

6. Energiegewinnung aus Kernreaktionen

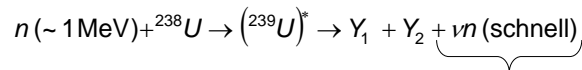
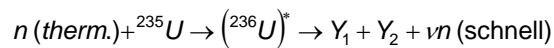
6.1 Kernspaltung und Kernkraftwerke (KKW)

Nützlich: M. Volkmer, Basiswissen Kernphysik (web)
<http://www.kernenergie.net/>

Motivation

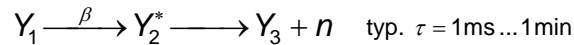
Bei der Spaltung von 1 kg Uran wird die gleiche Energie frei, wie bei der Verbrennung von 750 t Kohlenstoff ($\rightarrow 2770 \text{ t CO}_2$). Bem.: In realistischen Reaktoren werden aber nur etwa 5% des eingesetzten Brennstoffs gespalten.

a) Spaltreaktion



Im Mittel 2.3 Neutronen (schnell)

Neben direkten Neutronen entstehen auch verzögerte Neutronen ($\sim 1\%$)

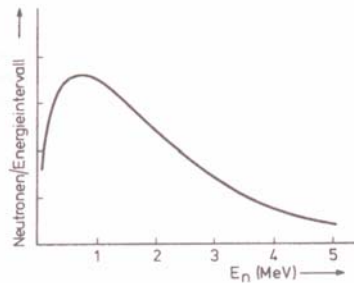


Energieverteilung der entstehenden Neutronen:

$$\frac{dN}{dE} \sim \sqrt{E} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

$$\langle E \rangle \approx 2 \text{ MeV}$$

d.h. Mehrzahl der Neutronen ist sehr schnell



b) Energiebilanz bei Spaltung

E_{kin} der Spaltfragmente	167	\pm	5 MeV
E_{kin} aller Spaltneutronen	5	\pm	0.2 MeV
prompte γ -Strahlung	8	\pm	1.5 MeV
verzögerte γ -Strahlung	6	\pm	1 MeV
E_{kin} der e^- aus dem β -Zerfall	6	\pm	1 MeV
E_{kin} der $\bar{\nu}_e$ aus dem β -Zerfall	12	\pm	2.5 MeV
Summe Q	204	\pm	6 MeV

Nutzbare Energie

$$Q - E_{kin}(\nu) = 192 \text{ MeV}$$



$$1 \text{ g U} \equiv 2.55 \text{ MWh}$$

c) Kettenreaktion

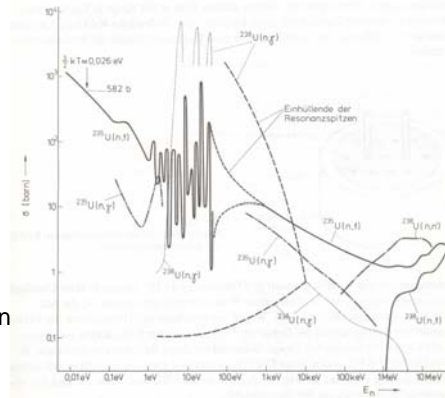
Die bei der Spaltung ausgelösten ν Neutronen können an einer Reihe unterschiedlicher Reaktionen teilnehmen und für weitere Spaltung verloren gehen.

Beispiel: (n,γ) Absorptionsreaktion $n + U \rightarrow U^* \rightarrow U + \gamma$

Statt ν verwendet man die Größe η
(Regenerations(Vermehrungs)faktor)

$$\eta = \frac{\text{Anzahl der Spaltneutronen}}{\text{Anzahl der absorbierten } n} = \frac{\nu \cdot \sigma_f(n, f)}{\sigma_f(n, f) + \sigma_R}$$

σ_R = Reaktionsquerschnitt für alle anderen Neutron-induzierte Reaktionen



Eine Kettenreaktion kann nur stattfinden wenn $\eta > 1$.

Für ^{238}U ist der WQ für inelastische Stoßprozesse $\sigma(n, n', \gamma)$ größer als der Spaltquerschnitt $\sigma(n, f)$. In ^{238}U kann keine Kettenreaktion stattfinden.

Eine Kettenreaktion ist nur mit thermischen Neutronen und Spaltung von ^{235}U möglich: \rightarrow Abbremsen (Moderation) der Neutronen.

Beim Abbremsen in Natur-Uran (99.3% ^{238}U + 0.7% ^{235}U) bzw. in angereicherterem Uran (97% ^{238}U + 3% ^{235}U) durchlaufen die Neutronen Energien zwischen 100 eV ... 1 eV für die der WQ $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ sehr groß ist $\rightarrow \eta$ wird < 1 .

→ Abbremsen in einem vom Brennstoff getrennten Moderator

Moderatoren

Moderator	$\lambda_{\text{abs}} / \text{cm}$	$\lambda_{\text{elastisch}} / \text{cm}$	Bremslänge /cm (schnell \rightarrow langsam)
H ₂ O	51.8	0.43	5.3
D ₂ O	13000	2.4	11.2
¹² C	2500	2.7	19.2

} auch als Kühlmittel geeignet

Kritische Masse:

In hochangereichertem ^{235}U (>90%) oder ^{239}Pu ohne Neutronen absorbierende Fremdkerne kommt es bei genügend großer Masse (möglichst kugelförmig) zu einer unkontrollierten Kettenreaktion.

Nuklid	Kritische Masse bei Kugelform	
	unreflektiert	durch Wasser refl.
U-235	49 kg	23 kg
Pu-239	10 kg	5.4 kg

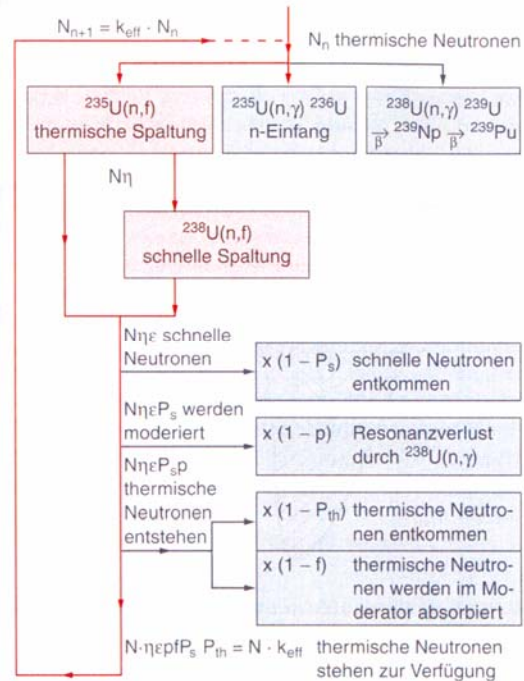
Neutronenbilanz für Kernreaktor (97% ^{238}U + 3% ^{235}U)

nte Generation: N_n therm. Neutronen

- η Regenerationsfaktor
- ϵ Schnellspaltfaktor
- P_s Wahrsch. schnelles Neutron bleibt im Reaktor (endl. Reaktor)
- P_{th} Wahrsch. therm. Neutron bleibt im Reaktor (endl. Reaktor)
- p Wahrsch. für n Abbremsung ohne Resonanzeinfang
- f Nutzungsfaktor: Anteil der nicht im Moderator absorbiert wird

➔ (n+1)te Generation:

$$N_{n+1} = \eta \epsilon P_s p P_{th} f \cdot N_n$$



Neutronenbilanz

Therm. Neutronen in (n+1)ter Generation:

$$N_{n+1} = \eta \varepsilon P_s p P_{th} f \cdot N_n \equiv k_{eff} \cdot N_n \quad k_{eff} = \text{effektiver Vermehrungsfaktor}$$

$$\frac{N_{n+1} - N_n}{T} = \frac{k_{eff} - 1}{T} \cdot N_n \quad T = \text{Mittlere Zykluszeit zwischen Generationen (typ. } 1 \mu\text{s, Abbremszeit)}$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{k_{eff} - 1}{T} \cdot N \quad \Rightarrow \quad N(t) = N_0 \exp\left(\frac{k_{eff} - 1}{T} \cdot t\right)$$

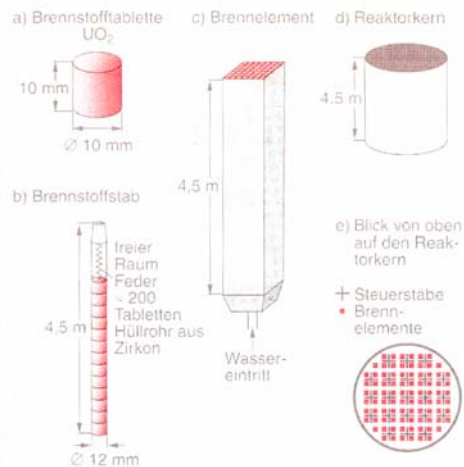
Stationärer Betrieb eines Reaktors: $k_{eff} = 1$ $k_{eff} \equiv k_{\infty} P_s P_{th}$

Für unendlich großen Reaktor: $P_s = P_{th} = 1$

Vierfaktorformel:

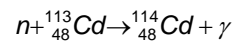
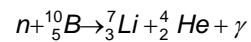
$$k_{\infty} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f = 1$$

d) Aufbau eines Reaktors: Druckwasserreaktor – gängigster Typ in D



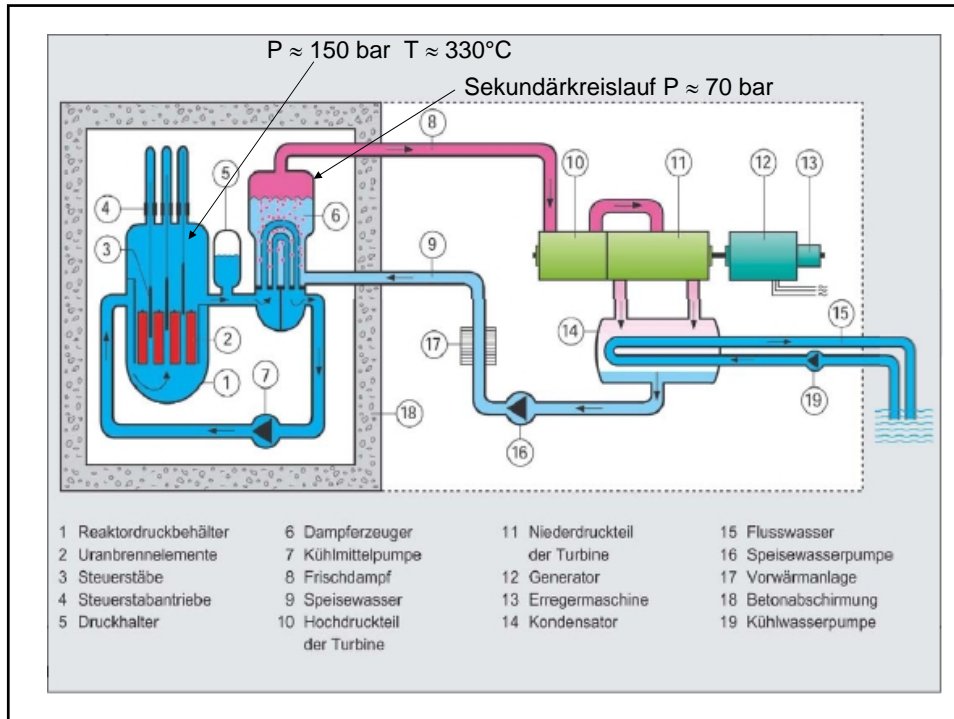
Steuerstäbe:

Material mit großer Neutronen-Absorption: B, Cd, In, Ag



typische Daten (Brokdorf 1993):

Kernbrennstoff	UO_2
Anreicherung ${}^{235}\text{U}$	1.9 – 3.5%
Brennstoffmenge	103 t
thermische Leistung	3.8 GW
elektr. Nettoleistung	1.3 GW
Wirkungsgrad	35%



e) Steuerung und Betrieb eines Reaktors

Reaktivität $\rho \equiv \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$ ➔ Zahl der Neutronen $N(t) = N_0 \exp\left(\frac{\rho k_{\text{eff}}}{T} \cdot t\right)$
➔ $\rho = 0$: Stationärer Betrieb

Zykluszeit T (typ. $1 \mu\text{s}$) ist zu schnell für eine Regelung mit Steuerstäben.

Zur Steuerung wichtig sind die verzögerten Neutronen ($\tau = 0.1 \dots 60 \text{ s}$):

Verzögerte Neutronen: $N_n^v = \beta \cdot N_n$ mit $\beta \approx 0.7\%$

- Regelung:
- $\rho < 0$: Reaktor schaltet ab
 - $0 < \rho < \beta$: Reaktor fährt langsam hoch
Regelzeit für Absorberstäbe $\sim 10 \text{ s}$
 - $\rho > \beta$: schnelles Anwachsen der Spaltprozesse
 - $\rho = 0$: Stationärer Betrieb

Beim Anfahren des Reaktors wird künstliche Neutronenquelle benutzt: $\rho > 0$

Selbstregelung:

- Bei Leichtwasser Reaktoren (H₂O als Moderator)

$k_{\text{eff}} > 1 \rightarrow$ mehr Wärme

\rightarrow Moderator H₂O verdünnt sich

$\rightarrow k_{\text{eff}}$ sinkt

\rightarrow Wärmebewegung \rightarrow Dopplerverbreiterung der Resonanzen $\rightarrow k_{\text{eff}}$ sinkt

Sinnvolles Design: $\frac{dk_{\text{eff}}}{dT} < 0 \rightarrow$ Selbstabschaltung

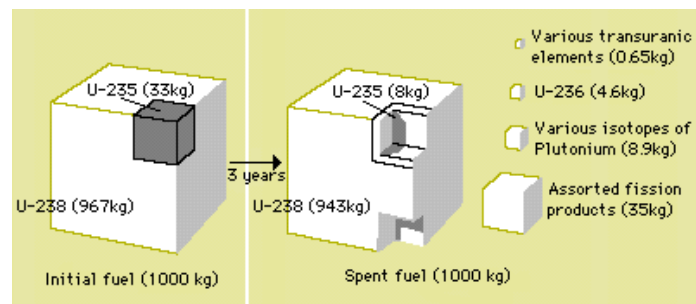
- Graphit-Moderierte Druckröhren-Reaktoren (Tschernobyl Typ)

Kühlmittel: H₂O

$$\left. \frac{dk_{\text{eff}}}{dT} \right|_{\text{H}_2\text{O}} > 0$$

Reaktor neigt zu Instabilitäten insbesondere beim Entfernen fast aller Steuerstäbe

Abbrand:



Bei mittlerem Abbrand:

1 t angereichertes Uran \rightarrow ~10 GWd an elektrischer Energie

KKW mit 1 GW Leistung \rightarrow 30 t angereichertes Uran / Jahr

Typischer Reaktor (1.3 GW) enthält etwa 100 t Uran.

e) Reaktortypen

Klassifizierungskriterien:

- Trennung von Spaltstoff und Moderator: homogene, heterogene Reaktoren
- Moderator: Leichtwasser (H_2O), Schwerwasser (D_2O), Graphit
- Kühlung/Kühlmittel:
 - Druckwasser-Reaktoren **DWR**: H_2O , Primärkreislauf bei hohem Druck, Sekundärkreislauf bei niedrigem Druck.
 - Siedewasser-Reaktor **SWR**: Kombiniertes Kühl- und Dampfkreislauf.
 - Gasgekühlte Reaktoren mit CO_2 , He_2 (→ Hochtemperatur Reaktor **HTR**)
 - Fl. Natrium-Kühlung (→ schneller Brüter **SBR**)
- Brutverhalten

Typische Betriebsparameter für 1000 MW-Reaktoren (η Wirkungsgrad)

	Moderator	Kühlung	Brennstoff	Anreicherung	Abbrand MW/t	$^{\circ}C/atm$	η	Zahl der Kühlkreise
DWR	H_2O	H_2O	100 t	3 %	$3 \cdot 10^4$	330/160	33%	2
SWR	H_2O	H_2O	100 t	2.7%	$2.8 \cdot 10^4$	290/70	34%	1
HTR	C	He	40 t	4 % (93%)	10^5	800/48	38%	2
SBR	-	Na	19 t	12 %	$7 \cdot 10^4$	600/<10	42%	2(3)

Brut-Reaktoren:

“Schneller Brüter“

erzeugt spaltbares ^{239}Pu aus ^{238}U

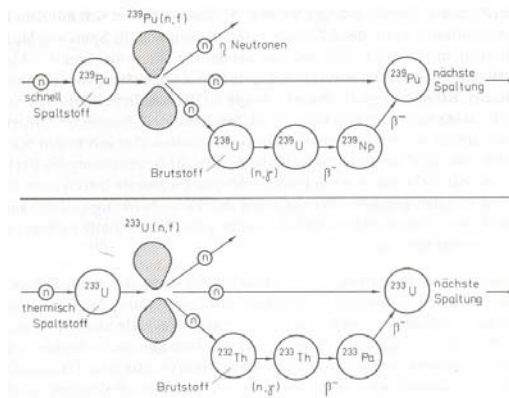
H_2O als Kühlmittel nicht möglich (wirkt als Moderator)

→ Verwendung von fl. Natrium.

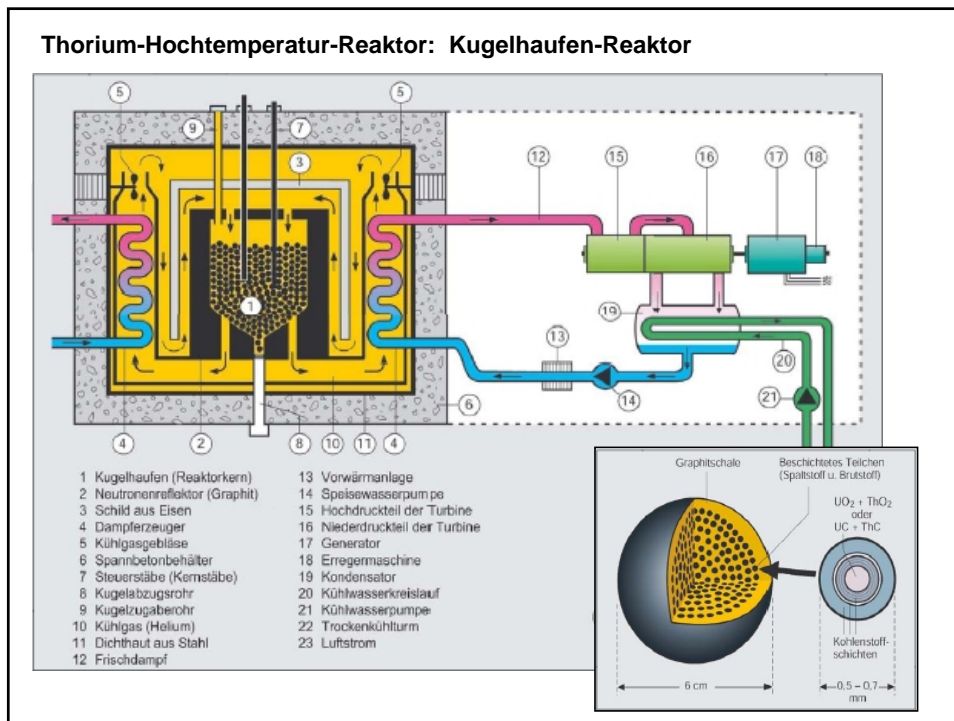
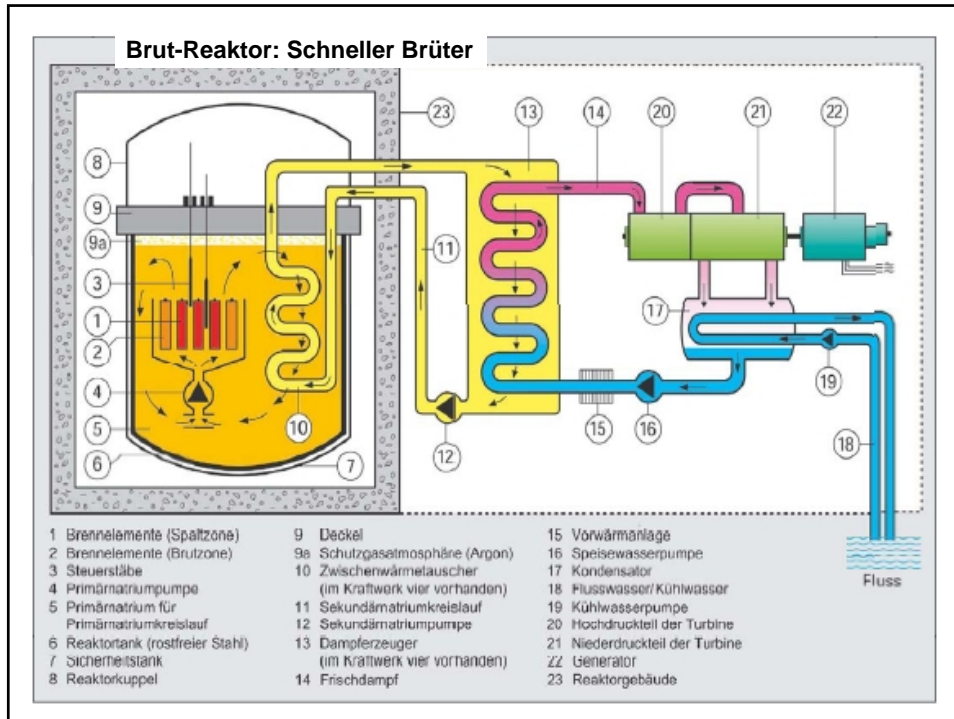
Probleme: fl. Na sehr aggressiv, Na wird radioaktiv → mehrere Kühlkreisläufe

“Thorium Brüter“

erzeugt spaltbares ^{233}U aus ^{232}Th



Brut-Reaktoren: Bessere Nutzung des Urans bzw. Nutzung von Thorium (größere Welt-Reserven als für Uran)



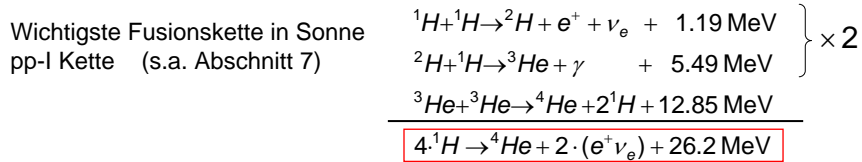
6.2 Kernfusion und Fusionsreaktoren

http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/presse/pi/kernfusion_berichte_02.pdf

a) Kontrolliertes "Sonnenfeuer" auf der Erde

- Bei Fusion ist die freigesetzte Energie pro fusionierender Masse sehr viel größer als bei Spaltung
- Leistungsdichte ϵ_F der Sonne ist aber gering: KKW $\epsilon_F = 10^8 \text{ W}_{\text{th}}/\text{m}^3$

$$\text{Sonne } \epsilon_F = 0.3 \cdot 10^3 \frac{\text{W}_{\text{th}}}{\text{m}^3} \text{ Zentrum}$$



- Radioaktive Abfälle sehr viel kurzlebiger als bei Spaltung
- Rohstoff ist fast unbegrenzt vorhanden

b) Bedingungen für Kernfusion

Überwindung (Durchtunneln) der Coulomb-Barriere der Kerne

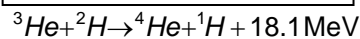
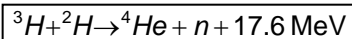
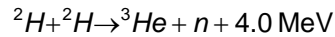
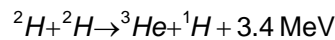
$$V_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad K_1 \xrightarrow{E_{\text{Kin}}, v} K_2$$

$$E_{\text{Kin}} \approx 10 \text{ keV} \dots 100 \text{ keV} \leftrightarrow T \approx 10^{8 \dots 9} \text{ K}$$

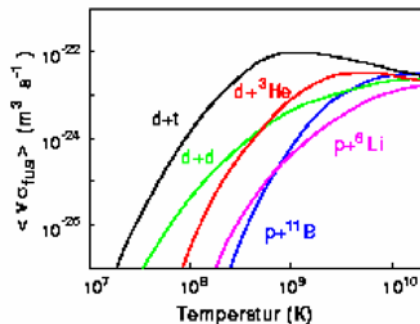
Tunneleffekt:

$$\sigma_f(v) \sim e^{-2G} \quad \text{mit } G \sim \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{v} \quad \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Z_1, Z_2 \text{ klein } (= 1 \text{ !!}) \\ v \text{ } (\leftrightarrow \text{ Temperatur}) \text{ groß} \end{array} \right.$$

Mögliche Fusionsreaktionen:



aussichtsreichste Alternative:
Erzeugung von ${}^3\text{H}$ im Reaktor selbst



Plasma:

Bei den obigen Temperaturen sind die leichten H/He-Kerne im Reaktor vollständig ionisiert: es liegt ein neutrales Plasma aus Elektronen und Kernen vor.

Fusionsrate für Tritium/Deterium:

$$Z_F = n_d n_t \cdot \langle \sigma_f(v) v \rangle \quad [\text{Fusionen}/(\text{m}^3\text{s})]$$

$n_{d,t,e}$ = Deuterium/Tritium/e - Dichte

v = Relativgeschwindigkeit

σ_F = Fusionsquerschnitt

Neutrales Plasma

$$n_d = n_t = \frac{n_e}{2} \equiv \frac{n}{2}$$

Fusionen sind nur dann möglich wenn die Einschusszeit τ_E der Teilchen im Plasma größer ist als die Zeit bis zu einem Fusionsstoß τ_F

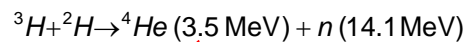
- Lange Plasma-Einschlusszeiten → magnetischer Einschluss:

$$n \sim 10^{20} / \text{m}^3 \quad \tau_E = O(10 \text{ s})$$

- Hohe Dichten → Laserinduzierte Plasmen - Trägheitseinschluss:

$$n \sim 10^{31} / \text{m}^3 \quad \tau_E \sim 10^{-10} \text{ s}$$

Zündbedingung für Plasma (Lawson Kriterium):



Plasma zugeführte Leistung

$$E_\alpha = 3.5 \text{ MeV}$$

(Neutronen bleiben nicht im Plasma)

>

Verlustleistung:

- Plasmadiffusion
- Elektronen-Bremsstr. an Kernen

Zur Berechnung wird thermisches Gleichgewicht angenommen: $T_{ion} = T_e = T$

Energiedichte:
$$U = \frac{3}{2} (n_e + n_d + n_t) \cdot kt = 3nkt$$

Diffusionszeit aus Reaktionsvolumen τ_D

Verlustleistungsdichte durch Diffusion:

$$P_D = \frac{3nkt}{\tau_D} = \frac{3n^2kT}{n\tau_D}$$

Verlustleistungsdichte durch Bremsstrahlung

$$P_\gamma = \varepsilon_\gamma n^2 \sqrt{kT} \quad \varepsilon_\gamma = 5.4 \cdot 10^{-37} \frac{\text{Wm}^3}{\sqrt{\text{keV}}}$$

Leistungsdichte durch Fusion (nur α Teilchen):

$$P_\alpha = Z_F \cdot E_\alpha = \left(\frac{n}{2}\right)^2 \langle \sigma_F(v) v \rangle \cdot E_\alpha$$

Break-even Punkt: Energie aus Fusionsreaktion produziert gerade erforderliche Plasma-Temperatur

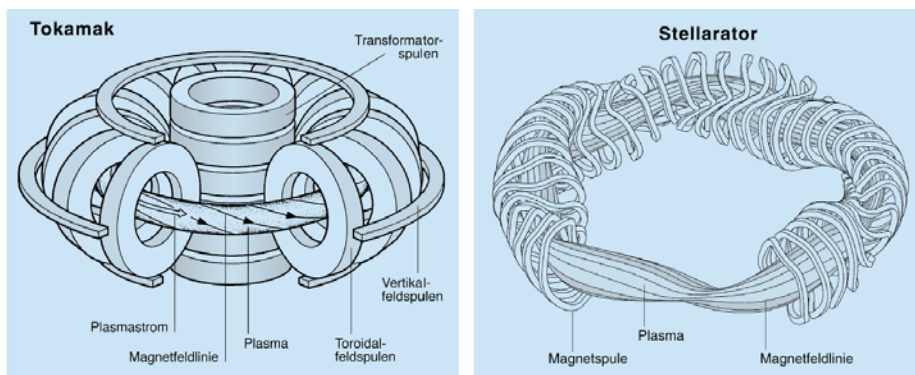
$$P_\alpha \geq P_D + P_\gamma \Leftrightarrow \frac{1}{P_D} \geq \frac{1}{P_\alpha - P_\gamma}$$

$$n\tau_D \geq \frac{3kT}{\frac{1}{4} \langle \sigma_F v \rangle \cdot E_\alpha - \varepsilon_\gamma \sqrt{kT}} \quad \text{Lawson Kriterium}$$

Beispiel: $kT \approx 10 \text{ keV}$ $\langle \sigma_F v \rangle$ (Abbildung) $\Rightarrow n\tau \approx 10^{21} \text{ s/m}^3$

c) Fusionskraftwerke: Magnetischer Einschluss

Plasma muss auf $T > 10^8 \text{ K}$ aufgeheizt werden und genügend lange eingeschlossen bleiben:



Magnetsystem:

- Toroidfeldspule
- Transformatorfeldspule \rightarrow Plasmastrom
- Vertikalfeldspule \rightarrow Pulsbetrieb

Magnetsystem:

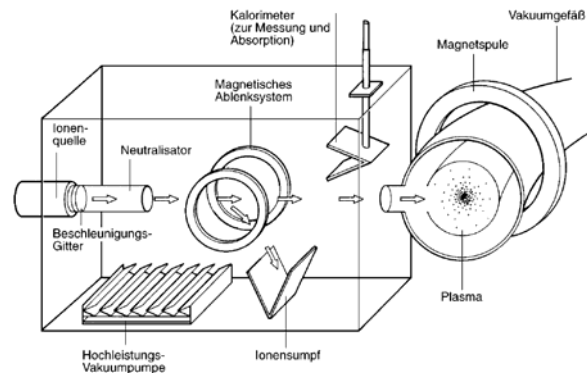
- Nicht ebene Einzelspulen \rightarrow Dauerbetrieb

Plasmaheizung

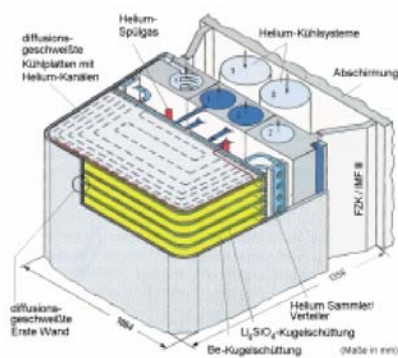
- Stromheizung (Tokamak):
Plasma = Sekundärspule eines Transformators
- Neutralteilchenheizung:
Einschuss hochenergetischer neutraler Teilchen
(^2H Atome)
- Einspeisung von HF und Mikrowellen

Neutralteilchenheizung:

D_2 dissoziiert/ionisiert
Neutralisator=Alkali-Dampf
Tangentialer Einschuss

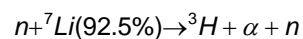
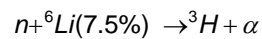


Blanket

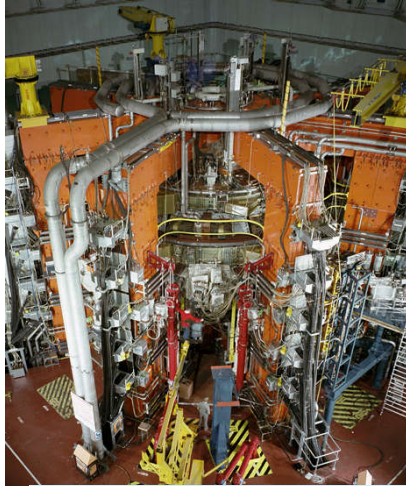


In zukünftige Kraftwerken bedeckt das etwa 1 m dicke Blanket die innere Wand des Plasmagefäßes:

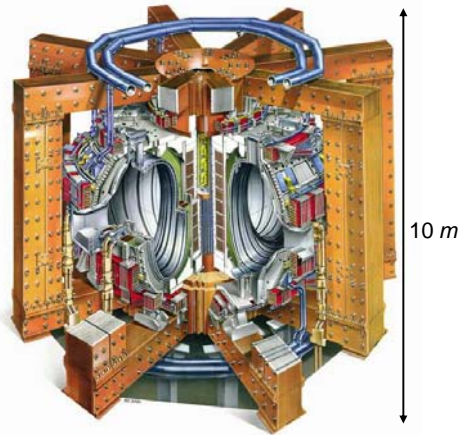
- Fusionsneutronen werden im Blanket abgebremst. Bewegungsenergie wandelt sich in Wärme um, die über Wärmetauscher abgeführt wird.
- Neutronen erzeugen hier aus Li das für die Fusion benötigte Tritium:



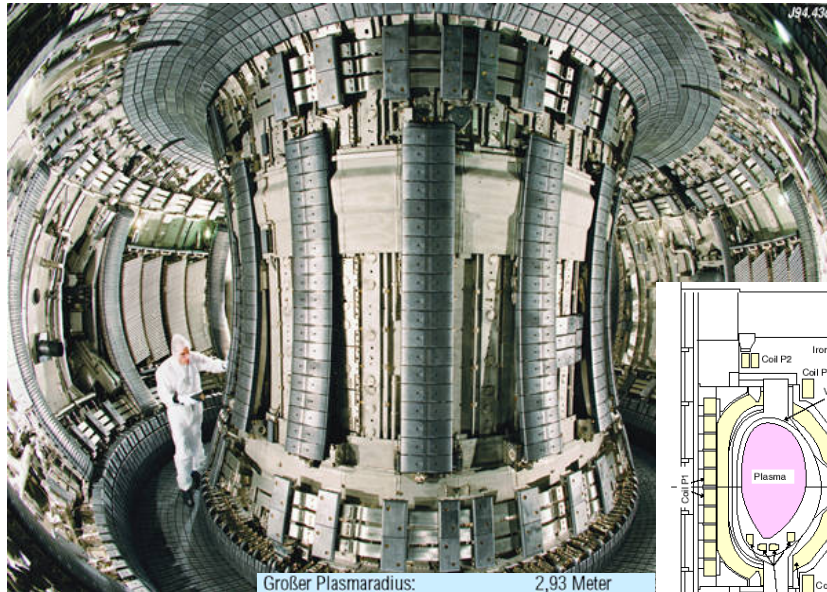
JET = Joint European Torus (Culham, GB, seit 1983 in Betrieb)



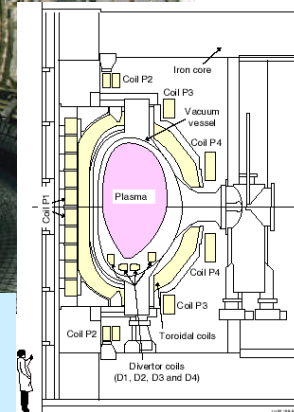
Anzahl der Toroidal­feldspulen:	32
Spulenstrom:	max. 78 Kiloampere
Magnetfeld:	max. 4,0 Tesla
Plasma­strom:	max. 5 Megaampere
Entladungs­dauer:	max. 60 Sekunden



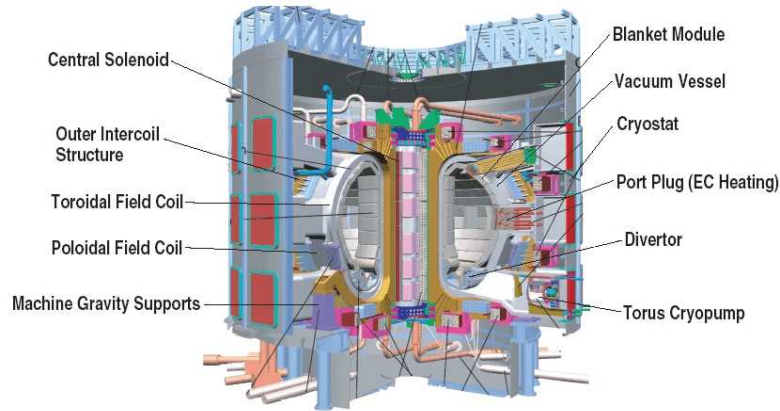
1991 Erzeugung von 1.5 MW Fusionsleistung
 1997 22 MJ Fusionsenergie in einem Puls
 16 MW Peak Fusionsleistung
 (= 65% der aufgewandten Heizenergie)



Großer Plasmaradius:	2,93 Meter
Plasmahöhe:	4 Meter
Plasmabreite:	2,5 Meter
Plasmavolumen:	80 Kubikmeter
Plasmagewicht:	0,02 Gramm

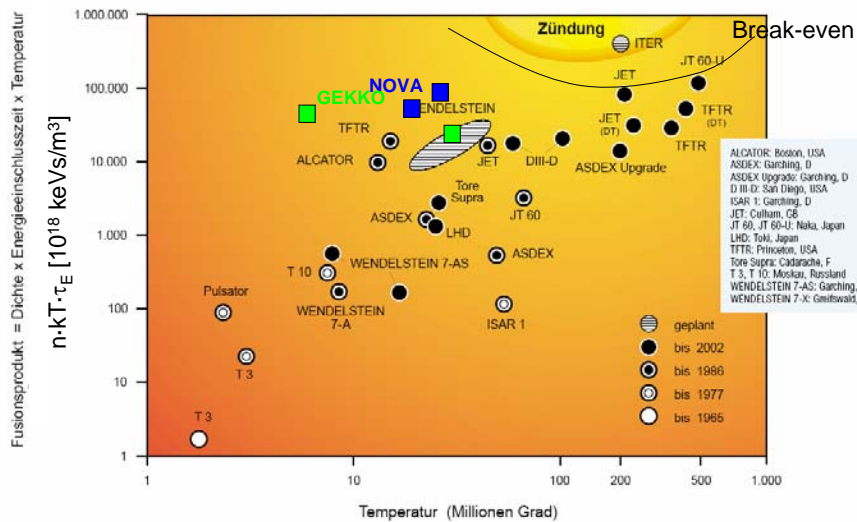


Internationaler Experimentalreaktor ITER (geplant)



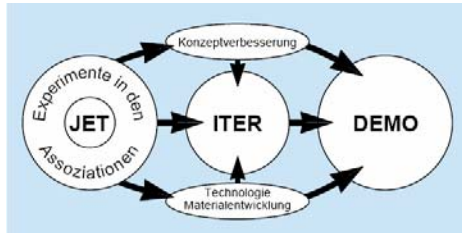
Gesamtradius (über alles):	15 Meter	Magnetfeld:	5,3 Tesla
Höhe (über alles):	30 Meter	Maximaler Plasmastrom:	15 Megaampere
Gewicht:	15000 Tonnen	Heizleistung und Stromtrieb:	73 Megawatt
Plasmaradius:	6,2 Meter	Wandbelastung durch Neutronen:	0,57 Megawatt pro m ²
Plasmahöhe:	7,4 Meter	Fusionsleistung:	500 Megawatt
Plasmbreite:	4,0 Meter	Brenndauer:	≥ 300 Sekunden
Plasmavolumen:	837 Kubikmeter		

Zündparameter $n \cdot kT \cdot \tau_E$ [10¹⁸ keVs/m³]



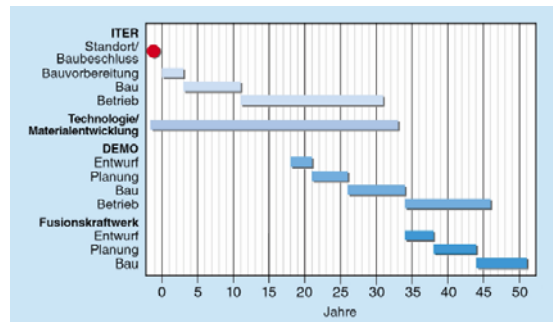
Zündparameter $ZP = n \cdot kT \cdot \tau_E = p \cdot \tau_E > 10^{21} \text{ keVs/m}^3$

Fusionsforschung



Fusionskraftwerk

Großer Plasmaradius:	9 Meter
Plasmahöhe:	10 Meter
Plasmabreite:	6 Meter
Plasmavolumen:	760 Kubikmeter
Magnetfeld:	7 Tesla
Maximaler Plasmastrom:	28 Megaampere
Startheizung und Stromtrieb:	234 Megawatt
Wandbelastung durch Neutronen:	1,8 Megawatt pro m ²
Fusionsleistung:	3400 Megawatt
Brenndauer:	Dauerbetrieb



Radioaktiver Abfall:

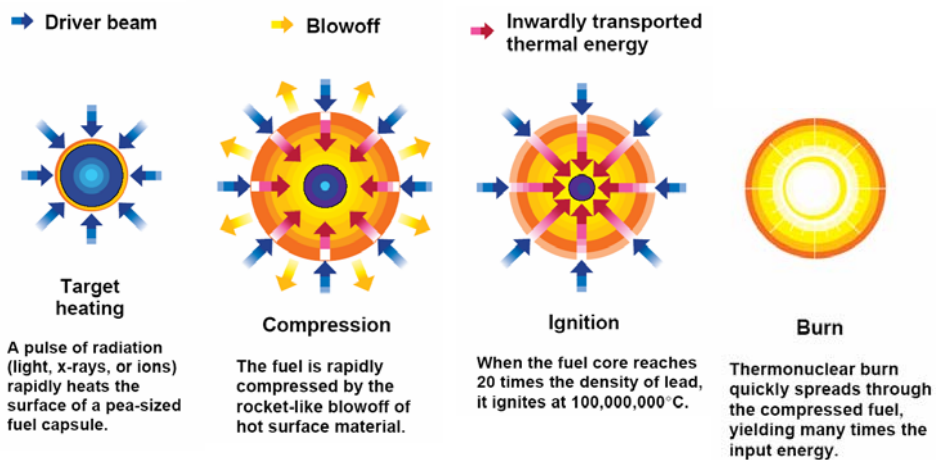
In 30-jähriger Betriebszeit fallen zwischen 65000 und 95000 t radioaktiver Abfall an (mind. soviel wie bei KKW):

$$T_{1/2} = 1 \dots 5 \text{ Jahre}$$

$$(T_{1/2} = 100 \dots 10^4 \text{ Jahre, bei KKW})$$

d) Fusionskraftwerke: Trägheitseinschluss

Kompression eines Brennstoff-Pellets: 2.5 mg d-t

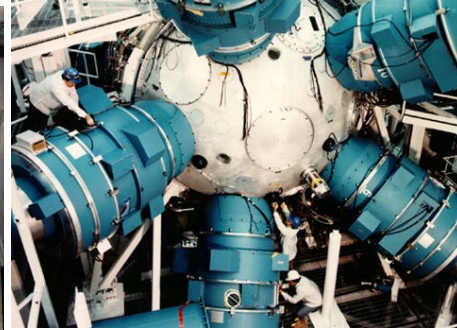


Leistungsbedarf des Laser oder Ionenstrahl-Treibers: $3 \cdot 10^6 \text{ J}$ in $0.3 \text{ ns} \leftrightarrow 10^{16} \text{ W}$

Laser-Treiber



NOVA Laseranlage



NOVA Brennkammer

Schwerionen-Treiber:

$$I=3 \cdot 10^6 \text{ A}$$

