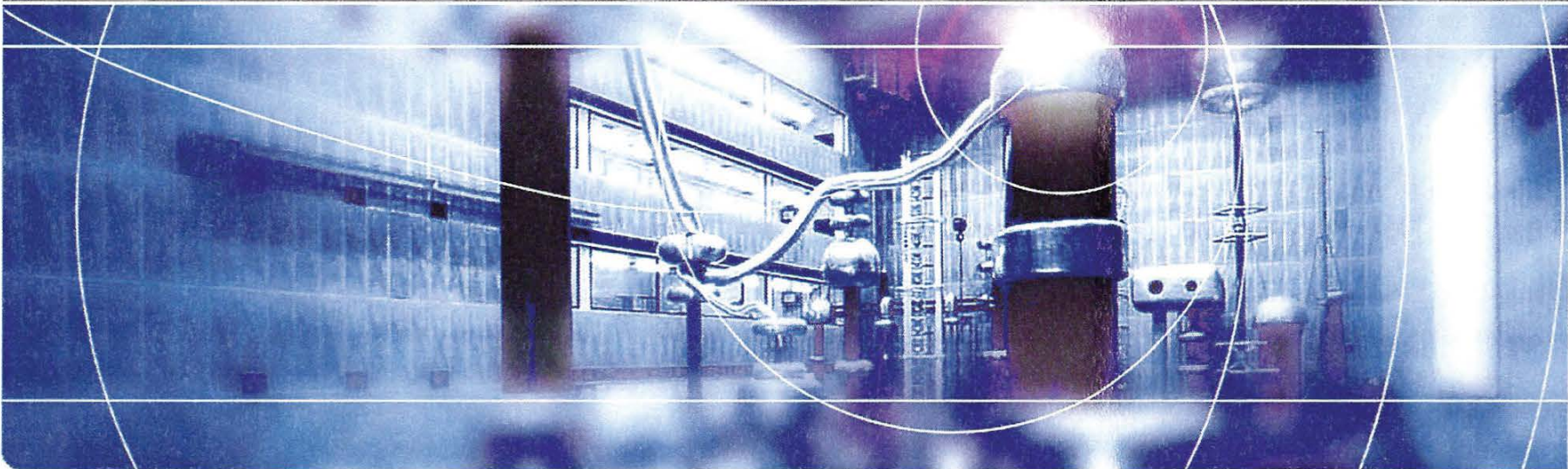


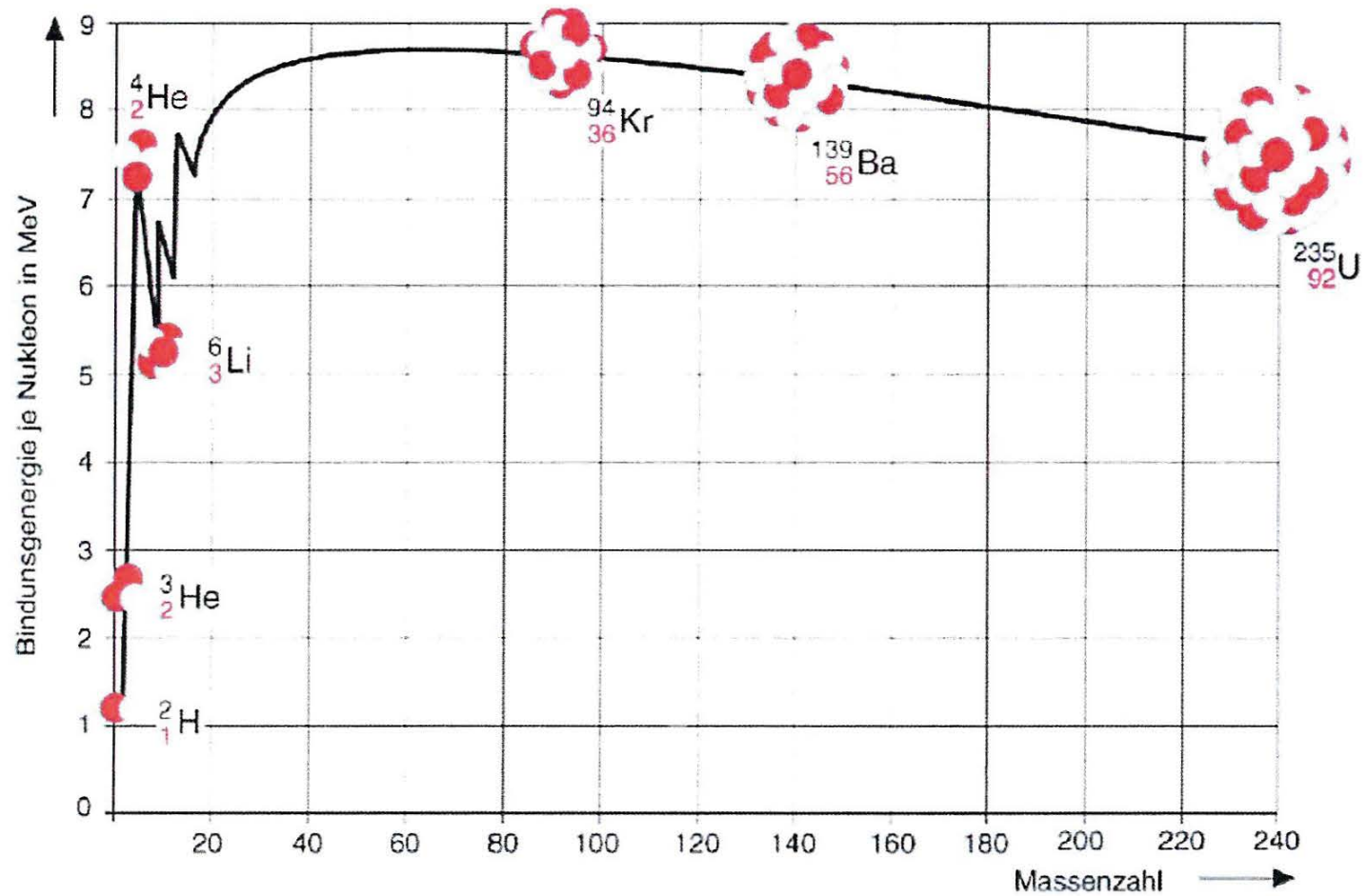
Erzeugung elektrischer Energie

Dr.-Ing. Bernd Hoferer

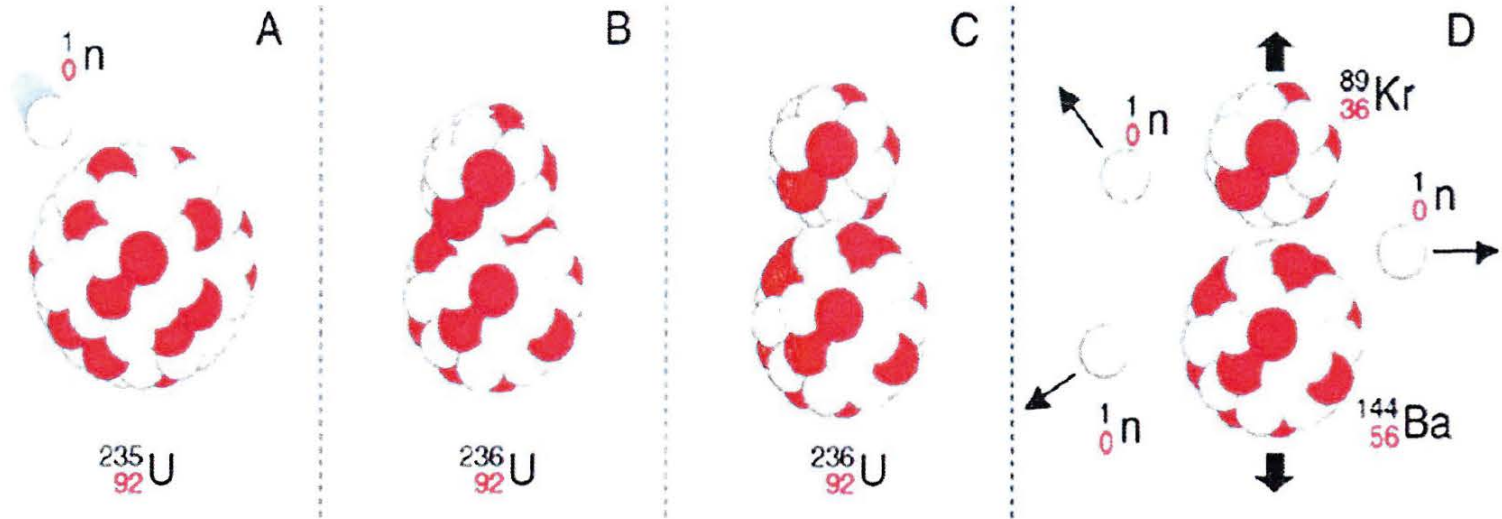
INSTITUT FÜR ELEKTROENERGIESYSTEME UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK (IEH)



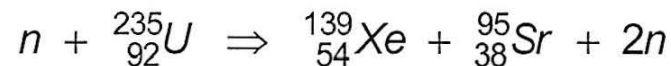
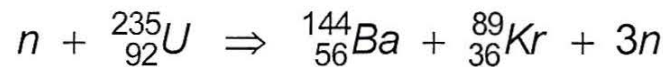
Kernkraftwerke: Bindungsenergie pro Nukleon



Kernspaltung (I)



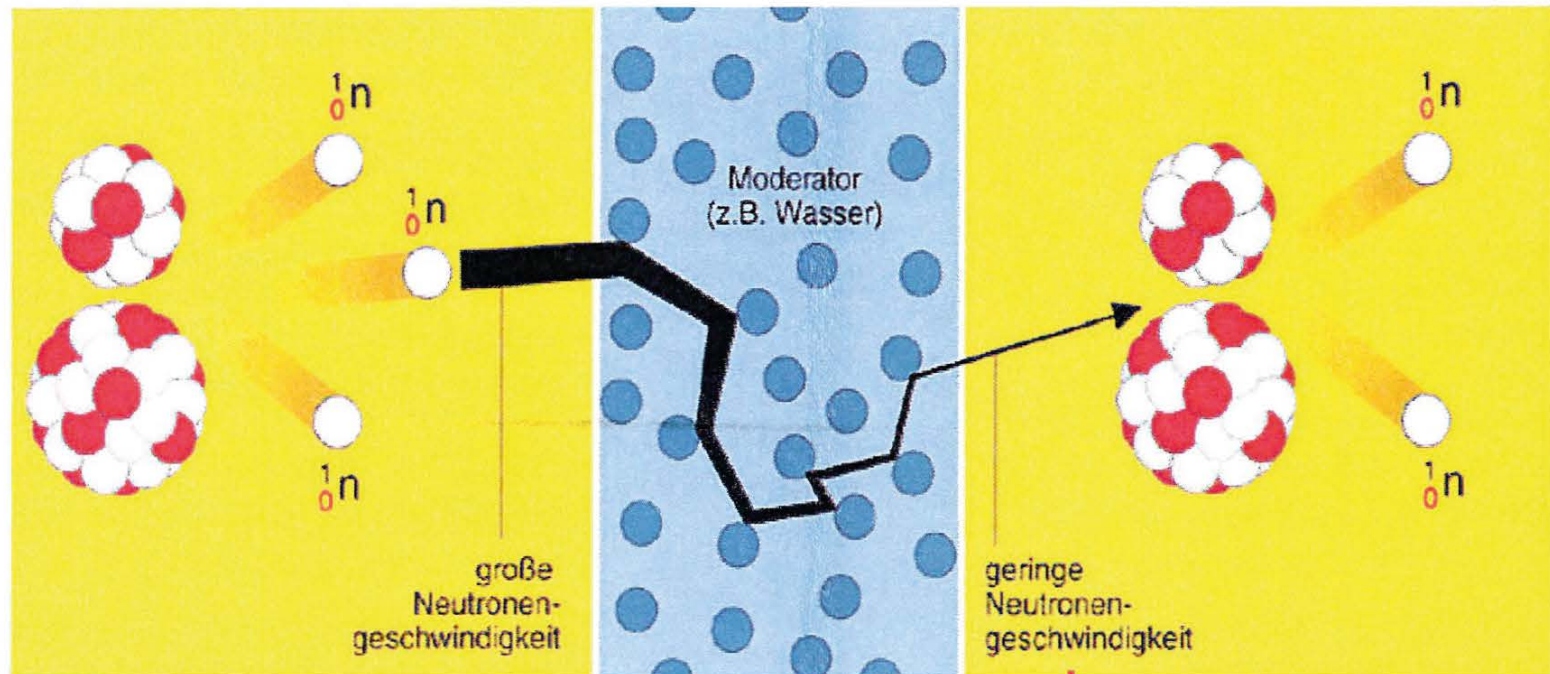
Langsames Neutron
(0,025eV) trifft
Uran-235-Kern



Frei werdende Neutronen
sind sehr schnell (2 MeV)

Nutzung frei werdender Neutronen für die nächste Spaltung erfordert abbremesen
(moderieren) dieser Neutronen

Kernspaltung (II)



thermische Neutronen

Elastischer Stoß der Neutronen an kleinen Atomkernen

Kernspaltung (III)

Uran: 0,7% Uran 235, Rest Uran 238

Uran 238: - absorbiert schnelle Neutronen
 - ist nicht spaltbar

⇒ Keine Kettenreaktion in natürlichem Uran

2 Möglichkeiten für Kettenreaktion

- 1) Materialien als Moderator (Bremsen für schnelle Neutronen) die kaum Neutronen absorbieren (D_2O , Graphit)
- 2) Anreicherung von des Brennmateriale auf einen Uran-235-Gehalt von 3...5%
dadurch: Ausgleich der Neutronenverluste durch Absorption,
Wasser (H_2O) kann als Moderator verwendet werden

Voraussetzung für eine Kettenreaktion: $k = 1$

- Die bei einer Spaltung frei werdenden Neutronen führen (im Mittel) gerade wieder zu einer Spaltung

Im Mittel gilt:

$$k = \frac{\text{Zahl der erzeugten Neutronen}}{\text{Zahl der Neutronenverluste}} = 1$$

Regelung des Reaktors durch Material, das Neutronen absorbiert (Regelstäbe)

Anfahren des Reaktors: $k > 1$

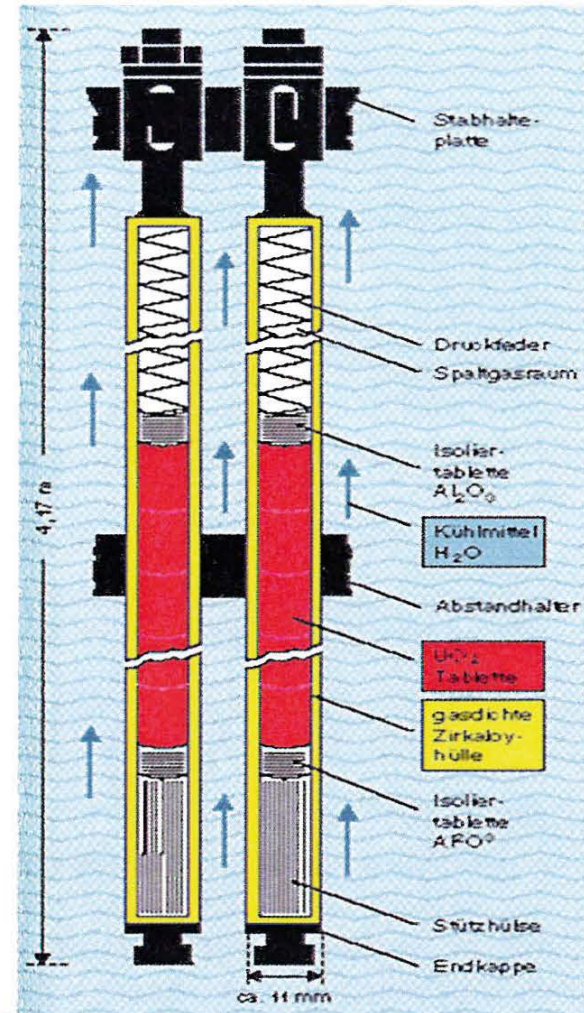
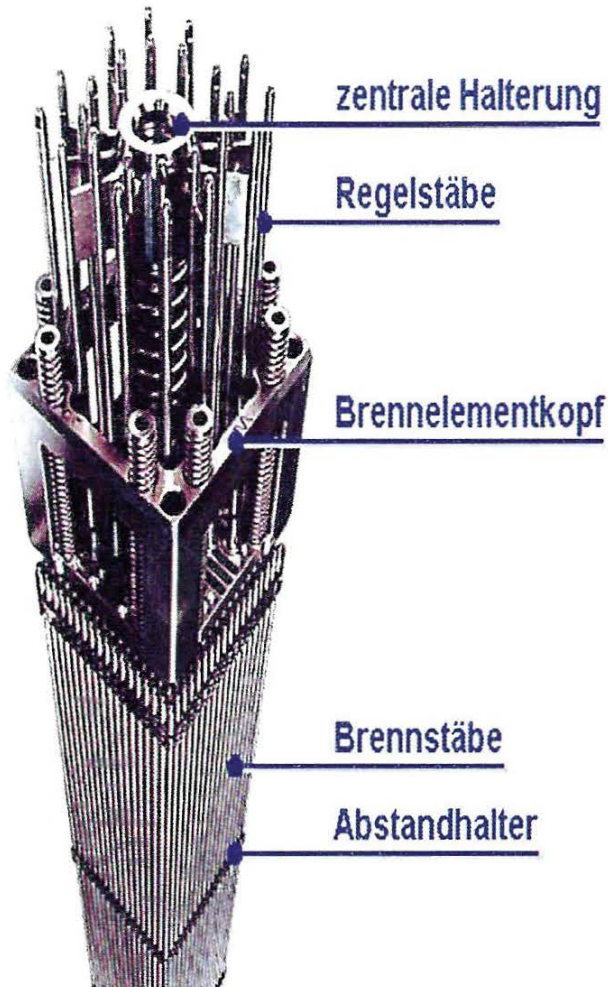
aber $k < 1,0075$: 0,75% der Neutronen werden um einige Sekunden verzögert nach der Spaltung frei. Diese Neutronen werden zum Anfahren benutzt.

Damit: mechanische Regelung der Steuerstäbe aus neutronenabsorbierendem Material möglich

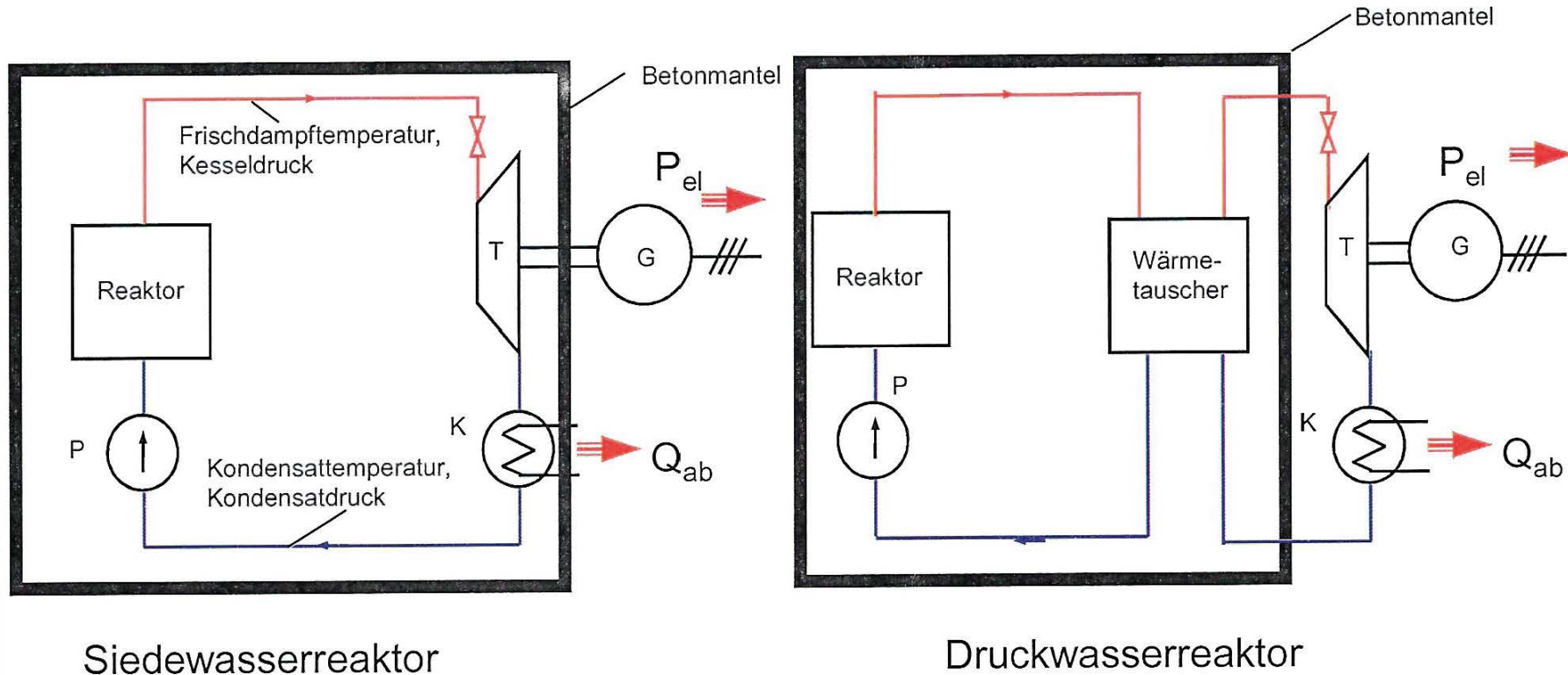
Abschalten des Reaktors: $k < 1$

Nicht jede Spaltung führt zu genau einer neuen Spaltung, der Prozeß kommt zum Erliegen

Kernreaktor

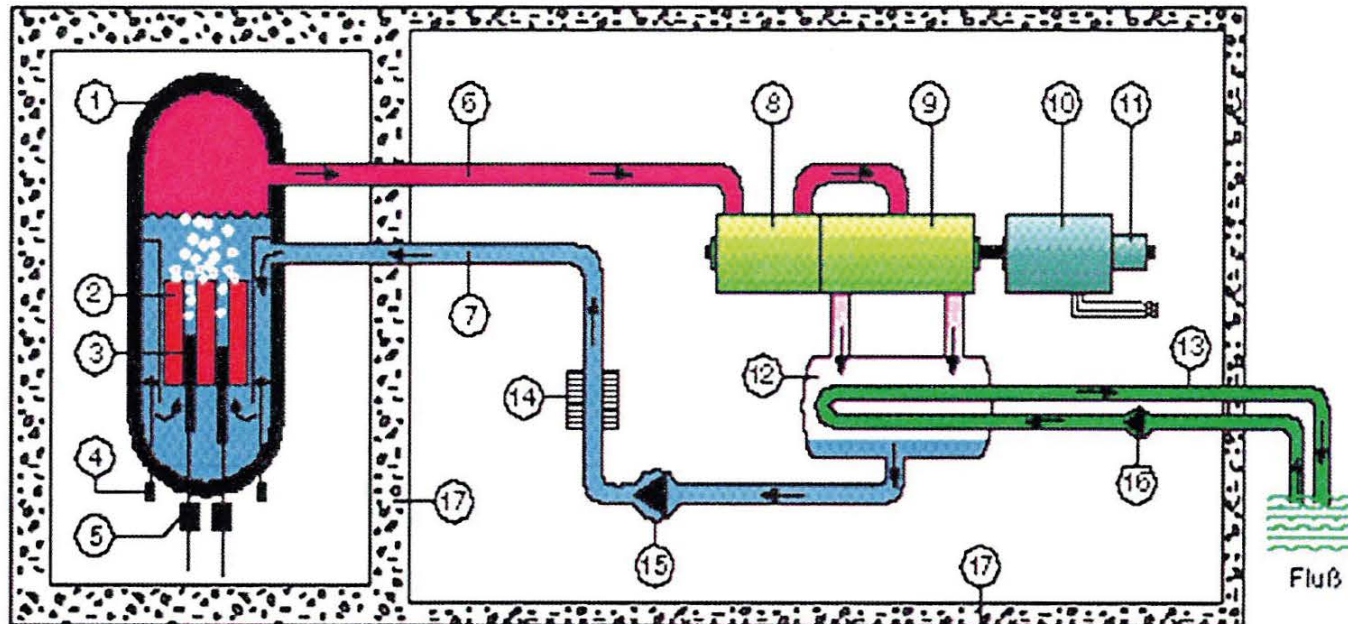


Vergleich: Siedewasserreaktor und Druckwasserreaktor



Prinzip: Spaltprodukte erwärmen die Brennstäbe, diese geben ihre Wärme an das umgebende Wasser ab

Siedewasserreaktor

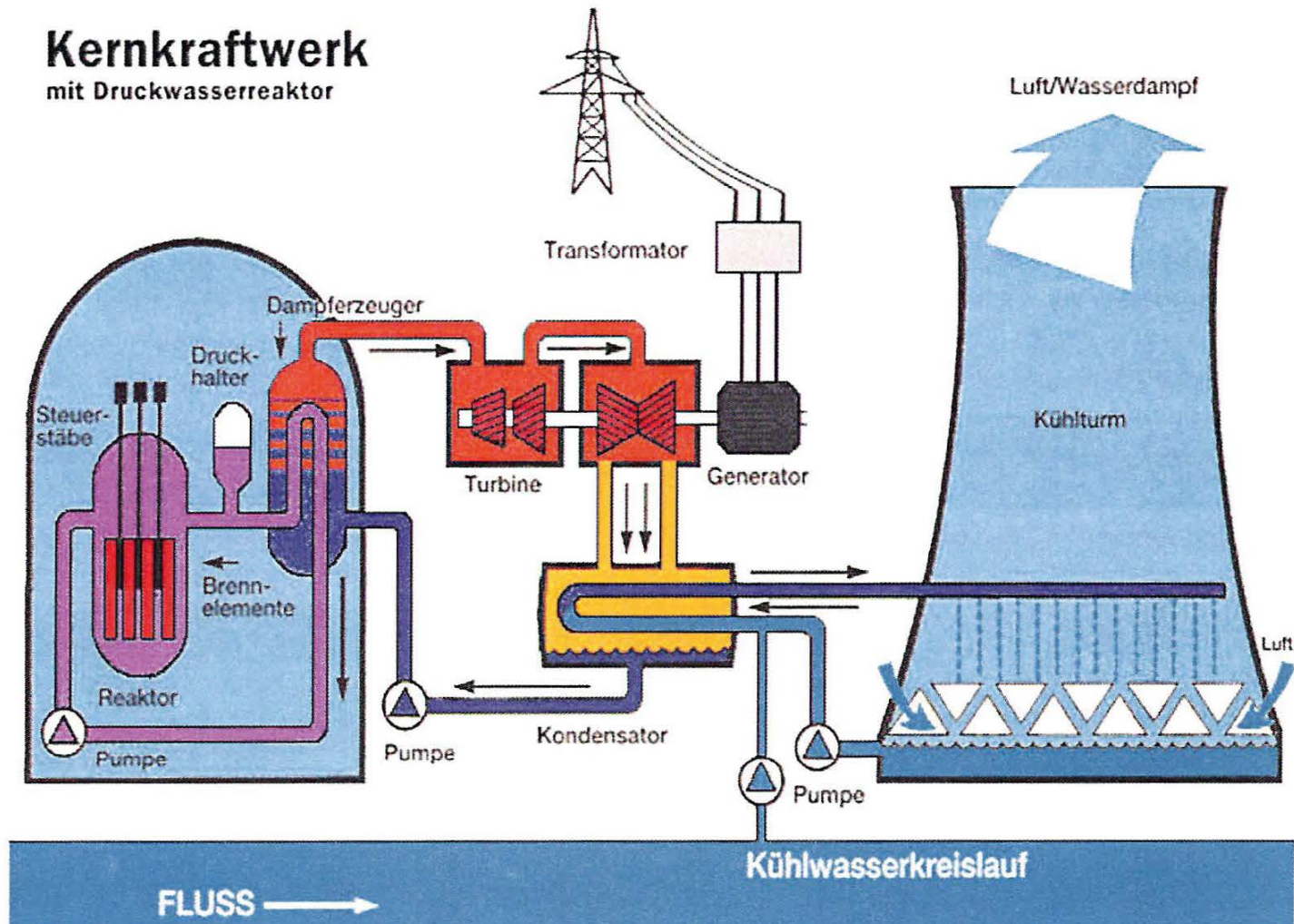


Funktion: Ein Teil des Wassers verdampft, der Rest fließt wieder in den Reaktorbehälter zurück, System zur Wasser/Dampf-Trennung notwendig
Frischdampfzustand: typ. 290 °C, 70 bar

Regelung: Steuerstäbe auf neutronenabsorbierendem Material werden von unten in den Reaktor gefahren (elektromotorisch im Normalbetrieb, hydraulisch bei Schnellabschaltung)

Druckwasserreaktor: Aufbauschema

Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor



Druckwasserreaktor: Regelung

Leistungsregelung: Borsäure oder Regelstäbe

Prinzip:

Leistungsabsenkung $\Rightarrow$ Turbine benötigt weniger Wärmeleistung
 $\Rightarrow$ mittlere Kühlmitteltemperatur (MKMT) im Primärkreis steigt

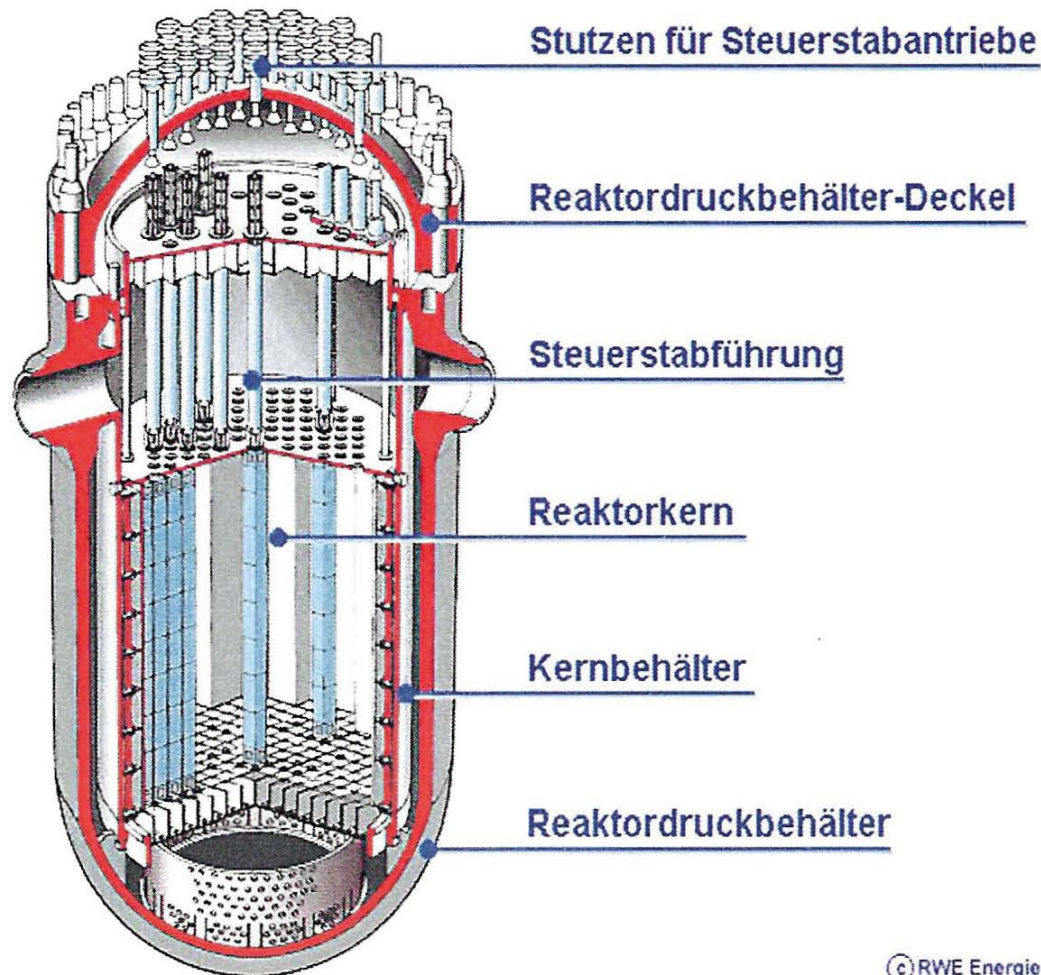
Forderung: MKMT = const.

- $\Rightarrow$ Zugabe von Borsäure in den Primärkreis, Borsäure absorbiert Neutronen, d. h. Anzahl der Spaltungen sinkt
- $\Rightarrow$ Reicht das nicht aus, so können die Regelstäbe in die Brennelemente gefahren werden

Leistungssteigerung $\Rightarrow$ Turbine benötigt mehr Wärmeleistung
 $\Rightarrow$ mittlere Kühlmitteltemperatur (MKMT) im Primärkreis sinkt

- $\Rightarrow$ Zugabe von reinem H_2O in den Primärkreis, Borsäure wird verdünnt, d. h. Anzahl der Spaltungen steigt wieder
- $\Rightarrow$ ggf. Regelstäbe aus den Brennelementen fahren

Druckwasserreaktor: Reaktor-Druckbehälter



© RWE Energie

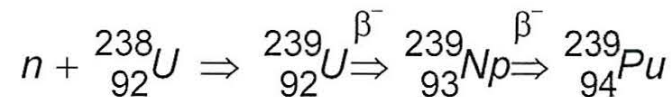
Hochtemperaturreaktor und Brüter

Hochtemperaturreaktor:

- Wärmeübertragung nicht durch Wasser sondern Helium, Temperaturen zwischen 800 °C und 1100 °C
- Entwicklung Ende 60er Jahre, Planung für ein Kraftwerk in D Mitte 80er Jahre, heute möglicherweise in Japan/China/Südafrika ein Thema

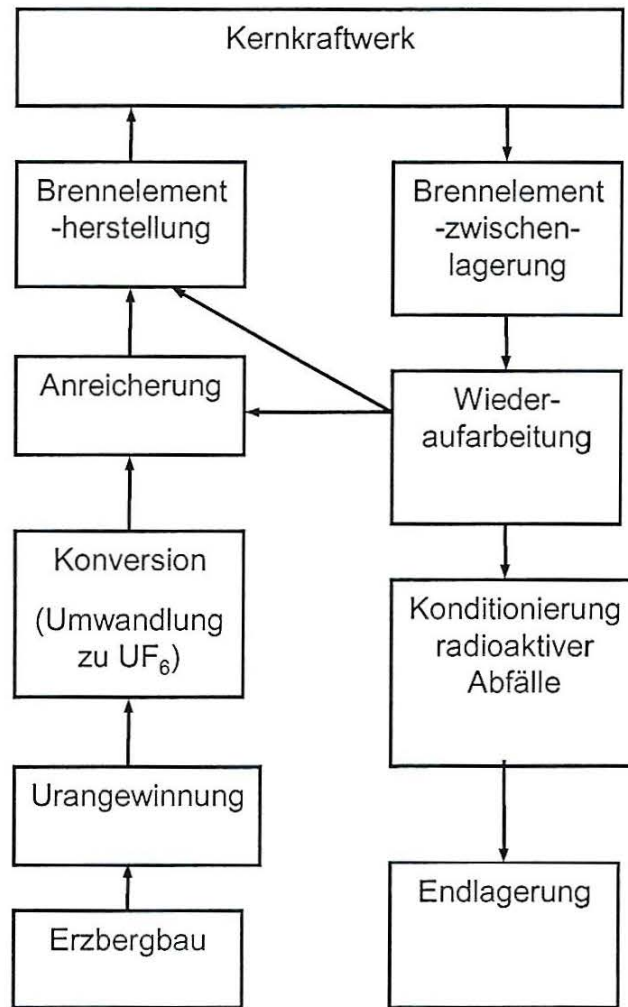
Brutreaktor:

- Uran-238 soll nutzbar gemacht werden



- Reaktion findet in speziellen Brutreaktoren statt, bei jedem Leichtwasserreaktor als Nebeneffekt

Brennstoffkreislauf



Urangewinnung:

Erze enthalten 0,1...0,5% Uran 235, Abbau vor allem in USA, Kanada, Brasilien, Afrika, Australien, Frankreich, GUS

Urangewinnung:

Reinigung der Erze, Ergebnis „Yellow Cake“ (Ammonium(di)-uranat mit 70...80% Urangehalt)

Anreicherung und Herstellung von Brennstäben:

Uran-235-Gehalt in den „Yellow Cake“ ca. 0,7%,
Anreicherung auf 3...5% notwendig, dazu Konversion in UF_6 ,
chemische und physikalische Verfahren der Anreicherung,
Endprodukt UO_2 -Tabletten (Pellets)
Brennstab = Hülle aus Zirkaloy gefüllt mit Pellets

Einsatz und Wiederaufarbeitung:

Einsatz bis zu 7 Jahre in wechselnden Positionen im Reaktor,
Wiederaufarbeitung = Zerlegen in Uran, Plutonium,
Spaltprodukte
z. T. kann das Material wieder eingesetzt werden

Beispiel

Die elektrische Leistung eines Kraftwerks, das mit Natur-Uran als Brennstoff arbeitet, beträgt 1000 MW, der Gesamtwirkungsgrad $\eta = 0,33$.

Wieviel Natur-Uran wird pro Jahr verbraucht, wenn das Kraftwerk bei einer Jahresbenutzungsdauer von $t = 7800 \text{ h}$ mit voller Leistung gefahren wird?

Anmerkung: Natur-Uran enthält 0,715% des spaltbaren Isotops ^{235}U . Die Spaltung von 1 kg ^{235}U läuft gemäß folgender Reaktion ab:

