

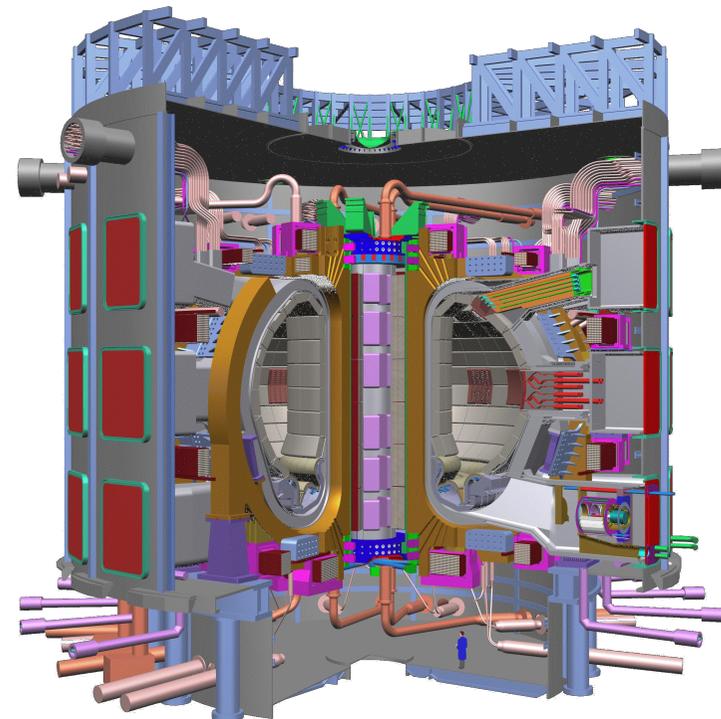
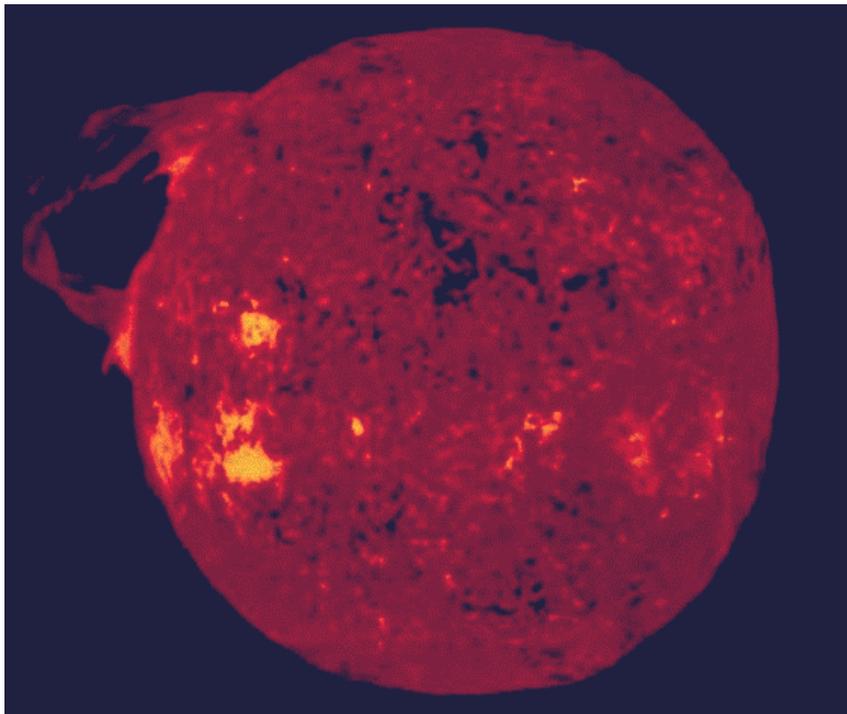


# Kernfusion – die Energiequelle der Sonne auf der Erde nutzen



## *Sibylle Günter*

*Wissenschaftliche Direktorin  
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching/Greifswald*





# Energie erzeugen wie die Sonne

IPP





# Wie gewinnt die Sonne Energie?

IPP

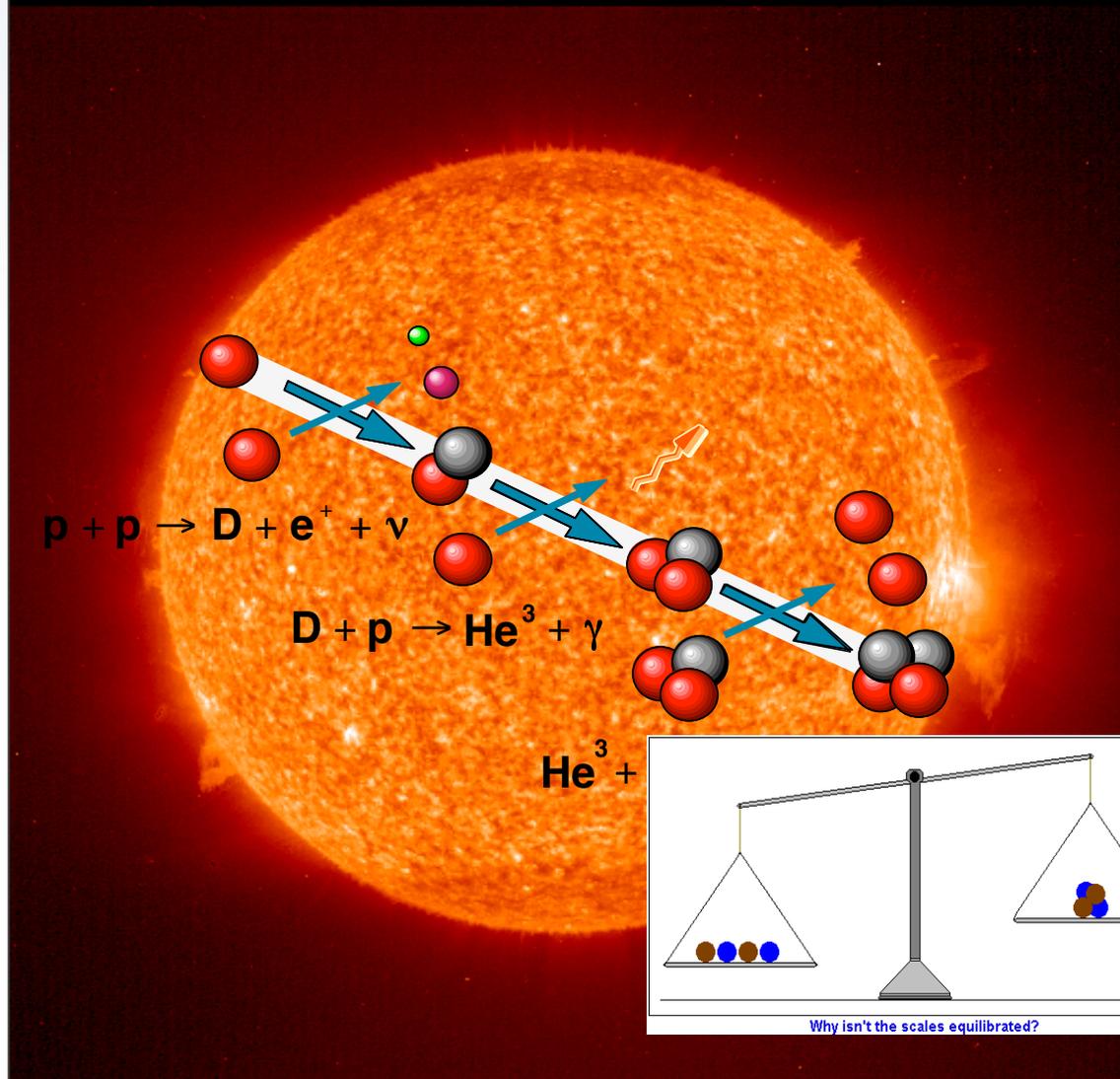




# Kernfusion – die Energiequelle der Sterne

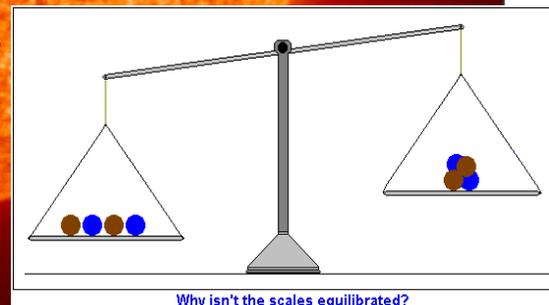
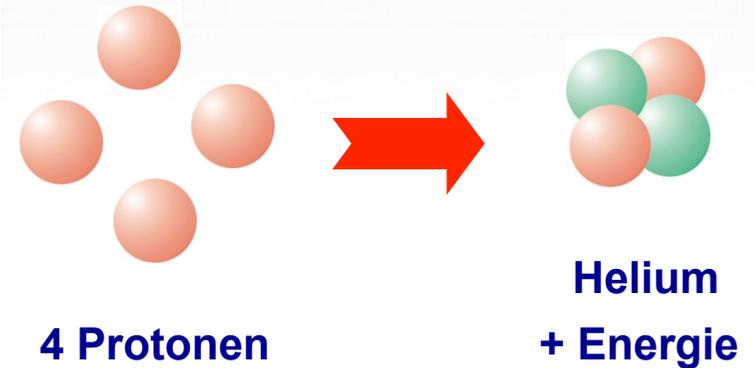


SOHO EIT, He II line, 304 Å  
May 18, 1996 at 20:02



## Energieerzeugung der Sonne durch Fusion leichter Kerne

### pp-Zyklus



Why isn't the scales equilibrated?

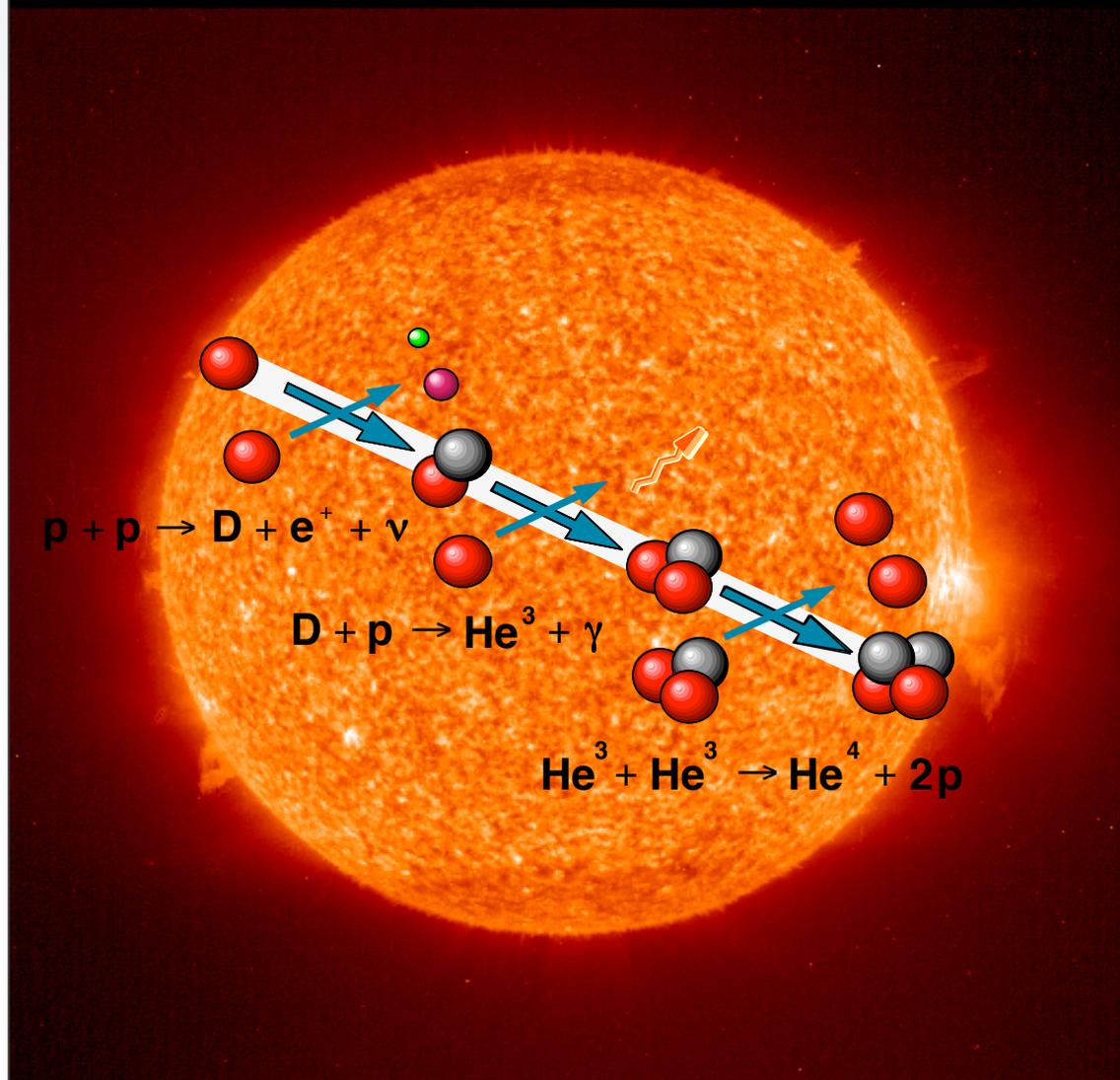
Energiegewinn, weil  
He-Masse < 4 p-Massen  
 $E = \Delta m c^2$



# Kernfusion – die Energiequelle der Sterne

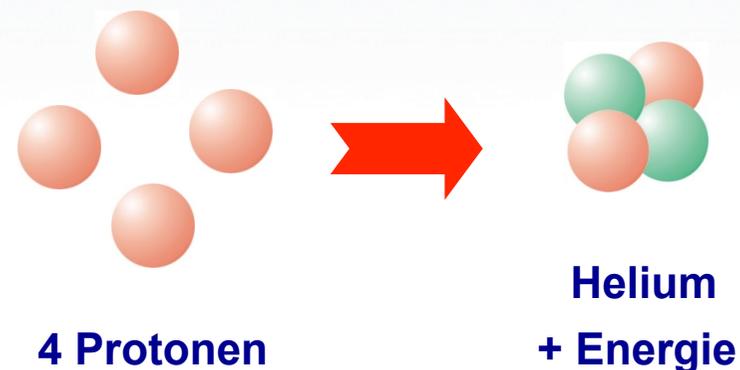
IPP

SOHO EIT, He II line, 304 Å  
May 18, 1996 at 20:02



## Energieerzeugung der Sonne durch Fusion leichter Kerne

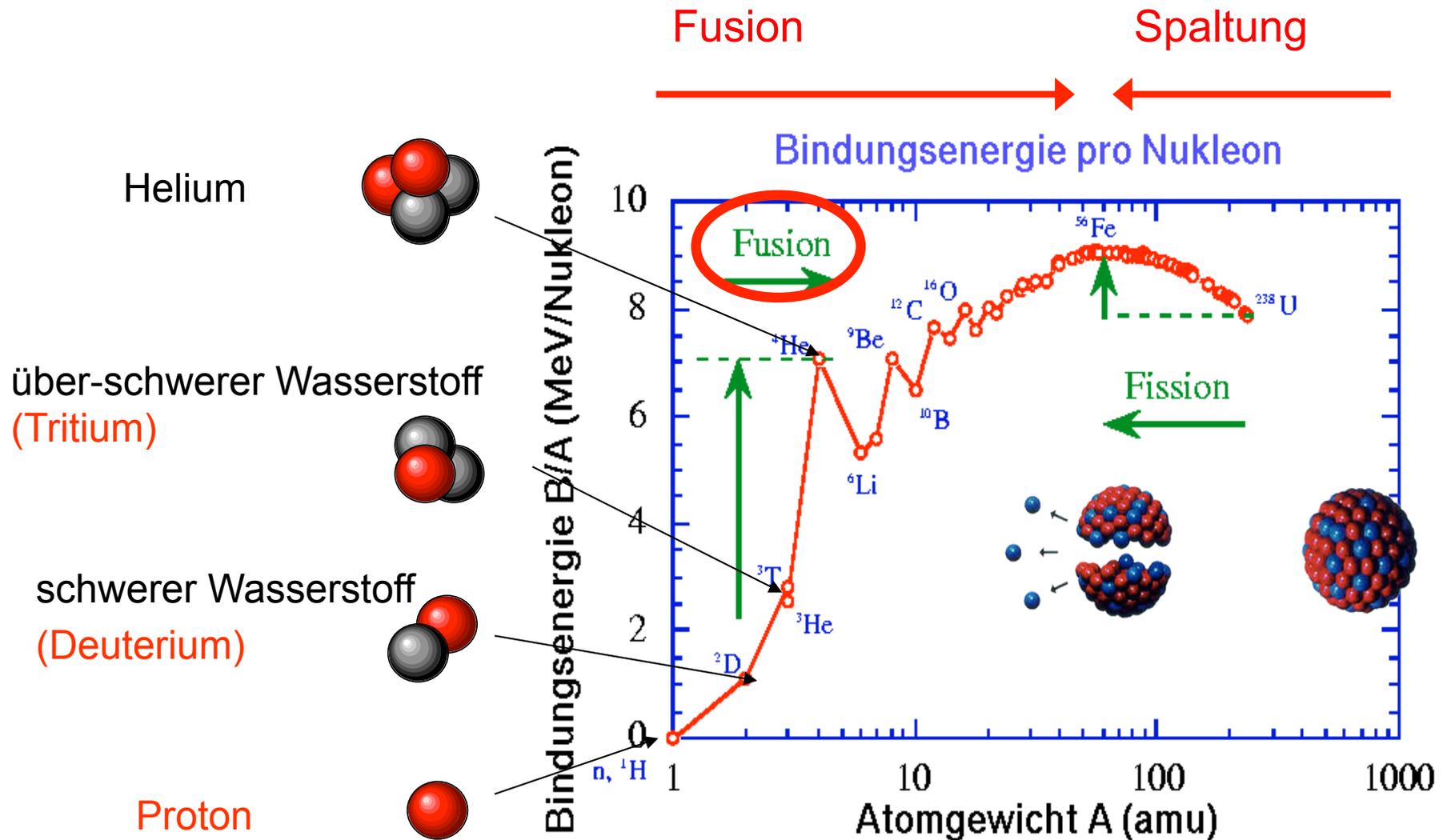
### pp-Zyklus



Pro Sekunde 600 Mio t  
Wasserstoff zu 596 Mio t  
Helium umgewandelt  
( $3.6 \cdot 10^{17}$  GW Leistung)

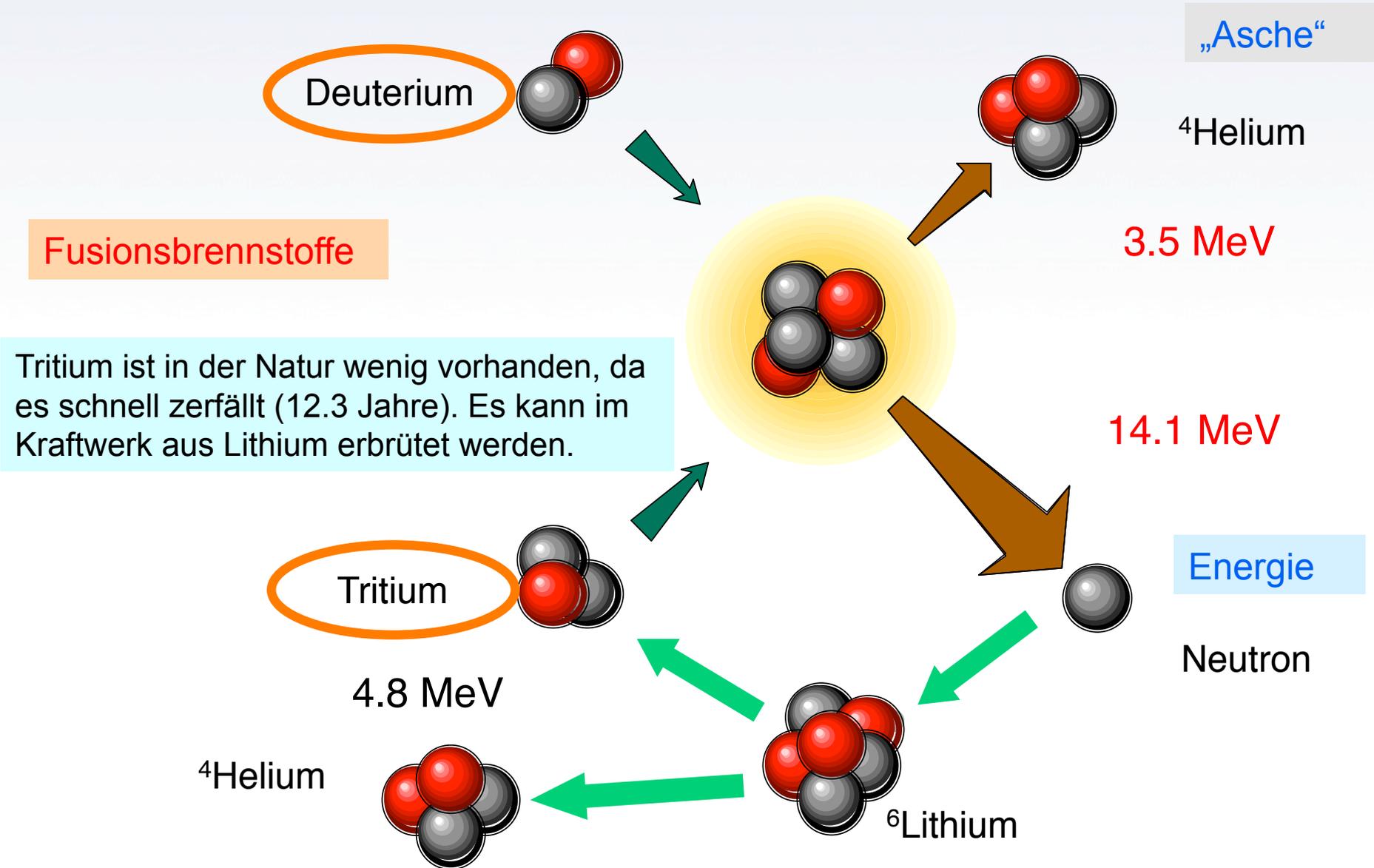


# Methoden der Energiegewinnung





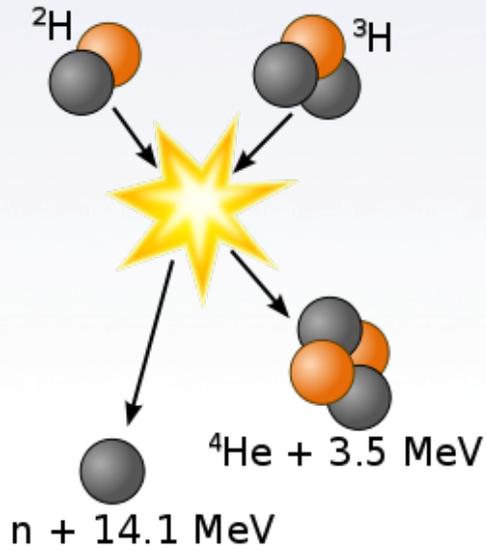
# Im Kraftwerk: Fusion von Deuterium und Tritium



Tritium ist in der Natur wenig vorhanden, da es schnell zerfällt (12.3 Jahre). Es kann im Kraftwerk aus Lithium erbrütet werden.



# Energiegewinn bei D-T-Fusion



**Sehr hohe Energiedichte und Verfügbarkeit:**

**10000 t Kohle entspricht  
800 g D-T**

**Deuterium ist in Wasser zu 0.015% enthalten.**

**Tritium muss in-situ generiert werden:**



**Eine Badewanne Wasser  
Li in einem Akkumulator**



**Energie für 50 Jahre  
Versorgung einer  
mittleren Familie**





# Kernfusion erfordert hohe Energie (Temperatur)



- Atomkerne sind positiv geladen
- Gleiche Ladungen stoßen sich ab (Coulomb-Wechselwirkung)
- Anziehende Kernkräfte erst wirksam, wenn sich Kerne (fast) berühren

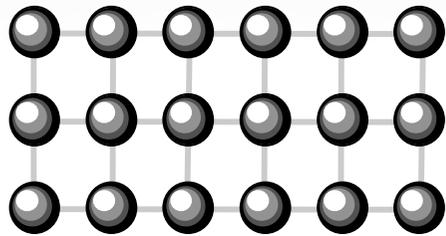
Für Verschmelzung von Deuterium und Tritium Temperaturen von 100 Mio Grad erforderlich (10 mal heißer als im Sonnen-Inneren)



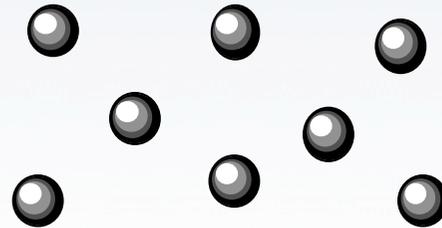
# Der Plasmazustand

IPP

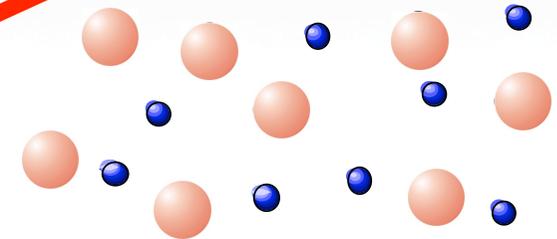
„Der 4. Aggregatzustand der Materie“



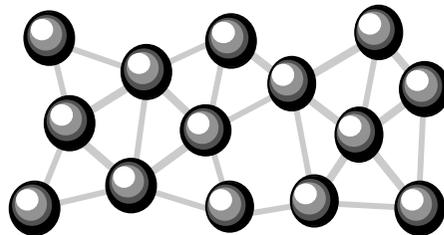
1. Festkörper



3. Gas



4. Plasma = ionisiertes Gas



2. Flüssigkeit

Temperatur

 neutrale Atome

 Ionen

 Elektronen



# Wie kann man ein heißes Plasma „einsperren“?

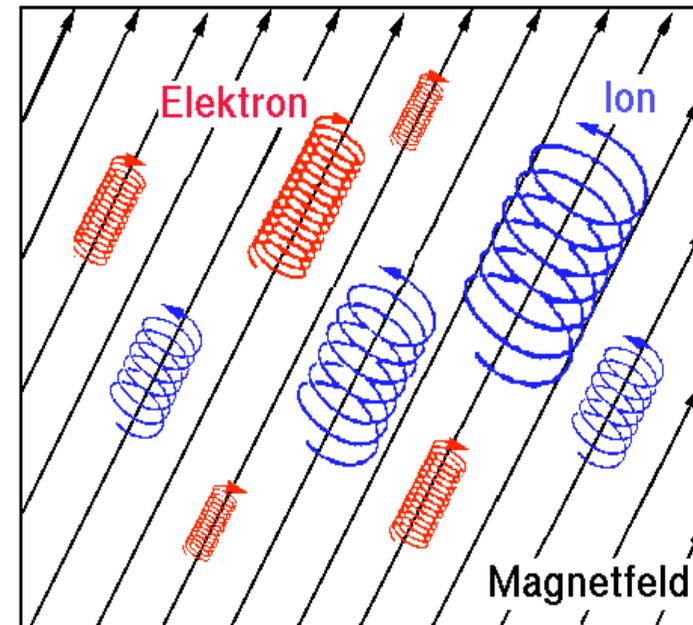


Das Plasma ist 10 mal heißer als das Sonnen-Innere  
Welches Material kann das aushalten?

**Keines!**

Aber geladene Teilchen können durch Magnetfelder beeinflusst werden

Geladene Teilchen können sich nur  
parallel zum Magnetfeld frei  
bewegen





# Wie erzeugt man ein brennendes Fusionsplasma ?

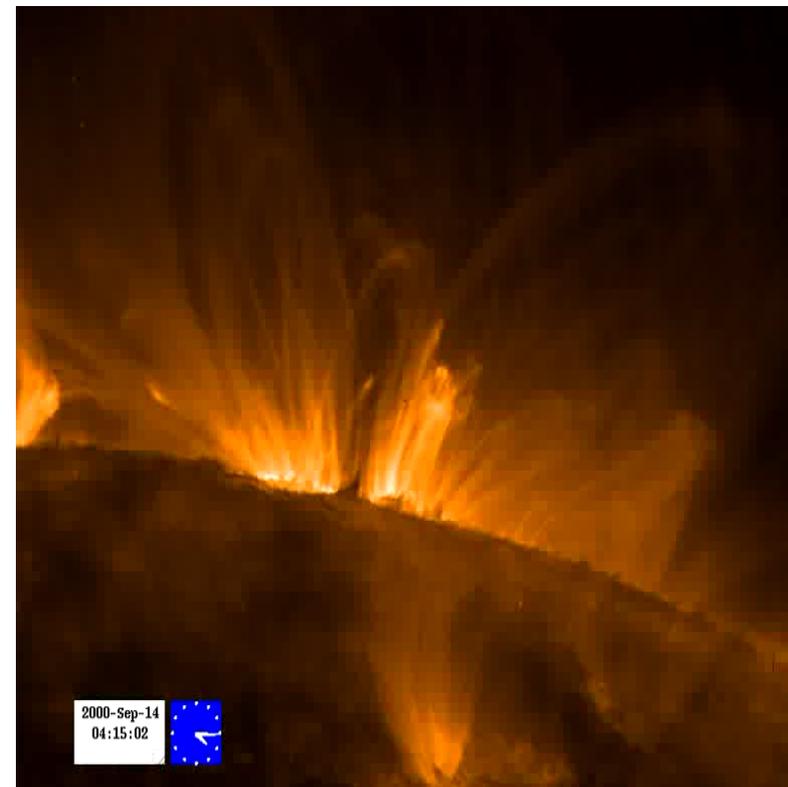


Das Plasma ist 10 mal heißer als das Sonnen-Innere  
Welches Material kann das aushalten?

**Keines!**

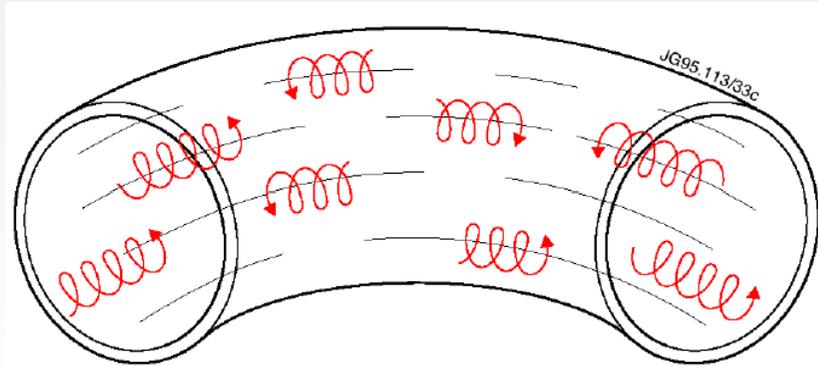
Aber geladene Teilchen können durch Magnetfelder beeinflusst werden

Geladene Teilchen können sich nur parallel zum Magnetfeld frei bewegen



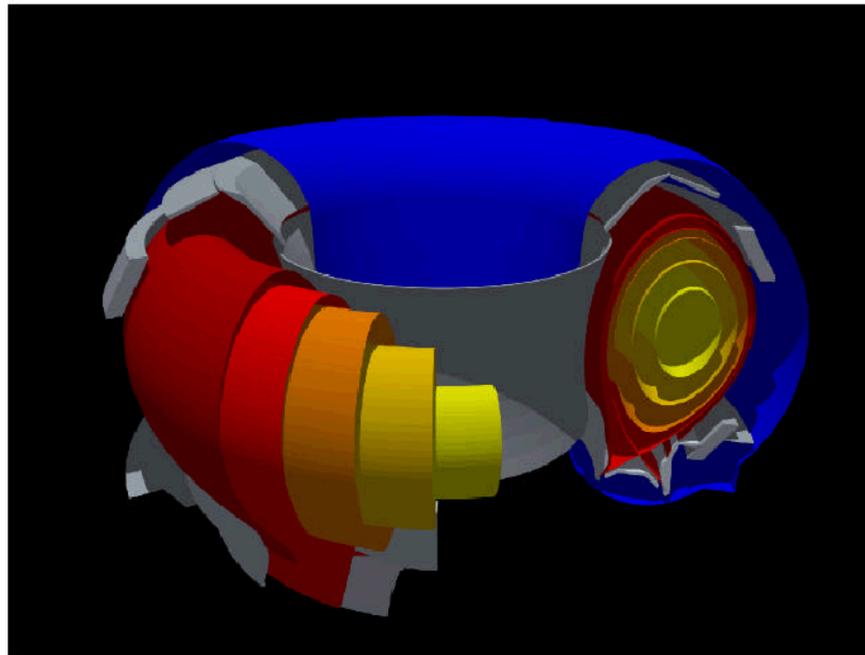


# Magnetischer Einschuß von Fusionsplasmen



Magnetfeld:

- reduziert senkrechte Teilchenbewegung (Teilcheneinschluss und Wärmeisolierung)
- bilanziert Plasmadruck ( $\sim 10$  atm)



Keine Endverluste im Torus  
Feldlinien auf magnetischen Flächen

**System mit wenig Leistung pro Volumen**

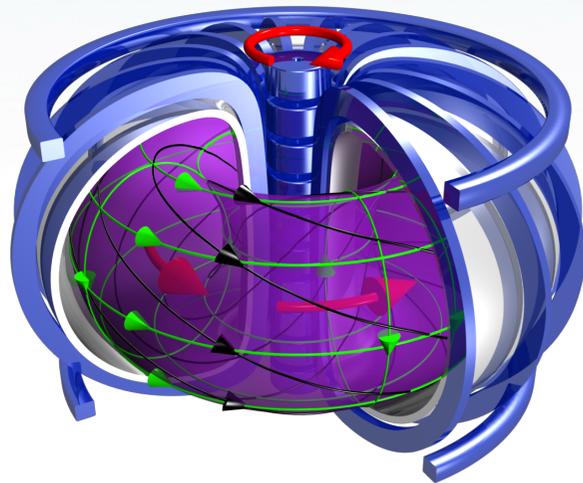
**ITER: 0.5 kW/l**

**Automotor: 50 kW/l**

**Spaltungsreaktor: 100 kW/l**



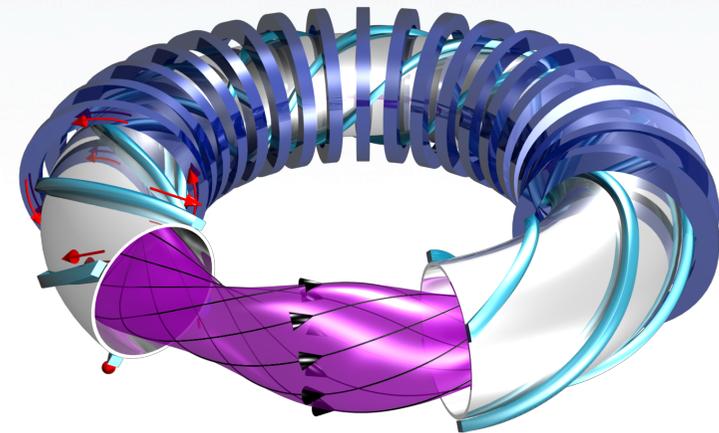
## Tokamak (axisymmetrisch)



Magnetfeld durch äußere Spulen  
und induziertem Plasmastrom

gepulst

## Stellarator (3D)

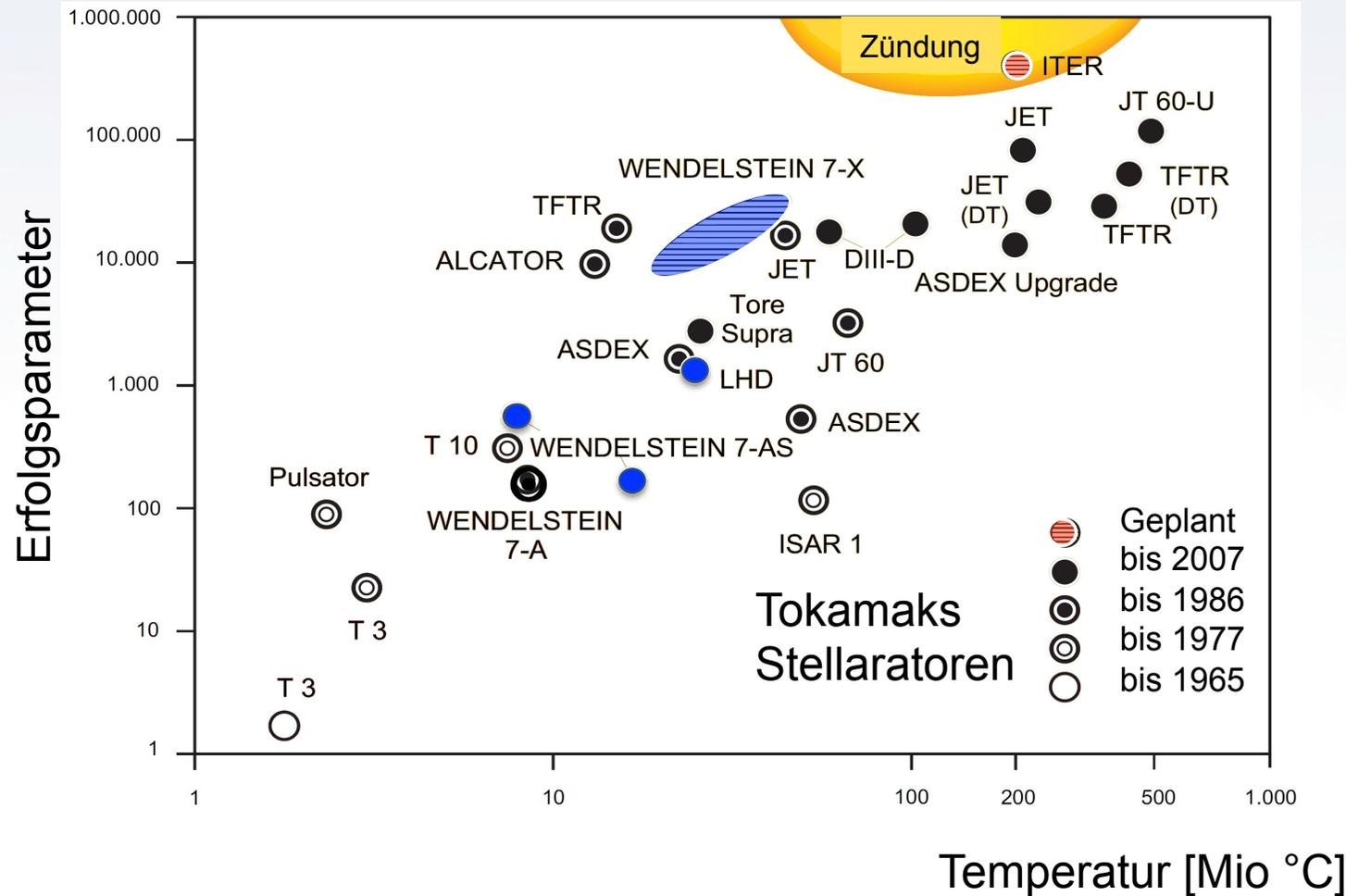


Magnetfeld nur durch äußere  
Spulen

intrinsich stationär



# Fusion auf dem Weg zur Energie-Erzeugung

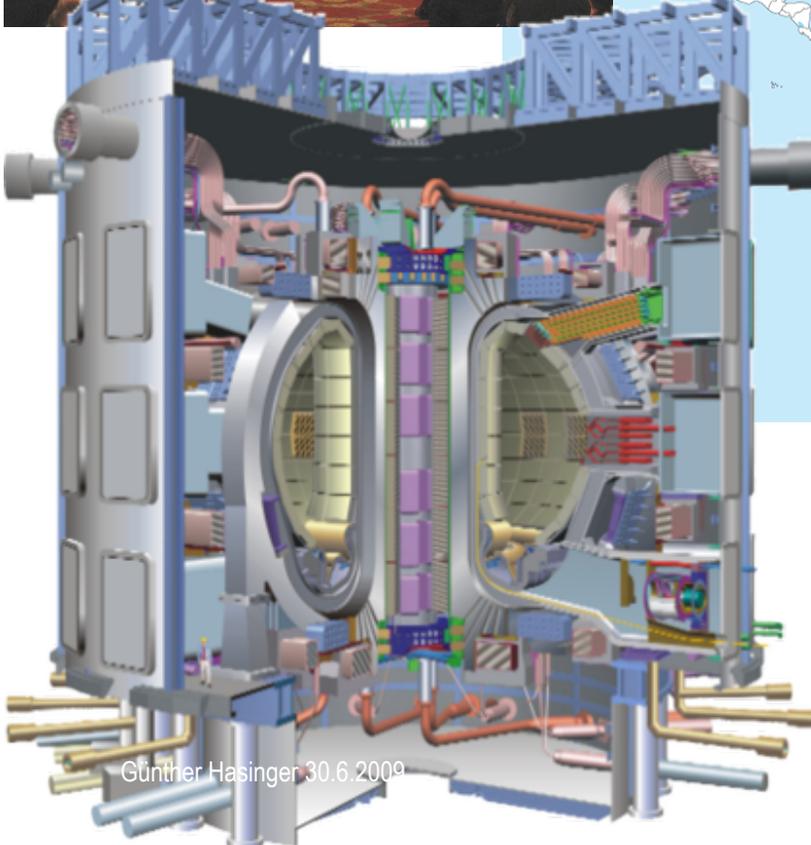
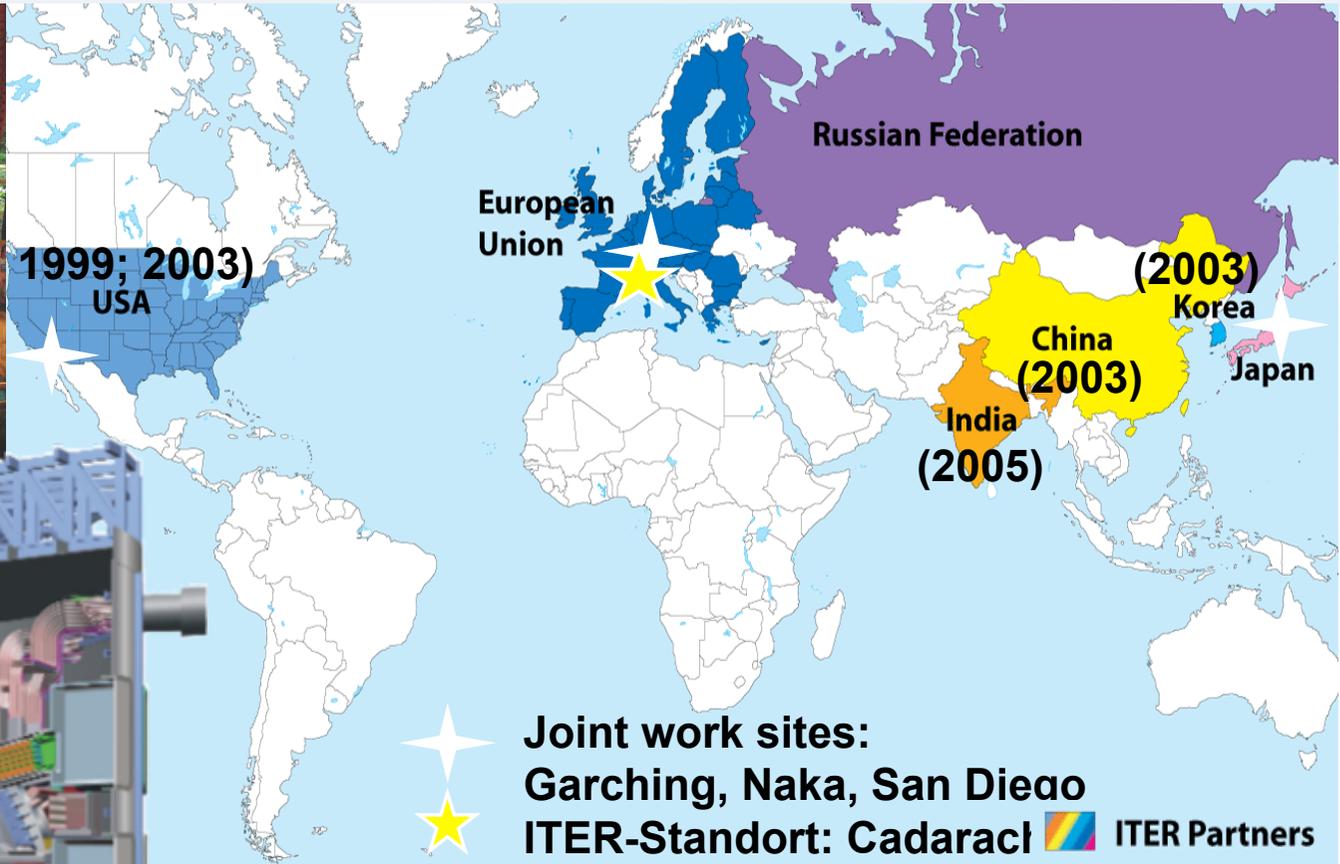


- Erforderliche Temperaturen ( $>150$  Mio °C) und Dichten erreicht, noch bessere Wärmeisolierung nötig (ITER!)
- Stellaratoren brauchen Optimierung (Hochleistungsrechner!), daher Tokamaks weiter fortgeschritten





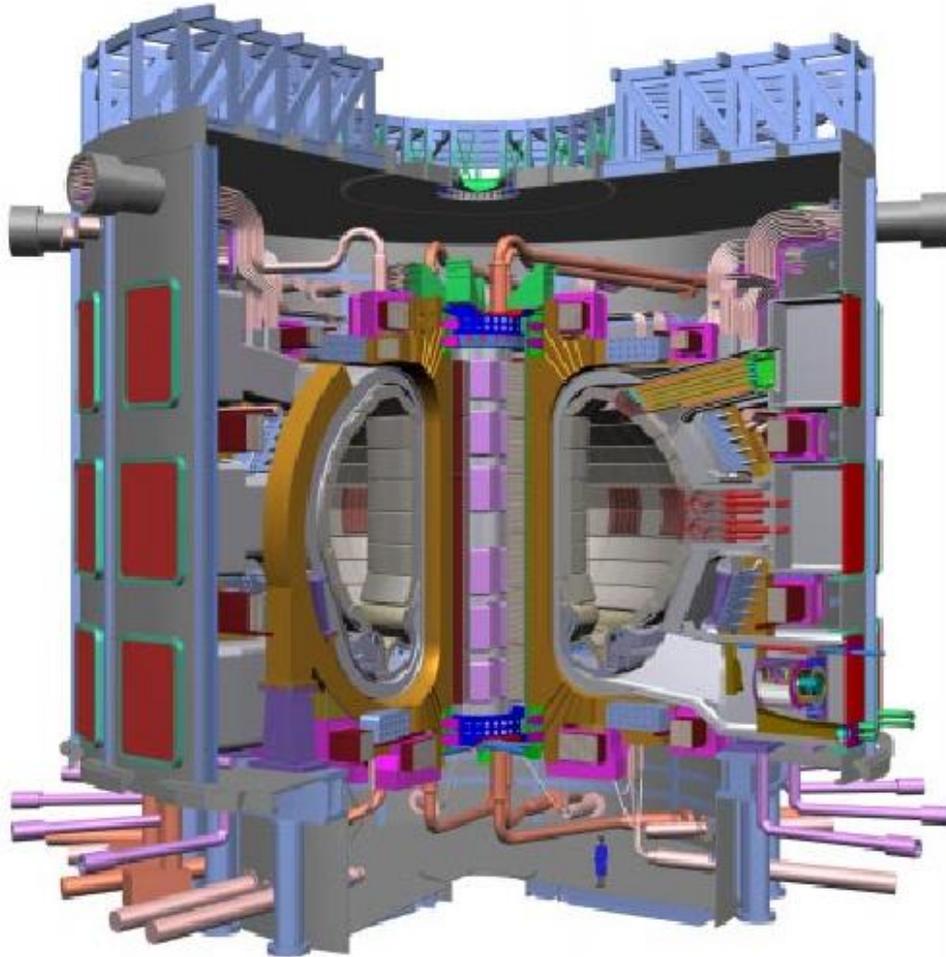
# ITER @ Cadarache



>50% der Weltbevölkerung und >80% des GDP  
Größtes und komplexestes Wissenschaftsprojekt



# ITER: 10 mal mehr Fusionsleistung als für Plasmaheizung erforderlich



	ITER
Großer Radius	6.2 m
Kleiner Radius	2.0 m
Plasmastrom	15 MA
Magnetfeld	5.3 T
Leistungsverstärkung Q	$\geq 10$
Fusionsleistung	400 (800) MW
Brenndauer	400 (3000) s
Externe Heizleistung	40 (73) MW

Kosten: 15 Milliarden €

Im Aufbau in Cadarache (F)

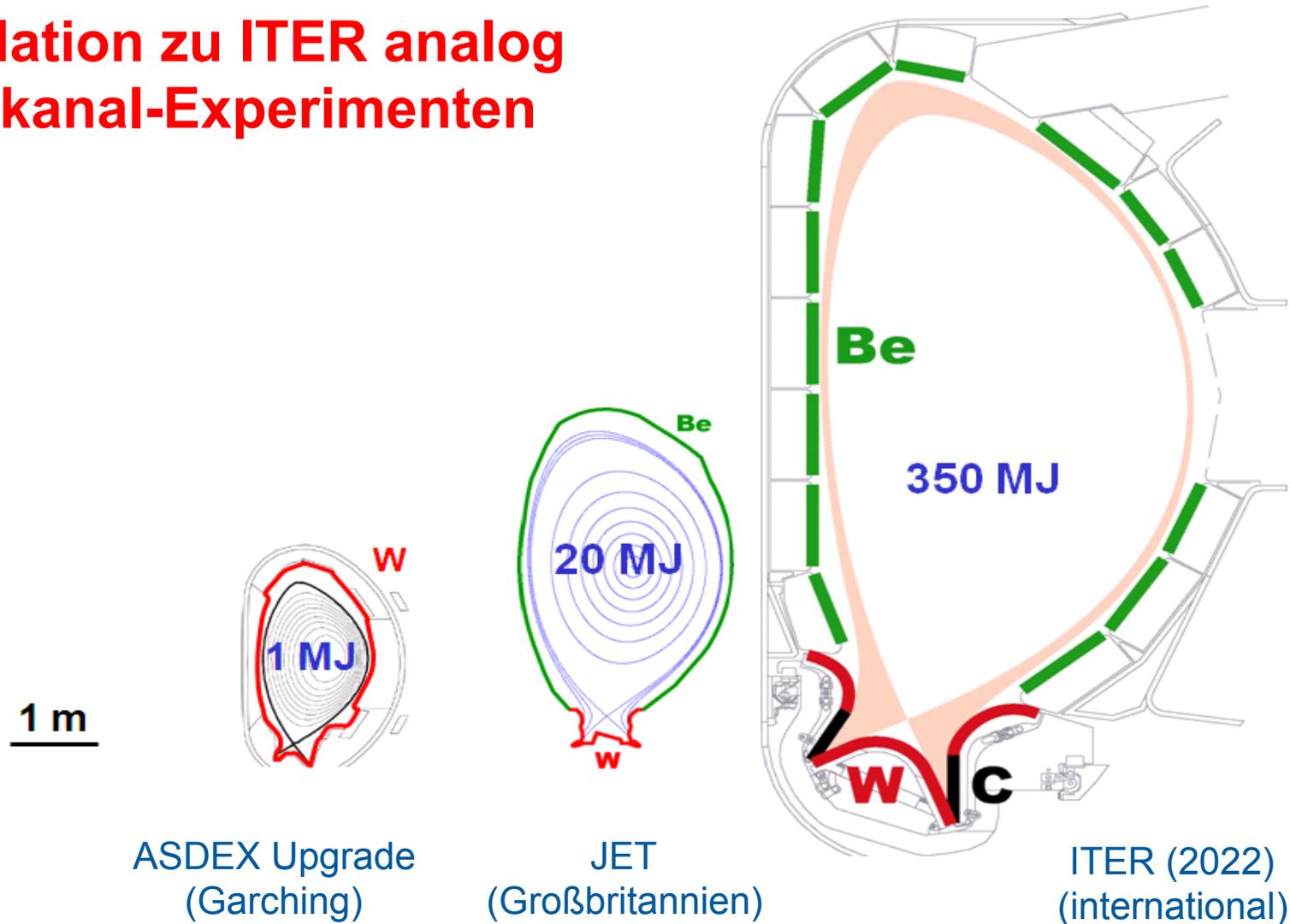
weltweite Anstrengung (EU, Cn, In, Jp, USA, Ko, RF)



# Planung von ITER auf der Grundlage bisheriger Experimente

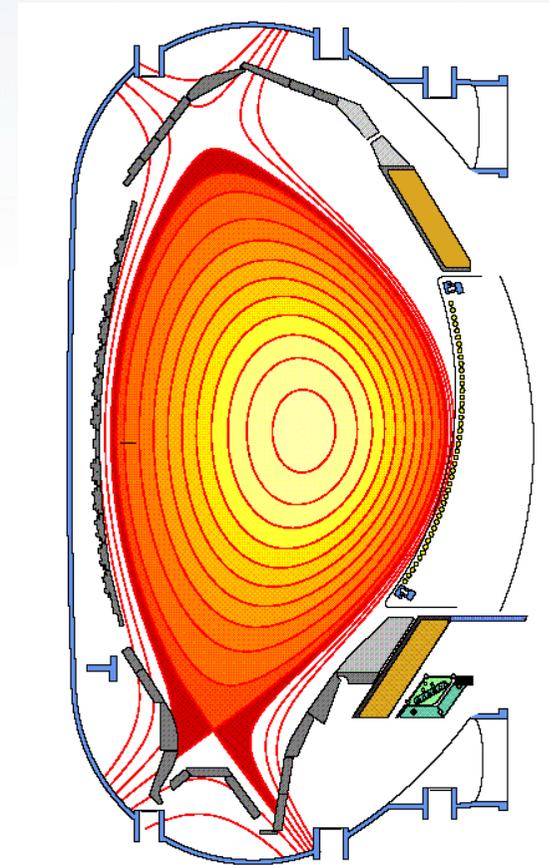
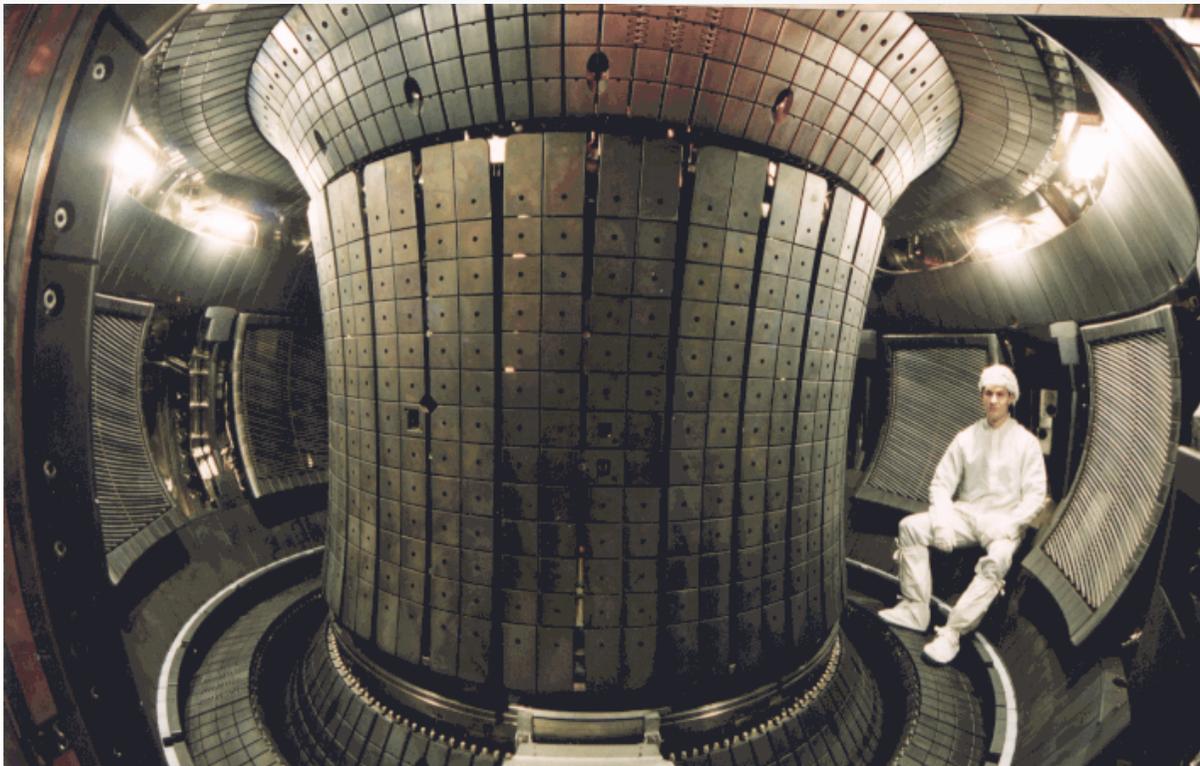


Extrapolation zu ITER analog zu Windkanal-Experimenten





# ASDEX Upgrade - Blick ins Innere





# Unser Experiment: ASDEX Upgrade - eine Plasmaentladung



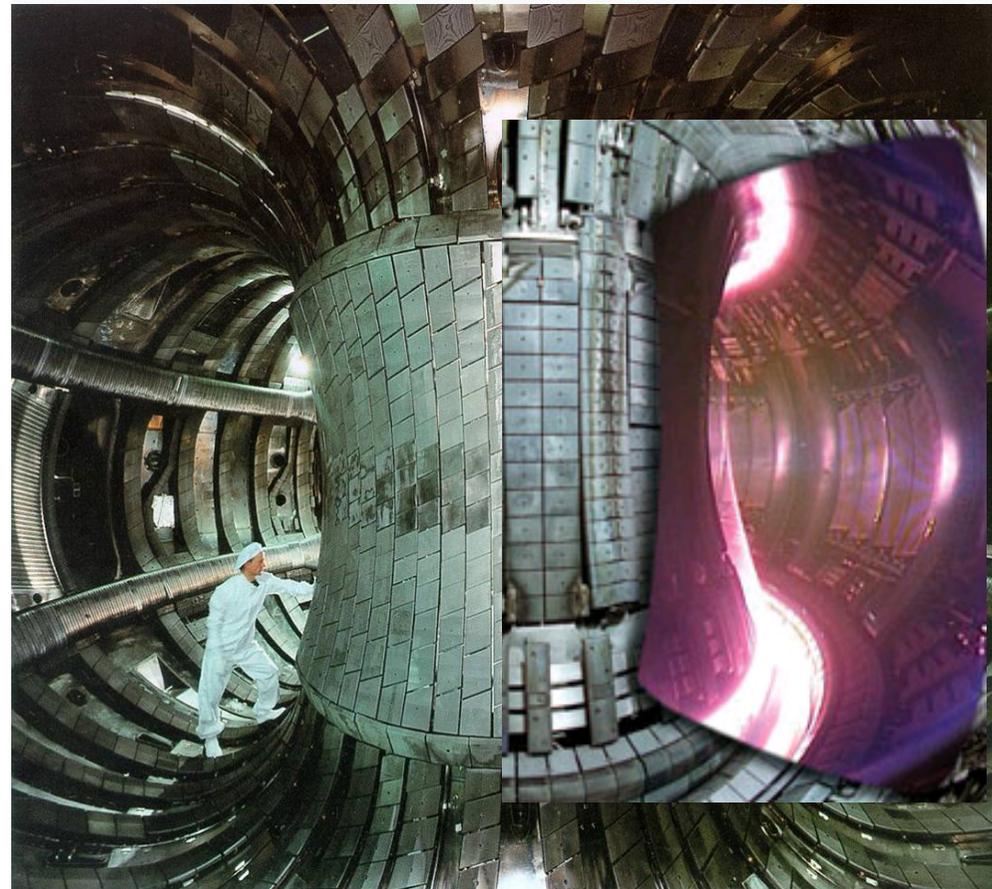
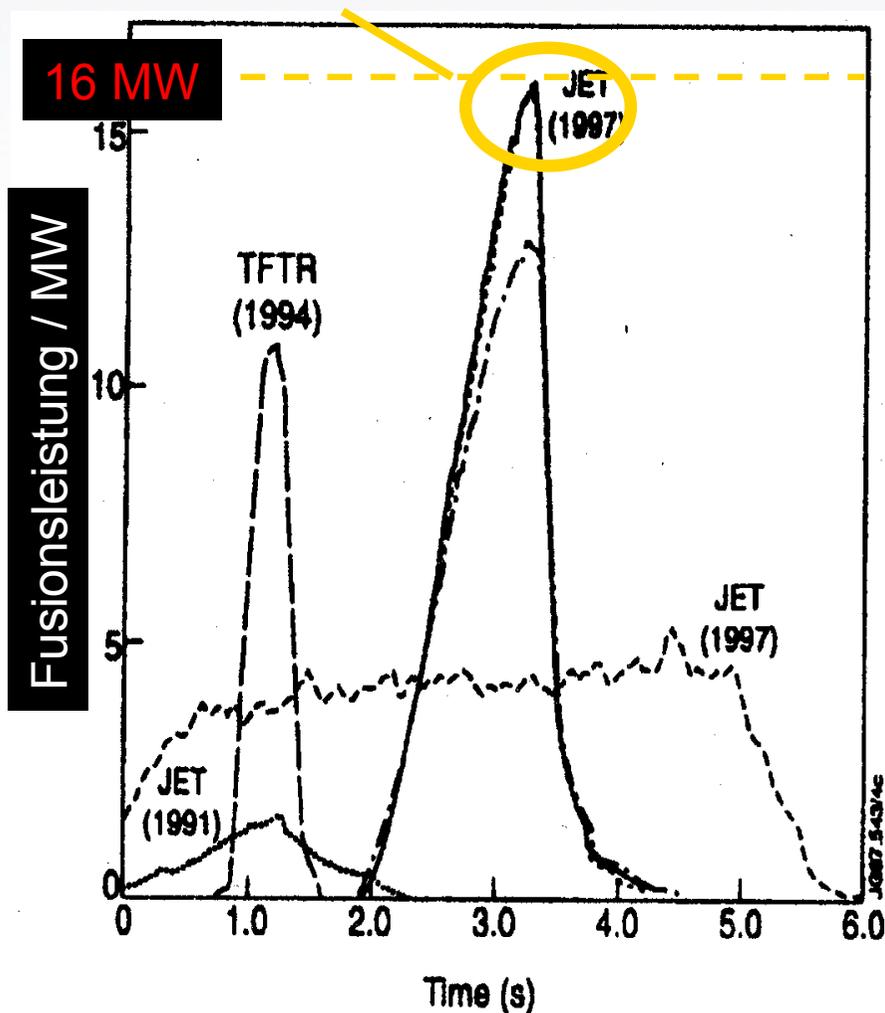


# Bisher erzeugte Fusionsleistung (JET)

IPP

Joint European Torus (JET), Gemeinschaftsprojekt seit 1978, Culham, UK  
scientific "breakeven" nahezu erreicht ( Fusionsleistung = 0.6 \* Heizleistung )

R= 3 m, Plasmavolumen=164 m<sup>3</sup>

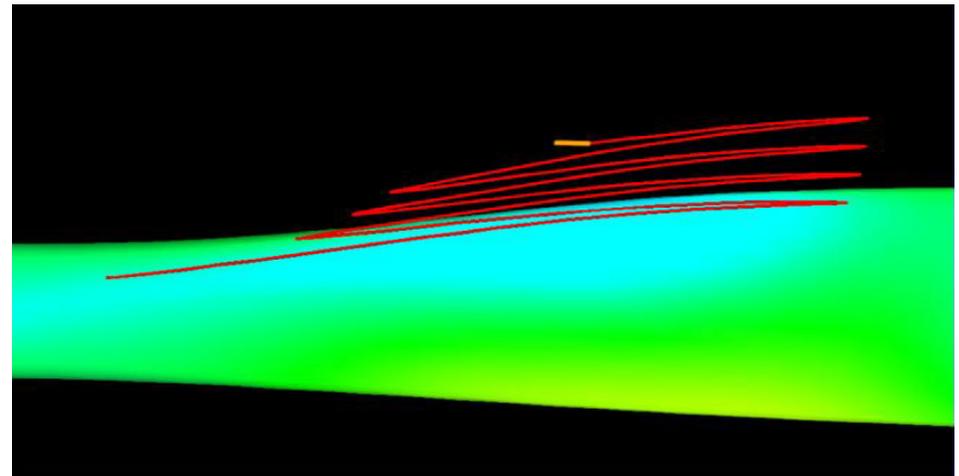
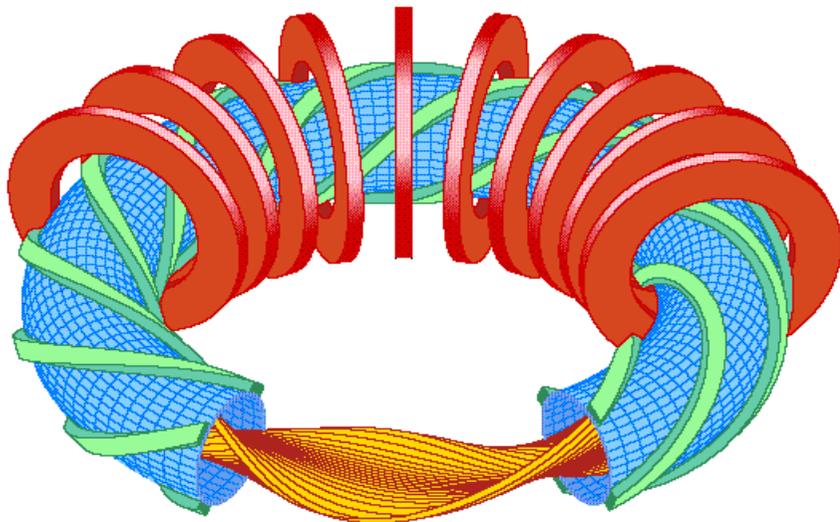




# Problem in frühen Stellaratoren: Verluste von schnellen Teilchen

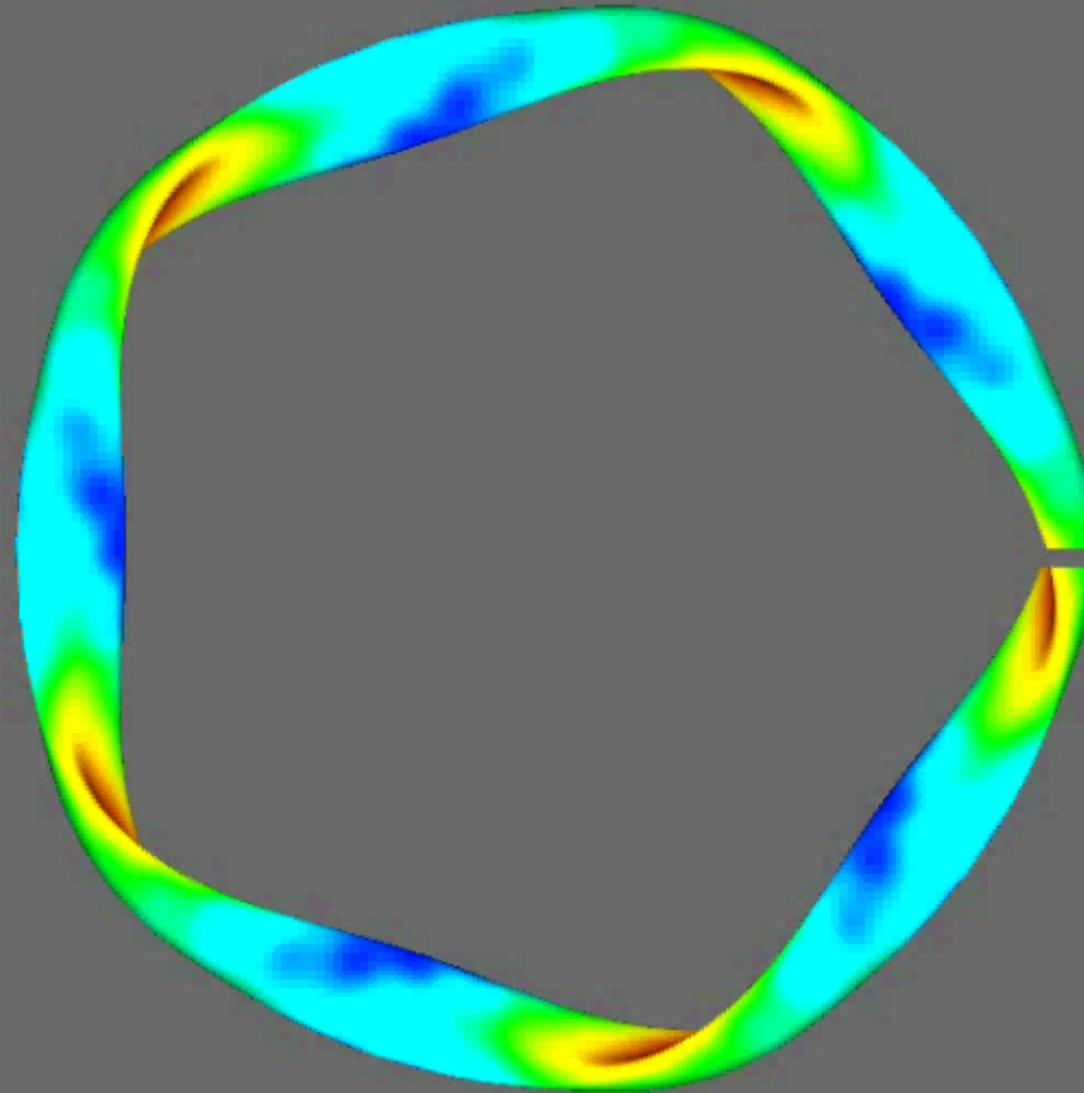


Besonders schnelle Teilchen gehen verloren, also keine Plasmaheizung durch Fusionsprodukte



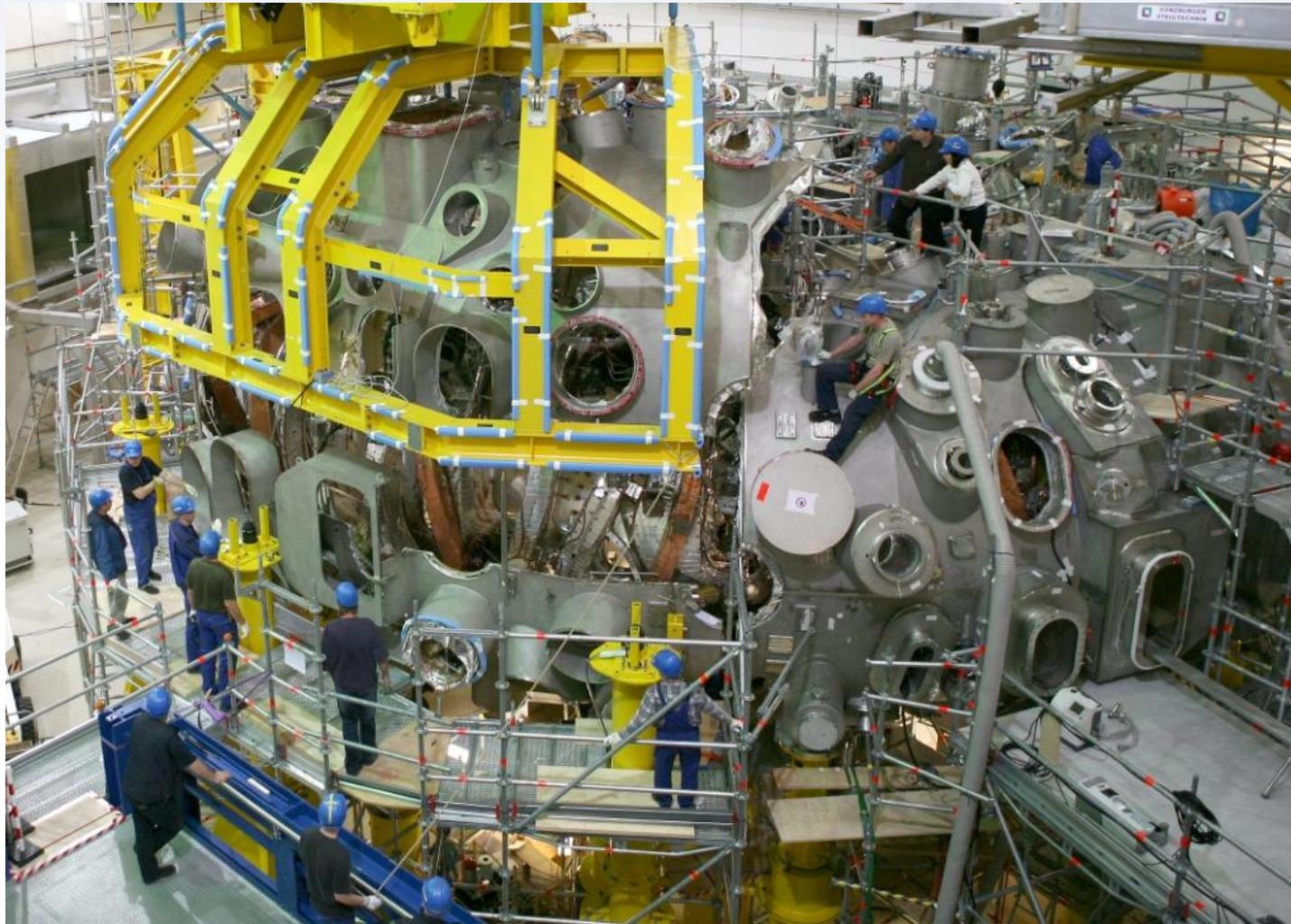


# Optimierung: kaum noch Teilchenverluste (W7-X)



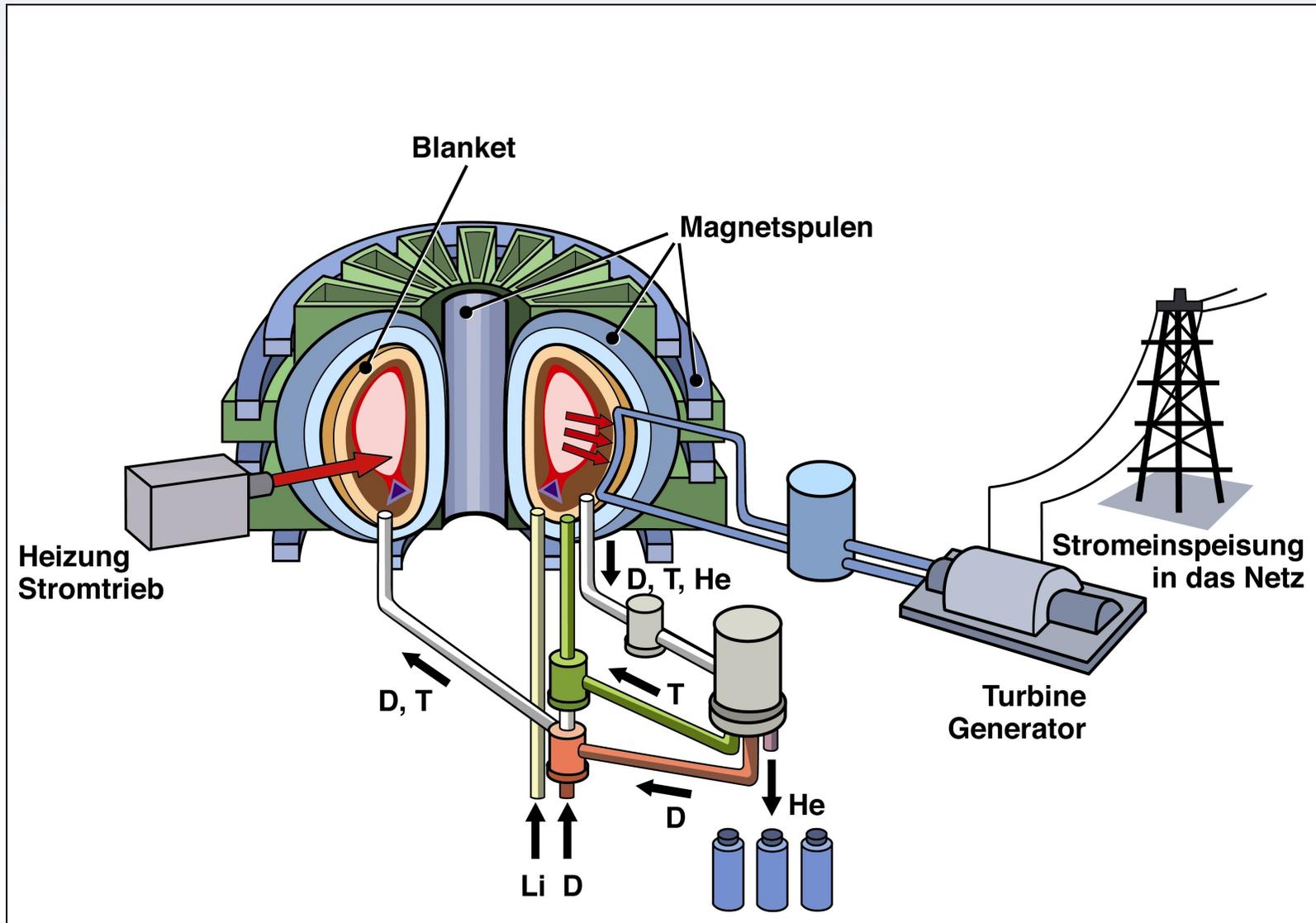


# W7-X: Aufbau im Plan – Torus komplett





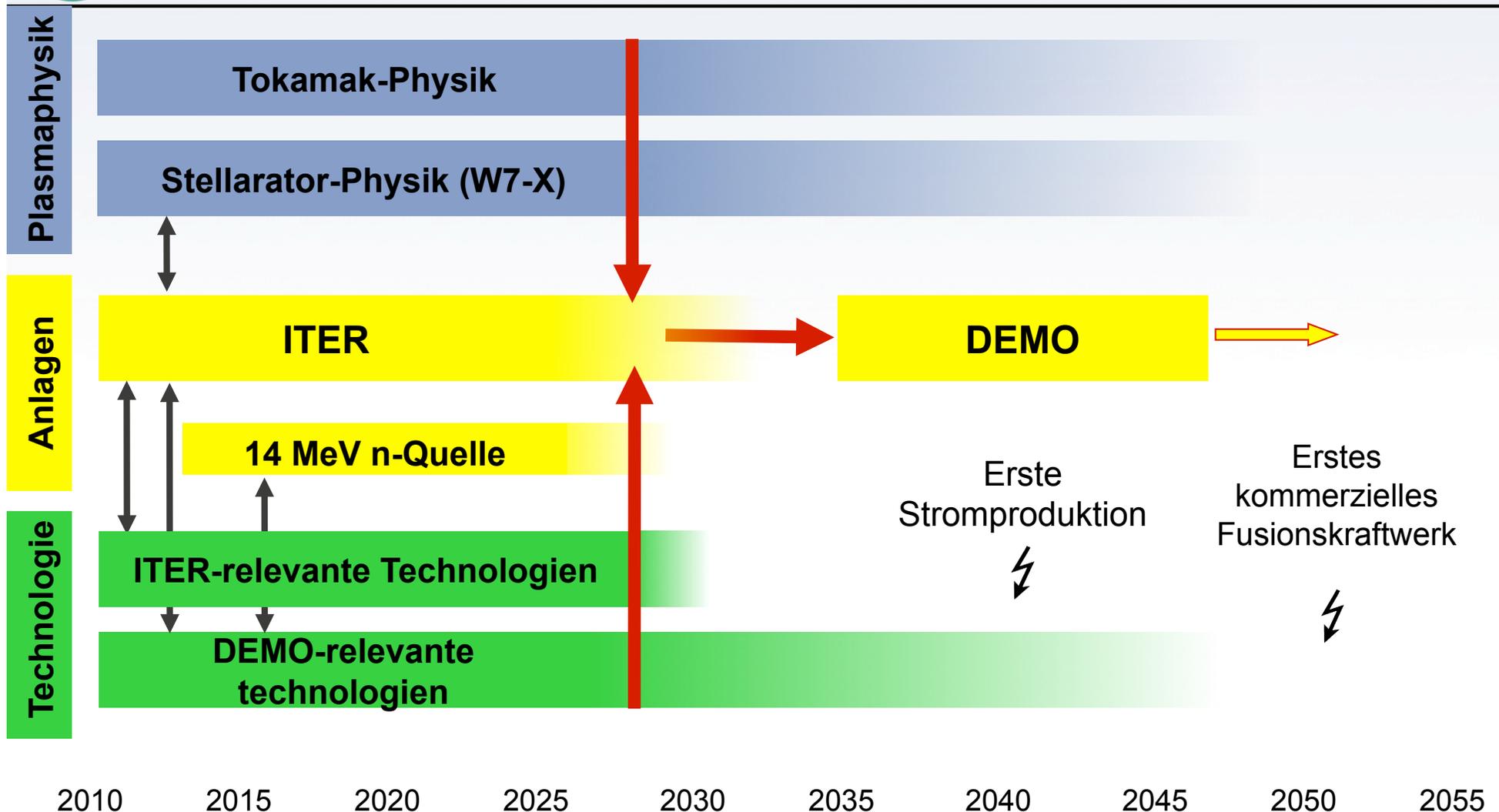
# Fusionskraftwerke passen in vorhandene Infrastruktur und sind grundlastfähig





# Der Weg zu einem Fusionskraftwerk

IPP



**Es ginge auch schneller (höheres Risiko):**

**China startet großes Fusionsprogramm als Reaktion auf Fukushima:**

**Erstes Versuchskraftwerk vor 2030, 100 GW aus Fusion bis 2100**

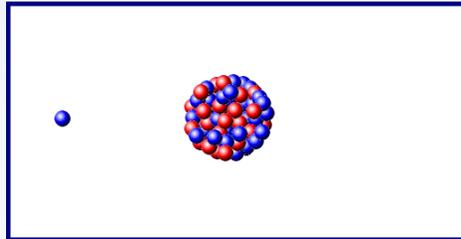


# Spaltung

vs.

# Fusion

IPP



Kettenreaktion

Brennstoff für ca. 3 Jahre (~300t)

Radioaktive Endprodukte  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  ...

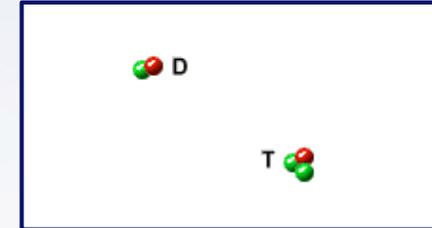
Hohe Leistungsdichte



## Kontrolle, ununterbrochene Kühlung!

- Um Kernschmelze zu verhindern
- Kontrolle der Neutronenzahl

Endlager nötig (> 10000 Jahre)



Brennvorgang

Brennstoff für 1min ~ 1g

Keine radioaktiven Endprodukte  $^4\text{He}$

Niedrige Leistungsdichte (1/100)



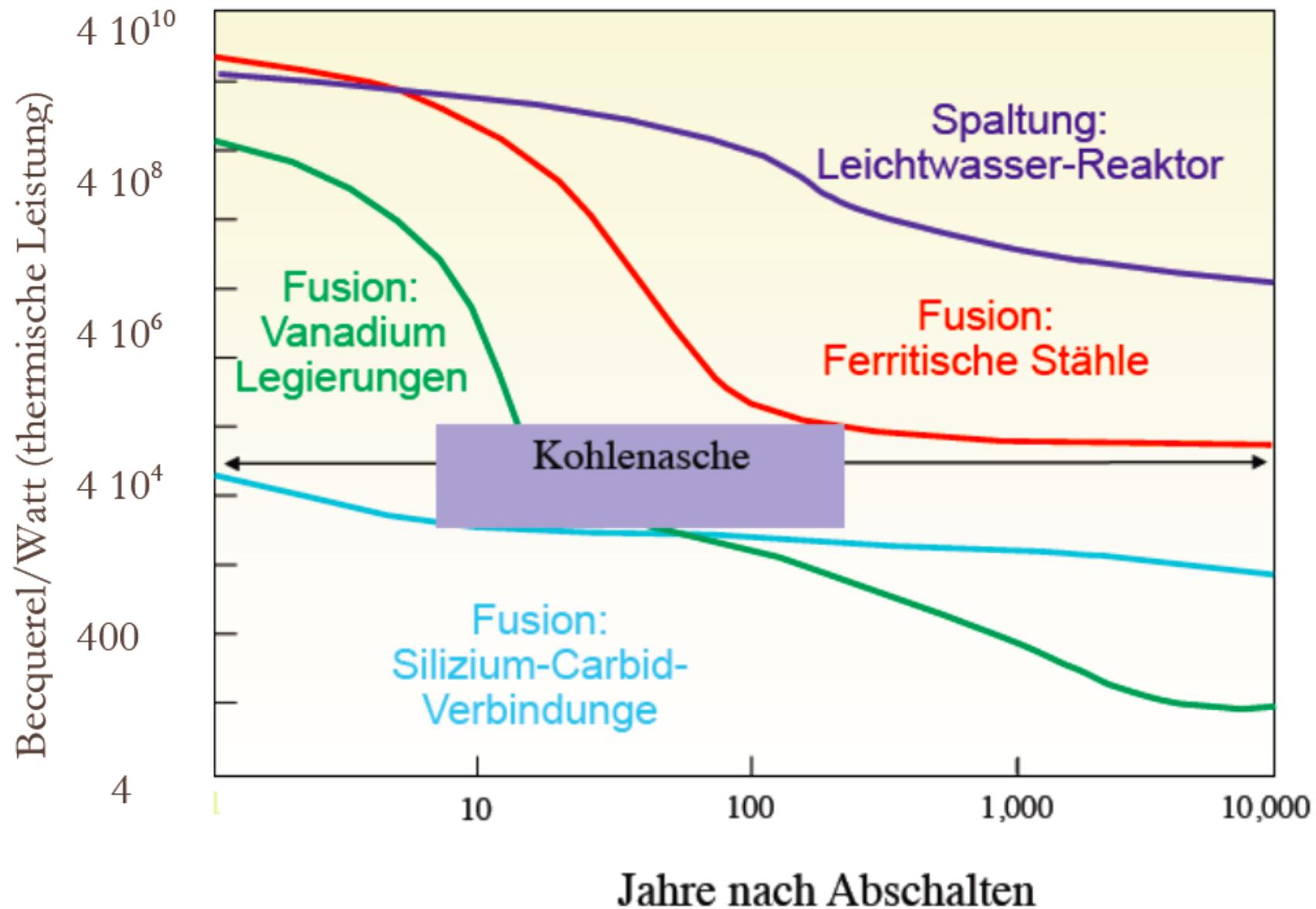
## Inhärente Sicherheit

- Keine Kernschmelze
- Keine Leistungsanstiege

Recycling nach ~100 Jahren



# Keine Endlagerung nötig





# Vorteile der Fusion

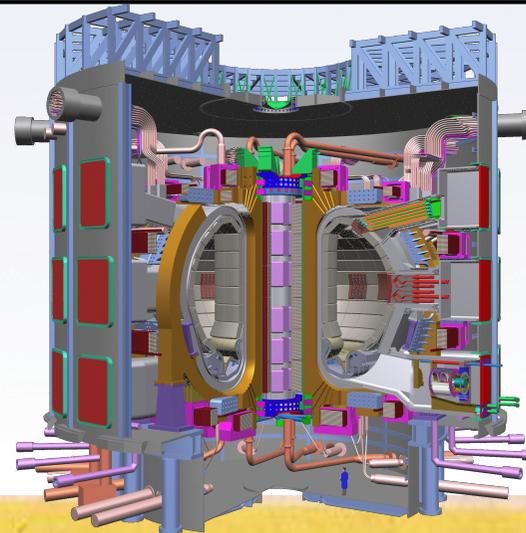


- **Brennstoffvorrat fast unbeschränkt und für alle Nationen verfügbar**
  - Deuterium (D aus Wasser) und Lithium (L aus Steinen und Meerwasser)
- **Vorteile für die Umwelt**
  - Keinerlei CO<sub>2</sub> Emissionen
  - Mittlere bis niedrige radioaktive Belastung (nur Brennstoff für 1 Minute = 1g), kein Endlagerproblem
  - Unfall- und Verunreinigungsrisiko minimal
- **Keine Explosionsgefahr, keine Kernschmelze**
  - <5 Minuten Brennstoff im Plasma, keine radioaktiven Endprodukte
- **Hohe Energie-Konzentration**
  - Minimale Landnutzung im Vergleich zu Solar-, Wind- und Wasserkraft
  - Aber niedrige Leistungsdichte (1/100 von Spaltungskraftwerken)
- **Unabhängig von Tages-, Jahres- oder Regionalen Variationen**
  - Keine Notwendigkeit zur Energiespeicherung oder globalem Transport

**Fusion ist eine nachhaltige regenerative Energiequelle!**



# In 50 Jahren: von "science fiction" zum Design eines Testreaktors



ITER  
(skaliert)

