

# ATOMTHEORIE

IN ELEMENTARER DARSTELLUNG

VON

ARTHUR HAAS

DR. PHIL.

A. O. PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT WIEN

MIT 56 FIGUREN IM TEXT UND AUF ZWEI TAFELN



BERLIN UND LEIPZIG 1924

WALTER DE GRUYTER & CO.

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



# ATOMTHEORIE

IN ELEMENTARER DARSTELLUNG

VON

ARTHUR HAAS

DR. PHIL.

A. O. PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT WIEN

MIT 56 FIGUREN IM TEXT UND AUF ZWEI TAFELN



BERLIN UND LEIPZIG 1924

WALTER DE GRUYTER & CO.

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

Copyright by WALTER DE GRUYTER & Co., Berlin und Leipzig 1924

Alle Rechte, einschließlich des Übersetzungsrechts, vorbehalten.

# **FREDERICK GEORGE DONNAN**

**Dr. phil.**

**Professor der Chemie an der Londoner Universität**

**Fellow of the Royal Society of London**

**g e w i d m e t**



## Vorwort.

---

Das vorliegende Buch ist aus Vorlesungen entstanden, die ich an der Wiener Universität gehalten habe. Ihr Ziel war, die Grundideen und die wichtigsten Ergebnisse der modernen Atomtheorie übersichtlich in einer elementaren Weise darzustellen, die eine Benutzung höherer Mathematik vermeidet. Da auch in physikalischer Hinsicht in diesem Buche nicht mehr Kenntnisse vorausgesetzt werden, als etwa im Gymnasium vermittelt werden, so hoffe ich, daß dieses Buch nicht bloß von Physikern wird benutzt werden können, sondern auch von Chemikern und vielleicht auch von Laien, die sich etwas eingehender mit der Atomtheorie zu beschäftigen wünschen.

Für viele wertvolle Ratschläge, die mir bei der Abfassung dieses Buches zuteil wurden, bin ich Herrn Universitätsdozent Dr. ADOLF SMEKAL und Herrn Universitätsassistent Dr. OTTO HALPERN in Wien zu großem Danke verpflichtet. Aufrichtigst danke ich auch Herrn Dr. HARRY SCHMIDT, Professor am Polytechnikum in Cöthen, und Herrn cand. phil. FRANZ URBACH in Wien für die gründliche Durchsicht der Korrekturbogen.

Wien, im Juni 1924.

**Arthur Haas.**





# Inhaltsverzeichnis.

|                        | Seite |
|------------------------|-------|
| Vorbemerkung . . . . . | 1     |

## I. Kapitel. Die Elementarquanten.

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| § 1. Das elektrische Elementarquantum . . . . .                            | 2  |
| § 2. Die Elektrolyse und die Masse des Wasserstoffatoms . . . . .          | 8  |
| § 3. Die negative Korpuskularstrahlung und das negative Elektron . . . . . | 10 |
| § 4. Die positive Korpuskularstrahlung . . . . .                           | 15 |
| § 5. Das elementare Wirkungsquantum . . . . .                              | 19 |

## II. Kapitel. Theorie des Wasserstoffatoms.

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| § 6. Das Kernatom . . . . .                                   | 22 |
| § 7. Das BOHRsche Modell des Wasserstoffatoms . . . . .       | 24 |
| § 8. Die Spektralformel von BOHR . . . . .                    | 26 |
| § 9. Das Linienspektrum des Wasserstoffs . . . . .            | 28 |
| § 10. Das Linienspektrum des ionisierten Heliums . . . . .    | 33 |
| § 11. Die Mitbewegung des Atomkerns . . . . .                 | 35 |
| § 12. Die SOMMERFELDSche Theorie der Ellipsenbahnen . . . . . | 39 |
| § 13. Die Feinstruktur der Spektrallinien . . . . .           | 42 |
| § 14. Der STARK-Effekt . . . . .                              | 46 |
| § 15. Der ZEEMAN-Effekt . . . . .                             | 49 |

## III. Kapitel. Die Röntgenstrahlen.

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| § 16. Die Entstehung der Röntgenstrahlen . . . . .                    | 51 |
| § 17. Die Raumgitter . . . . .                                        | 53 |
| § 18. Die Netzebenen . . . . .                                        | 58 |
| § 19. Die Interferenz der Röntgenstrahlen in den Kristallen . . . . . | 64 |
| § 20. Die Gleichung von DUANE und HUNT . . . . .                      | 71 |

## IV. Kapitel. Theorie der Grundstoffe.

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 21. Das Gesetz von MOSELEY und die natürliche Reihe der Grundstoffe . . . . . | 76  |
| § 22. Das periodische System . . . . .                                          | 81  |
| § 23. Die Isotopie . . . . .                                                    | 84  |
| § 24. Kernzerfall und Grundstoffverwandlung . . . . .                           | 90  |
| § 25. Das radioaktive Gleichgewicht . . . . .                                   | 94  |
| § 26. Die Umwandlungsreihen . . . . .                                           | 99  |
| § 27. Die radioaktive Strahlung . . . . .                                       | 106 |
| § 28. Die Zertrümmerung der Grundstoffe . . . . .                               | 112 |
| § 29. Die Struktur der Atomkerne . . . . .                                      | 114 |

---

**V. Kapitel. Allgemeine Theorie der Spektren und des Atombaus.**

|                                                                     | Seite |
|---------------------------------------------------------------------|-------|
| § 30. Die Röntgenserien . . . . .                                   | 119   |
| § 31. Die Feinstruktur der Röntgenspektren . . . . .                | 125   |
| § 32. Anregung und Ionisierung der Atome . . . . .                  | 131   |
| § 33. Die optischen Spektren . . . . .                              | 137   |
| § 34. Die Gruppierung der Elektronen in den Atomen . . . . .        | 146   |
| § 35. Die Vervollständigung der inneren Elektronengruppen . . . . . | 152   |
| § 36. Die Fluoreszenz . . . . .                                     | 159   |
| § 37. Die Elektronenstöße . . . . .                                 | 162   |
| § 38. Die metastabilen Zustände der Atome . . . . .                 | 166   |
| § 39. Der Magnetismus der Atome . . . . .                           | 167   |
| § 40. Die Molekelbildung . . . . .                                  | 171   |
| § 41. Die Struktur der Kristalle . . . . .                          | 175   |
| § 42. Die Molekularspektren . . . . .                               | 177   |
| § 43. Die Dispersion . . . . .                                      | 182   |
| § 44. Die Strahlungskonstanten . . . . .                            | 184   |

**Anhang.**

|                                                       |     |
|-------------------------------------------------------|-----|
| Zusammenfassung des Inhalts . . . . .                 | 188 |
| Übersicht über die häufigsten Bezeichnungen . . . . . | 197 |
| Die universellen Konstanten der Atomphysik . . . . .  | 197 |
| Chronologische Übersicht . . . . .                    | 198 |
| Namenverzeichnis . . . . .                            | 200 |
| Sachverzeichnis . . . . .                             | 202 |

---

### Vorbemerkung.

Die in der Atomphysik vorkommenden Größen werden sowohl in absoluten als auch in praktischen Einheiten angegeben. Die Grundeinheiten des absoluten Maßsystems sind g, cm und sec. Aus ihnen wird als Einheit der Kraft die Dyne abgeleitet, die der Masseneinheit von 1 g in 1 sec einen Geschwindigkeitszuwachs von 1 cm pro sec erteilt; eine Dyne ist gleich dem Gewicht von 1,0198 mg (unter 45° Breite). Die Arbeit, die eine Kraft von einer Dyne auf dem Wege von 1 cm verrichtet, wird als Erg bezeichnet und stellt die Energieeinheit dar.  $4,186 \cdot 10^7$  Erg sind gleichbedeutend mit der Wärmeeinheit, der Grammkalorie, die 1 g Wasser von 15° auf 16° zu erwärmen vermag.

Die elektrostatische Einheit ist diejenige Elektrizitätsmenge, die auf eine gleich große in der Entfernung von 1 cm gemäß dem COULOMBSchen Gesetz eine Kraft von 1 Dyne ausübt. Die Kraft, die an einer beliebigen Stelle eines elektrischen Feldes eine beliebige Elektrizitätsmenge erfährt, ergibt, durch die Elektrizitätsmenge dividiert, die elektrische Feldstärke an der betreffenden Stelle. In analoger Weise wie die elektrostatische Einheit und die elektrische Feldstärke werden die Einheit der Magnetismusmenge und die magnetische Feldstärke definiert.

Die absolute Einheit des elektrischen Potentials ist (im sogenannten elektrostatischen Maß) durch den Potentialunterschied gegeben, bei dessen Zurücklegung seitens einer elektrostatischen Einheit eine Arbeit von 1 Erg verrichtet wird. Der dreihundertste Teil dieser absoluten Potentialeinheit stellt die praktische Einheit der elektrischen Spannung, das sogenannte Volt, dar. Die absolute Einheit der Stromstärke ist (im elektrostatischen Maß) durch einen Strom gegeben, dessen Querschnitt in der Sekunde von einer elektrostatischen Einheit passiert wird. Eine  $3 \cdot 10^9$  mal so große Stromstärke stellt die praktische Einheit, das sogenannte Ampère, dar.

Als Längeneinheit wird in der Spektroskopie das Mikron und die ÄNGSTRÖM-Einheit benutzt; es ist  $1 \mu$  gleich  $10^{-4}$  cm und eine Å.-E. gleich  $10^{-8}$  cm.

---

## I. Kapitel. Die Elementarquanten.

### § 1. Das elektrische Elementarquantum.

So alt wie alle theoretische Physik ist auch der Gedanke, daß die Materie eine individuelle Zusammensetzung besitze, daß sie aus winzig kleinen, unsichtbaren, einzelnen Teilchen bestehe. Dieser Gedanke ist schon im Altertum von dem griechischen Philosophen DEMOKRIT begründet worden, der die unsichtbaren kleinsten Teilchen, in die er die Materie auflöste, als Atome bezeichnete. Dieser Ausdruck wird auch von der modernen Naturwissenschaft für die kleinsten Teilchen der chemischen Grundstoffe beibehalten; auf die Zusammenfügung der Atome zu sogenannten Molekeln führt ja die neuere, von DALTON begründete Chemie die Mannigfaltigkeit der chemischen Verbindungen zurück.

Eine Fülle physikalischer Erscheinungen offenbart es aber nun, daß die Atome jedenfalls elektrische Ladungen enthalten müssen. Vor allem zeigt die Tatsache der Elektrolyse, daß die Atome durch elektrische Kräfte beeinflußt werden. Auch das altbekannte Phänomen der durch die Materie bewirkten Dispersion des Lichtes konnte seit dem Bestehen der elektromagnetischen Lichttheorie nicht anders gedeutet werden als durch die Annahme einer Wechselwirkung zwischen elektromagnetischen Wellen und elektrischen Ladungen, die in den Atomen der Materie enthalten sind. Die Vorstellung einer atomistischen Struktur der Materie führte so mit Notwendigkeit zu der Vorstellung eines Atomismus der Elektrizität, also zu dem Begriff eines Elementarquantums der Elektrizitätsmenge. Doch nicht allein theoretische Erwägungen leiteten zu dieser für die moderne Atomtheorie fundamentalen Annahme; sie findet eine unmittelbare empirische Bestätigung in Versuchen von MILLIKAN, die auch eine direkte, sehr genaue Bestimmung des elektrischen Elementarquantums ermöglichen.

MILLIKANS Versuche beziehen sich auf einzelne kleine Materieteilchen, die schwache elektrische Ladungen tragen und deren Bewegungen unter dem zweifachen Einfluß der eigenen Schwere und eines vertikal nach aufwärts gerichteten Feldes mittels eines Mikroskopes untersucht werden. Diese Methode der sogenannten „Indi-

vidualbeobachtung“<sup>1</sup> wurde im Jahre 1909 von EHRENFHAF und etwas später auch von MILLIKAN ersonnen und in den folgenden Jahren weiter ausgebildet und verwertet.<sup>2</sup>

MILLIKAN experimentierte mit Öltröpfchen, die einen Durchmesser von ungefähr  $10^{-4}$  cm hatten; gegenüber Teilchen aus anderem Material haben die Öltröpfchen den Vorzug, daß sie nicht durch Verdunstung ihre Größe ändern. Mittels eines Zerstäubers wird ein feiner Sprühregen von Öl in eine Kammer geblasen, aus der durch eine kleine, im Boden angebrachte Öffnung bisweilen ein Tröpfchen in einen unterhalb der Kammer befindlichen Kondensator eintritt, der von zwei parallelen, horizontalen Platten gebildet wird. Infolge der bei dem Zerstäuben eintretenden Reibung ist ein solches Tröpfchen fast immer elektrisch geladen. Durch einen Umschalter können die Platten des Kondensators an eine Akkumulatorenbatterie von etwa 10000 Volt Spannung angeschlossen werden. Das im Kondensator befindliche Teilchen wird durch starke Lichtquellen von der Seite her beleuchtet und zugleich durch ein in dem Kondensator angebrachtes Fenster mittels eines Mikroskopes betrachtet; es erscheint dann, ohne daß seine wahre Gestalt kenntlich würde, als heller Punkt auf schwarzem Hintergrund. Ist das elektrische Feld nicht eingeschaltet, so sinkt ein solches Tröpfchen infolge seiner Schwere und der starken Reibung mit konstanter Geschwindigkeit langsam zu Boden; wird hingegen durch Umschaltung die Spannung der Batterie angelegt, so bewegt sich das Teilchen, und zwar ebenfalls mit konstanter Geschwindigkeit, langsam nach aufwärts, wofern die elektrische Kraft nicht allzusehr über die Schwere überwiegt. (Bei der angegebenen Tropfengröße und der angegebenen Spannung besteht gerade das richtige Verhältnis.) Indem man immer im richtigen Augenblick umschaltet, kann man derart ein Tröpfchen beliebig oft zwischen den beiden Kondensatorplatten hin und her wandern lassen.

Infolge der starken Reibung ist sowohl bei der Abwärts- als auch bei der Aufwärtsbewegung die Geschwindigkeit der einwirkenden Kraft proportional, wie dies sowohl aus mechanischen Beziehungen folgt als auch durch die Versuche unmittelbar bestätigt wird. Bezeichnen wir also die Geschwindigkeit der Abwärtsbewegung mit  $v_1$  und die der Aufwärtsbewegung mit  $v_2$ , bezeichnen wir ferner die Masse des Tröpfchens mit  $m$  und seine Ladung mit  $Q$ , die Beschleunigung der Erdschwere mit  $g$

<sup>1</sup> Das wesentlich Neue an dieser Methode war eben, daß sie sich auf einzelne Teilchen bezog, während frühere Methoden sich immer nur auf die Mittelwerte der Ladungen einer großen Zahl von Teilchen bezogen hatten.

<sup>2</sup> MILLIKAN hat über seine Forschungen zusammenhängend in seinem Buche berichtet „The electron, its isolation and measurement“, Chicago 1917; deutsch von K. STÖCKEL, Braunschweig 1922 (Sammlung „Die Wissenschaft“, Verlag VIEWEG, Band 69). — MILLIKANS erste Mitteilung erfolgte im August 1909 (in den Berichten der britischen Naturforscherversammlung zu Winnipeg), EHRENFHAFS erste Mitteilung im März 1909 (im Anzeiger der Wiener Akademie).

und die elektrische Feldstärke (also den Quotienten aus Spannung und Plattenabstand) mit  $E$ , so muß daher die Beziehung bestehen

$$(1) \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{Q E - m g}{m g}.$$

Die Geschwindigkeit wird nun einfach bestimmt, indem man die Zeit mißt, die das Teilchen braucht, um die Strecke zwischen zwei Querfäden im Beobachtungsfernrohr zurückzulegen. Tab. I gibt in Sekunden die Werte wieder, die MILLIKAN bei einem Versuche für die Zeit  $t_1$  der Abwärts- und die Zeit  $t_2$  der Aufwärtsbewegung zwischen den Querfäden erhielt; dem Abstand der Querfäden entsprach dabei eine wirkliche Fallstrecke von 0,5222 cm.

Tabelle I.

| $t_1$ | $t_1$ | $t_1$              | $t_2$ |
|-------|-------|--------------------|-------|
| 13,6  | 12,5  | 13,8               | 34,6  |
| 13,8  |       | 13,7               |       |
| 13,4  | 12,4  | 13,8               | 34,8  |
| 13,4  | 21,8  | 13,6               | 16,0  |
| 13,6  |       | 13,5               | 34,8  |
| 13,6  | 34,8  | 13,4               | 34,6  |
| 13,7  | 84,5  | 13,8               | 21,9  |
| 13,5  |       | 13,4               |       |
| 13,5  | 85,5  | Mittelwert: 13,595 |       |

Wie die Tabelle zeigt, erfolgt die Abwärtsbewegung des Teilchens bei der gegebenen Batteriespannung immer mit derselben Geschwindigkeit; hingegen nimmt die Größe  $t_2$  (und somit auch die Größe  $v_2$ ) abwechselnd verschiedene Werte an, wobei im Verlaufe der Hin- und Herbewegung frühere Werte später wiederkehren.

Die sprunghaften Änderungen des Wertes von  $t_2$  müssen nun offenbar darauf zurückgeführt werden, daß das positiv elektrische Öltröpfchen Luftionen einfängt und daß sich dadurch eben die Ladung des bewegten Teilchens ändert. Die Anlagerung eines negativen Ions hat eine Verzögerung der Aufwärtsbewegung, also eine Vergrößerung des Wertes von  $t_2$  zur Folge, während eine Verminderung des Wertes von  $t_2$  in der Anlagerung eines positiven Ions oder in der Abstoßung eines negativen ihre Ursache hat.

Bezeichnen wir nun die Ladung des Ions mit  $Q'$  und die Geschwindigkeit der Aufwärtsbewegung nach Anlagerung des Ions mit  $v_2'$ , so muß nach Gl. 1 die Beziehung gelten

$$(2) \quad \frac{v_2'}{v_1} = \frac{Q E + Q' E - m g}{m g}.$$

Subtrahieren wir die Gl. 1 von der Gl. 2, so finden wir somit

$$(3) \quad \frac{v_2' - v_2}{v_1} = \frac{Q' E}{m g}.$$

In Tab. II sind nun in der ersten Vertikalrubrik die Werte eingetragen, die sich für die Geschwindigkeit der Aufwärtsbewegung ergeben, wenn die Fallstrecke von 0,5222 cm durch die der Tab. I entnommenen Werte von  $t_2$  dividiert wird.<sup>3</sup> Die zweite Vertikalrubrik verzeichnet zunächst die Differenzen zwischen den in der ersten Vertikalrubrik aufeinander folgenden Zahlen.

Tabelle II.

| Geschwindigkeit der Aufwärtsbewegung | Unterschied                     |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| $\frac{0,5222}{12,45} = 0,04196$     | } $\frac{0,01806}{2} = 0,00903$ |
| $\frac{0,5222}{21,8} = 0,02390$      |                                 |
| $\frac{0,5222}{34,7} = 0,01505$      | } $\frac{0,00885}{1} = 0,00885$ |
| $\frac{0,5222}{85,0} = 0,00614$      |                                 |
| $\frac{0,5222}{34,7} = 0,01505$      | } $\frac{0,00891}{1} = 0,00891$ |
| $\frac{0,5222}{16,0} = 0,03264$      |                                 |
| $\frac{0,5222}{34,7} = 0,01505$      | } $\frac{0,01759}{2} = 0,00880$ |
| $\frac{0,5222}{21,85} = 0,02396$     |                                 |
|                                      | } $\frac{0,01759}{2} = 0,00880$ |
|                                      |                                 |
|                                      | } $\frac{0,00891}{1} = 0,00891$ |
|                                      |                                 |

Wie die Tab. II zeigt, ergibt diese Differenz aber nun stets denselben Wert oder gerade den doppelten Betrag (oder auch bei anderen Versuchen den dreifachen oder vierfachen). Da für ein gegebenes Tröpfchen bei gegebener Spannung die Größen  $m$ ,  $v_1$ ,  $E$  und  $g$  als Konstante anzusehen sind, so folgt also hieraus gemäß Gl. 3, daß die Ladung der Luftionen stets ein ganzzahliges Vielfaches einer elementaren Ladung darstellen muß. Die Daten der Tab. II bilden so einen unmittelbaren experimentellen Beweis für die atomistische Struktur der Elektrizität.

Auch die eigentliche Tröpfchenladung  $Q$  läßt sich ohne weiteres mit der Ionenladung  $Q'$  und somit mit dem Elementarquantum vergleichen. Wir brauchen hierzu nur von der Gl. 1 auszugehen, aus der die Beziehung folgt

$$(4) \quad \frac{v_2 + v_1}{v_1} = \frac{QE}{mg}$$

<sup>3</sup> Wenn in der Tab. I zwei nahezu gleiche Werte von  $t_2$  aufeinander folgen, wurde in Tab. II der Mittelwert benutzt.

oder in Verbindung mit Gl. 3

$$(5) \quad \frac{v_2 + v_1}{v_2' - v_2} = \frac{Q}{Q'}.$$

Da die Geschwindigkeiten  $v_1$ ,  $v_2$  und  $v_2'$  gemessen werden können, kann somit die Ladung  $Q$  mit der kleinsten Ladung verglichen werden, als deren ganzzahlige Vielfache sich die Ionenladungen offenbaren. MILLIKAN fand, daß sich auch die Tröpfchenladung stets als ein genau ganzzahliges Vielfaches jener Elementarladung erweist. Alle ganzzahligen Vielfachen der Elementarladung bis etwa fünfzig konnte MILLIKAN mit größter Genauigkeit nachweisen und bis etwa 150 immerhin noch die Elementarquanten zählen, die einem Öltröpfchen anhaften. Mit zunehmender Vervielfachungszahl nimmt natürlich die Genauigkeit der Zählung ab, weil die Fehlergrenze bei dieser Methode etwa ein halbes Prozent beträgt und somit bei einer Ladung von mehr als 200 Elementarquanten bereits mehr als ein Elementarquantum ausmacht.

Es ist nun klar, daß gemäß der Gl. 1 auch die absolute Größe des elektrischen Elementarquantums ermittelt werden kann, wofern man das Gewicht eines Tröpfchens kennt. Dieses läßt sich aber wiederum auf Grund der Beziehung bestimmen, die die konstante Fallgeschwindigkeit mit dem Halbmesser des Teilchens verknüpft. Wie schon STOKES im Jahre 1845 gefunden hatte, ist die Fallgeschwindigkeit einer Kugel vom Halbmesser  $a$  und der Dichte  $\varrho$  in einem Mittel von der Dichte  $\varrho'$  und dem inneren Reibungskoeffizienten  $\eta$  durch die Formel gegeben

$$(6) \quad v = \frac{2}{9} \frac{ga^2(\varrho - \varrho')}{\eta}.$$

MILLIKAN und seine Mitarbeiter richteten nun die Versuche, die der Bestimmung des Tropfengewichtes dienten, so ein, daß dabei nach Möglichkeit auf das exakteste die Voraussetzungen erfüllt waren, an die die Gültigkeit des STOKESSchen Gesetzes geknüpft ist.<sup>4</sup> Soweit diese Voraussetzungen aber nicht vollkommen erfüllt werden konnten, untersuchten MILLIKAN und seine Mitarbeiter wieder genau die durch die Unvollkommenheiten bewirkten Abweichungen. Mittels des von ihnen derart modifizierten Fallgesetzes<sup>5</sup> vermochten sie den Halbmesser der Tröpfchen mit größter Genauigkeit zu ermitteln, und damit war bei der bekannten Dichte auch deren genaues Gewicht gegeben.

Jahrelange Messungen an vielen Tausenden von Tropfen ermöglichten es derart MILLIKAN, den Wert des heute allgemein mit  $e$  bezeichneten elektrischen Elementarquantums mit einer Genauigkeit von ein Promille zu bestimmen; als Mittel der Messungsergebnisse fand MILLIKAN

$$(7) \quad e = 4,774 \cdot 10^{-10} \text{ elektrost. Einh. } (\pm 0,004 \cdot 10^{-10}).$$

<sup>4</sup> Von besonderer Wichtigkeit war es, daß die Öltröpfchen vollkommene Kugelgestalt hatten, was durch besondere Kunstgriffe erreicht wurde.

<sup>5</sup> Näheres hierüber in dem erwähnten Buche von MILLIKAN.



Ein näheres Eingehen auf die MILLIKANSchen Messungsmethoden erscheint hier deshalb überflüssig, weil in späteren Abschnitten noch verschiedene andere Methoden werden behandelt werden, die ganz unabhängig von MILLIKANS Forschungen auf indirekten Wegen zu ganz demselben Werte von  $e$  führen.<sup>6</sup>

In historischer Hinsicht sei noch bemerkt, daß die ersten direkten Bestimmungen des elektrischen Elementarquantums in den Jahren 1897 und 1898 von TOWNSEND und J. J. THOMSON durchgeführt wurden. Diese Untersuchungen, die für  $e$  einen Wert von etwa  $3 \cdot 10^{-10}$  elektrost. Einh. ergaben, bezogen sich aber nicht auf einzelne Materieteilchen, sondern auf langsam fallende Nebelwolken, in denen die Kondensationskerne der Wassertropfen von Luftionen gebildet werden. Aus der Fallgeschwindigkeit der Nebelwolke konnte auf Grund des STOKESschen Fallgesetzes der Radius der Wassertropfen und somit bei festgestelltem Gewicht der Wolke die Zahl der Tropfen ermittelt werden. Da andererseits auch die gesamte elektrische Ladung der Wolke gemessen werden konnte, konnte so die Ladung eines einzelnen Ions berechnet werden.<sup>7</sup> Indem diese Ladung willkürlich einem Elementarquantum gleichgesetzt wurde, ergab sich für dieses ein in der Größenordnung richtiger Wert.

<sup>6</sup> Daraus folgt auch, daß Einwände, die gegen die MILLIKANSche Methode erhoben wurden, keinesfalls die Existenz eines elektrischen Elementarquantums in Frage zu stellen vermögen, die durch zahlreiche andere Methoden sicher erwiesen erscheint. — Einwände wurden gegen MILLIKANS Arbeiten von EHRENFHAF und seinen Schülern erhoben, die mit kugelförmigen Teilchen aus verschiedenem Material (Quecksilber, Silber, Gold, Öl u. a.) in verschiedenen chemisch inerten Gasen (Stickstoff, Argon) experimentierten; die Teilchen hatten Radien von etwa  $5 \cdot 10^{-5}$  cm bis hinab zu etwa  $5 \cdot 10^{-6}$  cm (der Grenze der Beobachtbarkeit). Aus diesen Versuchen, die zum Teil schon vor MILLIKANS erster Veröffentlichung publiziert worden waren, schloß EHRENFHAF, daß mit abnehmendem Radius (also mit abnehmender elektrostatischer Kapazität) auch die Ladung der Teilchen derart abnehme, daß das Elementarquantum dabei wesentlich unterschritten werde. — Überdies fand EHRENFHAF später, daß die Teilchen, wenn sie einen Gehalt an radioaktiver Substanz hatten, die Geschwindigkeit ihrer Vertikalbewegungen trotz der Konstanz des elektrischen Feldes kontinuierlich änderten. Darin erblickt EHRENFHAF einen weiteren Beweis gegen die Annahme einer ausnahmslos sprunghaften Änderung einer Ladung von der Größenordnung des Elementarquantums. — Von anderer Seite wurden die von EHRENFHAF entdeckten Unterschreitungen des elektrischen Elementarquantums auf vermutliche Dichteänderungen zurückgeführt, die ihre Ursache in einer schwammigen oder flockigen Struktur besonders kleiner Teilchen (von geringerer Größe als die MILLIKANSchen Öltröpfchen) oder in einer Gasadsorption haben könnten. Vgl. die zusammenfassenden Arbeiten von EHRENFHAF in den *Annalen der Physik* 56, 1918, S. 1–80 und 63, 1920, S. 773–815, ferner TH. SEXL, *Zeitschr. f. Physik*, 16, 1923, S. 34–41. Bezüglich des gegnerischen Standpunktes vgl. die in der Zeitschrift „Die Naturwissenschaften“ erschienenen zusammenfassenden Berichte von R. BÄR (10, 1922, S. 322 u. 344) und E. REGENER (11, 1923, S. 17).

<sup>7</sup> Näheres hierüber z. B. im III. Kapitel des MILLIKANSchen Buches.

## § 2. Die Elektrolyse und die Masse des Wasserstoffatoms.

Schon lange, bevor den Physikern die absoluten Werte der Atommassen bekannt waren, waren die Chemiker in der Lage, die relativen Gewichte der Atome, d. h. die Verhältnisse zwischen ihren Massen zu ermitteln, und zwar auf Grund des von DALTON im Jahre 1805 entdeckten Gesetzes der sogenannten multiplen Proportionen. Wie DALTON fand und in diesem bekannten Gesetze lehrte, läßt sich jedem Grundstoff eine bestimmte, für ihn charakteristische Zahl derart zuordnen, daß die in einer chemischen Verbindung enthaltenen Mengen der Grundstoffe sich untereinander so verhalten wie ganzzahlige Vielfache der für die betreffenden Elemente charakteristischen Zahlen.

Indem man die für den Sauerstoff charakteristische Zahl in konventioneller Weise genau gleich 16 setzt, ergeben sich derart die sogenannten Atomgewichte der Grundstoffe. Das kleinste hat der Wasserstoff mit 1,008 (genauer 1,0077), das größte das Uran mit 238,2. Auf die bekannten Methoden, mittels deren die Chemie die Atomgewichte ermittelt, braucht hier wohl nicht näher eingegangen zu werden.

Die Zahl nun, durch die man die Atomgewichtszahlen dividieren muß, um die absoluten Massen der Atome in Grammen zu erhalten, wird heute allgemein als die LOSCHMIDTSche Zahl bezeichnet. Sie heißt so zu Ehren des Physikers, der zuerst (im Jahre 1865) mittels einer (hier nicht näher zu erörternden) gastheoretischen Methode die absolute Größe der Atome ungefähr ermittelte. Bezeichnen wir die in Grammen gemessene Masse des Wasserstoffatoms mit  $m_H$  und die LOSCHMIDTSche Zahl mit  $L$ , so ist also

$$(1) \quad m_H = \frac{1,0077}{L} \text{ Gramm.}$$

In analoger Weise erhalten wir die Masse jedes beliebigen Atoms, indem wir das Atomgewicht des betreffenden Grundstoffs durch die LOSCHMIDTSche Zahl dividieren. Die Masse eines Stoffes, die soviel Gramm beträgt, wie das Atom- oder Molekulargewicht des Stoffes ist, wird entweder als ein Grammatom oder als ein Mol (eine Gramm-Molekel) des betreffenden Stoffes bezeichnet. Es ist also zum Beispiel ein Grammatom Sauerstoff 16 g, ein Mol Wasser rund 18 g und so fort. Die LOSCHMIDTSche Zahl gibt demnach für jeden beliebigen Stoff die Zahl der Atome im Grammatom oder der Molekeln im Mol an. Ist nun erst einmal das elektrische Elementarquantum bekannt, so können wir daraus auch die LOSCHMIDTSche Zahl sehr genau auf Grund elektrochemischer Messungsergebnisse berechnen.

Schon im Jahre 1833 hatte nämlich FARADAY aus seinen Beobachtungen über die Elektrolyse das Grundgesetz der Elektrochemie abgeleitet. Darnach ist die in einer bestimmten Zeit elektrolitisch ausgeschiedene Menge eines bestimmten Stoffes vollkommen

durch die Stromstärke bestimmt und ihr direkt proportional. Andererseits sind die Mengen, die von einem Strome von bestimmter Stärke aus verschiedenen Elektrolyten abgeschieden werden, „chemisch äquivalent“, d. h. sie verhalten sich wie die Quotienten aus Atomgewicht und chemischer Wertigkeit. Ein Strom, der in der Zeiteinheit 1,008 g des einwertigen Wasserstoffs absondert, scheidet daher in der Zeiteinheit 8 g des zweiwertigen Sauerstoffs vom Atomgewicht 16 ab, und so fort.

Das elektrochemische Grundgesetz findet nun eine sehr einfache Erklärung, wenn man annimmt, daß in einem Elektrolyten die Molekeln ganz oder zum Teile in entgegengesetzt elektrisch geladene Bestandteile, in sogenannte Ionen, gespalten oder dissoziiert sind und daß der Leitungsstrom im Elektrolyten auf einem Transport solcher Ionen beruht. Die positiven Ionen würden dann in der Richtung des Stroms zu dessen Austrittsstelle, zur sogenannten Kathode, die negativen in der entgegengesetzten Richtung zur Eintrittsstelle, der sogenannten Anode, wandern. Das FARADAYSche Gesetz ergibt sich derart aber ohne weiteres mittels der Hypothese, daß die Ladung bei allen einwertigen Ionen ein elektrisches Elementarquantum betrage, bei den zweiwertigen Ionen zwei, bei den dreiwertigen Ionen drei Elementarquanten, und so fort.

Bezeichnen wir nämlich die Zahl der Atome, die in der Zeiteinheit etwa an der Kathode abgeschieden werden, mit  $N$  und die Wertigkeit mit  $z$ , so ist die Stromstärke als die in der Zeiteinheit die Kathode passierende Elektrizitätsmenge

$$(2) \quad J = N z e .$$

Andererseits ist aber, wenn wir das Atomgewicht mit  $A$  bezeichnen, die Masse des einzelnen Atoms gegeben durch den Quotienten aus Atomgewicht und LOSCHMIDTScher Zahl, also durch die Größe  $A/L$ . Die in der Zeiteinheit abgeschiedene Menge des betreffenden Stoffes ist also durch die Beziehung bestimmt

$$(3) \quad M = \frac{N A}{L} .$$

Hierfür können wir nach Gl. 2 auch schreiben

$$(4) \quad M = \frac{A}{z} \frac{J}{L e} .$$

Diese Gleichung drückt aber in der Tat das elektrochemische Grundgesetz aus. Da  $L$  und  $e$  universelle Konstanten sind, folgt nämlich aus dieser Gleichung einerseits, daß bei gegebenem Stoffe, also bei gegebenen Werten von  $A$  und  $z$ , die in der Zeiteinheit abgeschiedene Masse  $M$  der Stromstärke  $J$  proportional ist; andererseits folgt aus der Gl. 4, daß bei gegebenem Strom die Größe  $M$  proportional ist dem Quotienten aus Atomgewicht und Wertigkeit.

Da nach dem früher Gesagten die Größe  $M/A$  die Zahl der Gramm- atome bedeutet, so erkennen wir auch aus der Gl. 4, daß das Produkt aus der LOSCHMIDTSchen Zahl und dem elektrischen Elementarquantum nichts anderes darstellt als die in elektrostatischem Maß gemessene Stromstärke, bei der in der Zeiteinheit ein Gramm- atom eines einwertigen Grundstoffes ausgeschieden wird.

Sehr genaue Messungen, die man vor allem an Silber angestellt hat, haben nun ergeben, daß ein Grammatom eines einwertigen Stoffes in der Zeiteinheit bei einer Stromstärke von 96494 Ampère ausgeschieden würde. Um diese Stromstärke in elektrostatischem Maß auszudrücken, müssen wir noch mit dem zehnten Teil der Lichtgeschwindigkeit multiplizieren. Da die Lichtgeschwindigkeit gleich ist  $2,999 \cdot 10^{10}$  cm sec<sup>-1</sup>, so finden wir derart

$$(5) \quad L e = 2,894 \cdot 10^{14} \text{ elektrost. Einh.}$$

Hieraus folgt bei Benutzung des schon früher angegebenen Wertes des elektrischen Elementarquantums für die LOSCHMIDTSche Zahl

$$(6) \quad L = 6,062 \cdot 10^{23},$$

wobei der mögliche Fehler kaum mehr als ein Promille betragen dürfte.

Nach Gl. 1 ergibt sich somit die Masse des Wasserstoffatoms zu

$$(7) \quad m_H = 1,662 \cdot 10^{-24} \text{ g.}$$

Für das Verhältnis zwischen Ladung und Masse, also für die sogenannte spezifische Ladung des ionisierten Wasserstoffatoms finden wir nach Gl. 1

$$(8) \quad \frac{e}{m_H} = \frac{L e}{1,0077}$$

oder nach Gl. 5

$$(9) \quad \frac{e}{m_H} = 2,871 \cdot 10^{14} \text{ abs. Einh.}$$

### § 3. Die negative Korpuskularstrahlung und das negative Elektron.

Im Jahre 1858 hat PLÜCKER merkwürdige Strahlen entdeckt, die in stark evakuierten GEISSLERSchen Röhren von der Kathode ausgehen und die deshalb allgemein als Kathodenstrahlen bezeichnet werden. Ihre Eigenschaften sind namentlich von HITTORF (1869) und von CROOKES (1879) näher untersucht worden. Beide machten die überraschende Feststellung, daß die im allgemeinen sich geradlinig ausbreitenden Strahlen durch einen Magneten sehr leicht abgelenkt werden. Überdies wies GOLDSTEIN (1876) nach, daß die Kathodenstrahlen auch in einem elektrischen Felde eine Ablenkung erfahren.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Wesentlich gefördert wurde das Studium der Kathodenstrahlen durch einen Kunstgriff LENARDS, der durch eine dünne, in die Röhrenwand eingefügte Metallfolie die Kathodenstrahlen aus der Röhre austreten ließ.

Alle diese Eigenschaften der Kathodenstrahlen lassen sich nun, wie zuerst J. J. THOMSON und KAUFMANN (1897) erkannten, leicht erklären, wenn man annimmt, daß die Kathodenstrahlen aus rasch bewegten, elektrisch geladenen Teilchen bestehen, die zugleich eine träge Masse besitzen. Aus ihrer Trägheit folgt ihre geradlinige Ausbreitung, aus ihrer elektrischen Ladung ergeben sich mit Notwendigkeit die beobachteten Ablenkungen sowohl im magnetischen als auch im elektrischen Felde; der Sinn der Ablenkung zeigt in beiden Fällen, daß die Ladung negativ sein muß. Die Kathodenstrahlen stellen also nicht wie die Licht- oder Wärmestrahlen elektromagnetische Wellenstrahlen dar, sondern eine sogenannte korpuskuläre Strahlung, die aus einem Strom träger Massenteilchen besteht.

Nun folgt aus der Elektrizitätstheorie ohne Zuhilfenahme irgendwelcher atomistischer Vorstellungen, daß eine bewegte, elektrisch geladene Masse in einem transversalen, homogenen Magnetfeld mit konstanter Geschwindigkeit eine kreisförmige Bahn beschreiben muß, und zwar in einer zu den magnetischen Kraftlinien senkrechten Ebene; für den Radius der Kreisbahn gilt dabei die einfache Beziehung

$$(1) \quad r = \frac{c v}{\gamma H},$$

wenn  $H$  der Betrag der magnetischen Feldstärke ist,  $\gamma$  die spezifische Ladung der bewegten Masse und  $v$  ihre Geschwindigkeit.

Ebenso folgt aus der Elektrizitätstheorie (ohne Zuhilfenahme irgendwelcher atomistischer Anschauungen), daß in einem transversalen, homogenen elektrischen Felde ein bewegter geladener Körper eine Parabel beschreibt, deren Krümmung außer von der elektrischen Feldstärke nur von der spezifischen Ladung und der Geschwindigkeit abhängt. Wählen wir nämlich die ursprüngliche Bahnrichtung als  $x$ -Achse und die Richtung der elektrischen Kraft als  $z$ -Achse und wählen wir den Koordinatenursprung so, daß sich zur Zeit  $t=0$  der bewegte Körper in dem Ursprung befindet, so gilt die Beziehung

$$(2) \quad \frac{z}{x^2} = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{v^3} E,$$

wenn  $E$  der Betrag der elektrischen Feldstärke ist.<sup>2</sup>

Die Kathodenstrahlteilchen bewegen sich nun in der Tat, wie die Beobachtung zeigt, im transversalen Magnetfeld in einer kreisförmigen, im transversalen elektrischen Feld in einer parabolischen Bahn. In den beiden Gleichungen können wir also, indem wir sie auf die Kathodenstrahlteilchen anwenden,  $\gamma$  und  $v$  als Unbekannte ansehen und aus den durch Messungen bekannten Werten der magnetischen und der elektrischen Feldstärke derart die Geschwindigkeit und die spezifische Ladung der Kathodenstrahlteilchen ermitteln.

<sup>2</sup> Die exakte Ableitung der Gl. 1 und 2 findet der Leser z. B. in des Verfassers „Einführung in die theoretische Physik“, 3. u. 4. Aufl., Bd. I, § 71.

Für die Geschwindigkeit ergeben sich außerordentlich große Werte, nahezu von der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit, bis zu einem Drittel davon. Im übrigen hängt die Geschwindigkeit natürlich von der Spannung der Kathodenröhre ab (nämlich von dem Potentialunterschied, den die Teilchen durchlaufen). Ist die Röhrenspannung  $V$  und die Ladung eines Kathodenstrahlteilchens  $Q$ , so muß ja das Produkt  $Q V$  gleich sein der kinetischen Energie, die das Kathodenstrahlteilchen bei dem Verlassen der Röhre besitzt, also gleich sein  $\frac{1}{2} m v^2$ . Daraus folgt

$$(3) \quad v = \sqrt{2\gamma V}.$$

Es ist also die Geschwindigkeit proportional der Quadratwurzel aus der Röhrenspannung.

Für die spezifische Ladung ergibt sich aus den Messungen gemäß Gl. 1 und 2 der Wert

$$(4) \quad \gamma = 5,3 \cdot 10^{17} \text{ elektrost. Einh./Gramm.}$$

Vergleichen wir diesen Wert mit demjenigen, der für die spezifische Ladung des ionisierten Wasserstoffatoms gilt, so sehen wir, daß er ungefähr 1800mal größer ist. Machen wir die sehr naheliegende Annahme, daß die Ladung eines Kathodenstrahlteilchens ein elektrisches Elementarquantum betrage, so müssen wir also den Kathodenstrahlteilchen eine Masse zuschreiben, die 1800mal kleiner ist als die des Wasserstoffatoms.

Eine solche Annahme erschien, als sie zuerst geäußert wurde, den Physikern zunächst sehr überraschend, da bis gegen das Ende des 19. Jahrhunderts die Masse des Wasserstoffatoms als die kleinste überhaupt mögliche Masse gegolten hatte. Indessen führte zu derselben Annahme auch der im Jahre 1896 entdeckte (später näher zu besprechende) ZEE-MAN-Effekt (die Zerlegung von Spektrallinien in einem Magnetfeld), und durch die späteren Fortschritte der theoretischen Physik schienen auch alle Folgerungen durchaus bestätigt, die sich aus der Annahme kleinster Teilchen ergeben, deren Masse noch etwa 1800mal kleiner ist als die des Wasserstoffatoms. Solche Teilchen mit der negativen Ladung eines elektrischen Elementarquantums bezeichnet man heute allgemein als negative Elektronen oder auch als Elektronen schlechthin.<sup>3</sup> Für ihre Masse, die in der Atomtheorie allgemein mit  $m$  bezeichnet wird, folgt aus der Gl. 4 und dem bekannten Werte des elektrischen Elementarquantums

$$(5) \quad m = 9,0 \cdot 10^{-28} \text{ g.}$$

Die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen hängt, wie schon erwähnt, von der Röhrenspannung ab; und da diese nicht nach Belieben gesteigert werden kann, so ist dadurch für die Geschwindigkeit der

<sup>3</sup> Der Name Elektron stammt von STONEY (1881).

Kathodenstrahlen eine obere Grenze gegeben, die von dem Stande der Experimentaltechnik abhängt. Außer den künstlich hervorgerufenen negativen Korpuskularstrahlen kennt die Physik aber auch spontan auftretende, die ebenfalls aus negativen Elektronen zusammengesetzt sind, jedoch eine viel größere Geschwindigkeit besitzen; diese Strahlen sind in der Strahlung enthalten, die von den sogenannten radioaktiven Substanzen ausgeht.

Im Jahre 1896 machte BECQUEREL die überraschende Entdeckung, daß Uranerze ohne jede äußere Einwirkung ständig Strahlen aussenden, die imstande sind, eine photographische Platte durch eine undurchsichtige Hülle hindurch zu schwärzen sowie die Luft zu ionisieren und dadurch leitend zu machen, so daß ein in der Nähe aufgestelltes Elektroskop seine Ladung verliert. Zwei Jahre später, im Jahre 1898, fanden PIERRE und MARYA CURIE, daß die sogenannten BECQUEREL-Strahlen, wie man sie ursprünglich nannte, in der Tat vor allem von einem in der Pechblende enthaltenen, damals noch unbekannten Metalle ausgehen, das sie nach mühevollen Untersuchungen aus der Pechblende isolierten und als Radium bezeichneten.<sup>4</sup> Die nähere Untersuchung der von dem Radium und anderen Substanzen ausgehenden „radioaktiven Strahlung“ zeigte nun, daß sie in der Tat aus drei ganz verschiedenen Strahlenarten besteht, die man als Alpha-, Beta- und Gammastrahlen unterscheidet; die Trennung der drei Strahlenarten wird durch ihr verschiedenes Verhalten im Magnetfeld möglich. Während nämlich die  $\gamma$ -Strahlen überhaupt nicht abgelenkt werden und somit als elektromagnetische Wellenstrahlen anzusehen sind, erweisen sich die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlen als Korpuskularstrahlen, die durch einen Magneten abgelenkt werden; und zwar zeigt es sich, daß die (später zu besprechenden)  $\alpha$ -Strahlen positive, die  $\beta$ -Strahlen hingegen negative Ladungen mitführen.

Geschwindigkeit und spezifische Ladung konnten für die Betastrahlen nach derselben Methode wie bei den Kathodenstrahlen ermittelt werden. Für die spezifische Ladung wurde derselbe Wert wie bei den Kathodenstrahlen gefunden, wodurch es erwiesen erschien, daß die  $\beta$ -Strahlen ebenfalls aus negativen Elektronen bestehen. Sie sind also den Kathodenstrahlen durchaus wesensgleich; sie unterscheiden sich aber von ihnen durch eine größere Geschwindigkeit, für die Werte von 30 bis zu 99,8% der Lichtgeschwindigkeit ermittelt wurden.

Die Bewegung der  $\beta$ -Teilchen ist die rascheste materielle Bewegung, die die Physik kennt, und in der Tat offenbaren sich bei dieser ungeheueren Geschwindigkeit, die der Lichtgeschwindigkeit bereits so nahe kommt<sup>5</sup>, deutlich die Abweichungen von der klassischen

<sup>4</sup> Die Gewinnung des metallischen Radiums ist Frau CURIE allerdings erst im Jahre 1910 gelungen; bis dahin waren nur die Salze des Radiums bekannt.

<sup>5</sup> Geschwindigkeiten, die größer als die Lichtgeschwindigkeit sind, erscheinen nach der Relativitätstheorie, wie auch die Gl. 6 zeigt, unmöglich.