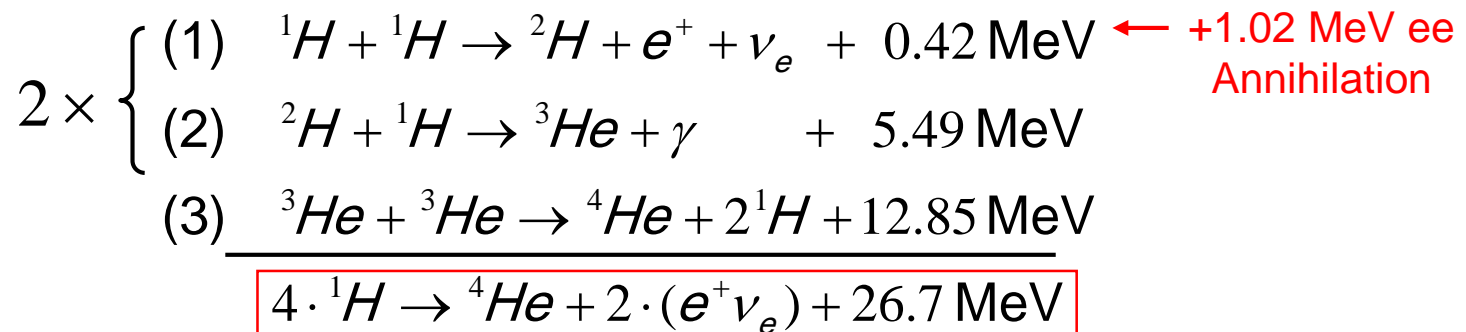


# X. Fusion und Elementsynthese

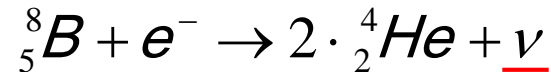
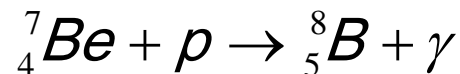
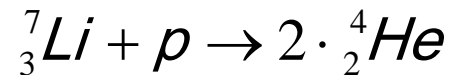
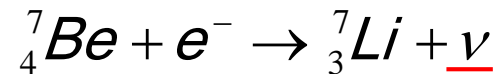
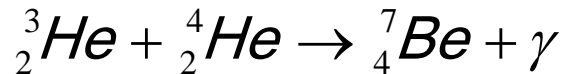
## 1. Wasserstoff-Fusion in der Sonne

Für Elemente mit  $A \ll 56$  wird bei Fusion von 2 Kernen Energie frei.  
In der Sonne wird die meiste Energie (>98%) durch den Proton-Proton (pp) Fusionsprozess erzeugt:



Reaktion (1) ist ein schwacher Prozess  $p \rightarrow n e^+ \nu$  und verläuft sehr langsam. Die Leistungsdichte der Sonne ist deshalb mit  $0.3 \text{ kW/m}^3$  (im Zentrum) verhältnismäßig niedrig (zum Vergleich KKW:  $10^5 \text{ kW/m}^3$ ), ihre Gesamtlebensdauer dadurch aber sehr groß ( $\sim 10^{10}$  Jahre). pp-Zyklus eignet sich deshalb nicht für Fusionsreaktoren auf der Erde.

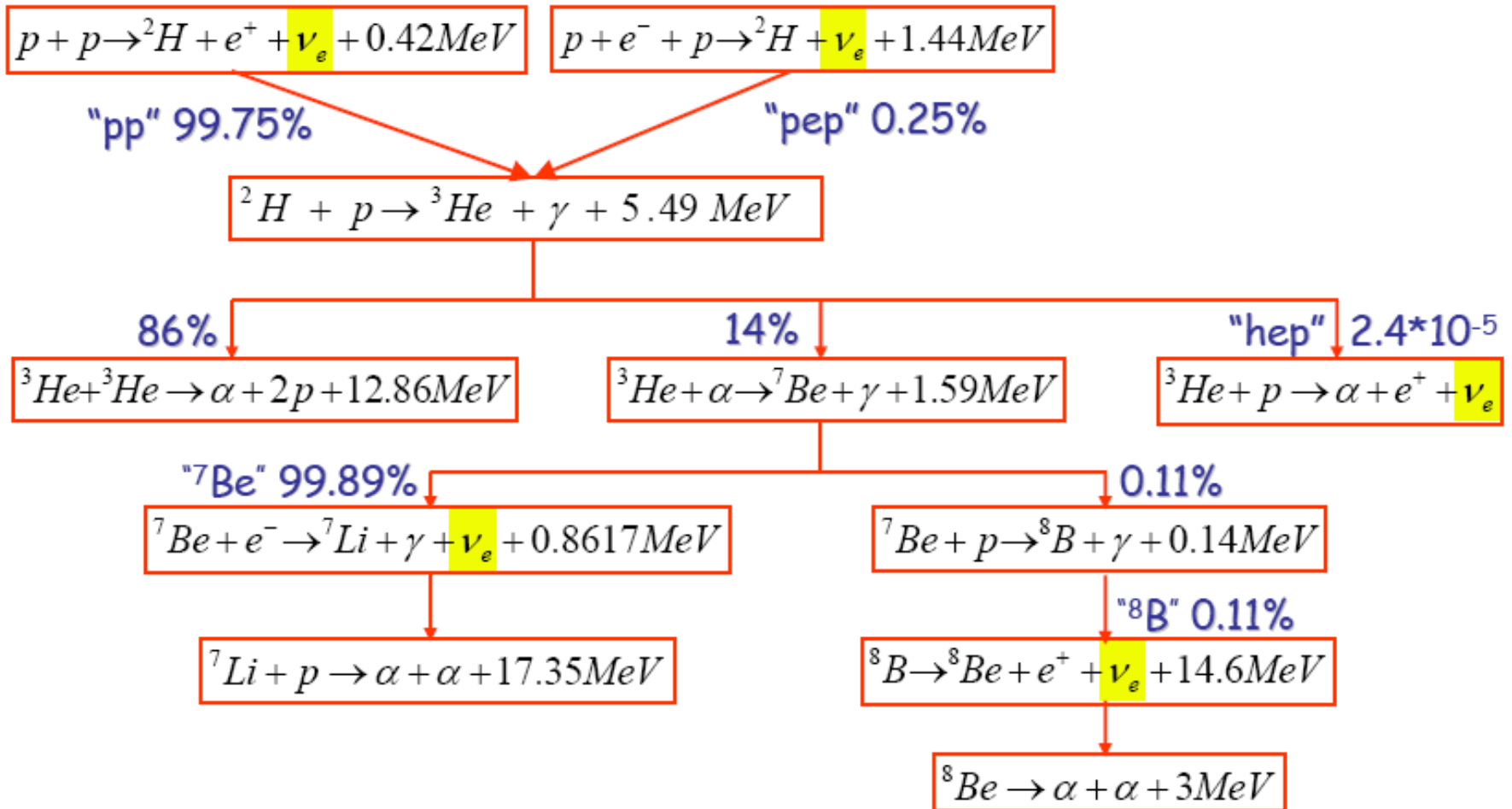
Für die Energiegewinnung in der Sonne von geringerer Bedeutung sind die folgenden Seitenzweige des pp-Zyklus:



Bemerkung: Trotz des geringen Beitrags zur Energiebilanz tragen die entstehenden Neutrinos aber sehr charakteristisch zum messbaren Neutrino-Spektrum der Sonne bei: **Be- und B-Neutrinos**

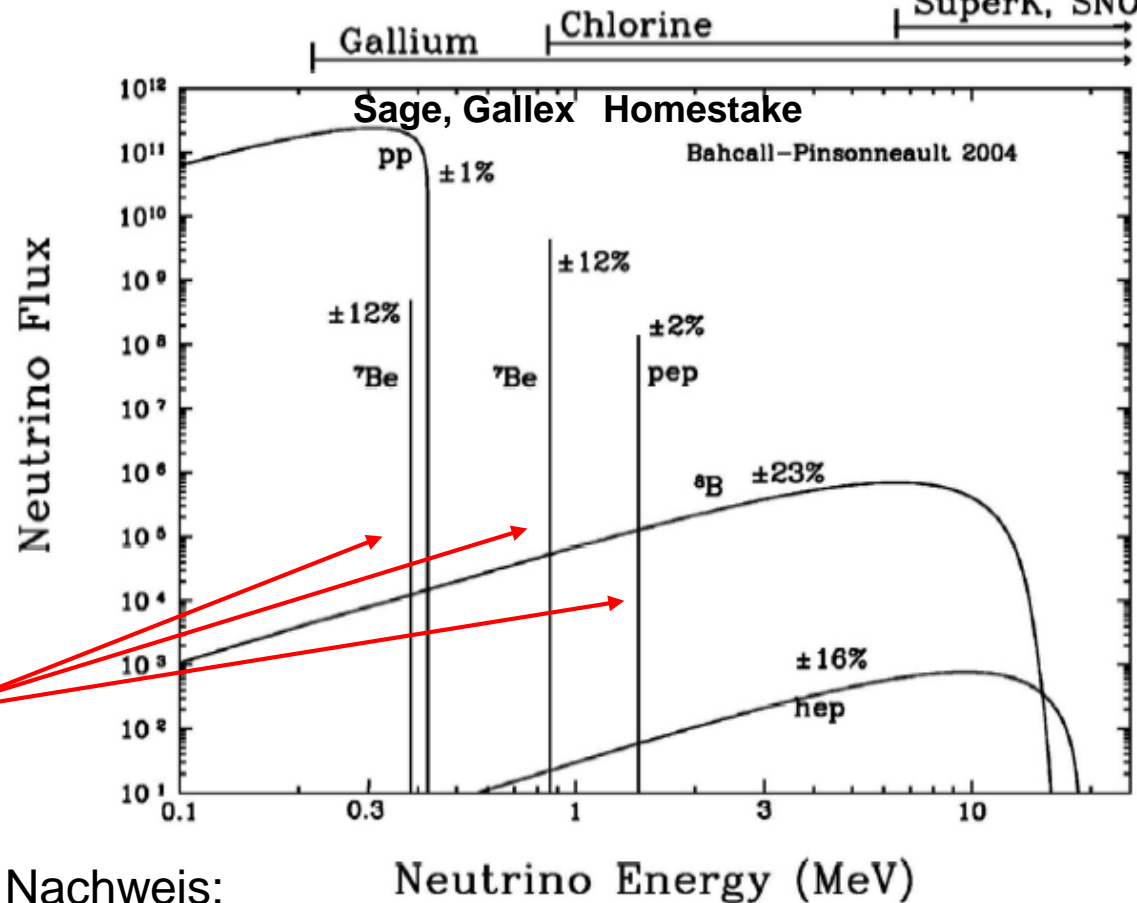
Solange der Proton-Vorrat (Wasserstoff  ${}^1\text{H}$ ) reicht, brennt der Stern stabil. Für die Sonne beträgt die Gesamtbrenndauer etwa  $10^{10}$  Jahre wobei die Hälfte bereits vergangen ist. Die lange Lebensdauer ist die Folge des „langsamen Brennens“ aufgrund der schwachen Wechselwirkung.

# Vollständiger Proton-Proton-Fusionszyklus der Sonne



# Spektrum der Sonnen-Neutrinos

H<sub>2</sub>O  
SuperK, SNO



2-body decays

## Neutrino Detektoren zum Nachweis:

Cl<sub>2</sub> Detektoren  $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e, {}^{37}\text{Ar} \rightarrow {}^{37}\text{Cl} \text{ (EC)}$   $E_\nu > 0.8 \text{ MeV}$

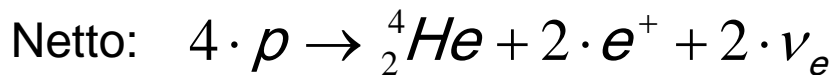
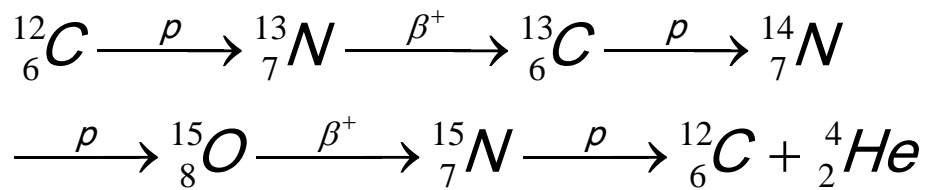
Ga Detektors  $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e$   $E_\nu > 0.2 \text{ MeV}$

H<sub>2</sub>O Detektoren Elastische Streuung:  $\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$   $E_\nu > 5 \text{ MeV}$

Man beobachtet ein Defizit für alle Sonnenneutrinos ( $\nu_e$ ) → Neutrinooszillation. <sup>4</sup>

# CNO-Zyklus

In größeren, massereicheren Sternen mit höherer Dichte und Temperatur kann im Sterninneren  $^{12}_6\text{C}$  als Katalysator für den CNO-Zyklus (Bethe & Weizsäcker) wirken:



CNO-Zyklus läuft schneller ab als pp-Zyklus, er setzt aber wegen der höheren Coulomb-Barriere erst bei höheren Temperaturen ein.

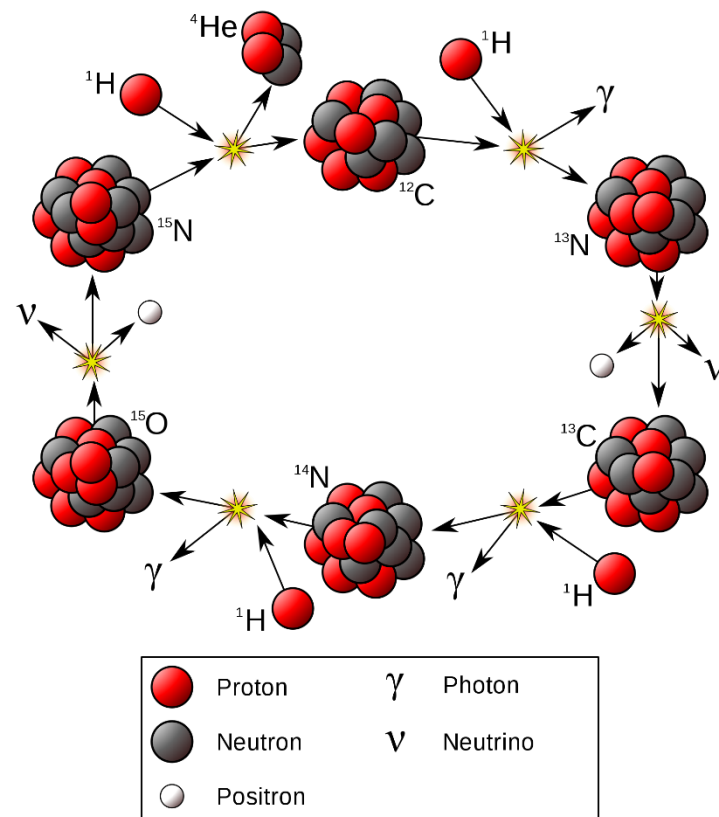
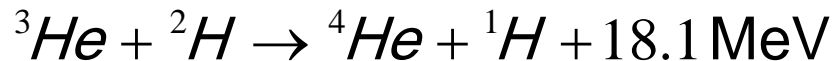


Bild: Wikipedia

## 2. Fusionsreaktoren auf der Erde

### „Sonnenfeuer auf der Erde“:

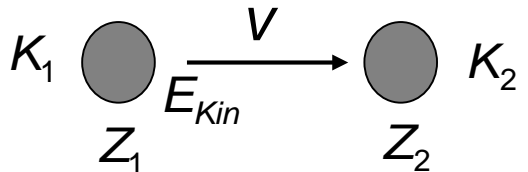
Da der Fusionsprozess der Sonne auf einer schwachen Reaktion basiert eignet er sich nicht zur Realisierung eines Fusionsreaktors (Energiedichte 0.3 kW/m<sup>3</sup> ist sehr niedrig!). Stattdessen müssen Prozesse genutzt werden, die alleine auf der starken Wechselwirkung beruhen:



↙ Aussichtsreichster Prozess: mit der Erzeugung von <sup>3</sup>H im Reaktor selbst

## Coulomb-Barriere:

Überwindung (Durchtunneln) der Coulomb-Barriere der Kerne

$$V_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}$$


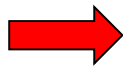
$$E_{Kin} \approx 10 \text{ keV} \dots 100 \text{ keV} \leftrightarrow T \approx 10^{8 \dots 9} \text{ K}$$

$$(k_B = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1} \approx 10^{-4} \text{ eV K}^{-1})$$

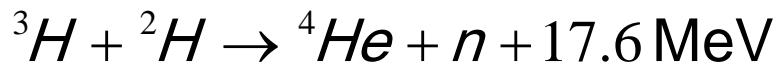
Boltzmann-Konstante

Tunneleffekt:

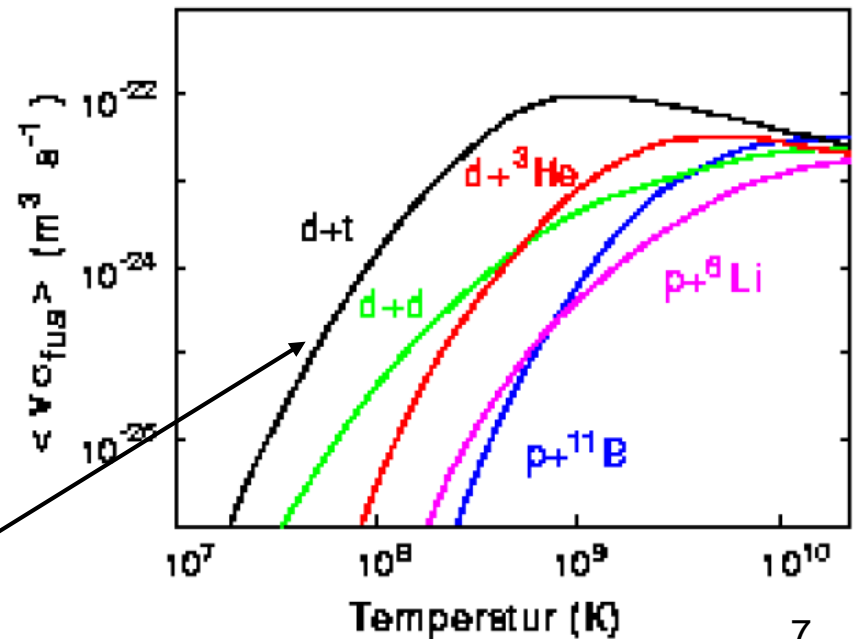
$$\sigma_f(v) \sim e^{-2G} \quad \text{mit} \quad G \sim \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{E_{Kin}}}$$



- $Z_1, Z_2$  klein (= 1 !!)
- $E_{Kin}$  (= Temperatur) groß



Ist am günstigsten!



## a. Plasma:

Bei Temperaturen von  $T \approx 10^8 \dots 10^9$  K sind H, He-Atome vollständig ionisiert und es liegt ein neutrales Plasma aus Elektronen und Kernen vor.

Fusion ist nur möglich, wenn die Einschlusszeit  $\tau_E$  des Plasmas größer ist als die Zeit bis zu einem Fusionsstoß  $\tau_F$ .

Zündparameter des Plasmas:

$$ZP = n \cdot \tau_E \cdot k_B T \quad n = \text{Plasma(Kern)-Dichte}$$

Bedingung zum Zünden des Plasmas  $ZP > 6 \cdot 10^{21} \text{ keVs/m}^3$   $n \cdot \tau_E \cdot T > 6 \cdot 10^{28} \text{ sK / m}^3$   
(Lawson-Kriterium)

## b. Einschluss des heißen Plasmas

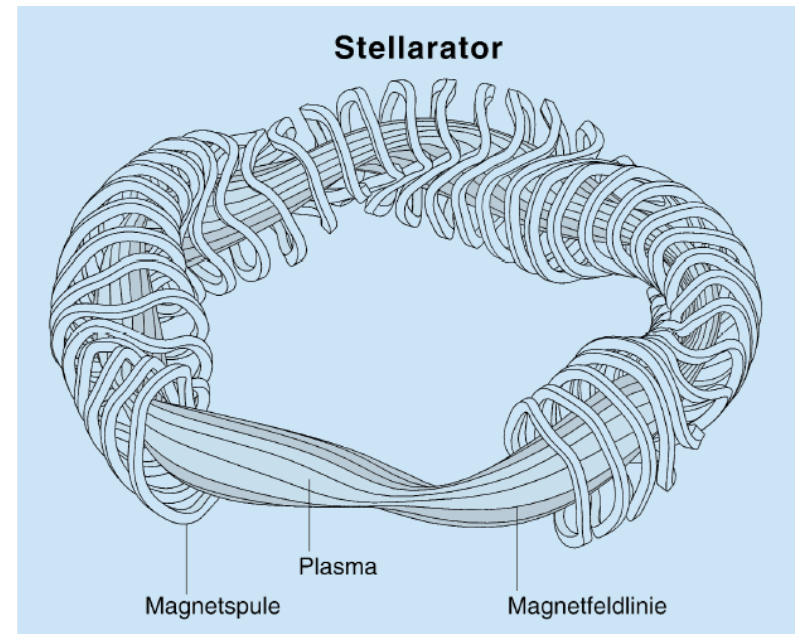
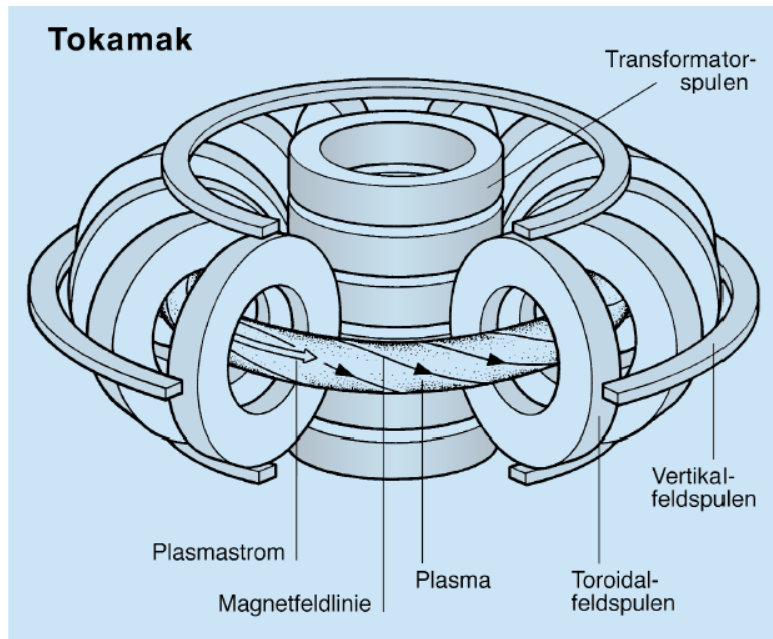
- Magnetischer Einschluss  $\rightarrow$  lange Einschlusszeit, niedrige Plasmadichten:  $\tau_E \approx O(10\text{s})$ ,  $n \approx 10^{20} / \text{m}^3$
- Trägheitseinschluss  $\rightarrow$  kurze Einschlusszeit, hohe Dichten (Laser induziert)  $\tau_E \approx O(10^{-10} \text{ s})$ ,  $n \approx 10^{31} / \text{m}^3$

Zünd-  
bedingung  
bei  $T=10^8$  K

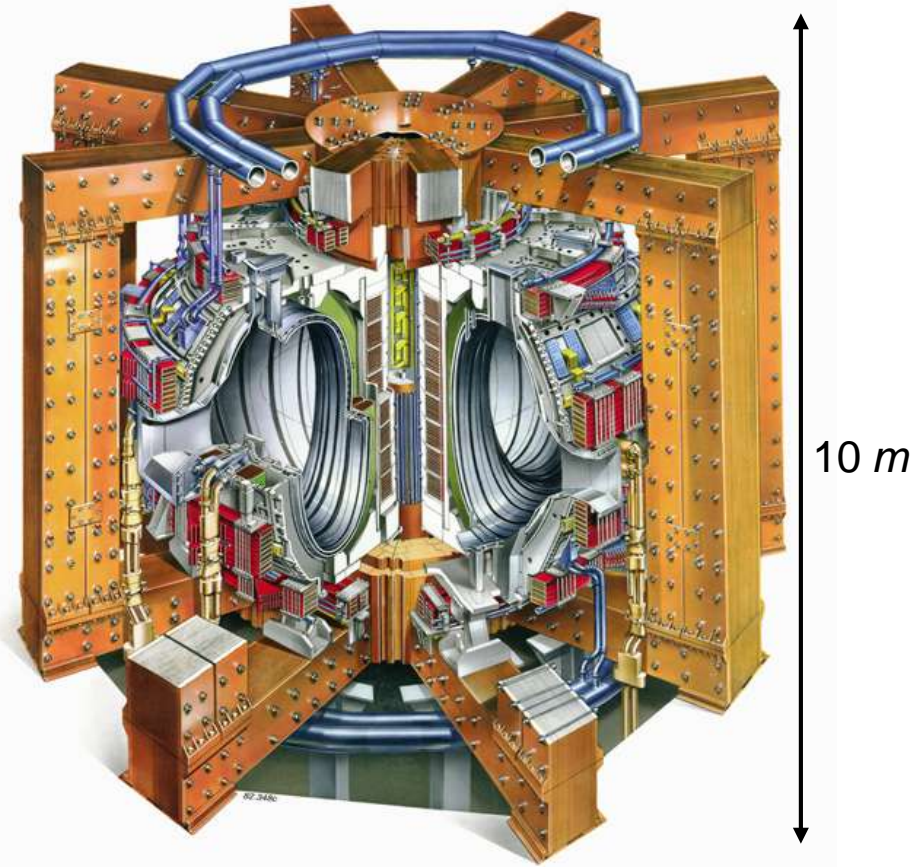
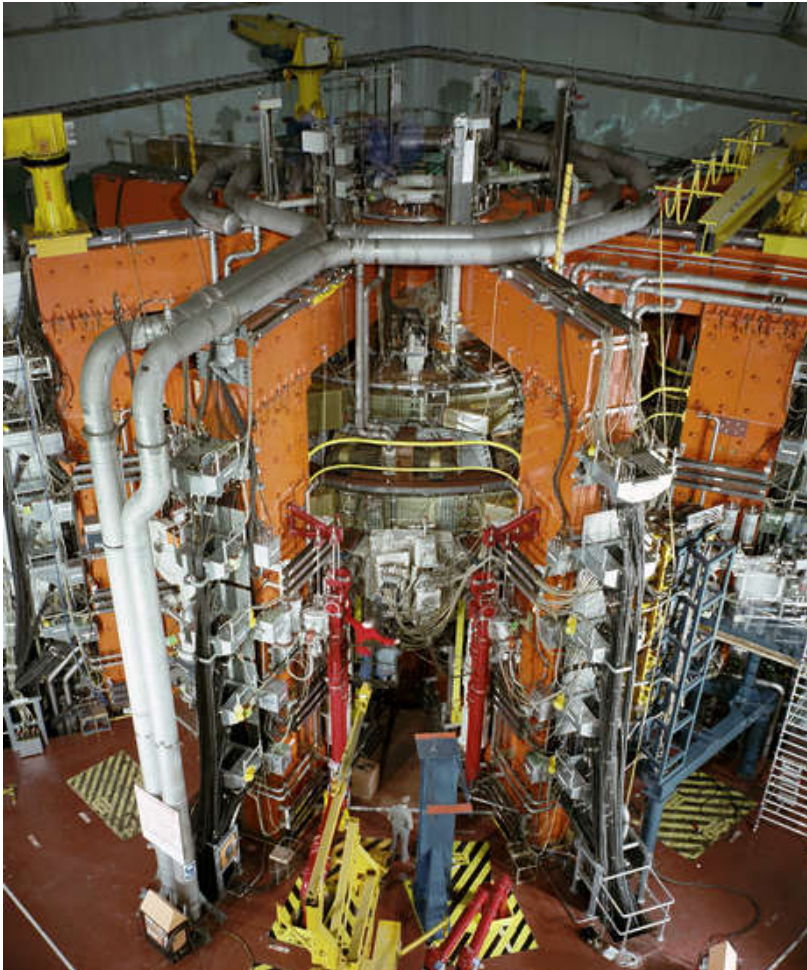


## c. Fusionskraftwerke: Magnetischer Einschluss (Bsp. ITER)

- Plasmaeinschluss durch komplizierte Magnetfeld-Geometrie
- Plasmaheizung:
  - „Stromheizung“ (nur Tokamak): zusätzliche Spule wirkt als Primärspule eines Trrafos, Plasma bildet den Sekundärstrom);
  - Hochfrequenzeinstrahlung;
  - Einschuss hochenergetischer (neutraler) Teilchen.



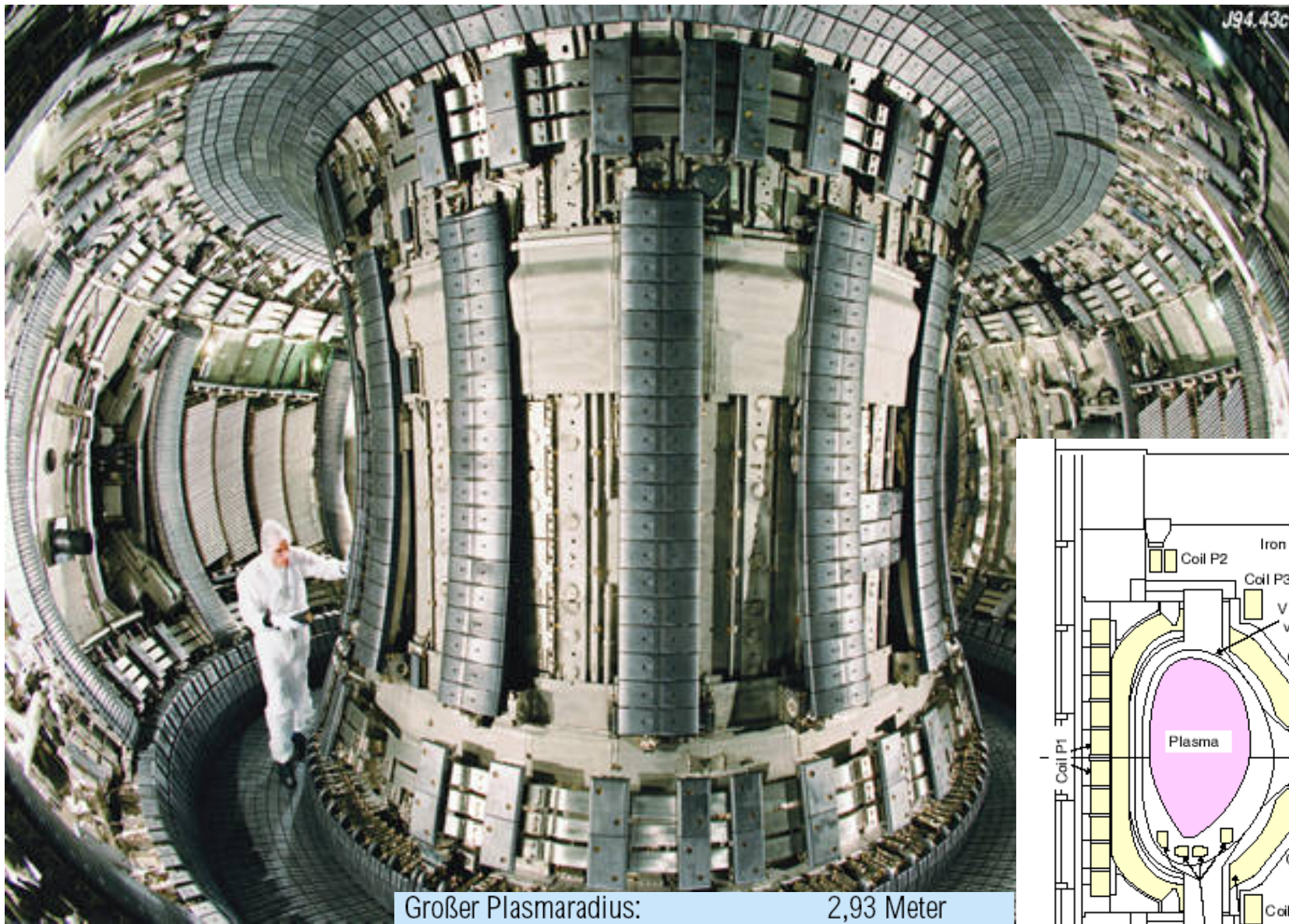
# JET = Joint European Torus (Culham, GB, seit 1983 in Betrieb)



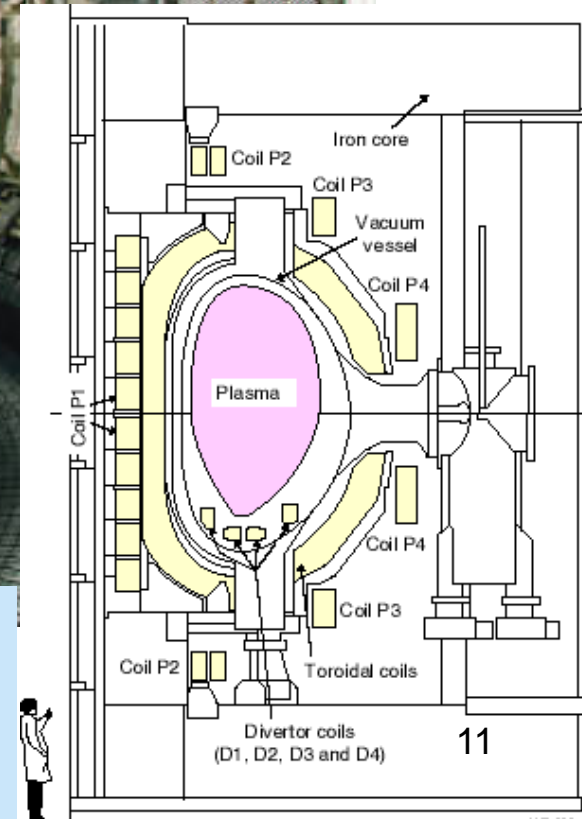
Anzahl der Toroidalfeldspulen:	32
Spulenstrom:	max. 78 Kiloampere
Magnetfeld:	max. 4,0 Tesla
Plasmastrom	max. 5 Megaampere
Entladungsdauer:	max. 60 Sekunden

1991 Erzeugung von 1.8 MW Fusionsleistung  
1997 22 MJ Fusionsenergie in einem Puls  
16 MW Peak Fusionsleistung  
( = 65% der aufgewandten Heizenergie,  
Weltrekord)  
(bisher nur sehr kurzzeitige Fusionspulse)<sup>10</sup>

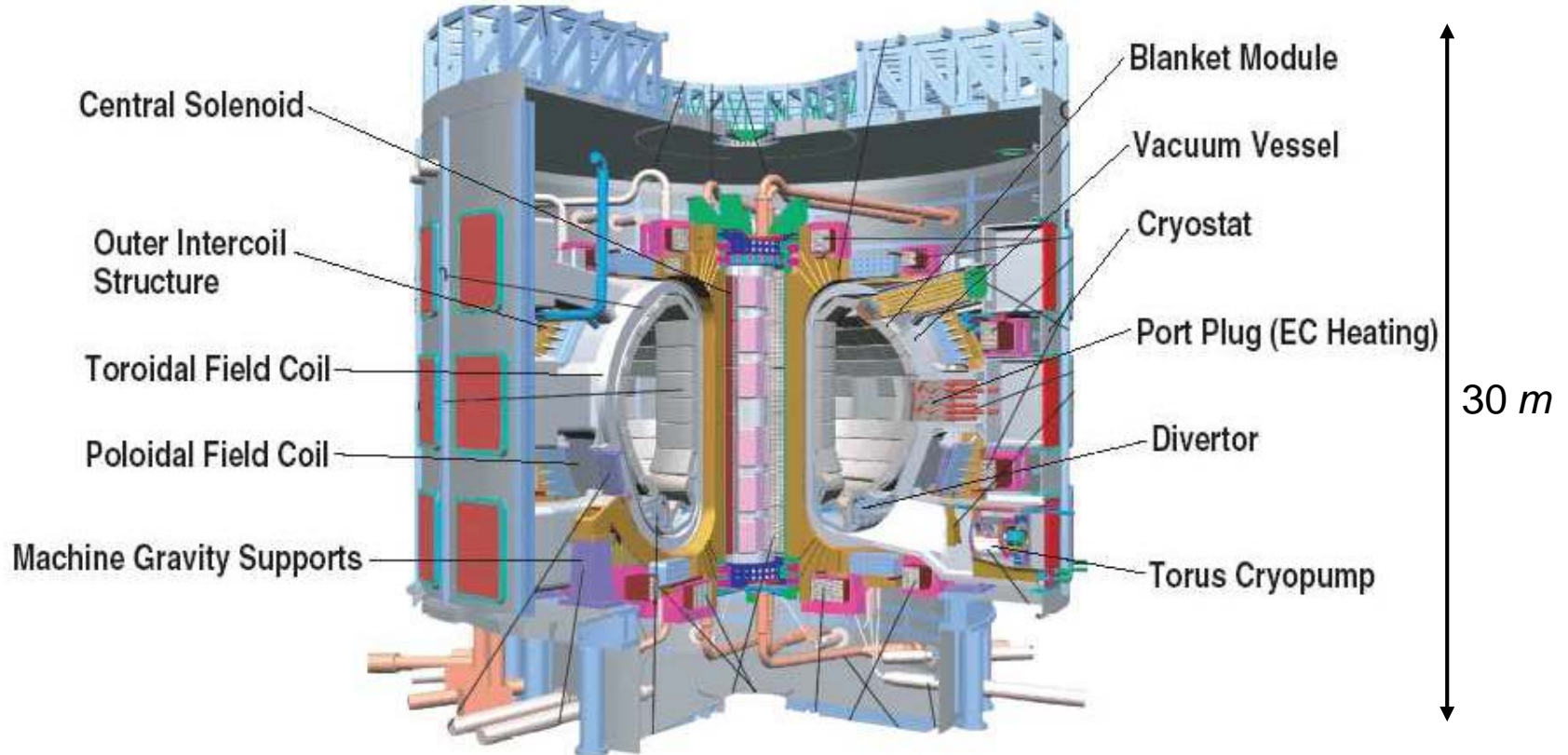




Großer Plasmaradius:	2,93 Meter
Plasmahöhe:	4 Meter
Plasmabreite:	2,5 Meter
Plasmavolumen:	80 Kubikmeter
Plasmagewicht:	0,02 Gramm



# Nächster Schritt: Internationaler Experimentierreaktor ITER (im Bau)



Gesamtradius (über alles):	15 Meter
Höhe (über alles):	30 Meter
Gewicht:	15000 Tonnen
Plasmaradius:	6,2 Meter
Plasmahöhe:	7,4 Meter
Plasmabreite:	4,0 Meter
Plasmavolumen:	837 Kubikmeter

Magnetfeld:	5,3 Tesla
Maximaler Plasmastrom:	15 Megaampere
Heizleistung und Stromtrieb:	73 Megawatt
Wandbelastung durch Neutronen:	0,57 Megawatt pro m <sup>2</sup>
Fusionsleistung:	500 Megawatt
Brenndauer:	≥ 300 Sekunden <sup>12</sup>



## d) Fusionskraftwerke: Trägheitseinschluss

### Kompression eines Brennstoff-Pellets: 2.5 mg d-t

→ Driver beam

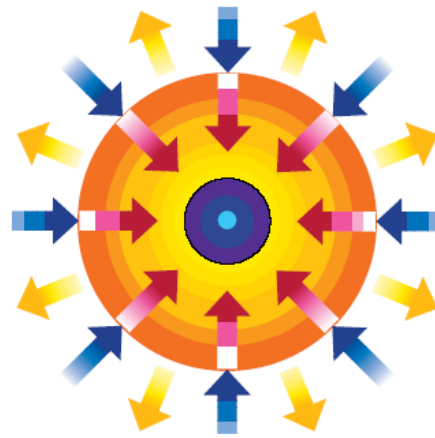
→ Blowoff

→ Inwardly transported thermal energy



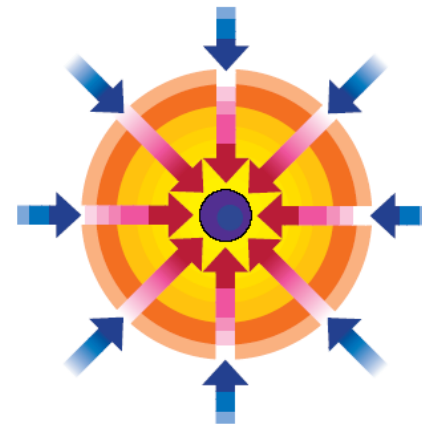
Target heating

A pulse of radiation (light, x-rays, or ions) rapidly heats the surface of a pea-sized fuel capsule.



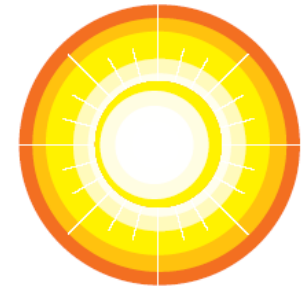
Compression

The fuel is rapidly compressed by the rocket-like blowoff of hot surface material.



Ignition

When the fuel core reaches 20 times the density of lead, it ignites at 100,000,000°C.

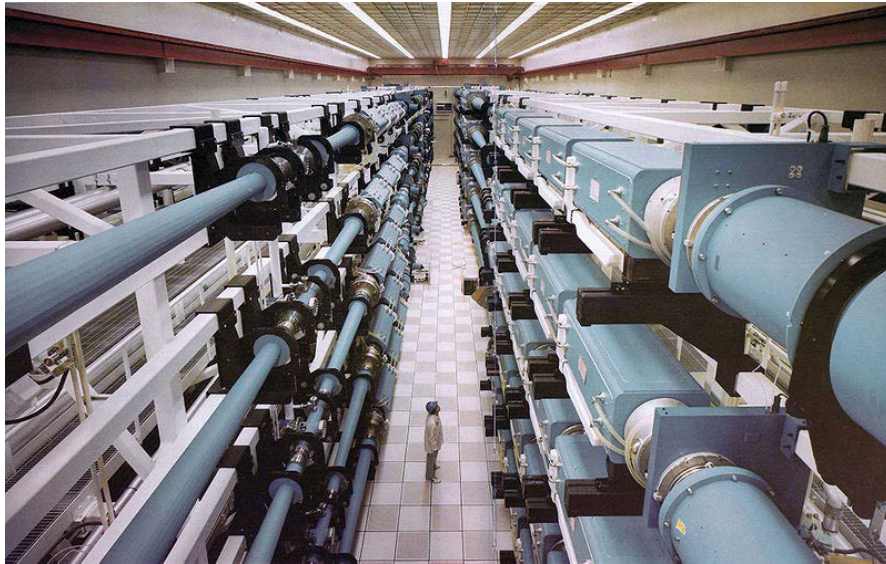


Burn

Thermonuclear burn quickly spreads through the compressed fuel, yielding many times the input energy.

Leistungsbedarf des Laser oder Ionenstrahl-Treibers:  $3 \cdot 10^6 \text{ J}$  in  $0.3 \text{ ns} \leftrightarrow 10^{16} \text{ W}$

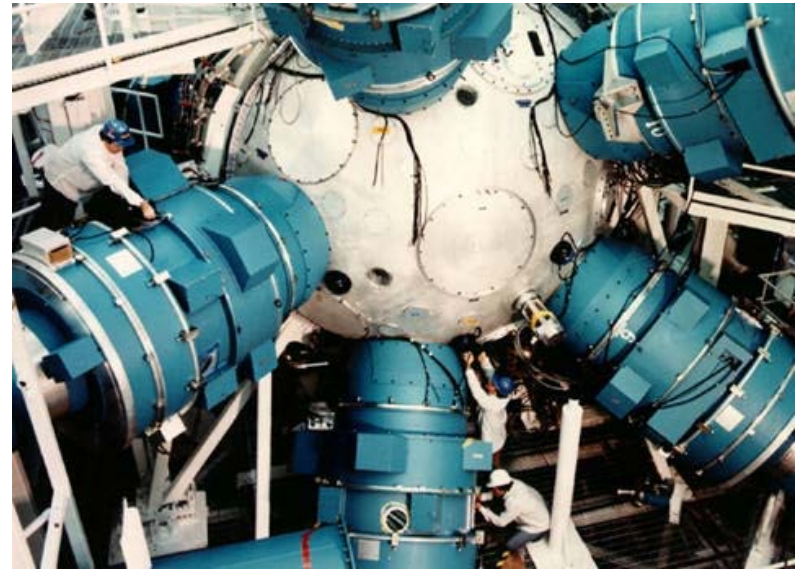
# National Ignition Facility (NIF) am Lawrence Livermore National Laboratorium



NOVA Laseranlage

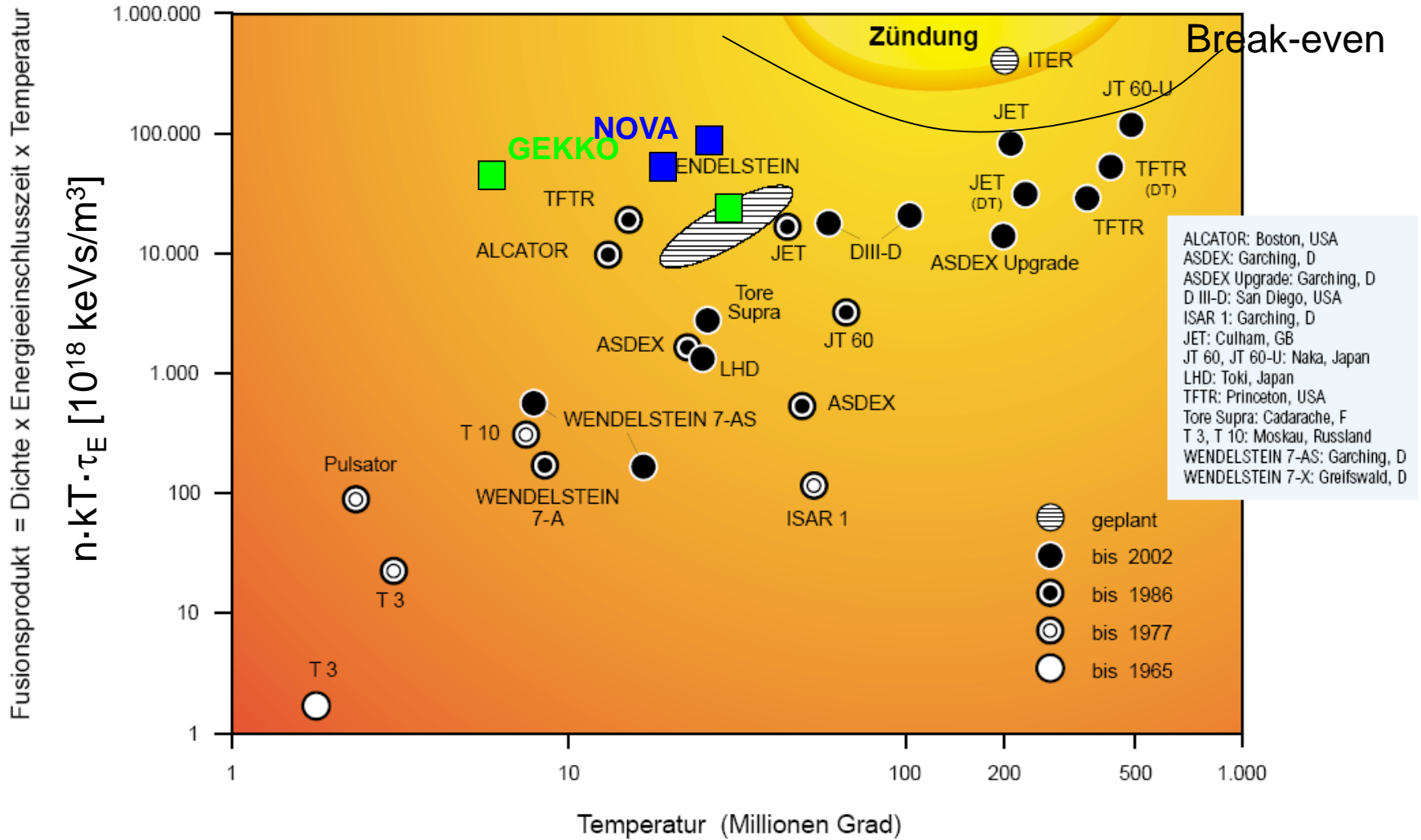
192 Laser

423 TW Spitzenleistung



NOVA Brennkammer

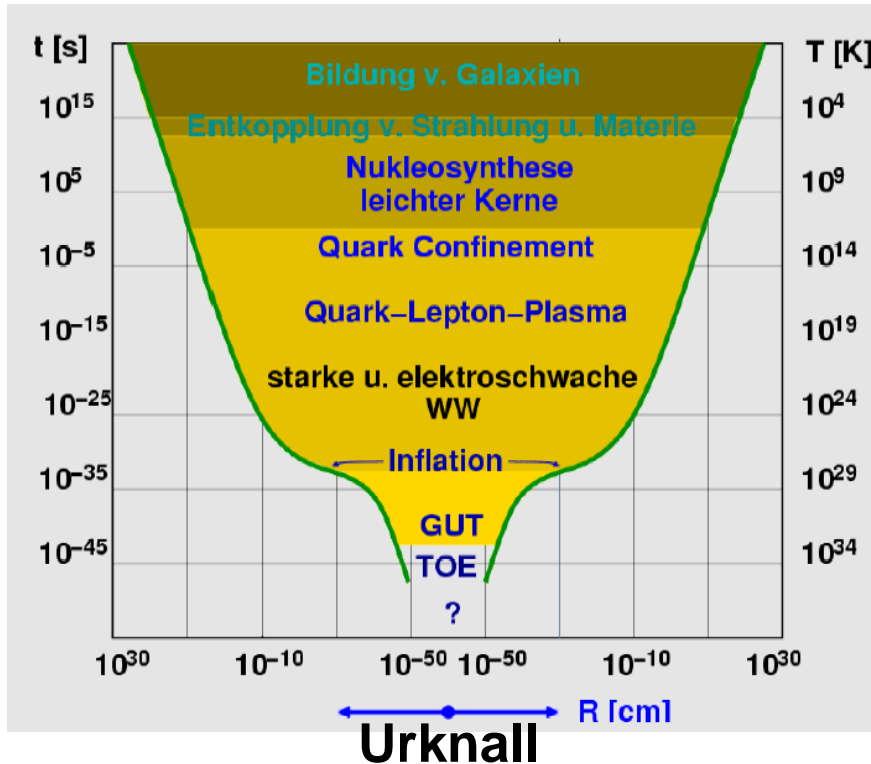
# Zündparameter $n \cdot kT \cdot \tau_E$ in $[10^{18} \text{ keVs/m}^3]$



**Zündparameter**  $ZP = n \cdot kT \cdot \tau_E = p \cdot \tau_E > 6 \cdot 10^{21} \text{ keVs/m}^3$

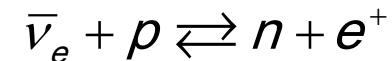
### 3. Primordiale („ursprünglich“) Elementsynthese

Das Universum entstand aus dem Urknall, bei dem sich ein unendlich dichter, heißer Anfangszustand explosionsartig ausdehnte. Mit der Ausdehnung kühlte sich das Universum ab.



Zur Zeit  $t=10^{-6}$ s,  $k_B T=O(100 \text{ MeV})$  bilden sich aus dem Quark-Gluon-Lepton-Plasma die **Hadronen**: im wesentlichen Protonen und Neutronen in gleicher Zahl (Isospin-Symmetrie).

Protonen und Neutronen standen im thermodynamischen Gleichgewicht bis die Neutronenerzeugung durch die Reaktion:



Aufgrund der zu kleinen Energie von Neutrino und Proton unter die Rate der Protonerzeugung fällt ( $m_n - m_p \approx 1.3 \text{ MeV}$ )

Beim „freeze-out“ ( $t=1 \text{ s}$ ,  $k_B T \approx 1 \text{ MeV}$ ):

$$\left. \frac{N_n}{N_p} \right|_{t=1s} \approx \exp\left(-\frac{m_n - m_p}{k_B T}\right) \approx 0.2 \quad 16$$

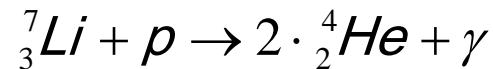
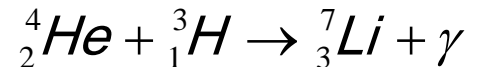


**Bis zur Zeit  $t \approx 300$  s** verändert sich das n/p durch Neutron-Zerfall ( $\tau \approx 880$  s) von  **$\approx 0.2$  auf etwa  $0.135$** . Bis zu dieser Zeit herrscht Gleichgewicht zwischen der Bildung von  ${}^2\text{H}$  (d) und der Photodissoziationsreaktion:



Danach ( $k_{\text{B}}T < 100$  KeV) ist die Dichte hochenergetischer Photonen soweit ausgedünnt, dass die Photospaltung nicht mehr möglich ist  **$\rightarrow$  Bildung von  ${}^2\text{H}$  (d).**

Aufgrund weiterer **Fusionsreaktionen, p+d und n+d**, entstehen  ${}^3\text{He}$  und  ${}^3\text{H}$  und im weiteren Verlauf auch  ${}^4\text{He}$ . Aus Fusion von He und H entstehendes Li wird sofort wieder zerstört:



In dieser Phase werden fast **alle Neutronen in  ${}^4\text{He}$  gebunden**, das zu diesem Zeitpunkt **24% der Masse** des Universum ausmacht.  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$  und  ${}^7\text{Li}$  sind nur in Spuren vorhanden ( $10^{-5} \dots 10^{-9}$ ). Da es keine stabilen Kerne mit  $A=5,8$  gibt (5, bzw. 8-Gap), war es zu dieser Zeit nicht möglich schwerere Element zu bilden. **Die verbleibende Masse (76%) wird durch die Protonen gebildet.**

**Die Urknall-Nukleosynthese war nach  $t \approx 30$  min abgeschlossen.**

## 4. Sterneneentwicklung und Elementsynthese bis Eisen

Sterne entstehen durch Akkretion und Kontraktion des interstellaren Gases -  $^1\text{H}$  und  $^4\text{He}$ : Sind Temperatur und Druck im Innern des Gases hoch genug, kommt es zur Kernfusion. Der entstehende Strahlungsdruck wirkt der weiteren Kontraktion des Sterns aufgrund der Gravitation entgegen.

**H-Brennen:** Um Kerne mit hohen Kernladungen zu fusionieren sind sehr hohe Temperaturen notwendig um die Coulomb-Barriere zu überwinden. Zuerst fusioniert deshalb  $^1\text{H}$  bei einer Temperatur von  $T \geq 10^7 \text{ K}$ .

**He-Brennen:** Wenn der  $^1\text{H}$ -Vorrat erschöpft ist. Kann der Stern dem Gravitationsdruck nicht mehr standhalten und kollabiert.

$M \ll M_{\text{Sonne}}$ :  $^4\text{He}$ -Brennen kann nicht gezündet werden, Stern kollabiert und es entsteht ein planetengroßer „**Weißer Zwerg**“.

$M \geq M_{\text{Sonne}}$ : bei  **$T \approx 10^8 \text{ K}$  setzt He-Brennen** ein. Ein direktes Verschmelzen von 2  $^4\text{He}$  ist wegen des  $A=8$  gaps nicht möglich. Stattdessen verschmelzen über mehrere Schritte  $3 \cdot ^4\text{He}$  zu  $^{12}\text{C}$ .

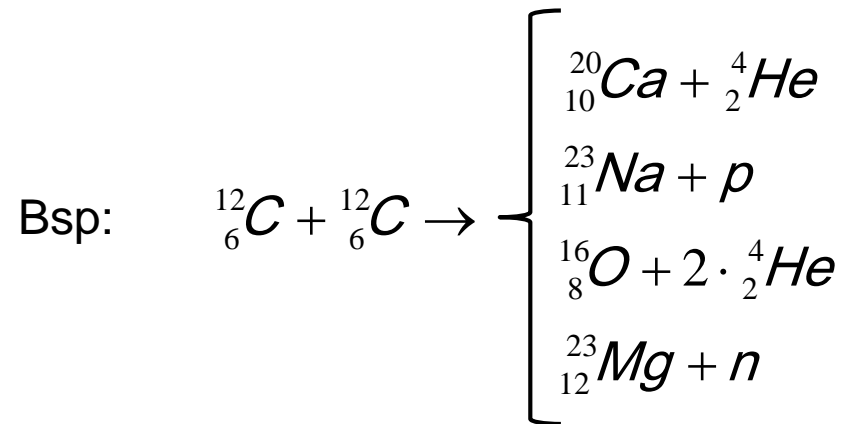
Diese Sterne Brennen jetzt auch in der Außenschale und dehnen sich dadurch stark aus: „**Roten Riesen**“

## Fusion bis zu Eisen:

Nachdem der He-Vorrat verbraucht ist, besteht Stern vor allem aus  $^{12}\text{C}$ .

$M \approx M_{\text{sonne}}$ : → „weißer Zwerg“

$M \gg M_{\text{sonne}}$ : Massive Sterne durchlaufen weitere Brennphasen: direkte Fusion von  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{28}\text{Si}$  sind möglich.



Auf diese Weise können alle Elemente zwischen  $^{12}\text{C}$  und  $^{56}\text{Fe}$  erzeugt werden. Es entsteht eine Schalenstruktur des Stern. Wenn das Zentrum aus Eisen besteht gibt es keine Energie mehr, die dem Gravitationsdruck entgegenwirkt:

**Stern kollabiert → Super-Nova.**

## Brennphasen : Stern mit $M = 25 M_{\odot}$

Fusion of	Time to complete	Core temperature (K)	Core density ( $\text{kg m}^{-3}$ )
H	$7 \times 10^6$ yr	$6 \times 10^7$	$5 \times 10^4$
He	$5 \times 10^5$ yr	$2 \times 10^8$	$7 \times 10^5$
C	600 yr	$9 \times 10^8$	$2 \times 10^8$
Ne	1 yr	$1.7 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
O	0.5 yr	$2.3 \times 10^9$	$1 \times 10^{10}$
Si	1 day	$4.1 \times 10^9$	$3 \times 10^{10}$

Brenndauern werden mit steigender Temperatur immer kürzer.

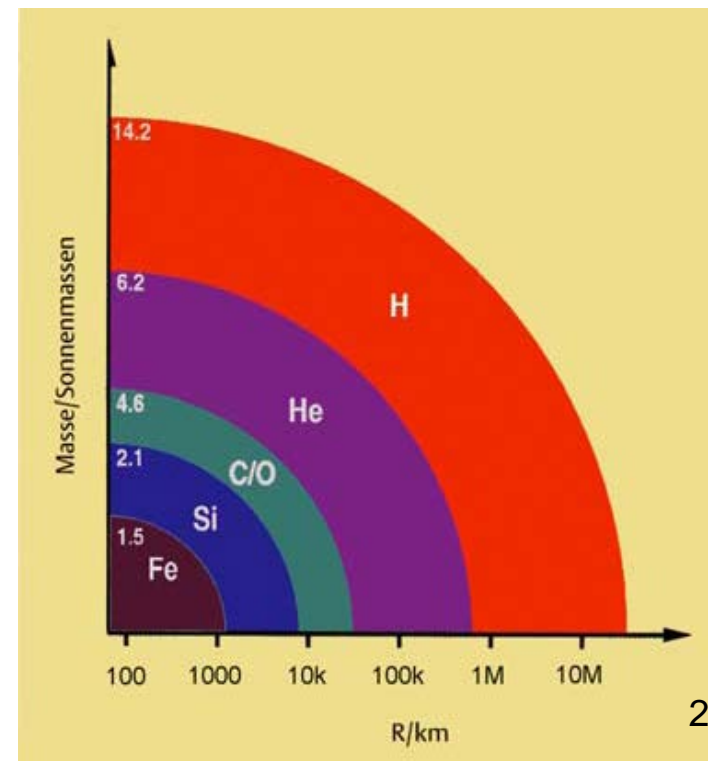
## Endstadium :

Im Endstadium hat ein massereicher Stern eine Zwiebelschalenstruktur:

Eisenkern und Schalen in denen noch Fusionsprozesse laufen.

Stark aufgebläht: Roter Riesenstern.

Gravitationsdruck zu hoch  $\rightarrow$  Super-Nova.



## 5. Synthese schwerer Elemente

Die Fusion der Elemente im Brennprozess der Sterne stoppt bei Eisen. Schwere Kerne werden durch eine Sequenz von Neutronen-Anlagerungen und  $\beta$ -Zerfällen erzeugt. Dabei fängt ein „Saat“-Kern Neutronen ein, bis eine radioaktives Isotop entsteht  $\rightarrow$  durch  $\beta$  Zerfall entsteht ein neues Element. Auch Proton-Anlagerung (p-Prozesse) möglich.

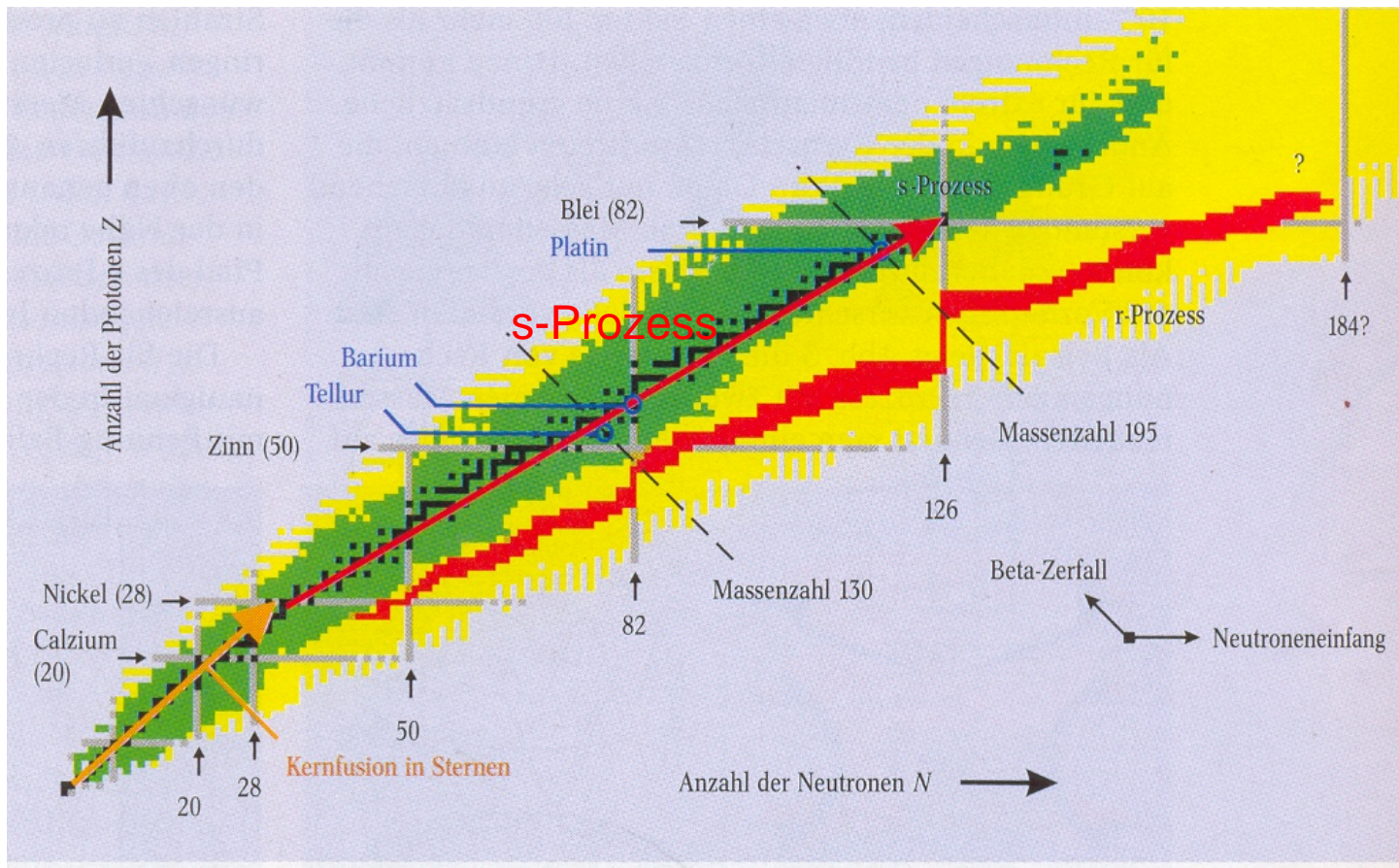
Man unterscheidet 2 verschiedene Prozesse der Neutronenanlagerung:

r-Prozess („rapid“ neutron capture):

- Schnelle Anlagerung von Neutronen in einer sehr Neutronen reichen Umgebung (z.B. Super-Nova Explosionen, oder in der Verschmelzung zweier Neutronen-Sterne – Gegenstand aktueller Forschung).
- Es werden mehrere Neutronen eingefangen bevor ein  $\beta$ -Zerfall stattfindet: mittlere **Neutroneneinfangzeit typ.  $10^{-4}$  s**, sehr viel kürzer als Halbwertszeit der entsprechenden  $\beta$ -Zerfälle (Neutronenfluss:  $10^{22}$  n  $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).
- Nur etwa bis  $A=260$  da schwerere Kerne spontan zerfallen.
- Synthesepfad etwa 10-20 Masseneinheiten zum Stabilitätstal verschoben
- Entstehung neutronenreicher  $\beta$ -instabiler Kerne, die sich nach ihrer Bildung über eine Reihe von  $\beta$  Zerfällen in stabile Kerne umwandeln.

## s-Prozess ("Slow neutron capture")

- Neutroneneinfänge sind **langsamer** als  $\beta$  Zerfall. Durch  $\beta$  Zerfall entstehen stabile Kerne  $\Rightarrow$  Synthesepfad läuft entlang des Stabilitätstals.
- Prozess läuft in der Außenhülle von "Roten Riesen" ab (bis  $A=210$ ) und erklärt die Entstehung der Elemente bis  $Z=82$  (Kerne mit größerem  $Z$  nicht mehr stabil genug um Neutronen anlagern zu können).



Stabile  
Isotope

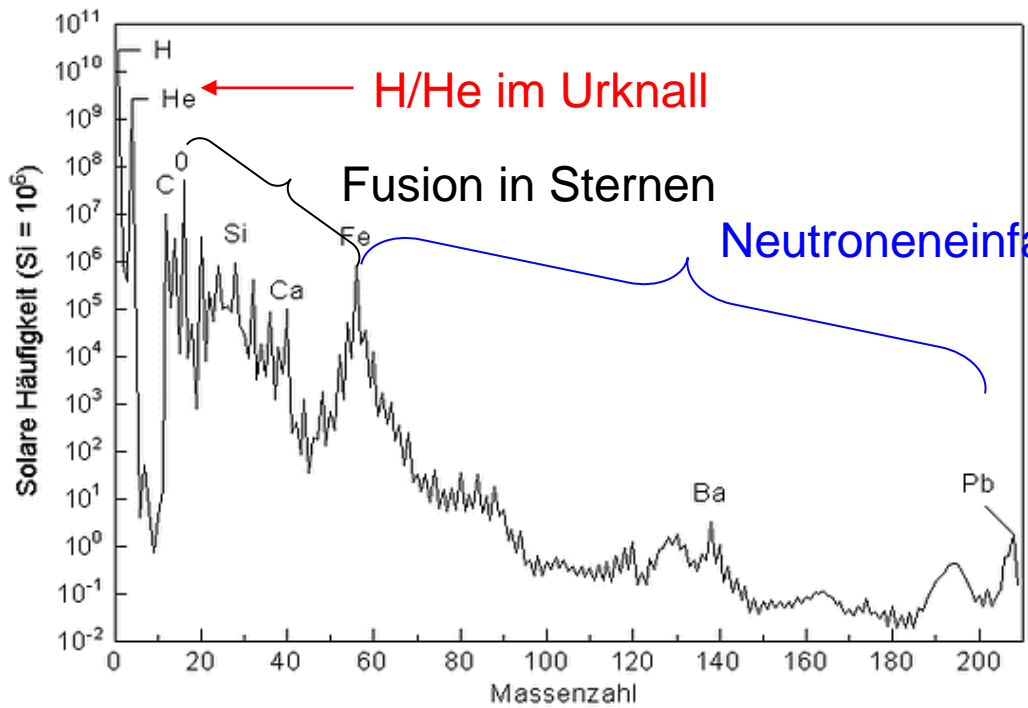
Massen  
bekannt

Theoretisch  
Vorhergesagt

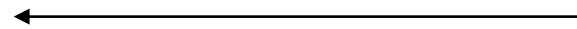
r-Prozess



# Isotopenhäufigkeit im Sonnensystem:



Isotopenhäufigkeit im Sonnensystem relativ zur Häufigkeit von Si die auf 10<sup>6</sup> festgelegt ist.



## Fazit:

Bis auf H und He stammen alle Elemente aus denen die Erde aufgebaut ist aus dem Innern von Sternen und wurden vermutlich sogar mehrmals durch Super-Nova-Explosionen freigesetzt.