

Kapitel 3: Kernenergie

3.1 Kernspaltung

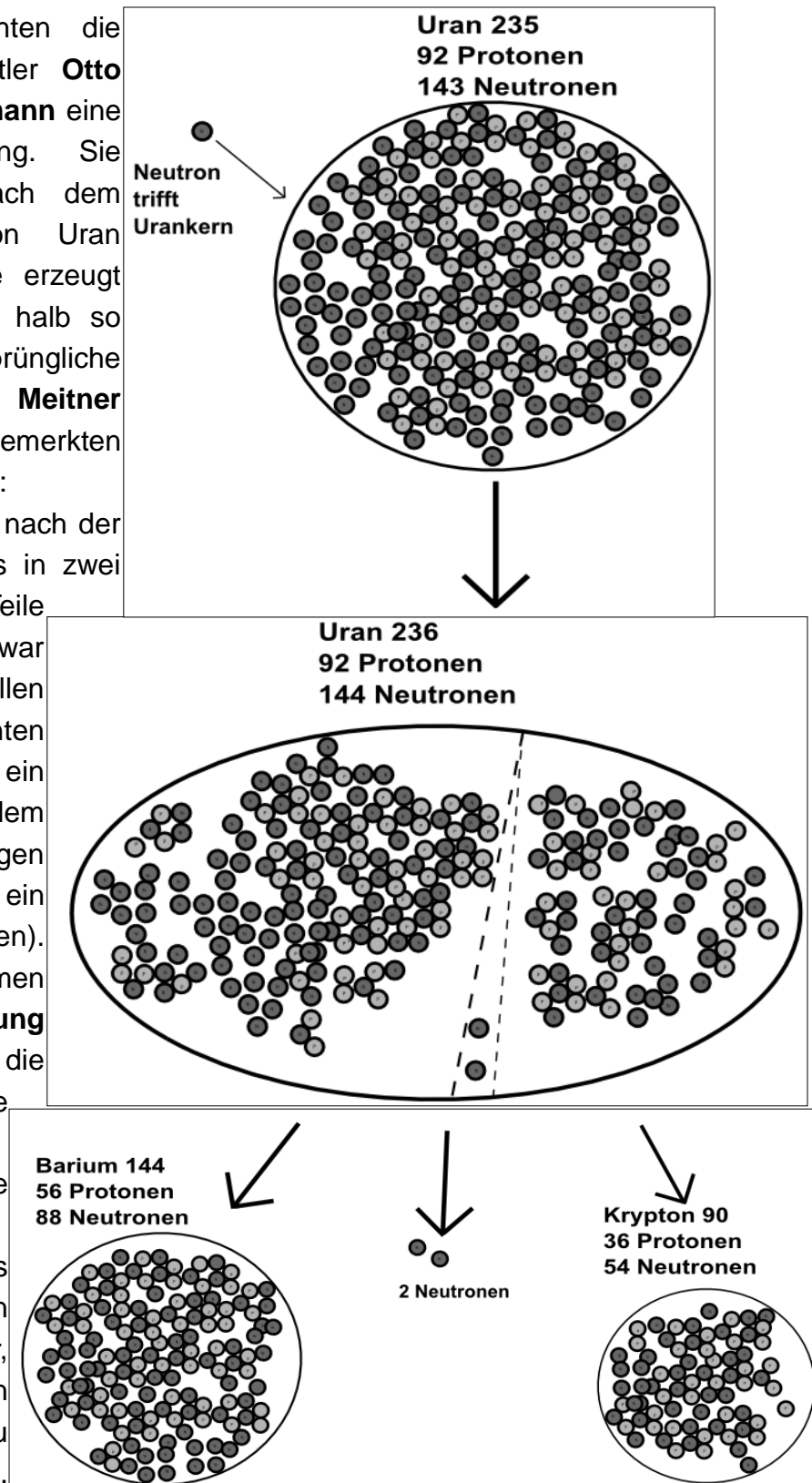
Im Jahre 1938 machten die deutschen Wissenschaftler **Otto Hahn** und **Fritz Strassmann** eine erstaunliche Entdeckung. Sie stellten fest, dass nach dem Neutronenbeschuss von Uran mitunter kleinere Kerne erzeugt wurden, die annähernd halb so groß wie der ursprüngliche Urankern waren. **Lise Meitner** und **Otto Frisch** bemerkten schnell, was passiert war:

Der Urankern hatte sich nach der Aufnahme des Neutrons in zwei nahezu gleich große Teile gespalten. Dies war überraschend, weil bei allen bis dahin bekannten Kernreaktionen nur ein winziges Fragment aus dem Kern herausgeschlagen wurde (wie ein Neutron, ein Proton oder Alpha-Teilchen). Dieses neue Phänomen wurde als **Kernspaltung** bezeichnet, weil es an die biologische Spaltung (die Zellteilung) erinnert.

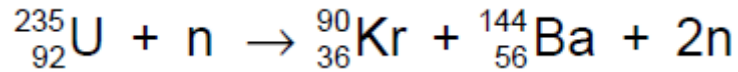
Man kann sich die Spaltung so vorstellen:

Durch das Auftreffen des Neutrons auf den Atomkern fängt dieser, mit all seinen Neutronen und Protonen heftig an zu schwingen. Das führt, dass der Kern eine

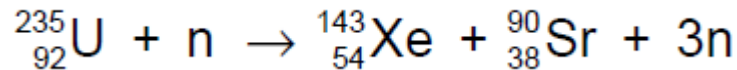
abnormal gestreckte Form annimmt (*so wie ein Wassertropfen*). Wenn sich der Kern weiter in die dargestellte Form streckt, wird die Anziehung der beiden Enden aufgrund der kurzreichweitigen Kernkraft wegen des zunehmenden Abstands schwächer und die



elektrische abstoßende Kraft, die die Protonen der linken Seite auf die Protonen der rechten Seite ausüben (und umgekehrt), dominiert. Folglich teilt sich der Kern. Die beiden entstandenen Kerne heißen Spaltfragmente, wobei während des Prozesses auch einige Neutronen (typischerweise zwei oder drei) abgegeben werden. Die Reaktion (so wie sie abgebildet ist) kann insgesamt als



geschrieben werden. Es können auch andere Spaltfragmente bei der Spaltung von Uran entstehen z.B. Xenon und Strontium:



Bei einer Spaltreaktion wird eine gewaltige Energiemenge freigesetzt. Wie kann es dazu kommen? Der Atomkern wird doch lediglich gespalten.

Wie bereits im Kapitel über das Periodensystem geschrieben, hat man die einzelnen Elemente der Masse nach sortiert.

Man fand heraus, dass zum Beispiel ein Sauerstoffatom das Gewicht 16 u und ein Kohlenstoffatom das Gewicht 12 u hatte. Man wusste, dass Sauerstoffatome aus 8 Protonen und 8 Neutronen und Kohlenstoffatome aus 6 Protonen und 6 Neutronen bestand und das Protonen und Neutronen dieselbe Masse haben. Wasserstoffatome besitzen ein Proton. Das bedeutet für die Wissenschaftler der Zeit, dass also Wasserstoffatome 1/12 der Masse von Kohlenstoffatome haben müssten. Um dieses zu überprüfen, hat man ein Wasserstoffatom gewogen. Das erwartete Gewicht von 1 u konnte jedoch nicht gemessen werden, sondern der Wert 1,008 u. Die Wissenschaftler dieser Zeit wunderten sich. Wenn ein Kohlenstoffatom aus 12 Wasserstoffatomen zusammengesetzt war, wie konnte 1,0008 u mal 12 die Masse 12 u ergeben? Wo ist der Rest der Masse geblieben?

Die Verbindung von Protonen (und Neutronen) zu einem Atomkern, muss also Auswirkung auf die Gesamtmasse des zusammengesetzten Atomkerns haben.

Dieses Phänomen kann man mithilfe einer der berühmtesten Gleichungen von Albert Einstein erklären:

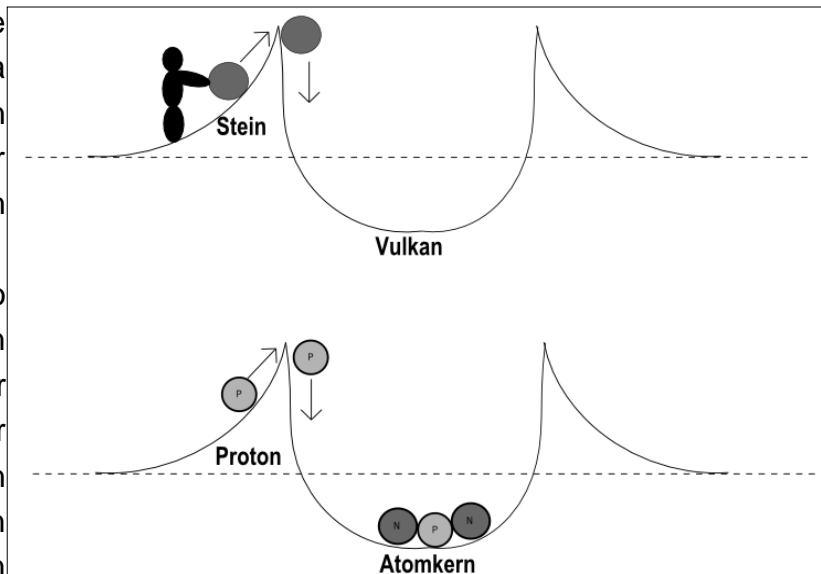
$$E = m \cdot c^2.$$

Diese Gleichung besagt, **Energie ist dasselbe wie Masse.**

Diese Erkenntnis gewinnt man, wenn man versucht einen Körper (z.B. ein Proton) in einem Ringbeschleuniger (z.B. in CERN) zu beschleunigen. Zunächst ist es einfach, das Proton auf eine bestimmte Geschwindigkeit hin zu beschleunigen. Nähert man sich jedoch der Lichtgeschwindigkeit, wird es nahezu unmöglich (auch mit riesigen Energien) das Proton weiter zu beschleunigen. Die Energie, die bei einer solch hoher Geschwindigkeit dem Proton weiterhin zugeführt wird, führt dazu, dass die Masse des Protons steigt. Hier wird die Gleichheit zwischen Masse und Energie deutlich.

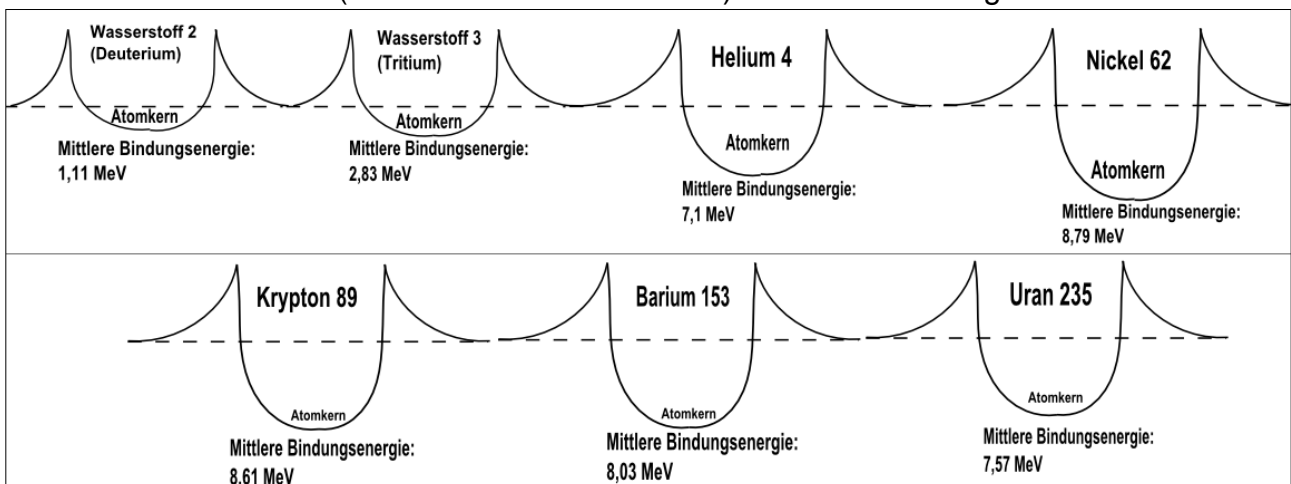
Versuchen wir nun selber mal einen Heliumkern herzustellen. Wir haben zwei Protonen und zwei Neutronen. Die 2 Neutronen sind noch relativ einfach mit einem der beiden Protonen zu verbinden, da zwischen ihnen keine abstoßenden elektrischen Kräfte herrschen. Nun wird es aber schwer, das zweite Proton den 3 anderen Teilchen anzunähern, geschweige diese miteinander zu verbinden, da sich die beiden Protonen gegenseitig abstoßen und zwar immer mehr, je näher sie sich kommen.

Man kann sich das so vorstellen, als würde man einen Stein einen Vulkankrater hinaufrollen, der immer steiler wird. Erst wenn man ganz oben angekommen ist, kann man den Stein ganz einfach fallen lassen.



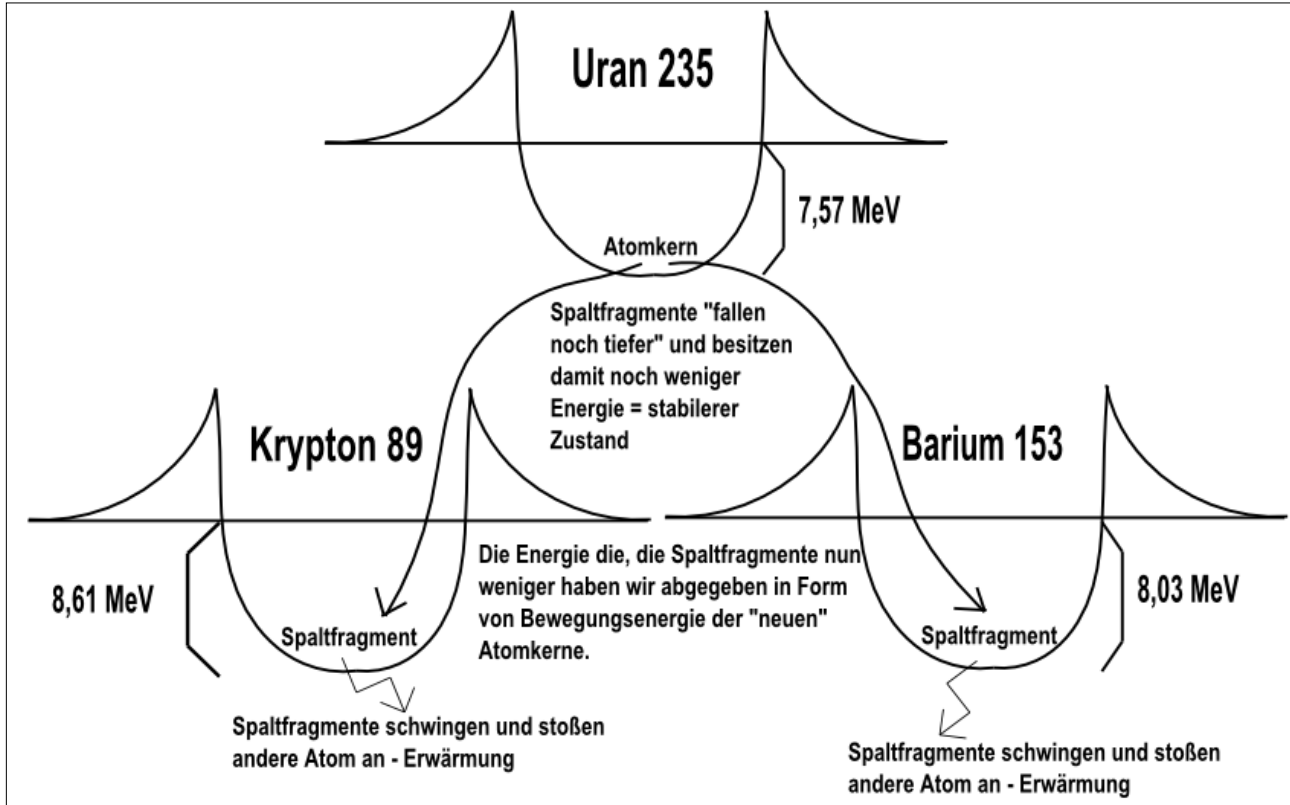
So ähnlich ist das bei der Annäherung zweier Protonen. Erst wenn sie sich fast berühren, ist die anziehende starke Kernkraft größer als die abstoßende elektrische Kraft und man kann die Protonen einfach loslassen, ohne dass sie auseinander fliegen. Würde man das Proton bei einer größeren Entfernung bereits loslassen, dann würde dieses aufgrund der abstoßenden Kräfte davon fliegen (oder um in unserem Bild zu bleiben wieder den Vulkan herunter rollen). Dadurch, dass man die Protonen also nun soweit zusammengeführt hat, dass die starke Kernkraft diese zusammenhält, entzieht man dem Proton, das man angenähert hat, potenzielle Energie. Diese Energie wird also bei der Verbindung von Protonen frei. Diese Energie wird in kinetische Energie des zusammengesetzten Atomkerns umgewandelt. Der nach einiger Zeit ruhende zusammengesetzte Atomkern hat nun weniger Energie. Dieses führt dazu, dass er eine geringere Masse hat (Energie gleich Masse).

Die höchste mittlere Bindungsenergie besitzt Nickel 62. Eine deutlich niedrigere Bindungsenergie besitzen Wasserstoff 2 – Deuterium (1 Proton und ein Neutron) und Wasserstoff 3 – Tritium (1 Proton und 2 Neutronen). Dieses ist wichtig für die **Kernfusion**



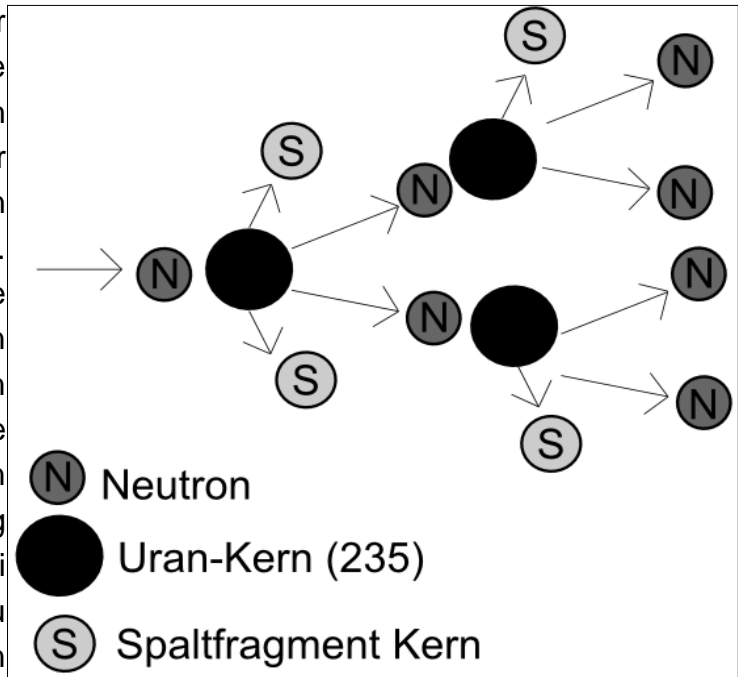
(Kapitel 3.3).

Wird Uran mit einer mittleren Bindungsenergie von 7,57 MeV gespalten in zwei Kerne mit höherer Bindungsenergie (Barium 153 mit 8,03 MeV und Krypton 89 mit 8,61 MeV) dann wird bei diesem Prozess Energie freigesetzt, da der Zustand noch stabiler ist. Diese freigesetzte Energie kann in einem Atomkraftwerk genutzt werden.



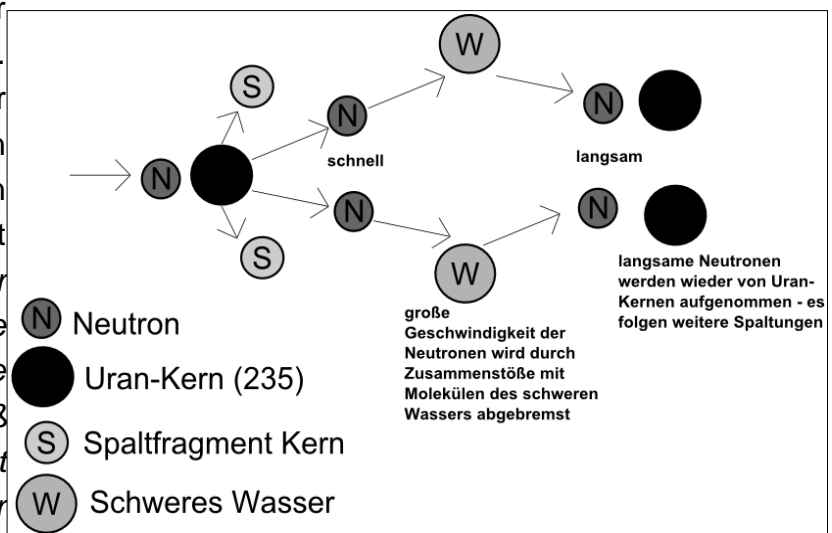
3.2 Kernkraftwerk

Praktisch gesehen, ist die bei einer einzigen Spaltung freigesetzte Energie natürlich winzig. Wenn jedoch viele solcher Spaltungen in einer kurzen Zeit ablaufen könnten, ist ein enormer Energiebetrag verfügbar. Etliche Physiker stellten fest, dass die bei jeder Spaltung freigesetzten Neutronen dazu eingesetzt werden könnten, eine **Kettenreaktion** (siehe Abbildung) zu erzeugen. Ein Neutron führt also zunächst zu einer Spaltung eines Urankerns; die zwei oder drei freigesetzten Neutronen können zu weiteren Spaltungen von Urankern führen, sodass sich der Prozess vervielfältigt.



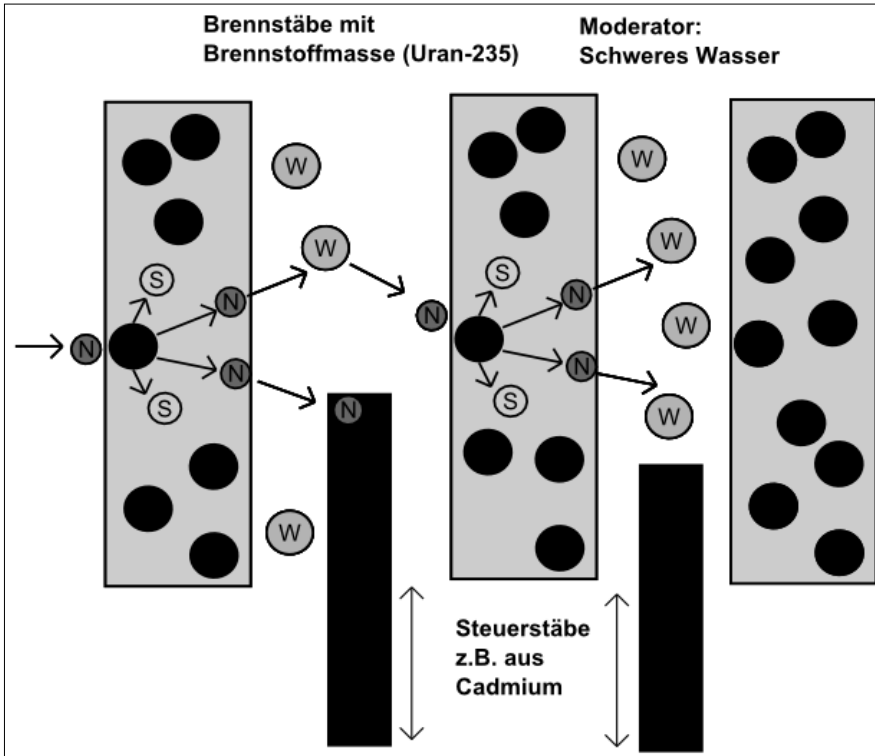
Man stellte fest, dass die Wahrscheinlichkeit für die Aufnahme eines Neutrons durch einen Uran-Kern-235 nur für **langsame Neutronen** groß ist. Die während einer Spaltung emittierten Neutronen, die zum Aufrechterhalten der Kettenreaktion gebraucht werden, bewegen sich dagegen sehr schnell. Eine Substanz, die als **Moderator** bezeichnet wird, muss zum Abbremsen der

Neutronen eingesetzt werden. Der effektivste Moderator besteht aus Atomen, deren Masse so nah wie möglich an der Neutronenmasse liegt (Genauso ist es bei einer Billardkugel, die auf eine ruhende Kugel gleicher Masse trifft und selbst durch den Stoß gestoppt wird. Dagegen prallt eine Billardkugel mit nahezu der ursprünglichen Geschwindigkeit



zurück, wenn sie auf einen schwereren Gegenstand trifft.) Der beste Moderator bestünde daher aus Wasserstoffatomen H1. Unglücklicherweise neigt Wasserstoff H1 zur Aufnahme von Neutronen. Das Wasserstoffisotop Deuterium H2 ist dagegen gegenüber Neutronen weniger aufnahmefreudig und daher ein fast idealer Moderator.

Deuterium kann in Form von „schwerem“ Wasser genutzt werden, bei dem die



Wasserstoffatome durch Deuterium ersetzt wurden. Ein anderer gebräuchlicher Moderator ist Graphit. Damit die Kettenreaktion kontrolliert abläuft (nicht wie bei einer Atombombe), darf pro gespaltenem Kern nur **ein Neutron** eine weitere Spaltung auslösen. Der Kernreaktor läuft bei konstanter Leistung. Die überschüssigen Neutronen werden durch die **Steuer- oder Regelstäbe** aufgenommen. Durch Ein- und Ausfahren der

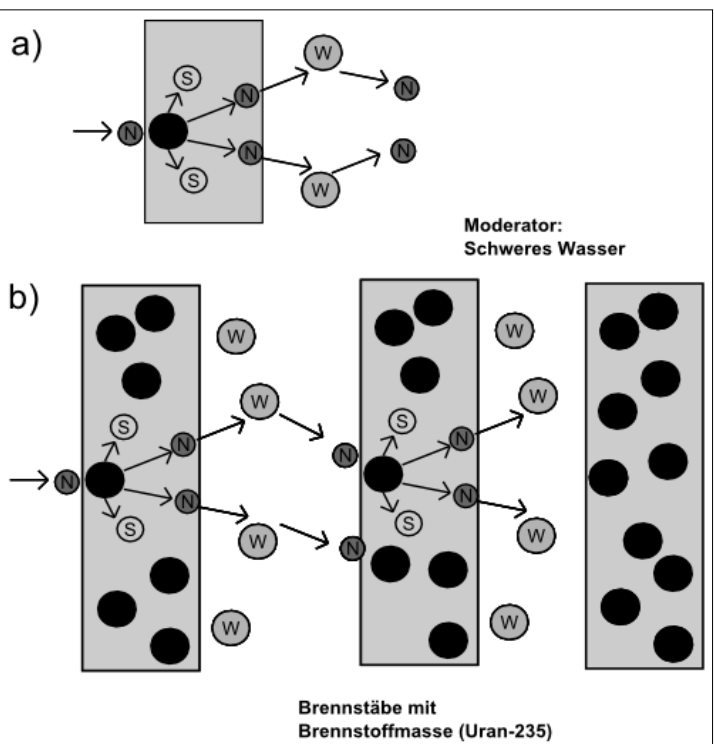
Steuerstäbe kann die Leistung reguliert werden oder der Reaktor sofort abgeschaltet werden.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die bei einer Spaltung erzeugten Neutronen möglicherweise absorbiert werden und andere Kernreaktionen mit anderen Kernen im Reaktor auslösen können, anstatt zu weiteren Spaltungen zu führen.

Natürliches Uran enthält nur zu 0,7 Prozent spaltbares Uran-235. Um die Wahrscheinlichkeit für die Spaltung dieser Kerne zu erhöhen, kann natürliches Uran zur Erhöhung des Prozentsatzes dieser Kerne angereichert werden.

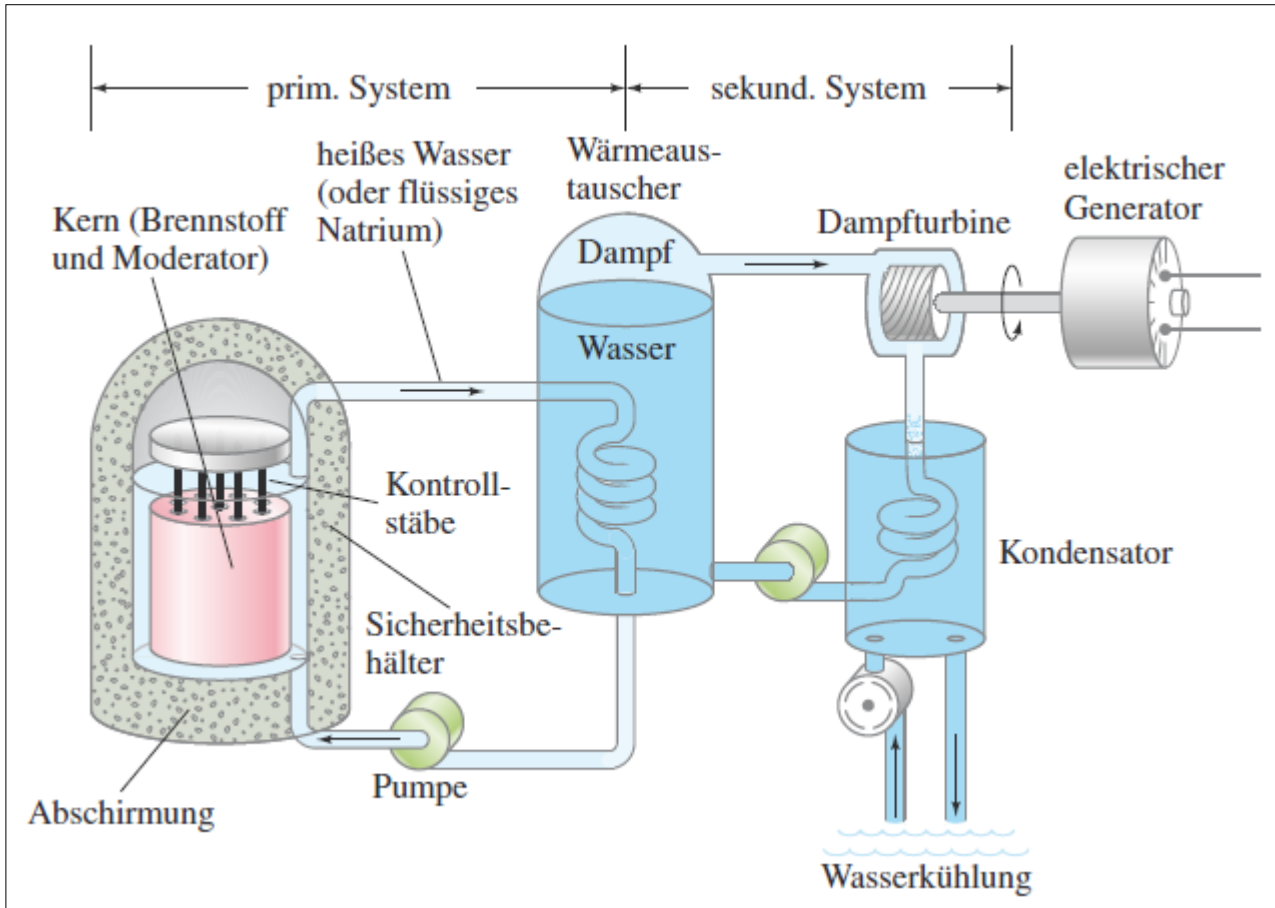
Das Anreichern ist bei Reaktoren mit schwerem Wasser als Moderator üblicherweise nicht notwendig, weil schweres Wasser keine Neutronen absorbiert.

Das nächste Problem ist, dass einige Neutronen den Reaktorkern durch dessen Oberfläche verlassen, noch ehe sie zu weiteren Spaltungen geführt haben (siehe Abbildung a). Daher muss die Brennstoffmasse hinreichend groß sein, damit es zu einer selbsterhaltenden Kettenreaktion kommen kann (siehe Abbildung b). Die dazu mindestens benötigte Uranmasse



wird als kritische Masse bezeichnet. Der Wert der **kritischen Masse** hängt vom Moderator, vom Brennstoff und gegebenenfalls vom Anreicherungsgrad des Brennstoffs ab. Typische Werte liegen im Bereich von einigen Kilogramm (es sind also weder Gramm noch Tausende Kilogramm).

Die beim Spaltprozess freigesetzte Energie erscheint als Wärme, die zum Erwärmen von Wasser und zur Erzeugung von Wasserdampf benutzt wird, der eine an einen elektrischen Generator angeschlossene Turbine antreibt.

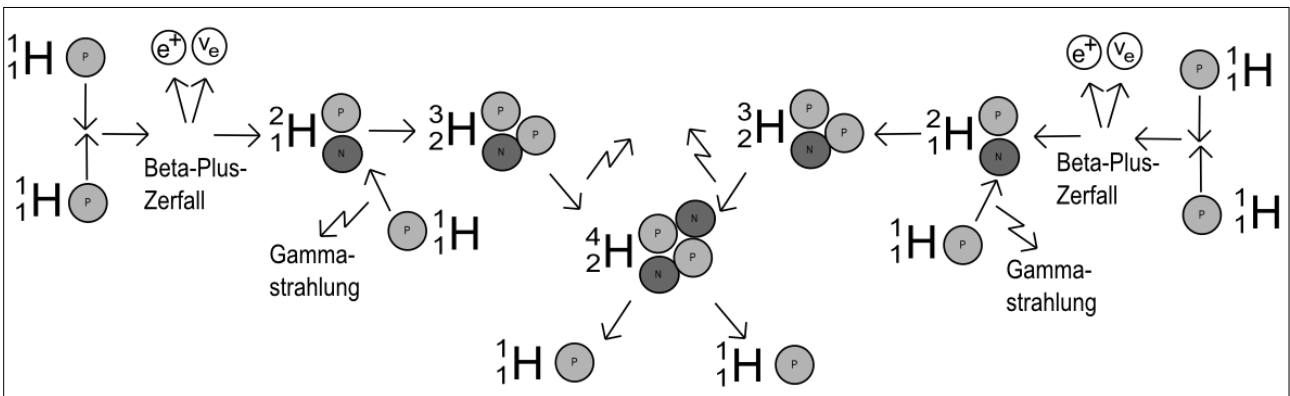


3.3 Fusionsreaktoren

Zwei Atomkerne sehr leichter Elemente sind zusammen schwerer als der Atomkern eines etwas schwereren Elements, der genau aus diesen beiden Kernen zusammengesetzt ist. Es fehlt die Masse, die beim Verschmelzen der leichten Atomkerne als Energie frei wird (siehe Abschnitt Bindungsenergie).

Im Inneren von Sternen läuft Kernfusion seit Jahrtausenden ab. Leichte Atomkerne verschmelzen zu schwereren Kernen. Unsere Sonne bezieht ihre Energie aus der Wasserstofffusion: Aus vier Wasserstoffkernen (4 Protonen) wird über mehrere Zwischenschritte ein Heliumkern.

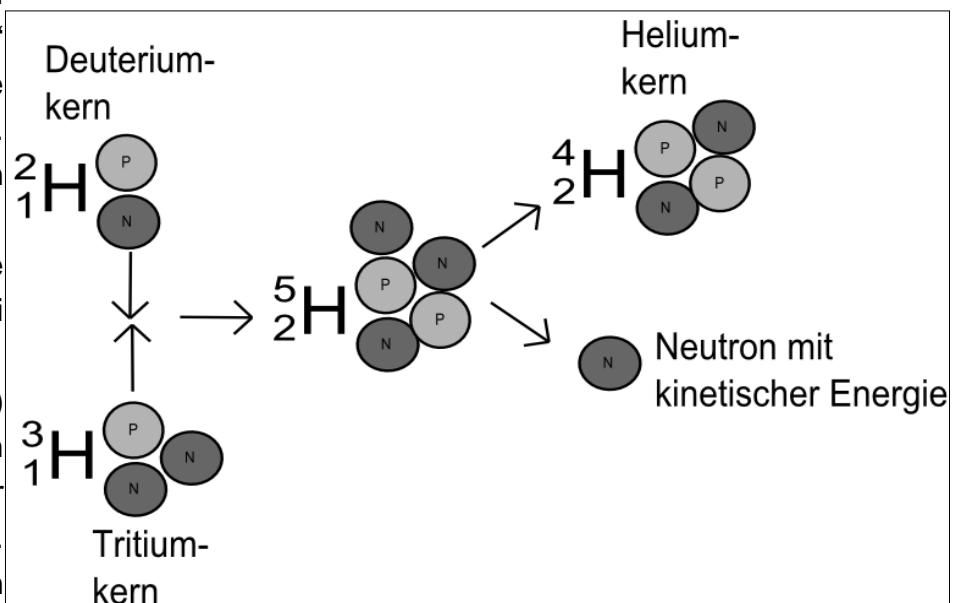
Zunächst verschmelzen je zwei Protonen. Bei der Verschmelzung entsteht sofort durch den Beta-Plus-Zerfall ein Deuteriumkern (1 Proton und ein Neutron), einem Isotop des



Wasserstoffs. Im Mittel dauert es mehr als 14 Milliarden Jahre, bis ein bestimmtes Proton mit einem anderen reagiert. Die Anzahl der Protonen in der Sonne ist jedoch groß genug, um diese Proton-Proton-Reaktion dauernd ablaufen zu lassen. Würden diese Prozesse häufiger ablaufen, wäre die Sonne heißer und der Wasserstoff längst verbraucht.

Danach verbindet sich ein weiteres Proton mit dem Deuteriumkern. Bei der Fusion wird Energie in Form von Gamma-Strahlung frei (es kommt zu einem Masseverlust). Es entsteht ein Helium-3-Kern. Treffen nun zwei solcher Helium-3-Kerne aufeinander entsteht ein Helium-4-Kern. Auch hierbei wird Energie in Form von Gamma-Strahlung frei (Masseverlust) und zwei

freie Protonen. „Unsere“ Sonne wird jede Sekunde durch Kernfusion um ca. 4 Millionen Tonnen leichter. Auf der Erde soll die Kernfusion von zwei Wasserstoffisotopen (Deuterium und Tritium) zu Helium helfen, den Energiebedarf der Menschheit zu decken. Wenn sich ein



Deuterium- und ein Tritiumkern nähern, werden zwischen ihnen abstoßende elektrische Kräfte ausgeübt. Diese sind umso größer, je kleiner der Abstand ist. Dadurch werden beide Kerne wieder auseinandergetrieben. Erst bei Geschwindigkeit von jeweils mehr als 1000 km/s setzt ein anderer Vorgang ein: Die beiden Kerne kommen sich trotz der Abstoßung so nahe, dass zwischen ihnen anziehende Kernkräfte wirksam werden. Diese sind viel größer als die abstoßenden elektrischen Kräfte und führen dazu, dass die beiden Kerne zu einem Heliumkern verschmelzen. Dabei werden ein energiereiches Neutron und Gamma-Strahlung freigesetzt.

Könnte die bei dieser Reaktion frei werdende Energie vollständig in elektrische Energie umgewandelt werden, würde bei der Bildung von 1 kg Helium so viel elektrische Energie erzeugt, um den gesamten deutschen Strombedarf im Jahre 2010 für etwa 1,5 Stunden zu decken.

Um diese Energiequelle nutzen zu können, versucht man Fusionsreaktoren zu bauen. Dort muss Wasserstoff auf ca. 100 Millionen Grad erhitzt werden. Bei diesen Temperaturen haben die Atome all ihre Elektronen verloren. Positive Kerne und negative Elektronen bilden einen neuen Zustand der Materie – das Plasma.

Mit einem raffiniert geformten Magnetfeld kann das Plasma auf einer Kreisbahn „in der Schwebe“ gehalten werden. Kein Gefäß würde die hohen Temperaturen des Plasmas aushalten. Das energiereiche Neutron und die Gamma-Strahlung, die bei der Fusion entstehen, könnten den Fusionsreaktor verlassen, da sie keine Ladung besitzen und durch ihre Energie z.B. umliegendes Wasser erhitzen und damit einen Generator betreiben (so wie bei einem Kernkraftwerk).

Leider ist es bis heute noch nicht einmal gelungen, einen Forschungsreaktor für einige Stunden laufen zu lassen. Die industrielle Nutzung wird dann noch weitere Probleme offenbaren. Kein Fachmann wagt heute eine verlässliche Prognose, wann die Fusionsreaktoren die benötigte Energie liefern werden.