

# Atomenergie durch Kernspaltung

Sommerakademie Salem 2008

Die Zukunft der Energie

Sabine Weishäupl

17. August - 30. August 2008

# Inhalt

- 1 Kernphysik
  - Grundlagen
  - Bindungsenergie
  - Bethe-Weizsäcker-Formel
  - Radioaktivität
- 2 Kernspaltung
  - Induzierte Kernspaltung
  - Kettenreaktion
- 3 Kernreaktoren
  - Aufbau eines Kernreaktors
  - Siedewasserreaktor
  - Druckwasserreaktor
  - Schwerwasserreaktor
  - RBMK
  - Schneller Brutreaktor
  - Thorium-Hochtemperaturreaktor
- 4 Atommüllentsorgung
  - Radioaktiver Abfall
  - Endlagerung
- 5 Ausblick

# Chemische Elemente

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Gruppe																	
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La -71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac -103	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh		
Periode			Lanthanoide	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			Actinoide	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Abbildung: Chemische Elemente

# Das Atom

- Das Atom ist das kleinste, mit chemischen Mitteln nicht weiter spaltbare Teilchen eines chemischen Elements.
- Das Atom besteht aus einem elektrisch positiv geladenen Kern und einer Hülle aus negativ geladenen Elektronen.

# Das Atom

- Das Atom ist das kleinste, mit chemischen Mitteln nicht weiter spaltbare Teilchen eines chemischen Elements.
- Das Atom besteht aus einem elektrisch positiv geladenen Kern und einer Hülle aus negativ geladenen Elektronen.
- Der Durchmesser der Hülle beträgt etwa  $10^{-10}\text{m}$  und der Durchmesser des Kerns etwa  $10^{-14}\text{m}$ .

# Das Atom

- Das Atom ist das kleinste, mit chemischen Mitteln nicht weiter spaltbare Teilchen eines chemischen Elements.
- Das Atom besteht aus einem elektrisch positiv geladenen Kern und einer Hülle aus negativ geladenen Elektronen.
- Der Durchmesser der Hülle beträgt etwa  $10^{-10}\text{m}$  und der Durchmesser des Kerns etwa  $10^{-14}\text{m}$ .

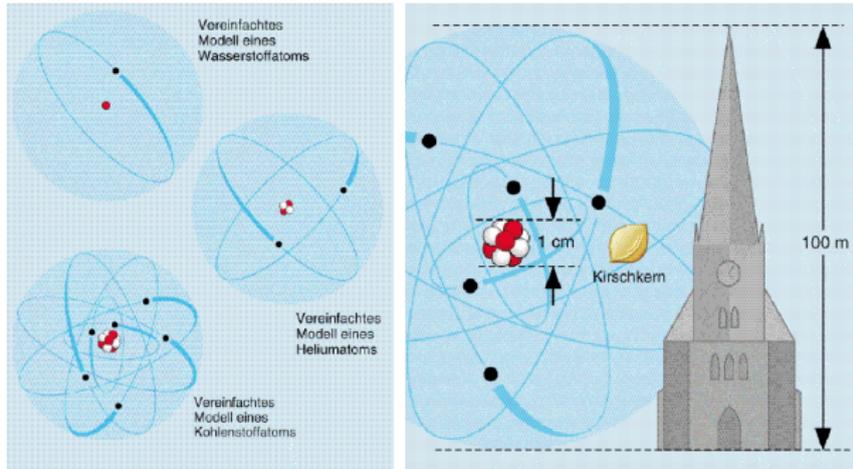


Abbildung: Atome in vereinfachter Modelldarstellung und Größenverhältnis in einem Atom

# Der Kern

- Der Kern baut sich aus elektrisch positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen auf: Nukleonen
- Die Anzahl  $Z$  der Protonen heißt Kernladungszahl oder Ordnungszahl.

# Der Kern

- Der Kern baut sich aus elektrisch positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen auf: Nukleonen
- Die Anzahl  $Z$  der Protonen heißt Kernladungszahl oder Ordnungszahl.
- Die Gesamtzahl der Nukleonen  $A = N + Z$  wird als Massenzahl bezeichnet.

# Der Kern

- Der Kern baut sich aus elektrisch positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen auf: Nukleonen
- Die Anzahl  $Z$  der Protonen heißt Kernladungszahl oder Ordnungszahl.
- Die Gesamtzahl der Nukleonen  $A = N + Z$  wird als Massenzahl bezeichnet.
- Ein Element wird durch  $A$  und  $Z$  gekennzeichnet:  ${}^A_ZX$

# Der Kern

- Der Kern baut sich aus elektrisch positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen auf: Nukleonen
- Die Anzahl  $Z$  der Protonen heißt Kernladungszahl oder Ordnungszahl.
- Die Gesamtzahl der Nukleonen  $A = N + Z$  wird als Massenzahl bezeichnet.
- Ein Element wird durch  $A$  und  $Z$  gekennzeichnet:  ${}^A_ZX$

# Isotope

Isotope sind Nuklide (Atomkernsorten) mit gleicher Kernladungszahl, aber unterschiedlicher Massenzahl.

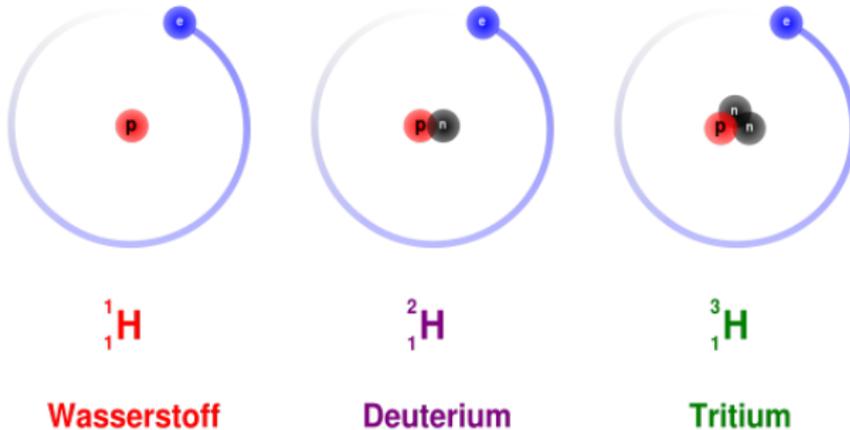


Abbildung: Isotope des Wasserstoffs

# Kernkräfte

- Im Kern werden Protonen und Neutronen durch die starken Kernkräfte zusammengehalten.
- Die Kernkräfte haben eine sehr geringe Reichweite (Größenordnung  $10^{-15}\text{m}$ ).

# Kernkräfte

- Im Kern werden Protonen und Neutronen durch die starken Kernkräfte zusammengehalten.
- Die Kernkräfte haben eine sehr geringe Reichweite (Größenordnung  $10^{-15}$  m).
- Die Kernkräfte sind ladungsunabhängig.

# Kernkräfte

- Im Kern werden Protonen und Neutronen durch die starken Kernkräfte zusammengehalten.
- Die Kernkräfte haben eine sehr geringe Reichweite (Größenordnung  $10^{-15}$  m).
- Die Kernkräfte sind ladungsunabhängig.

# Kernkräfte

Wegen der geringen Reichweite wirken die Kernkräfte nur zwischen unmittelbar benachbarten Kernteilchen. Dies ist immer nur zwischen einer begrenzten Anzahl von Teilchen der Fall. Besteht der Atomkern nur aus wenigen Nukleonen, ist jedes Teilchen mit jedem anderen in Kontakt, so dass die Kernkräfte zwischen allen wirksam sind.

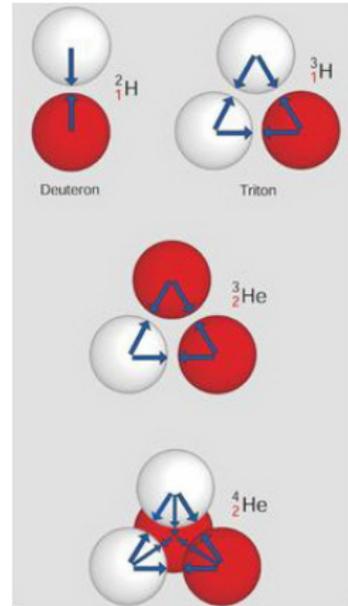
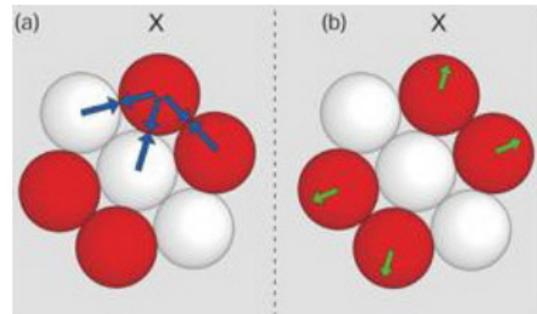


Abbildung: Kernkräfte

# Kernkräfte

Ist die Anzahl der Nukleonen größer, kann nicht mehr jedes Kernteilchen mit jedem anderen in Wechselwirkung treten. Anders ist es bei den elektrischen Kräften, die auch noch über größere Entfernungen abstoßend wirken.



**Abbildung:** Kernkräfte (blaue Pfeile) und elektrische Kräfte (grüne Pfeile)

# Bindungsenergie

Bindungsenergie ist die Energiemenge, die frei wird, wenn sich Protonen und Neutronen zu einem Atomkern verbinden.

Dies ist nach  $E = mc^2$  mit einem kleinen Massenverlust der gebundenen Nukleonen verbunden, dem Massendefekt.

## Beispiel: Heliumkern

Beispiel: Heliumkern

$$2 \cdot m_p = 2 \cdot 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,32524 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$2 \cdot m_n = 2 \cdot 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,34986 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Rightarrow m_{2p+2n} = 6,69510 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

## Beispiel: Heliumkern

$$m_{2p+2n} = 6,69510 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_{\text{He}} = 6,644656 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Die Masse des Heliumkerns ist um  $\Delta m = 0,050444 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  geringer als die Summe der Massen seiner Bestandteile.

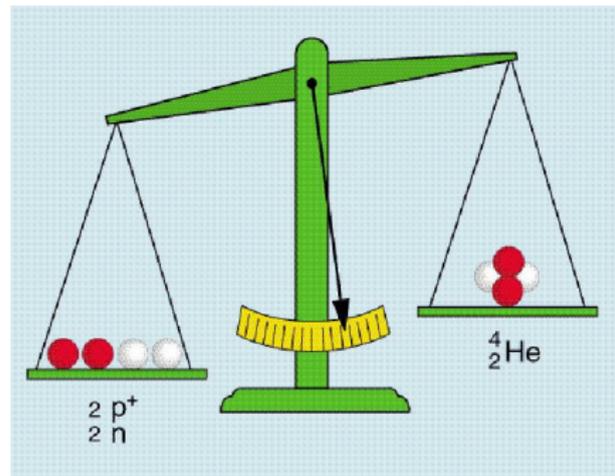


Abbildung: Massenverlust

# Bindungsenergie

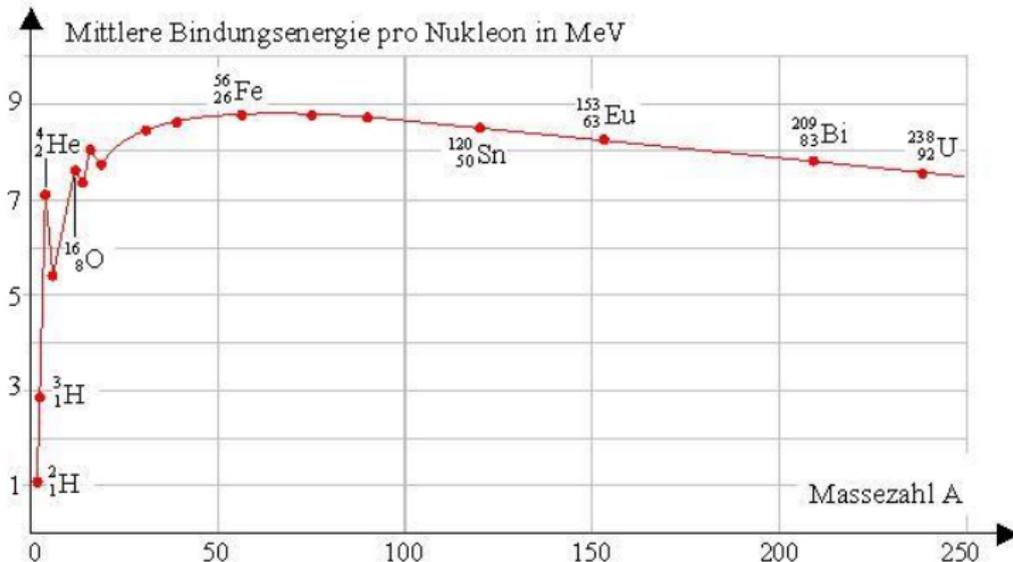


Abbildung: Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl

# Bethe-Weizsäcker-Formel

Die Bindungsenergie des Kerns wird durch Volumenenergie, Oberflächenenergie, Coulombenergie, Symmetrie und Parität beschrieben.

$$E_{\text{Bindung}} = E_{\text{Volumen}} - E_{\text{Oberflaeche}} - E_{\text{Coulomb}} - E_{\text{Symmetrie}} \pm E_{\text{Paarbildung}}$$

$$E_{\text{Bindung}} = a_V \cdot A - a_O \cdot A^{\frac{2}{3}} - a_C \cdot Z^2 A^{-\frac{1}{3}} - a_S \cdot \frac{(N - Z)^2}{4} A^{-1} + \delta \cdot A^{-\frac{1}{2}}$$

## Volumenenergie

- $E_{\text{Volumen}} = a_V \cdot A$  mit  $a_V \approx 15,67 \text{ MeV}$  dominiert die Bindungsenergie.
- Die Volumenenergie resultiert aus der gegenseitigen Anziehung der Nukleonen aufgrund der starken Kernkraft.

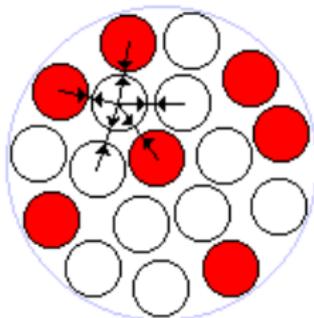


Abbildung: Zur Veranschaulichung des Volumenbeitrags zur Bindungsenergie

## Oberflächenenergie

- Der Oberflächenanteil beträgt  $-a_0 \cdot A^{\frac{2}{3}}$  mit  $a_0 \approx 17,23 \text{ MeV}$ .
- Die Nukleonen an der Oberfläche sind schwächer gebunden und reduzieren die Bindungsenergie.
- Oberfläche  $\propto R^2$  und  $V \propto A \Rightarrow R^2 \propto A^{\frac{2}{3}}$

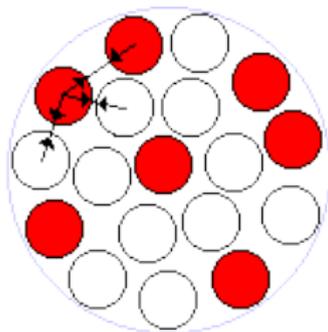


Abbildung: Zur Veranschaulichung des Oberflächenbeitrags zur Bindungsenergie

## Coulombenergie

- Der Coulombanteil beträgt  $-a_C \cdot Z^2 A^{-\frac{1}{3}}$  mit  $a_C \approx 0,714 \text{ MeV}$ .
- $\Rightarrow E_{Coulomb} \propto Z(Z-1) \propto Z^2$  für  $Z \gg 1$

$$\Rightarrow E_{Coulomb} \propto \frac{Z^2}{R} \propto \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}}$$

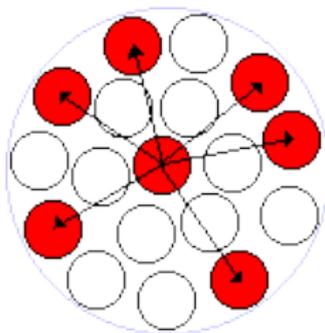


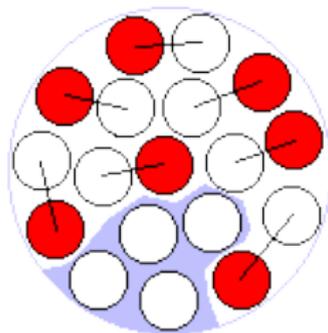
Abbildung: Zur Veranschaulichung des Coulombbeitrags zur Bindungsenergie

## Symmetrieenergie

- $E_{\text{Symmetrie}} = -a_5 \cdot \frac{(N-Z)^2}{4A}$  mit  $a_5 \approx 93,15 \text{ MeV}$
- Dieser Term sorgt für ein Gleichgewicht zwischen Neutronenzahl und Protonenzahl.
- Er verschwindet für  $N=Z$  und schwächt die Bindung mit zunehmender Differenz zwischen Neutronen- und Protonenzahl.

## Symmetrieenergie

Die Bindungsfestigkeit ist bei gleicher Protonen- und Neutronenzahl am größten und die Überschußneutronen sind weniger fest gebunden.



**Abbildung:** Zur Veranschaulichung des Symmetriebeitrags zur Bindungsenergie

## Paarbildungsenergie

Der Paarbildungsanteil besteht aus  $\delta \cdot A^{-\frac{1}{2}}$  mit

$$\delta = \begin{cases} +11,2\text{MeV} & : \text{gg - Kerne} \\ 0 & : \text{ug - und gu - Kerne} \\ -11,2\text{MeV} & : \text{uu - Kerne} \end{cases}$$

Kerne mit gerader Protonenzahl  $Z$  und gerader Neutronenzahl  $N$  (gg-Kerne) sind besonders fest gebunden.

Kerne mit ungeradem  $Z$  und  $N$  (uu-Kerne) sind besonders schwach gebunden.

Und die restlichen Kerne, nämlich ug- und gu-Kerne liegen dazwischen.

## Paarbildungsenergie

- Durch die Bindung von je zwei Protonen oder zwei Neutronen zu einem Paar wird die Bindungsenergie erhöhrt.
- Bei ungerader Protonen- oder Neutronenanzahl bleibt jeweils ein ungepaartes Teilchen übrig, das lockerer gebunden ist und die Bindungsenergie wird reduziert.

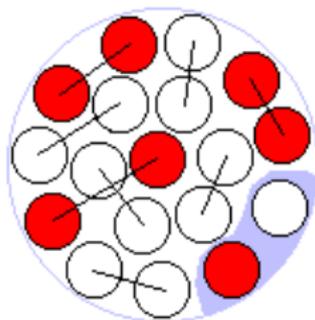


Abbildung: Zur Veranschaulichung des Paritätsbeitrags zur Bindungsenergie

# Bindungsenergie

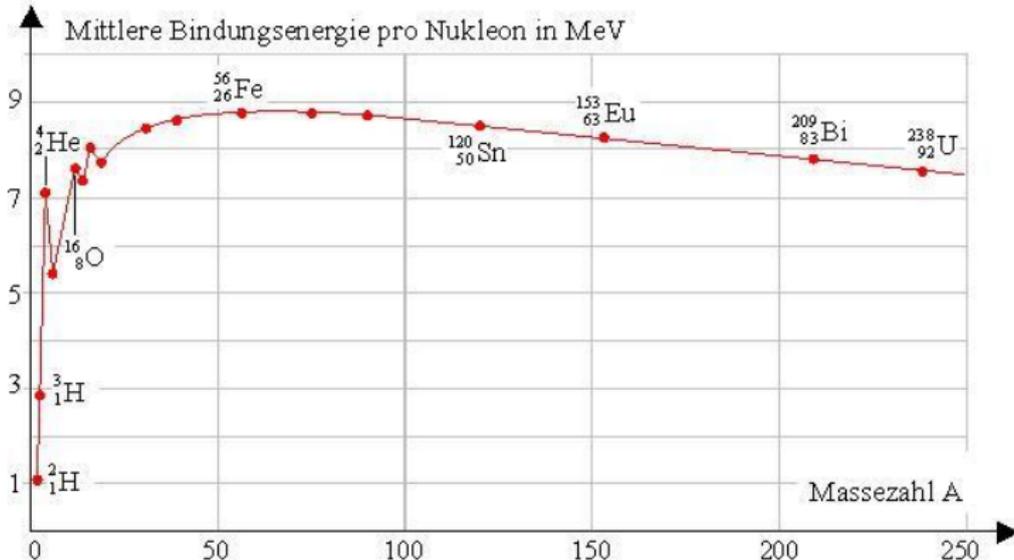
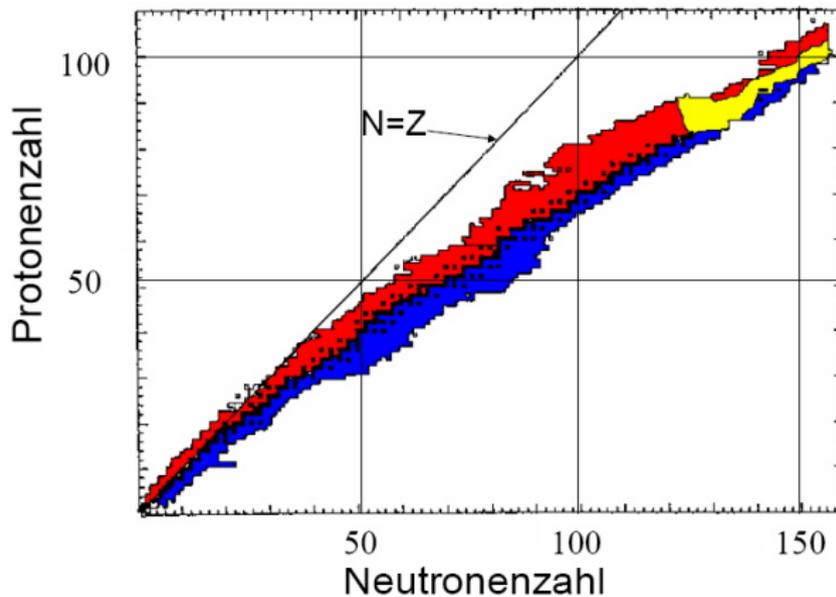


Abbildung: Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl

# Nuklidkarte

Für leichte Kerne ist  $N = Z$

Schwerere Kerne haben Neutronenüberschuss:  $N > Z$



# Radioaktivität

Radioaktivität: Instabile Atomkerne zerfallen unter Abgabe von Strahlung.

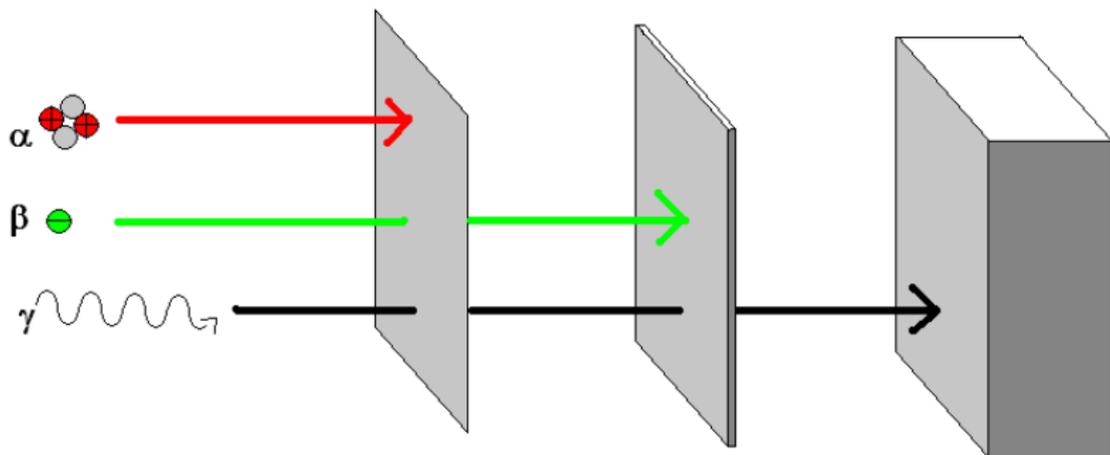


Abbildung:  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung

# Alphazerfall

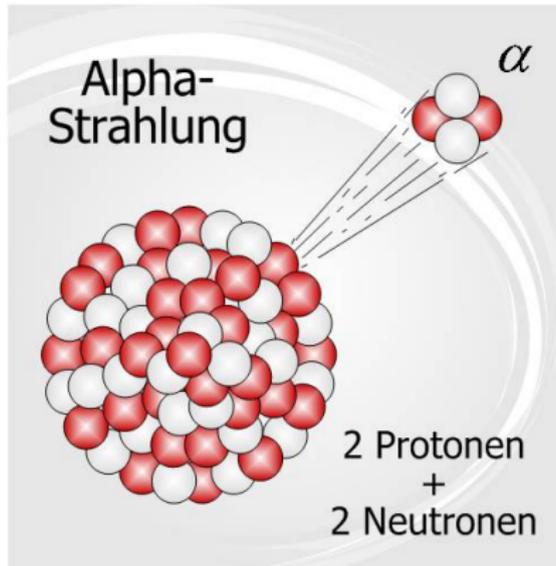
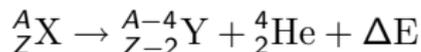


Abbildung: Alphastrahlung

# Alphazerfall

$\alpha$ -Zerfall:



Ein konkretes Beispiel ist:

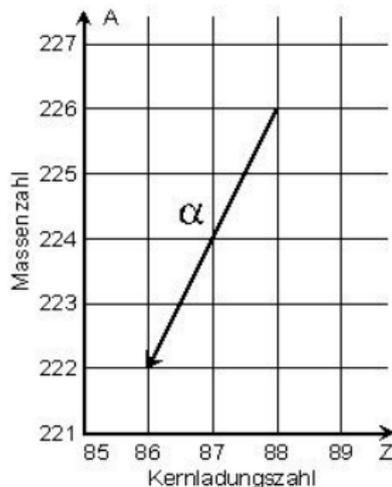
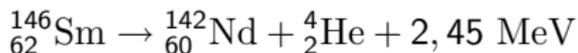


Abbildung:  $\alpha$ -Zerfall

# Betazerfall

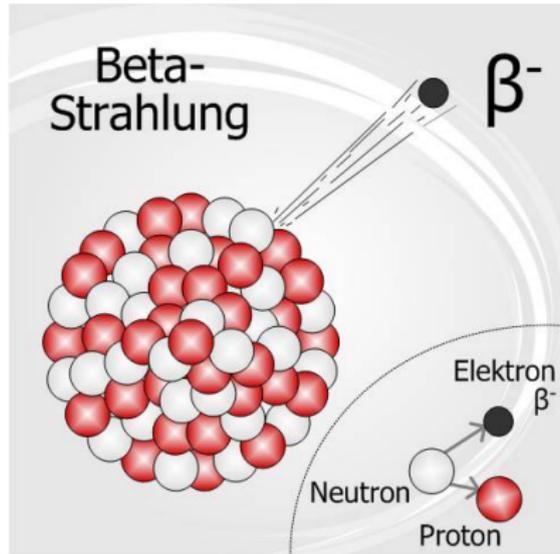
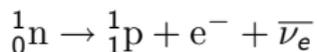


Abbildung: Betastrahlung

## Betazerfall

$\beta^-$ -Zerfall:

Nuklide mit einem Überschuss an Neutronen zerfallen über den  $\beta^-$ -Zerfall. Ein Neutron des Kerns wandelt sich in ein Proton um und sendet dabei ein Elektron sowie ein Antineutrino aus.



Beispiel:

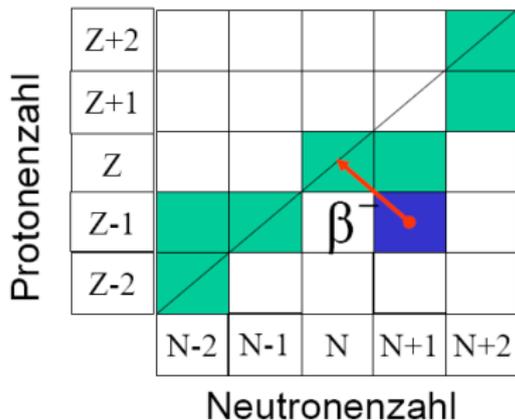
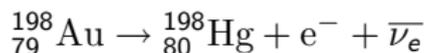
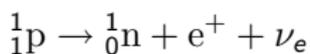


Abbildung:  $\beta^-$ -Zerfall

## Betazerfall

$\beta^+$ -Zerfall:

Der  $\beta^+$ -Zerfall tritt bei protonenreichen Nukliden auf. Ein Proton des Kerns wandelt sich in ein Neutron um und sendet dabei ein Positron und ein Neutrino aus.



Beispiel:

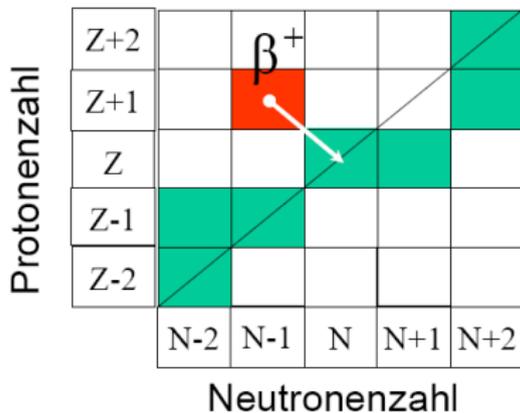
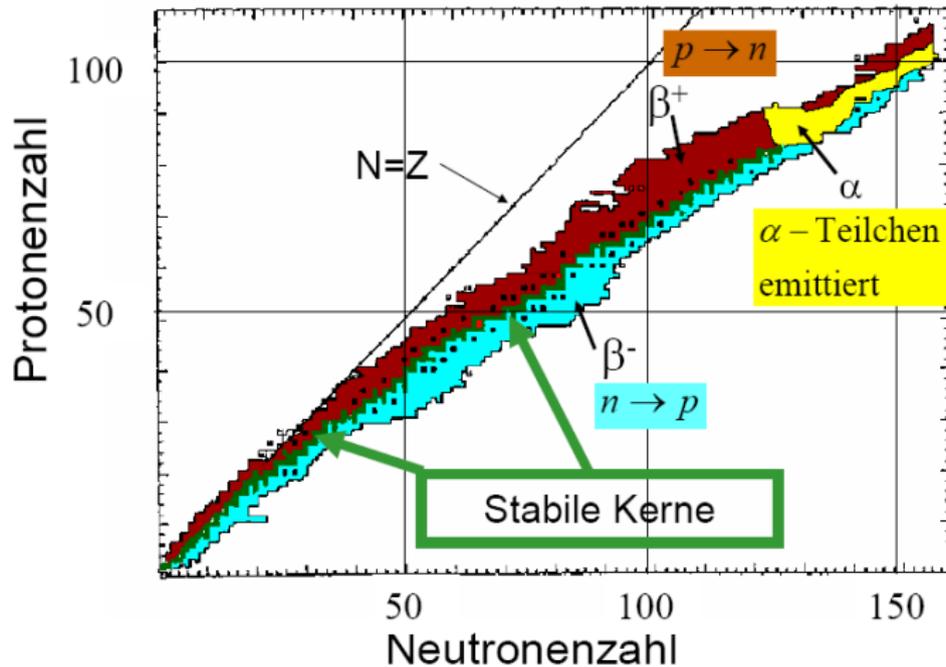


Abbildung:  $\beta^+$ -Zerfall

# Radioaktiver Zerfall



# Gammastrahlung



Abbildung: Gammastrahlung

# Gammastrahlung

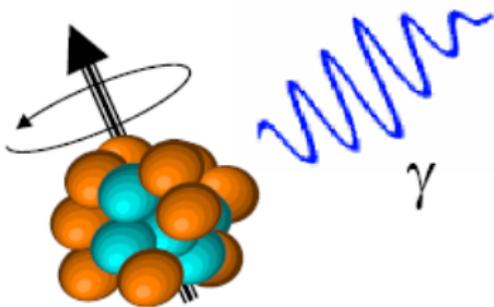


Abbildung: Gammastrahlung

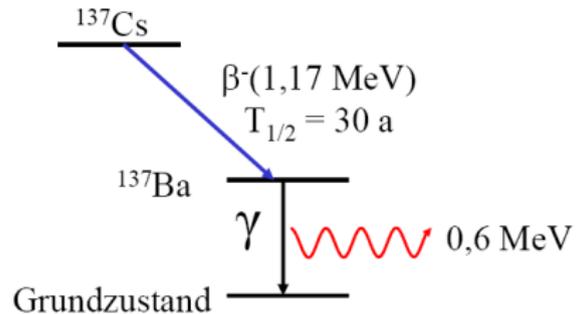


Abbildung: Zerfallsschema

# Kernspaltung und Kernfusion

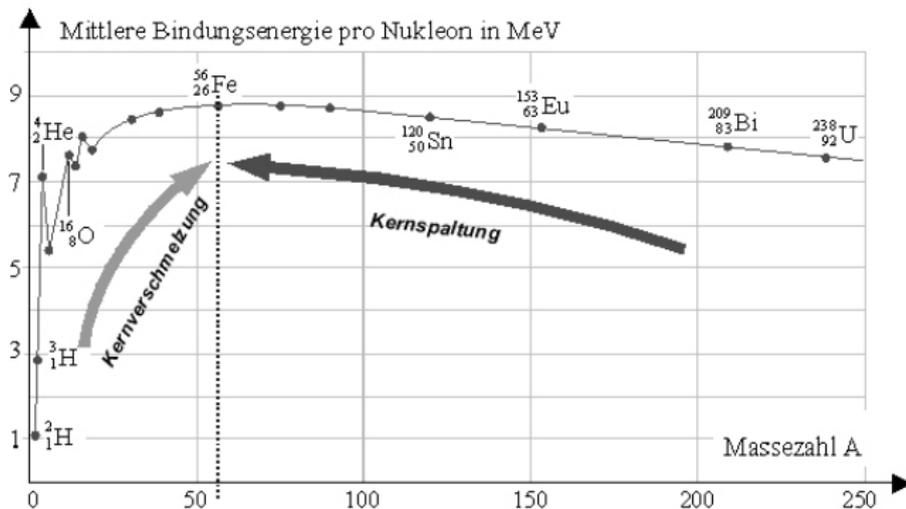


Abbildung: Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl

# Induzierte Kernspaltung

## Induzierte Kernspaltung:

- Ein frei herumfliegendes Teilchen, meist ein Neutron trifft einen Kern und wird von diesem absorbiert.
- Der Kern gewinnt dadurch die Bindungsenergie und zusätzlich auch eventuelle kinetische Energie des Neutrons.
- Er befindet sich also in einem angeregten Zustand und spaltet sich.

# Induzierte Kernspaltung

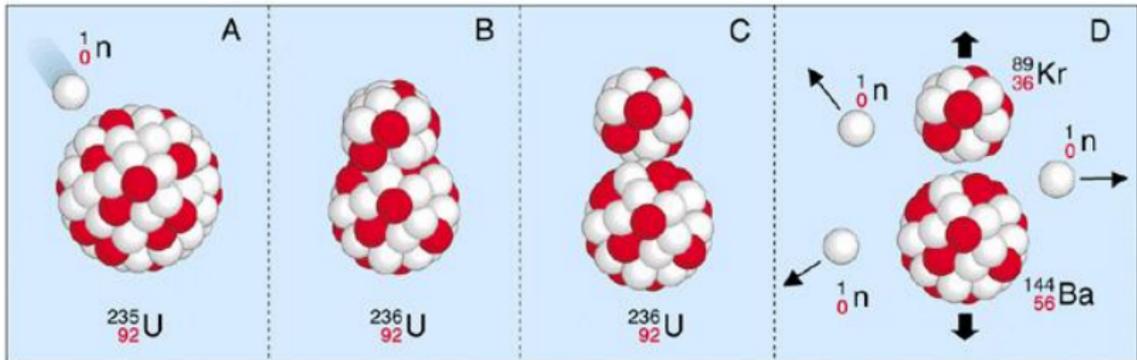


Abbildung: Vier-Phasen-Modell zur Kernspaltung

# Energiebilanz bei der Kernspaltung

Bewegungsenergie der Spaltprodukte	175 MeV
Bewegungsenergie der Neutronen	5 MeV
Bei der Kernspaltung auftretende Gammastrahlung	7 MeV
Energie aus dem Betazerfall der Spaltprodukte	7 MeV
Energie der Gammastrahlung der Spaltprodukte	6 MeV
Energie der Neutrinos	10 MeV
<b>Summe</b>	<b>210 MeV</b>

# Kettenreaktion

- Bei der Kernspaltung entstehen neben den beiden Spaltprodukten noch einige Neutronen.
- Man hat somit die Möglichkeit, einen sich selbst erhaltenden Kernspaltungsprozess ablaufen zu lassen

# Kettenreaktion

- Bei der Kernspaltung entstehen neben den beiden Spaltprodukten noch einige Neutronen.
- Man hat somit die Möglichkeit, einen sich selbst erhaltenden Kernspaltungsprozess ablaufen zu lassen
- Die freigesetzten Neutronen können unter geeigneten Bedingungen weitere Uranatome spalten  $\Rightarrow$  Kettenreaktion

# Kettenreaktion

- Bei der Kernspaltung entstehen neben den beiden Spaltprodukten noch einige Neutronen.
- Man hat somit die Möglichkeit, einen sich selbst erhaltenden Kernspaltungsprozess ablaufen zu lassen
- Die freigesetzten Neutronen können unter geeigneten Bedingungen weitere Uranatome spalten  $\Rightarrow$  Kettenreaktion

# Kettenreaktion

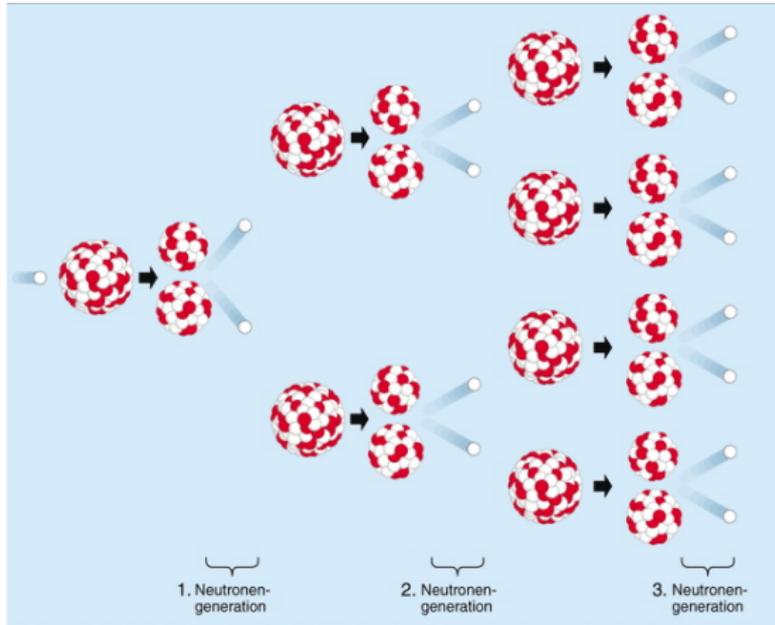


Abbildung: Kettenreaktion im  $^{235}\text{U}$

# Verwendungszweck

## Verwendungszweck:

- Leistungsreaktoren
- Forschungsreaktoren
- Antrieb von Fahrzeugen

# Hauptbestandteile eines Kernreaktors

- Brennstoff (Spaltbares Material)
- Moderator (Bremssubstanz)
- Steuerungs- und Kontrolleinrichtungen (Steuerstäbe)
- Kühlmittel
- Strahlenschutzbarrieren

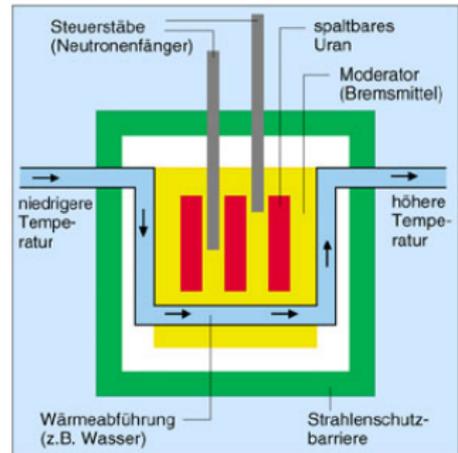


Abbildung: Hauptbestandteile eines Kernreaktors

# Spaltbares Material

- $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  oder  $^{239}\text{Pu}$
- Natürliches Uran besteht zu 0,73 % aus  $^{235}\text{U}$  und 99,27 %  $^{238}\text{U}$ .

# Spaltbares Material

- $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  oder  $^{239}\text{Pu}$
- Natürliches Uran besteht zu 0,73 % aus  $^{235}\text{U}$  und 99,27 %  $^{238}\text{U}$ .
- Im angereicherten Uran ist der Prozentsatz des Isotops  $^{235}\text{U}$  auf ca. 3 bis 4 % erhöht.

# Spaltbares Material

- $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  oder  $^{239}\text{Pu}$
- Natürliches Uran besteht zu 0,73 % aus  $^{235}\text{U}$  und 99,27 %  $^{238}\text{U}$ .
- Im angereicherten Uran ist der Prozentsatz des Isotops  $^{235}\text{U}$  auf ca. 3 bis 4 % erhöht.
- $^{233}\text{U}$  entsteht aus  $^{232}\text{Th}$  und  $^{239}\text{Pu}$  aus  $^{238}\text{U}$ .

## Spaltbares Material

- $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  oder  $^{239}\text{Pu}$
- Natürliches Uran besteht zu 0,73 % aus  $^{235}\text{U}$  und 99,27 %  $^{238}\text{U}$ .
- Im angereicherten Uran ist der Prozentsatz des Isotops  $^{235}\text{U}$  auf ca. 3 bis 4 % erhöht.
- $^{233}\text{U}$  entsteht aus  $^{232}\text{Th}$  und  $^{239}\text{Pu}$  aus  $^{238}\text{U}$ .
- Mischoxid (MOX) ist ein Gemisch aus Uranoxid und Plutoniumoxid.

## Spaltbares Material

- $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$  oder  $^{239}\text{Pu}$
- Natürliches Uran besteht zu 0,73 % aus  $^{235}\text{U}$  und 99,27 %  $^{238}\text{U}$ .
- Im angereicherten Uran ist der Prozentsatz des Isotops  $^{235}\text{U}$  auf ca. 3 bis 4 % erhöht.
- $^{233}\text{U}$  entsteht aus  $^{232}\text{Th}$  und  $^{239}\text{Pu}$  aus  $^{238}\text{U}$ .
- Mischoxid (MOX) ist ein Gemisch aus Uranoxid und Plutoniumoxid.

# Brennstäbe

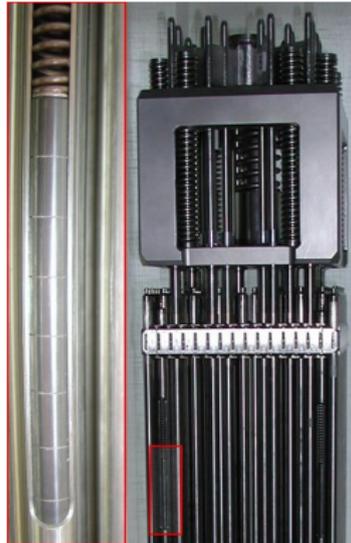


Abbildung: Kopfbereich eines Brennelementes

# Moderator

- Bei der Spaltung frei gesetzte Neutronen haben hohe Geschwindigkeiten.
- Ein Moderator dient dazu, diese Neutronen abzubremfen: Bremsmittel

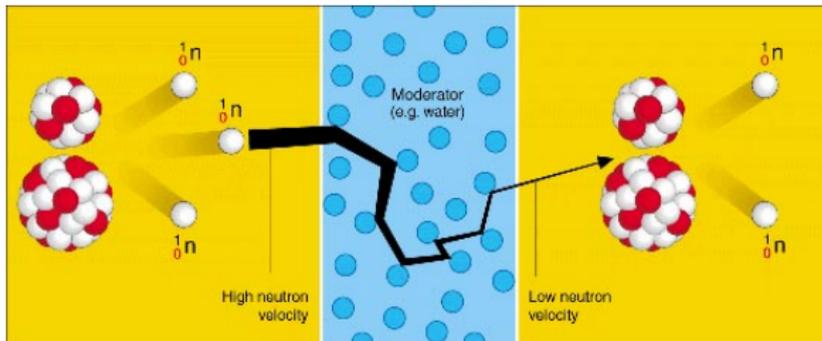


Abbildung: Abbremsung schneller Neutronen durch einen Moderator

# Moderator

Moderator	Massenverhältnis Kern zu Neutron	mittlere Anzahl der Stöße für Abbremsung
Wasserstoff	1	18
Deuterium	2	25
Beryllium	9	86
Graphit	12	114
Uran	238	2172

**Tabelle:** Durchschnittliche Anzahl der Stöße um Neutron auf thermische Energie abzubremesen

# Moderator

Gute Moderatoren müssen folgende zwei Bedingungen erfüllen:

- Die schnellen Neutronen sollen möglichst schnell durch wenige Stöße ihre Energie verlieren und dadurch abgebremst werden.

# Moderator

Gute Moderatoren müssen folgende zwei Bedingungen erfüllen:

- Die schnellen Neutronen sollen möglichst schnell durch wenige Stöße ihre Energie verlieren und dadurch abgebremst werden.
- Der Moderator darf nur eine geringe Neigung zum Einfang von Neutronen besitzen.

# Moderator

Gute Moderatoren müssen folgende zwei Bedingungen erfüllen:

- Die schnellen Neutronen sollen möglichst schnell durch wenige Stöße ihre Energie verlieren und dadurch abgebremst werden.
- Der Moderator darf nur eine geringe Neigung zum Einfang von Neutronen besitzen.

# Moderator

Moderator	mittlere Anzahl der Stöße für Abbremsung	Neigung zum Einfang thermischer Neutronen
Wasserstoff	18	650
Deuterium	25	1
Beryllium	86	7
Graphit	114	10
Uran	2172	5601

**Tabelle:** Eigenschaften verschiedener Moderatorstoffe, Uran zum Vergleich

# Steuerstäbe

- Steuerstäbe dienen zur Regelung und Abschaltung des Kernreaktors.
- Sie bestehen aus Stoffen mit großer Neigung zur Absorption von Neutronen, z.B. Bor, Indium, Silber oder Cadmium.



Abbildung: Steuerstäbe

# Steuerstäbe

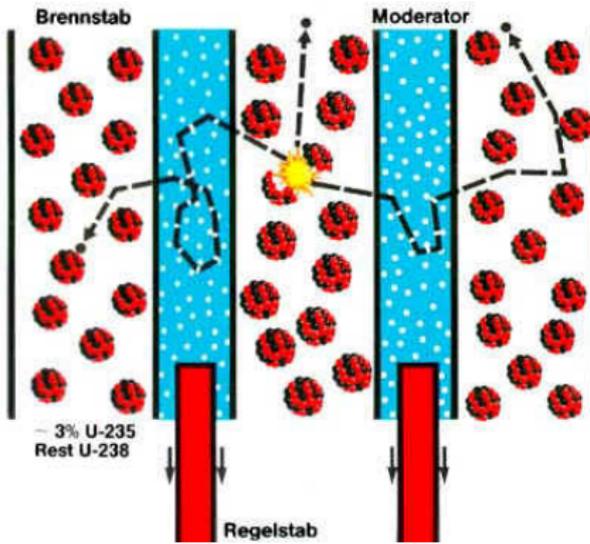


Abbildung: Anfahren eines Reaktors

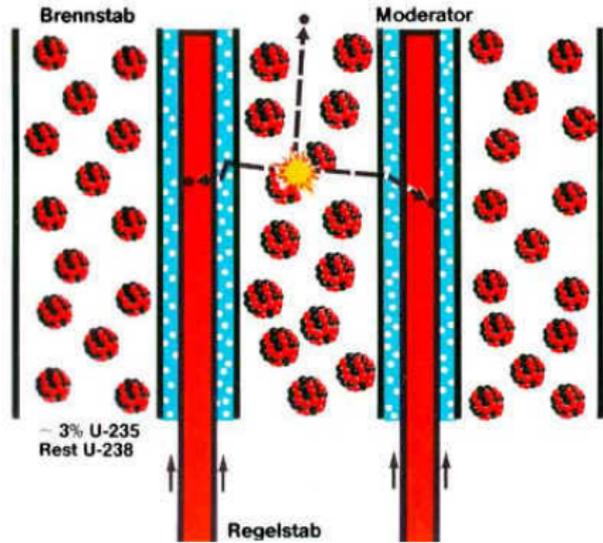


Abbildung: Abschalten eines Reaktors

# Kühlmittel

Medien zur Wärmeabführung:

Wasser, Schweres Wasser, Quecksilber, Natrium, Kohlendioxid, Luft, Helium.

## Sicherheitsbarrieren

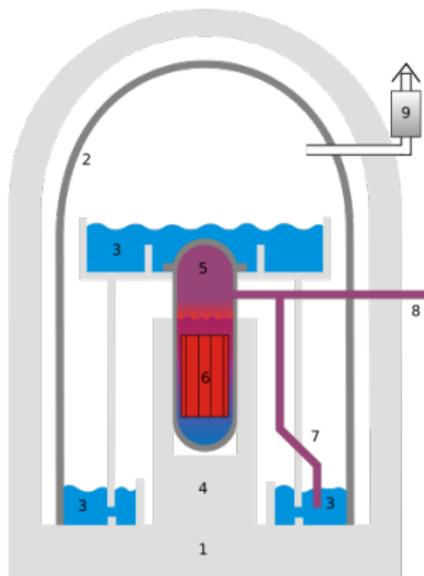


Abbildung: Sicherheitsbarrieren gegen das Austreten radioaktiver Stoffe

# Verschiedene Reaktortypen

- Leichtwasserreaktor
  - Siedewasserreaktor
  - Druckwasserreaktor
- Schwerwasserreaktor
- RBMK
- Brutreaktor (Schneller Brüter)
- Hochtemperaturreaktor (HTR)

# Leichtwasserreaktor

- Wasser  $\text{H}_2\text{O}$  ist Reaktorkühlmittel und Moderator.
- Brennstoff ist angereichertes Uran mit einem  $^{235}\text{U}$ -Massenanteil zwischen ca 1,5 % und 6 %.
- Leichtwasserreaktor existiert in den Varianten Siedewasserreaktor und Druckwasserreaktor.

# Siedewasserreaktor

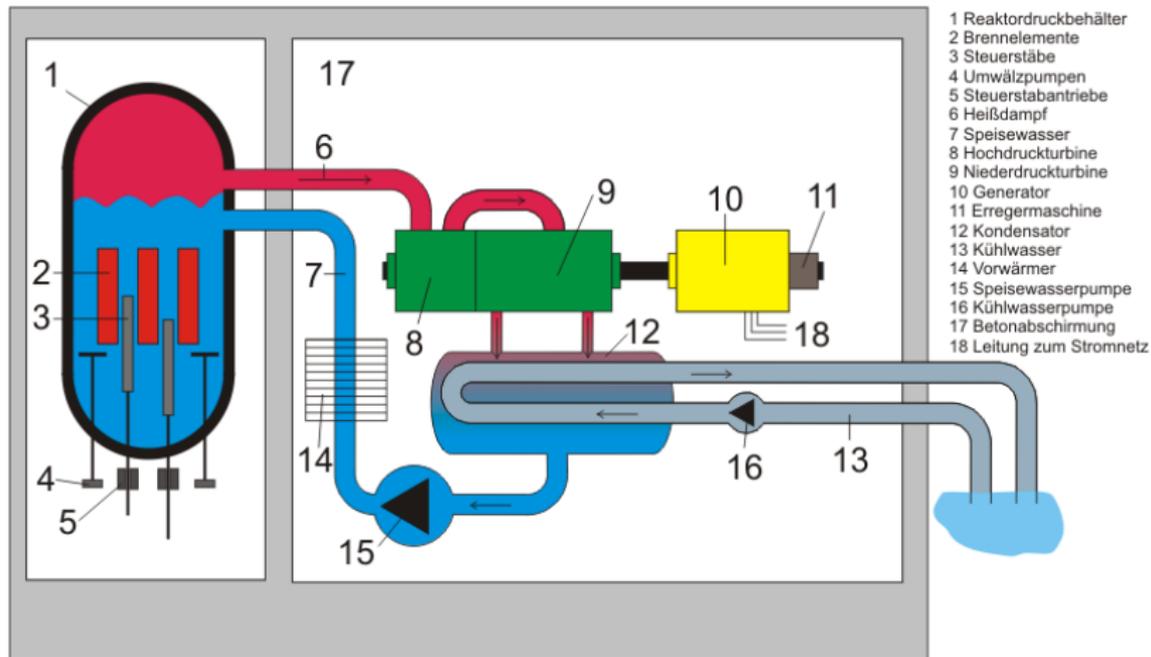


Abbildung: Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor

# Siedewasserreaktoren

Siedewasserreaktoren in  
Deutschland:

- Brunsbüttel
- Philippsburg (Block 1)
- Isar (Block 1)
- Krümmel
- Gundremmingen (Blöcke B und C)
- Würgassen

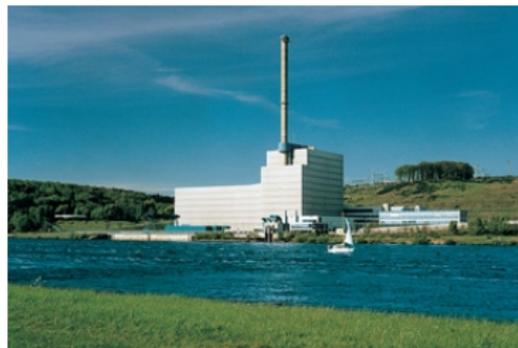


Abbildung: Kernkraftwerk Krümmel

# Druckwasserreaktor

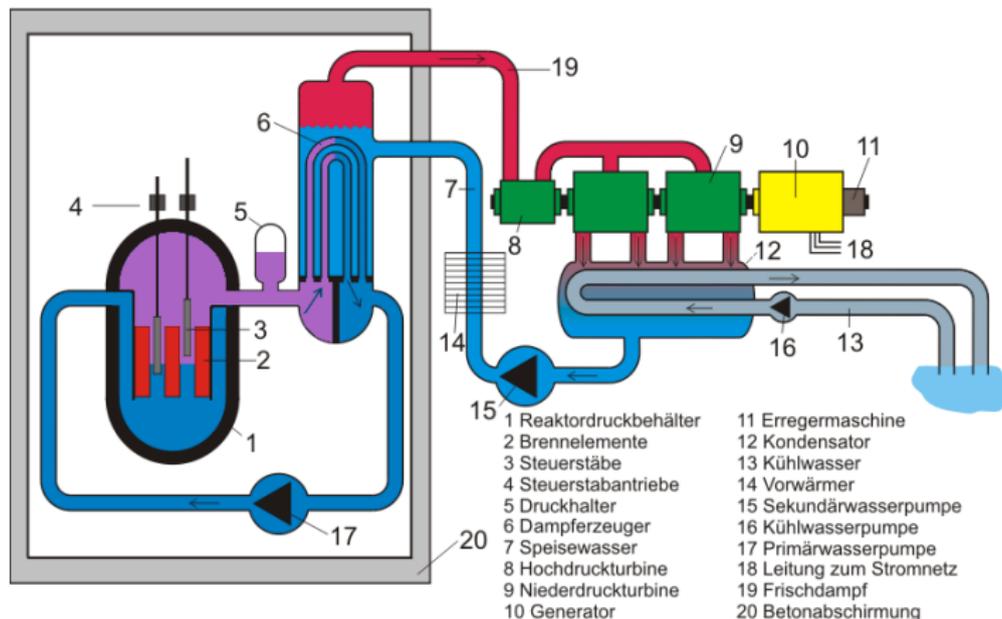


Abbildung: Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor

# Druckwasserreaktor

Druckwasserreaktoren in  
Deutschland:

- Brokdorf
- Isar (Block 2)
- Philippsburg (Block 2)
- Grohnde
- Unterweser
- Emsland
- Neckarwestheim (Blöcke 1 und 2)
- Grafenrheinfeld
- Biblis (Blöcke A und B)



**Abbildung:** Kernkraftwerk  
Grafenrheinfeld

# Schwerwasserreaktor

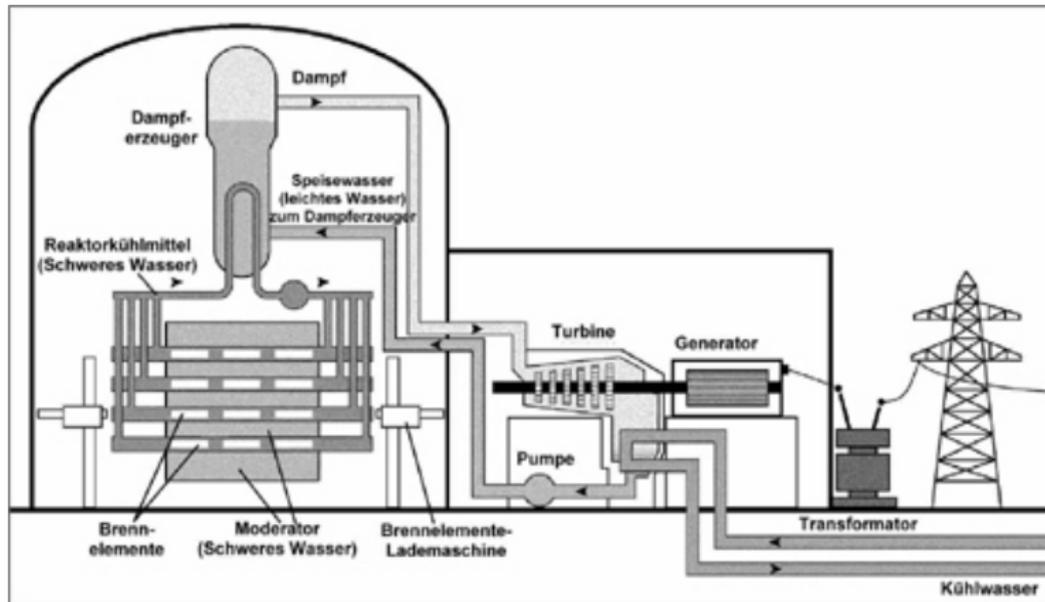


Abbildung: Kernkraftwerk mit Schwerwasserreaktor

# RBMK

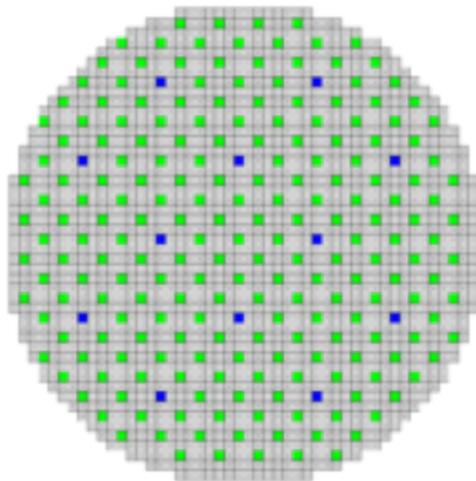


Abbildung: Aufbau eines Reaktorkerns eines RBMK-1000

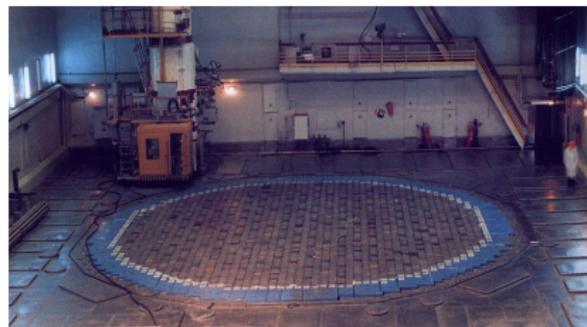
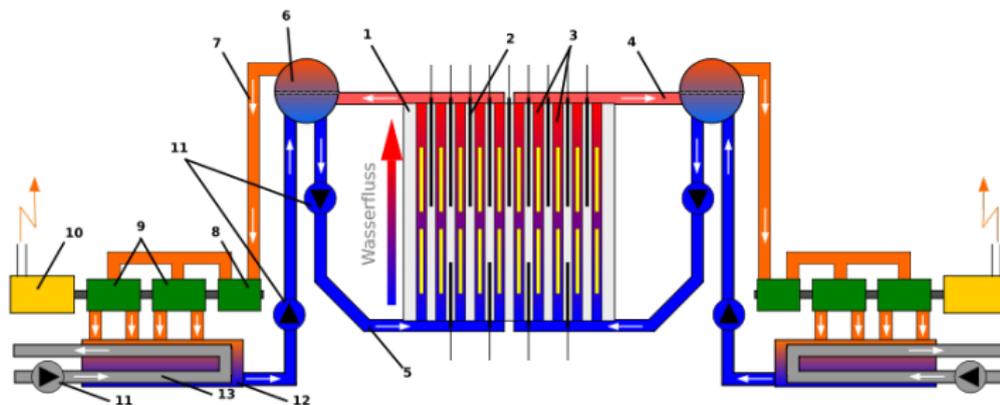


Abbildung: Reaktorkern eines RBMK-1000

# RBMK



**Beschreibung:**

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 1. Reaktorkern mit Graphit als Moderator | 8. Hochdruckturbine                  |
| 2. Steuerstab                            | 9. Niederdruckturbinen               |
| 3. Druckröhren mit Brennelementen        | 10. Generator                        |
| 4. Dampf-Wasser-Gemisch                  | 11. Pumpen                           |
| 5. Wasser                                | 12. Kondensator                      |
| 6. Dampfseparator/-abscheider            | 13. Kühlwasser (von Fluss, See etc.) |
| 7. Frischdampf                           |                                      |

Abbildung: Kernkraftwerk mit Siedewasser-Druckröhrenreaktor RBMK 1000

# Schneller Brutreaktor

In Schnellen Brutreaktoren werden die beiden folgenden Vorgänge gezielt herbeigeführt:

- Energiegewinnung durch Kernspaltungen
- Brutvorgang: Erzeugung von neuem spaltbarem Material

# Plutonium

- Der  $^{238}\text{U}$ -Kern wandelt sich durch Neutroneneinfang in den angeregten Zustand  $^{239}\text{U}$  um.
- $^{239}\text{U}$  zerfällt unter Emission von  $\gamma$ -Strahlung in den Grundzustand.
- $^{239}\text{U}$  geht dann durch zweimaligen  $\beta$ -Zerfall zunächst in  $^{239}\text{Np}$  und anschließend in  $^{239}\text{Pu}$  über.

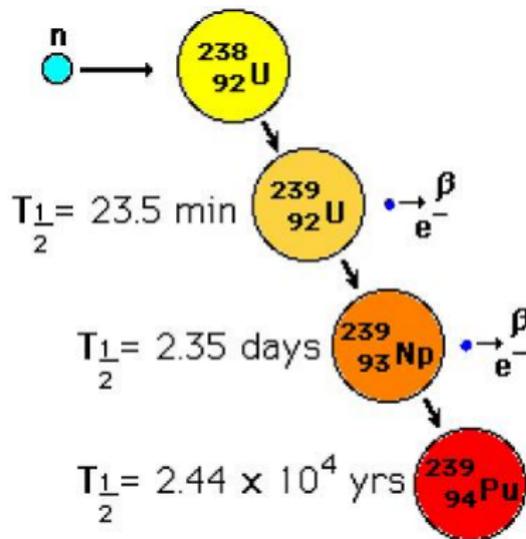


Abbildung: Entstehung von  $^{239}\text{Pu}$

# Schneller Brutreaktor

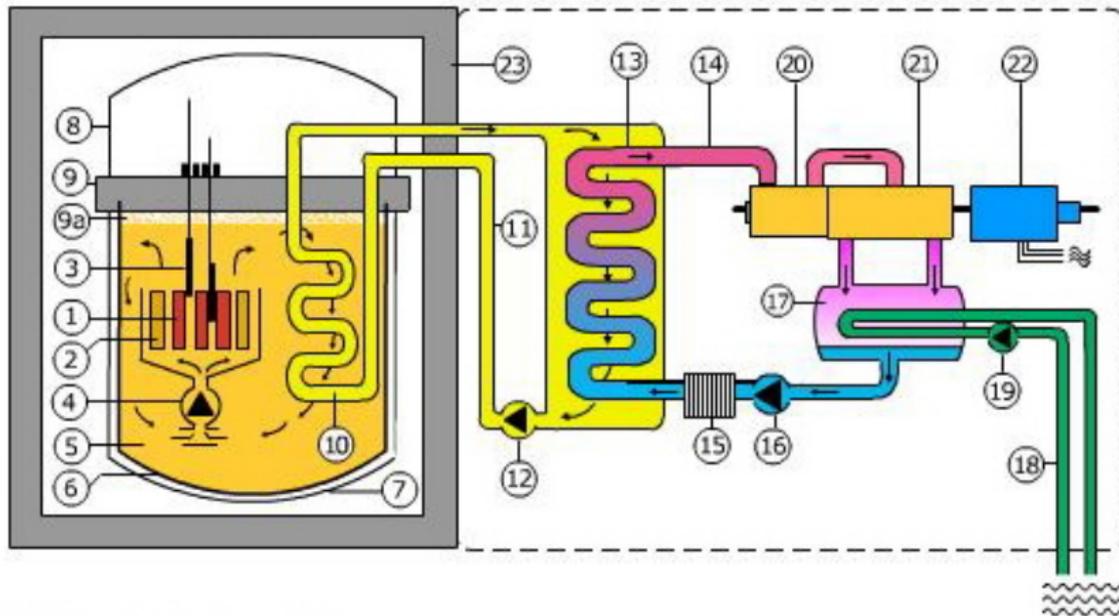
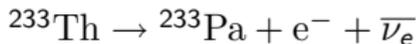
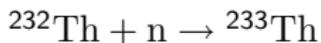


Abbildung: Kernkraftwerk mit Schnellem Brutreaktor

# Thorium-Hochtemperaturreaktor

- Kühlmitteltemperaturen von 750°C bis 950°C
- $^{233}\text{U}$  wird aus  $^{232}\text{Th}$  erbrütet:



# Thorium-Hochtemperaturreaktor

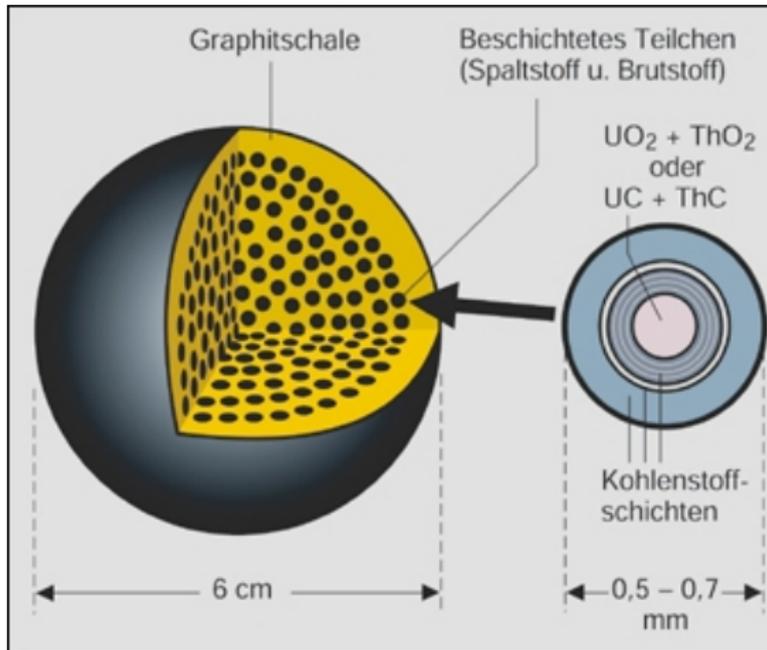


Abbildung: Kugelförmiges Brennelement des THTR-3000

# Thorium-Hochtemperaturreaktor

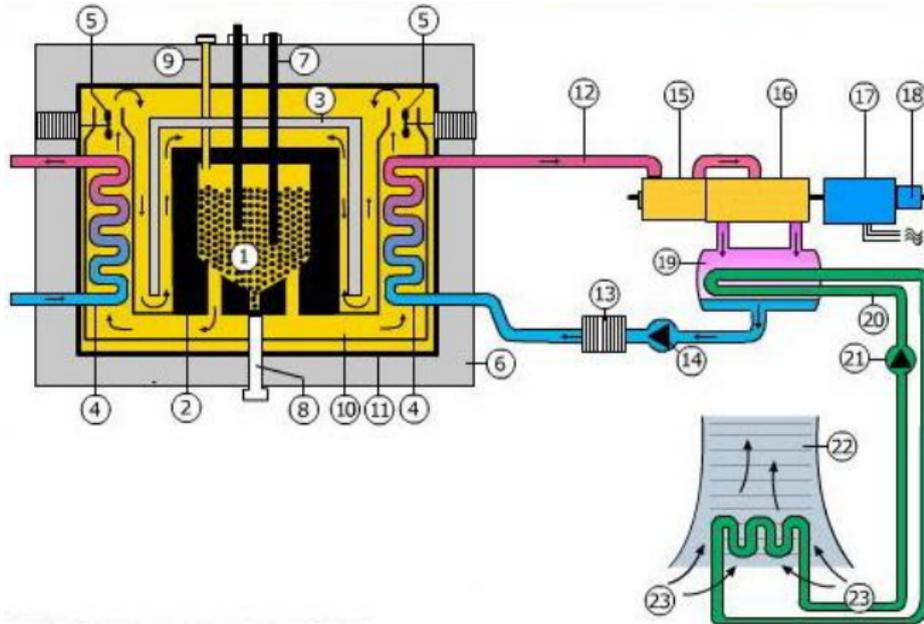


Abbildung: Kernkraftwerk mit Thorium-Hochtemperaturreaktor

# Charakterisierung von radioaktiven Abfällen

- Radioaktivitätsgehalt
  - schwachradioaktive Abfälle
  - mittelradioaktive Abfälle
  - hochradioaktive Abfälle
- Physikalischer Zustand



Abbildung: Radioaktiver Abfall

## Radioaktive Abfälle

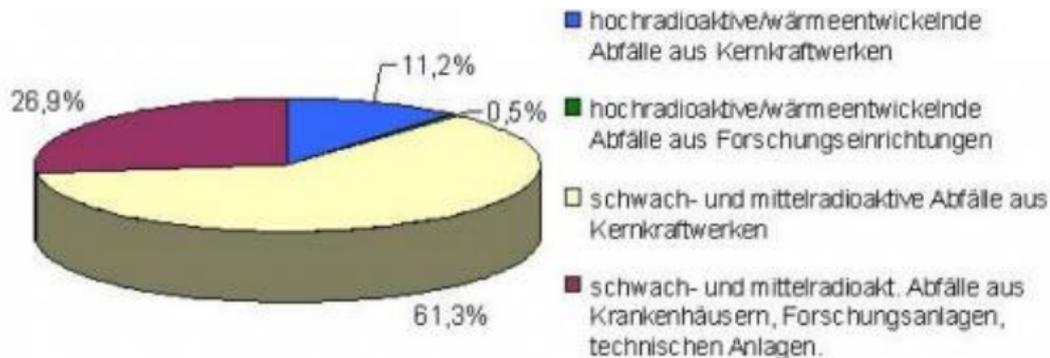


Abbildung: Herkunft der radioaktiven Abfälle in Deutschland

# Radioaktiver Abfall

In radioaktiven Abfällen aus Kernkraftwerken kommen an Radionukliden die folgenden wesentlichen Stoffgruppen vor:

- Spaltprodukte:  $^{131}\text{I}$  ( $T_{\frac{1}{2}} = 8,02070\text{d}$ ),  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{\frac{1}{2}} = 30,17\text{a}$ ),  $^{90}\text{Sr}$  ( $T_{\frac{1}{2}} = 28,78\text{a}$ ),  $^{129}\text{I}$  ( $T_{\frac{1}{2}} = 1,57 \cdot 10^7\text{a}$ )
- Aktivierungsprodukte:  $^{60}\text{Co}$  ( $T_{\frac{1}{2}} = 5,2714\text{a}$ )
- Erbrüteter Kernbrennstoff:  $^{239}\text{Pu}$  ( $T_{\frac{1}{2}} = 24110\text{a}$ )
- Erbrütete weitere Transurane:  $^{241}\text{Am}$  ( $T_{\frac{1}{2}} = 432,2\text{a}$ )
- Unverbrauchter ursprünglicher Brennstoff:  $^{235}\text{U}$  ( $T_{\frac{1}{2}} = 7,038 \cdot 10^8\text{a}$ ),  $^{238}\text{U}$  ( $T_{\frac{1}{2}} = 4,468 \cdot 10^9\text{a}$ )

# Radioaktive Abfälle

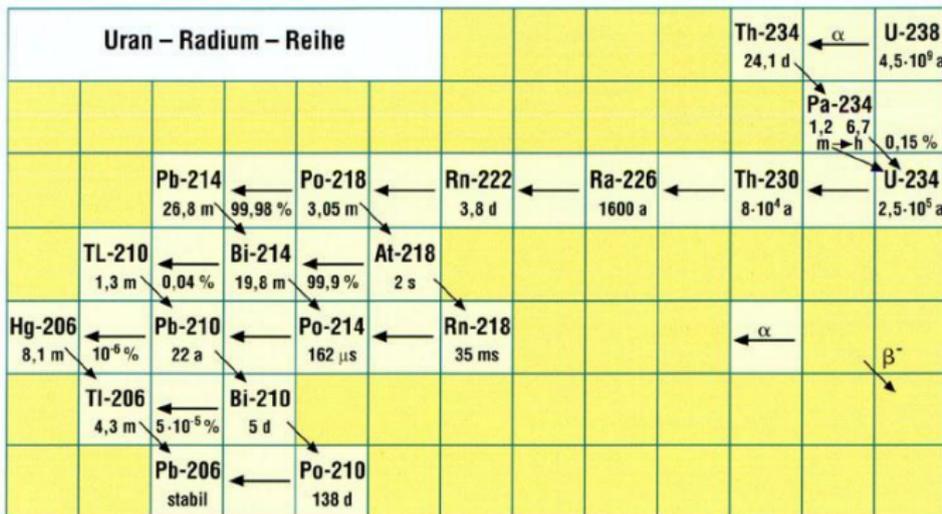


Abbildung: Der radioaktive Zerfall von Uran über Radium zu Blei

# Endlagerung

- Unter Endlagerung versteht man die wartungsfreie, zeitlich unbefristete und sichere Beseitigung von radioaktiven Abfällen und bestrahlten Brennelementen in geeigneten Lagern in geologischen Formationen.
- Ton-, Granit- oder Salzlager sind am besten geeignet.
- In 300 bis 1000 m Tiefe sollen die radioaktiven Abfälle eingelagert werden.

# Endlagerung

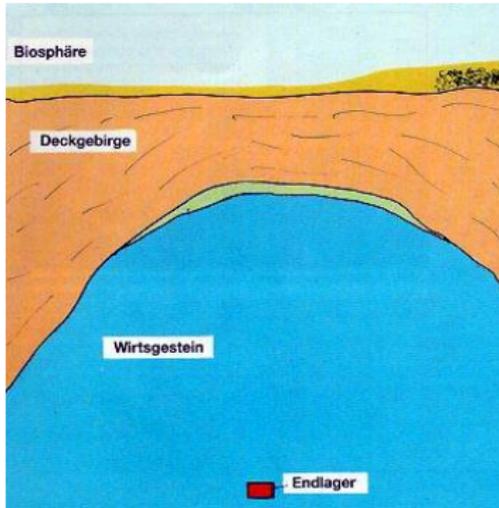


Abbildung: Natürliches  
Barrierensystem

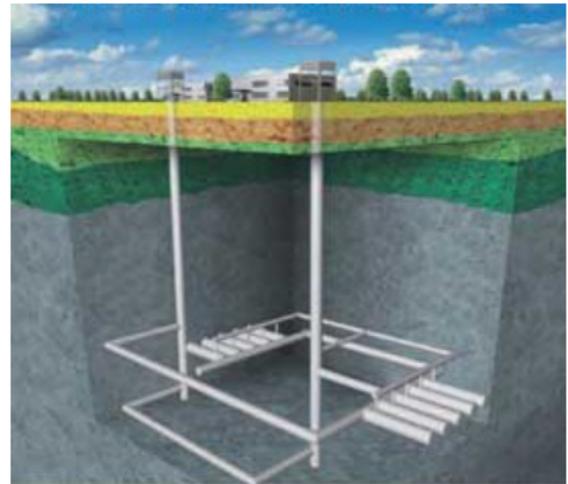


Abbildung: Technisches  
Barrierensystem

# Endlagerung

Für schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus Deutschland ist das Endlager Schacht Konrad vorgesehen. Schacht Konrad ist ein ehemaliges Eisenerzbergwerk bei Salzgitter. Anfang 2008 haben die Arbeiten für den Ausbau von Schacht Konrad begonnen. Dort sollen auf Dauer bis zu 303.000 Kubikmeter schwach- und mittelradioaktive Abfälle entsorgt werden.



Abbildung: Endlager Schacht Konrad

# Kernkraftwerke in Deutschland



Abbildung: Kernkraftwerke in Deutschland

## Brutto-Stromerzeugung 2007 in Deutschland

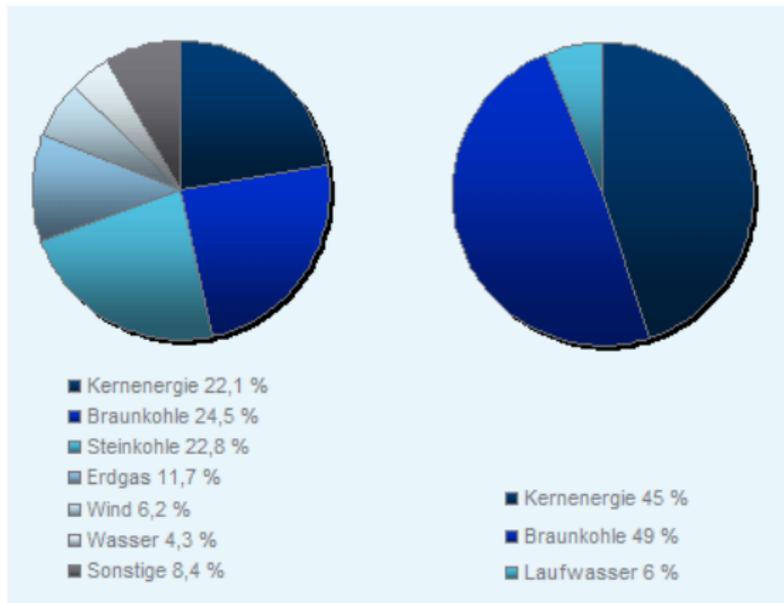


Abbildung: Brutto-Stromerzeugung und Grundlast 2007 in Deutschland

# Kernkraftwerke weltweit



Abbildung: Kernkraftwerke weltweit

## Atomausstieg, nein danke?

- Geringe CO<sub>2</sub>-Emission: 32 g pro kWh
- Keine Abhängigkeit von Energieimporten
- Niedrige Strompreise
- Sicherheitsstandards der modernen Kernkraftwerke

## Atomkraft, nein danke?

- Risiken für Umwelt und Gesundheit
- Ungelöstes Problem der Endlagerung
- Wirtschaft und Versicherung
- Begrenztes Uranvorkommen:  
Jahresbedarf an Natururan: 68000 t

Uranvorkommen	Förderkosten \$ / kg U	Uranvorräte weltweit
Reserven	80 - 130	7,36 Mio. t
Ressourcen	130	8,17 Mio. t
In Phosphaterzen	100	22 Mio.t
Im Meerwasser	300	4 Mrd. t