

KAPITEL 16 :

Kernfusion

- 16.1 Prinzip der Kernfusion
- 16.2 Energieerzeugung in der Sonne
- 16.3 Wege zur Realisierung der gesteuerten Kernfusion
- 16.4 Magnetischer Einschluss (Tokamak-Prinzip)
- 16.5 Trägheitseinschluss

16.1 Prinzip der Kernfusion

- Kernfusion: verschmelzen (fusionieren) von 2 leichten Kernen
→ bilden mittelschweren, stärker gebundenen Kern
→ Bindungsenergie wird freigesetzt
⇒ Interessante Alternative zur Energiegewinnung

- Bedingung für Kernfusion:

Coulombbarriere zwischen beiden Kernen muss überwunden werden

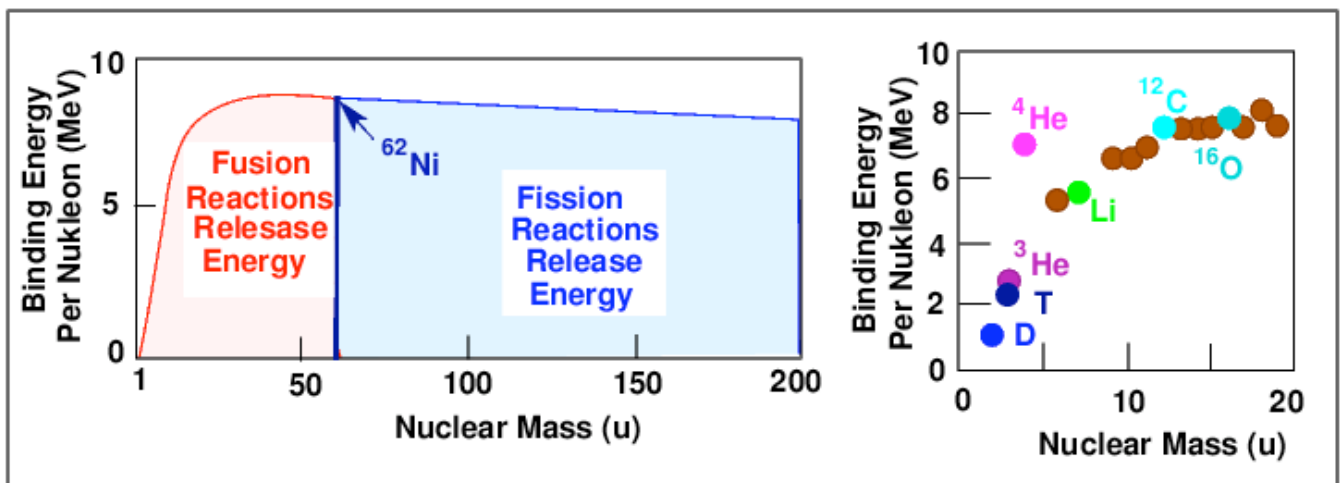
$$V_c = \frac{ZZ'e^2}{R+R'} \sim \frac{1}{8} A^{\frac{5}{3}} \text{ MeV} \quad \text{für } A \sim A' \sim 2Z \sim 2Z'$$

→ Erhitzen der Kerne auf hohe Temperaturen
(grosse E_{kin})

z.B.: $V_c \sim \text{keV} \rightarrow T \sim 10^7 \text{ K}$ [$kT (\text{eV}) = 8.6 \cdot 10^{-5} T (\text{K})$]

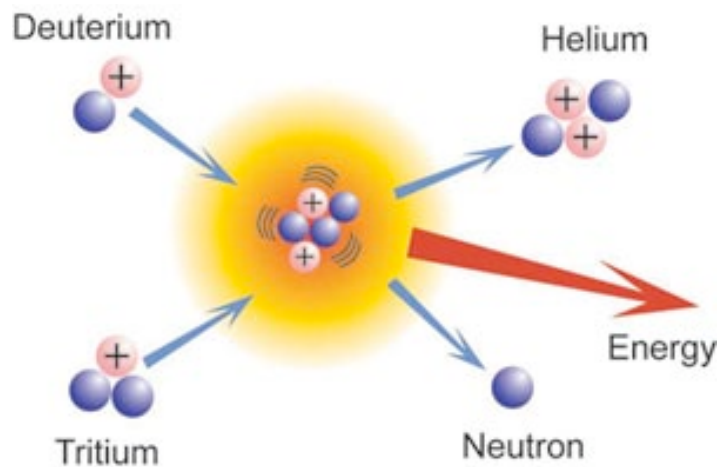
Bisher Kernfusion nur unkontrolliert →
Kernfusionsbombe

- Wasserstoffbombe: verwende als 'Zünder' Atombombe
→ sehr hohe Temperatur



Kernfusion

- Für Kernfusion erforderlich: $T \geq 10^7 \text{ K} \Rightarrow$ **PLASMA**
- Aussichtsreichste Reaktion für gesteuerte Kernfusion:



Deuterium und Tritium sind Isotope von Wasserstoff
Deuterium : natürlich in Wasser vorkommend

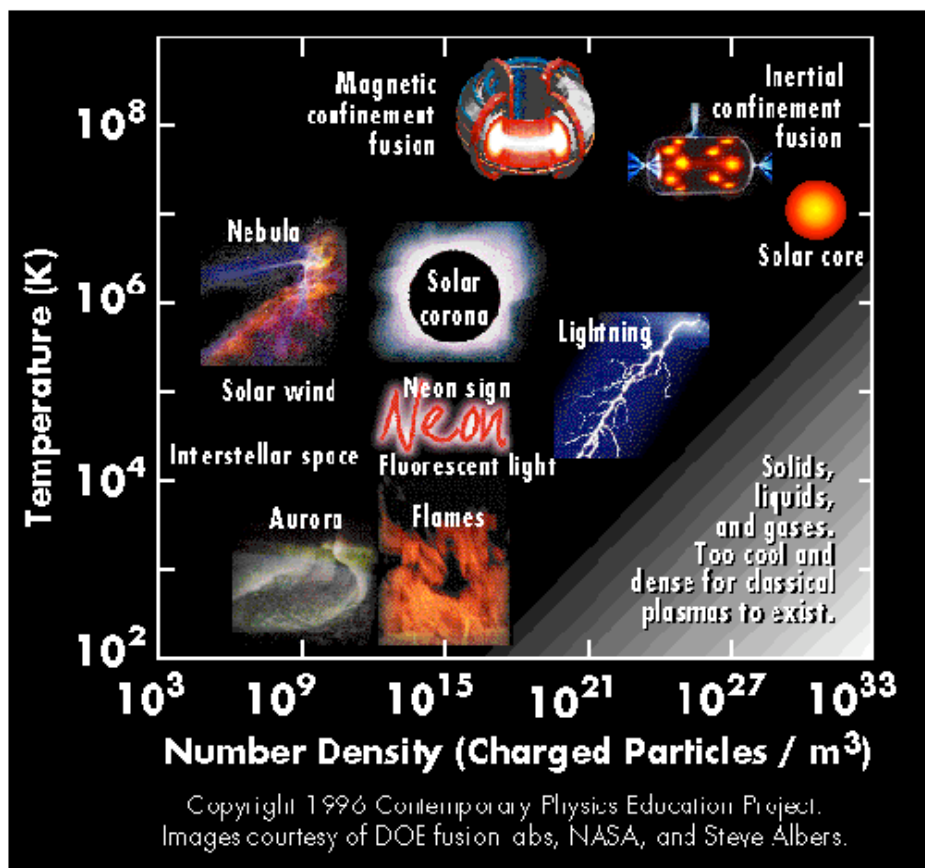
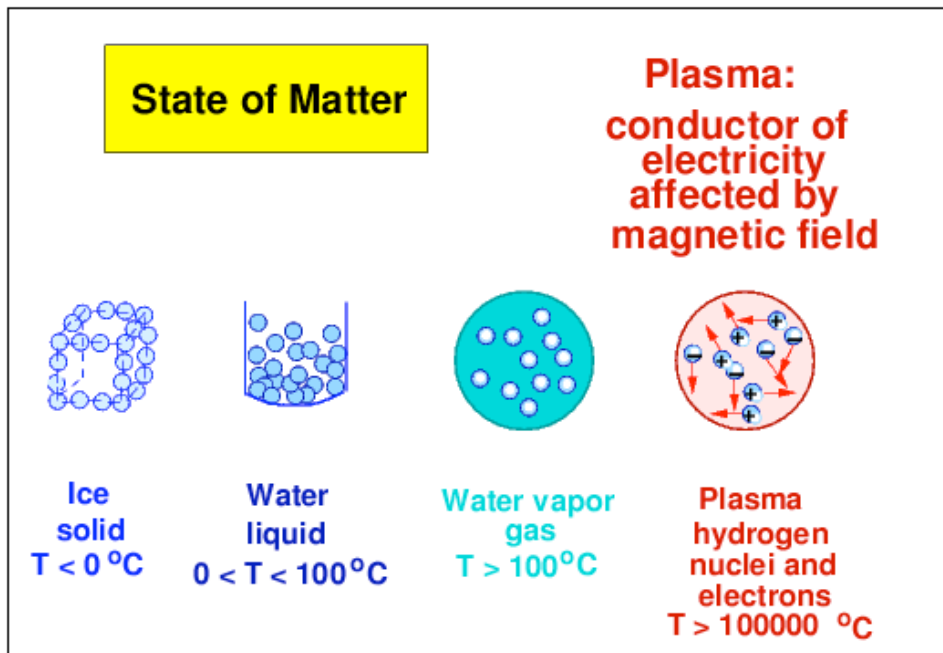
Tritium: aus Lithium erzeugt:



Nachteile: Radioaktives Tritium
Neutronenstrahlung
Lithium reagiert heftig mit Sauerstoff

Plasma

Plasma: der Zustand tritt bei sehr hohen Energien auf.
Die Atome werden ionisiert und in geladene Bestandteile zerlegt.
Der Körper hat keine feste innere Struktur,
aber besitzt elektromagnetische Wechselwirkungen

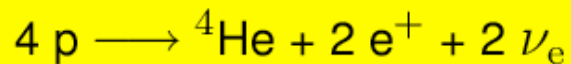


16.2 Energieerzeugung in Sonne

Einige wichtige Parameter der Sonne

Parameter	Wert
Alter	$4.6 \cdot 10^9$ Jahre
Radius	$6.96 \cdot 10^5$ km
Masse	$1.99 \cdot 10^{30}$ kg
mittler Dichte	1.41 g cm^{-3}
Temperatur T_c im Zentrum	$15.6 \cdot 10^6$ K
Oberflächentemperatur	$5.78 \cdot 10^3$ K
Zusammensetzung (Massen-%):	
Wasserstoff H	34.1%
Helium He	63.9%
schwere Kerne ($Z > 2$)	1.96%
mittlerer Abstand Sonne-Erde (= 1 astronom. Einheit, AE)	$1.496 \cdot 10^8$ km
Beitrag zur Energieerzeugung:	
pp-Zyklus	98.4%
CNO-Zyklus	1.6%
frei werdende Energie pro ^4He -Fusion	26.73 MeV
mittlere Energie der beiden Neutrinos	0.59 MeV
gesamter ν_e -Fluss aus der Sonne	$1.87 \cdot 10^{38} \text{ s}^{-1}$
ν_e -Flussdichte auf der Erde	$6.6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

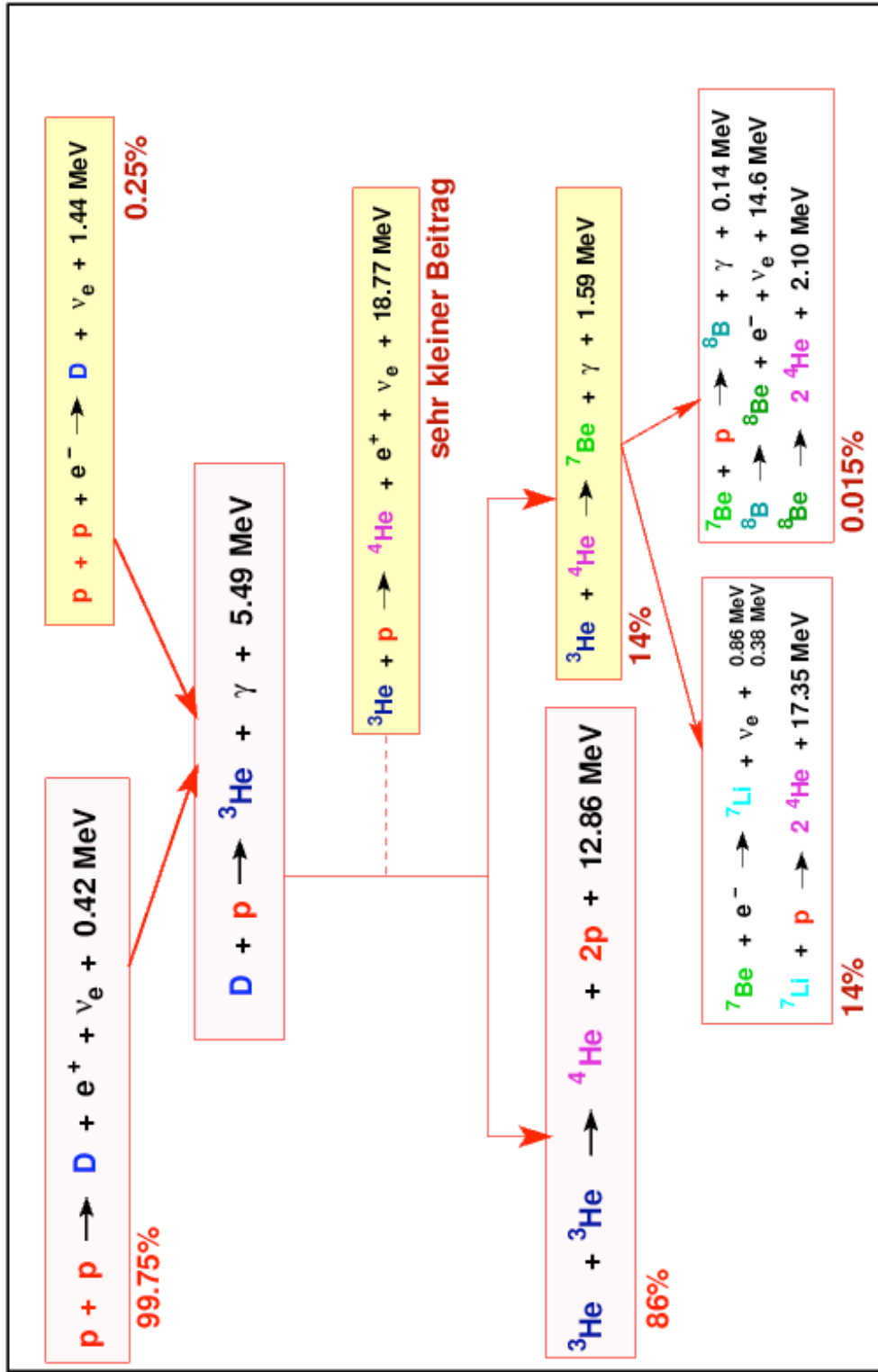
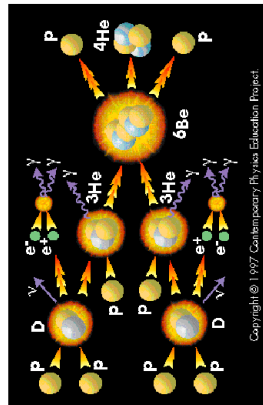
- Sonnenenergie durch thermonukleare Fusion von Wasserstoff zu Helium erzeugt
(Plasma-Confinement durch Gravitation):



Im Inneren der Sonne bei $T \sim 1.56 \cdot 10^7 \text{ K}$
 2 e^+ annihilieren mit 2 e^- : $\text{e}^+ \text{ e}^- \longrightarrow \gamma\gamma$ oder $\gamma\gamma\gamma$

- Für Energieerzeugung:
 $Q = 2m_e + 4m_p - m_{\text{He}} = 26.73 \text{ MeV}$ wird frei
- ca $8 \cdot 10^{28} \text{ kg}$ ${}^1_1\text{H} \longrightarrow {}^4_2\text{He}$ umgewandelt
 entspricht ca 4% der Gesamtmasse der Sonne

pp – Zyklus in der Sonne

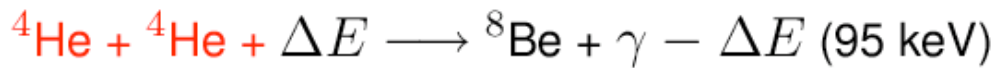


CNO – Zyklus

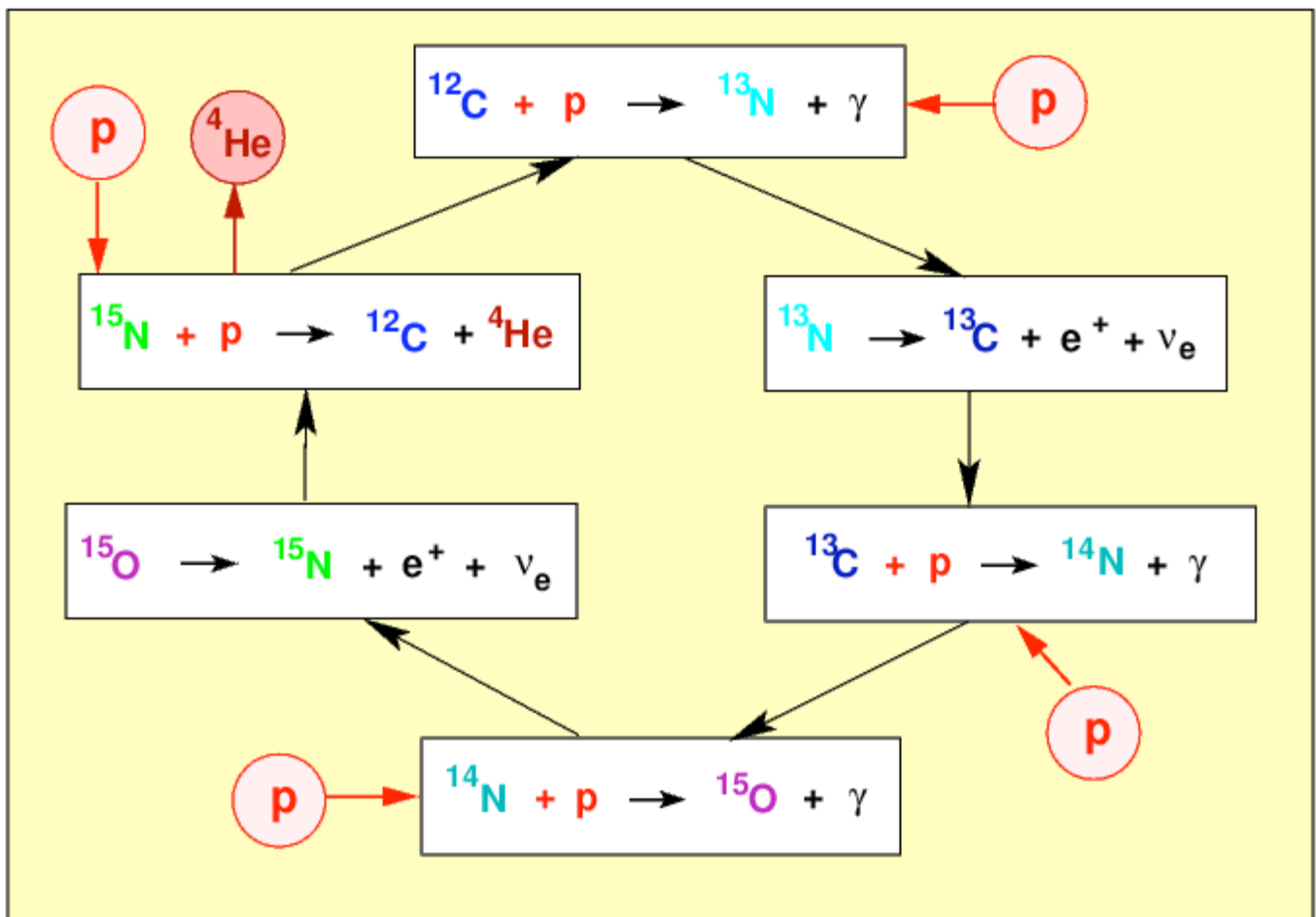
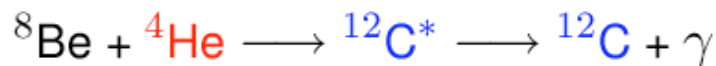
Für Sonne untergeordnete Rolle (1.6% der Energieerzeugung)
Bei heissen Sternen: Hauptanteil der Energieerzeugung

Kohlenstoff wirkt als Katalysator für Fusion von 4 p zu ${}^4\text{He}$ -Kern

Kohlenstoff wird erzeugt via:



Erst bei genügender Energie
der Stosspartner



16.3 Gesteuerte Kernfusion

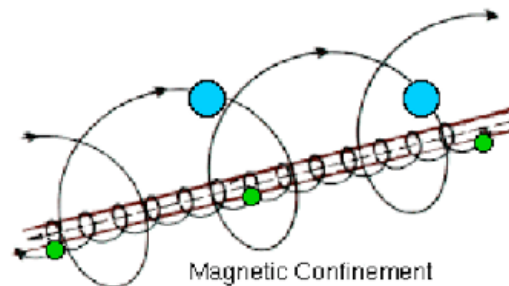
Forderung (Lawson's Bedingung) für D-T Fusion:

$$n\tau \geq 10^{14} \text{ s/cm}^3$$

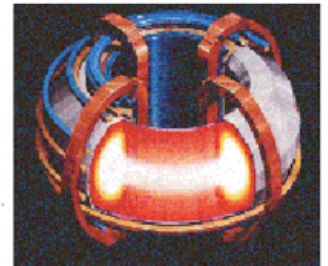
n Dichte (Zahl der Kerne/cm³)

τ Confinement Zeit

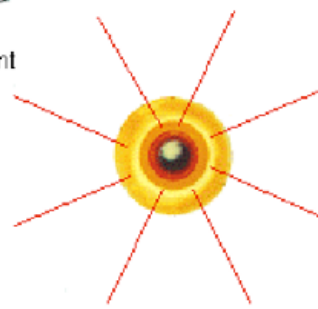
Fusion Mechanisms



Magnetic Confinement



Gravitational Confinement
in the Sun and Stars



Inertial Confinement
Using Lasers

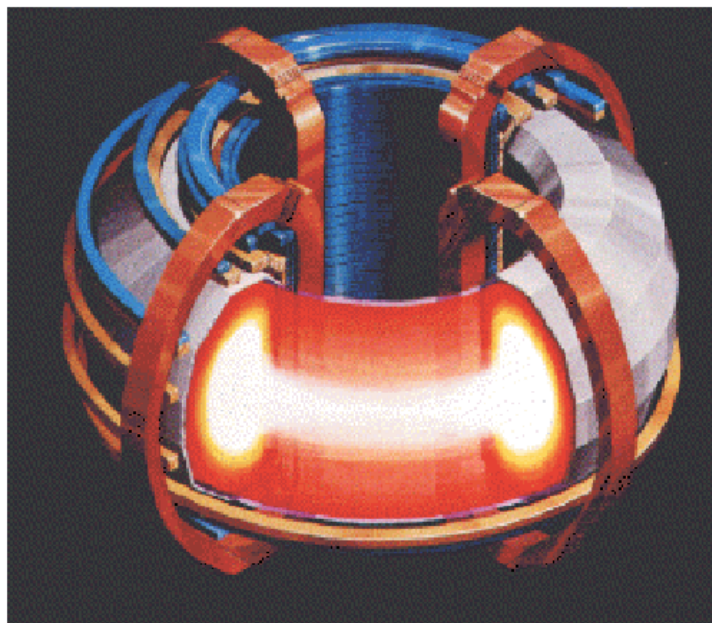


- 1. Magnetischer Einschluss** des Plasmas ($T \sim 10^8 \text{ K}$):
für 1 Sekunde (magnetische Flasche) $\rightarrow 10^{14} \text{ Atome/cm}^3$
(entspricht 10^{-5} mal der Dichte von Luft)
TOKOMAK: **TO**rois-**K**amera-**MA**gnit-**K**atushka
(toroidal chamber and magnetic coil)
1952 in Russland entwickelt
Stellarator: andere Magnetfeld Konfiguration
- 2. Trägheitseinschluss** des Fusionsplasmas ($T \sim 10^8 \text{ K}$):
aufheizen des Plasmas durch Laserstrahlung
für 10^{-11} Sekunden (Mikro-Explosion) $\rightarrow 10^{25} \text{ Atome/cm}^3$
(entspricht ~ 1000 mal Dichte von flüssigem DT)

16.4 TOKAMAK – Prinzip

Beruh auf spezieller Anordnung von 3 Magnetsystemen:

- Ein zeitlich veränderlicher Strom durch die Transformatorspule im Zentrum erzeugt in der ringförmigen, mit dem Fusionsgas gefüllten Toroidkammer einen elektrischen Strom. Dieser Strom heizt Gas auf und ionisiert es → PLASMA entsteht.
- Toroid-Feldspulen erzeugen ringförmiges Magnetfeld entlang des Torus. Geladene Teilchen im Plasma auf spiralförmigen Bahnen um Magnetfeldlinien.
- Ein grosses horizontal liegendes Spulenpaar erzeugt vertikales Magnetfeld → geladene Teilchen können nicht den Torus in radialer Richtung verlassen.



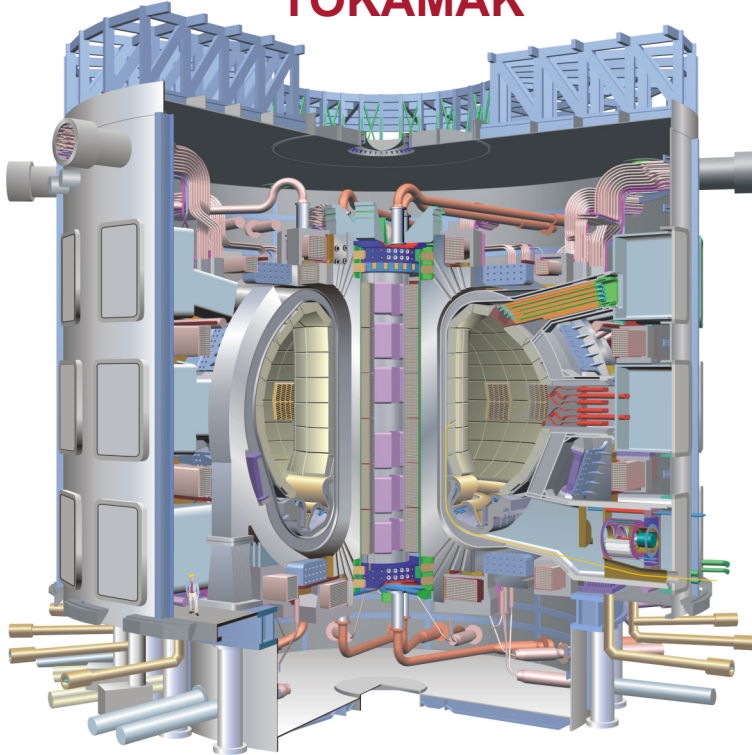
Alle Magnetfelder müssen so optimiert werden, dass sie den Plasmadruck kompensieren, und Plasma genügend lange einschliessen.

Verwende supraleitende Spulen

Bemerkung: **JET** (Joint European Torus in Culham, UK):
in Pulsen von ca. 2 Sekunden Dauer, Spitzenleistung von 16MV
verwirklicht, entspricht ca. 62% der eingesetzten Heizleistung

ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor

TOKAMAK



International Project:

1985: Soviet Union, USA, Europe, Japan

Today: 7 ITER Partner:

European Union (+CH), Japan, Russia, China, South-Korea, India, USA

Demonstrate the scientific and technological feasibility of fusion energy for peaceful purpose

Technical

- Demonstrate extended burn of Deuterium-Tritium plasma, with steady state as the ultimate goal.
- Integrate and test all essential fusion power reactor technologies and components.
- Demonstrate safety and environmental acceptability of fusion.

ITER Parameters

Total fusion power	500 MW (700MW)
Plasma radius	6.2 m
Total Radius	10.7 m
Total Height	30 m
Toroidal magnetic field	5.3 T
Plasma volume	837 m ³
Plasma mass	0.5 g
Temperature	10 ⁸ K



Mission of ITER

- Up to steady state fusion power production.
- Plasma makes 10x more power than needed to run it.
- Optimize plasma behavior.
- Have dimensions comparable to a power station.
- Produce about 500 MW of fusion power.
- Demonstrate or develop all the new technologies required for fusion power stations, except materials endurance.
- Obtain license for construction and operation.
- Operate for about 20 years.
- Cost about €5bn to construct (over 9 years) and €5bn to operate (about 20 years) and decommission (total €10bn).

Cadarache Site (F): decided in 2006
Took 5 years to decide

First plasma in 2016?

ITER is not an electrical power producing reactor

If ITER is successful:
Start DEMO Fusion Project
(design 2020 → start 2035)



If ITER and DEMO are successful:
commercial fusion power station not before 2060 (status 11/2006)

16.5 Trägheitseinschluss des Fusionsplasmas

Extreme Temperaturen von 100 Millionen Grad und Dichten von 1000 mal normaler Festkörper-Dichten sind notwendig - jedoch nur für einige 10^{-9} s

