

Kernphysik.

Von Prof. Dr. P. DEBYE, Physikalisches Institut der Universität Leipzig.

(Eingeg. 22. Mai 1935.)

Nach einem Vortrag auf der 13. Jahrestagung des Bundes der Freunde der Technischen Hochschule München am 1. Dezember 1934.

1. In den beiden letzten Jahrzehnten ist es gelungen, über den Bau des Elektronengerüsts der Atome genaue Aufschlüsse zu gewinnen, Hand in Hand gehend mit der Entwicklung der von *Planck* begründeten, von *Bohr* auf das Atom angewandten und von *Heisenberg*, *de Broglie* und *Schrödinger* in ein vorläufig endgültiges System gebrachten Quantentheorie, welche als Verfeinerung der *Newtonschen* Mechanik letztere abgelöst hat. Die *Rutherford'sche* Idee, daß ein Atom aus einem kleinen, schweren, positiv geladenen Kern bestehe, in dem nahezu die ganze Masse konzentriert ist, umgeben von einer viel weiter ausgedehnten Elektronenwolke, hat das Bild geliefert, welches der ganzen Entwicklung zugrunde liegt. Heute sind wir so weit, daß nunmehr energische Bemühungen um den Kern selber, um das Verständnis seines Baues und der in ihm geltenden Gesetze einsetzen konnten.

Wir wollen uns zu allererst klar machen, welche ungefähre Größe die Dinge haben, mit denen man es hier zu tun hat. In den Molekülen, deren Eigenschaften bestimmt werden durch die Architektur der Atomanordnung, mit deren Erforschung sich die Chemie bisher hauptsächlich und bekanntlich höchst erfolgreich beschäftigt hat, ist der Abstand von Atom zu Atom von der Größenordnung 10^{-8} cm. Diese Länge stellt gleichzeitig den ungefähren Durchmesser der zu einem Atom gehörigen Elektronenwolke dar, und was als chemische Bindungskräfte in Erscheinung tritt, ist die Wechselwirkung der peripheren Elektronen jener Wolken. Im Zentrum der Elektronenhülle sitzt jeweilig der Kern, dessen Ladung allein mittels der von ihm ausgehenden elektrostatischen, durch das *Coulomb'sche* Gesetz charakterisierten Wirkung für den ganzen Bau der Elektronenwolke und damit für die chemischen Eigenschaften des Atoms verantwortlich ist. Besitzt der Kern beispielsweise eine positive Elementarladung, dann bindet er normalerweise ein Elektron, und wir haben es mit dem ersten Element des periodischen Systems, dem Wasserstoff (H), zu tun; hat der Kern beispielsweise acht Elementarladungen, dann bindet er acht Elektronen, und das entstandene Atom ist seinen chemischen Eigenschaften nach ein Sauerstoffatom (O). Der Kern ist etwa 10000 mal kleiner als die Elektronenhülle, sein Durchmesser beträgt also der Größenordnung nach 10^{-12} cm.

Die Abstände der Atome voneinander und die Größe ihrer Elektronenwolken hat man bestimmt durch Untersuchung der durch die Materie verursachten Streuung und Interferenz von Röntgenstrahlen, die als Licht mit einer Wellenlänge von ungefähr 10^{-8} cm (d. h. etwa 5000mal kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes), einem Maßstabe zu vergleichen sind, der gerade die passende Feinheit der Einteilung besitzt. Für die Messung der Kerndimensionen sind die gewöhnlichen Röntgenstrahlen aber noch viel zu langwellig. Hier hat man als Reagens die von gewissen radioaktiven Substanzen gelieferten α -Strahlen benutzt, d. h. Heliumkerne, also Kerne mit zwei Elementarladungen, die mit großen Geschwindigkeiten von rund $\frac{1}{20}$ Lichtgeschwindigkeit von den radioaktiven Atomen ausgeschleudert werden. Wie *Rutherford* und *Geiger* zeigen konnten, werden diese Strahlen im allgemeinen so von der Materie gestreut, als ob sie durch punktförmige positive Ladungen großer Masse, die nach dem *Coulombschen* Gesetz abstoßende Kräfte auf die Heliumkerne übertragen, abgelenkt wären. Gerade diese Versuche gaben den Anlaß zu der Aufstellung des heute allgemein angenommenen *Rutherford'schen* Atombildes. So lange indessen die Versuchsergebnisse zu erklären waren mit Hilfe von punktförmig

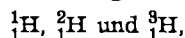
konzentrierten Kernladungen, konnte man naturgemäß noch nichts über die Kerndimensionen aussagen. Erst als sich herausstellte, daß die wenigen noch beobachtbaren, sehr stark abgelenkten α -Strahlen, die deshalb den Kern beinahe zentral getroffen haben müssen und daher sehr nahe an ihn herangekommen sind, nicht mehr in ihrer Winkelverteilung mit Hilfe der *Coulombschen* Wechselwirkung gedeutet werden können, konnte man auf eine Struktur des Kernes und dessen ungefähre Ausdehnung schließen.

Um das Bild der angegebenen Dimensionen lebendiger zu gestalten, mag folgender Vergleich dienen. Wir gehen aus von einem kleinen Kriställchen aus gewöhnlichem Salz (NaCl) in Form eines Kubus, dessen Seitenlänge so gewählt ist, daß man unter einem guten, stark vergrößernden Mikroskop die Form noch gut erkennen kann. Das bedeutet, daß die Kanten einige Wellenlängen des sichtbaren Lichtes, beispielsweise $\frac{1}{1000}$ mm, lang sein müssen. Wir wollen nun diesen Kubus mit einer hypothetischen, 10^{11} -fachen Vergrößerung betrachten. Die Kantenlänge wird dann 100 km an Stelle von $\frac{1}{1000}$ mm. Von Atom zu Atom ist nun der Abstand rund 30 m geworden, und die Elektronenwolken der Atome sind durch Kugeln dargestellt, deren Radius 10–15 m beträgt. Im Mittelpunkt jeder solchen Kugel sitzt der Kern, und dessen Durchmesser beträgt nun etwa 1 mm. Mit diesem Kern und dessen Struktur beschäftigt sich die Kernphysik.

In der klassischen Chemie führt man Reaktionen zwischen den Atomen aus, d. h., wie wir jetzt wissen, man bringt die peripheren Elektronen der Atome zur Wechselwirkung. Man kann sich nun die Frage vorlegen, ob es nicht gelingen könnte, die Kerne selber einander nahe zu bringen, um zu sehen, ob dadurch vielleicht ein ganz neuer Typus von Reaktionen ausgelöst wird. Das ist in der Tat die Richtung, in der sich die Versuche der Neuzeit bewegen. Ehe ich darüber berichte, wollen wir indessen erst feststellen, welche Kerne existieren.

2. Schon sehr frühzeitig hatte man beobachtet, daß die Atomgewichte der chemischen Elemente, so wie sie vom Chemiker bestimmt werden (d. h. auf O = 16 bezogen), nicht so viel von ganzen Zahlen abweichen, wie das zu erwarten steht, wenn sie nach Zufall verteilt wären. Schon das wurde dahin gedeutet, daß ein genetischer Zusammenhang zwischen den verschiedenen Elementen bestehe und vielleicht letzten Endes alle Elemente auf Wasserstoff zurückführbar seien. Wirklich entwicklungsfähig aber wurde diese Idee erst, als man erkannte, daß die chemischen Elemente der klassischen Chemie in der Tat keine eigentlichen Elemente sind, sondern vielfach aus Atomgewichten bestehen, in denen die Bestandteile sich chemisch gleich verhalten, trotzdem ihre Atomgewichte verschieden sind. Besonders durch die Versuche von *Aston*, der die Massen bestimmte aus der Größe der Ablenkung von Strahlen elektrisch geladener Atome beim Durchlaufen einer Kombination von einem elektrischen und einem magnetischen, ablenkenden Felde, sind unsere Kenntnisse über die Isotope, wie man solche Bestandteile genannt hat, sehr bereichert worden. In unserem Bilde bedeutet die Tatsache der Isotopie, daß man beispielsweise nicht nur einen einzigen Kern mit der positiven Einheitsladung und dem abgerundeten Atomgewicht 1 kennt, sondern daß die positive Einheitsladung auch noch verbunden mit anderen Massen auftreten kann. Dabei entsteht dann immer wieder ein Atom mit den chemischen Eigenschaften des Wasserstoffes, da diese durch das Elektron bedingt werden, welches in seiner Bewegung, abgesehen von kleinen Korrekturen, nur

von der Ladung des Kernes und nicht von seiner Masse beeinflusst wird. Die verschiedenen Massen aber, die in Frage kommen, sind nun zwar auch nicht völlig, aber doch mit viel größerer Annäherung ganzzahligen Vielfachen der Wasserstoffkernmasse gleich als die klassischen Atomgewichte. So kennen wir heute 3 verschiedene Wasserstoffe mit dem abgerundeten Atomgewicht 1, 2 und 3. Man schreibt sie



indem man durch den Stellenzeiger links unten die Ladung und durch den links oben die abgerundete Masse bezeichnet.

In der folgenden Tabelle sind für die ersten 18 Elemente des klassischen periodischen Systems Daten angegeben¹⁾.

Tabelle 1.

Z	Symbol	A	Rel. Häufigkeit	Genaues Atomgewicht
0	n	1	100	1,0080
1	H	1	99,98	1,00778
		2	0,02	2,01363
		3	10 ⁻⁷	—
2	He	3	—	—
		4	100	4,00216
3	Li	6	8,3	6,0145
		7	91,7	7,0146
4	Be	8	0,05	—
		9	99,95	9,0155
5	B	10	20	10,0135
		11	80	11,0110
6	C	12	98,92	12,0036
		13	1,08	13,0039
7	N	14	99,62	14,008
		15	0,38	15,003
8	O	16	99,76	16
		17	0,04	17,0029
		18	0,20	18,0065
9	F	19	100	19,00
10	Ne	20	90,00	19,9967
		21	0,27	—
		22	9,73	21,9947
11	Na	23	100	22,997
12	Mg	24	77,4	—
		25	11,5	—
		26	11,1	—
13	Al	27	100	26,97
14	Si	28	89,6	27,9818
		29	6,2	—
		30	4,2	—
15	P	31	100	31,02
16	S	32	96	—
		33	1	—
		34	3	—
17	Cl	35	76	34,9796
		37	24	36,9777

Die erste Spalte enthält die Ladungszahl Z des Kernes und damit die Nummer des Elementes, die zweite gibt das übliche chemische Zeichen, die dritte das abgerundete Atomgewicht A, die vierte die Häufigkeit der Isotope in Prozenten, die fünfteschließlich das genaue Atomgewicht (vom Kern plus Elektronen) bezogen auf O = 16 für das in der überwiegenden Häufigkeit vorkommende Sauerstoffisotop.

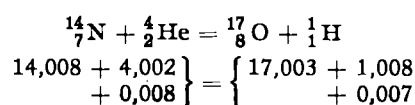
Man sieht, daß es Elemente gibt wie Fluor (F) oder Phosphor (P) von denen man noch keine stabilen Isotope

¹⁾ Die in der Tabelle angegebenen Werte sind massenspektroskopisch bestimmt und entsprechen dem Stand vom Jahre 1934. In mehreren Fällen bestanden Diskrepanzen zwischen diesen Werten und den aus Zertrümmerungsprozessen bzw. aus den Vorstellungen der Theorie abgeleiteten Werten; besonders auffällig war der Fall des Berylliums, wo der massenspektroskopische Wert sogar der tatsächlichen Stabilität widersprach. Inzwischen liegen neuere Werte vor, H. Bethe, Physic. Rev. 47, 633 [1935] und M. E. L. Oliphant, A. E. Kempton und Lord Rutherford, Proc. Roy. Soc. 150, 253 [1935] bestimmten die Massen neu aus Zertrümmerungsprozessen und Aston, Nature 135, 541 [1935] revidierte seine massenspektroskopischen Werte. Mit diesen neuen Werten sind die Schwierigkeiten behoben.

gefunden hat; bei anderen Elementen, wie Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C) oder Sauerstoff (O), sind isotope Elemente mit geringerem Prozentsatz zugemischt; schließlich gibt es auch Elemente, wie Bor (B) oder Chlor (Cl), die Gemische von Isotopen vergleichbarer relativer Häufigkeit sind. Am Anfang der Tabelle ist noch ein Element mit der Kernladungszahl 0, das vor einigen Jahren entdeckte Neutron, aufgeführt, von dem noch später die Rede sein wird. Daß die Massen nicht genau ganzzahlig sind, wird durch die letzte Spalte belegt. Die kleinen Abweichungen von der Ganzzahligkeit sind, wie sich nachher zeigen wird, von der allergrößten Bedeutung für die Beurteilung der Energieverhältnisse bei den Kernreaktionen.

3. Wir kommen jetzt zu den Methoden, die man anwenden kann, um die Kerne einander so weit zu nähern, daß Reaktionen möglich werden. Es war wieder *Rutherford*, der im Jahre 1919 die ersten derartigen Versuche ausführte. Er ging aus von den α -Strahlen, welche von gewissen radioaktiven Atomen, z. B. von RaC' geliefert werden, das sind He-Kerne, welche sich mit einer Geschwindigkeit von $1,92 \cdot 10^9$ cm/sec, also mit etwa $\frac{1}{18}$ Lichtgeschwindigkeit bewegen. Die kinetische Energie eines solchen Teilchens ist 10^{-5} erg. Verglichen mit den Energien, die im täglichen Leben vorkommen, ist diese Energie also recht klein, auf das einzelne Atom bezogen, ist es aber ein sehr großer Betrag. Man sieht das, wenn man etwa ausrechnet, wieviel Energie auf ein chemisches Atomgewicht, also auf 4 g He, entfallen würde, wenn alle Atome sich mit der genannten Geschwindigkeit bewegen würden. Man erhält in diesem Falle $6 \cdot 10^{18}$ erg, und das entspricht einer Energie von rund 200 000 kWh. Zum Vergleich sei angeführt, daß bei der Verbrennung von 2 g Wasserstoff (22 l unter gewöhnlichem Druck) zu Wasser nur $\frac{1}{14}$ kWh an Energie frei wird. Um die Energien zu messen, hat man in der Kernphysik ein neues Maß eingeführt. Man gibt an, wie groß die Potentialdifferenz in Volt ist, die eine Einheitsladung, z. B. ein Elektron, durchlaufen muß, um den darzustellenden Energiebetrag aufzunehmen. In diesen Einheiten, die man Elektronenvolt (abgekürzt eV) nennt, ist die Energie des oben genannten α -Teilchens $7,68 \cdot 10^6$ eV. Da wir im folgenden bei den Kernprozessen stets mit Energien von der Größenordnung 10^6 eV zu tun haben werden, soll von nun an für 1 Million Elektronenvolt abkürzend 1 MeV geschrieben werden. Die Energien, welche bei gewöhnlichen chemischen Prozessen auftreten, sind höchstens einige Elektronenvolt.

Läßt man solche α -Strahlen etwa in Stickstoff eintreten, so verlaufen die Begegnungen eines He-Kernes mit einem N-Kern in großer Überzahl ganz ähnlich wie der Zusammenstoß zweier Billardkugeln. Die Kerne werden mehr oder weniger aus ihrer Richtung abgelenkt, aber sie fliegen nach dem Zusammenstoß wieder unverändert weiter. Ganz gelegentlich aber kommt es vor, daß ein He-Kern nahezu zentral auf einen N-Kern zukommt. Ist das der Fall, dann kommen die Kerne, bevor sie wieder auseinander gehen könnten, sehr nahe zusammen, und dann haben sie Gelegenheit, mit einander zu reagieren. *Rutherford* beobachtete nämlich, daß bei der Ausführung des geschilderten Versuches in kleiner Menge Strahlen von großem Durchdringungsvermögen neu entstehen, die als Wasserstoffkerne oder Protonen großer Geschwindigkeit gedeutet werden müssen. Man spricht hier von Atomzertrümmerung, es scheint aber geeigneter, den Prozeß als Kernreaktion aufzufassen, die ähnlich wie eine gewöhnliche chemische Reaktion durch eine Gleichung dargestellt werden kann. Diese hat im vorliegenden Falle die Gestalt



Aus zwei Kernen mit den Ladungen 7 und 2, d. h. aus N und He, sind zwei neue Kerne mit den Ladungen 8 und 1, d. h. O und H entstanden. Dabei ist die Gesamtladung, auch die Gesamtmasse, vorausgesetzt, daß man nur die auf ganze Zahlen abgerundeten Atomgewichte beachtet, erhalten geblieben, denn es ist aus N mit dem Atomgewicht 14 und He mit dem Atomgewicht 4, O mit dem Atomgewicht 17 und H mit dem Atomgewicht 1 neu entstanden. Daß wirklich ein stabiles Sauerstoffatom mit dem Atomgewicht 17 existenzfähig ist, ersieht man übrigens aus Tabelle 1.

Das Gesetz der Erhaltung der Ladung scheint wirklich ohne weiteres ein genaues Naturgesetz zu sein. Das Gesetz der Erhaltung der Masse dagegen ist, wie die Relativitätstheorie uns gelehrt hat, nur dann genau erfüllt, wenn wir die Äquivalenz von Energie und Masse im Sinne der *Einstein*-schen Beziehung $\text{Masse} = \text{Energie}/\text{Quadrat der Lichtgeschwindigkeit}$ annehmen. Um diese Verhältnisse zu illustrieren, sind unterhalb der Reaktionsgleichung noch die in Frage kommenden Massen genauer angegeben. Auf Einheiten der dritten Dezimale abgerundet hat das N-Atom die Masse 14,008 und das He-Atom die Masse 4,002, dazu kommt aber noch die der kinetischen Energie des α -Teilchens äquivalente Masse von 0,008 Einheiten. Aus dieser Masse entsteht dann das O-Atom mit der Masse 17,003, das H-Atom mit der Masse 1,008, und es stehen nach dem Erhaltungssatz dann noch 0,007 Masseneinheiten als kinetische Energie der entstandenen Teilchen zur Verfügung. Es besteht nun der sehr bequeme Zusammenhang, daß 0,001 Masseneinheit einer Energie von rund 1 MeV entspricht; die bei der Reaktion frei gewordene Energie beträgt danach ungefähr 7 MeV, die hauptsächlich dem wegfliegenden Proton zugute kommt. Man sieht, wie vom Standpunkt der Energie eine weit getriebene Genauigkeit der Massenangaben von größter Bedeutung ist. Im vorliegenden Falle, wo die Summe der Atomgewichte links und rechts des Gleichheitszeichens nahezu gleich ist, kommt das allerdings noch nicht so deutlich zum Ausdruck wie in anderen Reaktionen, welche später betrachtet werden.

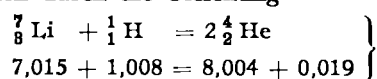
Von *Rutherford* wurden die Teilchen großer Geschwindigkeit nachgewiesen durch Beobachtung des momentanen Aufleuchtens, welches ein mit Zinksulfid belegter Schirm an der Auftreffstelle zeigt. Für die weitere Entwicklung ist es von großer Bedeutung gewesen, daß noch eine andere Methode besteht, mit deren Hilfe man die Bahn der Einzelteilchen photographieren kann. Läßt man die α -Teilchen oder auch Protonen oder Elektronen großer Geschwindigkeit durch mit Wasserdampf übersättigte Luft gehen und expandiert diese, so schlägt sich der Wasserdampf, wie *C. T. R. Wilson* entdeckte, vorzugsweise nieder um die bei dem Durchgang der Strahlen durch die Luft erzeugten Ionen. Die entstandenen Tröpfchenreihen können bei genügend starker Beleuchtung photographiert werden, ehe sie sich von ihrer Entstehungsstelle entfernt haben. So bekommt man Bilder, in denen man leicht den gewöhnlichen Zusammenstoß von He-Kernen mit N-Kernen zur Darstellung bringen kann. Sehr viel schwieriger war es, die Zertrümmerung zu beobachten. *Blackett* machte 23000 Aufnahmen, auf denen im ganzen 415000 α -Strahlenbahnen photographiert waren. Unter diesen fanden sich 8 Fälle, in denen die Bahn eines wegfliegenden Protons beobachtet werden konnte. Wenn 50000 α -Teilchen in Stickstoff absorbiert werden, so kommt es also nur einmal vor, daß der Kernzusammenstoß zu der durch die Gleichung dargestellten Kernreaktion führt.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurden nun die verschiedenen Elemente mit α -Strahlen beschossen und auf eventuelle Zertrümmerung beobachtet, sowohl in Cambridge durch *Rutherford* und seine Mitarbeiter, wie auch in Wien durch *Kirsch* und *Petersson*. Die Resultate sind nicht immer dieselben, die Wiener Beobachter glauben Zer-

trümmerung bei mehr Elementen festgestellt zu haben, als von der Cambridge Schule beobachtet wurde. Daß die Zertrümmerung wirklich existiert, darüber aber besteht Einigkeit.

4. In all diesen Versuchen wurden als Geschosse, die in die Kerne eindringen sollten, die natürlichen, von den radioaktiven Produkten gelieferten, α -Strahlen benutzt. Während der letzten Jahre setzten nun Bemühungen ein, positive Atomreste durch so hohe Potentiale künstlich zu beschleunigen, daß auch ihre Kerne nahe genug an die Kerne der Versuchsobjekte herankommen konnten, um in Reaktion zu treten. Ursprünglich war die Meinung, daß man zu diesem Zwecke Energien von 1 MeV und darüber würde erreichen müssen. Es hat sich aber gezeigt, zuerst im Jahre 1932 bei den Versuchen von *Cockroft* und *Walton*, daß man manchmal schon mit einigen hunderttausend Elektronenvolt, wenigstens bei den leichten Elementen mit kleiner Kernladungszahl, auskommt. Dieser günstige Umstand, der auf Grund der klassischen Mechanik unverständlich ist, findet seine einfache Erklärung nach den Gesetzen der Wellenmechanik. Um die prinzipielle Seite dieser Angelegenheit zu beleuchten, sei angenommen, daß uns Teilchen von 1 MeV zur Verfügung stehen, und daß wir diese auf ein Gebiet auftreffen lassen, in das sie nur unter Überwindung einer potentiellen Energie von 2 MeV eintreten können. Nach den klassischen Gesetzen wird das keinem der Teilchen gelingen, alle werden am Rande des Gebietes reflektiert. Das ist anders in der Quantentheorie. Hier ergibt sich, daß auch dann noch, wenn die zu überwindende potentielle Energie höher ist als die zur Verfügung stehende kinetische Energie, eine endliche Wahrscheinlichkeit dafür besteht, daß ein Teilchen die Grenze überschreiten kann. Es werden also zwar viele reflektiert, aber ein kleiner Teil, um so kleiner, je höher das zu überwindende Potential und je breiter der Potentialberg ist, dringt ein. Stellt man sich nun nach *Gamow* den Kern als ein Gebilde vor, in dessen Nähe das Potential zwar zunächst mit abnehmender Entfernung, wie das einer Punktladung, ansteigt, dann aber einen Höchstwert erreicht und danach wieder abfällt, so wird man selbst mit Teilchen, die den Potentialberg nach der klassischen Mechanik längst nicht überwinden können, dennoch Erfolg haben, falls sie nur in genügend großer Zahl verwendet werden können. Bei der künstlichen Erzeugung schneller Teilchen kann man nun relativ leicht wesentlich größere Teilchenzahlen erreichen, als von den verfügbaren radioaktiven Präparaten geliefert werden. So erklärt sich der Erfolg mit relativ niedrigen Spannungen.

Als charakteristisches Beispiel sei die Kernreaktion gewählt, die auftritt, wenn Lithium mit Wasserstoffkanalstrahlen hoher Geschwindigkeit bombardiert wird. Sie läßt sich darstellen durch die Gleichung



Aus dem Lithiumisotop der Masse 7 und einem Wasserstoffkern der Masse 1 entstehen also 2 Heliumatome der Masse 4. Die Energieverhältnisse werden durch die, wieder auf die dritte Dezimale abgerundeten, Atomgewichte beleuchtet. Die reagierenden Massen sind zusammen $7,015 + 1,008 = 8,023$; die kinetische Energie der mit einigen Hunderttausend Elektronenvolt beschleunigten Wasserstoffkanalstrahlen würde erst in der folgenden Dezimale der Masse erscheinen und ist deshalb vernachlässigt. Aus diesen Massen entstehen nun 2 Heliumatome, deren Gesamtmasse nur 8,004 beträgt, es bleibt also ein Massenüberschuß von 0,019 verfügbar, und dieser tritt als kinetische Energie der He-Teilchen auf. Da der Impuls der auftreffenden H-Teilchen klein ist gegen den in einem He-Teilchen erzeugten Impuls, wollen wir ihn hier vernachlässigen. In dieser Näherung muß dann auch der gesamte erzeugte Impuls Null sein, d. h. die beiden

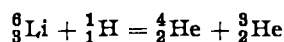
He-Teilchen müssen in entgegengesetzter Richtung mit gleicher Geschwindigkeit fortfliegen. Jedes derselben hat dabei die Hälfte der verfügbaren Energie aufgenommen, in Masseneinheiten also 0,0095, und da, wie schon früher bemerkt, 0,001 Masseneinheit rund 1 MeV entspricht, bedeutet das die große Energie von rund 9 MeV für jedes He-Teilchen. Der Prozeß ist u. a. von *Kirchner* mit der *Wilson-Kammer* photographiert worden, seine Aufnahmen lassen sehr schön die Bahnen der gleichzeitig mit gleicher Energie nach entgegengesetzten Richtungen fortfliegenden He-Kerne erkennen.



Abb. 1. Lithium durch Wasserstoffkanalstrahlen zertrümmert, die entstandenen He-Teilchen fliegen nach entgegengesetzter Richtung fort.

Der Prozeß ist prinzipiell sehr interessant, denn es ist hier auf Kosten der Masse verfügbare, kinetische Energie in großem Ausmaße entstanden. Die 9 MeV für jedes entstandene He-Teilchen bedeuten nämlich, daß man rund 500 000 Kilowattstunden gewinnen würde bei der Umsetzung von 7 g Li mit 1 g H zu He. Das ist eine Energiequelle von weitaus größerer Ergiebigkeit als die jetzt in der Technik gebräuchlichen. Von einer praktischen Anwendung ist man indessen noch sehr weit entfernt. Infolge des Umstandes nämlich, daß nur sehr wenige der beschleunigten Protonen den Kernprozeß ausführen und die übergroße Mehrzahl ihre Energie sonstwie verliert, ist der Gesamtwirkungsgrad so klein, daß man alles in allem viel mehr Energie für die Beschleunigung verwenden muß, als nachher in den seltenen Kernprozessen frei wird.

In Tabelle 1 sieht man, daß das gewöhnliche Lithium aus 2 Isotopen von den runden Atomgewichten 6 und 7 besteht. Der Prozeß, von dem oben die Rede ist, findet am Kern des Atoms ${}^6_3\text{Li}$ statt; es steht zu erwarten, daß am begleitenden Atom ${}^7_3\text{Li}$ gleichzeitig noch ein anderer Prozeß stattfindet. In der Tat sind die von natürlichem Li gelieferten α -Strahlen nicht einheitlich; es ist *Rutherford* und seinen Mitarbeitern gelungen, die Isotopen 6 und 7 rein darzustellen und sicherzustellen, daß der am Isotop 6 verlaufende Prozeß durch die Gleichung



beschrieben wird. Es besteht also hier neben dem gewöhnlichen ${}^4_2\text{He}$ das bis dahin unbekannte Isotop ${}^3_2\text{He}$ mit dem Atomgewicht 3. Noch sehr viele andere interessante Kernreaktionen, z. B. mit Hilfe des schweren Wasserstoffisotops¹⁾, hat man herbeiführen können. Wir gehen darauf nicht ein, sondern wenden uns jetzt der Entdeckung zweier neuer Elementarteilchen zu.

5. Bis hierhin sind wir als solchen nur dem Proton (${}^1_1\text{H}$) und dem gewöhnlichen, negativ geladenen Elektron, das wir mit e_- bezeichnen wollen, begegnet. Daneben hat

man in neuerer Zeit die Existenz des Neutrons ${}^1_0\text{n}$, eines Teilchens mit der Ladung 0 und dem abgerundeten Atomgewicht 1, und die des Positrons e_+ , eines Korpuskels mit der positiven Einheitsladung und der Masse des gewöhnlichen Elektrons, festgestellt. Das Neutron wurde als Element des Stellenzeigers 0 in die Tabelle 1 aufgenommen. Über sein genaues Atomgewicht sind die Meinungen zur Zeit noch geteilt; die englische Schule bevorzugte bis vor kurzem den Wert 1,0067, die französische dagegen den Wert 1,0098, neuere Versuche in Cambridge führen zu dem Wert 1,0080, der in der Tabelle Aufnahme gefunden hat. An der Entdeckung des Neutrons sind hauptsächlich drei Forscher beteiligt. *Bothe* stellte im Jahre 1930 fest, daß leichte Elemente und insbesondere Beryllium (Be) beim Beschießen mit α -Strahlen eine sehr durchdringende Strahlung erzeugen, die zunächst als γ -Strahlung gedeutet wurde. Als das Ehepaar *Joliot-Curie* feststellte, daß diese γ -Strahlung imstande war, aus wasserstoffhaltigen Substanzen, wie Paraffin, Protonenstrahlen in größerer Zahl auszulösen, d. h. den vorhandenen H-Kernen große Geschwindigkeiten zu erteilen, war das zunächst unerklärlich. *Chadwick* deutete dann im Jahre 1932 diese merkwürdige Beobachtung durch die Hypothese, daß ein Teil der sogenannten γ -Strahlung aus Neutronen, d. h. Teilchen der Ladung Null und relativ großer Masse, bestehe, die selber kaum ionisieren und erst dadurch beobachtbar werden, daß sie beim Zusammenstoß mit anderen gewöhnlichen Kernen, wie z. B. ${}^1_1\text{H}$ an diese ihre kinetische Energie übertragen. Die ausgelösten geladenen Kerne haben dann wieder die normale Ionisationswirkung, wodurch sie nachweisbar sind. So ist es beispielsweise gelungen, in der mit Wasserstoff beschickten *Wilson-Kammer*, deren Gas mit Neutronen bestrahlt wird, Spuren der ausgelösten Protonenstrahlen, die scheinbar ohne Anlaß mitten in der Kammer beginnen, zu photographieren. Es

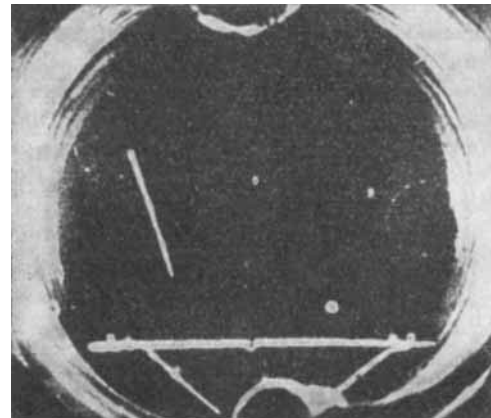
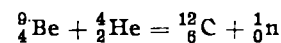


Abb. 2. Protonenstrahl im Gas der *Wilson-Kammer* durch ein Neutron ausgelöst.

ist wohl sicher, daß z. B. im Falle des Berylliums die Neutronenstrahlung auf Grund einer Kernreaktion entsteht, die durch folgende Gleichung dargestellt wird:



und bei der also aus Be und He neben dem Neutron ein stabiler C-Kern entsteht.

Das Positron, ein Teilchen von der Masse des Elektrons, also 1850mal so leicht wie ein Wasserstoffatom und im Gegensatz zum negativen Elektron mit einer positiven Einheitsladung ($4,77 \cdot 10^{-10}$ elektrostatischer Einheiten) versehen, wurde im gleichen Jahre 1932 von *Anderson* entdeckt. Er fand in der *Wilson-Kammer* neben den Bahnen von gewöhnlichen Elektronen, die durch die kosmische Ultrastrahlung ausgelöst werden, gleichzeitig andere, ähnlich

¹⁾ Vgl. z. B. *Harteck*, Atomzertrümmerung mit normalem und schwerem Wasserstoff, diese Ztschr. 47, 708 [1934].

aussehende Bahnen, die aber im vorhandenen Magnetfeld nach der entgegengesetzten Seite gekrümmt waren. Die Bewegungsrichtung konnte dadurch festgestellt werden, daß man die Teilchen in der Kamme durch eine Bleiplatte hindurchgehen ließ. Nach dem Durchgang ist die Geschwindigkeit vermindert und die Bahn daher stärker gekrümmt. So konnte zweifelsfrei festgestellt werden, daß die Teilchen wirklich positiv geladen und nicht etwa in umgekehrter Richtung laufende negative Elektronen waren.

Unter den Entstehungsmöglichkeiten der Positronen ist eine von ganz besonderem Interesse. Nach den obigen Angaben ist das Atomgewicht eines Elektrons in der üblichen chemischen Skala rund $\frac{1}{2000}$, die in ihm konzentrierte Masse entspricht daher einer Energie von 0,5 MeV. Da das Positron die gleiche Masse hat, kommt ihm derselbe Energiebetrag zu. Die Ladungen von Elektron und Positron können sich gegenseitig zu Null kompensieren. Man wird daher zu der Fragestellung geführt, ob es nicht möglich sei, γ -Strahlung von genügender Durchdringungsfähigkeit, so daß ihr Energiequantum $h\nu$ den Wert von 1 MeV oder darüber beträgt, in Materie in Form von Elektronen und Positronen zu transformieren. Diese Materialisierung strahlender Energie hat man in der Tat beobachten und den Prozeß in der *Wilson-Kammer* photographieren können. Läuft der γ -Strahl durch den leeren Raum, so besteht kein Anlaß zu einem Materialisierungsprozeß. Tritt er aber in der Nähe eines Kernes in das räumlich auf ganz kurzen Strecken stark sich ändernde Kernfeld, dann bekommt der Prozeß eine endliche Wahrscheinlichkeit. Es ist das eine Folgerung, welche spezifisch für die Quantentheorie ist und beispiels-

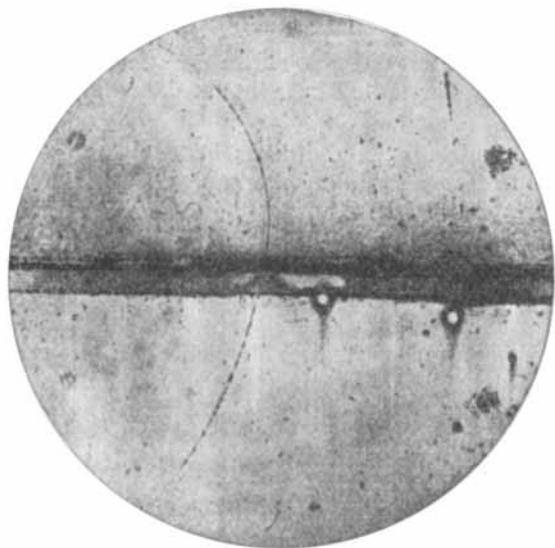


Abb. 3. Spur eines Positrons durch ein Magnetfeld gekrümmt; das Positron geht durch eine Bleiplatte hindurch.

weise auch übertragen werden muß auf den Fall, daß zwei Lichtbündel einander durchdringen. Hier hat man im Gegensatz zu den Folgerungen der klassischen Elektrodynamik zu erwarten, daß eine, allerdings außerordentlich geringe, Streuung von Licht an Licht existieren muß. Das Positron, dessen Existenzmöglichkeit schon von *Dirac* vorhergesagt worden war, hat gewöhnlich keine lange Lebensdauer. Bald findet es ein Elektron, mit dem zusammen dann der umgekehrte Prozeß eingegangen wird. Die beiden Teilchen vereinigen sich, und der Energiewert ihrer Massen tritt in Form zweier entgegengesetzt gerichteter γ -Strahlen von je 0,5 MeV Quantenenergie in Erscheinung. Das ist eine γ -Strahlung, die stets bei der Absorption von Positronen in der Materie beobachtet wird.

6. Bei den bisher besprochenen Kernprozessen sind stets nur stabile Kerne, so wie wir sie in Tabelle 1 angegeben finden, entstanden. Am Anfang des vergangenen Jahres 1934 hat das Ehepaar *Joliot-Curie* zum erstenmal eine Kernreaktion entdeckt, bei der ein instabiles, radioaktives Element gebildet wird. Bestrahlt man Aluminium mit

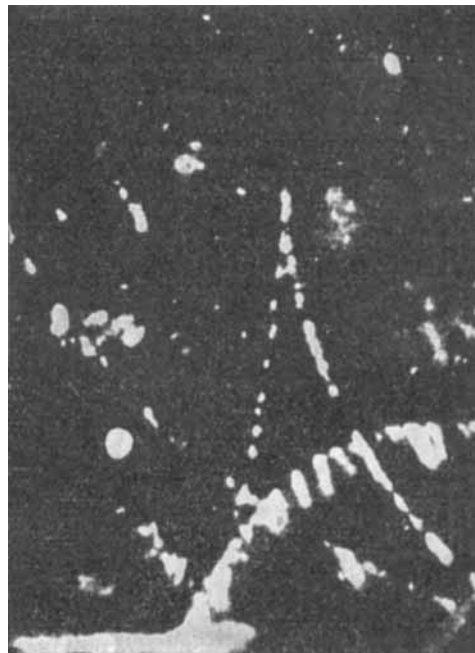
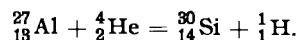


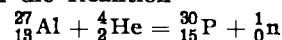
Abb. 4. Aus γ -Strahlung entsteht ein Positron und ein Negatron. Die Ladungen verschiedener Vorzeichen sind an den entgegengesetzten Krümmungen der Bahnen zu erkennen.

α -Strahlen, dann können neben Protonen noch Neutronen und Positronen nachgewiesen werden. Daß Protonen entstehen, ist leicht verständlich, offenbar findet der folgende Prozeß statt:

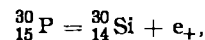


In der Tat ist nach Ausweis der Tabelle 1 das Silicium ${}_{14}^{30}\text{Si}$ ein schon früher beobachtetes stabiles Si-Isotop.

Versucht man in ähnlicher Weise eine Gleichung für eine Umwandlung, bei der ein Neutron entsteht, aufzustellen, so wird man auf die Reaktion



geführt. Es muß dann ein Element mit der Kernladungszahl 15, d. h. Phosphor, entstehen, aber dieser Phosphor kann nicht das chemische Atomgewicht 31, sondern muß nur das Gewicht 30 besitzen. Ein solches Isotop von Phosphor hat man, wie aus Tabelle 1 hervorgeht, bisher nicht finden können, es ist einzig nur Phosphor mit dem Atomgewicht 31 bekannt. Man kann sich nun aber vorstellen, daß der neue Phosphor ${}_{15}^{30}\text{P}$ selber wieder zerfällt unter Aussendung eines Positrons. Dann entsteht nach der Gleichung

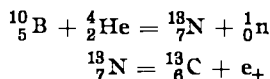


da die Positronenmasse in der Näherung der Gleichung vernachlässigbar klein ist, wieder das Silicium ${}_{14}^{30}\text{Si}$, von dem wir schon oben sahen, daß es als stabiler Kern existenzfähig ist. In dieser Weise hätte man sowohl das Auftreten von Protonen, wie das von Neutronen und Positronen erklärt.

Joliot-Curie haben nun erstens nachweisen können, daß mit α -Strahlen bestrahltes Aluminium nach Aufhören der Bestrahlung noch einige Zeit unter Aussendung von Positronen radioaktiv ist. Die Halbwertszeit beträgt $3\frac{1}{4}$ min. Zweitens konnten sie den chemischen Nachweis führen, daß die Radioaktivität verknüpft ist mit einem chemischen

Element, das sich in seinen Reaktionen wie Phosphor verhält. So wird bei der raschen Auflösung des bestrahlten Aluminiums in Salzsäure die Radioaktivität vom entweichenden Wasserstoff, offenbar als Phosphorwasserstoff, mitgeführt.

Ähnlich wie Al verhält sich auch das Bor, von dem gezeigt werden konnte, daß die Kernreaktion nach den Gleichungen

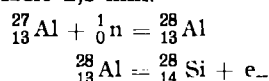


verläuft, denn es konnte der radioaktive Stickstoff, dessen Halbwertszeit 14 min beträgt, nachgewiesen werden. Dieser Nachweis war historisch der allererste, der ausgeführt wurde.

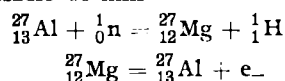
Nach Bekanntwerden der Versuche von *Joliot-Curie* wurden nicht nur von anderer Seite ihre Richtigkeit bestätigt und neue Fälle künstlicher Radioaktivität entdeckt, sondern es wurden auch in England und Amerika mit Hilfe von künstlich beschleunigten Protonen (${}^1_1\text{H}$) und Deutonen (${}^2_1\text{H}$) einige radioaktiv zerfallende neue Elemente erzeugt.

7. Der Kreis wurde schließlich ganz beträchtlich erweitert durch Versuche, die in Rom von *Fermi* und seinen Mitarbeitern (*Amaldi, d'Agostino, Pontecorvo, Rasetti, Segrè*) ausgeführt wurden. Die Resultate sind zusammengefaßt in zwei Arbeiten, die in den Jahren 1934 und 1935 in den *Proc. Roy. Soc. London* veröffentlicht worden sind. Alle Umwandlungen wurden in den bisher besprochenen Versuchen dadurch herbeigeführt, daß ein geladener Kern wie ${}^4_2\text{He}$, ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ usw. so beschleunigt wurde, daß er unter Überwindung der elektrostatischen Abstoßung des umzuwandelnden Kernes in diesen eindringen konnte. *Fermi* und seine Mitarbeiter ließen nun statt dessen die ungeladenen Neutronen auf die Kerne wirken²⁾. Die elektrostatische Abstoßung fällt jetzt weg, und es zeigte sich, daß nun selbst mit den schwersten hochgeladenen Kernen Reaktionen eintraten und neue radioaktive Elemente gebildet wurden. Die Neutronenquelle war ein Gemisch von Radiumemanation (bis 800 Millicurie) mit Beryllimpulver in einem Glasrohr; in der Nähe von dieser Quelle wurden die verschiedenen Substanzen, meistens in Form von Zylindern, die über das Glasrohr geschoben wurden, der von ihr ausgehenden Neutronenbestrahlung ausgesetzt und nach Bestrahlung auf erregte Radioaktivität mit einem *Geiger-Müllerschen* Zählrohr geprüft. Von 60 untersuchten Elementen konnten so 40 aktiviert werden. Sie senden alle, soweit sie geprüft werden konnten, und im Gegensatz zu den mit α -Strahlen erzeugten radioaktiven Elementen keine Positronen, sondern Elektronen aus. Die Art der Reaktionen, sowie die Hauptgesetzmäßigkeiten können gut im Spezialfalle des Aluminiums, eines reinen Ausgangselementes ohne beigemischte Isotope (siehe Tabelle 1), diskutiert werden. Es wurde eine künstliche Radioaktivität festgestellt, die einen Abfall mit drei verschiedenen Halbwertszeiten zeigt. Diesen drei verschiedenen Zeiten entsprechen nach *Fermi* drei verschiedene Umwandlungen

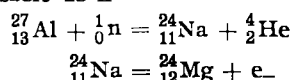
a) Halbwertszeit 2,3 min.



b) Halbwertszeit 10 min

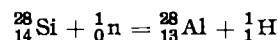


c) Halbwertszeit 15 h



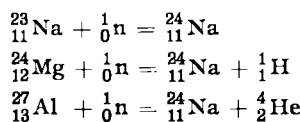
²⁾ Vgl. hierzu die Ausführungen von *I. Noddack* über das Element 93, diese Ztschr. 47, 653 [1934]; ferner den Beitrag „Kurzlebige Transurane“, *Der deutsche Chemiker* Nr. 2, S. 15 [1935].

Es konnte mit chemischen Mitteln gezeigt werden, daß der Träger mit 10 min Halbwertszeit in der Tat ein Magnesiumisotop und der mit 10 h Halbwertszeit ein Natriumisotop ist. Bei den ersten Versuchen war die radioaktive Erregung mit 2,3 min Halbwertszeit nicht gefunden worden. Sie ist auch bei der gewöhnlichen Versuchsanordnung außerordentlich schwach. Es wurde aber beobachtet, daß manche Aktivitäten sehr verstärkt werden können, wenn in die nähere Umgebung der bestrahlten Substanz größere Mengen Wasser, Paraffin, kurz Körper, die viel Wasserstoff enthalten, gebracht werden. Zu diesen verstärkten Aktivitäten gehört die mit 2,3 min Halbwertszeit; sie kommt erst recht zum Vorschein, wenn Aluminium unter Wasser mit Neutronen bestrahlt wird. *Fermi* deutet diesen merkwürdigen Befund folgendermaßen: Die Neutronen werden von der Quelle mit großen Energien fortgeschleudert. Haben sie nun Gelegenheit, auf viele Wasserstoffkerne aufzutreffen, dann verlieren sie dadurch nach mehreren Zusammenstößen ihre kinetische Energie. Erst mit diesen ganz langsamen Neutronen können manche Reaktionen mit relativ guter Ausbeute ausgeführt werden. Es scheint in der Tat nahelegend, daß eine Reaktion, wie die unter a) genannte, bei der ein Neutron sozusagen an den Kern geheftet wird, am besten mit langsamen Neutronen gelingen muß. Für das Produkt mit 2,3 min Halbwertszeit, das aus Aluminium entsteht, wurde Isotopie mit Aluminium nicht chemisch nachgewiesen. Sie folgt aber aus der Tatsache, daß bei der gewöhnlichen Bestrahlung von Silicium auch ein Produkt mit 2,3 min Halbwertszeit entsteht, das die chemischen Eigenschaften des Aluminiums hat. Diese Reaktion wird durch die Nähe von Wasser nicht verbessert und verläuft sehr wahrscheinlich nach der Gleichung



Sie liefert offenbar dieselbe Substanz, wie die, welche im Falle a) durch langsame Neutronen aus Aluminium gebildet wird.

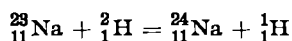
Am Beispiel des Aluminiums haben wir gesehen, wie durch Neutronenbestrahlung drei radioaktive Elemente entstehen können: Radio-Aluminium, Radio-Magnesium und Radio-Natrium. Man kann vorliegende Systematik auch von einer anderen Seite betrachten, indem man sich fragt, wie durch Neutronenbestrahlung ein bestimmtes Element, z. B. das radioaktive Natrium ${}^{24}_{11}\text{Na}$, hergestellt werden kann. Da gibt es dann offenbar drei Möglichkeiten, die durch die folgenden drei Gleichungen dargestellt werden:



Alle drei Reaktionen sind in der Tat beobachtet. Die erste findet wieder nur dann in erheblichem Maße statt, wenn die Neutronen durch wasserstoffhaltige Substanzen in der Umgebung verlangsamt werden. Die zweite wird bei der Bestrahlung von Magnesium in der Versuchsanordnung ohne Wasser beobachtet, und die dritte ist die, über welche schon oben unter c) berichtet wurde.

Das radioaktive Natrium ${}^{24}_{11}\text{Na}$ mit seiner Halbwertszeit von 15 h wird wahrscheinlich praktisch, auch auf biologischem Gebiet, von Bedeutung werden. Es liefert neben seiner β -Strahlung, deren Maximalenergie von *Lawrence* zu $1,2 \cdot 10^6$ Volt bestimmt wurde, noch eine durchdringende γ -Strahlung mit einer Quantenenergie von 5,5 MeV. Nun ist zwar die Menge des bisher bei den *Fermischen* Versuchen gebildeten Radio-Natriums sehr gering, aber *Lawrence* hat in der gleichen Arbeit, die Anfang dieses Jahres erschienen ist, gezeigt, wie die Substanz in viel größerer Menge künstlich erzeugt werden kann durch Bestrahlung von

Natrium oder Natriumsalzen mit hochbeschleunigten Deutonen (Schwerer Wasserstoff). Es findet dabei eine Reaktion statt, welche nach der Gleichung



verläuft. *Lawrence* hat schon mit seiner Apparatur, die 1 μA bei einer Beschleunigung durch $2,15 \cdot 10^6$ V liefert, Radionatrium-Präparate gemacht, die, wie er berichtet, 10^7 β -Teilchen pro sec lieferten. Er glaubt, bald mehr als 100mal stärkere Präparate herstellen zu können.

8. Es bleibt schließlich, nachdem heute so viele verschiedene Elementarteilchen bekannt geworden sind, noch die Frage zu erörtern, aus welchen Bestandteilen die Kerne voraussichtlich aufgebaut sind. *Heisenberg*³⁾ vertritt die Ansicht, daß man die Kerne zusammengesetzt denken soll aus Protonen und Neutronen. Die Protonen üben aufeinander die *Coulombsche* Abstoßung aus. Nimmt man nun an, daß in Entfernungen von der Größenordnung der Kerndimensionen zwischen den Neutronen untereinander und zwischen Protonen und Neutronen Anziehungskraft

³⁾ „Die Rolle der Neutronen beim Kernaufbau“, diese Ztschr. 46, 799 [1933].

besteht, wobei die Anziehung zwischen den letztgenannten wesentlich größer ist als die zwischen zwei Neutronen, dann kann man in der Tat die Existenzfähigkeit einer begrenzten Zahl stabiler Kerne, wie sie in der Natur beobachtet wird, verständlich machen. Baut man zu viele Protonen in den Kern ein, so wird er instabil infolge der *Coulombschen* Abstoßung. Das kann man kompensieren durch Hinzufügung von Neutronen, aber wenn die Neutronenzahl zu groß wird, dann kann man wieder Energie gewinnen und die Stabilität erhöhen dadurch, daß ein Neutron unter Abspaltung eines Elektrons zu einem Proton wird. Daß ein solches Elektron erst entstehen muß und nicht von Anfang an da ist, dürfte kein Hindernis für das Verständnis bilden, nachdem wir gesehen haben, daß Elektronen und Positronen durch Materialisierung von Strahlung entstehen und auch wieder selbst zerstrahlt werden können. Wie sich das Bild über die Zusammensetzung der Kerne in Zukunft noch gestalten mag, eines ist jetzt schon sicher, nämlich, daß wir heute schon vielerlei Methoden besitzen, um die Kerne zu zerlegen, um so nicht nur bekannte chemische Elemente in einander umzuformen, sondern auch neue, bisher unbekannte, Elemente zu erzeugen. [A. 54.]

Die Bedeutung der physikalischen Chemie für die angewandte Elektrochemie.¹⁾

Von Prof. Dr. G. GRUBE, Stuttgart.

(Eingeg. 11. Juni 1935)

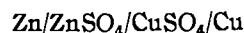
In einem Brief vom 20. März 1800 teilte *Volta* dem Präsidenten der Royal Society in London die Entdeckung der nach ihm benannten Säule mit und stellte damit eine Stromquelle zur Verfügung, die die Möglichkeit eröffnete, die elektrolytische Wirkung des Stromes auf wäßrige Lösungen und auf Salzschnmelzen zu untersuchen. Wir können diesen Zeitpunkt als die Geburtsstunde der wissenschaftlichen Elektrochemie bezeichnen. In den folgenden Jahren untersuchten zahlreiche Forscher die Zersetzungserscheinungen, die beim Durchgang des Stromes durch Salzlösungen auftreten. Man fand die Zerlegung des Wassers in gasförmigen Wasserstoff und Sauerstoff, und *Davy* krönte diese Forschungen im Jahre 1807 durch die Darstellung der Alkalimetalle Kalium und Natrium.

Die wissenschaftliche Forschung der nächsten Jahrzehnte beschäftigte sich zunächst mit der Untersuchung der Gesetzmäßigkeiten des von der *Volta'schen* Säule gelieferten Stromes. *Ohm* entdeckte 1827 das nach ihm benannte Gesetz, und 1833 fand *Faraday* den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen der aufgewendeten Strommenge und der Menge der Zersetzungsprodukte der Elektrolyse.

Ein anderes Ziel war die Verbesserung der als einzige Stromquelle verfügbaren galvanischen Elemente²⁾. Schon *Volta* hatte seine Säule durch eine Batterie aus einzelnen Glaszellen ersetzt und so die bei der Säule unvermeidlichen Nebenschlüsse beseitigt. Ein viel untersuchtes Problem war durch die Tatsache gegeben, daß die von galvanischen Elementen gelieferten Ströme nach Einschalten des Elementes dauernd schwächer wurden. Das Ergebnis dieser Untersuchungen, an denen *Schönbein* maßgebend beteiligt war, bestand in der Feststellung, daß die Erscheinung auf die Polarisation durch den entladene Wasserstoff zurückzuführen sei.

Damit war der Weg bereitet zur Anwendung der Depolarisatoren, und *Grove* konstruierte 1833 das erste derartige Element, in dem Platin in Salpetersäure als Depolarisator als positive Elektrode diente. 1840 ersetzte

Cooper das Platin durch Kohle bzw. Graphit, und 1841 verwendete *Bunsen* die von ihm zuerst hergestellte *Kunstkohle* als Elektrode. Schon vorher, im Jahre 1826, hatte *Daniell* mit der Kombination



eine neue Art von Elementen vorgeschlagen, bei denen nicht mehr die Entladung des Wasserstoffes, sondern die Metallabscheidung der elektromotorisch wirksame Vorgang an der positiven Elektrode ist.

Das Zink-Kohle-Element erfuhr dann seine wichtigste Ausgestaltung durch *Leclanché* 1865, der Braunstein als festen Depolarisator verwandte. Seine heutige Form erhielt dieses Element durch *Lessing* in Nürnberg.

Trotz all dieser Fortschritte war die in galvanischen Elementen erzeugte elektrische Energie viel zu teuer, als daß man daran denken konnte, eine industrielle Produktion auf Grund elektrolytischer oder elektrothermischer Verfahren aufzubauen. Eine geringfügige Anwendung fand die Elektrolyse schon um die Mitte des neunzehnten Jahrhunderts, und hier begegnen wir unter den Pionieren dieser ersten industriellen Anwendung der Elektrolyse dem Manne, der durch sein Wirken die heutige Entwicklung ermöglicht hat, *Werner von Siemens*. *Siemens*³⁾ meldete 1842 in Preußen ein Patent an, das die galvanische Vergoldung und Versilberung aus der Cyanid- bzw. Thiosulfatlösung schützte. Er hat dann im Jahre 1866 durch die Entdeckung des dynamo-elektrischen Prinzips den Weg bereitet für die heutige Entwicklung der Elektrotechnik und damit auch der technischen Elektrochemie.

*Heß*⁴⁾ hat darauf hingewiesen, daß andererseits in den Anfangszeiten der Wunsch, elektrochemische Verfahren in Betrieb zu bringen, die Entwicklung des Dynamobaues gefördert hat. Die ersten großen Dynamomaschinen, die in Deutschland aufgestellt wurden, dienten zur elektrolytischen Metallabscheidung. Bei der norddeutschen Affinerie in Hamburg wurde 1875 die Gewinnung von Kupfer und Gold durch Elektrolyse und um die gleiche Zeit die elektrolytische Gewinnung von Kobalt in Uhlmannsdorf

¹⁾ Zusammenfassender Vortrag auf der 40. Hauptversammlung der Deutschen Bunsengesellschaft vom 30. Mai bis 2. Juni in Berlin.

²⁾ Näheres über die historische Entwicklung der galvanischen Elemente bei *A. Güntersulze*, Galvanische Elemente, Verlag von Wilhelm Knapp, Halle 1928, S. 46 ff.

³⁾ *Werner von Siemens*, Lebenserinnerungen, Verlag Julius Springer, Berlin 1892, S. 88.

⁴⁾ *J. Heß*, Chem. Ind. 52, 1 [1929].