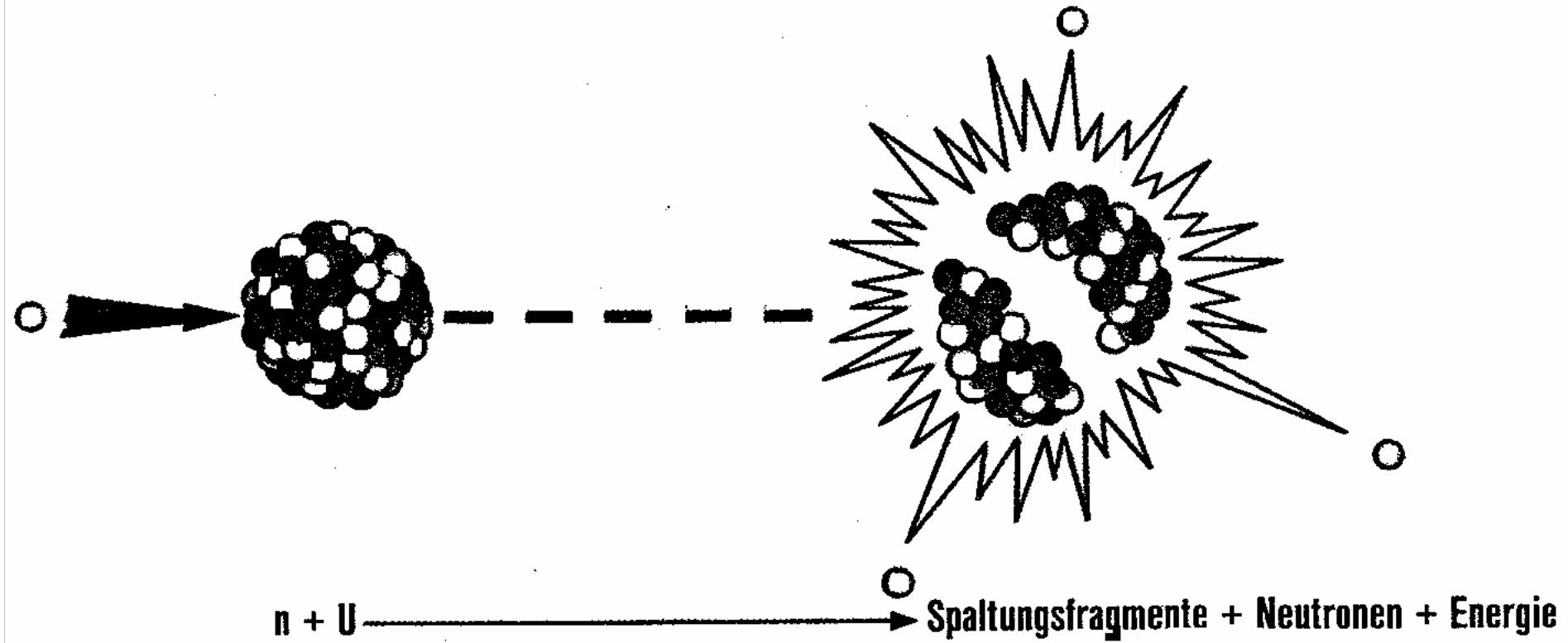


Kernenergie



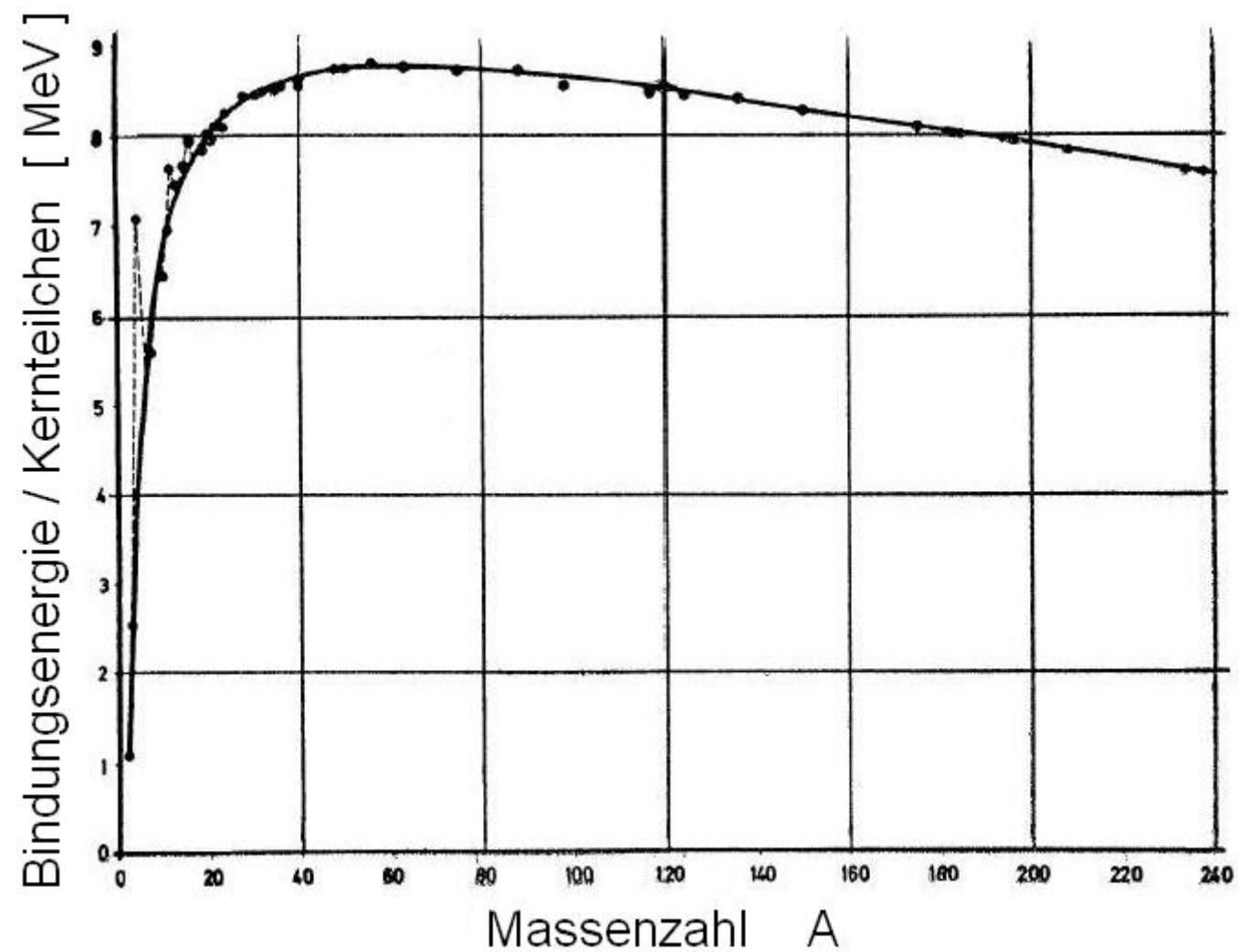
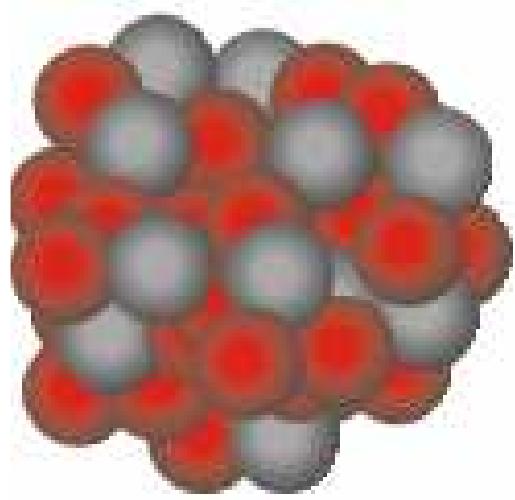
$$A = N + Z$$

A → Massenzahl
N → Neutronenzahl
Z → Protonenzahl

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

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

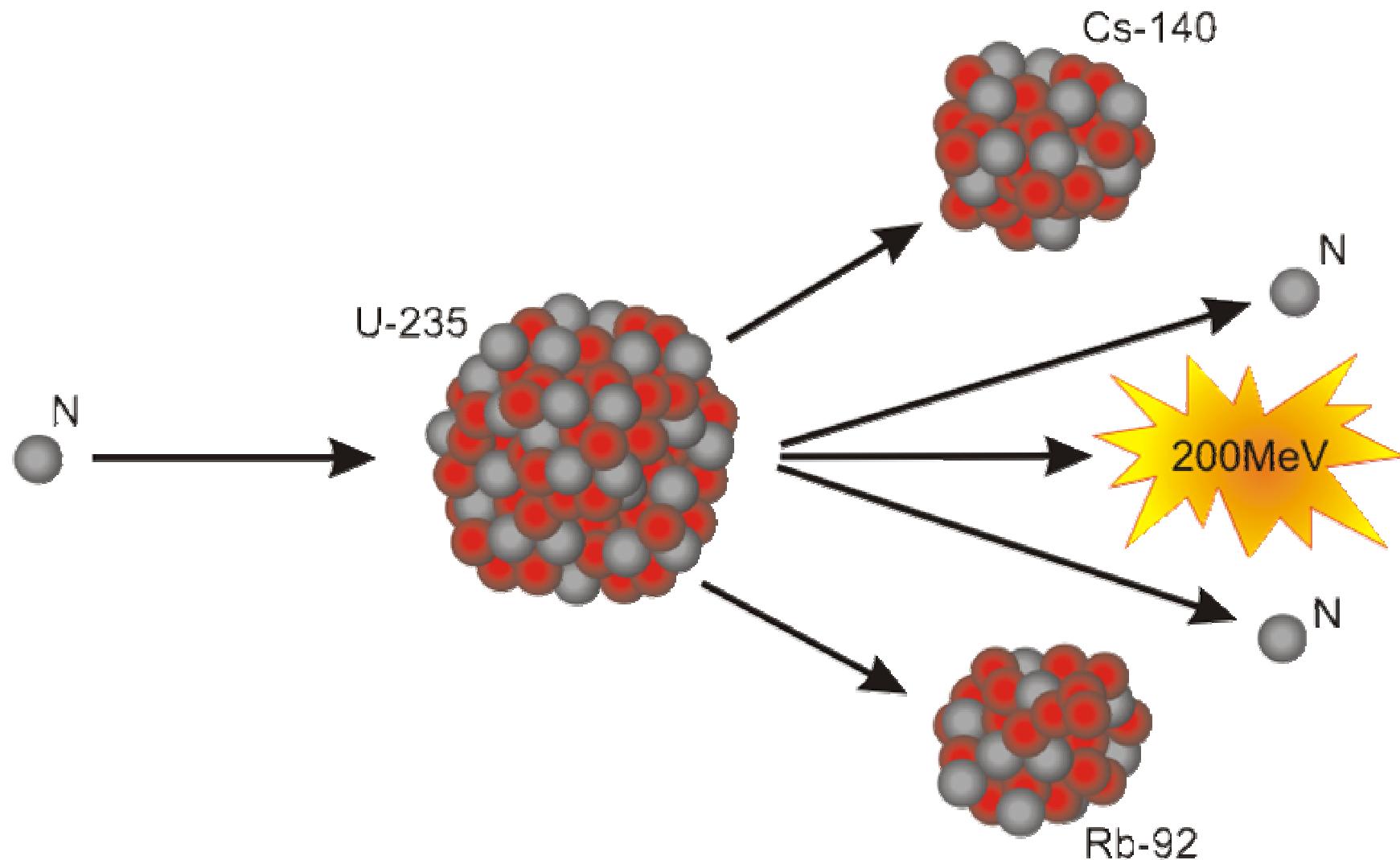
c ≡ Lichtgeschwindigkeit

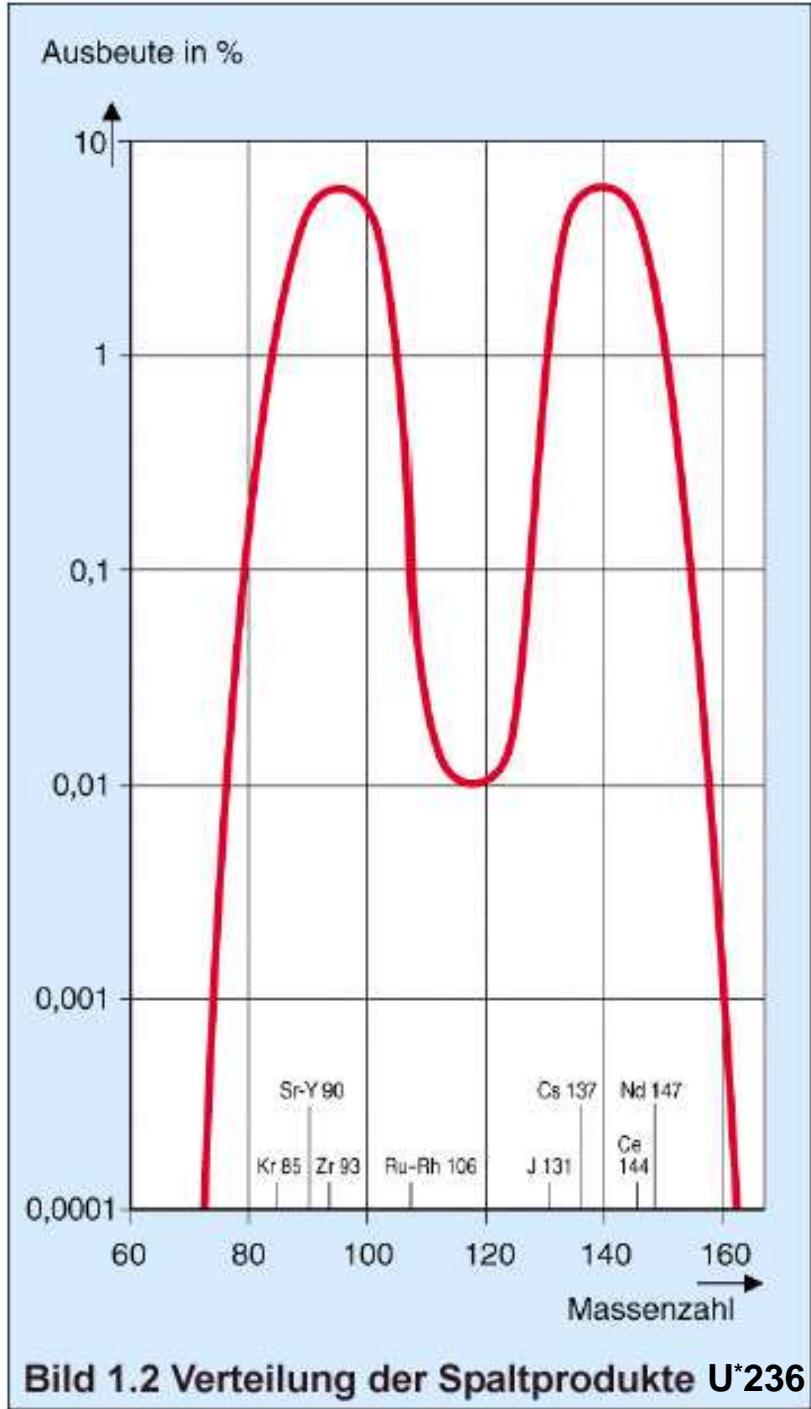


Mittlere Bindungsenergie je Nukleon

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

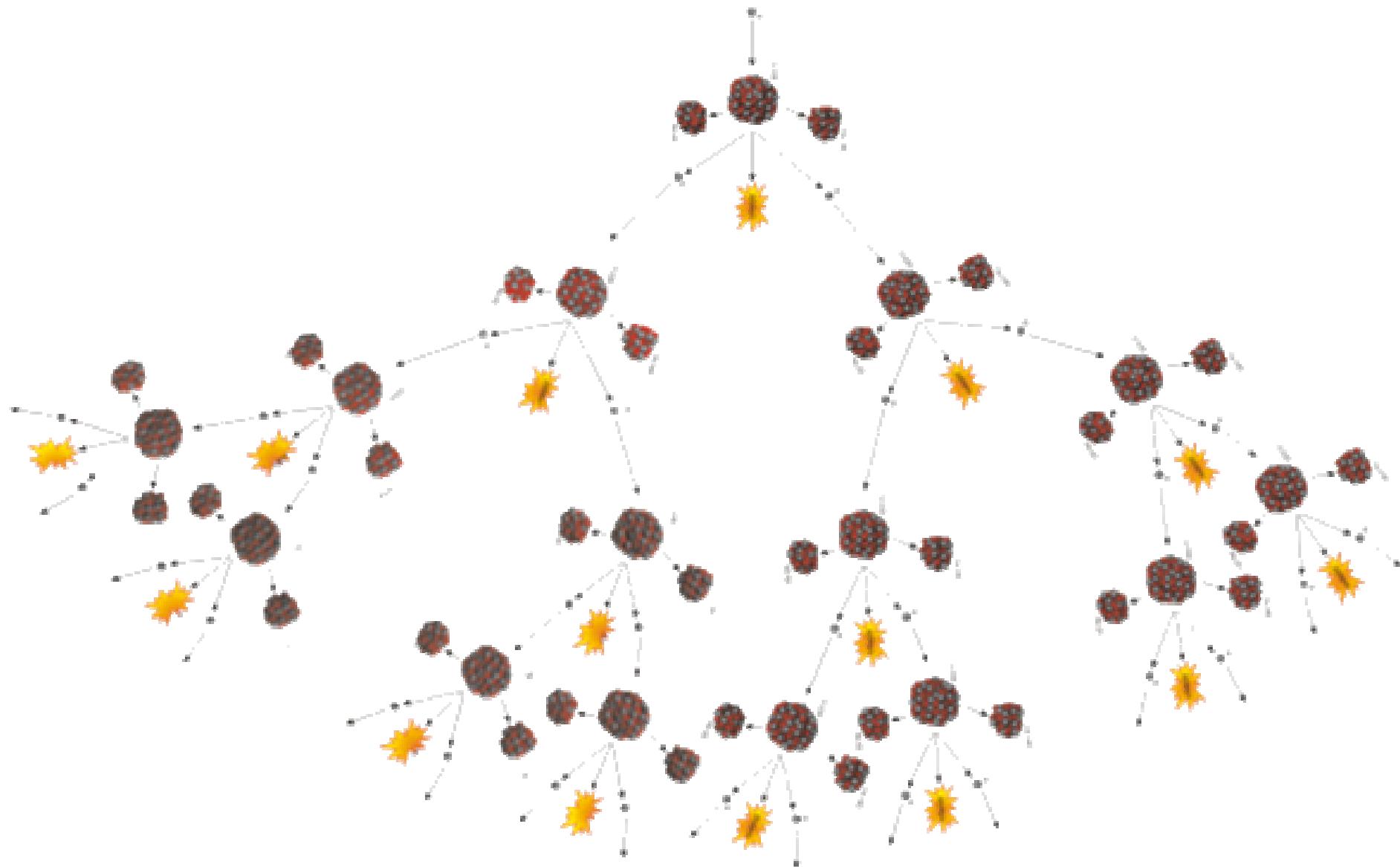
Kernspaltung - Fission





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

Die Kettenreaktion



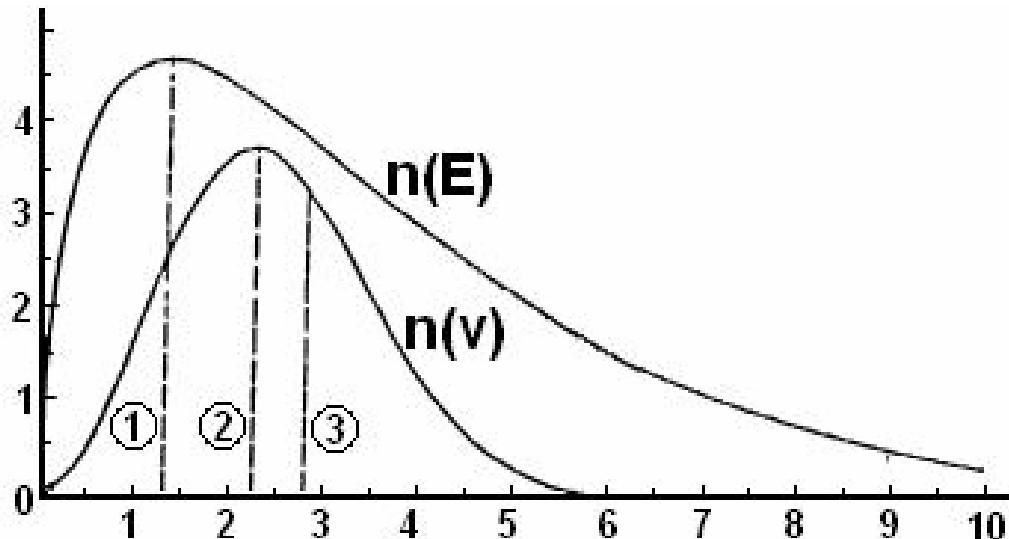
GRUNDLAGEN der ENERGIETECHNIK

ENERGIEFORMEN und ENERGIEQUELLEN

- ❖ 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 = 300K

- (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]

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

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

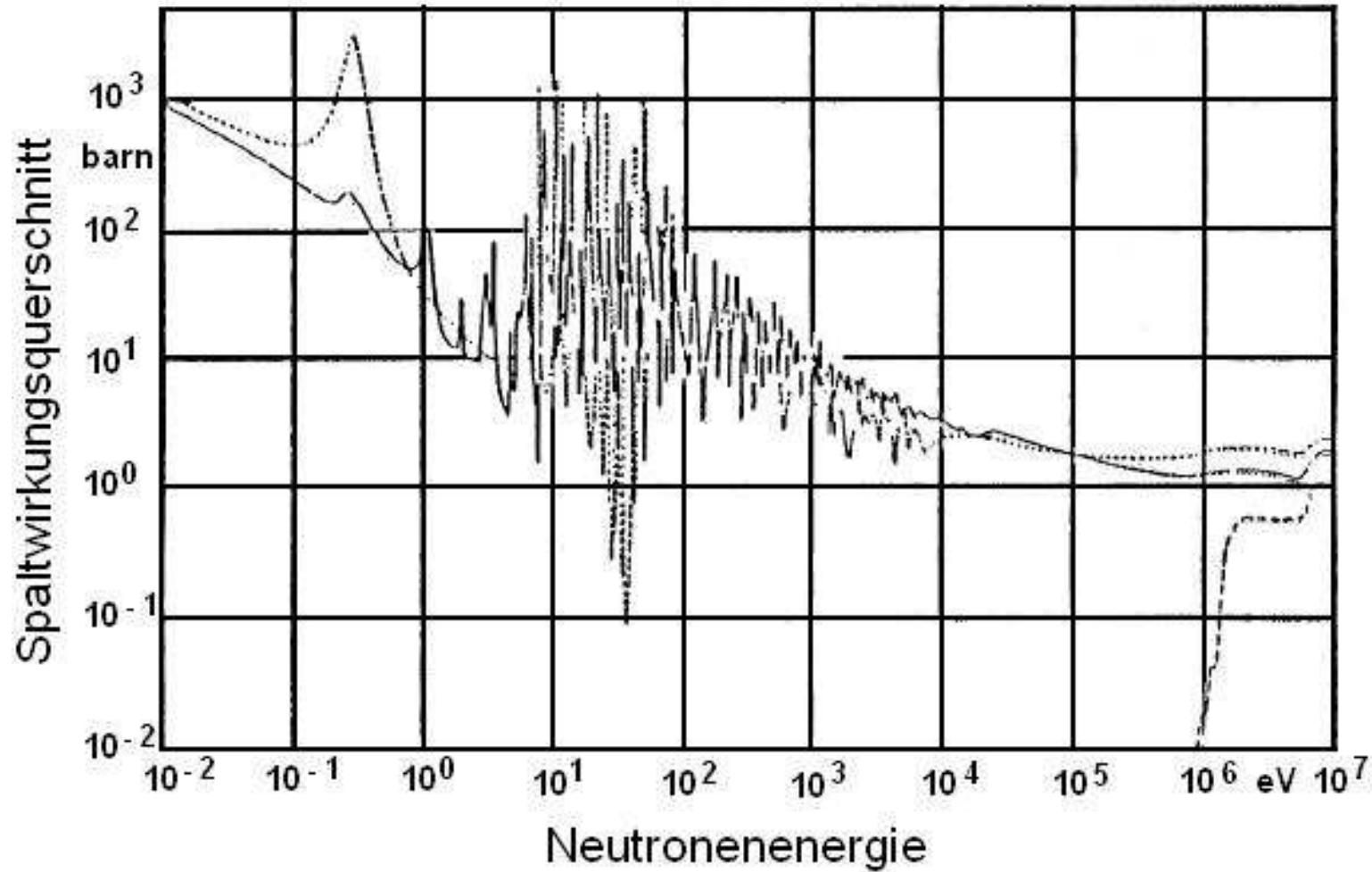
Die Energie eines thermischen Neutrons (Definition):

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

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

U – 235 (_____),
U – 238 (- - - - -) und
Pu – 239 (- - - - .)

Die leicht und schwer spaltbaren Isotopen

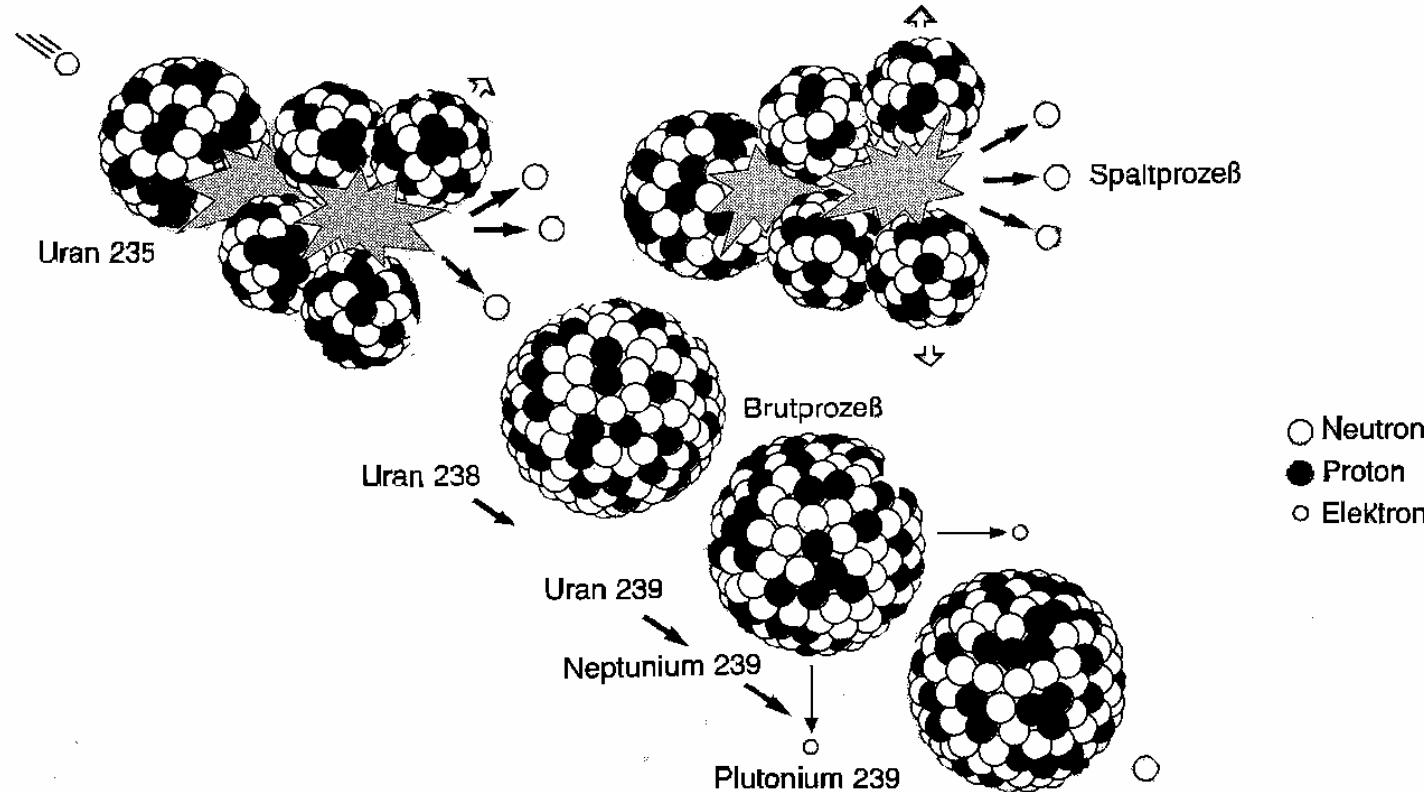
❖ leicht spaltbare Isotopen:

- 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

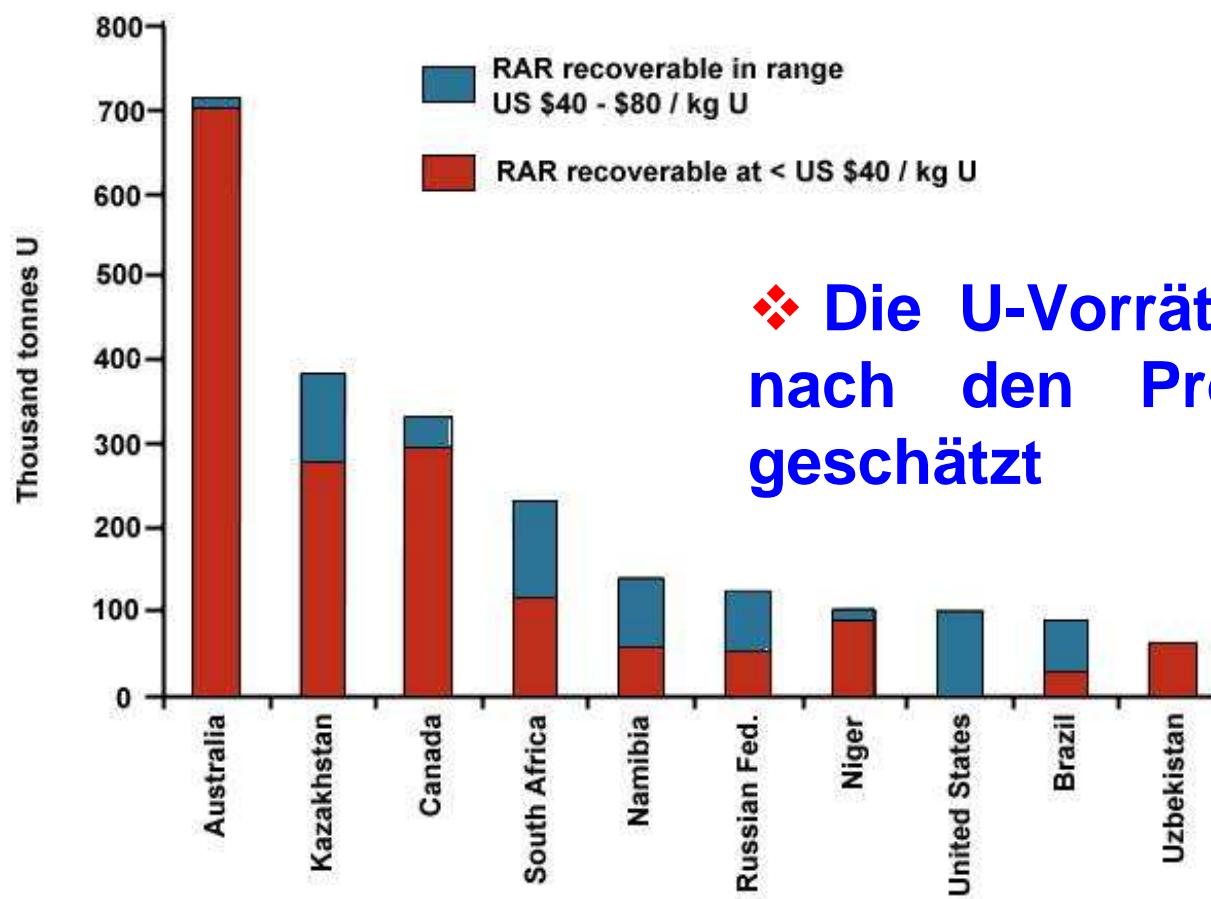
Brutprozess



- ❖ 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

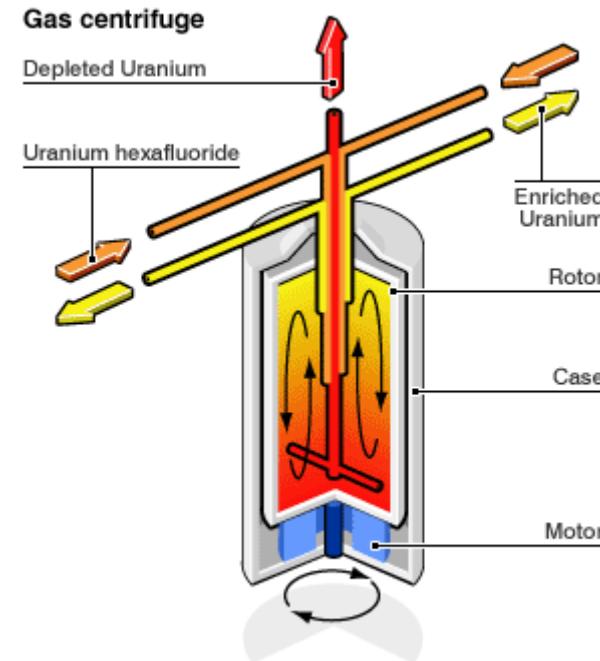
Kernbrennstoff

- ❖ 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



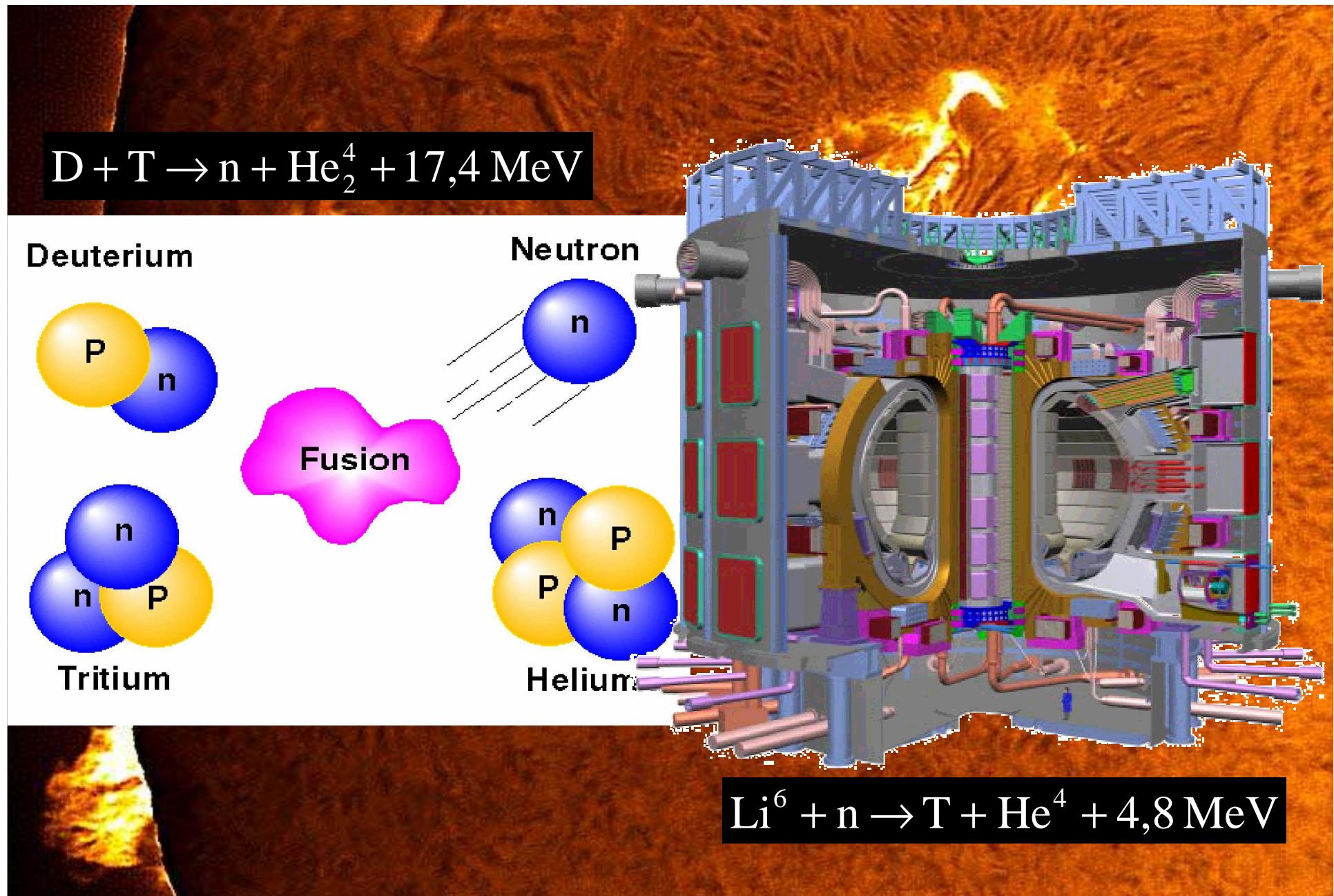
Kernbrennstoff

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

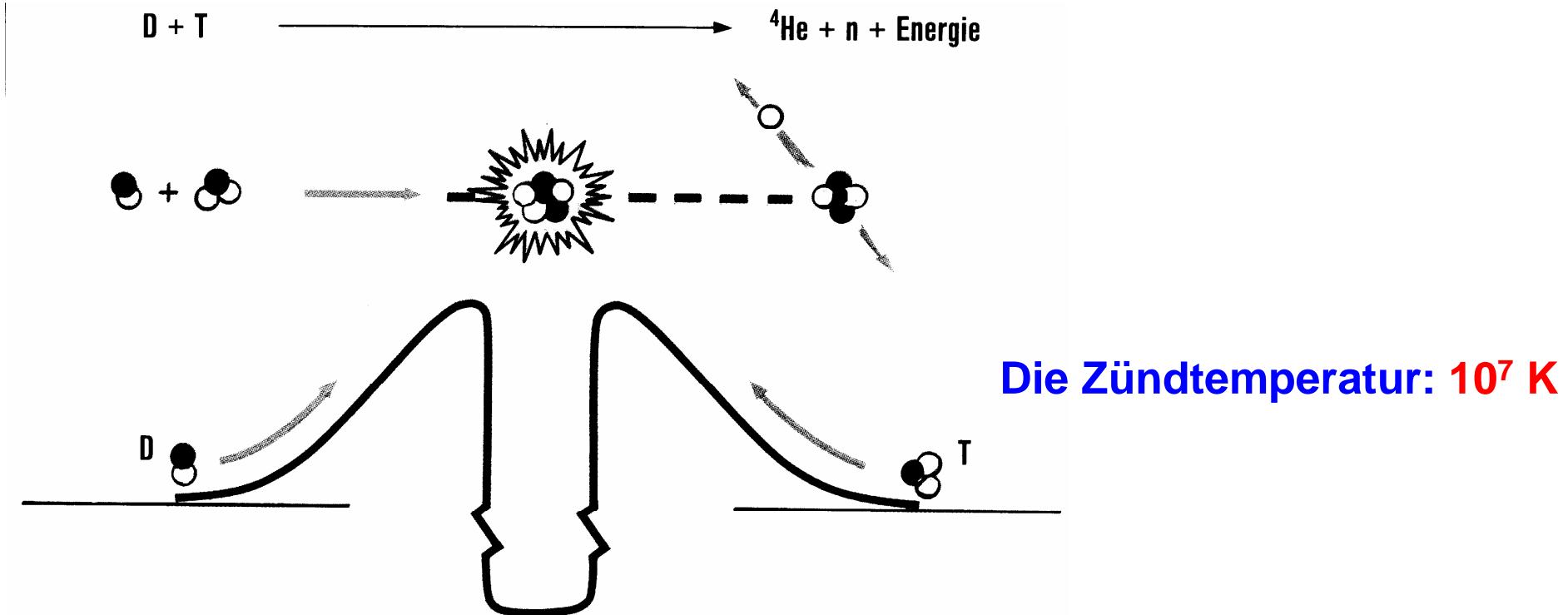


- ❖ Die meisten Leistungsreaktoren verwenden einen Brennstoff, bei dem der U-235-Gehalt auf meist mehr als 3 % angereichert ist
- ❖ Heutige Reaktoren verwenden das Dioxid, UO_2 , das in Form von keramischen Tabletten eingesetzt wird

Kernverschmelzung - Fusion



Kernverschmelzung - Fusion



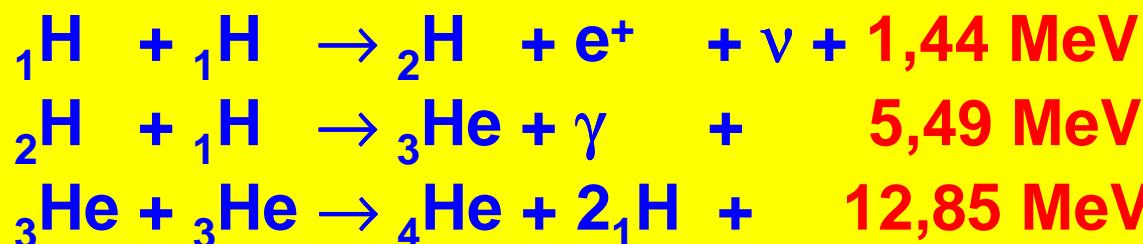
Der Gesamtprozess:



- ❖ 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):



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

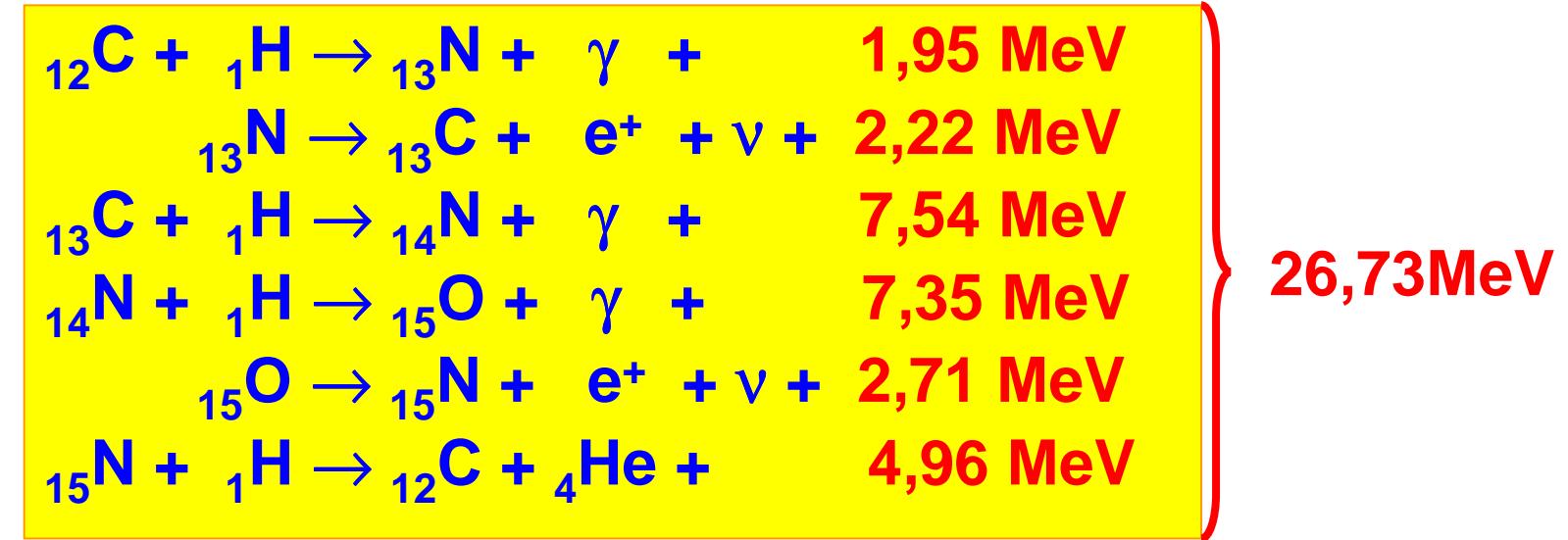
A = Massenzahl: A = 2 → Deuterium,
A = 3 → Tritium;

He = Helium;

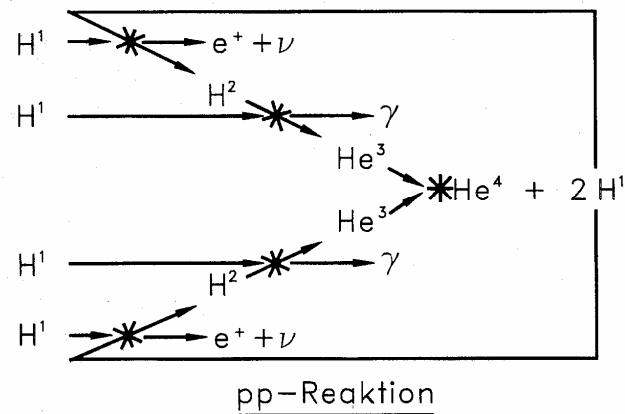
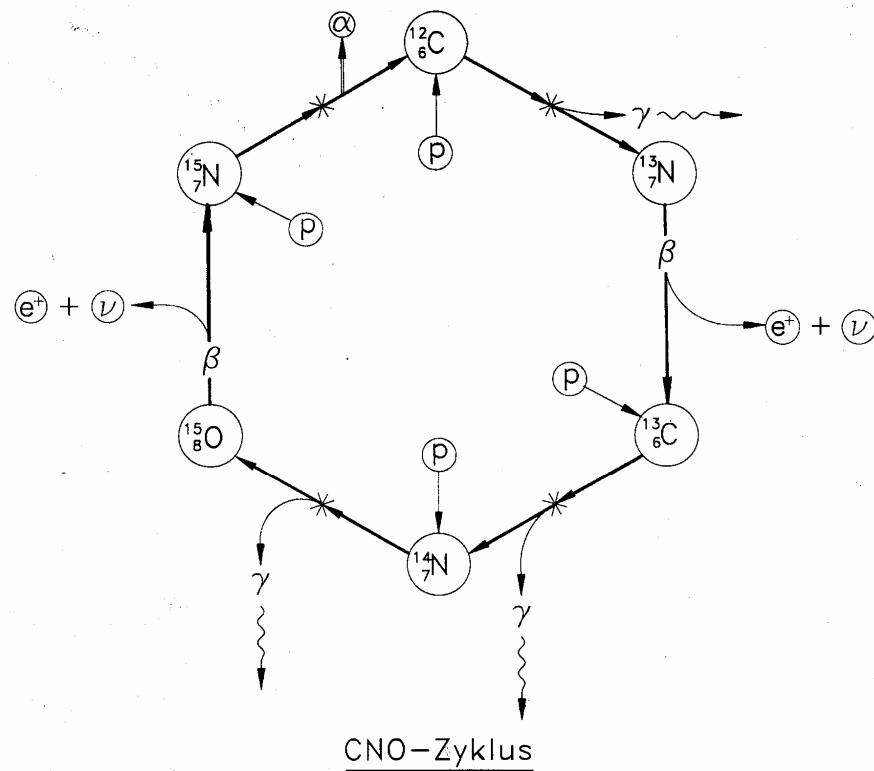
γ = Gammastrahlung;

ν = Neutrino bzw. Antineutrino;

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



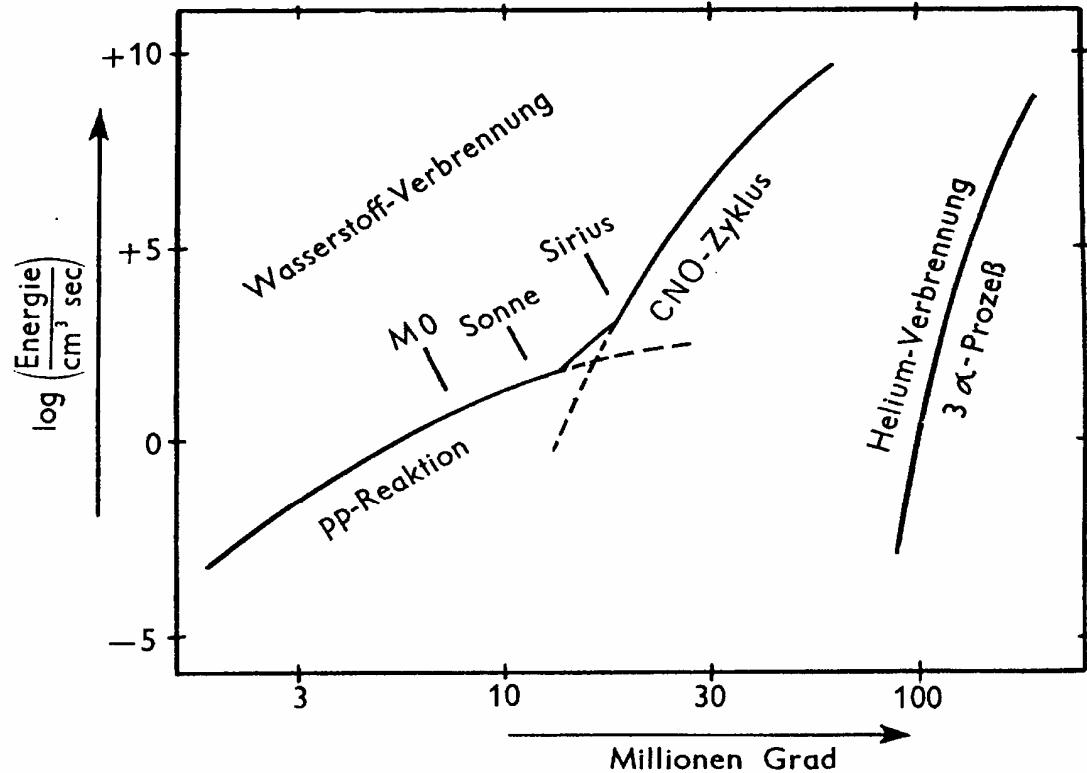
- e^+ = Positron;
 C = Kohlenstoff;
 O = Sauerstoff;
 N = Stickstoff



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 3α -Prozesses ist extrem stark



- das Alter von der Sonne ≈ 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 $\approx 10^7$ 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)
 $R = \text{Radius} / D = \text{Dicke der Schicht}$

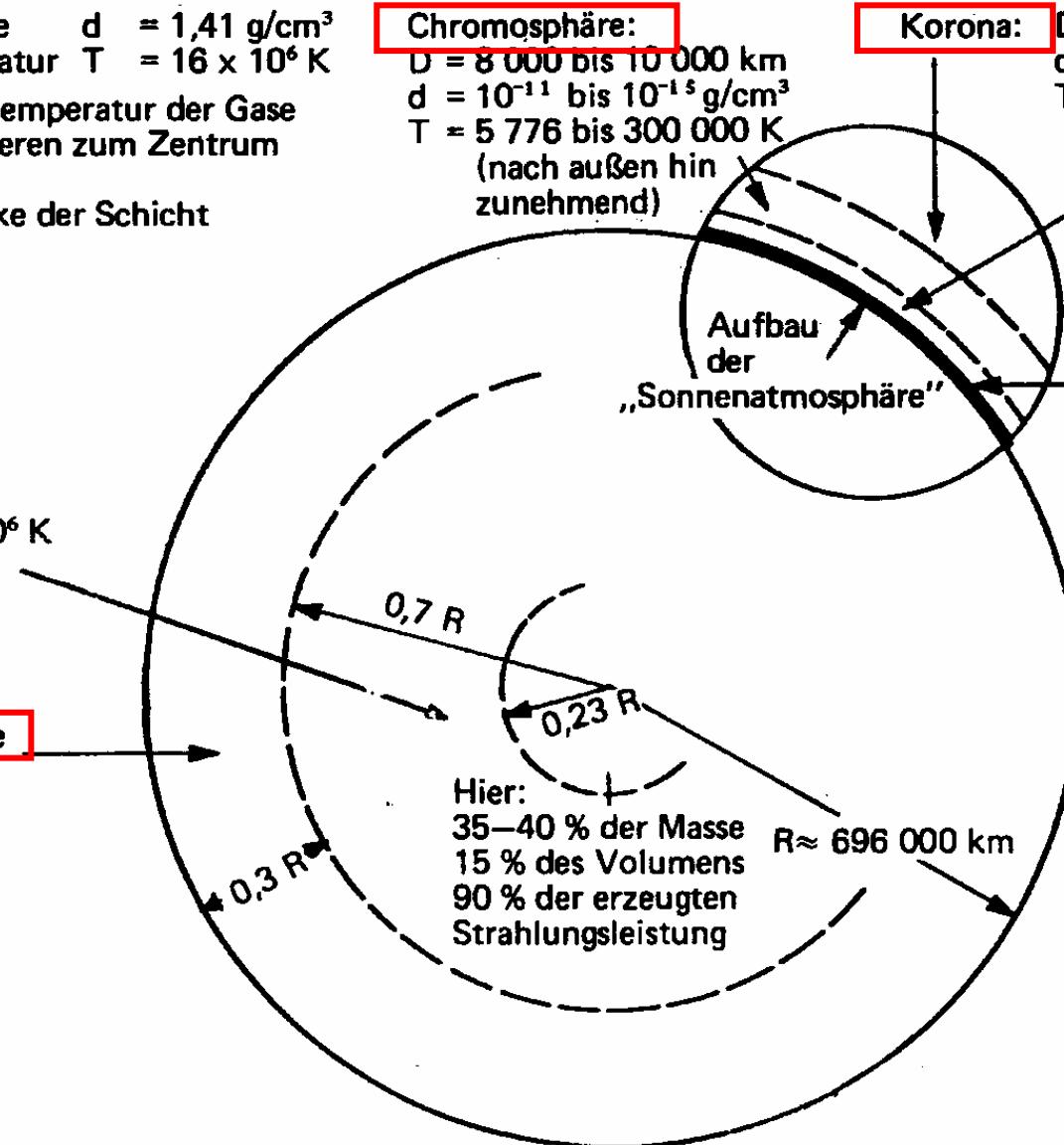
Sonneninneres
 $d = 100 \text{ g/cm}^3$
 $T = 8 \text{ bis } 40 \times 10^6 \text{ K}$

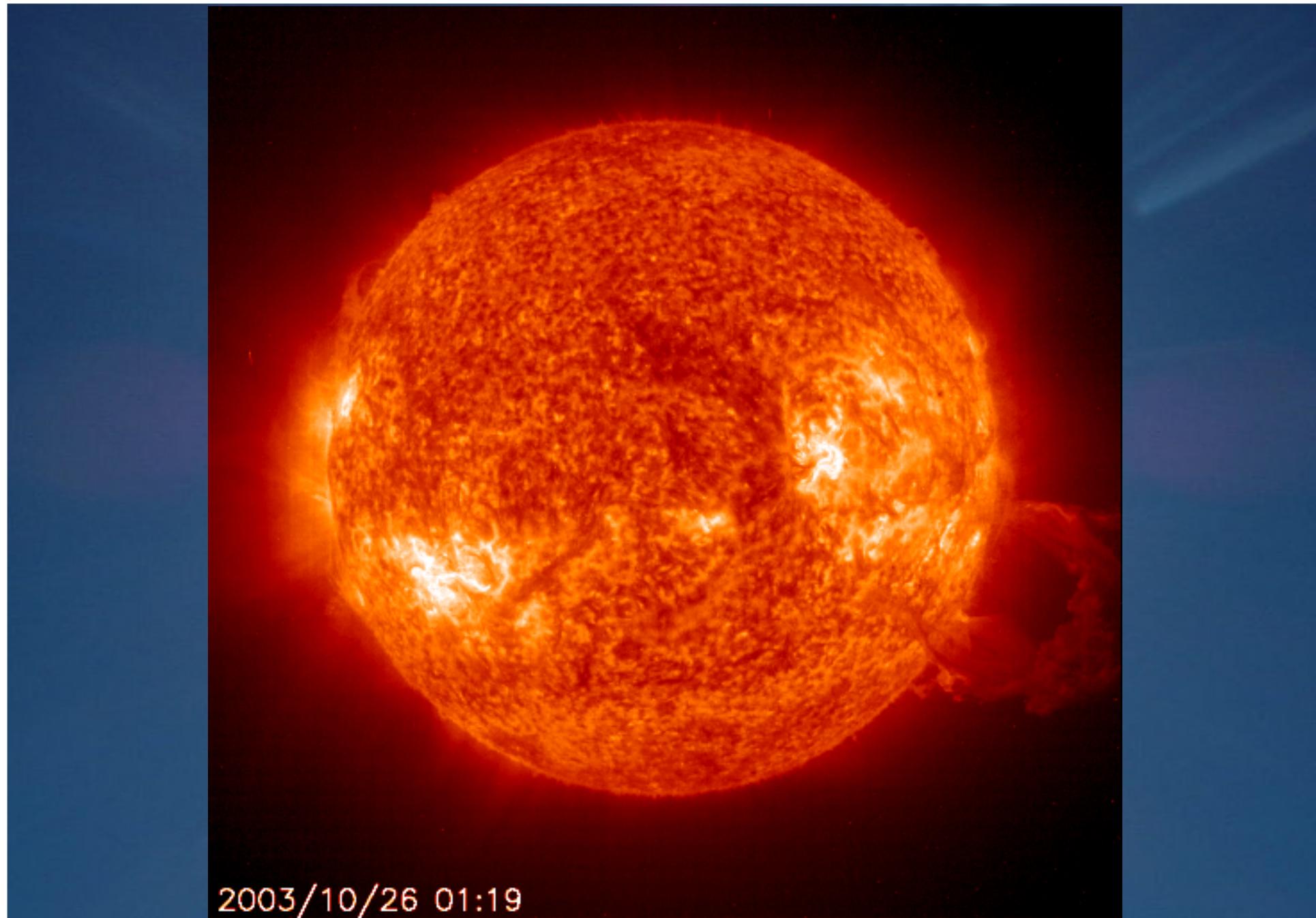
Wasserstoff-Konvektionszone
 $d = 0,07 \text{ g/cm}^3$
 $T = 130\,000 \text{ K}$

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“)





2003/10/26 01:19

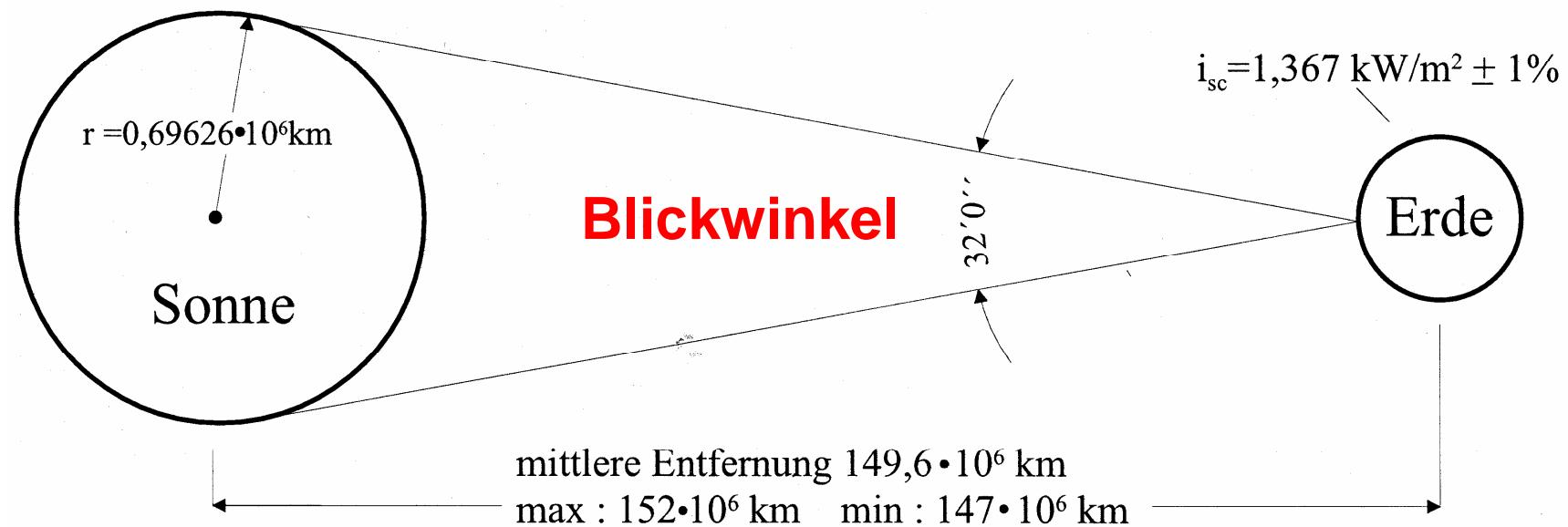
GRUNDLAGEN der ENERGIETECHNIK

ENERGIEFORMEN und ENERGIEQUELLEN

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: $i_{sc} = 1,367 \text{ kW/m}^2 \pm 1\%$

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: $R_S = 0,696 \cdot 10^6 \text{ Km}$

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



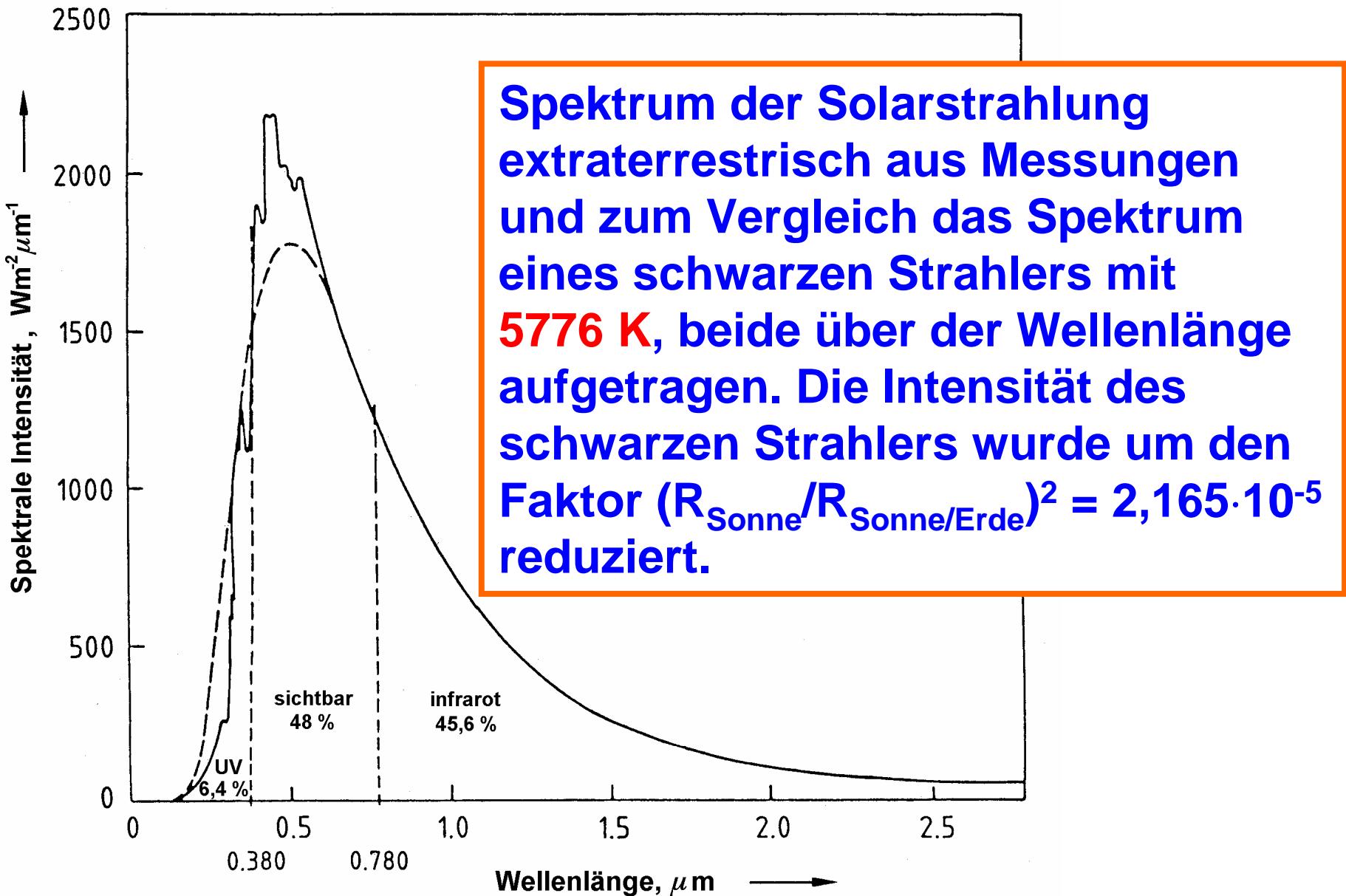
die Strahlungsdichte an der Sonnenoberfläche: $i_{Sonne} = 63,11 \text{ MW/m}^2$

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

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

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

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



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 Meereströmungen, Meereswellen)
 - kinetische Energie von Wind,
 - Biomasse,
 - Umweltenthalpie als Wärmequelle für Wärmepumpen,
 - Temperaturdifferenz zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser