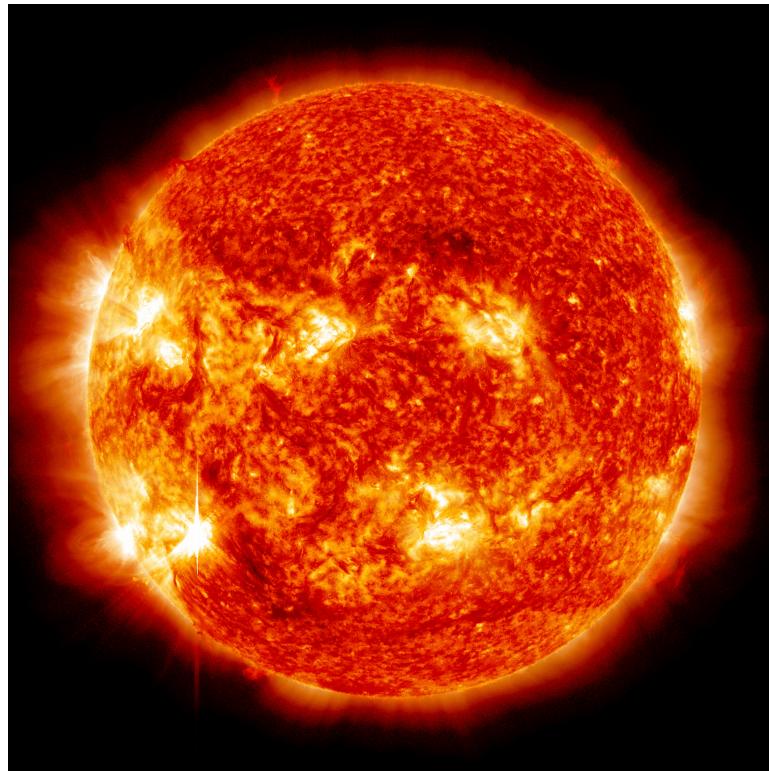
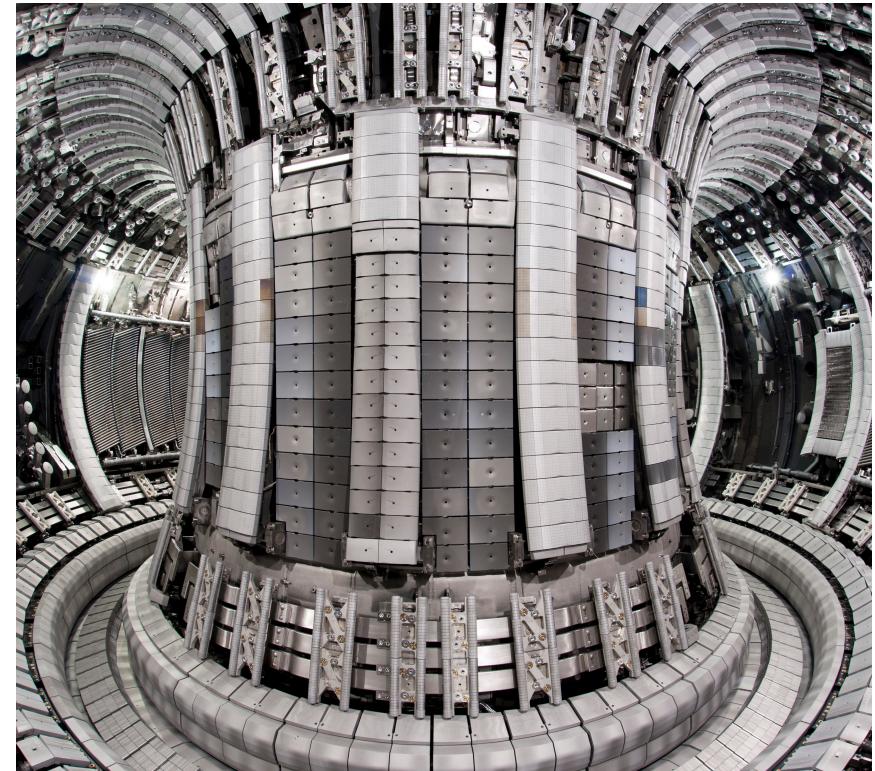


Kernfusion – Natürlich und Technisch



[1]

&



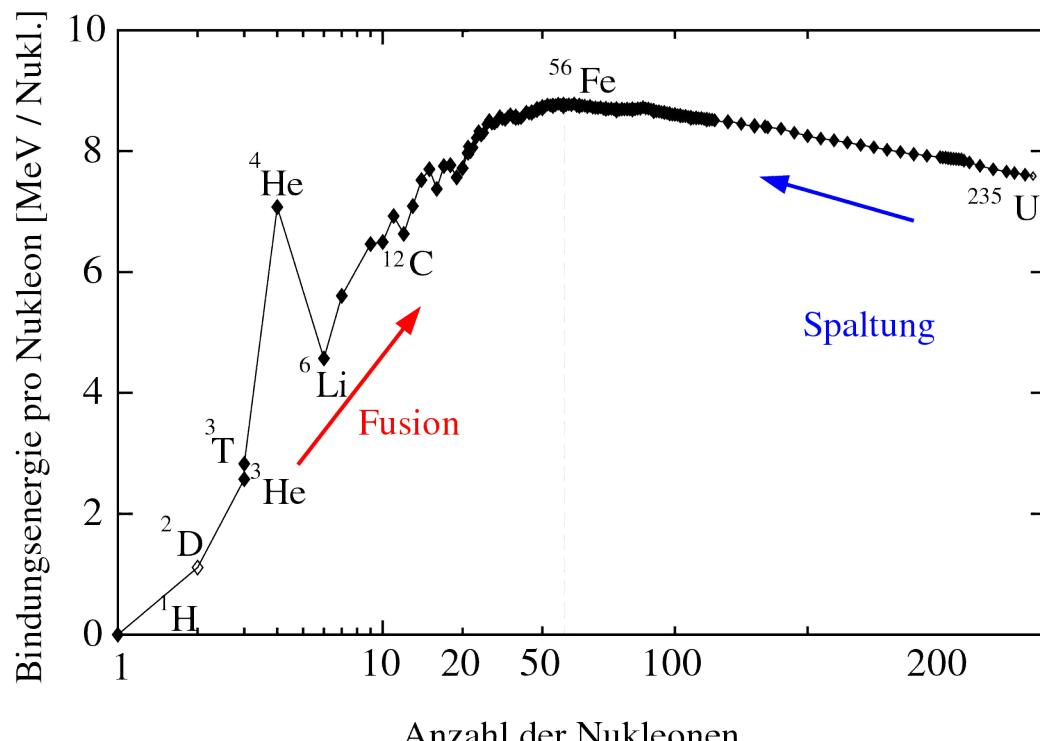
[2]

Gliederung

- 1) Grundlegende Prinzipien der Kernfusion
- 2) Die Sonne als natürlichen Fusionsreaktor
 - 2.1) Umgebung für die Plasmazündung
 - 2.2) pp-Kette und CNO-Zyklus
- 3) Technische Nutzung der Kernfusion
 - 3.1) Problemstellungen
 - 3.1) Magnetischer und Trägheitseinchluss
- 4) Fusionsreaktoren
 - 4.1) Tokamak und Stellarator
 - 4.2) Konzepte für die Zukunft
- 5) Ausblick und Zusammenfassung

[2]

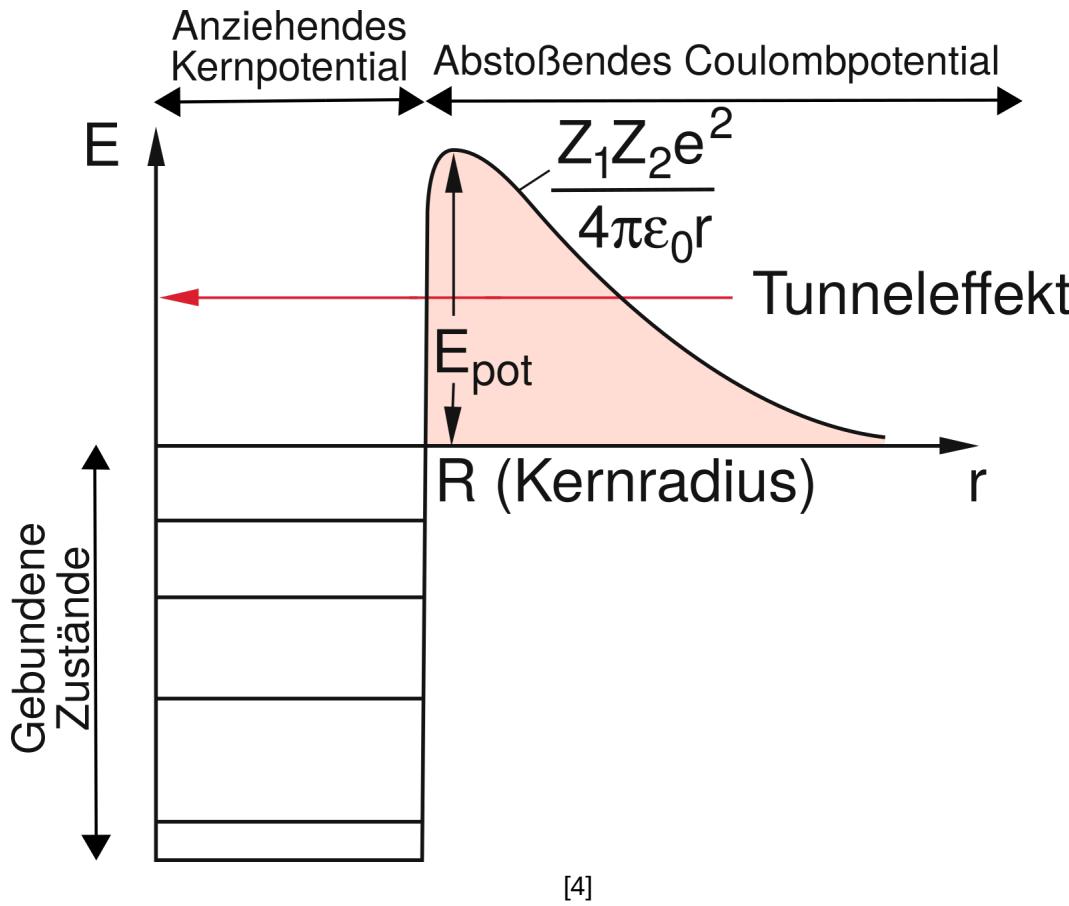
Physikalische Grundlagen



[3]

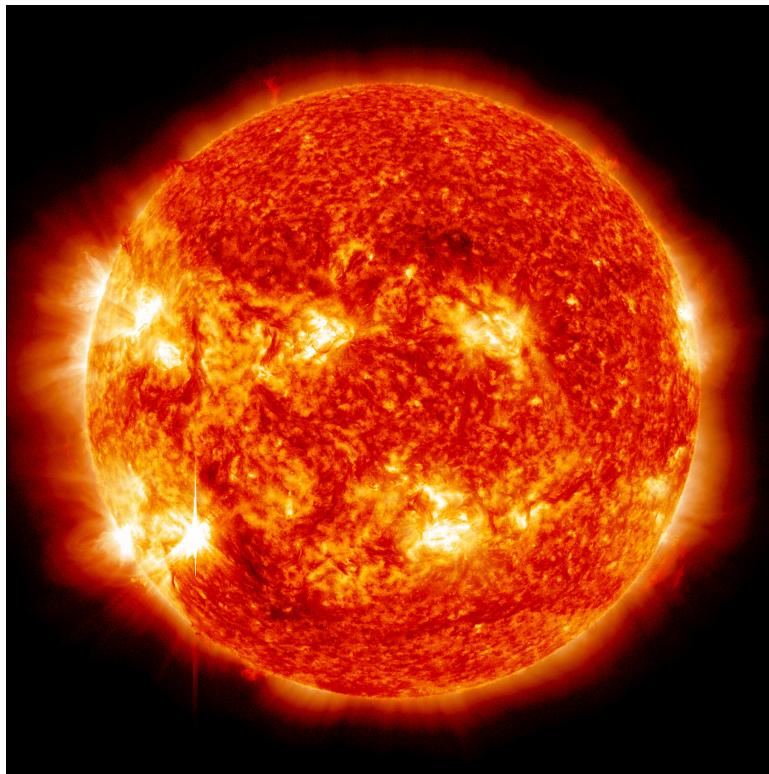
- Bindungsenergie der Atomkerne als Energiequelle
- Von Uran bis Eisen mittels Kernspaltung
- Von Wasserstoff bis Eisen mit Kernfusion
- Energie z.B. Deuterium + Tritium ${}^1\text{D} + {}^3\text{T} \rightarrow {}^4\text{He} (3,5 \text{ MeV}) + \text{n} (14 \text{ MeV})$
- Energie ca. 18 MeV < Energie Kernspaltung mit ca. 180 MeV
- Energiegewinn pro kg jedoch ca. 10 mal höher

Physikalische Grundlagen



- Coulombpotential muss überwunden werden
- Einfacher mit leichten Kernen
- Anziehende Kraft sehr kurze Reichweite
- Hohe Geschwindigkeit der Teilchen notwendig
 - Hohe Temperatur
 - Teilchen Ionisieren zu Plasma
- Extreme Bedingungen nötig jedoch möglich → siehe Sonne

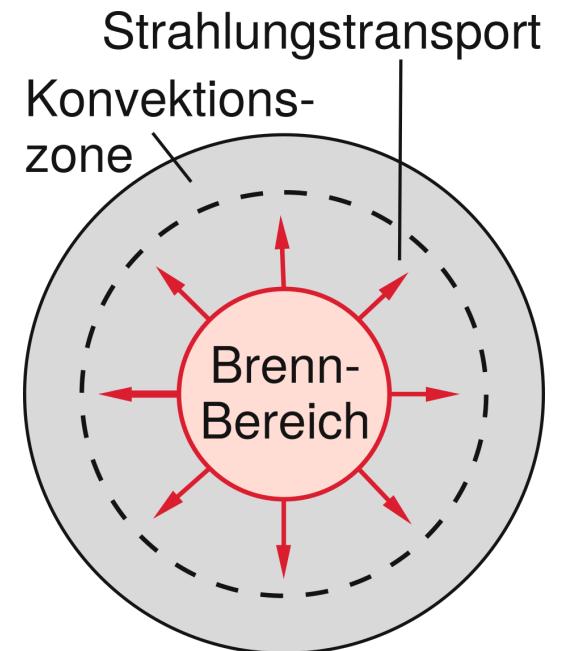
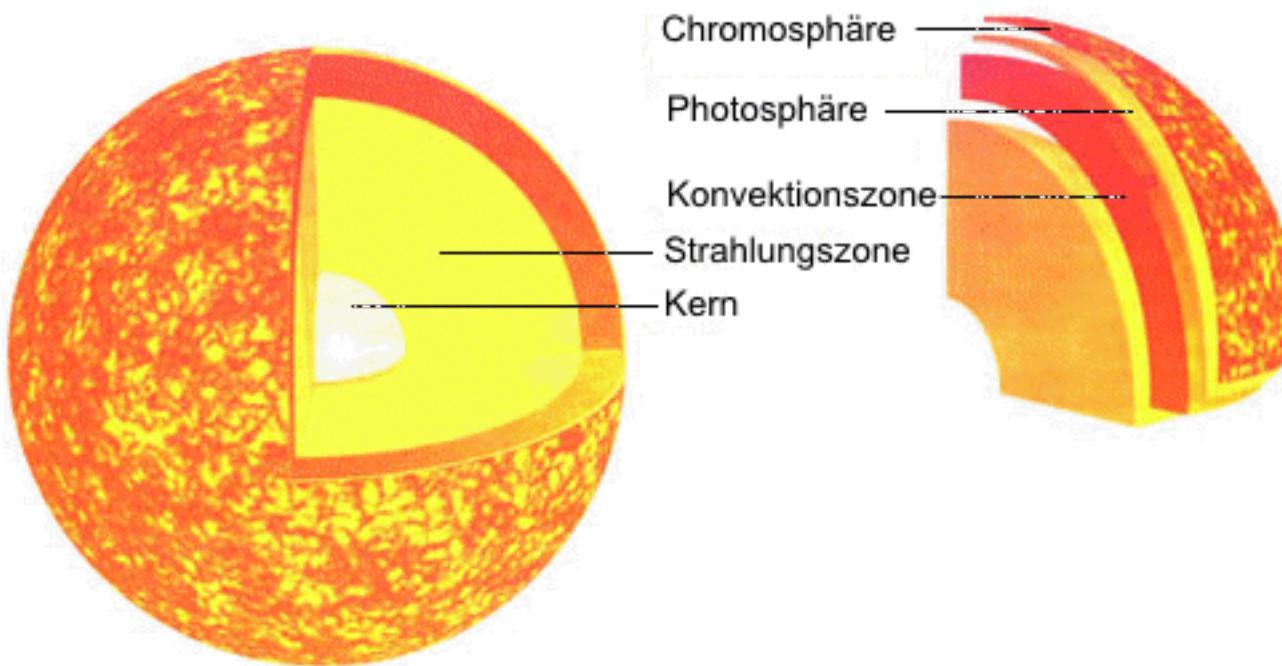
Fusionsreaktor: Sonne



[1]

- Sonnenmasse ca. $2 \cdot 10^{30}$ kg
- Vor ca. 4,57 Mrd. Jahren entstanden
- Besteht aus ca. 73% Wasserstoff
25% Helium
2% Schwere Elemente
- Wird durch Gravitation zusammengehalten
- Kerntemperatur ca. 10^7 K → ermöglicht Fusion von Wasserstoff
- Fusion über pp-Kette oder CNO-Zyklus

Fusionsreaktor: Sonne



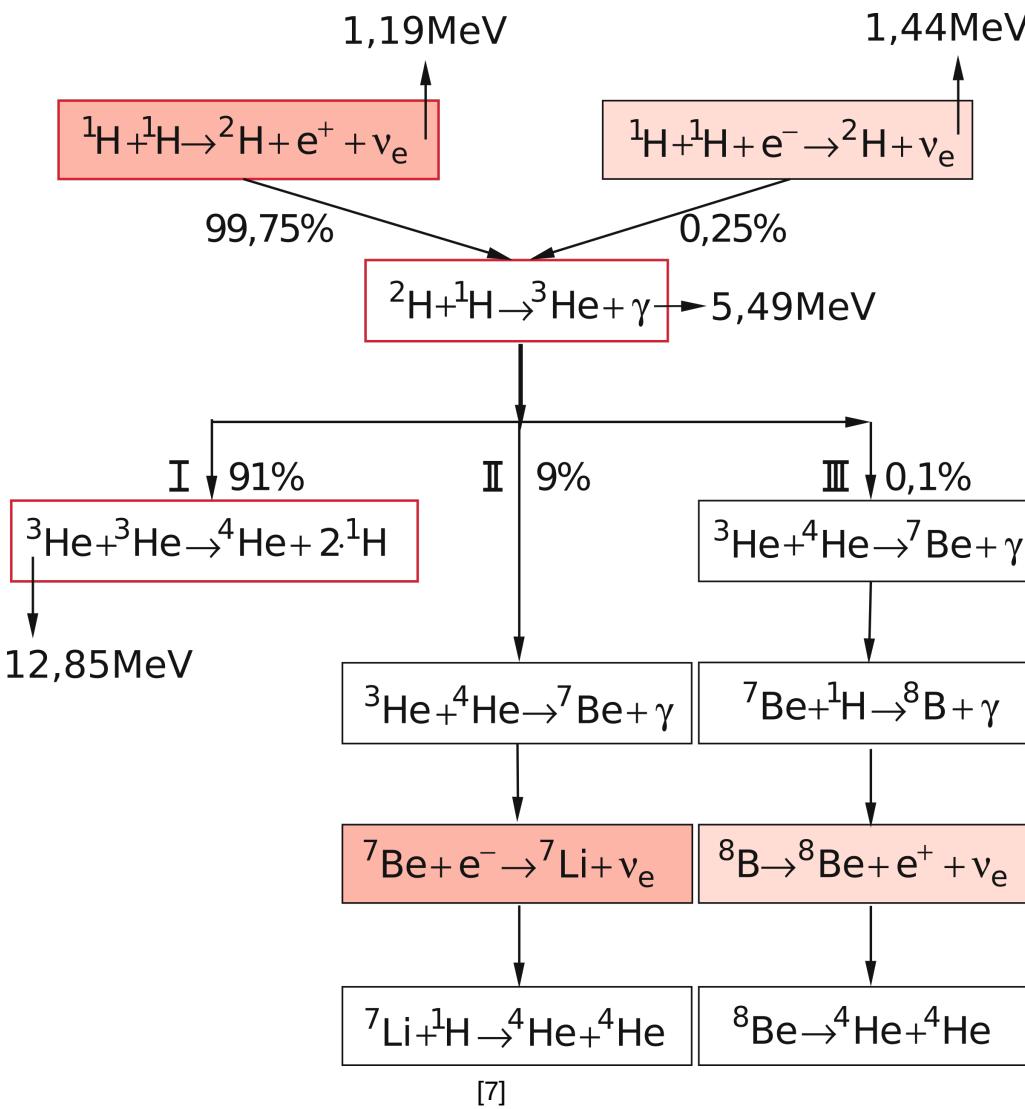
$$0,25 M_{\odot} < M < 1,5 M_{\odot}$$

[5]

- Fusion von Wasserstoff im Kern bei einem Druck von $2,5 \cdot 10^{16}$ Pascal
- Unsere Sonne fusioniert derzeitig mit pp-Kette und CNO Zyklus andere Sterne evtl. auch schwerere Elemente
- Strahlungsdruck im inneren und Gravitation befinden sich im Gleichgewicht solange Wasserstoff brennt

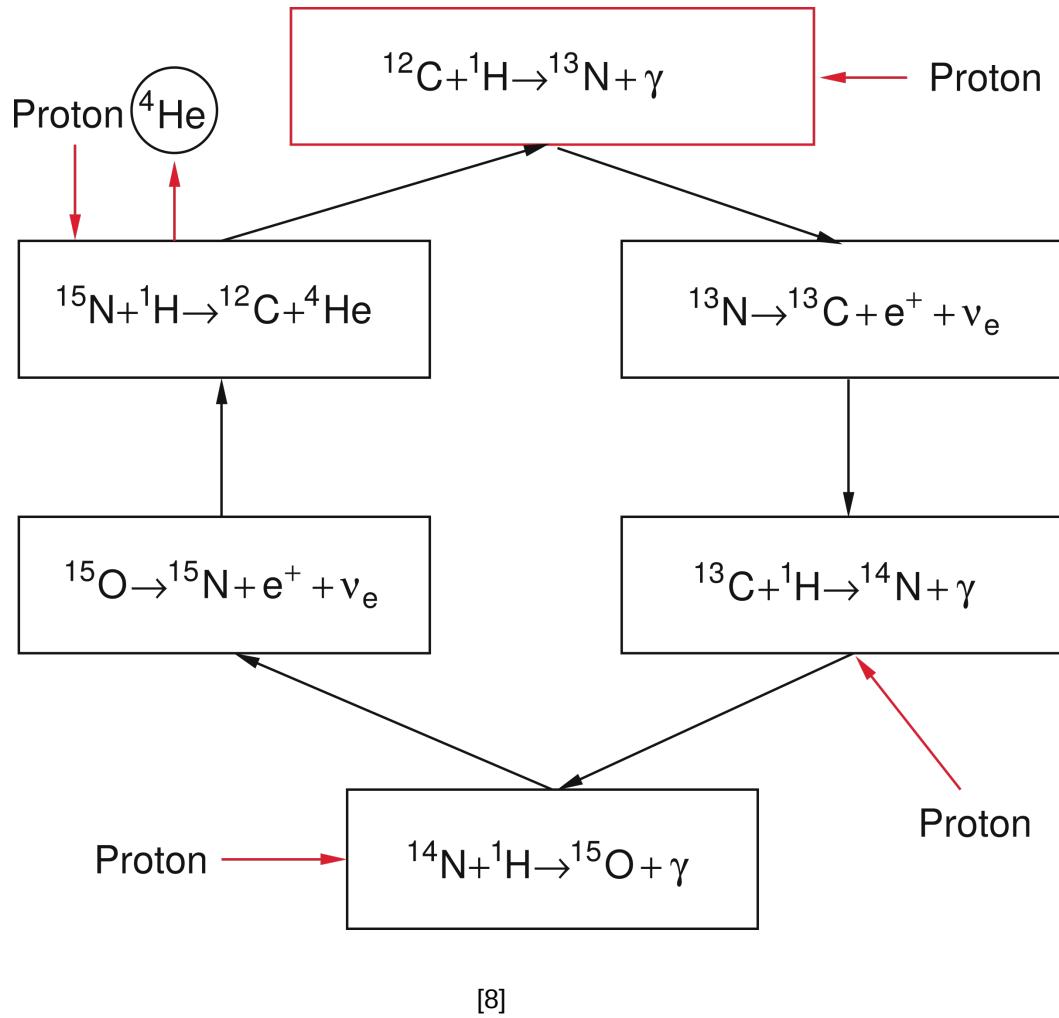
[6]

pp-Kette



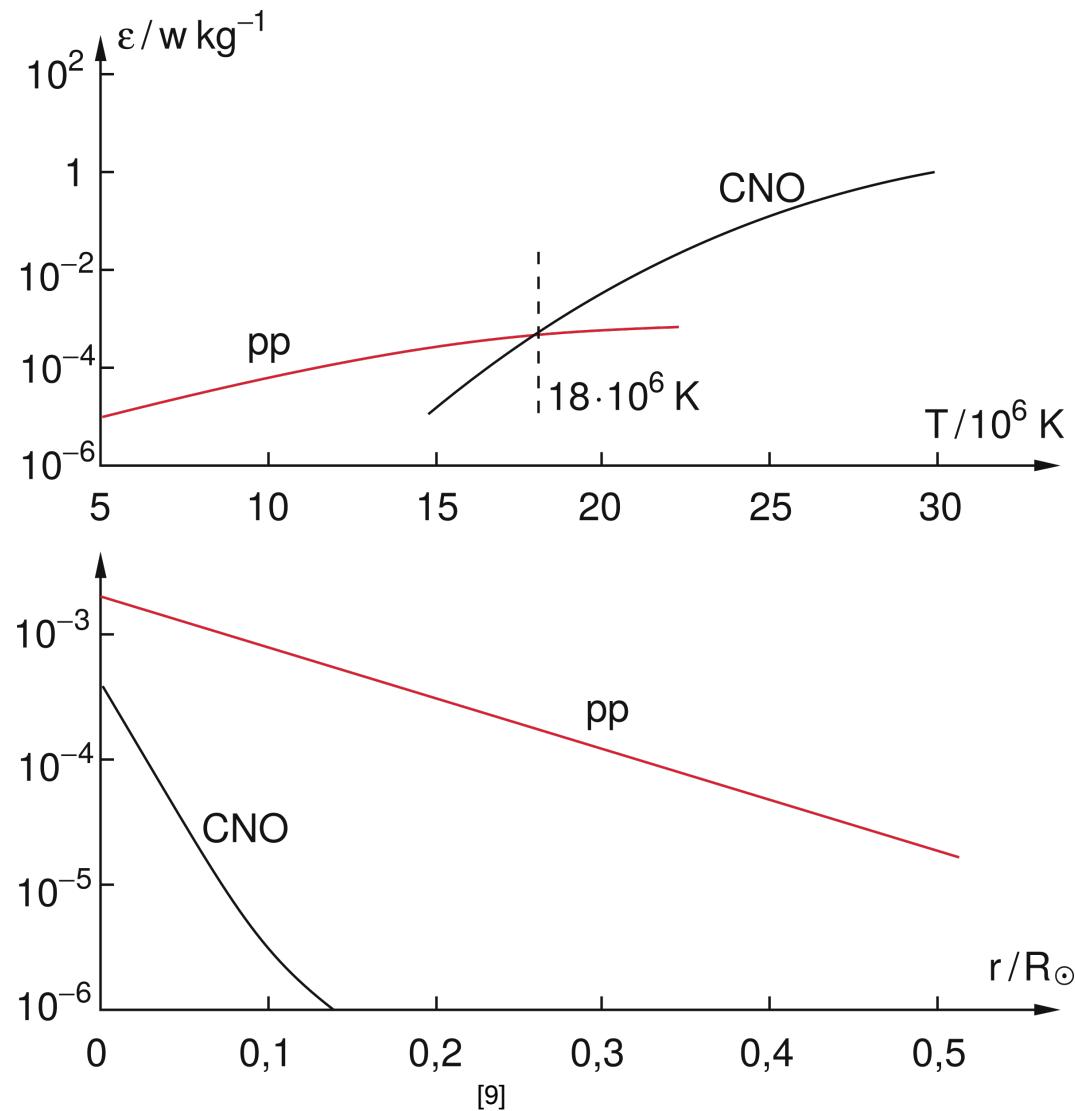
- $4 {}^1\text{H} \rightarrow 1 {}^4\text{He}$ mit evtl. Umwegen über Beryllium, Lithium und Bor
- Fusionszweig I produziert pro Fusion ca. 26,2 MeV Energie
- Neutrinos gelangen meist ohne WW nach außen, Energien bis 0,4 MeV
- Andere Zweige liefern 25,67 MeV bzw. 19,28 MeV
- Dominant bei Temperaturen um ca. $5-15 \cdot 10^6$ K

CNO-Zyklus



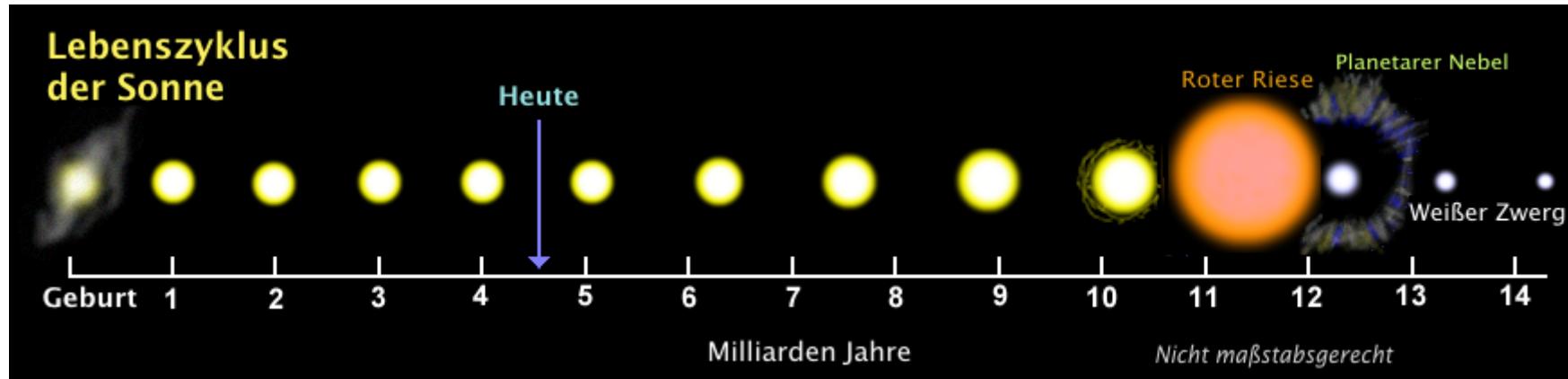
- Fusion von 4 H Kernen über einen Kreislauf
- Wasserstoff wird an verschiedenen Stellen eingebbracht
- Fusion über andere anderen Stoffe (C) Kohlenstoff, (N) Stickstoff, (O) Sauerstoff
- $$^{12}\text{C} + 4 \text{ H} \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He} + 2 e^+ + 2 \nu_e + \Delta E$$
- Energiegewinn gleich mit der pp-Kette
- Dominant bei Temperaturen um ca. $T = 18 \cdot 10^6 \text{ K}$

CNO vs. pp



- Aufgetragen ist die spezifische Energieerzeugung
- Die Leistung pro Kg Materie in Abhängigkeit der Temperatur für den Prozess der pp-Kette bzw. CNO-Zyklus
- pp ist effizienter bis 18 Mio. K ab dann wird CNO Zyklus effizienter
- Unterer Plot: Anteil von CNO oder pp in der Sonne abhängig vom Radius
- CNO brennen vor allem im Inneren der Sonne
- Sonne zu ca. 98% pp dominiert und 2% CNO Anteil

Die Zukunft der Sonne



[10]

- Leistung der Sonne entspricht der von 2 Mio. AKW ca. $4 \cdot 10^{26}$ W
- Jede Sekunde werden 600 Mio. t H zu 595 Mio. t He fusioniert
 - Massendefekt von $5 \cdot 10^9$ kg pro Sekunde, trotzdem nur 0,007% in 1 Mio. Jahre
- Sonne relativ „jung“, jedoch massendefekt vernachlässigbar
- Ab ca. 11,7 Mrd. Jahre wird Wasserstoff verbraucht sein
- Einsetzen von He Brennen, dabei wird Kohlenstoff produziert
- Sonne wird dabei um das 100 fache größer und 1000fache heißer
- Letztlich nach 12,3 Mrd. Jahre kommt es zur Supernova
 - von der Sonne bleibt nur ein weißer Zwerg

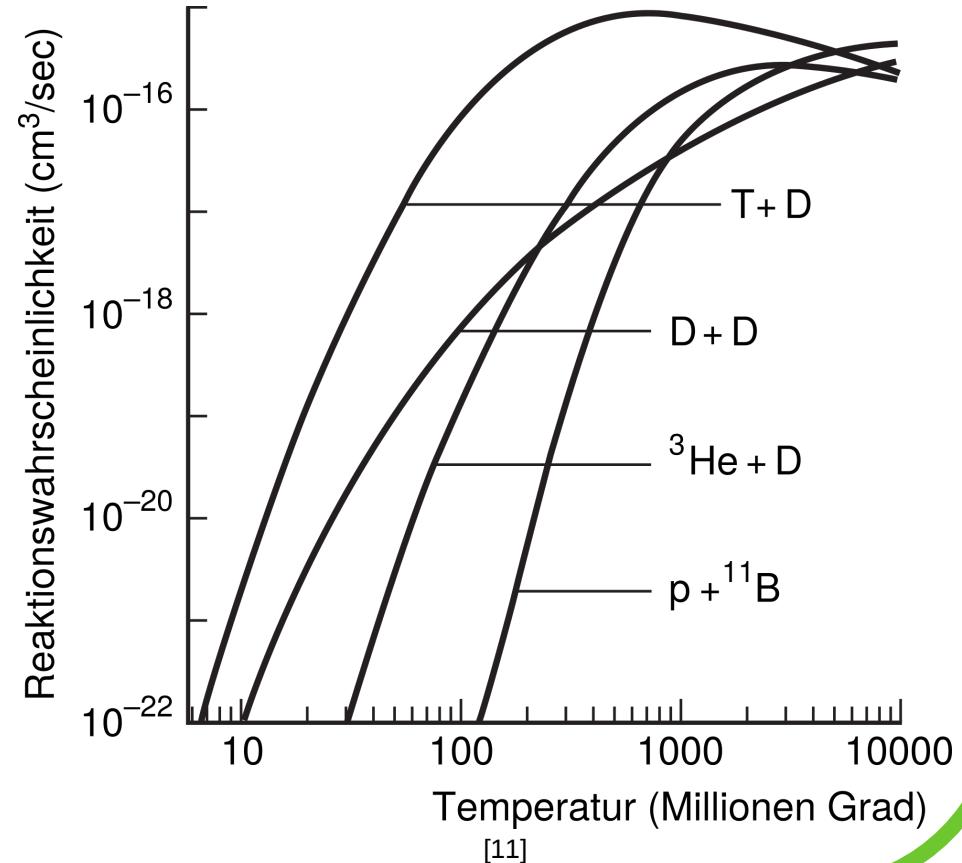
Technische Kernfusion

- Wasserstoff ^1H nicht nutzbar, da WQ zu gering

- Mögliche Fusionskanäle sind (Energien in MeV)

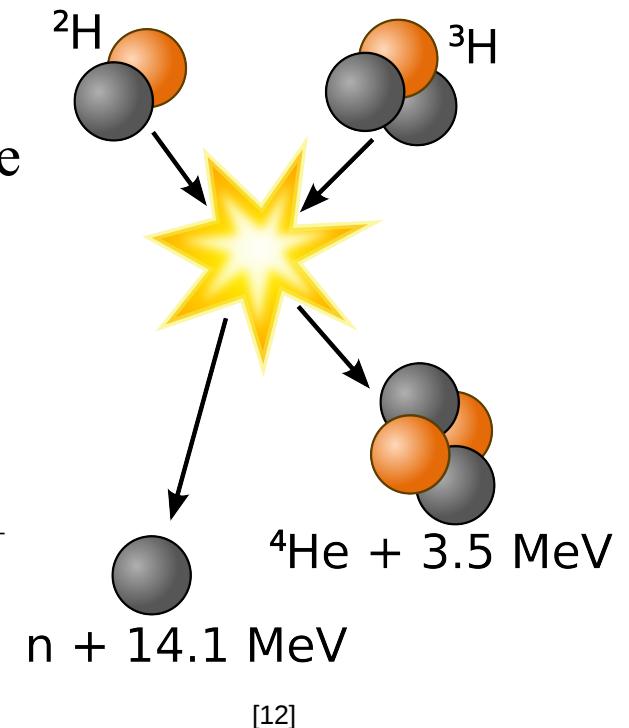


- Deuterium + Tritium höchste Reaktionswahrscheinlichkeit + hohe Energieausbeute mit 17,5 MeV



Technische Kernfusion

- Gravitation nicht nutzbar zum Zusammenhalten des Plasmas
- Größtes Problem extrem hohe Temperaturen über lange Zeit aufrecht erhalten
- 3 technische Lösungen für Kernfusion:
 - 1) Magnetischer Einschluss des Plasmas
 - 2) Trägheitseinschluss
 - 3) Kernfusion über Teilchenkollision $p + p \rightarrow D + \pi^+$
- Letzteres ist wirtschaftlich unbrauchbar
- Betrachte im Folgenden nur D-T Fusion

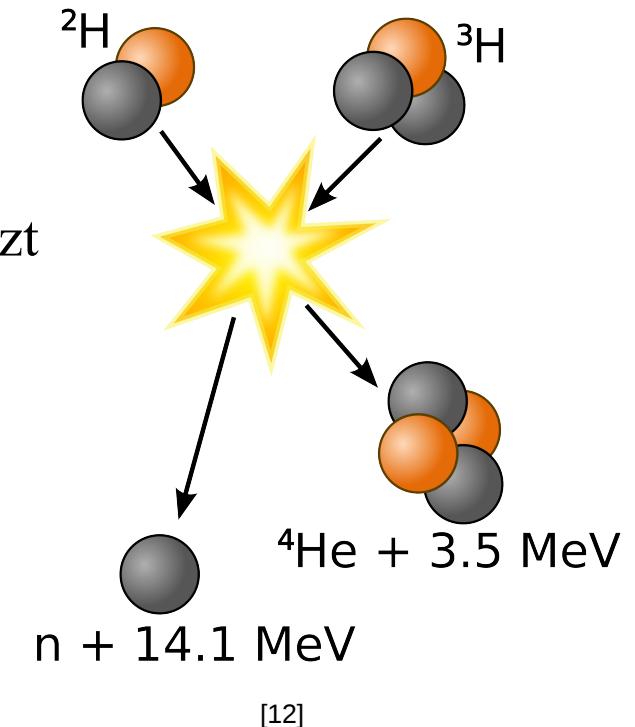


Tritium Problematik

- Tritium ist Radioaktiv (β^- Strahler)
- Halbwertszeit von ca. 12,3 Jahren
- Relativ seltener Stoff, Weltinventar wird auf 7kg geschätzt
→ Lösung Tritium „brüten“ über Lithium



- Reichlich vorhandenes Lithium in den Plasmamantel geben



Wichtige Größen

- Teilchendichte n , Energieeinschlusszeit τ_E , Druck p , Temperatur T , Reaktionsrate f
- Energieeinschlusszeit gibt die Abklingzeit der Energie innerhalb des Plasmas durch Verluste nach Außen → Maß für die Isolation des Plasmas
- Reaktionsrate f ergibt sich aus $f = n_1 n_2 \langle \sigma(v) \cdot v \rangle$, für D-T Fusion gilt $n_1 = n_2 = n_e / 2$
- Neutronen verlassen das Plasma mit ca. 80% ihrer Energie
- He-Kern gibt Energie ab und heizt damit das Plasma → Heizleistung P_α
- Verluste durch Teilchenabstrahlung und Wärmestrahlung → Verlustleistung P_v
- Stabiles („gezündetes“) Plasma ist selbsterhaltend
→ Heizleistung $P_\alpha \geq$ Verlustleistung P_v

Lawson Kriterium

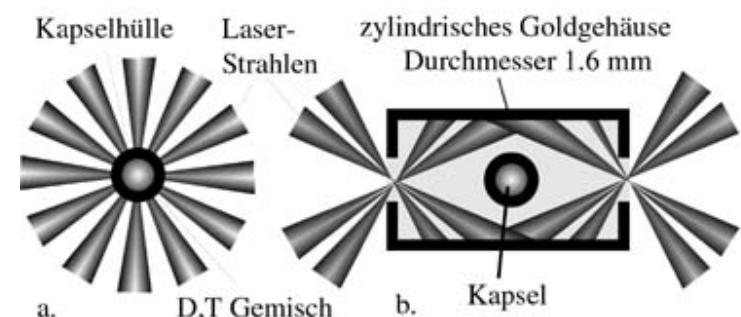
- Teilchendichte n , Energieeinschlusszeit τ_E , Druck p , Temperatur T , Reaktionsrate f , Heizleistung P_a , Verlustleistung P_v , Plasmavolumen V , Wärmeenergie W
 - Reaktionsrate $f = n_e/4 \langle \sigma(v) \cdot v \rangle$, Suche nach: $P_a \geq P_v$
 - $P_a = f \cdot V \cdot E_\alpha$, $E_\alpha = 3,5 \text{ MeV}$ ist die Energie des Heliumkerns pro Fusion
 - $P_v = W \cdot \tau_e = 3 \cdot (n_e \cdot V) k_B T \cdot \tau_E$, aus klassischer Betrachtung
- Damit ergibt sich für die Bedingung $P_a \geq P_v$ das Lawson Kriterium:

$$n_e \tau_E \geq \frac{12 k_B T}{\langle \sigma v \rangle \epsilon} \quad \text{für D-T bei } T = 100 \cdot 10^6 \text{ K ca. } 2 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$$

Plasmaeinschluss

Träigkeitseinschluss:

- Idee: Reaktionszeit < Energieeinschlusszeit
- Hoch konzentrierte Kapseln aus fusionierbarem Material (ca. 1mg)
- Durch Absorption von Lasern lassen sich kurzzeitig lokal $T \sim 10^8 \text{K}$ erzeugen
 - Einschlusszeit ist gering dafür Plasma dichter
- Zündung entweder radial oder zylindrisch



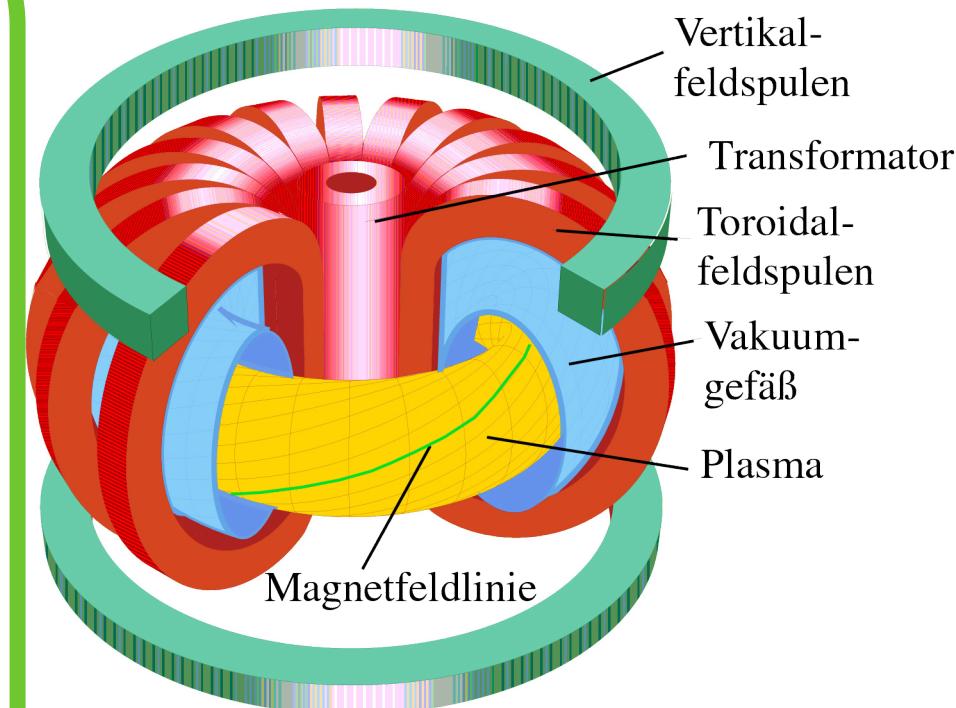
Magnetischer Einschluss:

- Zwei Bauweisen haben sich durchgesetzt
 - Tokamak und Stellarator
- Einschluss des Plasmas mit Ablenkung der Ionisierten Teilchen von magnetischen Feldern
 - Höhere Einschlusszeiten ermöglichen weniger Dichtes Plasma (s. h. Lawson Kriterium)

[13]

Fusionsreaktor Tokamak

- „Tokamak“ Akronym für die russische Toroidalna Kamera Magnitna Katuxka (toroidale Kammer im Spulenmagnetfeld)
- Einschluss durch Torodialmagnetfeld mit zusätzlichem Vertikalfeld + selbstinduziertes Magnetfeld über Plasmastrom (durch Transformator initialisiert)
 - Da Transformator endlichen Strom hat sinkt der Plasmastrom mit der Zeit → Plasmaabriß
- Plasmaheizung elektrisch und durch Einschuss hochenergetischer neutraler Teilchen
- Bsp: ASDEX-Upgrade in Garching



[14]

ASDEX - Upgrade

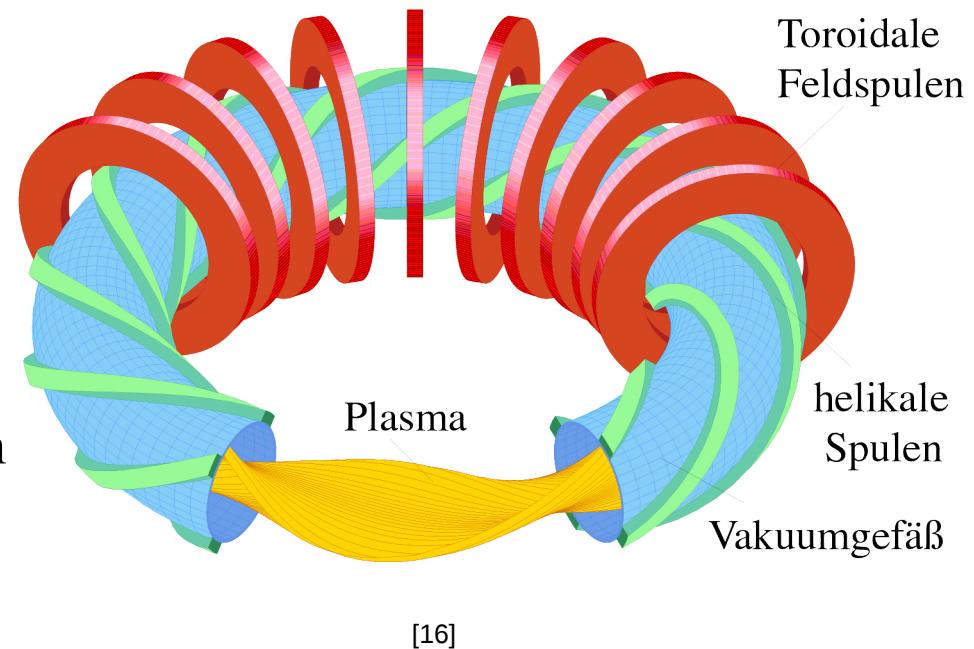
- Axialsymmetrisches Divertorexperiment
- Divertorspulen lenken äußere Plamaschicht auf spezielle Prallplatten um Verunreinigungen zu entfernen
- Testreaktor → Kein Energiegewinn
- Umgeben von 2m dicken Betonwänden zum Abschirmen von Fusionsneutronen
- 9m hohe Anlage, 3,9 T Magnetfeld
- 3mg Plasma, $T = 10^8 \text{ K}$, Plasmadichte von $2 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, Pulsdauer 10s



Abb.: Montagearbeiten im Plasmagefäß des ASDEX-Upgrade [15]

Fusionsreaktor: Stellarator

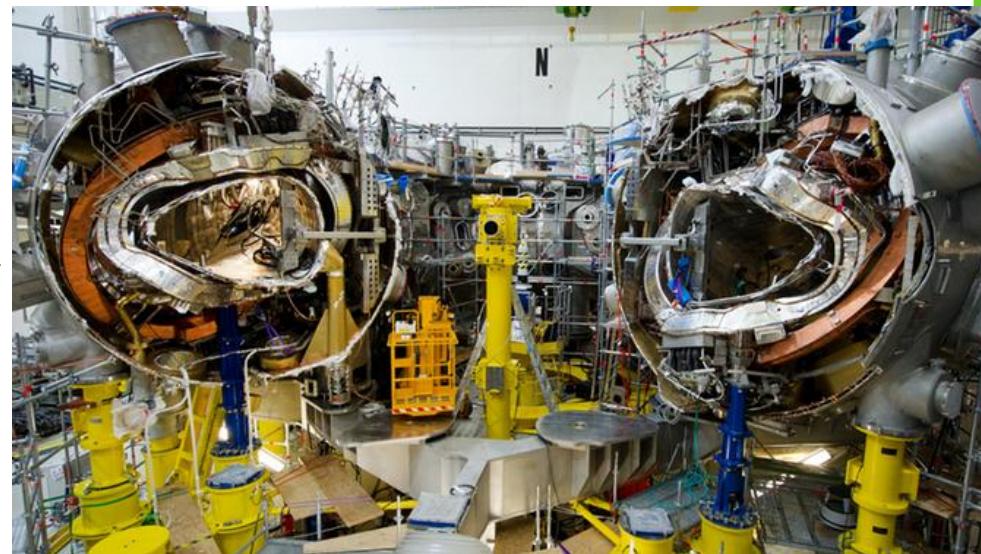
- Stellarator nutzt torodiale Feldspulen und zusätzlich helikale Spulen
- Verschraubtes Magnetfeld für besseren Plasmaeinschluss und bessere Reaktion auf Störungen im Plasma
- Wesentlicher Vorteil ist der natürliche Plasmaeinschluss
 - kein induziertes B-Feld durch Plasmastrom nötig
 - kleinere Gefahr des Stromabisses
 - kontinuierlicher Betrieb möglich
- Bsp.: Wendelstein 7-X



[16]

Wendelstein 7 - X

- Am Max-Plank-Institut für Plasmaphysik
In Greifswald (Mecklenburg-Vorpommern)
- Größte Anlage vom Typ Stellarator
- 2014 fertig gebaut, 10.12.2015 erstes Plasma
- 30min lange Plasmaentladung geglückt
- 3T Magnetfeld, 5-30mg Plasma, $3 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$
Teilchendichte, $T \sim 60-130 \cdot 10^6 \text{ K}$
- Deuterium Fusion möglich
→ große Ersparnis durch Verzicht auf Tritium

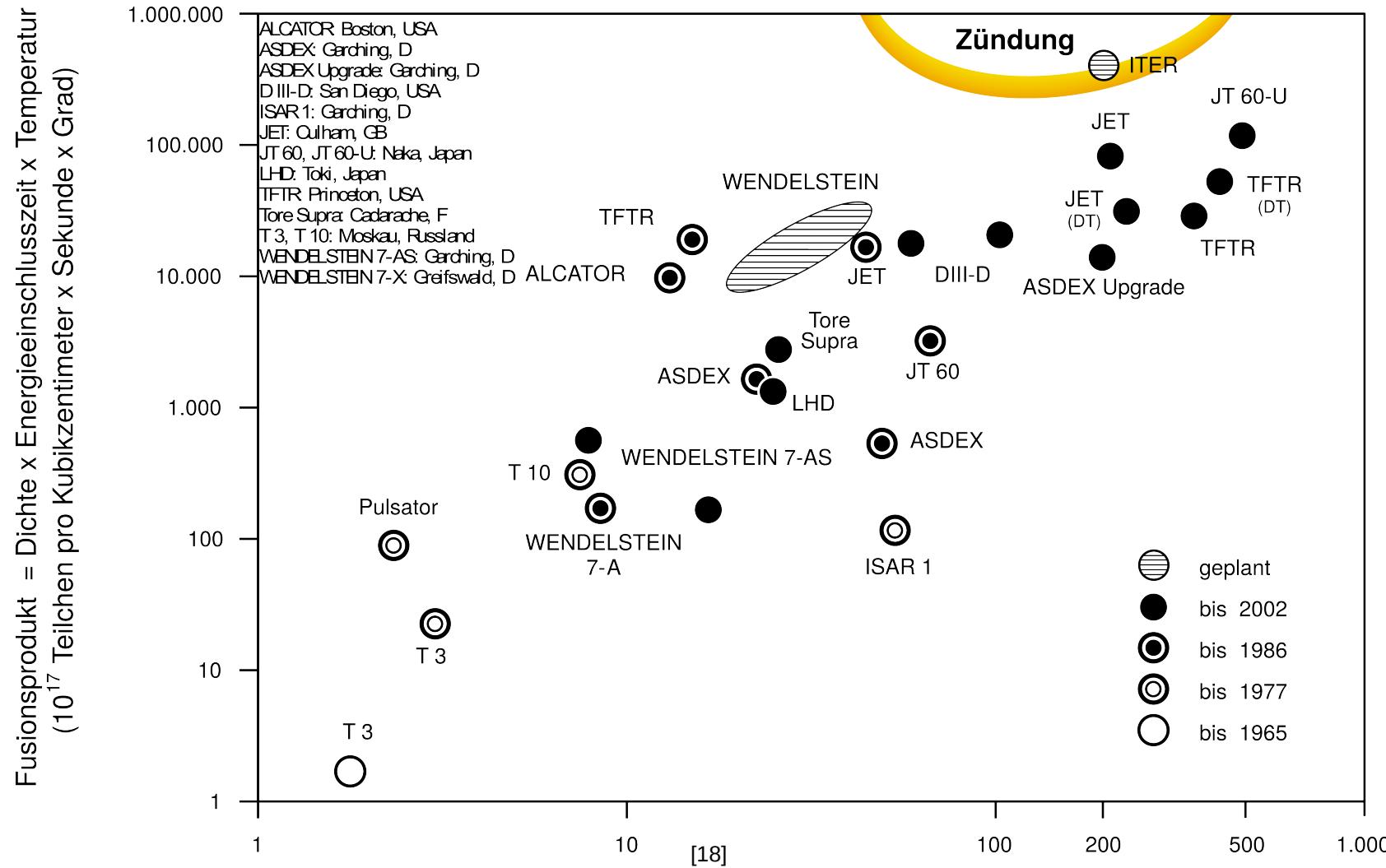


[17]

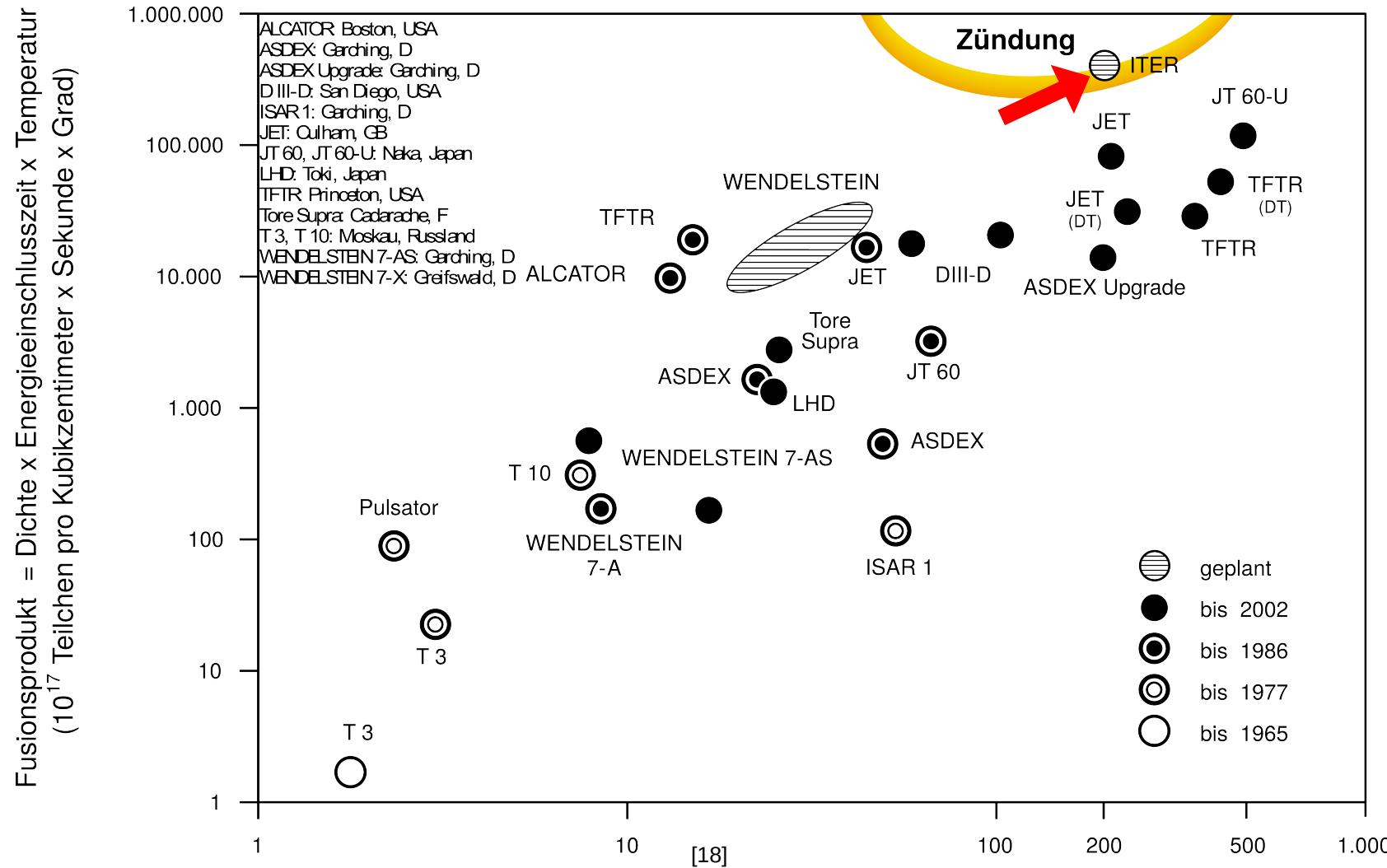
Übersicht Fusionsreaktoren

Experiment	Ort	Typ	Jahr	Leistung[MW]
T-3	UdSSR	Tokamak	1962	0
T-10	UdSSR	Tokamak	1975	1
ASDEX	Deutschland	Tokamak	1980	4
JT-60	Japan	Tokamak	1985	30
Alcator	USA	Tokamak	1979	4
TFTR	USA	Tokamak	1982	51
JET	GB (EU)	Tokamak	1983	47
D-III D	USA	Tokamak	1986	26
Tore Supra	Frankreich	Tokamak	1988	22
ASDEX Upgrade	Deutschland	Tokamak	1991	30
W7-AS	Deutschland	Stellarator	1992	7
LHD	Japan	Stellarator	1998	11
HSX	USA	Stellarator	1999	0,5

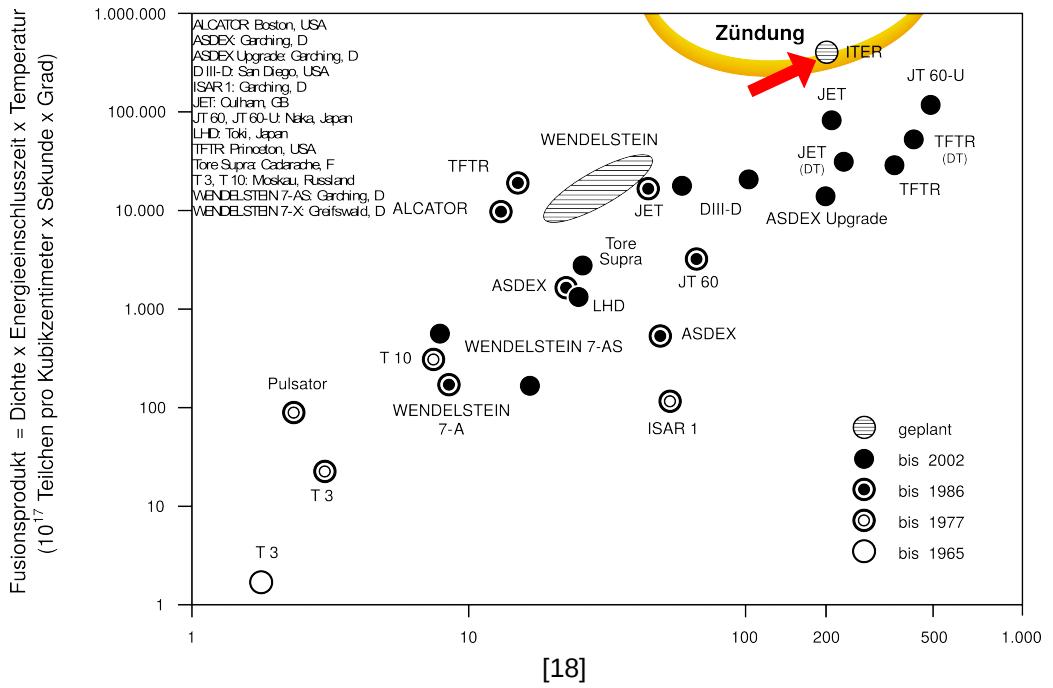
Übersicht Fusionsreaktoren



Übersicht Fusionsreaktoren



Ausblick: ITER



- Apronym: International Thermonuclear Experimental Reactor kurz ITER gleichzeitig lateinisch für „Weg“
- Fortsetzung von JET auf internationaler Ebene
- Tokamak Design
- Umstieg auf supraleitende Magnetspulen
- Seit 2007 im Bau in Südafrika
- Plan ca. 2025 erstes Plasma
- Sollte Leistung im GW Bereich möglich sein soll Nachfolger DEMO ans Netz gehen

Zusammenfassung

- Technische Kernfusion als Energielieferant der Zukunft realistischer als je zuvor, dennoch ein weiter Weg bis in die Wirtschaftlichkeit
- Natürliche Kernfusion über erneuerbaren Energien immer noch Attraktiv (für ein paar Milliarden Jahre)
- Kernfusion in der Sonne funktioniert auf der Erde so nicht umsetzbar
- Fortschritte im Bereich technischer Kernfusion gehen kontinuierlich weiter
→ nach Möglichkeit selbst ohne Tritium
- Einige Fragen ungeklärt im Bezug auf „Sauberkeit“, Einsatz von Tritium aber auch Aktivierung von Materialien durch Fusionsneutronen → quantitativ weniger Relevant als radioaktiver Abfall von Kernspaltung
- Spannende nächste 10-20 Jahre für die Kernfusion

Danke für eure
Aufmerksamkeit !

Zeit für Fragen

Literaturverzeichnis

- Demtröder, W.: Experimentalphysik 4, Springer Verlag, 2013
- ITER: <https://www.iter.org/construction/tkmfoundations>
- Max-Plank-Institut für Plasmaphysik: <https://www.ipp.mpg.de/>
- Sternwarte Eberfing:
<http://www.sternwarte-eberfing.de/Fuehrung/Objekbeschreibung/SonneAufbau.html>
- DPG Plasmaphysik:
http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/grundlagen_fusion.html
- EFDA:
<https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>
- Rhode, W: Vorlesung für Astroteilchenphysik, TU Dortmund

Bilderverzeichnis

- 1) <http://www.planeten.ch/wp-content/uploads/2015/11/full-sun.jpg>
- 2) <https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2012/03/CP11j-047-02.jpg>
- 3) http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/grundlagen_fusion.html
- 4) Demtröder, W.: Experimentalphysik 4, Springer Verlag, 2013, Seite 45
- 5) <http://www.sternwarte-eberfing.de/Fuehrung/BilderFuehrung/SonneAufbau.gif>
- 6) Demtröder, W.: Experimentalphysik 4, Springer Verlag, 2013, Seite 346
- 7) Demtröder, W.: Experimentalphysik 4, Springer Verlag, 2013, Seite 310
- 8) Demtröder, W.: Experimentalphysik 4, Springer Verlag, 2013, Seite 311
- 9) Demtröder, W.: Experimentalphysik 4, Springer Verlag, 2013, Seite 312
- 10) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/Sun_Life_DE.png
- 11) http://www.ipp.mpg.de/47411/1_einfuehrung_grundlagen.pdf
- 12) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Deuterium-tritium_fusion.svg
- 13) [https://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/inertial.html](http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/inertial.html)
- 14) <http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/magnet.html>
- 15) <https://www.ipp.mpg.de/36468/zoom-1369313316.jpg>
- 16) <http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/magnet.html>
- 17) <https://i.pinimg.com/originals/8a/cb/ae/8acbae2d76ad08b510c732c28c37992c.jpg>
- 18) http://www.ipp.mpg.de/47411/1_einfuehrung_grundlagen.pdf