

# 17. Kernphysik und die innere Struktur der Atome

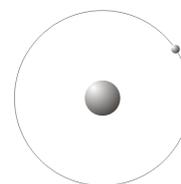
Rainer Hauser

November 2011

## 1 Einleitung

### 1.1 Verschiedene Atommodelle

Das *Dalton'sche* Atommodell sah die Atome als nicht weiter teilbare Kügelchen, wobei alle Atome desselben chemischen Elements ununterscheidbar sind. Die Unteilbarkeit erwies sich als falsch, als Thomson 1897 das Elektron entdeckte. Im *Rutherford'schen* Atommodell besteht ein Atom einerseits aus einem Atomkern, der praktisch die gesamte Masse des Atoms ausmacht, aber etwa 10 000-mal kleiner ist als das Atom selber, und andererseits aus einer Atomhülle mit Elektronen, die den Atomkern umkreisen. Man kann sich das ähnlich wie die Sonne und ihre Planeten vorstellen. Die nebenstehende Abbildung zeigt ein Wasserstoffatom mit seinem Elektron.



Die weitere Entwicklung der Physik in den ersten Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts zeigte, dass die Elektronen sich nur auf ganz bestimmten Bahnradien um den Atomkern bewegen können. Das bis heute gültige *Bohr'sche* Atommodell trägt dem Rechnung. Mit Hilfe der Quantenmechanik lassen sich diese Radien bestimmen.

### 1.2 Vorstellung im Bereich der Elementarteilchen

Weil sich nach der Heisenberg'schen Unschärferelation Ort und Impuls nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmen lassen und Elektronen sich somit nicht mehr einfach als Kügelchen beschreiben lassen, spricht man manchmal von der Elektronenwolke um den Atomkern, als wären die Elektronen über die Flugbahnen verschmiert. Solche Beschreibungen und dazu passende bildliche Darstellungen sind nicht immer hilfreich. Vielleicht sollte man sich einfach damit abfinden, dass die menschliche Vorstellungskraft im atomaren und subatomaren Bereich versagt.

## 2 Der Aufbau der Atome

### 2.1 Die Atomhülle

Die *Atomhülle* besteht aus *Elektronen*, die sich nur auf ganz bestimmten Bahnen um den Atomkern bewegen können. Durch die Bewegung um den Atomkern haben die Elektronen kinetische Energie, und durch die elektrische Anziehung durch den Atomkern haben sie potenzielle Energie.

Weil sich die Elektronen nur auf ganz bestimmten Bahnen befinden können, kann die Energie eines Elektrons in der Atomhülle auch nur ganz bestimmte Werte annehmen. Der kleinstmögliche Wert  $E_1$  gehört zum *Grundzustand*, während die anderen Werte zu den *angeregten Zuständen* gehören. Durch Absorption von Strahlung oder durch Zusammenstöße mit anderen Atomen kann ein Elektron in einen angeregten Zustand mit der Energie  $E_n$  kommen.

Nach einer Anregung geht das Elektron normalerweise schnell wieder in den Grundzustand oder einen weniger angeregten Zustand über. Dabei gibt es die Energiedifferenz  $\Delta E$  in Form von Strahlung der

Wellenlänge  $\lambda$  ab. Der Zusammenhang zwischen Energiedifferenz und Wellenlänge enthält neben der *Lichtgeschwindigkeit*  $c \approx 3.0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  auch das *Planck'sche Wirkungsquantum*  $h \approx 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ . Für die durch Strahlung abgegebene Energie und die dazugehörige Wellenlänge gilt

$$E_{\text{Photon}} = \Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \qquad \lambda = \frac{h \cdot c}{E_{\text{Photon}}} = \frac{h \cdot c}{\Delta E} \quad (1)$$

wobei beispielsweise  $\Delta E = E_3 - E_1$  ist, wenn das Elektron aus dem angeregten Zustand  $E_3$  in den Grundzustand  $E_1$  zurückfällt.

Das von den Elektronen eines Atoms ausgesendete Strahlung kann deshalb nur bestimmte Wellenlängen annehmen, die zu einem Teil im Bereich des sichtbaren Lichts liegen. Das Spektrum eines nur aus einem chemischen Element bestehenden Gases ist also ein Linienspektrum, bei der jede Linie einem möglichen Übergang von mehr zu weniger Energie entspricht. Jedes chemische Element hat also ein typisches *Linienspektrum*. Mit Hilfe der *Spektralanalyse* kann man dadurch die chemische Zusammensetzung einer leuchtenden Gaswolke im Weltall bestimmen.

## 2.2 Der Atomkern

Der Atomkern kann weiter geteilt werden und besteht aus *Protonen* und *Neutronen*, die unter dem Begriff *Nukleonen* zusammengefasst werden. Die Anzahl  $Z$  der Protonen im Atomkern bestimmt das chemische Element. Weil die Anzahl Protonen somit den Platz im Periodensystem bestimmt, heisst  $Z$  auch *Ordnungszahl*.

Nicht alle Atome desselben chemischen Elements haben die gleiche Masse. Das liegt daran, dass sich Atome mit gleicher Ordnungszahl in der *Nukleonenzahl*  $A$  und somit in der Anzahl Neutronen  $N = A - Z$  unterscheiden können. Das Wasserstoffatom beispielsweise hat ein Proton, kommt aber als normaler Wasserstoff ohne Neutron, als Deuterium mit einem Neutron und als Tritium mit zwei Neutronen vor.

Um einen Atomkern vollständig zu charakterisieren, braucht es also die Nukleonenzahl  $A$  und die Protonenzahl  $Z$ . Man verwendet deshalb die Nuklidschreibweise  ${}^A_Z X$  für das Nuklid mit  $N = A - Z$  Neutronen und  $Z$  Protonen, wobei  $X$  das Symbol des entsprechenden chemischen Elements ist. So schreibt man für die am häufigsten vorkommenden Sauerstoffatome  ${}^{16}_8\text{O}$ . Weil das Elementsymbol  $X$  das chemische Element bereits eindeutig bestimmt, lässt man manchmal die Ordnungszahl weg und schreibt nur  ${}^{16}\text{O}$ .

Bei Nukliden mit derselben Protonenzahl, aber unterschiedlicher Neutronenzahl spricht man von *isotopen Nukliden* oder einfach von *Isotopen*. Verschiedene isotope Nuklide unterscheiden sich nicht durch ihr chemisches Verhalten.

Obwohl sich die Protonen wegen ihrer elektrischen Ladung abtossen, werden sie zusammen mit den Neutronen im Atomkern zusammengehalten. Das liegt an der *Kernkraft*, die immer anziehend ist, nur eine sehr kurze Reichweite hat und innerhalb dieser Reichweite die stärkste bekannte Kraft ist.

Die Atomkerne sind trotz der Kernkraft nicht starr, denn die Nukleonen im Kern führen eine Zitterbewegung aus und haben deshalb neben der potenziellen auch kinetische Energie. Wie die Elektronen in der Atomhülle können auch die Nukleonen im Atomkern nur bestimmte Energiewerte annehmen, und es gibt neben dem Grundzustand mit minimalster Energie auch angeregte Zustände. Die Energie kann durch Kollisionen beispielsweise mit schnellen Neutronen zunehmen. Kehrt ein Atomkern von einem angeregten Zustand in einen weniger angeregten Zustand zurück, gibt er ebenfalls gemäss der Formeln in (1) Strahlung ab, nur ist diese sehr viel energiereicher als bei den Elektronen.

## 2.3 Das Atom als Ganzes

Das Atom besteht aus dem elektrisch positiv geladenen Atomkern und der elektrisch negativ geladenen Atomhülle, die sich somit gegenseitig anziehen. Weil Neutronen elektrisch ungeladen sind, Elektronen und Protonen aber bis auf das Vorzeichen gleiche elektrische Ladungen haben, ist ein Atom nach aussen elektrisch neutral, wenn es gleich viele Elektronen wie Protonen besitzt. Hat es mehr oder weniger Elektronen als Protonen, spricht man von *Ionisierung*. Das ionisierte Atom wirkt elektrisch geladen und zieht andere ionisierte Atome elektrisch an oder stösst sie ab.

Von den an einem Atom beteiligten Teilchen hat das Neutron mit  $m_n = 1.6749 \cdot 10^{-27}$  kg die grösste Masse gefolgt vom Proton mit  $m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27}$  kg. Das Elektron mit  $m_e = 9.2158 \cdot 10^{-31}$  kg ist bedeutend leichter. Massen in der Kernphysik werden häufig in Einheiten der *Atommasse*  $u$  angegeben, die dem Zwölftel der Atommasse des Kohlenstoffisotops  $^{12}_6\text{C}$  entspricht. Mit  $u = 1.6605 \cdot 10^{-27}$  kg gilt  $m_n = 1.0087 \cdot u$ ,  $m_p = 1.0073 \cdot u$  und  $m_e = 0.00056 \cdot u$ .

## 2.4 Massendefekt und Bindungsenergie

Wie man mit diesen Zahlen leicht feststellt, ist die Summe der Massen der Bestandteile eines  $^{12}_6\text{C}$ -Atoms grösser als die Masse des Atoms. Das gilt allgemein, und man nennt diesen Effekt *Massendefekt*. Wenn ein Atomkern aus Nukleonen entsteht, wird die so genannte Bindungsenergie  $E_B$  in Form von  $\gamma$ -Strahlung abgegeben, und der Teil  $\Delta m$  der Masse verschwindet, wobei mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$

$$E_B = \Delta m \cdot c^2 \quad (2)$$

gilt. Damit kann man die Bindungsenergie aus dem Massendefekt berechnen.

Die Bindungsenergie  $E_B$  gemäss (2) ist die Energie, die mindestens aufgewendet werden muss, um einen Atomkern in Teile zu zerlegen. Die Bindungsenergie pro Nukleon ist somit ein Mass für die Stabilität eines Atomkerns. Trägt man in einem Koordinatensystem auf der  $x$ -Achse die Anzahl Nukleonen  $A$ , auf der  $y$ -Achse die Bindungsenergie pro Nukleon  $E_B/A$  und darin die einzelnen chemischen Elemente ein, so steigt die Kurve von Deuterium  $^2\text{H}$  als instabilstem Nuklid bis zum Eisen  $^{56}\text{Fe}$  als stabilstem Nuklid steil an und fällt anschliessend bis zum Uran  $^{238}\text{U}$  flach ab. Dazwischen gibt es einzelne Zacken nach oben wie bei  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$  und  $^{16}\text{O}$ , die besonders stabil sind. Die Bindungsenergie pro Nukleon misst man üblicherweise in Megaelektronenvolt, wobei  $1 \text{ MeV} = 1.602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$  gilt.

## 3 Radioaktivität

### 3.1 Zerfall instabiler Atomkerne

Ist die Bindungsenergie klein, sind die Atomkerne instabil, und es braucht wenig Energie von aussen, dass sie zerfallen. Trägt man auf der  $x$ -Achse eines Koordinatensystems die Anzahl Protonen und auf der  $y$ -Achse die Anzahl Neutronen ab und zeichnet für jedes stabile Nuklid einen Punkt an der entsprechenden Stelle ein, so liegen die stabilen Atomkerne mehr oder weniger auf der Geraden von  $Z = 0$  und  $N = 0$  nach  $Z = 82$  und  $N = 124$ . Stabile Kerne haben also etwa gleich viele oder etwas mehr Neutronen als Protonen. Dass Kerne mit nur Protonen instabil sind, ist verständlich, weil sich die Protonen gegenseitig elektrisch abstossen und damit der Kernkraft entgegenwirken.

Radioaktive Strahlung ist ein Überbegriff für die  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung. Die ersten beiden Begriffe entsprechen den beiden häufigsten Zerfallsarten, die  $\alpha$ - und  $\beta$ -Zerfall genannt werden. Daneben gibt es noch weitere Zerfallsarten. Atomkerne mit einer sehr grossen Nukleonenzahl zerbrechen manchmal auch einfach in zwei Teile. Die  $\gamma$ -Strahlung, die aus historischen Gründen auch zur Radioaktivität gezählt wird, ist eine sehr energiereiche elektromagnetische Strahlung, die etwa bei der Strahlungsabregung eines angeregten Atomkerns entsteht, aber oft auch bei  $\alpha$ - und  $\beta$ -Zerfällen vorkommt, weil die Zerfallsprodukte unmittelbar nach dem Zerfall in einem angeregten Zustand sind.

Beim  $\alpha$ -Zerfall zerfällt ein Nuklid  $^A_Z\text{X}$  in das Nuklid  $^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$  und einen  $^4_2\text{He}$ -Kern. Die Reaktionsgleichung für den  $\alpha$ -Zerfall wird als



geschrieben. Kerne mit mehr als 83 Protonen sind instabil und zerfallen meist durch  $\alpha$ -Zerfälle.

Beispiel:

Ist der Ausgangskern das Radiumnuklid  $^{226}_{88}\text{Ra}$  und das Zerfallsprodukt das Radonnuklid  $^{222}_{86}\text{Rn}$ , so ist das ein  $\alpha$ -Zerfall und hat die Reaktionsgleichung  $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$ .

Beim  $\beta$ -Zerfall kommt ein Elektron aus dem instabilen Kern herausgefliegen, weil ein Neutron in ein Proton und ein Elektron zerfällt. (Wolfgang Pauli hat festgestellt, dass daneben noch ein weiteres, Neutrino

genanntes Teilchen entsteht, das im Folgenden ignoriert wird.) Die Reaktionsgleichung für den  $\beta$ -Zerfall wird als



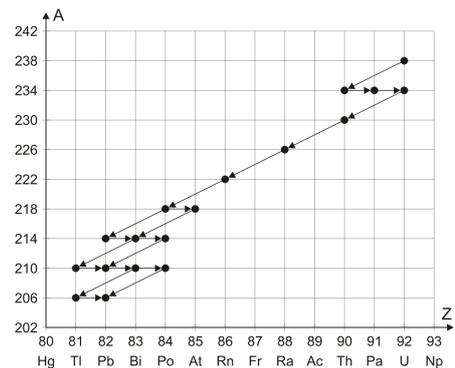
geschrieben.

Beispiel:

Die Reaktionsgleichung  ${}^{199}_{78}\text{Pt} \rightarrow {}^{199}_{79}\text{Au} + e^-$  beschreibt den Zerfall des instabilen Platinnuklids  ${}^{199}_{78}\text{Pt}$  in das Goldnuklid  ${}^{199}_{79}\text{Au}$ , das stabiler ist.

### 3.2 Zerfallsketten

Das Zerfallsprodukt eines  $\alpha$ -Zerfalls gemäss (3) oder  $\beta$ -Zerfalls gemäss (4) ist häufig wieder ein instabiles Nuklid, das weiter zerfällt. Auf diese Weise entstehen so genannte Zerfallsketten. Die nebenstehende Abbildung zeigt eine solche Zerfallskette für das instabile Urannuklid  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , woraus erst durch  $\alpha$ -Zerfall  ${}^{234}_{90}\text{Th}$  und anschliessend durch zwei  $\beta$ -Zerfälle das ebenfalls instabile Urannuklid  ${}^{234}_{92}\text{U}$  entsteht. Dieses zerfällt durch mehrere  $\alpha$ -Zerfälle in das instabile Poloniumnuklid  ${}^{218}_{84}\text{Po}$ . Dieses Nuklid und viele der folgenden Zerfallsprodukte können sowohl durch  $\alpha$ -Zerfall als auch durch  $\beta$ -Zerfall weiter zerfallen. Am Schluss bleibt das stabile Bleinuklid  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$  übrig. Das radioaktive Radonnuklid  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  ist im Gegensatz zu den anderen Zerfallsprodukte gasförmig und kann deshalb in die Luft entweichen.



### 3.3 Zerfallsgesetz

Instabile Atomkerne zerfallen zufällig und unabhängig voneinander mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Ist für ein gewisses Nuklid  $\lambda$  die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Kern dieses Nuklids in der nächsten Sekunde zerfällt, so hängt das Zerfallsgesetz nur von  $\lambda$  und der gegebenen Anfangsmenge  $N_0$  des Nuklids ab. Das Zerfallsgesetz ist eine Exponentialfunktion und hat eine feste Halbwertszeit  $t_{1/2}$ , nach der nur noch die Hälfte der radioaktiven Atome vorhanden sein wird, während die andere Hälfte zerfallen ist.

Ist  $N_0$  die Anzahl instabiler Atomkerne zur Zeit  $t = 0$  und  $N(t)$  diejenige zur Zeit  $t$ , so gilt

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (5)$$

für die zeitliche Abnahme der Anzahl instabiler Atomkerne.

Für eine gegebene Anzahl instabiler Atomkerne ist die *Aktivität*  $A$  die Anzahl Kernzerfälle pro Sekunde und hat die Einheit *Becquerel* mit  $1 \text{ Bq} = \frac{1}{\text{s}}$ . Weil  $\lambda$  die Zerfallswahrscheinlichkeit pro Sekunde ist, gilt somit  $A(t) = N(t) \cdot \lambda$ , woraus weiter mit (5)

$$A(t) = N(t) \cdot \lambda = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot \lambda = (N_0 \cdot \lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

als Zusammenhang zwischen  $A_0$  der Aktivität zur Zeit  $t = 0$  und  $A(t)$  derjenigen zur Zeit  $t$  folgt.

Weil die Aktivität von der gegebenen Menge des radioaktiven Nuklids abhängt, ist die *spezifische Aktivität*, welche die Aktivität eines Kilogramms des gegebenen Nuklids angibt, die aussagekräftigere Grösse. Bei gasförmigen Materialien gibt man meist die Aktivität pro Kubikmeter an.