

DIE
UMWANDLUNGEN
DER CHEMISCHEN
ELEMENTE

VON

ARTHUR HAAS

DR. PHIL., PROFESSOR FÜR PHYSIK AN DER UNIVERSITÄT
IN WIEN

MIT 31 ABBILDUNGEN



WALTER DE GRUYTER & CO.

VORMALS G. J. GÖSCHEN'SCHE VERLAGSHANDLUNG · J. GUTTENTAG, VERLAGS-
BUCHHANDLUNG · GEORG REIMER · KARL J. TRÜBNER · VEIT & COMP.

BERLIN UND LEIPZIG 1935

Alle Rechte, insbesondere das Übersetzungsrecht
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1935 by Walter de Gruyter & Co., Berlin W 10

Archivnummer 52 54 35
Druck von Walter de Gruyter & Co., Berlin W 10.
Printed in Germany.

DR. PARKE REXFORD KOLBE

**PRÄSIDENTEN DES DREXEL-INSTITUTE IN PHILADELPHIA
FRÜHER PRÄSIDENTEN DES POLYTECHNIC INSTITUTE
OF BROOKLYN**

GEWIDMET

Vorwort.

Unter den wissenschaftlichen Leistungen der letzten drei Jahre haben vielleicht wenige so viel Interesse in weitesten Kreisen erweckt wie die umwälzenden Entdeckungen, die in dieser Zeit der physikalischen Forschung glückten. Sie enthüllte neue Urbau- steine der Materie; sie vermochte in sicherem Experimente die Entstehung und Vernichtung von Materie nachzuweisen; sie entdeckte in alltäglichsten Stoffen nicht unbeträchtliche und dennoch früher unbekannte Beimengungen. Am gewaltigsten aber waren die Fortschritte in der künstlichen Zerlegung und Umwandlung der chemischen Grundstoffe und in der künstlichen Herbeiführung von Radioaktivität; durch eine Fülle ver- blüffender Experimente sind heute alte alchimistische Ideen in modernem Gewand und auf exakter Grundlage Wirklichkeit geworden. Ein neuer physikalisch-chemischer Wissenszweig ist in Entwicklung, der vielleicht ungeahnte Möglichkeiten künftiger technischer Verwertung in sich birgt.

Von diesen neuen Entdeckungen soll das vorliegende Büchlein, das aus Wiener Universitätsvorlesungen hervor- gegangen ist, zusammenfassend in möglichst leicht verständ- licher Form berichten. Der Verfasser hofft seine Darstellung auch dem Bedürfnis solcher Leser angepaßt zu haben, die nur mit den bekanntesten Tatsachen der Physik, nicht aber mit deren modernen Einzelheiten vertraut sind.

Herzlich sei den Herren Dr. Eugen GUTH, stud. phil. Herbert Ph. ECKSTEIN und stud. phil. Josef MAYERHÖFER für die freund- liche Hilfe bei dem Lesen der Korrektur gedankt.

Wien, im April 1935.

Arthur Haas.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Erster Vortrag. Die Materialisation des Lichtes.....	1
(Die Eigenenergie der Materie — Die Photonen — Die γ -Strahlen — Bahnphotographien von α - und β -Teilchen — Die Positronen — Die DIRACSche Theorie — Erzeugung von Elektronenpaaren durch γ -Strahlung — Die Dematerialisation)	
Zweiter Vortrag. Die Grundstoffarten.....	22
(Emanation und Heliumbildung — Röntgenspektroskopie und natürliches Grundstoffsystem — Isotopie und Massenspektroskopie — Der doppelt und dreifach schwere Wasserstoff — Die Kernladung)	
Dritter Vortrag. Die Mittel der Atomzertrümmerung...	45
(Atomkerne als Projektile — Die α -Teilchen — Die Protonen — Künstliche Wasserstoffstrahlen — Die LAWRENCEsche Methode der Protonenbeschleunigung — Die Deutonen — Die Neutronen — Der Nachweis von Atomtrümmern — Das Neutrino — Der Spin der materiellen Urteilchen)	
Vierter Vortrag. Die Ergebnisse der Atomzertrümmerung.	67
(Die Zertrümmerung des Lithiums und Bors — Die Zertrümmerung des Berylliums — Die Zertrümmerung des schweren Wasserstoffs durch Deutonen — Die Bildung von Helium vom Atomgewicht 3 aus schwerem Wasserstoff — Die Spaltung der Deutonen in Protonen und Neutronen — Zertrümmerungen durch α -Teilchen — Die Kernresonanz des Aluminiums — Die künstliche γ -Strahlung)	
Fünfter Vortrag. Die künstliche Radioaktivität	89
(Die natürliche Radioaktivität — Die Umwandlungsreihen — Die Entdeckung der künstlichen Radioaktivität — Der chemische Nachweis der Grundstoffumwandlungen — Aktivierung durch α -Teilchen — Aktivierung durch Protonen und Deutonen — Aktivierung durch Neutronen — Die bekannten künstlichen Radioelemente — Die Umwandlungen der künstlichen Radioelemente)	
Anmerkungen.....	105
Literaturverzeichnis.....	112
Namenverzeichnis.....	115
Sachverzeichnis.....	117

Verzeichnis der Abbildungen.

1. Bahnen von α -Teilchen
 2. Bahn eines β -Teilchens
 3. Spur des ersten, von ANDERSON entdeckten Positrons
 - 4, 5. Schauer von Positronen und Elektronen, hervorgerufen durch die kosmische Strahlung
 6. Erzeugung eines Elektronenpaares durch ein Lichtquant
 7. L-Serie benachbarter Grundstoffe
 8. Schematische Darstellung des Massenspektrographen von BAINBRIDGE
 9. Massenspektren von Germanium und Tellur
 - 10—12. Massenspektroskopischer Nachweis der Trennung der Neonisotope
 13. Massenspektroskopisches Wasserstoff-Helium-Dublett
 14. Geknickte Bahn eines α -Teilchens
 15. Durchgang von α -Strahlen durch Helium
 16. Durchgang von α -Strahlen durch Wasserstoff
 - 17, 18. Der LAWRENCEsche Apparat zur Protonenbeschleunigung
 19. Fortschleuderung eines Protons durch ein Neutron
 20. Zertrümmerung eines Neonkerns durch ein Neutron
 21. Registrierung von Atomtrümmern
 22. Zertrümmerung von Lithiumkernen durch Protonen
 23. Fortschleuderung eines Paares von α -Teilchen nach entgegengesetzten Richtungen aus einem zertrümmerten Lithiumkern
 24. Zertrümmerung von Lithiumkernen durch Deutonen
 25. Gleichzeitige Emission von drei α -Teilchen aus einem zertrümmerten Borkern
 - 26, 27. Zertrümmerung von Borkernen durch Protonen
 28. Zertrümmerung eines Deutons durch ein Deuton
 29. Zertrümmerung von Stickstoffkernen durch α -Teilchen
 30. Künstliche Radioaktivität des Aluminiums
 31. Positronenemission durch Kohlenstoff nach Bombardement mit Deutonen
- Die Quellen der Abbildungen sind in den Beschriftungen angegeben.

Nachträge (von Mitte April 1935)

Als ein neues stabiles Isotop wurde von ASTON Eisen (Nr. 26) von der Masse 57 entdeckt. HEVESY und Mitarbeiter konnten ein radioaktives Kalium-Isotop von der Masse 42 durch Einwirkung von Neutronen sowohl aus Kalium (Nr. 19) als auch aus Calcium (Nr. 20) und Scandium (Nr. 21) herstellen.

Erster Vortrag.

Die Materialisation des Lichtes.

Der gewaltige Aufschwung der modernen Physik offenbart sich am deutlichsten in der Fülle solcher Entdeckungen, die in völligem Widerspruch zu Vorstellungen stehen, die noch vor wenigen Jahrzehnten als unantastbare Dogmen der Naturwissenschaft gegolten hatten. Vielleicht auf keinem anderen Gebiete hat eine Gruppe derartiger Entdeckungen in weitesten Kreisen so viel Aufsehen erweckt wie die künstlichen Grundstoffumwandlungen, die seit 1932 in rasch wachsender Zahl den Forschern glückten.

Längst erscheint heute die einstige Auffassung überholt, die die chemischen Elemente als starr und unwandelbar betrachtet hatte. Nicht einmal die Materie als solche kann heute als die unerschaffbare und unzerstörbare Substanz angesehen werden, als die sie stets gegolten hatte; denn seit 1933 konnte in mannigfachen Experimenten das Entstehen und Vergehen von Materie unmittelbar beobachtet, ja sogar photographiert werden. Da jedesfalls die Idee der Materie umfassender als diejenige der chemischen Elemente ist, mag es nicht unangebracht sein, die Erörterung dieser „Materialisationsphänomene“ der Erörterung der eigentlichen Grundstoffumwandlungen vorzuschicken.

In theoretischer Hinsicht bildet den Schlüssel zum Verständnis dieser Erscheinungen ein fundamentales Prinzip, das im Jahre 1905 in die Physik Eingang gefunden hat. Es besagt, daß jede Änderung des Energieinhaltes eines Körpers zugleich auch eine Änderung der Masse des Körpers herbeiführen muß. Ein Körper, der Strahlung verschluckt oder sich er-

wärmt, wird schwerer; hingegen wird ein Körper leichter, wenn er Strahlung aussendet oder sich abkühlt. Zwischen der Änderung des Energieinhalts und der dadurch verursachten Änderung der Masse ergibt sich eine sehr einfache Beziehung; es erweist sich die Änderung der Masse gleich der Energieänderung, gebrochen durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit. Da diese $3 \cdot 10^{10}$ cm pro sec beträgt¹, so erhält man die Massenänderung in Gramm, indem man die in absoluten Energieeinheiten (Erg) ausgedrückte Energieänderung² durch $9 \cdot 10^{20}$ dividiert. Die mit beobachtbaren Energieänderungen verknüpften Massenänderungen sind daher im allgemeinen viel zu klein, als daß sie wahrgenommen werden könnten. Wenn sich z. B. eine Wassermenge im Gewichte von tausend Tonnen (10^9 g) um 100^0 abkühlt, also 10^{11} Kalorien³ oder, was dasselbe ist, $4,2 \cdot 10^{18}$ Erg abgibt, so beträgt doch der Massenverlust erst etwa fünf Milligramm.

Die Verallgemeinerung dieser Erkenntnis führte zu dem wichtigen Gesetz, wonach jeder Masse eine Eigenenergie zukommt, die sich durch Multiplikation der Masse mit dem Quadrate der Lichtgeschwindigkeit ergibt (in knapper mathematischer Formel $E = m c^2$). Es sind freilich phantastische Werte, die man nach diesem Gesetz für die Eigenenergie der Materie erhält. Denn in jedem Gramm schlummern danach $9 \cdot 10^{20}$ Erg, also eine Energiemenge, die 20 Billionen Kalorien oder eine mögliche Arbeitsleistung von 9 Billionen Kilogramm-Metern darstellt.⁴ Stellen wir uns einmal vor, daß sich eine Wundermaschine konstruieren ließe, die durch die Eigenenergie von irgendwelchem in die Maschine eingeführten Stoffe betrieben werden könnte. Es würde dann genügen, in diese Maschine stündlich einige wenige Gramm von irgend einer Substanz, z. B. Papier oder Wasser oder gar Luft, einzuführen, um eine ebensogroße Zahl von Pferdestärken zu gewinnen wie aus den riesigsten Kraftwerken der Gegenwart.

Auf Grund des Prinzips der Eigenenergie müssen wir wohl annehmen, daß die Erzeugung von Materie einen Energieaufwand erfordert, der sich pro Gramm des zu schaffenden Stoffes auf $9 \cdot 10^{20}$ Erg stellen würde. Umgekehrt müßte diese Energiemenge bei dem etwaigen Verschwinden von Materie frei werden. Von besonderem Interesse ist nun

natürlich die Frage, welche Energie erforderlich wäre, um die kleinsten bekannten Materieteilchen zu erzeugen. Diese sind, wie heute wohl allgemein bekannt, die sogenannten Elektronen, die eine 1838mal kleinere Masse als das leichteste Atom, das Wasserstoffatom, aufweisen; sie beträgt, wie man genau weiß, $9,0 \cdot 10^{-28}$ g. Wenn wir diese Zahl mit $9 \cdot 10^{20}$ multiplizieren, ergibt sich die Eigenenergie eines Elektrons zu $8,1 \cdot 10^{-7}$ Erg.

Wir haben bisher die Energie in der in der klassischen theoretischen Physik üblichen Einheit, nämlich in Erg angegeben, wollen uns aber von nun ab derjenigen Einheit bedienen, die in der Atomphysik üblich geworden ist und die sich aus verschiedenen, später noch zu erörternden Gründen als sehr zweckmäßig erweist. Diese Einheit wird durch diejenige Arbeit dargestellt, die ein Elektron bei dem Durchlaufen einer Spannung von 1 Volt leistet⁵, und wird darum Elektron-Volt genannt; das übliche Symbol hierfür ist eV. Das Tausendfache dieser Einheit wird als Elektron-Kilovolt (ekV), das Millionenfache als Elektron-Megavolt (eMV) bezeichnet. Es muß freilich sorgfältig beachtet werden, daß das Elektron-Volt ebensowenig eine Einheit der Spannung ist, wie etwa das vorhin erwähnte Kilogramm-Meter eine Längeneinheit ist. Wohl aber stimmt in einfachen Fällen die Zahl der bei der Erscheinung in Betracht kommenden Volt mit der Zahl der auftretenden Elektron-Volt überein. Wenn z. B. in einer Entladungsröhre Elektronen einer Spannung von x Volt ausgesetzt werden, so erlangen sie dadurch eine Energie von x Elektron-Volt.

Bei dem Durchlaufen einer Spannung von 1 Volt leistet nun ein Körper, der eine Einheitsladung (eine „elektrostatische“ Einheit⁶) trägt, Arbeit im Betrage von $1/300$ Erg (Das Auftreten des Faktors $1/300$ erklärt sich daraus, daß erst 300 Volt die absolute elektrostatische Einheit der Spannung im g-cm-sec-System ergeben). Von dem Elektron weiß man auf Grund mannigfachster Messungen, daß es eine Ladung von $4,77 \cdot 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten trägt; daher ist ein eV gleich $1,59 \cdot 10^{-12}$ Erg, und somit beträgt die Eigenenergie eines Elektrons 509 ekV, oder rund $1/2$ eMV.

Für die mögliche Erzeugung von Materie muß nun begreiflicherweise solche Energie in Betracht gezogen werden, die sich in der Natur in einer nicht der Materie anhaftenden Form vor-

findet, und dies ist die elektromagnetische Strahlung, also „Licht“ im weitesten Sinne dieses Wortes — in dem Sinne, der auch die Strahlen jenseits des Rot bis in das Gebiet der Radiowellen und jenseits des Violett bis in das Gebiet der Röntgen- und Gammastrahlen mit einbezieht. Obwohl in ihrem Wesen gleich, unterscheiden sich bekanntlich die verschiedenen „Licht“-Strahlen durch ihre Wellenlänge. Diese reicht von etwa 100 bis 2000 m bei den Rundfunkwellen bis zu $8 \cdot 10^{-5}$ cm bei dem sichtbaren Rot, $4 \cdot 10^{-5}$ cm bei dem sichtbaren Violett und über den Bereich der Röntgenstrahlen bis zu etwa 10^{-11} cm im Gebiete der Gamma-Strahlen. Indem man die Lichtgeschwindigkeit (also $3 \cdot 10^{10}$) durch die in cm ausgedrückte Wellenlänge dividiert, erhält man die Frequenz pro sec. Sie beträgt z. B. für violettes Licht $8 \cdot 10^{14}$ und erreicht bei den Gamma-Strahlen Werte bis zu 10^{21} .

Wie nun im Jahre 1900 PLANCK entdeckte, setzt sich die Energie der elektromagnetischen Strahlung aus „Elementen“ zusammen, die durch das Produkt aus der Frequenz und einer universellen Konstanten, dem sogenannten elementaren Wirkungsquantum, dargestellt sind. PLANCK, der zuerst die Existenz dieser für die moderne Physik fundamentalen Konstanten erkannte, hat auch bereits im Jahre 1900 ihren Wert richtig ermittelt. Er beträgt $6,5 \cdot 10^{-27}$ Erg mal Sekunden; d. h. wenn man die auf die Sekunde bezogene Frequenz mit $6,5 \cdot 10^{-27}$ multipliziert, so erhält man die Energie eines „Elementes“ in Erg. Für rotes Licht findet man derart z. B. $2,5 \cdot 10^{-12}$ Erg, für violettes Licht das Doppelte.

Während PLANCK ursprünglich nur annahm, daß derartige Energieelemente bei der Emission und Absorption von Strahlung eine Rolle spielen, hat 1905 EINSTEIN die Vorstellung begründet, daß sich überhaupt alles Licht aus Lichtquanten oder, wie man sie neuestens nennt, aus Photonen zusammensetzt.⁷ Daß sie verschwindend klein sind, geht schon daraus hervor, daß erst die Energie von rund einer Trillion (10^{18}) violetter Lichtquanten derjenigen Energie gleichkommt, die aufgewendet werden muß, um ein Gewicht von 1 kg 5 cm hoch zu heben.

Bedienen wir uns wieder des Elektron-Volts als Einheit, so ergibt sich die Lichtquantenenergie für rotes Licht zu etwa

$1\frac{1}{2}$ und für violettes Licht zu etwa 3 eV. Etwa 1000 bis 100 000 mal größer als bei dem sichtbaren Licht ist die Frequenz und somit auch die Lichtquantenenergie bei den Röntgenstrahlen. Bei einer Röntgenröhre, die mit einer Spannung von x Volt betrieben wird, beträgt die höchste auftretende Lichtquantenenergie x Elektron-Volt. Die medizinische Röntgentechnik verwendet z. B. in der Oberflächentherapie Spannungen von einigen tausend Volt, für diagnostische Zwecke Spannungen zwischen ungefähr 30 000 und 100 000 Volt, für tiefentherapeutische Zwecke aber gar Spannungen von einigen hunderttausend Volt. Hier nähert sich also tatsächlich bereits die Lichtquantenenergie der Röntgenstrahlen der Eigenenergie eines Elektrons.

Eine noch höhere Frequenz als die kürzestwelligen Röntgenstrahlen weisen die ihnen ähnlichen Gamma-Strahlen auf, die von radioaktiven Substanzen ausgesendet werden. Durch besonders kurzwellige, also besonders „harte“ γ -Strahlung sind die radioaktiven Elemente Polonium, Radium C und Thorium C' ausgezeichnet.⁸ Die Poloniumstrahlung entspricht 800 kV, diejenige des Radium C 1,8 Millionen und die Strahlung des Thorium C' gar 2,6 Millionen Volt. Die härteste bekannte γ -Strahlung ist die später noch näher zu besprechende sekundäre Strahlung, die von Beryllium ausgeht, wenn dieses mit α -Strahlen⁹ bombardiert wird; die sekundäre Beryllium-Strahlung entspricht etwa 5 Millionen Volt, was eine Wellenlänge von ungefähr $2 \cdot 10^{-11}$ cm bedeutet. In den drei zuletzt angeführten Fällen des Po, Th C' und des Be überragt also tatsächlich die Lichtquantenenergie die Eigenenergie eines Elektrons; gleichwohl mußte die Annahme einer möglichen Materialisation solcher Lichtquanten zunächst noch einer wesentlichen Schwierigkeit begegnen.

Ein längst bekannter physikalischer Erfahrungssatz besagt nämlich, daß man bei dem „Elektrisieren“ nie eine Menge positiver oder negativer Elektrizität erzeugen kann, ohne zugleich eine gleich große Menge entgegengesetzter Elektrizität ins Leben zu rufen; die algebraische Summe der erzeugten Elektrizität bleibt stets null, weshalb man von der Erhaltung der Elektrizität spricht. Da nun die Elektronen eine negativ elektrische Ladung aufweisen, würde die Erzeugung eines