



Diese Veranstaltung wird aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

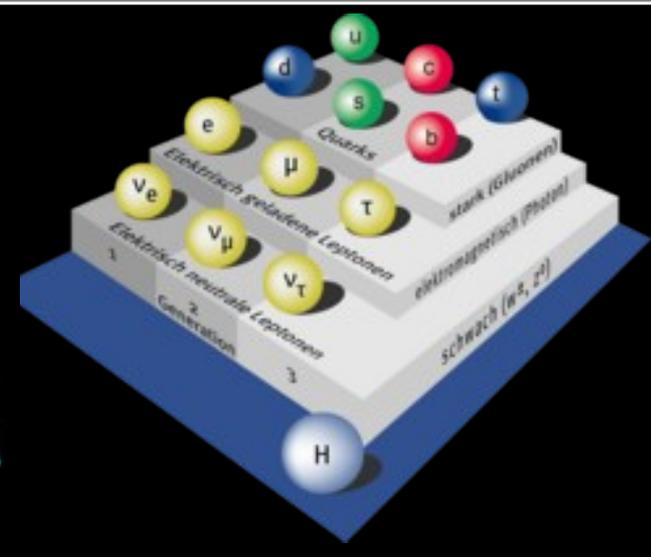
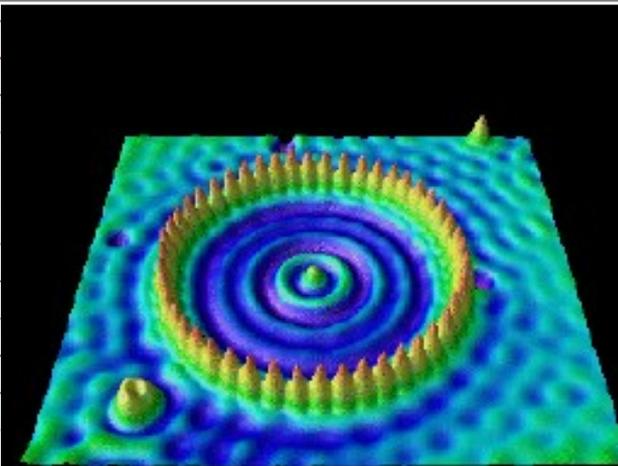
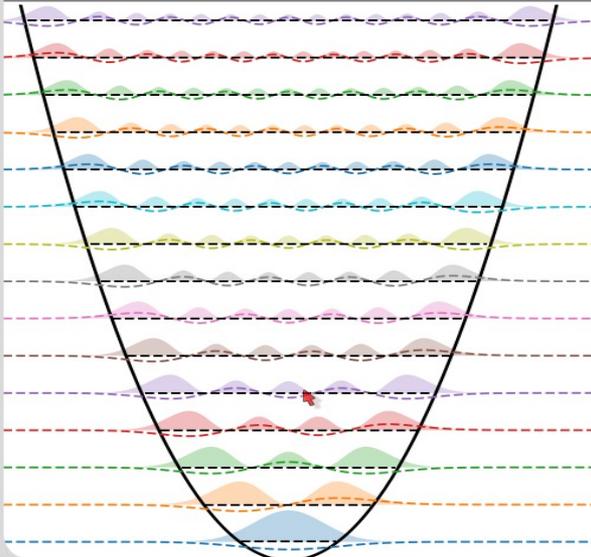
Vorlesung **Moderne Physik (L)**

Energiegewinnung und Sternentwicklung

Günter Quast

Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

SS '20



Schriftliche Modulprüfung:

- Termin: Mittwoch, 05.08.2020, 9 Uhr,
Physikhochhaus, Seminarräume 3.1 und 6.1
- Bearbeitungsdauer: 2 Stunden
Hilfsmittel: Stift, Taschenrechner (nicht programmierbar)
- Voraussetzung: bestandene Vorleistung
- Ergebnisse: vorläufige Veröffentlichung im Campussystem
- Einsichtnahme: Mo. 10.08.2020, 14:00–15:30 Uhr,
Physikhochhaus, Raum 9-1

Mündliche Prüfung

1. Block: 12. - 14. August

2. Block: 1. - 3. September

- Voraussetzung: bestandene Vorleistung, Anmeldung im Campussystem

Weitere Prüfungstermine Anfang Oktober

Terminvereinbarung via E-Mail an Guenter.Quast@kit.edu

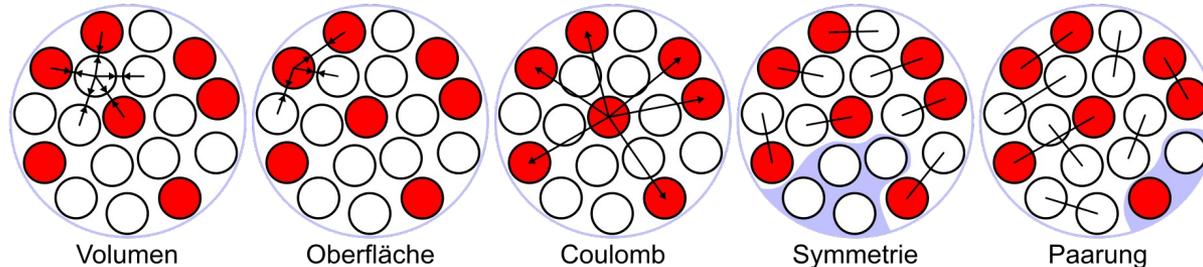
Hauptseminar für Lehramt:

s. Ankündigung im Vorlesungsverzeichnis und

Webseite <http://www.physik.kit.edu/Studium/Lehramt/>

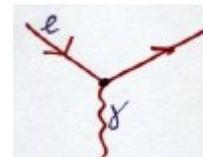
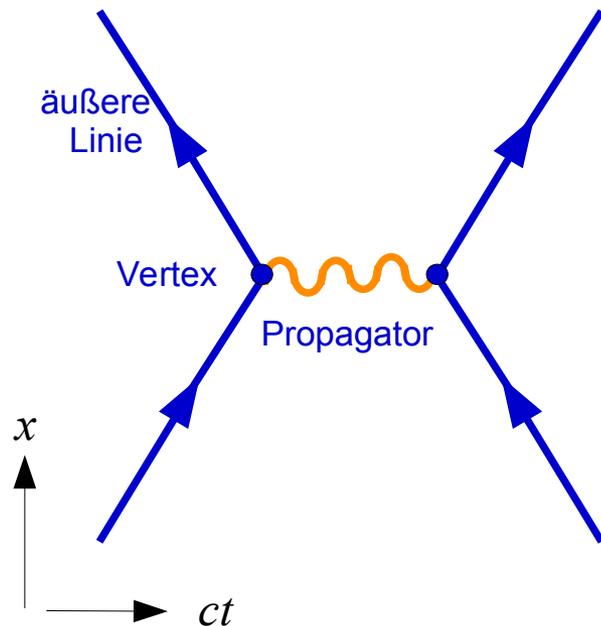
- „Tröpfchenmodell“ zur Beschreibung der Bindungsenergie / Nukleon

$$E_b = a_V \cdot A + a_O \cdot A^{2/3} - a_C \cdot \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_A \cdot \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + a_P \cdot A^{1/2} \cdot \begin{cases} +1 & \text{gg} \\ 0 & \text{gu/ug} \\ -1 & \text{uu} \end{cases}$$

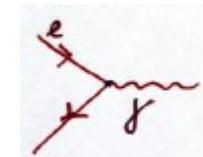


- Kräfte werden durch Austauscheteilchen vermittelt;
 - elektromagnetische Wechselwirkung: Photon
 - starke Kernkraft: geladene und neutrale π -Mesonen
Reichweite $\sim 10^{-15}\text{m}$
 - schwache Kernkraft: W^\pm -Bosonen
Reichweite $\sim 10^{-18}\text{m}$
- Kernkräfte haben sehr kurze Reichweite, erklärt durch Masse der Austauscheteilchen: $R = c\Delta t = \frac{c\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{mc}$

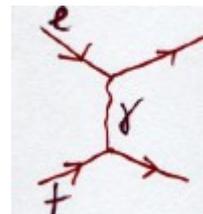
- Feynman-Diagramme zur Darstellung (und Berechnung) von Wechselwirkungen durch Austausch einzelner Teilchen
 - Äußere Linien laufen in die Wechselwirkungspunkte („Vertizes“) ein und entsprechen ebenen Wellen;
 - an den Wechselwirkungspunkten findet die Kopplung an eine innere Linie statt, die ein „virtuelles Austauschteilchen“ darstellt (sog. „Propagatoren“).
 - geladene Teilchen kennzeichnet man durch Pfeile, die den Ladungsfluss des Teilchens angeben (bei Anti-Teilchen also entgegen der Flugrichtung!); neutrale Teilchen haben keine Pfeile.



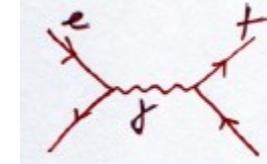
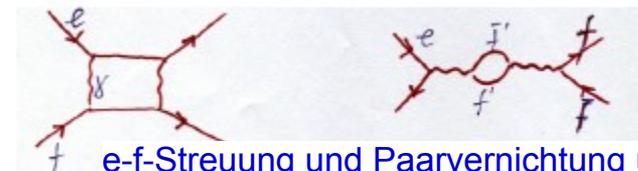
Photonabstrahlung



Paarvernichtung



Elektron-Streuung

Erzeugung eines Fermion-Paares aus e^+e^- 

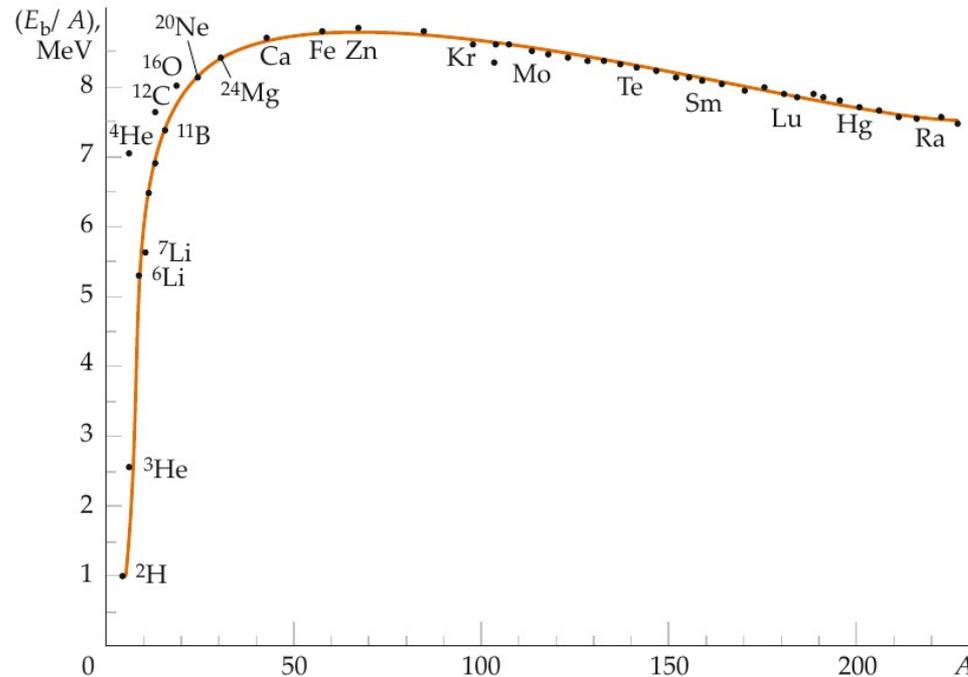
e-f-Streuung und Paarvernichtung und -Erzeugung in „höherer Ordnung“

Inhaltsübersicht VL Moderne Physik

- 1) Einführung
- 2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
- 3) Spezielle Relativitätstheorie
- 4) Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik
- 5) Die Schrödingergleichung
- 6) Anwendungen der Schrödingergleichung
- 7) Das Wasserstoff-Atom
- 8) Atome mit mehreren Elektronen
- 9) Wechselwirkung von Licht und Materie
- 10) Grundlagen der Festkörperphysik
- 11) **Kernphysik**
- 12) Teilchenphysik
- 13) Astrophysik und Kosmologie

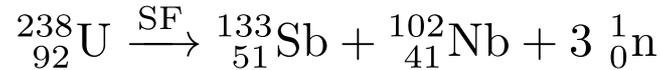
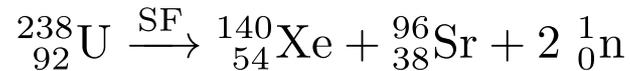
Ausgangspunkt: Bethe-Weizsäcker-Formel für die Bindungsenergie

$$E_b = a_V \cdot A + a_O \cdot A^2 - a_C \cdot \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_A \cdot \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + a_P \cdot A^{1/2} \cdot \begin{cases} +1 & \text{gg} \\ 0 & \text{gu/ug} \\ -1 & \text{uu} \end{cases}$$



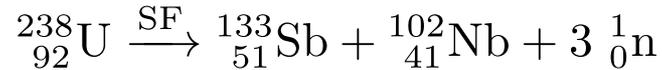
- Schwere Kerne haben eine geringere Bindungsenergie/Nukleon als leichte
→ **Energiegewinn durch Spaltung**
- sehr leichte Kerne haben eine geringere Bindungsenergie/Nukleon als schwerere
→ **Energiegewinn durch Fusion**

- sehr schwere Kerne spalten spontan (d.h. ohne Anregung von außen):



da der schwere Kern gegenüber den leichten Fragmenten einen Neutron-Überschuss hat, entstehen zusätzlich ungebundene Neutronen

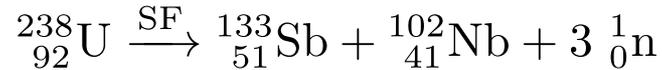
- sehr schwere Kerne spalten spontan (d.h. ohne Anregung von außen):



da der schwere Kern gegenüber den leichten Fragmenten einen Neutron-Überschuss hat, entstehen zusätzlich ungebundene Neutronen

- bei der Neutron-induzierten Spaltung werden Kerne zu Schwingungen angeregt, woraufhin der Kern in leichtere Fragmente zerfällt.

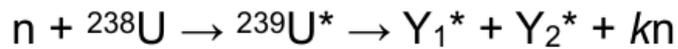
- sehr schwere Kerne spalten spontan (d.h. ohne Anregung von außen):



da der schwere Kern gegenüber den leichten Fragmenten einen Neutron-Überschuss hat, entstehen zusätzlich ungebundene Neutronen

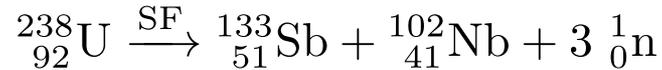
- bei der Neutron-induzierten Spaltung werden Kerne zu Schwingungen angeregt, woraufhin der Kern in leichtere Fragmente zerfällt.

Hahn, Meitner, Straßmann (1938):



nur **schnelle** Neutronen ($E > 1 \text{ MeV}$)

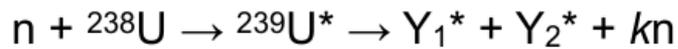
- sehr schwere Kerne spalten spontan (d.h. ohne Anregung von außen):



da der schwere Kern gegenüber den leichten Fragmenten einen Neutron-Überschuss hat, entstehen zusätzlich ungebundene Neutronen

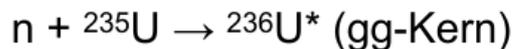
- bei der Neutron-induzierten Spaltung werden Kerne zu Schwingungen angeregt, woraufhin der Kern in leichtere Fragmente zerfällt.

Hahn, Meitner, Straßmann (1938):



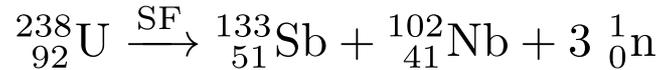
nur **schnelle** Neutronen ($E > 1 \text{ MeV}$)

Selteneres Isotop ${}^{235}\text{U}$:



auch mit **langsamen** Neutronen,
viel höherer Wirkungsquerschnitt

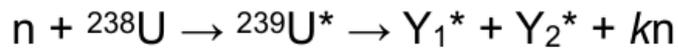
- sehr schwere Kerne spalten spontan (d.h. ohne Anregung von außen):



da der schwere Kern gegenüber den leichten Fragmenten einen Neutron-Überschuss hat, entstehen zusätzlich ungebundene Neutronen

- bei der Neutron-induzierten Spaltung werden Kerne zu Schwingungen angeregt, woraufhin der Kern in leichtere Fragmente zerfällt.

Hahn, Meitner, Straßmann (1938):



nur **schnelle** Neutronen ($E > 1 \text{ MeV}$)

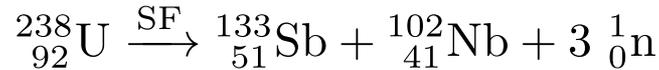
Selteneres Isotop ${}_{92}^{235}\text{U}$:



auch mit **langsamen** Neutronen,
viel höherer Wirkungsquerschnitt



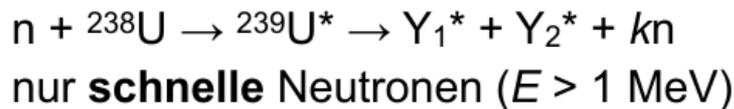
- sehr schwere Kerne spalten spontan (d.h. ohne Anregung von außen):



da der schwere Kern gegenüber den leichten Fragmenten einen Neutron-Überschuss hat, entstehen zusätzlich ungebundene Neutronen

- bei der Neutron-induzierten Spaltung werden Kerne zu Schwingungen angeregt, woraufhin der Kern in leichtere Fragmente zerfällt.

Hahn, Meitner, Straßmann (1938):



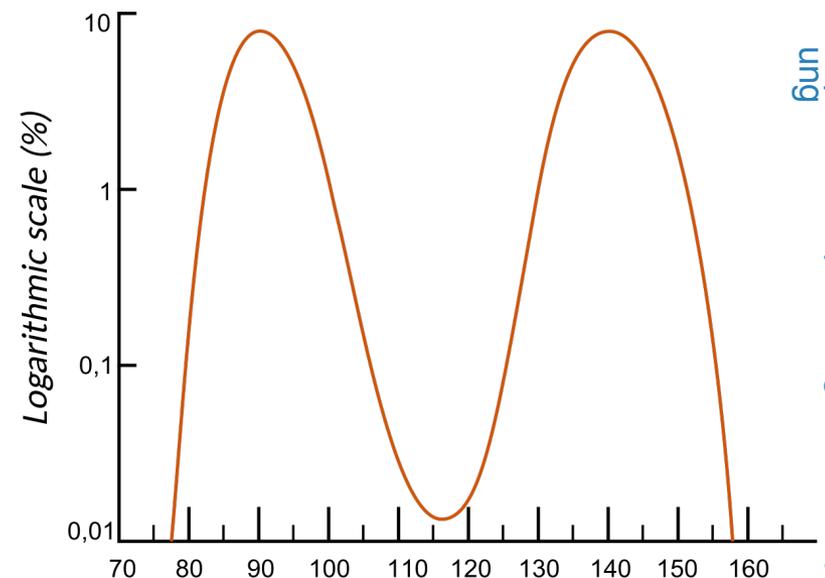
Selteneres Isotop ${}_{92}^{235}\text{U}$:



auch mit **langsamen** Neutronen,
viel höherer Wirkungsquerschnitt



- Massenzahlen der Spaltfragmente sind asymmetrisch.



Distribution of Uranium-235 fission products (A)



Mittlere Bindungsenergie ${}^{236}\text{U}$: 7.7 MeV

Bindungsenergie: $236 \cdot 7.7 \text{ MeV} = 1817 \text{ MeV}$

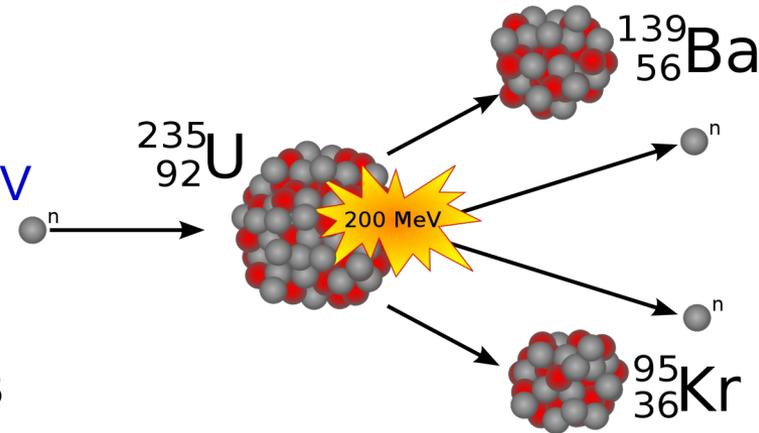
Annahme:

Zerfall in zwei gleich große Bruchstücke mit $A=118$

Mittlere Bindungsenergie für $A=118$: 8.8 MeV

Bindungsenergie $118 \cdot 8.8 \text{ MeV} = 1015 \text{ MeV}$

Energiegewinn: $(2 \cdot 1015 - 1817) \text{ MeV} = 213 \text{ MeV}$





Mittlere Bindungsenergie ${}^{236}\text{U}$: 7.7 MeV

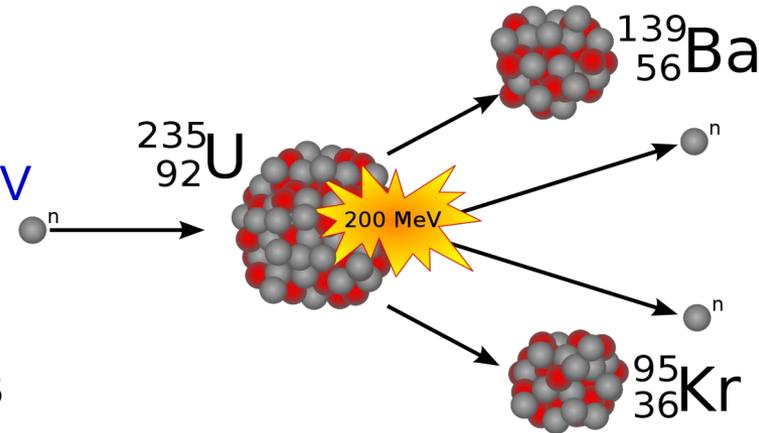
Bindungsenergie: $236 \cdot 7.7 \text{ MeV} = 1817 \text{ MeV}$

Annahme:

Zerfall in zwei gleich große Bruchstücke mit $A=118$

Mittlere Bindungsenergie für $A=118$: 8.8 MeV

Bindungsenergie $118 \cdot 8.8 \text{ MeV} = 1015 \text{ MeV}$



Energiegewinn: $(2 \cdot 1015 - 1817) \text{ MeV} = 213 \text{ MeV}$

Diese Energie ist die kinetische Energie der auseinanderfliegenden Bruchstücke, die sie als thermische Energie an das umgebende Medium abgeben.



Mittlere Bindungsenergie ${}^{236}\text{U}$: 7.7 MeV

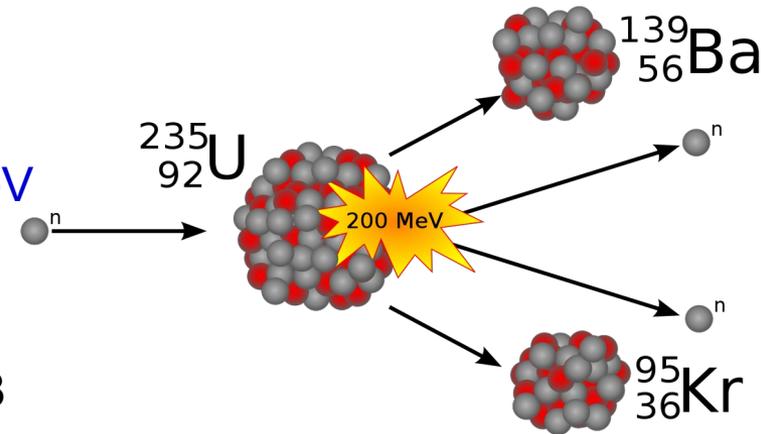
Bindungsenergie: $236 \cdot 7.7 \text{ MeV} = 1817 \text{ MeV}$

Annahme:

Zerfall in zwei gleich große Bruchstücke mit $A=118$

Mittlere Bindungsenergie für $A=118$: 8.8 MeV

Bindungsenergie $118 \cdot 8.8 \text{ MeV} = 1015 \text{ MeV}$



Energiegewinn: $(2 \cdot 1015 - 1817) \text{ MeV} = 213 \text{ MeV}$

Diese Energie ist die kinetische Energie der auseinanderfliegenden Bruchstücke, die sie als thermische Energie an das umgebende Medium abgeben.

Durch **Abbremsen der Neutronen** in einem sog. **Moderator** (= Material mit gleich schweren Partnern, z.B. Protonen in Wasser) werden langsame Neutronen erzeugt, die einen höheren Wirkungsquerschnitt für induzierte Spaltung haben
→ **durch Moderatormaterial steuerbare Kettenreaktion möglich**

Vermehrungsfaktor k : Zahl der Neutronen / Spaltung

Maximum bei ^{235}U : $k=2.5$

$k < 1$: Reaktion kommt zu Erliegen

$k = 1$: Reaktion ist selbsterhaltend

$k > 1$: Reaktionsrate steigt dramatisch an (→ Bombe)

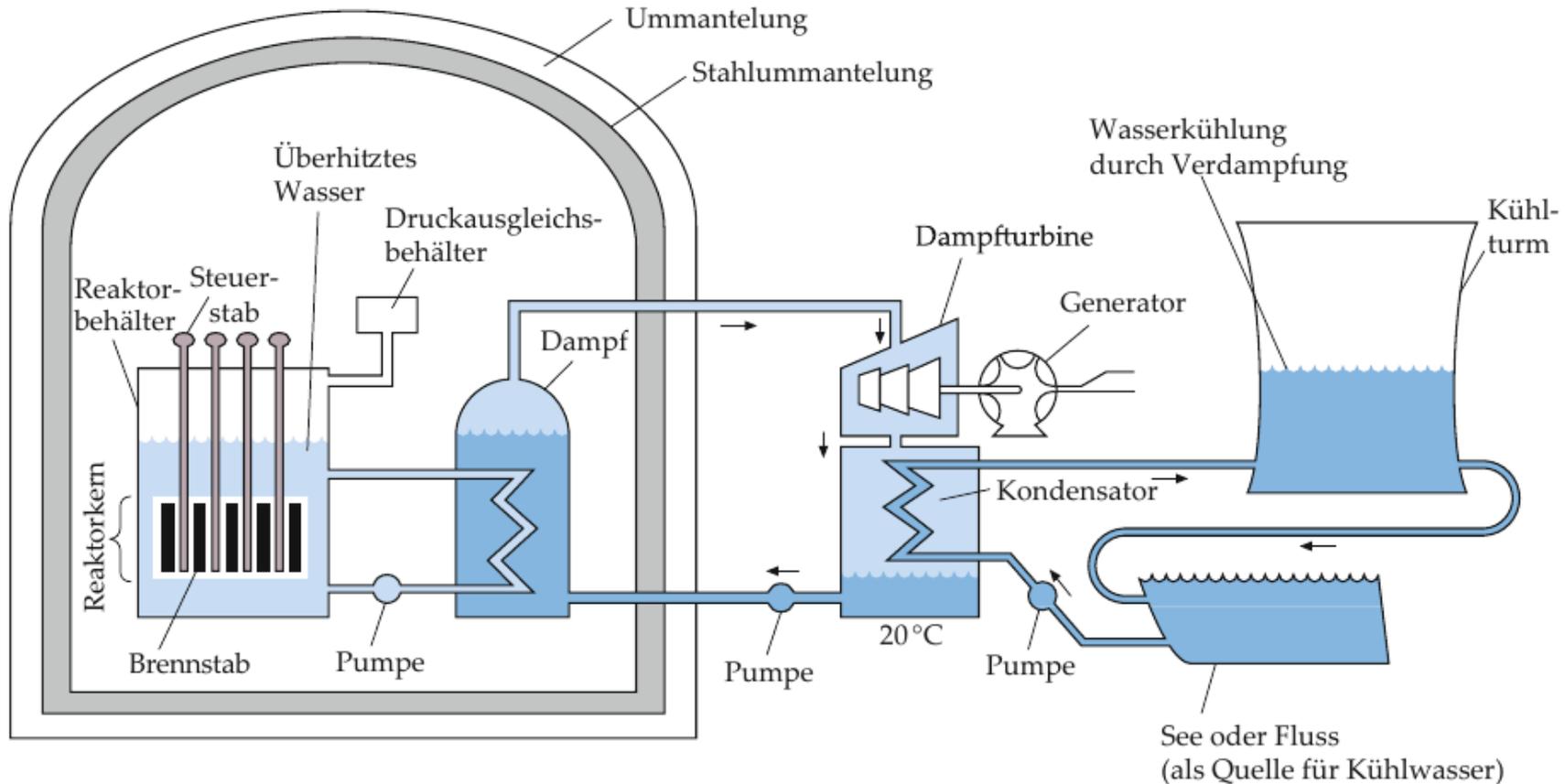
Vermehrungsfaktor k : Zahl der Neutronen / Spaltung

Maximum bei ^{235}U : $k=2.5$

$k < 1$: Reaktion kommt zu Erliegen

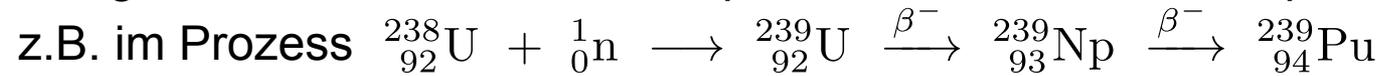
$k = 1$: Reaktion ist selbsterhaltend

$k > 1$: Reaktionsrate steigt dramatisch an (→ Bombe)



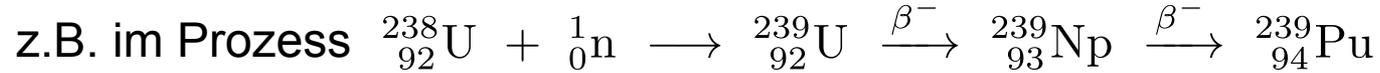
Prinzip eines Kernkraftwerks (Druckwasserreaktor)

In sogenannte „Brütern“ werden spaltbare Kerne aus nicht-spaltbaren erzeugt,



Ein „Brutmantel“ umgibt die aktive Spaltzone, der die schnellen Neutronen absorbiert

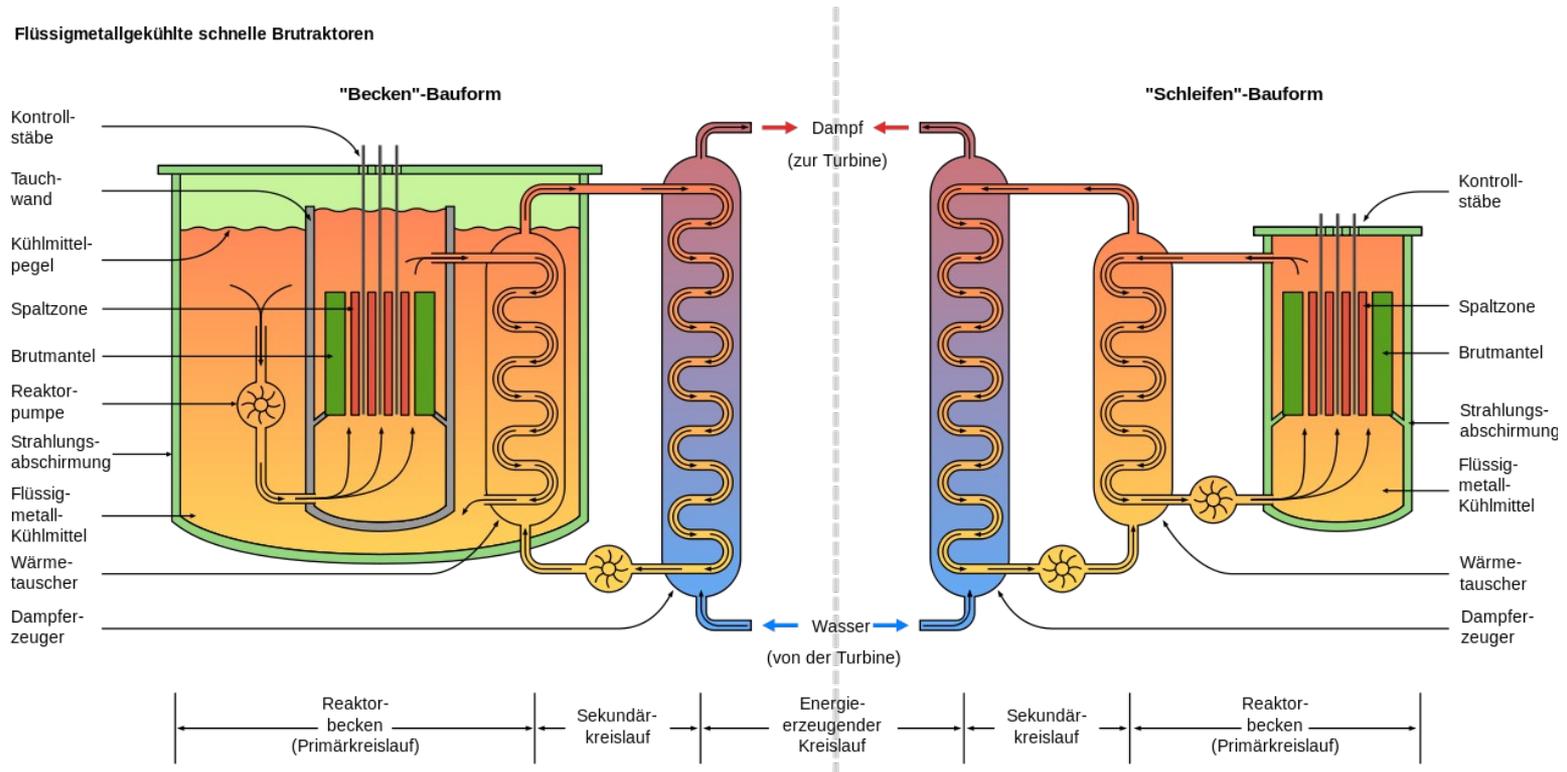
In sogenannte „Brüttern“ werden spaltbare Kerne aus nicht-spaltbaren erzeugt,



Ein „Brutmantel“ umgibt die aktive Spaltzone, der die schnellen Neutronen absorbiert

Problem: Kontrolle der erzeugten Spaltprodukte, sie sind (auch) waffenfähig !

Flüssigmetallgekühlte schnelle Brutreaktoren

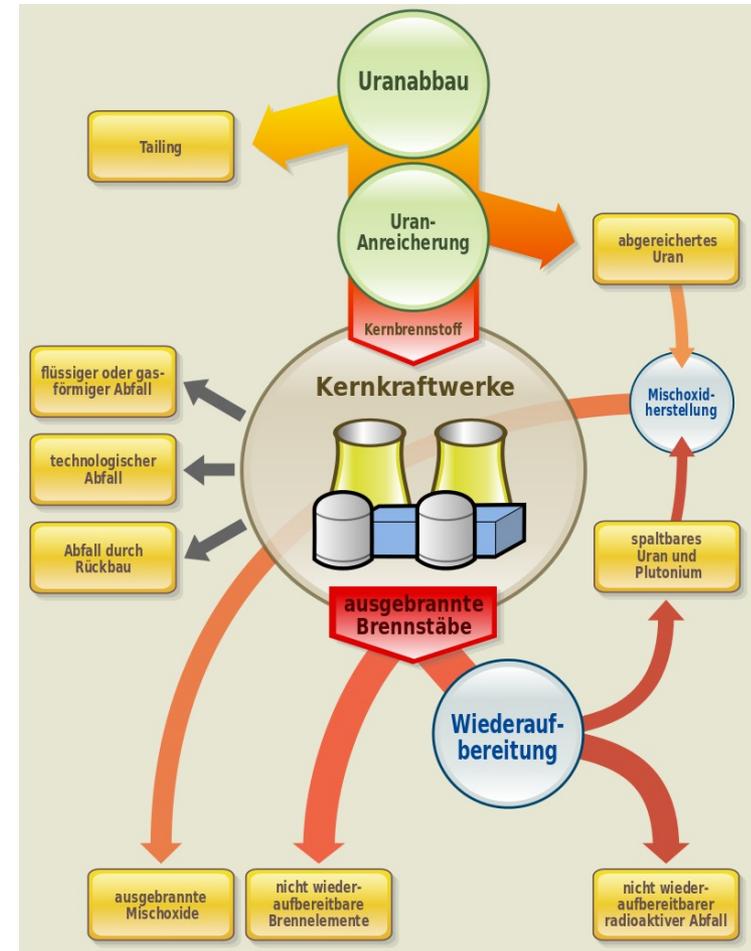


Bei der Kernspaltung entstehenden **Rückstände**
in Form **langlebiger radioaktiver Isotope**

Rückstände müssen zur Rückgewinnung
von spaltbarem Material **aufgearbeitet** und
nicht verwertbare Reste über über **Zehn-**
tausende von Jahren sicher **gelagert** werden.

Bei der Kernspaltung entstehenden **Rückstände**
in Form **langlebiger radioaktiver Isotope**

Rückstände müssen zur Rückgewinnung
von spaltbarem Material **aufgearbeitet** und
nicht verwertbare Reste über über **Zehn-**
tausende von Jahren sicher **gelagert** werden.



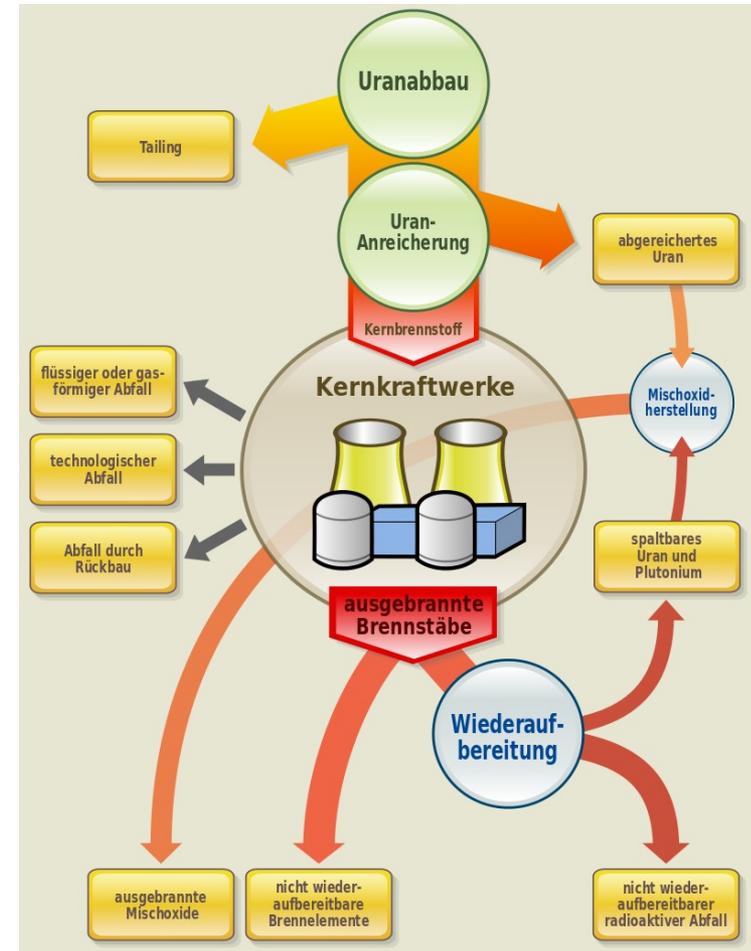
Radioaktive Abfälle der Nuklearindustrie

Bei der Kernspaltung entstehenden **Rückstände**
in Form **langlebiger radioaktiver Isotope**

Rückstände müssen zur Rückgewinnung von spaltbarem Material **aufgearbeitet** und nicht verwertbare Reste über über **Zehntausende von Jahren** sicher **gelagert** werden.

Klassifikation radioaktiver Abfälle:

- **Hochradioaktiv** mit Aktivität $> 10^{14}$ Bq/ m³ :
typisch $(5 -50) 10^{16}$ Bq/m³ und erheblicher
Zerfallswärme (2 bis 20 kW/m³);
- **Mittelradioaktiv** ($10^{10} - 10^{15}$ Bq/m³):
Abschirmungsmaßnahmen ohne Kühlung;
- **Schwachradioaktiv** ($<10^{11}$ Bq/m³): keine
Abschirmung bei Transport oder Handhabung

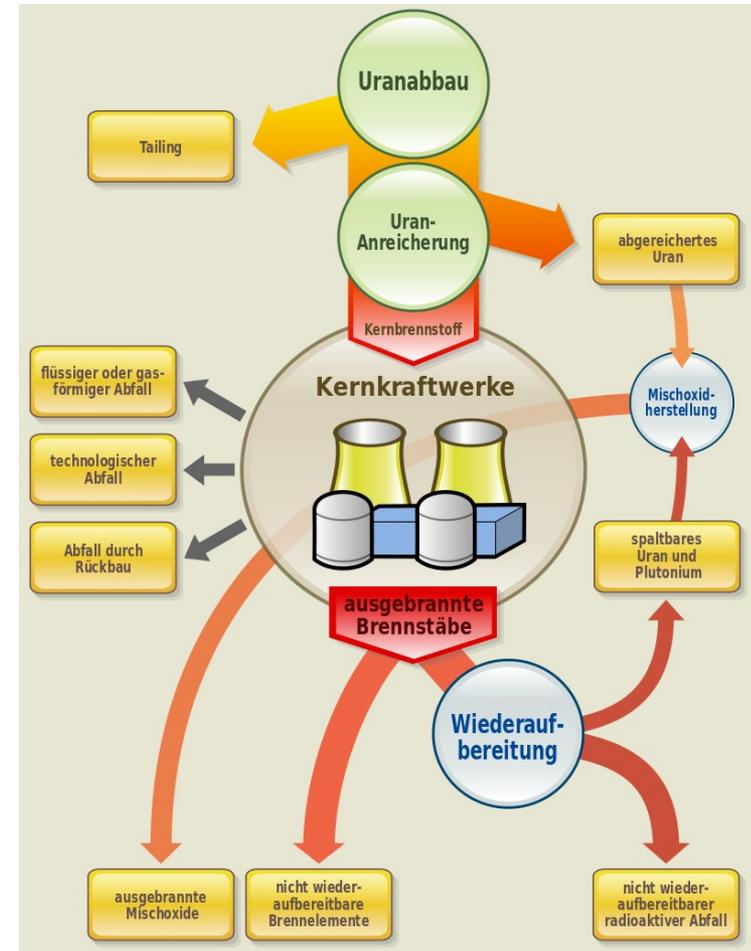


Bei der Kernspaltung entstehenden **Rückstände**
in Form **langlebiger radioaktiver Isotope**

Rückstände müssen zur Rückgewinnung von spaltbarem Material **aufgearbeitet** und nicht verwertbare Reste über über **Zehntausende von Jahren** sicher **gelagert** werden.

Klassifikation radioaktiver Abfälle:

- **Hochradioaktiv** mit Aktivität $> 10^{14}$ Bq/ m³ :
typisch $(5 -50) 10^{16}$ Bq/m³ und erheblicher
Zerfallswärme (2 bis 20 kW/m³);
- **Mittelradioaktiv** ($10^{10} - 10^{15}$ Bq/m³):
Abschirmungsmaßnahmen ohne Kühlung;
- **Schwachradioaktiv** ($<10^{11}$ Bq/m³): keine
Abschirmung bei Transport oder Handhabung



https://de.wikipedia.org/wiki/Radioaktiver_Abfall

Radioaktive Abfälle der Nuklearindustrie

Das ist eine enorme gesellschaftliche und technologische Aufgabe !

Vorgeschlagen 1996 von C. Rubbia:
Einsatz eines hochintensiven
Teilchenbeschleunigers
zur kontrollierten Kernspaltung.

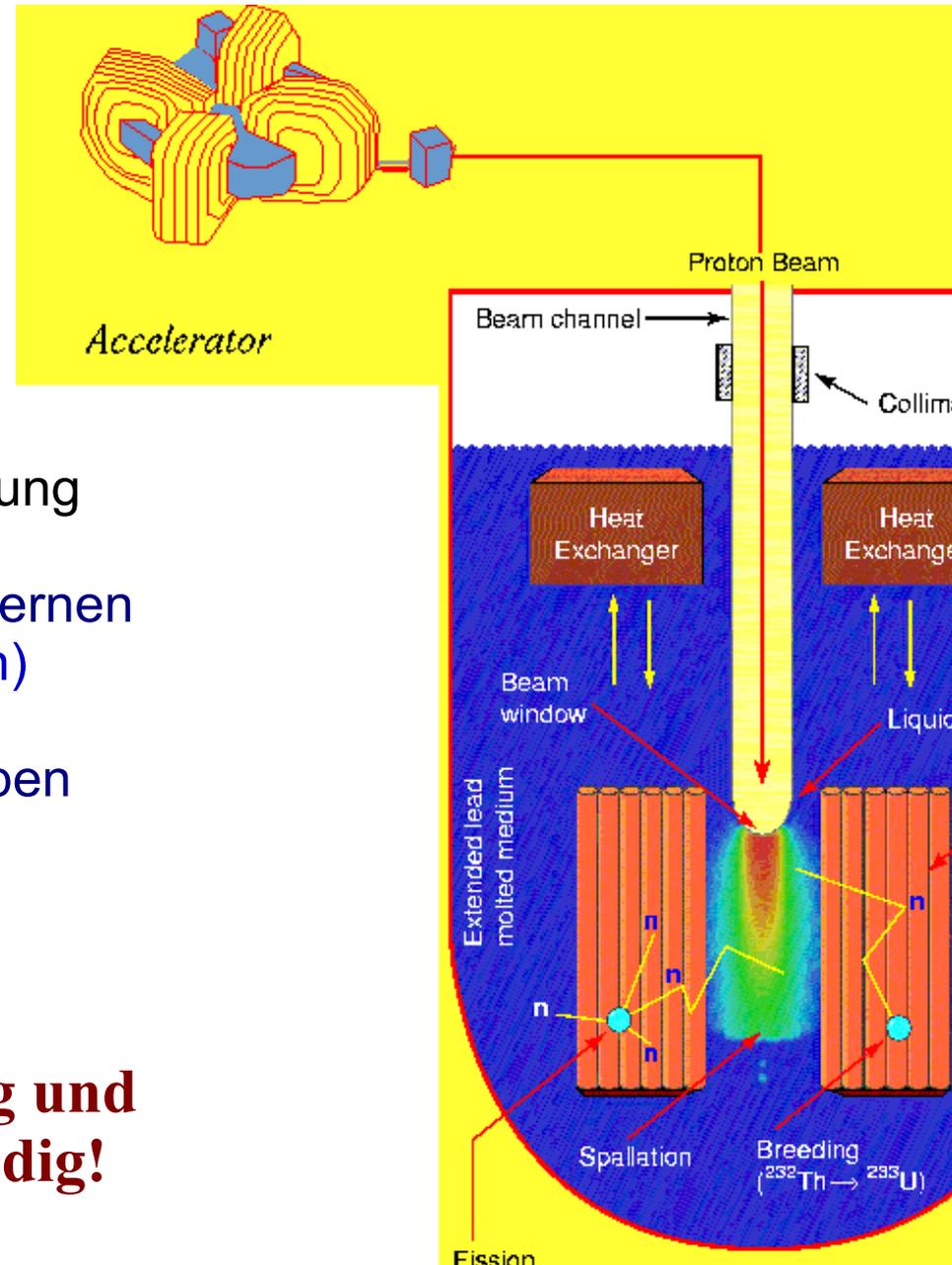
Externe Neutronenquelle durch
intensiven Teilchenstrahl, d.h. **keine**
unkontrollierte, selbsterhaltende Spaltung

Energieproduktion aus schweren Kernen
(Thorium) (d.h Alternativen zum Uran)

oder

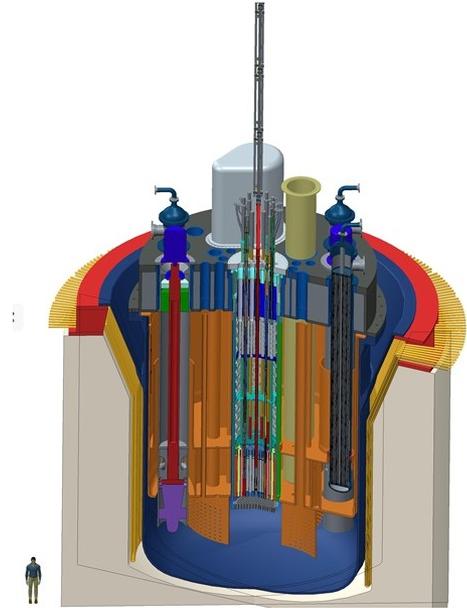
Umwandlung von langlebigen Isotopen
in kurzlebige
(verspricht kürzere Lagerzeiten von
Nuklear-Abfällen)

**Viel technologische Entwicklung und
Aufbau von Prototypen notwendig!**



Weltweit erster Prototyp eines durch einen Teilchenstrahl getriebenen Nuklearreaktors in Mol / Belgien

- Reaktor ist unterkritisch
- Fluss schneller Neutronen durch Teilchenbeschleuniger erzeugt und kontrolliert

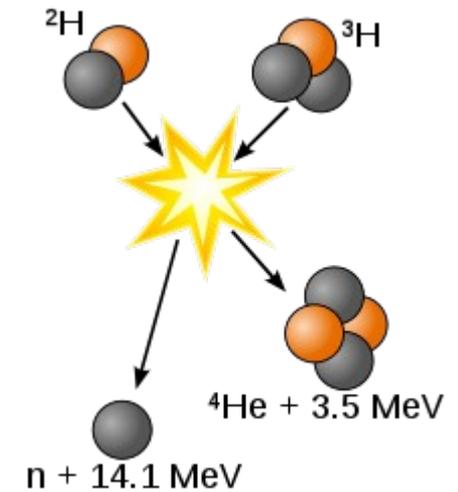


Wenn die Coulomb-Abstoßung der Protonen in leichten Kernen überwunden werden kann, kommt es zur Fusion der leichten Kerne.

Coulomb-Barriere:
$$E > \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0(a_1 + a_2)}$$

Z_i : Kernladungen

a_i : Reichweite der Kernkräfte



Wenn die Coulomb-Abstoßung der Protonen in leichten Kernen überwunden werden kann, kommt es zur Fusion der leichten Kerne.

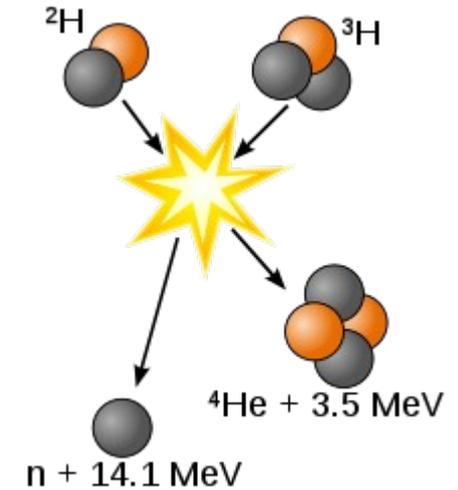
$$\text{Coulomb-Barriere: } E > \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0(a_1 + a_2)}$$

Z_i : Kernladungen

a_i : Reichweite der Kernkräfte

Beispiel: $a_1 = a_2 = 1.5 \text{ fm}$, $Z_1 = Z_2 = 1$

→ $E_{\text{kin}} > 0.5 \text{ MeV}$, als mittlere thermische Energie entspricht das einer Temperatur von 10^9 K



Wenn die Coulomb-Abstoßung der Protonen in leichten Kernen überwunden werden kann, kommt es zur Fusion der leichten Kerne.

$$\text{Coulomb-Barriere: } E > \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0(a_1 + a_2)}$$

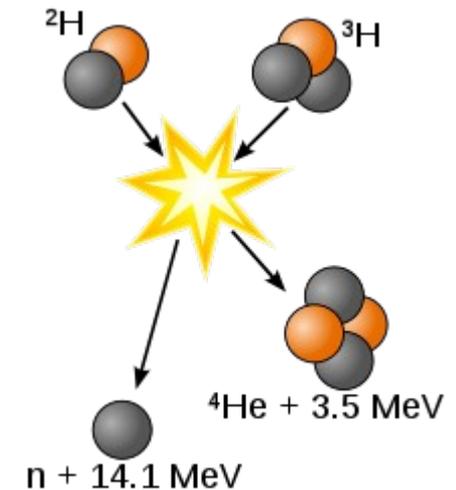
Z_i : Kernladungen

a_i : Reichweite der Kernkräfte

Beispiel: $a_1 = a_2 = 1.5 \text{ fm}$, $Z_1 = Z_2 = 1$

→ $E_{\text{kin}} > 0.5 \text{ MeV}$, als mittlere thermische Energie entspricht das einer Temperatur von 10^9 K

Wegen des Tunneleffekts wird die Reaktion schon bei kleineren Temperaturen möglich

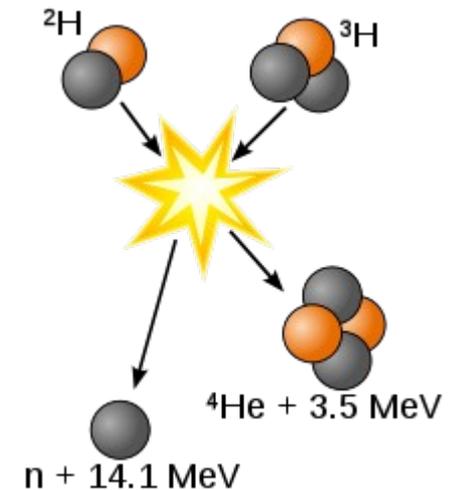


Wenn die Coulomb-Abstoßung der Protonen in leichten Kernen überwunden werden kann, kommt es zur Fusion der leichten Kerne.

Coulomb-Barriere:
$$E > \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0(a_1 + a_2)}$$

Z_i : Kernladungen

a_i : Reichweite der Kernkräfte

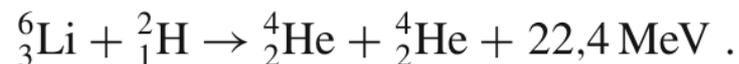
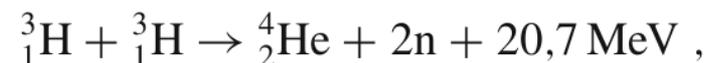
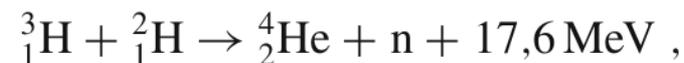
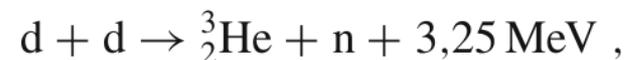
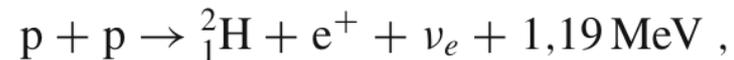


Beispiel: $a_1 = a_2 = 1.5 \text{ fm}$, $Z_1 = Z_2 = 1$

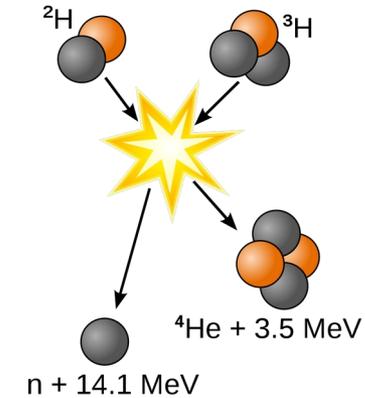
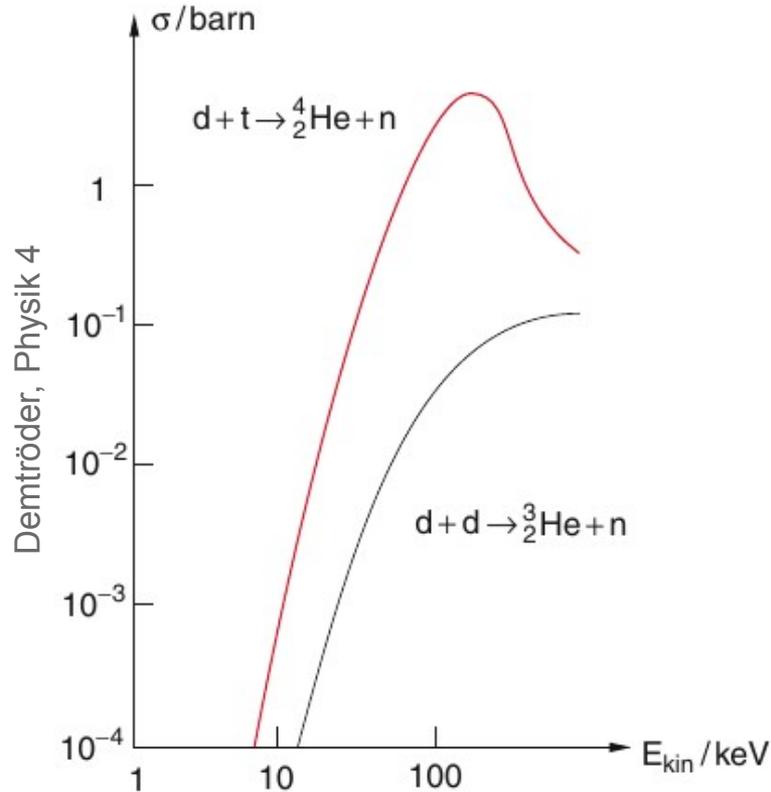
→ $E_{\text{kin}} > 0.5 \text{ MeV}$, als mittlere thermische Energie entspricht das einer Temperatur von 10^9 K

Wegen des Tunneleffekts wird die Reaktion schon bei kleineren Temperaturen möglich

Fusionsreaktionen zur Bildung von He aus 4 H-Kernen:

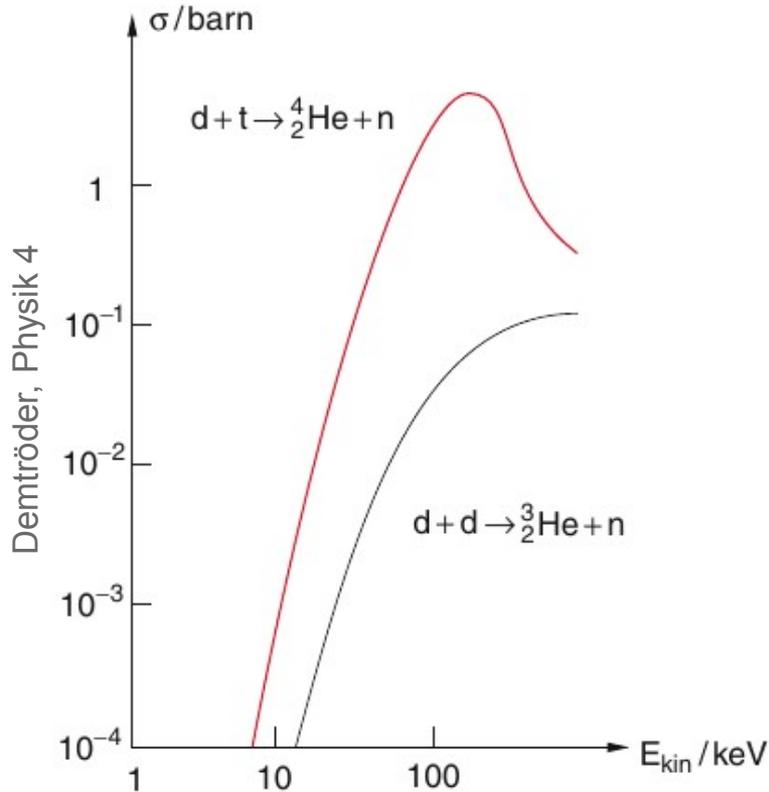


Zur Nutzung der Kernfusion als Energiequelle:
Deuterium und Tritium als Reaktionspartner

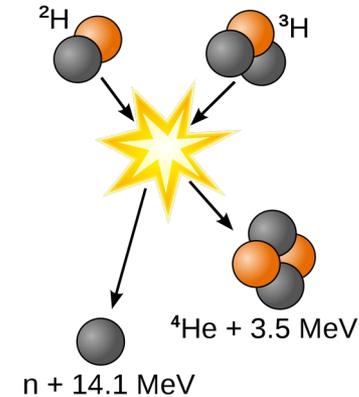


Wirkungsquerschnitt der Fusionsreaktionen
 $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$ und $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$

Zur Nutzung der Kernfusion als Energiequelle:
Deuterium und Tritium als Reaktionspartner



Wirkungsquerschnitt der Fusionsreaktionen
 $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$ und $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$

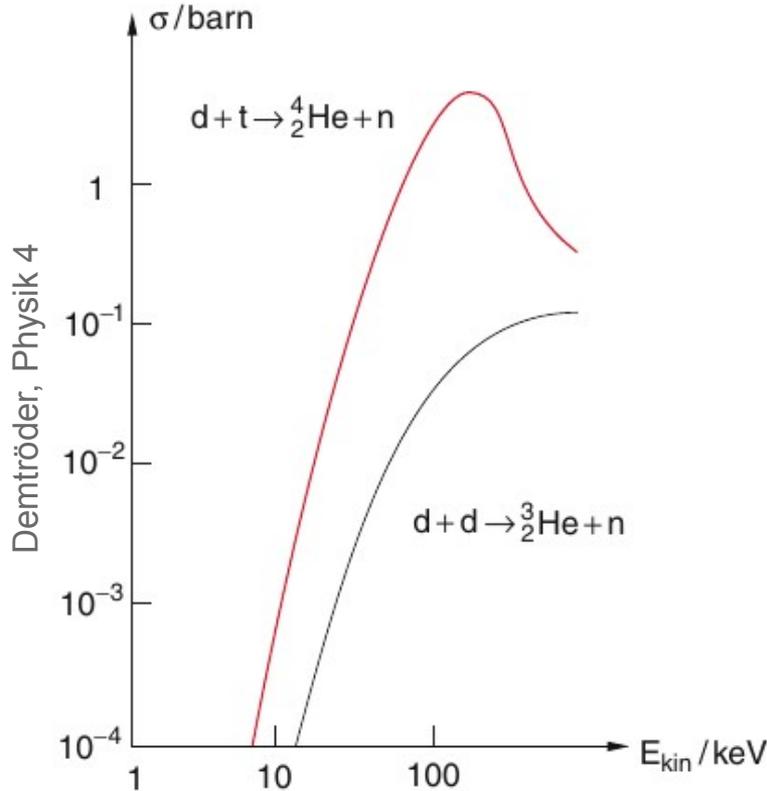
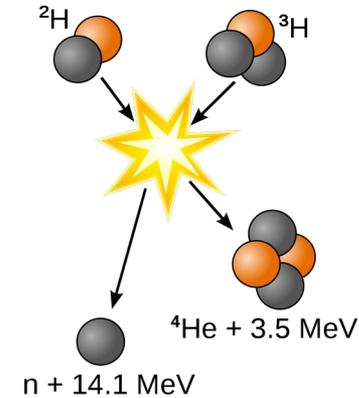


Dauerhaften Fusion mit Energiegewinn:

- hohe Teilchendichte n
 - lange „Einschlusszeiten“ τ_E
 - hohen kinetischen Energien
- Aufheizen durch Energieanteil ϵ_α der α -Teilchen

Lawson-Kriterium:

Zur Nutzung der Kernfusion als Energiequelle:
Deuterium und Tritium als Reaktionspartner



Wirkungsquerschnitt der Fusionsreaktionen
 $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$ und $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$

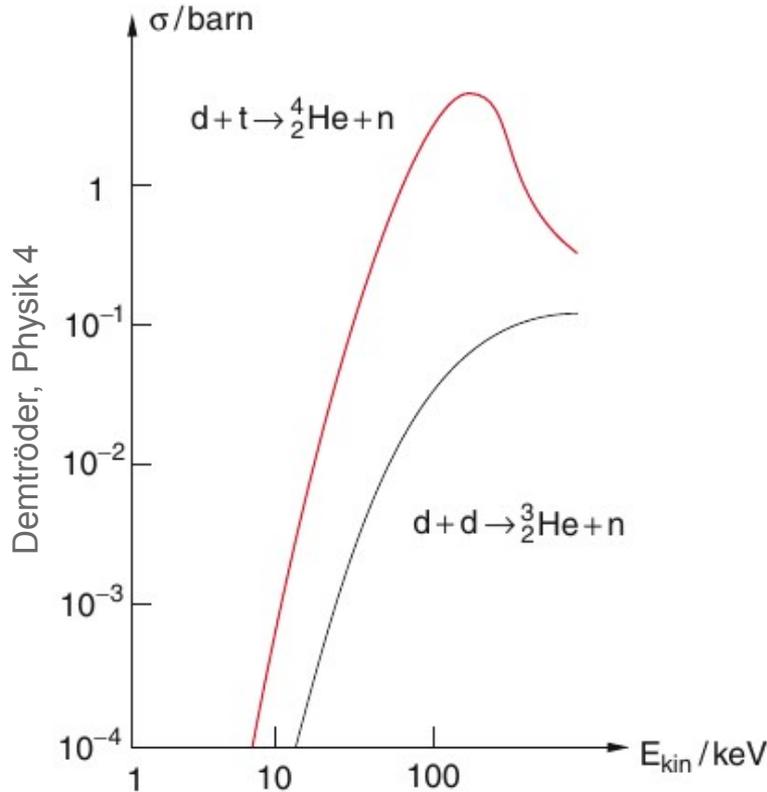
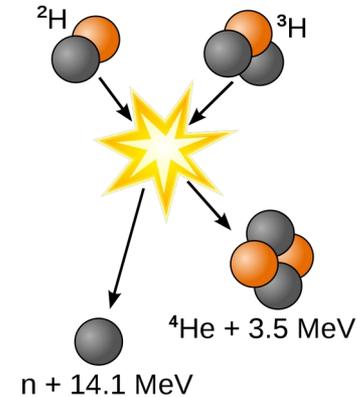
Dauerhaften Fusion mit Energiegewinn:

- hohe Teilchendichte n
 - lange „Einschlusszeiten“ τ_E
 - hohen kinetischen Energien
- Aufheizen durch Energieanteil ϵ_α der α -Teilchen

Lawson-Kriterium:

$$n \cdot \tau_E \cdot T \geq \frac{12k_B T^2}{\langle \sigma \cdot v \rangle \epsilon_\alpha}$$

Zur Nutzung der Kernfusion als Energiequelle:
Deuterium und Tritium als Reaktionspartner



Wirkungsquerschnitt der Fusionsreaktionen
 $d + t \rightarrow ^4\text{He} + n$ und $d + d \rightarrow ^3\text{He} + n$

Dauerhaften Fusion mit Energiegewinn:

- hohe Teilchendichte n
 - lange „Einschlusszeiten“ τ_E
 - hohen kinetischen Energien
- Aufheizen durch Energieanteil ϵ_α der α -Teilchen

Lawson-Kriterium:

$$n \cdot \tau_E \cdot T \geq \frac{12k_B T^2}{\langle \sigma \cdot v \rangle \epsilon_\alpha}$$

Nutzbare Reaktionsraten für d+t ergeben sich erst oberhalb von $E_{\text{kin}} = 10 \text{ keV}$ (100 Millionen K)

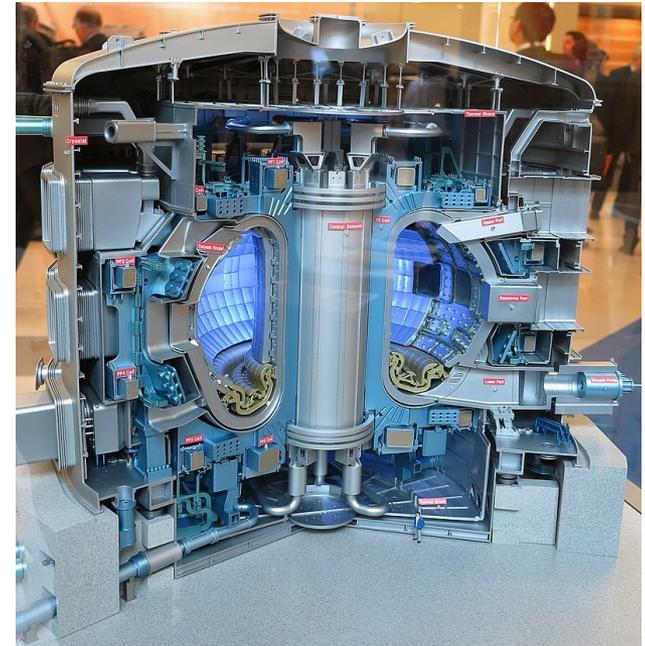
Technische Möglichkeiten:

- magnetischer Einschluss eines Plasmas aus d und t

Fusionsreaktionen

ab $T=150 \cdot 10^6$ K und

Teilchendichten $> 10^{20}/\text{m}^3$



<https://www.iter.org/>

Modell des Kernstücks von ITER,
dem internationalen Fusionsreaktor
(Aufbau in Südfrankreich, erster
Betrieb geplant 2025)

Technische Möglichkeiten:

- magnetischer Einschluss eines Plasmas aus d und t

Fusionsreaktionen

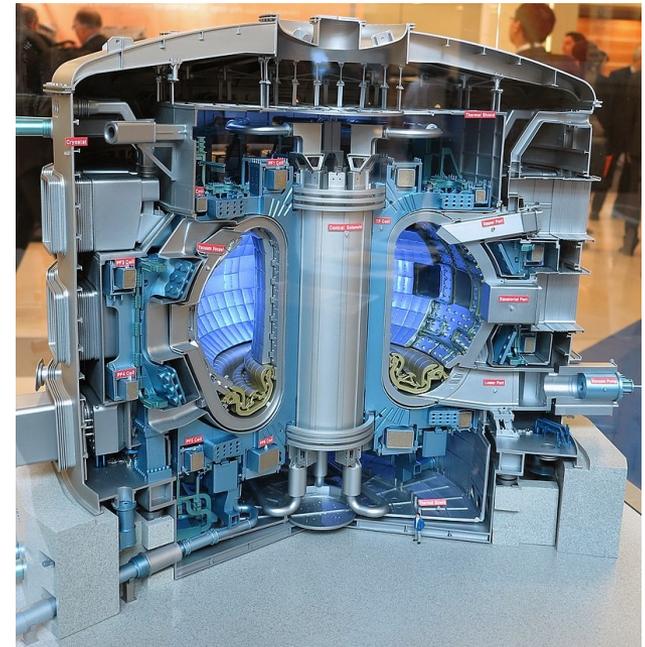
ab $T=150 \cdot 10^6$ K und

Teilchendichten $> 10^{20}/\text{m}^3$

- **Trägheitsfusion**

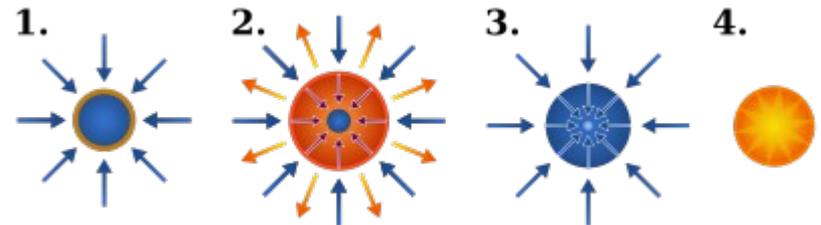
kurzzeitiges Komprimieren und Aufheizen eines Brennstoff-Pellets durch Licht- oder Teilchenstrahlen, Einschluss für kurze Zeiten $< 1\text{ns}$ durch Trägheit

(Prinzip der „Wasserstoff-Bombe“)



<https://www.iter.org/>

Modell des Kernstücks von ITER, dem internationalen Fusionsreaktor (Aufbau in Südfrankreich, erster Betrieb geplant 2025)

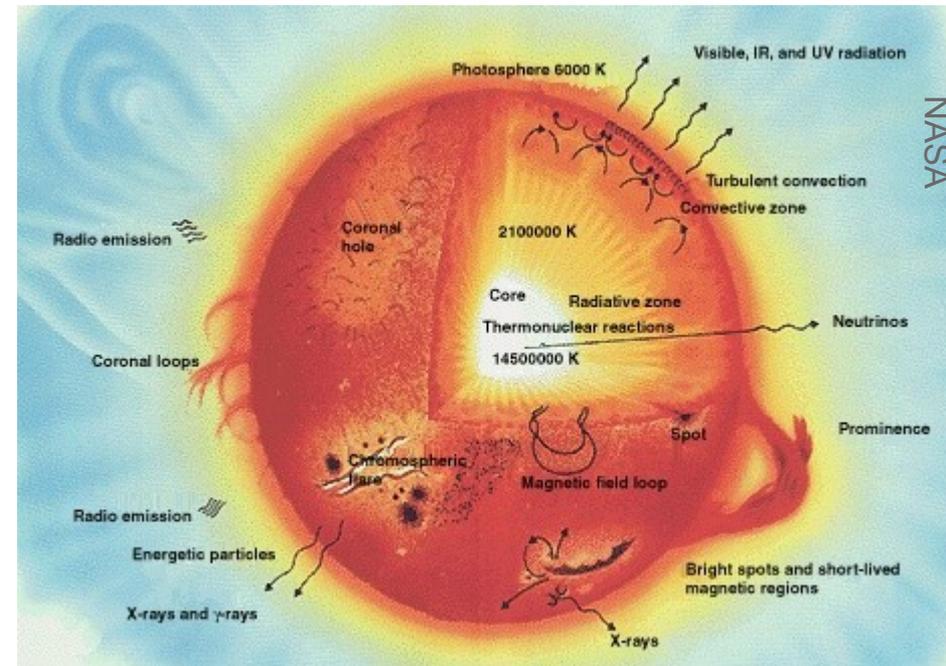
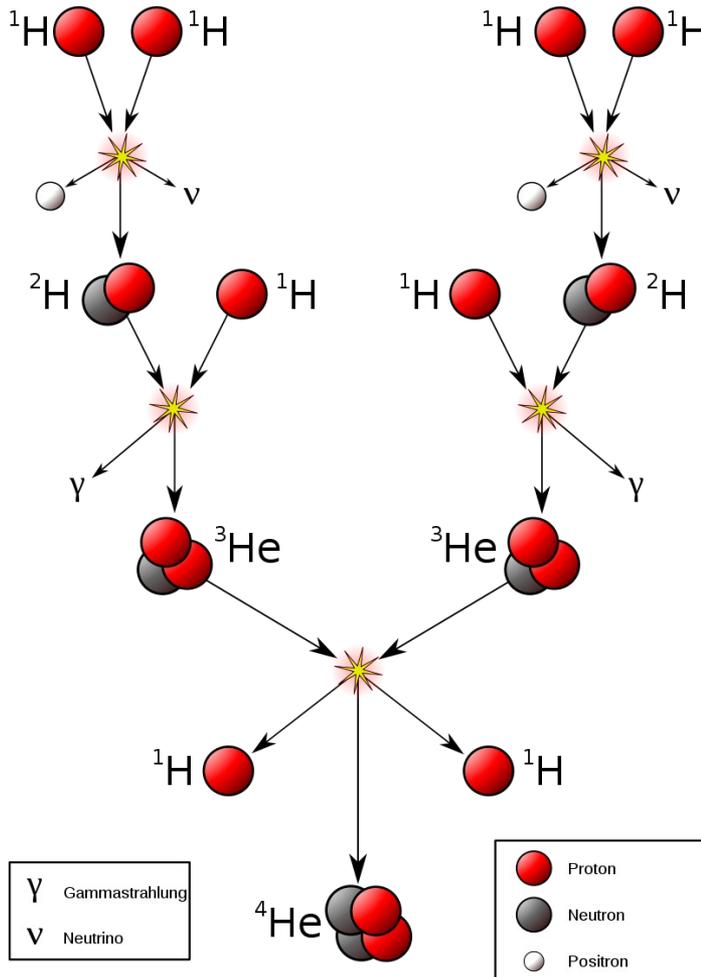


[https://de.wikipedia.org/wiki/Trägheitsfusion](https://de.wikipedia.org/wiki/Tr%C4%84gheitsfusion)

Pause

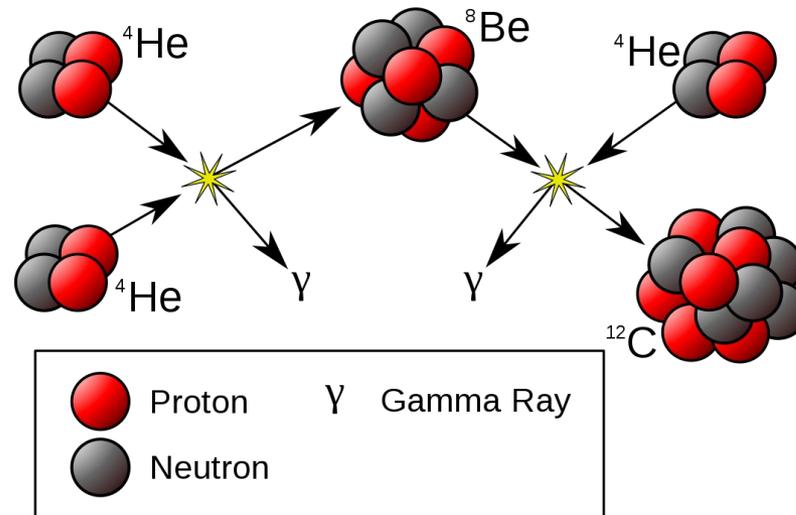
und Zeit für Fragen ?

Ein bereits funktionierender
Fusionsreaktor:
unsere Sonne



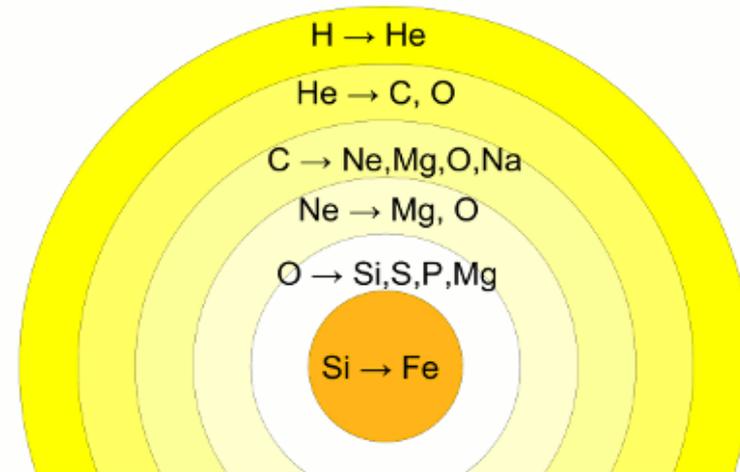
<https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusion>

Wenn der Wasserstoff im heißen Kern aufgebraucht ist, beginnt das „Helium-Brennen“



Nach dem Helium-Brennen geht die Kernfusion in verschiedenen Schichten weiter.

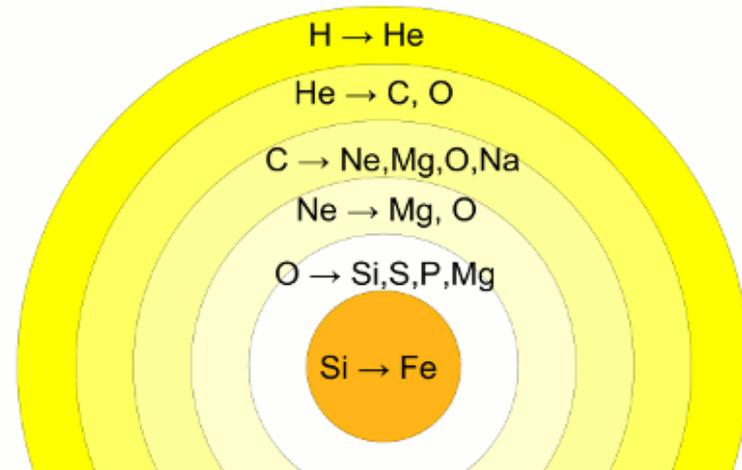
- 1: $H \rightarrow He$
- 2: $He \rightarrow C$
- 3: $C \rightarrow Ne, Mg, O, Na$
- 4: $Ne \rightarrow Mg, O$
- 5: $O \rightarrow Si, S, P, Mg$
- 6: $Si \rightarrow Fe$
- 7: Eisenkern



So entstehen Elemente bis Fe

Nach dem Helium-Brennen geht die Kernfusion in verschiedenen Schichten weiter.

- 1: $H \rightarrow He$
- 2: $He \rightarrow C$
- 3: $C \rightarrow Ne, Mg, O, Na$
- 4: $Ne \rightarrow Mg, O$
- 5: $O \rightarrow Si, S, P, Mg$
- 6: $Si \rightarrow Fe$
- 7: Eisenkern



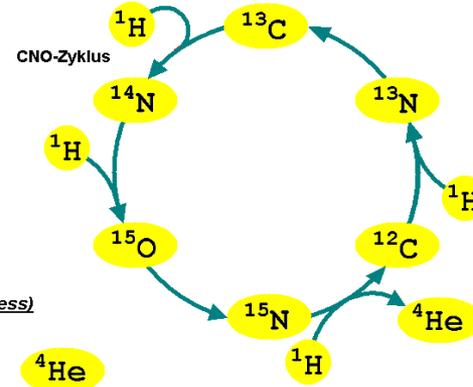
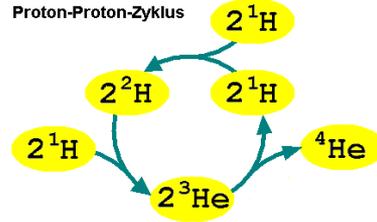
So entstehen Elemente bis Fe

Gegen Ende des Wasserstoffbrennens:

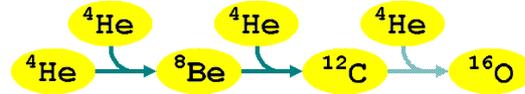
- Gravitationskraft wird stärker als der Strahlungsdruck
 - Kontraktion des Kerns → Temperatur im Kern erhöht sich stark (≈ 100 Millionen Kelvin)
 - Stern erreicht Heliumbrennphase (Heliumflash), Strahlungsdruck wird stark erhöht
 - Gravitationskraft < Strahlungsdruck
 - Strahlungsdruck lässt äußere Schichten des Sterns expandieren
 - Äußere Schichten des Sterns kühlen ab = Farbe wird langsam zu Rot
- Stern wird zum „**Roten Riesen**“
- Stern stabilisiert Druckverhältnisse wieder nach Einsetzen des Heliumbrennens

Wasserstoff-Brennen
($15 - 60 \cdot 10^6 \text{ K}$)

Proton-Proton-Zyklus



Helium-Brennen (3 α -Prozess)
($100 - 200 \cdot 10^6 \text{ K}$)



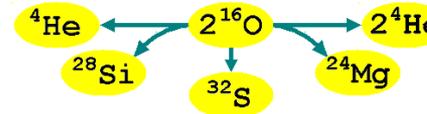
Kohlenstoff-Brennen
($500 - 900 \cdot 10^6 \text{ K}$)



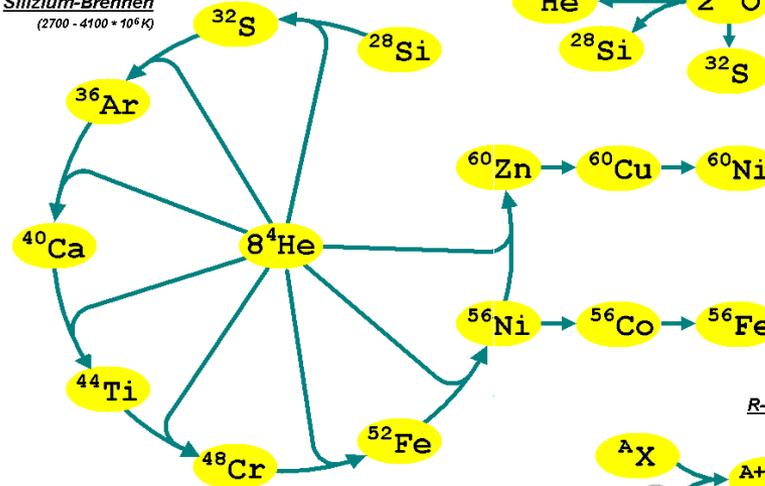
Neon-Brennen
($1200 - 1700 \cdot 10^6 \text{ K}$)



Sauerstoff-Brennen
($1500 - 2300 \cdot 10^6 \text{ K}$)



Silizium-Brennen
($2700 - 4100 \cdot 10^6 \text{ K}$)



R-Prozess & S-Prozess

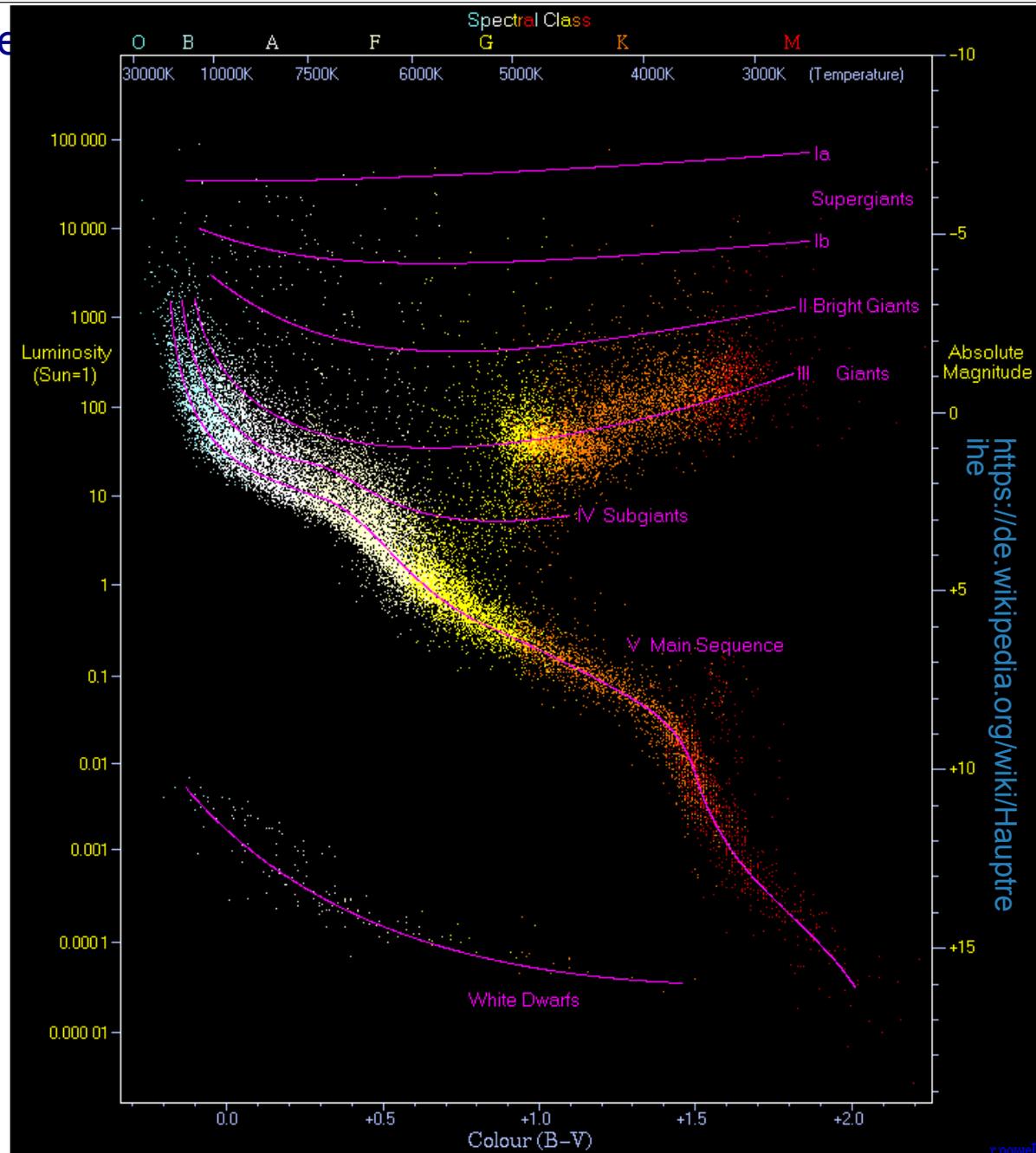


Jenseits von Eisen und Nickel:

Das Helligkeits-Farbdiagramm oder Hertzsprung-Russel-Diagramm

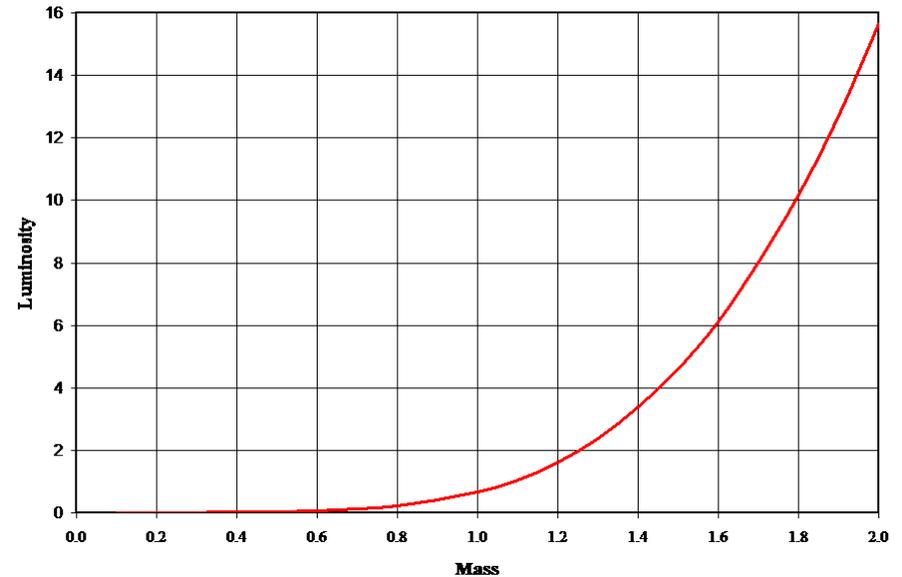
Oberflächentemperatur gegen
(auf den Abstand korrigierte)
Helligkeit

- Sterne auf der „Hauptreihe“
 - „verbrennen“ Wasserstoff
 - Zustand stabil
- Heliumbrennen bzw. Schalenbrennen
 - Stern wird instabil
 - Masse des Sterns bestimmt den Verlauf der Entwicklung



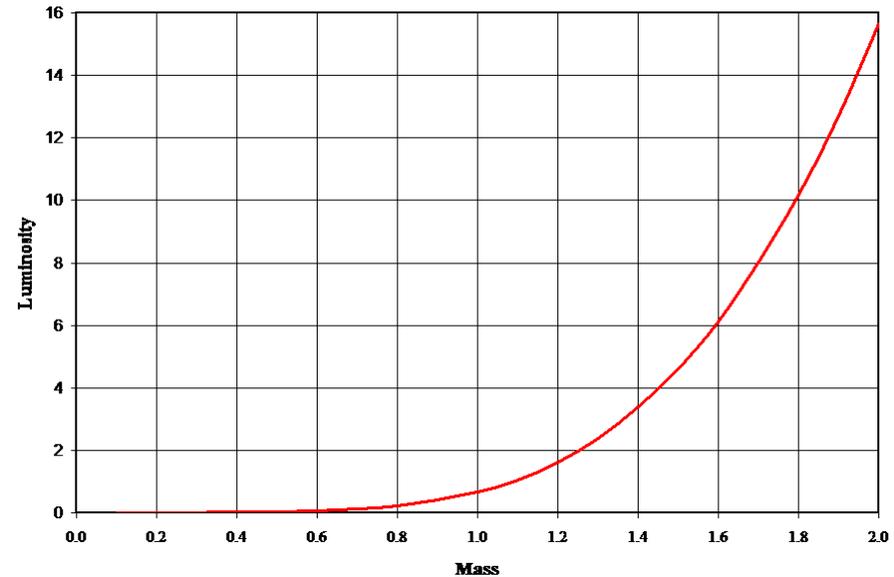
Zwischen der **Masse** eines Sterns und seiner **Leuchtkraft** besteht ein Zusammenhang:

$$L \propto M^{\frac{7}{2}}$$



Zwischen der **Masse** eines Sterns und seiner **Leuchtkraft** besteht ein Zusammenhang:

$$L \propto M^{\frac{7}{2}}$$



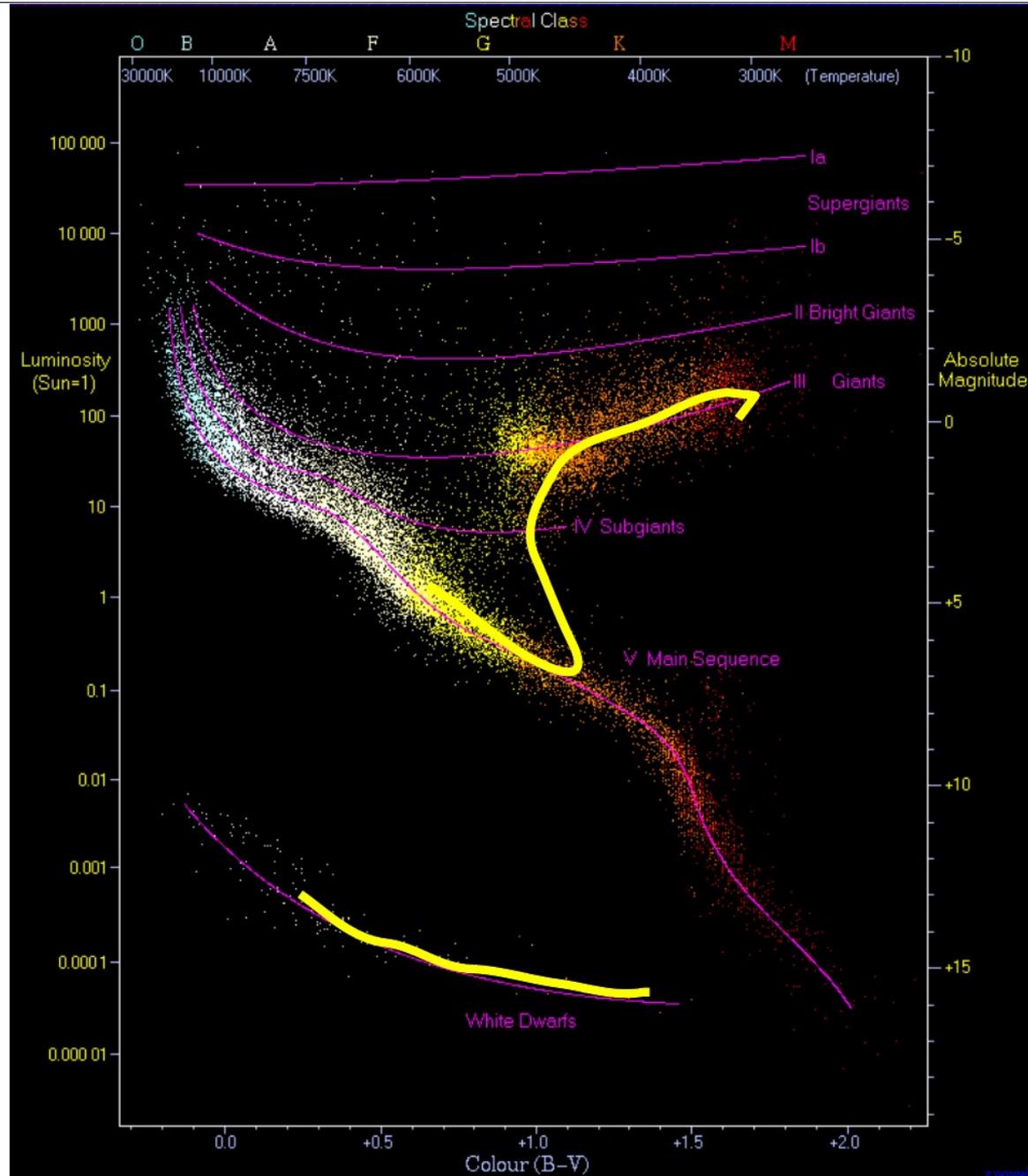
Auch die Lebensdauer eines Sterns, d.h. die Zeit bis der Wasserstoff verbraucht ist, hängt von der Masse ab:

$$\tau_{ms} \sim 10^{10} \text{Jahre} \cdot \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \cdot \left(\frac{L_{\odot}}{L}\right) = 10^{10} \text{Jahre} \cdot \left(\frac{M_{\odot}}{M}\right)^{\frac{5}{2}} = 10^{10} \text{Jahre} \cdot \left(\frac{L_{\odot}}{L}\right)^{\frac{5}{7}}$$

Schwere Sterne leben kürzer !

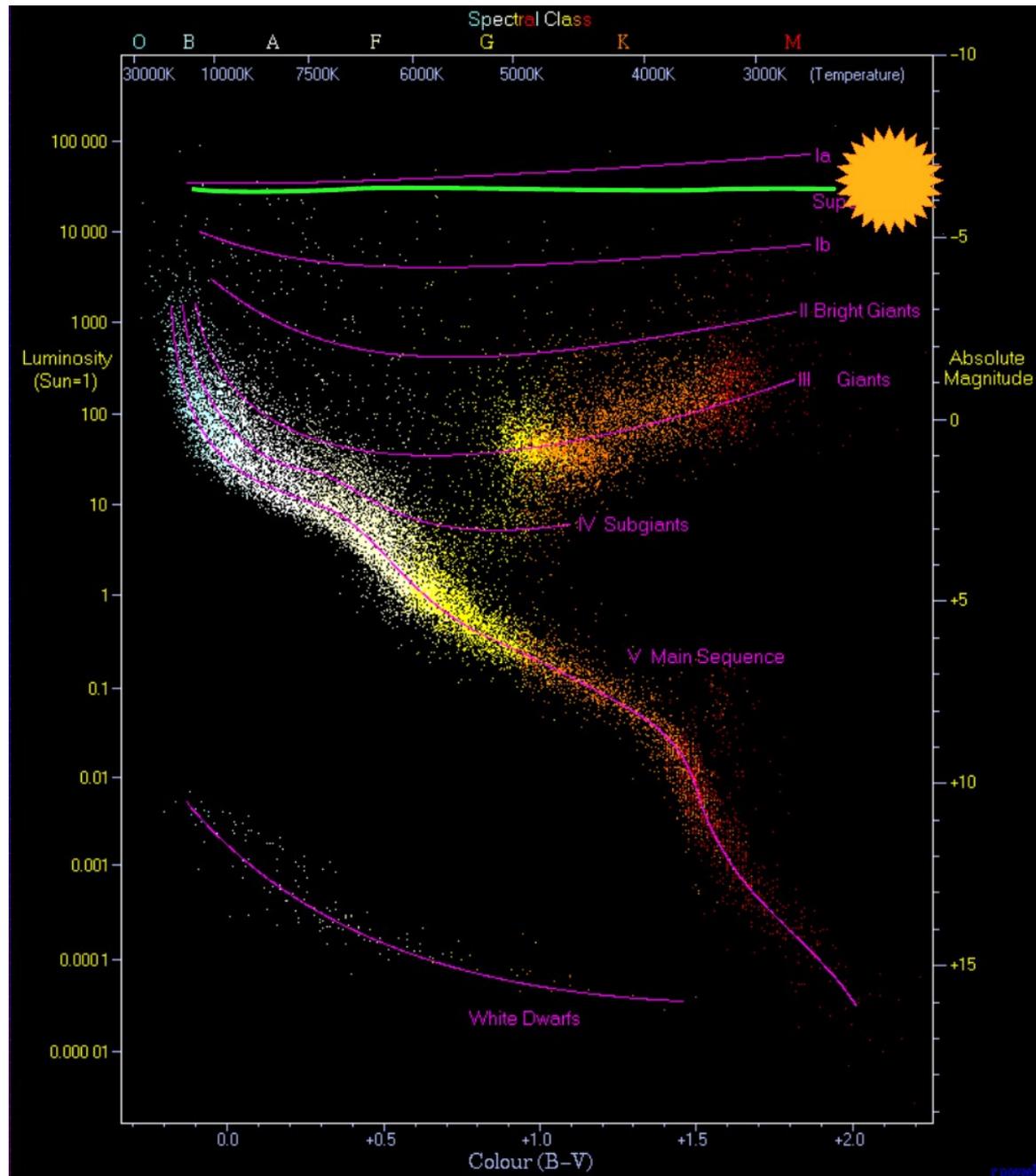
Unsere Sonne:

- 9 Milliarden Jahre auf der Hauptreihe
(also noch gut 4 Milliarden Jahre)
- 1 Milliarde Jahre als Roter Riese
- Endzustand:
Weißer Zwerg



Ein sehr **schwerer Stern**

- endet nach einigen Millionen Jahren als **Supernova**
 - Kern kollabiert zu einem schwarzen Loch
 - Hülle mit den erzeugten schweren Elementen wird an das interstellare Medium abgegeben
 - im Ungleichgewichtszustand der Explosion entstehen auch Elemente schwerer als Fe.



Sterne zwischen 1.44 und 3.2 Sonnenmassen

- Elektronen und Protonen werden zu Neutronen
 - **Neutronenstern** mit Dichte von Kernmaterie
 - rotiert extrem schnell, da er den Drehimpuls des alten Sterns übernimmt, aber sehr klein ist (bis zu 1000(!) Umdrehungen/s)

Sterne zwischen 1.44 und 3.2 Sonnenmassen

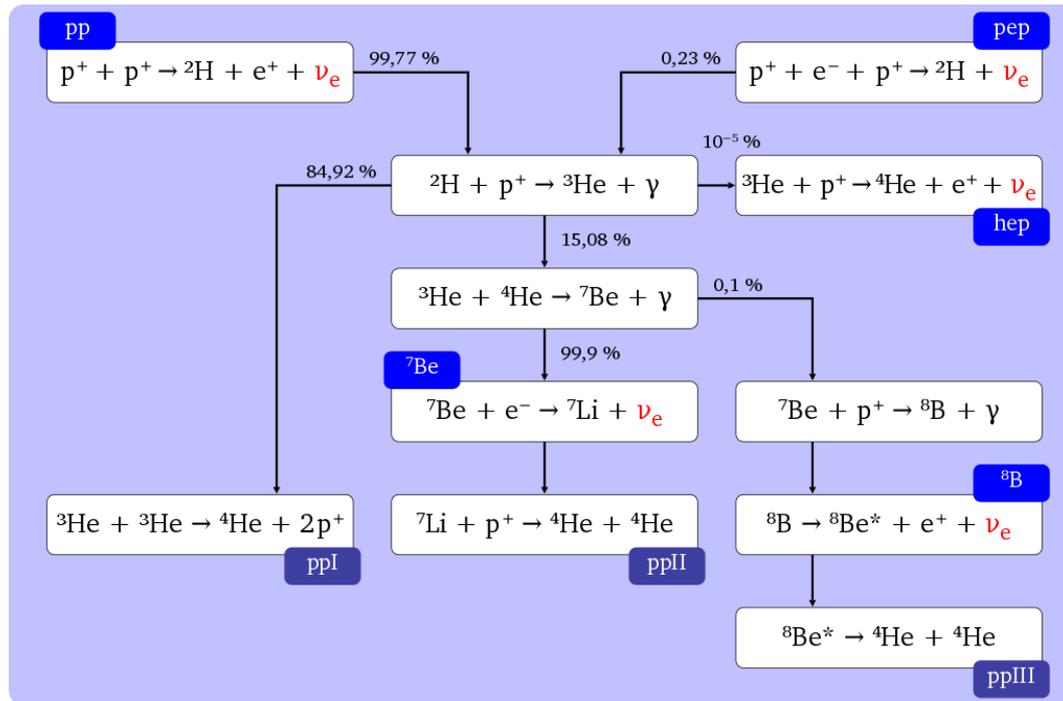
- Elektronen und Protonen werden zu Neutronen
 - **Neutronenstern** mit Dichte von Kernmaterie
 - rotiert extrem schnell, da er den Drehimpuls des alten Sterns übernimmt, aber sehr klein ist (bis zu 1000(!) Umdrehungen/s)

Kerne mit mehr als 3.2 Sonnenmassen

- Fermi-Druck der Neutronen reicht nicht aus, um den Stern zu stabilisieren
 - **schwarzes Loch**
 - ein Zustand mit unendlich hoher Dichte und extrem hoher Gravitation

Schwarze Löcher sind Gegenstand der aktuellen Forschung; durch die Beobachtung von Gravitationswellen ist es kürzlich gelungen, die Fusion von schwarzen Löchern oder von einem schwarzen Loch und einem Neutronenstern nachzuweisen.

Kernreaktionen in der Sonne erzeugen sehr viele Neutrinos, die die Sonne mit Lichtgeschwindigkeit verlassen.



https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_neutrino

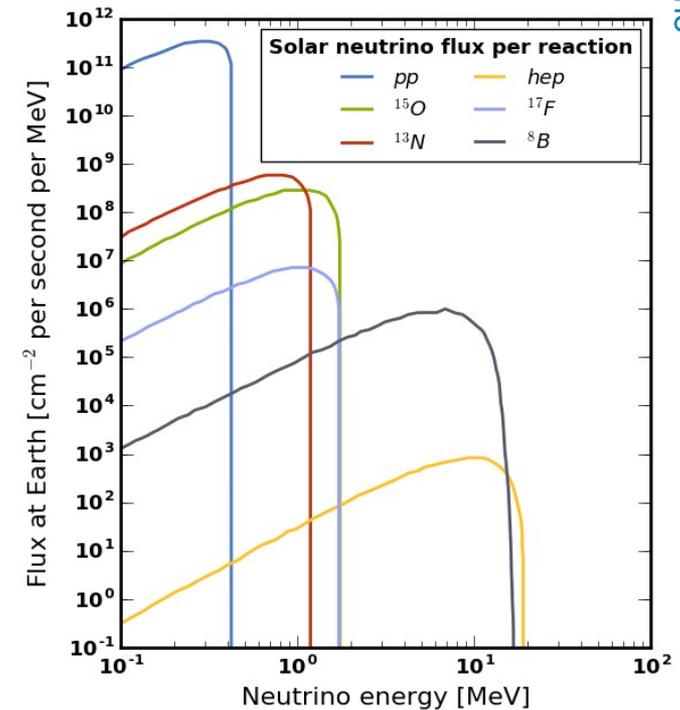
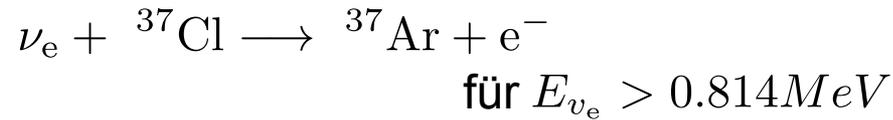
Wenn diese Neutrinos auf der Erde nachgewiesen werden können, liefern sie einen direkten Blick auf die nuklearen Prozesse im Sonnenkern und erlauben die Überprüfung des „solaren Modells“

Der aus Modellen erwartete **Neutrinofluss von der Sonne** ist gewaltig:

$$\sim 10^{11} \text{ cm}^2/\text{MeV}$$

Allerdings ist die Energie des Hauptbeitrags mit nur ~ 0.4 MeV zu klein für einen Nachweis.

Der **erste Nachweis von Sonnenneutrinos** gelang über die Reaktion

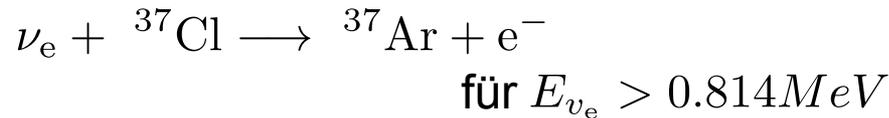


Der aus Modellen erwartete **Neutrinofluss von der Sonne** ist gewaltig:

$$\sim 10^{11} \text{ cm}^2/\text{MeV}$$

Allerdings ist die Energie des Hauptbeitrags mit nur $\sim 0.4 \text{ MeV}$ zu klein für einen Nachweis.

Der **erste Nachweis von Sonnenneutrinos** gelang über die Reaktion

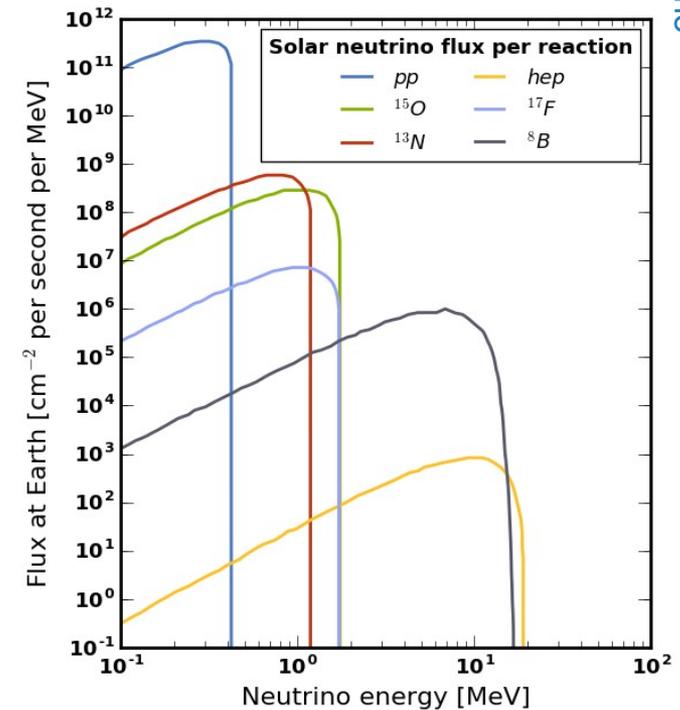


Die Argon-Atome wurden zum Nachweis der Reaktion aus einem Tank mit 615 t Tetrachlorethylen herausgespült, in einer Kühlfalle gesammelt und einzeln über den Zerfall ${}^{37}\text{Ar} \longrightarrow {}^{37}\text{Cl} + e^- + \bar{\nu}_e$ nachgewiesen.

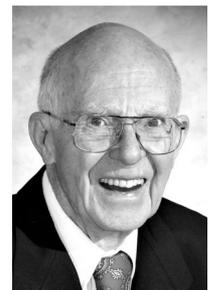
Das Experiment lief fast 25 Jahre und lieferte nur 1/3 zu des erwarteten Neutrino-Flusses

Die Diskrepanz wurde 2001 vollständig durch eine besondere Eigenschaft der Elektron-Neutrinos erklärt

→ **der Sonne geht es gut**, und Nobelpreis für Raymond Davis jr.



https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_neutrino



nobelprize.org

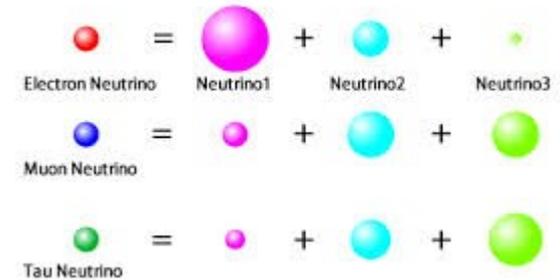
R. Davis
Nobelpreis 2002

Wie wir in der Teilchenphysik noch sehen werden, gibt es drei Arten von Neutrinos, die zu den drei Arten von geladenen Leptonen zugeordnet sind: ν_e , ν_μ und ν_τ

Diese Neutrino-Arten mischen untereinander, d.h. ein

- als Elektron-Neutrino erzeugtes Neutrino
- kommt auf der Erde als Myon- oder Tau-Neutrino an

Mit Chlor lassen sich aber nur Elektron-Neutrinos nachweisen !

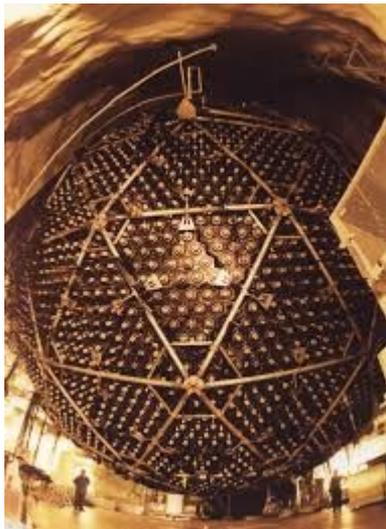
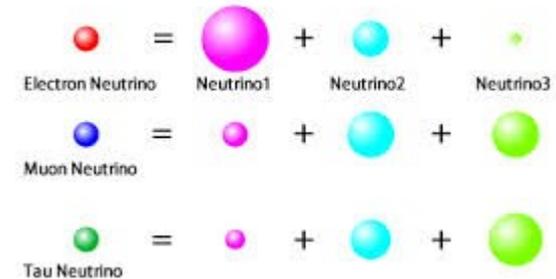


Wie wir in der Teilchenphysik noch sehen werden, gibt es **drei Arten von Neutrinos**, die zu den drei Arten von geladenen Leptonen zugeordnet sind: ν_e , ν_μ und ν_τ

Diese Neutrino-Arten mischen untereinander, d.h. ein

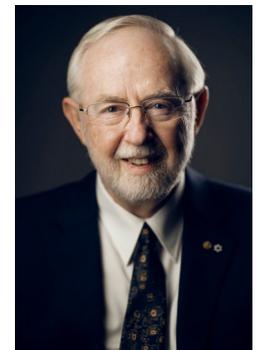
- als Elektron-Neutrino erzeugtes Neutrino
- kommt auf der Erde als Myon- oder Tau-Neutrino an

Mit Chlor lassen sich aber nur Elektron-Neutrinos nachweisen !



Ein moderner Detektor mit Empfindlichkeit auf alle Neutrino-Sorten, das **Sudbury Neutrino Observatory** in Kanada zeigte 2001, dass der Neutrino-Fluss von der Sonne **ok** ist !

Das **solare Neutrino-Problem** ist heute gelöst !



nobelprize.org

A.B. McDonald
Nobelpreis 2015

SNO-Detektor mit
2000 t schwerem Wasser

Nobelpreis für Artur B. McDonald 2015

Ende Vorlesung 23

und Zeit für Fragen ?