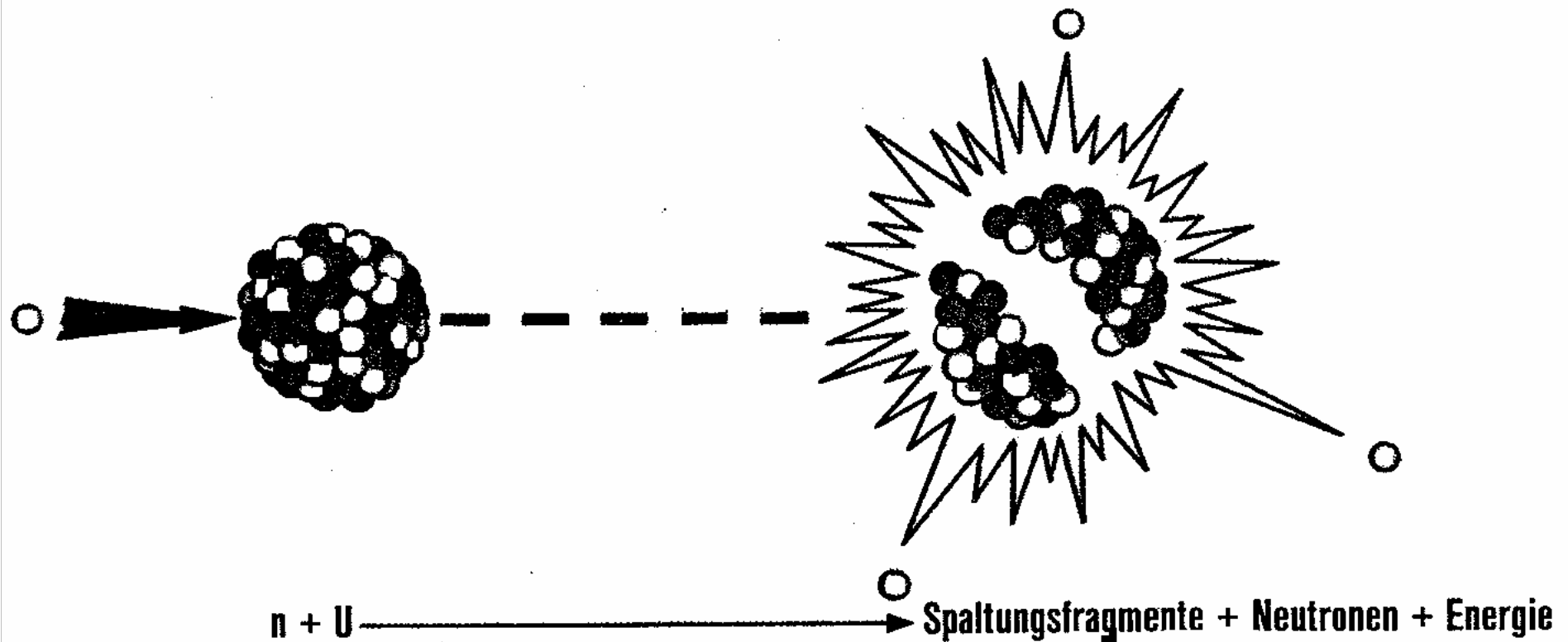


Kernenergie



$$A = N + Z$$

$A \rightarrow$ Massenzahl

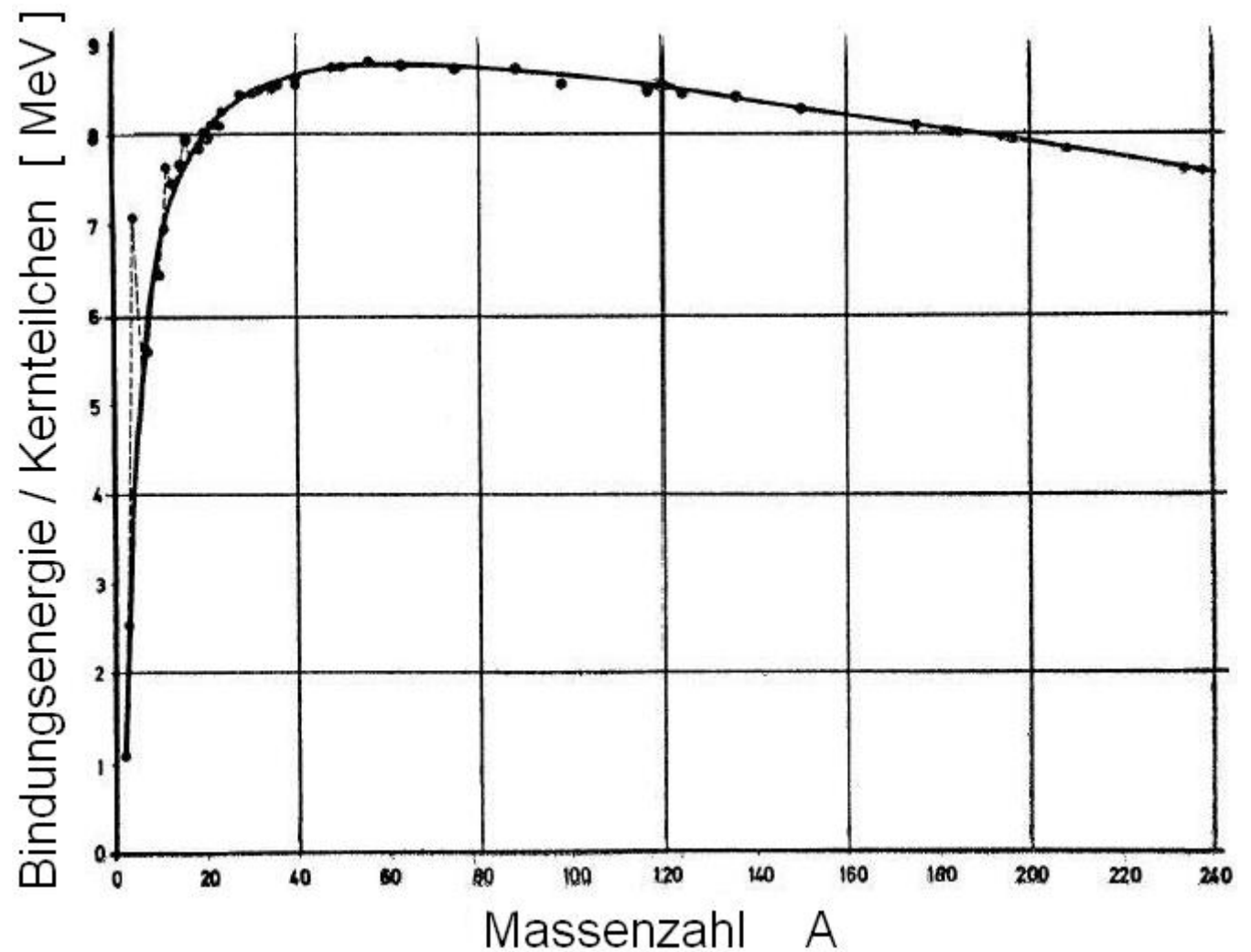
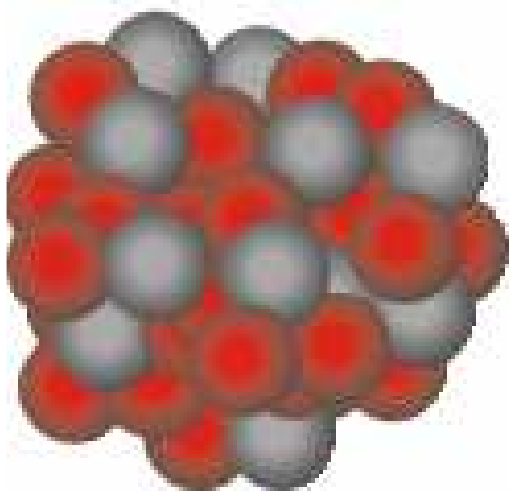
$N \rightarrow$ Neutronenzahl

$Z \rightarrow$ Protonenzahl

- **Massendefekt:** $\Delta M \equiv Z m_p + N m_n - M_A$

- **Bindungsenergie:** $B \equiv \Delta M \times c^2$

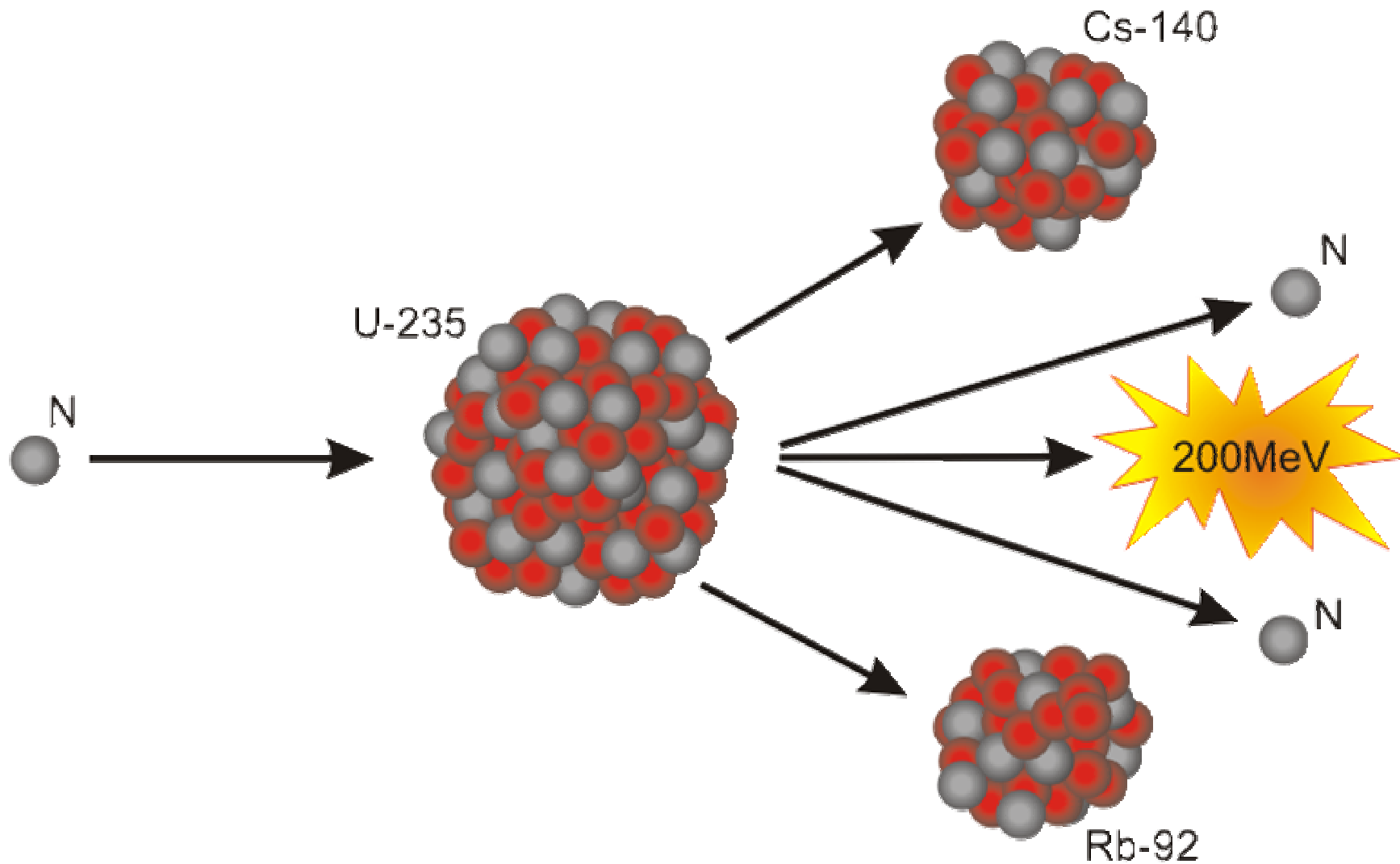
$c \equiv$ Lichtgeschwindigkeit

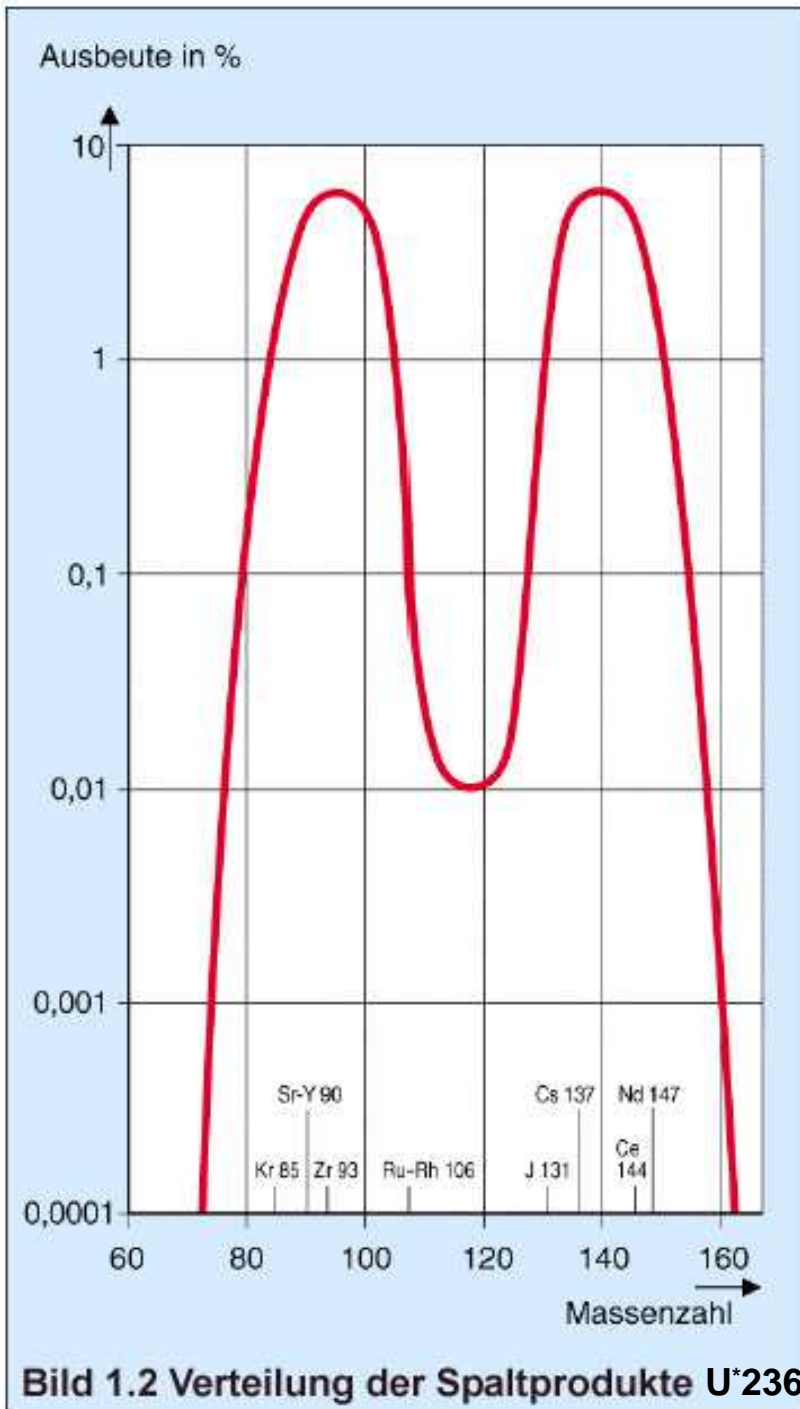


Mittlere Bindungsenergie je Nukleon

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

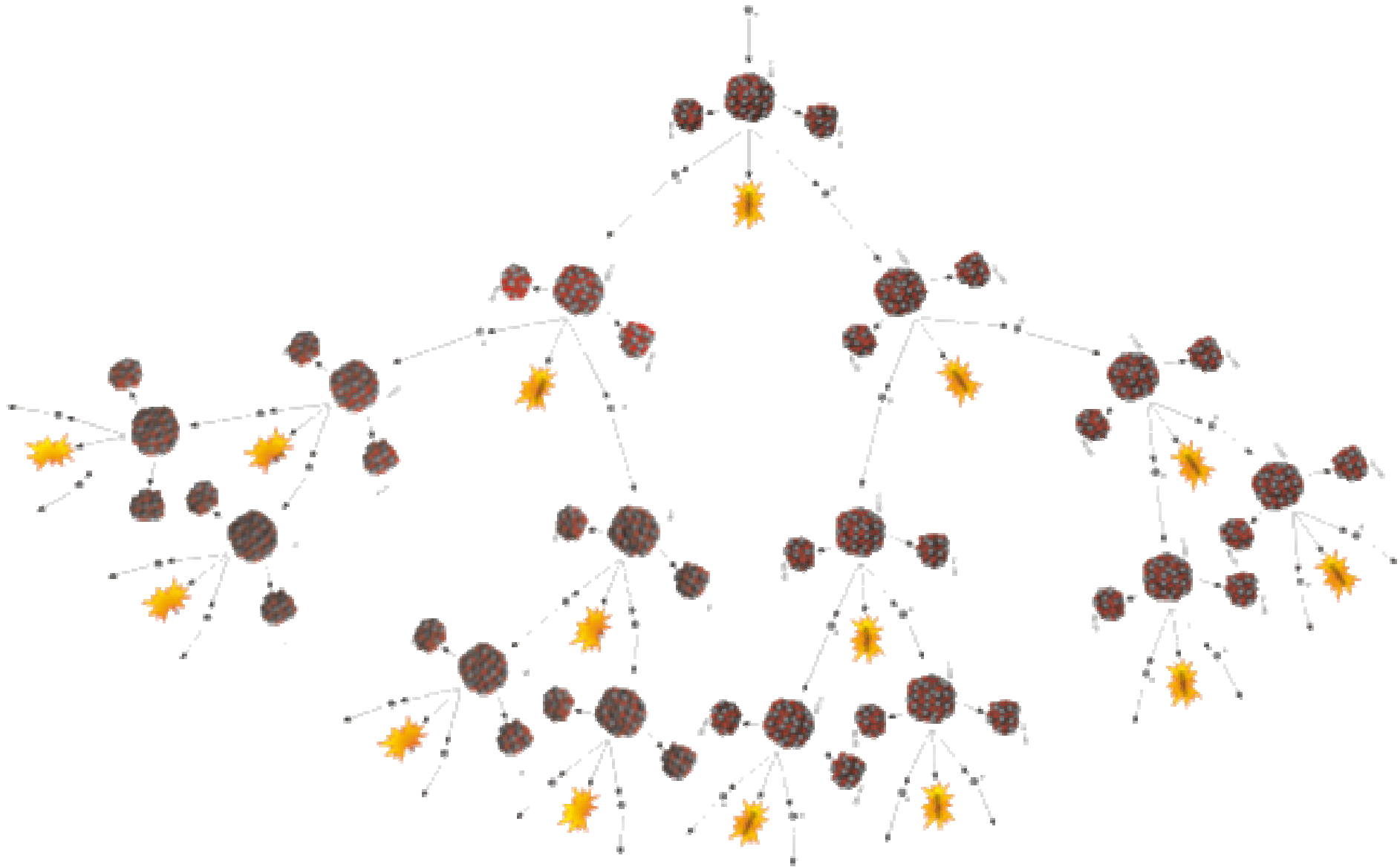
Kernspaltung - Fission





❖ Die Massezahlen der Spaltprodukte liegen im Bereich von 80 bis 160 mit einer bestimmten Häufigkeitsverteilung

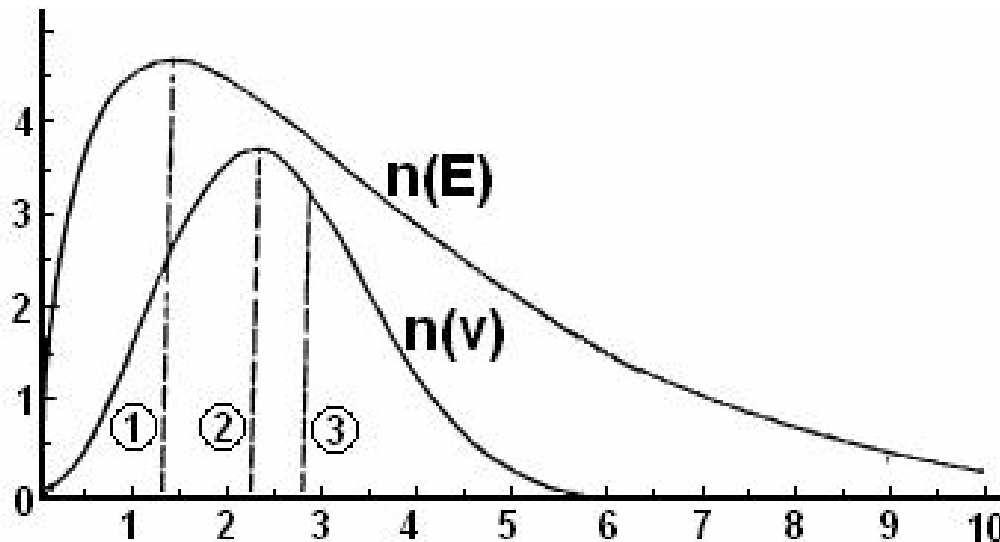
Die Kettenreaktion



- ❖ die Neutronen haben nach der Spaltung eine kinetische Energie von etwa **2 MeV**
- ❖ im thermischen Gleichgewicht mit den Umgebungsatomen, haben die Neutronen bei **20 °C** eine Energie von **0,025 eV**
- ❖ bei der niedrigen Energien ist die Wahrscheinlichkeit für erneute Spaltreaktion, der Wirkungsquerschnitt deutlich größer als mit Spaltenergie

Maxwell-Boltzmann-Verteilung für thermische Neutronen bei $T = 300\text{K}$

- (1) wahrscheinlichste Energie E_w ;
- (2) wahrscheinlichste Geschwindigkeit v_w ;
- (3) mittlere Geschwindigkeit v



$$E = \frac{mv^2}{2}$$

$$n(v)dv = n(E)dE$$

Neutronengeschwindigkeit $10^{-5} \cdot v$ [cm/s]

kinetische Energie der Neutronen $10^{-2} \cdot E$ [eV]

$$n(E) = \frac{2\pi}{(\pi k T)^{3/2}} e^{-\frac{E}{kT}} E^{1/2}$$

Die wahrscheinlichste Geschwindigkeit: $v_w = \sqrt{2kT/m}$

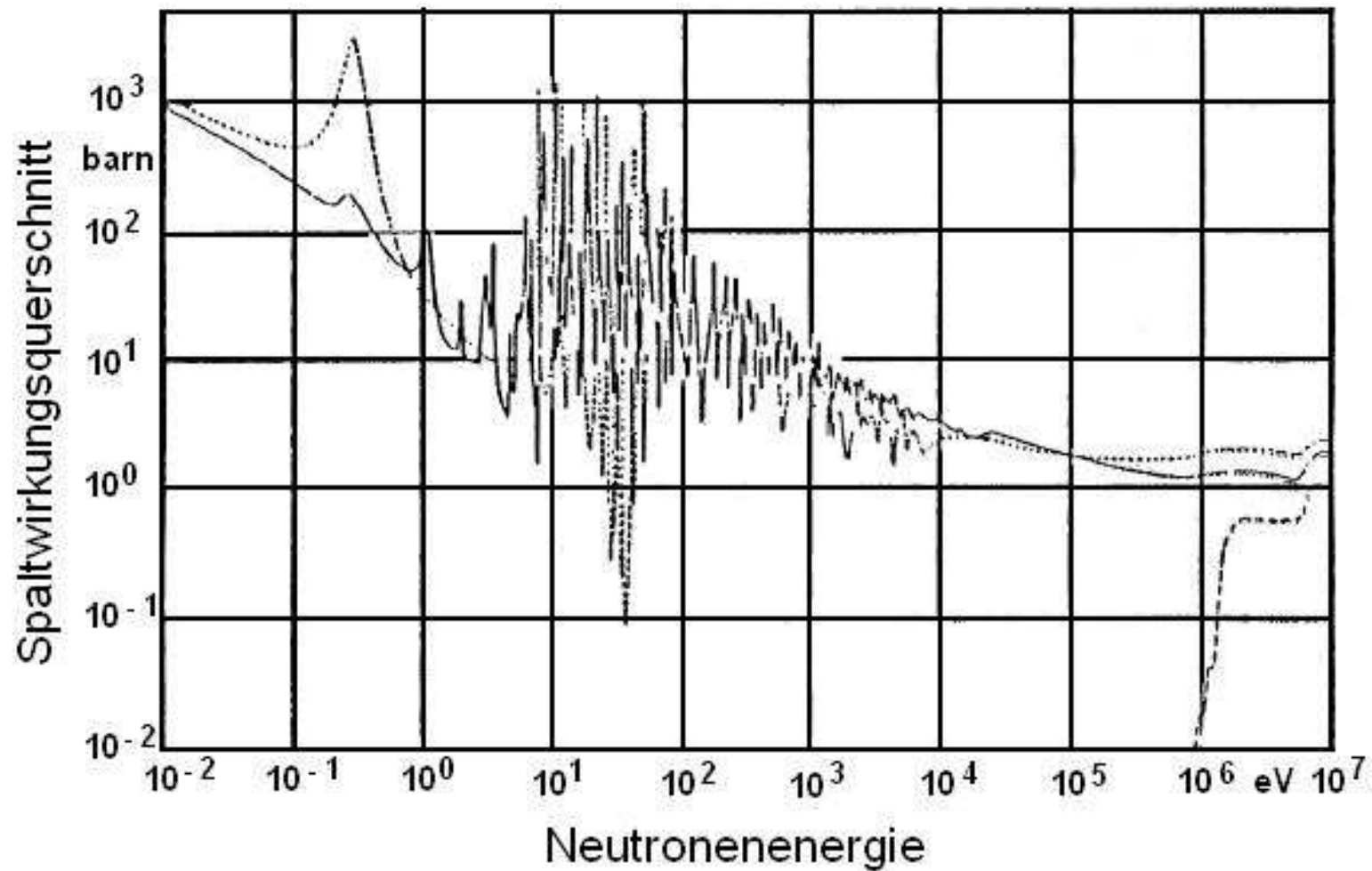
Die Energie eines thermischen Neutrons (Definition):

$$E = \frac{1}{2}mv_w^2 = kT$$

Die mittlere Energie: $\bar{E} = \frac{3}{2}kT$

Bei Zimmertemperatur ist T ungefähr 293°K, also:

$$t = 20^\circ\text{C} \Rightarrow \begin{cases} v_w \approx 2200 \text{ m/s} \\ E \approx 0.0253 \text{ eV} \end{cases}$$



Spaltquerschnitte von

^{235}U (—————),
 ^{238}U (- - - - -) und
 ^{239}Pu (.)

Die leicht und schwer spaltbaren Isotopen

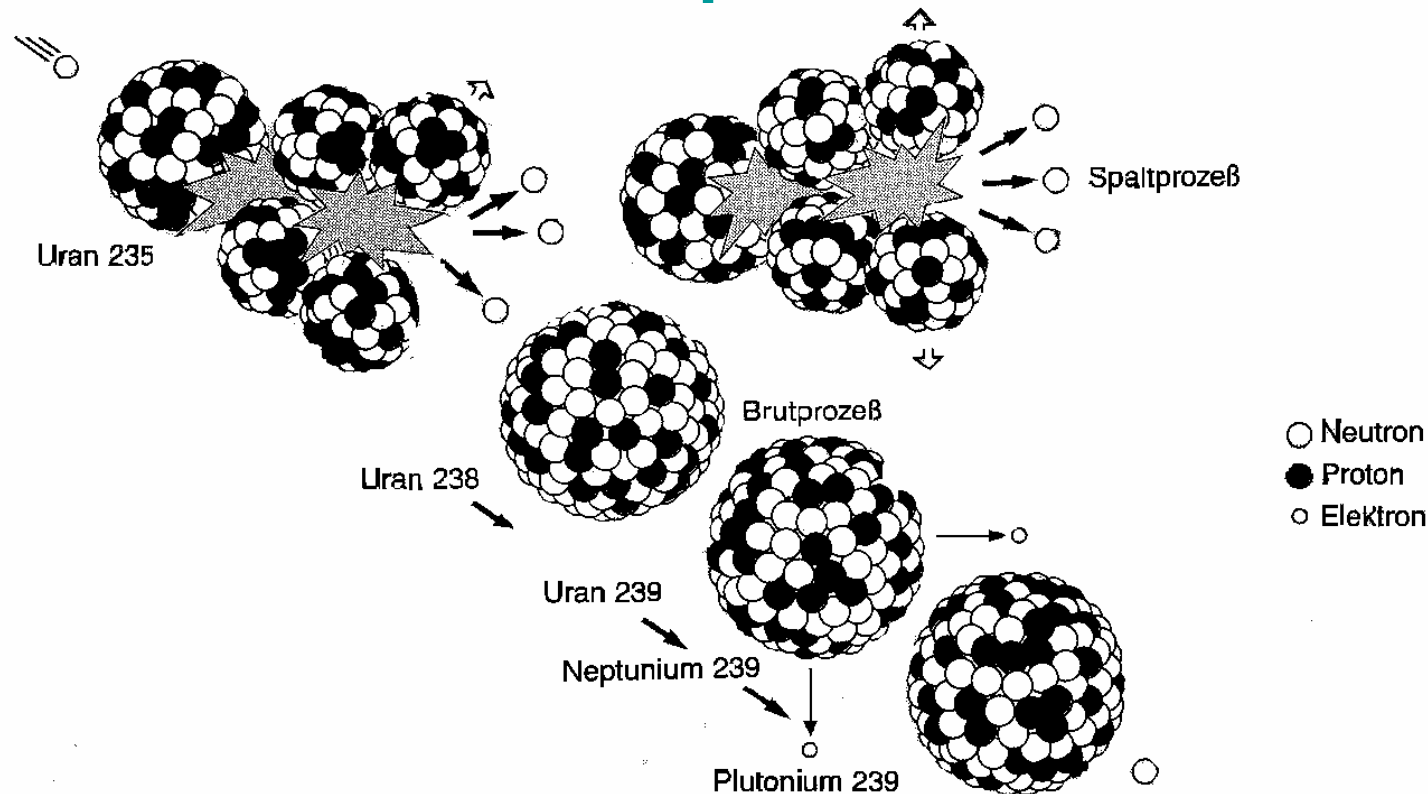
❖ leicht spaltbare Isotopen:

- sie können mit thermischen Neutronen gespalten werden
- U-235 (0,7 % im Uran natürlicher Isotopenzusammensetzung)
- Uran-233 und Plutonium-239 (künstliche Spaltstoffe)

❖ schwer spaltbaren Isotopen

- Uran-238 (der Rest des natürlichen Urans)
- Thorium-232
- das Neutron muss eine Mindestenergie 1 MeV mitbringen, um zusammen mit der Bindungsenergie des Neutrons die Spaltungen auslösen zu können
- mit den schwer spaltbaren Substanzen alleine kann keine Kettenreaktion zustande kommen

Brutprozess

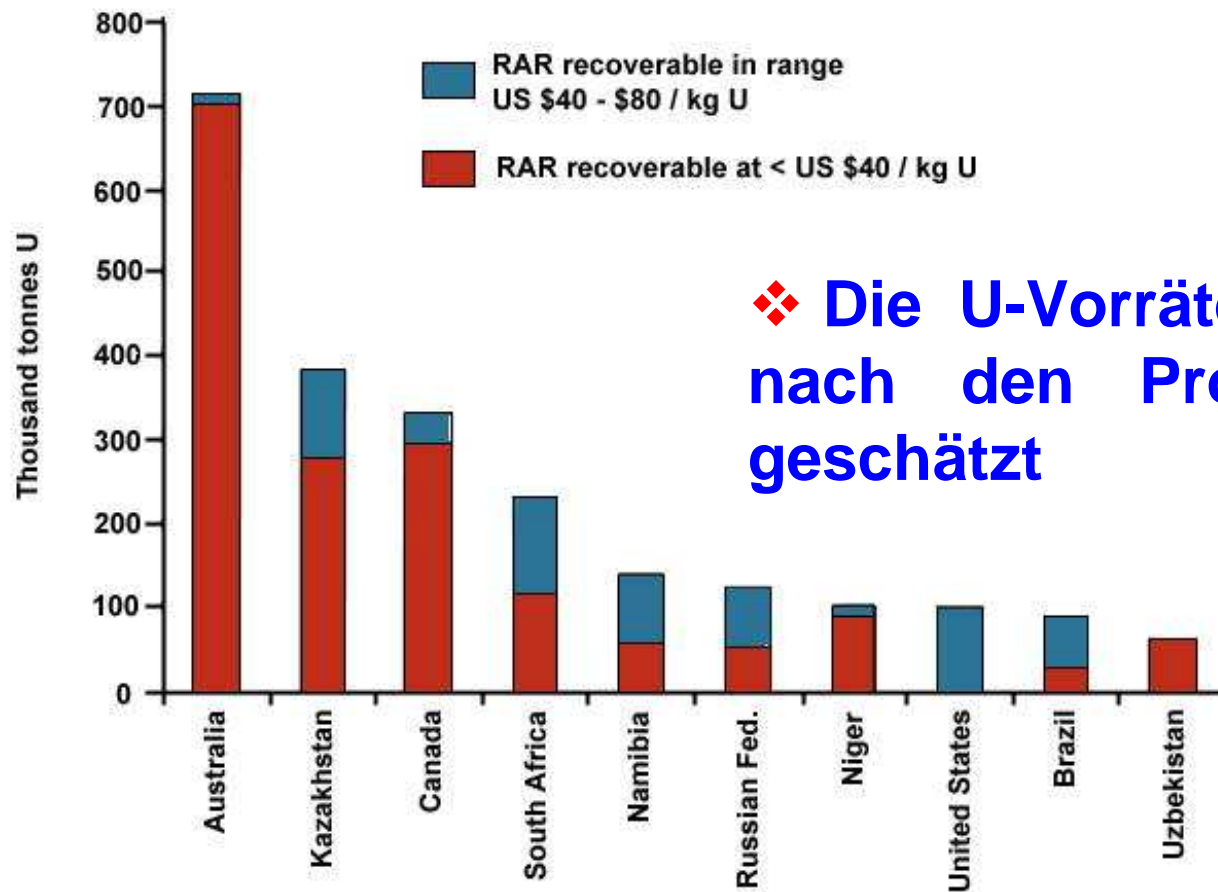


❖ Konversions- oder Brutprozesse: Umwandlung von Uran-238 oder Thorium-232 in die spaltbaren Isotope **Plutonium-239** bzw. **Uran-233**

❖ Die Brutreaktoren können die in der Natur angebotenen Spaltstoffressourcen um einen **Faktor 60** besser nutzen.

Uran-Vorräte

- ❖ 1 Gramm Uran-235 gespalten eine Energie von 0,9 MWd entsprechend dem Heizwert von 2,6 Tonnen Steinkohle
- ❖ die größten Uranlagerstätten befinden sich in Kanada, Niger, Gabun, Südafrika, Namibia, Kongo, USA, Brasilien, Australien, Frankreich, Argentinien



- ❖ Die U-Vorräte werden klassifiziert nach den Produktionskosten eingeschätzt

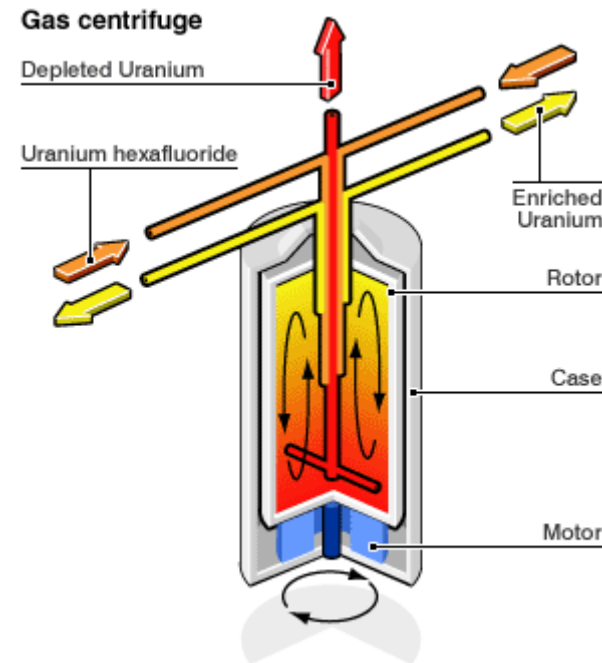
Kernbrennstoff

- ❖ Natururan enthält **0,72 % Uran-235** und der Rest ist Uran-238 mit 99,27%
 - Uran-235 zerfällt mit einer Halbwertszeit von $7 \cdot 10^8$ Jahren und Uran-238 mit $4,5 \cdot 10^9$ Jahren
 - Erdalter ~ 4,5 Mrd. Jahren
- ❖ Metallisches Uran besitzt die Dichte $19,1 \text{ g/cm}^3$
 - Bis zu seinem Schmelzpunkt bei 1132 °C existieren 3 Kristallmodifikationen
- ❖ Durch Oxidieren wird Uranoxid und durch Fluorieren UF_6 gewonnen



Kernbrennstoff

❖ UF_6 geht zur Anreicherungsanlage um die Uran-235 Konzentration zu erhöhen



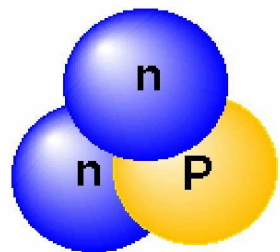
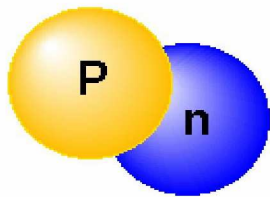
❖ Die meisten Leistungsreaktoren verwenden einen Brennstoff, bei dem der **U-235-Gehalt** auf meist **mehr als 3 %** angereichert ist

❖ Heutige Reaktoren verwenden das Dioxid, UO_2 , das in Form von keramischen Tabletten eingesetzt wird

Kernverschmelzung - Fusion



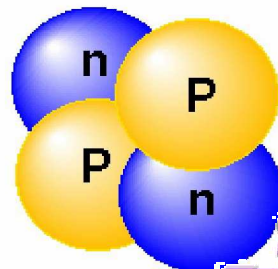
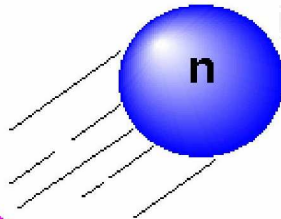
Deuterium



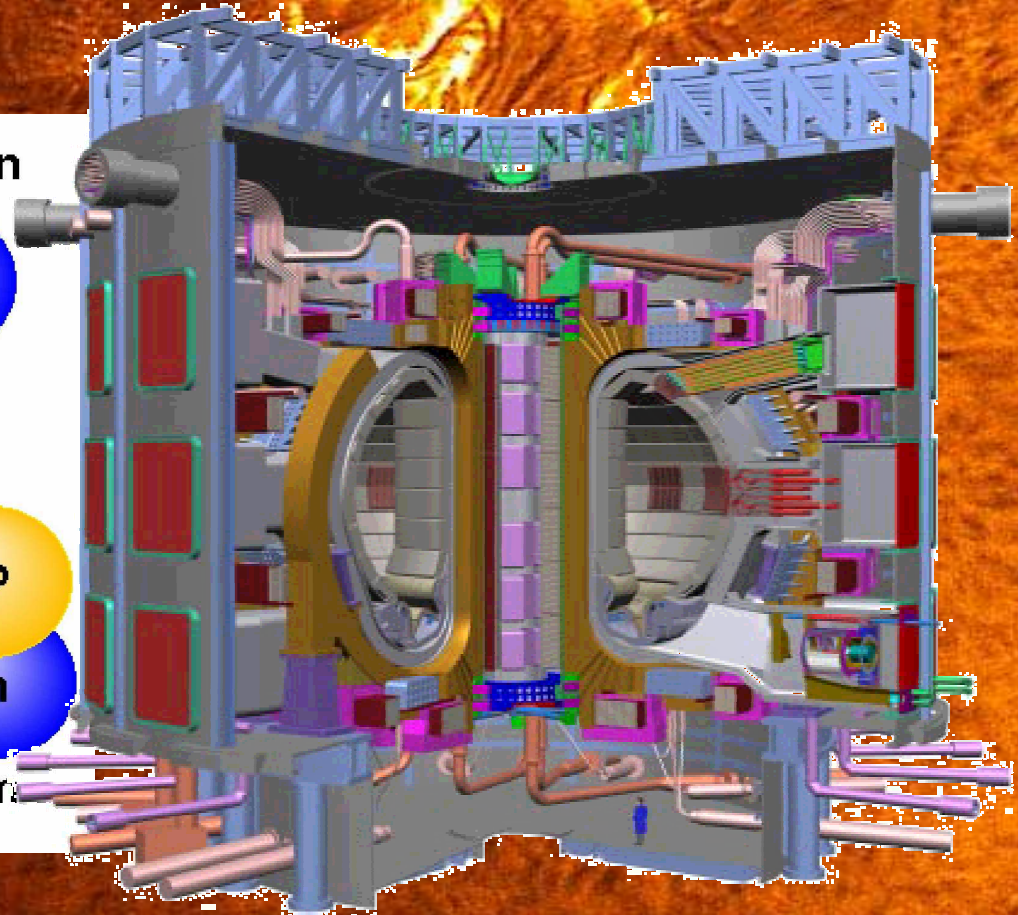
Tritium

Fusion

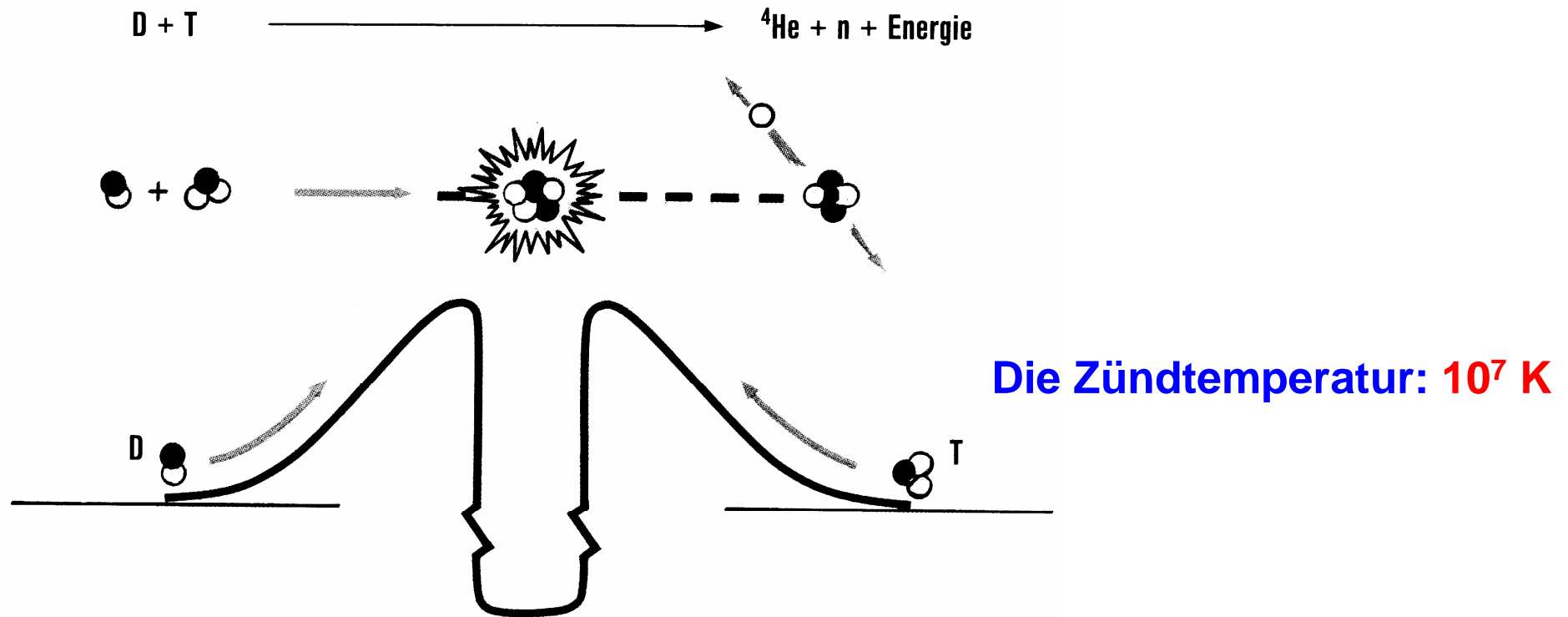
Neutron



Helium



Kernverschmelzung - Fusion



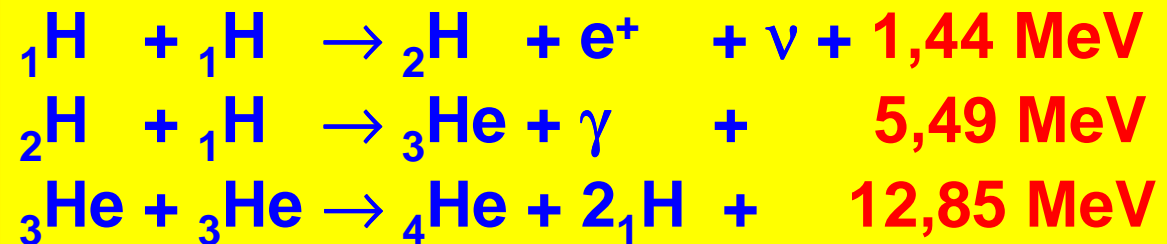
Der Gesamtprozess:



- ❖ Der Gesamtprozess erzeugt aus einem Gramm Deuterium 12,5 MWd – ein vielfaches der Uranspaltung
- ❖ Deuterium ist mit etwa 1/6000 im natürlichen Wasserstoff enthalten

Die Sonne als Energiequelle

Die Sonne schöpft ihre Energie aus einer Kette von Umwandlungsprozessen (**pp-Reaktion**):



${}_A\text{H}$ = Wasserstoff;

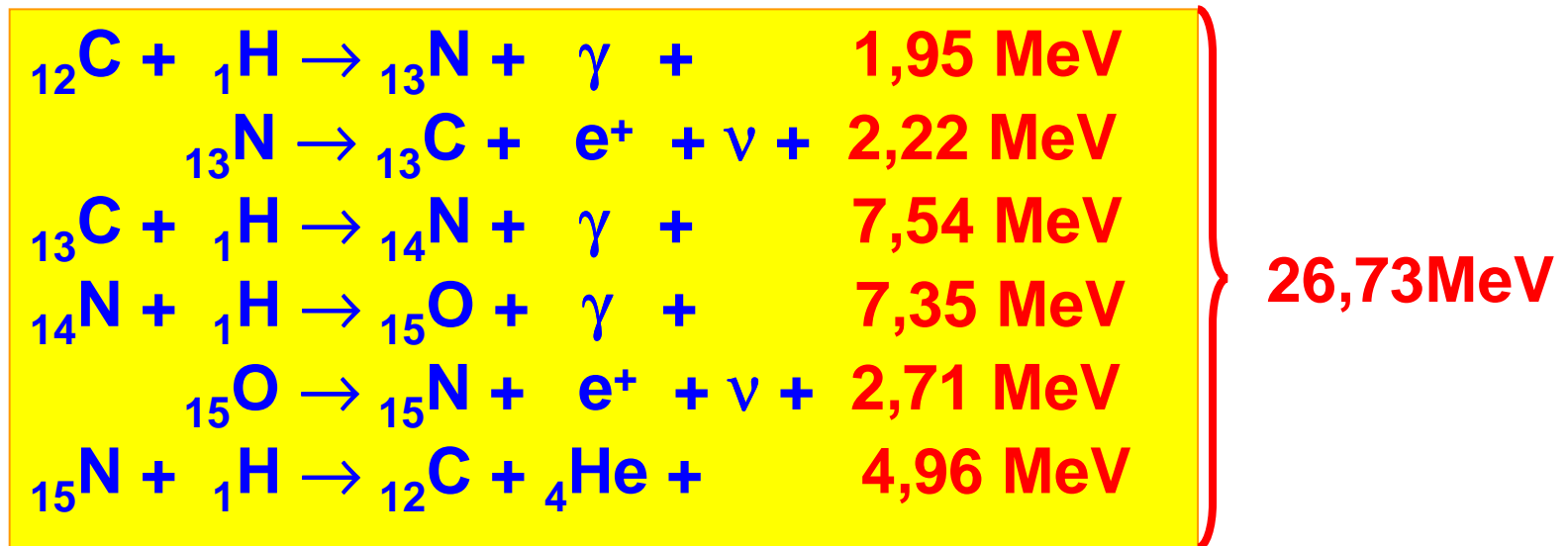
A = Massenzahl: $A = 2 \rightarrow$ Deuterium,
 $A = 3 \rightarrow$ Tritium;

He = Helium;

γ = Gammastrahlung;

ν = Neutrino bzw. Antineutrino;

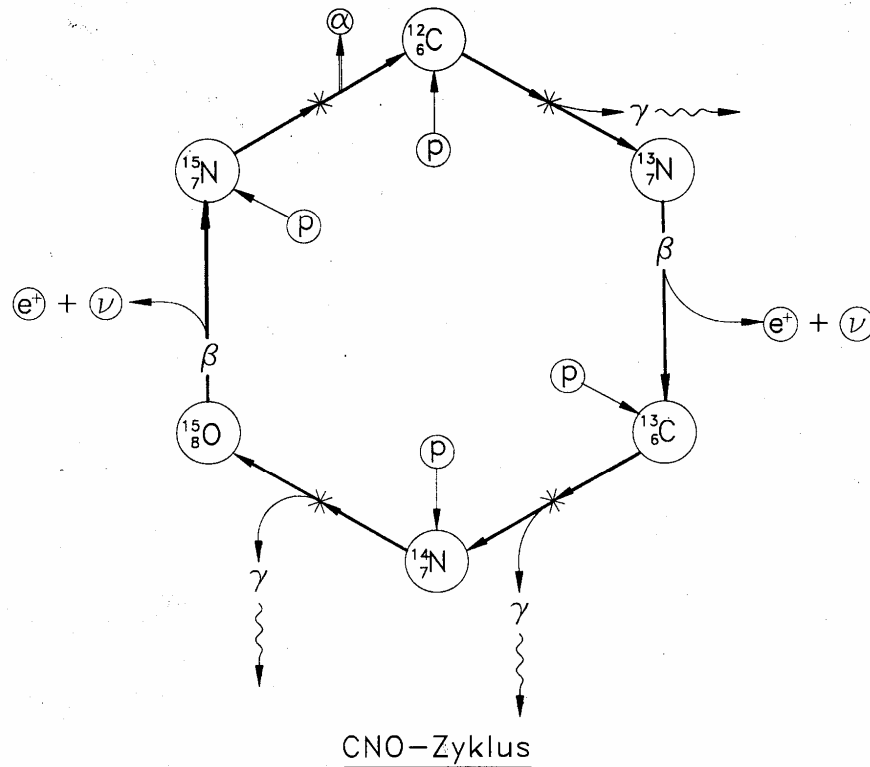
Bei Sternen mit höheren Temperaturen kann noch ein zweiter Fusionszyklus ablaufen, der **CNO-Zyklus**:



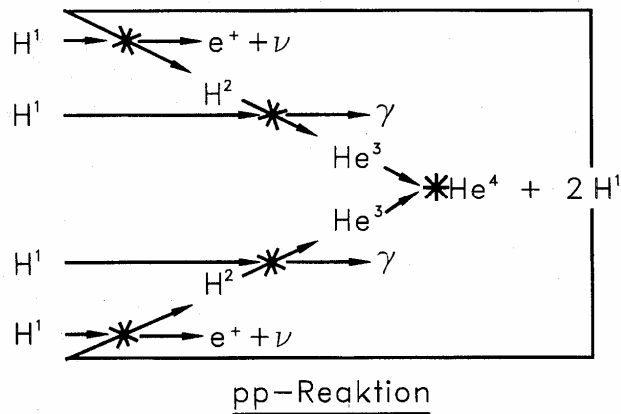
e^+ = Positron;
 C = Kohlenstoff;
 O = Sauerstoff;
 N = Stickstoff

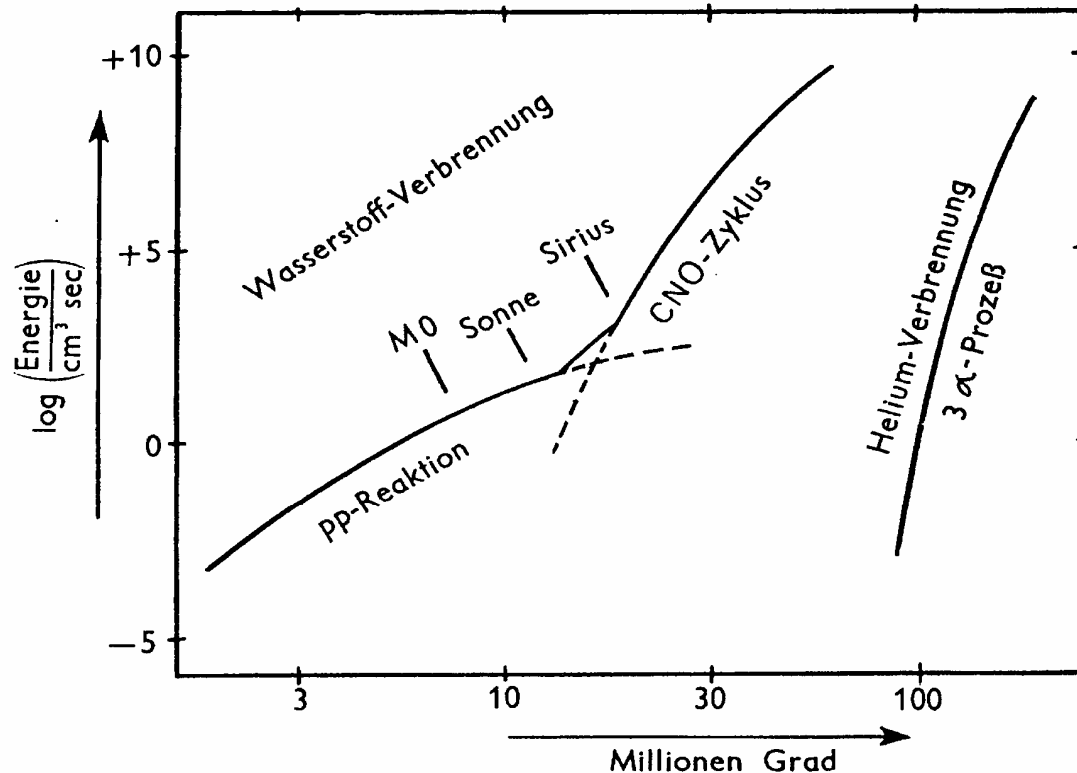
Beide Prozesse verbinden im Gesamteffekt Wasserstoff zu Helium:

← **CNO-Zyklus** (Sternen mit höheren Temperaturen)



← **pp-Reaktion** (die Sonne)





Die erzeugte Energie (im Zentrum des Sternes) als Funktion der Temperatur

- unterhalb von 16 Millionen Grad überwiegt die pp-Reaktion
- der CNO-Zyklus abhängt starker von der Temperatur
- die Temperaturabhängigkeit des 3 α -Prozesses ist extrem stark



- das Alter von der Sonne \cong **5 Milliarden Jahre**
- die Wasserstoffkonzentration hat auf ca. **92 %** abgenommen
 - ✓ die jetzige Leistung noch über **10 Milliarden Jahre** abgegeben werden kann
- die Heliumhäufigkeit erreicht ca. **8 %**
- die Sonne strahlt mit **4×10^{20} MW** in den Raum, von denen **2×10^{11} MW** die Erde treffen
 - ✓ der Energieverbrauch weltweit: **$1,13 \times 10^7$ MW**
- das Zentrum von der Sonne:
 - ❖ die Temperatur \cong **10^7 K**; die Energie der Teilchen: **$1 \div 10$ KeV**; die Dichte: **10^5 kg/m³**
 - ✓ damit sind die Bedingungen für den Ablauf der Fusionsprozesse gegeben
- **90%** der Energie werden im Zentrum bis etwa **0,3R** erzeugt

Schematischer Aufbau der Sonne

Mittlere Sonnendichte $d = 1,41 \text{ g/cm}^3$
 Mittlere Innentemperatur $T = 16 \times 10^6 \text{ K}$
 (Dichte, Druck und Temperatur der Gase steigen im Sonneninneren zum Zentrum zu an)
 R = Radius / D = Dicke der Schicht

Chromosphäre:

$D = 8\,000 \text{ bis } 10\,000 \text{ km}$
 $d = 10^{-11} \text{ bis } 10^{-15} \text{ g/cm}^3$
 $T = 5\,776 \text{ bis } 300\,000 \text{ K}$
 (nach außen hin zunehmend)

Korona:

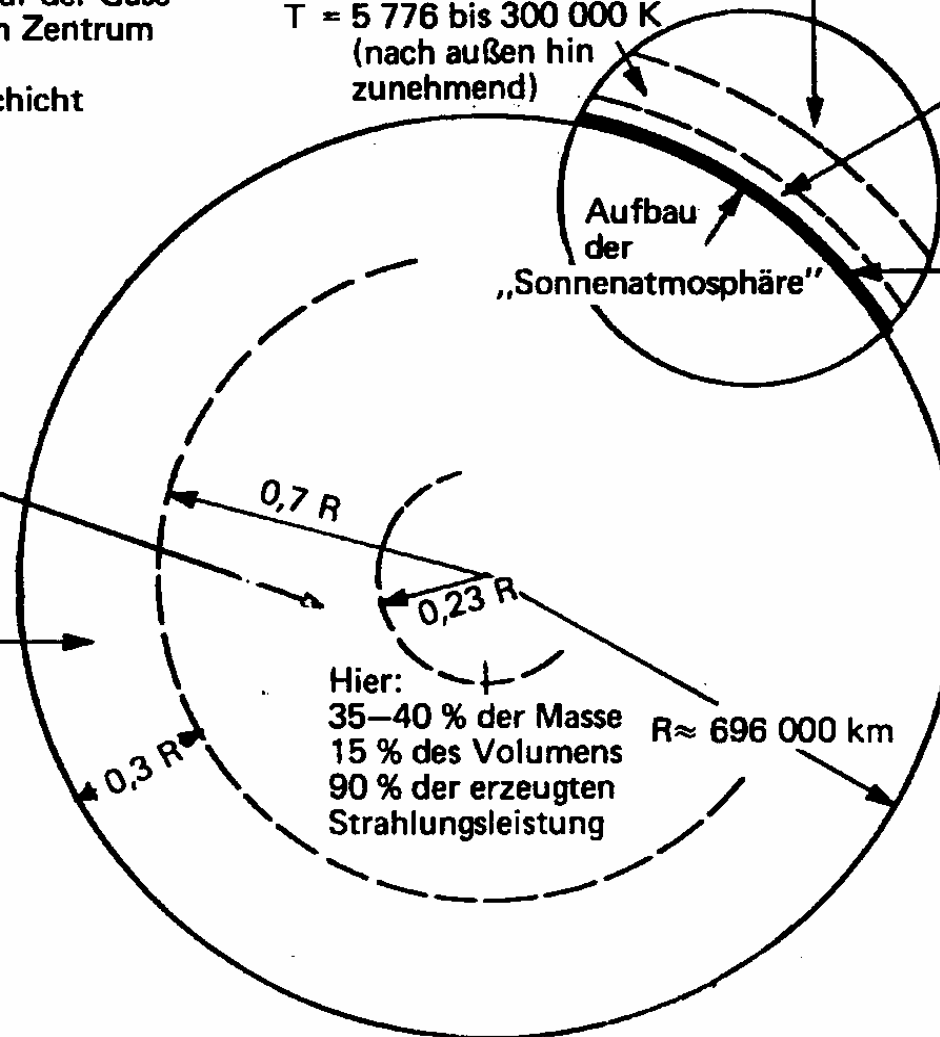
$D = \text{nicht begrenzbar}$
 $d = \text{nur } 10^{-19} \text{ bis } 10^{-16} \text{ g/cm}^3$
 $T = \text{rund } 10^6 \text{ K}$

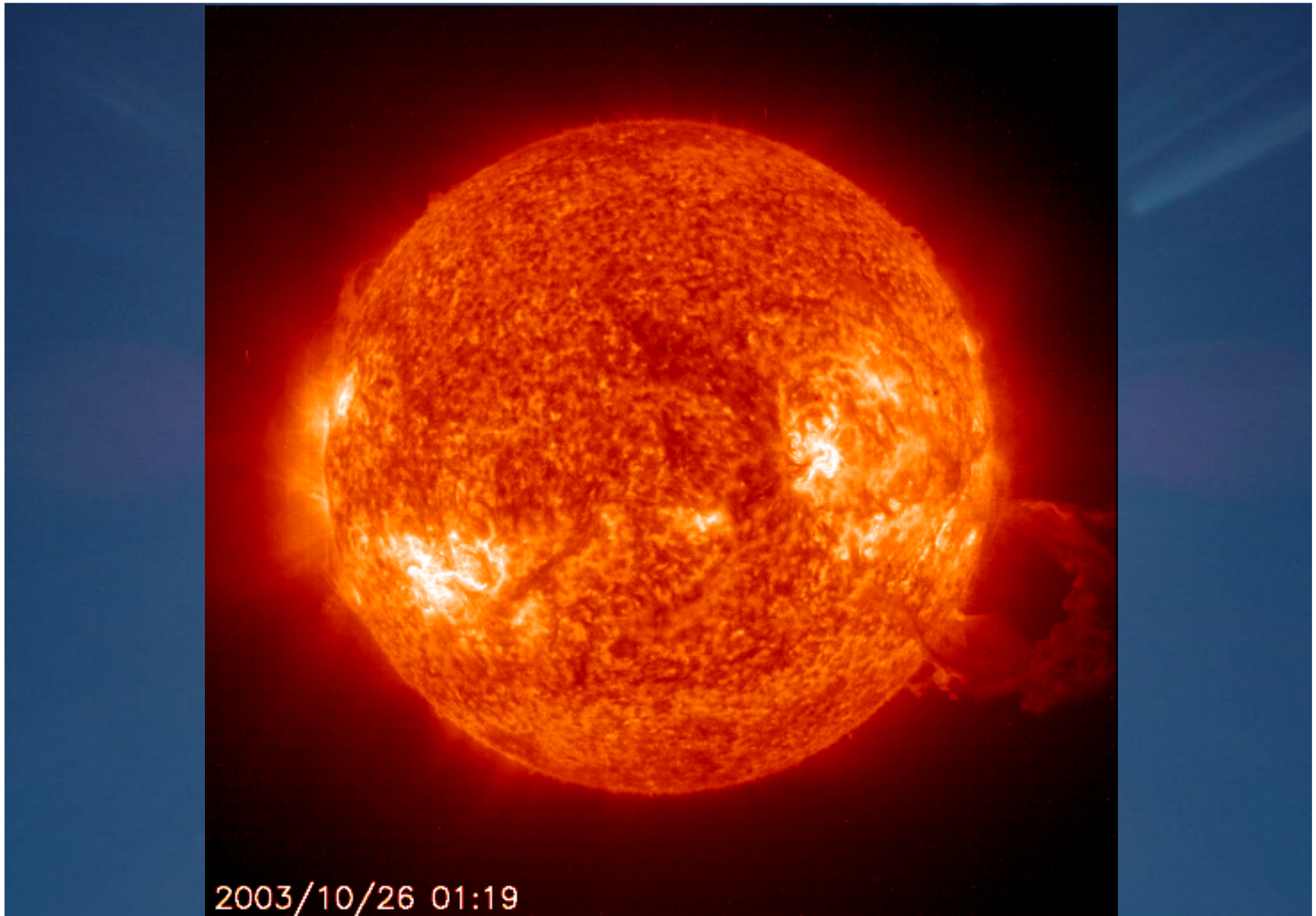
Photosphäre:

Umkehrschicht
 $D = 400 \text{ bis } 500 \text{ km}$
 $d = 10^{-7} \text{ bis } 10^{-8} \text{ g/cm}^3$
 $T = 4\,000 \text{ bis } 7\,000 \text{ K}$,
 zugleich
Obere Schicht der Konvektionszone,
 Quelle des größten Teils der Sonnenstrahlung („Sonnenoberfläche“)

Sonneninneres
 $d = 100 \text{ g/cm}^3$
 $T = 8 \text{ bis } 40 \times 10^6 \text{ K}$

Wasserstoff-Konvektionszone
 $d = 0,07 \text{ g/cm}^3$
 $T = 130\,000 \text{ K}$

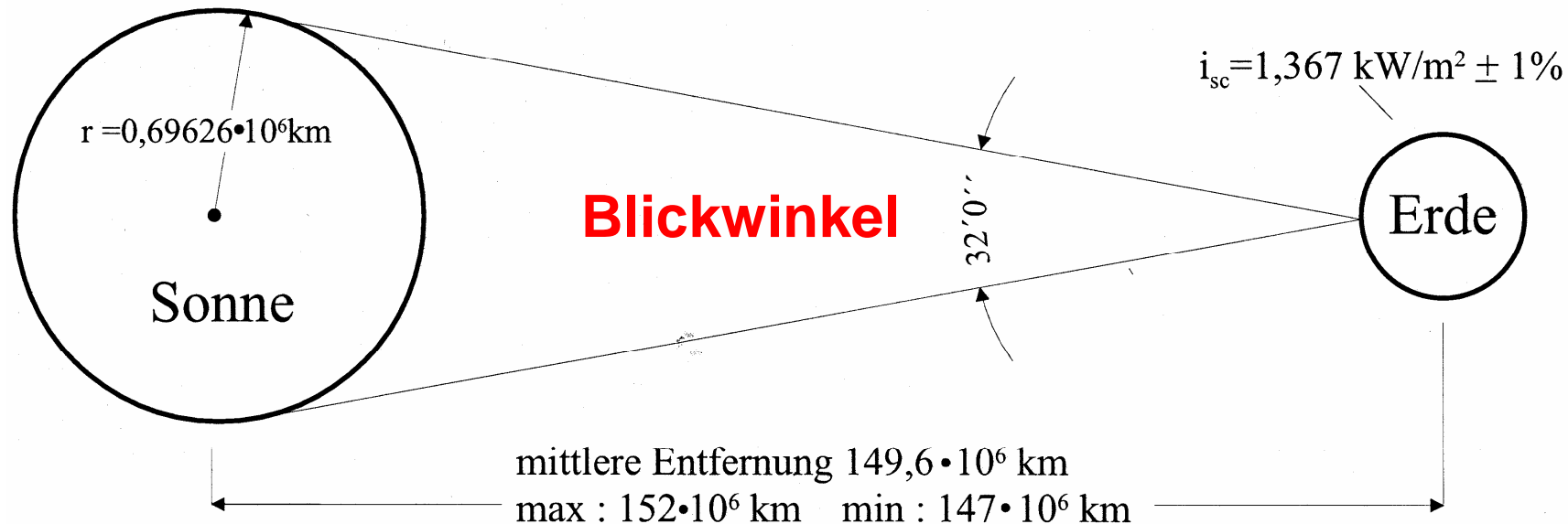




Blickwinkel der Sonne, Solarkonstante

$$T = 5776 \text{ K}$$

$$i_{\text{Sonne}} = 6,311 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$$



- **der Blickwinkel**: die Erde sieht die Sonne unter **$32'$**
- **die Solarkonstante** → die Intensität der solaren Strahlung auf eine Fläche von 1 m^2 senkrecht zur Einstrahlungsrichtung, extraterrestrisch, ohne atmosphärische Schwächung: **$i_{\text{sc}} = 1,367 \text{ kW/m}^2 \pm 1\%$**

Temperatur der Sonne

- ✓ der mittlere Abstand der Erde von der Sonne: $R_{S/E} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ Km}$ (8,3 Lichtminuten)
- ✓ die Solarkonstante: $i_{SC} = 1,367 \text{ kW/m}^2$
- ✓ der Sonnenradius: $R_S = 0,696 \cdot 10^6 \text{ Km}$

$$i_{\text{Sonne}} \cdot 4\pi R_S^2 = i_{SC} \cdot 4\pi R_{S/E}^2$$



die Strahlungsdichte an der Sonnenoberfläche: $i_{\text{Sonne}} = 63,11 \text{ MW/m}^2$

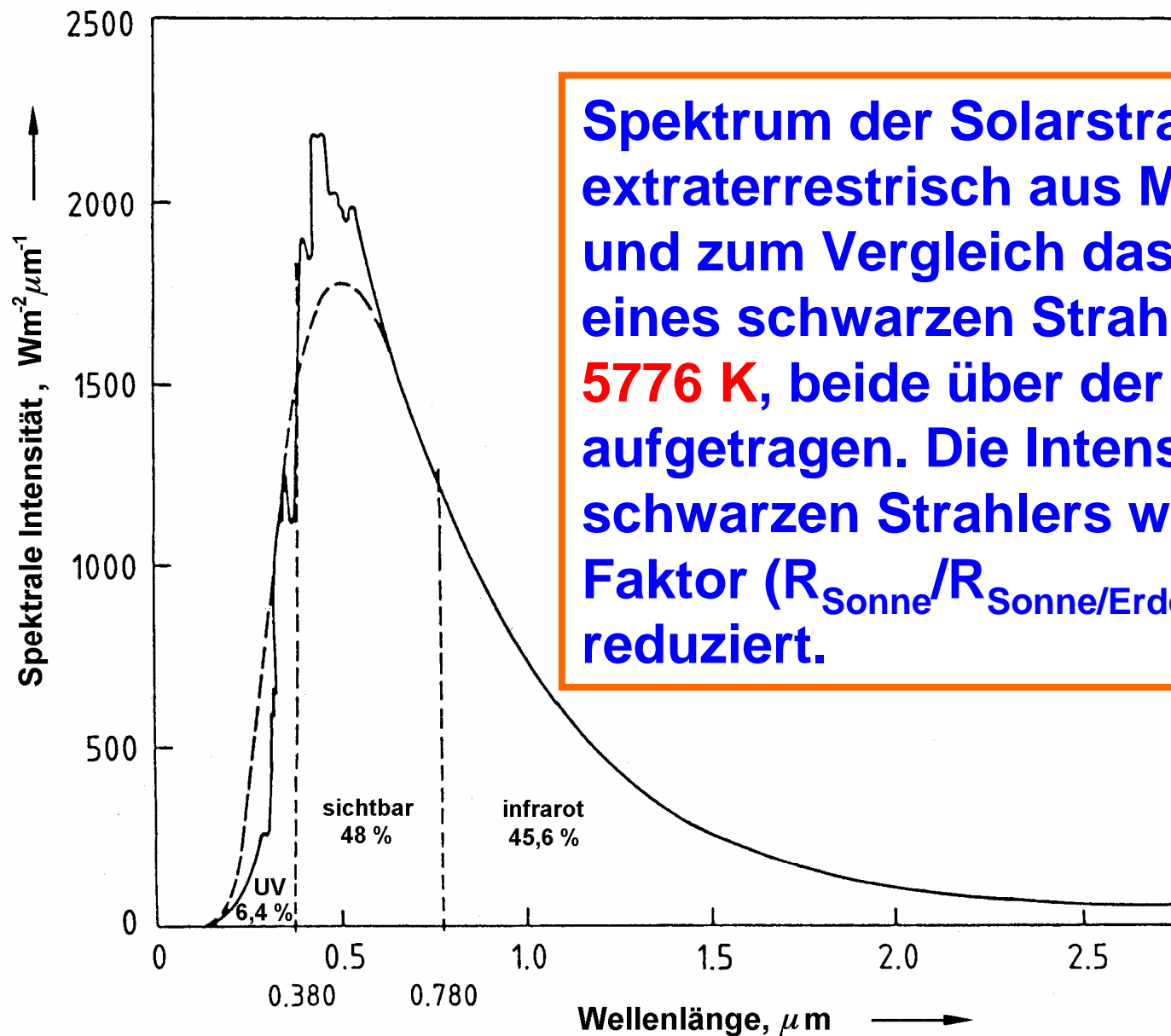
- ✓ das Stefan-Boltzmann-Gesetz für einen schwarzen Strahler:

$$\dot{E}_S = \sigma T_{\text{Sonne}}^4 = i_{\text{Sonne}}$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 = \text{Stefan-Boltzmann-Konstante}$










$$T_{\text{Sonne}} = 5776 \text{ K}$$



Spektrum der Solarstrahlung extraterrestrisch aus Messungen und zum Vergleich das Spektrum eines schwarzen Strahlers mit **5776 K, beide über der Wellenlänge aufgetragen. Die Intensität des schwarzen Strahlers wurde um den Faktor $(R_{\text{Sonne}}/R_{\text{Sonne/Erde}})^2 = 2,165 \cdot 10^{-5}$ reduziert.**

Die auf die Erdatmosphäre auftreffende Strahlung wird zu:

-  **31,0 %** kurzwellig an der Atmosphäre reflektiert,
-  **17,4 %** von der Lufthülle absorbiert,
-  **4,3 %** kurzwellig an der Erdoberfläche reflektiert,
-  **32,7 %** den Meeren als thermische Energie zugeführt,
-  **14,3 %** den Kontinenten als thermische Energie zugeführt,
-  **0,2 %** in kinetische Energie (Wind, Wellen, Meeresströmung) umgesetzt und
-  **0,1 %** durch Photosynthese in Biomasse umgesetzt

- ❖ Als Energiequelle kann die Sonnenstrahlung direkt oder können ihre Auswirkungen auf der Erde genutzt werden:
- direkte und diffuse Strahlung,
 - kinetische und potentielle Energie von Wasser (Wasserstrom auf dem Lande, auch Meeresströmungen, Meereswellen)
 - kinetische Energie von Wind,
 - Biomasse,
 - Umweltenthalpie als Wärmequelle für Wärmepumpen,
 - Temperaturdifferenz zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser