

BG/BRG AMSTETTEN

SPEZIALGEBIET

Kernphysik

Autor:

Thomas BAUMGARTNER

Betreuer:

Mag. Josef LECHNER

20. Mai 2014

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	2
1 Kernmodelle	2
1.1 Einstieg	2
1.2 Tröpfchenmodell	4
1.3 Schalenmodell	4
2 Kernkraft	5
3 Kernspaltung	7
4 Kernfusion	12
5 Strahlung	15
5.1 Alpha-Strahlung	15
5.2 Beta-Strahlung	17
5.3 Gamma-Strahlung	18

Einleitung

Die besondere Bedeutung der **Kernphysik** ist durch die Größenordnungen von typischen Energieumsätzen im Atomkern begründet: Sie liegt zwischen 10^4 und 10^8 eV (im Vergleich zu etwa 10^1 eV in der Atomhülle). Dabei entstehen einerseits ionisierende Strahlungen hoher Wirksamkeit, andererseits Spaltungs- und Fusionsreaktionen mit außerordentlich großer Energiefreisetzung. Diese Kernprozesse finden wichtige Anwendungen in der modernen, energiehungrigen Welt, erfordern aber auch ganz besondere Vorsichtsmaßnahmen.

1 Kernmodelle

1.1 Einstieg

Ein Atomkern an sich besteht aus Protonen und Neutronen. Protonen sind positiv geladene Teilchen, welche genauso wie die elektrisch neutralen Neutronen, wiederum aus kleinen Teilchen bestehen, den Quarks. Es gibt 6 verschiedene Quarks: Up(u), Down(d), Strange(s), Charm(c), Bottom(b), Top(t). Ein Neutron besteht aus einem Up- und zwei Down-Quarks (u|d|d), ein Proton aus zwei Up- und einem Down-Quark (u|u|d). Die Ladung der Nukleonen entsteht durch die Einzelladungen der Quarks. Ein Up-Quark hat beispielsweise die Ladung $+\frac{2}{3}$, ein Down-Quark die Ladung $-\frac{1}{3}$. Jetzt lassen sich die Ladungen der Atomkernbausteine leicht erklären:

$$Neutron = Up + Down + Down = \left(+\frac{2}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) = 0 \Rightarrow \textit{neutral}$$

$$Proton = Up + Up + Down = \left(+\frac{2}{3}\right) + \left(+\frac{2}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) = 1 \Rightarrow \textit{positiv}$$

Das Ordnungsschema für Atomkerne ist sehr übersichtlich: Die Anzahl der Protonen Z gibt zusammen mit der Neutronenanzahl N die Nukleonenanzahl A an. A wird manchmal

auch als **Massenzahl** oder gerundete relative Atommasse bezeichnet, weil die Massen von Neutronen und Protonen nahezu identisch sind.

Nukleonenzahl:

$$A = Z + N$$

Da Z beim neutralen Atom der Anzahl der Hüllenelektronen entspricht, ist dies gleichzeitig die Ordnungszahl. Bei einer Atomkernart — einem Nuklid — kann N allerdings variieren, sodass **isotope Nuklide** entstehen. Diese werden **Isotope** genannt. Zur vollständigen Bezeichnung eines Nuklids muss also das chemische Symbol des entsprechenden Elements mit A und Z versehen werden:

Nuklid-Bezeichnung:



Der Atomkern ist kein massives Teilchen, sondern muss dualistisch bzw. quantenmechanisch betrachtet werden. Dennoch kann man aus Wechselwirkungsexperimenten mit geladenen Teilchen (Streuexperiment von RUTHERFORD) auf eine Kugelsymmetrie schließen und sogar ein Kugelvolumen angeben, das zur Nukleonenzahl direkt proportional ist. Für den Kernradius gilt die empirische Beziehung:

Atomkern-Radius:

$$r_K = r_0 \cdot \sqrt[3]{A}$$

mit $r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15} m$. Daraus folgt auch, dass alle Atomkerne nahezu die gleiche Dichte haben.

Nach wie vor hat sich in der Physik kein einheitliches Modell zur Beschreibung des Atomkerns durchgesetzt. Im Vergleich zu der Atomphysik, die sehr gut durch das quantenmechanische Atommodell bedient wird, nimmt man zur Beschreibung verschiedener

Vorgänge im Atomkern auch verschiedene Modelle. Hinzu kommt, dass die Kräfte, die im Atomkern eine Rolle spielen weitaus komplizierter sind als die rein elektromagnetische Wechselwirkung im Atom. In den folgenden Abschnitten führe ich die wichtigsten Kernmodelle an.

1.2 Tröpfchenmodell

Der Name Tröpfchenmodell rührt daher, dass man den Atomkern wie einen Wassertropfen beschreibt. Die Grundidee stammt von George Gamow, jedoch stellte Carl Friedrich von Weizsäcker 1935 seine darauf beruhende Massenformel für Atomkerne vor, die mit den beobachteten Massen gut übereinstimmten. Lise Meitner und Otto Frisch nutzten das Tröpfchenmodell 1939 zur ersten Erklärung der Kernspaltung und der dabei frei werdenden Kernenergie. Das Tröpfchenmodell beschreibt in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Werten die Bindungsenergien der Kerne. Die Grundannahme dabei ist, dass es zwischen den Bestandteilen eines Kerns (Nukleonen, also Protonen und Neutronen) starke anziehende Kernkräfte gibt, die aber eine so kurze Reichweite haben, dass sie nur auf jeweils direkt benachbarte Nukleonen wirken. Daraus ergibt sich, dass die Massendichte in allen Atomkernen weitgehend gleich ist und dass der Kern zwar verformt werden kann, dabei aber sein Volumen beibehält, ähnlich wie beim aus Wassermolekülen gebildeten Wassertropfen. Die elektrische Abstoßung der Protonen untereinander, die Coulombkraft, ist selbst bei benachbarten Protonen schwächer als die anziehende Kernkraft, hat aber eine lange Reichweite und erfasst daher von einem Proton aus alle anderen Protonen eines Kerns. Das macht die Kerne zunehmend weniger stabil, je mehr Protonen sie enthalten. Als Folge kommen dadurch u. a. Kerne mit mehr als 92 Protonen auf der Erde nicht natürlich vor, und daher auch nicht mehr als 92 verschiedene chemische Elemente.

1.3 Schalenmodell

Während das Tröpfchenmodell den Atomkern mit einem Wassertropfen vergleicht, dessen Verhalten im Wesentlichen mit der klassischen Mechanik beschrieben werden kann,

betrachtet das Schalenmodell die einzelnen Nukleonen und ihre Bewegung in einem Potentialfeld nach den Regeln der Quantenmechanik, ähnlich wie das Schalenmodell für Elektronen in der Atomhülle. Proton und Neutron haben wie das Elektron die Spinquantenzahl $1/2$. Jedoch gibt es wichtige Unterschiede zur Atomhülle:

- Der Atomkern besteht aus zwei verschiedenen Teilchenarten, den Neutronen und Protonen.
- Es gibt kein gemeinsames Kraftzentrum des Potentials, sondern das Feld, das auf ein einzelnes Teilchen wirkt, wird von den übrigen Teilchen erzeugt.
- Zwischen den Nukleonen wirken die sogenannten starken und schwachen Wechselwirkungen, welche um einiges stärker sind als die elektromagnetische Kraft. Trotzdem spielt sie eine wesentlichen Rolle im Atomkern.

Ein weiteres Phänomen, welches durch das Schalenmodell beschrieben werden kann, ist jenes der **magischen Zahlen**. Hierbei ist bei 2, 8, 20, 28, 50, 82 und 126 ein besonders stabiler Atomkern voraussagbar. Die Anzahl gilt für Protonen, sowie für Neutronen, das heißt ein Kern mit beispielsweise 8 Protonen (Sauerstoff) hat einen besonders stabilen Kern. Ebenso kann ein ^{40}CA Isotop mit 20 Protonen, sowie 20 Neutronen als besonders stabil bezeichnet werden. Wenn Protonen UND Neutronen einer magischen Zahl entsprechen, nennt man das doppelt magisch.

2 Kernkraft

Eine der 4 Fundamentalen Wechselwirkungen/Grundkräfte ist die **starke Kernkraft**. Sie ist etwa 100 mal so stark wie die elektromagnetische Kraft hat jedoch nur eine Wirkungsreichweite von 10^{-15} m . Sie spielt eine große Rolle im Atomkern. Sie ist überhaupt erst dafür verantwortlich, dass in erster Linie die einzelnen Quarks verbunden werden und in zweiter Linie, die dabei entstehenden Nukleonen einen Atomkern bilden können. Um einem Atomkern ein Proton hinzuzufügen, muss zuerst die elektrostatische Abstoßung zwischen dem neuen Proton und den Protonen im Kern überwunden werden (Coulombkraft),

d.h. die Energiepotentialkurve steigt. Hat man jedoch eine Entfernung von 10^{-15} m erreicht, übernimmt die starke Kernkraft und bindet das Proton an ein benachbartes Nukleon — die Energiepotentialkurve fällt in den Potenzialtopf. Das selbe gilt generell beim "Zusammenbauen" von Atomkernen. **Immer wenn man Nukleonen zusammenführt wird dabei Energie frei.** Nach $\Delta E = \Delta mc^2$ hatte diese eine Masse und macht damit insgesamt den Atomkern etwas leichter. Die Bindung von Nukleonen bedeutet also einen Massenverlust — der sogenannte **Massendefekt**. Darauf kommen wir später noch zurück.

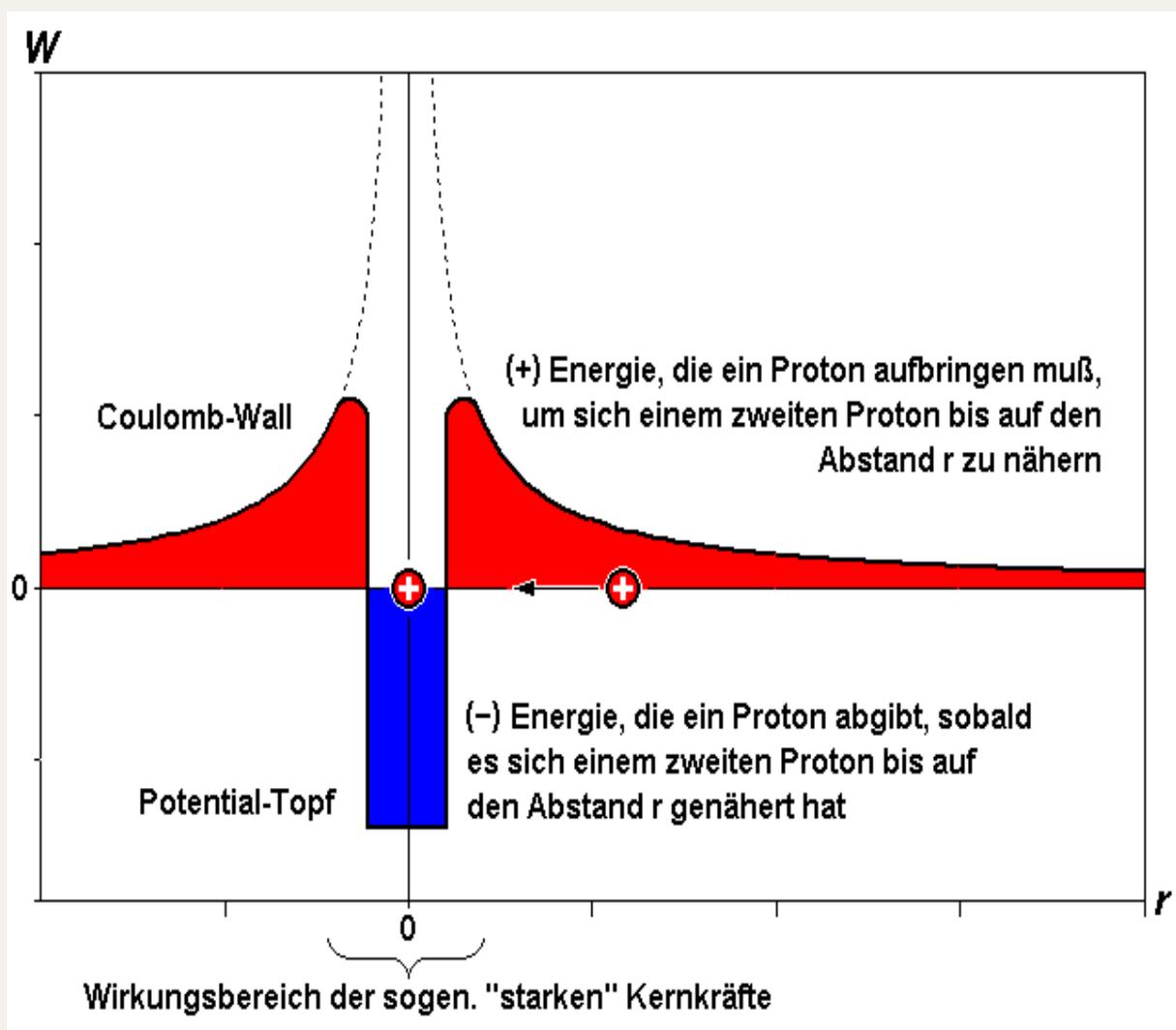


Abb 1: Energiepotential eines Protons beim hinzufügen in den Atomkern

Ein weiterer wichtiger Begriff ist die **Bindungsenergie**. In der Kernphysik ist die Bindungsenergie die Energiemenge, die aufgewandt werden muss, um den Atomkern in seine

Nukleonen zu zerlegen. Umgekehrt wird eine ebenso große Energie frei, wenn sich Nukleonen zu einem Kern vereinigen.

Das Austauschteilchen der starken Wechselwirkung wird Gluon genannt. Die von den Gluonen vermittelte Anziehung zwischen den Quarks, und daraus folgend zwischen Protonen und Neutronen, ist für die Stabilität der Atomkerne verantwortlich. (Zusammenhalt der Protonen und Neutronen im Atomkern; gerade die Protonen würden sich ansonsten aufgrund ihrer gleichen elektrischen Ladung abstoßen).

Die Quantenchromodynamik (QCD) ist die heute akzeptierte Theorie zur Beschreibung der starken Wechselwirkung. In ihr vermitteln Gluonen-Kräfte zwischen Teilchen, die eine Farbladung tragen. Wenn zwischen zwei Quarks ein Gluon ausgetauscht wird, ändert sich die Farbladung der beteiligten Quarks. Das Gluon trägt dazu jeweils eine Antifarbladung zur Kompensation der ursprünglichen Farbladung des Quarks sowie die neue Farbladung des Quarks. Da das Gluon selbst auch eine Farbladung trägt, kann es mit anderen Gluonen wechselwirken. Diese so genannte Selbstwechselwirkung, das heißt die Wechselwirkung der die Wechselwirkung vermittelnden Teilchen miteinander, macht die mathematische Analyse der starken Wechselwirkung sehr kompliziert.

3 Kernspaltung

Aus der Kernphysik, kann man mithilfe verschiedenster Methoden Energie gewinnen. Die geläufigste Variante ist die bekannte **Kernspaltung**. Hierbei wird ein besonders schwerer (viele Nukleonen) Kern zum Zerfall gebracht und durch den Massendefekt wird Energie frei. Wie genau das vor sich geht erkläre ich gleich.

Vorerst möchte ich noch kurz auf den zuvor angesprochenen **Massendefekt** eingehen: Bei den exakten Massebestimmungen von Atomkernen und ihren Bausteinen stellt man fest, dass die Kernmasse stets kleiner als die Summe der Nukleonenmassen ist. Dieser Massendefekt (nicht etwa im Sinne von Schaden, sondern im ursprünglichen Wortsinn von Mangel und Fehlen) entsteht durch die Bindungsenergie der Nukleonen. Beide Größen sind verknüpft durch die EINSTEINSche Masse-Energie-Äquivalenz $E = mc^2$.

Der experimentelle Nachweis dieser Äquivalenz ist sicher die dramatischste und folgenreichste Anwendung der Kernphysik.

Die Bindungsenergie kann als Maß für die Stabilität eines Kerns interpretiert werden. Wenn man sie als **mittlere Bindungsenergie pro Nukleon** über der Massenzahl A für die natürlich vorkommenden Nuklide aufträgt, erhält man eine wichtige Kurve, die weiter unten abgebildet ist. Offenbar ist die Stabilität großer Kerne wie des Urankerns etwas geringer als die der Kerne von Eisen, Nickel usw. $A \approx 40$ bis $A \approx 80$. Auch der He-4-Kern hat eine höhere Bindungsenergie pro Nukleon als seine direkten Nachbarn und ist darum besonders stabil. Aus diesem Grund kann er sogar als kompaktes "α-Teilchen" radioaktive Nuklide verlassen. Der am stärksten gebundene Kern ist der eines Eisenaatoms. Elemente mit geringerer Ordnungszahl können ausschließlich durch Kernfusion als Energiebringer genutzt werden, Elemente mit höherer Ordnungszahl ausschließlich durch Kernspaltung.

Außerdem kann man an der Kurve den Gewinn an (und das bedeutet die Abgabe von) Bindungsenergie entnehmen, der bei der Spaltung eines großen Kerns oder der Verschmelzung zweier kleiner entsteht. Beide Möglichkeiten werden in kontrollierten Kernprozessen technisch (bzw. in lawinenartig ablaufenden Kernreaktionen militärisch) genutzt.

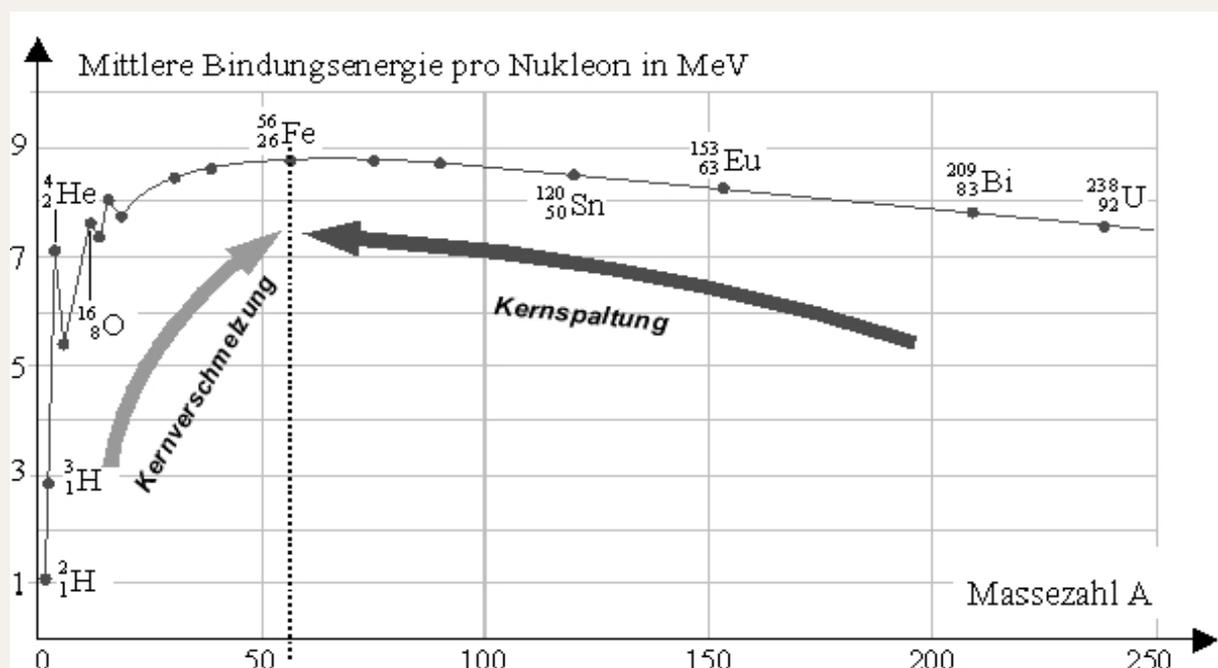


Abb 2: Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon

Bei Uran, dem wichtigsten Element für die Anwendung in der Energiegewinnung, beträgt die Bindungsenergie pro Nukleon $7,6 \text{ MeV}$. Typische Spaltfragmente haben eine Nukleonenzahl im Bereich von 100. Deren mittlere Bindungsenergie beträgt nun ca. $8,5 \text{ MeV}$. Die neu gebildeten kleineren Kerne besitzen in der Summe eine geringere Masse, und das Energieäquivalent dieses Massendefekts wird gemäß der EINSTEINSchen Gleichung in unterschiedlichen Energieformen abgegeben.

Für die Anschauliche Beschreibung der Spaltreaktion eignet sich das **Tröpfchenmodell**. Der Atomkern wird zunächst durch den Einfang eines Neutrons in einen angeregten Zustand versetzt, und für 10^{-12} s entsteht ein **Compoundkern**.

Ein Compoundkern oder Zwischenkern ist ein instabiler, kurzlebiger Atomkern. Er entsteht durch vollständige Vereinigung des eingefangenen Teilchens (zum Beispiel: Neutron, Proton, α -Teilchen) mit dem betroffenen Kern (Targetkern). Durch den Gewinn an Bindungsenergie befindet er sich in einem angeregten Zustand hoher Energie und kann einen hohen Gesamtdrehimpuls haben. Nach seiner Lebensdauer von etwa 10^{-12} s zerfällt er dann in zwei oder mehr Kerne oder Teilchen, oder es bleibt beim Einfang des Projektileilchens und die Bindungsenergie wird als Gammaquant abgestrahlt. Der Zerfall ist nicht davon abhängig, auf welchem Wege der Zwischenkern entstanden ist. Beispielsweise sind, wenn es mehrere Zerfallskanäle gibt, deren Häufigkeitsanteile (Verzweigungsverhältnisse) stets gleich. Dies konnte experimentell an Fällen bestätigt werden, wo gleiche Zwischenkerne auf verschiedenen Reaktionswegen erzeugt wurden. Anschaulich gesagt hat der Zwischenkern bei seinem Zerfall abgesehen von Erhaltungsgrößen wie Energie, Drehimpuls und Parität schon vergessen, wie er entstanden ist.

Wenn nun der entstandene Compoundkern durch die höhere Nukleonenergie — die man sich in diesem Modell wie eine thermische Energie vorstellen kann — eine gestreckte Form annimmt, kann die COULOMB-Kraft zwischen den Protonen die kurzreichweitige Kernkraft übertreffen und den Kern zerreißen. Für das wichtige Nuklid Uran-235 lautet eine typische Reaktionsgleichung (es gibt über 80 mögliche Spaltfragmente):

Typische Uranspaltungsreaktion:



Alternativ zur Gammastrahlung kann auch ein drittes Neutron (mit Krypton-92) entstehen. Im Mittel sind es 2,5 Neutronen. Die freigesetzte Energie beträgt:

$$E_{U-236} = 236 \cdot (8,5 - 7,6)\text{MeV} \approx 212\text{MeV}$$

Die Energieabgabe eines Nuklids bei der Kernspaltung ist also sehr hoch im Vergleich zu chemischen Reaktionen in der Atomhülle, auch den explosiven. Dennoch wäre der Gesamtertrag gering, wenn einzelne Kerne durch individuellen Neutronenbeschuss angeregt werden müssten. Die jeweils frei werdenden Neutronen kann man jedoch zu einer Kettenreaktion nutzen. Dazu muss ihre Geschwindigkeit durch einen **Moderator** so weit reduziert werden — in den Bereich thermischer Energie —, dass die Wahrscheinlichkeit zum Einfang durch den nächsten Kern ausreichend groß ist.

Nach den Stoßgesetzen ist die Impuls- bzw. Energieübertragung auf einen anderen Körper am effektivsten, wenn die Massen annähernd gleich sind (zum Abbremsen der Neutronen). Das ist am besten für die Protonen des Wasserstoffatoms erfüllt, allerdings fangen die H-Kerne einen Teil der Neutronen ein und bilden das Deuterium-Isotop. Wird also einfach Wasser (H_2O) zur Abbremsung verwendet, müssen die spaltbaren Kerne in relativ hoher Konzentration vorliegen. Darum ist beim natürlichen Uran-Isotopengemisch die Anreicherung von U-235 im Verhältnis zu U-238 notwendig)

Ein gut geeigneter Moderator ist das Deuterium-Nuklid. Es liegt im "schweren Wasser" D_2O vor, das aber aufwendig aus leichtem Wasser angereichert werden muss. Ebenfalls brauchbar und in der Wirkung einfach zu dosieren sind C-12-Atome in Form von Grafit. Ein technisches Problem im Kernreaktor von Tschernobyl verursachte den GAU, da etwas mit der Regulierung der Grafitstäbe nicht stimmte.

Eine weitere Bedingung für die Kettenreaktion ist eine ausreichende Zahl von Neutronen. Insbesondere dürfen nicht mehr Neutronen das spaltbare Material verlassen, als durch die Reaktion ersetzt werden. Das bedingt eine minimale Materialmenge, die als **kritische Masse** bezeichnet wird. Durch den **Vermehrungsfaktor** k lassen sich der Verlauf und damit auch die Anwendung der Kettenreaktion charakterisieren:

- $k \approx 1$ bedeutet **Reaktorbetrieb**. Der Vermehrungsfaktor kann z.B. durch Neutronenabsorber aus Kadmium ("Kontrollstäbe") gesteuert werden. Vor allem die kinetische Energie der Spaltprodukte wird als Wärme genutzt und meistens in Verdampfungsenthalpie, dann in mechanische Arbeit (Dampfturbine) und schließlich in elektrische Energie umgewandelt.
- $k > 1$ bewirkt eine exponentielle Zunahme der Kettenreaktion und stellt das Prinzip der "konventionellen Atombombe" dar. Für deren Zündung wird das Verhältnis von Oberfläche und Volumen verringert, zum Beispiel, indem zwei unterkritische Massen mittels Sprengstoff vereinigt werden.

Die ca. 10^9 -fache Energiedichte von Kernbrennstoffen gegenüber fossilen Brennstoffen ist nur ein Aspekt ihrer technischen Nutzung, der CO_2 -neutrale Betrieb ein weiterer. Andererseits ist der dabei entstehende Abfall in Gestalt der Spaltfragmente stark radioaktiv, und der Reaktor-Ofen wird es beim Betrieb ebenfalls. Daraus resultiert das Problem der Endlagerung dieser Materialien. Reaktoren, bei denen der Vermehrungsfaktor k mit steigender Temperatur sinkt und die somit einen GAU (**G**rößten **A**nzunehmenden **U**nfall) im Extremfall verhindern würden, sind noch in der Entwicklung.

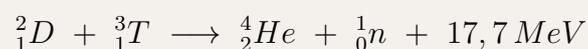
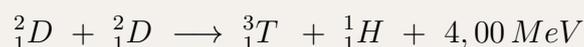
4 Kernfusion

Eine alternative Möglichkeit zur Nutzung der Nukleonen-Bindungsenergie mittels Massendefektes ist die Verschmelzung kleiner Atomkerne zu gemeinsamen größeren. Nach Abbildung 2 ist vor allem die Synthese von Helium-4 aus den Wasserstoff-Isotopen energetisch lohnend.

Physikalisch ist das Kernproblem, im wahrsten Sinn des Wortes, die COULOMB-Barriere mittels des Tunneffektes zu überwinden, um die Nuklide in den Wirkungsbereich der starken Wechselwirkung zu bringen. Da ein „Einzelbeschuss“ der Kerne nicht effizient ist, kann die erforderliche kinetische Energie praktisch nur durch extrem hohe Gastemperaturen erreicht werden. Temperaturen in der Höhe von $10^8 K$ sind erforderlich um den Prozess in Gang zu bringen. Materielle Gefäße sind also für solche Gase unbrauchbar, da sie nicht standhalten würden. Bei diesen hohen Temperaturen liegt das Gas aber im elektrisch leitenden (weil vollständig ionisierten) Plasma-Zustand vor, was einen magnetischen Einschluss ermöglicht.

Die technisch nutzbaren (und zum Teil gleichzeitig ablaufenden) Fusionsreaktionen sind:

Fusionsreaktionen:



Die Kernfusion ist grundsätzlich attraktiv, da Deuterium im Wasser (z.B. der Weltmeere) mit einem Anteil von 0,015% praktisch unbegrenzt enthalten ist. Außerdem setzt die Gesamtreaktion sogar noch erheblich mehr Energie pro Nukleon frei als die Kernspaltung. Das Edelgas Helium als Abfall ist dabei völlig unproblematisch, allerdings zerfällt Tritium als β -Strahler mit $T_{1/2} = 12,3 a$, und durch den Neutronenbeschuss werden die Reaktorwände ebenfalls schwach radioaktiv.

Die zentrale Problematik der Kernfusion hat J.D. LAWSON bereits in den 1950er-Jahren in seinem **Kriterium** für das Produkt aus der Teilchendichte n und der Einschlusszeit t zusammengefasst. Etwas verallgemeinert lautet es für die wichtigsten Fusionsreaktionen:

LAWSON-Kriterium:

$$n \cdot t = 10^{20} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$$

Im Pulsbetrieb kann alleine durch den aus der LORENTZ-Kraft resultierende **Pinch**effekt eine Plasmakompression bis zu sehr hohen Teilchendichten erreicht werden. Für die Zündung eines **thermonuklearen Prozesses**, der sich anschließend selbst erhält, muss jedoch beispielsweise eine Teilchendichte von $\frac{10^{20}}{\text{m}^3}$ über mindestens eine Sekunde aufrecht erhalten werden — auch das gelingt mittlerweile zuverlässig. Allerdings ist für den Einsatz eines Fusionsreaktors in Kraftwerken außerdem die Nutzschwelle von Bedeutung, oberhalb der mindestens so viel Energie abgegeben wie zum Betrieb aufgewandt wird.

Die unkontrollierte Kernfusion ist bereits 1952 demonstriert worden und als Wasserstoffbombe bekannt. Zur Zündung wird eine Kernspaltungsreaktion verwendet, um sowohl die große Dichte als auch die hohen Temperaturen für den explosiv ablaufenden thermonuklearen Prozess zu erzielen. Bei der ersten Erprobung übertraf die Energieabgabe alle Erwartungen und zerstörte außer sämtlicher Aufbauten auch die zum Test ausgewählte Insel.

In mehreren Forschungseinrichtungen werden seit einem halben Jahrhundert große Anstrengungen unternommen, das LAWSON-Kriterium bei kontrollierten Fusionsreaktionen zu erfüllen. Die EU betreibt seit 1983 den JET (**J**oint **E**uropean **T**orus). Mittels externer Plasmaheizung kann die Fusion einige Sekunden aufrechterhalten werden. Obwohl zahllose technologische Probleme gelöst wurden, beträgt die Energieausbeute nur ca. 50%.

Zur Überwindung der Nutzschwelle konzipiert eine um die wichtigsten Industriestaaten der Welt erweiterte Forschungsgemeinschaft den ITER (**I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor). Er soll 2017 in Betrieb gehen und bis zur Mitte des Jahrhunderts Nettoenergie gewinnen. Einen Eindruck von der Größe und Komplexität der Anlage zum

magnetischen Einschluss der Deuterium- bzw. Tritium-Plasmen gibt Abbildung 3: Unterhalb des Torus, in der das magnetisch eingeschlossene Plasma entstehen soll, ist ein Mensch eingezeichnet.

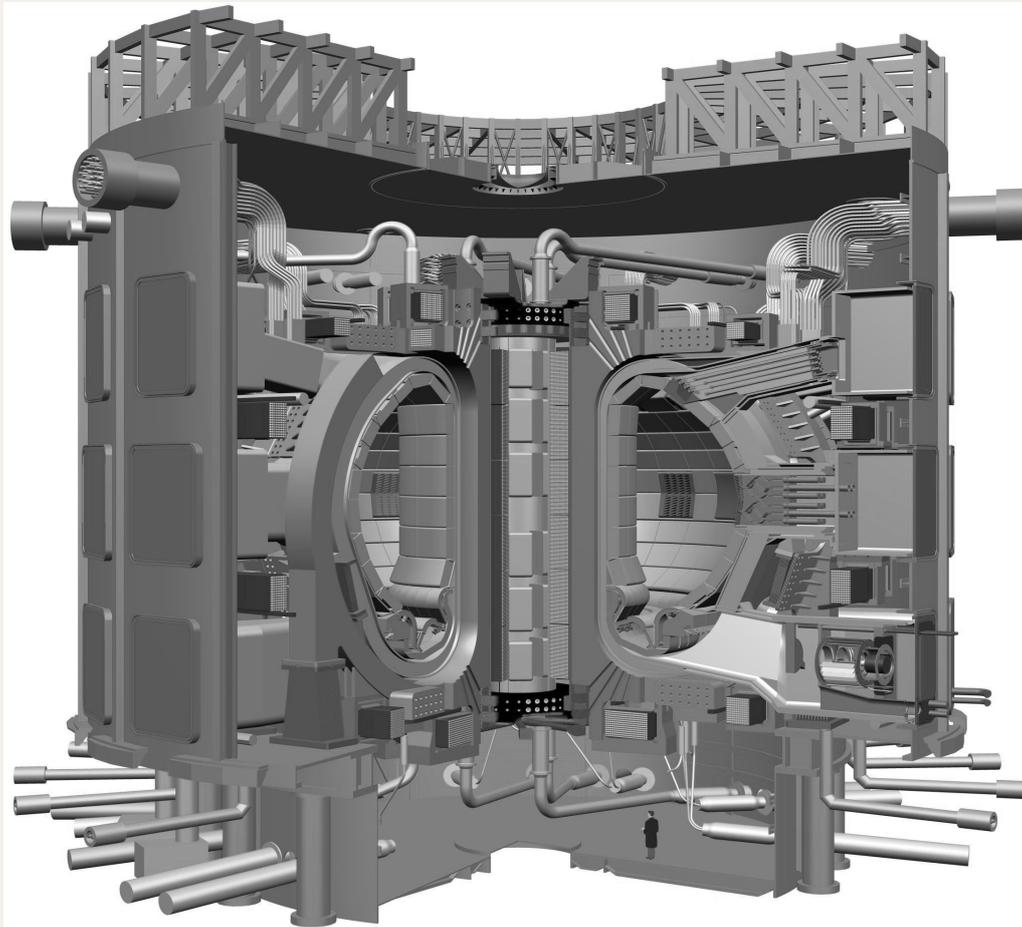
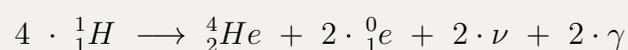


Abb 3: Fusionsreaktor ITER ; in der rechten unteren Ecke ist ein Mensch eingezeichnet

Die Vorbilder aller Fusionsexperimente sind die Sterne. Auch unsere Sonne produziert ihre Strahlungsleistung durch Kernfusion. Ihre Ausdehnung gestattet allerdings den Gravitationseinschluss des Plasmas, d.h. ihre Masse ist groß genug um das Plasma durch die Gravitation einzuschließen. Dabei kann vermutlich sogar in einem dreistufigen Prozess gewöhnlicher Wasserstoff-1 zu Helium-4 verschmolzen werden:

Kernfusion in der Sonne:



Um den Erhaltungssätzen nachzukommen, müssen je 2 Positronen, Neutrinos und Gammaquanten entstehen, die anschließend Sekundärprozesse durchlaufen. Bei jeder solchen Fusionsreaktion werden über 26 MeV frei. Diese "Sonnenenergie" hat sämtliche fossilen Energievorräte auf der Erde gebildet, von der Kohle bis zum Erdgas. Sie ist auch für alle regenerativen Energiequellen verantwortlich, vom Windkraftwerk bis zum Holzofen.

Mit einem technischen Kernfusionskraftwerk wäre die Energieversorgung auf der Erde elegant, sicher und dauerhaft gelöst. Die Größenordnung dieses Entwicklungsprojekts lässt sich mit der mitreißenden Frage umschreiben: *Kann der Mensch die Sonne nachbauen?*

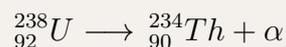
5 Strahlung

Ob ein bestimmtes Nuklid stabil ist, hängt vom Verhältnis der Neutronenzahl N zur Protonenzahl Z ab. Dieses Verhältnis nimmt mit steigender Nukleonenzahl A zu. Über 80% der etwa 1900 bekannten Nuklide, vor allem, neutronenreiche Isotope, zeigen radioaktiven Zerfall. Glücklicherweise sind jedoch über 80% der 320 natürlich vorkommenden Atomkerne stabil. Der eine Aspekt des Zerfallvorgangs ist eine Kernumwandlung, der andere die dabei entstehende radioaktive Strahlung. Man unterscheidet 3 Arten:

5.1 Alpha-Strahlung

α -Strahlung besteht aus ${}^4_2\text{He}$ -Kernen (" α -Teilchen"), die von massereichen Nukliden ($A > 200$) ausgeschleudert werden. Ein Beispiel ist die Umwandlung von Uran-238 zu Thorium-234 unter Abstrahlung eines He-Kerns:

Typischer α -Zerfall:



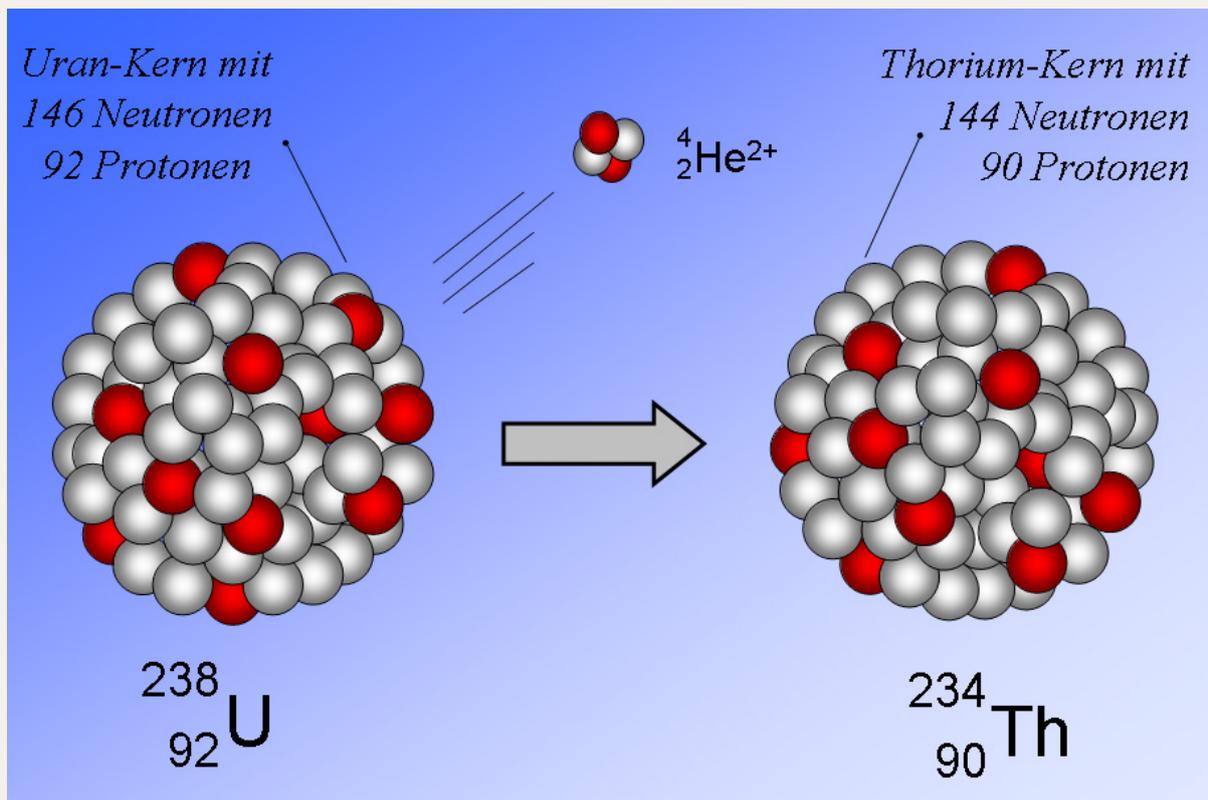


Abb 4: Beispiel zur Entstehung von α -Strahlung

Die kinetische Energie der α -Teilchen liegt zwischen 4 MeV und 9 MeV. Wegen ihrer Größe werden sie aber relativ leicht absorbiert: In Luft beträgt die Reichweite maximal 10 cm, und in festen Stoffen nur einige μm . Ein Blatt Papier würde zur Abschirmung ausreichen, jedoch sind α -Strahler besonders gefährlich wenn sie in den Körper gelangen, beispielsweise durch Verzehr radioaktiver Nahrung. Nach dem großen Reaktorunglück in Tschernobyl wurde ausdrücklich vor dem Verzehr von Pilzen und ähnlichem gewarnt, da sie teilweise durch die radioaktive Wolke gesundheitsgefährdend wurden.

α -Teilchen und der Tunneleffekt:

Man kann sich die Frage stellen, wie das α -Teilchen überhaupt der stark anziehenden Kernkraft entkommen und in den Bereich der abstoßenden COULOMB-Kraft gelangen kann. In Abbildung 5 ist der Potenzialverlauf skizziert, der aus der Superposition beider Kräfte resultiert. Nach der klassischen Physik gibt es für das Teilchen mit seiner kinetischen Energie kein Entrinnen aus dem Topf mit den hohen "Wändenpotenzieller Energie. Die Quantenmechanik betrachtet jedoch auch dieses Teilchen als Welle und gibt eine

bestimmte Wahrscheinlichkeit für das Durchtunneln der Potenzialbarriere an. Die Höhe und die Breite dieser Barriere bestimmen, wie schnell der radioaktive Zerfall des Kerns erfolgt.

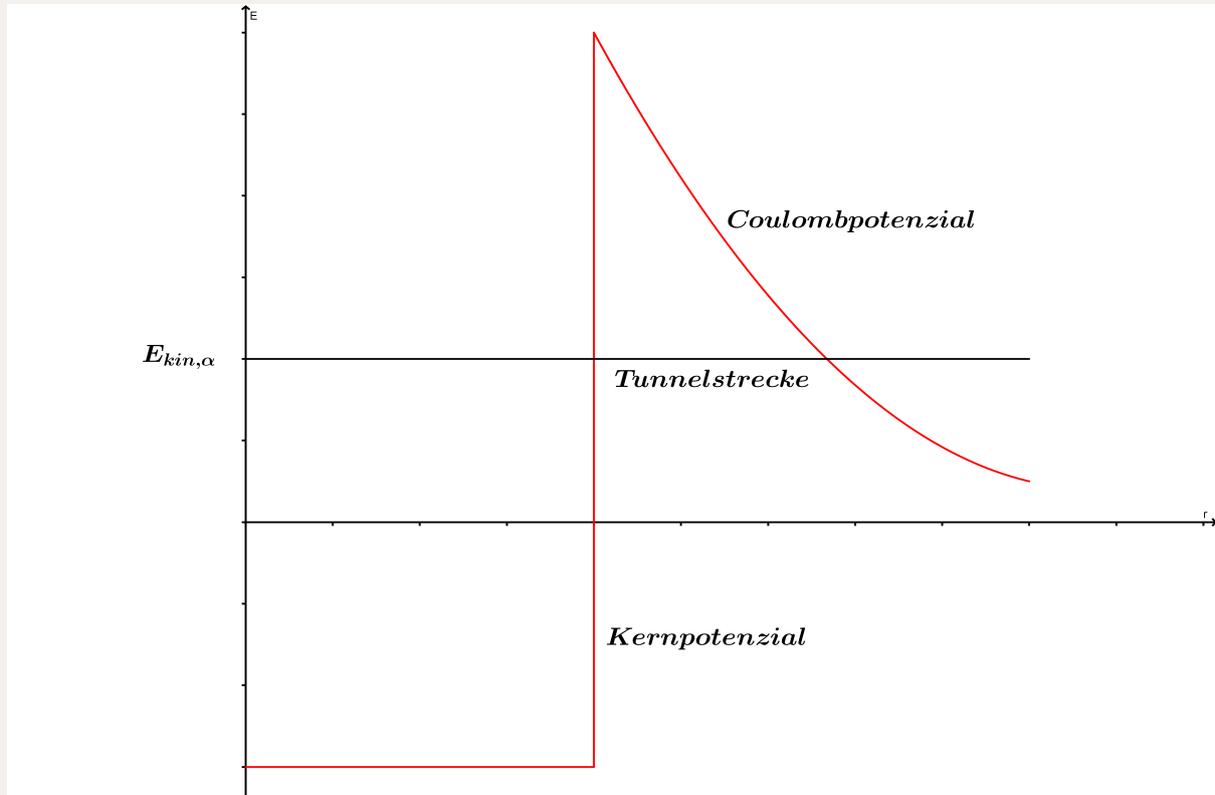
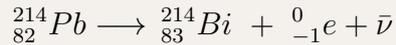


Abb 5: Tunneleffekt bei α -Teilchen

5.2 Beta-Strahlung

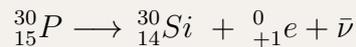
β -Strahlung entsteht durch die Umwandlung der beiden Nukleonenarten ineinander: Kerne mit Neutronenüberschuss können ein Elektron abgeben (β^- -Teilchen) und so ein Proton erzeugen, während ein Proton durch Abstrahlung eines Positrons — des Antiteilchens eines Elektrons — zum Neutron umgewandelt wird (β^+ -Zerfall). Zusätzlich wird jeweils ein elektrisch neutrales Teilchen ohne Ruhemasse, ein Antineutrino $\bar{\nu}$ bzw. Neutrino ν emittiert. Ein Beispiel für den β^- -Zerfall ist die Umwandlung des instabilen Blei-214 zum (ebenfalls instabilen) Wismut-214:

Typischer β^- -Zerfall:



Den β^+ -Zerfall beobachtet man unter anderem beim radioaktiven Zerfall von Phosphor-30, wobei das stabile Isotop Silizium-30 entsteht:

Typischer β^+ -Zerfall:



Da die Neutrinos einen variablen Anteil der Zerfallsenergie aufnehmen, haben die β -Teilchen ein kontinuierliches Spektrum kinetischer Energie, das bis etwa 2 MeV reicht. In Luft beträgt die Reichweite einige Meter. Sie können aber zum Beispiel durch Aluminiumblech von einigen Millimetern Dicke vollständig abgeschirmt werden.

5.3 Gamma-Strahlung

γ -Strahlung besteht aus den Photonen, die ein angeregter Kern nach dem α - oder β -Zerfall beim Übergang in einen niedrigeren Energiezustand emittiert. Ihre hohe Energie (bis zu 2,5 MeV) unterstreicht den Quantencharakter. Da es sich aber gleichzeitig um elektromagnetische Wellen handelt, ist eine Schwächung nach dem Absorptionsgesetz plausibel. Allerdings ist dies eine rein statistische Aussage, da viele Einzelprozesse wie Paarbildung und COMPTON-Streuung zusammen wirken. Um zum Beispiel die Intensität eines Linienstrahlers der Energie 1 MeV auf 1/10 (also die Anzahl der Photonen auf 10%) zu verringern, ist eine Bleiwand von 4,5 cm Dicke erforderlich.

Die künstliche Erzeugung von γ -Strahlen findet ihre Anwendung beispielsweise in der Medizin — die sogenannte Strahlenbehandlung. Hierbei versucht man gezielt das bösartige Gewebe mit Gammastrahlung zu bestrahlen und somit abzutöten. Diese Art der Therapie nützt die höhere Strahlenempfindlichkeit von Tumoren zu ihrem Vorteil.