

KAPITEL 15 :

Kernspaltung

- 15.1 Anwendung der Kernenergie**
- 15.2 Anwendung der Kernspaltung**
- 15.3 Kernspaltungsreaktor**
- 15.4 Radioaktiver Abfall und Entsorgungskonzept**
- 15.5 Neue Konzepte:
Transmutationsanlage**
- 15.6 Kernspaltungsbombe**
- 15.7 Strahlendosis**

15.1 Anwendung der Kernenergie

Gewinnung von Kernenergie: 1. induzierte Kernspaltung 2. Kernfusion

Historische Bemerkungen:

- 1934: Meitner, Hahn und Strassmann beginnen mit ihrer Forschung an Transuranelementen
- 1938/39: Entdeckung der Kernspaltung von Uran und Thorium:
Hahn, Strassmann, Meitner, Frisch
- 1938: Lise Meitner (österreichische Staatsbürgerin, Professorin in Berlin) flieht nach Schweden und hat durch briefliche Anregungen wesentlich zur Entdeckung der Kernspaltung beigetragen.
- 1939: Meitner und Frisch liefern erste theoretische Deutung der Kernspaltung



Otto Hahn



Lise Meitner

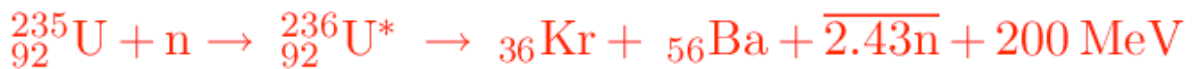
Otto Hahn: Nobelpreis 1944:
"for the discovery of the fission
of heavy nuclei"

- 2. Dez. 1942 : Chicago (E. Fermi): 1. Uran-Graphit Reaktor wurde kritisch
→ gesteuerte Kettenreaktion
- 1942 - 1945: 1. Atombombe in USA unter Leitung von Oppenheimer entwickelt
16.7.1945: in Wüste von New Mexico getestet
6.8.1945: Hiroshima (U) } erster Einsatz
9.8.1945: Nagasaki (Pu) }
- Friedliche Nutzung der induzierten Kernspaltung zur Energiegewinnung:
27.6.1954: Kernkraftwerk in Obninsk (bei Moskau)
- 1.11.1952: Test der Wasserstoffbombe auf dem Bikini-Atoll
→ 1. unkontrollierte Kernfusionsreaktion realisiert (USA)
830 mal Hiroshima Bombe

Gesteuerte Kernfusion zur Energiegewinnung bis heute noch nicht gelungen

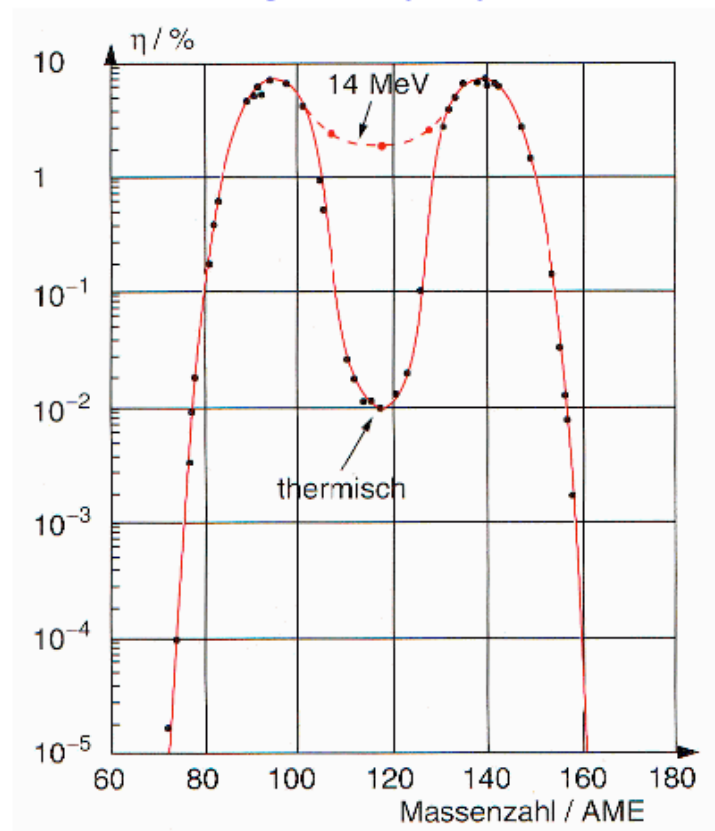
15.2 Anwendung der Kernspaltung

- Neutroneninduzierte Kernspaltung des $^{235}_{92}\text{U}$:



Bisher ca. 300 Isotope bekannt, die als Spaltprodukte auftreten können

Verteilung der Spaltprodukte

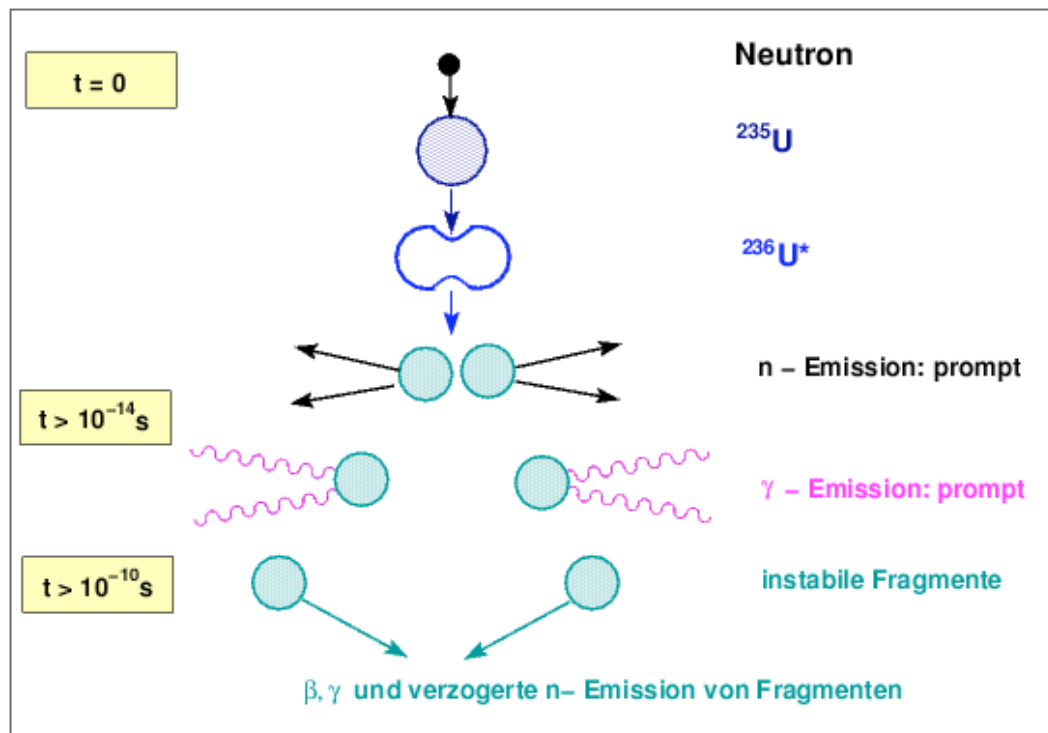


⇒ grösste W'keit für Massenverhältnis 2:3

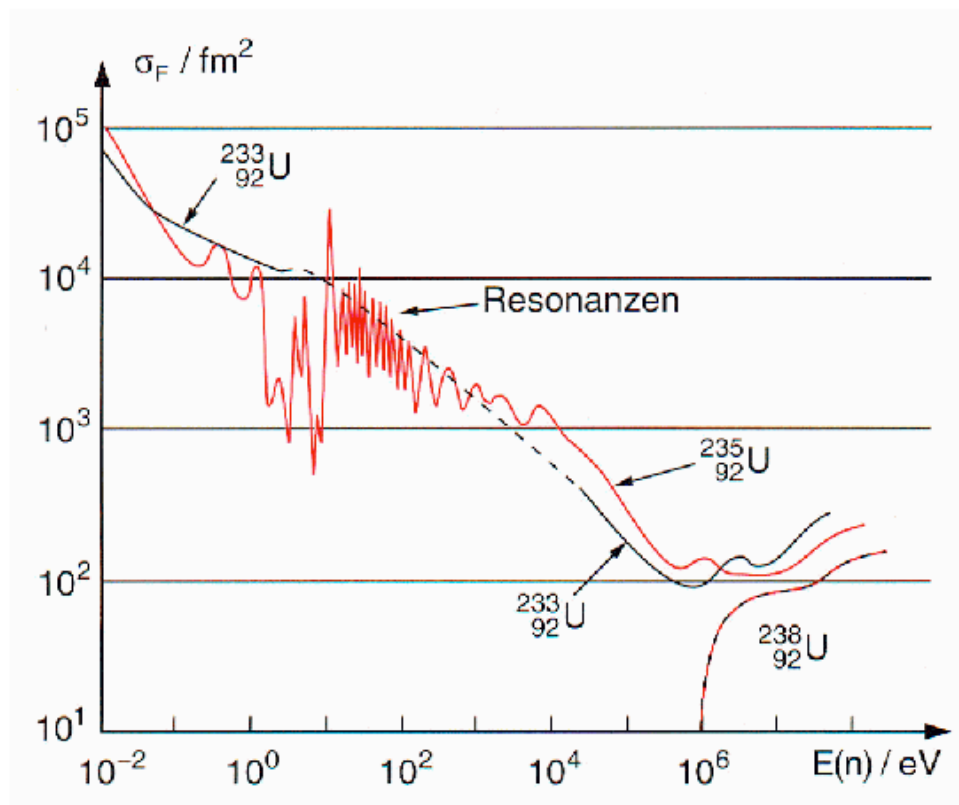
- Pro Kernspaltung entstehen 2–3 freie Neutronen innerhalb von ca 10^{-13} s freigesetzt
≙ prompte Neutronen

Neutronenemission nach β -Zerfall: verzögerte n
 $\approx 0.65\%$ der gesamten Neutronenemission
→ zur Steuerung von Kernspaltungsreaktoren

- Zeitlicher Ablauf einer Spaltung:



- Spaltungsquerschnitt $\sigma(U, n, f)$ als Funktion der kinetischen Energie der Neutronen für $^{238}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$ und $^{233}_{92}\text{U}$



- Kettenreaktion**

Für n-induzierte Spaltung: $\sigma \sim E_n^{-1/2}$

$^{235}_{92}\text{U}$: durch thermische n gespalten

freiwerdende Neutronen: $\langle 2.43 \rangle$, $\langle E_n \rangle \sim 2 \text{ MeV}$
 → wenn abgebremst, induzieren wieder Spaltung
 → Kettenreaktion

Multiplikationsfaktor der Kettenreaktion:

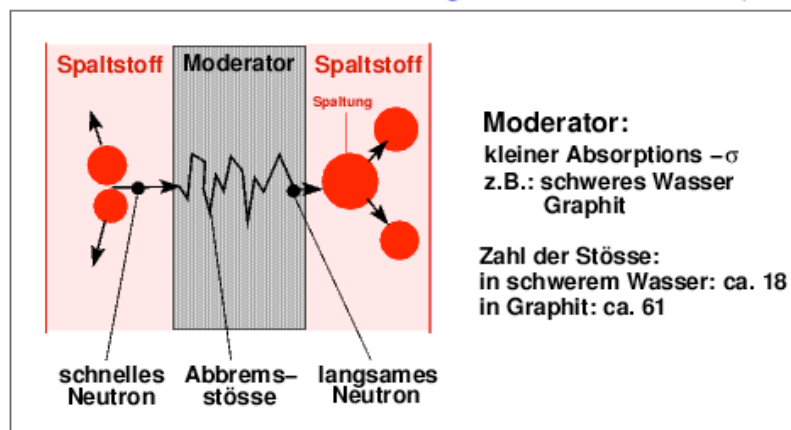
$$k = \frac{N_{n+1}}{N_n}$$

$N_{n+1}, N_n \dots$ Anzahl der im spaltbaren Material absorbierten therm. Neutronen der (n+1)- und n-ten Generation

- Natürliches Uran** besteht aus ^{238}U und 0.7% ^{235}U

erzeugen der Kettenreaktion durch

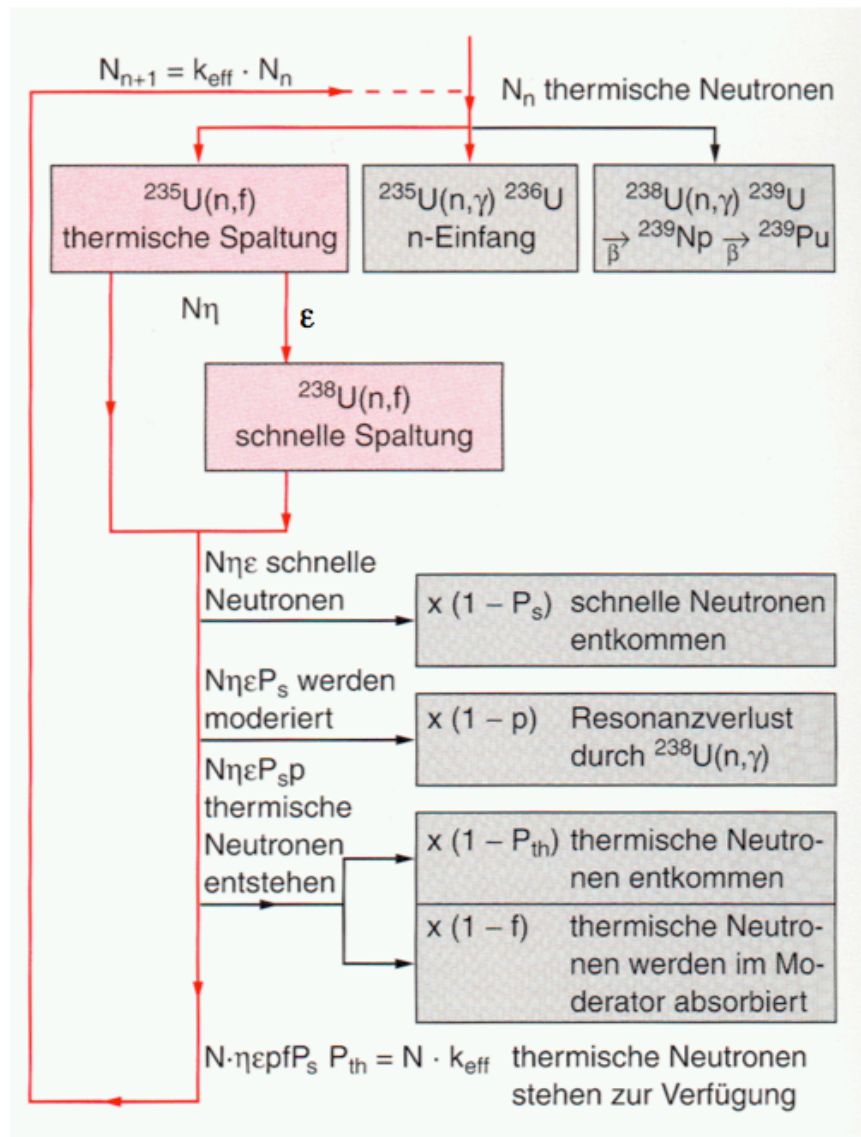
- Anreicherung des Isotops ^{235}U
- Einsatz von Moderatoren: muss n vor Zusammenstoß mit ^{235}U auf Energie unterhalb der Resonanzenergie abbremesen ($\sim 7.5 \text{ eV}$)



- Freigesetzte Kernspaltungsenergie (^{235}U)**

E_{kin} der Kerne	: 167 MeV	} nutzbare Energie = 192 MeV totale Energie = 204 MeV
Prompte n	: 5 MeV	
Prompte γ	: 6 MeV	
verzögerte γ	: 6 MeV	
β^- Strahlung	: 8 MeV	
Neutrinos	: 12 MeV	

- Lebenszyklus von N_n thermischen Neutronen von einer Spaltgeneration zur nächsten:



- Thermische n für die Spaltung der $(n + 1)$ -ten Generation:

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

$k_{eff} = 1$: stationärer Betrieb

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

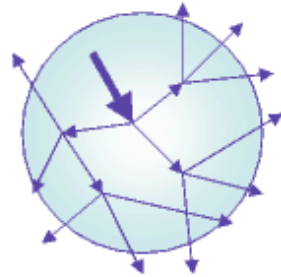
$k_{eff} > 1$: Zahl der Neutronen wächst exponentiell an

- Grenzfall: ∞ ausgedehnter Reaktor

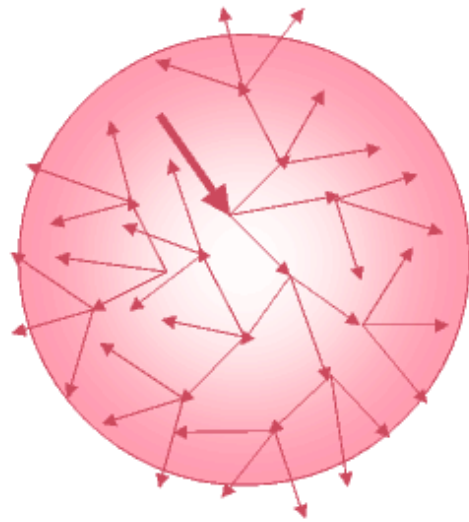
$$k_{\infty} = \eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f \quad \text{Vierfaktorformel}$$

- Abhängigkeit der Kettenreaktion von der Masse des spaltbaren Materials:

$k = 1$: kritische Masse



$k < 1$: unterkritische Masse



$k > 1$: überkritische Masse

- Kritische Masse eines beliebig geformten spaltbaren Materials durch Verhältnis der Oberfläche zum Volumen festgelegt

^{235}U : ≈ 50 kg: entspricht einer ^{235}U -Kugel mit $R \approx 8.4$ cm

Bemerkung: kritische Masse verkleinern, indem spaltbares Material mit Neutronenreflektor umgeben

- Energiegewinnung:

Spaltung von 1 kg ^{235}U Uran $\hat{=}$ Verbrennung von 750 t Kohle



Produkt. von
radioaktiven
Spaltprodukten



2770 t CO_2 in Atmosphäre

15.3 Kernspaltungsreaktor

- Anlage zur Erzeugung von Wärme durch die bei gesteuerten Kettenreaktion freiwerdende kinet. Energie
→ Kühlmittelkreislauf → Stromerzeugung

spaltbares Material: Natururan oder ^{235}U –angereichert
von überkritischer Masse

aktive Zone $\hat{=}$ Spaltzone: spaltbares Material
Kühlmittel
Moderator
Regelstäbe des Reaktors

- Bedingung für Reaktorbetrieb: $k = 1$

Regelung von k : durch neutronenabsorbierende
Regelstäbe, z.B.: Bor, Cadmium

$k > 1$: $k_{\bar{u}} = k - 1$ (Überschuss)

$$dN = \frac{N k_{\bar{u}}}{\tau} dt \quad \tau \dots \text{mittleres } \tau \text{ einer Neutronengeneration}$$

$$N = N_0 e^{(k_{\bar{u}}/\tau)t}$$

Reaktorperiode: $T = \frac{\tau}{k_{\bar{u}}}$

Wenn Regelung nur mit verzögerten Neutronen
($\tau \geq 0.1\text{s}$):

$$0 < k_{\bar{u}} < 0.0065 \rightarrow T \simeq 15\text{s}$$

→ mechanische Regelung möglich

- Reaktorbetriebsbereiche:

$1 < k < 1.0065$: prompt unterkritisch

$k = 1.0065$: prompt kritisch

$k > 1.0065$: prompt überkritisch

- Graphit – Reaktor (1. Reaktor (Fermi), Tschernobyl)

spaltbares Material: angereichertes ^{235}U : 1% - 5%

Moderator: Graphit

Kühlmittel: CO_2

Wärmeabfuhr : Wasser

grosse Reaktorabmessung, da Graphit geringes
Neutronenbremsvermögen $\rightarrow$ grosser Energieaufwand

- Leichtwasser-Reaktor :

spaltbares Material: angereichertes ^{235}U : 1% - 5%

H_2O verwendet für: Moderator

Kühlmittel

Neutronenreflektor

Druckwasserreaktor : 2 Wasser-Kreisläufe (z.B. Goesgen)

Siedewasserreaktor : 1 Wasser-Kreislauf (z.B. Leibstadt)

zur Zeit wirtschaftlichster Reaktortyp

- Schwerwasser-Reaktor :

spaltbares Material: Natururan

Moderator: D_2O (Deuterium mit kleiner n -Absorption)

Normal : Druckwasserreaktor

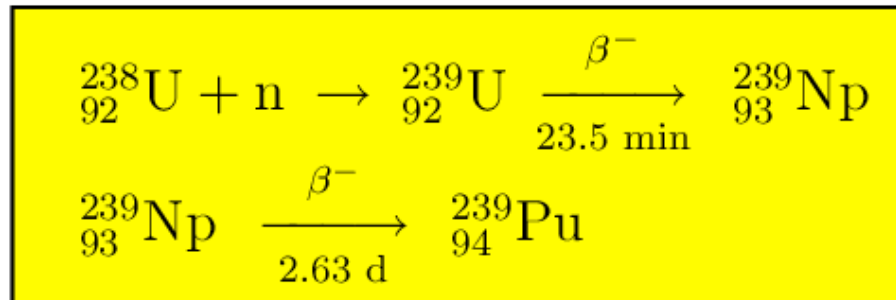
Beispiel: Candu (Canada)

Brutreaktor (Brüter)

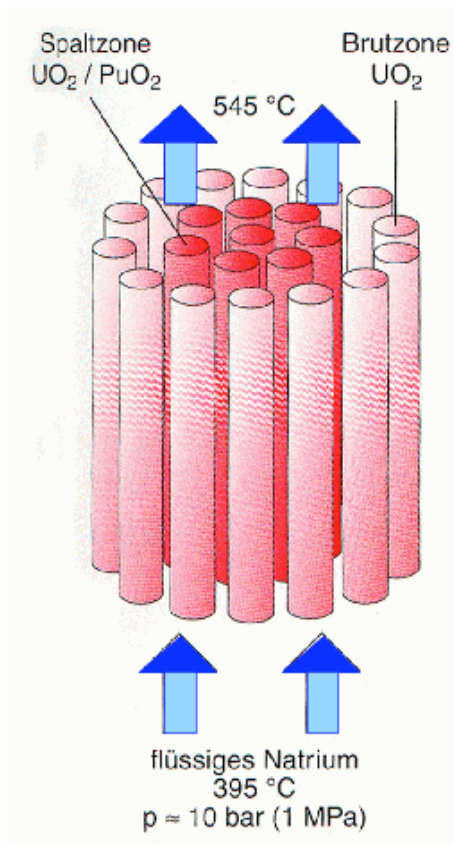
um Ausnutzungsgrad des Uranbrennstoffes zu erhöhen

Prinzip: nutze Umwandlung von ^{238}U nach ^{239}Pu
durch schnelle n zur Energiegewinnung
und Erzeugung neuer Spaltneutronen

Neutronen induzieren folgende Kettenreaktion:



$\Rightarrow$ aus $^{238}_{92}\text{U}$ wird $^{239}_{94}\text{Pu}$ "erbrütet", bei gleichzeitiger Spaltung
von $^{235}_{92}\text{U}$



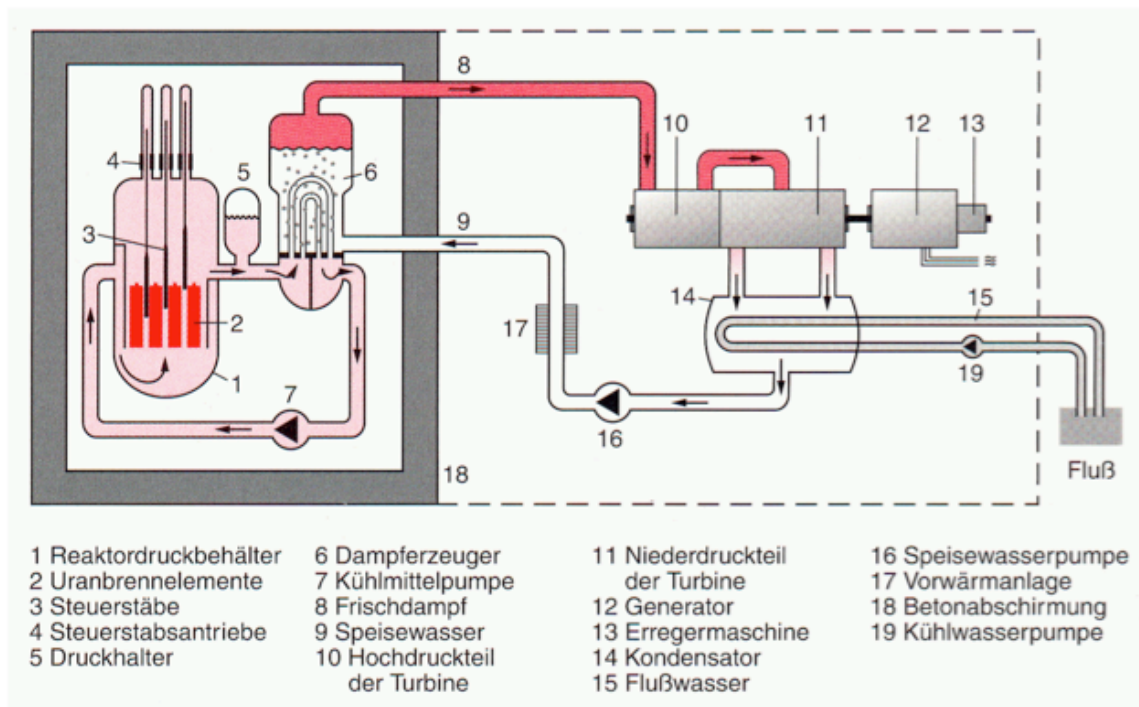
Kühlmittel: flüssiges Natrium
chemisch aktiv
wird radioaktiv



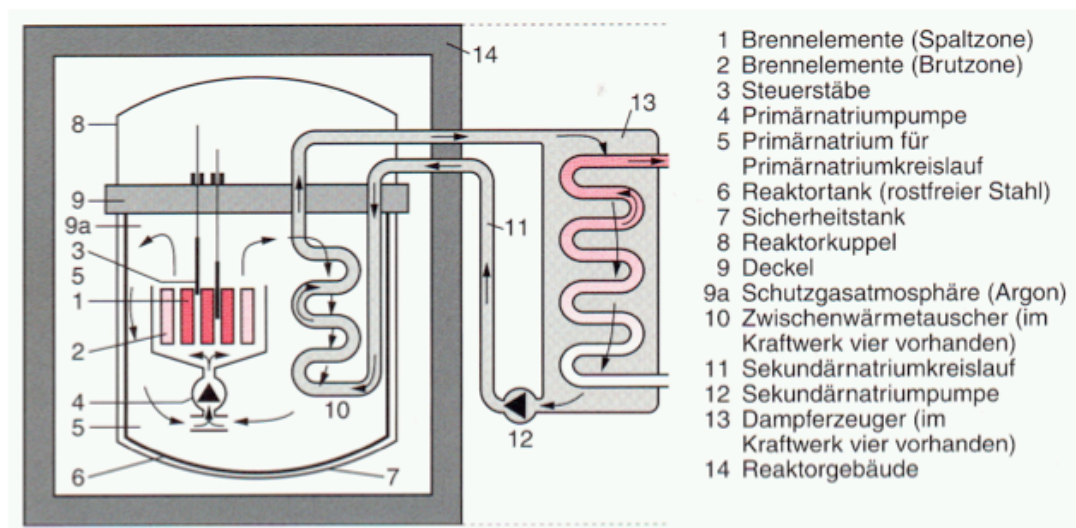
Siedepunkt: 883°C
Schmelzpunkt 98°C
 $\hookrightarrow$ auch bei kleinem Druck
bleibt immer flüssig

Steuerung des Reaktors schwieriger als bei Leichtwasser –
Reaktoren

Schematische Darstellung eines Druckwasser Reaktors



Aufbauprinzip eines Kernkraftwerks mit schnellem Brutreaktor

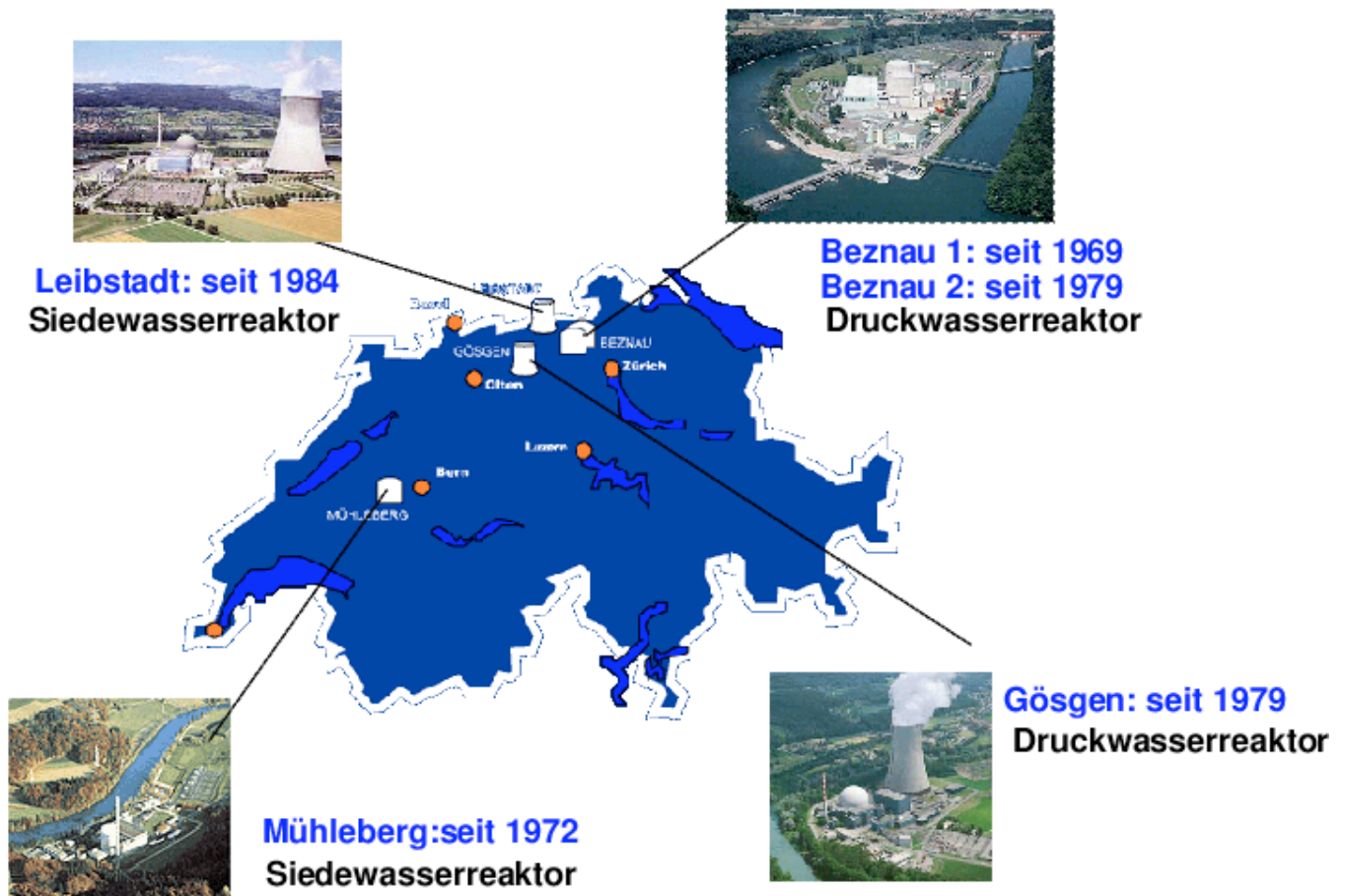


Wirkungsgrad der Energieproduktion:

Vollständige Spaltung von 1 g ^{235}U liefert an einem ganzen Tag
1MW Leistung

$\Rightarrow$ 1 g ^{235}U liefert Energie $\hat{=}$ $3 \cdot 10^6$ mal von 1 g Kohle

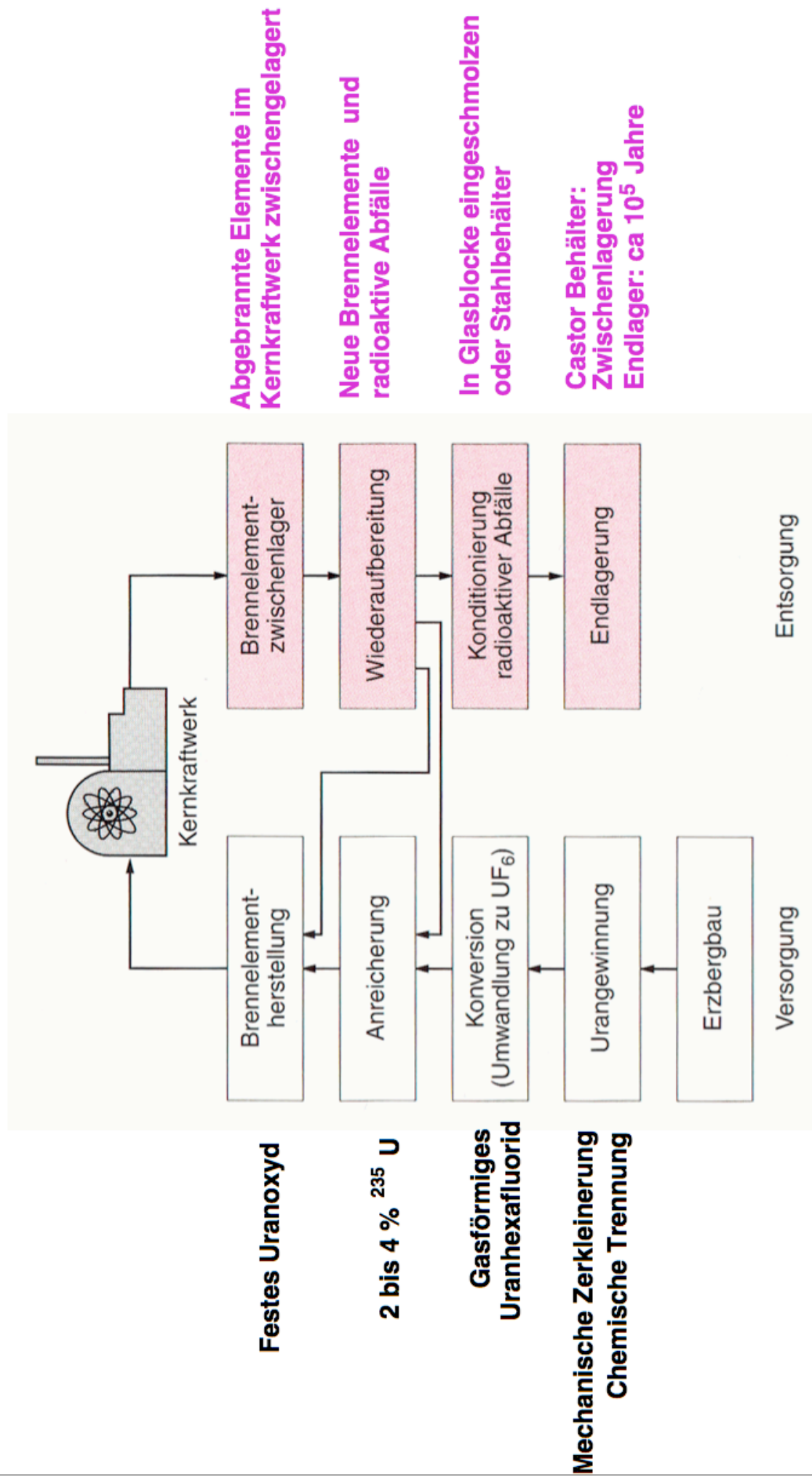
Kernkraftwerke in der Schweiz



Anteil der Kernenergie an der Stromerzeugung: Beispiele

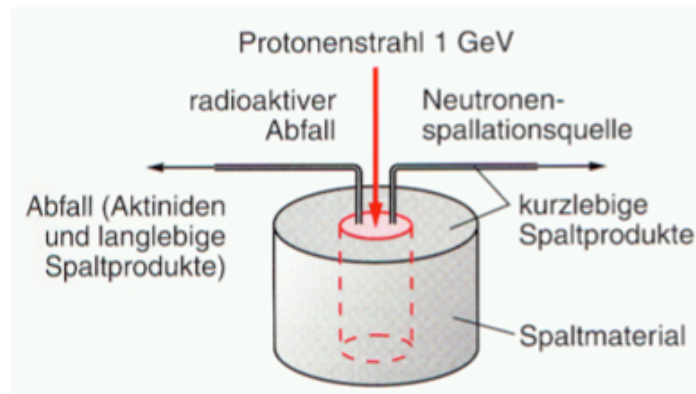
Land	%-Anteil des Stromes	Zahl der KKW
Schweiz	40	5
Frankreich	80	58
Grossbritannien	28	35
Deutschland	32	19
Belgien	60	7
Russland	14	29
Ukraine	47	14
USA	20	104
Welt (31 Länder)	16	440 + 30 im Bau

15.4 Radioaktiver Abfall und Entsorgungskonzept



15.5 Transmutationsanlage: neues Konzept

- Beseitigung der radioaktiven Abfälle : Prinzip der Umwandlung radioaktiver Spaltprodukte in stabile Elemente durch Beschuss mit **hochenergetischen Protonen**:



Target aus geschmolzenem Blei-Bismut-Eutektikum

schnelle n : Abbremsen durch Graphitmoderator, der Spallationsquelle zylinderförmig umgibt

Spallation: Neutronenerzeugung durch "Abdampfen" eines schweren Kerns

- Durch Moderator fließt flüssige Lösung der Abfallprodukte:
 - Actinide: Plutonium, Neptunium, . . .
durch n -Anlagerung gespalten
freiwerdende Energie:
20% für Beschleuniger
80% für Energieabgabe
 - Spaltprodukte: Jod, Cäsium, Krypton, . . .
durch n -Beschuss entstehen:
 - * langlebige Kerne: weiter n -Beschuss
 - * kurzlebige Kerne: zerfallen → Energie als Nutzwärme
 - * stabile Kerne: aus Kreislauf extrahieren
- Erwarte: 99.9% der Actinide gespalten
99% der Spaltprodukte umwandeln
in ungefährliche Isotope

Transmutationsanlage in Reaktor eingebaut:

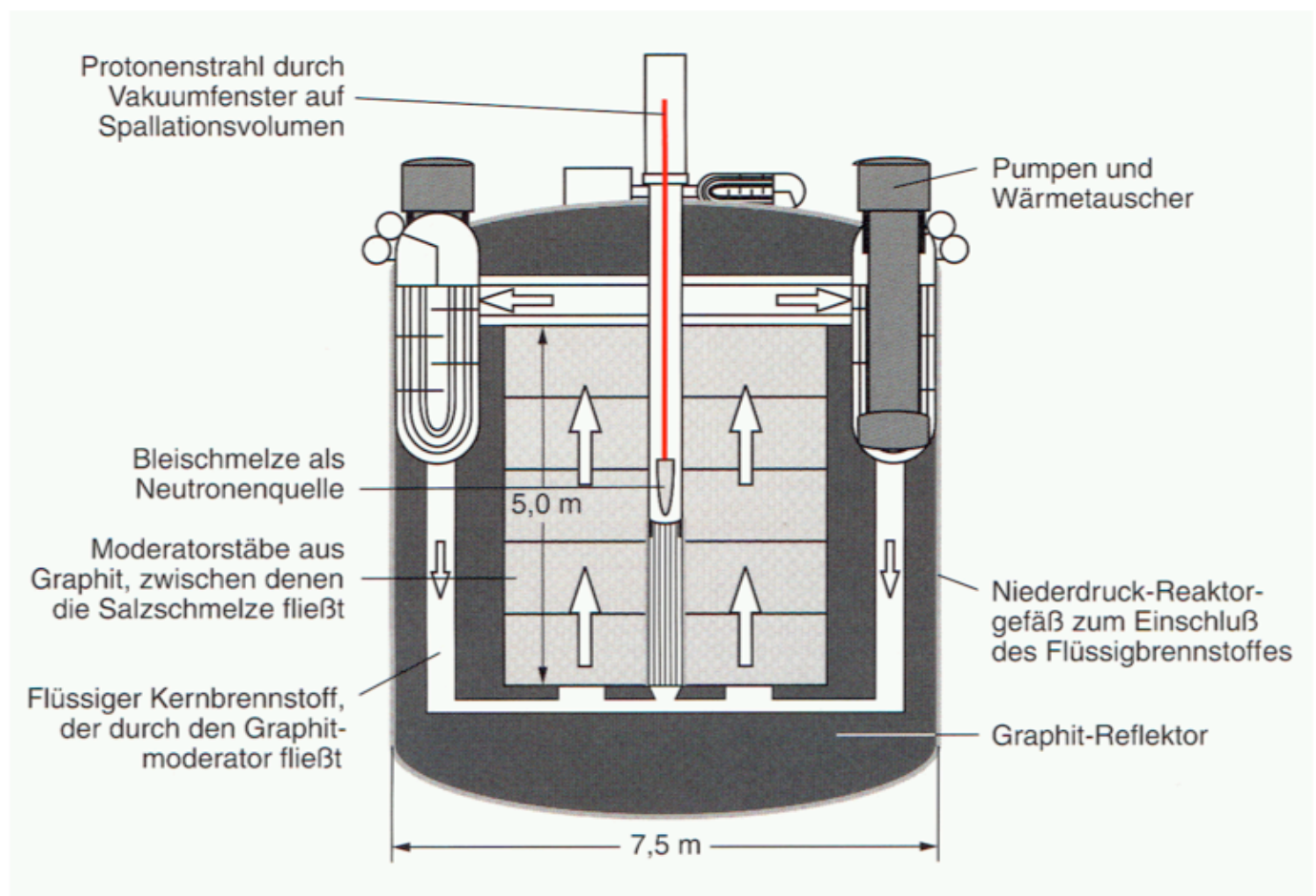
Reaktor kann unterkritisch gefahren werden da zusätzliche n aus Spallationsquelle erhält

Abschalten des Beschleunigers

→ Kettenreaktion wird unterbrochen

Experimentelle Schwierigkeiten noch nicht
gelöst!!!

Schematisch geplanter Aufbau eines Transmutations-Kernreaktors:



15.6 Atombombe

Kernspaltungsbombe

- Explosionsartig ablaufende Kettenreaktion eines spaltbaren Materials überkritischer Masse
- 1942 – 1945: USA: Oppenheimer, Fermi, Bethe, Lawrence, Seaborg, Teller, . . .

Folgende Probleme mussten gelöst werden:

- Gewinnung von ^{235}U durch Isotopentrennung
- Bestimmung der mittleren freien Weglänge
→ Ermittlung der kritischen Masse
- Verhindern vorzeitiger Explosion

Hiroshima: Uranbombe	} Sprengkraft $\hat{=}$ 20 kt TNT
Nagasaki: Plutoniumbombe	

TNT: Trinitrotoluol . . . herkömmlicher Sprengstoff

Auswirkung der Normalbombe:

- von wirksamer Energie: $\sim 83\%$ in E_{kin} der Spaltprodukte
→ Aufheizen des Explosionszentrum: $\sim 10^7 \text{ K}$
→ Heisser leuchtender Feuerball: $\phi \sim 470 \text{ m}$
- Strahlung einige 0.1 s nach Explosion maximal
- Direktkernstrahlung: γ -Strahlung: $\sim 3\%$ der Energie
n-Strahlung: $\sim 3\%$ der Energie
→ wirkt tödlich bis einige km Entfernung
- Rest: 11%: langfristig nach Explosion in Form von β - und γ -Strahlung der radioaktiven Spaltprodukte ausgesendet
→ Gesundheitsschäden

15.7 Strahlendosis

- Aktivität: Zahl der pro Sekunde zerfallenen Kerne
Einheit: 1 Bq (Becquerel) = 1 Zerfall/s
1 Ci (Curie) = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq
- Energiedosis: im bestrahlten Körper absorbierte Strahlungsenergie pro Masseneinheit
Einheit: 1 Gy (Gray) = 100 rad = 1 J/kg
rad. . . radiation absorbed dose
- verschiedene Strahlenarten → unterschiedliche Schädigung

Qualitätsfaktor Q

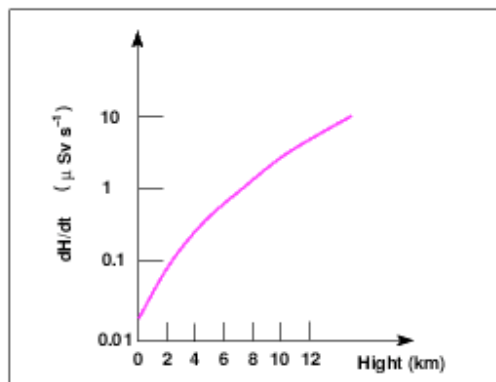
Äquivalentdosis H = Energiedosis · Q

Q	Strahlungsart
1	Röntgen–, Gammastrahlung und Elektronen
2,3	thermische Neutronen
10	schnelle Neutronen, Protonen und einfach geladene Ionen
20	α -Teilchen und schwere Ionen

Einheit: 1 Sv (Sievert)
1 rem = 0.01 Sv

Quellen der natürlichen Strahlenbelastung:

- Höhenstrahlung:



Äquivalentdosisleistung
der kosmischen Strahlung

Höhe über Erdboden: $h = 0$ km
→ $0.04 \mu\text{Sv/s}$

- Natürliche Radioaktivität ausserhalb und innerhalb des Hauses:

Aussenbereich		Belastung im Haus	
Gestein	A/Bq/kg	Quelle	Aktivität
Granit	1000	Radon	$\approx 50 \text{ Bq/m}^3$ Luft
Tonschiefer	700	Leitungswasser	$1 - 30 \text{ Bq/dm}^3$
Sandstein	350	Kalium im Körper	4500 Bq
Basalt	250		
Gartenerde	400		

- Mensch: 25% externe Strahlenbelastung
 - 50%: Höhenstrahlung
 - je 25%: Kalium und Nuklide aus U + Th - Reihe
- 75% interne Strahlenbelastung
 - 68%: einatmen von Radon im Zimmerluft
 - 32%: durch Nahrungsmittel

Mittlerer Wert der Strahlungsbelastung: $\sim 2.2 \text{ mSv/a}$

Medizinische Untersuchung: $\sim 0.5 - 1.0 \text{ mSv/a}$