

## Kernkräfte und Potentialtopfmodell des Kerns

### Kernkräfte

Die zentrale Frage dieses Abschnitts lautet:

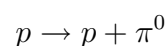
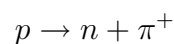
- Warum haltet der Kern trotz der abstoßenden Columbkraft zwischen den Protonen zusammen?

Die Antwort auf diese Frage wurde durch die theoretische Physik gegeben, durch den japanischen Physiker Hideki Yuakawa, der von den Arbeiten der Physiker Sommerfeld, Heisenberg und Dirac beeinflusst wurde. Er stellte 1935 die Forderung nach einer neuen Kraftart auf, die der Columbkraft entgegenwirkt und für den Zusammenhalt der Nukleonen sorgt.

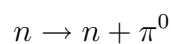
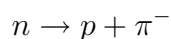
Die Kernkräfte halten die Nukleonen im Kern zusammen. Dabei unterscheidet man zwei unterschiedliche Arten von Kernkräften, nämlich die starken und die schwachen Kernkräfte.

Dabei haben die starken Kernkräfte die Kernkräfte, die auch als starke Wechselwirkungen bezeichnet werden, die nachstehenden Eigenschaften:

- Verglichen mit den Columbkraft sind die starken Kernkräfte 100 mal stärker.
- Die Reichweite beträgt  $10^{-15}$  m, damit wirken diese Kräfte nur im Innenbereich des Atomkerns.
- Sie sind unabhängig von der Ladung, damit wirken sie zwischen allen Nukleonen, also auf Neutronen und Protonen.
- Aus den Arbeiten von Yukawa geht hervor, dass das Proton kein stabiles Teilchen ist. Die starke Kernkraft bedingt einen permanenten Austauschvorgang, bei dem ein Elementarteilchen, das  $\pi$ - Meson fortlaufend ausgesendet und wieder eingefangen wird. Für den Austausch gibt es zwei Möglichkeiten, die hier in einer Reaktionsgleichung dargestellt werden:



Des weiteren ermöglichen die starken Kernkräfte die folgende Kernreaktionen:



- Nach den Experimenten in den großen Teilchenbeschleunigern weiß man heute, dass die Mesonen wiederum aus Quarks aufgebaut sind.

Die schwachen Kernkräfte bedingen die folgenden Eigenschaften:

- Sie haben die gleiche Reichweite wie die starken Kernbindungskräfte, ihre Stärke ist aber um den Faktor  $10^{14}$  schwächer als die starken Kernbindungskräfte.
- Die Wirkung der schwachen Kernbindungskräfte ist immer mit einem Ladungsaustausch der wechselwirkenden Teilchen verbunden.
- Als Austauscheteilchen gelten nach dem derzeit gängigen Standardmodell der Elementarteilchen die Bosonen.

## Konsequenzen der Kernbindungskräfte

- Auf die Neutronen wirken nur die Kernbindungskräfte.
- Den Kernbindungskräften wirkt bei den Protonen die Columbkraft entgegen.
- Auf die Protonen wirkt damit eine schwächere Gesamtkraft als auf die Neutronen.
- Da der Betrag des Potentials immer das Wegintegral über die wirkende Gesamtkraft ist, ist dieser bei den Protonen geringer als bei den Neutronen.
- Da die Kernkräfte der Columbkraft entgegen wirkt, wird bei der Kernbildung Energie frei und daher besitzt diese Energie ein negatives Vorzeichen.

## Das Potentialtopfmodell des Kerns

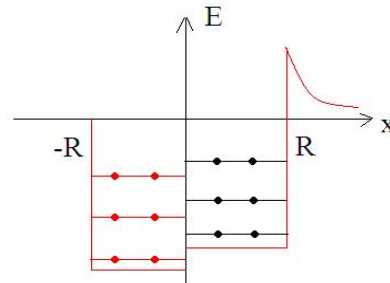
Mit den bisherigen Erkenntnissen über die Kernbindungskräfte kann man nun den Atomkern als einen Potentialtopf beschreiben, der die folgenden Eigenschaften besitzt:

- Die Breite des Potentialtopfs entspricht dem Durchmesser des Atomkerns.
- Der Topf unterteilt sich in einen Protonen und einen Neutronentopf.
- Der Topf der Neutronen ist dabei tiefer, weil der Betrag des Potentials der Neutronen tiefer ist.
- Die Energiestufen in beiden Töpfen werden über die Formel

$$E_n = \frac{h^2}{8ma^2} \cdot n^2$$

beschrieben.

- Da die Columbkraft auch außerhalb des Kerns wirkt, besitzt der Protonentopf noch eine positive Energiebarriere, die mit zunehmender Entfernung abnimmt. In einer Skizze kann man dies wie folgt veranschaulichen:



- Die Tiefe des Topfs ist von dem jeweiligen Atomkern abhängig.

Das Potentialtopfmodell eignet sich besonders gut zur Erklärung der radioaktiven Strahlung. Dabei unterscheiden wir zwischen  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  Strahlung.

## Der Beta- Zerfall im Potentialtopfmodell

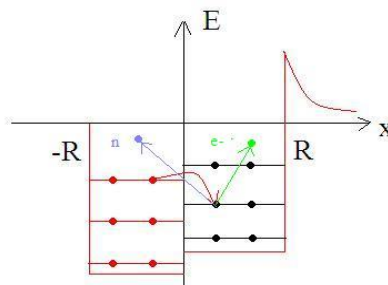
Ausgangspunkte:

- Das Proton ist kein stabiles Teilchen.
- Es sind prinzipiell Wechselwirkungen möglich, die ein Proton in ein Neutron umwandeln oder ein Neutron in ein Proton.

Wie im folgenden gezeigt wird, kann es bei diesen Umwandlungen zur Aussendung von Elektronen oder deren Antiteilchen, also Positronen kommen.

**Beispiel** :  ${}^{228}_{88}\text{Ra}$  zerfällt unter der Aussendung von Elektronenstrahlen in  ${}^{228}_{89}\text{Ac}$ .

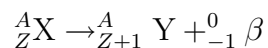
Im Potentialtopfmodell kann man sich den Beta- Zerfall wie folgt vorstellen:



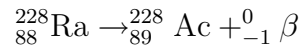
12. Jahrgangsstufe – Physik– Kernphysik – Lehrskript

- Es wandelt sich ein Neutron, das sich in einem energetisch höheren Zustand befindet in ein Proton auf einem niedrigeren Energiezustand um.
- Die dabei freiwerdende Energie wird dazu genutzt, dass das  $\pi^-$  Meson in ein Positron und ein Neutrino aufgespalten wird.
- Da bei dieser Aufspaltung wiederum Bindungsenergie frei gesetzt wird (da ja die Bindungskräfte überwunden werden) werden das Elektron und das Neutrino aus dem Kern emittiert.
- Dadurch wandelt sich im Ergebnis das Neutron unter der Abgabe eines Positrons in ein Proton um.
- Das Ergebnis dieses Prozesses ist dann die Elektronenstrahlung oder die  $\beta^-$ -Strahlung, wie diese auch genannt wird.

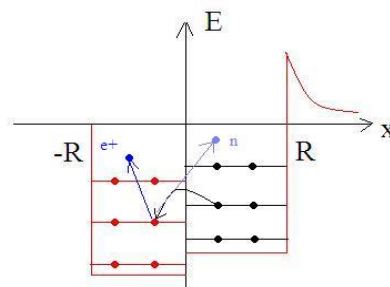
Bei der  $\beta^-$ -Strahlung wird ein Neutron in ein Proton umgewandelt. Dabei erhöht sich die Ordnungszahl des Kerns um 1, was zu der nachstehenden Reaktionsgleichung führt:



Für das Beispiel ergibt sich dann die folgende Reaktionsgleichung:



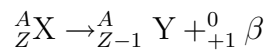
Es gibt noch eine andere Möglichkeit, nämlich dass sich ein Neutron einer höheren Energiestufe in ein Proton auf einer niedrigeren Energiestufe umwandelt. Im Potentialtopfmodell sieht dies dann wie folgt aus:



- Es wandelt sich ein Proton, das sich in einem energetisch höheren Zustand befindet in ein Neutron auf einem niedrigeren Energiezustand um.
- Die dabei freiwerdende Energie wird dazu genutzt, dass das  $\pi^+$  Meson in ein Positron und ein Neutrino aufgespalten wird.

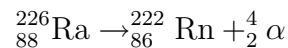
- Da bei dieser Aufspaltung wiederum Bindungsenergie frei gesetzt wird (da ja die Bindungskräfte überwunden werden) werden das Positron und das Neutrino aus dem Kern emittiert.
- Dadurch wandelt sich im Ergebnis das Proton unter der Abgabe eines Positrons in ein Neutron um.
- Das Ergebnis dieses Prozesses ist dann die Positronenstrahlung oder die  $\beta^+$ -Strahlung, wie diese auch genannt wird.

Bei der  $\beta^+$ -Strahlung wird ein Proton in ein Neutron umgewandelt. Dabei erniedrigt sich die Ordnungszahl des Kerns um 1, was zu der nachstehenden Reaktionsgleichung führt:

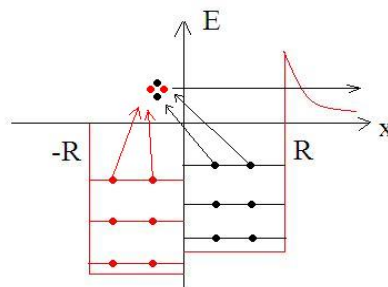


## Die Alpha- Strahlung

Bei der Alphastrahlung werden  $\alpha$ - Teilchen emittiert, die aus zweifach positiv geladenen Heliumkernen bestehen. Bei der Alphastrahlung tritt immer eine Kernumwandlung ein. Ein Beispiel für eine  $\alpha$ - Reaktion ist



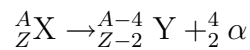
Das Potentialtopfmodell liefert für die Entstehung von  $\alpha$ - Strahlung die nachstehende Erklärung:



- Es fusionieren zwei Protonen und Neutronen zu einem  $\alpha$ - Teilchen.
- Bei der Kernfusion wird die Kernbindungsenergie freigesetzt.
- Aufgrund der Energieunschärfe  $\Delta E$  ist es nun möglich, dass das  $\alpha$ - Teilchen kurzzeitig die Energiebarriere übersteigt und durch die Energiebarriere mit einer von Null verschiedenen Wahrscheinlichkeit durchtunneln kann.

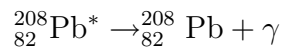
- Damit befindet sich das  $\alpha$ - Teilchen außerhalb des ursprünglichen Atomkerns und kann wegen Energieverlust, der beim Durchtunneln entstanden ist, nicht wieder zurück in den Kern tunneln.
- Damit wurde das  $\alpha$ - Teilchen aus dem Kern emittiert und der ursprüngliche Atomkern hat sich zu einem so bezeichneten Tochterkern umgewandelt.
- Die natürliche Energie von  $\alpha$ - Teilchen liegt bei 2,00 MeV bis 5,00 MeV, bei künstlich erzeugten Nukliden auch über 10,0 MeV.

Bei der  $\alpha$ - Strahlung werden vom Atomkern doppelt positive Heliumkerne, die sogenannten  $\alpha$ - Teilchen emittiert. Dabei bildet sich ein Tochterkern. Die allgemeine Reaktionsgleichung lautet daher:



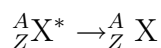
## Der Gammazerfall

Die Gammastrahlung ist die Strahlungsart der drei radioaktiven Strahlungsarten, bei der die meiste Energie emittiert wird. Die Energieabstrahlung wird durch die sogenannten  $\gamma$ -Quanten geleistet. Eine derartige Kernreaktion ist die folgende:



Aus dieser Reaktionsgleichung wird deutlich, dass die Gammastrahlung ein Produkt der inneren Vorgänge des Atomkerns ist, bei der keine Kernumwandlung erfolgt. Dabei besetzt ein energetisch höher stehendes Elektron einen freien, niedrigeren Energiezustand. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form von Gammaquanten abgestrahlt. Da die Energieniveaus in einem Atomkern diskret sind, können nur Gammaquanten mit einer bestimmten Energie abgestrahlt werden. Die Gammaquanten sind dabei für den Atomkern charakteristisch wie im analogen Fall die Spektrallinien für ein Atom charakteristisch sind.

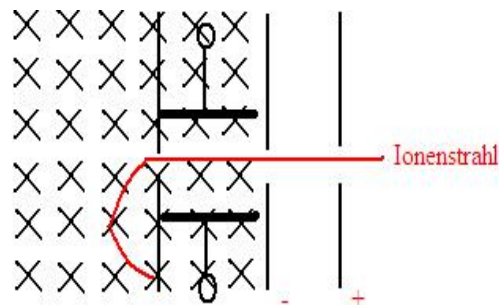
Die Gammastrahlung ist die energiereichste Strahlungsart und die einzige Strahlungsart, bei der es keine Kernumwandlung gibt. Die allgemeine Reaktionsgleichung ist:



## Die Energie des Atomkerns

### Der Massenspektrograph

Ab 1920 war es mit Hilfe der ersten Massenspektrographen möglich die Masse von Atomkernen und Kernbausteinen experimentell zu bestimmen. Das Grundprinzip eines Massenspektrographen wird in der folgenden Abbildung beschrieben:



- Durch den ersten Kondensator vor dem Magnetfeld wird der Ionenstrahl auf seine Geschwindigkeit  $v$  beschleunigt.
- Ein Ionenstrahl tritt in ein elektrisches Feld eines Plattenkondensators ein.
- Senkrecht zu dem elektrischen Feld bildet sich das homogene Magnetfeld der Helmholtzspulen aus.
- Die Spannung an dem Ablenkkondensator wird nun so eingestellt, dass der Ionenstrahl den Kondensator ohne Ablenkung passiert und hinter dem Kondensator durch eine Blende in das homogene Magnetfeld eintritt.
- Aufgrund der wirkenden Lorentzkraft beschreibt der Ionenstrahl dann einen Kreis, dessen Radius messbar ist.
- Aus den Messdaten kann die Masse des Atomkerns dann bestimmt werden und zwar aus dem Gleichgewicht zwischen der Zentripetalkraft und der Lorentzkraft des Magnetfelds:

$$\frac{m}{r}v^2 = qvB$$

$$m = \frac{qB}{r \cdot v}$$

- Die Masse eines Protons entspricht der Masse eines Wasserstoffkerns und mit dem Massenspektrographen wurde diese Masse zu  $m_p = 1,007277 \text{ u}$ . Die Masse des Neutrons entspricht  $1,008665 \text{ u}$ .

- u ist die atomare Masseneinheit Unit. Zur Umrechnung in Kilogramm gilt der Zusammenhang:

$$1 \text{ u} = 1,660566 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

## Massendefekt und Kernbindungsenergie

Aus der bisherigen Entwicklung ist bekannt, dass die Atomkerne aus Nukleonen aufgebaut sind. Damit kann man in einem Gedankenexperiment sich den Heliumkern aus zwei Protonen und zwei Neutronen zusammensetzen. Damit müsste die Masse des Kerns die Summe der Massen der einzelnen Kernbausteine sein. Das würde bedeuten:

$$m = 2m_p + 2m_n$$

$$m = 2 \cdot 1,007277 \text{ u} + 2 \cdot 1,008665 \text{ u} = 6,6946 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Der Massenspektrograph bestimmt allerdings die Kernmasse des zu

$$m_{\text{Kern}} = 6,6436 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Damit ergibt sich eine Massendifferenz, die man nicht aus dem Messfehler erklären kann. Dieses Phänomän wird als Massendefekt bezeichnet. Dieser Massendefekt ergibt sich bei allen Atomkernen.

Der Unterschied der Masse der einzelnen Nukleonen eines Atomkerns und der Atomkernmasse wird als Massendefekt bezeichnet und wird berechnet über

$$\Delta m = (N \cdot m_n + Z \cdot m_p) - m_{\text{Kern}}$$

Es ist nun zu klären, was mit der verschwundenen Masse passiert ist.

- Albert Einstein hat mit seiner Entdeckung  $E = mc^2$  gezeigt, dass Energie und Masse analoge Begriffe sind. Das bedeutet, dass sich Energie in Masse und Masse in Energie umwandeln kann.
- Damit lässt sich das Problem klären: Ein Atomkern kann als stabiles Gebilde gedeutet werden, das durch die Kernbindungskräfte zusammengehalten wird. Wenn man den Kern in seine Bestandteile zerlegen will, dann muss man gerade diese Energie aufwenden. Im umgekehrten Fall wird gerade diese Energie frei, das heist beim Zusammensetzen zu einem Atomkern wird die Kernbindungsenergie freigesetzt.
- Der Massendefekt entspricht also einem Energieverlust, der über die Einsteinsche Energieformel berechnet wird.



12. Jahrgangsstufe – Physik– Kernphysik – Lehrskript

Der Massendefekt entspricht einem Energieverlust, der durch das Zusammenfügen der Nukleonen zu einem Atomkern entsteht. Quantitativ wird dieser beschrieben über:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$