

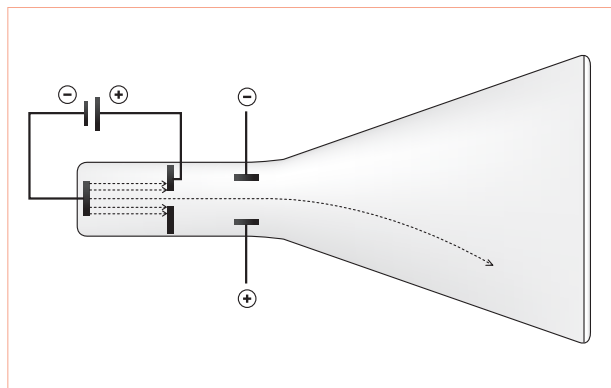
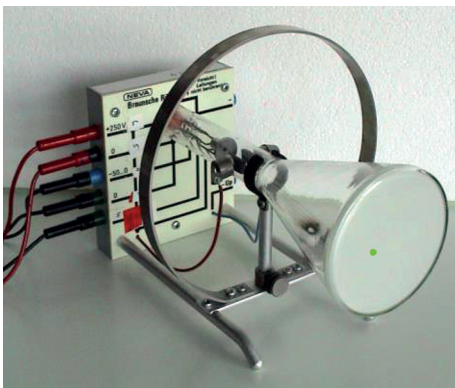
### 3.7 Exkurs: Die Entdeckung der Atombausteine und der Isotope – Massenbestimmung

Der Durchmesser eines Protons liegt in der Grössenordnung von  $10^{-15}$  m, Elektronen sind noch viel kleiner. Trotzdem gelang es bereits im 19. Jahrhundert, diese Elementarteilchen hinsichtlich Masse und Ladung zu charakterisieren. Wie war das möglich? Die elektrostatischen Kräfte erwiesen sich dafür als ein fantastisches Werkzeug.

Ende des 18. Jahrhunderts gab es die Möglichkeit, mit Vakuumröhren zu experimentieren, da immer bessere Vakuumpumpen entwickelt wurden. Mithilfe dieser Röhren und der Kenntnis der Kräfte zwischen elektrisch geladenen Teilchen (Coulomb-Gesetz) gelang die Entdeckung der Elektronen und Protonen sowie der Nachweis von Isotopen. Ausserdem lässt sich mit Vakuumröhren auf einfache Weise die Masse von Teilchen bestimmen.

#### Die Entdeckung der Elektronen

Erzeugt man in einem evakuierten Glasrohr eine hohe elektrische Spannung zwischen zwei Elektroden, so kann man auf einem Leuchtschirm eine sonst unsichtbare «Strahlung» beobachten. Sie stammt vom Metall der glühenden Kathode (negativer Pol) und bewegt sich auf die Anode (positiver Pol) zu. Die englischen Physiker Cromwell F. Varley (1828–1883) und William Crookes (1832–1919) erkannten 1870 bzw. 1879, dass es sich bei dieser Kathodenstrahlung um Teilchen handeln musste. Diese fliegen im Kathodenstrahlrohr, wie man die Versuchsvorrichtung nun nannte, geradlinig durch ein Loch in der Anode und lassen sich anschliessend von einem positiven Pol ablenken (Abb. 3.9). Da diese Teilchen von einer positiven Ladung angezogen und abgelenkt werden, müssen sie eine negative Ladung tragen (anziehende Coulomb-Kräfte).



**Abb. 3.9**

Links: Kathodenstrahlrohr, den grünen Punkt erzeugen die Teilchen beim Aufprall auf die Leuchtschicht; rechts: schematische Darstellung.

Joseph J. Thomson (1856–1940) bestimmte 1897 mithilfe des Kathodenstrahlrohrs das Verhältnis von Ladung und Masse der Teilchen aus der beobachteten Ablenkung, die u. a. von der Masse abhängig ist. Je grösser die Masse, desto geringer ist die Ablenkung. Der Forscher nahm bei diesem Experiment an, dass die Elektronen, wie sie erstmals 1881 vom englischen Physiker George J. Stoney (1826–1911) bezeichnet wurden, die Elementarladung tragen.

Verhältnis Elementarladung zur Masse eines Elektrons:

$$\frac{e}{m(e^-)} = 1.759 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

$e$ : Elementarladung;  $m(e^-)$ : Masse eines Elektrons;  $C$  (Coulomb): Ladung der Teilchen

Nachdem Robert A. Millikan (1868–1953) 1913 die Elementarladung  $e$  bestimmt hatte, liess sich mit der Beziehung von Thomson die Masse eines Elektrons berechnen:

$$e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

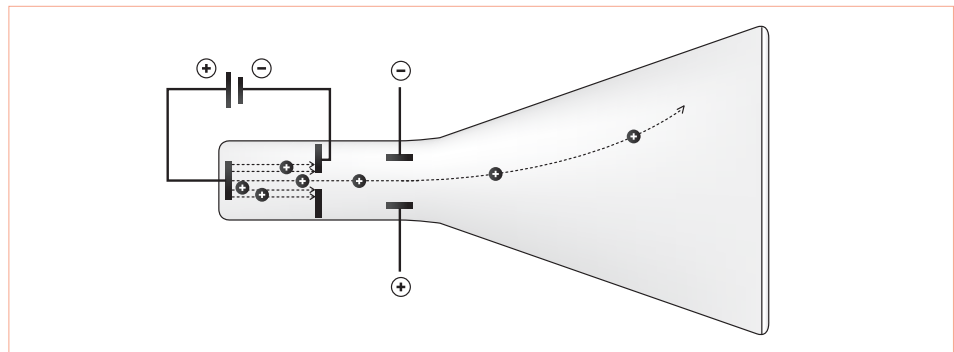
$$m(e^-) = \frac{1.602 \cdot 10^{-19}}{1.759 \cdot 10^{11}} = 9.107 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad \text{bzw.} \quad m(e^-) = 9.107 \cdot 10^{-28} \text{ g}$$

### Die Entdeckung der Protonen

1886 verwendete Eugen Goldstein (1850–1930) eine dem Kathodenstrahlrohr ähnliche Vorrichtung, die ein Loch (einen «Kanal») in der Kathode enthielt (Kanalstrahlrohr). Er führte den Versuch nicht im Vakuum durch, sondern benutzte Wasserstoff als Füllgas und vertauschte Anode und Kathode.

**Abb. 3.10**

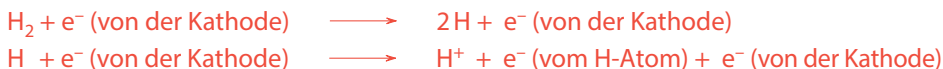
Schema eines Kanalstrahlrohrs; statt der Anode wie beim Kathodenstrahlrohr enthält die Kathode eine Öffnung, einen «Kanal».



Beim Anlegen einer Spannung konnte Goldstein beobachten, dass sich neben den Kathodenstrahlen (Elektronen vom Minus- zum Pluspol) auch Teilchen von der Anode zur Kathode bewegten, also vom Plus- zum Minuspol. Nach dem Passieren der Öffnung wurden sie von einem weiteren negativen Pol angezogen. Die Ladung dieser Teilchen musste demnach derjenigen der Elektronen entgegengesetzt sein. Thomson sprach 1907 von positiver Strahlung. Man konnte schliesslich feststellen, dass die Protonen (gr. *protos* = der Erste), wie Ernest Rutherford (1871–1937) die Teilchen 1920 nannte, die positive Elementarladung tragen und knapp 2000 Mal schwerer sind als die Elektronen.

Was passiert im Kanalstrahlrohr? Die Elektronen der Kathode stossen mit den kleinsten Teilchen des Wasserstoffs zusammen. Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, sind dies keine H-Atome, sondern  $\text{H}_2$ -Moleküle, die zunächst von den Elektronen der Kathode in die Atome gespalten werden. Durch den Aufprall wei-

terer Kathodenelektronen auf die H-Atome verlieren diese ihr Elektron. Die jetzt positiv geladenen H-Atome, die Protonen, werden nun von der Kathode angezogen und durchqueren dabei die Öffnung, den «Kanal», der Elektrode. Anschließend kommt es zu einer Ablenkung zum Minuspol. Daraus lassen sich Masse und Ladung der Protonen berechnen.



### Die Entdeckung der Neutronen

Rutherford vermutete 1921 die Existenz von ungeladenen Teilchen als weitere Bausteine der Atome. Walther W. G. Bothe (1891–1957) beobachtete 1930 gemeinsam mit dem Studenten Herbert Becker beim Beschuss des Elements Beryllium mit  $\alpha$ -Teilchen (zweifach positiv geladene Helium-Atome,  $\text{He}^{2+}$ ), die von radioaktiven Elementen freigesetzt werden (Exkurs 4.9), eine durchdringende, sehr energiereiche Strahlung, die nicht durch eine elektrische Ladung abgelenkt werden konnte. Sir James Chadwick (1891–1974) zeigte 1932, dass es sich dabei um Neutronen handelt. Die Masse der Neutronen entspricht jener der Protonen.

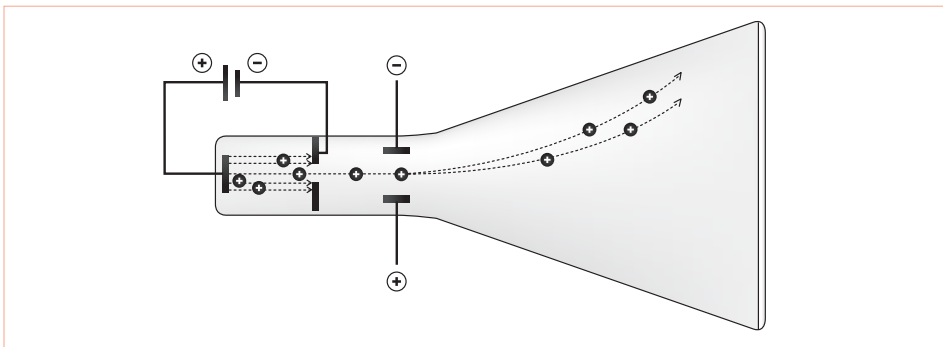


(Die Kerne der beiden Nuklide verschmelzen, das dabei gebildete Kohlenstoff-Nuklid  ${}^{13}_6\text{C}$  spaltet anschliessend ein Neutron ab.)

### Der Nachweis von Isotopen – Massenspektrometer

Die Versuchsanordnung von Goldstein, das Kanalstrahlrohr, ist von grosser Wichtigkeit für die Bestimmung der Atommassen. Dabei macht man sich die Tatsache zunutze, dass elektrisch geladene Teilchen, die in Bewegung sind, durch Coulomb-Kräfte unterschiedlich stark abgelenkt werden. Je kleiner die Masse eines Teilchens, desto grösser ist die Ablenkung.

Die von der Kathode ausgehenden Elektronen stossen mit den Atomen eines Füllgases im Kanalstrahlrohr zusammen, die dadurch je ein Elektron verlieren. So entstehen einfach positiv geladene Atome. Ein Teil von ihnen fliegt durch das Loch in der negativen Elektrode. Mithilfe von zwei weiteren Elektroden lässt sich die Masse der Teilchen ermitteln, indem ihre Ablenkung gemessen wird. Thomson benutzte 1910 diese Versuchsanordnung, um die Masse der Atome von Elementen zu bestimmen. Als er einen Strahl positiv geladener Neon-Atome untersuchte, konnte er zwei verschieden schwere Teilchen beobachten.



**Abb. 3.11**

Nachweis der Isotope von Neon

Daraus folgte Thomson, dass es Neon-Atome mit unterschiedlicher Masse gibt. Das Element Neon besteht also nicht aus völlig identischen Atomen, sondern aus einer Mischung von verschiedenen schweren Atomen, die jedoch, wie man inzwischen wusste, alle gleich viele Protonen besitzen und sich damit nur in der Neutronenzahl unterscheiden:

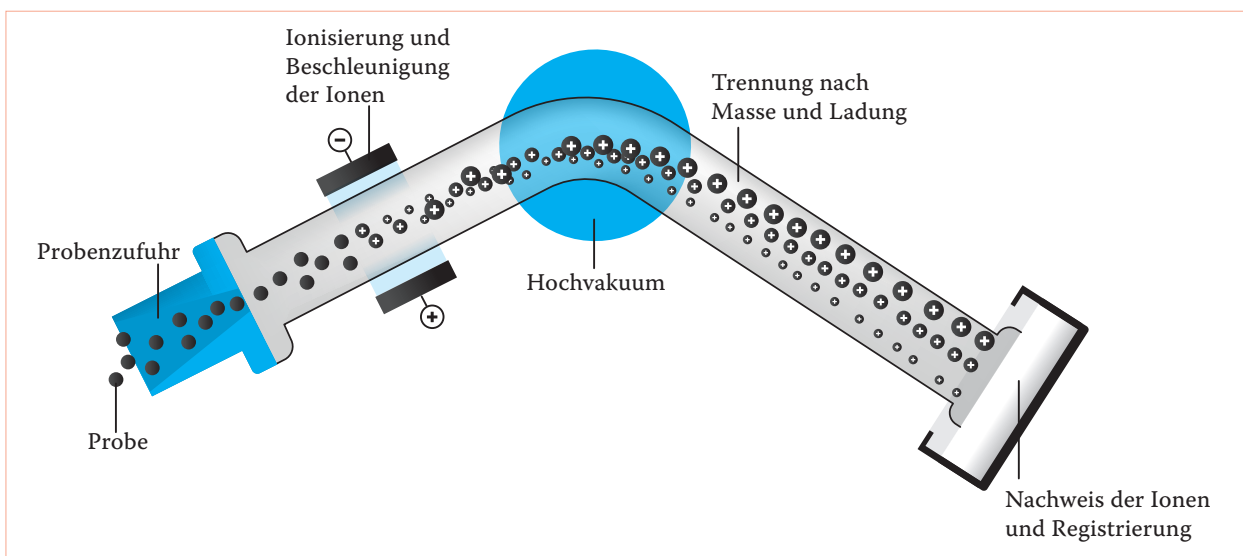


Frederick Soddy (1877–1956) prägte 1913 für diese Atome den Namen Isotope oder isotope Nuklide (gr. *isos* = gleich; gr. *topos* = Ort; vgl. Abschnitt 3.3), da sie den gleichen Platz im Periodensystem einnehmen.

Heute kann man mit einem Massenspektrometer, einer modernen Fortentwicklung des Kanalstrahlrohrs, sehr rasch und äusserst exakt die Massen eines unbekannten Stoffs ermitteln. Dabei verdampft man den Stoff und erhitzt ihn so stark, dass beim Beschuss mit Elektronen kleine Bruchstücke entstehen, die elektrisch positiv geladen sind (Ionen). Diese lassen sich zu einem Strahl bündeln und ablenken. Ionen mit kleinerer Masse werden stärker, solche mit grösserer Masse schwächer abgelenkt. Aus den gemessenen Ablenkungswinkeln kann die Masse der Ionen und dadurch auch die Gesamtmasse der Stoffteilchen sehr genau bestimmt werden.

**Abb. 3.12**

Schema eines  
Massenspektrometers



## Zentrale Begriffe zum Exkurs 3.7

- › Kathodenstrahlrohr
- › Kanalstrahlrohr
- › Massenspektrometer