



Fusionsforschung

Auf dem Weg zu einer neuen Primärenergiequelle

Robert Wolf

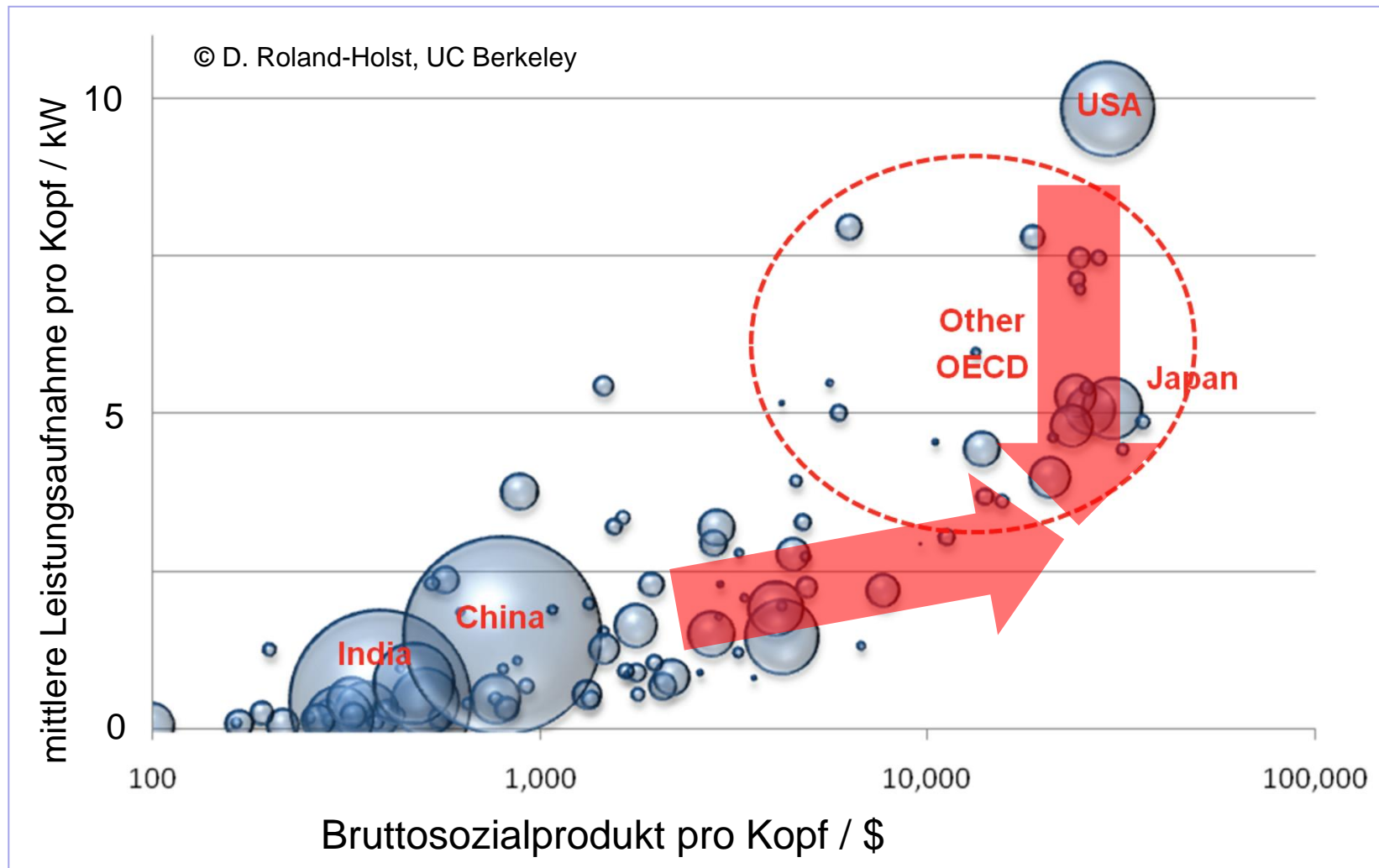
robert.wolf@ipp.mpg.de



Energie

Kernfusion

Fusionsforschung



Ein ambitionierter Zielwert: 3 kW pro Kopf bei 30-40 T\$ BSP pro Kopf

Positive Utopie: Gleiche Perspektiven für alle Regionen der Welt

2100

Anstieg der Weltbevölkerung auf 10 Mrd

Entwicklungsländer etablieren Wohlstand

minimierte Leistungsaufnahme pro Kopf 3 KW

ergibt Primärenergiebedarf mit 30.000 GW Leistung

Annahme von 40% Anteil elektrische Energie

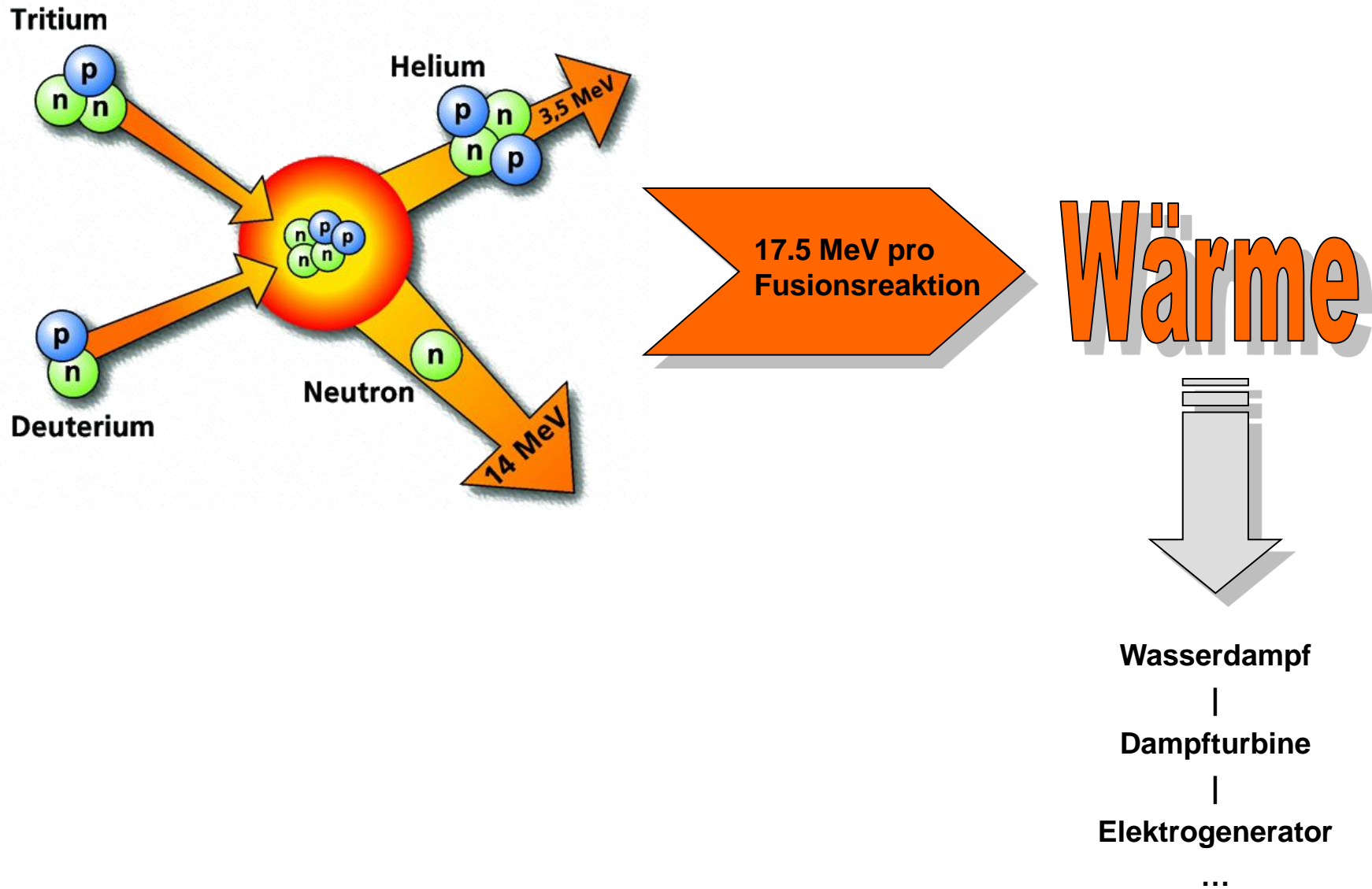
entspricht dem 6-fachen der jetzt installierten Leistung

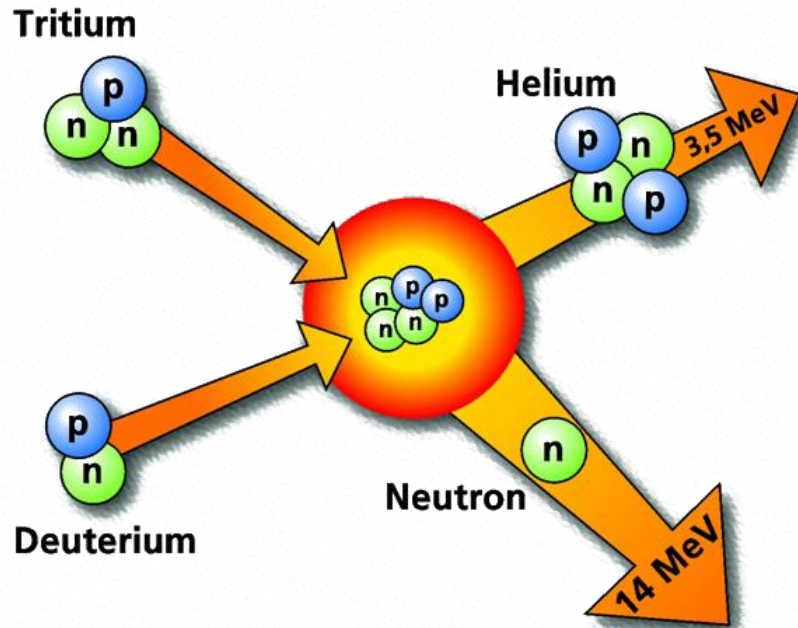


Energie

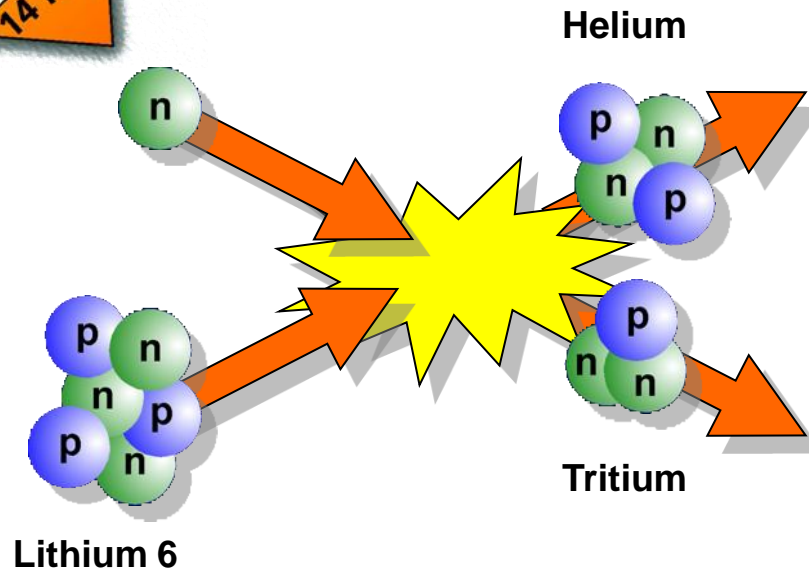
Kernfusion

Fusionsforschung





Tritium muss erbrütet werden



**Eine Badewanne Wasser
Li in einem Akku**



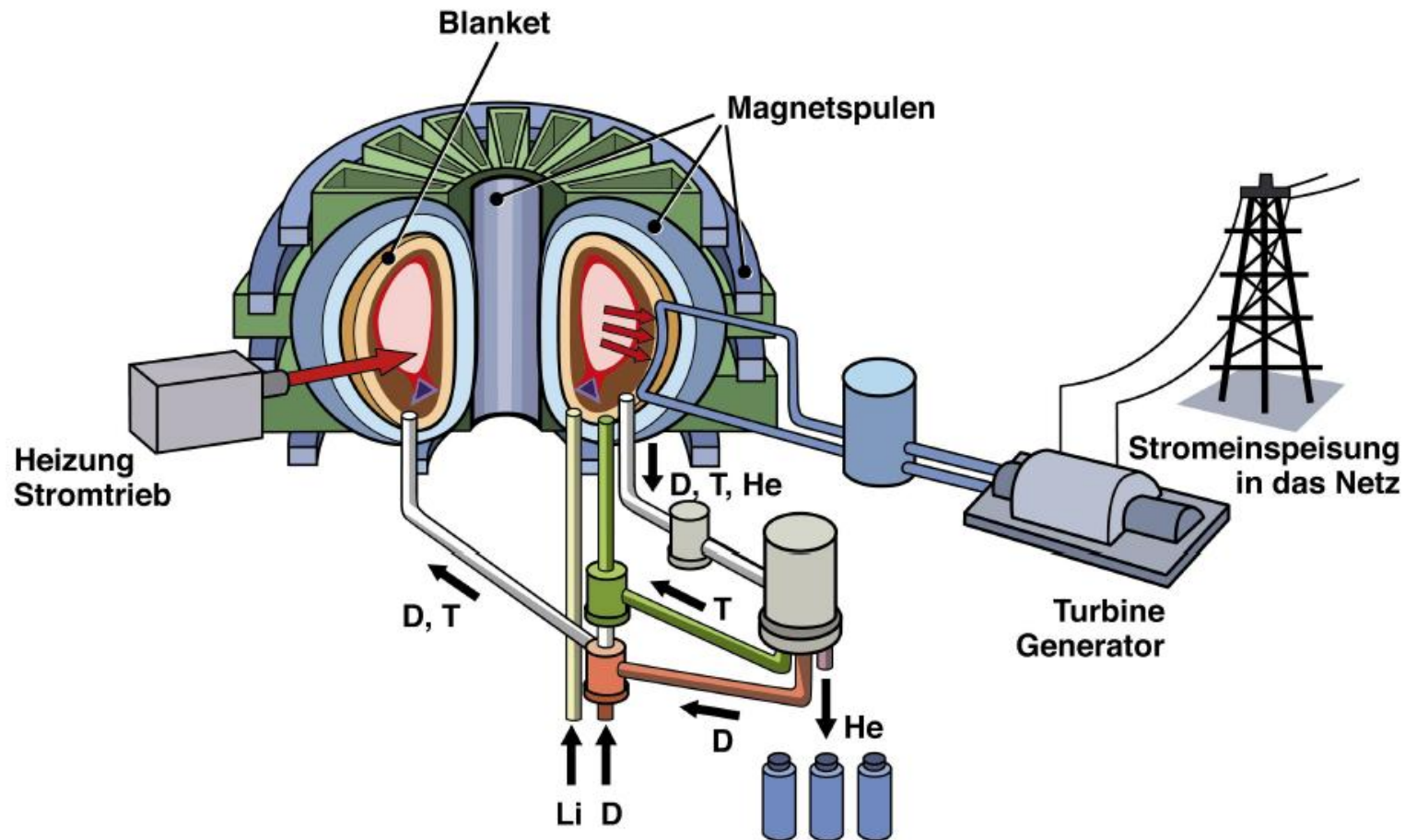
**Energie für 50 Jahre
Versorgung einer
mittleren Familie**



- **Einzig neue Primärenergiequelle**
- **Brennstoff für mindestens 1 Millionen Jahre (Grundlastversorgung ~1 GWe)**
- **Rohstoffe weltweit gleichmäßig verteilt**
- **Keine CO₂ Erzeugung**
- **Keine Kettenreaktion (wie bei Kernspaltung; in den Brennstäben ist die Energie einiger Jahre gespeichert)**
- **Begrenzte Radioaktivität (Neutronen aus der Fusionsreaktion aktivieren Strukturmaterialien)**

Schema eines Fusionsreaktors

- 1/5 der Energie geht in die He-Kerne (α -Teilchen)
→ Aufrechterhaltung der Fusionsreaktion / Wärme
- 4/5 der Energie geht in die Neutronen
→ Erbrüten des Tritiums / Wärme

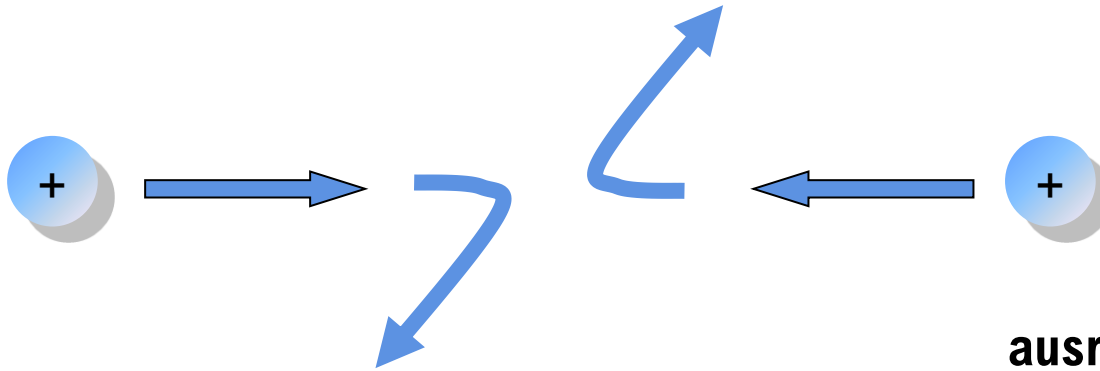




Energie

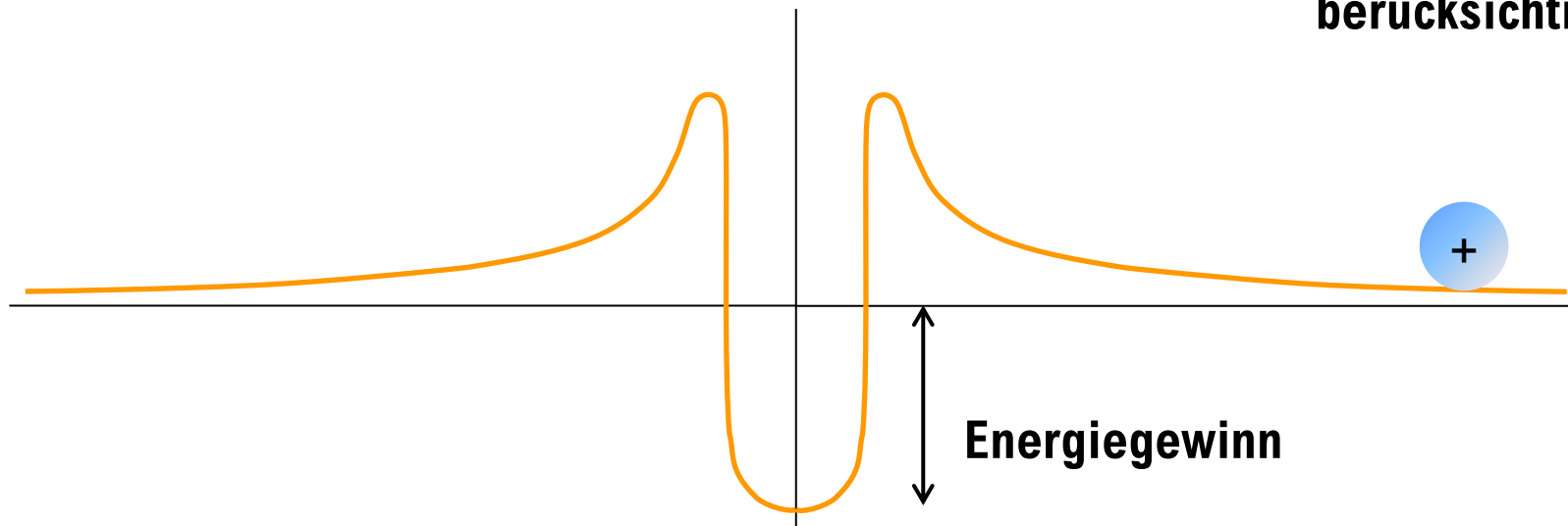
Kernfusion

Fusionsforschung



ausreichend Aktivierungsenergie
 $v \gg 1$ Millionen km/h
das entspricht ~ 100 Millionen $^{\circ}\text{C}$

Quantenmechanischer Tunneleffekt muss
berücksichtigt werden





Hohe Temperatur: 150 Mio °C

Extrem hoher Druck: 10 Mrd. bar

Auf der Erde so nicht möglich !

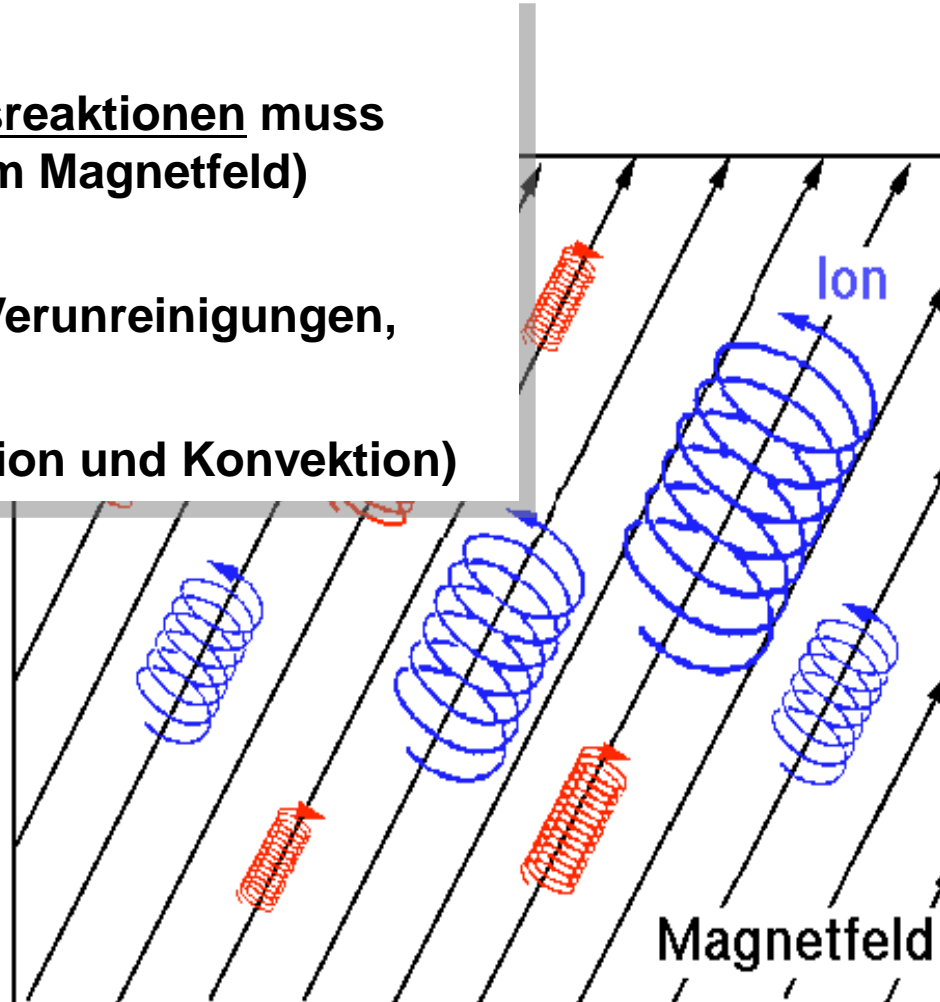
5000 °C

0,1 bar

Zündung

Heizung durch Fusionsreaktionen muss Verluste (senkrecht zum Magnetfeld) kompensieren

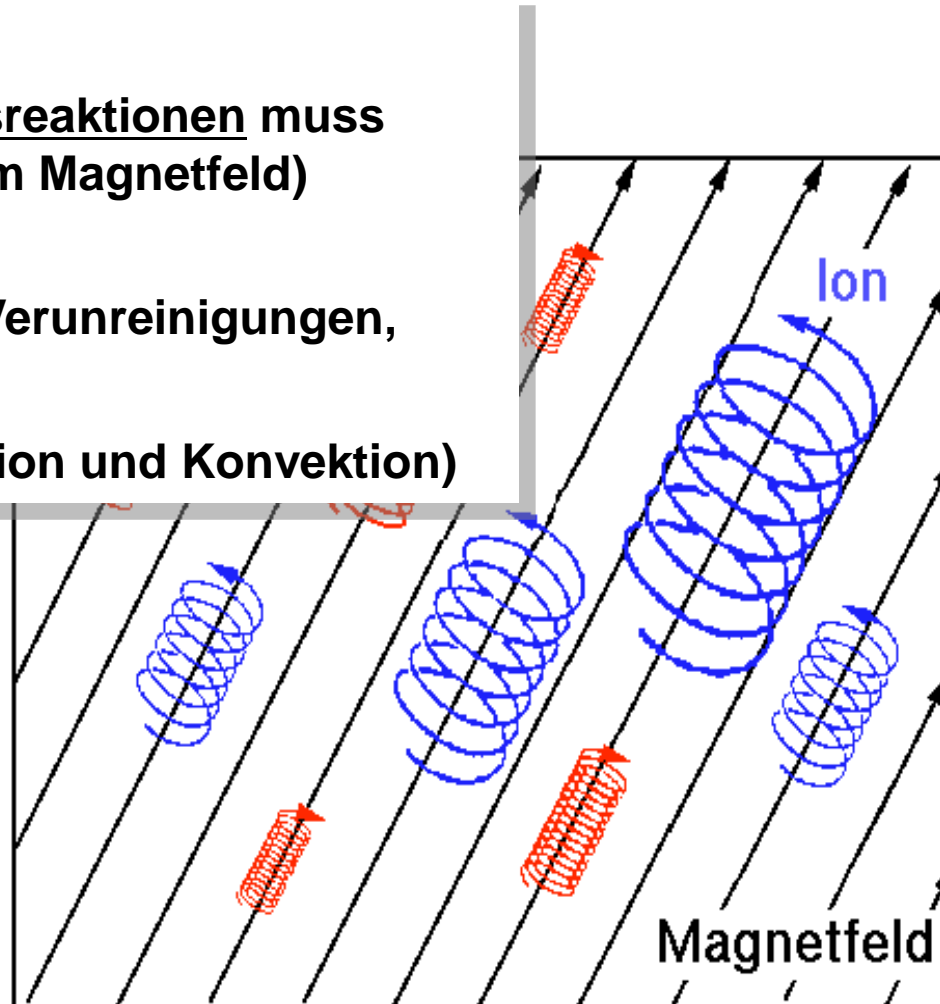
- Strahlungsverluste (Verunreinigungen, Bremsstrahlung, ...)
- Wärmeleitung (Diffusion und Konvektion)

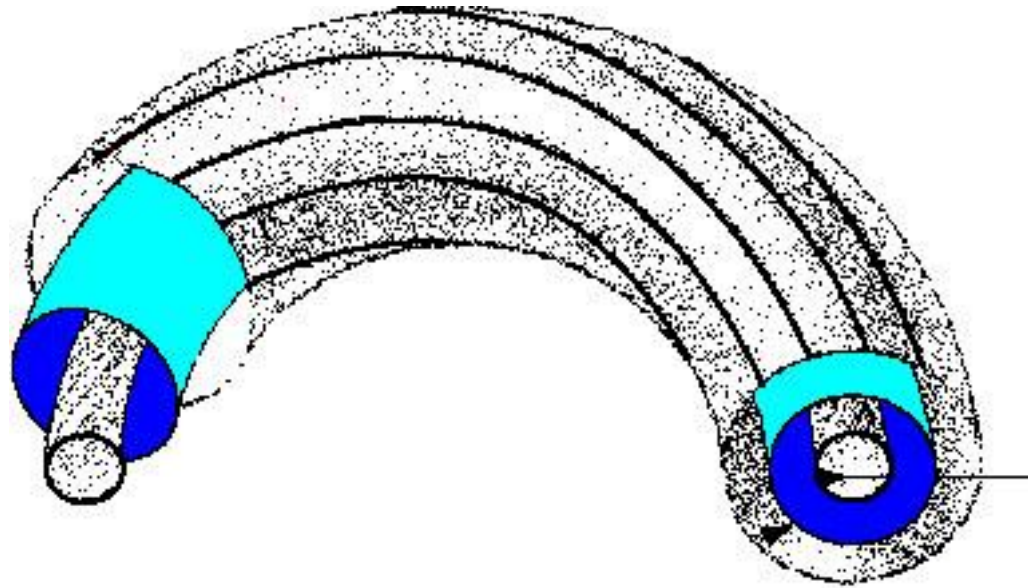


$$Q = P_{\text{Fusion}} / P_{\text{Heizung}} \gg 1$$

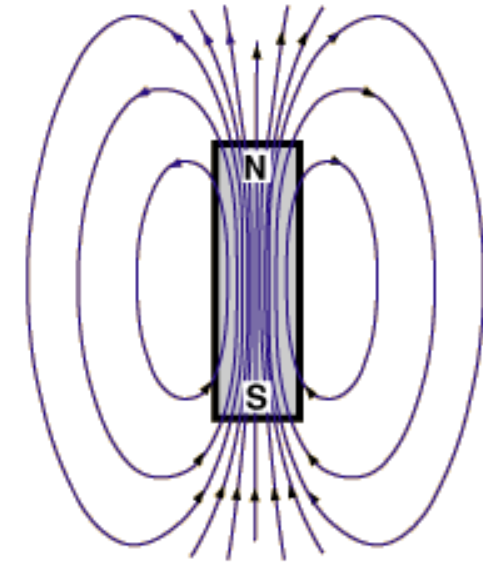
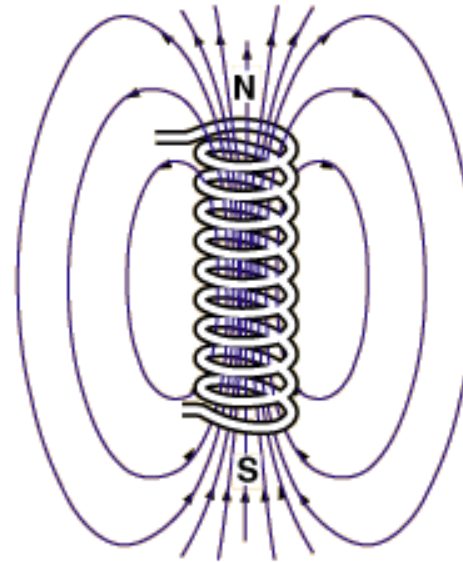
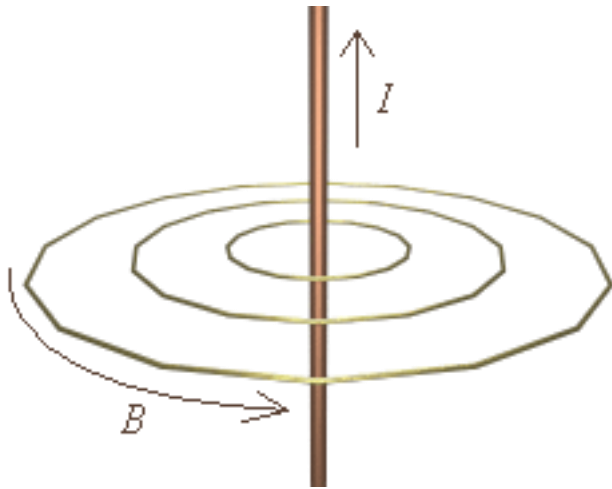
Heizung durch Fusionsreaktionen muss Verluste (senkrecht zum Magnetfeld) kompensieren

- Strahlungsverluste (Verunreinigungen, Bremsstrahlung, ...)
- Wärmeleitung (Diffusion und Konvektion)





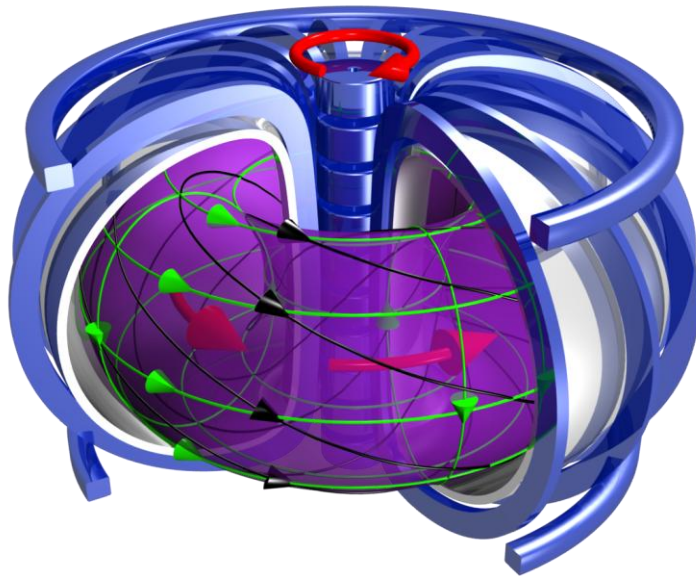
- **Lineare Konfigurationen haben zu viele Endverluste**
- **Aber Einführung eines radialen Magnetfeldgradienten**
→ **Erfordert eine helikale Verschraubung der Magnetfeldlinien**



Supraleitung

- Elektrischer Widerstand = 0
- Verlustfreie Erzeugung von Magnetfeldern
- Erfordert sehr niedrige Temperaturen

Tokamak

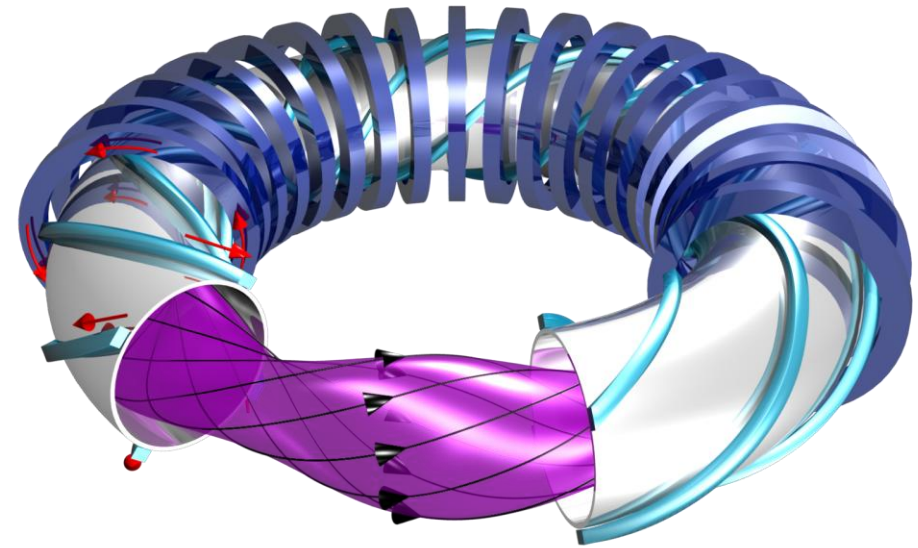


Tokamak (aus dem Russischen von „toroidalnaya kamera magnitnaya katishka“ / toroidale Kammer mit magnetischer Spule)

→ I. Tamm und A. Sakharov

Wesentlicher Teil des Magnetfelds durch elektrischen Strom im Plasma erzeugt

Stellarator (3D)

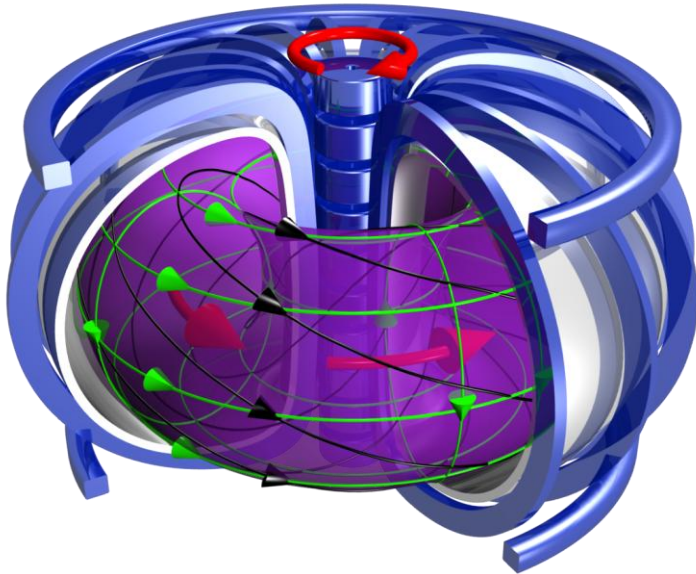


Stellarator (steht für die Nutzbarmachung der Energiequelle der Sterne)

→ L. Spitzer (Princeton Plasma Physics Laboratory)

Magnetfeld im Wesentlichen durch äußere Spulen erzeugt

Tokamak

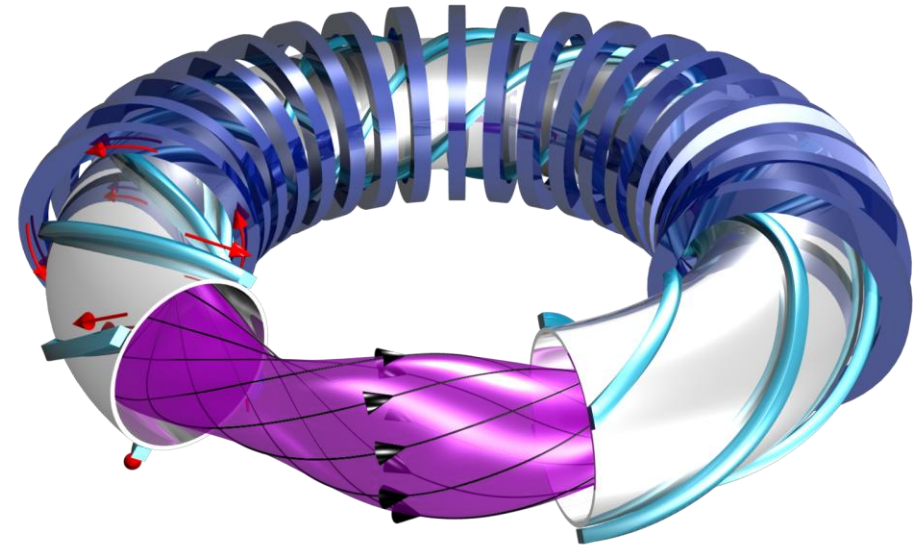


**Weiter entwickelt aber
gepulst**

ITER ist ein Tokamak

**Erstmalig Energieerzeugung
mit Fusion**

Stellarator (3D)



**Günstigere
Eigenschaften für
Kraftwerksbetrieb**

**W7-X ist ein
Stellarator**

Aus Stabilitätsgründen

$$\beta = \frac{p}{B^2/2\mu_0} \leq 5\%$$

Aus technischen Gründen $B \sim 5T$ (Supraleitung, mechanische Kräfte)

$$p \leq 5\text{bar}$$

Zusammen mit optimaler Temperatur (D-T-Reaktion) $\sim 10\text{ keV}$ erhält man

$$n \sim 10^{20}\text{ m}^{-3}$$

Aus der Leistungsbilanz folgt Triple-produkt(D-T-Fusion)

$$nT\tau_E > 3 \cdot 10^{21}\text{ keV m}^{-3}\text{ s}$$

Deshalb

$$\tau_E > 3\text{ s}$$

$$Q = P_{\text{Fusion}}/P_{\text{Heizung}} \sim 30$$

$$\text{und } \tau_E \sim 3\text{ s}$$

$$P_{\text{thermisch}} = P_{\text{Fusion}} \sim 3\text{ GW}$$

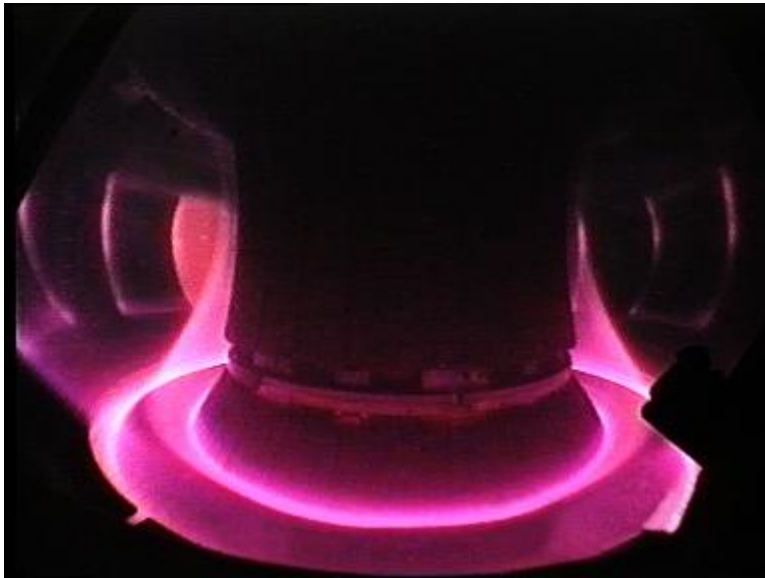
$$P_{\text{elektrisch}} \sim 1\text{ GW}$$

Deuterium-Tritium Plasma

10^{14} cm^{-3}

100 Millionen °C (100 MK)

2 bar



Wasser

10^{22} cm^{-3}

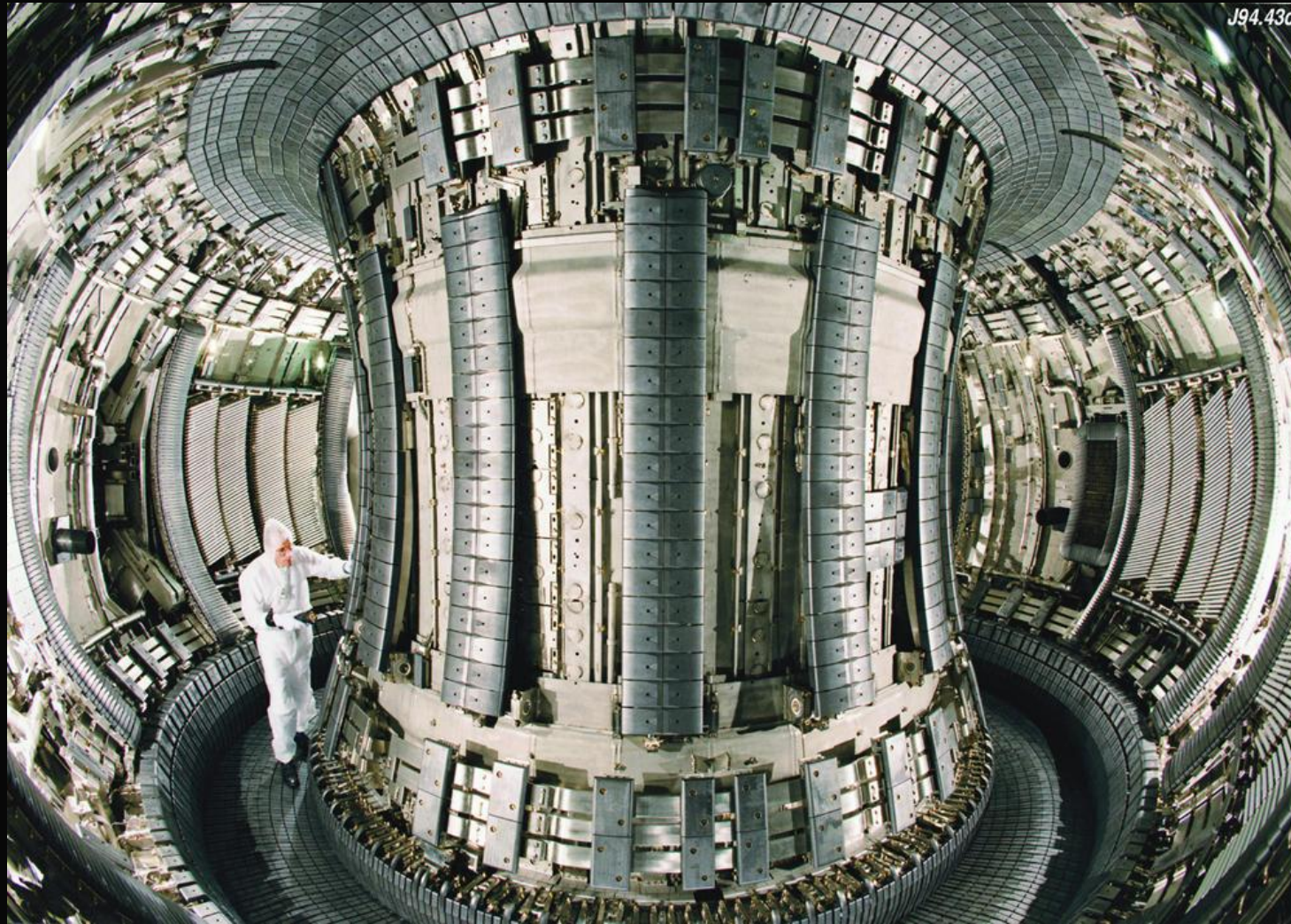
20 °C (300 K)

1 bar

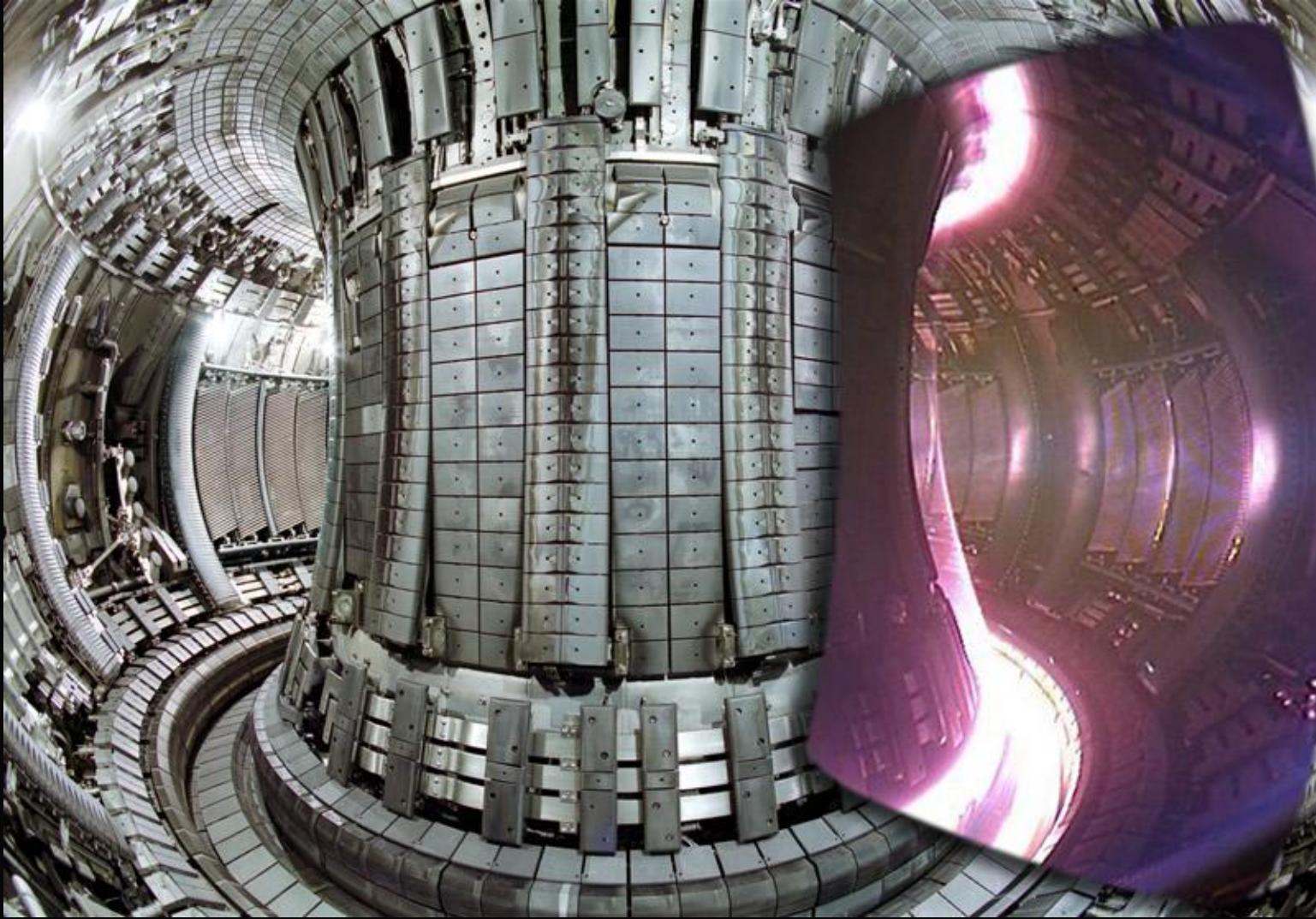


- **Entdeckung eines geeigneten Einschlusskonzepts: Tokamak (1968) und H-Mode (1984) bilden die Basis für das ITER-Design**
- **Mehr als 100 Mio. Grad (15 keV) in Tokamaks**
- **Deuterium-Tritium-Betrieb in JET mit 16 MW Fusionsleistung (1997)**
- **Entwicklung der Stellarator-Optimierung und Bau von W7-X (1996)**
- **Große Fortschritte bei Fusionstechnologie, z.B.**
 - **Plasmaheizung: Stationäre 1 MW Mikrowellenröhren**
 - **Supraleitende Magnete aus Nb₃Sn für höhere Magnetfelder**
- **Ablösung von Kohlenstoff als Wandmaterial durch Wolfram (2007 erstmals volle W-Auskleidung in AUG, seit 2011 in JET, Wolfram wird in ITER eingesetzt)**
- **Zunehmendes theoretisches Verständnis der Grundlagen des Plasmaeinschlusses ermöglicht immer bessere Vorhersagen (geht Hand in Hand mit Fortschritten im High Performance Computing)**

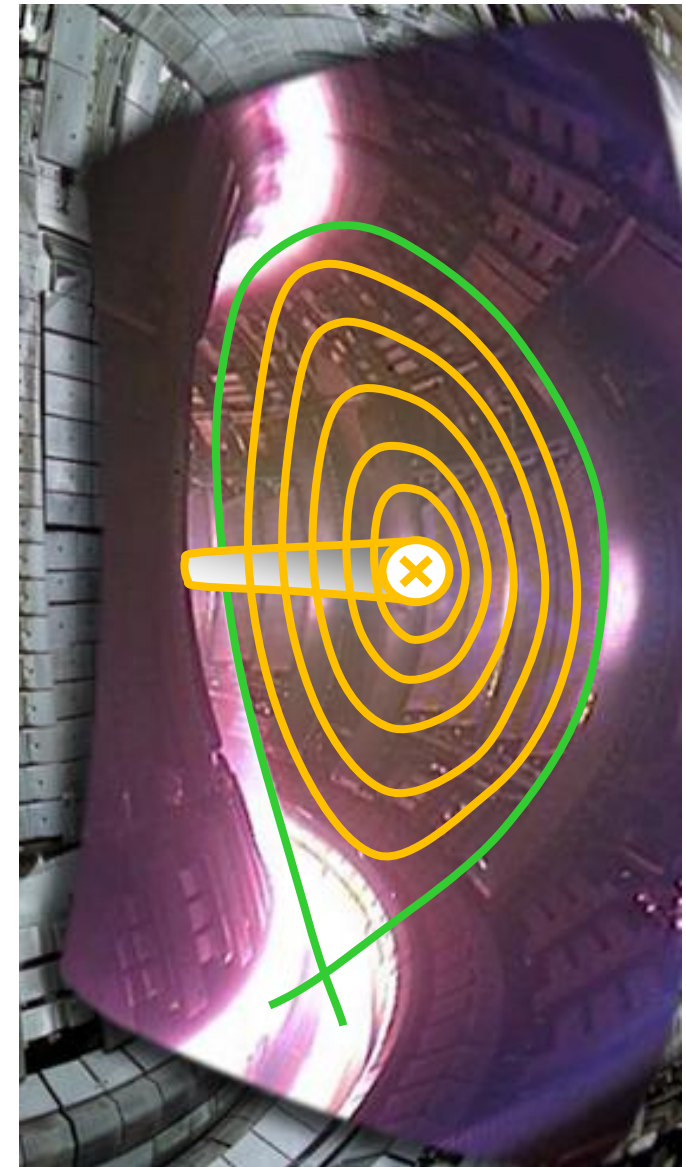
Tokamak von innen (JET)



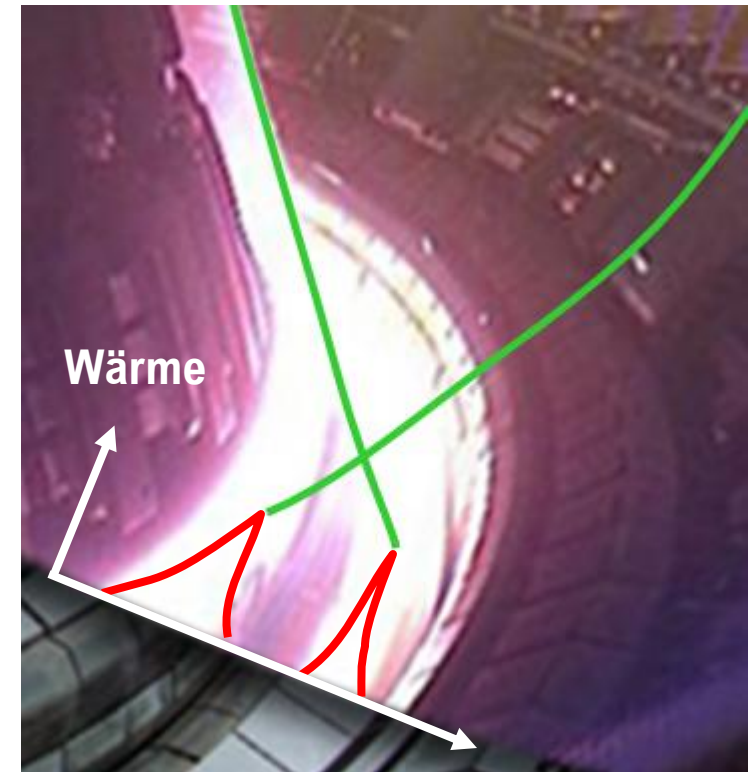
... mit Plasma



- Gleichgewicht zwischen erzeugter / zugeführter Energie
- Wärmequellen: Externe Heizung & Fusionsheizung (α -Teilchen)
- Wärmesenken
 - Geschlossene Magnetfeldlinien
 - Diffusion und Konvektion senkrecht zum Magnetfeld
 - Strahlung
 - Offene Magnetfeldlinien
 - Wärmeleitung parallel zu Magnetfeld ($\chi_{\parallel} / \chi_{\perp} \sim 10^{10}$)
 - Diffusion und Konvektion senkrecht zum Magnetfeld
 - Strahlung



- **Typische Wärmeflüsse**
 - Fusion $\sim 10.000 \text{ kW/m}^2$
 - Fossil, Kernspaltung $\sim 500 \text{ kW/m}^2$
 - Solar $< 1,4 \text{ kW/m}^2$ (Durchschnitt in Deutschland $0,1 \text{ kW/m}^2$)
 - Geothermie $\sim 10^{-4} \text{ kW/m}^2$
- **Begrenzung der lokalen Wärmeflüsse durch Erhöhung der abgestrahlten Leistung**
 - Gleichmäßige Verteilung auf Oberflächen im Plasmagefäß
 - Gezielte Zuführung von Verunreinigungen

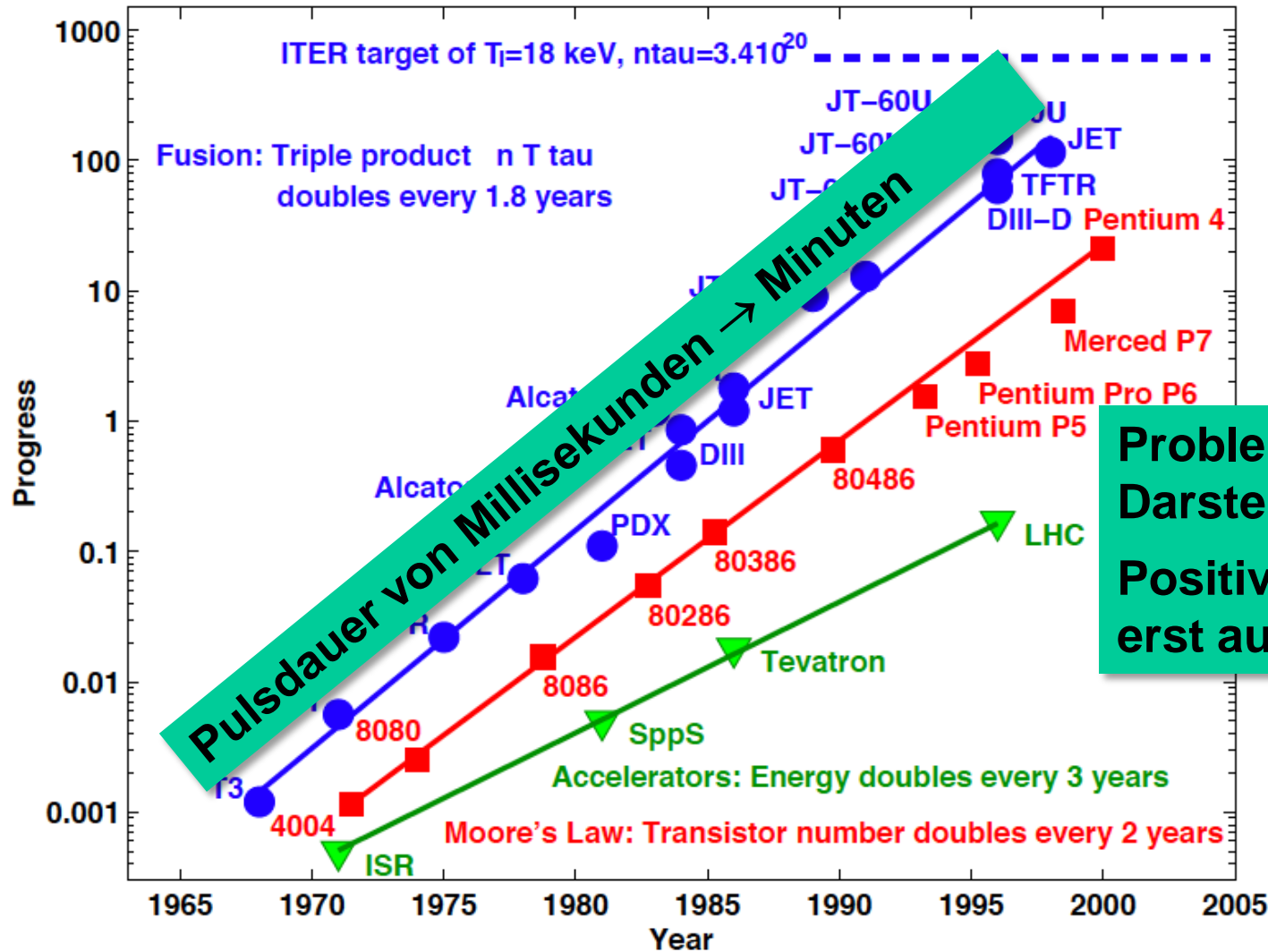


- **Typische Wärmeflüsse**
 - Fusion $\sim 10.000 \text{ kW/m}^2$
 - Fossil, Kernspaltung $\sim 500 \text{ kW/m}^2$
 - Solar $< 1,4 \text{ kW/m}^2$ (Durchschnitt in Deutschland $0,1 \text{ kW/m}^2$)
 - Geothermie $\sim 10^{-4} \text{ kW/m}^2$
- **Begrenzung der lokalen Wärmeflüsse durch Erhöhung der abgestrahlten Leistung**
 - Gezielte Zuführung von Verunreinigungen
 - Gleichmäßige Verteilung auf Oberflächen im Plasmagefäß



Durch Zuführung von Argon Begrenzung
der Leistungsflüsse auf 5 MW/m^2 trotz
 $P = 23 \text{ MW}$ ($P/R = 14 \text{ MW/m}$)

Rapid progress in different high technology fields



ITER

**Problematik für öffentliche Darstellung:
Positive Leistungsbilanz erst auf Kraftwerksskala**

Maß für Erfolg ($nT\tau_E$) verdoppelt sich alle 1.8 Jahre

- **ITER**
 - **Erstes brennendes Fusionsplasma / positive Leistungsbilanz ($Q = 10$)**
- **Wendelstein 7-X**
 - **Intrinsisch stationäres Konzept**
- **Supraleitende Tokamaks in Südkorea, China, Indien**
- **Großer supraleitender Tokamak (JT60-SA) in Japan mit Unterstützung der EU**
 - **Weiterentwicklung des stationären Tokamakbetriebs**
- **Materialtestanlage (IFMIF)**
 - **Bestrahlung von Materialien mit Neutronen für Reaktorentwicklung**

- **ITER**

- **Erstes brennendes Fusionsplasma / positive Leistungsbilanz ($Q = 10$)**

- **Wendelstein 7-X**

- **Intrinsisch stationäres Konzept**

- **Supraleitende Tokamaks in Südkorea, China, Indien**

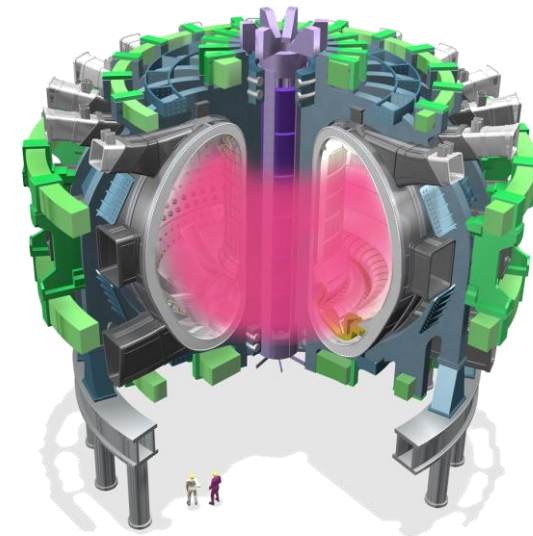
- **Großer supraleitender Tokamak (JT60-SA) in Japan mit Unterstützung der EU**

- **Weiterentwicklung des stationären Tokamakbetriebs**

- **Materialtestanlage (IFMIF)**

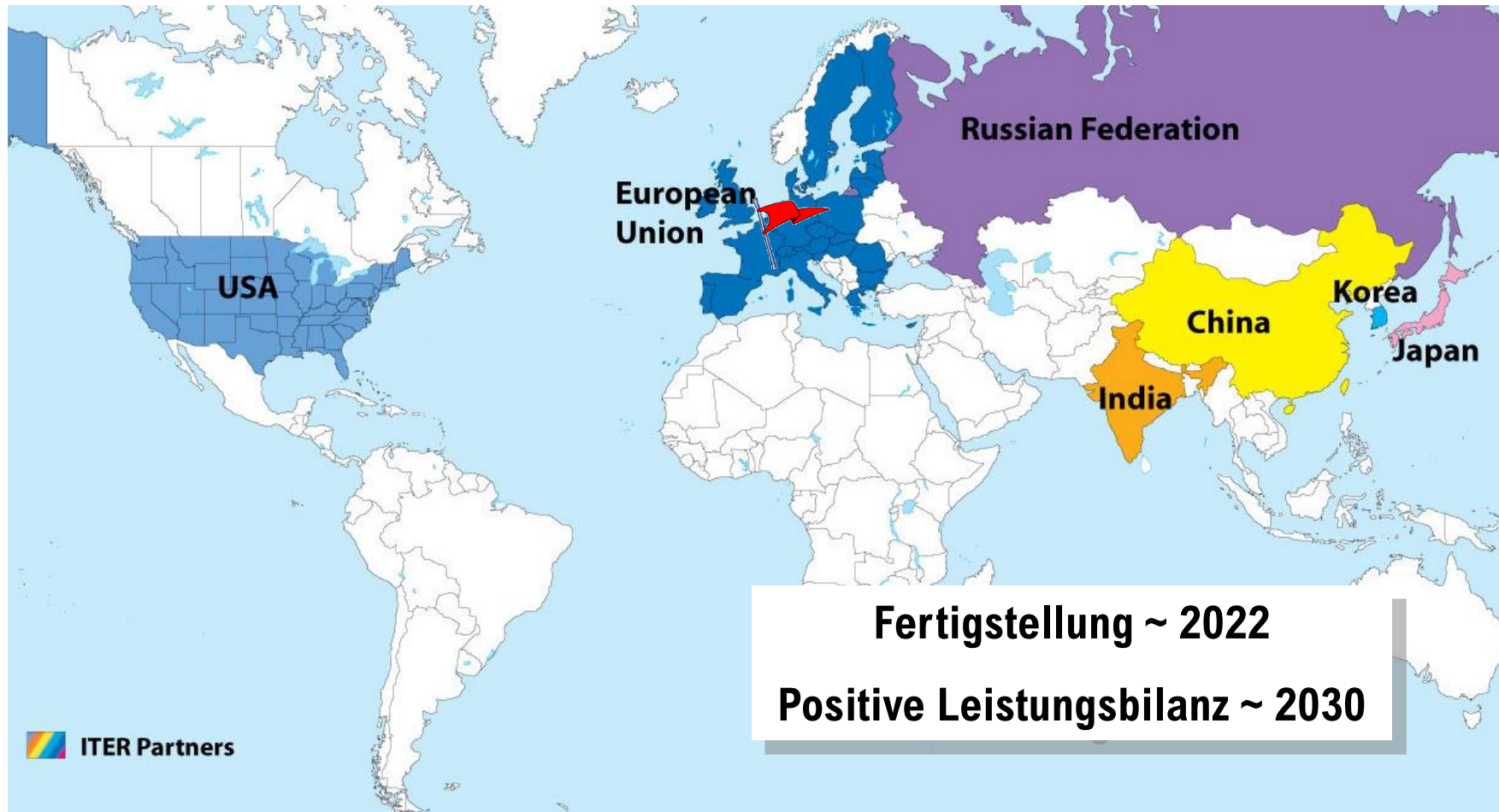
- **Bestrahlung von Materialien mit Neutronen für Reaktorentwicklung**

Größtes Fusionsexperiment weltweit
Wird derzeit in Cadarache, Südfrankreich gebaut
500 MW Fusionsleistung
(bei 50 MW zugeführter Leistung)
Bauzeit ~ 10 Jahre
Kosten ~ 15 Milliarden €
($\frac{1}{2}$ von EU und Frankreich)

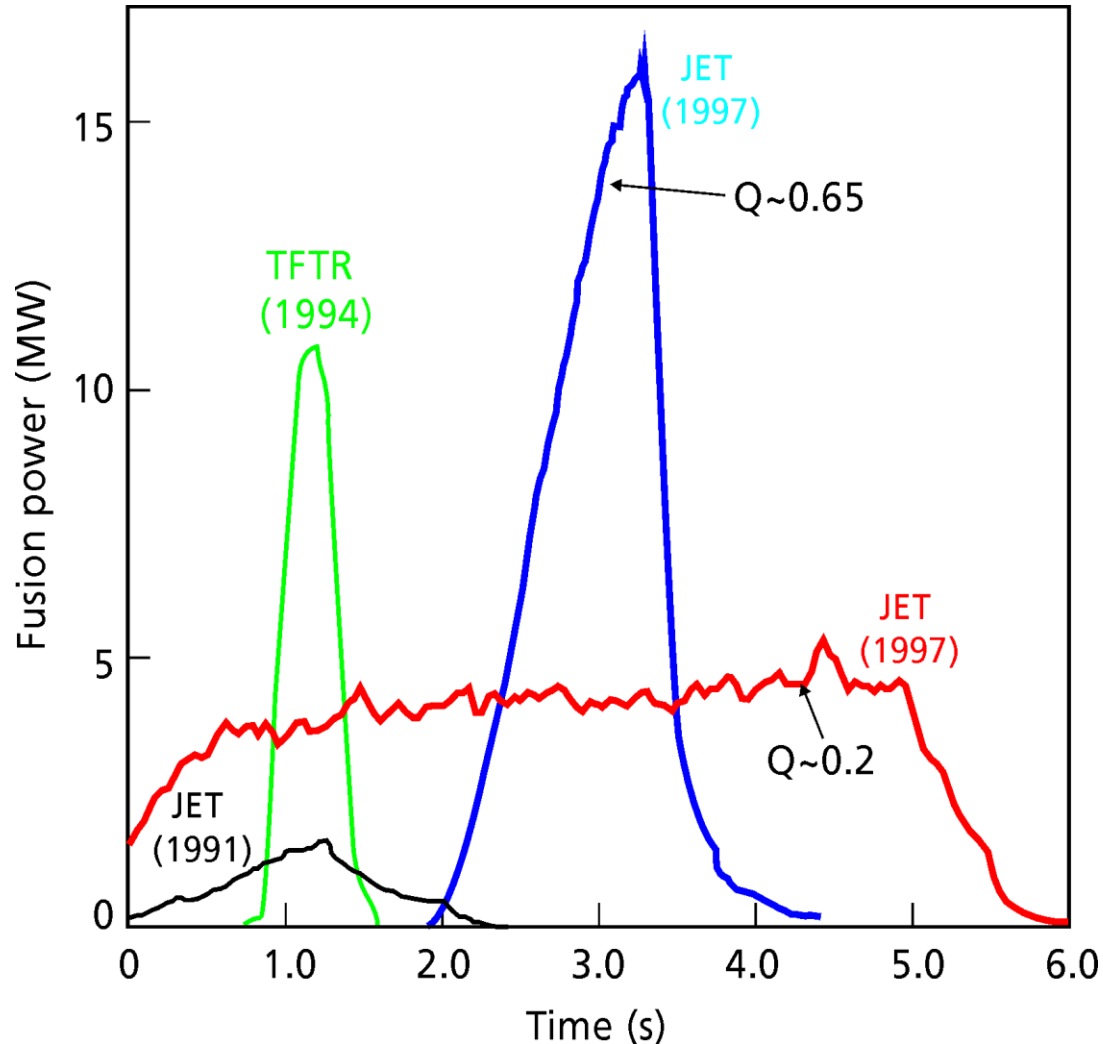


ITER-Partner repräsentieren mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung und mehr als 80% des weltweiten Bruttosozialprodukts

Eines der größten und komplexesten wissenschaftlichen Experimente!



- **Erstmalig brennendes Fusionsplasma ($Q = 10$) mit positiver Leistungsbilanz**
- **Großteil der Plasmaheizung stammt von α -Teilchen aus der Fusionsreaktion**
- **10 Minuten brennendes Plasma bei $Q = 10$**
- **Stationär bei $Q = 5$**
- **Physikalische und viele technologische Grundlagen für ein Fusionskraftwerk (z.B. Testblanketmodule)**



Gibson *et al.*
Phys. Plasmas 5 (1998) 1839

JET – $Q = 0,65$

- $P_{\text{Heizung}} = 25 \text{ MW}$
- $P_{\text{Fusion}} = 16 \text{ MW}$
- $P_{\alpha} = 3 \text{ MW}$

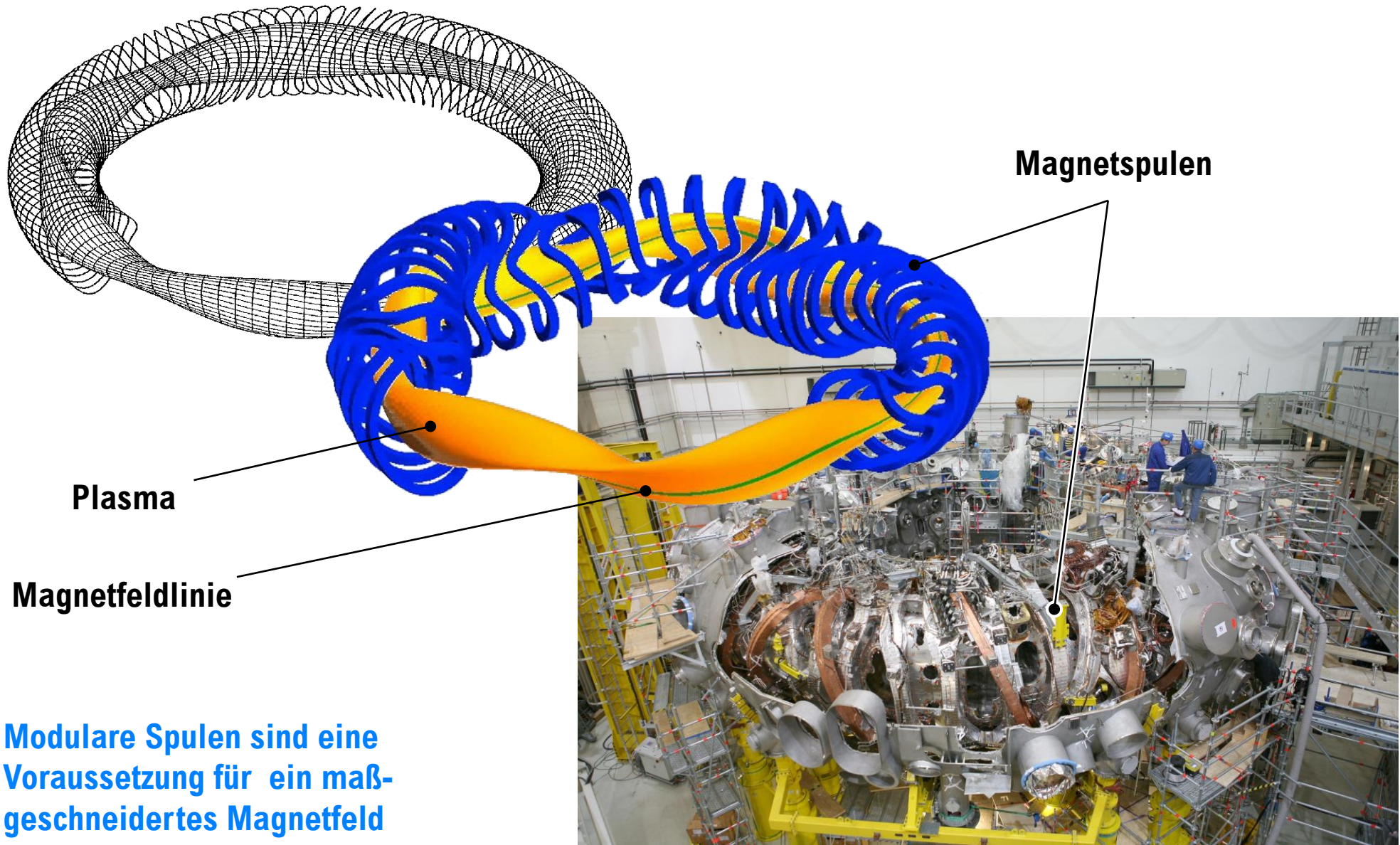
ITER – $Q = 10$

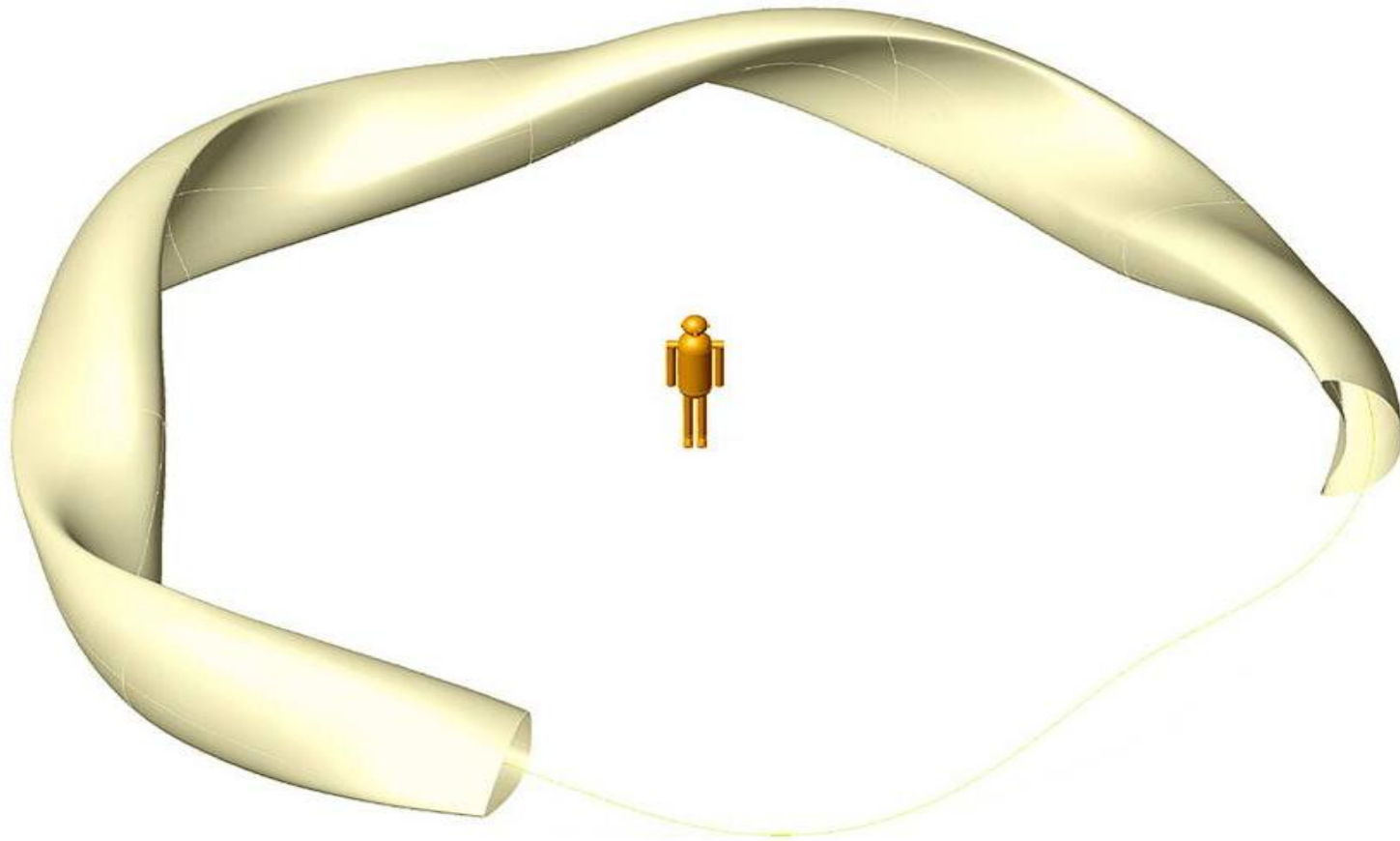
- $P_{\text{Heizung}} = 50 \text{ MW}$
- $P_{\text{Fusion}} = 500 \text{ MW}$
- $P_{\alpha} = 100 \text{ MW}$

Anforderung

- Einschluss des thermischen Plasmas (10 keV, 100 Mio. °C)
- Einschluss der α -Teilchen aus der Fusionsreaktion (3,5 MeV)

- **Vorteil Stellarator**
 - Anders als der Tokamak intrinsisch stationär
- **Nachteil Stellarator**
 - 3D erfordert für aufwändige Optimierung für grundsätzliche Einschlusseigenschaften
 - **Einschluss des thermischen Plasmas**
 - **Einschluss der schnellen Ionen**
- **Weiteres Kriterium für W7-X**
 - **Minimierung der Plasmaströme**
 - **Magnetfeldkonfiguration weitgehend unabhängig vom Plasma**
 - **Voraussetzung für Magnetfeldkonfiguration am Plasmarand (Inseldivertor), notwendig für kontrollierte Teilchen- und Wärmeabfuhr**



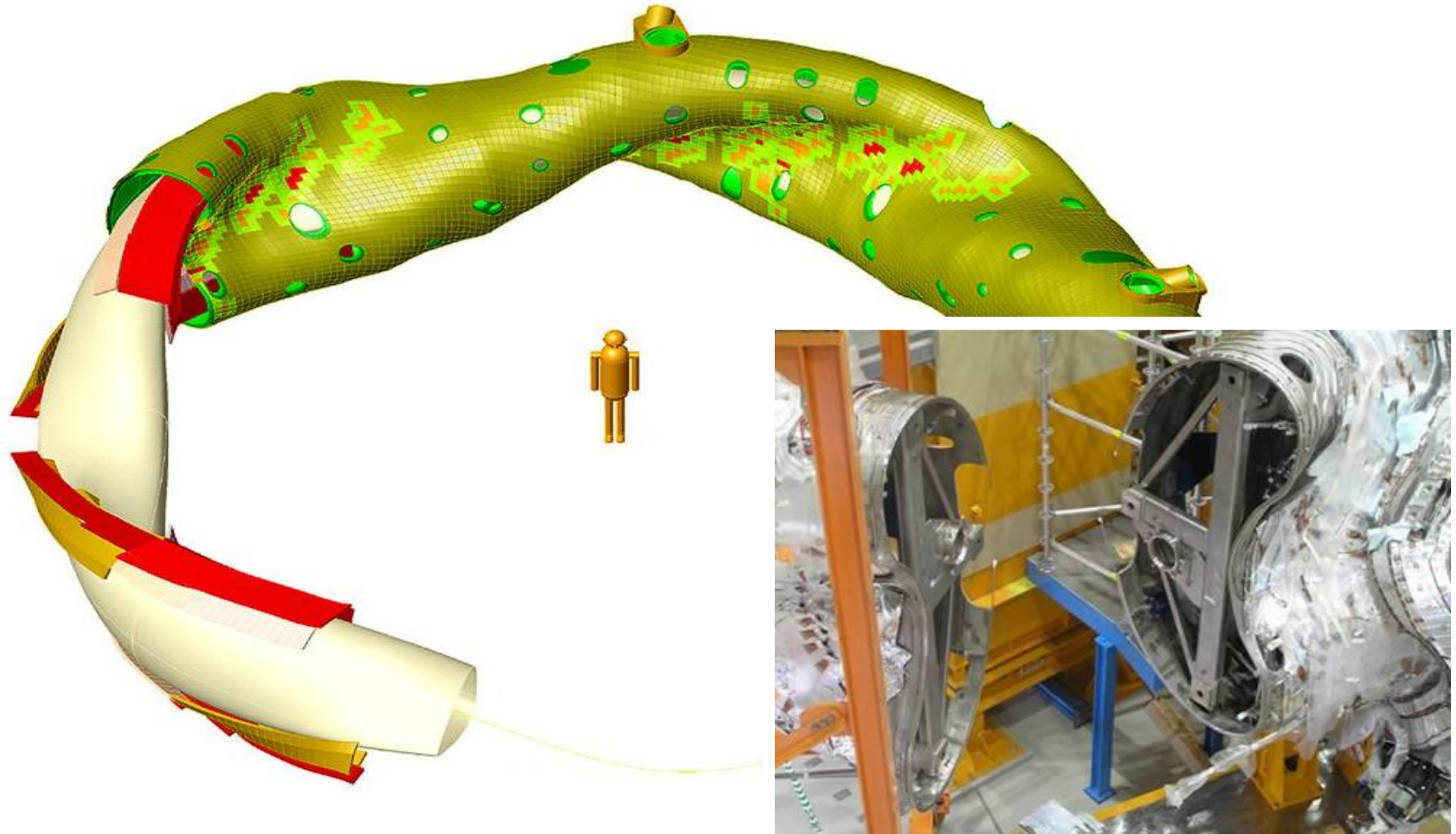




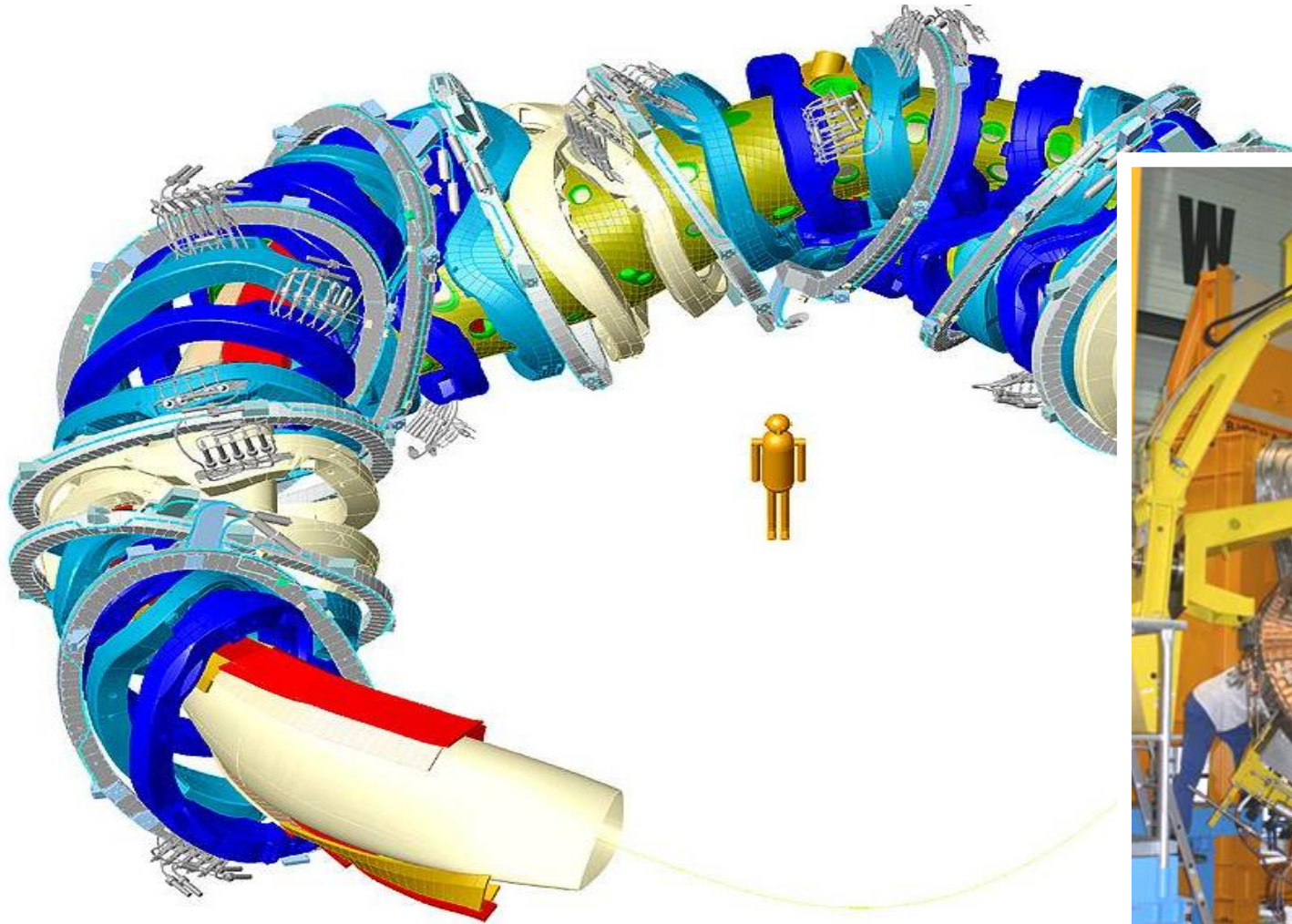
Aktive gekühlte Targetelemente: 10 MW/m²

Zum Vergleich heutige konventionelle Kraftwerke: ~ 0,5 MW/m²

–Vakuum $\sim 10^{-6}$ mbar

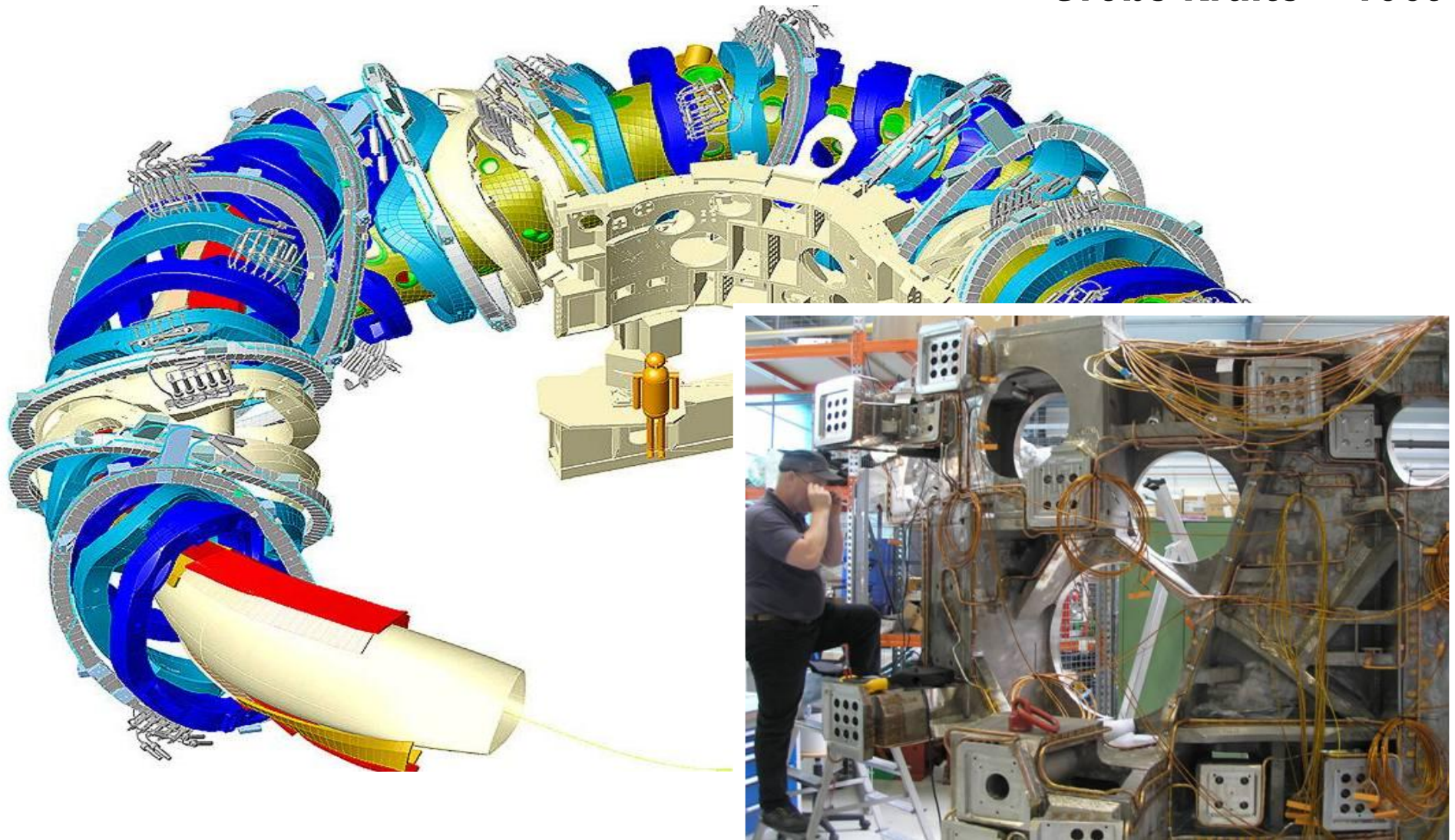


–Magnetfeld ~ 3T



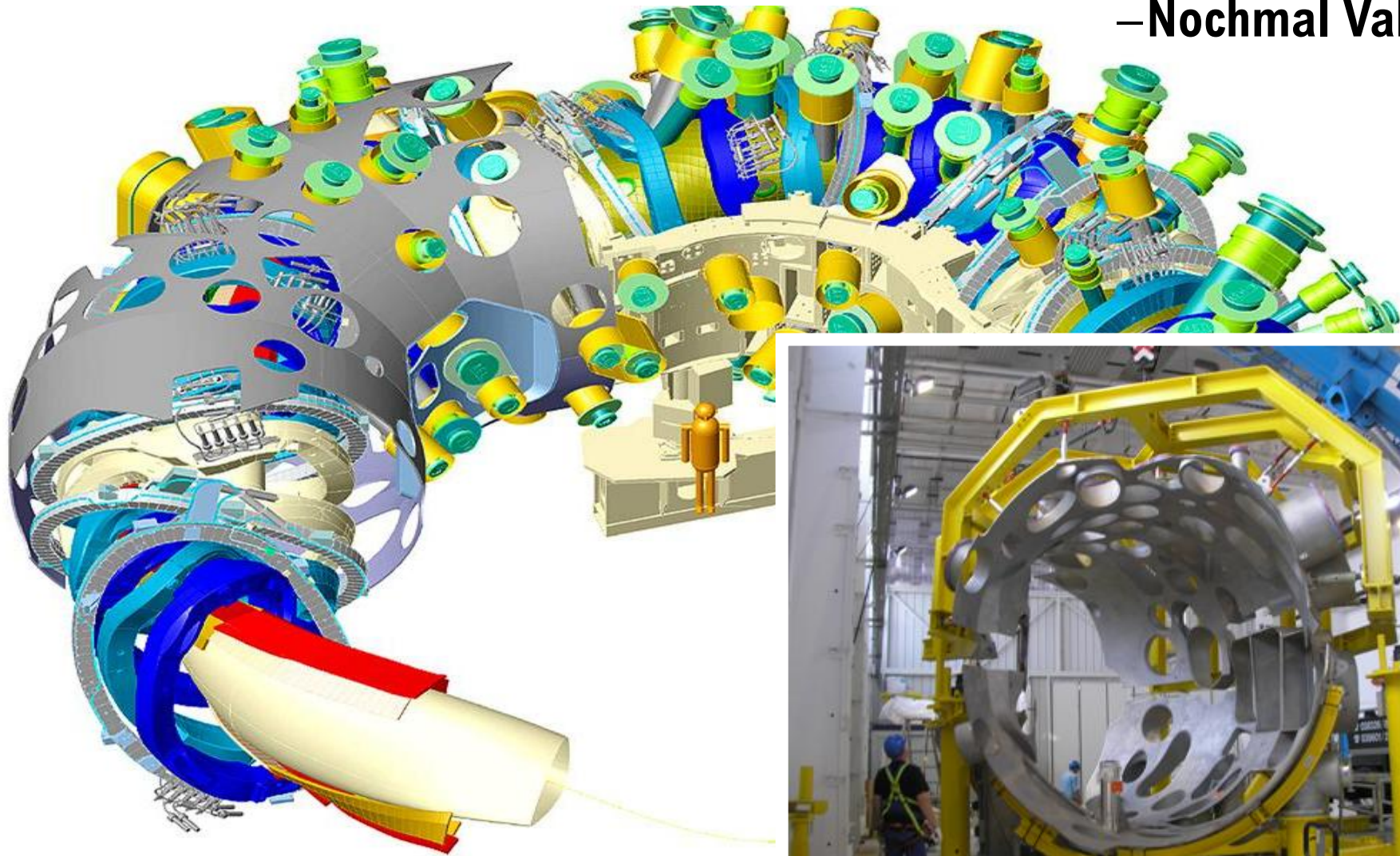
–Hohe Präzision ~ mm

–Große Kräfte ~ 100t



–Kryogene Temperaturen $\sim 3\text{K}$ bzw. $-270\text{ }^\circ\text{C}$

–Nochmal Vakuum



Größtes Stellaratorexperiment seiner Art

Wird derzeit in Greifswald gebaut

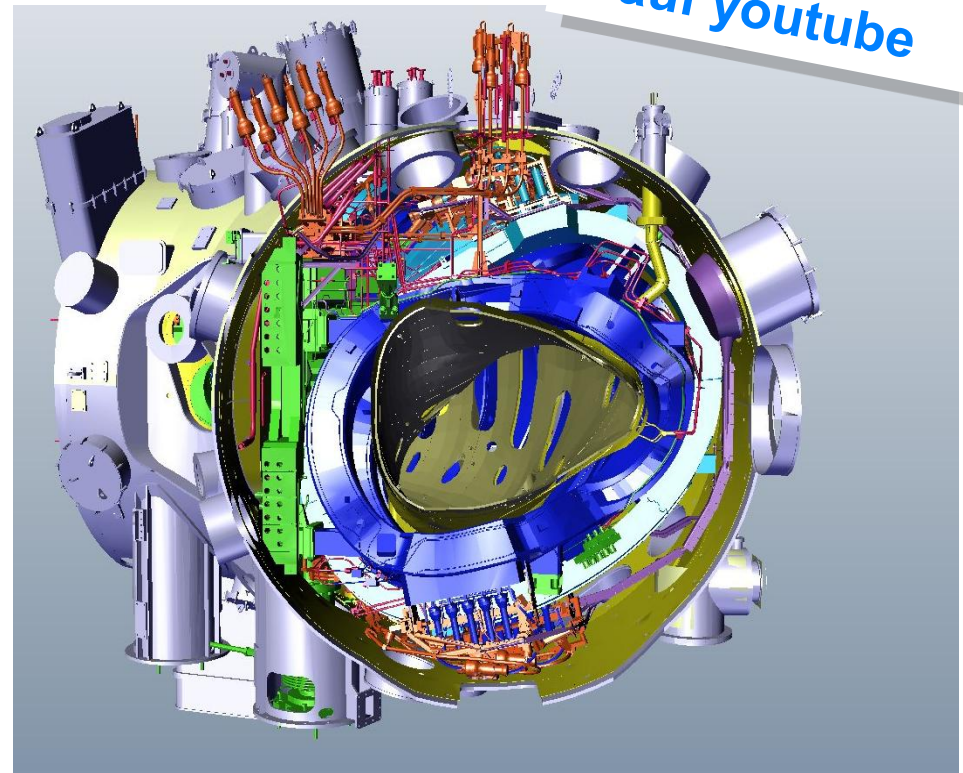
Kraftwerksrelevante Plasmen werden durch Zuführung von Heizleistung von außen erzeugt (keine Fusionsleistung) – 30 Min. / 10 MW

Technische Inbetriebnahme 2014

Erstes Plasma 2015

**Kosten ~ 1 Milliarden €
(Investitionen 370 Mio. € bis 2014;
90% Bund, 10% Land, bis zu 40% EU)**

**Zeitrafferfilm
auf youtube**



	AUG	JET	W7-X	ITER	Tokamak DEMO	Stellarator DEMO
$nT\tau$ (10^{20}m^{-3} keV s)	1	1 – 10	1	60	100	100
Fast ion confinement	confirmed	confirmed	to be confirmed	essential	essential	essential
Burning plasma Q	–	0,65	–	10	50	50
Fusion power / MW	–	16	–	500	2000 - 4000	3000
P/R (MW/m)	19,4	13,3	3,6	19,4	50 – 70	27 – 33
Steady state operation	< 10s	< 60s	1800 s	400 s	> 8 hrs	steady state
Magnetic field Superconductor	3 T –	3 T –	3 T yes	6 T yes	6 – 8 T yes	5 – 6 T yes
Neutron load	–	–	–	< 2 dpa	up to 150 dpa	up to 150 dpa
Blanket	–	–	–	test blanket ~ 0.025 g / d	breeding blanket ~ 550 g / d	breeding blanket ~ 550 g / d
Stationary cooling	–	–	10 MW/m ²	10 MW/m ²	< 10 MW/m ²	< 10 MW/m ²
Remote handling	–	tests	–	essential	essential	essential

- Die Fusionsforschung hat in den zurückliegenden enorme Fortschritte gemacht (Physik und Technologie)
- In **ITER** soll erstmalig ein brennendes Fusionsplasma mit einer **positiven Leistungsbilanz** erzeugt werden werden ($Q = 10$ über 10 Minuten)
- ITER soll die physikalischen und in vielen Bereichen technischen Grundlagen für ein Fusionskraftwerk liefern
- Das Ziel von **Wendelstein 7-X** ist, ein Konzept für eine **stationär arbeitendes Kraftwerk** zu testen
- Bis **2030** – Brennendes Fusionsplasma in ITER / stationärer Hochleistungsbetrieb in Wendelstein 7-X
- Für den Bau eines ersten Demonstrationkraftwerks ist die Entwicklung und Qualifizierung **niedrig aktivierbarer und neutronenresistenter Materialien** essentiell