilchen ein, das heißt nur auf diejenigen, von denen die Teilchen unmittelbar umgeben sind. Nukleonen, die sich am Rande des Kernes befinden, erfahren also nur einseitige Kräfte von den im Inneren befindlichen und sind aus diesem Grunde auch nicht so stark wie alle Innennukleonen an den Kern gebunden. Das läßt sich nachweisen.

Dazu wollen wir uns in Kürze mit zwei wichtigen Begriffen bekannt machen: mit der Bindeenergie und mit dem Massendefekt. Zunächst betrachten wir die Alphapartikel. Sie besteht aus zwei Neutronen und zwei Protonen; zwei Neutronen haben eine Masse von zweimal 1,00894 ME und die beiden Protonen eine Masse von zweimal 1,00813 ME, was zusammen 4,03414 ME ausmacht. Mit einem sogenannten Massenspektrographen kann man nun die Massen der Partikel bestimmen und erhält aber nur 4,00389 ME, das bedeutet eine Differenz von 0,03025 ME. Rechnet man diesen sogenannten Massendefekt in Elektronenvolt um, so ergibt sich eine Energie von rund 28 Mev. Um 0,03414 ME oder der ihr äquivalenten Energie von 28 Mev ist also die Partikel leichter geworden, beziehungsweise, die diesem Betrag entsprechende Energie hat sie verloren. Wobei ist dies aber geschehen? Bei ihrem Zusammenbau natürlich. Die Kernkräfte haben ja zu diesem Zweck eine Arbeit geleistet, und die ist nach außen frei geworden. Sie ist irgendwann einmal ans Weltall abgegeben worden, nämlich bei der Geburt dieses Teilchens. Will man die Partikel wieder in ihre Bestandteile zerlegen, dann müßte ihr dieser Betrag wieder zugeführt werden. Das würde heißen: Will man ein Nukleon aus dem Alphakern herausbrechen, dann müßte dazu ein Energiebetrag von rund 7 Mev aufgewendet werden. Das ist ja der Betrag, mit dem die Nukleonen im Durchschnitt an den Kern gebunden sind und den man deshalb auch die Bindeenergie nennt. Der Massendefekt gibt uns also einen Aufschluß über die Bindeenergie und diese wieder über die Kernkräfte.

Der Zusammenbau von Atomkernen ist ein Vorgang, bei dem Energie frei wird; die anziehenden Kernkräfte müssen dazu Arbeit leisten. Die Energie decken sie aus dem Massenvorrat. Es ergibt sich also daraus der kuriose Fall, daß die Partikel im Endzustand schließlich leichter ist als die einzelnen Bestandteile zusammen vor dem Zusammentreten. Die Differenz in den Massen nennt

man den Massendefekt. Je größer dieser nun ist, um so mehr Energie wurde abgegeben, um so fester sind also die Teilchen an den Kern gebunden. Die Bindeenergie läßt sich aus dem Massendefekt berechnen; sie läßt sich auch in einigen Fällen messen. Ein solcher Fall liegt beim Deuteron vor, wie wir noch sehen werden. Die Bindeenergie ist ein Maß für die Stabilität eines Kernes. Je größer sie ist, um so mehr Energie muß zum Sprengen der Bindung aufgewendet werden. Die radioaktiven Kerne zum Beispiel zeigen uns, daß die Natur das Bestreben hat, sich selbst zu erhalten. Ein Betastrahler geht nämlich durch die Emission eines Negatrons oder Positrons in einen Zustand über, der einen größeren Massendefekt und damit infolge der größeren Bindeenergie eine größere Stabilität hat. Die größere Stabilität ist nur der Ausdruck dessen, daß die Nukleonen stärker an den Kern gebunden sind. Bei der Alphapartikel zeigte sich, daß ein Nukleon im Durchschnitt mit etwa 7 Mev gebunden ist. Betrachtet man die Bindeenergie größerer Kerne, so stellt man fest, daß sich die Nukleonen im Durchschnitt stärker an den Kern binden, aber alle mit wenig unterschiedlicher Stärke; sie liegt zwischen 7–9 Mev. Dies liefert aber offensichtlich einen Beweis dafür, daß die Nukleonen nur auf die ihnen unmittelbar benachbarten Nukleonen einwirken können. Das Deuteron hat eine Bindeenergie von nur 2,18 Mev und das Alphateilchen eine von 7 Mev. Man kann sich das einfach dadurch erklären, daß sich ja in beiden Kernen nur wenig Nukleonen befinden, die gewissermaßen alle an der Oberfläche des Kernes liegen, und so ist die gegenseitige Einwirkung relativ schwach. Anders bei den schweren Kernen mit größerer Nukleonenzahl. Hier ergibt sich eine größere durchschnittliche Bindeenergie einfach dadurch, daß ja die meisten Nukleonen im Inneren des Kernes liegen und dort allseitig von ihresgleichen umgeben sind und so auch jeweils größere Kräfte aufeinander ausüben, was sich eben in der stärkeren Bindung äußert. Die in der Oberfläche des Kernes liegenden Teilchen sind in diesem Fall an Zahl gering und bewirken, obwohl sie natürlich auf Grund der einseitigen Kraftereinwirkung schwächer gebunden sind als ihre Kollegen im Inneren, doch keine merkliche Herabsetzung der durchschnittlichen Bindeenergie. Dies tritt jedoch *bei den Kernen in besonderem Maße* auf, deren Nukleonen *alle in der Oberfläche* liegen und so nicht allseitig aufeinander einwirken können und eine dementsprechend schwache Bindung zeigen.

Es ist also in guter Übereinstimmung mit dem Modell, wenn sich nur jeweils die allernächsten Nukleonen amüsant mit „Ballspiel“ unterhalten. Eine Folge der nur benachbarten Wechselwirkung ist auch der Sättigungscharakter der Kernkräfte, der sich nach unserem Modell auch verstehen läßt; denn wenn ein Nukleon bereits ringsum von Nachbarn umgeben ist, mit denen es Beziehungen unterhält, kann es mit weiteren, die noch hinzukommen, nicht in Beziehungen treten. Auf diese hat es dann keine Einwirkung mehr, es bindet nur die unmittelbar nächsten Nachbarn; mehr kann es nicht tun. Das ist aber das Charakte-

ristikum für die Sättigung der Kernkräfte. Wir haben in den Valenzen der chemischen Bindungen bereits solche Kräfte mit Sättigungscharakter erkannt. Ein Wasserstoffatom vermag immer nur ein einwertiges anderes Atom zu binden; es hat nur eine Valenz oder einen Arm, wie dies der Chemiker nennt.

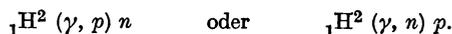
Die Kernkräfte wachen über die Nukleonen mit Argusaugen und starker Wirkung. Die Valenzelektronen der Atomhülle sind mit nur wenigen Elektronenvolt an den Kern gebunden; die Ionisierungsenergie beträgt nur einige eV. Die Nukleonen sind hingegen mit einigen Mev an den Kern gebunden, das bedeutet ein Verhältnis der Bindungskräfte von etwa 1 : 1 Million. Gelingt es nun einmal, die Kernkräfte für Bruchteile einer Sekunde von ihrer Aufgabe abzulenken, dann ist im Kern die Hölle los. In diesem Moment haben die Coulombkräfte endlich einmal freie Hand, und dann fliegt der Kern schon auseinander. Er zerlegt sich aber nicht vollständig, sondern in zwei Teile, infolge größerer Störungen in drei oder vier Teile. Das Bersten in zwei Stücke haben wir bei den Spaltungsprozessen vor uns, die wir noch besprechen werden. Größere Bruchstückzahlen entstehen, wenn ein energiereiches Teilchen aus einem Synchrozyklotron oder aus dem Bevatron zwischen die Nukleonen gerät. Dann tritt sogenannte Kernzersplitterung ein. Gerät aber ein Teilchen aus der kosmischen Strahlung in einen Kern, so richtet es noch größere Verwüstungen an. Das führt zur „Kernverdampfung“.

Die bei Kernprozessen frei werdende Energie ist gegenüber der bei chemischen Prozessen auftretenden meist um etwa eine Million mal größer. Man kann die Energien aus den jeweiligen Prozessen in der Nebelkammer bestimmen, indem die Reichweite der auseinanderfliegenden Teile gemessen wird. Eine kurze Rechnung für unser Beispiel IV wird uns das gleiche Ergebnis liefern.

Die Eingangsseite dieser Reaktion weist eine Masse von 13,01883 ME auf, die Ausgangsseite eine Masse von 13,01280 ME. Das bedeutet, daß eine dieser Massendifferenz äquivalente Energiemenge frei geworden ist; die Differenz beträgt 0,00603 ME und entspricht etwa 5,6 Mev, die auch gemessen wurden. Die Energie von 5,6 Mev haben die beiden Fragmente als kinetische Energie mitbekommen, das heißt, sie wird im vorliegenden Falle fast vollkommen auf das Neutron übertragen worden sein, da der Kohlenstoffkern etwa zwölfmal schwerer ist und aus diesem Grund einen fast unmerklichen oder mindestens sehr kleinen Rückstoß erhalten hat, was ja einer geringen kinetischen Energie gleichkommt. Rechnet man die kinetische Energie in Kalorien um, so ergibt sich für den Einzelprozeß zwar eine geringfügige Wärmemenge, doch wenn man eine große Anzahl von Prozessen ins Auge faßt, so erhalten wir schließlich enorme Werte. Gerade die Berylliumumwandlung erfordert im Gegensatz zu den meisten bekannten Reaktionen verhältnismäßig wenig Teilchen; man kann annehmen, daß zur Auslösung eines Prozesses bereits 4000 Alphateilchen genügen. Im Vergleich dazu braucht man zur Auslösung eines Prozesses nach

Gleichung I-III mindestens eine halbe Million Partikel, das heißt mehr als tausendmal soviel. Wenn wir also annehmen, daß etwa ein Mol des Berylliums umgewandelt wird, so ist dies durchaus noch ausführbar. Das entspricht einer umgewandelten Teilchenmenge von  $6,02 \cdot 10^{23}$  Partikel und macht bei reinem Be kaum 10 Gramm aus. Nach einer Zwischenrechnung ergibt sich, daß man bei der Umwandlung von einem Milligramm Be etwa eine Wärmemenge gewinnen kann, die der Heizkraft von 3 Kilogramm Braunkohle oder von rund 5 Briketts entspricht. Für einen quantitativen Vergleich muß man aber im Auge behalten, daß der gesamte Prozeß, energetisch gesehen, für uns höchst unrentabel ist. Um 1 mg Be umzuwandeln, braucht man erheblich mehr Energie, als durch die Reaktion frei wird. Zur Energiegewinnung sind die Kernumwandlungsprozesse völlig unrentabel und zu kostspielig. Anders ist dies bei den Spaltprozessen, die, einmal in Gang gesetzt, sich selbst speisen und keiner äußeren Energiezufuhr mehr bedürfen. Wir haben diesen Prozeß erwähnt als Beispiel für eine Kernreaktion mit besonders hoher Neutronenausbeute bei geringer einzuschießender Teilchenzahl. Betrachten wir einmal das Deuteron,  ${}_1\text{H}^2$ , den Kern des Deuteriums, des sogenannten schweren Wasserstoffes. Zu ihm gehören zwei Teilchen: ein Neutron und ein Proton. Dieser Kern ist also der einfachste neben dem Proton selbst. — Wir haben bereits erwähnt, daß ein Neutron im freien Zustand unter unseren Verhältnissen nicht existieren kann; es wird sofort von einem Atom eingefangen und kommt aus diesem Grund also bei uns nicht frei vor. Ein Atom, das nur ein Neutron als Kern hat, kann infolge der fehlenden elektrischen Ladung und des hiermit verbundenen Coulombfeldes nicht möglich sein. — Beide Teilchen haben zusammen eine Masse von  $1,00813 + 1,00894 \text{ ME} = 2,01707 \text{ ME}$ ; der massenspektroskopisch gemessene Wert beträgt für  $D = 2,01473 \text{ ME}$ , was eine Differenz von  $0,00234 \text{ ME}$  ergibt und einer Energie von  $2,18 \text{ Mev}$  entspricht; die Bindeenergie beträgt also  $2,18 \text{ Mev}$ .

Hat man in einer Nebelkammer das Gas des schweren Wasserstoffes und läßt Gammastrahlung mit einer Energie von  $2,65 \text{ Mev}$  darauf einwirken, so kann man die Spuren von stark ionisierenden Teilchen beobachten, die nur von Protonen sein können. Dann muß aber ein Prozeß folgender Art stattfinden:



Welches Teilchen man in diesem Fall als das ausgeschleuderte betrachtet, ist gleichgültig. Durch Einstrahlung von Gammaquanten wird also das Deuteron zersprengt. Dazu gehört aber, wie wir ausgerechnet haben, mindestens eine Energie von  $2,18 \text{ Mev}$ ; denn mit diesem Betrag binden sich beide Teilchen aneinander und dieser muß auch zur Zerstörung der Bindung aufgebracht werden. Neu am Ganzen ist für uns, daß der Kern Gammastrahlung aufnimmt und so zu seiner eigenen Vernichtung beiträgt. Die durch Gammastrahlung ausgelösten Kernprozesse nennt man Kernphotoeffekte. Die vom  $\text{ThC}''$  ausgesandte

Gammastrahlung hat die obengenannte Energie von 2,65 Mev; die beiden Kerntrümmer – man kann diesen Prozeß ja als Kernzertrümmerung bezeichnen – fliegen mit einer kinetischen Energie von rund 0,43 Mev auseinander. Gemessen wurde allerdings nur die Energie des ionisierenden Teilchens, des Protons; das Neutron hinterläßt ja keine Spur. Man kann aber annehmen, daß die Energie des nicht beobachteten Neutrons infolge nahezu gleicher Masse den gleichen Wert wie beim Proton hat. Die Differenz zwischen der eingestrahlenen und der bei der Zertrümmerung frei werdenden Energie ergibt aber gerade die Bindeenergie. Dies ist ein Beweis dafür, daß zum Zerlegen des Deuterons diesem mindestens ein Energiebetrag von der Größe der Bindeenergie zugeführt werden muß.

Was für das Deuteron gilt, wird auch für die anderen Kerne oder Nukliden gelten. Ein anderer Kernphotoeffekt ist die Reaktion

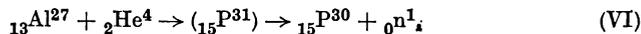


Die Masse der rechten Seite beträgt  $2 \cdot 4,00389 + 1,00894 \text{ ME} = 9,01672 \text{ ME}$ , der Berylliumkern hat eine Masse von  $9,01494 \text{ ME}$ , die Differenz beträgt  $0,00178 \text{ ME}$  oder  $1,6 \text{ Mev}$ ; diese Energie muß dem Kern also mindestens durch die Gammastrahlung zugeführt werden. Um aber den beiden Splittern auch etwas kinetische Energie zu erteilen, wird die eingestrahelte Energie entsprechend größer sein müssen. Ausgelöst wird der Prozeß aber schon bei der angegebenen Energie. – Diese Reaktion stellt also ein Beispiel für eine Gamma-Neutron-Reaktion dar.

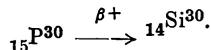
#### KÜNSTLICHE RADIOAKTIVITÄT

Die von den natürlich radioaktiven Elementen ausgesandten Teilchen und Strahlen haben auch zur Entdeckung der sogenannten künstlichen Radioaktivität geführt. Bei den zuvor besprochenen Kernumwandlungen ergaben sich zumeist Kerne, die gewöhnlich in der Natur gar nicht vorkommen.

Beschießt man den Kern  ${}_{13}\text{Al}^{27}$  mit Alphateilchen, so findet folgende Umwandlung statt (wir schreiben sie ausführlich):



Es handelt sich also um einen Alpha-Neutron-Prozeß. Nun beobachtet man aber nach dieser Reaktion, daß der Phosphorkern eine Strahlung aussendet, die sich in der Nebelkammer feststellen und ausmessen läßt. Der P-Kern ist nämlich ein Positronenstrahler mit einer Halbwertszeit von 2,5 Minuten. Die Fortsetzung dieser Gleichung sieht also so aus:



Man stellt fest, daß die Gesetze für den künstlichen Zerfall die gleichen sind wie für den natürlichen, das heißt, daß zum Beispiel der Intensitätsabfall genau wie bei den natürlichen Strahlern einer Exponentialgleichung genügt, also in einer Art vor sich geht, wie wir dies im Abschnitt über die natürliche Radioaktivität schon besprochen haben. Die Ausbeute nach Gleichung VII ist als gut zu bezeichnen. Man braucht zur Auslösung einer Reaktion etwa 100 000 Alphateilchen, eine verhältnismäßig geringe Zahl; denn viele Prozesse benötigen eine größere Zahl von Teilchen. Der Phosphorkern geht infolge der Positronenstrahlung in ein Siliziumisotop über, also in einen isobaren Nukliden (zum P-Kern).

Diese Prozesse zeigen uns, was man unter künstlicher Radioaktivität zu verstehen hat. Durch die Kernumwandlung entsteht ein neuer Kern, der sich wie ein natürlich radioaktiver verhält. Die Bezeichnung künstlich kennzeichnet, daß der Zerfall infolge äußerer Anregung stattfindet.

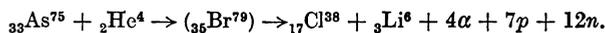
Man kann aber auch das Aluminium mit Neutronen bombardieren, die man aus der Beryllium-Radium-Quelle erhält. Dann läuft folgender Prozeß ab:



Dabei entsteht gleichfalls ein radioaktiver Kern (Radionuklid), nämlich der (isotope) Natriumkern  $\text{Na}^{24}$ . Dieser Kern ist ein Negatronenstrahler und verwandelt sich in den isobaren Nukliden  ${}_{12}\text{Mg}^{24}$  um, der eine Halbwertszeit von 14,8 Stunden hat. Der Magnesiumkern ist stabil, er zerfällt nicht weiter. Natürlich geben nicht alle Umwandlungsprozesse einen Radionukliden; man kann auch durch die Umwandlung direkt einen stabilen Kern bekommen. Wir haben im Abschnitt über die Radioaktivität darauf hingewiesen, daß bis jetzt etwa 280 stabile und 670 aktive Nukliden bekannt sind. Diese Zahlen sind natürlich keine Konstanten, sondern sie werden im Laufe der Zeit ständig größer, je mehr neue Prozesse durchgeführt werden.

In diesem Zusammenhang wollen wir noch auf eine sehr interessante Erscheinung kurz eingehen, bei der die künstliche Radioaktivität gleichfalls auftreten kann. Es handelt sich um die sogenannten Zersplitterungsprozesse, auf die wir zu Beginn dieses Abschnittes schon hinwiesen. Wir haben in einer kleinen Rechnung weiter vorn gezeigt, daß im Alphakern die Nukleonen durchschnittlich mit einer Energie von etwa 7 Mev aneinander gebunden sind. Geht man noch mehr in die Mitte des periodischen Systems der Elemente, also zu mittelschweren Kernen, so beträgt die Bindeenergie pro Nukleon im Durchschnitt etwa gegen 9 Mev; hier im Bereich dieser Kernladungszahlen sind die Nukleonen also stärker aneinander gebunden. Wir erinnern daran, daß bei Kernprozessen mit geringen Einschußenergien bisher stets höchstens zwei Teilchen vom angeregten Zwischenkern herausgeschleudert wurden. Die für manche Kernumwandlungen verwendeten größeren Zyklotronen erreichen bei Deuteronbeschleunigung eine Energie von etwa 18 Mev. In vielen Fällen ist es daher nicht weiter verwunderlich, daß bei

diesen noch verhältnismäßig geringen Einschußenergien auch nur ein Teilchen abgetrennt wurde; denn dazu gehört ja mindestens die Aufwendung der betreffenden Bindeenergie zur Abtrennung. Man wird daher nicht allzusehr verwundert sein, wenn beim Einschuß von Teilchen mit weit größerer Energie auch weit mehr Partikel herausgeschleudert werden. Der zugeführte Energiebetrag reicht in diesem Falle dazu aus, um mehr Teile aus dem getroffenen Kern zu machen, das heißt, ihn wirklich zu zertrümmern. Mit dem großen Zyklotron, der Alpha-teilchen auf etwa 400 Mev beschleunigt, hat man beispielsweise Arsen beschossen und unter den Trümmern auch das Chlorisotop  $\text{Cl}^{38}$  festgestellt, einen Kern also, der 16 %-Einheiten und 37 *A*-Einheiten vom beschossenen Nukliden entfernt liegt. Der bei diesem Prozeß gebildete Zwischenkern ist das Bromisotop  $_{35}\text{Br}^{79}$ . Es wäre also folgender Prozeß denkbar:



Es sind aber außerdem noch andere Prozesse möglich, bei denen der Chlorkern mit zugegen ist. Dieser Kern ist ein Betastrahler mit sehr kurzer Halbwertszeit. Da man aber noch nicht weiß, ob die eben angeschriebene Reaktion auch tatsächlich erfolgt, so schreibt man den Prozeß vorläufig in folgender summarischer Form:



Die Bedeutung ist wohl offensichtlich. Beim Einschuß eines Alphateilchens bildet sich der Chlorkern, und weiterhin treten Bruchstücke in Erscheinung, deren Zusammensetzung man nicht genau kennt, die jedoch dem Zwischenkern 18 Ladungseinheiten (Protonen) und 41 Nukleonen entführen. Diese Zersplitterungsprozesse führen in manchen Fällen zu neuen, bisher nicht bekannten Nukliden oder Radionukliden. Der hier gebildete Kern  $\text{Cl}^{38}$  war allerdings schon bekannt. Die Zahl der erzeugten Isotopen wird mit der Zeit weiterhin ansteigen, weil es gelingt, mit den energiereicheren Einschußteilchen neue Kerne zu erzeugen, die zum Teil stabil und zum Teil radioaktiv sind.

#### KERNSPALTUNG

Der Prozeß der Aufspaltung von Kernen in zwei fast gleich große Stücke wurde 1939 in Berlin von Hahn und Straßmann zum erstenmal am Uran beobachtet. Man beschießt dazu das Uranisotop  $\text{U}^{235}$  mit Neutronen nicht allzu großer Geschwindigkeit, mit sogenannten thermischen Neutronen. Man versteht darunter Neutronen mit mäßigen Geschwindigkeiten, wie sie etwa die Moleküle oder Atome eines Gases infolge ihrer thermischen Bewegung bei einer bestimmten Temperatur besitzen. Die Geschwindigkeit solcher thermischer Neutronen beträgt etwa 2800 m/s bei Zimmertemperatur. Zum Vergleich geben wir einmal die

Geschwindigkeiten dieser Partikel bei verschiedenen Energien an, aus denen sich die Energie bei 2800 m/s leicht abschätzen läßt:

Energie in eV	1/1000	1/10	10	10 000
Geschwindigkeit m/s	440	4400	44 000	1,4 Millionen

Mit solchen langsamen Neutronen lassen sich die Spaltprozesse leichter auflösen, die langsamen Neutronen werden von den Kernen leichter eingefangen. Wir haben schon wiederholt darauf hingewiesen, daß freie Neutronen unter den auf unserem Planeten herrschenden Bedingungen nicht existieren können. Entstehen also einmal irgendwie Neutronen, zum Beispiel, weil wir sie aus den Kernen frei machen, so sind sie nur kurze Zeit existenzfähig und werden je nach ihrer Geschwindigkeit mehr oder weniger rasch von den stets in riesiger Zahl anwesenden Atomkernen eingefangen.

Das ist leicht einzusehen. Unter den gewöhnlich vorkommenden Verhältnissen gibt es auch nicht einen winzigen kleinen Würfel oder ein kleines Volumen, in dem nicht eine riesige Anzahl von Atomen vorhanden wären. Die aus irgendwelchen Kernen herausgeschleuderten Neutronen bewegen sich also ständig zwischen den Atomhüllen und den Kernen hindurch. Viele werden dabei auch in unmittelbarer Kernnähe geraten. Langsamere Teilchen werden aber vom Kern leichter eingefangen als rasche oder sehr schnelle Partikel. Aus diesem Grunde haben die thermischen Neutronen eine größere Wirksamkeit und lösen also die Kernspaltung leichter aus. Dies trifft besonders für das seltene Isotop  $U^{235}$  zu, das mit langsamen Neutronen gespalten werden kann. Der  $U^{238}$ -Kern hingegen absorbiert die langsamen Neutronen, ohne daß dadurch ein Spaltprozeß beginnt. Dieser Kern kann wiederum nur mit sehr schnellen, also energiereichen Teilchen gespalten werden. Streng genommen, unterliegt nicht der  $U^{238}$ -Kern der Spaltung, sondern der  $U^{239}$ -Kern; der Prozeß wird aber in der Literatur die Spaltung von  $U^{238}$  genannt. Bezeichnen kann man schließlich die Spaltung wie man will, doch darf man nicht vergessen, daß nicht die ursprünglichen Kerne, sondern eben die Zwischenkerne einem Spaltprozeß unterliegen. Eine Aufspaltung von  $U^{235}$  ist zum Beispiel noch nicht beobachtet worden, trotzdem spricht man von der Spaltung des 235-Kernes, obwohl sich eigentlich der Kern  $U^{236}$  aufspaltet. Das reine Uran stellt gewöhnlich ein Isotopengemisch dar: Die Hauptkomponente ist der 238-Kern mit etwa 99,274 Prozent Anteil am Gemisch, die zweite Komponente ist der 235-Kern mit nur 0,719 Prozent Anteil und schließlich der 234-Kern mit 0,006 Prozent Anteil. Aus 10 Tonnen reinem Uran würde man also nur etwa 71,9 Kilogramm Uran-235 gewinnen. Leider findet sich aber Uran nirgends in reinem Zustand. Es ist stets durch andere Metalle und Nichtmetalle verunreinigt und kommt nur als Salz vor, woraus sich beispielsweise  $U_3O_8$  gewinnen läßt, das jedoch noch kein reines Uran darstellt.

Durch die Spaltung der Urkerne entstehen eine Reihe von Radionukliden. Eine der Reaktionsgleichungen wollen wir hier angeben:



Bei dieser Aufspaltung entstehen also ein Xenon- und ein Strontiumisotop, die beide radioaktiv sind; sie zerfallen unter Negatronemission in Cäsium- bzw. Yttriumkerne. Wir sehen, daß auch die Spaltprozesse zu künstlichen Strahlern führen. Diese Reaktion ist aber keineswegs die einzig mögliche. Es sind noch eine ganze Reihe anderer sogenannter Spaltprodukte beobachtet worden; die Kerne liegen alle im mittleren Teil des periodischen Systems der Elemente.

Die Spaltung von Kernen beschränkt sich aber nicht nur auf Urkerne. Die Wahrscheinlichkeit der Zerlegung besteht für Kerne mit über 200 Nucleonen gleichermaßen; das sind die Kerne vom Thallium an aufwärts (Tl hat  $Z = 81$  und  $A = 202, 204$  usw.). Die Spaltung des 236-Uralkernes liefert aber, wie wir schon bemerkt haben, keineswegs etwa ständig die gleichen Spaltprodukte; es liegen Beobachtungen vor, nach denen die Spaltung zwei gleiche Teile ergab, dabei hatte also jeder der wegfliegenden Bröckchen genau 118 Nucleonen. Dieser Prozeß findet jedoch, das ist statistisch ermittelt, nur etwa einmal bei 10000 Spaltungsprozessen statt. In 7 Prozent aller Fälle ergeben sich Teile mit einer Massenzahl  $A$  von 96 und 140; dieser Zerfall hat die größte Wahrscheinlichkeit.

Mit der Massenzahl ist natürlich ein Kern noch nicht festgelegt, und so können sich die Massen 96 und 140 auf verschiedene isobare Kerne verteilen.

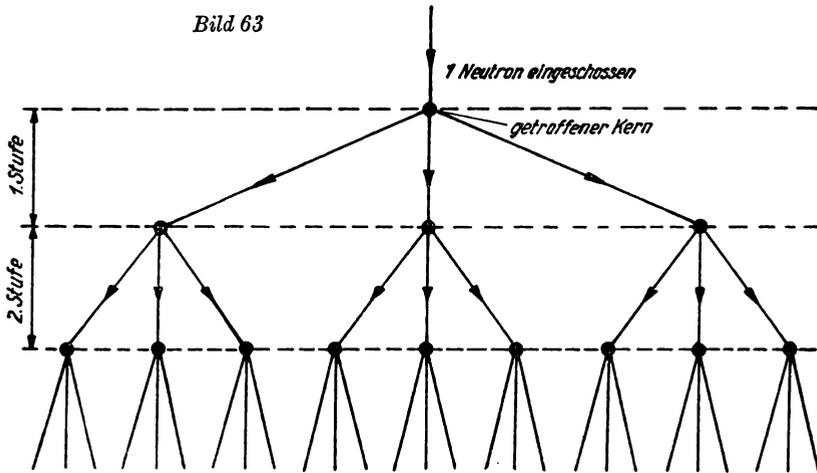
Ein Kern wie der  $\text{U}^{236}$ -Kern besitzt also  $236 - 92 = 144$  Neutronen. Der nach unserer Gleichung IX entstandene Xenonkern hat nur noch  $140 - 54 = 86$  Neutronen, das andere Bruchstück, der Strontiumkern, hingegen nur noch  $96 - 38 = 58$  Neutronen. Es verhalten sich die Neutronen zu den Protonen wie  $144 : 92$ ,  $86 : 54$ ,  $58 : 38$ , also wie  $1,54 : 1$ ,  $1,59 : 1$ ,  $1,52 : 1$ . Wie man sieht, sind die Verhältnisse nicht sehr unterschiedlich. Die Werte liegen dicht zusammen, der Mittelwert ist etwa 1,55. Solche Kerne jedoch, die einen so relativ hohen Gehalt an Neutronen aufweisen, sind instabil. Betrachten wir einmal den Kern  ${}_{38}\text{Sr}^{96}$ , so ergibt sich hier ein Verhältnis Neutronen zu Protonen von 1,33. Dieses Isotop ist stabil, es zerfällt nicht. Der hohe Neutronengehalt der obengenannten Kerne ist bedingt durch die große Anzahl Protonen, die hierbei zu einem Kern zusammengefügt worden sind, die aber auch notwendigerweise zu einem Kern dazugehören; sie bestimmen doch den Charakter des Stoffes. Infolge ihrer positiven Ladung stoßen sie sich jedoch ab. Je mehr Protonen zu einem Kern und damit zu einem Atom vereinigt werden, desto größer ist die abstoßende Wirkung infolge der Coulombkraft, und um so mehr Neutronen müssen in den Kern eingebaut werden, um dessen vorzeitiges Auseinanderfliegen, ein Spalten zu vermeiden; die Neutronen wirken gewissermaßen als Kitt. Die Möglichkeit des Berstens ist im

allgemeinen nur so lange nicht gegeben, wie der Kern ruhig sich selbst überlassen bleibt. Bei einem ungünstigen Verhältnis von Neutronen zu Protonen genügt auch schon die kleinste äußere Anregung, um diesen Kern auseinanderzureißen. So ist es denn auch zu verstehen, warum der Urankern schon von langsamen oder thermischen Neutronen gespalten werden kann. Die geringe Energie dieser Teilchen reicht schon aus, um das innere Gleichgewicht zu stören. Werden zu einem Kern mehr als 200 Nukleonen angehäuft, so besteht sogar eine Wahrscheinlichkeit dafür, daß er sich ohne äußere Anregung aufspaltet. Sind in einem Kern, dessen  $Z$  größer ist als 200, etwas zuviel Neutronen im Vergleich zu den Protonen eingebaut, so hat der Kern das Bestreben, sich zu spalten. Er befindet sich in einem labilen Zustand. Auch bei kleineren Nukleonenzahlen hat ein Kern das Bestreben, in einen energieärmeren Zustand überzugehen. Das geschieht zum Beispiel unter fortwährender Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und der Emission von Negatronen. Zerplatzt ein Urankern durch äußere Anregung infolge einer zu großen Nukleonenzahl in die beiden Spaltprodukte Xenon mit 140 Nukleonen und Strontium mit 96 Nukleonen, so hat sich dann zwar der erste Kern seiner ihm innewohnenden Spannungen entledigt, aber das ungünstige Verhältnis von Neutronen und Protonen ist für die Kerne der Spaltprodukte noch geblieben. Es ist daher von vornherein nicht zu erwarten, daß diese Kerne stabil sind, sondern sie werden sich weiter umwandeln. Bei dem in Gleichung IX angegebenen Prozeß werden die Spaltprodukte einen stabilen Zustand schon nach einmaliger Negatronemission erreicht haben; der Massendefekt ist nämlich für sie in diesem Zustand am größten. Es sind jedoch auch Kernspaltprozesse bekannt, bei denen die Bruchstücke erst nach sechsmaliger Negatronaussendung ihren stabilen Zustand erreicht haben. (Man muß beachten, daß durch Negatronemission der Kern eine Ladungseinheit mehr erlangt.)

Bei den Spaltungsprozessen treten aber noch Neutronen in Erscheinung. Sie werden von den Spaltprodukten in Freiheit gesetzt und sind gewöhnlich sehr rasch und energiereich. Diese Neutronen sind die für uns wichtigste Begleiterscheinung dieser Prozesse; auf ihnen beruht die Anwendung der Kernphysik zur Energieerzeugung.

Beschießt man einen Uranblock mit thermischen Neutronen und sorgt dafür, daß die bei der Spaltung auftretenden sehr energiereichen und schnellen Neutronen auf ihrem Weg etwas abgebremst werden und wiederum auf Uran treffen, so kann folgendes geschehen: Die durch den ursprünglichen Prozeß ausgelösten und auf thermische Geschwindigkeiten abgebremsten Neutronen rufen nun in den von ihnen getroffenen Kernen wiederum Spaltprozesse hervor, bei denen sich erneut sehr schnelle Neutronen bilden, die man wieder auf thermische Geschwindigkeiten abbremst und auf Uran fallen läßt, wobei sie wieder spalten und gleichfalls eine Anzahl von Neutronen auslösen usw. Ein vom Kern  $U^{235}$  eingefangenes langsames Neutron löst etliche Artgenossen aus dem Kern (höch-

stens 3), und wenn von diesen etwa auch jedes wieder von einem  $^{235}\text{U}$ -Kern eingefangen wird und seinerseits auch wieder mehrere Neutronen auslöst, so ergibt sich eine sogenannte Neutronenlawine. Wir haben in Bild 63 diese Situation einmal schematisch angedeutet. Wenn wir annehmen, daß jedes aus einem Spaltprodukt stammende Neutron seinerseits etwa 3 neue auslöst, so gibt dies, wie im Bild angedeutet, nach zwei Stufen schon 27 Neutronen, also  $3^3$  Teilchen, und nach hundert Stufen würde sich somit schon eine Zahl mit fast 50 Stellen vor dem Komma ergeben haben. Es entsteht also in diesem idealen Fall eine recht



ansehnliche Lawine, die durch ein *einziges* Teilchen verursacht wird. Nun werden natürlich mehr als ein, zwei oder drei Teilchen eingeschossen und zur Reaktion gebracht. Ihre Zahl ist sehr groß, und entsprechend nimmt die Lawine in einem nicht mehr vorstellbaren Maße zu. Allerdings ist bezüglich unserer Ausführungen die Einschränkung zu machen, daß nicht jedes ausgelöste Neutron einen Kern spalten wird; ein Teil der Neutronen kann durch mancherlei Umstände an der Reaktion mit  $^{235}\text{U}$  gehindert werden. Schließlich darf man auch nicht vergessen, daß dieses wirksame Isotop nur in kleinen Mengen zur Verfügung steht und die thermischen Reaktionen mit dem  $^{238}\text{U}$ -Kern einen seltenen Prozeß bilden; denn dieser Kern wird bekanntlich nur durch schnelle Neutronen gespalten. Trennt man jedoch aus dem natürlichen Isotopengemisch die Komponente  $^{235}\text{U}$  ab und beschießt das reine  $^{235}\text{U}$  mit Neutronen, so ruft bei geeignet gewählten Konstruktionsbedingungen jedes Neutron einen Spaltprozeß hervor.

Bei den Kernspaltungen werden in energetischer Hinsicht Rekorde aufgestellt. Läßt man die Reaktionen in einem Absorber stattfinden, also in einem Medium (Flüssigkeit), in dem alle Teilchen ihre kinetische Energie durch verhältnismäßig rasches Abbremsen weitgehend in Wärme umwandeln, so steht ein gewisser Betrag schließlich als Wärmeenergie zur Verfügung. Durch eine grobe Rechnung wollen wir uns die bei der Spaltung auftretenden Energiebeträge vor Augen führen. Nimmt man die Zahl der an einen Kern gebundenen Nukleonen mit rund 240 an, so ergibt sich eine Bindeenergie von etwa 7,6 Mev je Nukleon (diese Energie errechnet sich nach einer bekannten Formel); nimmt man ferner die Spaltprodukte mit je 120 Nukleonen an, so sind diese jeweils an ihren Kern mit etwa 8,5 Mev gebunden. Die frei werdende Energie errechnet sich somit folgendermaßen:  $2 \cdot 120 \cdot 8,5 - 240 \cdot 7,6 \text{ Mev} \sim 220 \text{ Mev}$ . Diese Rechnung ist etwas grob, trifft jedoch in der Größenordnung durchaus zu. Der gemessene Betrag der Energie liegt allerdings nur bei etwa 175 Mev, das heißt, diese Bruchstücke nehmen nicht die gesamte Energie als kinetische Energie mit.

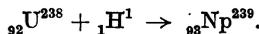
Die Messung der Energie erfolgte kalorimetrisch. Man hat also die kinetische Energie der Bruchstücke durch Abbremsen in einer Flüssigkeit in Wärmeenergie umgewandelt und die Erwärmung des Mediums gemessen, woraus sich schließlich die Energie berechnen läßt. Die Differenz zu unserem Ergebnis beträgt etwa 45 Mev und rührt im wesentlichen daher, daß die von den Spaltprodukten ausgesandte Neutrino- und auch die Gammastrahlung keinen kalorimetrischen Effekt hervorrufen und so die gemessene Energie kleiner sein muß als die gesamte beim Prozeß frei werdende Energie. Das Auftreten der Neutrinostrahlung bei den Spaltprodukten wird uns nach den bisherigen Darlegungen nicht befremden. Neutrinostrahlung tritt auf bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton, und gleichzeitig damit wird ja ein Negatron emittiert. Das Spaltprodukt geht dadurch in einen stabileren Zustand über. Das Auftreten von Gammastrahlung hat schließlich wieder seinen Grund in dem angeregten Zustand der Kerne der Spaltprodukte und deren Folgeprodukten, da die Negatron- und Neutrinoemission nicht notwendigerweise zum Grundzustand des Kerns führt.

Die bei dem Spaltprozeß frei werdende Energie ist also um etliches größer als die bei normalen Kernumwandlungen auftretende. Die durch langsame Neutronen ausgelöste Neutronenlawine verursacht die sogenannten Kettenreaktionen, also fortgesetzt zunehmende Spaltprozesse, bei denen der Energieumsatz natürlich sehr stark ansteigt, wenn man dabei bedenkt, daß die Umsetzungen in Bruchteilen von Sekunden stattfinden und in riesenhafter Anzahl, wobei jeweils der angegebene Energiebetrag frei wird. Der ganze Prozeß läuft, einmal in Gang gesetzt, ohne äußere Energiezufuhr von selbst weiter, ja, er steigt lawinenartig an und muß gedrosselt werden. Aus diesem Grund ist nur dieser Prozeß zur Energieerzeugung geeignet; ohne ihn wäre die Anwendung von Kernenergie zur Energieerzeugung für uns illusorisch. Die Kernspal-

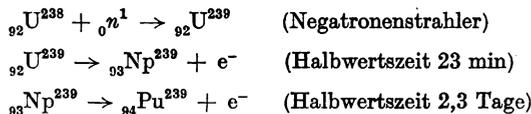
tung ist schlechthin der Energieprozeß der Zukunft. Es ist müßig, hierüber Rechnungen anzustellen und mehr oder weniger zu spekulieren. Tatsache ist aber, daß man hier Energiequellen von riesigem Ausmaß zur Verfügung hat, die man nur in geeigneter Weise steuern muß, das heißt, man muß den Ablauf der Reaktionen zeit- und mengenmäßig bestimmen. Gerade dies ist aber das technisch am schwersten zu lösende Problem.

#### SYNTHESE VON NEUEN ELEMENTEN

In aller Kürze wollen wir uns noch mit solchen Prozessen befassen, bei denen neue, bisher nicht bekannte Elemente erzeugt wurden, nämlich die sogenannten Transurane\*. Bis 1940 waren nur 92 Elemente bekannt, genauer gesagt, man wußte, daß es mindestens 92 sein mußten; die Elemente 85 und 87 zum Beispiel fehlten noch. In diesem Jahr gelang es erstmals, ein Element zu erzeugen, das im periodischen System hinter dem Uran stand. – Daher ja auch die Bezeichnung Transuran = jenseits vom Uran. – Beschießt man den Nukliden  $U^{238}$  mit sehr energiereichen Protonen aus dem Zyklosynchrotron, so ergibt sich nach der folgenden Gleichung ein neues Element:

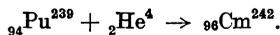


Dieses Element taufte man Neptunium nach dem Planeten Neptun; das erhaltene Produkt ist also ein *Isotop* des Neptuniums. Beschießt man jedoch den neuen Kern weiter mit Neutronen, so ergibt sich nach einigen Umwandlungsprozessen ein weiteres neues Element:



Das zweite neue Element mit  $Z = 94$  heißt nach dem äußersten unserer Planeten Plutonium und hat eine Massenzahl von 239. Es ist zu bemerken, daß die Atomgewichte noch nicht ermittelt wurden.

Wird der Plutoniumkern mit sehr energiereichen Alphateilchen beschossen, tritt folgende Umwandlung ein:



Dieses Element mit einem  $Z$  von 96 erhielt den Namen Curium nach dem französischen Forscherehepaar Curie und hat eine Massenzahl von 242. Beschießt man Plutonium mit schnellen Deuteronen, so erhält man den Prozeß:

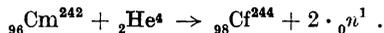


In der Chemie werden die Transurane als Actinide bezeichnet.

Dieses Element nennt man Americium; sein Atomgewicht stimmt etwa mit der angegebenen Massenzahl überein. Schließlich ist es 1950 noch gelungen, zwei weitere Transurane auf künstlichem Wege zu erzeugen. Dazu wurden die beiden Elemente Americium und Curium mit Alphapartikeln hoher Energie (etwa 35 Mev) beschossen und folgende Reaktionen beobachtet:



und



Das Element mit  $Z = 97$  heißt Berkelium, nach der Universität, an der es dargestellt wurde, und hat eine Massenzahl von 243. Das Element 98 heißt Californium, gleichfalls nach der Universität, an der es erstmals erzeugt wurde, und hat eine Massenzahl von 244. Es war bisher noch nicht möglich, die Atomgewichte mit einiger Genauigkeit festzustellen. Bei den angegebenen Kernen handelt es sich stets um Isotope, und die Zusammensetzung des natürlichen Gemisches kennt man noch nicht. Sämtliche Kerne sind Radionukliden, ein Teil von weiteren Isotopen dieser Elemente ist schon bekannt. Unter ihnen befinden sich alle Arten von Strahlern: Alpha-, Negatron-, Positronen- und Gammastrahler.

Es wird uns nach den Betrachtungen der letzten Seiten nicht mehr verwunderlich erscheinen, daß die Tafel der Elemente, also das periodische System, auch bei 98 Elementen noch nicht zu Ende sein wird. Die Annahme, daß es nur 92 Elemente gäbe, ist widerlegt worden, da man nicht voraussehen konnte, was uns die Atom- beziehungsweise Kernphysik an Einblicken in die Struktur der Mikrowelt gewähren würde. Unsere Untersuchungen führten zur Entdeckung der sogenannten künstlichen oder induzierten Radioaktivität und damit zu neuen Elementen. Wir werden heute keine Zahl mehr für die Elemente angeben; es wäre müßige Spielerei. Verschiedentlich werden als Zahl für die Elemente 104 genannt. Diese Angabe bezieht sich aber wohl mehr darauf, daß es uns kaum gelingen wird, in einiger Zeit, vielleicht den nächsten 50 Jahren, mehr als die danach noch ausstehenden Elemente 99 bis 104 zu erzeugen. Wer hier jedoch ernstlich feste Zahlen als unumstößliche Grenzen in Erwägung zieht, spekuliert entweder oder ist jeder tieferen Einsicht bar.

## 22. *Schlußbetrachtungen*

Wir haben im Vorangegangenen einen kleinen Ausschnitt aus der Atomphysik gegeben, in einer Form, die mehr den Charakter einer Information besitzt. Es wird von winzig kleinen Teilchen berichtet, von ihren Eigenschaften und ihrem Verhalten, obwohl sie noch niemand gesehen hat und auch nicht sehen

wird. Das Vorhandensein von Atomen ist aber nicht nur eine Forderung des menschlichen Intellektes, sondern eine unumstößliche Realität. Man wird daher nicht etwa der Ansicht sein dürfen, die Atome wären ein Erzeugnis des uns innewohnenden Geistes, wir hätten uns die Atome geschaffen als ein Produkt unserer beschränkten Vorstellungen. Das Atom ist ohne uns vorhanden, es besitzt Realität; ob es aber die geometrische oder dynamische Struktur besitzt, die wir ihm zuschreiben, das läßt sich natürlich nicht mit „absoluter Gewißheit“ sagen.

Die Ausführungen haben uns weiter gezeigt, daß die Atome (derselben Art und auch verschiedener Arten) aufeinander Wirkungen ausüben; man sagt, sie treten in Wechselwirkung miteinander. Strahlt man gewissen Teilchen energiereiche elektromagnetische Wellen zu, so nehmen sie diese auf und verändern ihren Zustand mehr oder weniger stark. Werden sie mit energiereichen Partikeln beschossen, so wandeln sich die Kerne und damit also die Atome und Elemente um. Gewisse Nukliden zerplatzen förmlich, wenn ihnen Energie (und Masse) von außen zugeführt wird. Die Energie spielt eine hervorragende Rolle im Haushalt der Materie. Wir haben uns davon überzeugt, daß sich Materie in Energie und Energie in Materie umwandeln kann.

Bringt man Elementarpartikel zu einem Kern zusammen, so verlieren sie augenscheinlich etwas von ihrer Masse. Viele Erscheinungen, die uns Alltagsmenschen ungewöhnlich erscheinen, sind in der Mikrowelt offensichtlich normale Ereignisse. Diese kleine Welt wird für uns immer interessant und rätselhaft zugleich sein, und alle Fortschritte auf diesem Gebiet sind uns Menschen in irgendeiner Form nützlich.

Und damit kommen wir zur Frage nach der Anwendung der atomphysikalischen Erkenntnisse. Die Beantwortung dieser Frage bringt die Atomphysik nicht in Verlegenheit. Angewendet wird sie in fast allen Zweigen der Naturwissenschaft und Technik, wenn auch oft nicht unmittelbar und darum auch nicht jedem ins Auge springend. Die Erkenntnisse dieses Gebietes macht sich jegliche Naturwissenschaft zunutze, die irgendwelche Probleme nicht nur oberflächlich behandelt, sondern die versucht, tiefer zu dringen. Man denke an die moderne Metallurgie, an die Elektrotechnik, die Biophysik und die Chemie. Es ließen sich noch viele Gebiete oder Teilgebiete der Wissenschaft oder Technik nennen, die mit unserem Gegenstand mehr oder weniger tief verbunden sind.

Häufig versteht man unter der Anwendung der Atomphysik auch nur die Nutzung der den Atomen innewohnenden Energien als ein derzeitiges oder auch zukünftiges Problem. Auch hier sind wir nicht ganz in Verlegenheit. Das Problem der Energiegewinnung ist heute nicht mehr nur ein Gegenstand utopischer Schriftsteller, sondern in einigen Fällen schon Wirklichkeit. So existieren unter anderem zwei Antriebsaggregate größerer Leistungen für die Schifffahrt und den Luftverkehr. Man wird nicht erwarten dürfen, diese Maschinen etwa

schon im nächsten Jahr auf dem Markt zu sehen. Eine immense Entwicklungsarbeit ist noch nötig, um diese Konstruktionen schließlich zu einer gewissen Reife zu bringen. Sieht man davon ab, so ist es immerhin erfreulich, daß es eine größere Zahl von Versuchsmustern gibt, die sich bisher gut bewährt haben. Neuerdings hat die Sowjetunion ein, wenn auch zunächst noch kleines, Atomkraftwerk zur Energieerzeugung errichtet. Das zeigt, daß auf dem Gebiet der Anwendung der Atomenergie in absehbarer Zeit noch vieles zu erwarten ist. Die im eigentlichen Sinne nutzbare Energieform ist die Wärmeenergie. Setzt man zum Beispiel die gesteuerte Kettenreaktion in einem Uran-Graphit-Block (Uranbrenner) in Gang, so entsteht infolge dieser Reaktion eine enorme Wärmemenge, die man durch eine zirkulierende Flüssigkeit aus dem Innenraum des Blockes entfernt und als Dampf Turbinen zuleitet, die ihrerseits entsprechende Generatoren antreiben und so schließlich elektrische Energie in genügenden Mengen liefern. Je mehr Aggregate von der Erzeugungsstelle bis zur Verwendungsstelle in diesen Kreis eingeschaltet sind, desto niedriger ist natürlich der Wirkungsgrad der gesamten Anlage.

Zum Vortrieb eines Flugzeuges braucht man zum Beispiel einen genügend starken Treibstrahl eines gasförmigen Mediums. Dieser Strahl wird im Inneren der Strahlenturbine hoch erhitzt und entspannt sich gegen die Umgebung beim Austritt aus der Schubdüse. Zum Erhitzen des Luftstrahles verwendet man die üblichen flüssigen Brennstoffe. Man kann aber, wie es bei einigen Konstruktionen der Fall ist, die vorn einströmende Luft unmittelbar durch einen sogenannten Reaktor leiten, der den gleichen Zwecken wie der eben genannte Uran-Graphit-Block dient. Dort werden sie genügend erhitzt. Das hat heute noch den Nachteil, daß der Reaktor mit seinen Hilfsgeräten zu schwer ist, wengleich auch der „Brennstoff“ hier sehr lange reicht. Die Umwandlung von kinetischer Energie in Wärmeenergie und wieder in kinetische ist, wie schon betont, mit reichlichen Verlusten verbunden, so daß diese Maschinen einstweilen mit den üblichen im Wirkungsgrad nicht konkurrieren können. Dafür kann man aber die Energie in reichlichen Mengen erzeugen, so daß eine große Anlage der obengenannten Art ein halbes Dutzend oder mehr Kraftwerke ersetzt. Der Prozeß der Energiegewinnung steht bezüglich der Nutzenanwendung atomphysikalischer Erscheinungen an erster Stelle. Doch auch die Medizin benutzt mit Vorteil die Strahlen gewisser Präparate zur Behandlung oder Untersuchung von Krankheiten. Man denke an die Röntgendiagnostik und die Behandlung von Geschwulstkrankheiten mit radioaktiver Strahlung. In manchen anderen Zweigen der Wissenschaft und Technik kennt man gleichfalls eine unmittelbare Nutzenanwendung der Ergebnisse atomphysikalischer Forschung.

Mit diesem kurzen Ausblick wollen wir hier unseren Streifzug durch die Welt der Atome beenden. Wir hoffen, daß dieses kleine Werk bei aller Unvollständigkeit, die vor allem in der Fülle des Stoffes begründet ist, doch einen kleinen

Einblick in die uns völlig neuen Gegebenheiten dieser Welt gewährte. Wenn der Leser erkannt hat, daß das mikrokosmische Geschehen zum Teil von ganz anderen Gesetzen beherrscht wird als unser Makrokosmos, und wenn er darüber hinaus die Möglichkeiten der Atomphysik und andererseits auch die Grenzen unserer Modellvorstellungen erkannte, dann ist der Zweck dieses Buches schon erreicht, dann hat der Leser das erkannt, was heute jeder von der Atomphysik wissen sollte.

## KLEINES FACHLEXIKON

*Absoluter Nullpunkt* – tiefste jemals erreichbare Temperatur; liegt in der Celsiusskala bei  $-273,16^{\circ}$ .

*Absorbieren* – verschlucken, aufsaugen, aufnehmen.

*Äquivalent* – gleichwertig.

*Aggregatzustände der Stoffe* – die Erscheinungsformen fest, flüssig und gasförmig.

*Alphapartikel* – der Heliumkern  ${}^4_2\text{He}$ , 4 Nukleonen, ein besonders stabiles Gebilde. Um ihn zu zerreißen, sind 28,2 Mev notwendig (Bindenergie, s. d.).

*Alphazerfall* – ein Teil der Nuklide (s. d.) sendet ohne äußere Einwirkung Alphapartikel aus, diese bilden sich im Moment der Aussendung. Die Reichweite der Strahlen charakterisiert das Element, der Zerfall unterliegt statistischen Gesetzen (nur Wahrscheinlichkeitsaussagen), maximale Energie um 9 Mev.

*Angeregter Zustand* – jeder vom Grundzustand (s. d.) verschiedene energetische Zustand eines Atoms. Jedes Atom hat das Bestreben, in einen Zustand geringster Energie überzugehen, sei es durch Wellenstrahlung oder Partikelemission. In einen angeregten Zustand gelangt ein Atom spontan oder infolge äußerer Anregung. Wandelt sich ein Neutron in ein Proton um unter Aussendung eines Negatrons und eines Neutrinos, so bleibt danach der gebildete Kern in einem

*a. Z.* zurück, aus dem er sich unter Gammastrahlung in den Grundzustand begibt (spontan *a. Z.*). Wird ein Kern mit Korpuskeln oder Quanten beschossen, gerät er gleichfalls in einen *a. Z.*

*Anisotropie* – nichtisotropes Verhalten von Materie gegenüber bestimmter Einwirkungen, d. h., die Materie verhält sich nicht nach allen Richtungen hin gleich. So kann die Lichtgeschwindigkeit  $c_L$  in einem Kristall in verschiedenen Richtungen unterschiedlich sein, dann zeigt also der Kristall bezüglich  $c_L$  Anisotropie.

*Anode* – positive Elektrode.

*Anomal* – nicht normal, unnormal, außergewöhnlich.

*Atomgewicht* – dimensionslose Zahl, Verhältniszahl, Verhältnis der Masse eines Atoms zu  $\frac{1}{16} \cdot 0^{16}$  - Masse (Masseneinheit);  $\frac{1}{16}$  der Masse vom  $0^{16}$ -Isotop ist die Masseneinheit von  $1,66 \cdot 10^{-24}$  g (Gramm). Das *A.* ist diejenige dimensionslose Zahl, die angibt, wievielmal schwerer die Atome eines Elementes sind als ein Sechzehntel der Masse vom Sauerstoffisotop  $0^{16}$ , das als Einheit gewählt ist.

*Atomhülle* – die den Kern umgebende (einhüllende) Elektronengesamtheit (s. a. Schalen).

*Ausbeute* – die Zahl der eingeschossenen Teilchen, die im Durchschnitt einen Kernprozeß auslösen; sie wird statistisch ermittelt.

**Bandenspektren** – die Spektren der Moleküle sind zumeist sehr linienreich und bilden ein „Band“.

**Betastrahlen** – die beim Betazerfall vom Kern ausgesandten Negatronen oder Positronen; die von demselben Element ausgesandten Strahlen haben unterschiedliche Reichweite und liegen zwischen einem kleinsten und einem größten Wert, der aber für ein Element charakteristisch ist.

**Betatron** – Gerät zur Beschleunigung von Elektronen; die Teilchen werden im Bruchteil einer Sekunde in mehreren hunderttausend Umläufen bis zu 100 Mev beschleunigt; das geschieht mit Hilfe eines sich zeitlich ändernden Magnetflusses, den sie in einer Vakuumkammer umkreisen. Durch ein Magnetfeld aus ihrer Bahn gezogen, treffen die Elektronen auf eine Metallwand, erzeugen dabei Röntgenstrahlen, die man auf das Ziel richtet.

**Bindeenergie** – jedes Nukleon ist mit einer bestimmten Energie an den Kern gebunden, die aber nicht für alle Kerne gleich ist; diese Energie muß aufgewendet werden, um ihn in seine Bestandteile zu zerlegen.

**Bohrsche Postulate** – die Elektronen können auf gewissen Bahnen den Kern umlaufen, ohne zu strahlen, sogenannte stationäre Bahnen. Die Energieaufnahme oder -abgabe des Systems (Elektronen – Kern) erfolgt nur unstetig in sogenannten Energiequanten  $E = h \cdot \nu$ , wo  $h$  die Plancksche Konstante (siehe Tafel I) darstellt.

**Comptoneffekt** – nach dem Physiker Compton benannter Effekt, bei dem die aus einem Streukörper (z. B. Paraffin) herausgestreute Wellenstrahlung eine größere Wellenlänge hat als die eingestrahelte. Das bedeutet Energieverlust und wird auf den Stoß Quant – Korpuskel zurückgeführt (Gammaquant – Atom).

**Coulombfeld** – das elektrostatische Feld des Kernes, verursacht durch die Protonen. Die vermittelte Kraftwirkung nimmt mit dem Quadrat der Entfernung (wie  $1/r^2$ ) ab.

**Coulombkräfte** – die elektrostatischen Wechselwirkungskräfte.

**Deuterium** – schweres Wasser, mit dem Deuteron als Kern gebildetes Wasser, Formel  $D_2O$ .

**Deuteronen** – die Kerne des schweren Wasserstoffs  ${}_1H^2$ , 1 Proton und 1 Neutron, der einfachste Kern neben dem Proton; wirksame Geschosse, werden meist im Zyklotron verwendet.

**Dipol** – Zweipol; zwei Ladungen, die sich in geringem Abstand voneinander befinden.

**Elektrische Stromstärke** – die in einer Sekunde durch den Querschnitt eines Leiters transportierte Ladungsmenge, also die Zahl der Elektronen mal der Ladungseinheit.

**Elektronenvolt** – atomphysikalische Energie- oder Arbeitseinheit, eV.  
 $10^3 \text{ eV} = 1 \text{ Kev}$  (Kiloelektronenvolt)  
 $10^6 \text{ eV} = 1 \text{ Mev}$  (Megaelektronenvolt)

$10^9 \text{ eV} = 1 \text{ Bev} = \text{Gev}$  (Gigaelektronenvolt)

**Element** – chemischer Grundstoff, der mit (chemischen) Mitteln nicht in einfachere Stoffe zerlegbar ist.

**Elementarladung** – Größe siehe Tafel I, Träger dieser Einheitsladung sind Negatron, Positron, Proton und verschiedene Mesonen. In welcher Form sie auf den Trägern existiert, ist noch ungeklärt.

**Elementarteilchen** – so nennt man die nicht mehr weiter unterteilbaren oder zerlegbaren Partikel; sicher gehören dazu Negatron, Positron, Neutrino und Photon; man kann auch Proton und Neutron mit dazu zählen, ferner die zahlreichen Mesonen. Alle diese Partikel lassen sich zum Teil ineinander umwandeln (Neutron in Proton und umgekehrt, Mesonen ineinander, Nukleonen in Mesonen); von der Theorie aus werden noch die sogenannten Antinukleonen gefordert (Antiproton). Die Frage nach den *E*. läßt sich zur Zeit noch nicht eindeutig beantworten. Neuerdings macht man hypothetische Annahmen über die Struktur und Zusammensetzung der Nukleonen.

**Emittieren** – aussenden.

**Energie** – die Fähigkeit Arbeit zu leisten oder der bereits geleistete Betrag einer Arbeit.

**Energieerhaltungssatz** – Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, sie wird beständig nur von einer Form in eine andere umgewandelt; danach ist der Energievorrat der Welt eine konstante

Größe und kann also weder vermehrt noch vermindert werden; bedenkt man die gegenseitige Umwandelbarkeit von Masse und Energie, so dürfte dieser Satz von allgemeiner Gültigkeit sein.

**Energieformen** – es gibt eine Reihe verschiedener Energien; die mechanische *E*. unterteilt man in potentielle und kinetische *E*., erstere nennt man auch die *E*. der Lage, da sie von der gegenseitigen Entfernung der Körper oder Partikel in einem Kraftfelde abhängt. Kinetische *E*. tritt in drei Arten auf: als Rotationsenergie (Rotation = Drehung), als Translationsenergie (Translation = Verschiebung) und als Oszillationsenergie (Oszillation = Schwingung). Außerdem existieren noch eine Reihe anderer Formen wie z. B. chemische *E*., Wärmeenergie, elektrische *E*. usw. In beschränktem Maße sind die einzelnen Arten ineinander umwandelbar.

**Energieniveaus** – die Energiebeträge, die ein System annehmen kann.

**Feld** – vermittelt die Wechselwirkung der Materie aufeinander; Ladungen umgeben sich mit elektrischen Feldern, Magneten mit Magnetfeldern, Nukleonen mit Nukleonen- oder Mesonenfeldern.

**Feldstärke** – in jedem Punkt des Raumes übt ein Feld auf eine dort befindliche geladene Masse eine bestimmte Wirkung aus; die Masse kann elektrisch, magnetisch, nuklear usw. geladen sein, die Wirkung ist die einer Kraft. Je größer

diese in einem Punkt ist, um so größer ist die dort wirkende jeweilige Feldstärke.

**Fluoreszenz** – gewisse Stoffe strahlen einen Teil des auffallenden Lichtes wieder ab, und zwar meist mit der gleichen Wellenlänge, sie leuchten also auf, sobald sie von entsprechender Strahlung getroffen werden, leuchten aber nicht nach. (Nachleuchten = Phosphoreszenz).

**Fokus** – bei Linsen und Hohlspiegeln Brennpunkt; durch ihn gehen sämtliche Strahlen hindurch.

**Fokussieren** – nach dem Brennpunkt werfen. In unserem Falle (Zyklotron usw.) sinngemäß: Die Teilchen in eine horizontale Bahnebene werfen, falls sie etwa daraus abweichen; sie in die Bahnebene zurückzwingen.

**Freie Weglänge** – die Strecke, die Moleküle eines Gases im Durchschnitt zurücklegen, bevor sie miteinander zusammenstoßen.

**Frequenz** – die Zahl der sich ständig oder auch nur während einer gewissen Zeit wiederholenden Vorgänge, die Zahl der Wechsel einer Größe, die physikalischer oder auch mathematischer Natur sein kann.

**Gammastrahlung** – wird von angeregten Kernen ausgesandt, sehr kurzwellig und durchdringend; die Energie  $E = h \cdot \nu$  ist das Quant dieser Strahlung; sie tritt bei natürlicher Radioaktivität nur im Zusammenhang mit Alpha- oder Betastrahlung auf, d. h. nach der Emission eines dieser Partikel.

**Gravitation** – Massenanziehung, macht sich zwischen den Planeten und Sternen bemerkbar und auf der Erde dadurch, daß alle Massen von dieser angezogen werden; *G.* ist also für das Gewicht der Körper verantwortlich.

**Grundfarben** – so nennt man nach Newton (1642–1727) die Farben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett; sie sind im Sonnenspektrum gut zu sehen.

**Grundzustand** – der energieärmste Zustand, den ein Atom überhaupt einnehmen kann.

**Homogen** – gleichmäßig, gleichartig.

**Impuls** – Produkt aus Masse mal Geschwindigkeit ( $m \cdot v$ ), ist nur dann gleich Null, wenn die Geschwindigkeit gleich Null ist; der *I.* mißt den Transport von Materie. Je größer er ist, desto größer ist die transportierte Masse (Massenfluß).

**Instabil** – unstabil, nichtstabil.

**Interferenz** – die Eigenschaft von kohärenten Wellen (von derselben Quelle stammende *W.*), sich gegenseitig in den Punkten des Raumes zu beeinflussen, sich jeweils in der Wirkung zu verstärken oder zu schwächen.

**Intermolekular** – zwischen den Molekülen; z. B. sind die zwischen den Molekülen wirksamen Kräfte intermolekular.

**Intramolekular** – innerhalb des Moleküls; z. B. sind die Kräfte zwischen den zum Molekül gehörenden Atomen intramolekular.

*Inverse Betastrahlen* – (invers = umgekehrt) auch *K*-Strahlung genannt; sie entsteht, wenn sich der Kern aus der innersten Schale (*K*-Schale) ein Elektron einfängt und die so frei gewordene Stelle von einem außenliegenden Elektron wieder besetzt wird. Die beim „Herunterfallen“ in die innere Schale frei werdende Energie wird als Röntgenstrahlung emittiert; durch den Einfang des *K*-Elektrons frei werdende Energie läßt sich nicht beobachten, sie entweicht als Neutrinostrahlung (Annahme).

*Ionen* – elektrisch geladen erscheinende Atome oder Atomgruppen; sie entstehen, wenn den Atomen Elektronen entrissen werden oder sich Elektronen anlagern.

*Ionisierungsenergie* – Energie zur Abtrennung des Leucht- oder Valenzelektrons; entspricht also der Energie, mit der dies Elektron an den Kern gebunden ist.

*Isobar* – gleichschwer; Kerne gleicher Nukleonenzahl sind isobar. Genau genommen, sind sie nicht gleich schwer, da Neutron und Proton verschiedene Masse haben, und um genau gleich schwer zu sein, müßte die Zahl der Neutronen und Protonen in allen Fällen auch genau gleich sein.

*Isotope* – an die gleiche Stelle im periodischen System der Elemente gehörende Elemente, die alle gleiche Protonenzahl aber verschiedene Neutronenzahl haben; ein Element kann bis zu 8 *I.* besitzen, die meisten sind dann allerdings radio-

aktiv, da das Verhältnis von Neutronen zu Protonen relativ hoch ist.

*Kalorie* – Einheit der Wärmeenergie, 1kcal = 1000 cal.

*Katode* – negative Elektrode.

*Katodenstrahlen* – die von der Katode (s. d.) einer Entladungsröhre weggeschleuderten Elektronen, sie werden durch die Potentialdifferenz zwischen Anode und Katode beschleunigt; wesensgleich den Betastrahlen.

*Kausalität* – lat. causa = Grund, Ursache, Anlaß usw.

*K.* in der Physik: zu jeder Wirkung gehört eine Ursache, ein Anlaß; aus der Wirkung läßt sich auf die Ursache schließen und schließlich von einer Ursache, einem Anlaß, läßt sich die Wirkung im voraus bestimmen. Wirkt auf einen Körper eine Kraft ein, so läßt sich im voraus, d. h. bei Kenntnis der notwendigen Gesetze, die Bewegung des Körpers berechnen. Es besteht ein durch ein Gesetz faßbarer Zusammenhang zwischen der einwirkenden Kraft und der entstehenden Bewegung. Man unterscheidet klassische und statistische *K.* (s. S. 55, 110).

*Kernkräfte* – die zwischen den Nukleonen wirkenden Kräfte; sie werden durch das Nukleonen- oder Mesonenfeld vermittelt und sind von extrem kurzer Reichweite ( $10^{-13}$  cm).

*Kernladungszahl* – die Zahl der Protonen eines Kernes ist gleich der Zahl der elementaren Ladungseinheiten.

**Kernphotoeffekt** – Kernumwandlung durch Quanten (Gammastrahlung), Name aus der Ähnlichkeit des Vorganges mit dem durch Photonen ausgelösten Photoeffekt (s. d.) bei Metallen.

**Kernspaltung** – durch äußere Anregung erfolgte Zerspaltung eines Kernes in zwei größere Bruchstücke; findet nur bei schweren Elementen ( $Z > 200$ ) statt. Es werden größere Energien als bei gewöhnlichen Kernumwandlungen frei.

**Kettenreaktion** – das durch die Neutronenlawine verursachte enorme Ansteigen der Zahl der Kernspaltungen in sehr kurzer Zeit. Wird der Prozeß nicht gesteuert oder in Grenzen gehalten, erfolgt eine Explosion (zerstörerische Wirkung bei der Atombombe); im Reaktor (s. d.) wird der Prozeß in mäßigen Grenzen gehalten.

**Korpuskel** – Teilchen, Körperchen.

**Kosmische Strahlen** – sehr energiereiche Strahlung, die aus dem Kosmos (Weltall) in den Erdbereich gelangt; besteht im wesentlichen aus Protonen mit Energien von vielen Bev (s. a. Elektronenvolt).

**Lichtquanten** – Energiequanten  $h \cdot \nu$ , die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, auch Photonen genannt.

**Loschmidtzahl** – siehe Tafel I, die Zahl der Moleküle oder Atome in einem Mol (s. d.).

**Magnetmoment** – die magnetische Wirkung irgendeines Systems oder auch Teilchens wird in dieser Größe

gemessen; wird z. B. verursacht durch einen Ringstrom oder durch eine rotierende Ladung.

**Makroskopisch** – großweltlich; Makrophysik, sieht von der atomistischen Struktur der Materie ab, also die gewöhnliche Physik. Gegensatz Mikrophysik = Physik, welche die atomistische Struktur berücksichtigt, also die Molekular- und Atomphysik.

**Massenzahl** – gleich der Zahl der Nukleonen eines Kernes.

**Mesonen** – Teilchen, deren Masse zwischen der leichtesten, der Elektronenmasse  $m_e$ , und der schwersten, der Protonenmasse  $m_p$ , liegt. Sie sind teils geladen – positiv und negativ – und teils ungeladen. Sie kommen in der kosmischen Strahlung und im Atomkern vor (Annahme).

**Molekül** – kleinster, mit physikalischen Methoden nicht weiter teilbarer Baustein der chemischen Verbindungen. Aufgebaut aus Atomen.

**Molekülspektren** – Moleküle ändern ihren innern Energiezustand sprunghaft; die Energiedifferenzen sind zahlreicher als beim Atom und daher die Spektren sehr linienreich (s. a. Bandenspektren).

**Molekulargewicht** – dimensionslose Zahl; gleich der Summe der Atomgewichte der zum Molekül gehörenden Atome.

**Negatron** – negatives Elektron

**Neutrino** – kleines Neutron; gleiche Eigenschaften wie dieses, jedoch

keine Ruhemasse und daher nicht beobachtbar, bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit; hat Quantencharakter; Nachweis durch Rückstoß bei der Emission.

**Neutron** – Form der Nukleonen, ohne elektrische Ladung (jedenfalls tritt sie nach außen nicht in Erscheinung), zeigt infolgedessen keine elektromagnetische Wechselwirkung mit der Materie, tritt nur in Wechselwirkung mit anderen Nukleonen in Reichweite des Mesonenfeldes (oder Kernfeldes). Nur indirekte Nachweismethoden, z. B. durch den auf leichte Partikel ausgeübten Stoß.

**Nukleon** – Bezeichnung für die Kernbestandteile Proton und Neutron.

**Nukliden** – dem Nukleon (s. d.) angepaßter Begriff zur Kennzeichnung der verschiedenen Kernsorten.

**Oszillation** – Schwingung.

**Pauliprinzip** – von W. Pauli aufgestellt; der durch vier Quantenzahlen charakterisierte Zustand eines Hüllenelektrons kann nur jeweils von einem solchen Teilchen besetzt sein; zwei Hüllenelektronen unterscheiden sich also mindestens in einer der vier Zahlen; es ist nicht möglich, daß sich zu derselben Zeit in einem Atom zwei Elektronen in demselben energetischen Zustand befinden, sie haben alle verschiedene Energien.

**Periode** – regelmäßige Schwankungen, z. B. physikalischer oder mathematischer Größen in gewissen Zeit-

räumen oder in gewissen räumlichen Abständen.

**Periodisches System** – Anordnung der chemischen Elemente in einer Tabelle nach steigendem Atomgewicht und chem. Verwandtschaft (Affinität); dadurch entstehen Gruppen ähnlicher Elemente. Ein System stammt von Mendelejew (1869) und ist in Tafel V zu sehen.

**Photoeffekt** – die Auslösung von Elektronen aus Metallen durch Quantenstrahlung, im besonderen durch kurzwelliges Licht.

**Photon** – Lichtquant.

**Positron** – positives Elektron, gleiche Masse wie das Elektron.

**Postulat** – Forderung

**Potential** – die potentielle Energie zwischen zwei Punkten in einem Kraftfeld, z. B. die Potentialdifferenz zwischen zwei Stellen in einem elektrischen Feld (= Spannung).

**Proton** – Nukleonenform; positive Elementarladung, kann sich in Neutron umwandeln; der einfachste Nuklid  ${}_1\text{H}^1$ .

**Quanten** – die als Welle abgestrahlte Größe  $h \cdot \nu$ , ( $\nu$  = Frequenz der Welle), auch Energiequant; der Begriff kommt von Quantum = die Menge. Q. bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit.

**Quantenmechanik** – mathematische Erfassung atomphysikalischer Vorgänge mit Hilfe von statistischen Methoden und Aussagen; nicht mehr anwendbar, wenn die Energie der betrachteten Teilchen sich der

Ruheenergie  $mc_L^2$  nähert; im letzteren Falle wird nach den Methoden der (quantisierten) Feldtheorie gerechnet.

**Quantenzahlen** – dienen zur Kennzeichnung der verschiedenen Energiezustände der Hüllenelektronen, die erst durch vier Zahlen charakterisiert sind:  $n$  = Hauptquantenzahl,  $l$  = Bahnquantenzahl,  $m$  = Magnetquantenzahl und  $s$  = Spinquantenzahl.

**Radioaktive Familie** – so nennt man die Mitglieder einer Zerfallsreihe (s. d.); es gibt vier solche *r. F.*

**Radioaktivität** – man unterscheidet natürliche und künstliche (oder induzierte) *R.*; im ersten Falle senden die Nukliden ohne Anregung Partikel oder Wellenstrahlung oder beides aus. Im anderen Falle senden sie gleichfalls Teilchen oder Quanten aus, aber nach Anregung z. B. durch Beschuß mit solchen Partikel oder Quanten. Der Zerfall unterliegt gewissen statistischen Gesetzen und ist von außen nicht zu beeinflussen. Die Zerfallszeiten sind sehr unterschiedlich.

**Radionuklid** – radioaktiver Kern.

**Reaktor** – Uran-Graphit- oder Uran-Paraffin-Block, in dem die Kettenreaktion ausgelöst wird.

**Röntgenstrahlen** – sehr kurzwellige Strahlen (jedoch langwelliger als Gammastrahlen, also weicher als diese) mit großem Durchdringungsvermögen. Sie entstehen z. B. wenn schnelle Elektronen im Coulombfeld der Kerne abgebremst werden;

ein Teil der kinetischen Energie wird dabei in Wellenstrahlung umgewandelt.

**Rotation** – Drehung.

**Ruhemasse** – die Masse eines Körpers oder einer Partikel ohne oder mit geringer Geschwindigkeit gegen die Lichtgeschwindigkeit, die Masse nimmt nach der Relativitätstheorie mit der Geschwindigkeit zu, jedoch müssen die beschleunigten Partikel sehr klein und die Geschwindigkeit sehr groß sein, bevor dies überhaupt merklich oder meßbar wird. So vergrößert sich die Masse des Elektrons bei 55 % Lichtgeschwindigkeit um 20 %, bei 94 % derselben aber schon um 200 %; die Masse des Protons steigt bei 65 % Lichtgeschw. auf das 1,32fache an, bei 87 % Lichtgeschw. bereits auf das 2fache und bei 100 % Lichtgeschw. würde sie schon das 11,7fache betragen.

**Rutherford** –  $1\text{ rd} = 1$  Million Zerfallsprozesse in einer Sekunde.

**Schalen** – man spricht bei der Elektronenhülle von einzelnen Schalen, zu denen Gruppen von Elektronen gehören. Im Modell sind die *Sch.* dadurch gekennzeichnet, daß die auf ihnen befindlichen Elektronen alle den gleichen Abstand vom Kern haben; bezüglich der Quantenzahlen (die ja den energetischen Zustand eines Elektrons bezeichnen) unterscheiden sich die *Sch.* durch die verschiedenen Hauptquantenzahlen. Es gibt 7 *Sch.*, die eine bestimmte Anzahl von Elek-

- tronen aufnehmen können, die *K-, L-, M-, N-, O-, P-, Q-Schale*. Die ersten vier werden bis zur Sättigung aufgefüllt, die übrigen sind unvollständig gefüllt. Die Anzahl der Elektronen in einer *Sch.* wird durch das Pauliprinzip beschränkt.
- Schweres Wasser* – so nennt man das mit dem Deuteron als Kern existierende Wasser, Formel  $D_2O$ , das D (= Deuterium) ist ein Wasserstoffisotop (s. a. Deuteron).
- Spektrum* – lat. spektrare, heißt zerlegen, irgendeine physikalische Größe wird in ihre Bestandteile zerlegt; so wird durch das Glasprisma das Licht in seine einzelnen Wellen zerlegt, aus denen es sich zusammensetzt. Die Gesamtheit der einzelnen Bestandteile der Aufspaltung nennt man ein Spektrum der betreffenden Größe, im genannten Fall also ein Lichtwellenspektrum.
- Spin* – so nennt man den Drehimpuls von Elementarpartikeln, spinnen heißt soviel wie sich drehen.
- Spontan* – von selbst, von innen heraus, ohne äußere Anregung.
- Stabil* – gegen kleine Störungen unempfindlich.
- Stoß* – wir unterscheiden den elastischen und den unelastischen *St.* (Mechanik); im ersten Falle bleibt die mechanische Energie erhalten, im zweiten Falle nicht, dann wird ein Teil derselben in Wärme umgewandelt. Beim unelastischen *St.* (Atomphysik) wird ein Teil der kinetischen Energie des stoßenden Teilchens zur Anregung des Kernes verwendet.
- Streuung* – Ablenkung.
- Subtilität* – Feinheit.
- Term* – in der Atomphysik der Wert einer Größe, im besonderen der Energie.
- Translation* – Verschiebung auf einer Geraden.
- Transurane* – die Elemente oberhalb der Kernladungszahl 92, also die auf das Uran folgenden Elemente.
- Triton* – der Kern des überschweren Wasserstoffes,  ${}^3_1H$ .
- Valenz* – Wertigkeit; sie wird durch den Charakter der Elektronenschalen bestimmt, und zwar meistens der äußeren Schale.
- Zerfallsreihe* – die auf die zerfallende Muttersubstanz folgenden Tochtersubstanzen bilden zusammen mit dieser eine Zerfallsreihe; bis zum Endprodukt hin bilden sie eine Kette, siehe unser Bild 43 (Uran-Radium-Reihe).
- Zyklotron* – Beschleunigungsgerät für geladene Partikel, im allgemeinen Protonen, Deuteronen und Alpha-teilchen. In spiralförmigen Bahnen werden die Teilchen durch ein elektrisches Wechselfeld beschleunigt; sie erlangen dabei große Energien, die sie befähigen, gegen das Coulombfeld eines Kernes anzulaufen und Kernprozesse auszulösen. Man kennt kleinere Geräte, die bis zu etwa 30 Mev beschleunigen, und Großgeräte, die bis zu einigen Hundert Mev (Synchronzyklotron) erreichen.

*Physikalische Konstanten*

## 1. Fundamentale Konstante

Lichtgeschwindigkeit, $c_L$ .....	= 2,99776 · 10 <sup>10</sup> cm/s
Elementarladung, $e$ .....	= 4,803 · 10 <sup>-10</sup> el. st. cgs-Einh.
	1,60199 · 10 <sup>-20</sup> el. mag. Einh.
Planckkonstante, $h$ .....	= 6,624 · 10 <sup>-27</sup> erg/sec
Loschmidtzahl, $L$ .....	= 6,0251 · 10 <sup>23</sup> (Moleküle)

## 2. Atomgewichte

Proton, $p$ .....	= 1,00813 ME
Neutron, $n$ .....	= 1,00894 ME
Elektron, $e$ .....	= 0,000584 ME
Deuteron, $d$ .....	= 2,01472 ME
Triton, $t$ .....	= 3,01699 ME
Wasserstoff, H .....	= 1,00827 ME
Alpha, $\alpha$ .....	= 4,00389 ME
Sauerstoff, O .....	= 16,004357 ME
Sauerstoff, ${}_8\text{O}^{16}$ .....	= 16,000000 ME
Verhältnis $\text{O}^{16} : \text{O}^{17} : \text{O}^{18}$ .....	= 506 : 1 : 0,204

## 3. Massen

Proton, $m_p$ .....	= 1,6725 · 10 <sup>-24</sup> g
Neutron, $m_n$ .....	= 1,6747 · 10 <sup>-24</sup> g
Elektron, $m_o$ .....	= 9,1055 · 10 <sup>-28</sup> g
$m_p : m_o$ .....	= 1836,5
Alpha, $m_\alpha$ .....	= 6,6442 · 10 <sup>-24</sup> g

## 4. Energien

1 Elektronenvolt, eV entspricht ..	1,60199 · 10 <sup>-12</sup> erg
1 Mev .....	= 10 <sup>6</sup> eV (1 Million)
1 Bev .....	= 10 <sup>9</sup> eV (1 Milliarde)
1 Masseneinheit, ME .....	= 931,04 Mev
1 erg entspricht .....	1,1127 · 10 <sup>-27</sup> g
1 erg entspricht .....	1,01972 · 10 <sup>-8</sup> mkg
1 Mev entspricht .....	1,782 · 10 <sup>-27</sup> g
1 Mev entspricht .....	3,827 · 10 <sup>-24</sup> cal

## Die schweren Nukliden

Z	A	Aktivität	Z	A	Aktivität
92 U Uran	228	$\alpha$	93 Np Neptunium	231	$\alpha$
	229	$\alpha$		234	K, $\gamma$
	230	$\alpha$		235	$\alpha$
	231	K		236	$e^-$
	232	$\alpha$		237	$\alpha$
	233	$\alpha, e^-, \gamma, K$		238	$e^-, \gamma$
	234	$\alpha$		239	$e^-, \gamma$
	235	$\alpha$			
	237	$e^-, \gamma$			
	238	$e^-$			
239	$\gamma$				
94 Pu Plutonium	232	$\alpha$	95 Am Americium	238	K
	234	$\alpha$		239	$\alpha$
	236	$\alpha$		240	K
	237	K		241	$\alpha$
	238	$\alpha$		242	$\alpha$
	239	$\alpha, \gamma$			
	240	$\alpha$			
241	$\alpha, e^-$				
96 Cr Curium	238	$\alpha$	97 Bk	244	$\alpha$
	240	$\alpha$	Berkelium		
	241	$\alpha$			
	242	$\alpha$	98 Cf	244	$\alpha$
		Californium			

Tafel III

Periodisches System der Elemente  
nach Bohr

1 H	3 Li	11 Na	19 K	37 Rb	55 Cs	87 Fr
2 He	4 Be	12 Mg	20 Ca	38 Sr	56 Ba	88 Ra
	5 B	13 Al	21 Sc	39 Y	57 La	89 Ac
	6 C	14 Si	22 Ti	40 Zr	58 Ce	90 Th
	7 N	15 P	23 V	41 Nb	59 Pr	91 Pa
	8 O	16 S	24 Cr	42 Mo	60 Nd	92 U
	9 F	17 Cl	25 Mn	43 Tc	61 Pm	93 Np
	10 Ne	18 Ar	26 Fe	44 Ru	62 Sm	94 Pu
			27 Co	45 Rh	63 Eu	95 Am
			28 Ni	46 Pd	64 Gd	96 Cm
			29 Cu	47 Ag	65 Tb	97 Bk
			30 Zn	48 Cd	66 Dy	98 Cf
			31 Ga	49 In	67 Ho	
			32 Ge	50 Sn	68 Er	
			33 As	51 Sb	69 Tm	
			34 Se	52 Te	70 Yb	
			35 Br	53 I	71 Lu	
			36 Kr	54 X	72 Hf	
					73 Ta	
					74 W	
					75 Re	
					76 Os	
					77 Ir	
					78 Pt	
					79 Au	
					80 Hg	
					81 Tl	
					82 Pb	
					83 Bi	
					84 Po	
					85 At	
					86 Rn	

## Elektronengruppierung in den Elementen des periodischen Systems

Schalen			K	L		M			N			
Hauptquantenzahl $n$			1	2		3			4			
Nebenquantenzahl $l$			0	0	1	0	1	2	0	1	2	3
1	H	Wasserstoff	1									
2	He	Helium	2									
3	Li	Lithium	2	1								
4	Be	Beryllium	2	2								
5	B	Bor	2	2	1							
6	C	Kohlenstoff	2	2	2							
7	N	Stickstoff	2	2	3							
8	O	Sauerstoff	2	2	4							
9	F	Fluor	2	2	5							
10	Ne	Neon	2	2	6							
11	Na	Natrium	2	2	6	1						
12	Mg	Magnesium	2	2	6	2						
13	Al	Aluminium	2	2	6	2	1					
14	Si	Silicium	2	2	6	2	2					
15	P	Phosphor	2	2	6	2	3					
16	S	Schwefel	2	2	6	2	4					
17	Cl	Chlor	2	2	6	2	5					
18	Ar	Argon	2	2	6	2	6					
19	K	Kalium	2	2	6	2	6		1			
20	Ca	Calcium	2	2	6	2	6		2			
21	Sc	Scandium	2	2	6	2	6	1	2			
22	Ti	Titan	2	2	6	2	6	2	2			
23	V	Vanadium	2	2	6	2	6	3	2			
24	Cr	Chrom	2	2	6	2	6	5	1			
25	Mn	Mangan	2	2	6	2	6	5	2			
26	Fe	Eisen	2	2	6	2	6	6	2			
27	Co	Kobalt	2	2	6	2	6	7	2			
28	Ni	Nickel	2	2	6	2	6	8	2			
29	Cu	Kupfer	2	2	6	2	6	10	1			
30	Zn	Zink	2	2	6	2	6	10	2			
31	Ga	Gallium	2	2	6	2	6	10	2	1		
32	Ge	Germanium	2	2	6	2	6	10	2	2		
33	As	Arsen	2	2	6	2	6	10	2	3		
34	Se	Selen	2	2	6	2	6	10	2	4		
35	Br	Brom	2	2	6	2	6	10	2	5		
36	Kr	Krypton	2	2	6	2	6	10	2	6		

Schalen			<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>				<i>O</i>				<i>P</i>			<i>Q</i>
Hauptquantenzahl <i>n</i>			1	2	3	4				5				6			7
Nebenquantenzahl <i>l</i>			-	-	-	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	0
37	Rb	Rubidium	2	8	18	2	6			1							
38	Sr	Strontium	2	8	18	2	6			2							
39	Y	Yttrium	2	8	18	2	6	1		2							
40	Zr	Zirkon	2	8	18	2	6	2		2							
41	Nb	Niob	2	8	18	2	6	4		1							
42	Mo	Molybdän	2	8	18	2	6	5		1							
43	Tc	Technetium	2	8	18	2	6	5		2							
44	Ru	Ruthenium	2	8	18	2	6	7		1							
45	Rh	Rhodium	2	8	18	2	6	8		1							
46	Pd	Palladium	2	8	18	2	6	10									
47	Ag	Silber	2	8	18	2	6	10	1								
48	Cd	Cadmium	2	8	18	2	6	10	2								
49	In	Indium	2	8	18	2	6	10	2	1							
50	Sn	Zinn	2	8	18	2	6	10	2	2							
51	Sb	Antimon	2	8	18	2	6	10	2	3							
52	Te	Tellur	2	8	18	2	6	10	2	4							
53	J	Jod	2	8	18	2	6	10	2	5							
54	X	Xenon	2	8	18	2	6	10	2	6							

Schalen			K	L	M	N				O				P			Q	
Hauptquantenzahl <i>n</i>			1	2	3	4				5				6			7	
Nebenquantenzahl <i>l</i>			-	-	-	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	0	
55	Cs	Cäsium	2	8	18	2	6	10		2	6			1				
56	Ba	Barium	2	8	18	2	6	10		2	6			2				
57	La	Lanthan	2	8	18	2	6	10		2	6	1		2				
58	bis	Seltene Erden	2	8	18	2	6	10	1	11								
bis									14									
71																		
72	Hf	Hafnium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	2		2				
73	Ta	Tantal	2	8	18	2	6	10	14	2	6	3		2				
74	W	Wolfram	2	8	18	2	6	10	14	2	6	4		2				
75	Re	Rhenium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	5						
76	Os	Osmium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	6						
77	Ir	Iridium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	7						
78	Pt	Platin	2	8	18	2	6	10	14	2	6	8						
79	Au	Gold	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		1				
80	Hg	Quecksilber	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2				
81	Tl	Thallium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2	1			
82	Pb	Blei	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2	2			
83	Bi	Wismut	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2	3			
84	Po	Polonium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2	4			
85	At	Astat	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2	5			
86	Rn	Radon	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2	6			
87	Fr	Francium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2	6		1	
88	Ra	Radium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2	6		2	
89	Ac	Actinium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2	6	1	2	
90	Th	Thorium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10		2	6	2	2	
91	Pa	Protaktinium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	2	2	6	1	2	
92	U	Uran	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	3	2	6	1	2	
93	Np	Neptunium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	4	2	6	1	2	
94	Pu	Plutonium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	5	2	6	1	2	
95	Am	Americium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	6	2	6	1	2	
96	Cm	Curium	2	8	18	2	6	10	14	2	6	10	7	2	6	1	2	

*Periodisches System*

Links über jedem Element ist dessen Atomgewicht, links darunter seine Kern-  
hier nach den Kernladungszahlen geordnet werden. Bei den Elementen, die nur  
das Atomgewicht eingeklammert

	I. Familie		II. Familie		III. Familie		IV. Familie	
	Haupt- gruppe	Neben- gruppe	Haupt- gruppe	Neben- gruppe	Haupt- gruppe	Neben- gruppe	Haupt- gruppe	Neben- gruppe
1. kurze Periode	6,940 Lithium 3		9,013 Beryllium 4		10,82 Bor 5		12,010 Kohlenstoff 6	
2. kurze Periode	22,997 Natrium 11		24,32 Magnesium 12		26,88 Aluminium 13		28,09 Silicium 14	
1. lange Periode	39,100 Kalium 19		40,08 Calcium 20		44,96 Scandium 21		47,90 Titan 22	
	63,54 Kupfer 29		65,38 Zink 30		69,72 Gallium 31		72,60 Germanium 32	
2. lange Periode	85,48 Rubidium 37		87,63 Strontium 38		88,92 Yttrium 39		91,22 Zirkon 40	
	107,880 Silber 47		112,41 Cadmium 48		114,76 Indium 49		118,70 Zinn 50	
3. lange Periode	132,91 Cäsium 55		137,36 Barium 56		138,92 Lanthan 57	Lanthanide 58-71	178,6 Hafnium 72	
	197,2 Gold 79		200,61 Quecksilber 80		204,39 Thallium 81		207,21 Blei 82	
4. lange Periode	223 Francium 87		226,05 Radium 88		227 Actinium 89	Actinide 90-98	<i>Actinide:</i>	
<i>Lanthanide:</i>	140,13 Cer 58	140,92 Praseodym 59	144,27 Neodym 60	[145] Promethium 61	150,43 Samarium 62	152,0 Europium 63		

ladungszahl angegeben, die man auch Ordnungszahl nennt, da die Elemente künstlich dargestellt wurden und die man in der Natur nicht gefunden hat, ist und gilt für das langlebigste Isotop.

V. Familie		VI. Familie		VII. Familie		VIII. Familie		
Haupt- gruppe	Neben- gruppe	Haupt- gruppe	Neben- gruppe	Haupt- gruppe	Neben- gruppe	Haupt- gruppe	Neben- gruppe	
				1,0080 Wasserstoff 1		4,003 Helium 2		
14,008 Stickstoff 7		16,0000 Sauerstoff 8		19,00 Fluor 9		20,183 Neon 10		
30,975 Phosphor 15		32,066 Schwefel 16		35,457 Chlor 17		39,944 Argon 18		
50,95 Vanadium 23		52,01 Chrom 24		54,93 Mangan 25		55,85 Eisen 26	58,94 Kobalt 27	58,69 Nickel 28
74,91 Arsen 33		78,96 Selen 34		79,916 Brom 35		83,80 Krypton 36		
92,91 Niob 41		95,95 Molybdän 42		[90] Technetium 43		101,7 Ruthen 44	102,91 Rhodium 45	106,7 Palladium 46
121,76 Antimon 51		127,61 Tellur 52		126,91 Jod 53		131,3 Xenon 54		
180,88 Tantal 73		183,92 Wolfram 74		186,31 Rhenium 75		190,2 Osmium 76	193,1 Iridium 77	195,23 Platin 78
209,00 Wismut 83		210 Polonium 84		210 Astat 85		222 Radon 86		
232,12 Thorium 90	231 Protaktinium 91	238,07 Uran 92		237 Neptunium 93	242 Plutonium 94	[243] Americium 95		
[243] Curium 96	[245] Berkelium 97	[246] Californium 98						
156,9 Gadolinium 64	159,2 Terbium 65	162,46 Dysprosium 66	164,94 Holmium 67	167,2 Erbium 68	169,4 Thulium 69	173,4 Ytterbium 70	174,99 Cassiopeium 71	

## BERICHTIGUNG

Seite 40, 14. Zeile von oben, muß es statt „ $n = 4$ “ heißen „ $n = 5$ “.

Seite 53, in der 4. Zeile von unten, muß es statt „geschwärzten“ heißen „hellen“, in der 2. Zeile von unten „hellen“ statt „dunklen“.

Seite 67, 10. Zeile von oben, lautet die Formel:  $E = m \cdot c \frac{v}{L}$ .

Seite 88, 7. Zeile von oben, muß es statt „ $10^{12}$ “ heißen „ $10^{13}$ “, eine Zeile tiefer ist zu ändern „ $10^{13}$ “ in „ $10^{12}$ “.

Seite 124, 11. Zeile von oben, muß es statt „Frequenz  $v$ “ heißen „Frequenz  $\nu$ “.

**1. Auflage · 1.-10. Tausend**

**Alle Rechte vorbehalten · Lizenz-Nr. 303 (305/171/54) · Redakteur: Hans-Albrecht Lütke  
Einband: Günter Brandt · Hersteller: Günter Kleiber · Satz und Druck: Druckhaus  
Einheit Leipzig III/18/211**