

# Ergänzungen zu Kapitel 3.5: Kernspaltung

Ablauf des Spaltprozesses:



(wobei  $\nu$  die Anzahl der prompten Neutronen darstellt)

- Es entstehen i. Allg. hochangeregte Spaltprozesse  $f_1^*$ ,  $f_2^*$
- Diese liegen weit weg vom „Tal der stabilen Kerne“, hoher Neutronenüberschuss, Anregungsenergie:  $\sim 30 \text{ MeV} > E_B(n) \sim 6-7 \text{ MeV}$   
→ „Abdampfen“ von Neutronen möglich

## Abregung der Spaltfragmente:

1. Neutronenemission, prompt  $\Delta E^* \sim 6-7 \text{ MeV/n}$
2.  $\gamma$ -Zerfälle
3.  $\beta$ -Zerfälle (Abbau des Neutronenüberschusses durch mehrere aufeinanderfolgende  $\beta$ -Zerfälle  $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$ )
4. Falls Anregungsenergie nach  $\beta$ -Zerfall groß genug ist, kann es zur Emission weiterer Neutronen kommen (verzögerte Neutronen)

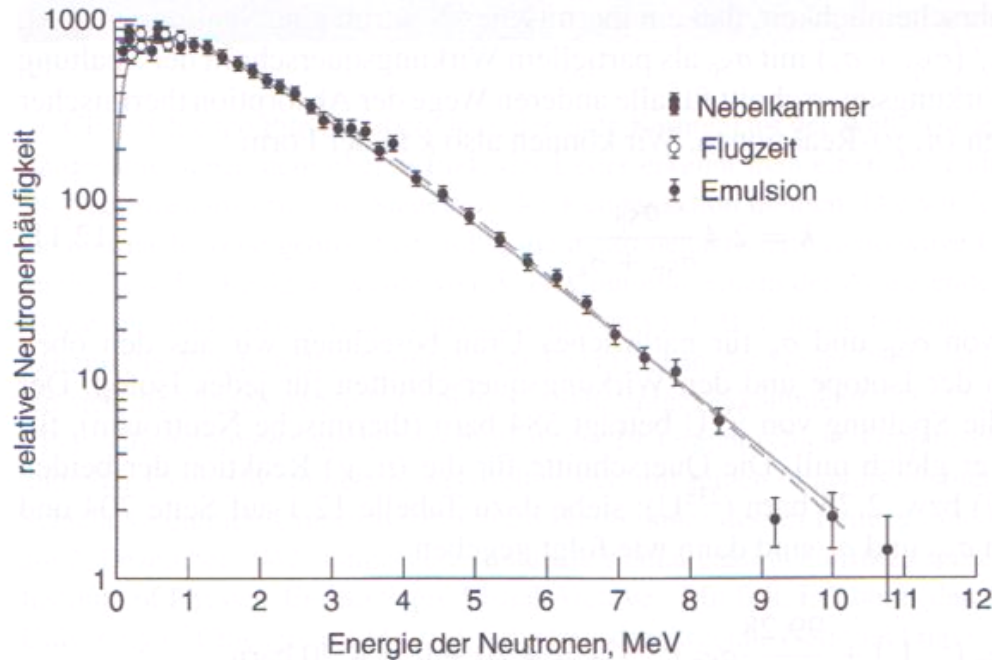
zu 1: Die Emission der **prompten Neutronen** erfolgt nach der Spaltung  
 $\Delta t = 10^{-21} - 10^{-14} \text{ sec}$  (nach Spaltung)  
(Messung durch Richtungskorrelation mit den Spaltprodukten)

Daher auch der Name: „prompte Neutronen“ oder Spaltungsneutronen;  
Die Anzahl der Spaltungsneutronen liegt bei  $\nu_n \sim 2-3$

Für  $^{235}\text{U}$ :  $\nu_n = 2,43$   
Für  $^{239}\text{Pu}$ :  $\nu_n = 2,88$

Sie stellen die Grundlage für die im Kernreaktor ablaufende Kettenreaktion dar.

- Energiespektrum der Spaltungsneutronen



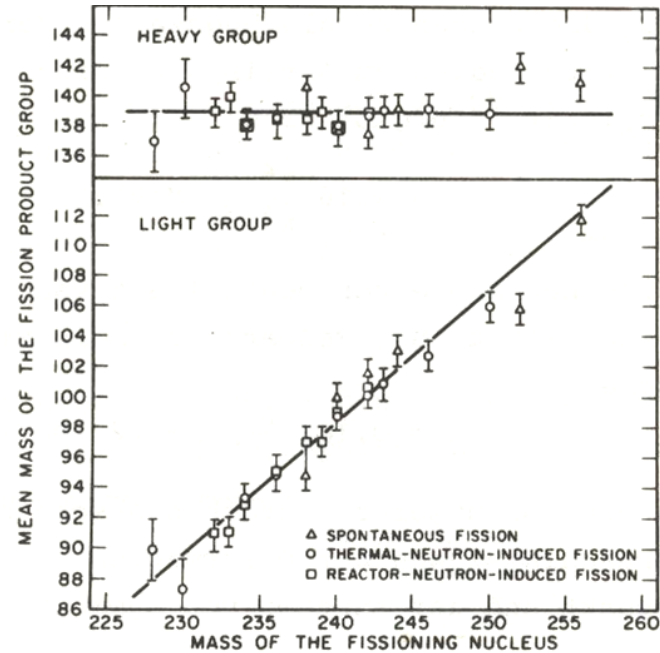
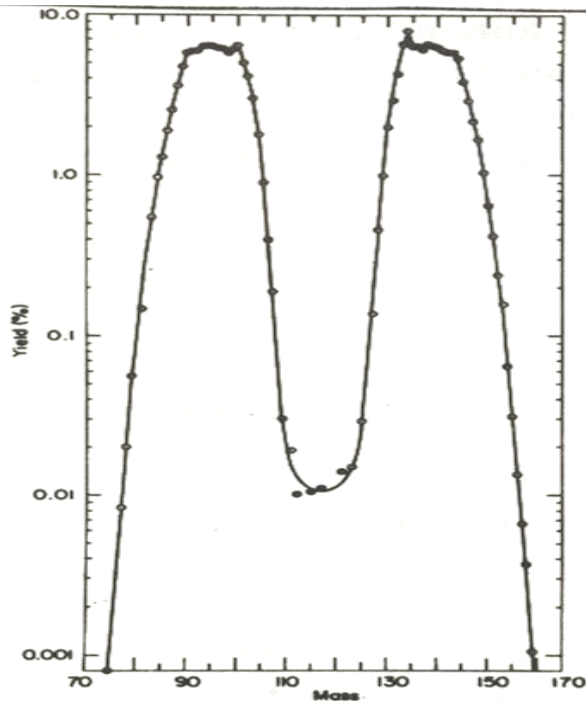
$$n(E) = a \sqrt{E} \cdot e^{-E/kT}$$

**Abb. 12.13.** Energiespektrum der Neutronen, die während der durch thermische Neutronen induzierten Spaltung von  $^{235}\text{U}$  freigesetzt werden. (Daten aus R. B. Leachman, *Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Band 2, Vereinte Nationen, New York 1956.)

Wahrscheinlichste Energie:  $\sim 0.8 \text{ MeV}$

Mittelwert der Energie:  $\langle E \rangle \sim 2 \text{ MeV}$

- Massenverteilung der Spaltprodukte



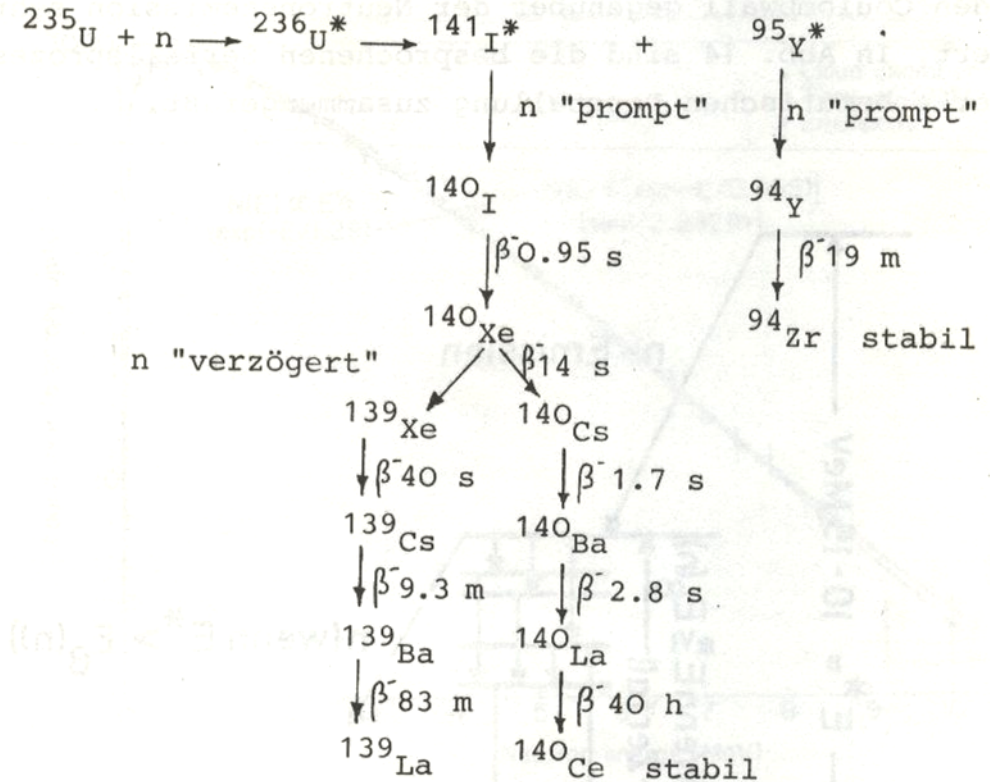
- i. allg. asymmetrisch, eine symmetrische Verteilung tritt nur mit einer Wahrscheinlichkeit von  $10^{-3}$  auf
- Die symmetrische Spaltung nimmt zu mit:
  - \* zunehmender Masse des Spaltkerns
  - \* zunehmender Anregungsenergie

- Im Verlauf der Abregungsprozesse entstehen zahlreiche Kerne /Zwischenprodukte

~80 Zwischenprodukte

- Die Halbwertszeiten liegen im Bereich von Sekunden bis zu  $10^{10}$  Jahren !!

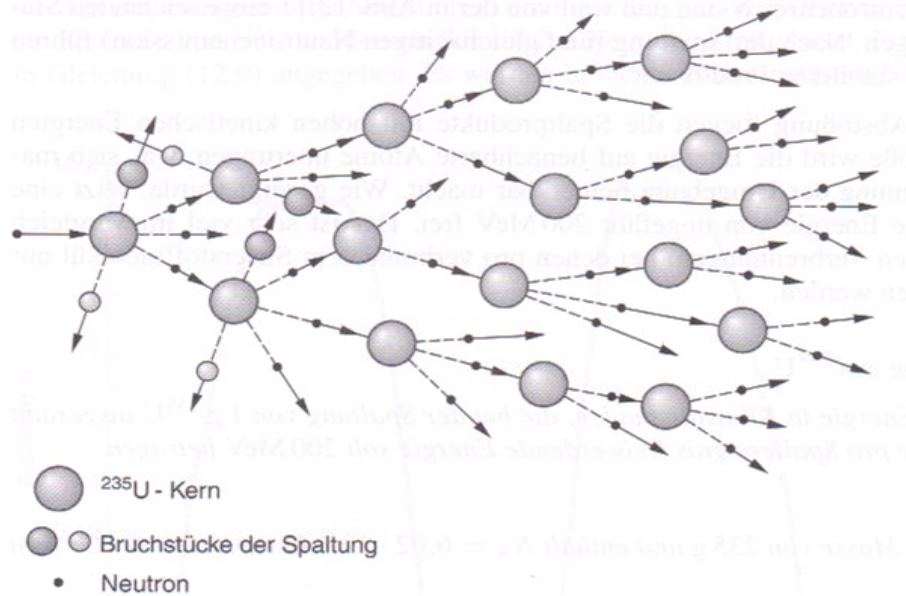
- Langsame radioaktive Zerfälle führen zur sog. **Nachwärme** in Kernreaktoren



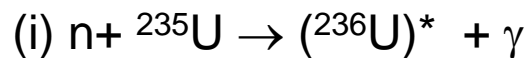
# Technische Anwendung: Kernreaktor

## -Diskussion einiger Aspekte-

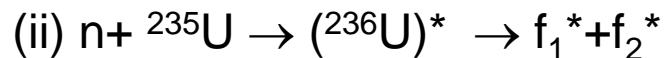
- Kettenreaktion kann kontrolliert ablaufen, wenn im Mittel 1 Neutron zu weiteren Spaltprozessen genutzt werden kann



- Wichtige Neutronenprozesse:



Wirkungsquerschnitt  $\sigma(n, \gamma)$   
(Neutron ist für Kettenreaktion verloren)

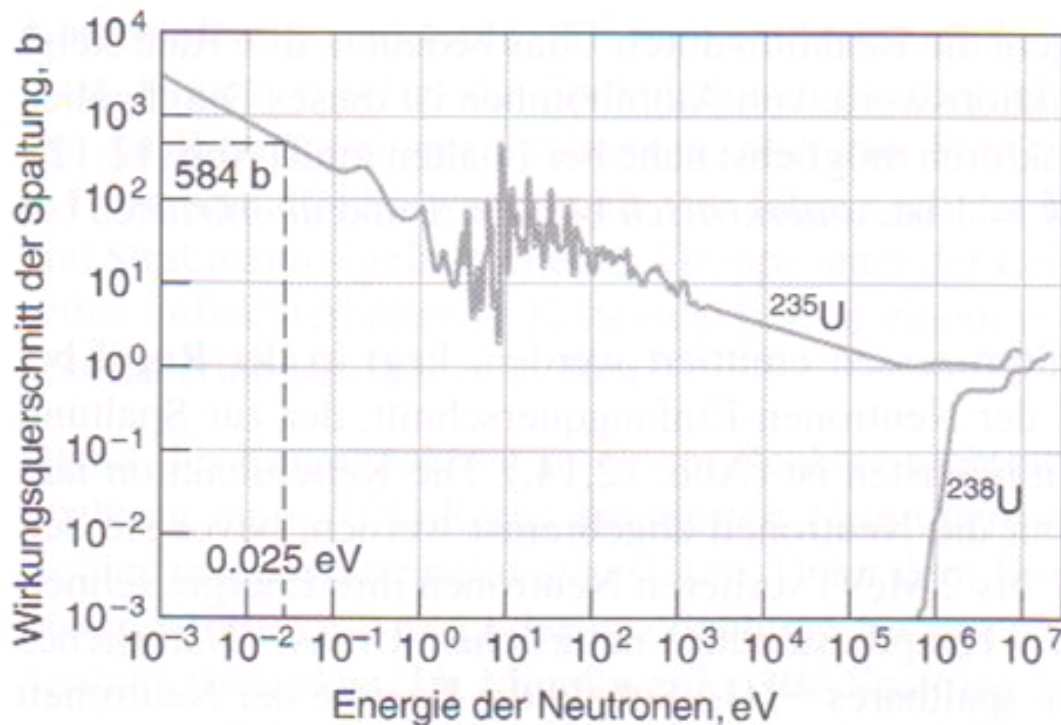


Spaltung  $\sigma(n, f)$  (fission)

Die Wirkungsquerschnitte für die induzierte Spaltung und für die  $(n, \gamma)$ -Reaktionen hängen stark von der kinetischen Energie / Geschwindigkeit  $v$  der Neutronen ab.

Im thermischen Bereich ( $E = 0,025$  eV) gilt:

$\sigma(n, \gamma)$  und  $\sigma(n, f)$  sind prop. zu  $1/v$  ( $v =$  Geschwindigkeit)  
(dominiert durch Wechselwirkungszeit, d.h. Zeit, während der sich das Neutron in der Umgebung des Kerns aufhält)



**Abb. 12.14.** Wirkungsquerschnitte der neutroneninduzierten Spaltung von  $^{235}\text{U}$  und  $^{238}\text{U}$ . Im Bereich unterhalb von  $0,01$  eV erkennt man bei  $^{235}\text{U}$  dieselbe  $1/v$ -Abhängigkeit wie beim Wirkungsquerschnitt der  $(n, \gamma)$ -Reaktion (aus dem gleichen Grund wie dort!). Die „radiative“ Absorption  $(n, \gamma)$  konkurriert mit der Spaltung, sie hat bei  $0,025$  eV einen Wirkungsquerschnitt von  $97$  barn. Die zahlreichen Resonanzen zwischen  $1$  eV und  $100$  eV gehören zu angeregten Zuständen des  $^{236}\text{U}$ -Kerns.

- Im mittleren Energiebereich treten Resonanzen auf; Energiezustände des sog. „Compound-Kerns“
- Um die hohen Spaltquerschnitte im thermischen Energiebereich auszunutzen, müssen die Neutronen ( $\langle E \rangle \sim 2 \text{ MeV}$ ) **moderiert** werden.

→ Moderation (Abkühlung) der Neutronen durch Stöße

- Gesucht: Materialien mit kleinem Absorptionsquerschnitt  $\sigma(n, \gamma)$  und großem Streuquerschnitt  $\sigma(n, n')$  (elastische Streuung, Energieabgabe)

- Moderator

Um effiziente Energieabgabe /Abkühlung mit möglichst wenig Stößen (wg. Einfangefahr) zu erreichen, sollen  $m_{\text{Stoßpartner}} \approx m_n$  sein;

→ p, n      Wasser  $\text{H}_2\text{O}$   
 Schweres Wasser  $\text{D}_2\text{O}$  (Deuterium)



## Einige Wirkungsquerschnitte für 2 MeV Neutronen

		$\sigma (n,n')$	$\sigma (n,\gamma)$
H <sub>2</sub> O	Leichtes Wasser	105 b	0,664 b
D <sub>2</sub> O	Schweres Wasser	14,5 b	0,001 b
C	Graphit	4,8 b	0,0035 b

Hoher Einfangquerschnitt von H<sub>2</sub>O

→ Eine Kettenreaktion ist in einem Leichtwasserreaktor mit natürlichem Uran nicht möglich!

Natürliches Uran:      0,72%      <sup>235</sup>U  
                                  99,28%      <sup>238</sup>U

→ # der zur Spaltung verfügbaren Neutronen = k

$$k = \underset{\text{(produziert)}}{2,4} \cdot \sigma(n,f) / [\sigma(n,f) + \sigma(n,\gamma)] = 1,32 \quad (\text{zu nah an } 1)$$

Zusätzliche Verluste durch Neutronen, die den Reaktorkern verlassen, etc..... →  $k_{\text{eff}} < 1$

→ Anreicherung: Erhöhung des  $^{235}\text{U}$ -Anteils auf ~3%

→  $k = 1,82$

Betrieb mit  $k_{\text{eff}} > 1$  bei leichtem Wasser-Moderator möglich!

**Schwerwasserreaktoren:** (mit  $\text{D}_2\text{O}$  Moderator) können mit natürlichem Uran arbeiten (keine Anreicherung notwendig)

Vorteil der Leichtwasserreaktoren:  $\sigma(n, n')$  ist groß,

→ Moderation erfolgt schnell

→ Kompakte Bauweise möglich

→ **Druck- oder Siedewasserreaktoren**

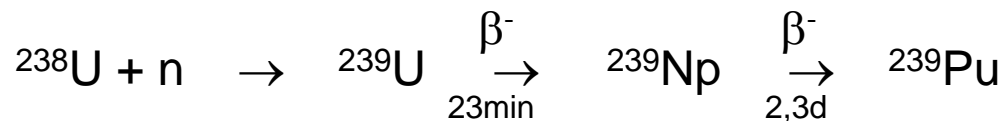
**Tabelle 12.1.** Moderatoreigenschaften ausgewählter Kerne.

<b>Kern</b>	$\sigma (n, \gamma)$ , barn	<b>Anzahl notwendiger Stöße bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts</b>
$^1\text{H}$	0,333	18
$^2\text{H}$	$0,51 \cdot 10^{-3}$	25
$^4\text{He}$	0	43
$^{12}\text{C}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	110
$^{238}\text{U}$	2,75	2200

## Was passiert, wenn nicht schnell moderiert wird?

- Gefahr, dass zu viele Neutronen im sog. epithermischen Bereich (10-1000 eV) einfangen werden;
  - Resonanzen für  $^{238}\text{U}$  und  $^{235}\text{U}$  in diesem Bereich
    - $\sigma(n,\gamma)$ -Resonanzen, hohe Wirkungsquerschnitte für Einfangreaktionen
    - Neutronen sind für Spaltungsprozesse verloren
- schnelle Moderation wünschenswert, um Resonanzgebiet schnell zu durchlaufen

- Brutreaktionen: Durch n-Einfang im  $^{238}\text{U}$  entsteht Plutonium



$$\tau(^{239}\text{Pu}) = 2,4 \cdot 10^4 \text{ a !!}$$

→ langsame Anreicherung von Plutonium in den Brennelementen

## Wiederaufbereitung:

- Extraktion von  $^{239}\text{Pu}$  und nicht abgebranntem  $^{235}\text{U}$  sowie von sog. Reaktorgiften (s.unten)
- $^{239}\text{Pu}$  ist spaltbar, hoher Spaltquerschnitt für schnelle Neutronen
  - Konzept des sog. „schnellen Brütters“ (Kalkar, 1970er Jahre, BRD)
  - kein Moderator erforderlich (da spaltbar mit schnellen Neutronen)
  - $k = 2,7$  (hohe Zahl an prompten Spaltneutronen)

Gefährlichkeit (wesentliche Sicherheitsprobleme) haben bisher den verbreiteten Einsatz „schneller Brüter“ verhindert:

- hohe Anzahl prompter Spaltneutronen
- geringer Anzahl verzögerter Spaltneutronen (nur 0,3% !!)
  - kürzere Sicherheitsabstände, für mechanische Steuerung
- Verdopplung des spaltbaren Materials im Reaktor alle ~7 Jahre

## Reaktorgifte:

Einige Spaltprodukte, die unkontrolliert auftreten, haben hohe Einfangwirkungsquerschnitte für Neutronen und werden daher als “Reaktorgifte” bezeichnet.

Beispiele:

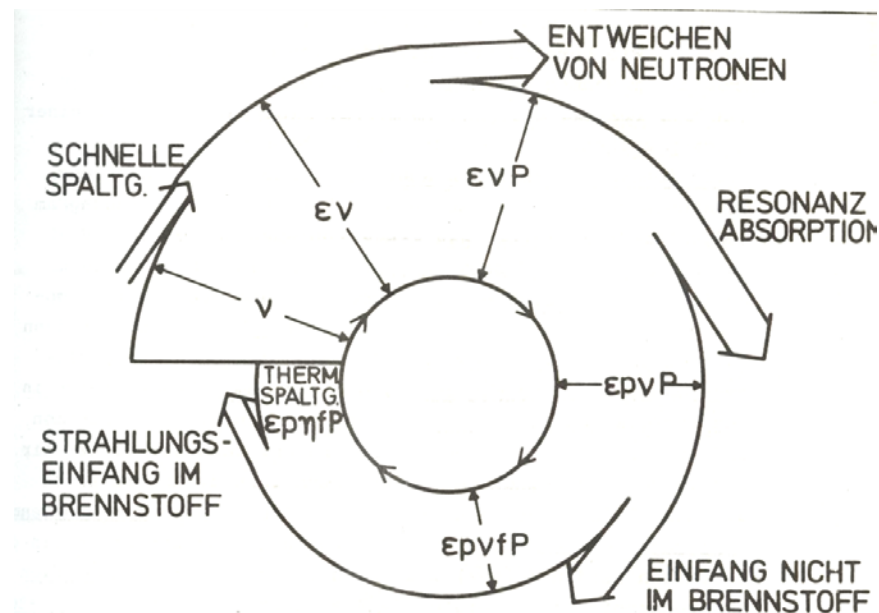
$$^{149}\text{Sm} \quad \sigma(n,\gamma) = 4 \cdot 10^4 \text{ b}$$

$$^{135}\text{Xe} \quad \sigma(n,\gamma) = 2,7 \cdot 10^6 \text{ b}$$

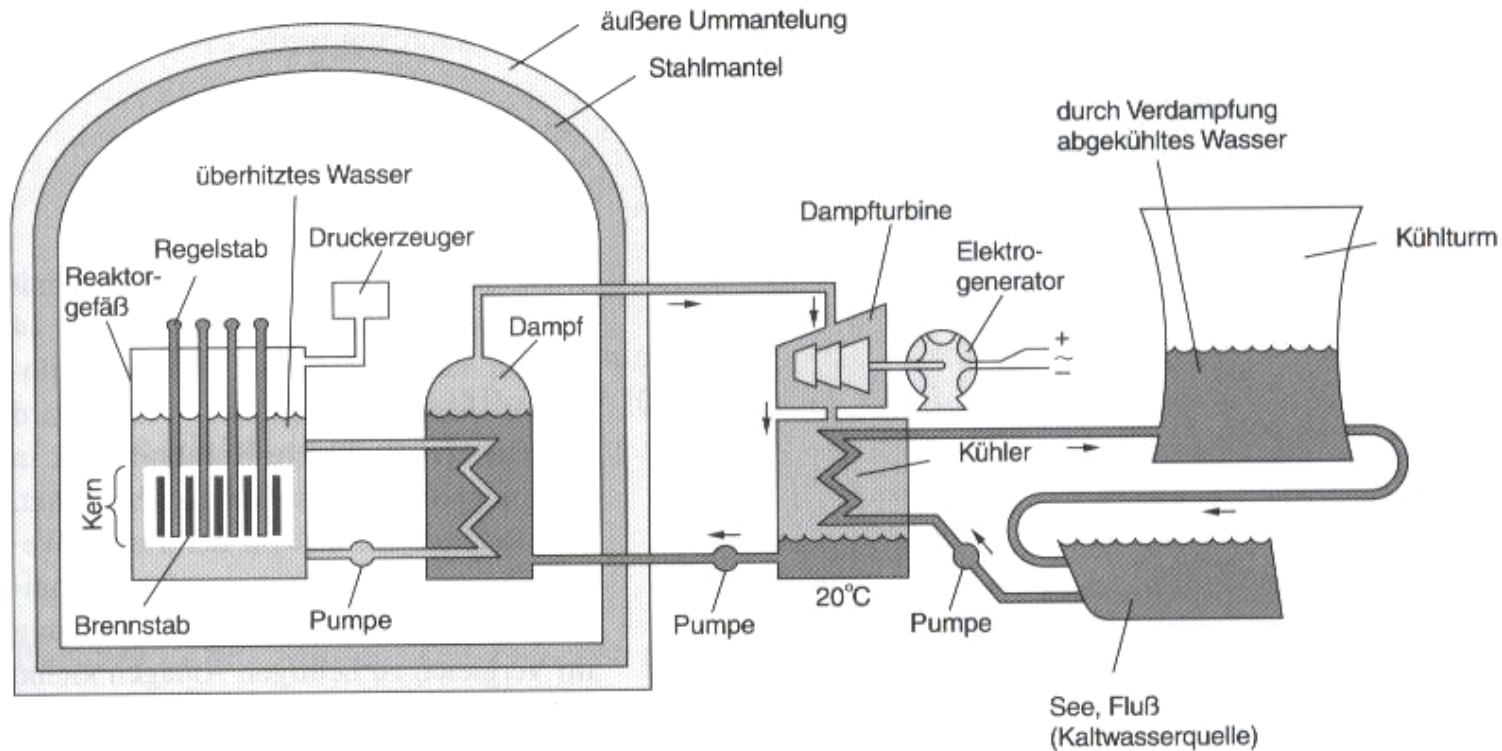
$$^{113}\text{Cd} \quad \sigma(n,\gamma) = 2 \cdot 10^4 \text{ b}$$

# Neutronenzyklus:

- Verluste durch:
- Entweichen von Neutronen
  - Absorption  $\sigma(n,\gamma)$ , insbesondere im Resonanzbereich
  - Einfang in anderen Materialien (Moderator, Brennstoff, ..)

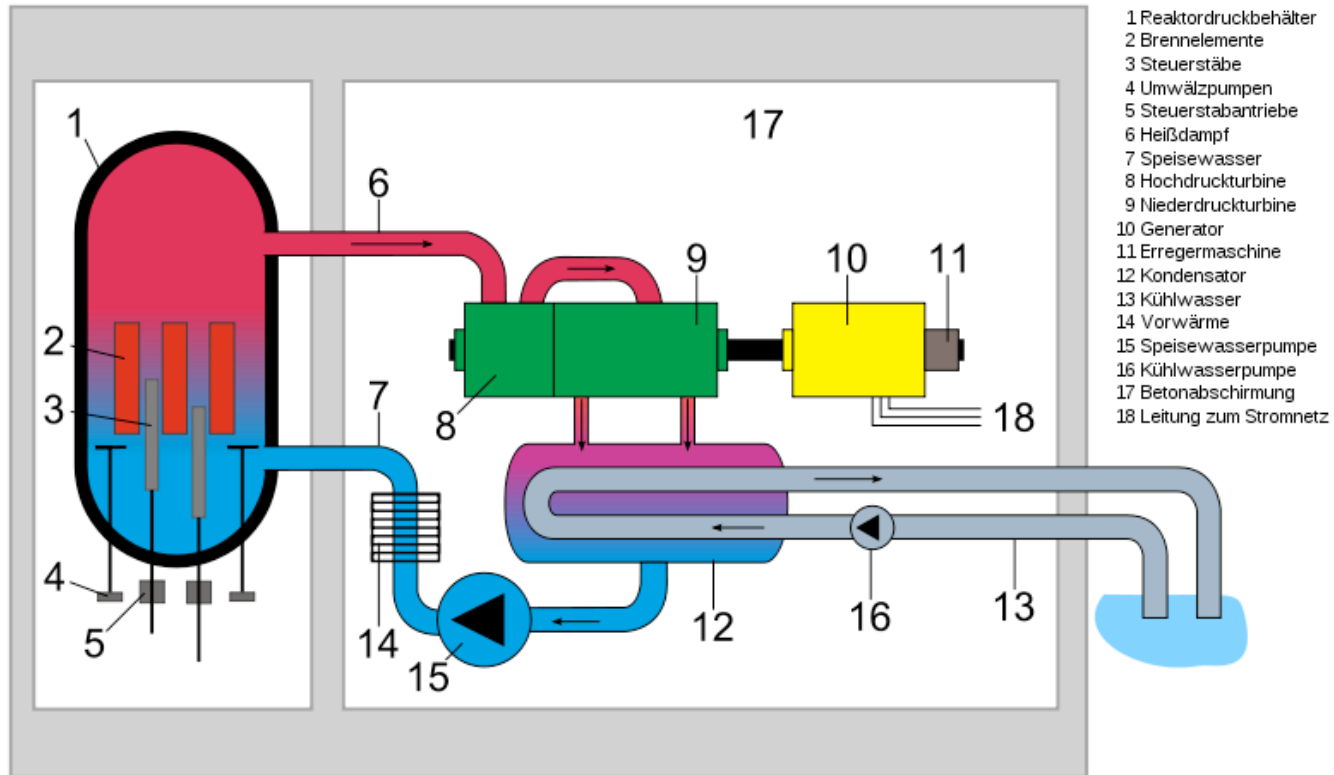


Feinabstimmung: durch gezielte Neutronenabsorber;  
Steuerstäbe, Cd-Absorber



**Abb. 12.16.** Vereinfachtes Schema eines Druckwasserreaktors (PWR, *pressurized water reactor*). Das mit dem Reaktorkern in Kontakt stehende Wasser dient sowohl als Moderator als auch als Wärmeträger. Sein Kreislauf ist vollständig vom Sekundärkreislauf getrennt, in welchen Wasser erhitzt wird, um Dampfturbinen anzutreiben. Viele Details, unter anderem die Notkühlvorrichtungen, werden hier nicht gezeigt. Im Siedewasserreaktor (BWR, *boiling water reactor*) wird Dampf aus dem Primärwasserkreislauf direkt (ohne Isolationskreislauf) zu den Turbinen geleitet.





Aufbau eines Siedewasserreaktors