

## Einführung in die Quantenphysik - Vorlesung 16

JOCHEN GEPPERT / DIDAKTIK DER PHYSIK

Sommersemester

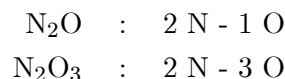
ABSTRACT. Vorbereitend auf die Hypothese de Broglies werden die grundlegenden Vorstellungen und Experimente zur Teilchenvorstellung, insbesondere von Elektronen vorgestellt.

### 1. DIE TEILBARKEIT DER MATERIE

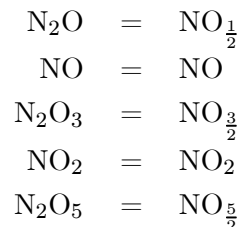
Sollen die stofflichen Eigenschaften der Materie erhalten bleiben, so ist diese nicht beliebig weit teilbar. Der kleinste Baustein der Materie, der noch die typischen physikalischen Eigenschaften des betreffenden Elements trägt, wird Atom genannt. Damit ist gemeint, dass bei weiterer Zerlegung die Bruchstücke sich grundsätzlich von dem Atom unterscheiden. Werden z. B. Ni-Atome in gewisser Weise aneinandergereit, so ergibt sich der Ni-Kristall mit seinen typischen Ni-Eigenschaften. Führt man dasselbe Verfahren mit irgendwelchen Bruchstücken des Ni-Atoms durch, so hat das resultierende Gebilde nichts mehr mit dem Ni-Kristall gemein. In diesem Sinne ist Materie somit nicht beliebig teilbar.

Erste entscheidende Hinweise auf die atomistische und damit nichtkontinuierliche Struktur der Materie ergaben sich aus DALTONs Untersuchungen (1808 - 1810) zur Zusammensetzung chemischer Verbindungen:

1. In einer chemischen Verbindung sind die relativen Gewichte der sie bildenden Elemente (Stoffe) stets konstant. Diese Aussage bezeichnet man als **Gesetz von der Konstanz der Verbindungsgewichte**.
2. Bilden zwei Elemente verschiedene chemische Verbindungen, so ist jede durch eine bestimmte Massenproportion gekennzeichnet:



Die Massenproportionen der verschiedenen Verbindungen stehen dann in einfachen rationalen Verhältnissen zueinander (**Gesetz der multiplen Proportionen**), z. B.:



in diesen Verbindungen verhalten sich die Sauerstoffmassen, bezogen auf eine feste Stickstoffmasse wie 1 : 2 : 3 : 4 : 5.

Mit der heutigen Kenntnis über die atomare Struktur der Materie sind die Gesetze

DALTONs natürlich leicht erklärbar. Bei Annahme einer bel. unterteilbaren Struktur würden sie allerdings große Schwierigkeiten bereiten. Weitere überzeugende Hinweise auf die atomistische Struktur der Materie lieferte die kinetische Gastheorie, deren Grundideen auf BERNOULLI (1738), WATERSTONE (1845), KÖNIG (1856) und CLAUSIUS (1857) zurückgehen. Ihre endgültige Formulierung ist aber MAXWELL und BOLTZMANN zu verdanken.

Die kinetische Gastheorie interpretiert den Gasdruck auf eine Gefäßwand als den Impulsübertrag der winzigen Gaskügelchen auf die Wand pro Flächen- und Zeiteinheit und kommt zu experimentell eindeutig bestätigten Aussagen<sup>1</sup>. Über die Modellvorstellungen der kinetischen Gastheorie lassen sich nicht zuletzt auch quantitative Aussagen zur Wärmeleitung und der Diffusion von Gasen ableiten. Allerdings sind dazu auch Kenntnisse über den Durchmesser der Moleküle vonnöten, wobei insbesondere die Definition eines Teilchendurchmessers problematisch ist.

Die Erfolge der kinetischen Gastheorie<sup>2</sup>, mussten als starke Stütze der Idee vom atomistischen Aufbau der Materie angesehen werden. Letzte Zweifel wurden schließlich durch neuere atomphysikalische Untersuchungen<sup>3</sup> beseitigt.

Der Begriff:

**Atom : kleinster, mit chem. Mitteln nicht mehr  
teilbarer Baustein der Materie**

war damit festgeschrieben.

Ganz analog definiert man das **Molekül** als **das kleinste Teilchen einer chemischen Verbindung, das noch deren typische Eigenschaften besitzt**.

Die Masse eines Atoms wird in der Regel nicht als Absolutwert angegeben, sondern in relativen Einheiten:

Relative Atommasse  $A_r$  : Vielfaches von  $\frac{1}{12}$  der Masse  
des reinen Kohlenstoffisotops  $^{12}\text{C}$

Das Molekulargewicht  $M_r$  von Molekülen berechnet sich mit Hilfe der betreffenden chemischen Formel aus den Atommassen der beteiligten Atome.

Die Masseneinheit  $\left(1u = \frac{1}{12}m^{12}\text{C}\right)$  ist heute sehr genau bekannt:

$$1u = 1.660277 \cdot 10^{-24}g \quad (1)$$

Die Einheit der Stoffmenge ist das **Mol**. Darunter versteht man die Stoffmenge, die aus ebenso vielen Teilchen besteht, wie Atome in 12g reinen atomaren Kohlenstoff

---

<sup>1</sup>Es ist in der historischen Entwicklung der Ideen der Physik völlig einleuchtend, dass man nach den Erfolgen der Mechanik NEWTONs, ihre grundlegenden Vorstellungen auch auf die Beschreibung von Gasen übertragen hat.

<sup>2</sup>Die Erfolge bestehen zweifelsfrei, obwohl in dieser Vorlesung nicht näher auf sie eingegangen wird.

<sup>3</sup>Z.B. die von WILSON konzipierte Nebelkammer, die Spuren atomarer Teilchen sichtbar werden lässt, oder durch die Röntgenbeugung an den mit Atomen in periodischer Anordnung besetzten Gitterebenen von Kristallen.

des  $^{12}\text{C}$  enthalten sind. Nach dem AVOGADRO-Gesetz befindet sich in gleichen Volumina verschiedener Gase bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl von Atomen (Molekülen). Danach nimmt 1 Mol eines Gases stets dasselbe Volumen ein:

$$1 \text{ Molvolumen} = 22.4 \text{ l} \quad (2)$$

Die Teilchenzahl pro Mol heisst **AVOGADRO-** oder **LOSCHMIDT-Zahl** :

$$N_A = 6.0222 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}} \quad (3)$$

sie lässt sich experimentell bestimmen.

Die Systematik der Atommassen hat zum **Periodensystem der Elemente (PSE)** geführt (MEYER, MENDELEJEFF 1869). Zunächst einmal handelt es sich dabei um eine Anordnung der Elemente nach steigenden Atommassen in Perioden nebeneinander und Gruppen untereinander. Da die Atommasse die Stellung des Elements im PSE nicht ganz eindeutig festlegt, hat man die Elemente, einschließlich der zunächst vorhandenen Lücken, vom Wasserstoff zum Uran durchnummeriert. Die Nummer heißt **Ordnungszahl des Elements** - wir wissen heute, dass sie als Zahl der Protonen im Kern des Atoms eine eigenständige physikalische Bedeutung besitzt.

Das Experiment ergab weiterhin, dass chemisch gleichwertige, damit zu derselben Ordnungszahl gehörige Elemente verschiedene Atommassen haben können. Man spricht dann von **Isotopen** und meint Atome mit gleicher Ordnungszahl  $Z$ , aber unterschiedlichen Atommassen.

Nicht ganz unproblematisch ist die Frage nach der Größe der Atome oder bei Annahme einer Kugelgestalt, nach dem Atomradius. Es ergeben sich grundsätzliche Schwierigkeiten, deren Ursachen uns noch beschäftigen werden. Es ist natürlich kein Problem, durch Stoßprozesse den Radius  $R$  einer Billiardkugel zu bestimmen. Sobald der Abstand der Kugelmittelpunkte kleiner als  $2R$  wird, setzt eine Ablenkung ein. Es ist allerdings klar, dass diese Methode bei geladenen Teilchen sehr problematisch wird, da wegen der langreichweitigen Coulomb-Wechselwirkung für praktisch beliebig große Abstände eine Ablenkung stattfindet. Neutrale Atome nehmen dabei eine Mittelstellung ein.

Man findet aber approximativ für einen Atomradius Größenordnungen von

$$R = 0.8 \cdot 10^{-8} \text{ cm bis } 3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

## 2. ELEKTRONEN

**Maple-Programm:** QPVorl16Pr1.mws (Kreisbahn eines Elektrons)

Man hat die Atome, wie schon ihr vom griechischen Woer "atomos" abgeleiteter Name besagt, zunächst für nicht weiter teilbar gehalten und demzufolge unsere gesamte stoffliche Welt als aus den verschiedenen Atomen aufgebaut gedacht. Heute weiss man, dass auch Atome noch teilbar sind, zwar nicht mit chemischen, so doch mit physikalischen Mitteln.

Direkt beobachtet und untersucht wurden elektrisch geladene Atome (die man **Ionen** nennt) zuerst bei der Elektrolyse. Unter Elektrolyten versteht man Stoffe, deren Lösungen oder Schmelze den elektrischen Strom leiten, da sie sich aus Ionen zusammensetzen.

Bringt man in einen Elektrolyten zwei Elektroden und legt an die eine Spannung, so findet man nach gewisser Zeit Massenabscheidungen (aus der Schule ist dies bekannt), für die FARADAY (1791 - 1867) die folgenden Gesetze formulierte:

**1. Die an einer Elektrode abgeschiedene Masse M ist der transportierten Ladung proportional:**

$$M = A \cdot Q \quad (4)$$

A nennt man "elektrochemisches Äquivalent" mit der Einheit  $\frac{kg}{As}$ .

**2. Ein Grammäquivalent transportiert für alle Stoffe dieselbe Ladungsmenge,** gegeben durch die **FARADAY-Konstante:**

$$1 \text{ Grammäquivalent} = 96487 \frac{As}{mol} \quad (5)$$

Ein Mol eines Stoffes enthält stets  $N_A$  Atome bzw. Moleküle. Ein einwertiges Ion ( $H^+$ ) transportiert demnach die Ladung:

$$e = \frac{F}{N_A} = 1.6021 \cdot 10^{-19} As \quad (6)$$

ein n-wertiges dagegen die Ladung  $n \cdot e$ . Ionen können also die Ladungen  $e, 2e, 3e, \dots$ , aber nicht z. B.  $1.5e, 2.5e, \dots$  tragen. Dies war ein deutlicher Hinweis auf die diskrete Struktur der elektrischen Ladung.

Die Bestätigung und direkte Messung der Elementarladung  $e$  gelang als erstem MILLIKAN (1911), der die Bewegung kleinster elektrisch geladener Öltröpfchen in elektrischen Feldern untersuchte.

## 3. DER MILLIKAN-VERSUCH

**3.1. Das Gesetz von STOKES.** Eine Kugel vom Radius  $r$ , dem Volumen  $V$  und der Masse  $m$  falle in einem mit Flüssigkeit der dynamischen Viskosität<sup>4</sup>  $\eta$  gefüllten, senkrecht stehenden Wasserrohr vom Radius  $R$ . In der Flüssigkeit wirken drei Kräfte: die Gewichtskraft  $F_G = mg$ , die Auftriebskraft<sup>5</sup>  $F_A = \rho_{Fl} \cdot V \cdot g$  und die Reibungskraft  $F_R$ . Die Geschwindigkeit der fallenden Kugel verändert sich solange, bis sich ein Gleichgewicht der Kräfte eingestellt hat. Da  $F_R$  und  $F_A$  nach oben,  $F_G$  nach unten wirken, gilt im Gleichgewichtszustand:

$$\begin{aligned} F_R \cdot \mathbf{e}_z + F_A \cdot \mathbf{e}_z - F_G \cdot \mathbf{e}_z &= \mathbf{0} \\ F_R + F_A - F_G &= 0 \end{aligned}$$

Die Reibungskraft berechnet sich nach dem Gesetz von STOKES:

$$F_R = 6\pi\eta \cdot v \cdot r \quad (7)$$

**3.2. Grundlagen des MILLIKAN-Versuchs.** Durch Zerstäubung von Öl - das zwischen die Platten eines Kondensators geblasen wird - entstehen feine Tröpfchen mit einem Durchmesser von etwa  $1\mu m$ . Meist sind sie geringfügig positiv oder negativ geladen. In einem elektrischen Feld (deshalb der Kondensator) überlagert sich der Schwerkraft noch die elektrostatische Anziehungskraft.

Betrachte dazu die folgende Kräftebilanz:

## 1. Fall eines Öltröpfchens ohne elektrisches Feld:

$$\begin{aligned} -F_G \cdot \mathbf{e}_z + F_R \cdot \mathbf{e}_z &= 0 \\ mg &= 6\pi r \cdot v_1 \cdot \eta \\ m &= \rho_{Öl} \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \end{aligned}$$

## 2. Aufstieg eines Öltröpfchens mit elektrischem Feld:

In diesem Fall gilt dann:

$$\begin{aligned} -F_G \cdot \mathbf{e}_z - F_{el} \cdot \mathbf{e}_z &= F_R \cdot \mathbf{e}_z \\ F_R &= -F_G - F_{el} \\ 6\pi r v_2 \eta &= -\rho_{Öl} \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 g + q \cdot E \\ E &= \frac{U}{d} \\ d &: \text{Plattenabstand} \\ U &: \text{angelegte Spannung} \end{aligned}$$

verknüpft man beide Fälle, so erhält man:

$$q = \frac{6\pi\eta d}{U} \sqrt{4.5 \cdot \frac{\eta v_1}{\rho_{Öl} g}} \cdot (v_1 + v_2)$$

<sup>4</sup>Sie ist ein Maß für die Zähigkeit einer Flüssigkeit, Honig ist zäher als Wasser.

<sup>5</sup>Diese berücksichtigen wir aber im Versuch nicht, da die Öltröpfchen zu klein sind.

$$\begin{aligned}\eta &= 1.8 \cdot 10^{-5} \frac{Ns}{m^2} \\ d &= 6 \cdot 10^{-3} m \\ \rho_{Öl} &= 870 \frac{kg}{m^3}\end{aligned}$$

In einem Plattenkondensator werden dann durch einen Zerstäuber Öltröpfchen eingeblasen, die wegen der Reibungselektrizität positiv oder negativ geladen sein können. Durch Regeln der angelegten Spannung lassen sich die Öltröpfchen steuern. Betrachte dazu die Schaltskizze.

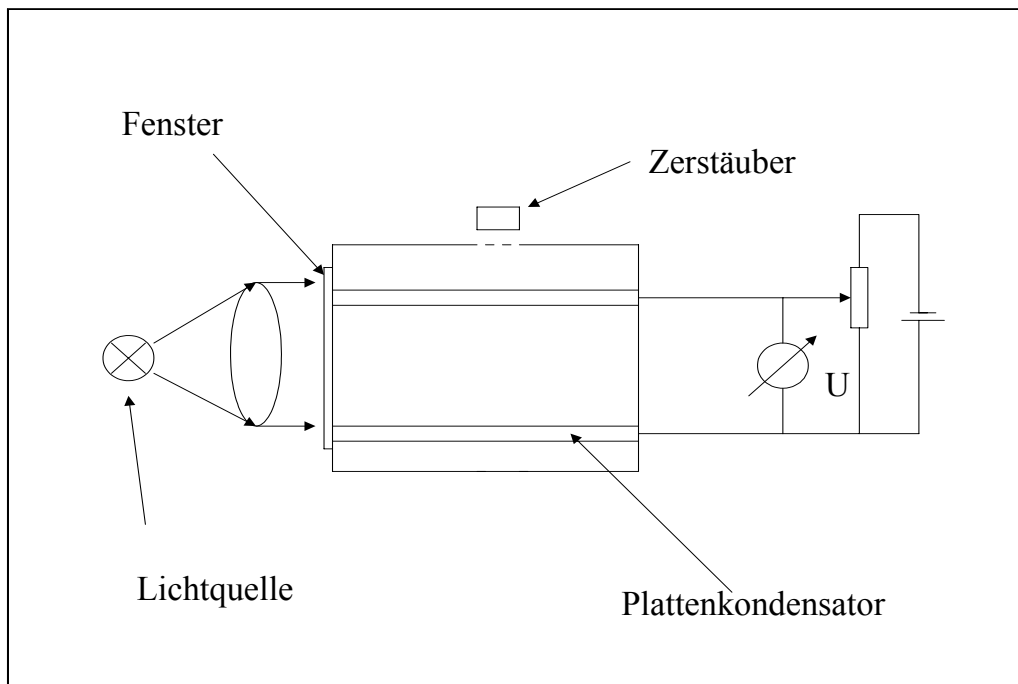


Figure 1: Schematische Darstellung des MILLIKAN-Versuchs.

Die Öltröpfchen lassen sich nun durch ein Mikroskop beobachten, dabei ist innerhalb des Okulars eine cm-Skala angebracht und über eine parallele Zeitmessung kann man die Geschwindigkeit eines einzelnen Öltröpfchens beobachten. Man sucht sich also ein Öltröpfchen aus, das ohne angelegte Spannung langsam fällt und mit einer Spannung von 500V bis 600 V langsam steigt. Als Wegstrecke verwendet man wie beschrieben die Markierungslinien im Okular und misst die Steig- bzw. Fallzeiten und die Spannung, die beim Aufsteigen angelegt wird.

Jedes Öltröpfchen trägt nun eine gerade Anzahl von Elementarladungen<sup>6</sup>. Mit den Versuchsgeräten wie sie in Schulen oder der Universität vorhanden sind, erhält man

<sup>6</sup>Man erhält nach Division durch eine gerade Zahl immer ein ähnliches Ergebnis - Millikan hat zehntausende (!! ) Öltröpfchen untersucht.

nach der Betrachtung von rund 40 Öltröpfchen den Wert:

$$(1.87 \pm 0.1) \cdot 10^{-19} C$$

Die Abweichung vom Literaturwert  $1.602 \cdot 10^{-19} C$  hat dabei die folgenden Ursachen, die BROWN-Zitterbewegung überlagert sich bei der Beobachtung eines Öltröpfchens immer wieder. Eine weitere Ursache ist die Nichtberücksichtigung der Auftriebskraft. Es muss eigentlich die STOKES-Reibungskraft korrigiert werden ("CUNNINGHAM-Korrektur"), da die mittlere freie Weglänge eines Öltröpfchens in der Größenordnung des Teilchenradius liegt. Man muss also die Zähigkeit des Öls korrigieren. Hinzu kommen natürlich die Fehler durch die verschmutzte Apparatur und natürlich werden in einem Praktikumsversuch erheblich weniger Tröpfchen untersucht.

#### 4. DIE GASENTLADUNG

Bei der selbstständigen Gasentladung befindet sich ein Gas zwischen zwei Elektroden, an die eine Spannung angelegt ist. Bei Abwesenheit äußerer Einwirkungen besteht ein Gas aus elektrisch neutralen Molekülen und enthält an sich keine freien beweglichen Ladungsträger.

Bei der unselbstständigen Gasentladung befinden sich aus irgendeiner vom Stromdurchgang selbst unabhängigen Ursache Ladungsträger im Gas, und diese werden durch ein im Feld herrschendes elektrisches Feld an die Anode bzw. Kathode befördert.

In Entladungen bei höheren Drucken und Stromstärken (Lichtbogen, Funken) heizen die Elektronen das Gas richtig auf, durch das sie fließen. Dieser Vorgang ist analog zum Strom, der die Wendel einer Glühlampe auf hohe Temperatur bringt. Die hohe Temperatur bewirkt im Gas, dass einige Elektronen von ihren Atomen oder Molekülen abgespalten werden, die sogenannte thermische Ionisation. Bei tieferem Druck und geringer Stromstärke überwiegt hingegen die Stossionisation. Diese besteht darin, dass schon vorhandene Elektronen durch das elektrische Feld so stark beschleunigt werden, dass sie imstande sind, bei einem Zusammenstoß mit einem Molekül ein weiteres Elektron von diesem abzuspalten. Das Molekül wird dadurch zu einem positiven Ion und die Anzahl der freien Elektronen wird um eins vermehrt. Das Gas wird also ionisiert.

Die auf diese Weise erzeugten neuen Ladungsträger können durch das Feld so beschleunigt werden, dass sie auch wieder Ladungsträger erzeugen usw.

Damit eine selbstständige Entladung überhaupt einsetzen kann, müssen also schon von Anfang an einige Ladungsträger im Gas vorhanden sein. Das ist stets der Fall und lässt sich nie ganz vermeiden, schon deshalb nicht, weil sich überall stets Spuren von radioaktiven Stoffen befinden, deren Strahlung ionisierend wirkt.

Die für eine unselbstständige Entladung erforderliche Ionisation kann in einem Gas auf verschiedene Arten entstehen. Bei der Volumionisation werden die Ladungsträger im Gas selbst durch eine auf seine Moleküle wirkende Ursache erzeugt. Bei der Oberflächenionisation werden sie von außen her, aus der Oberfläche der einen Elektrode in das Gas gebracht. Eine Ionisation des Materials einer Elektrode kann natürlich wie wir bereits wissen durch Bestrahlung mit kurzwelligem Licht zustande kommen (Photoeffekt) oder durch Erwärmung (Glühemission).

Das folgende Bild zeigt eine einfache Anordnung zur Untersuchung von Strömen durch ein Gas:

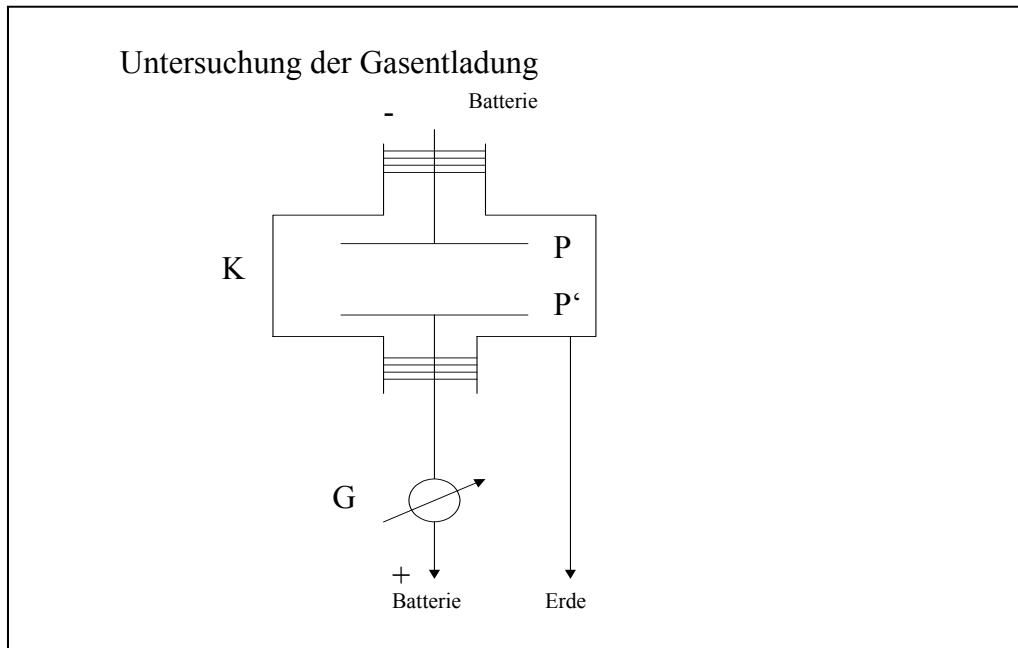


Figure 2: Schematische Darstellung zur Gasentladung.

Das Gas befindet sich in dem Metallkasten K, der mit der Erde leitend verbunden ist und gleichzeitig als elektrischer Schutzkäfig dient. Im Gasraum befinden sich zwei isoliert eingeführte Elektroden P und P', an die eine Spannung angelegt wird. Mit einem Strommesser G kann man die Abhängigkeit der Stromstärke untersuchen, wenn das Gas ionisiert ist.

Man beachte, dass alle diese Erklärungen natürlich selbstverständlich davon ausgehen, dass ein Elektron ein wie auch immer aussehendes festes Teilchen ist. Auf gar keinen Fall kann es irgendwelche Welleneigenschaften besitzen.



## 5. DAS FREIE ELEKTRON

Einen ersten deutlichen Hinweis, dass die Elementarladung nicht nur in an Atome oder Moleküle gebundenen Zuständen, sondern auch frei auftreten kann, lieferte die Untersuchung der elektrischen Entladung in verdünnten Gasen.

Bei der Gasentladung werden offenbar neutrale Atome in positiv geladene Ionen und negativ geladene Elementarpakete (-quanten) zerlegt. Für letztere hat man die Bezeichnung Elektronen vereinbart. Zur Bestimmung charakteristischer Eigenschaften des Elektrons ist es zunächst notwendig, freie Elektronen zu erzeugen. Dazu gibt es eine Reihe von Möglichkeiten.

1. Elektronenbefreiung durch Stossionisation.
2. Glühemission aus hoch erhitzten Metalloberflächen.

Der maximale Strom der sich durch Absaugen der Elektronen von der thermisch emittierenden Oberfläche durch ein elektrisches Feld erreichen lässt, hängt nach der **RICHARDSON-Gleichung**

$$I_S \sim T^2 \cdot \exp\left(-\frac{W_A}{k_B T}\right)$$

exponentiell von der Temperatur und der uns schon vom Photoeffekt bekannten Austrittsarbeit  $W_A$  ab.  $W_A$  ist eine Eigenschaft des Elektronen emittierenden Materials<sup>7</sup>.

3. Lichtelektrischer Effekt.
4. Feldemission

Durch extrem hohe elektrische Felder, wie sie z. B. an scharfen Metallspitzen sich ausbilden, lassen sich Elektronen aus Metallflächen abziehen.

5.  $\beta$  – Strahlen : Bestimmte radioaktive Substanzen  
emittieren spontan Elektronen, z. B.  ${}^{60}_{27}\text{Co}$

Nachdem man auf solche oder ähnliche Weise Elektronen erzeugt hat, kann man deren Bewegungen im elektromagnetischen Feld ausnutzen, um weitere experimentelle Informationen zu erhalten. Im Rahmen der klassischen Physik ist die Bewegung des Elektrons im Feld durch die Masse  $m$  und die Ladung  $q = -e$  beschreibbar. Von der räumlichen Ausdehnung des Elektrons kann in guter Näherung abgesehen werden. Man beschreibt es als geladenen Massenpunkt oder als Punktladung. Die Untersuchung der Elektronenbahnen im elektromagnetischen Feld gestattet allerdings nur die Bestimmung der spezifischen Ladung  $\frac{e}{m_e}$ , die wir aus dem MILLIKAN-Versuch bereits kennen.

---

<sup>7</sup>Zur Erinnerung: sie gibt an, wie "leicht" ein Elektron das Material verlassen kann.

Betrachte die folgende Schaltungsskizze:

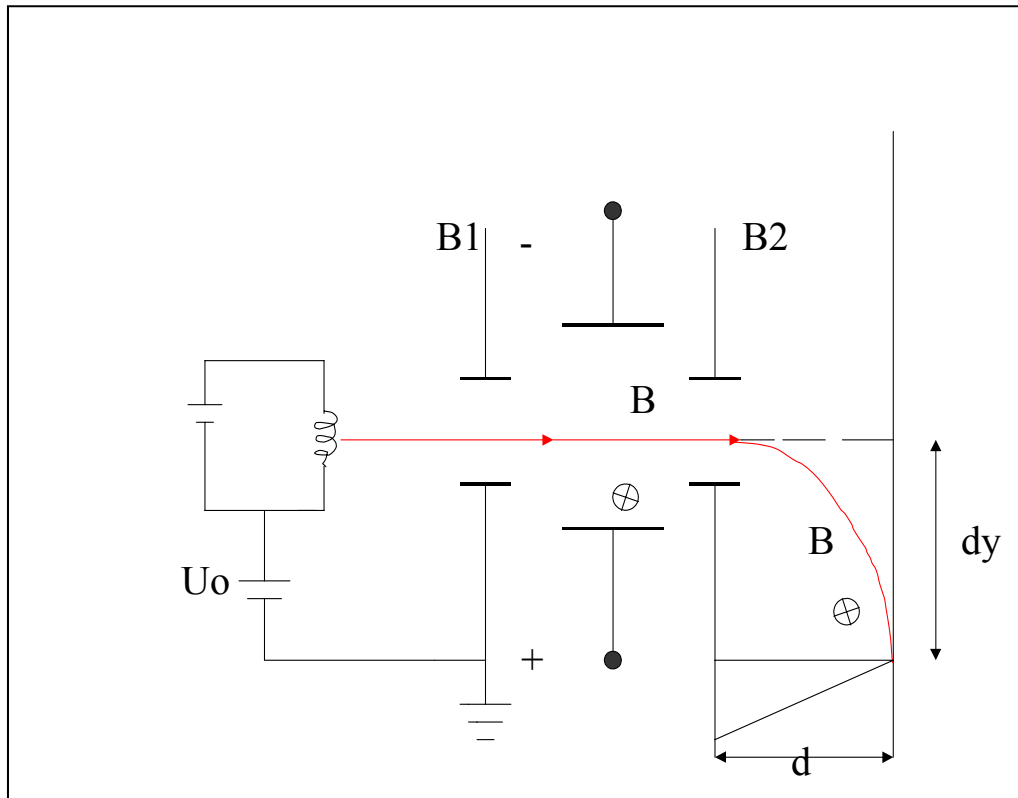


Figure 3: Schaltungsskizze zum WIEN-Filter.

Das Elektron verlässt eine Glühkathode und durchläuft bis zu einer Blende  $B1$  eine Spannung  $U_0$  und erhält damit eine kinetische Energie  $q \cdot U_0$ . Im Kondensator herrscht in  $y$ -Richtung und dazu senkrecht - also in die Papierebene hinein - ein homogenes Magnetfeld  $\mathbf{B}$ . Um durch die zweite Blende  $B2$  zu gelangen, darf das Elektron im Kondensator insgesamt keine Ablenkung erfahren:

$$\mathbf{F} = 0 \Rightarrow q \cdot \mathbf{E} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \Rightarrow |\mathbf{v}| = \frac{|\mathbf{E}|}{|\mathbf{B}|}$$

Das elektromagnetische Feld im Kondensator sortiert also nach Geschwindigkeiten. Nur Elektronen mit der richtigen Geschwindigkeit kommen durch. Man nennt dieses Feld einen sogenannten **WIEN-Filter**. Man kann durch die passende Wahl von  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{B}$  demnach die gewünschte Geschwindigkeit  $v$  einstellen. Außerhalb des Kondensators wirkt dann nur noch das Magnetfeld  $\mathbf{B}$  und zwar in der Weise, dass das Elektron auf eine Kreisbahn gezwungen wird<sup>8</sup>. Der Radius dieser Kreisbahn berech-

<sup>8</sup>Wir kennen diesen Fall bereits - siehe Vorlesung 11 zur Einführung in die Quantenphysik.

net sich aus:

$$m_e \frac{v^2}{r} = q \cdot v \cdot B \implies r = \frac{mv}{qB}$$

Gemessen wird nun die Ablenkung  $\Delta y$  auf dem Schirm:

$$r^2 = d^2 + (r - \Delta y)^2 \implies r = \frac{d^2 + \Delta y^2}{2\Delta y}$$

Diesen Ausdruck setzen wir in die vorherige Gleichung ein und erhalten:

$$\frac{v^2}{r} = \frac{q}{m_e} v B, v = \frac{E}{B} \implies \frac{q}{m_e} = \frac{E}{B^2} \left( \frac{2\Delta y}{d^2 + \Delta y^2} \right)$$

Damit ist die spezifische Ladung  $\frac{q}{m_e}$  des Elektrons in der Tat allein durch  $\Delta y$  bestimmt.

Experimente dieser Art ergaben:

1. Für Kathodenstrahlen ist  $\frac{q}{m_e} < 0$  und damit  $q$  stets negativ.
2. Wegen des scharfen Spaltbildes muss  $\frac{q}{m_e}$  für alle Elektronen gleich sein:

$$\frac{q}{m_e} = -1.75890 \cdot 10^{-11} \frac{As}{kg} \quad (8)$$

Da nur  $\frac{q}{m_e}$  messbar ist, muss es als, wenn auch bisher widerspruchsfreies Postulat aufgefasst werden, dem Elektron die im MILLIKAN-Versuch entdeckte Elementarladung  $e$  zuzuordnen:

$$q(\text{Elektron}) = -e$$

Damit ist aber auch die Elektronenmasse  $m_e$  bestimmt :

$$m_e = 9.1096 \cdot 10^{-31} kg \quad (9)$$

Die Eigenschaft des Elektrons eine bestimmte Masse zu besitzen wurde als weiterer Beleg der Vorstellung eines winzigen Teilchens gedeutet. Die in dieser Vorlesung betrachteten Gesetze der klassischen Elektrodynamik sind experimentell eindeutig belegt und sie fußen auf der Annahme, dass das Elektron ein Teilchen ist. Neben einer festen Masse und einem Impuls ist eine weitere Teilcheneigenschaft die einer Bahn. Die Bahnberechnung von Elektronen durch die Lorentz-Kraft, ist ein weiterer Beleg für die Teilchenvorstellung des Elektrons.

Wie wir bereits wissen, kann man ein Elektron durch ein konstantes  $\mathbf{B}$ -Feld auf eine Kreisbahn zwingen<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup>Siehe Skript 11 zur Vorlesung Einführung in die Quantenphysik.

Die folgende Abbildung zeigt noch einmal einen Vergleich zwischen dem Verlauf eines Elektronenstrahls im konstanten  $\mathbf{B}$ -Feld zwischen einem HELMHOLTZ-Spulenpaar und dem theoretischen Ergebnis der Bahnberechnung über die LORNTZ-Kraft<sup>10</sup>:

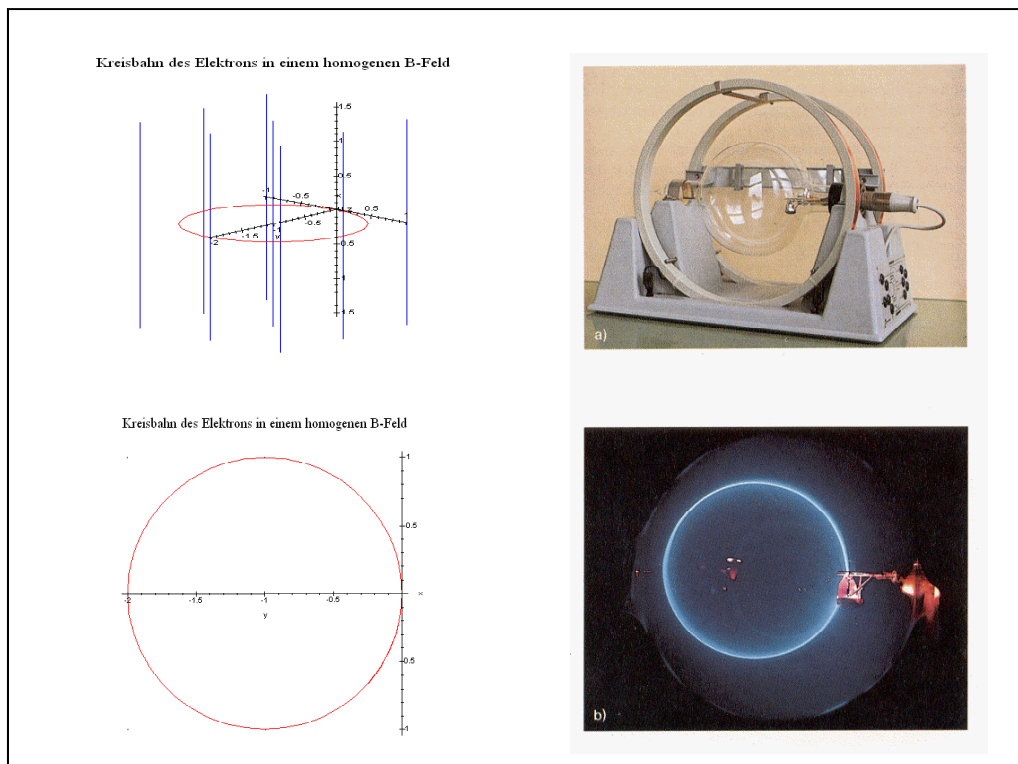


Figure 4: Vergleich zwischen der theoretisch errechneter Bahn des Elektrons und dem experimentellen Ergebnis.

Ein weiterer überzeugender Beleg der Bewegung von Elektronen auf Bahnen sind die Blaskameraaufnahmen der Bahnen von Elektronen. Die Blaskammer dient wie auch die Nebelkammer zur Sichtbarmachung von Bahnen geladener Teilchen. In der Kammer befindet sich eine überhitzte Flüssigkeit - meistens handelt es sich hierbei um flüssigen Wasserstoff. Die Teilchen erzeugen entlang ihrer Bahn Ionen, die als Kerne für die Bildung von Dampfbläschen in der durch eine plötzliche Drucksenkung überhitzten Flüssigkeit dienen. Die Teilchenbahn ist dann als Blasenspur sichtbar und man kann sie photographieren.

Wird die Blaskammer von einem Magnetfeld durchsetzt, so macht sich die elektrische Ladung der Teilchen durch Krümmung der Bahnen bemerkbar. Aus der Krümmung der Bahn kann man wie oben beschrieben quantitative Aussagen über die Teilcheneigenschaften machen.

<sup>10</sup>Die Abbildung stammt aus Metzler: Physik, 2. Auflage, Schroedel-Verlag 1992, S. 231.

Betrachte dazu die folgende Abbildung eines Elektrons<sup>11</sup>:

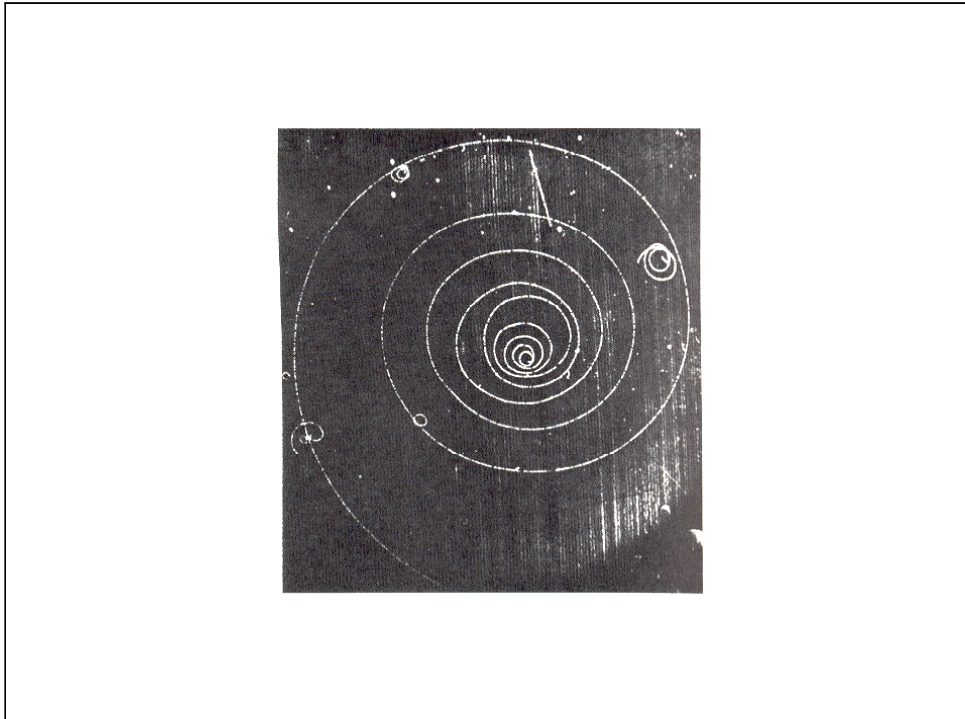


Figure 5: Blasenkammeraufnahme eines sehr schnell bewegten Elektrons. Das Elektron tritt von links unten in den Bildausschnitt ein. Das  $\mathbf{B}$ -Feld ist senkrecht zur Bildebene gerichtet und weist vom Betrachter weg. Auf seiner Bahn verliert das Elektron Energie, das es die Wasserstoffmoleküle ionisiert. Diese Energieabnahme des Elektrons bedeutet eine Verringerung seiner Geschwindigkeit und macht sich als stärkere Krümmung der Bahnkurve bemerkbar.

---

<sup>11</sup>Sie stammt ebenfalls aus Metzler: Physik, Schroedel-Verlag 1992, S. 230.

## 6. DIE RUTHERFORD-STREUUNG

Nachdem Elektrolyse und Gasentladung bereits deutliche Hinweise darauf gegeben haben, dass die Atome durchaus noch in gewisse Unterstrukturen zerlegbar sind, begann die eigentliche Untersuchung des Atomaufbaus mit den Experimenten von LENARD, der schnelle Elektronen auf Metallfolien schoss. Die Beobachtung, dass schnelle Elektronen eine Vielzahl von Atomen durchdringen können, ohne merklich abgelenkt zu werden, erzwang die Schlussfolgerung, dass Atome nicht als massive Gebilde aufgefasst werden können.

1896 war von BECQUEREL die Radioaktivität entdeckt worden. RUTHERFORD konnte deshalb in den Jahren 1906 bis 1913 seine Streuversuche an dünnen Materialien statt mit Elektronen mit den rund 7000 mal schwereren, zweifach positiv geladenen  $\alpha$  - Teilchen ( $\text{He}^{++}$ - Ionen) durchführen. Ein scharf ausgeblendeter  $\alpha$ -Strahl wurde auf eine dünne Goldfolie geschossen (Dicke  $\sim 10^{-3}\text{mm}$ ). Man beobachtete, dass fast alle Partikel die Goldfolie unbeeinflusst durchsetzen. Einige wenige werden aber auch sehr stark abgelenkt, bisweilen sogar mehr als  $90^\circ$ , sie fliegen also wieder zurück. Aus der Seltenheit großer Ablenkwinkel schloss RUTHERFORD, dass der Radius des ablenkenden Zentrums im Atom - also der Atomkern - etwa  $10^{-12}\text{cm}$  bis  $10^{-12}\text{cm}$  betragen dürfte.

Um die schweren  $\alpha$ -Teilchen ablenken zu können, muss er zudem praktisch die ganze Atommasse in sich vereinigen. Aus der Art der Ablenkung erfolgt zwingend, dass der Kern ebenso wie die  $\alpha$ -Teilchen positiv geladen sein muss. Die Ladungsneutralität des Atoms wurde nach RUTHERFORD von fast masselosen Elektronen gewährleistet. Sie kreisen um den Kern. Wegen der zu kleinen Elektronenmasse sollten die schwereren  $\alpha$ -Teilchen nur am Kern gestreut werden - man stellte sich das wie ein Billardspiel vor.

Diese weitgehend richtigen, damals völlig neuartigen Vorstellungen werden heute als **RUTHERFORD-Atommodell** bezeichnet.

Man hatte also bis Anfang der zwanziger Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts die Vorstellung, dass das Elektron ein winziges kugelartiges Gebilde sei, das Träger der Elementarladung ist.