



Universität Stuttgart

**Alf
Köhn-Seemann**

Fusionsforschung: Eine Einführung

2020-10-01

CC BY-SA 4.0

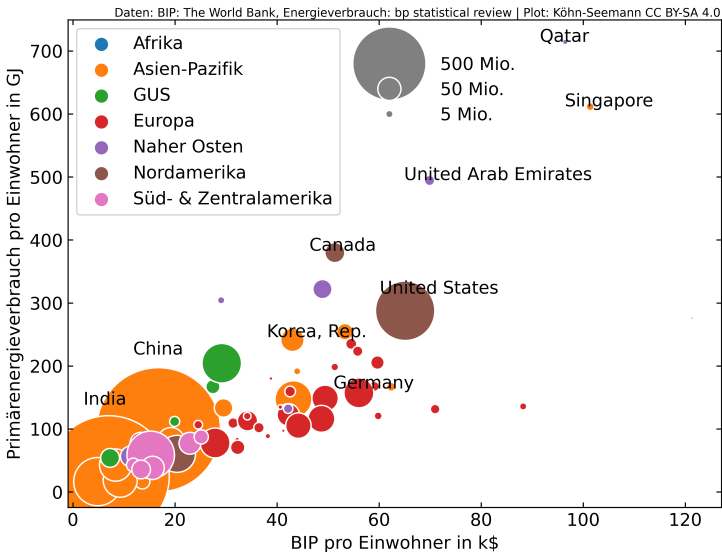
Overview

- 1 Motivation
- 2 Kernfusion
- 3 Plasma
- 4 Magnetischer Einschluss
- 5 Zusammenfassung
- 6 Weiterführende Literatur
- 7 Anhang

Motivation

1

Wohlstand ↔ Energiebedarf



Die Sonne

- Ein riesiger Haufen Kohle
→ einige 1000 Jahre
- Evolution & Geologie
→ einige Mio/Mrd Jahre
- 1920 - 1940: Kernfusion
als Energiequelle
- Sir Arthur Eddington
(1920):
*"[...] we sometimes dream
that man will one day learn
how to use it [the sun's
energy] for his service."*

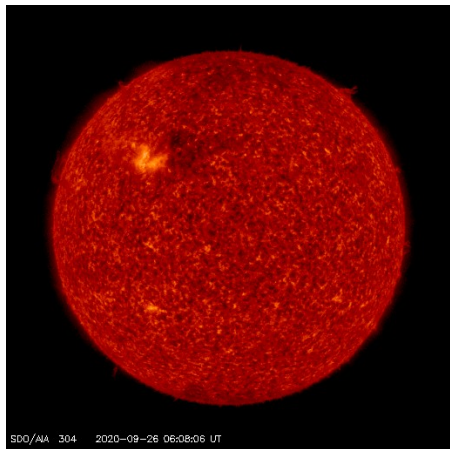


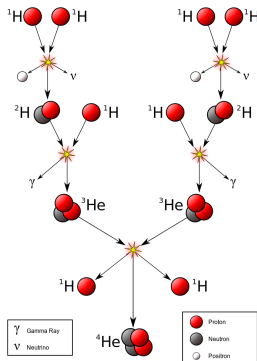
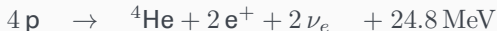
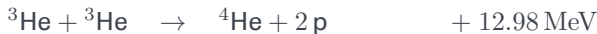
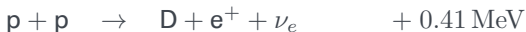
Photo credit: Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams.

Kernfusion

2

Kernfusion in der Sonne

- Bethe & Weizsäcker erklärten Energiequelle
→ Proton-Proton-Reaktion

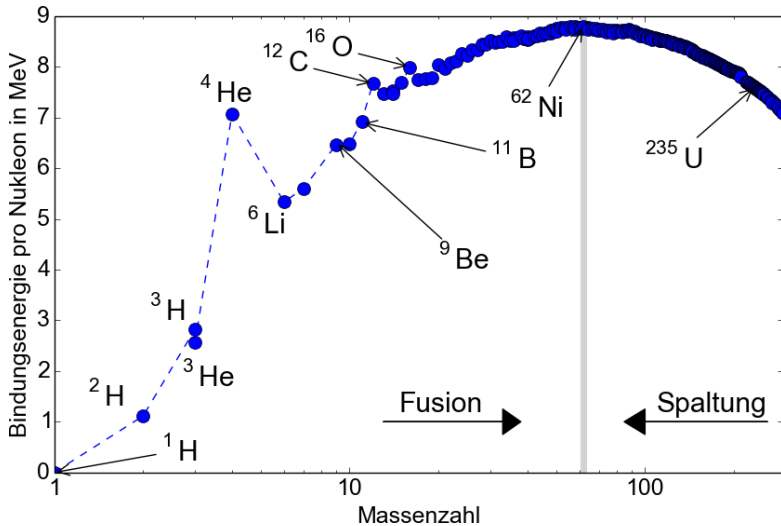


- 675 Mt H \rightarrow 670 Mt He pro Sekunde ($E = mc^2$)
- $\approx 85\%$ der abgestrahlten Energie
- Bindungsenergie pro Nukleon



Photo credit: Borb, CC BY-SA 3.0

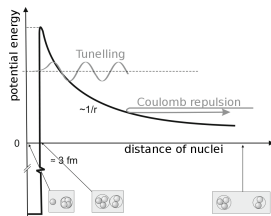
Bindungsenergie pro Nukleon als Energiequelle



Wie wird die Coulombbarriere überwunden?

- Coulombpotential von p-p
→ abstoßende Kraft

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



- Kernfusion geschieht bei Entfernungen \approx Kernradius

$$r_{\text{Kern}} \approx r_0 A^{1/3} \qquad r_0 \approx 1.3 \text{ fm}$$

A : Massenzahl

- Coulombpotential in allgemeiner Form mit $Z_{1,2}$

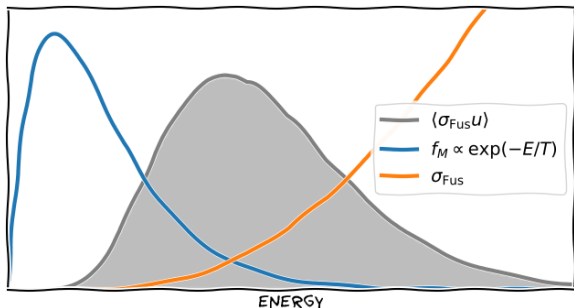
$$V_{\text{Coulomb}} \approx \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{r_0 (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})}$$

- Berechnung für Sonne: $V_{\text{p-p}} \approx 0.6 \text{ MeV} \gg T_{\odot, \text{Zentrum}}$

Fusionswahrscheinlichkeit

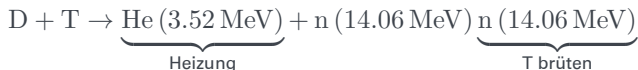
- Fusion bei moderaten Temperaturen wegen
 - Tunneln
 - Maxwell-Verteilung
- Kombination aus beiden ergibt Fusionswahrscheinlichkeit
- Faltung von Maxwell f_M und Fusionwirkungsquerschnitt σ_{Fus}

$$\langle \sigma_{Fus} u \rangle \propto \int E_r \sigma_{Fus}(E) e^{-E_r/T} dE_r$$



D-T ist aussichtsreichster Kandidat

- p-p Fusion höchst ineffizient
→ ca. 10^{10} Jahre für 2 Protonen in Sonne
- Analyse der Fusionswahrscheinlichkeiten ergibt besten Kandidat



- Fusionskraftwerk mit 1 GW: 100 kg D + 150 kg T pro Jahr
- Deuterium aus Meerwasser: $\approx 10^{10}$ Jahre
- Tritium in Lithium-Blankets brüten: $\approx 10^5$ Jahre
(zusätzlich Beryllium als n -Multiplikator)

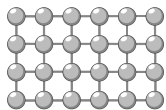


- Aktuelle keine Experimente mit Tritium
→ Tritium-Experimente bisher: TFTR, JET

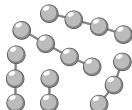
Plasma

3

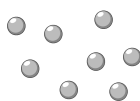
Plasma: ein weiterer Aggregatzustand



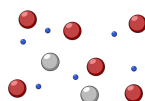
fest



flüssig



gasförmig



Plasma

Temperatur



Unsere Vorfahren vor 2500 Jahren lagen nicht so falsch:



Erde



Wasser

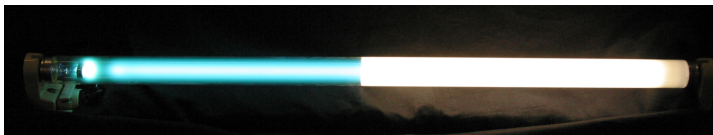


Luft

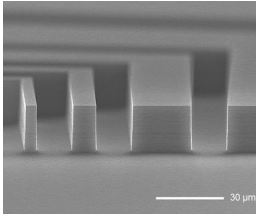


Feuer

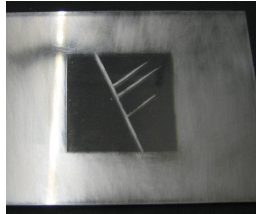
Künstlich erzeugte Plasmen auf der Erde: erhellend



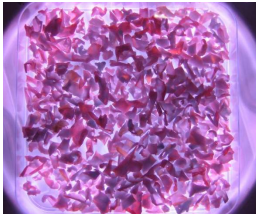
Plasmatechnologie



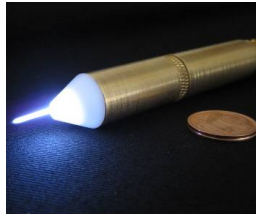
ätzen



beschichten



reinigen



sterilisieren

Photo credit: Etching: SENTECH

Natürliche Plasmen auf der Erde: Blitze



Photo credit: Jean Beaufort, publicdomainpictures.net

Polarlichter: aurora borealis & australis



Photo credit: NASA's Earth Observatory, CC BY-SA 2.0

Die Sonne



Photo credit: Solar Dynamics Observatory, NASA

Plasma ist überall: 99.9 % des sichtbaren Universum



Photo credit: NASA and the European Space Agency

Plasmadefinition



- Plasma: ionisiertes Gas aus Elektronen, Ionen & Neutralen
- Aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung langreichweitige Interaktionen, resultierend in kollektivem Verhalten
- Kein klarer Phasenübergang in Plasma-Zustand

Vereinfachte Plasmadefinition

Ein Plasma ist ein quasi-neutrales Gas bestehend aus geladenen Teilchen & Neutralen in dem kollektive Effekte dominieren.

Magnetischer Einschluss

4

Ein Magnetfeldkäfig

- Kein Material widersteht einem 15 keV (150 Mio °C) Plasma
- Plasma besteht aus geladenen Teilchen
- Magnetfelder zum Einschluss
- Magnetfeldlinien um Teilchen- und Wärmefluss auf Wand zu kontrollieren

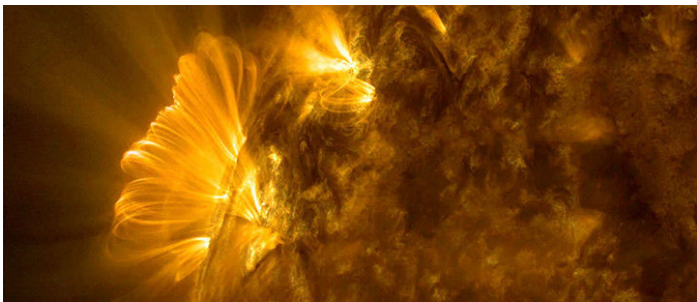


Photo credit: Solar Dynamics Observatory, NASA

Teilchenbewegung im Magnetfeld

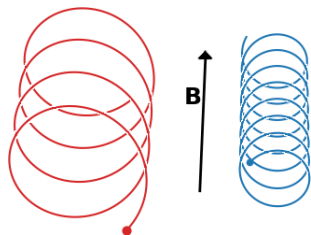
- Bewegungsgleichung durch Lorentz-Kraft

$$\mathbf{F} = m\dot{\mathbf{v}} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

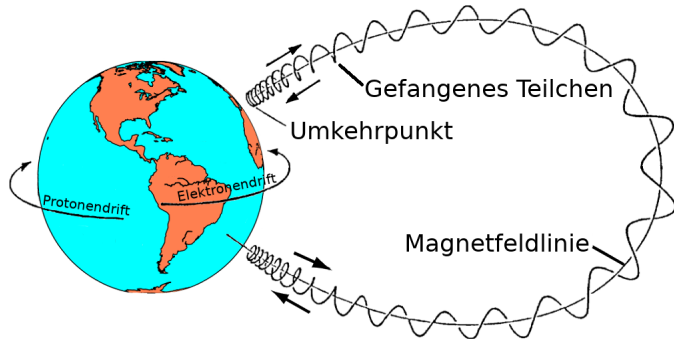
→ lösen für Position \mathbf{r} und/oder Geschwindigkeit \mathbf{v}

- Gyrationbewegung mit Drehsinn durch q
- Entlang \mathbf{B} betrachten
 - Ionen rotieren CCW
 - Elektronen rotieren CW
- $v_{\parallel} \neq 0$ resultiert in helikaler Bewegung
 - Führungszentrum + Gyration
- Radius der Gyration: **Larmor-Radius**

$$\rho_L = v_{\perp} / \omega_c$$



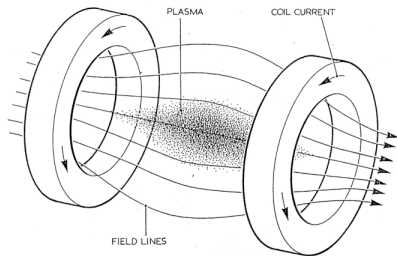
Gefangene Teilchen in der Magnetosphäre



- Erdmagnetfeld kann durch Dipolfeld angenähert werden
- Magnetfeldstärke steigt zu den Polen an
 - Änderung der Gyration
 - Einfang im magnetischen Spiegel möglich

Erste Fusionsreaktor-Konzepte

- Magnetische Spiegel waren erste Konzepte
→ Verluste an Enden



- Toroidaler Pinch
→ Reaktor-Patent 1946

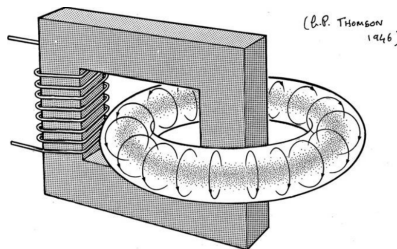
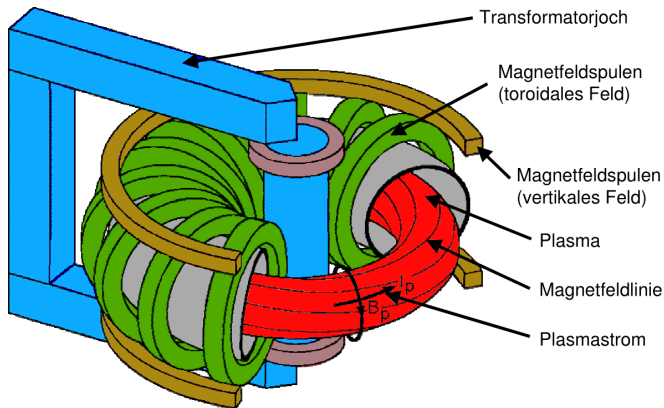


Photo credit: Bottom: Thomson & Blackman, British patent 817,681 (1946)

Das Tokamak-Prinzip



- Basierend auf Transformator: Primärspule \rightarrow Sekundärspule
- Induzierter Plasmastrom: Heizung, gepulster Betrieb

JET: Joint European Torus (größter Tokamak)

- Seit 1983 in Betrieb (Culham, UK)

$$R_0 \quad 2.96 \text{ m}$$

$$a \quad 1.25 \text{ m}$$

$$B_{\text{tor}} \quad 3.45 \text{ T}$$

$$V_{\text{plasma}} \quad 100 \text{ m}^3$$

$$I_{\text{plasma}} \quad 4.8 \text{ MA}$$

- Fusionsrekord (1997):

$$Q = 0.67,$$

$$P_{\text{fus}} = 16 \text{ MW}$$

- Aktuell Vorbereitung letzter DT Kampagne

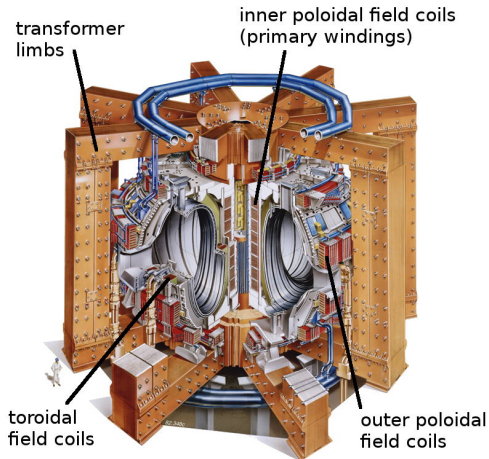


Photo credit: EUROfusion

JET von innen

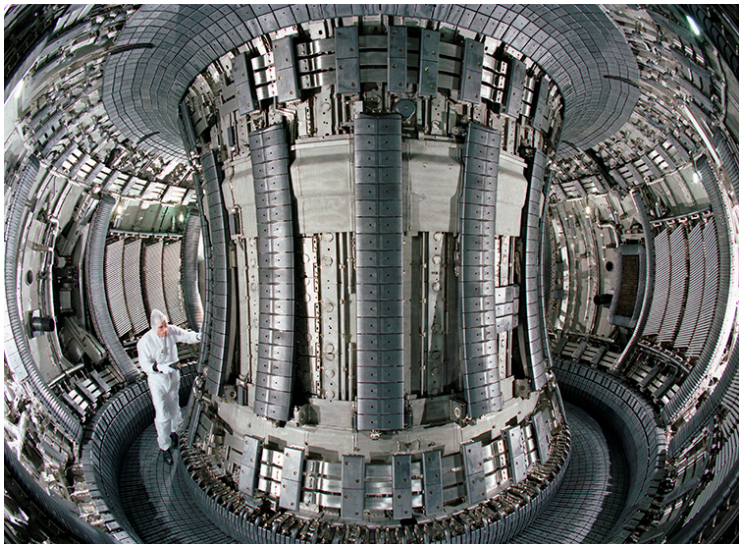


Photo credit: EUROfusion

Der nächste Schritt: ITER

- Designt für break-even

$$R_0/a \quad 6.2 \text{ m}/2 \text{ m}$$

$$B_{\text{tor}} \quad 5.3 \text{ T}$$

$$V_{\text{plasma}} \quad 840 \text{ m}^3$$

$$I_{\text{plasma}} \quad 15 \text{ MA}$$

- 1st Plasma 2025,
DT in 2035
- ITER ist groß (teuer),
basiert aber auf
konservativen Annahmen
→ gute Erfolgsaussichten
- EU, Russland, Südkorea,
Indien, China, Japan, USA
- Standort: Cadarache

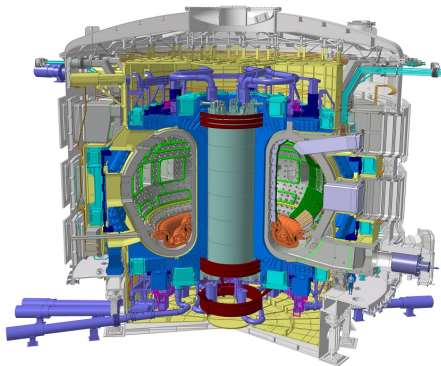
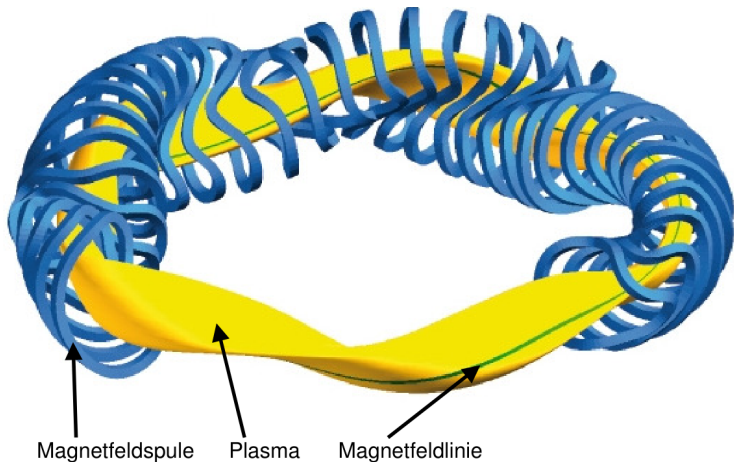


Photo credit: iter.org

Das Stellarator-Prinzip



- Magnetfeld ausschließlich durch externe Spulen erzeugt
→ kein hoher Plasmastrom notwendig, steady-state

Photo credit: IPP

Wendelstein 7-X (W7-X): größter Stellarator

- In Betrieb seit 2015
(Greifswald)

R_0	5.5 m
$\langle a \rangle$	0.53 m
B_{tor}	3 T
V_{plasma}	30 m ³

- Beste Performance
eines Stellarators
(2018)
- Aktuell: Ausbau
(Divertor-Einbau)

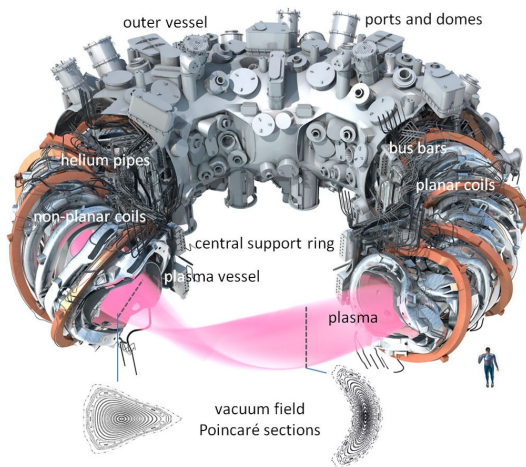
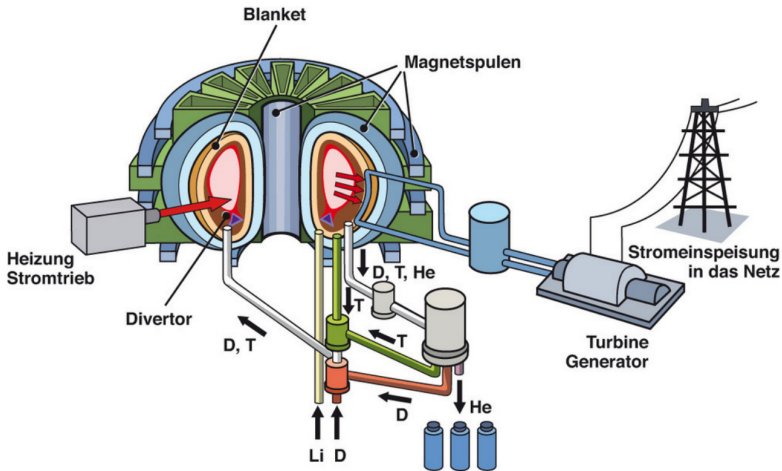


Photo credit: T. Klinger, PPCF 59 014018 (2016)

Fusionskraftwerk



Ressourcen

- D-T Fusionskraftwerk (1 GW) pro Jahr
 - 100 kg Tritium
 - 150 kg Deuterium
- Steinkohlekraftwerk pro Jahr
 - 2.700.000.000 kg Kohle
- Familie pro Jahr
 - 75 mg D + 225 mg Li
 - 1000 l Öl
- Deuterium: im Ozean für 35 Mrd. Jahre
- Tritium: aus Lithium erzeugen (Ozean: 30 Mio, Land: 30k Jahre)



Photo credit: IPP

Leistungsbilanz eines brennenden Plasmas

- Selbst-erhaltendes Plasma aus **Leistungsbilanz**

$$\underbrace{\text{Fusionsleistung}}_{\text{Alpha-Teilchen}} > \underbrace{\text{Verluste}}_{\text{Transport + Bremsstrahlung}}$$
$$\left(\frac{n}{2}\right)^2 \langle \sigma_{\text{Fus}} u \rangle E_{\alpha} > \frac{3\bar{n}\bar{T}}{\tau_E} + c_{\text{br}} Z_{\text{eff}} \bar{n}^2 \sqrt{T}$$

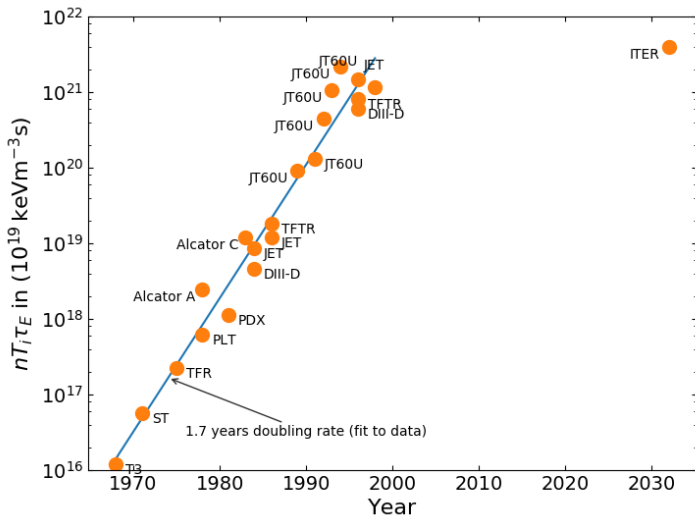
mit $E_{\alpha} = 3.52 \text{ MeV}$ und $c_{\text{br}} = 1.04 \cdot 10^{-19} \text{ m}^3 \frac{\sqrt{\text{eV}}}{\text{s}}$

- Zündungsbedingung als **Tripelprodukt** aus Leistungsbilanz

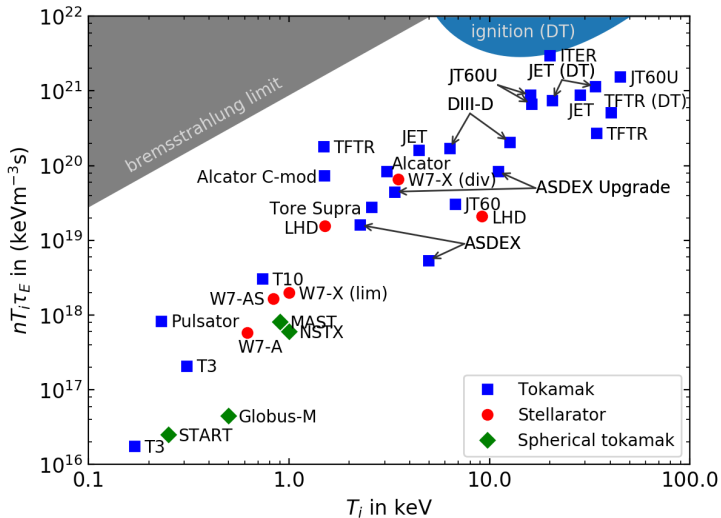
$$\bar{n}\bar{T}\tau_E > \frac{12\bar{T}^2}{\langle \sigma_{\text{fus}} u \rangle E_{\alpha} - 4c_{\text{br}} Z_{\text{eff}} \sqrt{T}} =: F$$

- Rechte Seite hat Minimum bei $T \approx 15 \text{ keV}$ (für D-T)
- $\bar{n}\bar{T}$ begrenzt $\Rightarrow \tau_E$ erhöhen

Fortschritt in den letzten Jahren



Tokamaks dominieren (bisher)



Wärmeisolation des Fusionsplasmas

- Dichte & Temperatur bereits in 1980 Jahren erreicht
- Herausforderung ist die Wärmeisolation (Energieeinschluss)
- Energieschlusszeit aus empirischen Skalierungen

$$\tau_E \propto f_H V B^{0.8} P^{-0.6}$$

- Fusionsplasma braucht bestimmte Mindestgröße
→ Bergmannsche Regel in der Biologie (Oberfläche ↔ Volumen)

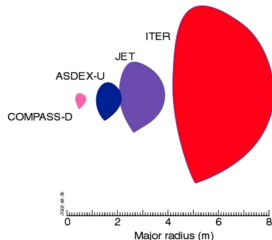
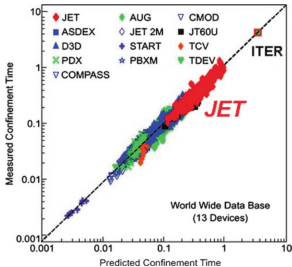


Photo credit: F. Wagner, AIP Conf. Proc. 1095 31 (2009) | F.F. Chen, *Indispensable Truth* (2011)

Plasmaheizung für 15 keV (150 Mio. °C)

- Ohm'sche Heizung im Tokamak durch induzierten Strom
 - Resistivität im Plasma sinkt mit steigender Temperatur
 - nur bis ca. 2 keV
- Neutralteilchen-Injektion
 - Erzeugung schneller Teilchen außerhalb, 1 MeV
 - Neutralisation da sonst kein Eindringen möglich
 - Bei Eintritt ins Plasma Energieübertrag durch Stöße
 - ITER: 2×16.7 MW
- Elektromagnetische Wellen
 - Ionengyrationsfrequenz, 40 – 55 MHz, ITER: 2×10 MW
 - Elektronengyrationsfrequenz, 170 GHz, ITER: 24×1 MW
- α -Teilchen
 - 20 % der in Fusion freiwerdender Energie
 - ITER: 100 MW

Limitierungen von Fusionsplasmen

- Optimaler Wert für $\bar{n}\bar{T}$ (DT)
- Extrem steile Gradienten am Plasmarand (150 Mio ° → 0 °)
- Mikroinstabilitäten
- Turbulenz (Transport)
- Makroinstabilitäten
- Wärmeflüsse auf die Wand
- Verunreinigungen
- Wandmaterial entscheidend
- Schnelle Diagnostik für Controlling

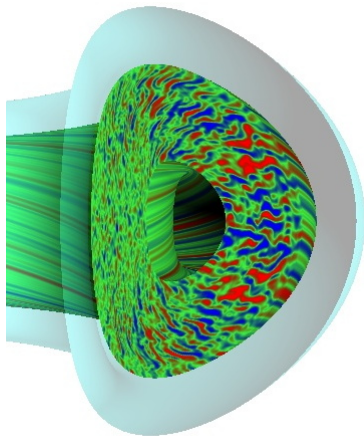


Photo credit: Greg Hammett, PPPL

Zusammenfassung

5

Zusammenfassung

- Energiebedarf wird steigen
→ Fusion als Teil eines Energiemixes (CO₂-neutral)
- Plasma: ionisiertes Gas in dem kollektive Effekte dominieren
- Plasmaeinschluss durch Magnetfeldkäfig
→ Tokamak & Stellarator
- D-T Fusion favorisiert in Fusionsreaktoren
→ geringe Aktivierungsenergie, Brennstoffverfügbarkeit
- Bedingung für Zündung durch Triple-Produkt (Lawson-Kriterium)
- Skalierungsgesetz der Energieeinschlusszeit
→ Größe von ITER
- Kombination mehrerer Heizmethoden
- ITER wird 2025 in Betrieb gehen, 2035 DT-Experimente
- Kernfusionsreaktoren inhärent sicher
- Keine Endlagerung radioaktiven Materials erforderlich
- Studium zahlreicher physikalischer Phänomene

Weiterführende Literatur

6

Plasmaphysik

- Bücher

- [1] *Plasmaphysik: Phänomene, Grundlagen, Anwendungen*, U. Stroth <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-55236-0>
- [2] *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, F.F. Chen <https://dx.doi.org/10.1007%2F978-3-319-22309-4>
- [3] *Plasma Physics: An Introduction*, A. Piel <https://dx.doi.org/10.1007%2F978-3-319-63427-2>
- [4] *Fundamentals of Plasma Physics*, P.M. Bellan
- [5] *Introduction to Plasma Physics*, R.J. Goldston & P.H. Rutherford

- Online-Ressourcen

- [6] *Introduction to Plasma Physics*, I.H. Hutchinson <http://silas.psfc.mit.edu/introplasma/index.html>
- [7] *Plasma Physics*, R. Fitzpatrick <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/Plasma/index.html>
- [8] *Plasma Physics and Applications*, MOOC from EPFL https://www.youtube.com/watch?v=SCFb5Au_dXk

Fusionsforschung

- Bücher

- [1] *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, F.F. Chen
<https://dx.doi.org/10.1007%2F978-3-319-22309-4>
- [2] *An Indispensable Truth*, F.F. Chen
<https://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7820-2>
- [3] *Fusion Physics*, IAEA (free to download) <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/8879/Fusion-Physics>
- [4] *Fusion Plasma Physics*, W.M. Stacey
- [5] *Plasma Physics and Controlled Fusion*, K. Miyamoto
- [6] *Plasma Physics and Fusion Energy*, J. Freidberg

- Online-Ressourcen

- [7] *FusionWiki*, LNF and FuseNet
<http://fusionwiki.ciemat.es>
- [8] *FuseNet: The European Fusion Education Network*
<https://www.fusenet.eu/>
- [9] *European Master of Science in Nuclear Fusion and Engineering Physics*, funding available
<https://www.em-master-fusion.org/>

Magnetischer Einschluss

- Bücher

[1] *Tokamaks*, J. Wesson

[2] *Magnetic Fusion Energy*, H.N. George (Ed.)

<https://doi.org/10.1016/C2014-0-03635-0>

[3] *Stellarator and Heliotron Devices*, M. Wakatani

[4] *Fusion: Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion*, W.M. Stacey

- Online-Ressourcen

[5] *All-the-World's Tokamaks*, N. Balshaw

<http://www.tokamak.info>

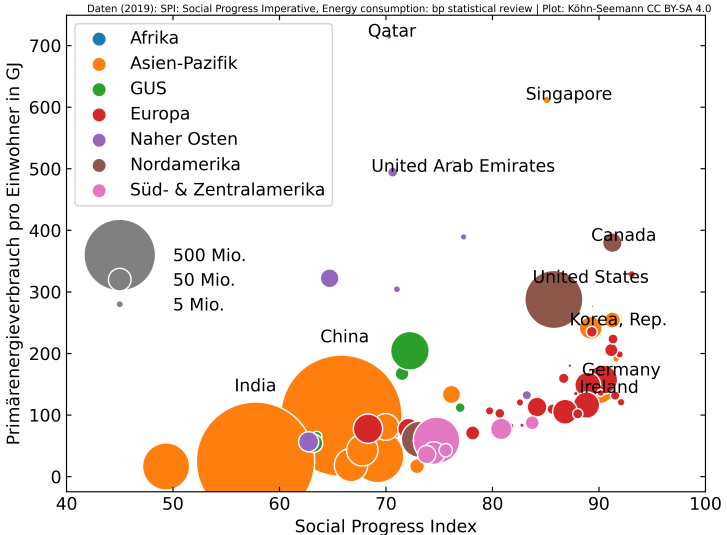
[6] *Fusion research lecture on YouTube*, A. Köhn-Seemann

<https://www.youtube.com/c/DerPlasma>

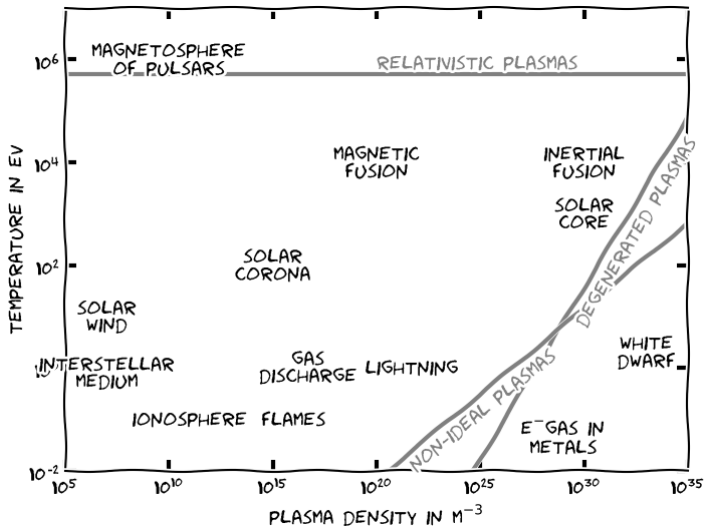
Anhang

7

Wohlstand ↔ Energiebedarf



Der Plasma-Zoo



Concept of temperature

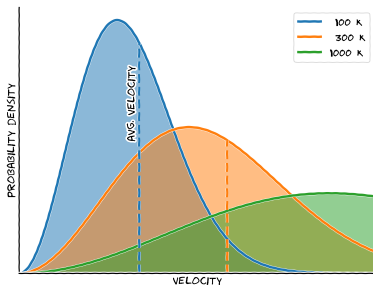
- Ensemble of particles
⇒ Maxwell-Boltzmann statistics
⇒ Maxwell-Boltzmann distribution of velocities (“Maxwellian”):

$$f(v) = n \sqrt{\frac{m}{2\pi k_B T}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2k_B T}\right)$$

- Average energy in 1D (weighted ensemble average):

$$E_{\text{av}} = \frac{\int \frac{mv^2}{2} f(v) dv}{\int f(v) dv} = \frac{1}{2} k_B T$$

→ in 3D: $E_{\text{av}} = \frac{3}{2} k_B T$



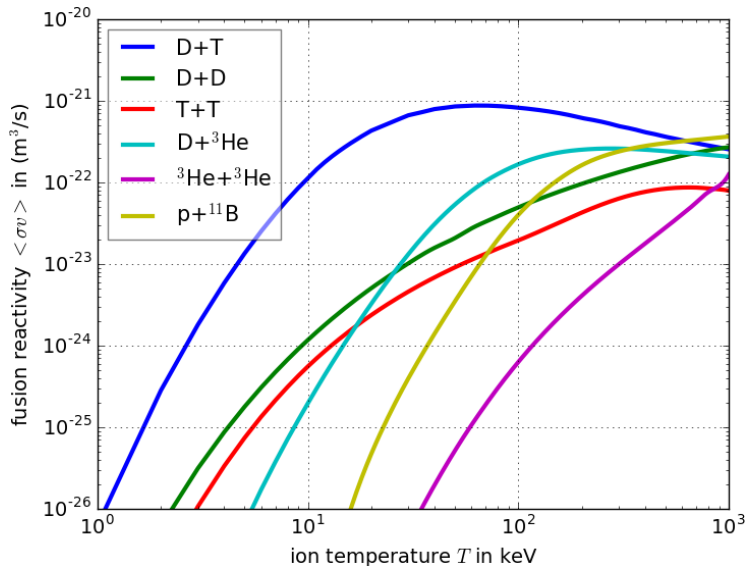
- $k_B T = 1 \text{ eV}$ corresponds to $T = 11600 \text{ K}$
- Note that often $k_B T \rightarrow T$
e.g. $T = 1 \text{ eV}$

A proper plasma definition

- Plasma: an ionized gas consisting of electrons, ions & neutrals
- Due to Coulomb interactions, the particles interact over large distances resulting in collective behaviour
- There is no clear phase transition into the plasma state
- Following criteria have to be fulfilled:
 - (1) $\lambda_D \ll L$, with λ_D the Debye length and L the spatial dimension of the plasma
 - (2) $N_D \gg 1$, with N_D the number of particles in the Debye sphere
 - (3) $\omega_{pe} \tau_{\text{coll},n} > 1$, with ω_{pe} the electron plasma frequency and $\tau_{\text{coll},n}$ the collision time between electrons and neutrals



Various fusion processes are possible





Universität Stuttgart



Alf Köhn-Seemann
IGVP, University of Stuttgart

eMail koehn@igvp.uni-stuttgart.de
fon +49 711 685 69686