

Grundlagen der technischen und stellaren Kernfusion

Frederic Schröder

TU Dortmund

9. Dezember, 2016

Einleitung

- Grundlagen

- Beispiele für Reaktionen

Technische Kernfusion

- Fusionsansätze

- Kriterien

- Zusammenfassung

Stellare Kernfusion

- Bedingungen

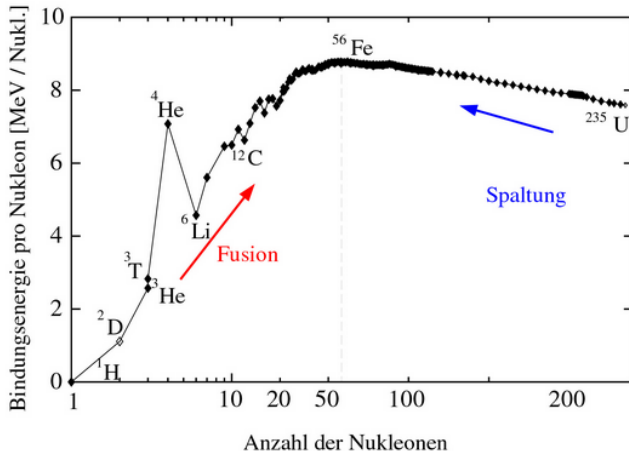
- Fusionsprozesse in der Sonne

- Charakteristika

- Zusammenfassung

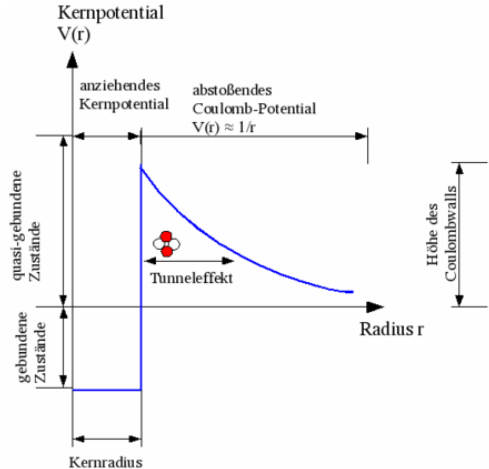
Quellenverzeichnis

Energiegewinnung aus Kernprozessen



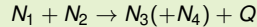
Grundlagen

- Für erfolgreiche Fusion muss die Coulomb-Barriere überwunden werden
- Größenordnung Kerne $O(10^{-15}\text{m})$
- → Schwierigkeit: Bringe die Fusionsprodukte nah genug aneinander
- möglichst kleine elektrostatische Abstoßung für leichte Elemente mit geringer Protonenzahl (H , ${}^2\text{D}$, ${}^3\text{T}$, ...)



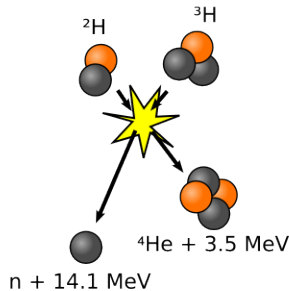
Aufbau einer Reaktionsgleichung:

- Allgemeine Form:



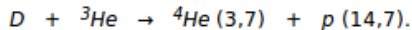
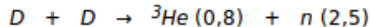
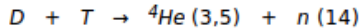
mit den Ausgangsstoffen $N_{1,2}$, Produkten $N_{3,4}$ und freier Energie Q

- Beispiel an Deuterium (^2H , D) und Tritium (^3H , T):



Mögliche Kanäle:

- Es sind unterschiedliche Prozesse möglich
- Reaktionen mit freigesetzter Energie in MeV in Klammern:



- Die D-T- und D-³He-Reaktionen ergeben am meisten Energiegewinn pro stattfindenden Prozess
- Im Folgenden soll im Wesentlichen die D-T-Reaktion betrachtet und diese Wahl begründet werden.

Energetische Betrachtung

- Energiegewinn pro Fusionsreaktion: $\approx 18 \text{ MeV}$
- Energiegewinn Spaltung von ^{235}U : $\approx 180 \text{ MeV}$
- Aber da $m(^{235}\text{U}) \approx 60 \cdot m(^4\text{He})$ ist der Energiegewinn pro Masse bei Fusionsreaktionen größer
- Beispiel: Energie aus 1000t Kohle die in einem Kohlekraftwerk verbrannt werden entspricht Energie 1kg Wasserstoff durch Fusion

Wesentlicher Ansatz zum Erreichen einer Fusion

Erhitzung (thermonuclear fusion)

- Temperatur ist Maß für die mittlere kinetische Energie (Bed.: ideales Gas)
 - Ausbildung eines Plasmas durch Erzeugung extrem hoher Temperaturen ($\approx 10^8$ K)
 - Schwierigkeit: Einschluss des Plasmas
 - Kerne besitzen ausreichend Energie zum Überwinden der Coloumb-Barriere
→ unter bestimmten Voraussetzungen Fusion möglich
-
- Plasma: Atome sind aufgebrochen; Elektronen und Wasserstoffkerne können sich unabhängig voneinander bewegen
→ daraus resultieren Eigenschaften wie elektrische Leitfähigkeit und die Möglichkeit der Beeinflussung durch Magnetfelder

Alternativer Ansatz zum Erreichen einer Fusion

Beschleunigung (ein weiterer Ansatz)

- Die Kerne werden auf nötige Energie beschleunigt und zur Kollision gebracht.
- Beam-beam und beam-target fusion
- Aber:
 - ▶ geringe Fusionsrate
 - ▶ Verluste durch Streuung

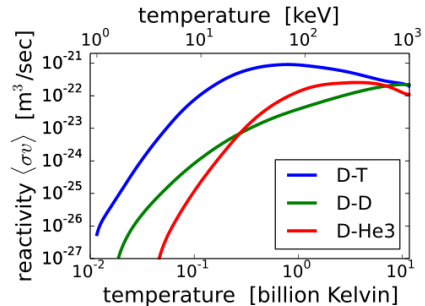
Wirkungsquerschnitt und Geschwindigkeitsverteilung

- Die Wahrscheinlichkeit, dass verschiedene Isotope fusionieren ist abhängig von der Art der Isotope und der Temperatur

- Als Maß für die Häufigkeit des Auftretens einzelner Prozesse wird die Reaktionsrate

$$f = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle \quad (1)$$

definiert, wobei $\langle \sigma v \rangle$ die Reaktivität bezeichnet.



Allgemeine und vereinfachende Annahmen:

- ab hier nur: Deuterium-Tritium
- Ausgangssituation: vollionisiertes Plasma mit einheitlicher Temperatur T für Ionen und Elektronen
- Elektronendichte $n_e = n$
 $\rightarrow n_D = n_T = n/2$
- kinetische Energie jedes Teilchens: $\frac{3}{2} k_B T$
- thermische Energiedichte: $3nk_B T$

Heiz- und Fusionsleistungsdichte:

Heizleistungsdichte

- ohne Energiezufuhr kühlt das Plasma aus
- charakteristische Zeit: (Energie-)Einschlusszeit τ
→ Zeit, in der aktuelle thermische Energiedichte verloren geht. Daher muss Plasma folgende Energiedichte zugeführt werden:

$$\Phi_H = \frac{3nk_b T}{\tau} \quad (2)$$

Fusionsleistungsdichte

- Mit der Fusionsrate und der freiwerdenden Energie $E_{DT} = 17,6 \text{ MeV}$ ergibt sich:

$$\Phi_{DT} = \frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle E_{DT} \quad (3)$$

Güte und Lawson-Kriterium

Güte des Fusionsplasmas:

- aus dem Verhältnis von Heiz- und Fusionsleistungsdichte:

$$Q_{DT} = \frac{\Phi_{DT}}{\Phi_H} = \frac{n\tau < \sigma v > E_{DT}}{12k_B T} \quad (4)$$

Lawson-Kriterium:

- Falls bei bekannter Temperatur ein bestimmter Q-Wert erreicht werden soll ist ein bestimmter Wert des Produktes $n\tau$ nötig.

$$n\tau \geq \frac{12k_B T}{< \sigma v > E_{DT}} \quad (5)$$

mit mindestens $Q = 1$ für einen Fusionsreaktor (Anforderung)

Plasmazündung und Selbstheizung

- Ein Plasma wird als gezündet bezeichnet, wenn sich das Plasma selbst aufrechterhält
- Anhand von D-T-Reaktion:
 - ▶ Neutronen verlassen das Plasma mit etwa 80% der Reaktionsenergie
 - ▶ Aber: Alpha-Teilchen (^4He) kann seine Energie durch Stöße an das Plasma abgeben
- Daher wird Plasmazündung erreicht, wenn hinreichend viele Reaktionen stattfinden, sodass Alpha-Teilchen-Heizung pro Zeiteinheit größer als Energieverlust
- für D-T-Reaktion lautet die Bedingung (Lawson):

$$n \cdot \tau > 2 \cdot 10^{20} \text{m}^{-3} \text{s} \quad (6)$$

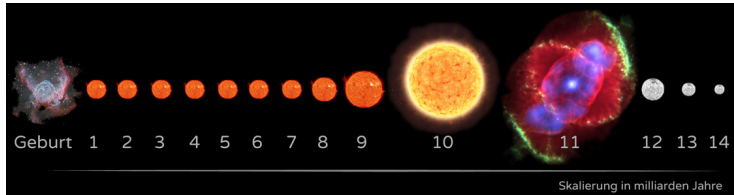
bei einer Temperatur $T \approx 10^8 \text{ K}$

- Häufig wird als Kenngröße $n \cdot \tau \cdot T$ verwendet, da hier die drei Hauptfaktoren beinhaltet sind, die zur Zündung des Plasmas beitragen

Technische Fusion im Überblick

- Zur Fusion muss die Coloumb-Barriere überwunden werden
- Vielversprechend: D-T-Reaktion in thermischer Kernfusion
- Fusion leichter Kerne (H, ^2D , ^3T , ..) liefert mehr Energie als Spaltung schwerer Kerne
- Das Lawson-Kriterium ermöglicht die Abschätzung von Einschlusszeit mal Ionendichte bei fester Temperatur und somit der maßgeblich nötigen Kenngrößen
→ $n \cdot \tau$ minimal bei etwa $3 \cdot 10^8 \text{K}$ für D-T-Reaktion

Stellare Fusion: Die Sonne



- Entstehung aus gravitativem Kollaps einer Gaswolke
- Heute: Hauptreihenstern (Gelber Zwerg), etwa 4,6 Milliarden Jahre alt
- Entwicklung zum Roten Riesen über instabile Phase hin zum Weißen Zwerg

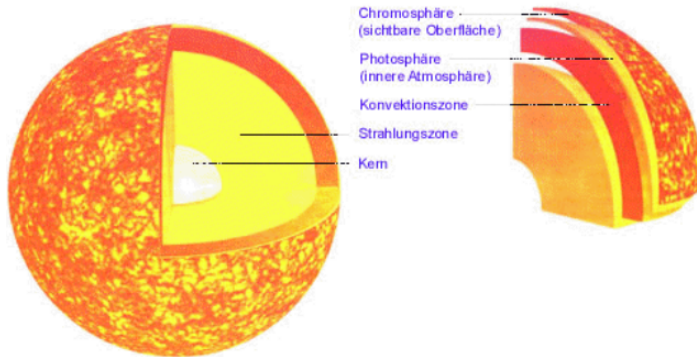
Ausgangsbedingungen

- Zusammensetzung der Sonne:
 - ▶ 73% Wasserstoff
 - ▶ 25% Helium
 - ▶ 2 % weitere Stoffe
- Kerntemperatur der Sonne: $T_{Kern} \approx 1,5 \cdot 10^7 \text{ K}$
- Kräfte:
 - ▶ intrinsisches Gravitationspotential
 - ▶ Strahlungsdruck
 - Bilden einen (vorübergehend) stabilen Gleichgewichtszustand in dem Wasserstoff zu Helium fusioniert.
- Der Fusionsprozess endet, falls kein Wasserstoff mehr im Kern ist.
- Zusammenhang zwischen Masse und nuklearer Zeitskala:

$$\tau_N \propto M^{-2,5}$$

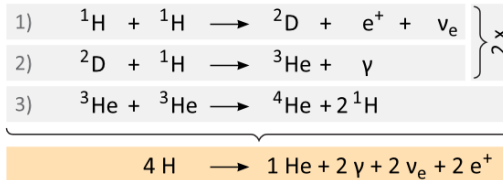
Die nukleare Zeitskala liegt im Mittel bei $\tau_n = 10^{10}$ Jahren

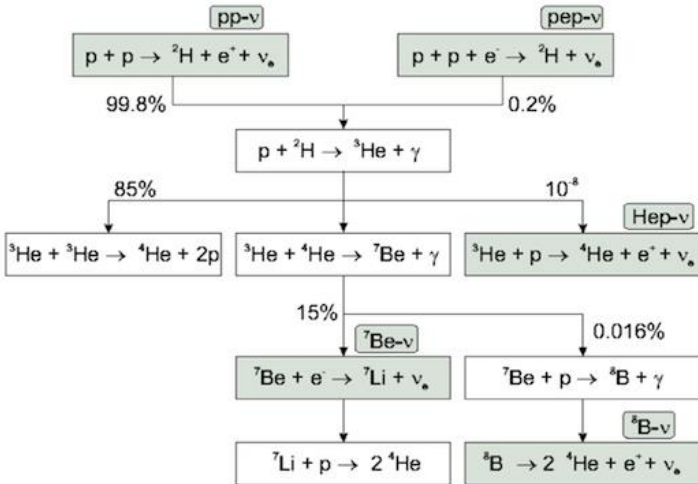
Ausgangsbedingungen



p-p-Reaktion:

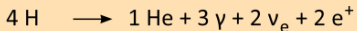
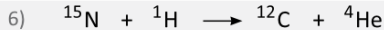
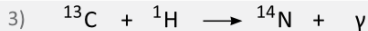
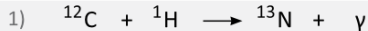
- Dominant bei Temperaturen $T \approx 5 - 15 \cdot 10^6 \text{K}$ und macht auf unserer Sonne deutlich über 90% der Fusionsprozesse aus
- Die Reaktion (hier: dominante Anteile) gliedert sich in drei Prozess:

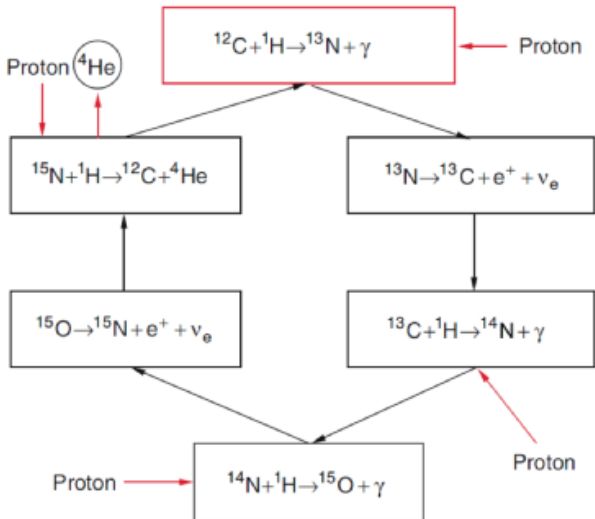




CNO-Zyklus (auch Bethe-Weizsäcker-Zyklus)

- Benötigt höhere Temperaturen $T = 15 - 30 \cdot 10^6 \text{K}$, daher bei heißeren und schwereren Sternen dominant
- Vorkommen von Sauerstoff und Stickstoff vorausgesetzt
- Gliedert sich in sechs Unterprozesse:





Merkmale der stellaren Fusion:

- Kernfusion findet im Kern bzw kernnah statt
→ Temperaturabhängigkeit
- Die im Vergleich zu anderen Sternen/Sonnen niedrige Temperatur der Sonne führt zu kleinen Fusionsraten.
→ "Langlebigkeit"
- Energiegewinn $E = 26.2 \text{ MeV}$
- Druck und räumliche Ausdehnung der Sonne begünstigen die Zündtemperatur

Energiebilanz im Vergleich zur Erde:

- Sonne erzeugt Fusionsenergie; Energie wird als elektromagnetische Strahlung in das Weltall abgestrahlt.
- Fusionsenergie in der Sonne pro Sekunde:
Etwa $600 \cdot 10^6$ t Wasserstoff werden zu $595 \cdot 10^6$ t Helium verbrannt.
- Vergleich zu Erde: Dieselbe Leistung wie auf der Sonne durch etwa $2 \cdot 10^{16}$ Atomkraftwerken

Stellare Fusion im Überblick

- Die Sonne produziert als Hauptreihenstern Strahlungsenergie durch Kernfusionen in Kernnähe
- Es werden zwei Zyklen zur Fusion von $4\ ^1\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He}$ unterschieden:
 - ▶ CNO- und pp-Zyklus
- Bei unserer Sonne dominiert der p-p-Zyklus, während bei massiveren Sternen und bei Sternen mit höherer Temperatur der CNO-Zyklus überwiegt
- Da irdische Ansätze auf kleinerem Raum und bei geringerem Druck durchgeführt werden, muss die Temperatur bei diesen im Allgemeinen höher sein

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.
Fragen?

Literaturverzeichnis

- Deutsche Physikalische Gesellschaft Fachverband Plasmaphysik: <http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/index.html>
- DLR: <http://solarsystem.dlr.de/RPIF/sonne0.shtml>
- Vorlesung: Einführung in die Astro- und Geophysik: <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/6806>
- Demtröder, W: Experimentalphysik 4, Springer Verlag, 2013
- Leifi-Physik <http://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/kernspaltung-und-kernfusion/kernfusion>
- Leifi-Physik <http://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/kernreaktionen#Bindungsenergie%20bei%20Kernen>
- Leifi-Physik <http://www.leifiphysik.de/astrophysik/sonne/fusionsreaktion-proton-proton-kette>
- Bergmann-Schäfer: Lehrbuch der Experimental Physik Band 5
- Max-Planck-Institut für Plasmaphysik:
http://www.ipp.mpg.de/47411/1_einfuehrung_grundlagen.pdf
- Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion

Bildquellenverzeichnis

- Coloumb-Barriere: Tunneleffekt:
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e2/Coulomb-Barriere.png/440px-Coulomb-Barriere.png>
- Nukleare Bindungskräfte zwischen zwei Kernen:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fb/Nuclear_fusion_forces_diagram.svg/440px-Nuclear_fusion_forces_diagram.svg.png
- Reaktivität von verschiedenen Reaktionen:
https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion#/media/File:Fusion_rxnrate.svg
- Mögliche Reaktionen zur Kernfusion:
http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/grundlagen_fusion.html
- Deutsche Physikalische Gesellschaft Fachverband Plasmaphysik. <http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/index.html>
- Lebenszyklus der Erd-Sonne: <http://blogs.fhnw.ch/sonnenforschung/files/2012/12/LebenszyklusSonneDavidBubeck.png>
- Aufbau der Sonne: http://www.volkssternwarte-amberg.de/images2/aufbau_1.gif
- p-p-Reaktion: <http://lp.uni-goettingen.de/get/text/7175>
- p-p-Kette: http://www.etap.physik.uni-mainz.de/Bilder_allgemein/Abb5.jpg
- CNO-Reaktion: <http://lp.uni-goettingen.de/get/bigimage/7173>
- CNO-Zyklus: Demtröder, W: Experimentalphysik 4, Springer Verlag, 2013
- Deuterium-Tritium Fusion:
http://www.fusetnet.eu/sites/default/files/styles/large/public/Deuterium-tritium_fusion.png?itok=58XFCTj3