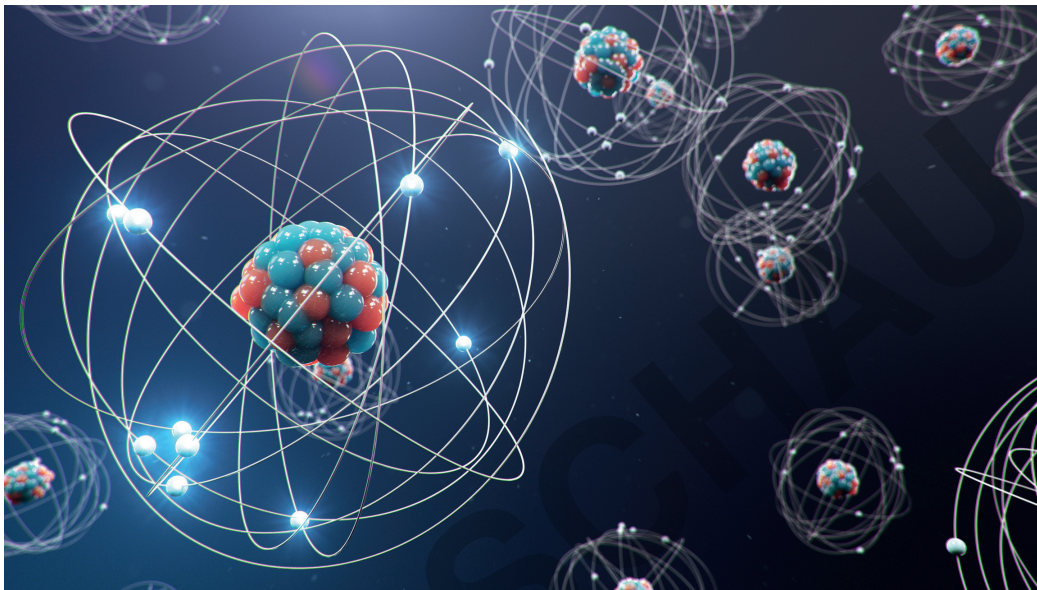


II.F.14

Atom- und Kernphysik

Atomkernmodelle – historische Entwicklung und physikalische Bedeutung

Ein Beitrag von Wolfgang Vogg, Illustrationen von Wolfgang Vogg



© RAABE 2022

© Rost-9D/iStock/Getty Images Plus

Im Vergleich zur Atomhülle sind Aufbau und Funktion von Atomkernen wesentlich komplexer. Auf die im Inneren eines Atomkernes vorhandenen Bestandteile wirken die elektrostatische Coulombkraft und die starke und schwache Wechselwirkung, natürlich auch die Gravitationskraft. Eine bestätigte Theorie zur Beschreibung aller Wechselwirkungskräfte existiert bis heute nicht – vielmehr behilft man sich mit aufwendigen Modellen, von denen jedes einzelne für sich bestimmte Eigenschaften der Atomkerne gut beschreiben kann. Kein Modell ist in der Lage, alle auftretenden Eigenschaften hinreichend genau zu beschreiben. Die gängigsten und hilfreichsten Modelle (wie etwa Tröpfchenmodell, Potentialtopfmodell und Schalenmodell) werden in diesem Beitrag hinsichtlich ihrer historischen Entwicklung und physikalischen Bedeutung vergleichend beschrieben und erläutert.

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe:	Sek. II
Dauer:	11 Unterrichtsstunden
Kompetenzen:	Texte erfassen, Probleme formulieren, Vermutungen äußern, Lösungen abschätzen, Ergebnisse reflektieren, physikalische Gesetzmäßigkeiten beschreiben und anwenden
Thematische Bereiche:	Atomkernmodelle in ihrer historischen Entwicklung, physikalische Hintergründe der einzelnen Modelle, vergleichende Erläuterung der Vor- und Nachteile der einzelnen Atomkernmodelle



netzwerk
lernen

zur Vollversion

Auf einen Blick

Ab = Arbeitsblatt

1. Stunde

Thema: Historische Entwicklung der Kernphysik

M 1 (Ab) Die Entdeckung des Atomkerns

Suche 

2.–3. Stunde

Thema: Aufbau und Zusammenhalt des Atomkerns

M 2 (Ab) Woraus besteht der Atomkern?

M 3 (Ab) Was hält den Atomkern zusammen?

Suche 



4.–8. Stunde

Thema: Die wichtigsten Atomkernmodelle

M 4 (Ab) Das Tröpfchenmodell des Atomkerns

M 5 (Ab) Das Potentialtopfmodell des Atomkerns

M 6 (Ab) Das Schalenmodell der Quantenphysik

Suche 



9. Stunde

Thema: Ergänzende Atomkernmodelle

M 7 (Ab) Kollektives, optisches und Fermigas-Modell

10.–11. Stunde

Thema: Atomkernmodelle im Vergleich

M 8 (Ab) Besonderheiten der wichtigsten Kernmodelle

Woraus besteht der Atomkern?

M 2



Atomkerne haben eine Ausdehnung in der Größenordnung von 10^{-15} m; so beträgt der Radius eines Wasserstoffatoms rund $1 \cdot 10^{-10}$ m, während der Radius eines Uranatoms rund $8 \cdot 10^{-15}$ m erreicht. Ihre Größenordnung ist damit etwa 10.000-mal kleiner als die der Atome, deren Ausdehnung in der Größenordnung von 10^{-10} m liegt. **Rutherford** entdeckte im Jahr 1919, dass der Atomkern des Stickstoffs Atomkerne des Wasserstoffs enthält. Aufgrund dieser Entdeckung nahm er an, dass alle Atomkerne aus Wasserstoffkernen aufgebaut sind, was ihn dazu brachte, diesen Kernen den Namen **Proton** zu geben.

Allerdings vermutete Rutherford schon im darauffolgenden Jahr 1920, dass sich in den Atomkernen neben Protonen noch eine weitere Art von Teilchen befinden muss, die im Gegensatz zu den positiv geladenen Protonen elektrisch neutral sind, aber von ihrer Masse her sehr nahe bei der Protonenmasse liegen. Für dieses hypothetische Teilchen wurde der Name **Neutron** eingeführt – erst im Jahr 1932 konnten die Neutronen von **James Chatwick** (1873–1951) experimentell nachgewiesen werden. Damit war sichergestellt, dass Atomkerne aus zwei Arten von Kernbausteinen bestehen, den Protonen und den Neutronen.

Häufig fasst man Protonen und Neutronen unter dem Begriff **Nukleonen** zusammen, wobei Nukleon so viel wie Kernbaustein bedeutet. Die Massen von Protonen und Neutronen sind ungefähr gleich ($m_p \approx 1,6727 \cdot 10^{-27}$ kg; $m_n \approx 1,6750 \cdot 10^{-27}$ kg), aber jeweils rund 1800-mal so groß wie die Masse eines Elektrons der Hülle ($m_e \approx 9,1093 \cdot 10^{-31}$ kg). Aufbauend auf theoretischen Vorhersagen gelang es durch aufwendige Experimente mit großen Teilchenbeschleunigern Anfang der 60er-Jahre des 20. Jahrhunderts zu zeigen, dass **Protonen** und **Neutronen** jeweils aus zwei noch kleineren Teilchen aufgebaut sind, die man **Quarks** nannte (**Abb. 1**).

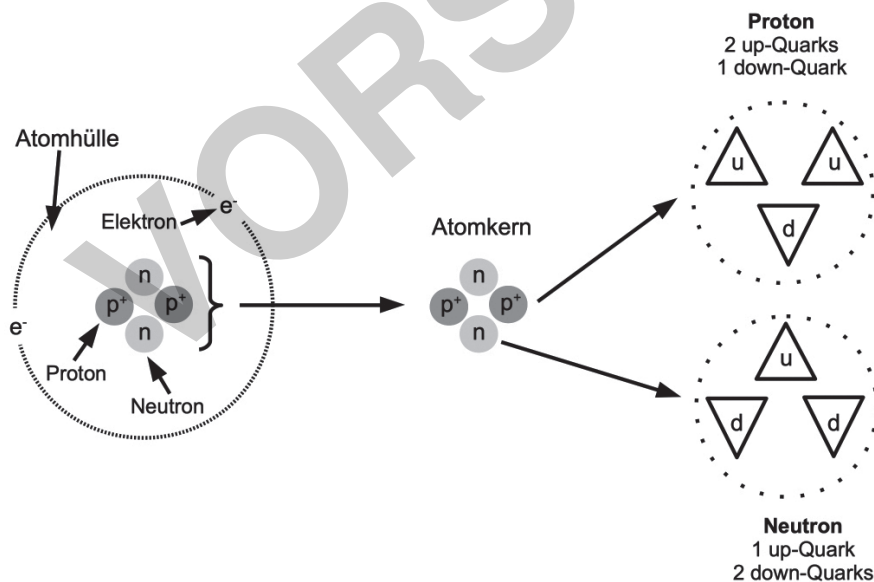


Abb. 1: Atomhülle mit Atomkern aus Protonen und Neutronen – aufgebaut aus Quarks

Tipp: Zur Ergänzung ist folgendes Video zu empfehlen:

▶ <https://raabe.click/phy-Atomkernmodelle-2>





Volumenterm

Der dominierende Energiebetrag bei der Berechnung der gesamten Bindungsenergie des Atomkerns resultiert aus der Volumenenergie E_V , die wegen der konstanten Kerndichte direkt proportional zur Nucleonenzahl A ist.

Sie ergibt sich aufgrund der **starken Kernkraft**, die aber wegen ihrer extrem kurzen Reichweite immer nur zwischen zwei benachbarten Nucleonen wirkt (**Abb. 2a**). Somit wird die Bindungsenergie eines von mehreren anderen Nucleonen umgebenen Nucleons unabhängig vom Vorhandensein anderer Nucleonen und damit von deren Gesamtzahl.

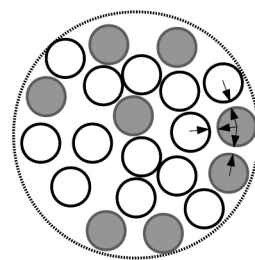


Abb. 2a

Es gilt: $E_V = k_V \cdot A$ mit $k_V \approx 15,67 \text{ MeV}$

Hinweis: Der Koeffizient k_V stellt die experimentell bestimmte Bindungsenergie pro Nucleon dar.

Oberflächenterm

Die Nucleonen an der Oberfläche des Atomkerns können bei einer maximalen Anzahl von Nachbarn nur von den innen liegenden Nucleonen an den Kern gebunden werden. Ihr Beitrag stellt somit eine Art Korrektur zum Volumenterm dar und verringert damit die gesamte Bindungsenergie, was durch einen negativen Koeffizienten k_{OF} für den Oberflächenterm ausgedrückt wird.

Will man die Anzahl der Nucleonen an der Oberfläche eines Atomkerns bestimmen, benutzt man die Näherung $A^{2/3} \sim r$. Da die Fläche einer Kugel proportional zu r^2 ist, muss auch die Anzahl der Nucleonen an der Kernoberfläche proportional zu r^2 und damit zu $A^{2/3}$ sein.

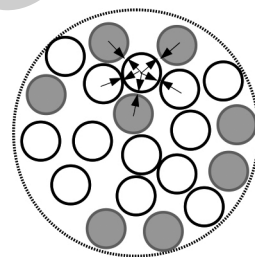


Abb. 2b

Folglich gilt: $E_{OF} = -k_{OF} \cdot A^{2/3}$ mit $k_{OF} \approx 17,23 \text{ MeV}$

Hinweis: Der Koeffizient k_{OF} wird aus experimentellen Daten ermittelt.

Coulombterm

Durch die abstoßende Coulombkraft zwischen den positiv geladenen Protonen wird die gesamte Bindungsenergie zusätzlich verringert, weshalb der Koeffizient k_C des Coulombterms ebenfalls negativ wird.

Entsprechend dem Coulomb'schen Gesetz ist diese abstoßende Energie eigentlich proportional zum Quadrat der elektrischen Ladungszahl Z und umgekehrt proportional zum Radius r . Da jedoch jedes der Z Protonen nur von den übrigen $Z - 1$ Protonen abgestoßen wird, ist diese Energie bei exakter Betrachtung proportional zu $Z \cdot (Z - 1)$ und bei großen Protonenzahlen durchaus vernachlässigbar.

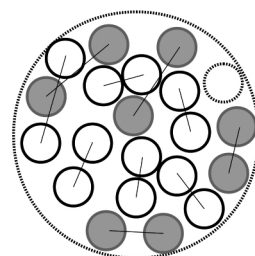


Abb. 2c

Gesamtbindungsenergie nach der Bethe-Weizsäcker-Formel

Für die gesamte Bindungsenergie eines Atomkerns mit der Nukleonenzahl A , der Protonenzahl (Kernladungszahl) Z und der Neutronenzahl N ergibt sich unter Einbeziehung der fünf beschriebenen Terme folgende Beziehung:

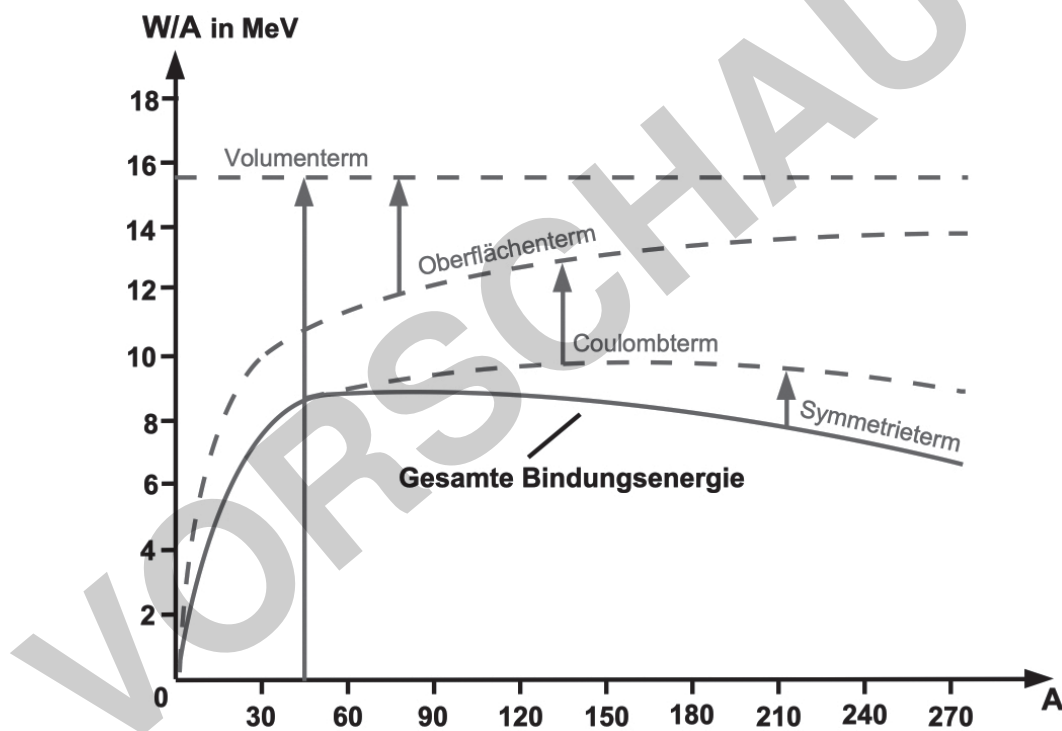
$$E_B = k_V \cdot A - k_{OF} \cdot A^{2/3} - k_C \cdot Z \cdot (Z-1) \cdot A^{-1/3} - k_S \cdot \frac{(N-Z)^2}{4 \cdot A} + E_p$$

mit

$$E_p(\text{gg}) = k_p \cdot A^{-1/2} \quad E_p(\text{gu} - \text{ug}) = 0 \quad E_p(\text{uu}) = -k_p \cdot A^{-1/2}$$

Die Beiträge der einzelnen Terme der Bethe-Weizsäcker-Formel zur Bindungsenergie pro Nukleon sind in **Abb. 3** dargestellt. Der Beitrag für den Paarungsterm muss je nach Kernart noch hinzugefügt werden.

Abb. 3: Beitrag der einzelnen Terme zur Gesamtenergie pro Nukleon



© RAABE 2022



Tipp: Zur Ergänzung ist folgendes Video zu empfehlen:

- ▶ <https://raabe.click/phy-Atomkernmodelle-3>

Aufgaben

- Bei der Beschreibung des Tröpfchenmodells anhand von Volumenterm, Oberflächenterm und Coulombterm erhält man folgende Ergebnisse für die zugehörigen Energien:

Volumenenergie: $E_V = k_V \cdot A$

Oberflächenenergie: $E_{OF} = -k_{OF} \cdot A^{2/3}$

Coulombenergie: $E_C = -k_C \cdot Z \cdot (Z - 1) \cdot A^{-1/3}$

Leiten Sie anhand entsprechender Überlegungen rechnerisch die zugehörigen Gleichungen für jede Energie her.



- Die stabilsten Atomkerne befinden sich im Bereich von Eisen, Chrom und Nickel bei Nukleonenzahlen von 52 bis 62. Die sehr hohen Bindungsenergien pro Nukleon haben einen Betrag von etwa 8,8 MeV pro Nukleon (**Abb. 4**).

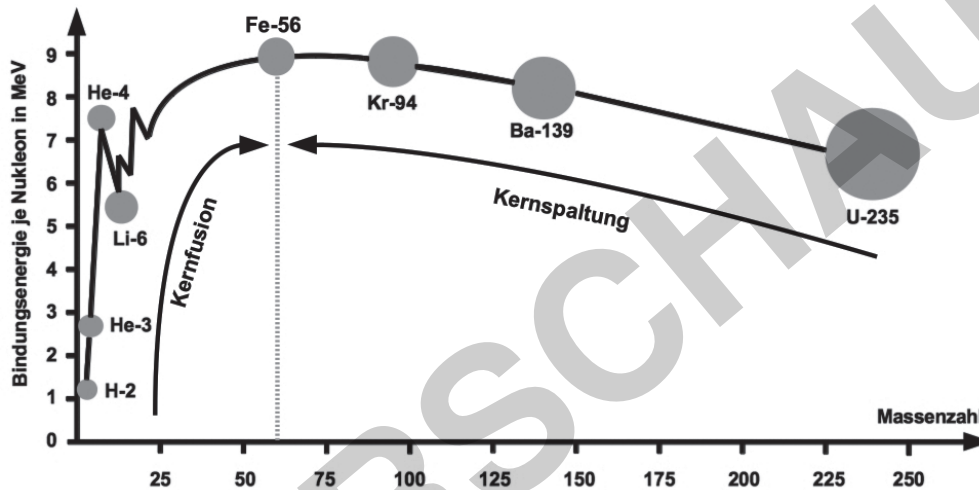


Abb. 4: Bindungsenergie pro Nukleon in MeV

- Begründen** Sie, warum über einen extrem langen Zeitraum betrachtet alle Atomkerne unter Energiefreisetzung zu Eisen bzw. Nickel werden.
- Berechnen** Sie nach dem Tröpfchenmodell für Eisen ^{56}Fe ($A = 56$; $N = 30$; $Z = 26$) unter Anwendung der Bethe-Weizsäcker-Formel die Bindungsenergie pro Nukleon.

Beachten Sie dabei im Hinblick auf den Paarungsterm, um welche Kernart es sich bei ^{56}Fe handelt!

- Mithilfe der Bethe-Weizsäcker-Formel lässt sich eine Bedingung für das Verhältnis zwischen Protonen- und Neutronenzahlen der stabilen Kerne herleiten.



Das Potentialtopfmodell des Atomkerns

M 5

In Anlehnung an das quantenmechanische Potentialtopfmodell für die Atomhülle entstand in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts auch ein Potentialtopfmodell für die Beschreibung der Vorgänge im Atomkern. Im Gegensatz zum Potentialtopfmodell der Hülle mit seinem zentralen Coulombpotential, das die Elektronen auf einen begrenzten Raum festlegt, fehlt jedoch beim Potentialtopfmodell für den Kern ein solches zentrales Kraftzentrum.

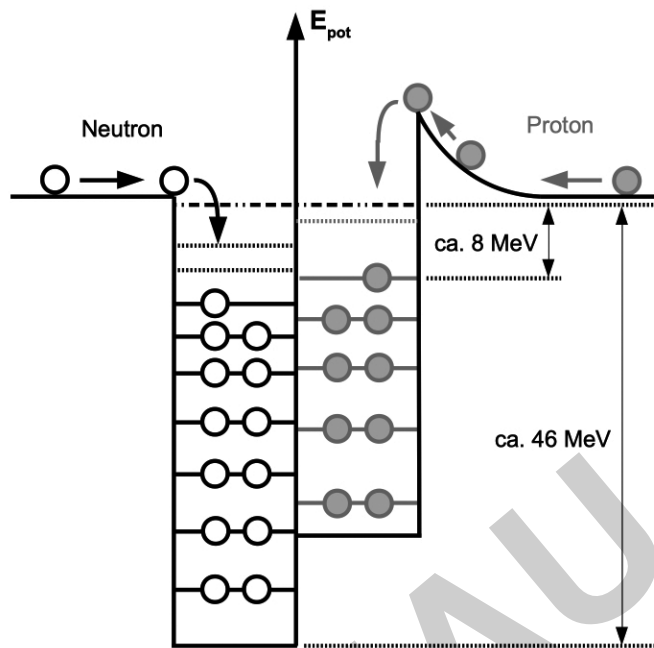


Abb. 5: Annäherung und Einbau von Neutron und Proton in den Atomkern

Stattdessen geht man beim Potentialtopfmodell des Atomkerns davon aus, dass sich jedes einzelne Nucleon unabhängig von den übrigen Nucleonen in einem mittleren Kernpotential bewegt, das von den anderen Nucleonen bewirkt wird.

An einem fiktiven Atomkern zeigt **Abb. 5**, wie sich ein Neutron (weiß unterlegt) und ein Proton (grau unterlegt) auf ihrem Weg aus großer Entfernung hin zum Atomkern verhalten. Auf das Neutron wirkt erst eine Kraft, wenn es den Kernrand erreicht – dort spürt es schlagartig die extrem stark anziehende Kernkraft. Auf das Proton hingegen wirkt bereits bei seiner Annäherung an den Kern die weitreichende abstoßende Kraft der Protonen im Kern.

Abb. 6 zeigt die unterschiedlichen Kraft- und Energiebedingungen beim Einbau eines freien Neutrons (links) sowie eines freien Protons (rechts) in einen vorhandenen Atomkern.

Dabei werden die beiden Potentialtöpfe unter Berücksichtigung der auf die Protonen wirkenden Coulombkräfte nebeneinander gezeichnet.

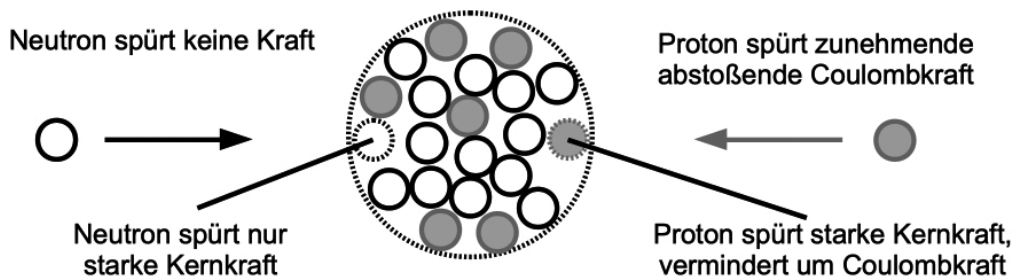


Abb. 6: Modell eines Kernpotentialtopfes

Der β^- -Zerfall

Bei stabilen Kernen müssen Neutronen- und Protonentopf in etwa bis zum gleichen Niveau gefüllt sein.

Ist hingegen der Neutronentopf bis zu einem höheren Niveau gefüllt (**Abb. 7**), so wandelt sich ein im Neutronentopf höher liegendes Neutron durch einen β^- -Zerfall in ein Proton um unter Aussendung eines **Elektrons** (e^-) und eines **Antineutrinos** ($\bar{\nu}$), die gemeinsam als Träger der Zerfallsenergie dienen.

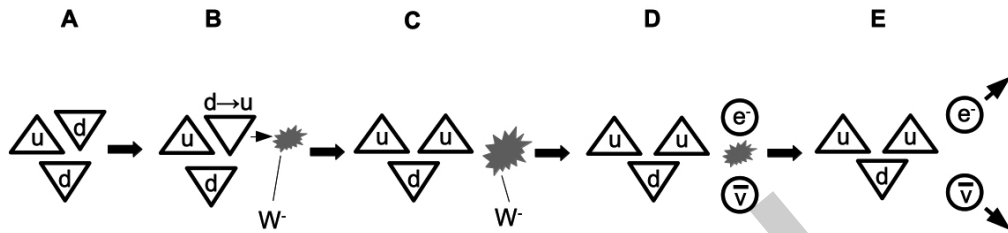
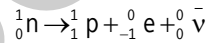


Abb. 7: β^- -Zerfall des Neutrons

Das Proton geht in den Protonentopf über. Damit wird erreicht, dass der Tochterkern weniger Energie hat und somit stabiler ist, weil man ihn nur durch Energieaufwand wieder in den vorherigen Zustand bringen könnte.

Die Vorgänge beim β^- -Zerfall lassen sich anschaulich mithilfe der schwachen Wechselwirkung darstellen:

Die Zerfallsgleichung für den β^- -Zerfall lautet:



Ein Neutron (Ladung 0), bestehend aus zwei down-Quarks und einem up-Quark, zerfällt in ein Proton (Ladung +e), das durch zwei up-Quarks und ein down-Quark beschrieben wird, sowie ein Elektron (Ladung -e) und ein später noch näher zu beschreibendes Antineutrino (Ladung 0). In **Abb. 8** sind die Abläufe bildlich dargestellt.

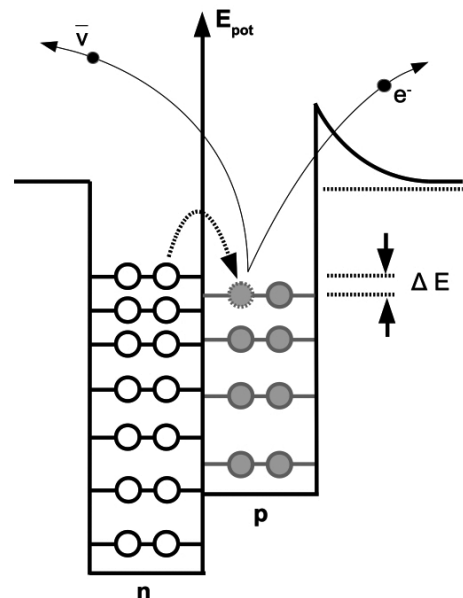


Abb. 8: Der β^- -Zerfall, dargestellt anhand der schwachen Wechselwirkung

Lösungen (M 1)

Die anfängliche mechanische kinetische Energie E_{α} des α -Teilchens ist gleich der potentiellen Energie E_{pot} , mit der der Goldkern das α -Teilchen kurzzeitig auf $v = 0$ abbremst: $E_{\alpha} = E_{\text{pot}}$

$$\text{Mit } E_{\text{pot}} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_{\alpha} \cdot q_{\text{Go}}}{d} \text{ folgt daraus: } E_{\alpha} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_{\alpha} \cdot q_{\text{Go}}}{d},$$

wobei $q_{\alpha} = 2 \cdot e$ der Ladung des α -Teilchens (2 Protonen) und $q_{\text{Go}} = 79 \cdot e$ der Ladung des Goldkerns (79 Protonen) entspricht. Wir setzen die Ladungen in die Gleichung ein und lösen diese nach dem Abstand d auf:

$$d = \frac{2 \cdot e \cdot 79 \cdot e}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot E_{\alpha}} = \frac{2 \cdot 79 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{4 \cdot \pi \cdot \left(8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}\right) \cdot 5,30 \text{ MeV} \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}}} = 4,298 \cdot 10^{-14} \text{ m}$$

Im Vergleich zu atomaren Größenordnung erscheint der Abstand sehr klein, allerdings nicht im Vergleich zum Atomkern. real betrachtet ist der wert noch größer als die Summe der Radien des Goldkerns und des α -Teilchens. Das α -Teilchen kehrt um, ohne den Atomkern wirklich berührt zu haben!

Lösungen (M 3)

Aufgabe 1

Betrachtet man einen aus Protonen und Neutronen bestehenden Atomkern, so ist der Zusammenhalt stabiler Kerne eigentlich nicht nachvollziehbar. Vielmehr sollten sich die gleichnamig geladenen Protonen aufgrund der Coulomb'schen Kraftwirkung voneinander abstoßen. Dies tun sie im Grunde auch, aber eine andere, etwa **137-mal** stärkere Kraft wirkt der Abstoßung entgegen. Diese wirkt zwischen Protonen untereinander, zwischen Neutronen untereinander, aber auch zwischen Neutronen und Protonen. Es handelt sich um die **Starke Wechselwirkung (Starke Kernkraft)**, die mit ihrer maximalen Reichweite von $2,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ fast nur benachbarte Nukleonen anzieht.

Aufgabe 2

Abb. 14 zeigt beispielhaft Protonen und Neutronen, die aus sogenannten **Quarks** aufgebaut sind, die in beiden Nukleonen als Dreiergruppen auftreten und sich entweder zu einer positiven Elementarladung ergänzen (**Proton**) oder sich nach außen hin neutralisieren (**Neutron**).

Protonen bestehen aus zwei „up-Quarks“ (Ladung $+2/3$) sowie einem „down-Quark“ (Ladung $-1/3$); Neutronen hingegen aus zwei „down-Quarks“ und einem „up-Quark“.

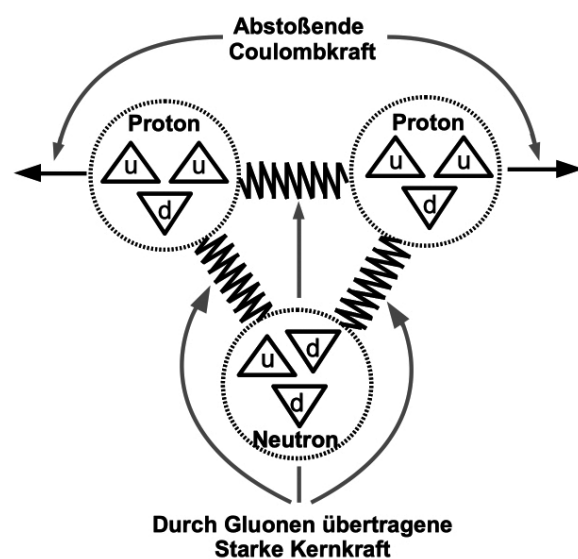


Abb. 14: Starke Kernkraft

Die starke Wechselwirkung, mit der die Quarks und damit die Nukleonen aneinandergelassen sind, wird durch „**Gluonen**“ (von „glue“ = Leim) vermittelt. Mit ihrer Kraft, die man auch „Residualkraft“ nennt, reicht sie bis zu den benachbarten Nukleonen.

Aufgabe 3

Die durch die Gluonen übertragene starke Wechselwirkung hat eine Reichweite von maximal $2,5 \cdot 10^{-15}$ m, was bei einem Kerndurchmesser von $d \approx 2,5 \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot A^{1/3}$ (bei U-235 also etwa $1,69 \cdot 10^{-14}$ m) rund einem Siebtel entspricht.

So spürt ein Proton, das am Rand eines großen Kernes sitzt, die starke Kernkraft nur von benachbarten Teilchen, die es nach innen ziehen wollen. Im Vergleich zu kleinen Kernen wie etwa He-4 oder C-12 kann man leicht nachvollziehen, dass sich bei einem U-235-Kern die von null bis gegen unendlich auf die Protonen wirkende Coulombkraft ganz wesentlich zur Instabilität des Kernes beiträgt (**Abb. 15**).

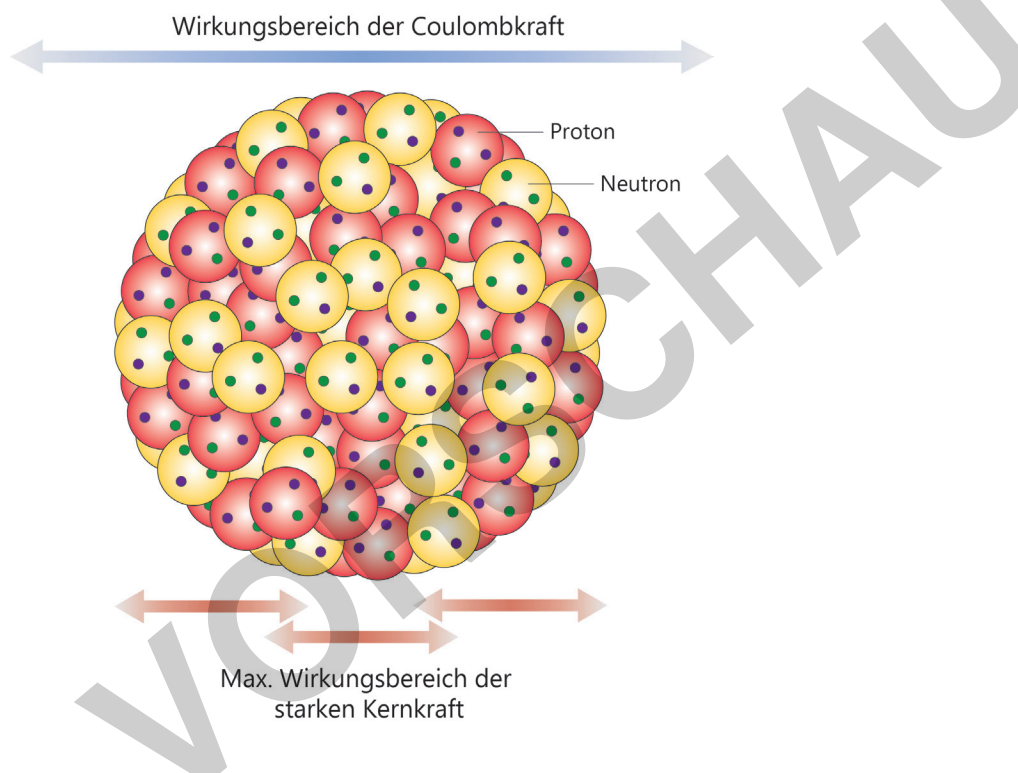


Abb. 15: Wirkungsbereich der Coulombkraft

Illustration: Alexander Friedrich

Hinweis (M 4)

Aufgabe 3 (einschließlich Lösung) eignet sich nur für mathematisch besonders versierte Schülerinnen und Schüler.