

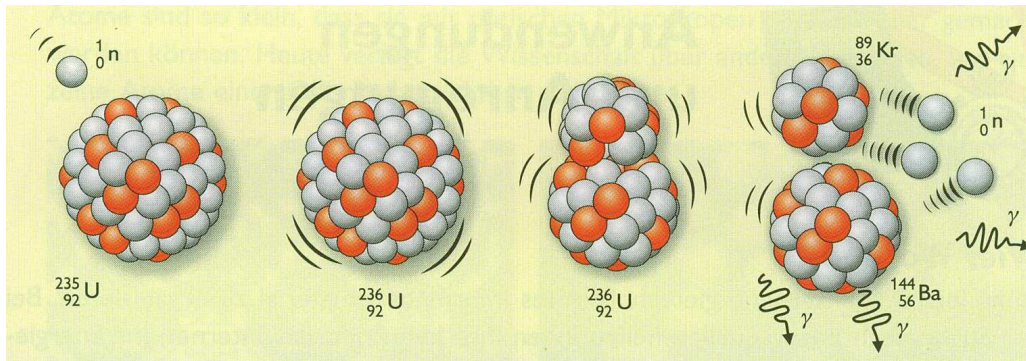
Erzwungene Kernspaltungen und Kernkraftwerke

Wie schon beim Thema „Energie bei Kernreaktionen“ angesprochen, gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten, aus Kernreaktionen Energie zu gewinnen: die Fusion leichter oder die Fission schwerer Elemente, und wie dort auch schon erwähnt verwenden bisherige Kraftwerke alle die zweite Methode; diese wird also zunächst genauer diskutiert.

Erzwungene Kernspaltung:

Das Beispiel der spontanen Kernspaltung von U235 wurde ebenfalls dort schon diskutiert. Diese findet allerdings nur selten statt (in 1 g Natururan pro Stunde etwa 20mal), ist also zur Energiegewinnung nicht brauchbar.

Es gibt aber eine sehr ähnliche Reaktion: U235-Kerne können langsame (!) Neutronen einfangen; es entsteht ein instabiler U236-Kern, der sich sehr schnell in zwei kleinere Kerne (z. B. Kr und Ba) aufspaltet; außerdem werden drei schnelle (!) Neutronen frei. Diese Reaktion wurde am 17.12.1938 von den deutschen **Otto Hahn** und **Fritz Strassmann** erstmals experimentell beobachtet; sie erhielten dafür 1944 den Nobelpreis (ihre Kollegen **Lise Meitner** und **Otto Frisch**, welche die Berechnungen und damit Erklärungen zu den Beobachtungen lieferten, gingen leer aus...) Man spricht hier (und bei ähnlichen Reaktionen) von einer erzwungenen Kernspaltung.



Der entscheidende Schritt hin zu einer Nutzung des Effekts in Kraftwerken gelang dann aber dem ungarisch-deutsch-amerikanischen Physiker **Leó Szilárd** (Theorie) und dem italienisch-amerikanischen Physiker **Enrico Fermi** (Experiment: „Chicago Pile 1“, der erste Kernreaktor, 2.12.1942 erstmals vor geladenen Gästen demonstriert). Die grundlegende Idee ist sehr einfach: die Kernspaltung wird durch ein Neutron ausgelöst, bei der Kernspaltung entstehen aber auch Neutronen – diese können also ihrerseits wieder neue Kernspaltungen auslösen usw.; es kommt also zu einer Kettenreaktion.

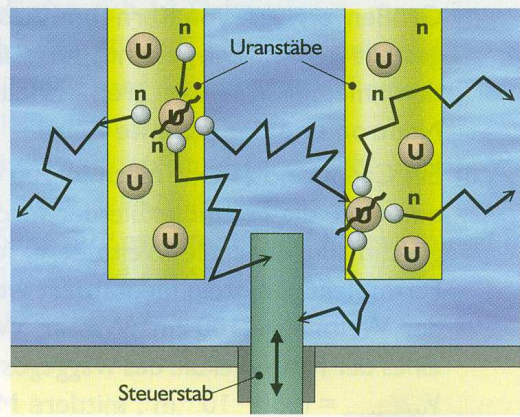
Dabei treten mehrere Probleme auf:

1. Die entstehenden Neutronen sind schnell, zur Auslösung der Kernspaltung sind aber langsame Neutronen nötig – man muss die Neutronen also irgendwie verlangsamen. Den dazu nötigen Stoff nennt man Moderator. (lateinisch *moderare* = mäßigen)
2. Ein zweites Problem ist, dass die Neutronen teilweise aus dem Uran entweichen. Es ist also eine gewisse Menge an Uran nötig, damit gewährleistet wird, dass genügend der entstehenden Neutronen ihrerseits wieder eine Kernspaltung auslösen. Man spricht von der kritischen Masse. Ist weniger als die kritische Masse vorhanden, so spricht man von einer unterkritischen Menge bzw. Reaktion, ansonsten von einer überkritischen. Eine überkritische Reaktion kann reguliert werden, indem man zusätzlich noch Stoffe einsetzt, welche überzählige Neutronen auffängt, bevor sie eine Spaltung auslösen können (typisch: Kadmium).
3. Natürlich vorkommendes Uran besteht zum größten Teil aus dem Isotop U238; das nötige Isotop U235 ist nur zu etwa 0,7% enthalten. Deshalb muss das U235 zunächst angereichert werden, bevor das Uran in Kernreaktoren verwendet werden kann.

Kernspaltungs-Kraftwerke:

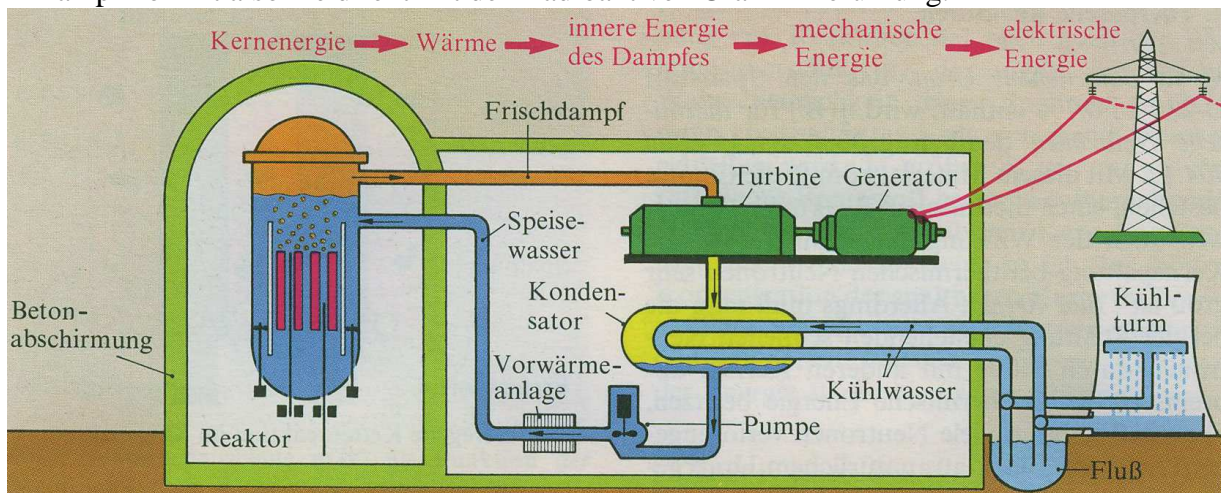
Zunächst wird hier die grundlegende Bauweise dargestellt:

In **Brennstäben** (gelb) finden Kernspaltungen statt. Hier werden große Mengen an Energie frei, die von einem Wasserkreislauf (blau) aufgenommen werden. Dieses Wasser dient zugleich zur **Abbremsung der Neutronen (Moderator)**. Die Wassermoleküle eignen sich aufgrund ihrer kleinen Masse sehr gut, die schnellen Neutronen auf thermische Geschwindigkeiten abzubremesen.
 In **Steuerstäben** (grün) befindet sich ein Material, das Neutronen absorbiert. Damit kann die Anzahl thermischer Neutronen und damit die Anzahl der Kernreaktionen gesteuert werden.

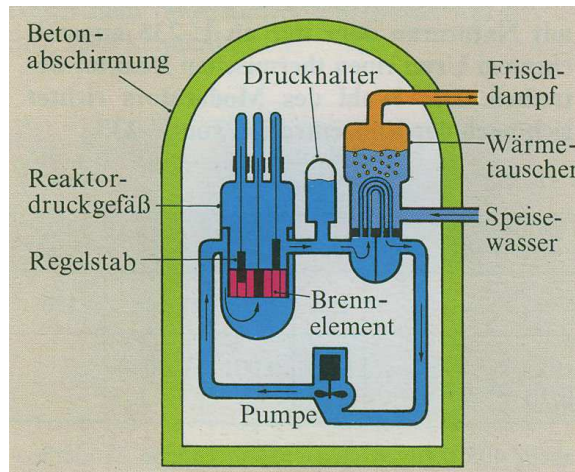


Im Folgenden werden einige typische Kernkraftwerke besprochen. (Anmerkung: Der häufig verwendete Begriff „Atom“kraftwerk ist eigentlich unsinnig – schließlich werden hier nicht Kräfte/ Energien von Atomen ausgenutzt (das wird z. B. in Kohlekraftwerken gemacht!), sondern von **Atomkernen!** Ähnliches gilt für den Begriff „Atom“bombe.)

- In einem **Siedewasserreaktor** (siehe Bild) dient Wasser als Moderator und gleichzeitig als Kühlmittel: die frei werdende Energie heizt das Wasser auf, und es entsteht Dampf. Dieser treibt eine Turbine an, und diese wiederum einen Generator, sodass man am Schluss elektrische Energie erhält. In den Kühltürmen wird der Dampf anschließend mit Hilfe eines zweiten, getrennten Wasserkreislaufs wieder zu flüssigem Wasser kondensiert; der aus den Kühltürmen entweichende Dampf kommt also nie direkt mit dem radioaktiven Uran in Berührung.



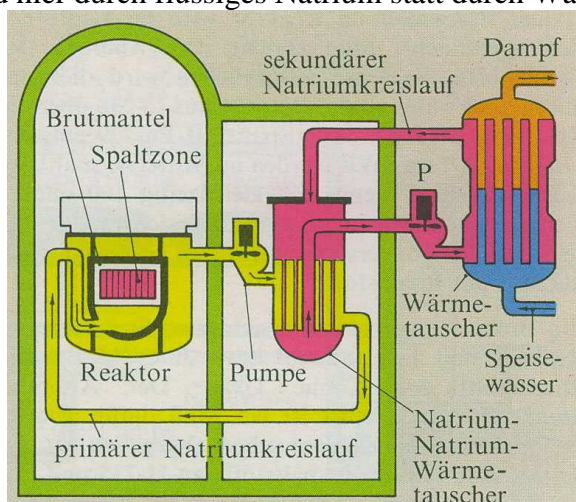
- Ein **Druckwasserreaktor** hat aus Sicherheitsgründen noch einen zusätzlichen Wasserkreislauf (siehe Bild): das erhitzte Wasser (das unter hohem Druck steht, sodass es selbst nicht verdampft) bringt seinerseits Wasser in einem zweiten Kreislauf zum verdampfen, und nur dieser Dampf wird zur Turbine geleitet.



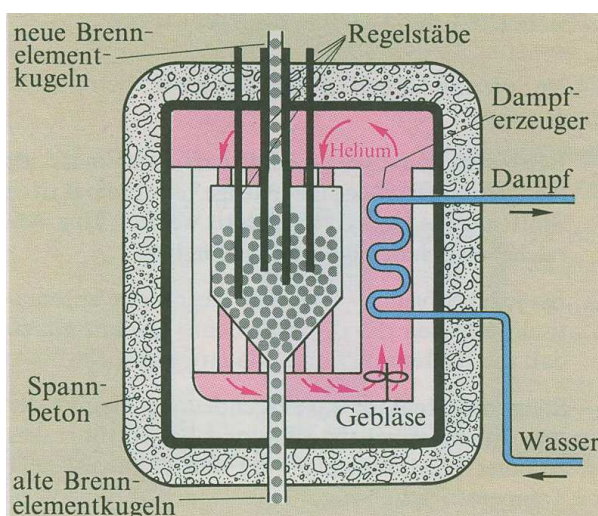
Zu unterscheiden sind bei diesen beiden Reaktortypen außerdem Leicht- und Schwerwasserreaktor: die H-Atome in normalem („leichten“) Wasser (H_2O) bremsen die Neutronen zwar gut ab, neigen aber auch dazu, Neutronen einzufangen, die dann für die Kettenreaktion fehlen. Deswegen verwendet man manchmal statt dessen „schweres“ Wasser D_2O , in dem die H-Atome durch Deuterium-Atome (also das Isotop H_2 , bei dem die Kerne aus einem Proton und einem Neutron bestehen) ersetzt wurden. Deuterium fängt die Neutronen viel seltener ein – bremst sie aber andererseits auch nicht so gut.

Die folgenden beiden Reaktortypen kommen ohne Wasser als Moderator aus, befinden sich aber großenteils noch in der Erprobungsphase und haben noch technische Probleme. Beide gehören zu den Hochtemperaturreaktoren und zu den Brutreaktoren, die neben der Energieerzeugung auch wieder neues spaltbares Material erzeugen.

- Im schnellen Brüter (siehe Bild) wird zusätzlich zu U_{238} auch Pu_{239} als zu spaltendes Material verwendet; andererseits wird der Bereich des Reaktors, in dem die Spaltung stattfindet, von einem „Brutmantel“ aus U_{238} umgeben. In diesem fangen die U_{238} -Kerne die entstehenden Neutronen ein, wodurch Pu_{239} , also neues Spaltmaterial, entsteht. Pu_{239} kann auch durch schnelle Neutronen gespalten werden (daher der Name des Reaktors), ein Moderator ist hier also nicht nötig. Die Wärme wird hier durch flüssiges Natrium statt durch Wasser abgeführt.



- Im Kugelhaufenreaktor (siehe Bild) ist der „Brennstoff“ in Graphitkugeln von 6 cm Durchmesser eingeschlossen. Die Kugeln enthalten neben U_{235} auch noch Th_{232} , das durch Neutroneneinfang in U_{233} umgewandelt wird und ebenfalls spaltbar ist; auch hier handelt es sich also zumindest teilweise um einen Brutreaktor. Das Graphit dient als Moderator, die Wärme wird durch Helium abgeführt.



Anmerkung:

Fermi mag der erste Mensch sein, der einen Kernspaltungsreaktor gebaut hat – aber in der Natur gab es das schon lange vor ihm: In der Uran-Mine **Oklo** (in Gabun, Afrika) wurden Hinweise gefunden, dass sich dort vor etwa 2 Milliarden Jahren auf natürliche Weise so viel Uran anreicherte, dass es zu einer

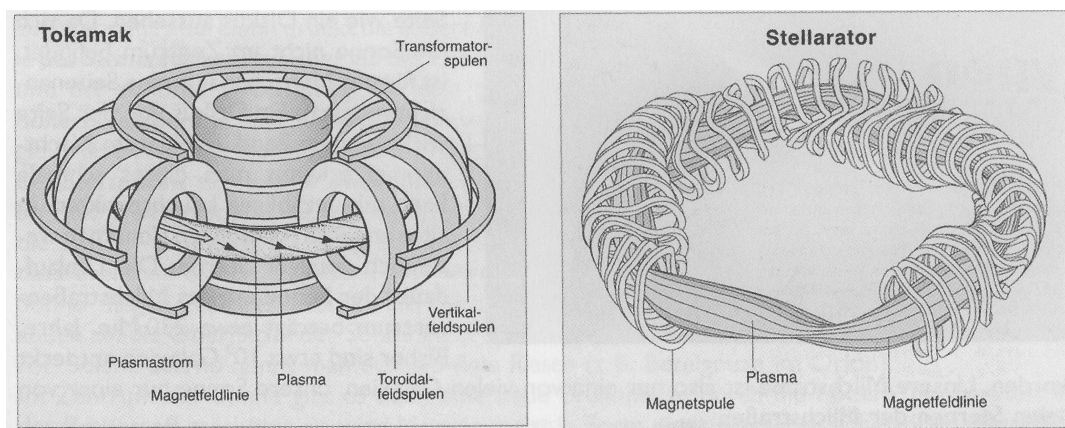
Kettenreaktion kam! (moderiert durch Wasser, das in die Lagerstätte einsickerte) Dieser „Naturreaktor“ war etwa 500 000 Jahre lang aktiv und setzte während dieses Zeitraums mehrere hundert Peta-Joule an Energie frei (das entspricht in etwa der Energiemenge, die ein durchschnittliches Kernkraftwerk in einem Zeitraum von vier Jahren erzeugt). Dabei wurden insgesamt etwa 10 Tonnen ^{235}U nuklear gespalten.

Kernfusions-Kraftwerke:

Die Kernfusion ist die wichtigste natürliche Energiequelle (durch sie entsteht das Licht der Sonne und der Sterne!), ihre technische Nutzung ist aber noch nicht wirtschaftlich möglich: zur Auslösung einer Fusionsreaktion ist immer noch mehr Energie nötig, als dabei frei wird. Trotz andauernder Forschung seit etwa den 1950er Jahren sind die Fortschritte nur langsam. Mit einer kommerziellen Nutzung zur Stromerzeugung ist wohl frühestens im Jahr 2050 zu rechnen.

Zur Zeit wird vor allem an zwei Typen von Fusionreaktoren intensiv geforscht; in beiden soll die Reaktion $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \longrightarrow ^4_2\text{He} + \text{n}$ ablaufen. Deuterium (^2_1H) kommt zu 0,015% in normalem Wasser vor, davon ist also genügend verfügbar. Das außerdem nötige Tritium (^3_1H) soll in den Reaktoren selbst aus Lithium, mit dem die Reaktionszone umgeben wird, erbrütet werden: $^6_3\text{Li} + \text{n} \longrightarrow ^4_2\text{He} + ^3_1\text{H}$.

- Ein *Tokamak* (russisch in etwa: „großer Strom“, auch Abkürzung für den russischen Begriff für „toroidale Kammer in Magnetspulen“) verwendet ein sehr heißes und dichtes Plasma (vollständig ionisiertes Gas) in einem Torus (Hohring / Donut), das durch starke Magnetfelder daran gehindert wird, mit den Wänden in Kontakt zu kommen („magnetischer Einschluss“). Das Plasma wird durch elektrischen Strom, der durch es fließt, geheizt; gleichzeitig entsteht durch diesen Strom auch das einschließende Magnetfeld. Im Jahre 2009 wurde der Bau des **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor, auch lateinisch für „Weg“) im südfranzösischen Cadarache begonnen. Dieser soll ab Inbetriebnahme (voraussichtlich 2018) erstmals demonstrieren, dass mehr Energie gewonnen werden kann, als zur Erzeugung der Fusion nötig ist.
- Ein *Stellarator* (von lateinisch *stella* = Stern) benutzt grundsätzlich dieselben Bauprinzipien, allerdings wird hier das einschließende Magnetfeld von außen erzeugt statt durch einen im Plasma fließenden Strom. Das Plasma wird dementsprechend auch anders geheizt, typisch durch Mikrowellen. Ein Nachteil dieser Bauweise ist, dass zur Erzeugung des nötigen einschließenden Magnetfelds eine komplizierte „verdrillte“ Bauweise des Torus und der Magnetfeldspulen nötig ist („Möbiusband“). Seit 2005 wird im deutschen Greifswald am Forschungsreaktor **Wendelstein 7-X** gebaut; mit der Fertigstellung wird 2014 gerechnet.



abschließend ein Vergleich:

Die wirtschaftliche bzw. technische Bedeutung von Kernkraftwerken liegt in den großen Energiemengen begründet, die bei Kernreaktionen frei werden (typisch einige MeV pro Kern; bei chemischen Reaktionen: typisch einige eV pro Molekül, also ein Faktor 1 Million weniger!). Bezogen auf die jeweils gleiche Masse der „Brennstoffe“ verhalten sich die frei gesetzten Energiemengen bei Kernfusion, Kernspaltung und Kohleverbrennung wie

10 000 000 zu 3 000 000 zu 1