



HTBLuVA St. Pölten
Höhere Abteilung Elektrotechnik

3100 St. Pölten, Waldstrasse 3 Tel: 02742-75051-300
Homepage: <http://et.htlstp.ac.at> E-Mail: et@htlstp.ac.at



ES1V-SKRIPTUM KERNKRAFTWERK _{HTL}

Autor:

LABENBACHER MICHAEL

Ort: HTBL u. VA

Zeitraum: 2015 – 2016

Fach: Energiesysteme Vertiefung

Lehrer: OStR Dipl.-Ing. Dr. Walter Widmann

Vorlage-Skriptum: Dipl.-Ing. Dr. Manfred Berger

Inhaltsverzeichnis

| | |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Physikalische Grundlagen | 1 |
| 2 Aufrechterhaltung und Regelung der Kettenreaktion | 5 |
| 3 Reaktortypen | 6 |
| 3.1 Leichtwasserreaktoren | 6 |
| 3.1.1 Druckwasserreaktor | 6 |
| 3.1.2 Siedewasserreaktor | 7 |
| 3.2 Schwerwasserreaktoren | 7 |
| 3.3 Graphitmoderierter Druckröhren-Siedewasserreaktor | 8 |
| 3.4 Gasgekühlte Hochtemperatur-Reaktoren (HTR) | 9 |
| 3.5 Schneller natriumgekühlter Reaktor (SFR) | 10 |
| 3.6 Kernkraftwerk Zwentendorf | 11 |
| 4 Sicherheit von Kernkraftwerken | 12 |
| 5 Gefahren der radioaktiven Strahlung | 14 |
| 6 Strahlenschutz | 16 |
| 7 Brennstoffkreislauf | 17 |
| 8 Kernfusion | 18 |

1 Physikalische Grundlagen



Abbildung 1.1: Kernkraftwerk

Vergleicht man die Masse eines Atoms mit der Summe der Massen seiner Elementarteilchen, so stellt man fest, dass immer eine kleine Differenz („Massendefekt“) besteht.

Aus dem Massendefekt lässt sich die Bindungsenergie der Kerne berechnen:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_k \quad (1.1)$$

$$M = Z + N \quad (1.2)$$

Z Ordnungs-/Kernladungszahlzahl (Anzahl der Protonen im Kern)

N Neutronenzahl (Anzahl der Neutronen im Kern)

M Massenzahl (Anzahl der Nukleonen (Protonen + Neutronen) im Kern)

m_p Masse der Protonen

m_n Masse der Neutronen ${}^Z_Z X$

m_k Kernmasse

Eine Energiegewinnung ist entweder durch Verschmelzung sehr leichter Kerne („Kernfusion“), oder durch Zerkleinerung sehr schwerer Kerne („Kernspaltung“) möglich.

Der Massendefekt lässt sich mit der Erkenntnis der relativistischen Physik erklären, dass man an der Masse die Energie des ruhenden Teilchens ablesen kann: die Bindungsenergie der Nukleonen vermindert die Summe der Ruheenergien der einzelnen Kernbausteine. Somit ist die beim Bau eines Atoms freigesetzte Bindungsenergie der Nukleonen nach der Beziehung $1.3 E_B = \Delta m c^2$ gleich dem Massendefekt. Je größer der Massendefekt pro Nukleon ist, desto stabiler ist der Atomkern, da mehr Energie zu seiner Zerlegung aufgewendet werden muss.

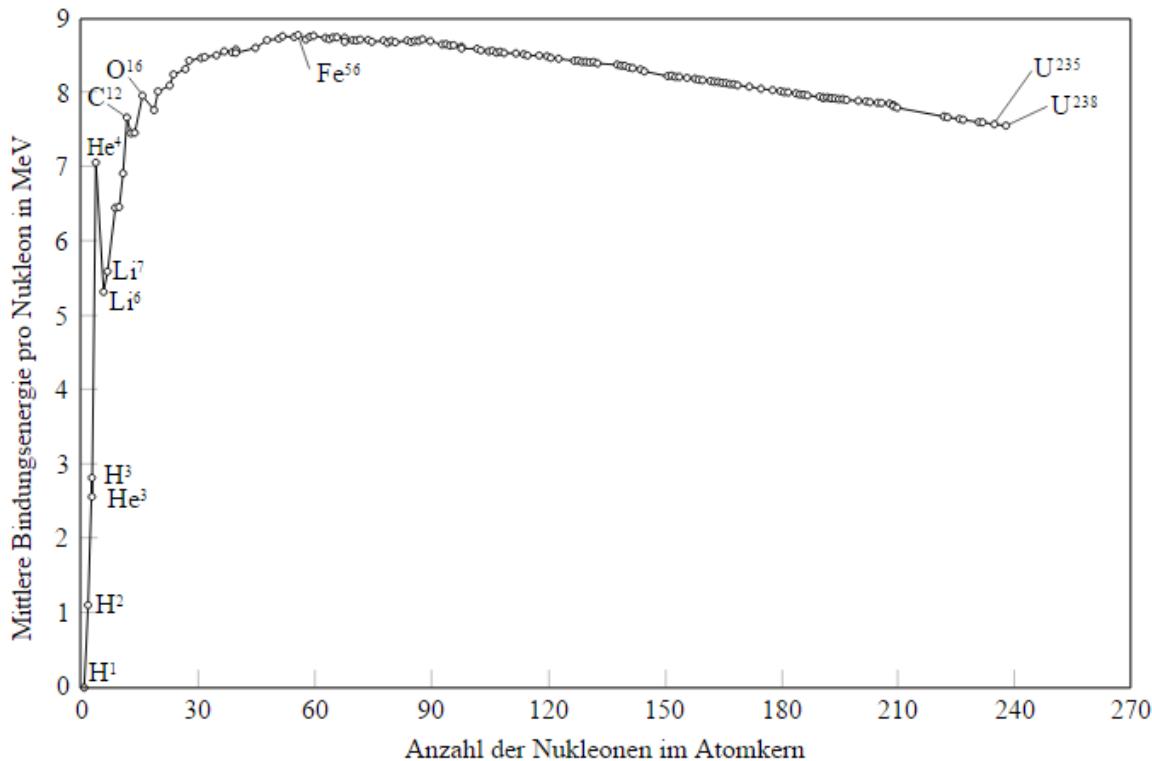


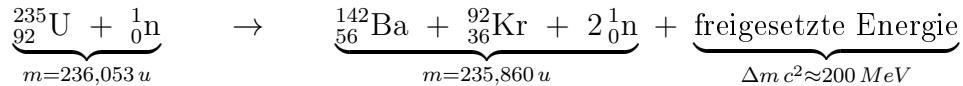
Abbildung 1.2: Kernbindungsenergie (pro Kernbaustein) in Abhängigkeit von der Kernmasse

Dieses Bild 1.2 zeigt, dass bei einer Kernspaltung in Gegensatz zu einer Kernfusion nur sehr wenig Energie entstehen kann, da die Bindungsenergiedifferenz zwischen Ausgangsstoff und entstehendem Stoff wesentlich geringer ist als bei der Fusion von sehr leichten Kernen.

Das $^{235}_{92}\text{U}$ für die atomare Nutzung kommt in der Natur nicht in der benötigten Form vor, sondern muss aus Uranerz gewonnen werden. Im Erz befindet sich hauptsächlich $^{238}_{92}\text{U}$, das in energieaufwendigen Prozessen angereichert werden muss, um spaltbares Material zu erhalten.

Otto Hahn konnte 1938 erstmals eine Kernspaltung bei Uran durchführen. Dabei hat sich gezeigt, dass durch den Beschuss mit einem Neutron nicht nur der Kern gespalten wird, sondern auch zusätzliche Neutronen freigesetzt werden.

Bei der Spaltung von $^{235}_{92}\text{U}$ in $^{142}_{56}\text{Ba}$ und $^{92}_{36}\text{Kr}$



beträgt die Masse des Urans und des die Spaltung auslösenden Neutrons zusammen $236,053\text{ }u$, die entstehenden Spaltprodukte und Neutronen weisen jedoch eine Masse von lediglich $235,860\text{ }u$ auf. Der Massendefekt beträgt in diesem Beispiel somit $0,193\text{ }u$ beziehungsweise $0,08\%$ der Ausgangsmasse.

Die Anzahl der Elementarteilchen ist gleich geblieben, aber die Bindungsenergie hat sich verändert und Energie kann somit frei werden, was die bekannte Formel:

$$E = m c^2 \tag{1.3}$$

beschreibt.

Diese aus dem Primärneutron entstehenden „Sekundärneutronen“ führen zu einer Kettenreaktion. Bei einem Atomkraftwerk wird diese Kettenreaktion gesteuert, bei einer Atombombe läuft die Kettenreaktion ungebremst ab.

Allgemeines:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \tag{1.4}$$

m atomare Masseneinheit $[m] = 1\text{ }u = 1,660538921 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$

c Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$

$m_p = 1,007276\text{ }u \approx 1\text{ }u$

$m_n = 1,008665\text{ }u \approx 1\text{ }u$

$m_{e^-} = 5,485 \cdot 10^{-4}\text{ }u$

$1\text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$

Die freiwerdende Gesamtenergie bei der Spaltung beträgt etwa 200 MeV . Für 1 kg Uran ^{235}U bedeutet das eine Energie von $22,7 \cdot 10^6 \text{ kWh}$.

Zum Vergleich:

1 kg angereichertes Uran (Erz (^{238}U) und ca. $3 - 4\%$ an ^{235}U), welches in Kernkraftwerken hauptsächlich verwendet wird, bedeutet dies eine Energie von $700\,000 \text{ kWh}$.

1 kg Steinkohle entspricht ca. 8 kWh an Energie. →

$$\frac{700\,000 \text{ kWh}}{8 \text{ kWh}} = 87\,500 \text{ mal mehr Energie}$$

Die entstehenden Bruchstücke sind radioaktiv, d. h. sie zerfallen langsam unter Abgabe von Strahlung!

2 Aufrechterhaltung und Regelung der Kettenreaktion

Die bei der Spaltung freiwerdenden Neutronen sind so schnell, dass sie nicht sofort zu weiteren Kernspaltungen führen können.

Um die Neutronen abzubremsen, wird im Kern des Reaktors der „Moderator“ angeordnet. In vielen Fällen ist der Moderator auch gleichzeitig das Kühlmittel und er sitzt zwischen den Brennstäben.

Die wichtigsten Moderatorstoffe sind (leichtes) Wasser (H_2O), schweres Wasser¹ (D_2O) und Kohlenstoff (C) in Form von Graphit.

Die Regelung des Reaktors (der Kernspaltung) erfolgt über Regelstäbe, deren Positionen dem Neutronenfluss angepasst sind. Das Material für die Stäbe muss eine hohe Neutronenabsorption besitzen (z. B. Bor). Die Regelstäbe werden dann zwischen den Brennstäben eingeführt.

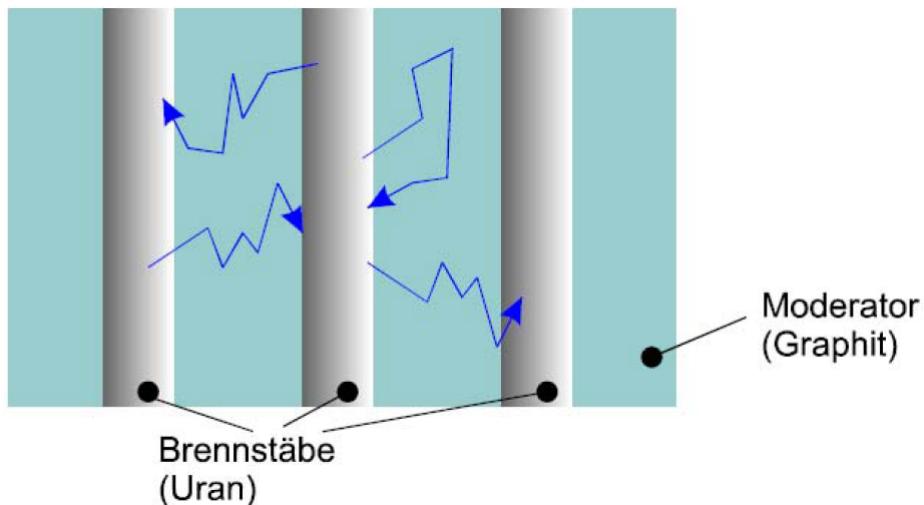


Abbildung 2.1: Neutronenbremsung im Moderator

¹Deuterium 2D (richtiger wäre 2H) besitzt gegenüber Wasserstoff H im Kern ein Neutron und Tritium 3T (bzw. 3H) noch ein zusätzliches.

3 Reaktortypen

3.1 Leichtwasserreaktoren

Dabei wird normales Wasser als Kühlmittel und Moderator verwendet. Als Brennstoff wird angereichertes Uran ($^{238}_{92}\text{U}$ mit 3 – 4 % $^{235}_{92}\text{U}$) verwendet. Dies ist der weltweit häufigste Reaktortyp!

3.1.1 Druckwasserreaktor

Es gibt zwei Kreisläufe. Das Wasser im Primärkreislauf wird als Kühlmittel und Moderator verwendet. Es steht unter einem Druck von ca. 160 bar, was ein Verdampfen bei Temperaturen um 300°C verhindert. Über einen Wärmetauscher wird die Wärme vom Primär- zu dem Wasser des Sekundärkreislaufs „gegeben“, und im Dampferzeuger wird das unter niedrigem Druck stehende Wasser des Sekundärkreislaufs verdampft.

Vor-/Nachteil: Das Wasser aus dem Reaktor kommt nicht direkt mit der Turbine in Berührung und ist nicht radioaktiv, jedoch ist dieser Typ sehr aufwendig.

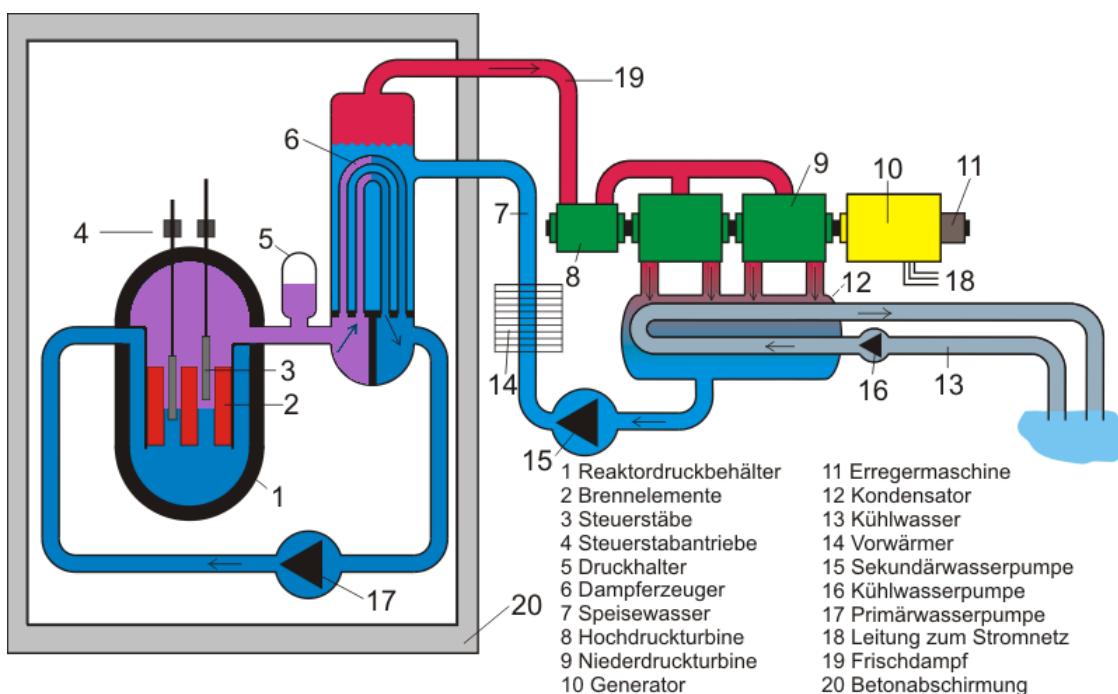


Abbildung 3.1: Aufbau eines Druckwasserreaktors

3.1.2 Siedewasserreaktor

Dabei wird das Wasser im Reaktor verdampft und auf die Turbine geleitet. Die Sicherheitsfordernisse sind dabei wesentlich höher, da der Dampf radioaktiv versäucht ist!

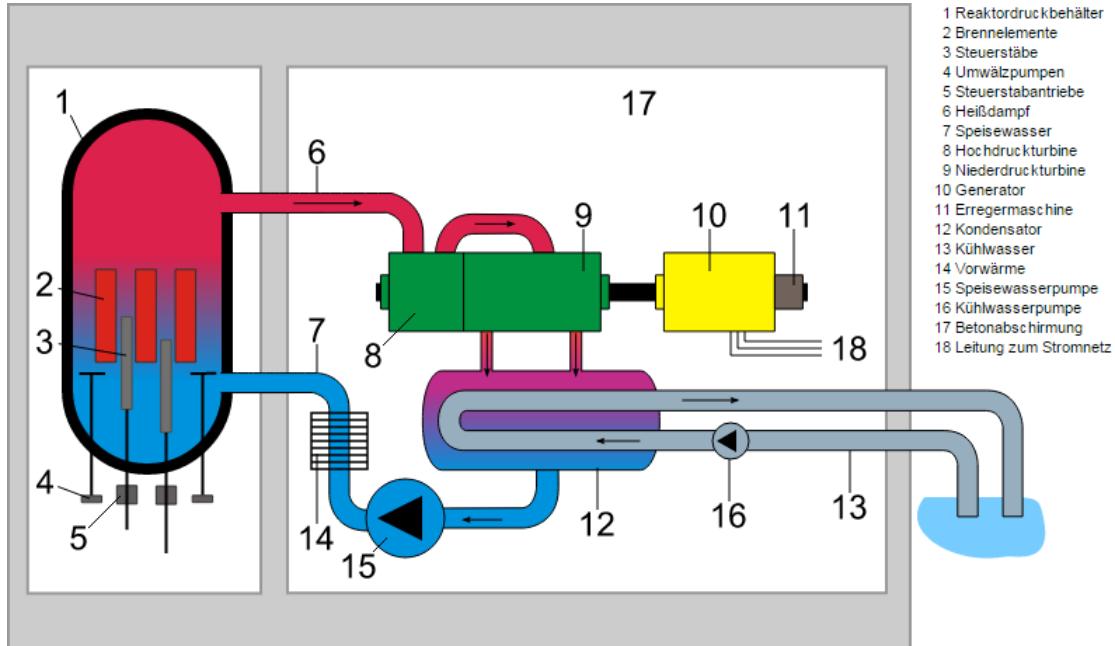


Abbildung 3.2: Aufbau eines Siedewasserreaktors

3.2 Schwerwasserreaktoren

Dabei wird schweres Wasser (D_2O) als Kühlmittel und Moderator verwendet. Schweres Wasser absorbiert Neutronen weniger stark als normales Wasser. Daher kann dieser Reaktortyp im Gegensatz zu Leichtwasserreaktoren mit Uran ^{238}U in der natürlichen Isotopenzusammensetzung als Natururanreaktor betrieben werden.

Von den verschiedenen Reaktortypen hat sich vor allem der in Kanada entwickelte so genannte CANDU-Reaktor (Druckröhrenreaktor) durchgesetzt.

3.3 Graphitmoderierter Druckröhren-Siedewasserreaktor

RBMK: transkribiert Reaktor Bolschoi Moschtschnosti Kanalny

Dieser Typ wird ausschließlich in Russland gebaut (Tschernobyl-Typ) und entspricht der Art des Druckwassererzeugers. Anstelle eines Druckbehälters besitzt er eine große Anzahl von Druckröhren, in denen sich der Kernbrennstoff befindet. Die Kettenreaktion im Reaktor wird durch Steuerstäbe kontrolliert.

Die durch die Kernspaltung entstehende Wärme wird durch Wasser und dessen Verdampfung aufgenommen. Der so entstandene Satt dampf wird durch Dampfabscheider abgeleitet.

Damit die Wärmeübertragung innerhalb des Reaktors zwischen den Graphitblöcken (Moderatoren aus Graphit) verbessert wird, zirkuliert ein Gasgemisch aus Helium und Stickstoff in den Spalten zwischen den Graphitblöcken. Die Steuerstäbe enthalten Borcarbid und können teils von oben, teils von unten in den Reaktorkern eingefahren werden. Zur Leistungsregelung im Betrieb werden die von oben eintauchenden Steuerstäbe genutzt; die von unten einfahrbaren Stäbe dienen zur Einstellung einer gleichmäßigen Leistungsverteilung im Reaktorkern.

Als ganz wesentliches Gefahrenmoment ergibt sich bei diesem Typ, dass um den Reaktorkern kein Stahlschutzmantel angebracht wird!

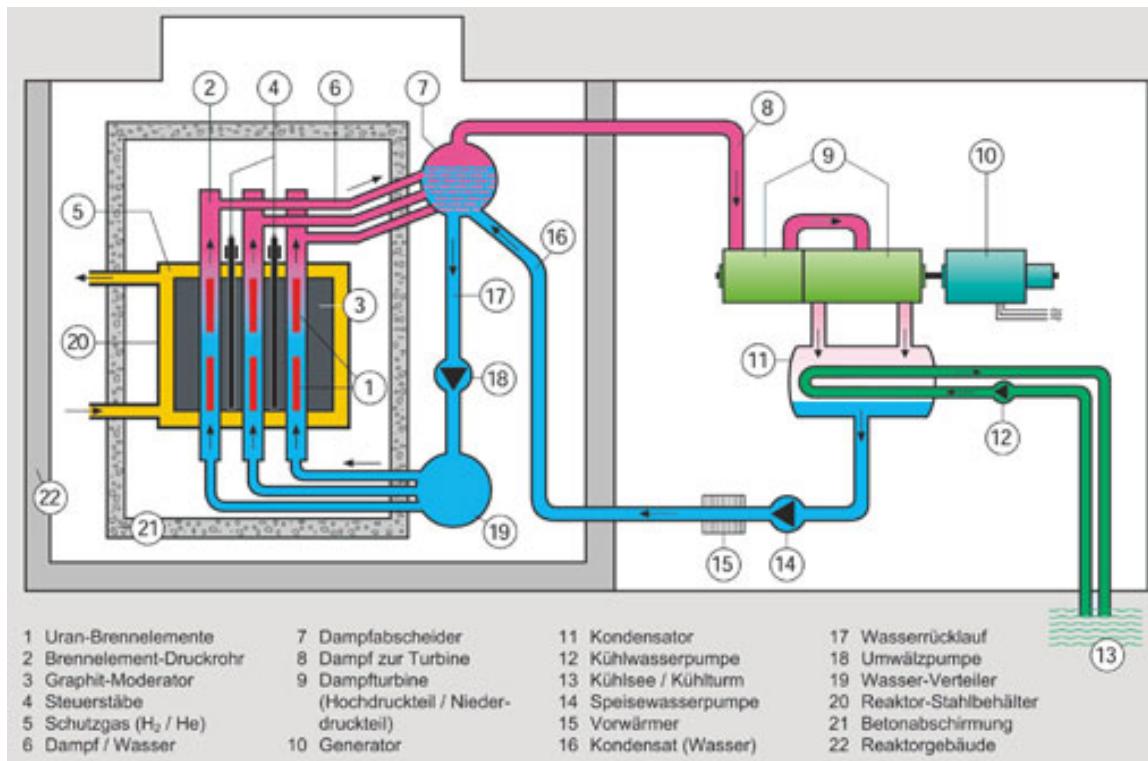


Abbildung 3.3: Aufbau eines Druckröhren-Siedewasserreaktors

3.4 Gasgekühlte Hochtemperatur-Reaktoren (HTR)

HTR: *High Temperature Reactor*

Diese arbeiten mit wesentlich höheren Temperaturen als andere bekannte Reaktortypen. Erreicht wird dies durch die Verwendung eines gasförmigen Kühlmittels, Graphit als Moderator und keramischer statt metallischer Werkstoffe im Reaktorkern.

Die Bezeichnung Hochtemperaturreaktor wird im Deutschen oft gleichbedeutend mit Kugelhaufenreaktor benutzt. Dieser ist jedoch nur eine von verschiedenen möglichen Bauformen des HTR.

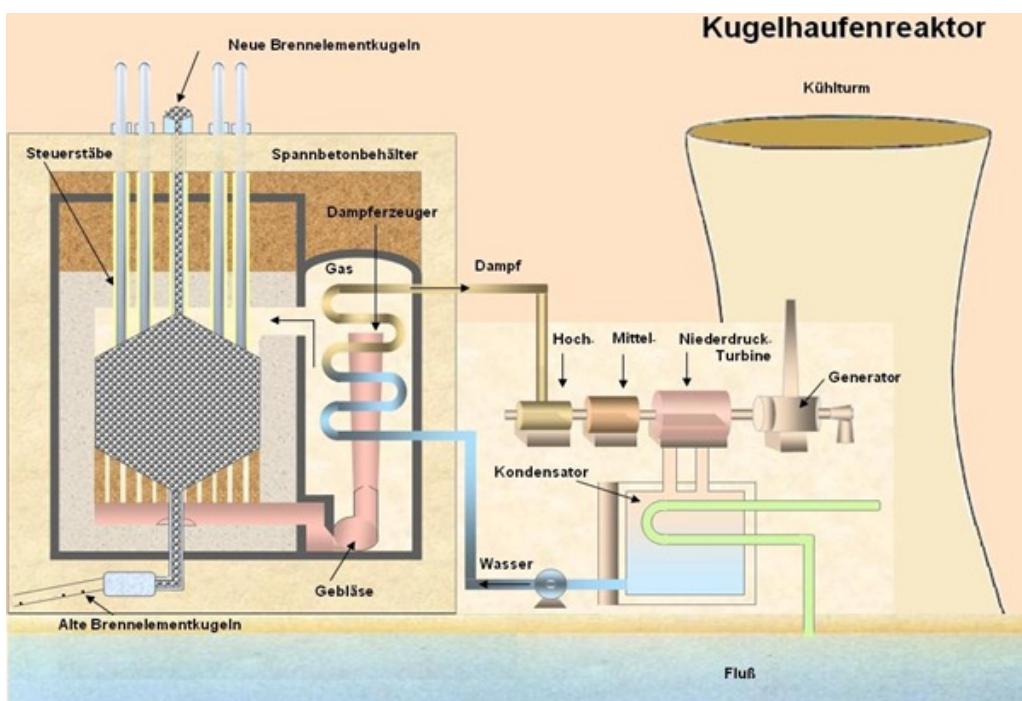


Abbildung 3.4: Aufbau eines Kugelhaufenreaktors

Das Konzept hat sich bis heute wegen verschiedener Schwierigkeiten und Pannen sowie auf Grund mangelnder Wirtschaftlichkeit im praktischen Betrieb nicht international durchgesetzt.

Die Verwendung von Gas statt einer Flüssigkeit als Kühlmittel soll die mechanische Abnutzung und die Korrosion der umströmten Teile verringern. Die bisher bekannt gewordenen HTR-Konstruktionen verwenden das Edelgas Helium.

Helium bietet im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid (CO_2), das in anderen gasgekühlten Reaktoren verwendet wird, die zusätzlichen Vorteile, dass es nicht chemisch verändert oder zersetzt werden kann.

3.5 Schneller natriumgekühlter Reaktor (SFR)

SFR: *Sodium-Cooled Fast Reactor*

Kraftwerk der Generation IV, soll ab 2030 einsatzfähig sein.

Der schnelle natriumgekühlte Reaktor ist ein Brutreaktor, das heißt er kann mehr Brennstoff produzieren als er selbst verbraucht. Die Effizienz soll durch das Erbrüten von Plutonium aus Natururan gesteigert werden.

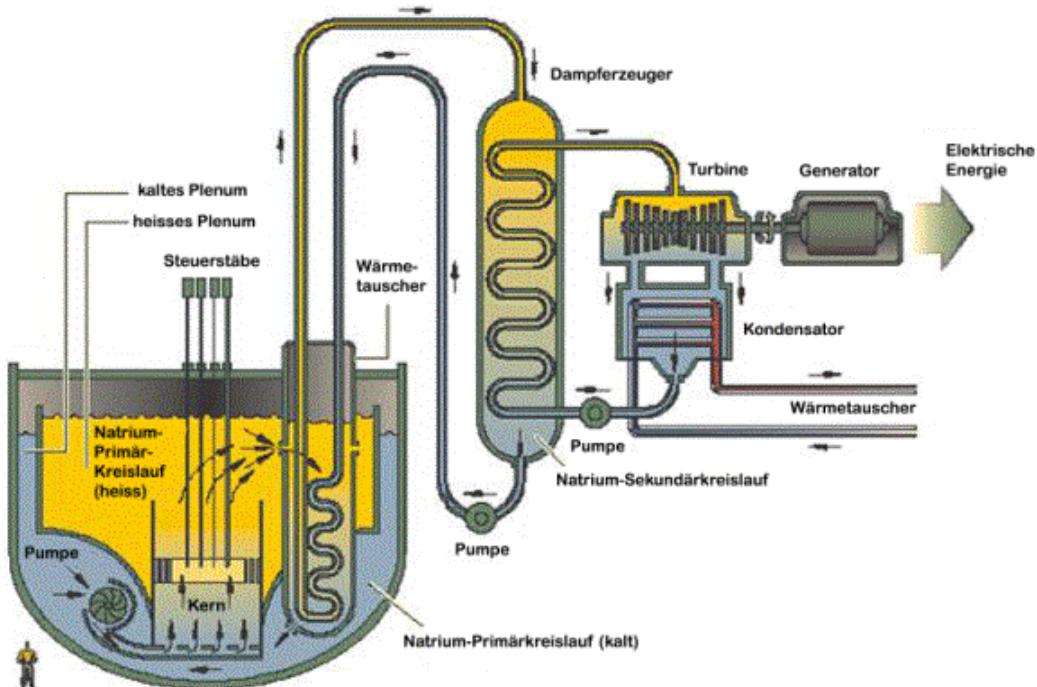


Abbildung 3.5: Aufbau eines schnellen natriumgekühlten Reaktors

Der Reaktor verwendet schnelle Neutronen, um die Kernspaltung aufrechtzuerhalten. Wenn der Reaktor überhitzt, erhöht sich die thermische Geschwindigkeit der Uranatome, was die Wahrscheinlichkeit des Neutroneneinfangs durch ^{238}U erhöht und dadurch die Spaltungsrate reduziert. (Sicherheitsfunktion)

Der Reaktor ist somit allein durch das physikalische Verhalten der enthaltenen Brennstoffe vor einer Kernschmelze geschützt, ohne dass zusätzliche Sicherheitsvorrichtungen erforderlich wären. Zur Wärmeabfuhr wird flüssiges Natrium verwendet, die Kernaustrittstemperatur beträgt maximal 550°C .

Nachteil: Erbrüten von waffentauglichem Plutonium

3.6 Kernkraftwerk Zwentendorf

Geplant war ein Siedewasserreaktor mit 723 MW Bruttoleistung und einer Nettoleistung von 692 MW. Das Investitionsvolumen 5,2 Milliarden Schilling ,1 Milliarde Euro nach heutiger Kaufkraft. Am 4. April 1972 wurde mit dem Bau begonnen.

Nach der Errichtung des Kernkraftwerks lehnte die Bevölkerung aber am 5. November 1978 in einer Volksabstimmung mit einer hauchdünnen Mehrheit von 50,47% die Inbetriebnahme ab.

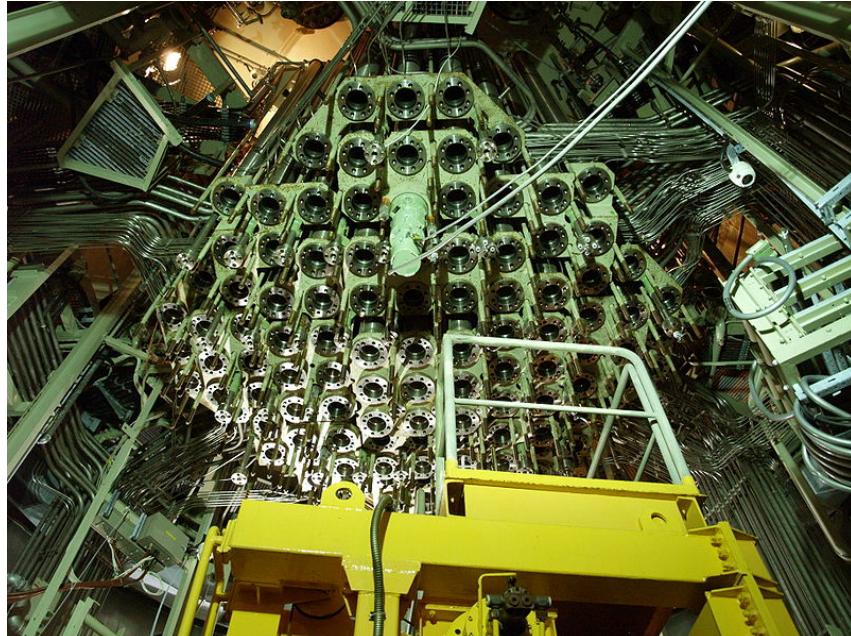


Abbildung 3.6: Unterseite des Reaktordruckbehälters in Zwentendorf

4 Sicherheit von Kernkraftwerken

Die radioaktive Strahlung kann von den menschlichen Sinnen nicht wahrgenommen werden. Hauptziel der sicherheitstechnischen Einrichtungen ist es, die bei der Kernspaltung entstehende radioaktive Strahlung sowohl im Normalbetrieb, als auch im Störfall fernzuhalten.

GAU größter anzunehmender Unfall ohne Austritt von radioaktivem Material an die Umgebung.

Super-GAU .. Unfall mit Austritt von radioaktivem Material an die Umgebung.

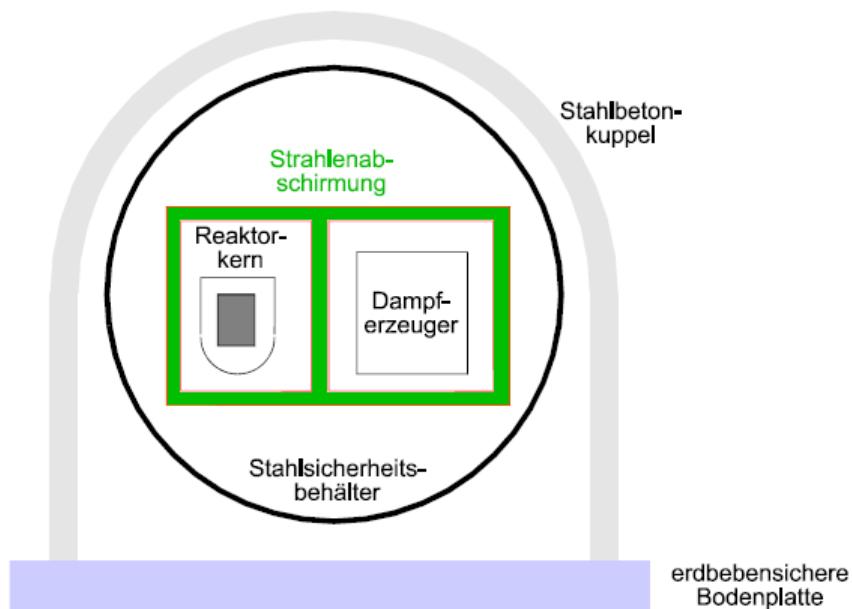


Abbildung 4.1: Schutzbarrieren eines Kernkraftwerks

Die meisten Sicherheitseinrichtungen sind mehrfach vorhanden (Redundanz). Der passive Schutz wird durch den Stahlsicherheitsbehälter (ca 6 m dick) und die Betonkuppel (ca 2 m dick) gewährleistet. Das Fundament besteht aus einer erdbebensicheren Betonbodenplatte (ca 3 m dick).

Die größten Störfälle:

- Das Kernkraftwerk **Three Mile Island** liegt auf der gleichnamigen Insel im Susquehanna River in Pennsylvania bei Harrisburg, USA. Das Kernkraftwerk hat zwei Druckwasserreaktor-Blöcke mit einer elektrischen Nettoleistung von 850 MW bzw. 880 MW . Am 28. März 1979 ereignete sich ein Kernschmelzunfall in Block 2, in dessen Verlauf etwa ein Drittel des Reaktorkerns geschmolzen ist.
- Das Kernkraftwerk **Tschernobyl** nahe der ukrainischen Stadt Prypjat: Die Katastrophe ereignete sich am 26. April 1986 in Block 4. Als Hauptursachen für die Katastrophe gelten die bauartbedingten Eigenschaften des graphit-moderierten Kernreaktors (Typ RBMK-1000) in einem unzulässig niedrigen Leistungsbereich und schwerwiegende Verstöße der Operatoren gegen geltende Sicherheitsvorschriften während des Versuches. Ausschlaggebend war dabei die Verringerung der Neutronenabsorption des Kühlwassers infolge von Dampfblasenbildung (Dichteänderung (Kühlungseffekt verschlechtert sich)) bei Leistungssteigerung.

$$W = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta \quad (4.1)$$

$$m = V \cdot \rho \quad (4.2)$$

Sinkt also die Dichte ρ ab, so kann ich weniger Wärme W speichern. Hier wurde nun die Leistung aber gesteigert $\Rightarrow \vartheta$ steigt.

- Das Kernkraftwerk **Fukushima I** in Japan: Es traten eine Reihe katastrophaler Unfälle und schwerer Störfälle im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi (Fukushima I) auf. Das Kernkraftwerk Fukushima I besteht aus sechs Reaktorblöcken mit je einem Siedewasserreaktor. Die Unfallserie begann am 11. März 2011 mit dem Tohoku-Erdbeben und lief gleichzeitig in vier von sechs Reaktorblöcken ab. In Block 1 bis 3 kam es zu Kernschmelzen. Große Mengen an radioaktivem Material – u. a. etwa $15 \text{ EBq} \frac{^{133}\text{Xe}}{^{54}\text{Xe}}$ ($\text{EBq} \dots \text{Exa-Becquerel}$), also etwas mehr als das Doppelte von Tschernobyl, und ca. $36 \text{ PBq} \frac{^{137}\text{Cs}}{^{55}\text{Cs}}$ ($\text{PBq} \dots \text{Peta-Becquerel}$), also ca. 42 % der ^{137}Cs -Emission von Tschernobyl – wurden freigesetzt.

Die großen Störfälle haben gezeigt, dass es trotz gewissenhafter Sicherheitsüberlegungen durch Zusammenwirkung ungünstiger Umstände (meist menschliches Versagen) zu gefährlichen Störungen kommen kann.

Insbesondere Kernkraftwerke russischer Bauart entsprechen sicherheitstechnisch nicht dem westlichen Standard.

5 Gefahren der radioaktiven Strahlung

Unter „Radioaktivität“ versteht man die Eigenschaft instabiler Atomkerne, spontan zu zerfallen und dabei energiereiche α -, β - und γ -Strahlen auszusenden. Diese Strahlen können die Atome in die sie eindringen ionisieren.

Die Intensität der Strahlung nimmt nach einer e -Funktion ab. Die „Halbwertszeit“ gibt an, wie lange es dauert, bis die Strahlung auf den halben Wert zurückgeht.

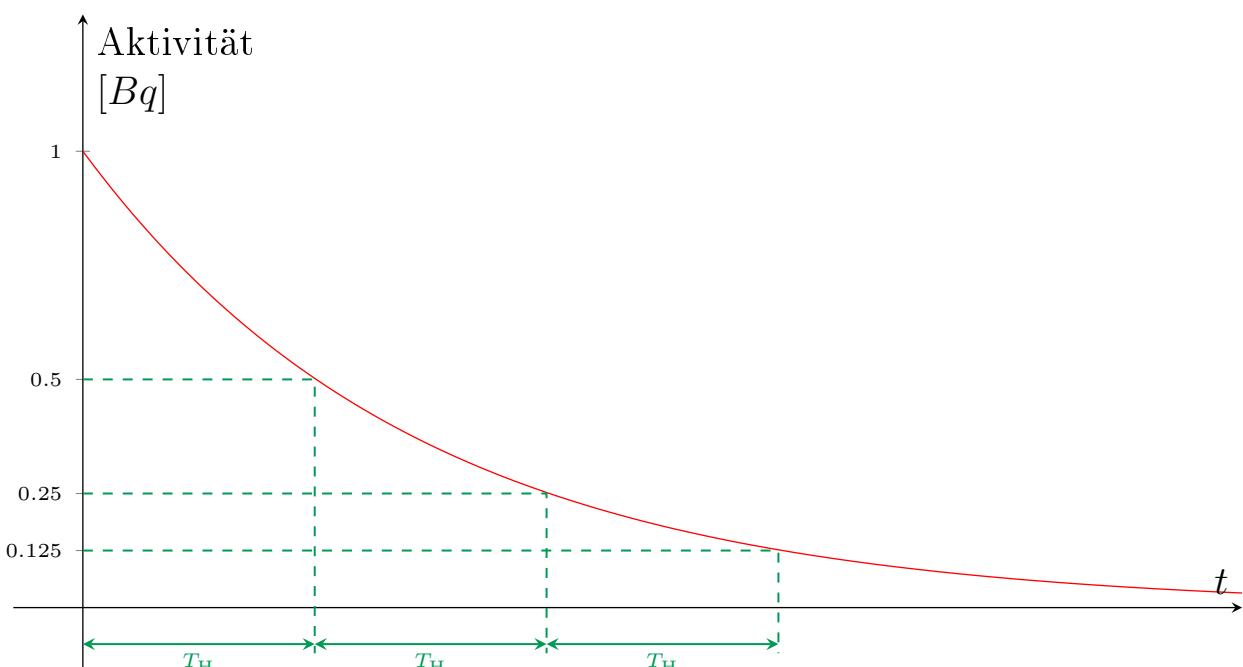


Abbildung 5.1: Radioaktiver Zerfall

Die Aktivität wird in Becquerel (Bq) gemessen. Dabei bedeutet $1\text{ }Bq$ genau 1 Zerfall pro Sekunde. Die Wirkung der Strahlung auf den menschlichen Körper wird durch die „Äquivalentdosis“ angegeben. Die Einheit ist Sievert (Sv).

Die Belastung auf Grund von natürlicher Strahlung und kosmischer Strahlung beträgt in Österreich etwa $2,5\text{ mSv/Jahr}$. Personen, die beruflich mit Strahlung zu tun haben, ist die zulässige Belastung mit 80 mSv/Jahr festgelegt worden. Bei einer Äquivalentdosis von über 6 Sv besteht nahezu keine Überlebenschance.

Direkte Auswirkungen auf den Menschen:

- Durch die radioaktive Strahlung werden die Gene der menschlichen Zelle beschädigt. Bis zu gewissen Grenzen können solche Beschädigungen erkannt und korrigiert werden. Wenn jedoch zu viele Gene zerstört werden, kommt es zu dauerhaften Schäden. Diese Schäden können sich über das Erbgut (Mutation) auf Folgegenerationen auswirken.
- Die ionisierende Wirkung der Strahlung führt zu einer chemischen Veränderung von lebenden Zellen. Insbesondere empfindliche Gewebe (Knochenmark, Haut, usw.) sind stark gefährdet.

6 Strahlenschutz

α -, β - und γ -Strahlen sind von ionisierender Natur welche beim radioaktiven Zerfall entstehen.

- α -Strahlen haben nur eine sehr kurze Reichweite. Im Normalfall können sie nicht einmal die Haut durchdringen. Eine Gefährdung entsteht nur beim Einatmen oder bei der Einnahme über die Nahrung.
- β -Strahlen können einige mm in den Körper eindringen. Sie können zu Hautverbrennungen führen. Werden Betastrahler in den Körper aufgenommen können hohe Strahlenbelastungen in der Umgebung des Strahlers die Folge sein. Gut dokumentiert ist Schilddrüsenkrebs als Folge von radioaktivem ^{131}Iod (Iod-131), das sich in der Schilddrüse sammelt. In der Literatur findet man auch Befürchtungen, dass ^{90}Sr (Strontium-90) zu Knochenkrebs und Leukämie führen kann, da sich Strontium wie Calcium in den Knochen anreichert. Ein optimaler Schutz entsteht durch die Kombination von Plexiglas und Blei.
- γ -Strahlung ist eine besonders durchdringende, energiereiche elektromagnetische Strahlung: Die Intensität der γ -Strahlen nimmt beim Durchgang durch Materie ab. Die Intensität nimmt quadratisch mit dem Abstand zur Strahlungsquelle ab (doppelter Abstand, viertel der Intensität). Je dichter ein Stoff ist, umso stärker wird die Strahlung abgeschwächt (Halbwertsdicken: 1 cm Blei = 2 cm Eisen = 7 cm Beton = 15 cm Wasser) Die Folgen können am bestrahlten Organismus selbst (somatische Schäden) oder, durch Schädigung des Erbguts, an seinen Nachkommen als genetische Schäden auftreten. Die Funktionsfähigkeit der Zellen bleibt auch bei hohen Strahlendosen zunächst meist erhalten. Sobald sich die Zelle aber teilt oder Proteine produziert, können Veränderungen am Erbgut und Schäden an Zellen zum Absterben der Zelle führen. Die Strahlenkrankheit wirkt deswegen erst nach einiger Zeit tödlich.

Allgemein gilt für die Energie einer elektromagnetischen Strahlung (Vakuum):

$$W = h \cdot f \quad (6.1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6.2)$$

h Plancksches Wirkungsquantum

f Frequenz der Strahlung

λ Wellenlänge

7 Brennstoffkreislauf

Die Urangehalte von Erzen sind sehr gering. Aus einer Tonne Erz lässt sich etwa 1 kg Urankonzentrat (U_3O_8) gewinnen. Dieses gelbe Urankonzentrat wird mit Fluor in das gasförmige Uranhexafluorid (UF_6) umgewandelt. Bei der anschließenden Anreicherung wird der spaltbare Anteil des Urans (^{235}U) erhöht.

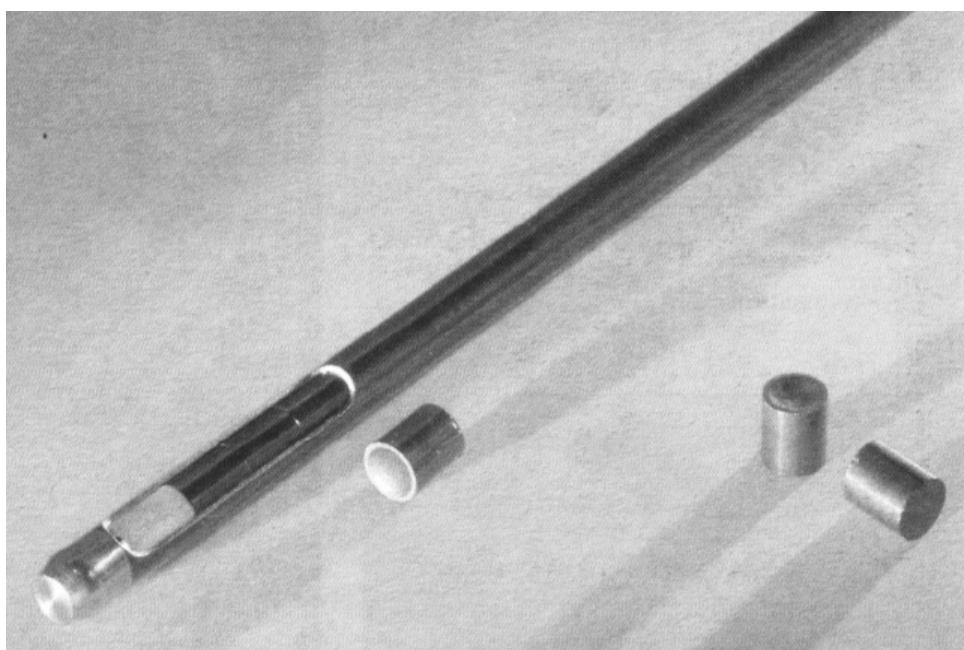


Abbildung 7.1: Brennstab

Aus dem Uranhexafluorid wird auf chemischem Weg Urandioxidpulver (UO_2) hergestellt, in Tabletten gepresst und bei etwa 1700°C gesintert.

Diese Tabletten werden nach einem Schleifprozess in die Hüllrohre („Brennstäbe“) gefüllt und diese dann gasdicht verschlossen. Diese Brennstäbe können ohne besondere Strahlungsschutzvorkehrungen transportiert werden.

Nach der Verwendung im Kernkraftwerk enthalten die Brennstäbe etwa 3 % radioaktives Material. Sie werden im Kraftwerk ein Jahr lang gelagert. Anschließend kommen sie in spezielle Stahlbehälter zur Zwischenlagerung oder zur Wiederaufbereitung.

Dieendlagerung erfolgt in Gesteinsschichten des tiefen geologischen Untergrunds.

8 Kernfusion

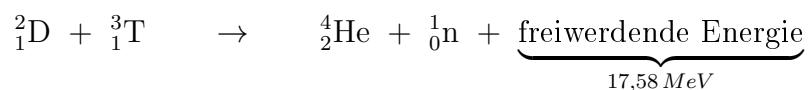
Ein Beispiel für die Kernfusion ist die Sonne, bei der durch die Verschmelzung von Wasserstoffkernen Energie freigesetzt wird.

Das Prinzip der Kernfusion wurde bereits 1929 vermutet. Die ersten Untersuchungen zur Nutzung der Fusionsenergie begannen Ende um 1949 in der USA, Russland und Großbritannien.

Dass die Kernfusion realisierbar ist, wurde durch die Entwicklung der Wasserstoffbombe 1950 bewiesen. Die friedliche Nutzung erweist sich als ungleich schwieriger und aufwendiger. Um die positiv geladenen Atomkerne zu verschmelzen müssen die abstoßenden Kräfte überwunden werden. Die zwei Kerne müssen mit hoher Geschwindigkeit aufeinander zufliegen. Dazu sind hohe Temperaturen (100 bis 200 Millionen Grad) notwendig. Das Plasma wird in Magnetspulen festgehalten.

Deuterium ist in genügender Menge in den Weltmeeren vorhanden, Tritium lässt sich aus dem ebenfalls reichlich vorkommenden Lithium durch Brutreaktion mit dem schnellen Neutron der Fusion im Kraftwerk erzeugen.

Reaktionsgleichung:



Kurz kann gesagt werden, dass Deuterium und Tritium zu Helium verschmilzt.

Vorteile der Kernfusion:

- Es wird nur eine äußerst geringe Brennstoffmenge benötigt.
- Es gibt keine Kettenreaktion und damit kein „Durchgehen“.
- Änderungen der Betriebsbedingungen bringen den Brennvorgang zum Erlöschen.
- Die radioaktiven Substanzen wie Tritium haben ein relativ niedriges biologisches Gefährdungspotenzial.

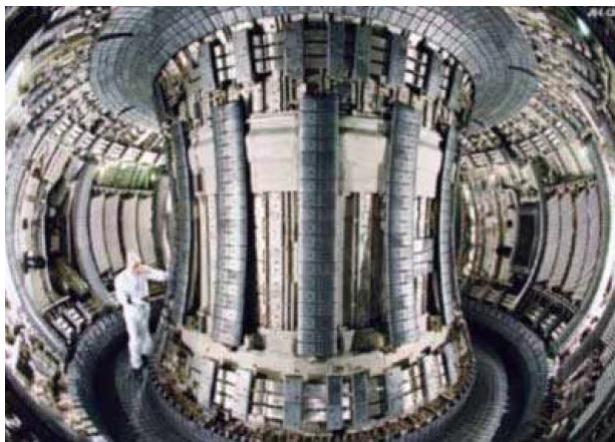


Abbildung 8.1: Fusionsreaktor

Für das Erreichen der hohen Plasmatemperatur ist zunächst eine große Energie aufzuwenden, ehe im Plasma so viele Fusionen stattfinden, dass die Temperatur ohne äußere Energiezufuhr gehalten wird („Zündung“).

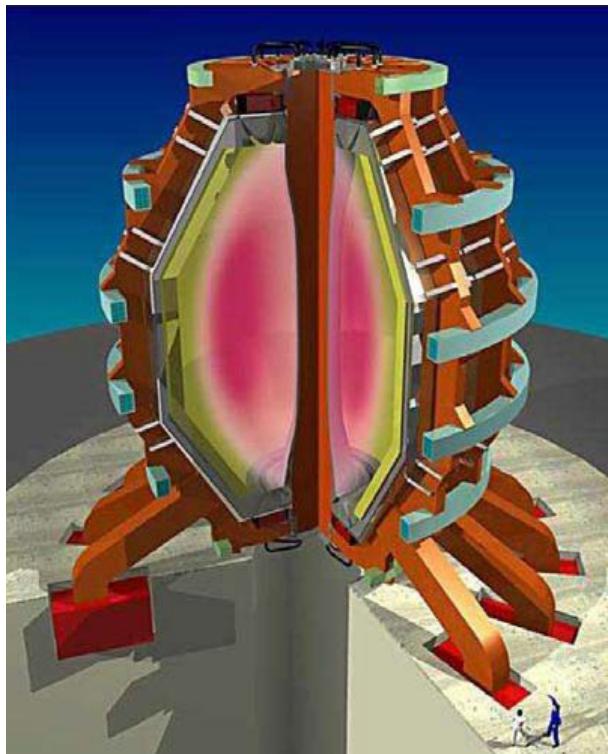


Abbildung 8.2: Plan eines Fusionsreaktor

Zurzeit kann diese Zündung noch nicht erreicht werden. Vorsichtige Schätzungen gehen davon aus, dass frühestens in 50 Jahren ein wirtschaftlich arbeitendes Kraftwerk gebaut werden kann.

Die Konstruktion dieses in Culham (bei Oxford, GB) geplanten Reaktors wird dominiert von riesigen Spulen zur Erzeugung des notwendigen Magnetfeldes. Man spricht von Strömen in der Größenordnung $30 \cdot 10^6 A$.

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) ist ein im Bau befindlicher Kernfusionsreaktor, mit dem notwendige Erkenntnisse auf dem Weg zu vielleicht möglichen Fusionsskraftwerken gewonnen werden sollen.

Der Reaktor basiert auf dem **Tokamak-Konzept**. Tokamak ist ein Konzept, bei dem das heiße Plasma in einem Torus von Magnetfeldspulen eingeschlossen wird.

Er wird im Vergleich zu seinem Vorgänger JET wesentlich größer und mit supraleitenden Magnetspulen ausgestattet. Das erste Plasma soll 2020 erzeugt werden, ab 2027 sind Experimente mit Deuterium und Tritium vorgesehen.

ITER wird im Forschungszentrum **Cadarache** als gemeinsames Forschungsprojekt der sieben gleichberechtigten Partner Europäische Atomgemeinschaft, Japan, Russland, Volksrepublik China, Südkorea, Indien und USA entwickelt, gebaut und betrieben.

Alternativkonzept **Stellarator**:

Die andere Möglichkeit, auf Basis der Torusform die spiralförmige Verdrillung der Magnetfeldlinien herbeizuführen, wird im Stellarator genutzt. Hier werden Torus und Magnetfeldspulen selbst bereits so verdrillt, anschaulich in Form eines Möbiusbandes, dass auch der poloidale (im Querschnitt des Ringes wirksame) Anteil des Feldes durch die Spulen erzeugt wird, anstatt durch einen im Plasma induzierten Strom wie beim Tokamak.