

Kernphysik - Grundlagen

KERN-/TEILCHENPHYSIK

Kernaufbau aus Protonen u. Neutronen - Isotope

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts erkannte man beim Beschuss von Atomen mit energiereichen Teilchen (Lenard: Beschuss mit schnellen Elektronen; Rutherford: Beschuss mit energiereichen α -Teilchen), dass Atome keine homogenen Massekugeln sind, sondern eine Kern-Hülle-Struktur besitzen. Zu dieser Zeit waren zwei Elementarteilchen bekannt, das Proton als Kern des Wasserstoffatoms und das Elektron.

1. Deutungsversuch: Kernaufbau aus Protonen und Kernelektronen

Um den Unterschied zwischen der Kernladungszahl Z (Anzahl der Protonen) und der relativen Atommasse A_r bei einem Atom wie z.B. Helium ($Z = 2$; $A_r \approx 4$) erklären zu können, nahm man zunächst an, dass sich die Kerne höherer Ordnungszahl aus Protonen und Elektronen zusammensetzen. Mit dieser Annahme konnte man grob die drei folgenden Erscheinungen erklären:

- **Ganzzahligkeit der relativen Atommassen**

Bei nicht zu hohen Anforderungen an die Genauigkeit konnte man die nahezu Ganzzahligkeit der relativen Atommassen erklären: Die Masse des Elektrons beträgt nur etwa $1/2000$ der Masse des Protons. Der Kern des Wasserstoffatoms (Proton) hat ungefähr die relative Atommasse 1. Wenn der Heliumkern aus vier Protonen und zwei Elektronen bestünde, käme man dann mit der nahezu vernachlässigbaren Elektronenmasse auf eine relative Massezahl von ungefähr vier beim normalen Helium.

- **β^- -Zerfall**

Bei radioaktiven Zerfällen wurden schnelle Elektronen beobachtet, die wegen ihrer hohen kinetischen Energie nicht aus der Hülle stammen konnten. Mit den "Kernelektronen" wäre der β^- -Zerfall verständlich.

- **Stabilität von Atomkernen**

Aufgrund der Coulomb-Abstoßung der Protonen im Kern (die starke Wechselwirkung war zu dieser Zeit noch nicht etabliert) hatte man Schwierigkeiten, die Stabilität der Kerne zu verstehen. Mit den "Kernelektronen", welche die abstoßende Wirkung der Protonen untereinander "mildern" konnten, wäre die Stabilität der Kerne eher zu verstehen gewesen. So könnte man sich den Aufbau des Heliumkerns aus zwei Protonen und zwei Elektron-Proton-Paaren, die sich in der elektrischen Ladung kompensieren, vorstellen.

Hinweis: Im Jahre 1933 konnte FERMI bei seiner Theorie des β^- -Zerfalls nachweisen, dass es keine Kernelektronen gibt. Eine Abschätzung mit Hilfe der Heisenbergschen Unschärferelation stützt diese Aussage. Wenn Sie an dieser Abschätzung interessiert sind, so können Sie sich diese einblenden lassen.

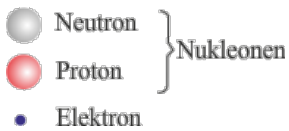
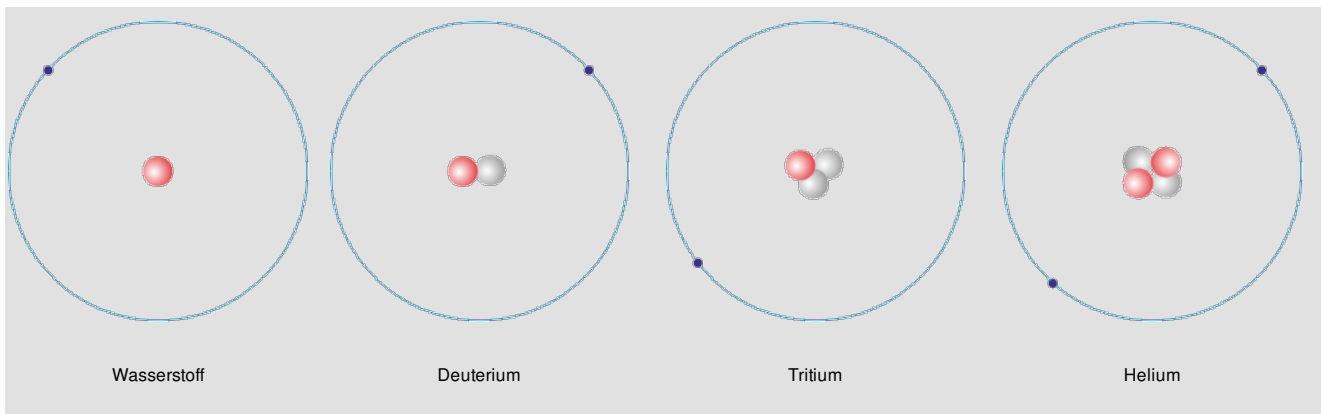
[Inhalt einblenden](#)

2. Deutungsversuch: Kernaufbau aus Protonen und Neutronen

Rutherford vermutete bereits 1920, dass die Kopplung eines Elektron-Proton-Paars im Kern von anderer Natur sei als z.B. die Kopplung des Hüllenelektrons mit Kernproton beim Wasserstoff. Er ging davon aus, dass die Kopplung zwischen Kernelektron und Proton so stark sei, dass man von einem einzigen neutralen Teilchen ausgehen kann, dessen Masse sehr nahe bei der Protonenmasse liegt. 1921 führte W. D. Harkins für dieses hypothetische Teilchen den Namen "Neutron" ein. Erst im Jahre 1932 konnte Chadwick die Neutronen experimentell nachweisen. Das Standardmodell der Teilchenphysik zu dieser Zeit war also recht überschaubar. Es bestand aus den drei Teilchen: Elektron, Proton und Neutron. Erst mit dem Aufkommen der großen Beschleunigungsanlagen wuchs die Zahl der "Elementarteilchen" bis zur Unübersichtlichkeit an ("Teilchenzoo"). Gell-Mann u.a. konnten 1965 durch die Einführung der Quarks Ordnung in das Teilchengestrüpp bringen. Auf ihren Ideen fußt das zurzeit anerkannte Standardmodell der Teilchenphysik.

Mit dem experimentellen Nachweis des Neutrons war man sich in den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts sicher, dass der Atomkern aus zwei Sorten von Kernteilchen (Nukleonen) bestehen kann, den Protonen und den Neutronen. In den folgenden Bildern ist der Aufbau einiger leichter Atome stark vereinfacht dargestellt.

Hinweis: In den folgenden Bildern ist die Atomhülle so dargestellt, wie man sie sich etwa nach dem Atommodell von Bohr vorgestellt hat. Inzwischen weiß man, dass sich die Elektronen nicht auf Kreisbahnen um den Kern bewegen. Der Einfachheit halber wurde aber auf die Darstellung von Orbitalen verzichtet.



Schreibweise

Ein Atomkern ist eindeutig charakterisiert durch seine Protonenzahl Z (= Ordnungszahl im Periodensystem) und seine Nukleonenzahl A (= Massezahl im Periodensystem). Zur Kennzeichnung des Kerns X verwendet man meist die folgende Schreibweise:



Die Neutronenzahl N ergibt sich als die Differenz $A - Z$

Beispiel

${}^{35}_{17}\text{Cl}$ besagt: Es handelt sich um Chlor mit der Kernladungszahl $Z = 17$, der Nukleonenzahl $A = 35$ und der Neutronenzahl $N = 35 - 17 = 18$

Hinweis

Da die Information über die Ordnungszahl bereits im chemischen Symbol X steckt, benutzt man gelegentlich auch andere Schreibweisen:

${}^{35}\text{Cl}$ oder $\text{Cl} - 35$

Isotope

Kerne mit gleicher Protonenzahl Z bezeichnet man als Isotope.

Deuterium und Tritium sind somit Wasserstoffisotope.

Da die Elektronenhülle von Isotopen nahezu identisch ist (für die Bindung der Elektronen an den Kern sind die Protonen zuständig), sind Isotope mit einfachen chemischen Mitteln nicht zu unterscheiden (für die chemische Bindung ist im Wesentlichen die Atomhülle maßgebend).

Weiterführende Artikel

>

Historische Ideen zum Aufbau des Atomkerns

- Rutherford sprach 1911 nur davon, dass im Zentrum des Atoms eine nahezu punktförmige positive Zentralladung sitzt. Später benutzte er für diese Zentralladung den Begriff "Kern" (engl.: nucleus).
- Im Jahre 1920 bezeichnet Rutherford den Kern des Wasserstoffatoms als "**Proton**".
- Manche Physiker vermuteten, dass schwerere Atom aus Wasserstoffatomen (ein Proton im Kern, ein Elektron in der Atomhülle) aufgebaut seien. Dies hätte jedoch mit den Kenntnissen, welche man über die Masse und die Elektronenzahl von Atomen zu dieser Zeit schon hatte, zu Widersprüchen geführt.
Deshalb vermutete Rutherford (1920) neben dem Proton einen weiteren Kernbaustein, das **Neutron**. Dieses Teilchen sollte etwa dieselbe Masse wie das Proton besitzen, jedoch keine elektrische Ladung tragen. Man bezeichnet die Kernbausteine Proton und Neutron auch mit dem Überbegriff **Nukleon**.
- Im Jahr 1932 konnte ein Schüler Rutherfords, nämlich J. Chadwick, das Neutron nachweisen.

Die Kernkraft hält die Nukleonen zusammen

Die folgenden qualitativen Erkenntnisse über die Kernkraft gewann man im Wesentlichen aus Experimenten, bei denen Nukleonen an Nukleonen gestreut wurden. Eine einfache Formel, wie sie etwa für die Coulombkraft oder die Gravitationskraft gefunden wurde, existiert für die Kernkraft nicht.

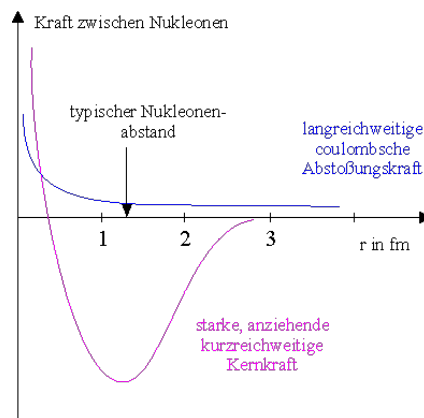
Bei jedem Atom (Ausnahme: Wasserstoff) befinden sich mehrere Protonen im Kern. Nun wissen wir, dass sich Protonen aufgrund der wirkenden Coulombkraft gegenseitig abstoßen und zwar um so stärker, je geringer ihr Abstand ist. Bei dem kleinen Kerndurchmesser ist also diese Abstoßungskraft zwischen den Protonen beträchtlich. Damit ein Kern stabil ist, die Protonen also zusammenhalten, muss es neben der abstoßenden Coulombkraft noch eine weitere, anziehende Kraft geben, die den Zusammenhalt der Protonen gewährleistet. Man nennt diese Kraft die **Kernkraft** (auch die Abweichung der Streuverteilung energiereicher α -Teilchen von der durch die reine Coulomb-Wechselwirkung vorhergesagten Streuverteilung deutet schon auf das Wirken einer Kraft zwischen den Kernbausteinen hin, wenn sich diese nur nahe genug kommen).

Eigenschaften der Kernkraft

Im Folgenden sind einige Eigenschaften der Kernkraft, welche zwischen den Nukleonen wirkt, zusammengestellt. Die genaueren Kenntnisse über die Kernkraft gewann man im wesentlichen aus Experimenten, bei denen Nukleonen an Nukleonen gestreut wurden:

- Die anziehende Wirkung der Kernkraft zwischen den Nukleonen setzt erst ab einem Abstand der Nukleonenmittelpunkte von ca. 2 fm ein.
Hinweis: 1 fm (femtometer) = 10^{-15} m
- Kommen sich die Nukleonenmittelpunkte näher als etwa 0,5 fm, so setzt eine stark abstoßende Kraft ein (diese "Hard-Core-Kraft" verhindert den Kollaps der Kerne).

Die beiden obigen Aussagen kann man auch durch den nebenstehend skizzierten Verlauf der Kraft zwischen zwei Nukleonen in Abhängigkeit vom Abstand r ihrer Mittelpunkte darstellen. Danach ist die anziehende Kernkraft bei ca. 1,3 fm am größten und überwiegt die (nur zwischen den Protonen wirkende) abstoßende Coulombkraft deutlich.



- Die Kernkraft ist ladungsunabhängig, d.h. sie ist bei einer Neutron-Neutron-, Neutron-Proton- oder Proton-Proton-Wechselwirkung gleich. Natürlich wirkt sich bei der Proton-Proton-Wechselwirkung noch zusätzlich die Coulombabstoßung aus.

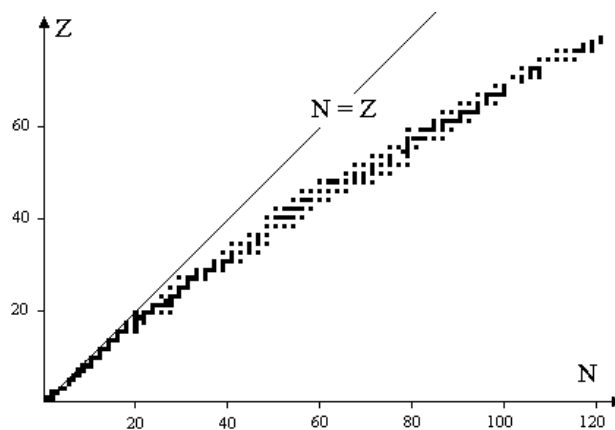
- Die Kernkraft (starke Wechselwirkung) ist wesentlich stärker als z.B. die Gravitationswechselwirkung oder die elektromagnetische Wechselwirkung. So ist die Kernkraft zwischen zwei Protonen im Abstand von 10^{-15} m etwa 35mal so groß wie die elektrische Abstoßungskraft der Protonen in diesem Abstand.
- Die Kernkräfte besitzen "**Sättigungscharakter**". Dies zeigt sich darin, dass die in einem Kern gebundenen Nukleonen trotz der zwischen ihnen wirkenden anziehenden Kräfte sich nicht auf ein immer kleineres Volumen zusammenziehen. Vielmehr ist in allen Kernen das Volumen pro Nukleon nahezu konstant.
Dies bedeutet, dass das Volumen des Gesamtkerns V_k proportional zur Nukleonenzahl A ist. Somit ergibt sich der folgende Zusammenhang zwischen dem Kernradius r_k und der Nukleonenzahl A :

$$V_k \sim A \Rightarrow \frac{4}{3}r_k^3 \cdot \pi \sim A \Rightarrow r_k \sim \sqrt[3]{A}$$

Mit den experimentellen Befunden über die Kernradien lässt sich dann die folgende Näherungsformel für die Kernradien aufstellen:

$$r_k = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot \sqrt[3]{A}$$

- Ein Folge der Kurzreichweitigkeit der Kernkraft und der Langreichweitigkeit der Coulombkraft ist der Aufbau von größeren, stabilen Kernen. In der folgenden Nuklidtafel (N-Z-System) sind die stabilen Kerne als schwarze Punkte dargestellt. Man sieht, dass die größeren stabilen Kerne unterhalb der Winkelhalbierenden liegen, bei ihnen überwiegt also die Neutronenzahl N die Protonenzahl Z .



Die Erklärung dieses Phänomens ist die lange Reichweite der Coulombkraft: In größeren Kernen sitzen schon so viele Protonen, dass ein neu einzubauendes Proton die abstoßende Kraft von allen diesen Kernprotonen "spürt". Überwiegt diese Coulombkraft die anziehende Kernkraft der unmittelbaren Nachbarn, so kann das Proton nicht stabil in den Kern integriert werden.

Moderne Erkenntnisse

Nach neueren Erkenntnissen der Elementarteilchenphysik sind Neutron und Proton keine strukturlosen Teilchen und somit nicht elementar. Sie setzen sich vielmehr aus noch kleineren Teilchen, den sogenannten **Quarks** zusammen. Die Kernkraft wird dann im Gefolge der Wechselwirkungskräfte zwischen den Quarks erklärt.

Weiterführende Artikel

>

Kennzahlen von Kernen

Kernladungszahl und Massezahl

Der Kern eines Atoms besteht aus den positiv geladenen Protonen und den ungeladenen Neutronen. Die Masse von Proton und Neutron ist ungefähr gleich. Ihre Masse ist jeweils etwa 1800-mal so groß wie die eines Elektrons der Hülle.

Teilchen	Masse	Ladung	Durchmesser
Proton	$1,6727 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx u$	$+1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ As} = +e$	ca. $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Neutron	$1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx u$	---	ca. $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Elektron	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$-1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ As} = -e$	$< 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}$

u: Atomare Masseneinheit (-unit); $u = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Kernladungszahl Z:

- Die Zahl der Protonen in einem Kern bestimmt die Kernladungszahl Z.
- Beim neutralen Atom stimmt die Elektronenzahl in der Hülle mit der Kernladungszahl überein.
- Die Struktur der Atomhülle (wesentlich bestimmt durch die Elektronenzahl) bestimmt das chemische Verhalten eines Atoms.
- Weiß man die Kernladungszahl eines Atoms, so liegt damit auch der Name des Elements fest und umgekehrt.
- Die Kernladungszahl eines Elements kann in einer Periodentafel nachgeschlagen werden. Ein Periodentafel findest du z.B. bei Wikipedia unter der Adresse: <http://de.wikipedia.org/wiki/Periodensystem>

Massezahl A:

- Die Summe aus Protonenzahl Z und Neutronenzahl N ergibt die Massezahl A.

$$A = Z + N$$

- Will man die Masse eines Atoms ungefähr bestimmen, so muss man nur die Massezahl A mit der atomaren Masseneinheit u multiplizieren:

$$m_{\text{atom}} \approx A \cdot u$$

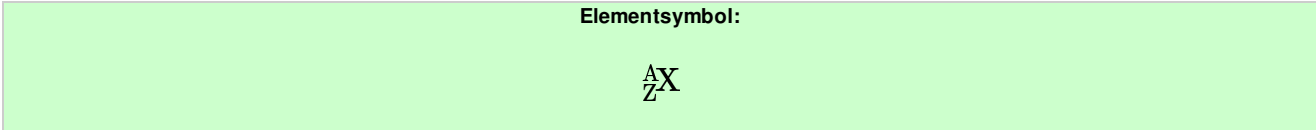
Isotope:

Kerne mit gleicher Protonenzahl Z aber verschiedener Massezahl A (und damit verschiedener Neutronenzahl N) bezeichnet man als Isotope. Aufgrund der gleichartigen Hüllenstruktur (beim neutralen Atom gilt: Protonenzahl = Elektronenzahl) sind Isotope chemisch nicht zu

unterscheiden.

Elementschreibweise:

Ein Element X mit der Kernladungszahl Z und der Massezahl A wird weltweit einheitlich in folgender Form geschrieben:



Die N-Z-Karte (Nuklidkarte)

Weiterführende Artikel

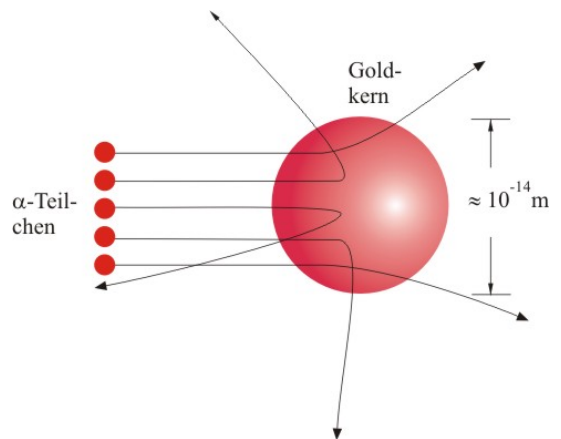
>

Streuexperiment

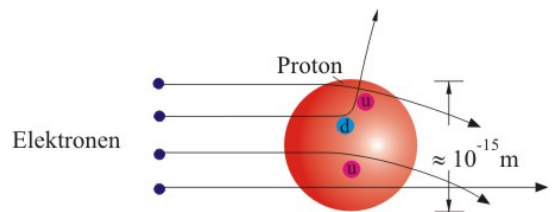
Um über die Struktur eines Mikroobjekts (Atom, Kern, Proton, Neutron) Näheres zu erfahren, hat sich das sogenannte Streuexperiment hervorragend bewährt. Dabei wird das zu untersuchende Objekt mit Teilchen bombardiert und die Verteilung der gestreuten Teilchen beobachtet.

Beispiele

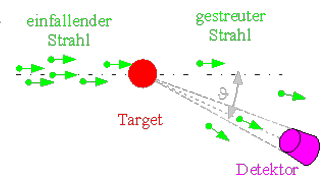
- Der **Streuversuch von Rutherford** (Geschosse: α -Teilchen) durch den man zu Beginn des vorigen Jahrhunderts zu der noch heute gültigen Kern-Hülle-Struktur des Atoms gelangte.



- Der Streuversuch am **Stanford Linearbeschleuniger** (1969) bei dem extrem schnelle Elektronen auf flüssigen Wasserstoff geschossen wurden. Aus der Ablenkung der Elektronen konnte die Theorie von Gell-Mann, dass ein Proton aus Quarks besteht, erhärtet werden. 1990 erhalten J. Friedman, H. Kendall und R. Taylor für diesen Nachweis den Physik-Nobelpreis



Aus der Streuverteilung der Geschosse und mit einer sinnvollen Modellvorstellung können dann Aussagen über die Struktur des zu untersuchenden Objekts gemacht werden.

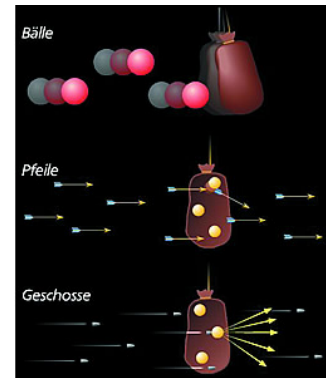


Einfaches mechanisches Analogiemodell (nach Hilscher)

Stelle dir einen Sack vor, von dessen Inhalt die Masse bekannt sei. Du sollst feststellen, wie sich die Masse über das Sackinnere verteilt, ohne in ihn hineinschauen zu dürfen. Der Sack könnte z.B. gleichmäßig mit einem Stoff verhältnismäßig kleiner Dichte - etwa Holz - gefüllt sein, oder es könnten sich nur an einigen Stellen kleine Körper großer Dichte, z.B. Bleikugeln, befinden. Wie kannst du herausfinden, welcher dieser beiden Fälle vorliegt?

Eine Möglichkeit ist es, kleine Kugeln mit hinreichender Geschwindigkeit in den Sack zu schießen und zu beobachten, wo und wie sie wieder aus ihm herauskommen. Treten alle Kugeln in Schussrichtung, jedoch mit verminderter Geschwindigkeit aus dem Sack aus, dann kann man schließen, dass der Sack gleichmäßig mit Materie geringer Dichte gefüllt ist. Findet man dagegen, dass einige Kugeln stark abgelenkt werden, dann kann man annehmen, dass sie mit kleinen, starren massiven Körpern zusammengestoßen sein müssen.

Je energiereicher die Projektile, desto mehr verraten sie über den Aufbau des Objekts: Aus der Ablenkung der Bälle kann man auf die Form des Sacks schließen; die Pfeile lassen die Kugeln in seinem Inneren erkennen; die hochenergetischen Geschosse lassen die Kugeln zerplatzen und offenbaren so deren innere Struktur (aus "Welt der Physik").

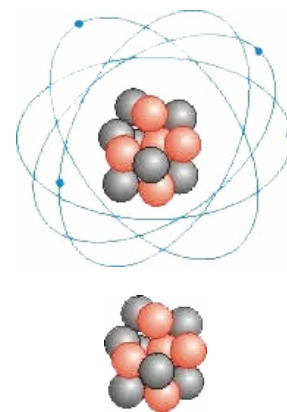


Weiterführende Artikel

>

Zusammenhang von Atom- und Kernmassen

Aufgrund der Massenspektroskopie sind heute die Atommassen m_a sehr vieler Isotope mit hoher Genauigkeit (häufig $10^{-7}u$ bis $10^{-6}u$) experimentell bestimmt.



Unter der Kernmasse m_k stellt man sich die Masse eines von allen Elektronen der Hülle befreiten "nackten" Kerns vor.

Die Atommasse m_a unterscheidet sich also von der Kernmasse m_k zunächst um die Summe der Ruhmassen der im Atom gebundenen Elektronen $Z \cdot m_e$. Ein weiterer – allerdings viel kleinerer Beitrag zur Atommasse rührt von der Bindungsenergie der Elektronen in der Atomhülle her.

So ist z.B. vom **Termschema des Wasserstoffs bekannt**, dass das H-Atom im Grundzustand energetisch um $13,6eV$ tiefer liegt als ein System aus einem freien Proton und einem freien Elektron, falls beide sehr wenig kinetische Energie besitzen. Dieser Energiedifferenz $\Delta E = 13,6eV$ entspricht nach der EINSTEINSchen Beziehung eine Massendifferenz $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$. Daher gilt z.B. für die Masse des H-Atoms:

$$m_a(H) = m_k(H) + m_e - \frac{13,6eV}{c^2}$$

Diese Überlegung lässt sich ohne weiteres auf ein Atom X mit Z Elektronen übertragen. Wird der Betrag der gesamten Bindungsenergie aller Z Elektronen im Grundzustand der Atomhülle mit B_e bezeichnet, so gilt:

$$m_a(X) = m_k(X) + Z \cdot m_e - \frac{B_e}{c^2}$$

Umgekehrt folgt für die Kernmasse:

$$m_k(X) = m_a(X) - Z \cdot m_e + \frac{B_e}{c^2}$$

Da die gesamte Elektronenbindungsenergie B_e experimentell nicht direkt bestimmt werden kann, ist man auf theoretische Abschätzungen angewiesen. Die Berechnung nach dem sogenannten THOMAS-FERMI-Modell liefert für ein Atom mit Z Elektronen den Näherungswert $B_e = 15,7eV \cdot Z^{7/3}$.

Um die Größenordnung zu verdeutlichen, sind in der folgenden Tabelle für einige Isotope die Atommassen, und die mit obiger Korrektur berechneten Kernmassen zusammengestellt.

Isotop	Z	m_a in u	$Z \cdot m_e$ in u	B_e/c^2 in u	m_k in u
1H	1	1,00782522	0,00054858	0,00000001	1,00727665
^{16}O	8	15,9949149	0,00438864	0,00000216	15,9905284
^{40}Ca	20	39,962589	0,0109716	0,0000183	39,951635

Bei praktischen Berechnungen, in denen Kernmassen mit 6 bis 7 geltenden Ziffern ausreichen (vergleiche z.B.: **Massendefekt und Kernbindungsenergie**), genügt demnach immer die Näherung:

$$m_k \approx m_a - Z \cdot m_e$$

Rechnungen, in denen noch genauere Massenwerte benötigt werden (z.B. Q-Berechnungen bei Kernreaktionen oder Zerfällen), sollen zweckmäßig mit den experimentell genau bestimmten Atommassen durchgeführt werden.

Eine Tabelle wichtiger Atom- und Kernmassen finden Sie **auf der folgenden Seite: Massen**

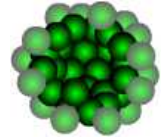
>

In der Atomphysik haben wir andeutungsweise den **historischen Weg** vom einfachen Atommodell der kinetischen Gastheorie bis hin zum quantenmechanischen Atommodell verfolgen können. Letzteres ist extrem leistungsfähig und beschreibt - bei entsprechendem mathematischen Aufwand, der an Schulen nicht nachvollzogen werden kann - alle Eigenschaften der Atomhülle erschöpfend.

In der Kernphysik fehlt noch das allumfassende Modell. Man verwendet für die Beschreibung unterschiedlicher Kerneigenschaften meist auch unterschiedliche Modelle, von denen im Folgenden zwei kurz charakterisiert werden sollen.

Tröpfchenmodell

Das Tröpfchenmodell behandelt den Kern ähnlich wie einen Flüssigkeitstropfen, bei dem man auch von einer konstanten Materiedichte ausgehen kann. Dieses Modell verschafft eine Einsicht in den Verlauf der Bindungsenergie eines Kerns und damit dessen Masse. Das Modell ist in der Lage einige Aussagen über Kernzerfälle und auch Spaltreaktionen zu machen. Weitergehende Vorhersagen kann die sogenannte semiempirische Massenformel von Weizsäcker jedoch nicht leisten.



Wenn du an einer etwas detaillierteren - aber noch immer nicht vollständigen - Darstellung dieses Modells interessiert bist, so haben wir dieses hier für dich zusammengefasst.

[Inhalt einblenden](#)

Die Idee zum Tröpfchenmodell stammt von dem Physiker GAMOV und wurde von mehreren namhaften Physikern (u.a. BETHE und v. WEIZSÄCKER) weiterentwickelt.

Die Ruhemasse eines Kerns kann mit Hilfe der **Bindungsenergie** in der folgenden Form geschrieben werden:

$$m_{K,0} = Z \cdot m_{p,0} + N \cdot m_{n,0} - \frac{B}{c^2}$$

Wenn es gelingt, B zu berechnen, so kann man alle Kernmassen theoretisch vorhersagen. Durch einen Vergleich mit einem Flüssigkeitstropfen konnte v. WEIZSÄCKER eine halbempirische Formel für B angeben. In Folge verschiedener Einflüsse setzt sich die Bindungsenergie (entspricht beim Flüssigkeitstropfen etwa der Kondensationsenergie) aus verschiedenen Anteilen zusammen:

$$B = B_0 + B_1 + B_2 + \dots$$

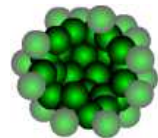
Auf die leichter verständlichen Anteile der Bindungsenergie wird im Folgenden eingegangen.

Volumenenergie

Oberflächenenergie

Die strenge (direkte) Proportionalität zwischen B_0 und A geht davon aus, dass jedes Nukleon stets die gleichartige Umgebung vorfindet. Dies ist jedoch für Nukleonen an der Kernoberfläche nicht der Fall, sie sind nicht - aufgrund fehlender Partner - so stark gebunden wie Nukleonen im Kerninneren. Man muss daher den Term B_0 durch den sogenannten Oberflächenterm B_1 korrigieren. Die Zahl der Nukleonen an der Kernoberfläche ist proportional zur Oberfläche. Für die Abhängigkeit der Oberfläche von der Nukleonenzahl lässt sich die folgende Proportionalität angeben:

$$O = 4 \cdot \pi \cdot r_K^2 = 4 \cdot \pi \cdot (r_0 \cdot \sqrt[3]{A})^2 = 4 \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot A^{\frac{2}{3}} \Rightarrow O \sim A^{\frac{2}{3}}$$



Zahl N der "Oberflächenkerne"

$$N \sim A^{\frac{2}{3}}$$

Somit ergibt sich als Korrekturterm für die Volumenenergie

$$B_1 = -a_0 \cdot A^{\frac{2}{3}}$$

COULOMB-Energie

Die im Kern befindlichen Protonen stoßen sich aufgrund der langreichweitigen Coulombkräfte gegenseitig ab. Auch dies führt zu einer Verringerung der Bindungsenergie, was in einem weiteren Korrekturterm B_2 berücksichtigt wird. Für die elektrostatische Energie einer kontinuierlich über das Innere einer Kugel vom Radius r_K verteilte Gesamtladung $Z \cdot e$ gilt

$$E_{estat} \sim \frac{(Z \cdot e)^2}{r_K} = \frac{(Z \cdot e)^2}{r_0 \cdot \sqrt[3]{A}} = \frac{e^2 \cdot Z^2}{r_0} \cdot A^{-\frac{1}{3}} \Rightarrow E_{estat} \sim Z^2 \cdot A^{-\frac{1}{3}}$$

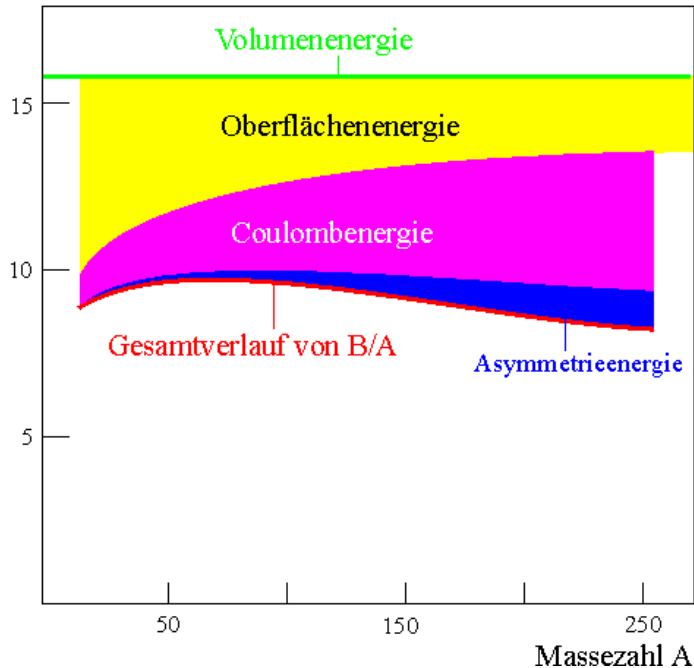
Somit ergibt sich als Korrekturterm für die COULOMB-Energie

$$B_2 = -a_C \cdot Z^2 \cdot A^{-\frac{1}{3}}$$

Von WEIZSÄCKER führte noch weitere Korrekturterme ein, auf die hier nur kurz eingegangen werden soll: Mit der Asymmetrienergie wird dem Neutronenüberschuss schwerer Kerne Rechnung getragen und mit der Paarungsenergie wird die Tatsache berücksichtigt, dass Kerne mit gerader Neutronen- und Protonenzahl (gg-Kerne) deutlich stabiler sind als solche mit ungerader Neutronen- und Protonenzahl (uu-Kerne). Die folgende Tabelle gibt hierüber einen statistischen Überblick:

Kernsorte	Zahl der stabilen Isotope	Stabilität	Zahl der Isotope pro Element
gg: gerade Protonen- und Neutronenzahl	165	sehr stabil	mehrere
gu: gerade Protonenzahl und ungerade Neutronenzahl	55	stabil	1
ug: ungerade Protonenzahl und gerade Neutronenzahl	50	stabil	1
uu: ungerade Protonen- und Neutronenzahl	4	zumeist instabil	1

In der Skizze sind die einzelnen Beiträge der Energierterme zur gesamten Bindungsenergie pro Nukleon B/A dargestellt. Die Proportionalitätskonstanten a_v , a_o , a_c usw. sind dabei empirisch ermittelte Werte.



Das Potenzialtopfmodell (Fermi-Gas-Modell)

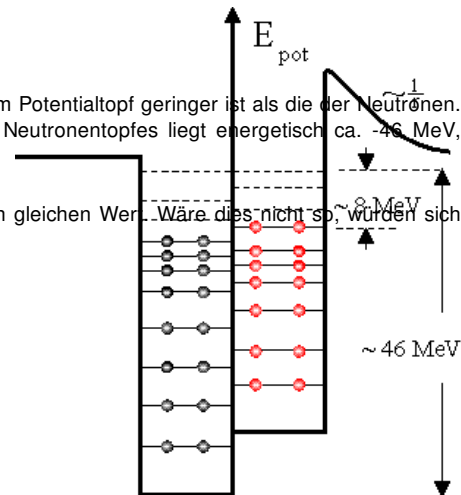
Beim quantenmechanischen Atommodell ergaben sich Elektronenzustände mit diskreter Energie dadurch, dass die Elektronen der Hülle durch das Coulombpotenzial des Kerns auf einen begrenzten Raumbereich "eingesperrt" waren. Unter der Berücksichtigung des Pauli-Prinzips konnte man den Aufbau der Hülle verschiedener Atomsorten verstehen.

Ähnliche Überlegungen führen zum sogenannten Potenzialtopfmodell des Kerns. Im Gegensatz zur Hülle fehlt hier jedoch das zentrale Kraftzentrum, welches das Potenzial ausmacht. Bei diesem Modell geht man davon aus, dass sich ein Nukleon unabhängig von den anderen Nukleonen in einem mittleren Kernpotenzial bewegt, das durch die anderen Nukleonen bewirkt wird.

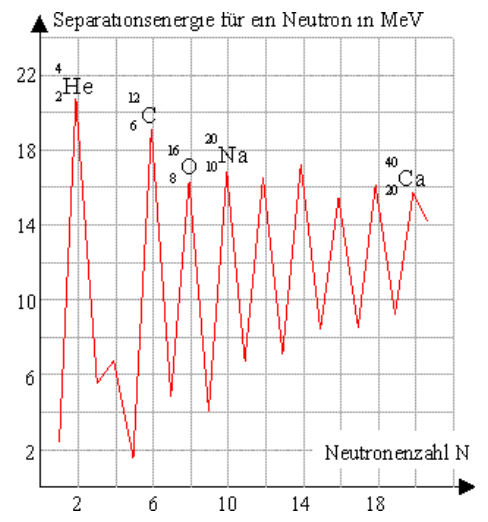
Der Kern besteht aus zwei voneinander verschiedenen Typen von Fermiteilchen, den Protonen und den Neutronen.

Die abstoßende Coulombkraft zwischen den Protonen bewirkt, dass ihre Bindungsenergie im Potentialtopf geringer ist als die der Neutronen. In der Skizze sind die beiden Potentialtöpfe nebeneinander gezeichnet. Der Boden des Neutronentopfes liegt energetisch ca. -46 MeV, derjenige des Protonentopfes liegt etwas höher.

Die höchsten noch besetzten Neutronen- und Protonenniveaus haben energetisch etwa den gleichen Wert. Wäre dies nicht so, würden sich Protonen in Neutronen umwandeln (β^+ -Zerfall) oder umgekehrt (β^- -Zerfall). Diese Niveaus liegen ca. 8 MeV unter dem Nullniveau.



Hinweis: Ähnlich wie in der Hülle gibt es auch beim Kern so etwas wie Schaleneffekte. Bei magischen Nukleonenzahlen (wenn entweder N oder Z einen der Werte 2, 8, 20, 28, 50, 82 oder 126 annimmt) ist es z.B. sehr schwer ein Nukleon aus einem Kern zu lösen. Eine ähnliche Beobachtung hatten wir bei abgeschlossenen Schalen, wie sie die Edelgase besitzen, zu beobachten. Zur Erklärung dieses Phänomens schuf man das sogenannte Schalenmodell des Atomkerns, welches hier jedoch nicht näher besprochen werden soll.



Weiterführende Artikel

>