

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 des Fusionsplasmas**

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

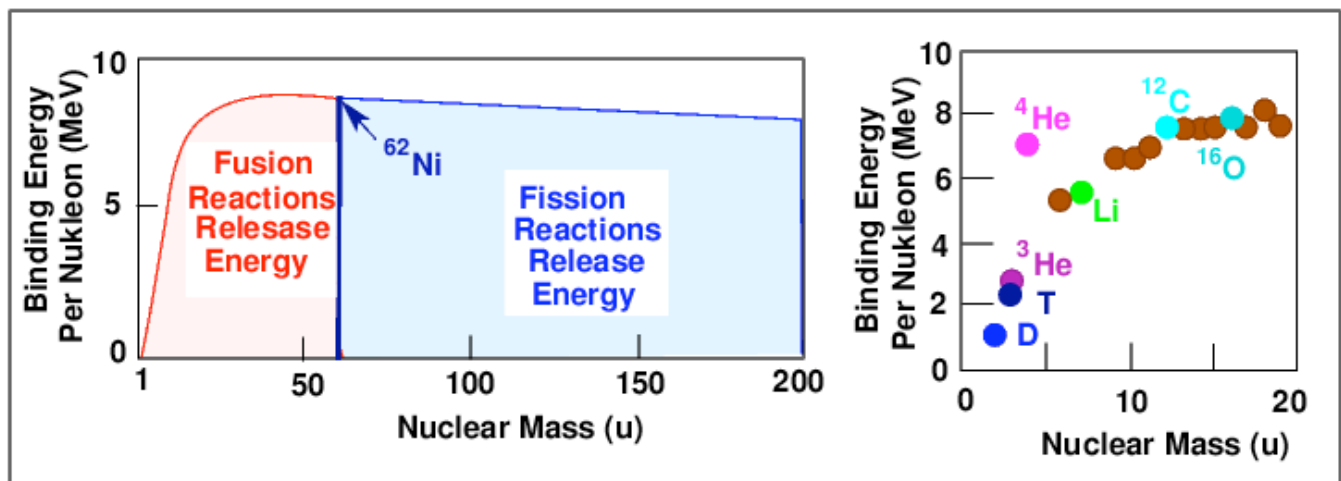
$$V_c = \frac{ZZ'e^2}{R+R'} \sim \frac{1}{8} A^{\frac{5}{3}} \text{ MeV} \quad \text{für } A \sim A' \sim 2Z \sim 2Z'$$

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

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

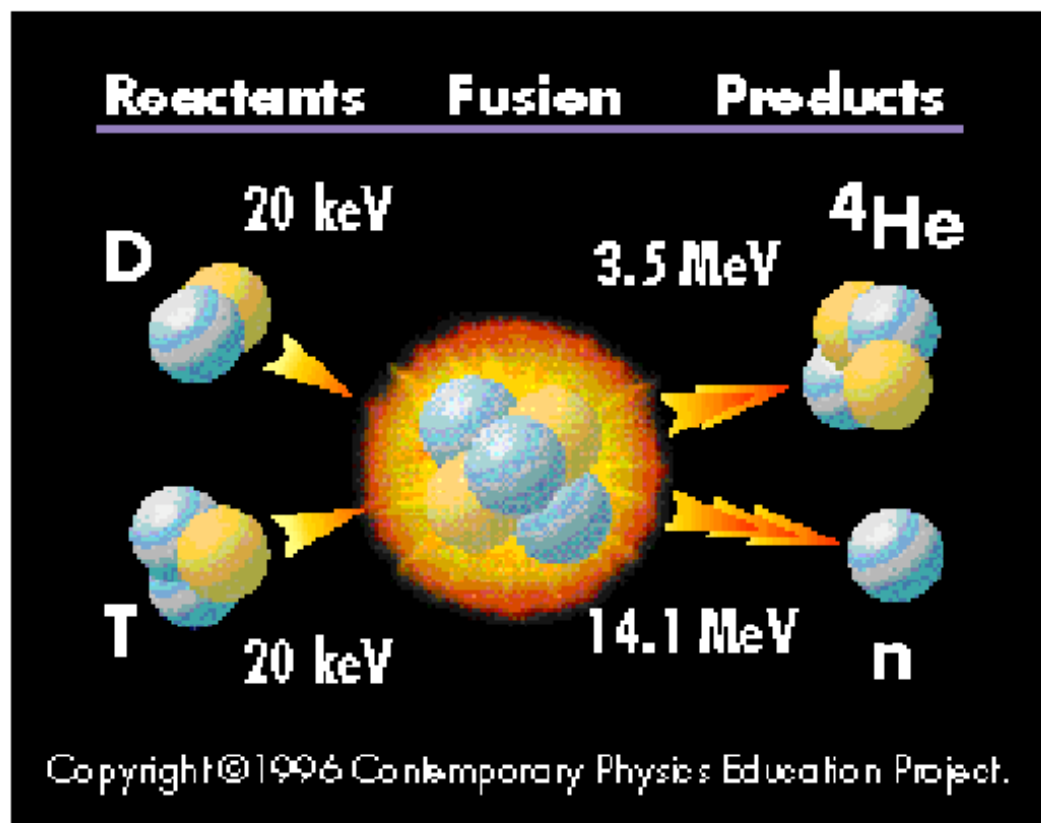
Bisher Kernfusion nur unkontrolliert —> Kernfusionsbombe

- Wasserstoffbombe: verwende als 'Zünder' Atombombe
 —> sehr hohe Temperatur



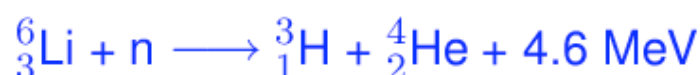
Kernfusion

- 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

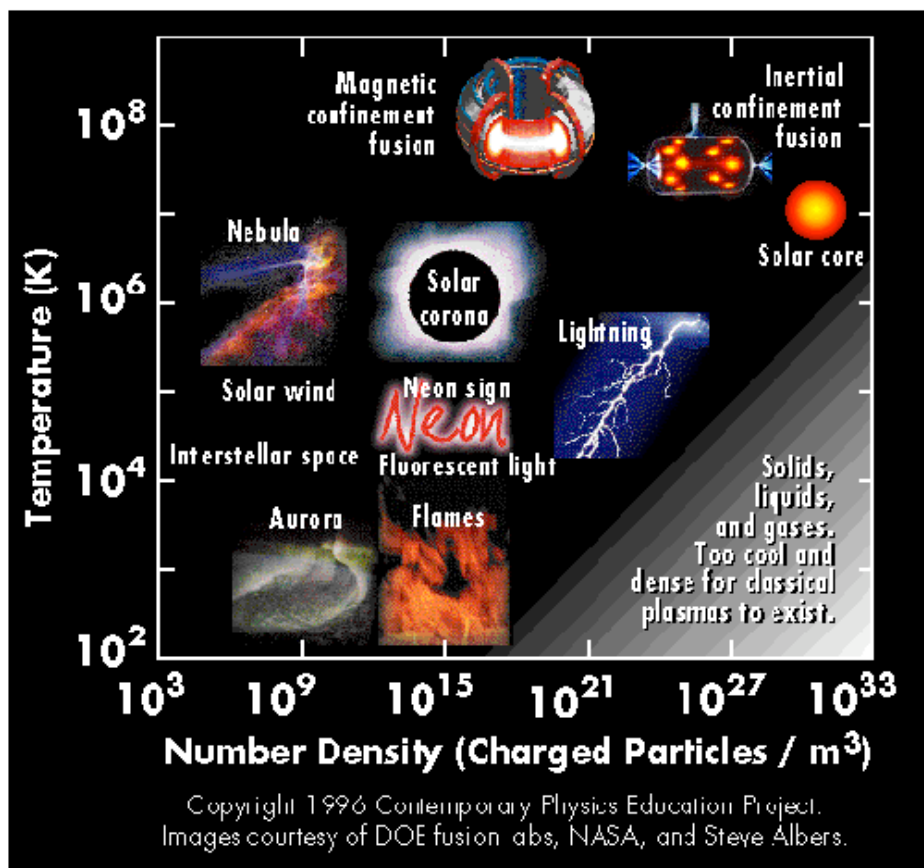
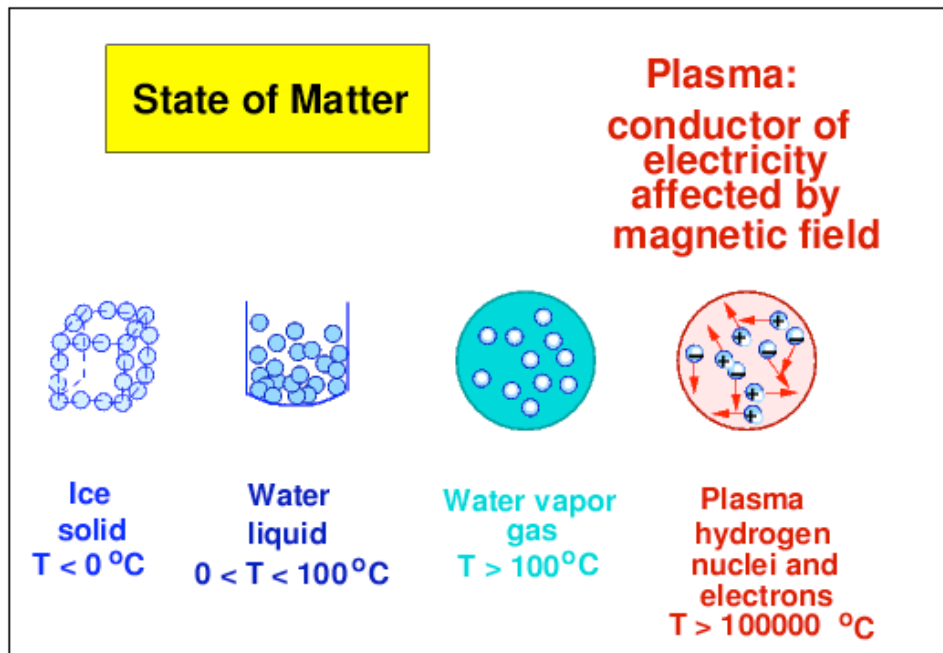
Tritium: aus Lithium erzeugt:



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

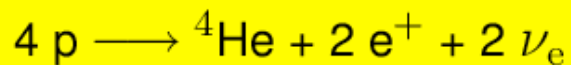


16.2 Energieerzeugung in Sonne

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	$6.6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

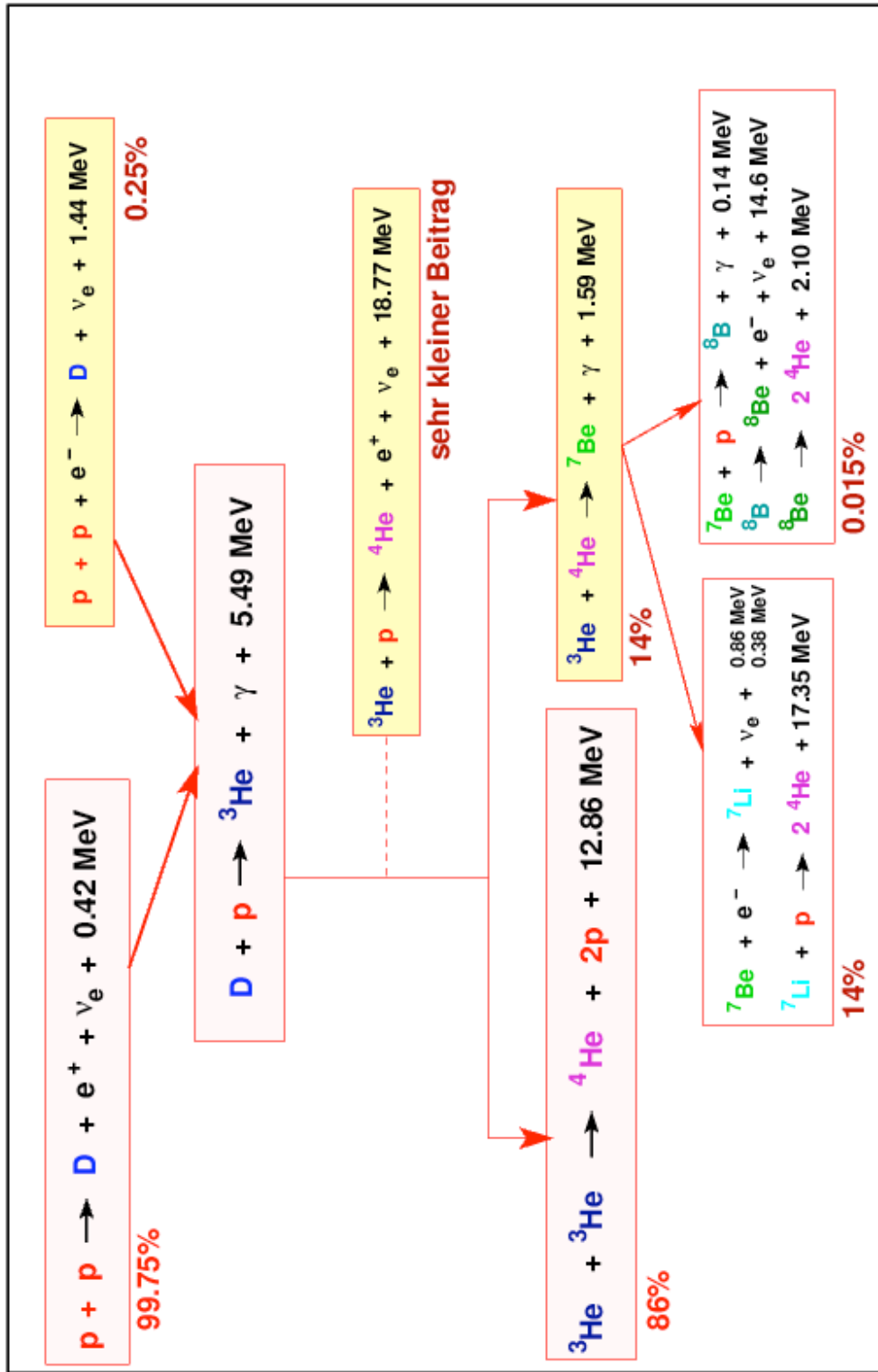
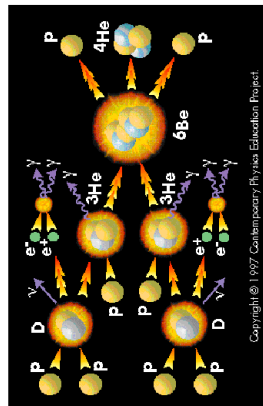
- Sonnenenergie durch thermonukleare Fusion von Wasserstoff zu Helium erzeugt
(Plasma-Confinement durch Gravitation):



Im Inneren der Sonne bei $T \sim 1.56 \cdot 10^7$ 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 $8 \cdot 10^{28} \text{ kg}$ ${}_1^1\text{H} \longrightarrow {}_2^4\text{He}$ umgewandelt
 entspricht ca 4% der Gesamtmasse der Sonne

pp – Zyklus in der Sonne

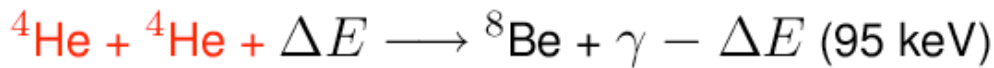


CNO – Zyklus

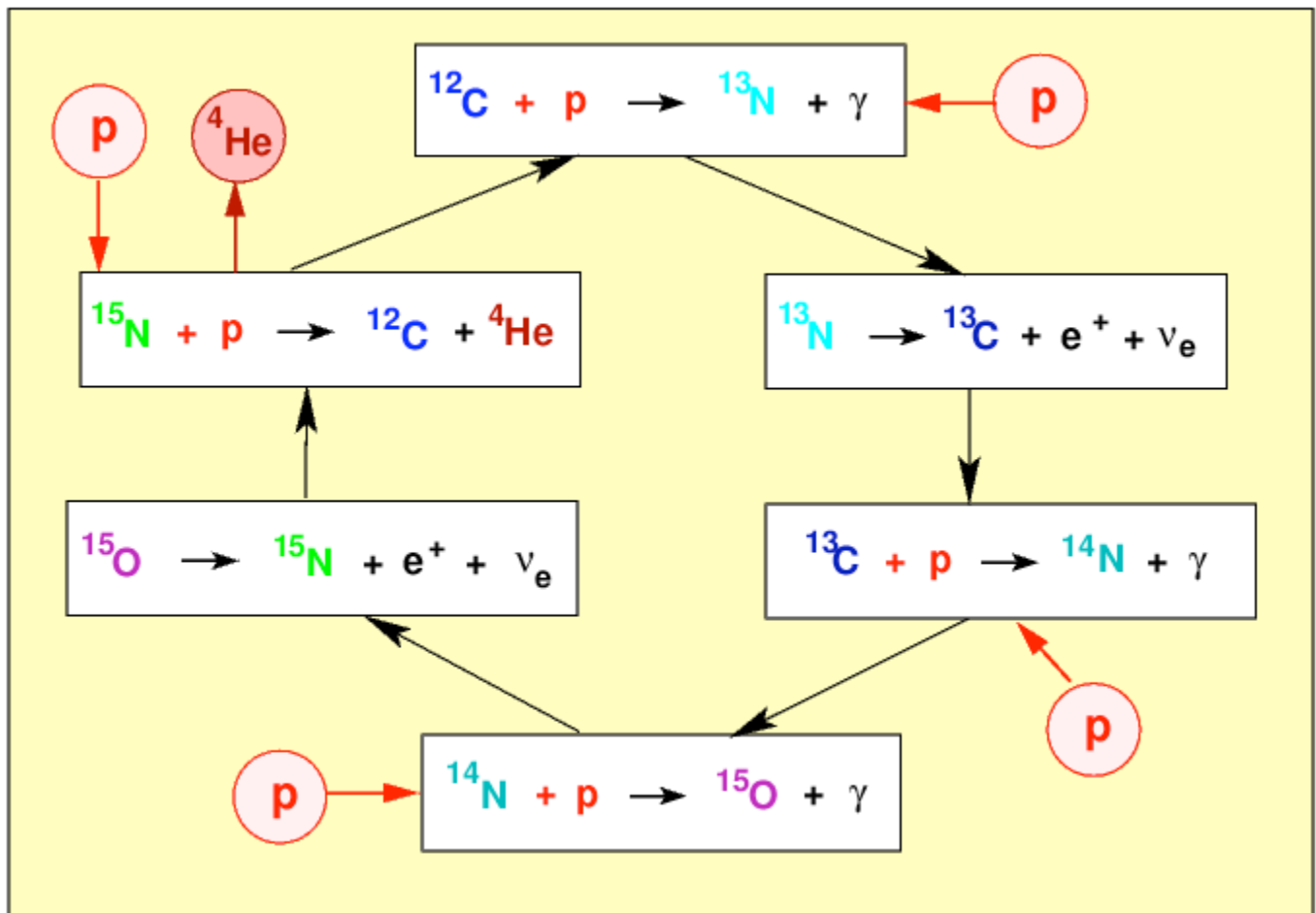
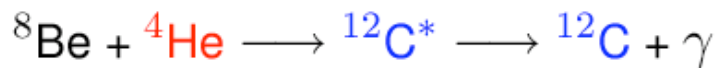
Für Sonne untergeordnete Rolle (1.6% der Energieerzeugung)
Bei heissen Sternen: Hauptanteil der Energieerzeugung

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

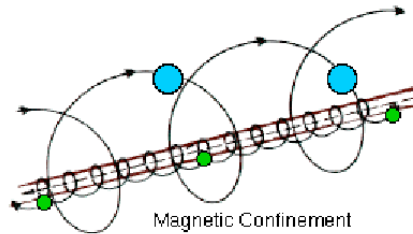
Forderung:

$$n \cdot T \cdot \tau \geq 6 \cdot 10^{21}$$

τ ... Confinement Zeit

n ... Dichte (Zahl der Kerne/cm³)

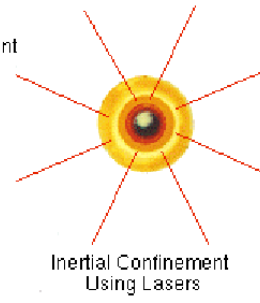
Fusion Mechanisms



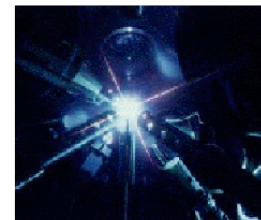
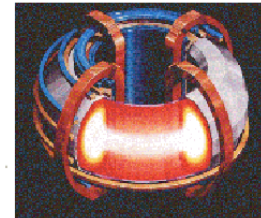
Magnetic Confinement



Gravitational Confinement
in the Sun and Stars



Inertial Confinement
Using Lasers



1. Magnetischer Einschluss des Plasmas:

Bedingungen: Temperatur $\sim 10^8$ K (10 keV)

10^{15} (Atome/cm³)·s

10 Sekunden (magnetische Flasche)

→ 10^{14} Atome/cm³ (10^{-5} mal der Dichte von Luft)

- TOKAMAK: Torois-KAMERA-MAGnit-Katushka
(Toroidal chamber and magnetic coil)
1952 in Russland von Tamm und Sacharov entwickelt
- STELLERATOR: andere Magnetfeld-Konfiguration

2. Trägheitseinschluss des Fusionsplasmas:

Aufheizen des Plasmas durch Laserstrahlung

Bedingungen: Temperatur $\sim 10^8$ K (10 keV)

10^{15} (Atome/cm³)·s

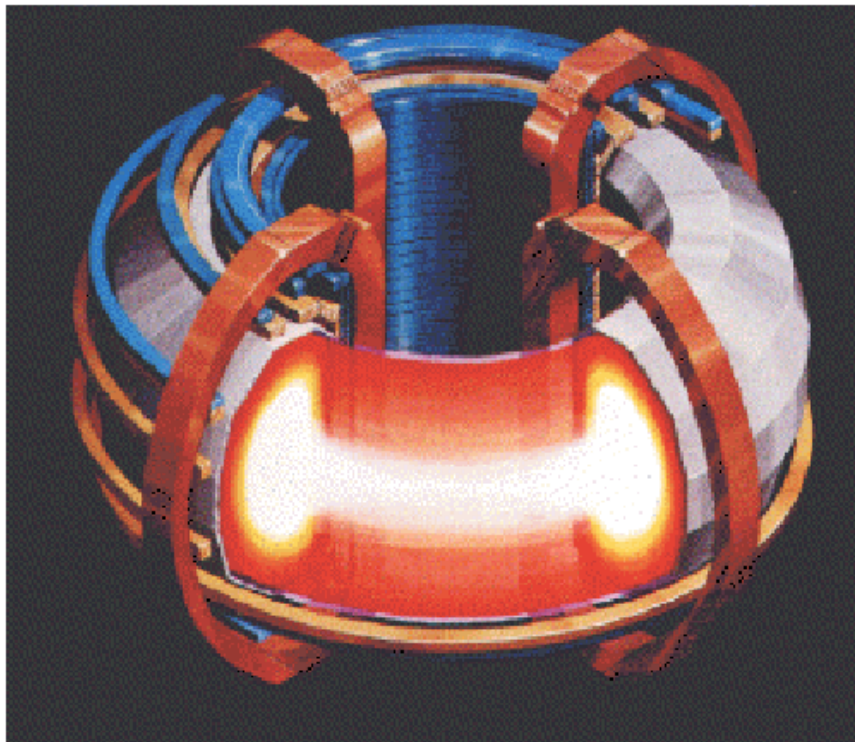
$3 \cdot 10^{-11}$ Sekunden (Mikro-Explosion)

→ 10^{25} Atome/cm³ (12 mal der Dichte von Blei,
 ~ 1000 mal der Dichte von flüssigem DT)

16.4 TOKAMAK – Prinzip

Beruh auf spezieller Anordnung von 3 Magnetsystemen:

- Ein zeitlich veränderlicher Strom durch die Transformerspule 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.

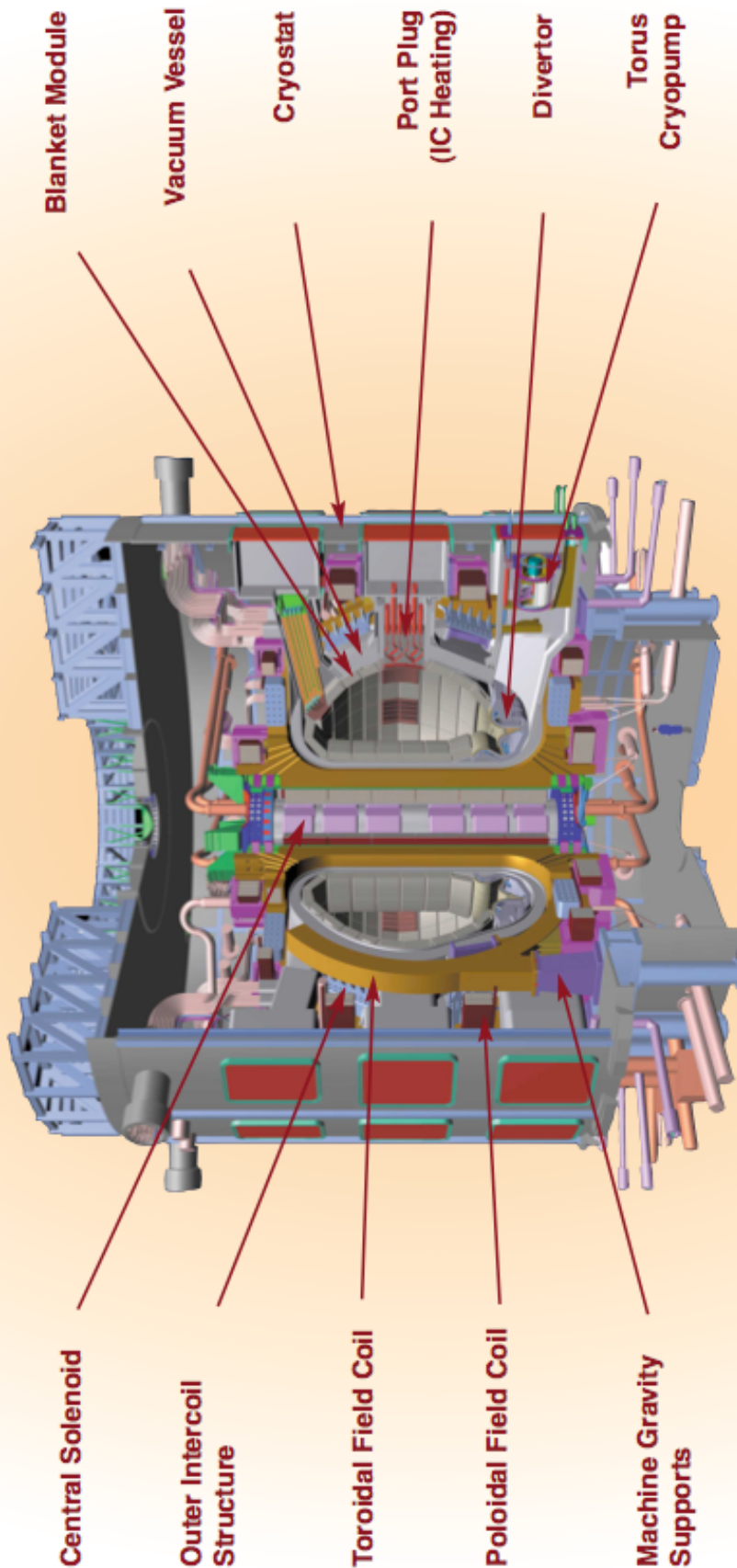


Alle Magnetfelder müssen so optimiert werden, dass sie den Plasmadruck kompensieren, und Plasma genügend lange einschliessen.

Verwende supraleitende Spulen

ITER

ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor



Main Plasma Parameters and Dimensions

Total fusion power	500 MW
Q — Fusion power/auxiliary heating power	≥ 10
Average (14 MeV) neutron wall loading	0.57 MW/m ²
Plasma major radius	6.2 m
Plasma minor radius	2.0 m
Plasma current	15 MA
Toroidal field @ 6.2 m radius	5.3 T
Plasma Volume	837 m ³
Installed auxiliary heating/current drive power	73 MW

The ITER tokamak has an elongated plasma and a single null poloidal divertor, which is the main point of contact of the plasma with the material boundary. The plasma is fuelled and heated to reach a high power amplification (Q) burn of deuterium-tritium (DT). The heating systems can be further used to drive the plasma current, extending the nominal inductive burn of 300 s up to steady state. Plasma control is provided by the poloidal field system, and the pumping, fuelling and heating systems, based on feedback from diagnostic sensors.

The major tokamak components are the superconducting toroidal and poloidal field coils which magnetically confine, shape and control the plasma inside the toroidal vacuum vessel. The internal, removable components, including blanket modules, divertor cassettes, and port plugs for the plasma limiter, heating antennae, test blanket modules and diagnostics sensors, absorb most of the radiated heat from the plasma and protect the vessel and magnet coils from excessive nuclear radiation. The divertor exhausts the helium from the fusion reaction and limits the concentration of impurities in the plasma.

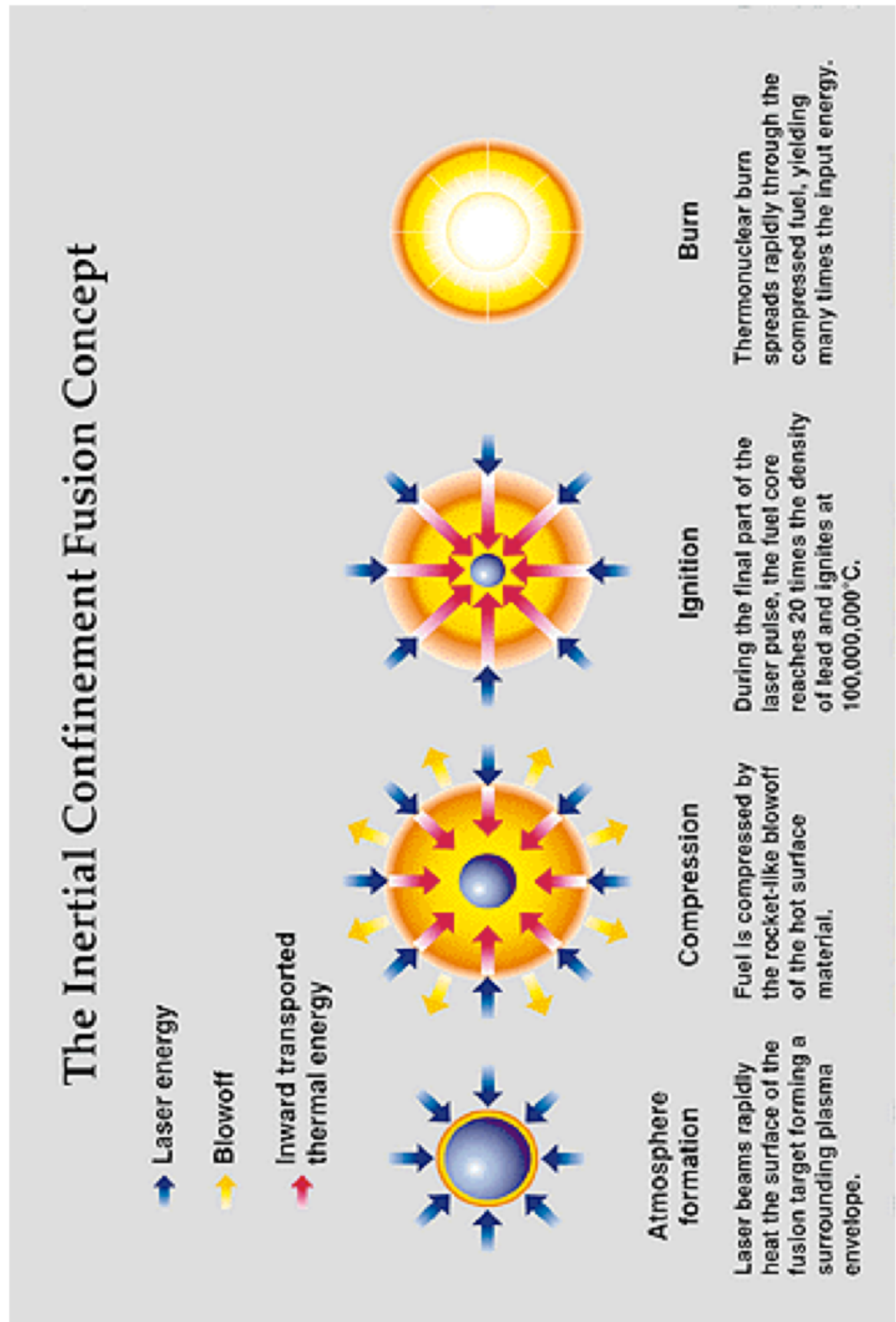
ITER (cont)

ITER und Kommerzielle Fusionsenergie?

- Internationales Projekt (1985): Soviet Union, USA, Europe (via EURATOM) und Japan;
- Kollaboration (2004): China, Europa, Japan, Süd-Korea, Russland und USA (unterbrochen 1999–2003) Kanada (ausgeschieden Ende 2003);
- ITER Design Report existiert (2001);
- Standort: Cadarache (Frankreich)
- Kosten $\approx$ 10 Milliarden Dollar (verteilt über 9 Jahre Bauzeit und 20 Betriebs-Jahre)
- Start der Experimente 9 Jahre nach Baubeginn ($\approx$ 2015?);
- “ITER is not an electric power producing reactor!”
Ziel: Beweis der prinzipiellen “Machbarkeit” von kontrollierter Fusion zur Energiegewinnung!
- Grösse: äusserer Radius=6.2m, innerer Radius=2m, erwartete Fusion-Power: 500 MW (thermische Leistung) das entspricht einer maximalen elektrischen Leistung von 150-200 MW.
- bei Erfolg von ITER: Start des DEMO Fusions Projektes (Design 2020 $\rightarrow$ Start 2035!)
- bei Erfolg von ITER und DEMO: kommerzielle Fusion Power Station nicht vor 2050!

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



Energieverbrauch und Kernfusion

Die Kernfusionsenergie: eine Lösung des Energieproblems?
Fossile Energieresourcen (Öl, Gas und Kohle) sind endlich!

Supplying Oil and Gas will require major investments Million of barrels per day of Oil equivalent

Quelle: http://www.exxonmobil.com/corporate/files/corporate/Energy_Brochure.pdf

