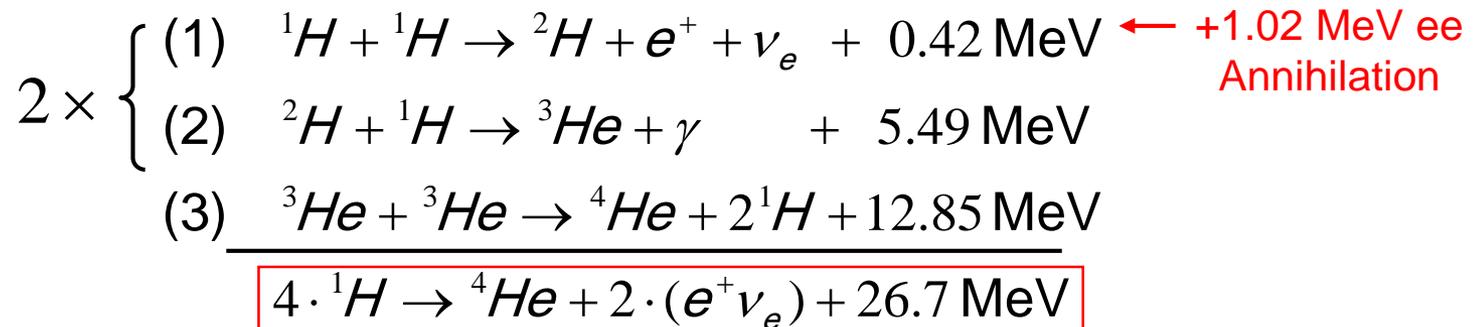


X. Fusion und Elementsynthese

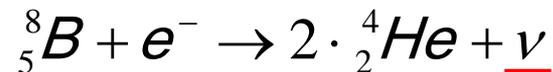
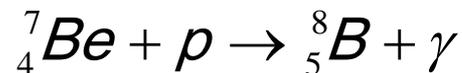
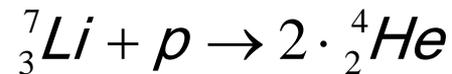
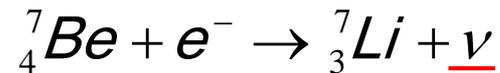
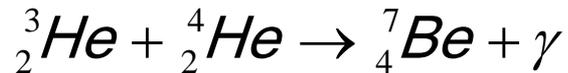
1. Wasserstoff-Fusion in der Sonne

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 kW/m^3 (im Zentrum) verhältnismäßig niedrig (zum Vergleich KKW: 10^5 kW/m^3), ihre Gesamtlebensdauer dadurch aber sehr groß ($\sim 10^{10}$ Jahre). pp-Zyklus eignet sich deshalb nicht für Fusionsreaktoren auf der Erde.

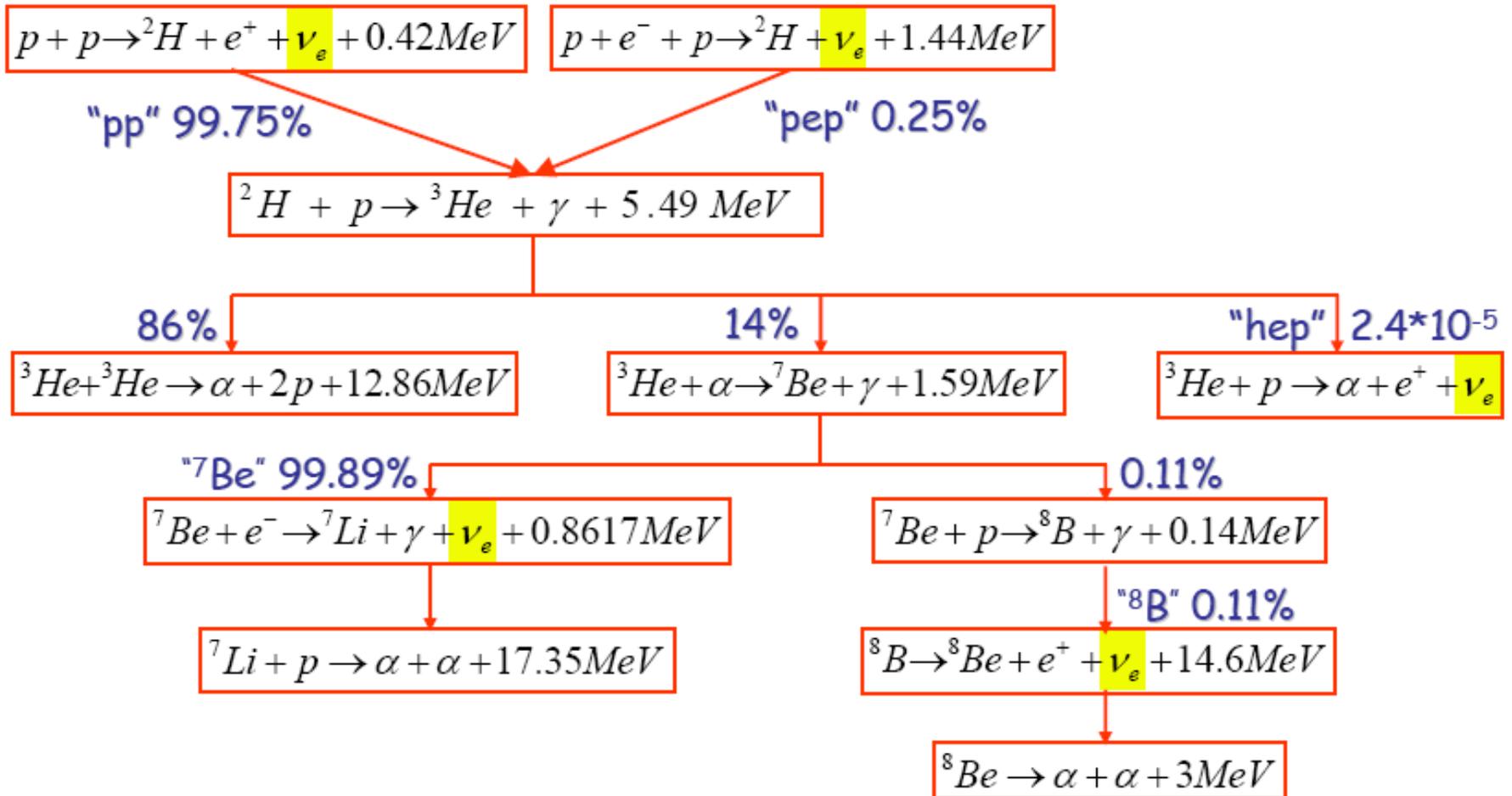
Für die Energiegewinnung in der Sonne von geringerer Bedeutung sind die folgenden Seitenzweige des pp-Zyklus:



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**

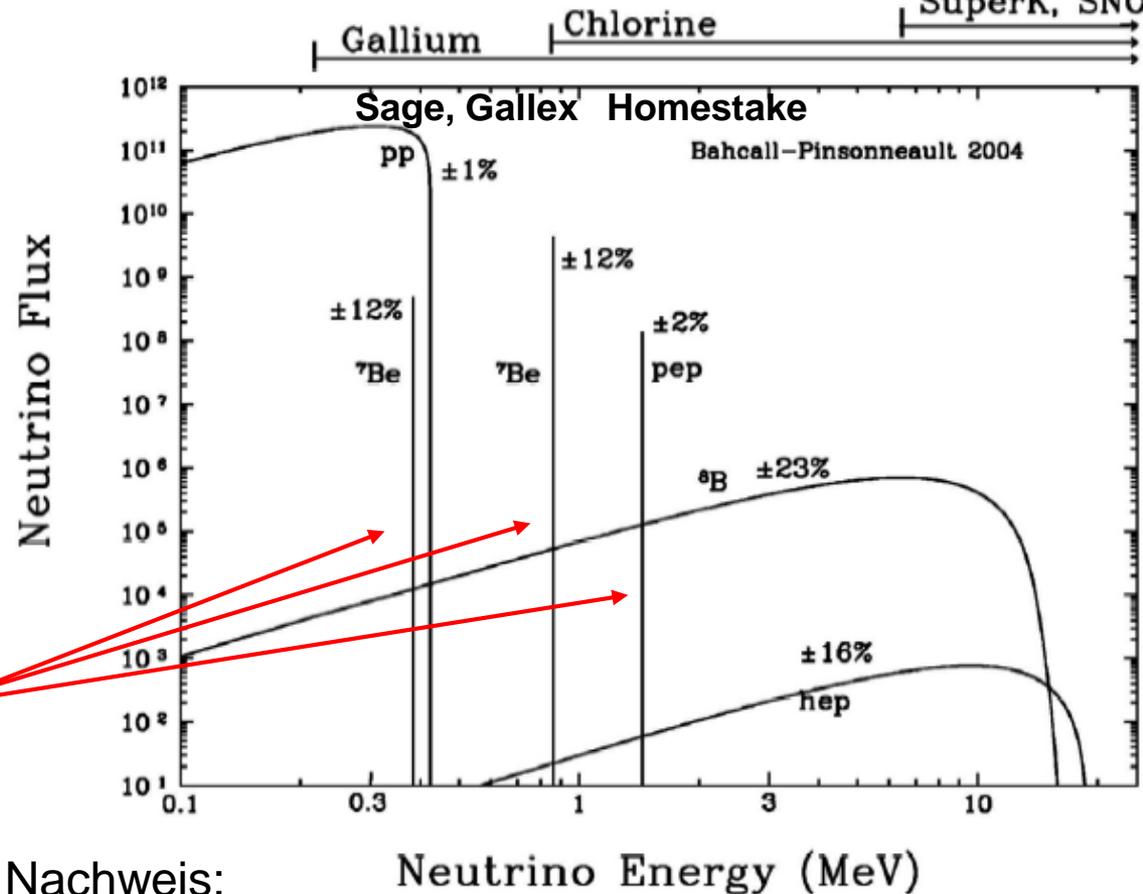
Solange der Proton-Vorrat (Wasserstoff ${}^1\text{H}$) reicht, brennt der Stern stabil. Für die Sonne beträgt die Gesamtbrenndauer etwa 10^{10} Jahre wobei die Hälfte bereits vergangen ist. Die lange Lebensdauer ist die Folge des „langsamen Brennens“ aufgrund der schwachen Wechselwirkung.

Vollständiger Proton-Proton-Fusionszyklus der Sonne



Spektrum der Sonnen-Neutrinos

H₂O
SuperK, SNO



2-body decays

Neutrino Detektoren zum Nachweis:

Cl₂ 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 $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e$ $E_\nu > 0.2 \text{ MeV}$

H₂O Detektoren Elastische Streuung: $\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$ $E_\nu > 5 \text{ MeV}$

Man beobachtet ein Defizit für alle Sonnenneutrinos (ν_e) → Neutrinooszillation. ⁴

2. Fusionsreaktoren auf der Erde

„Sonnenfeuer auf der Erde“:

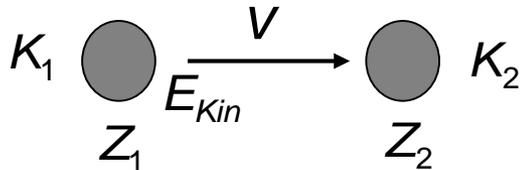
Da der Fusionsprozess der Sonne auf einer schwachen Reaktion basiert eignet er sich nicht zur Realisierung eines Fusionsreaktors (Energiedichte 0.3 kW/m^3 ist sehr niedrig!). Stattdessen müssen Prozesse genutzt werden, die alleine auf der starken Wechselwirkung beruhen:



↙ Aussichtsreichster Prozess: mit der Erzeugung von ${}^3\text{H}$ 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:

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

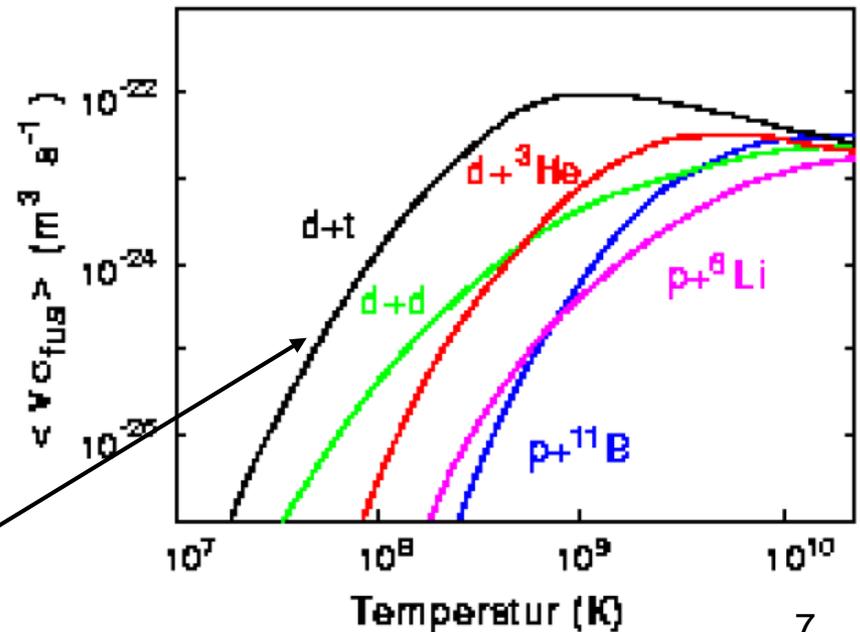


Z_1, Z_2 klein (= 1 !!)

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 τ_E des Plasmas größer ist als die Zeit bis zu einem Fusionsstoß τ_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)

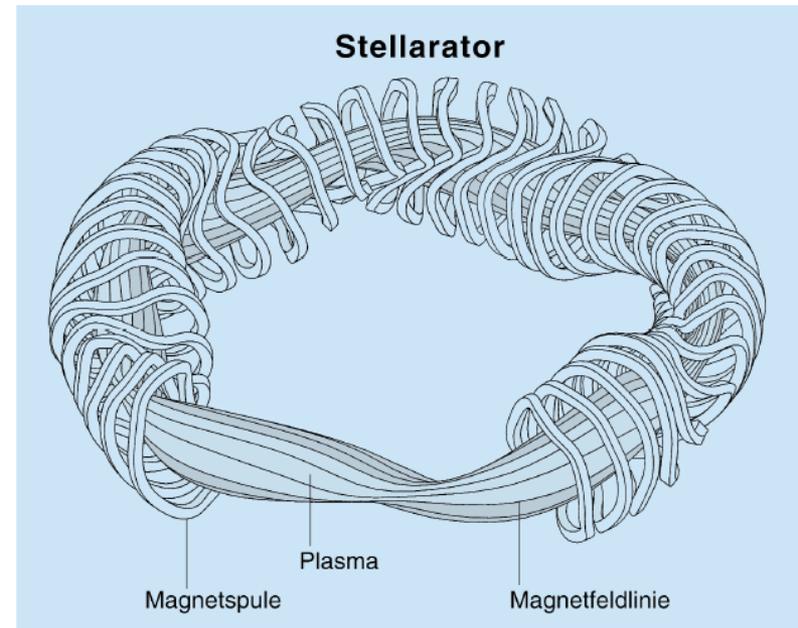
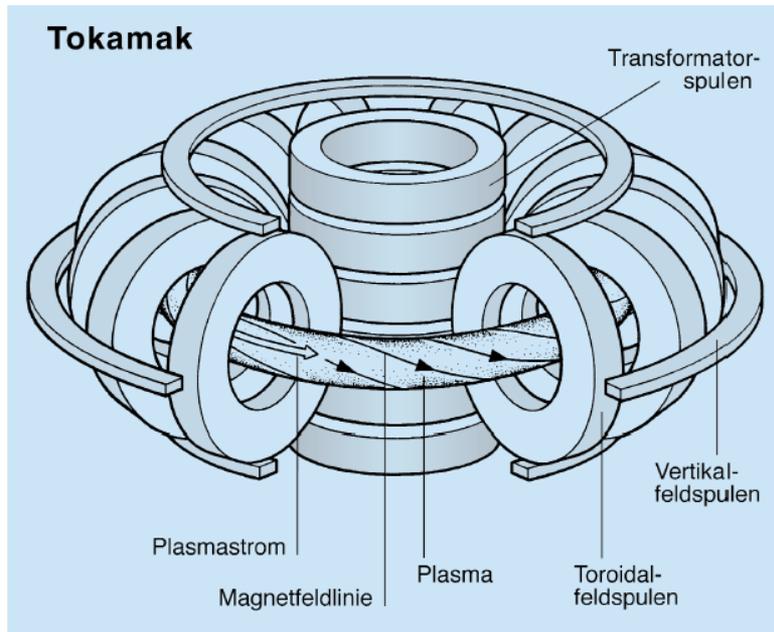
b. Einschluss des heißen Plasmas

- 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) $\tau_E \approx O(10^{-10} \text{ s})$, $n \approx 10^{31} / \text{m}^3$

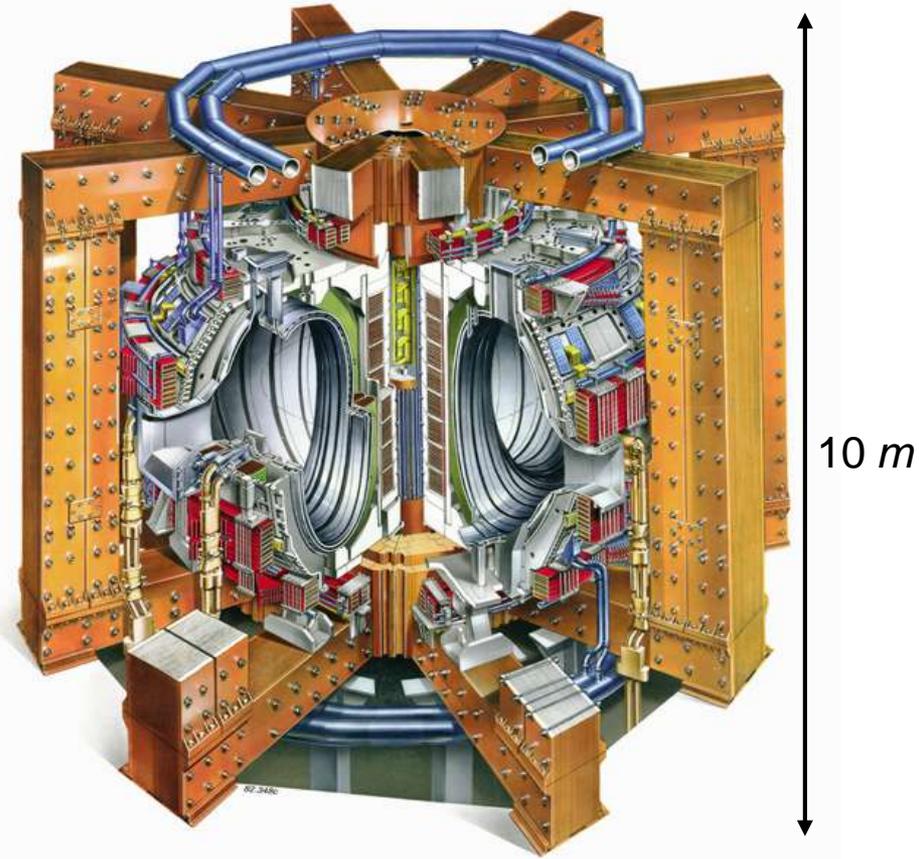
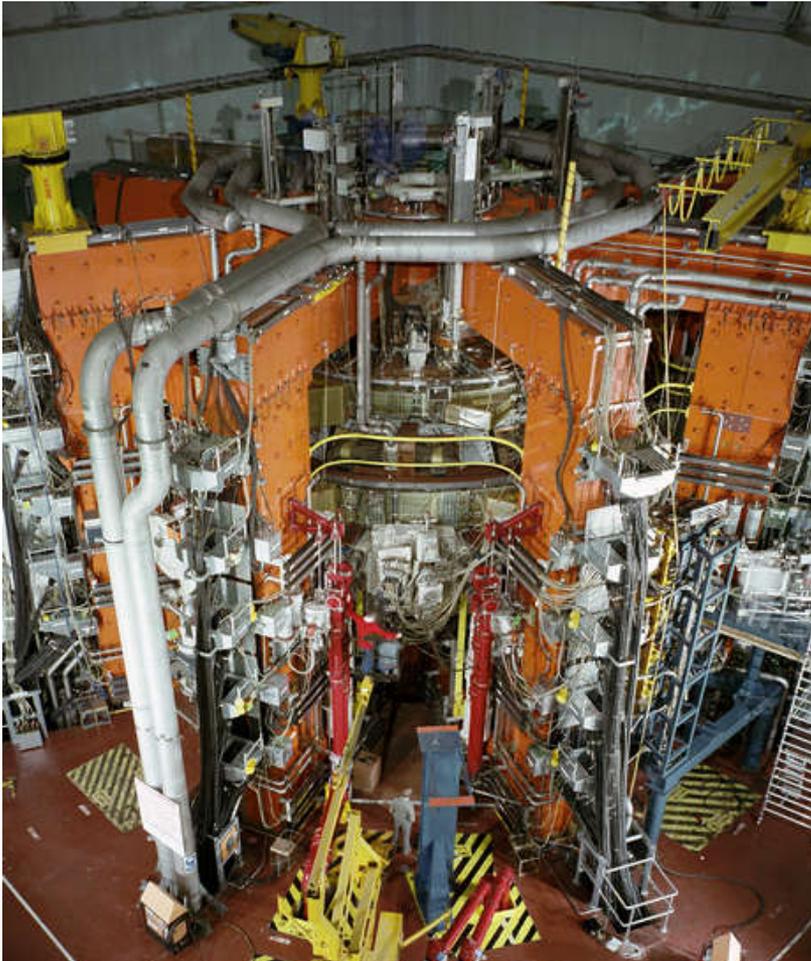
Zünd-
bedingung
bei $T=10^8$ K

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.

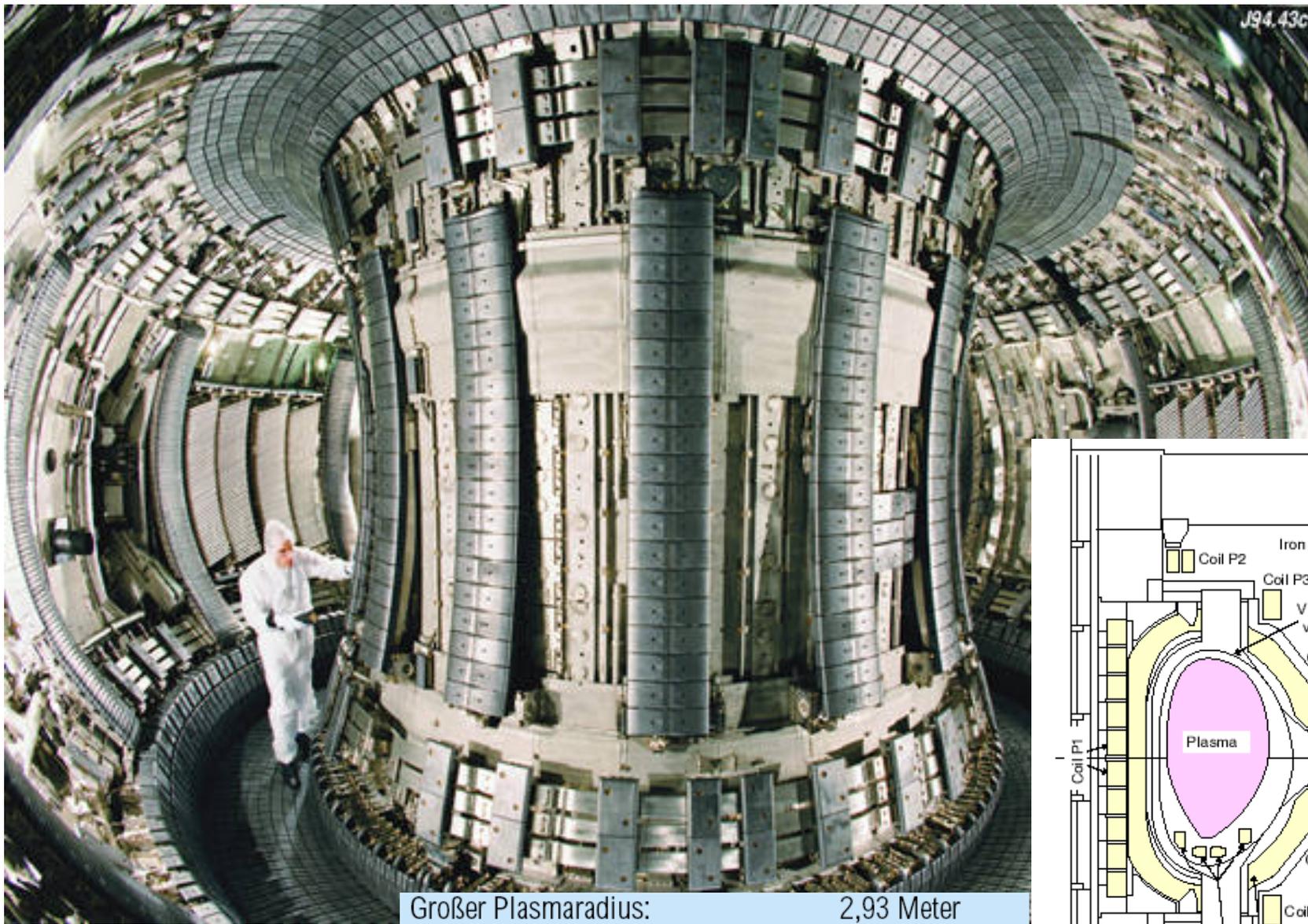


JET = Joint European Torus (Culham, GB, seit 1983 in Betrieb)

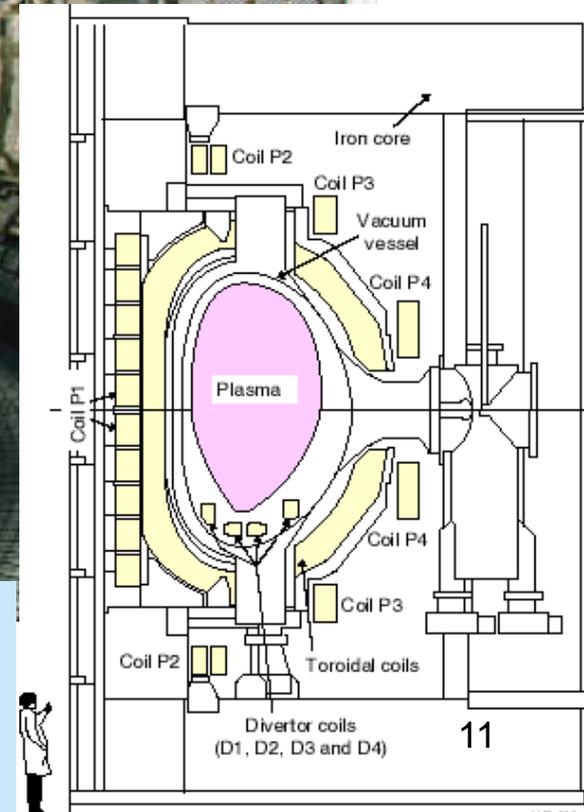


| | |
|--------------------------------|--------------------|
| Anzahl der Toroidalfeldspulen: | 32 |
| Spulenstrom: | max. 78 Kiloampere |
| Magnetfeld: | max. 4,0 Tesla |
| Plasmastrom | max. 5 Megaampere |
| Entladungsdauer: | max. 60 Sekunden |

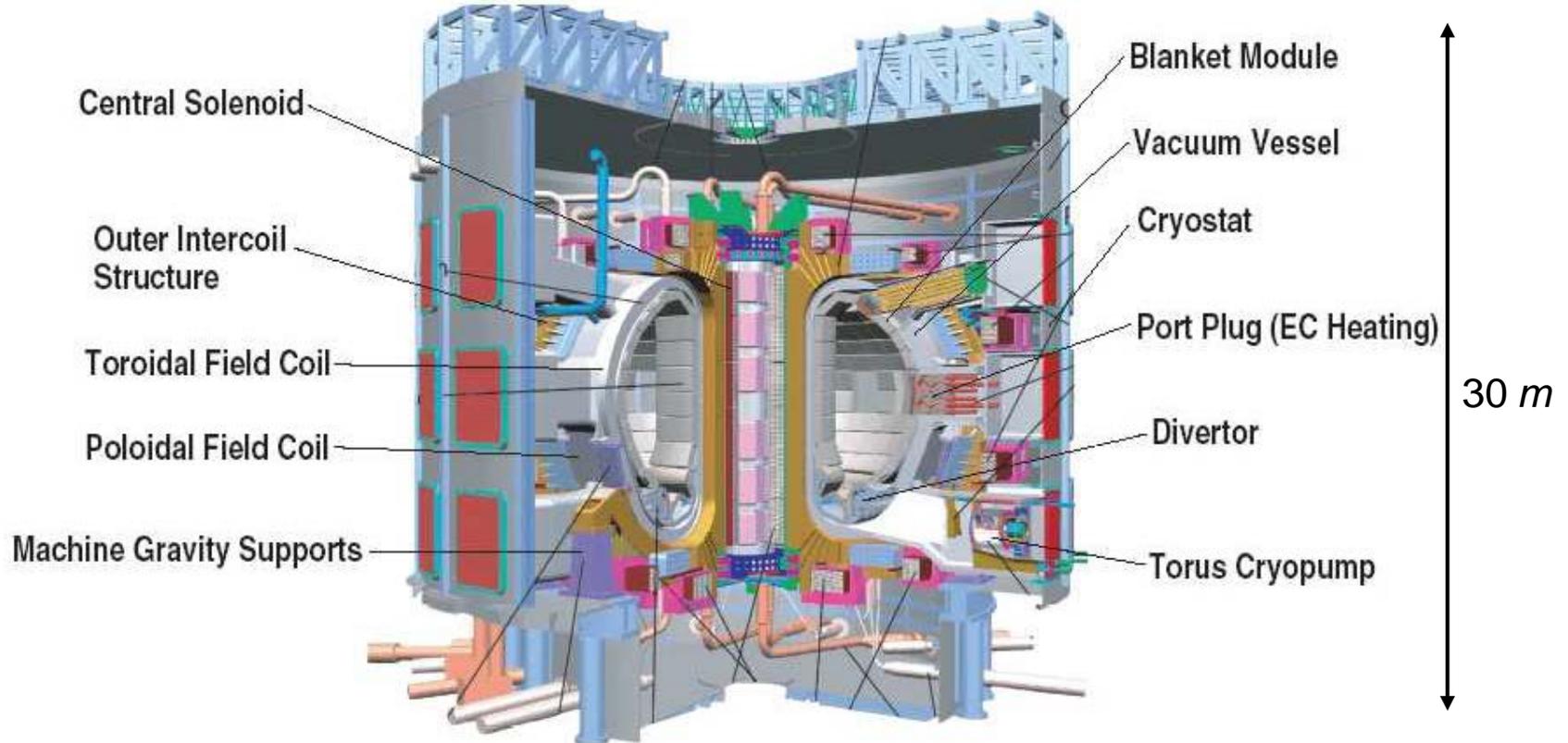
1991 Erzeugung von 1.8 MW Fusionsleistung
1997 22 MJ Fusionsenergie in einem Puls
16 MW Peak Fusionsleistung
(= 65% der aufgewandten Heizenergie,
Weltrekord)
(bisher nur sehr kurzzeitige Fusionspulse)¹⁰



| | |
|----------------------|---------------|
| 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 ² |
| Fusionsleistung: | 500 Megawatt |
| Brenndauer: | ≥ 300 Sekunden ¹² |

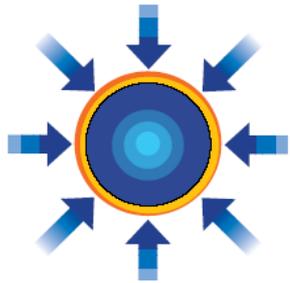
d) Fusionskraftwerke: Trägheitseinschluss

Kompression eines Brennstoff-Pellets: 2.5 mg d-t

➔ Driver beam

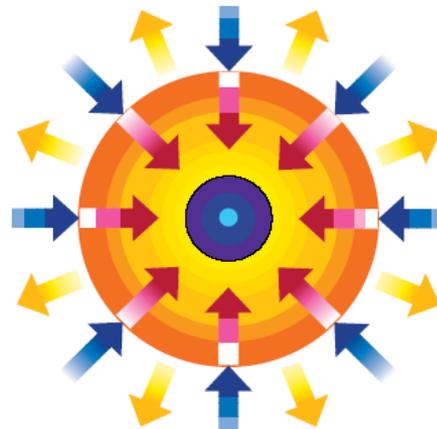
➔ Blowoff

➔ Inwardly transported thermal energy



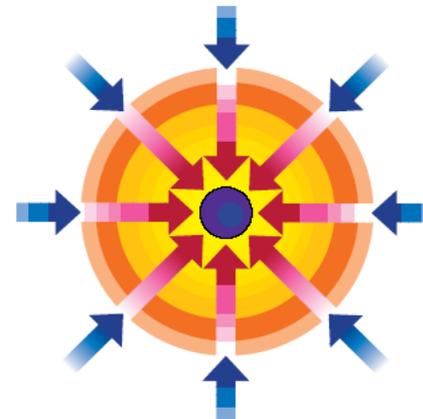
Target heating

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.

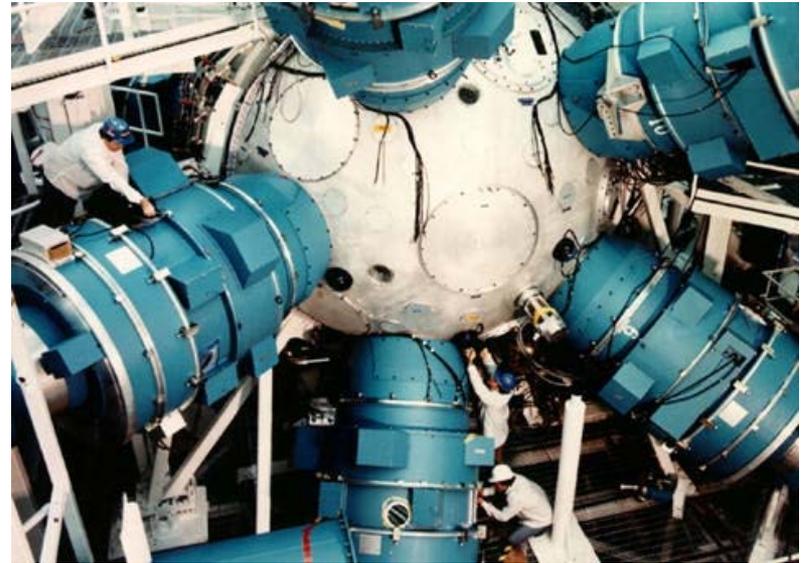
Leistungsbedarf des Laser oder Ionenstrahl-Treibers: $3 \cdot 10^6 \text{ J}$ in $0.3 \text{ ns} \leftrightarrow 10^{16} \text{ W}$

National Ignition Facility (NIF) am Lawrence Livermore National Laboratorium



NOVA Laseranlage

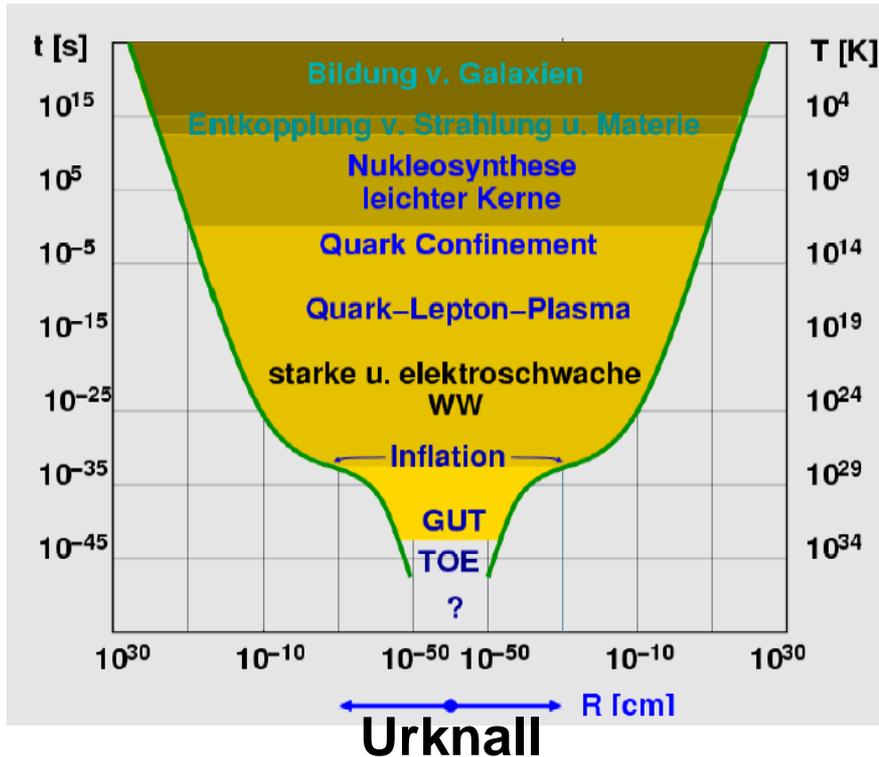
192 Laser
423 TW Spitzenleistung



NOVA Brennkammer

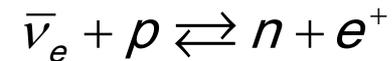
3. Primordiale („ursprünglich“) Elementsynthese

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 $t=10^{-6}\text{s}$, $k_B T=O(100\text{ MeV})$ 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“ ($t=1\text{ s}$, $k_B T \approx 1\text{ MeV}$):

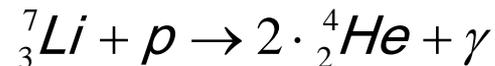
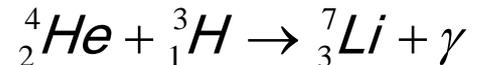
$$\left. \frac{N_n}{N_p} \right|_{t=1\text{s}} \approx \exp\left(-\frac{m_n - m_p}{k_B T}\right) \approx 0.2 \quad 16$$

Bis zur Zeit $t \approx 300$ s verändert sich das n/p durch Neutron-Zerfall ($\tau \approx 880$ s) von **≈ 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 **→ 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 - ^1H und ^4He : 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 ^1H bei einer Temperatur von $T \geq 10^7 \text{ K}$.

He-Brennen: Wenn der ^1H -Vorrat erschöpft ist. Kann der Stern dem Gravitationsdruck nicht mehr standhalten und kollabiert.

$M \ll M_{\text{Sonne}}$: ^4He -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 ^4He ist wegen des $A=8$ gaps nicht möglich. Stattdessen verschmelzen über mehrere Schritte $3 \cdot ^4\text{He}$ zu ^{12}C .

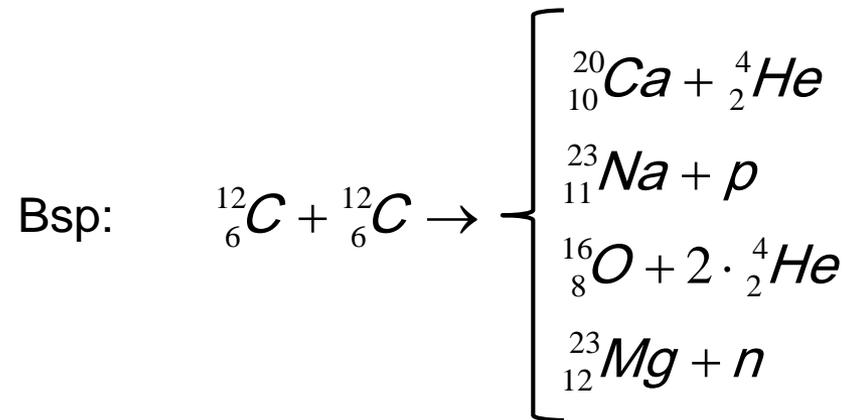
Diese Sterne Brennen jetzt auch in der Außenschale und dehnen sich dadurch stark aus: „Roten Riesen“

Fusion bis zu Eisen:

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

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

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



Auf diese Weise können alle Elemente zwischen ^{12}C und ^{56}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 (kg m^{-3}) |
|-----------|--------------------|----------------------|-------------------------------------|
| H | 7×10^6 yr | 6×10^7 | 5×10^4 |
| He | 5×10^5 yr | 2×10^8 | 7×10^5 |
| C | 600 yr | 9×10^8 | 2×10^8 |
| Ne | 1 yr | 1.7×10^9 | 4×10^9 |
| O | 0.5 yr | 2.3×10^9 | 1×10^{10} |
| Si | 1 day | 4.1×10^9 | 3×10^{10} |

Brenndauern werden mit steigender Temperatur immer kürzer.

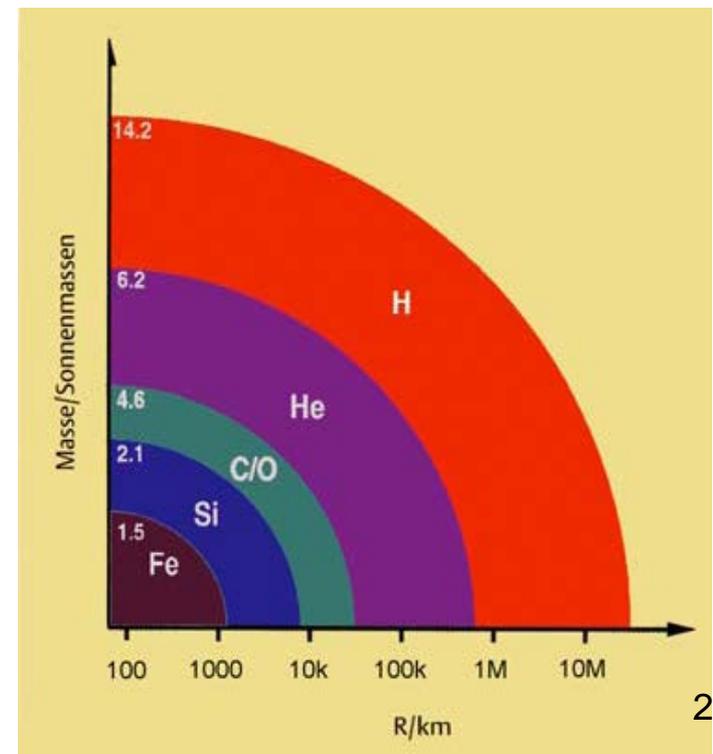
Endstadium :

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 β -Zerfällen erzeugt. Dabei fängt ein „Saat“-Kern Neutronen ein, bis eine radioaktives Isotop entsteht \rightarrow durch β Zerfall entsteht ein neues Element. Auch Proton-Anlagerung (p-Prozesse) möglich.

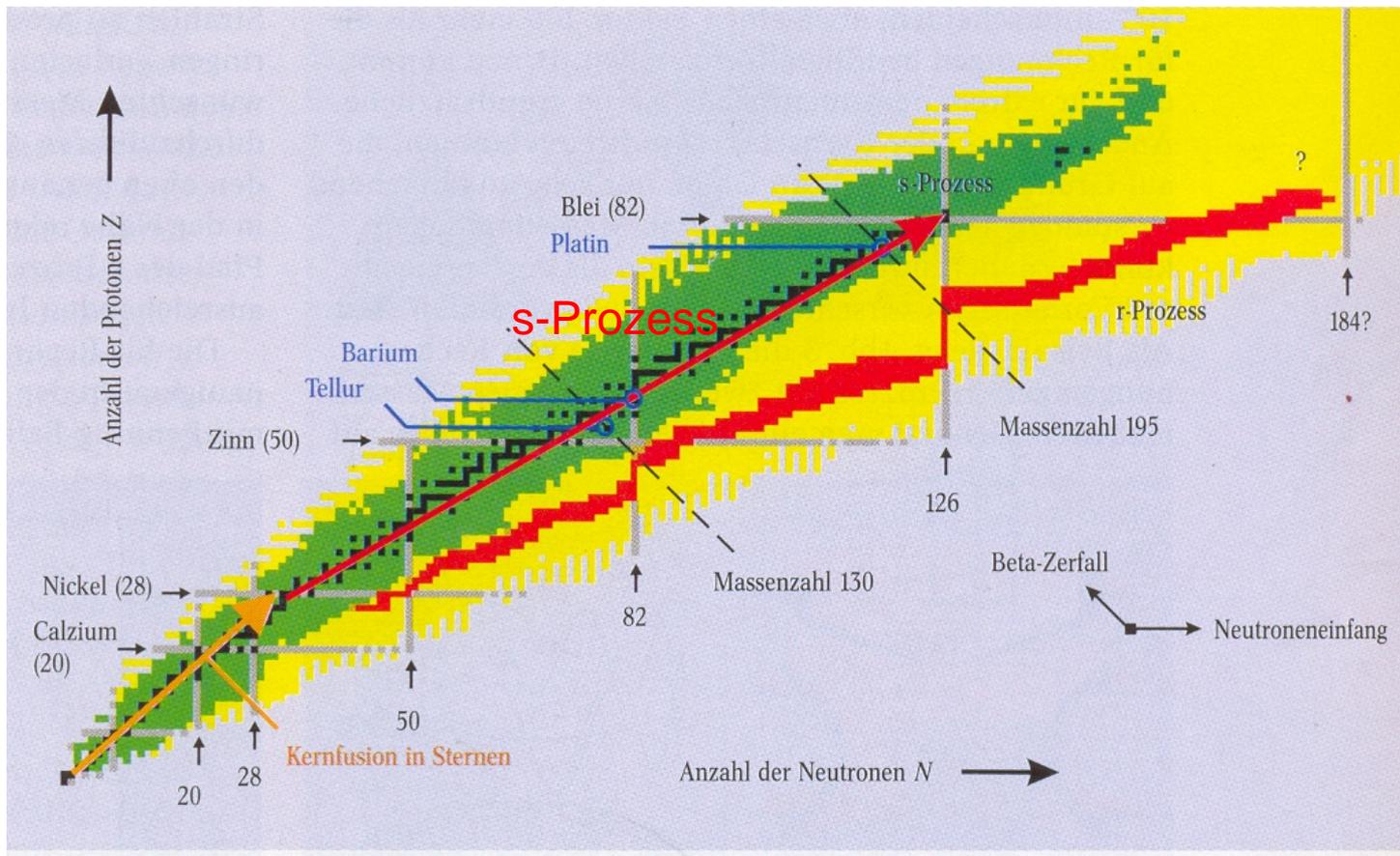
Man unterscheidet 2 verschiedene Prozesse der Neutronenanlagerung:

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 β -Zerfall stattfindet: mittlere **Neutroneneinfangzeit typ. 10^{-4} s**, sehr viel kürzer als Halbwertszeit der entsprechenden β -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 β -instabiler Kerne, die sich nach ihrer Bildung über eine Reihe von β Zerfällen in stabile Kerne umwandeln.

s-Prozess ("Slow neutron capture")

- Neutroneneinfänge sind **langsamer** als β Zerfall. Durch β 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).



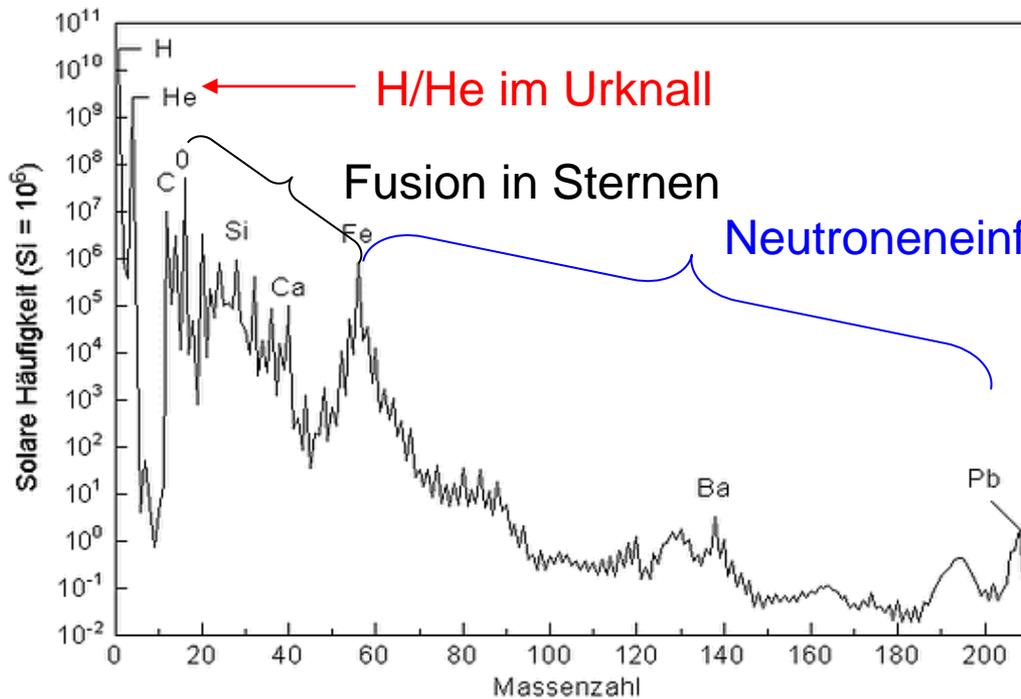
Stabile
Isotope

Massen
bekannt

Theoretisch
Vorhergesagt

r-Prozess

Isotopenhäufigkeit im Sonnensystem:



Isotopenhäufigkeit im Sonnensystem relativ zur Häufigkeit von Si die auf 10⁶ 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.