

# Image-Plate Detektor

Diese großflächigen Detektoren bestehen im Prinzip aus einer wiederbeschreibbaren Speicherfolie (Image-Plate). Die Strahlungsintensität wird in einem Lesevorgang unter Verwendung von sichtbarem Licht ausgelesen und elektronisch gespeichert. Nachdem Lesevorgang wird die Information in der Image-Plate gelöscht, und es kann ein neue Messvorgang beginnen.

## Eigenschaften

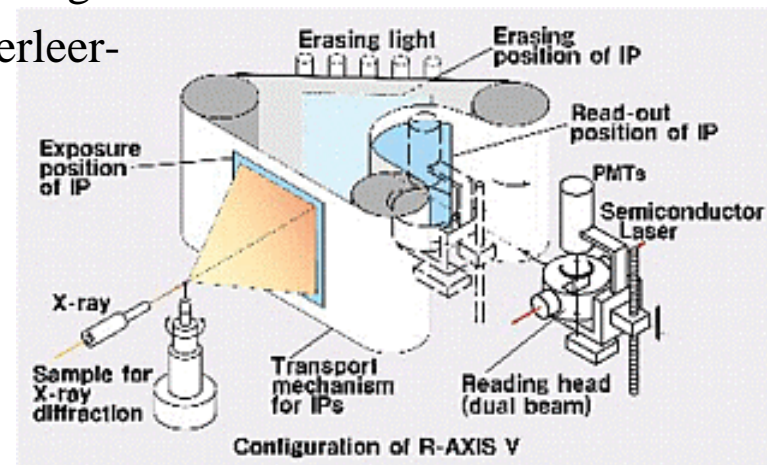
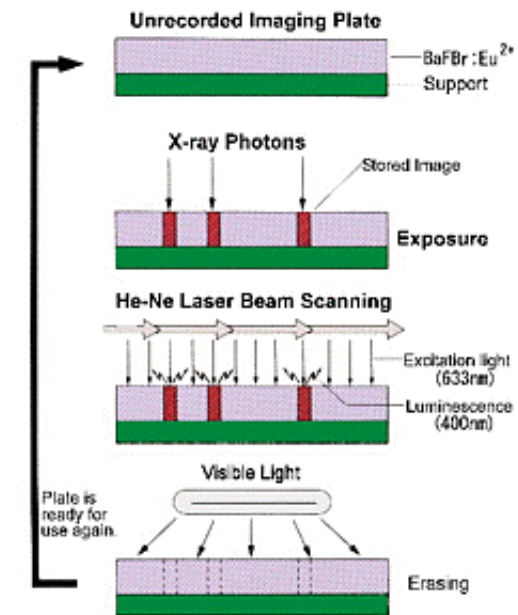
**Speicherfolie:** Deponierte Energie wird auf  $\text{Eu}^{2+}$  übertragen  
→ oxidiert zu  $\text{Eu}^{3+}$  und ein Photoelektron wird ins Leitungsband abgegeben. Das Photoelektron wird an einer Gitterleerstelle eingefangen ( → Farbzentren).

**aktive Fläche:** 10 x 10  $\text{cm}^2$

**Auslesezeit:** ca. 60 s

**gute Ortsauflösung:**  $\mu\text{m}$  -mm

## Prinzip einer Image-Plate



## CCD- Detektor

Der CCD-Detektor (charge-coupled device) besteht im wesentlichen aus drei Hauptkomponenten:

**Phosphorbildschirm:** konvertiert Röntgenstrahlung in sichtbares Licht

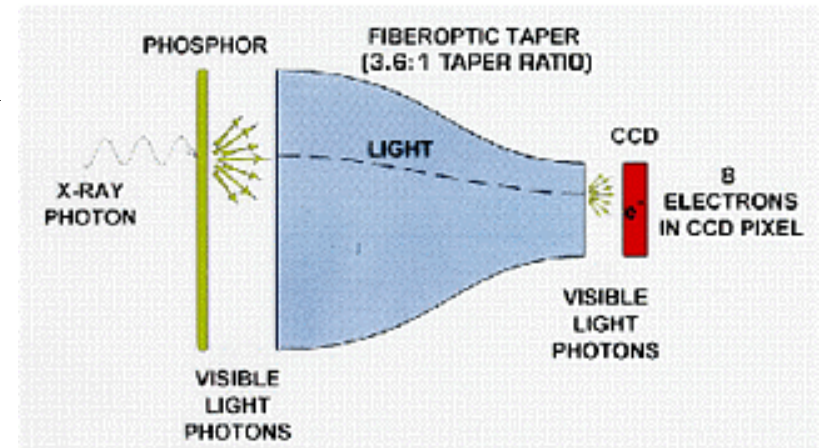
**Bildkonverter:** Verkleinerung des Bildes auf die Größe der CCD-Chips

**CCD-Chip:** konvertiert die Lichtinformation in eine elektrische Ladungsinformation (**Halbleiterzähler**). Die Anzahl der Ladungsträger ist proportional zur Intensität des eingefallenen Lichts.

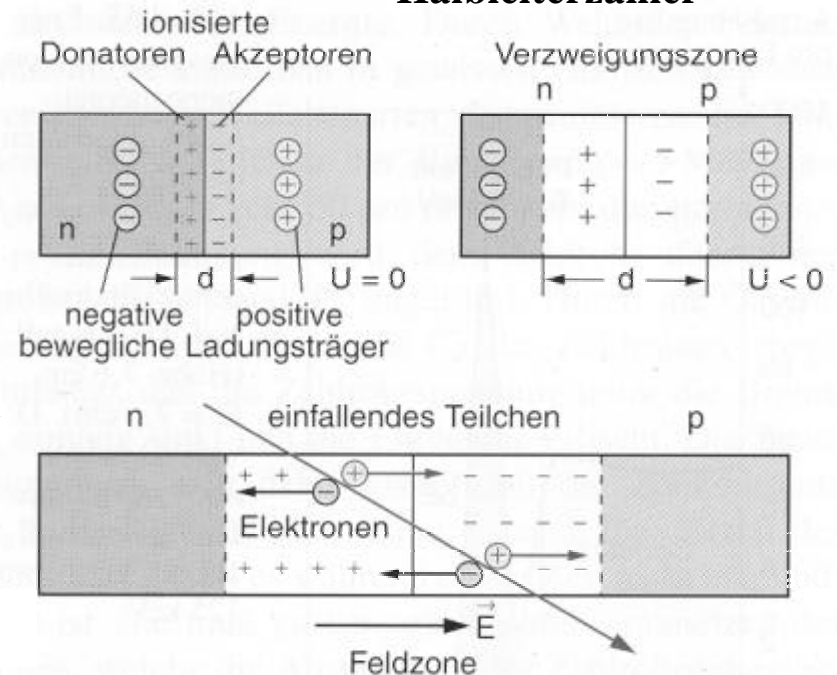
### Halbleiterzähler

Ein Halbleiterzähler ist im wesentlichen eine in Sperrrichtung betriebene p-n Halbleiterdiode. In der p-n- Übergangsschicht entsteht durch die angelegte Spannung eine Verarmung von Ladungsträgern. Wird Licht in der Verarmungszone absorbiert, so werden dort Elektronen-Loch-Paare erzeugt => es fließt ein Strom.

### Schema eines CCD-Detektors



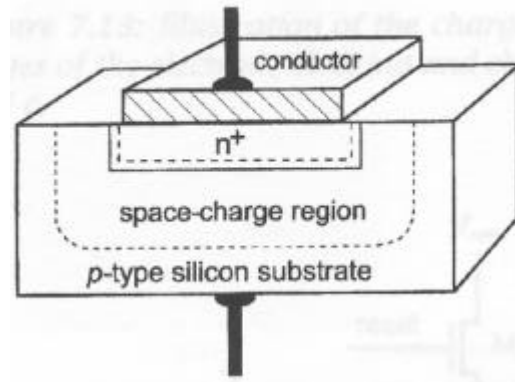
### Halbleiterzähler



# CCD- Detektor

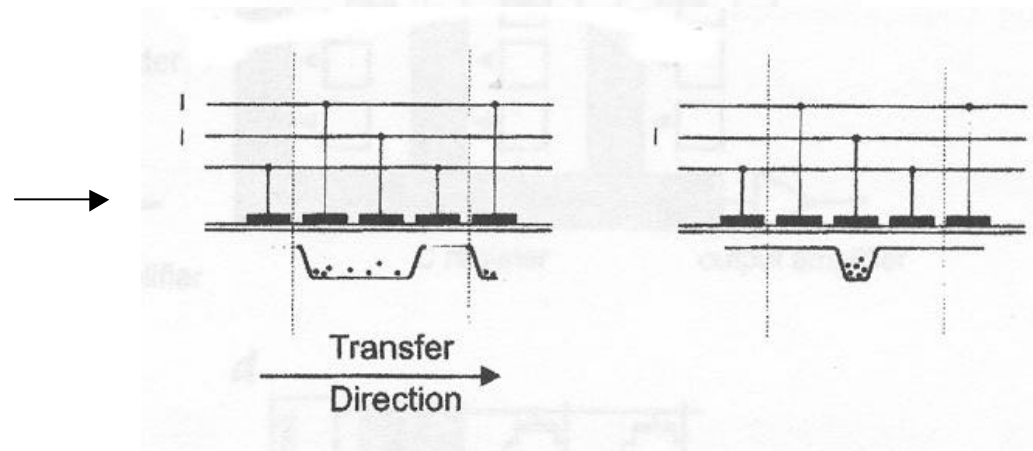
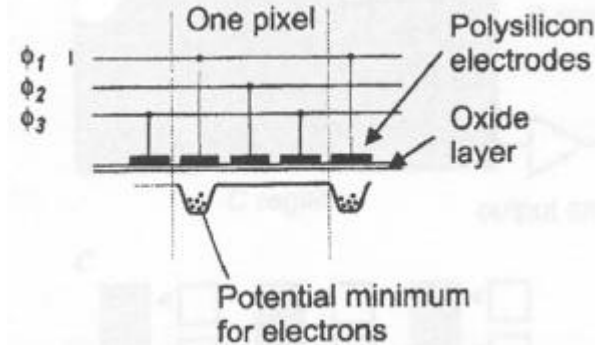
## Darstellung des Ladungstransports im CCD

Schema eines typischen  
Ladungsspeichernden  
Halbleiters



### Eigenschaften des CCD

- Auslesezeit: 15 Sekunden
- sehr hohe Empfindlichkeit
- relativ teuer
- kleine aktive Fläche



Die erzeugten Ladungsträger werden in Kondensatoren (Potentialmulden) aufgefangen. Die in den Kondensatoren gehaltenen Ladungen werden durch spezielle Ansteuerungen verschoben und ausgelesen.

## Eigenschaften des Neutrons

Die Entdeckung des Neutrons von Chadwick im Jahre 1932 war ein wichtiger Meilenstein zum Verständnis des Aufbaus der Materie. Da Neutronen ungefähr die gleiche Masse wie Protonen haben, aber keine elektrische Ladung besitzen, war der Nachweis von Neutronen zunächst schwieriger.

### **Kernreaktionen zum Nachweis von Neutronen**



Die Detektion der geladenen Teilchen liefert das Signal in einem Detektor.

### **Lebensdauer des Neutrons**

Das **freie Neutron** ist kein stabiles Teilchen. Es zerfällt nach einer Lebensdauer von etwa 900 Sekunden nach dem folgenden Schema:  $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$

### **Magnetisches Dipolmoment**

Da Neutronen, wie auch Protonen aus drei elementaren Quarks der Sorte („up“, „down“) aufgebaut sind, die wiederum Träger von Ladungen sind, kann man verstehen, warum auch ein nach außen hin neutrales Teilchen wie das Neutron ein magnetisches Dipolmoment besitzt:

$$\mu_n = -9.6632 \cdot 10^{-27} \text{ Am}^2$$

### **Spin des Neutrons**

Spin: 1/2

## Neutronenstreuung

Neutronen besitzen keine elektrische Ladung und zeigen daher keine Wechselwirkung mit dem Coulomb-Potential der streuenden Atome. Da sie aber an der starken Wechselwirkung teilnehmen, spüren sie das Kernpotential des Atoms. Die räumlich Ausdehnung der Kernpotentiale ist in der Größenordnung von  $\sim 10^{-14}$  m.

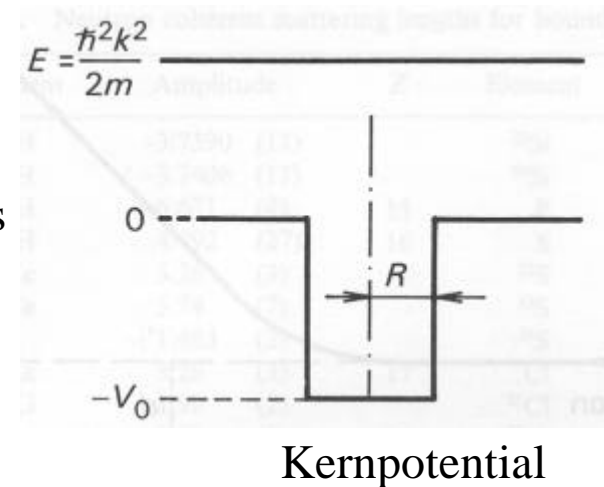
Die Potentialtiefe variiert von 10 – 60 MeV.

Für den Neutronenwellenvektor im Bereich außerhalb des Potentials gilt:

$$k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$$

Innerhalb des Potentials gilt:

$$q = \sqrt{\frac{2m(E + V_0)}{\hbar^2}}$$



Nach dem Huygens Prinzip entsteht die Neutronenwelle außerhalb des Potentials aus der Überlagerung der einfallenden Welle und der gestreuten Welle:

$$\mathbf{y}(r) = e^{ikr} + \frac{f}{r} e^{ikr}$$

Hierbei ist  $f$  die **Neutronenstreuamplitude**, die im Allgemeinen eine komplexe Größe darstellt. Aufgrund der geringen Ausdehnung des Kernpotential (verglichen mit typischen Neutronenwellenlängen  $\sim 0.01 - 10$  nm) zeigt die **Streuamplitude keine Winkelabhängigkeit** (S-Wellenstreuung).

# Neutronenstreuung

## Streulänge

Für die Streuamplitude  $f$  gilt im Limit  $k \rightarrow 0$  die folgende Definition:  $b = -\lim_{k \rightarrow 0} f$

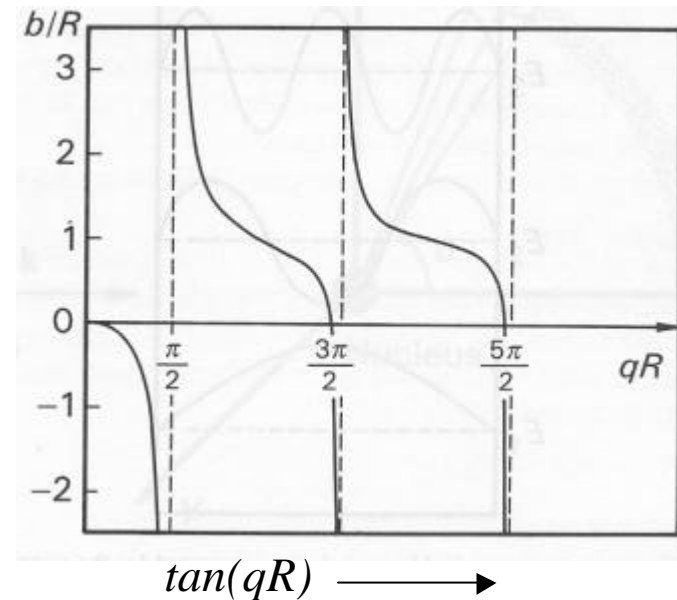
Diese Größe  $b$  heißt **Streulänge** und gibt im folgenden die Kerneigenschaften bezüglich der Neutronenstreuung an.

Unter der Annahme der streuende Kern verhält sich wie eine harte undurchdringbare Kugel, folgt dass die einfallenden Neutron reflektiert werden und somit eine Phasenverschiebung von  $180^\circ$  bezüglich der einfallenden Welle aufwiesen. Diese Annahme trifft für die meisten Kerne zu und hat zur Folge dass diese Kerne negativen Werte von  $f$  und positive Streulängen  $b$  haben.

Im Falle eines endlichen Kernpotentials  $V_0$  müssen die Wellenfunktionen sich am Übergang (außerhalb – innerhalb des Potentials) anpassen.

Für das Limit  $k \rightarrow 0$  gilt daher:

$$\frac{b}{R} = 1 - \frac{\tan(qR)}{qR} \quad \text{mit negativem } b \text{ für } \tan(qR) > qR$$



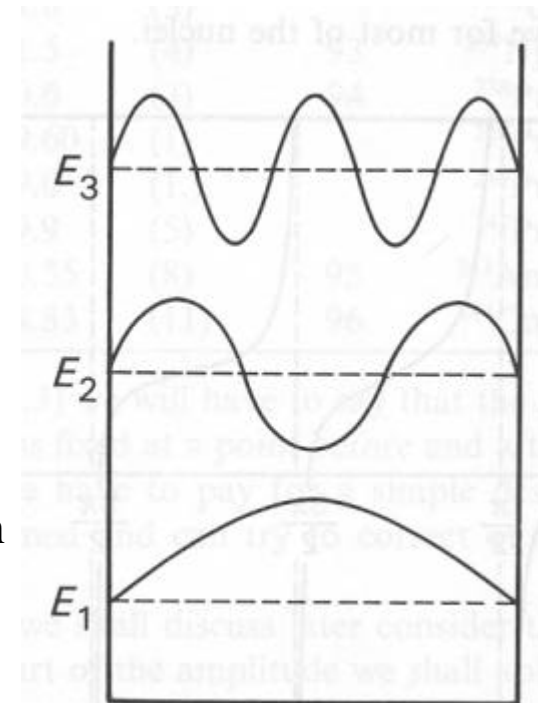
# Neutronenstreuung

## **Streulänge**

Aus der  $qR$ -Abhängigkeit des Verhältnisses  $b/R$  folgt, dass  $b/R$  am wahrscheinlichsten nahe bei 1 ist. Das bedeutet, dass die Streulänge gerade dem Ausmaß des Kernpotentials entspricht und damit den Kernradius darstellt.

Allerdings kann  $b/R \rightarrow \pm\infty$  werden, wenn  $qR$  ein ungerades Vielfaches von  $\pi/2$  wird. Dieser Zustand beschreibt eine Wellenlänge, deren halber Wert (bzw. Vielfaches des halben Wertes) genau dem Durchmesser des Potentials entspricht. Ein solcher Zustand (stehende Welle im Potentialkasten) stellt einen gebundenen Zustand dar und repräsentiert den physikalischen Effekt eines **Neutroneneinfangs**.

=> d.h. **Absorption anstatt Streuung**



Stehende Wellen im Potentialkasten: Kernbindungszustände

# Neutronenstreuung

## Streu - Absorptionsquerschnitte

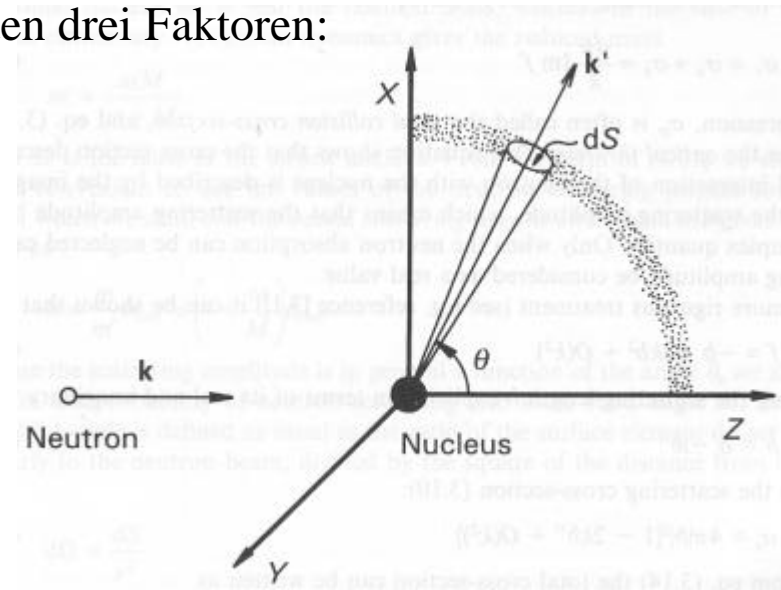
Betrachtet man eine Kugel mit dem Radius  $r$  um einen Kern, dann ist die Zahl der gestreuten Neutronen pro Zeiteinheit das Produkt der folgenden drei Faktoren:

Distanz welche die Neutronen in der Zeiteinheit zurücklegen:  $v \cdot t$

Oberfläche der Kugel mit dem Radius  $r$ :  $4\pi r^2$

Wahrscheinlichkeitsdichte ein Neutron im Abstand  $r$  vom Kern zu finden:

$$\left| \frac{f}{r} e^{ikr} \right|^2$$



Der Fluss der gestreuten Neutronen durch die Kugel ist damit gegeben durch:

$$\frac{vt \cdot 4\pi r^2 \cdot \left| \frac{f}{r} e^{ikr} \right|^2}{t} = 4\pi v |f|^2$$

Der Fluss der einfallender Neutronen ist gegeben durch:

$$v |e^{ikr}|^2 = v$$

Der **Streuquerschnitt** als Verhältnis beider Flüsse ist:

$$\mathbf{s}_s = 4\pi |f|^2 \longrightarrow \frac{d\mathbf{s}_s}{d\Omega} = |f|^2 \quad \text{mit} \quad d\Omega = \frac{dS}{r^2}$$



## Neutronenstreuung

### **Streu - Absorptionsquerschnitte**

In Analogie zum Brechungsindex bei elektromagnetischer Strahlung kann auch die Streulänge  $b$  (bzw. die Streuamplitude  $f$ ) als eine komplexe Größe betrachtet werden:

$$b = b' - ib''$$

Da neben Streuung auch Absorption stattfinden kann, setzt sich der **totale Stoßquerschnitt** für Neutronen dann aus dem Streuquerschnitt und dem Absorptionsquerschnitt zusammen:

$$\mathbf{s}_{tot} = \mathbf{s}_s + \mathbf{s}_a$$

$$\text{Streuquerschnitt: } \mathbf{s}_s = 4\mathbf{p}|b|^2$$

$$\text{Absorptionsquerschnitt: } \mathbf{s}_a = \frac{4\mathbf{p}}{k} \text{Im}(b)$$

Während der Streuquerschnitt keine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zeigt, ist die Wahrscheinlichkeit für Absorption umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit der Neutronen !

Im allgemeinen wird der Streuprozess eines Neutrons an einem einzelnen gebundenen Kern in der Born'schen Näherung (Wellenfunktion für die Kerne und für die Elektronen ist separierbar) mit Hilfe des sogenannten **Fermi-Pseudopotentials** beschrieben:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{2\mathbf{p}\hbar^2}{m} b\mathbf{d}(\mathbf{r})$$

Hierbei wird die Neutronen-Kern-Wechselwirkung nur durch die Streulänge  $b$  beschrieben.

## Neutronenstreuung

Da der Streuprozess von Neutronen in der Praxis an einem Ensemble von Atomkernen betrachtet werden muss, kann die folgende Unterscheidung vorgenommen werden :

kohärente Streuung:  $\mathbf{s}_{coh} = 4\mathbf{p}\langle b_i \rangle^2$

inkohärente Streuung:  $\mathbf{s}_{inc} = 4\mathbf{p}\left[\langle b_i^2 \rangle - \langle b_i \rangle^2\right]$

Gesamtstreuquerschnitt:  $\mathbf{s}_s = \mathbf{s}_{coh} + \mathbf{s}_{inc}$

- Isotopeninkohärenz
- **Spininkohärenz** (z.B.  $n$  und  $H$  beide Spin:  $\frac{1}{2}$ )

Spinabhängigkeit der Neutronenstreuung:

Ein Isotop mit dem Spin  $s$  wechselwirkt mit einem Neutron Spin  $\frac{1}{2}$ . Damit gibt es zwei Streulängen  $b^+$  und  $b^-$  mit den beiden möglichen Spinzuständen:

$$S^+ = s + \frac{1}{2} \quad \text{und} \quad S^- = s - \frac{1}{2}. \quad \text{Da es } n^+ = 2S^+ + 1 \quad \text{und} \quad n^- = 2S^- + 1 \quad \text{jeweilige}$$

Spinzustände gibt und beide die gleiche Wahrscheinlichkeit haben, gilt:

$$\langle b \rangle = \frac{1}{n^+ + n^-} [n^+ b^+ + n^- b^-] \quad \longrightarrow \quad \boxed{b^{coh} = \langle b_i \rangle = \frac{1}{2s+1} [(s+1)b^+ + s b^-]}$$

## Neutronenstreuung

Fortsetzung: Spinabhängigkeit der Neutronenstreuung:

mit

$$\langle b^2 \rangle = \frac{1}{n^+ + n^-} \left[ n^+ (b^+)^2 + n^- (b^-)^2 \right]$$

$$= \frac{1}{2s+1} \left[ (s+1)(b^+)^2 + s(b^-)^2 \right] \quad \longrightarrow$$

$$b^{inc} = \sqrt{\langle b_i^2 \rangle - \langle b_i \rangle^2}$$

$$= \frac{\sqrt{s(s+1)}}{2s+1} (b^+ - b^-)$$

Bsp:  $H$  ( $s=1/2$ )

Für den Tripletzustand  $S^+ = 1$  mit  $n^+ = 3$  gilt

$$b^+ = 1.04 \times 10^{-12} \text{ cm}$$

Für den Singuletzustand  $S^- = 0$  mit  $n^- = 1$  gilt

$$b^- = -4.74 \times 10^{-12} \text{ cm}$$

$$\langle b \rangle = \frac{1}{4} [3b^+ + b^-] = -0.38 \times 10^{-12} \text{ cm}$$

$$\langle b^2 \rangle = \frac{1}{4} [3(b^+)^2 + (b^-)^2] = 6.49 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (\text{barn})$$

→

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{coh}(H) &= 1.8 \text{ barn} \\ \mathbf{s}_{inc}(H) &= 79.9 \text{ barn} \end{aligned}$$

Bsp:  $D$  ( $s=1$ ):

Für  $S^+ = 3/2$  mit  $n^+ = 4$  gilt

$$b^+ = 0.95 \times 10^{-12} \text{ cm}$$

Für  $S^- = 1/2$  mit  $n^- = 2$  gilt

$$b^- = 0.10 \times 10^{-12} \text{ cm}$$

→

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{coh}(D) &= 5.6 \text{ barn} \\ \mathbf{s}_{inc}(D) &= 2.0 \text{ barn} \end{aligned}$$

# Neutronenstreuung

## Eigenschaften einiger Isotope bezüglich der Neutronenstreuung

Reference: SEARS, V.F. (1984) 'Thermal-neutron scattering lengths and cross-sections for condensed matter research' Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario, Canada.

Element	Z	A	Spin	Relative abundance	Coherent scattering length (10 <sup>-15</sup> m)			Cross sections (in barns)						
					Coher.	Incoh.	Absorp.	Coher.	Incoh.	Scat.	Absorp.			
H	1				-3.7409			1.7586	79.90	81.66	0.3326			
				1	1/2	99.985	-3.7423	25.217	1.7599	79.91	81.67	0.3326		
				2	1	0.015	6.674	4.033	5.597	2.04	7.64	0.00051		
				3	1/2	(12.32A)	4.94	0.00	3.07	0.00	3.07	0		
He	2				3.26			1.34	0.00	1.34	0.00747			
				3	1/2	0.00014	5.74	-i × 1.48	-1.8	+i × 2.56	4.42	1.2	5.6	5333.
				4	0	99.9998	3.26	0	1.34	0	1.34	0		
Li	3				-1.90			0.454	0.91	1.36	70.5			
				6	1	7.5	2.0	-i × 0.26	-1.79	+i × 0.25	0.51	0.41	0.92	940.
				7	-3/2	92.5	-2.22	-2.49	0.619	0.78	1.40	0.0454		
Be	4	9	-3/2	100	7.79			7.63	0.005	7.64	0.0076			
B	5				5.30			3.54	1.70	5.24	767.			
				10	3	20	-0.1	-i × 1.06	-4.7	+i × 1.23	0.14	3.0	3.1	3837
				11	-3/2	80.	6.65	-1.31	5.56	0.22	5.78	0.0055		

## Neutronenoptik

### Brechungsindex für Neutronen

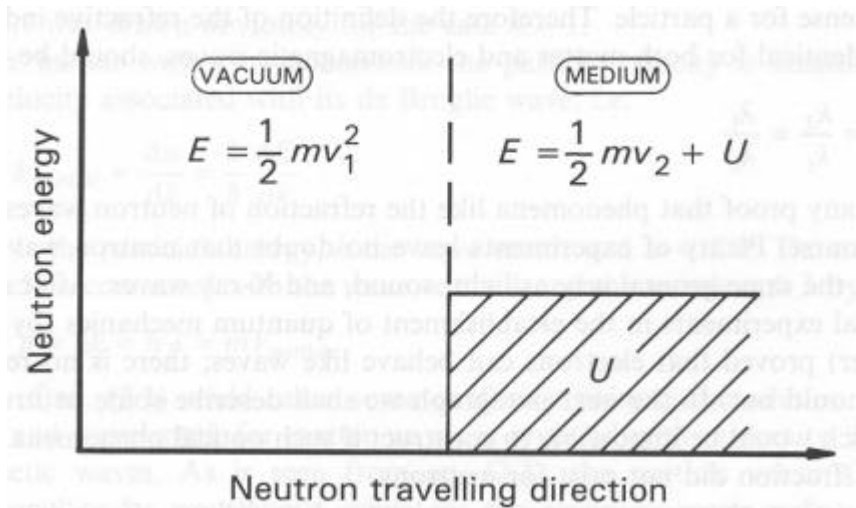
Aufgrund der Welleneigenschaften von Neutronenstrahlung kann analog zur Lichtstreuung über die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Strahlung in unterschiedlichen Medien ein Brechungsindex definiert werden:

$$n = \frac{k_2}{k_1} = \frac{I_2}{I_1}$$

Das Brechungsphänomen kann mit Hilfe der folgenden Betrachtung verstanden werden. Das Neutron durchdringt mit der kinetischen Energie  $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$  das Vakuum und trifft an Grenzfläche auf ein Medium. Die Wechselwirkungsenergie  $U$  in dem Medium ist konstant. Die Gesamtenergie des Neutron bleibt erhalten so dass gilt:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{\hbar k_1^2}{2m} = \frac{\hbar k_2^2}{2m} + U \quad \longrightarrow$$

$$n = \frac{k_2}{k_1} = \frac{\sqrt{k_1^2 - 2mU / \hbar^2}}{k_1} \\ = \sqrt{1 - \frac{2mU}{\hbar^2 k_1^2}} = \sqrt{1 - \frac{U}{E_{kin,1}}}$$



## Neutronenoptik

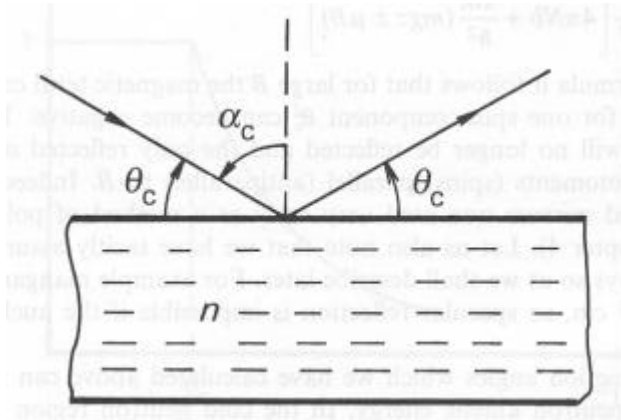
Durch Einsetzen des Fermi-Potentials ergibt sich für den Brechungsindex:

$$n = \sqrt{1 - \frac{4pN\bar{b}}{k_1^2}} \quad \text{mit} \quad U(\mathbf{r}) = \frac{2p\hbar^2}{m} b\mathbf{d}(\mathbf{r}) \quad \text{und} \quad \bar{b} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i$$

Typische Werte des Brechungsindex für Neutronen liegen wie bei der Röntgenstreuung bei  $n \gg 1$  (aber kleiner als 1 !):

Beispiel:  $b : 5 \cdot 10^{-15} \text{ m}; N \approx 10^{29} \text{ m}^{-3}; k_1 = 5 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1} \longrightarrow \frac{4pN\bar{b}}{k_1^2} = 2 \cdot 10^{-6}$

Dieser Wert des Brechungsindex für Neutronen spiegelt die Tatsache wider, dass ähnlich wie bei der Röntgenstreuung die Streuung der Strahlung in der Materie relativ schwach ist.



### **kritischer Glanzwinkel**

$$\theta_c = \pi/2 - \alpha_c$$

Nach dem Gesetz von Snellius folgt:

$$\cos \theta_c = n$$

$$\longrightarrow q_c^2 = \frac{4pN\bar{b}}{k_1^2} \quad \text{sehr kleine } \theta_c \approx 10^{-3}$$

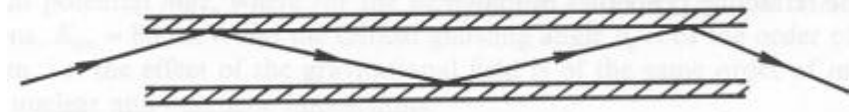
# Neutronenleiter

Um Streuexperimente mit Neutronen durchzuführen, ist es aus verschiedenen Gründen hilfreich, die Neutronen vom Entstehungsort (z.B. Reaktor) zu einem geeigneten Meßplatz möglichst verlustfrei zu führen.

## verlustfreier Neutronenleiter durch Totalreflexion

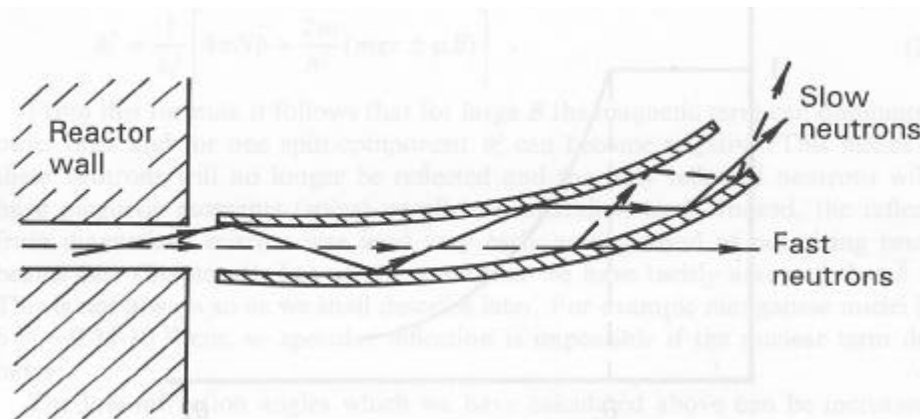
- Homogenität des Materials
- geringe Oberflächenrauigkeit
- Strahlausdehnung: einige cm<sup>2</sup>
- Länge des Neutronenleiters: 10 –100 m

## Prinzip eines Neutronenleiters



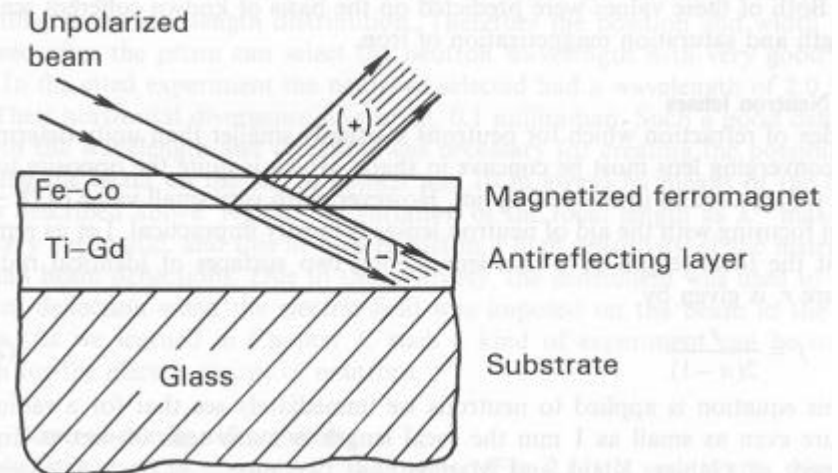
## gekrümmter Neutronenleiter

Selektion von kalten, thermischen Neutronen  
Selektion von anderen Teilchen ( $\gamma$ -Quanten)



## Polarisation des Strahls

$$q_c^2 = \frac{1}{k_1^2} \left[ 4pN\bar{b} + \frac{2m}{\hbar^2} (mgz \pm mB) \right]$$

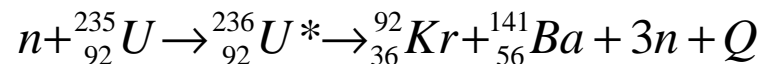
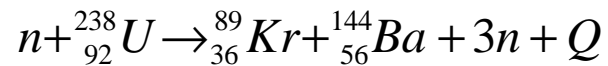


# Neutronenquellen

## **Kernreaktionen**

Unter Kernreaktionen versteht man inelastische Stöße, bei denen Atomkerne angeregt werden und dann in andere Kerne umgewandelt werden oder in andere Kerne zerfallen. Die am häufigsten angewandte Methode Neutronen für Streuexperimente zu erzeugen basiert auf einer kontrollierten Kettenreaktion in einem Kernreaktor.

Die wichtigsten Kernreaktionen in Reaktoren sind die Kernspaltungen der Isotope U-235 und U-238:



### **Energiebilanz:**

$$Q \approx 200 \text{ MeV}$$

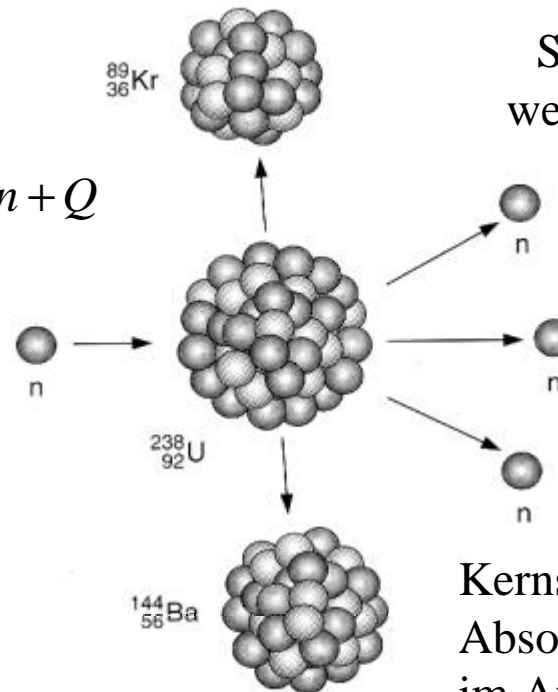
(Vergleich:  $\text{C} \rightarrow \text{CO}_2$ :

$$Q = 13.5 \text{ eV})$$

### **natürliches Vorkommen:**

U-235: 0.7 %

U-238: 99.3 %



Spaltneutronen können  
weitere Urankerne spalten  
**=> Kettenreaktion**

Kernspaltung erfolgt durch  
Absorption des Neutrons  
im Atomkern: hohe Wahrschein-  
lichkeit für langsame Neutronen !



# Kernreaktoren

## Spaltquerschnitte und Moderatoren

Für einen fortlaufenden Spaltprozess wird eine **Kettenreaktion** benötigt. Hierfür ist es wichtig Konkurrenzprozesse und die Spaltwahrscheinlichkeit der Neutronen als Funktion der kinetischen Energie zu betrachten.

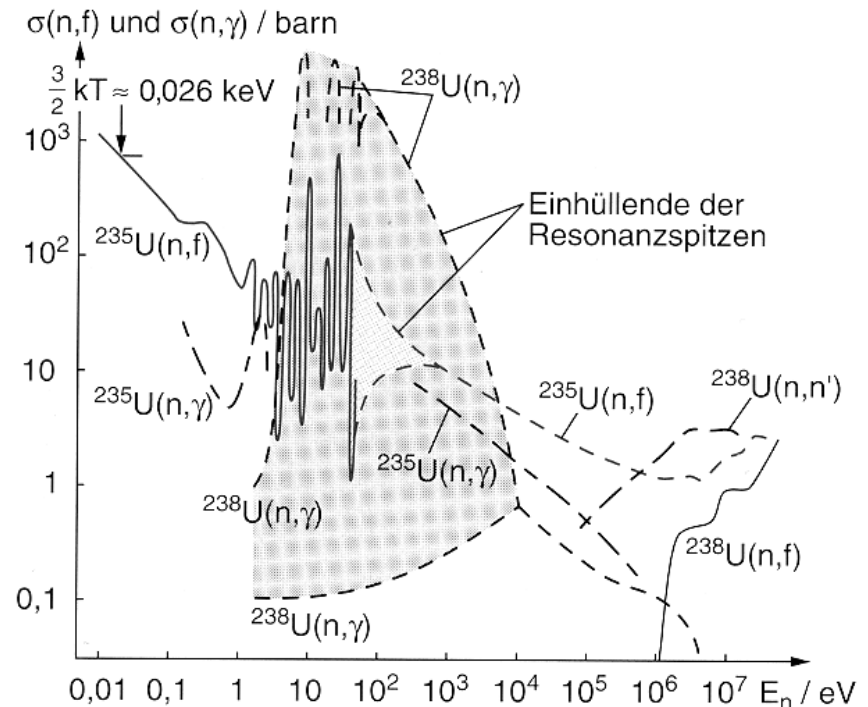
### Konkurrenzprozesse

- Absorption in anderen Materialien (Moderator, Wände, etc.)
- Austritt aus dem Reaktorkern

### Spaltwahrscheinlichkeit

- U-238 wird nur durch schnelle Neutronen ( $E_{\text{kin}} > 1 \text{ MeV}$ ) gespalten.
- U-235 ist durch thermische spaltbar (mit höherer Spaltquerschnitt als U-238 für schnelle Neutronen)
- Durch Anreicherung des U-235 auf ca. 3 % ist eine Kettenreaktion möglich wenn die Spaltneutronen zusätzlich abgebremst werden (**Moderator**).

## Spalt – und Absorptionsquerschnitte: $s(n,f), s(n,g)$



### Moderator

- Aufnahme kinetischer Energie
- geringe Absorption
- Kühlung und Wärmetransport
- Beispiele:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , Graphit

# Kernreaktoren

## Neutronenbilanz

Die Anzahl der Neutronen der Generation  $n$  ( $N_n$ ) wird mit der der nächsten Generation ( $N_{n+1}$ ) verglichen:

$$N_{n+1} = N_n \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{e} \cdot p \cdot f \cdot P_s \cdot P_{th} = k_{eff} \cdot N_n$$

$$dN = \frac{k_{eff} - 1}{T} \cdot N \cdot dt$$

## Multiplikationsfaktor

$k_{eff} = 1$ : stationärer Betrieb

$k_{eff} < 1$ : Kettenreaktion geht aus

$k_{eff} > 1$ : Neutronenzahl steigt  
exponentiell

## Reaktivität eines Reaktors

$$\mathbf{r} = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

Regelung eines Reaktors findet über  
**Steuerstäbe** mit Absorbermaterial  
(Bor, Cadmium) statt.

$\mathbf{h}$ : Anzahl der Spaltneutronen pro Kern

$\mathbf{e}$ : Wahrscheinlichkeit der Kernabsorption  
ohne Spaltung

$1 - p$ : moderiert aber nicht absorbiert

$1 - f$ : Moderatorabsorption

$1 - P_s$ : Entweichen der schnellen Neutronen

$1 - P_{th}$ : Entweichen der thermischen Neutronen

## Vergleich Leistungs- und Forschungsreaktoren

**Leistungsreaktor**: hohe thermisch Leistung

~ 1000 MW; niedrige Anreicherung (LEU);

Kraft-Wärmekopplung (hohe Drücke)

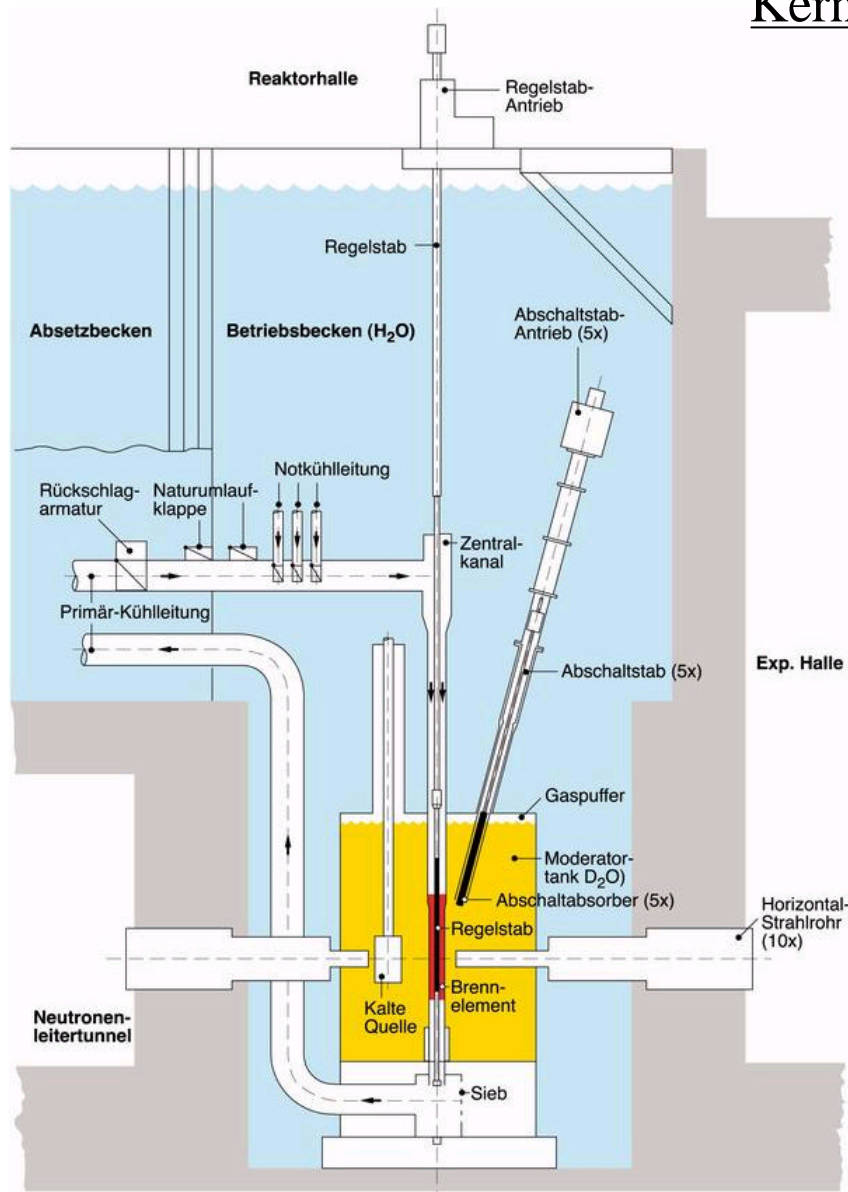
**Forschungsreaktoren**: hohe Neutronenflüsse

(Kompaktkern und/oder hohe Anreicherung: HEU)

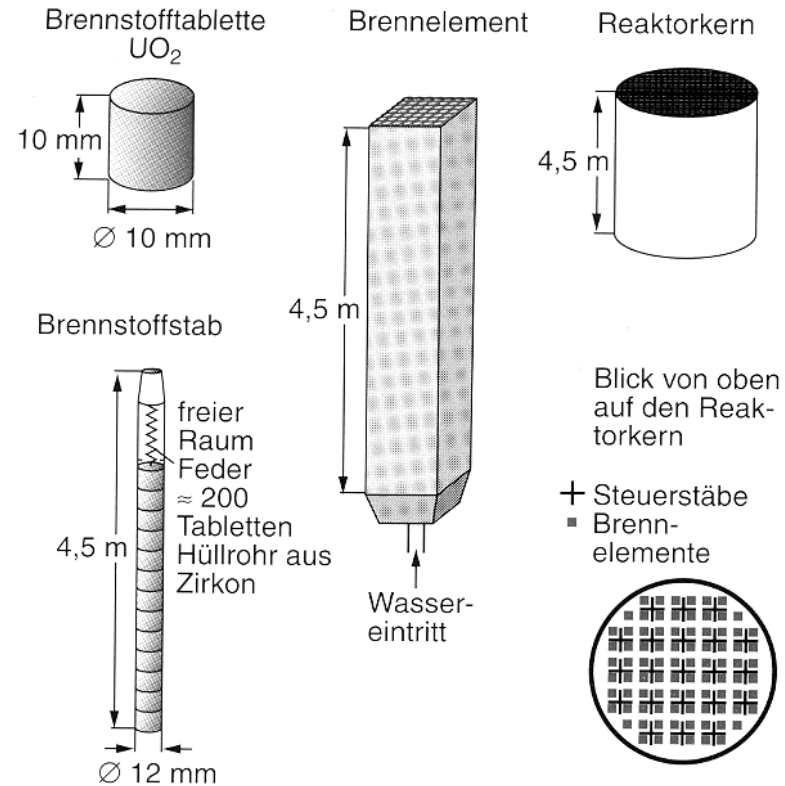
niedrige thermische Leistung: 10 – 70 MW

Schwimmbadreaktor

# Kernreaktoren



## Bestandteile eines wassergekühlten Reaktorkerns



Brennstoff: Uranerz → gasförmiges  $UF_6$  → Isotopentrennung durch Ultrazentrifugation (2-6 % Anreicherung) → Uranoxid

Schema eines Forschungsreaktors (FRM-2)