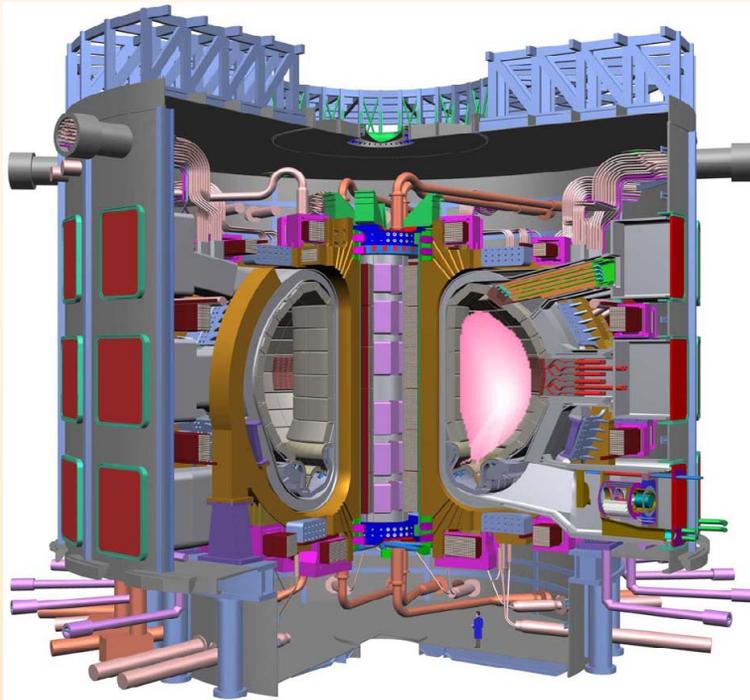


# ITER kommt - aber ist seine Plasmaphysik verstanden?

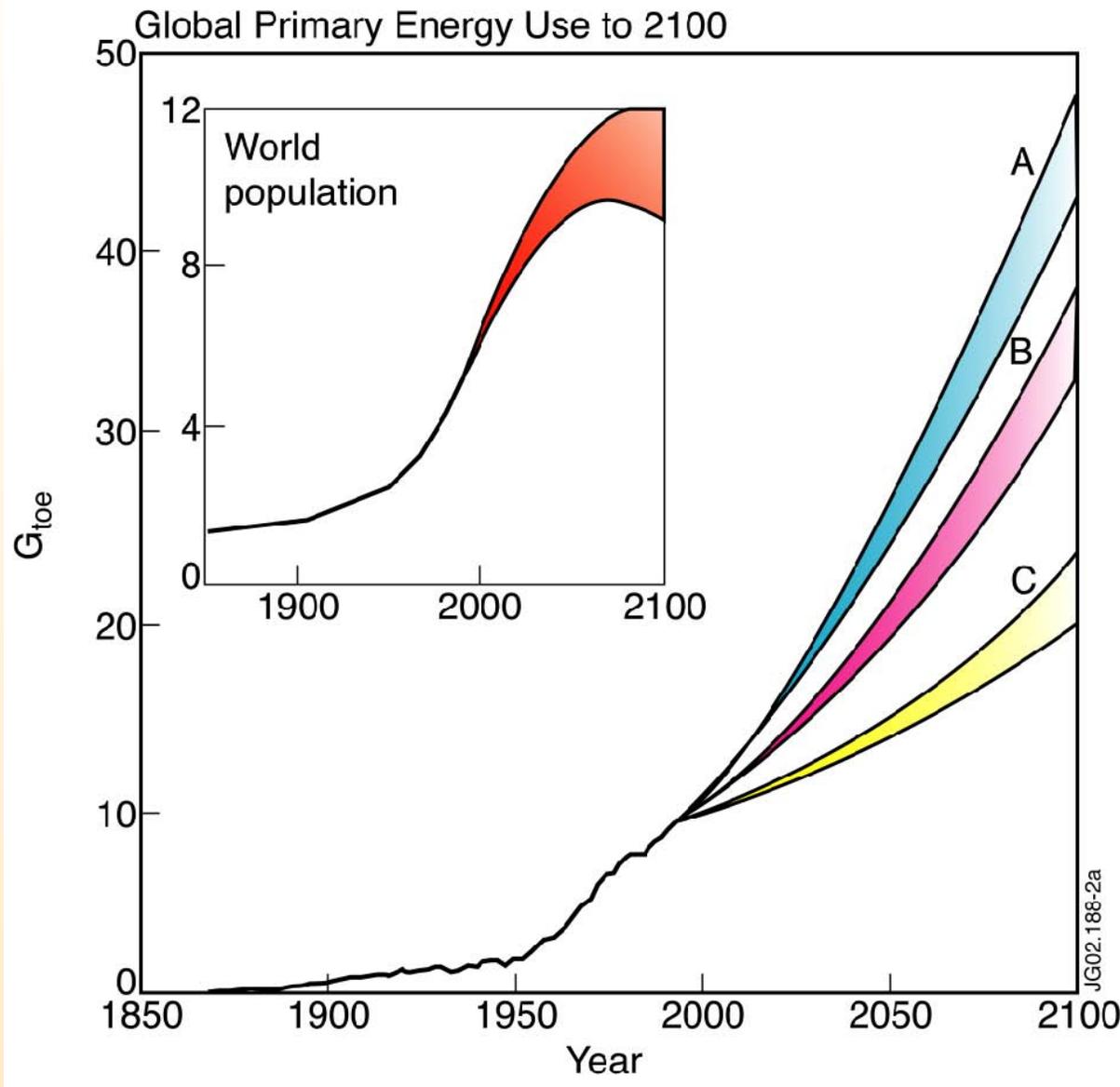


York Schröder  
(Univ Bielefeld)

Vortrag im Rahmen  
des Habilitationsverfahrens

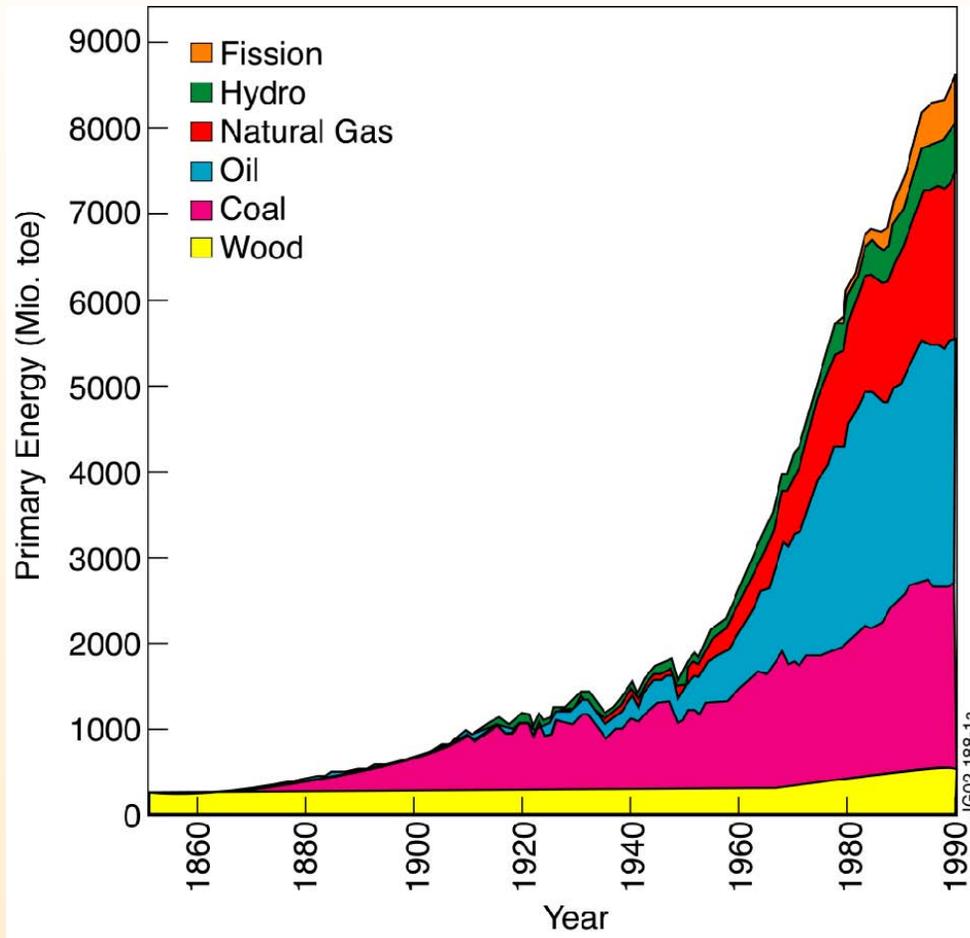
Bielefeld, 10 Jul 2006

# Motivation: steigender E-Bedarf



Energiebedarf steigt schneller als Weltbevölkerung

# Motivation: steigender E-Bedarf



bisher: fossile Brennstoffe

- geographisch ungleich verteilt
- endliche Reserven

# Motivation: steigender E-Bedarf

brauchen mehr / sauberere Energie

aktueller (ca. 2002) jährlicher Verbrauch (pro Kopf)

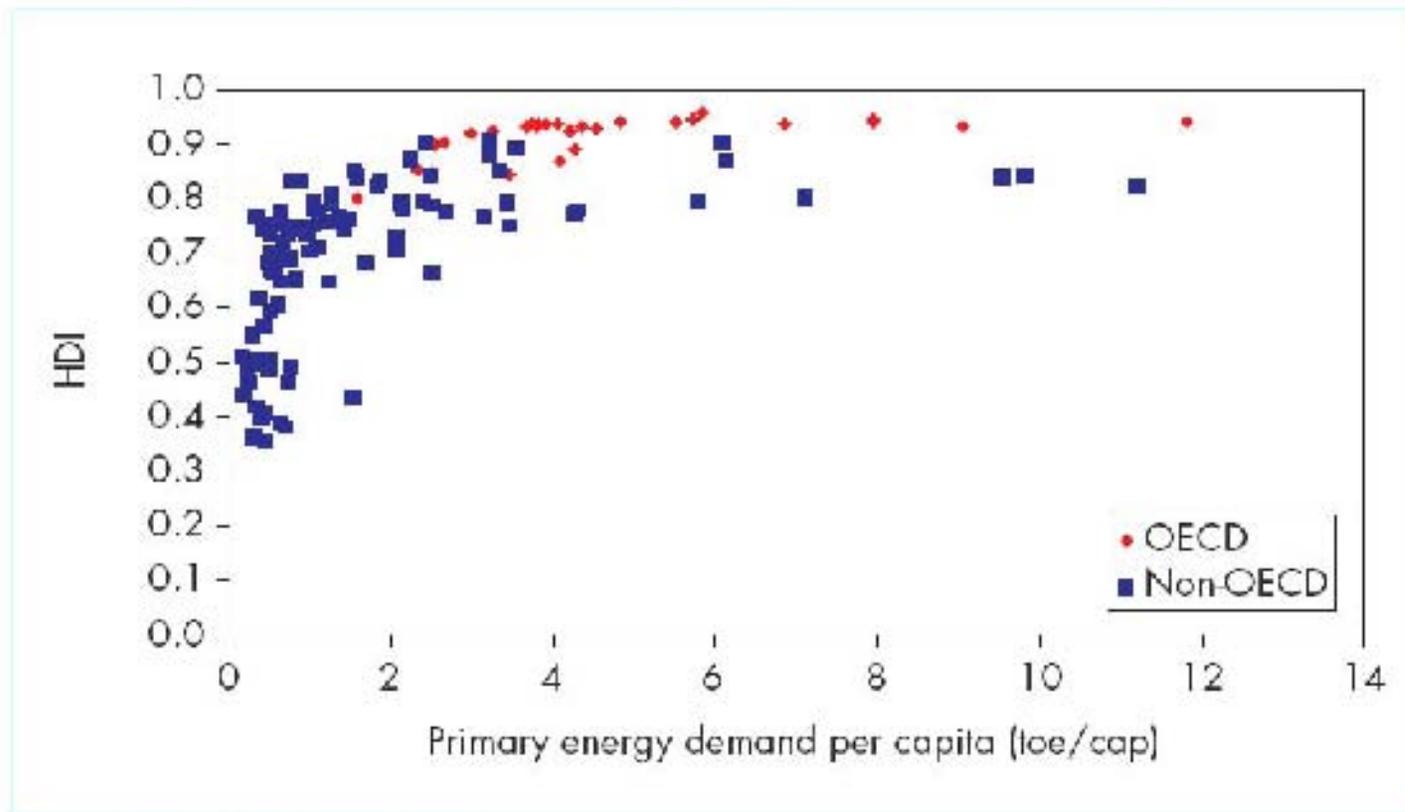
- z.B. (toe = tons of oil equivalent)

USA	7.97 toe
OECD	4.67 toe
UK	3.83 toe
Welt	1.65 toe
China	0.96 toe
Indien	0.51 toe
Bangladesh	0.15 toe

Erwartung: Welt-Energiebedarf bis 2045 verdoppelt

# Motivation: steigender E-Bedarf

Figure 10.1: HDI and Primary Energy Demand per Capita, 2002



Sources: IEA analysis; UNDP (2004).

## HDI (human development index)

- $\sim$  Lebenserwartung + Bildung + Bruttosozialprodukt

# Motivation: steigender E-Bedarf

Optionen:

## fossile Brennstoffe (Kohle, Öl)

- Ressourcen endlich
- globale Erwärmung (CO<sub>2</sub>)
- Versorgungssicherheit?

## erneuerbare Energien (Solar, Wind, Hydro)

- Fluktuationen
- Speicherung?

## Kernspaltung

- radioaktiver Abfall
- Verbreitung spaltbaren Materials

## Kernfusion

- Machbarkeit?

# Motivation: steigender E-Bedarf

Ein Beispiel:



Dänemark: 160 MW (80 Turbinen)

Bsp: EU (2002) Windenergie = 24 GW = 2% der Elektrizitätserzeugung

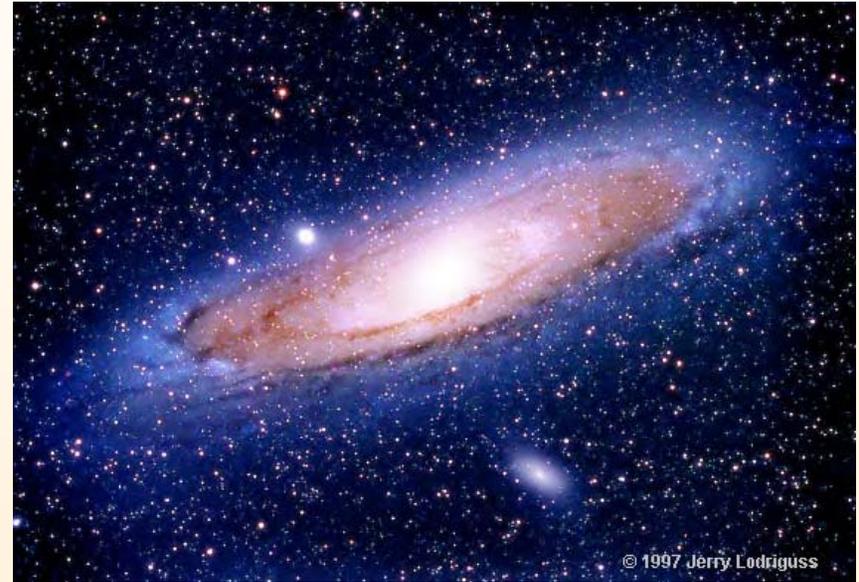
Annahme: 20% → 1500 große Windparks

# Was ist Fusion?

natürliche Fusionsreaktoren



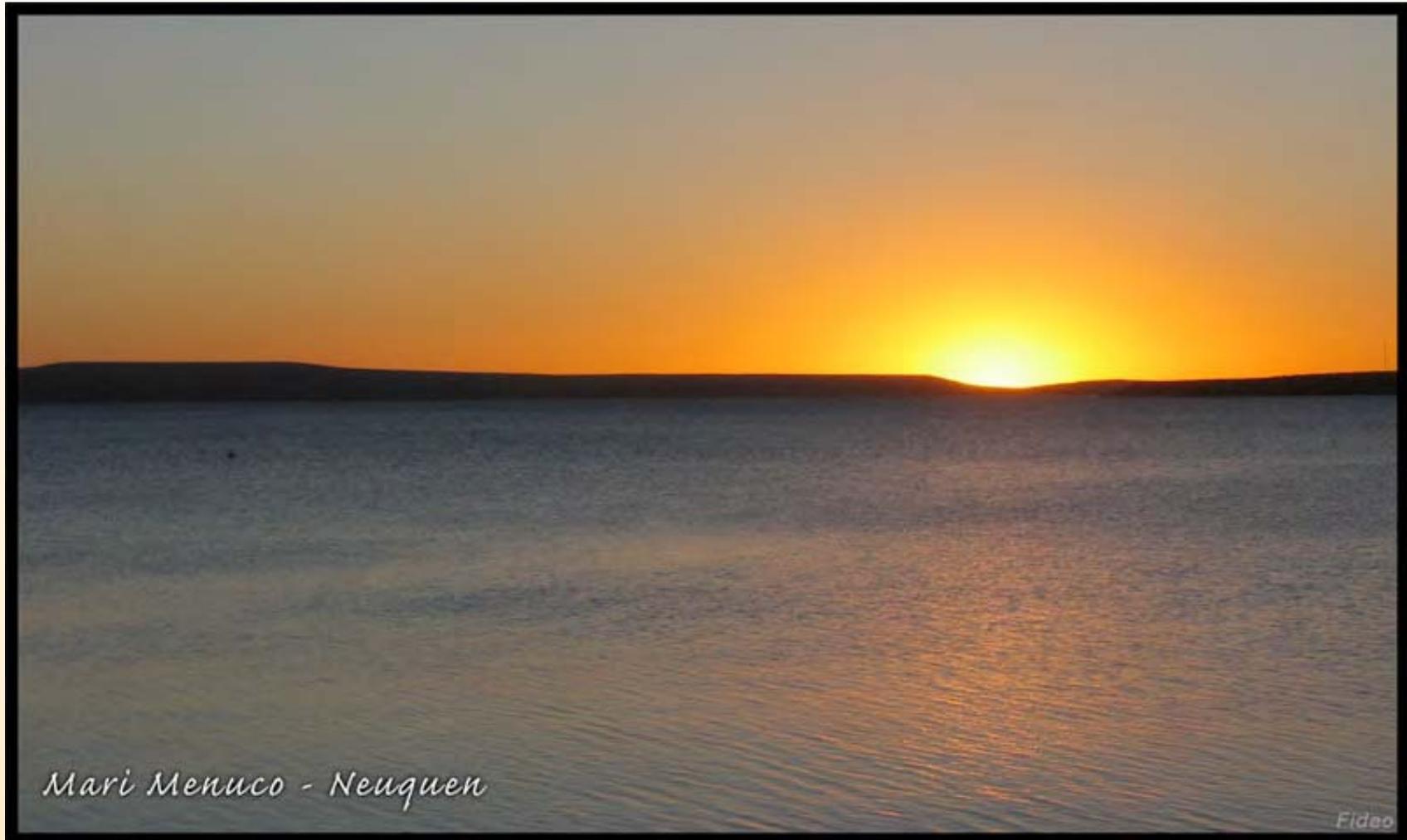
Milchstraße



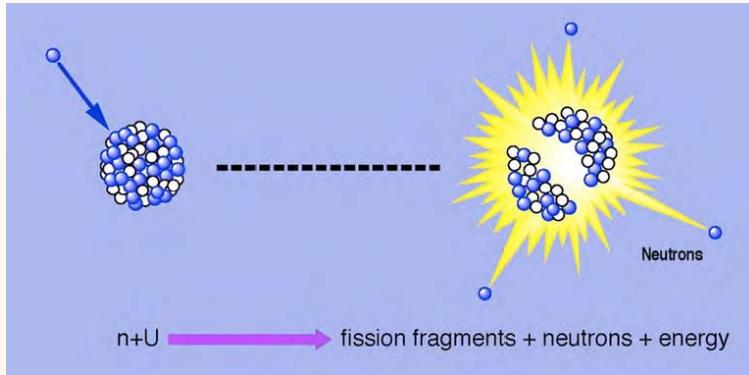
Andromeda

# Was ist Fusion?

jeden Morgen ...



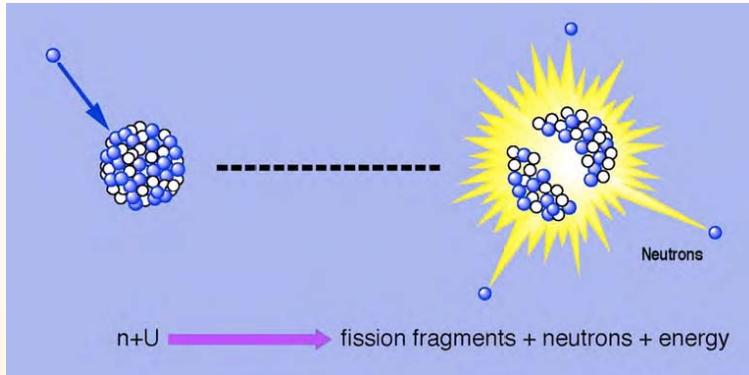
# Was ist Fusion?



Kernspaltung ist ‘einfach’:

- ausgelöst durch el. neutrales  $n$
- bei Raumtemperatur
- in Festkörpern

# Was ist Fusion?

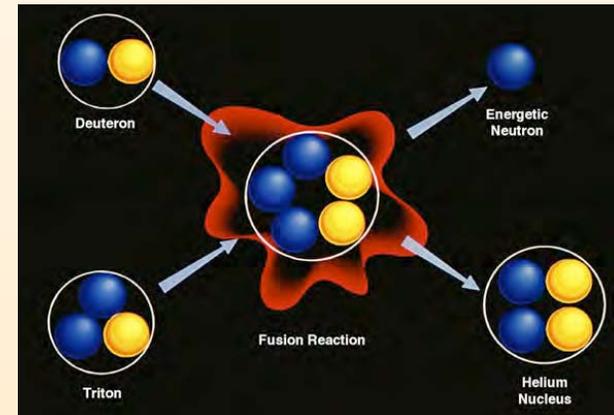


Kernspaltung ist "einfach":

- ausgelöst durch el. neutrales  $n$
- bei Raumtemperatur
- in Festkörpern

Kernfusion ist "schwierig":

- ausgelöst durch el. geladene Teilchen
- bei sehr hoher Energie
- Schwellentemp.  $\sim 100$  Millionen Grad



# Was ist Fusion?

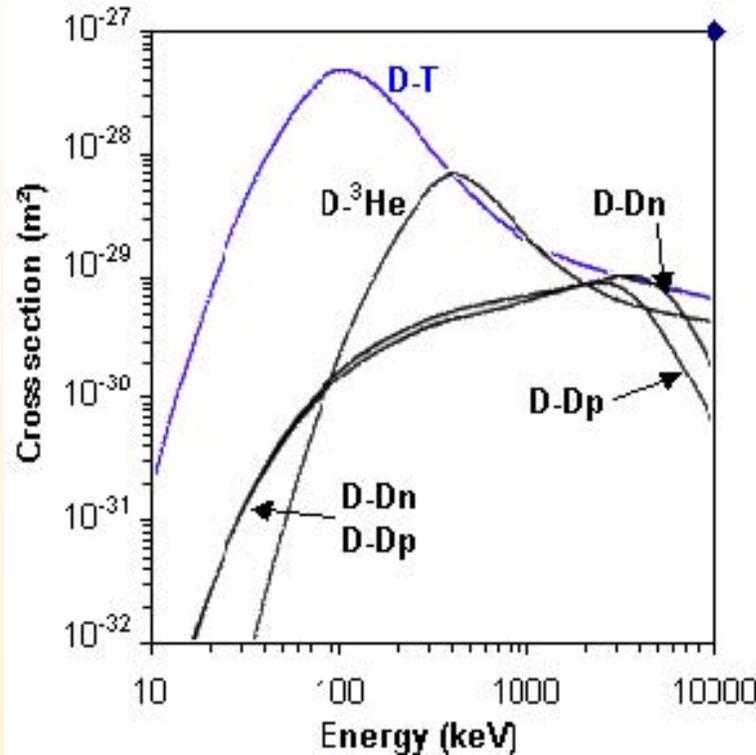
einige mögliche Fusionsprozesse:

- $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$  (\*)
- $D + D \rightarrow T + p + 4.0 \text{ MeV}$
- $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3.25 \text{ MeV}$
- $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + 18.2 \text{ MeV}$

(\*)  $10^7$  mal mehr als bei chemischer Reaktion beim Verbrennen fossiler Brennstoffe

(\*) 1 GW Reaktor: 1kg D+T pro Tag /  $10^7$ kg Kohle pro Tag

# Was ist Fusion?



warum Tritium?

- $t_{1/2}=12.5$  Jahre
- keine natürlichen Reserven

“hoher” Wirkungsquerschnitt

zur Erinnerung:  $k_B \approx 10^{-4}$  eV/K

- 10 keV  $\approx$  100 Mio. K

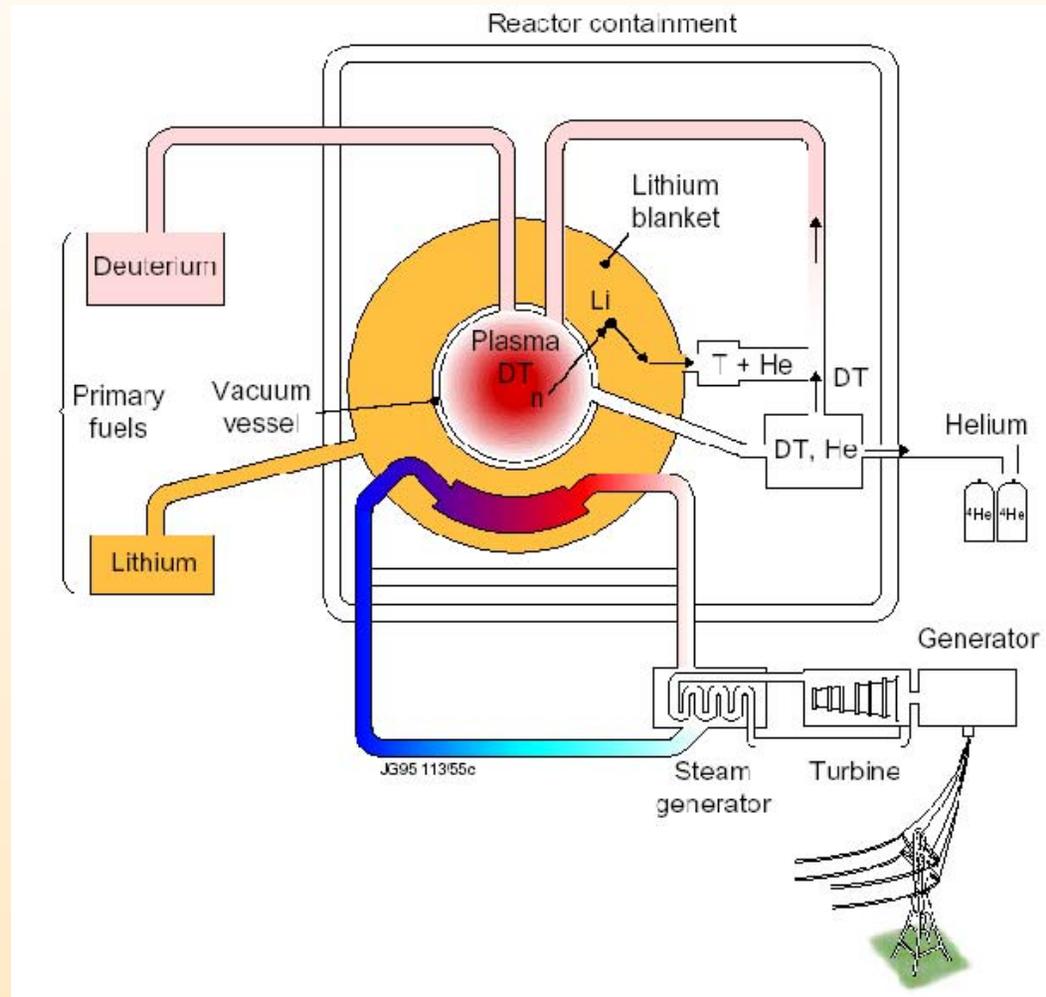
in Sonne (10 Mio. K): wenige energetische Ionen fusionieren



# D-T Fusionsprinzip

Fusions-Reaktor würde konventionellem Reaktor ähneln

- Unterschiede: Brennstoff, **Ofen**



# Plasma

Ofen für ein Plasma?

hohe  $T \Rightarrow$  therm.  $E$  ausreichend für Ionisation

- Stärke der Ionisation: Saha-Formel

$$\frac{n_i n_e}{n_n} = \frac{2g_1}{g_0} \left( \frac{m_e}{2\pi} \right)^{\frac{3}{2}} \hbar^{-3} (k_B T_e)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right)$$

bei  $10^8\text{K}$  praktisch vollständige Ionisation (H:  $E_i = 13.6\text{eV}$ )

$\Rightarrow$  starke Kopplung an  $E$ - und  $B$ -Felder

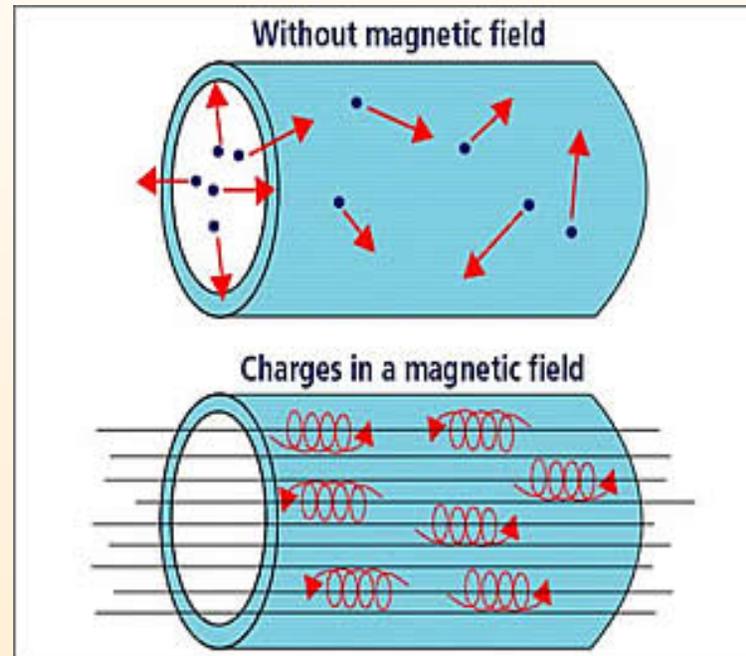
Schlüsselidee: magnetischer Einschluß

in nullter Näherung: geladene Teilchen in  $E, B$

- $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$
- Gyration um  $\mathbf{B}$ -Feldlinien
- $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  Drift
- $\nabla \mathbf{B}$  Drift

# Plasmaeinschluss im Tokamak

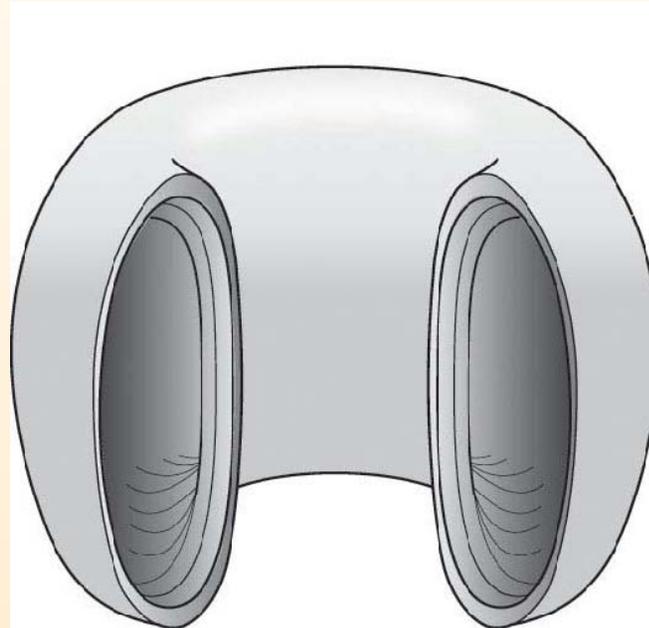
Gyrationsfrequenz und -radius:  $\nu_g \sim \frac{qB}{m} \approx 10^{11} \text{Hz}(e^-)$ ,  $r_L = \frac{v_{\text{perp}}}{\omega_g}$



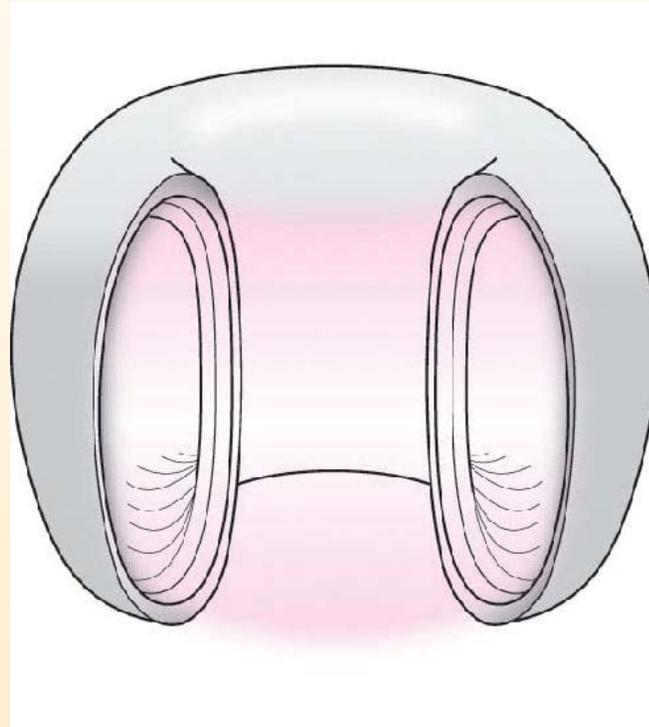
Zylinder zusammenbiegen

⇒ Toroidalnaya Kamera Magnitnymi Katushkami

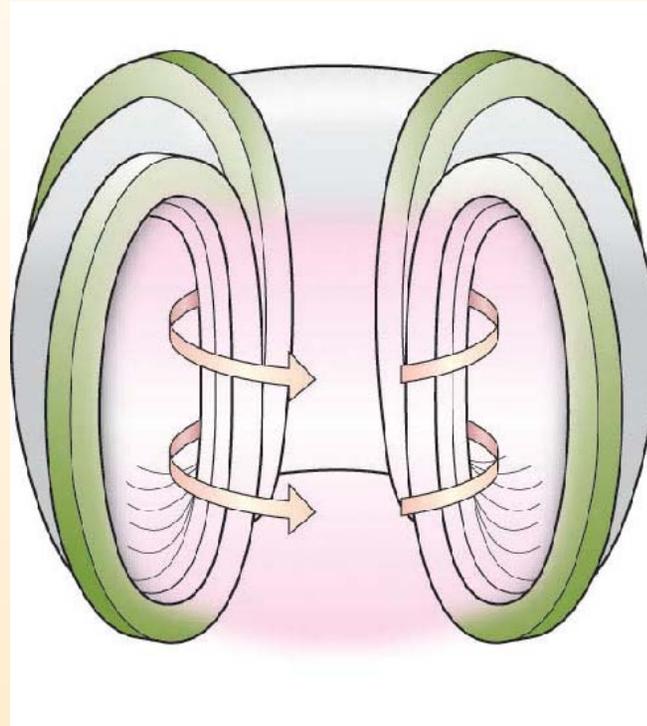
# Plasmaeinschluss im Tokamak



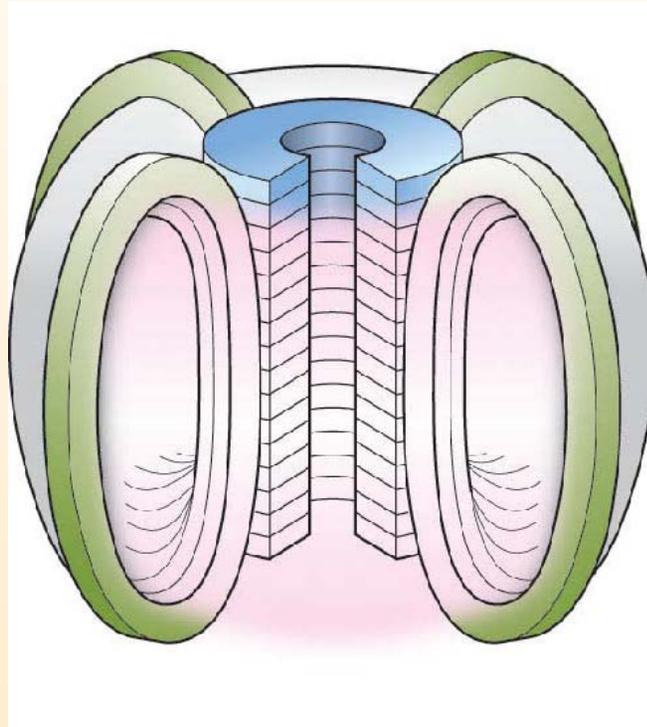
# Plasmaeinschluss im Tokamak



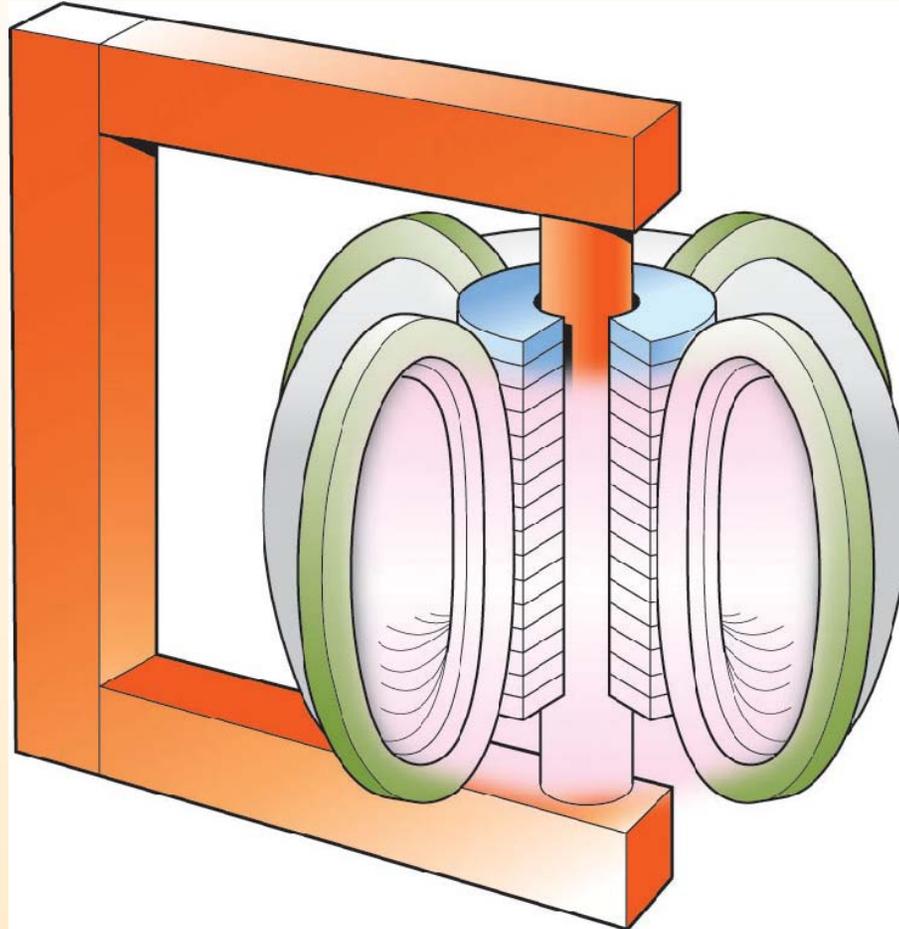
# Plasmaeinschluss im Tokamak



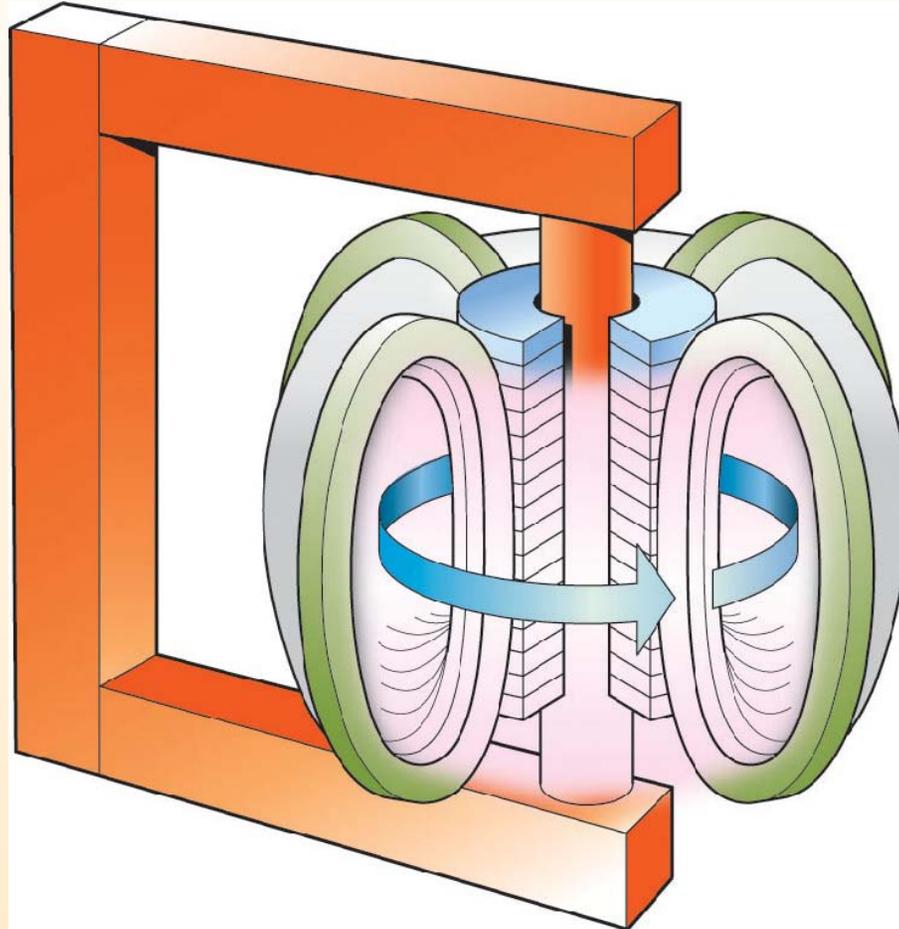
# Plasmaeinschluss im Tokamak



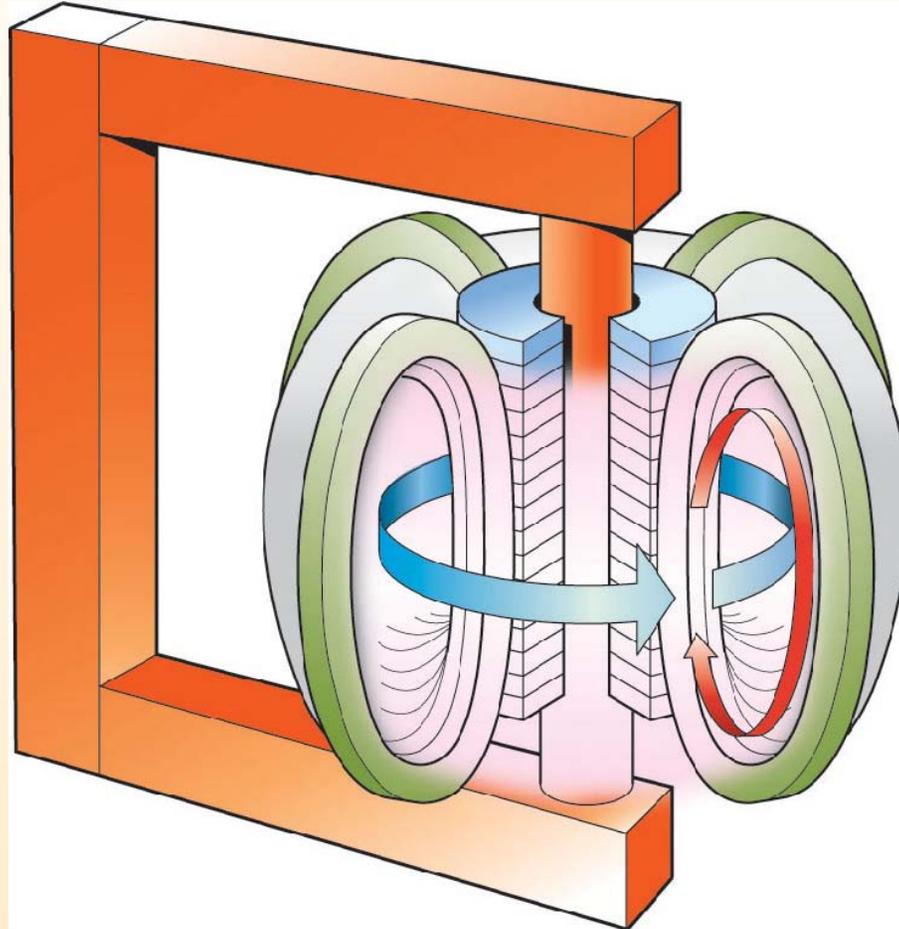
# Plasmaeinschluss im Tokamak



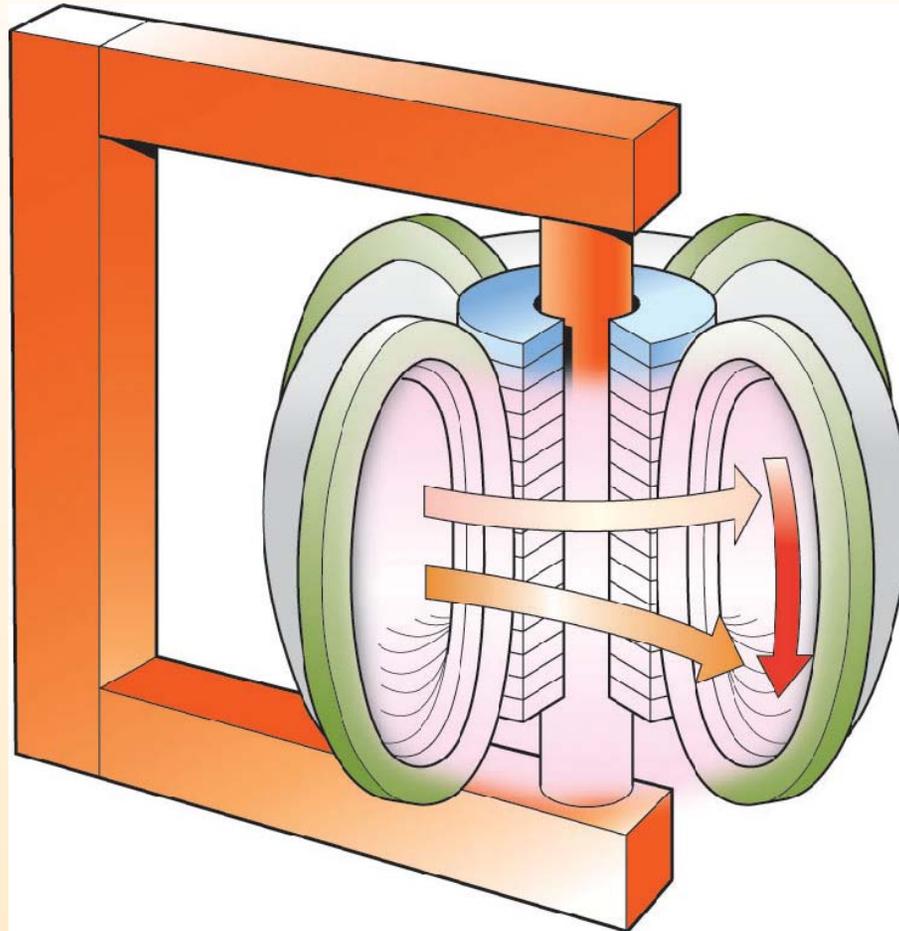
# Plasmaeinschluss im Tokamak



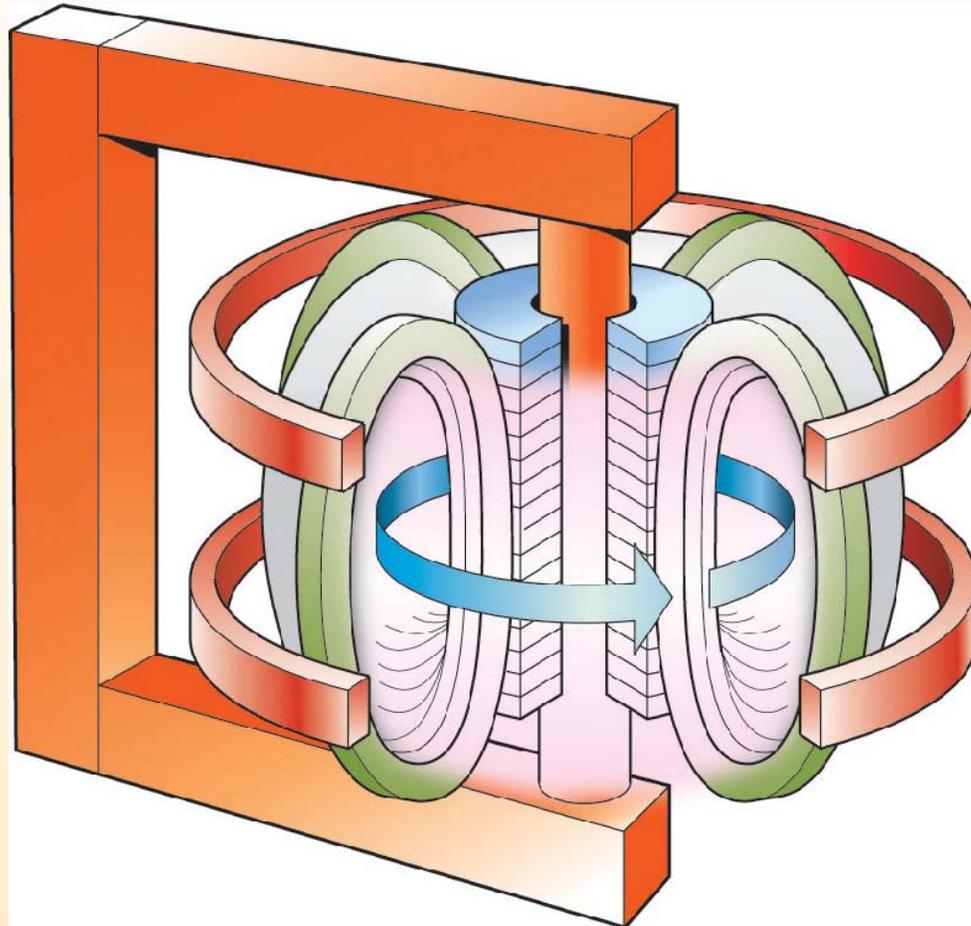
# Plasmaeinschluss im Tokamak



# Plasmaeinschluss im Tokamak



# Plasmaeinschluss im Tokamak



# Beschreibung des Plasmas

Vielteilchencharakter → Methoden der statist. Physik

MHD: Plasma leitfähiges kontinuierliches Medium

- → Gleichungen der Hydro- + E-Dynamik

Zweiflüssigkeitenmodell

- getrennte Behandlung von Ionen, Elektronen

i.A.: kinetische Beschreibung

- N-Teilchen Verteilungsfunktion  $F_N(\mathbf{x}_i, \mathbf{p}_i)$
- Liouville: Dichte im  $6N$ -dim Phasenraum konstant,  $d_t F_N = 0$
- Reduktion auf Verteilungsfunktionen niedriger Ordnung  $F_s = \int_{N-s} F_N$
- → BBGKY Hierarchie
- mit Zusatzannahmen abbrechen → verschiedene kinetische Gleichungen
- z.B.  $F_2 = F_1 F_1 + G_{1,2} \rightarrow$  Vlasov
- $(\partial_t + \mathbf{v} \cdot \partial_{\mathbf{r}} + \frac{q}{m} (\langle \mathbf{E} \rangle + \mathbf{v} \times \langle \mathbf{B} \rangle) \cdot \partial_{\mathbf{v}}) F_1^\sigma = 0$

# Beschreibung des Plasmas

kennen viele Instabilitäten der Hydrodynamik

- große Reynolds-Zahl → Turbulenz  
(z.B. Zusammenbruch einer laminaren Strömung an fester Wand)
- Kelvin-Helmholtz  
(z.B. Wellen auf windüberströmter Wasserberfläche)
- thermische  
(z.B. Konvektion in von unten beheizter Flüssigkeit)
- ...

entsprechende Instabilitäten (und mehr) in MHD

Vorsicht mit Entwicklungen

- Fluß kann stabil gegen kleine Störungen sein
- aber instabil gegen große

## $e^-$ relativistisch?

- therm. Geschw.  $\frac{v_t}{c} = \frac{\sqrt{k_B T/m_e}}{c} \approx \sqrt{T/10^{10}\text{K}} \approx 0.1$

## Quanteneffekte relevant?

- z.B. Abweichung von Boltzmann-Statistik im GG / Entartung des  $e^-$ -Gases
- wenn therm. deBroglie-Wellenlänge der  $e^- >$  mittl. Abstand
- $\lambda_B = \frac{\hbar}{m_e v_t} \approx \frac{200\text{MeV fm}}{0.5\text{MeV} \cdot 0.1} \approx 10^{-12}\text{m} > n_e^{-1/3} \approx 10^{-7}\text{m}$

## ideales Plasma? (Ww-E klein gegen kin. E)

- ideal wenn  $n_e \lambda_D^3 = n_e \left( \frac{k_B T}{4\pi n_e e^2} \right)^{3/2} \gg 1$
- oder Plasmaparameter  $\Lambda \equiv \frac{4\pi}{3} n_e \lambda_D^3 \approx 10^{22} (10^{-5})^3 \approx 10^7 \gg 1$

## charakteristische Zeitskalen

- kollektive: Plasmafreq.  $\omega_p = \frac{v_t}{\lambda_D} = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m}} \approx 10^{12}\text{Hz}$
- individuelle: schätze Stoßfrequenz für  $90^\circ$  Ablenkung ab (in  $\lambda_D$  viele Rutherford-Streuungen mit kl. Winkel)  
$$\nu_s = \frac{4\pi n_0 e^4}{m_e^2 v_t^3} \approx \frac{\omega_p}{\Lambda}$$
- also wieder: individuelle Effekte vernachlässigbar wenn  $\Lambda \gg 1$

# Magnetohydrodynamik (MHD)

Plasma als leitende Flüssigkeit (+Dissipation)

makroskopische Beschreibung: bilde Momente der Boltzmann-Glg

- z.B.  $\rho(\mathbf{r}, t) = \int_{\mathbf{v}} f_e(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t); \mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \int_{\mathbf{v}} f_e(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)\mathbf{v}/\rho$

Kontinuitätsgleichung  $d_t\rho + \nabla \cdot \rho\mathbf{u} = 0$

Impulserhaltung  $\rho\partial_t\mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \rho\nu_1\Delta\mathbf{u} + \rho\nu_2\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u})$

Ohm'sches Gesetz  $\eta\mathbf{j} = \mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}$

Maxwell-Gleichungen  $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t\mathbf{B}$   
 $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0\mathbf{j}$

Abschluß durch Zustandsgleichung, z.B.

- $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$  im inkompressiblen Fall
- $\partial_t \left( \frac{p}{\rho^\gamma} \right) = 0$  im adiabatischen Fall

ideale MHD:

- Grenzfall Leitfähigkeit  $\sigma = 1/\eta \rightarrow \infty$  (+ Viskositäten  $\nu_{1,2} \rightarrow 0$ )

# Computersimulationen

## Energieverlust im Tokamak hoch

- viel höher als klassische Transporttheorie vorhersagt
- → mikroskopische Plasma-Turbulenzen

## (kennen Navier-Stokes Gln seit 100 Jahren. Turbulenzen?)

- im Plasma weitere Komplikation: Coulomb-Stöße langreichweitig

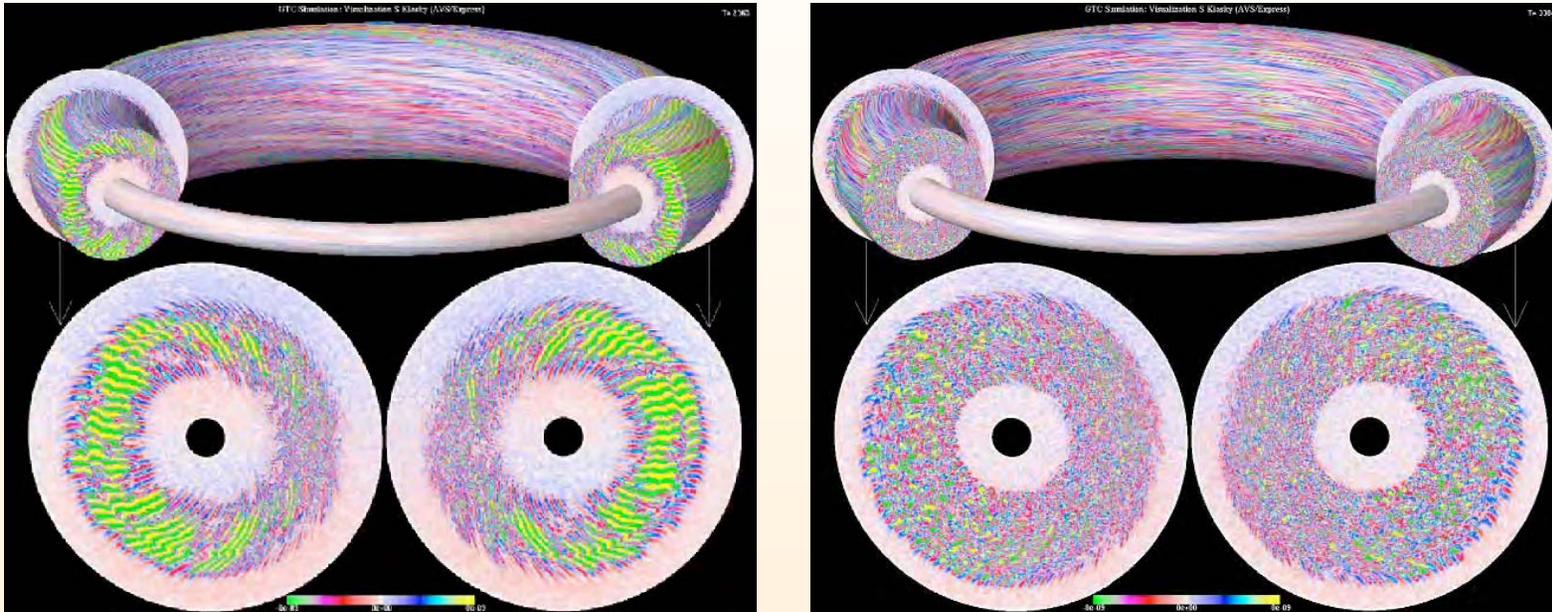
## löse gekoppeltes System

- Boltzmann + Maxwell
- + komplexe Magnetfeld-Geometrie

## Hoffnung: numerisch möglich?

- bisher (bis Tflop) nur einfache Geometrien möglich
  - ▷ z.B. in gyro-kinetischer Näherung ( $\nu_{turb} < \nu_{gyro}$ )
  - ▷ fasse viele Teilchen zu einer "Wolke" zusammen
  - ▷ löse Bewegungs- und Feldgleichungen numerisch
  - ▷ typischer Zeitschritt 20-50ns
  - ▷ Berechne makroskopische Größen (z.B.  $\rho$ ,  $\mathbf{u}$ ) aus Ensemble

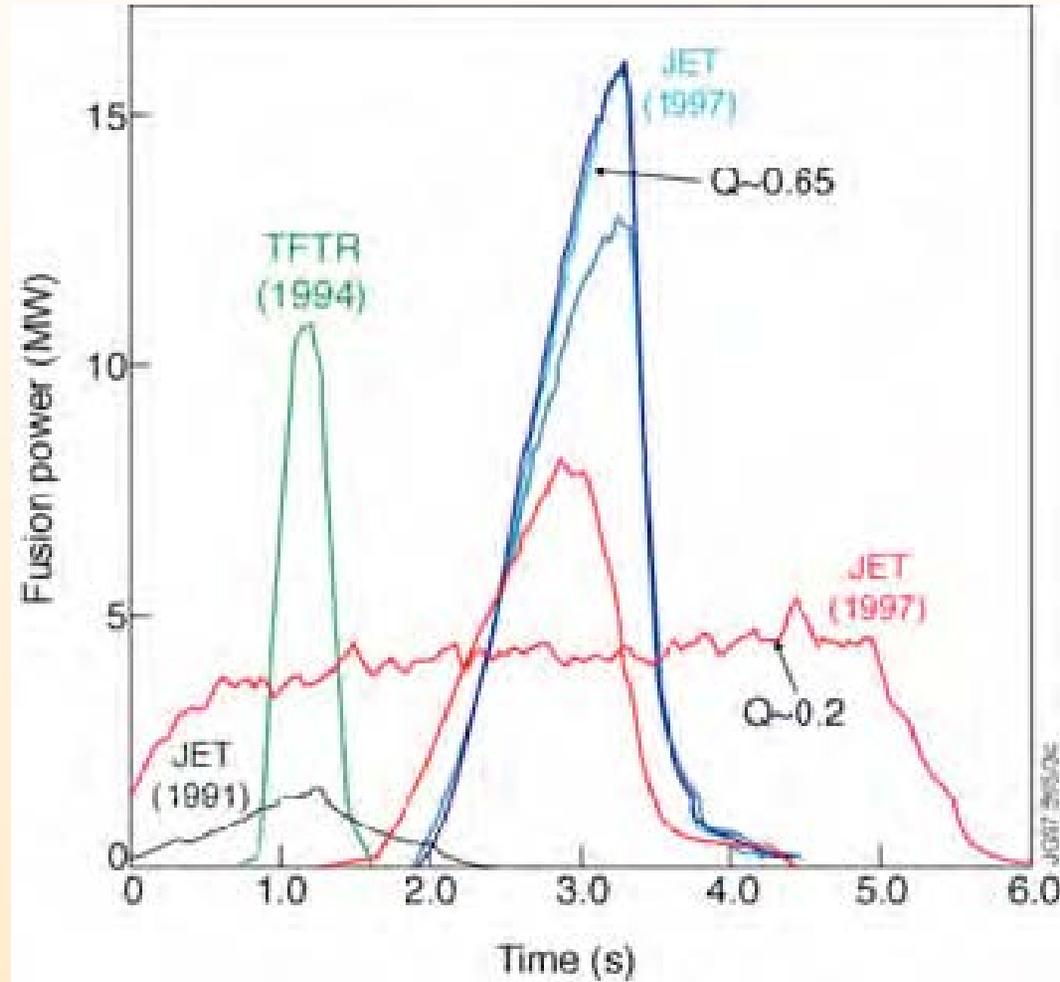
▷ *bisher (Tflop):  $10^5$  ‘‘Wolken’’ mit je  $10^3$  Elektronen und Ionen*



für ITER: 10 Pflops realistisch (ca 2010?)

# D-T Fusionsexperimente

TFTR und JET erreichen  $\sim 10\text{MW}$

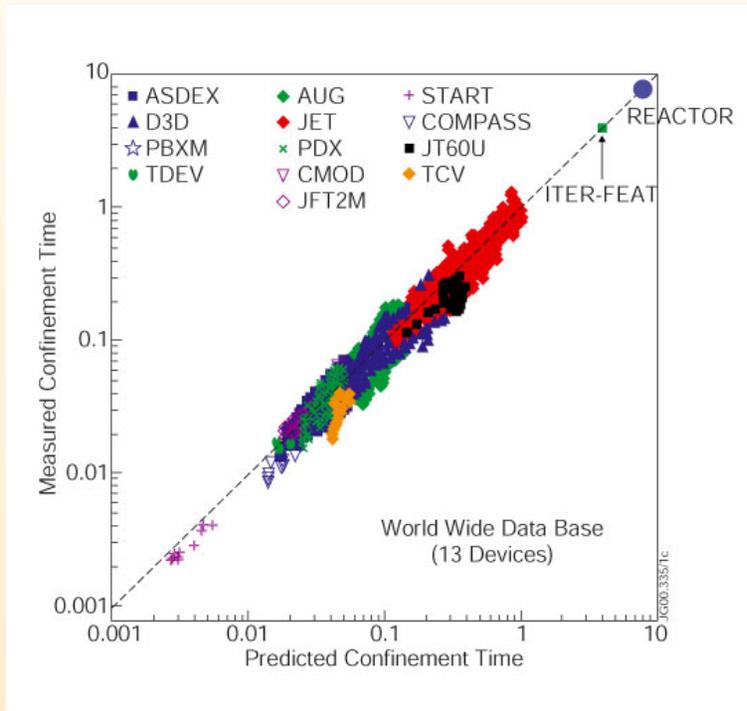


# D-T Fusionsexperimente

## Fusionsdatenbank

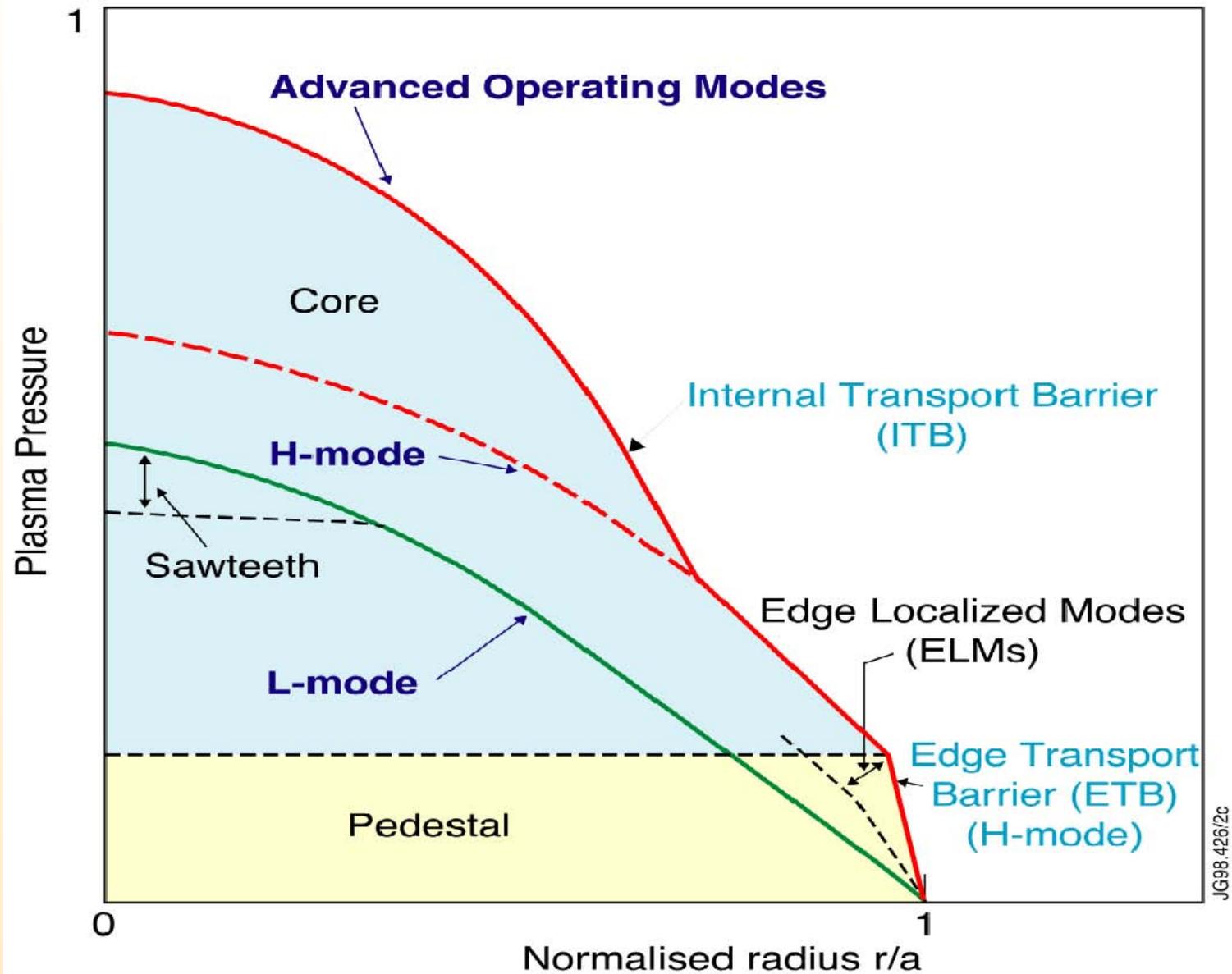
→ Skalierung

$$\tau_E \propto R^{1.97} B_T^{0.15} I_p^{0.93}$$



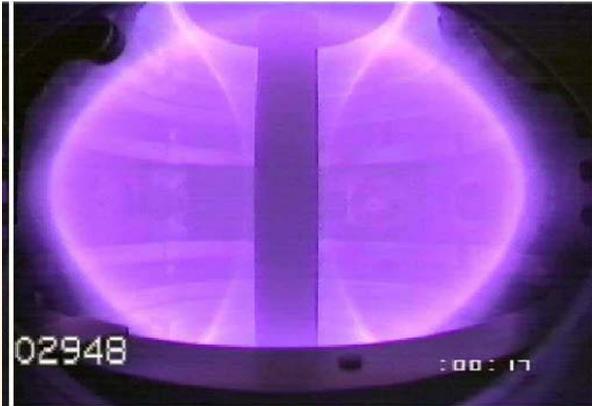


# D-T Fusionsexperimente



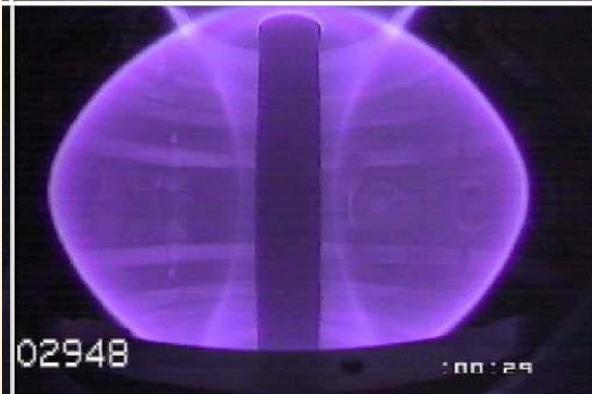
# D-T Fusionsexperimente

Übergang zur H-Mode bei MAST



vorher

- unscharfer Plasmarand
- schlechter E-Einschluß



nachher

- scharfer Plasmarand
- besserer E-Einschluß
- kann Plasma-Druck erhöhen

# Fusionsreaktor (back of the envelope)

Neutron (14.1 MeV) braucht  $\sim 1$  Meter in Li zur T-Produktion

- also Längenskala  $\sim 1\text{m}$

stärkste Magnetfelder für diese Größenordnung  $\sim 5$  Tesla

- Druck  $B^2/2\mu_0 \sim 10^7\text{N/m}^2 \sim 100\text{atm}$
- Stabilitätslimit typischerweise 10% des magn Druckes, also  $p \sim 10\text{atm}$  im Plasma

brauchen typischerweise ( $Q \sim 30$ ,  $T \sim 10^8\text{K}$ )  $p\tau_E \sim 10\text{atm sec}$

- $\tau_E \sim 1\text{s}$

dann ist der Wärmefluß  $\sim pR/\tau_E$

- Wärmefluß  $\sim 1\text{MW/m}^2$
- hohe Anforderung an Behälter-Wand

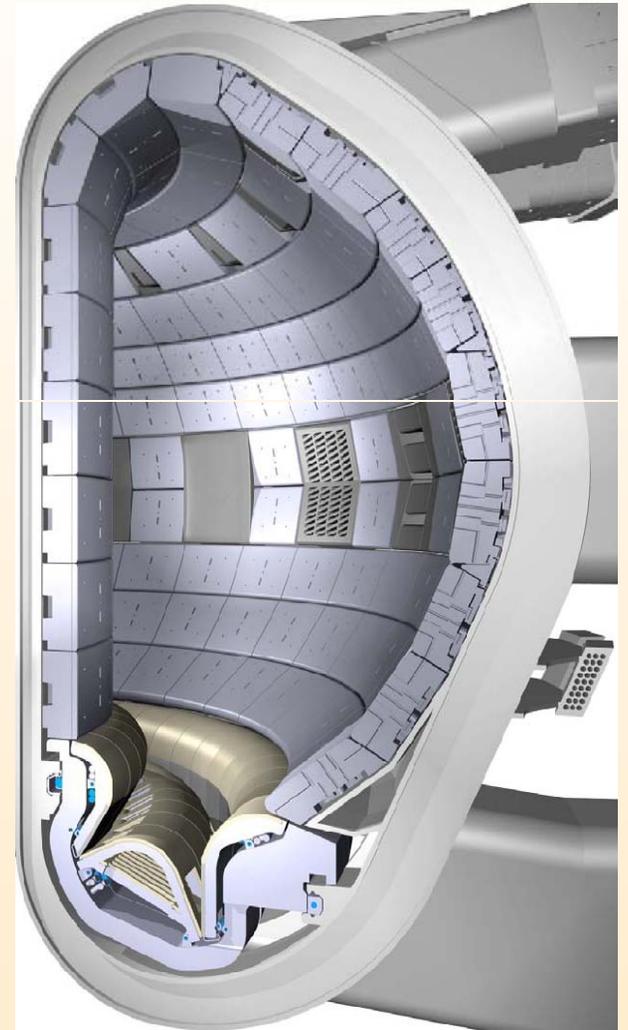
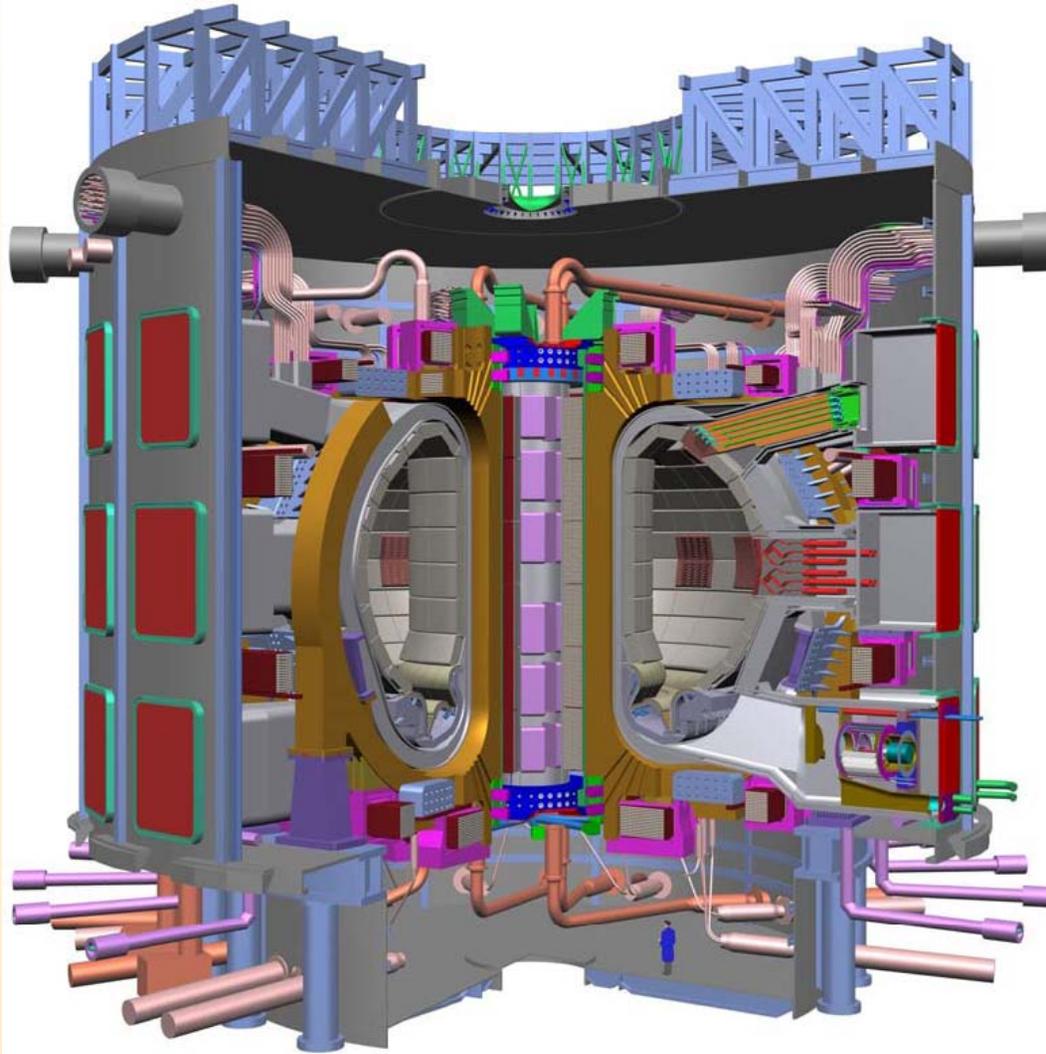
# Fusionsexperimente

Parameter	Tore Supra	JET	ITER
$R_1$ (m)	2.25	3	6.21
$R_2$ (m)	0.7	1.25	2.0
Plasmavolumen (m <sup>3</sup> )	25	155	837
max. Plasmastrom (MA)	1.7	5-7	15
Magnetfeld (T)	4.5	3.4	5.3
Pulslänge	Minuten	10 sec	>300 sec
Plasmatyp	D-D	D-D / D-T	D-T
thermonukleare Leistung $P_{th}$	~kW	50kW / 10MW	500MW
$Q = P_{th}/\text{Heizleistung}$	~0	~1	>10
Neutronenfluß	20W/m <sup>2</sup>	60kW/m <sup>2</sup>	0.57MW/m <sup>2</sup>

## ITER

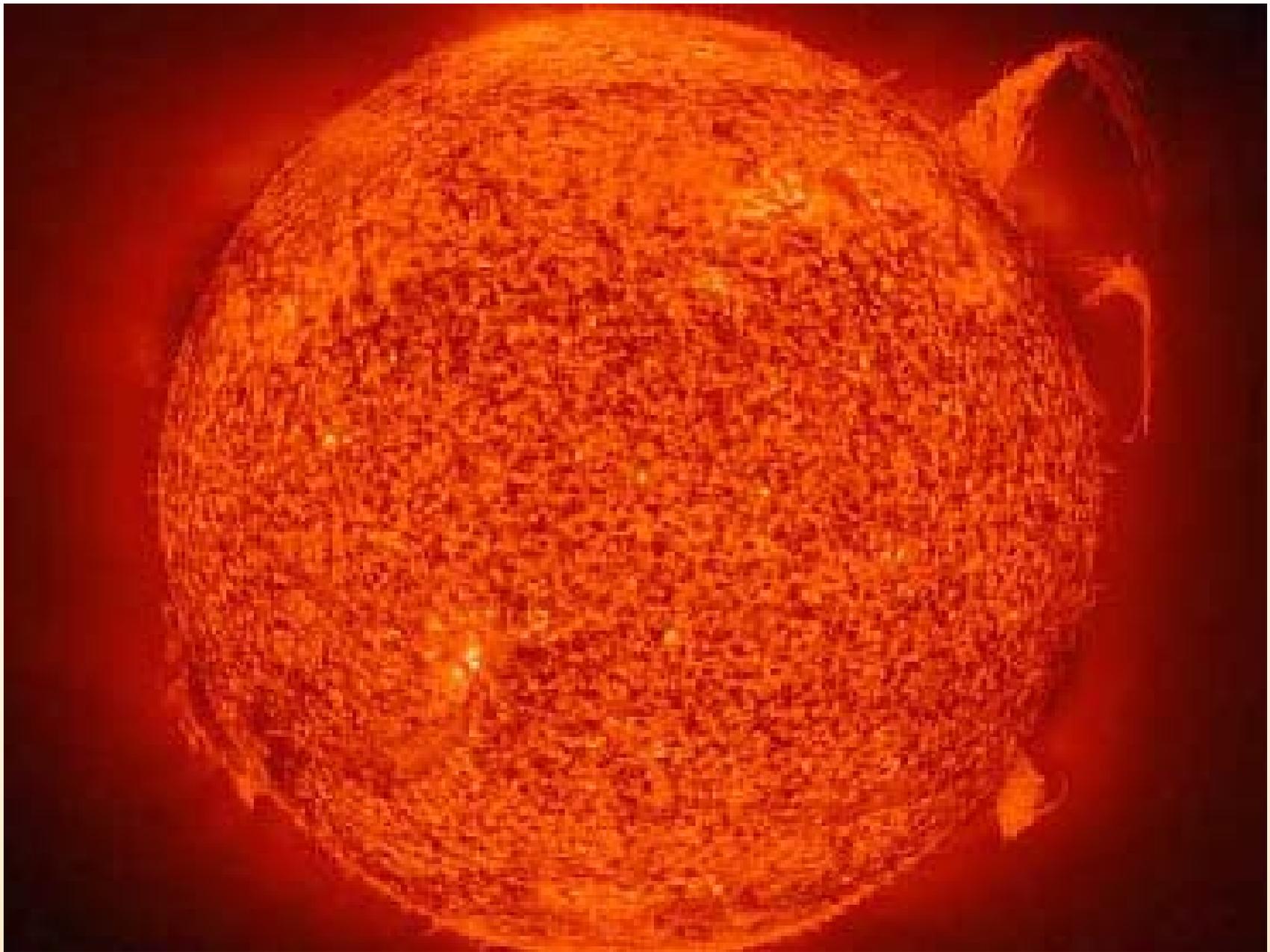
- Baubeginn 2007, 9 Jahre Bauzeit, 20 Jahre Laufzeit
- ITER Kosten 4.5 G Euro
  - ▷ *EU 45.4%*
  - ▷ *Japan, China, Indien, Russland, Südkorea, USA je 9.1%*

# ITER Struktur



# Fazit / Ausblick

- kontrollierte Kernfusion birgt großes Potenzial
- Plasmagleichungen i.A. nicht analytisch lösbar
- realistische Computersimulationen  $\sim$  Pflops
- ITER Design: Extrapolation experimenteller Resultate
- mehr Grundlagenforschungs-Experiment als Reaktor
- Reaktor: brauchen große Fortschritte in Materialforschung
- aber: Potenzial zum “fast track”



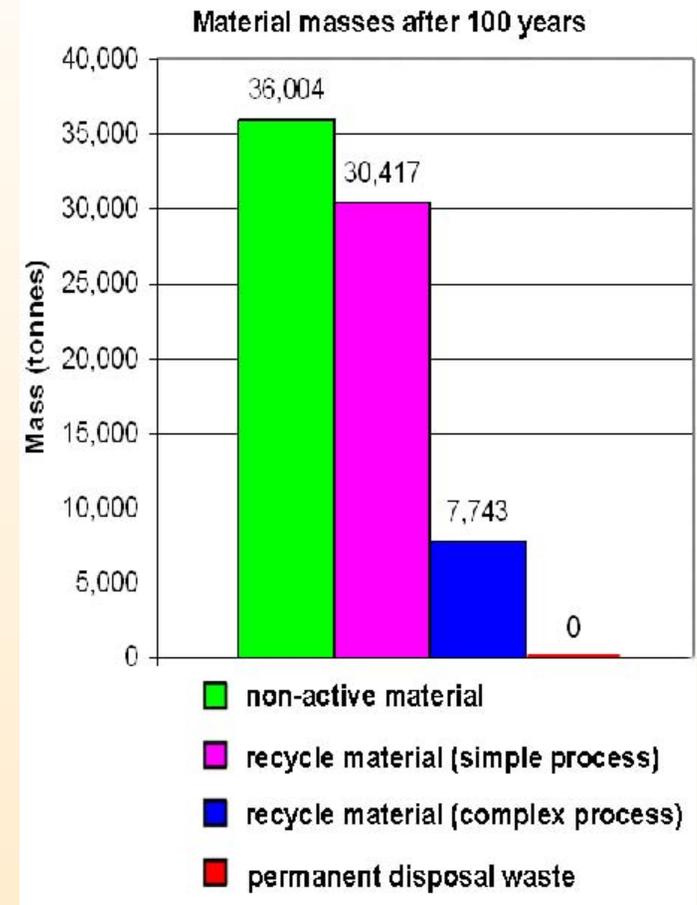
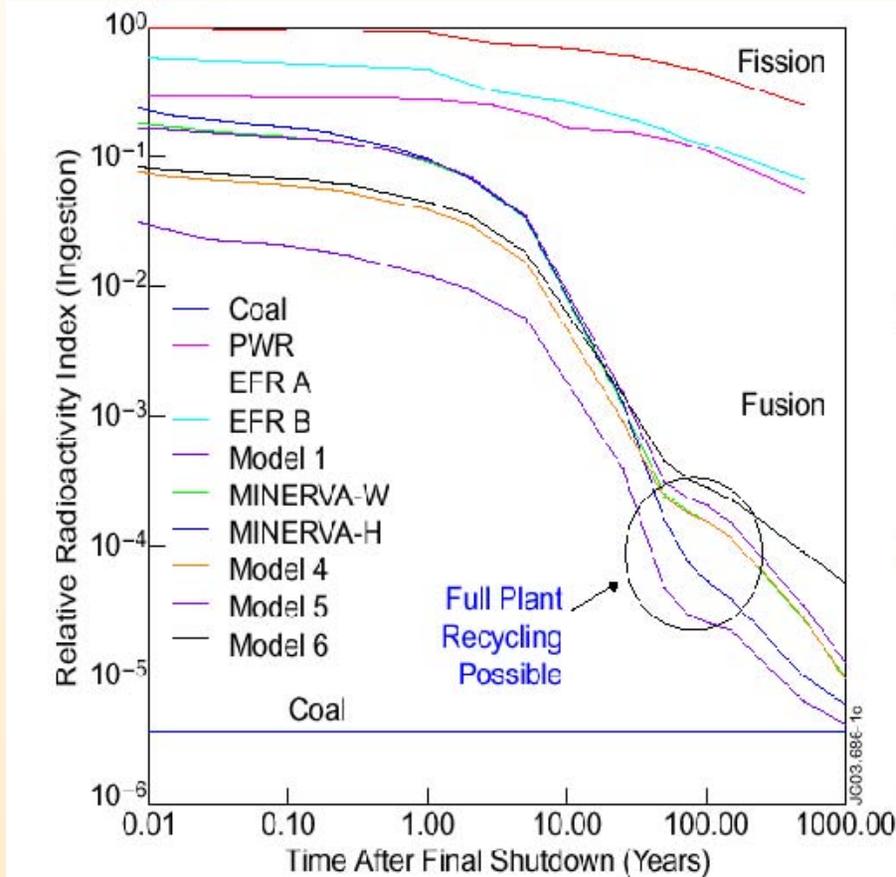


# Quellen

- ITER Physics Basis, Nuclear Fusion 39 (1999) 2137-2638
- PR Material: <http://www.jet.efda.org>, <http://www.iter.org>
- US website: <http://www.fire.pppl.gov>
- Institute: MPI Garching, KFA Jülich, FZK Karlsruhe
- Lehrbücher: Jackson, Cowling, Stacey, Spatschek, Kegel
- Plasmaphysik Konferenzen: ICPP 05/06, EPS meeting 06/06
- Zeitschrift: Plasma Physics and Controlled Fusion

# radioaktiver Abfall

normiert auf 1GW Reaktor

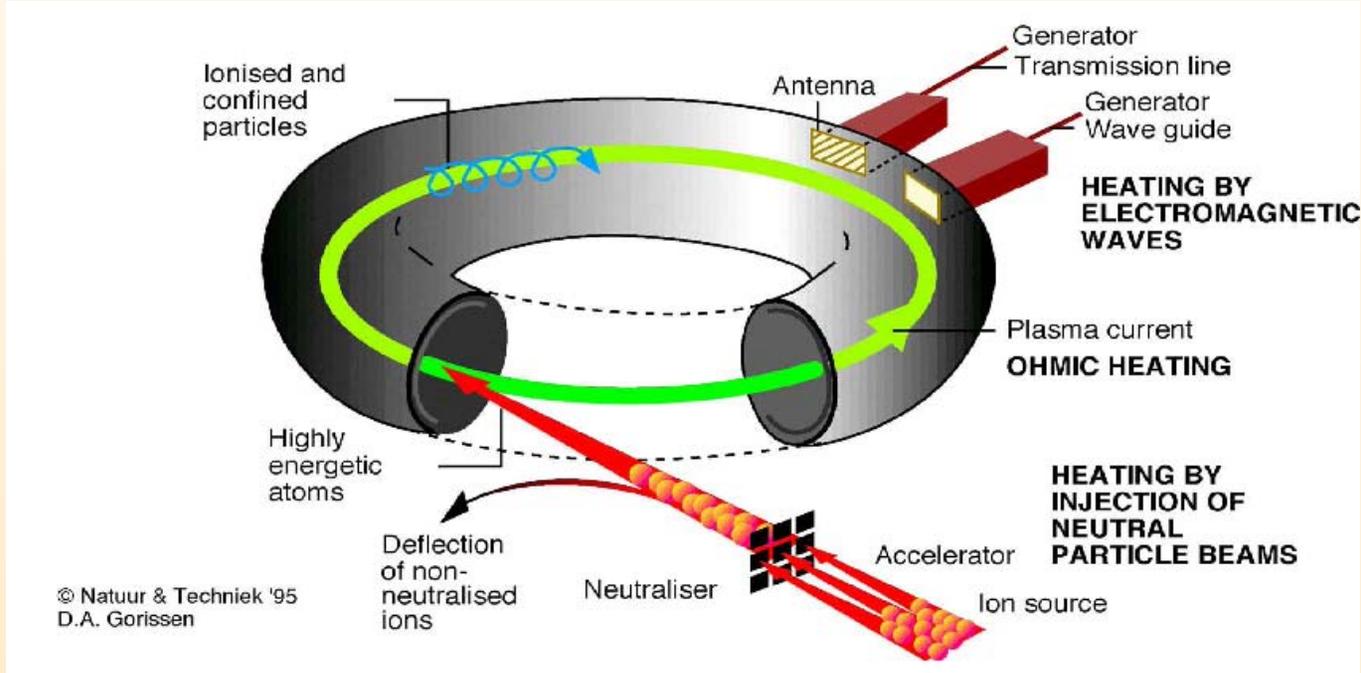


# Heizen

Ohm'sches Heizen:  $\sigma \propto T^{3/2} \Rightarrow$  nur bis ca.  $T \sim 3$  keV

zusätzliche Heizmechanismen

- em Wellen
- injizierter Neutralstrahl



# JET

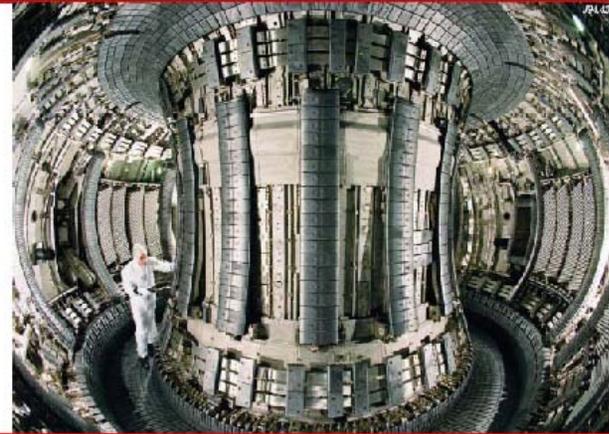
EFDA EUROPEAN FUSION DEVELOPMENT AGREEMENT JET

**JET vessel in 1991**



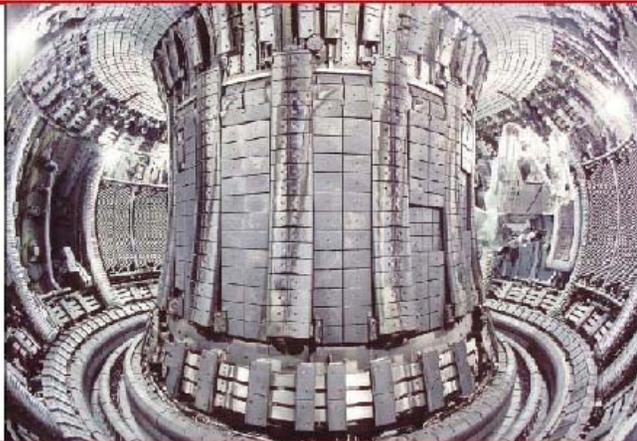
EFDA EUROPEAN FUSION DEVELOPMENT AGREEMENT JET

**JET vessel with Mark I divertor in 1994**



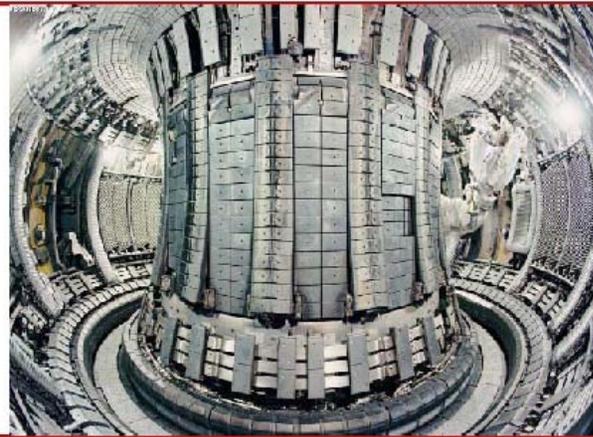
EFDA EUROPEAN FUSION DEVELOPMENT AGREEMENT JET

**JET vessel with Mark IIGB divertor in 1998**



EFDA EUROPEAN FUSION DEVELOPMENT AGREEMENT JET

**JET vessel with Mark IISRP divertor in 2002**



# JET

