



HELMHOLTZ
GEMEINSCHAFT



Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik



Standort Greifswald



Der Weg zu einem Fusionskraftwerk

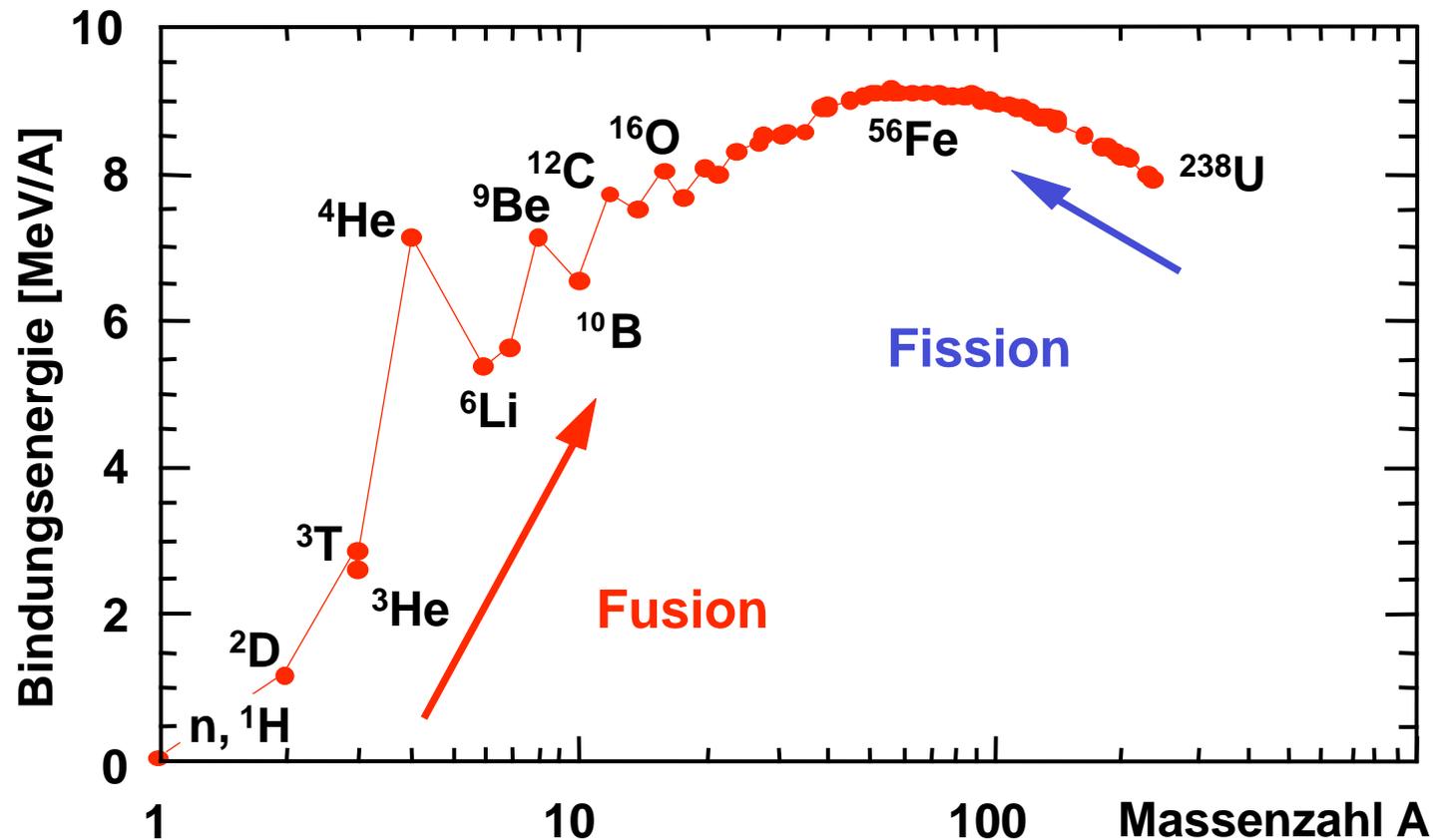
Standort Garching



G. Hasinger
Physikalisches Kolloquium
Universität Heidelberg
4. Dezember 2009

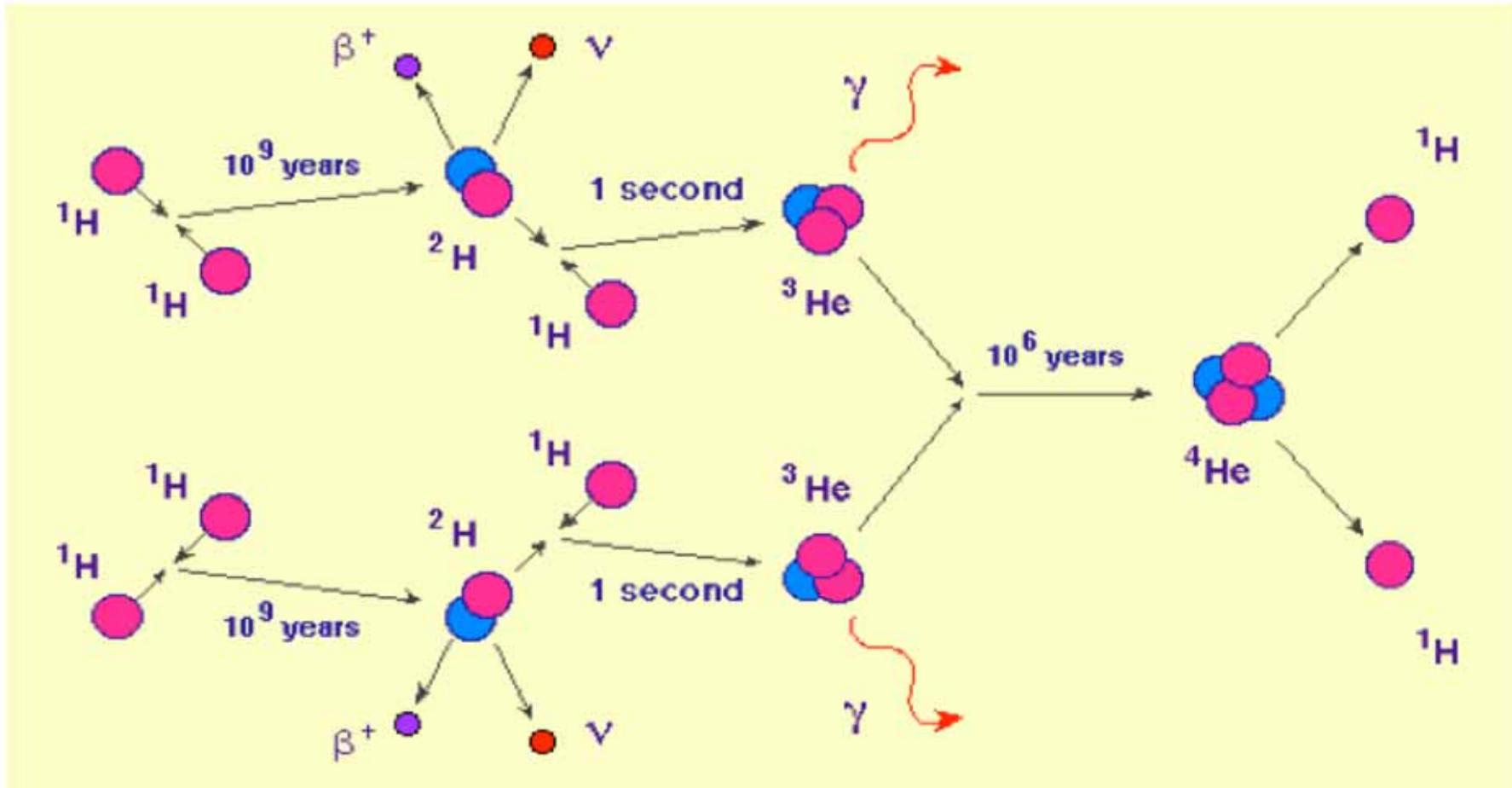
Vielen Dank an meine Kollegen, v.a. S. Günter, H. Zohm, und J. Roth für etliche Folien

Kernbindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl

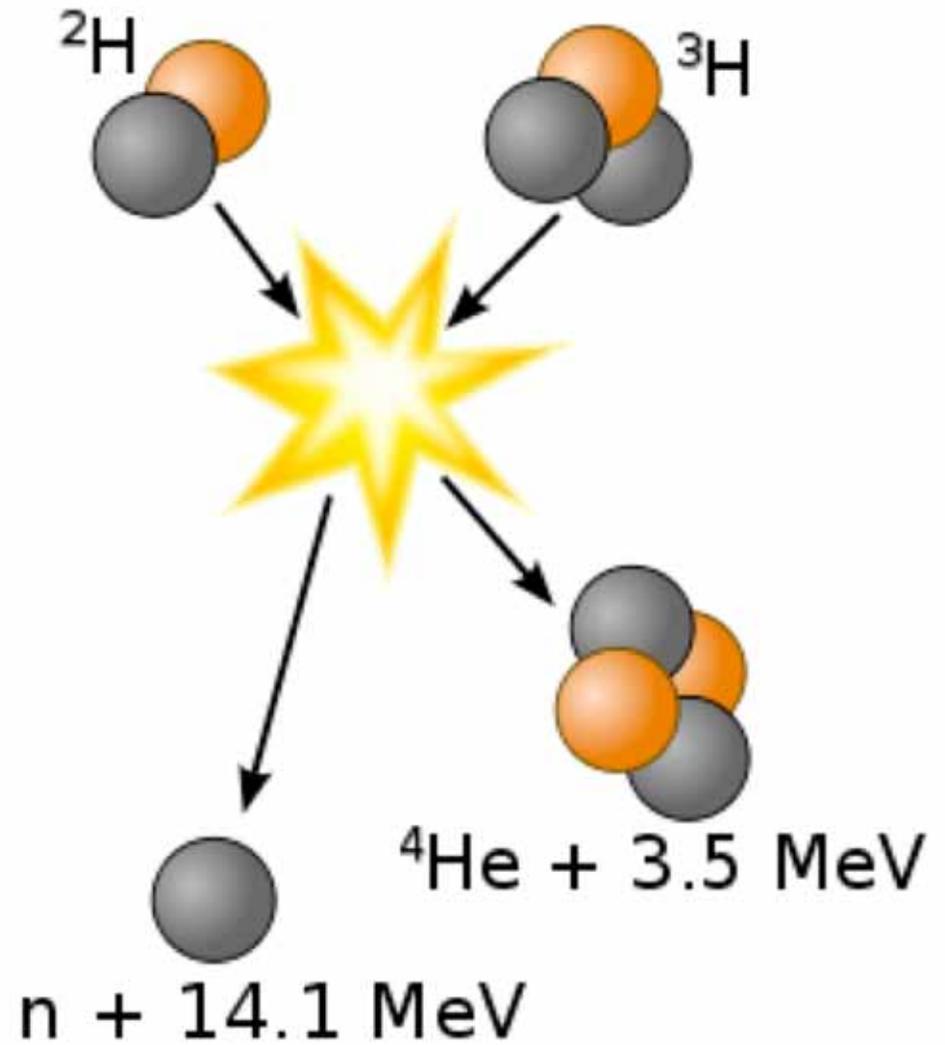
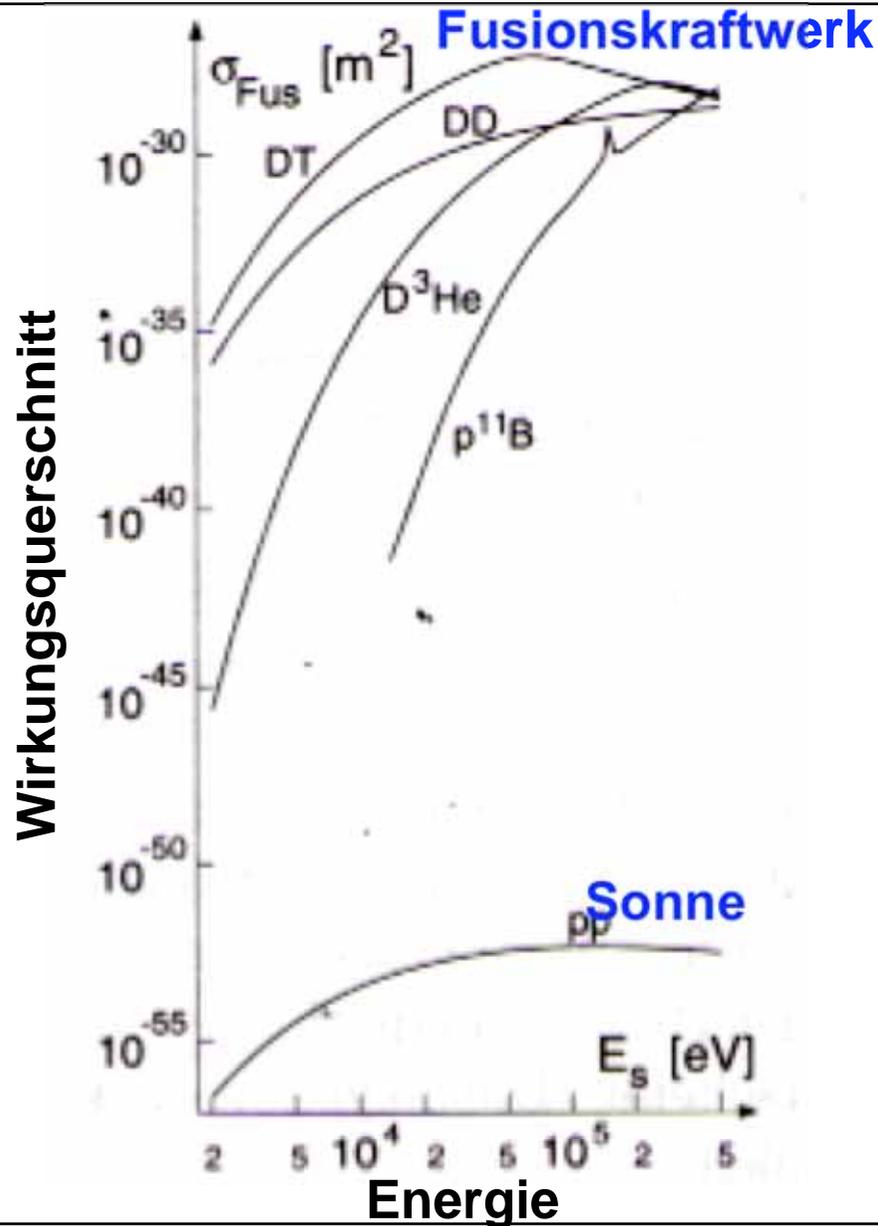


Wie bei der Spaltung (**Fission**) schwerer Kerne wird auch bei der Verschmelzung (**Fusion**) leichter Kerne Energie freigesetzt.

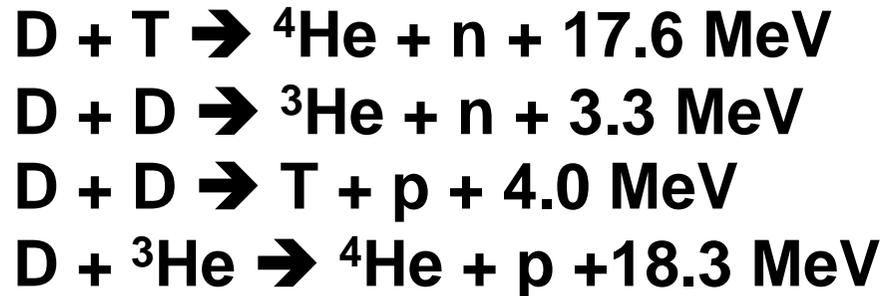
Primärer Prozess der Sonne: Proton-Proton-Kette



Das „Sonnenfeuer“ auf der Erde



Fusion



Höchster Wirkungsquerschnitt

Tritium-Brüten



Neutronenvermehrung

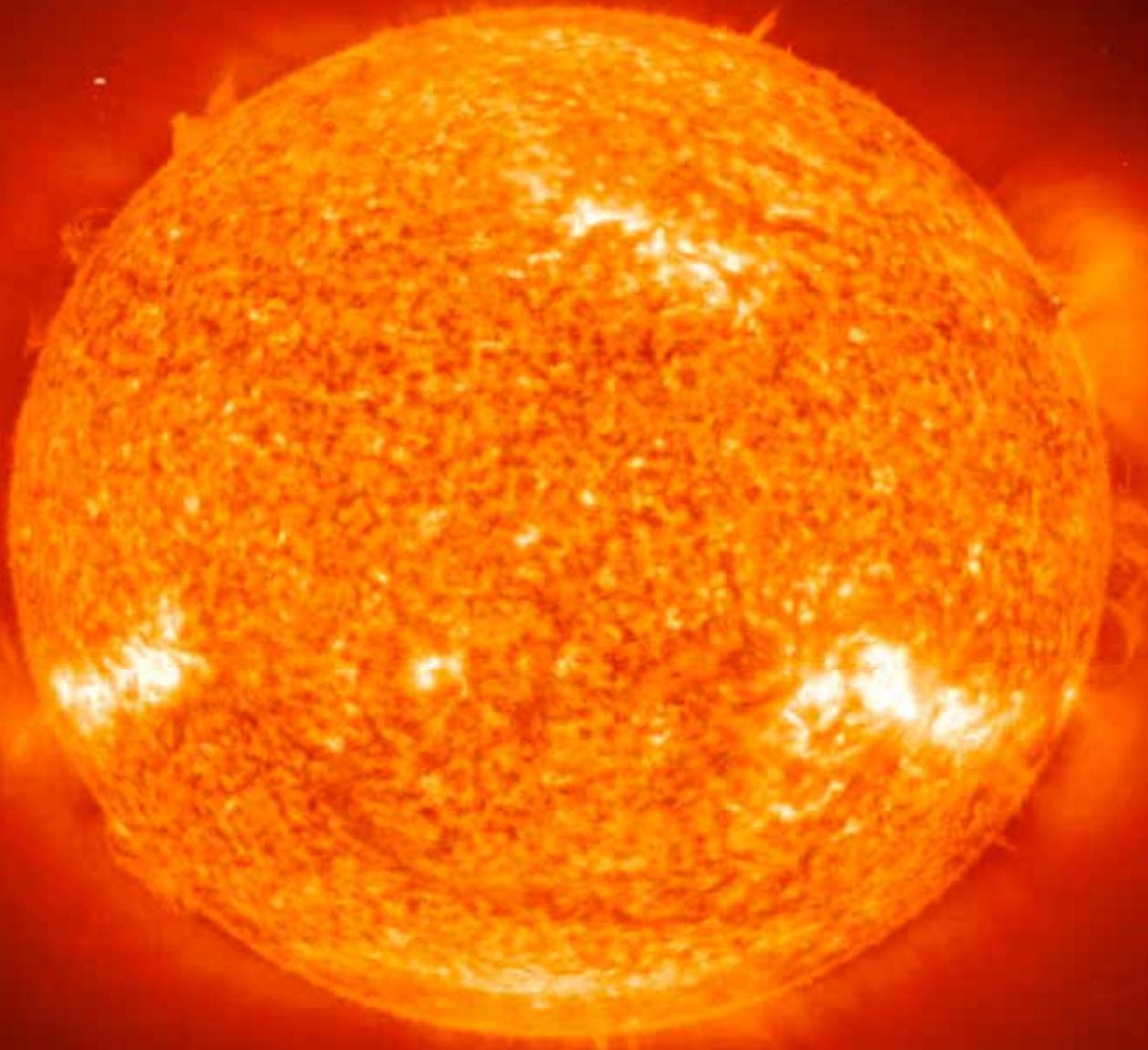


Plasmaphysik: Magnetischer Einschluss

IPP

SOHO/ESA

TRACE/NASA

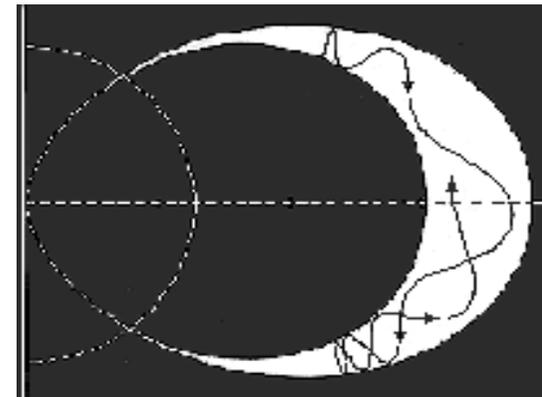
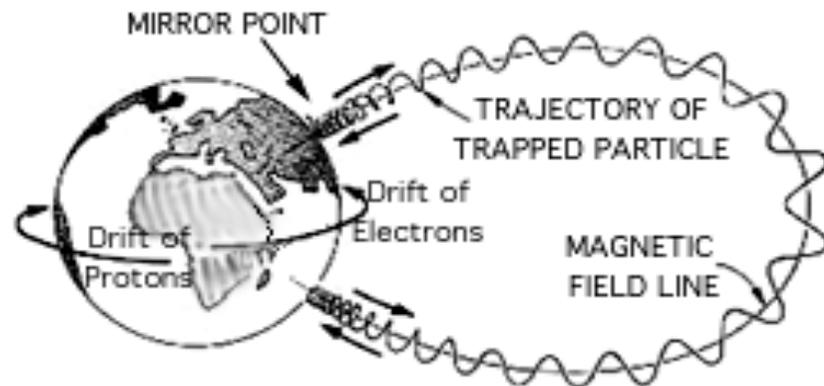


G. Hasinger: Der Weg zu einem
Fusionskraftwerk 4.12.2009

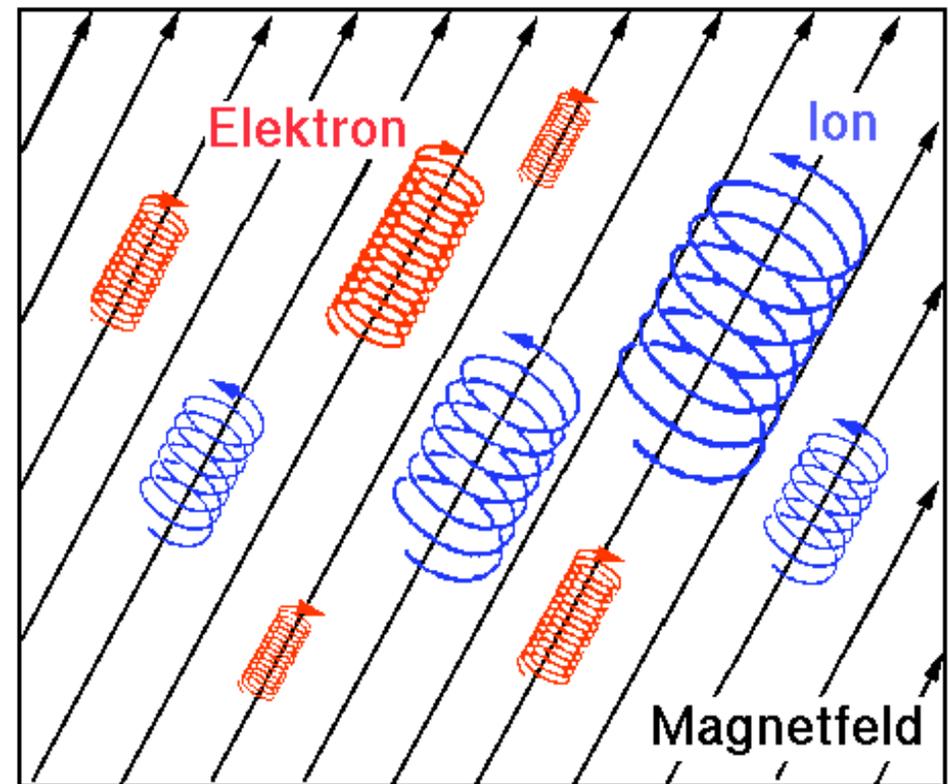
1998/03/30 20:23:42

2000-Sep-14
04:15:02

Van Allen Strahlungsgürtel

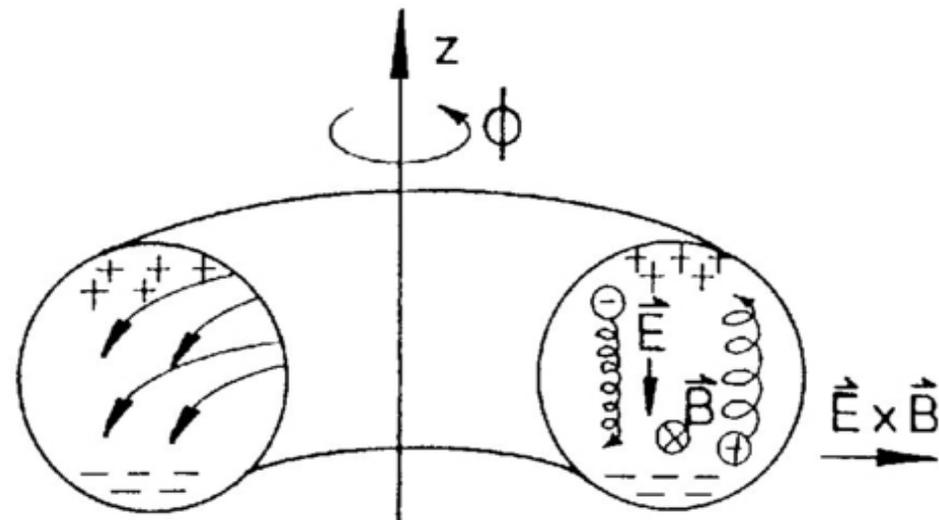


- Geladene Teilchen werden durch die Lorentz-Kraft auf Spiralbahnen um die magn. Feldlinien gezwungen.
- Eine Bewegung senkrecht zum Magnetfeld \mathbf{B} ist nur durch Stöße möglich.
- Die Bewegung parallel zu \mathbf{B} kann ungehindert erfolgen. Dies führt bei einem linearen magnetischen Feld zu einem Teilchen-Verlust.

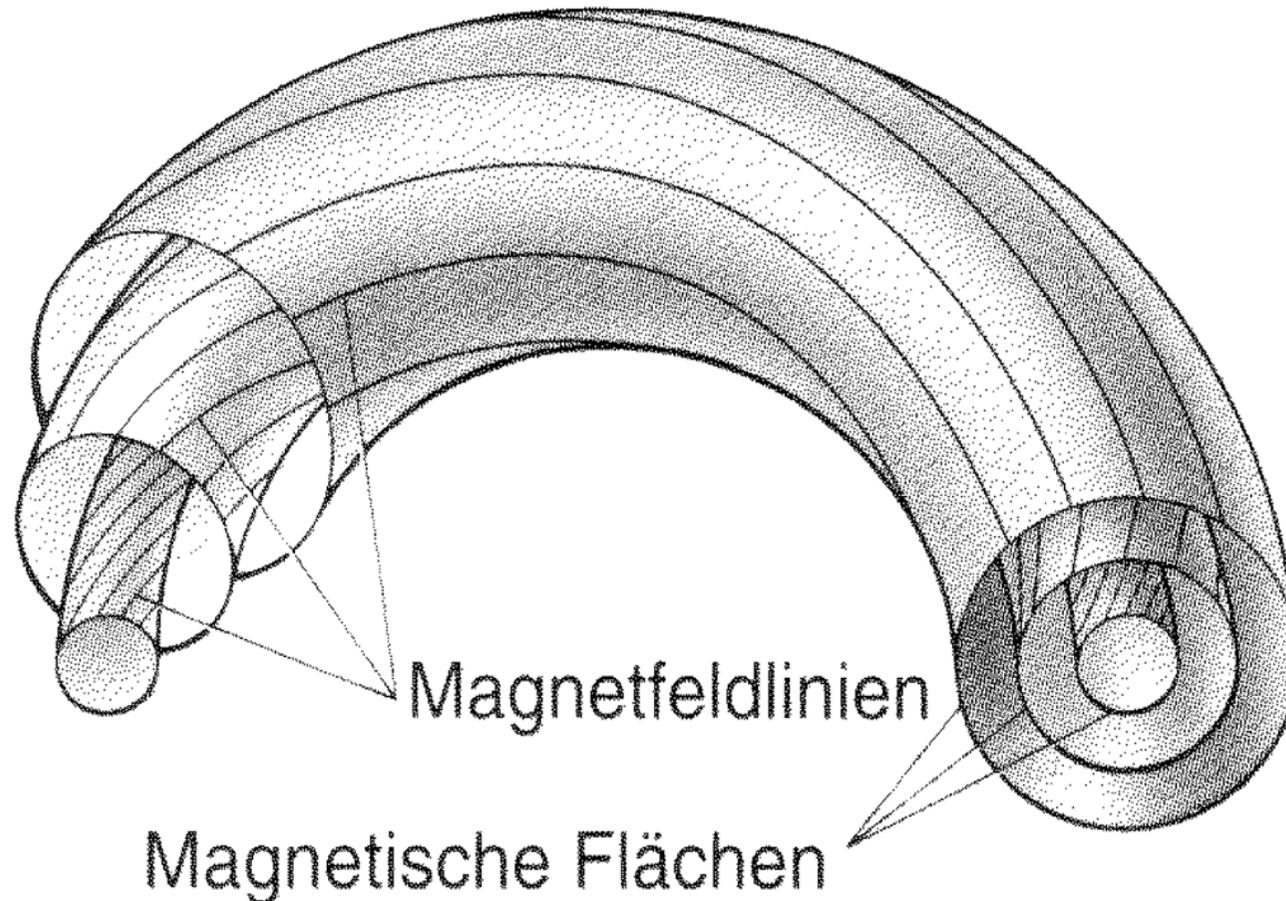


- **Ausweg: Dem Magnetfeld die Gestalt eines **Torus** geben!**

- Wegen der Krümmung und der Inhomogenität resultiert ein rein toroidales Magnetfeld in einer Ladungstrennung und folglich einem elektrischen Feld E .
- Dies führt wiederum zu einer $E \times B$ - Drift: die Teilchen driften aus dem Torus heraus.

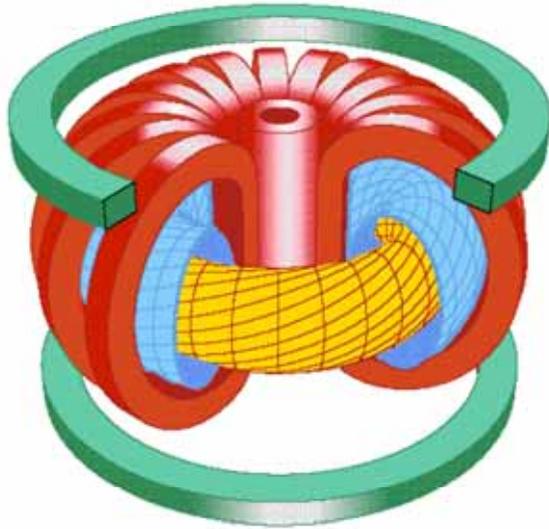


- **Ausweg: Verdrillung** der Feldlinien

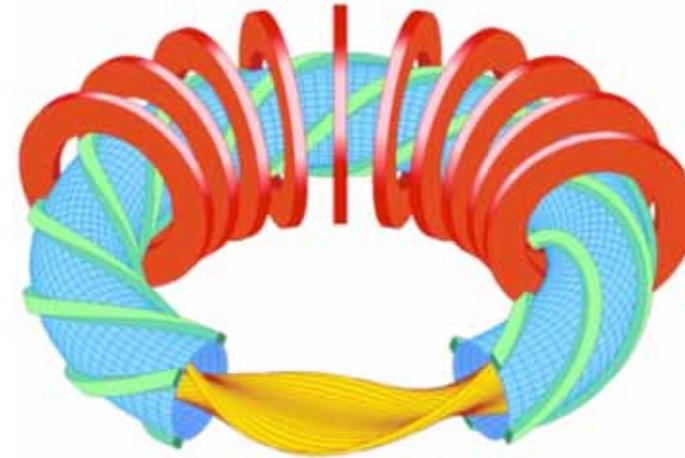


Für die Verdrillung gibt es zwei konkurrierende Experiment-Konzepte, die **Stellaratoren** und die **Tokamaks**; im IPP werden beide Konzepte verfolgt.

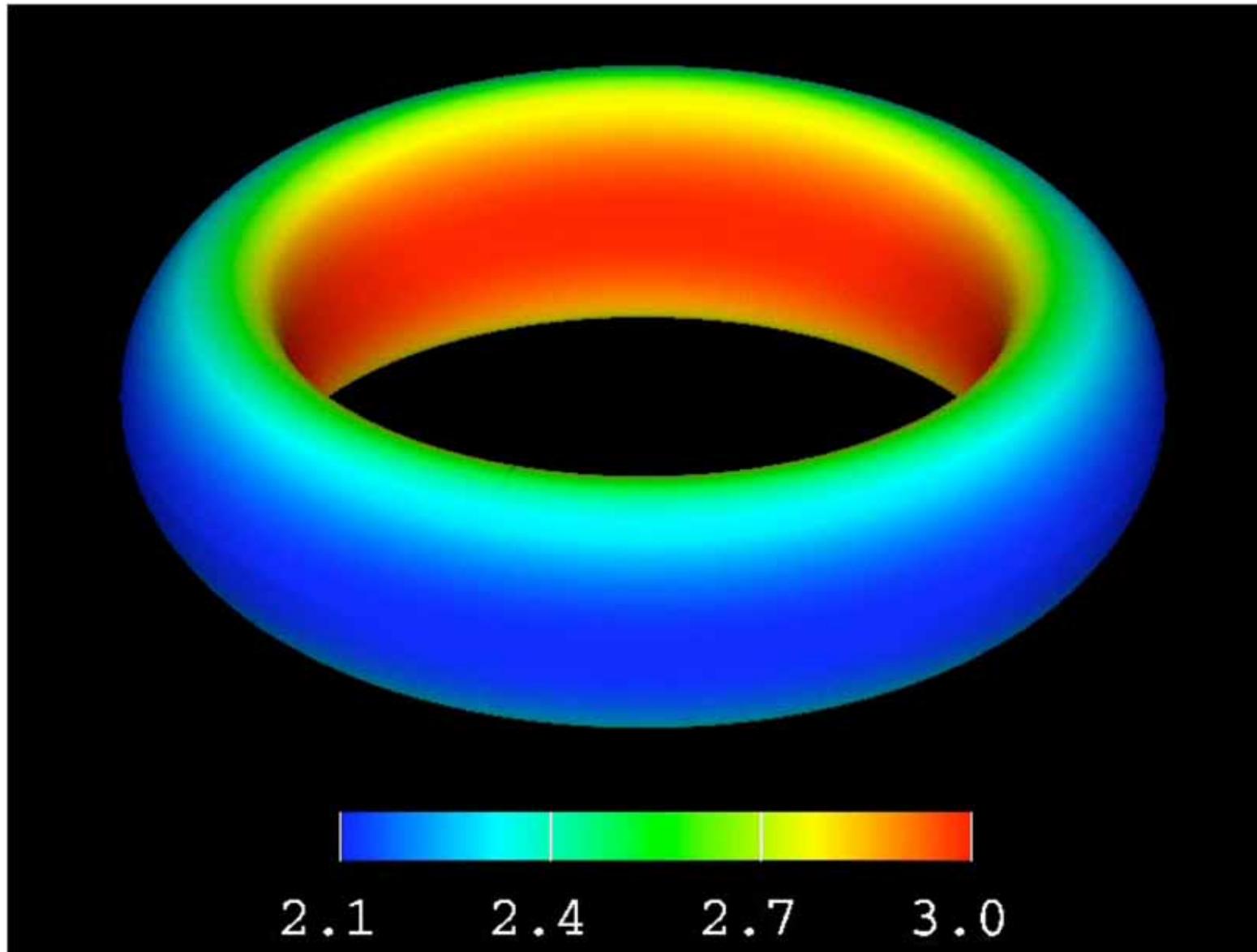
Tokamak

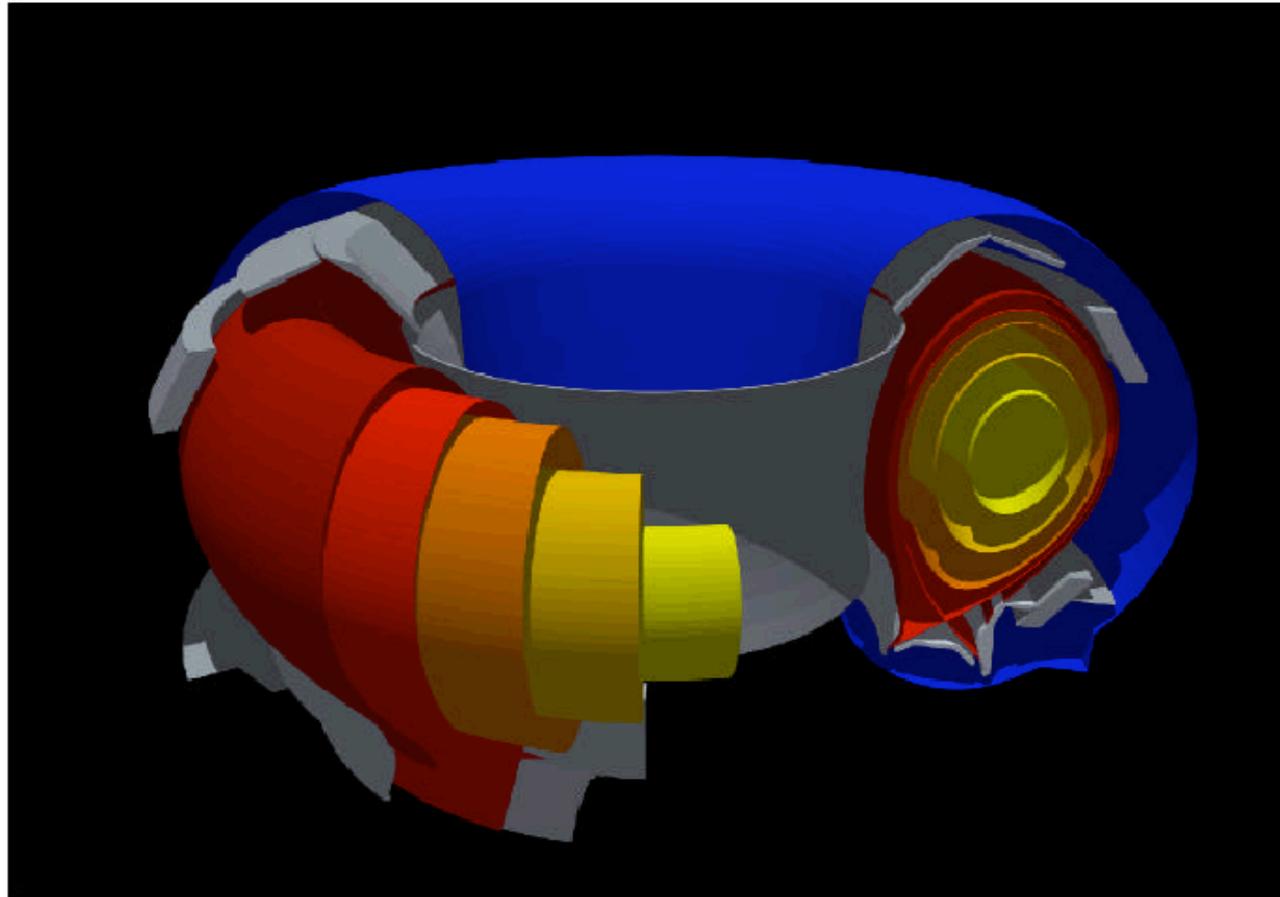


Stellarator



Bahnen schneller Teilchen im Tokamak (Bananen-Orbits)

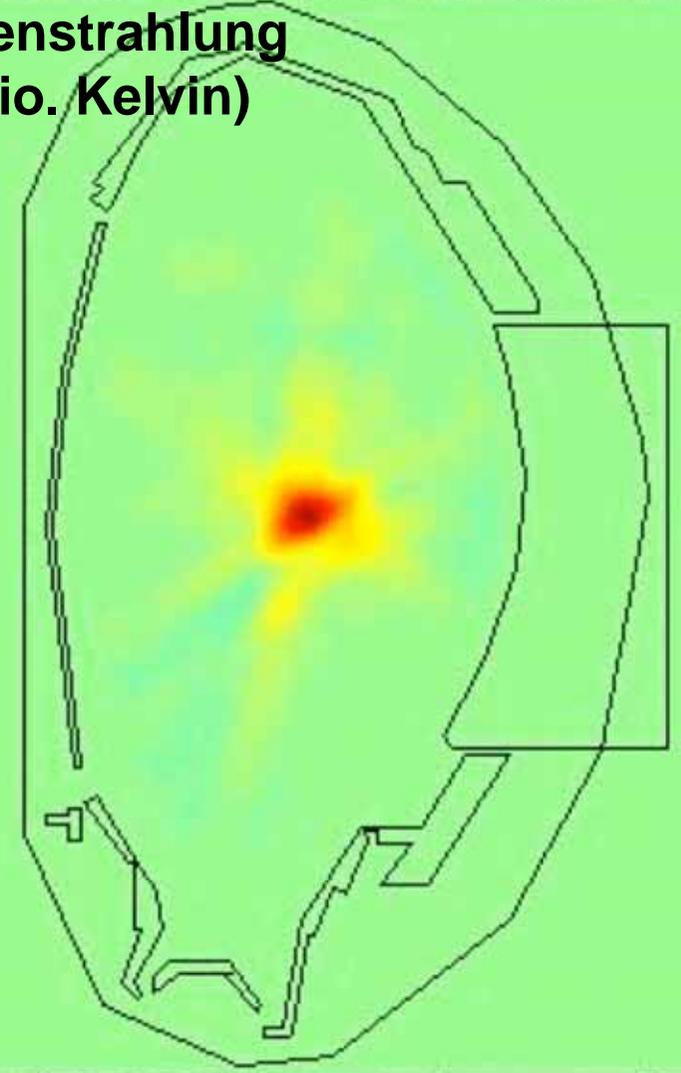




Der ASDEX Upgrade Tokamak in Garching

IPP

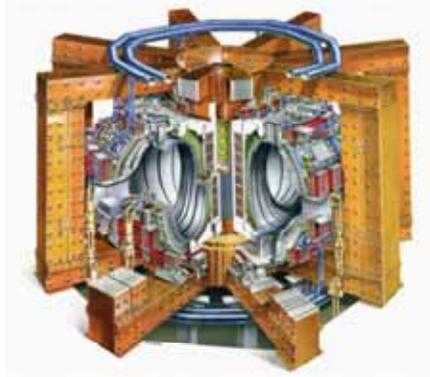
Röntgenstrahlung
(200 Mio. Kelvin)



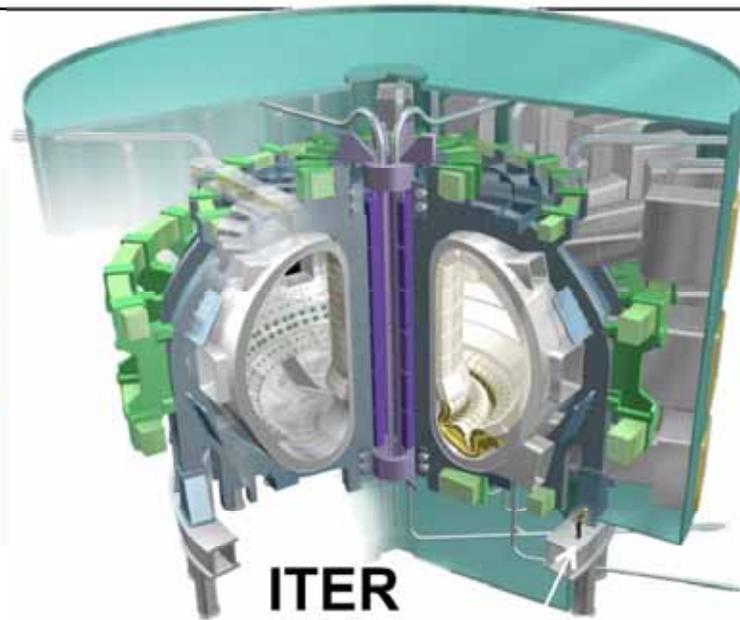
Tokamaks



ASDEX Upgrade
Garching



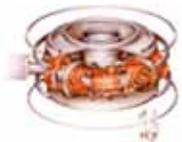
JET
Culham



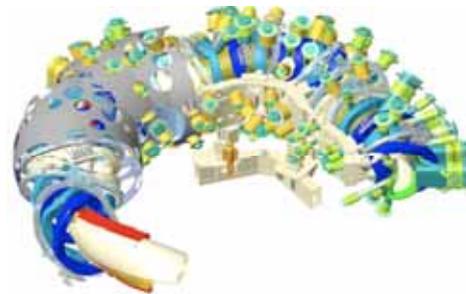
ITER
Cadarache

Mensch

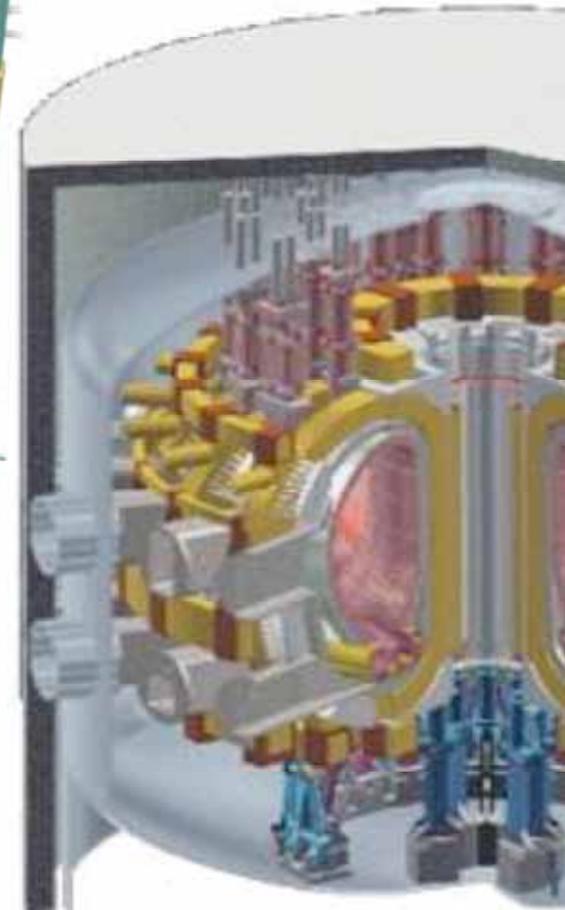
Stellaratoren



Wendelstein 7-AS
Garching

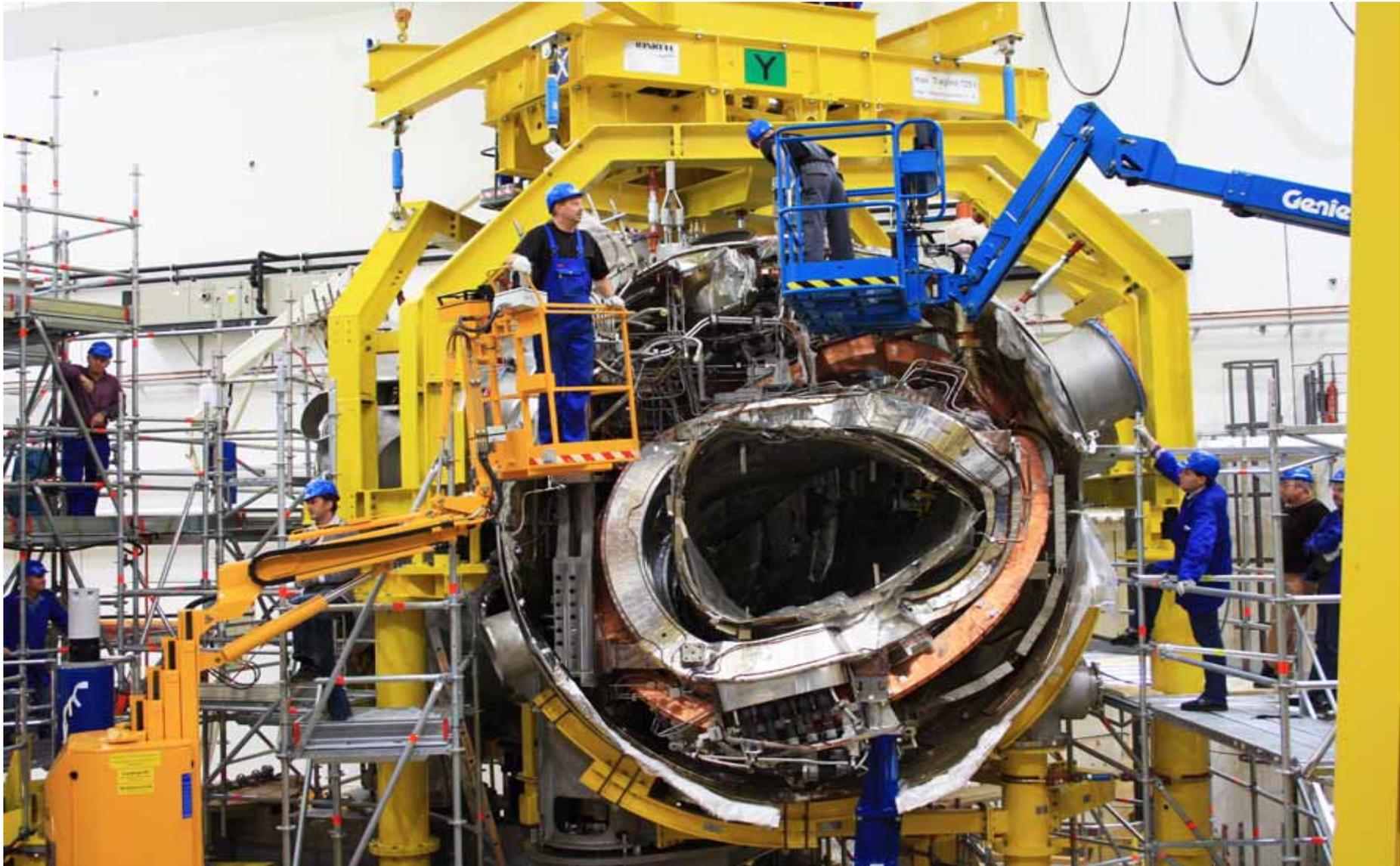


Wendelstein 7-X
Greifswald



DEMO

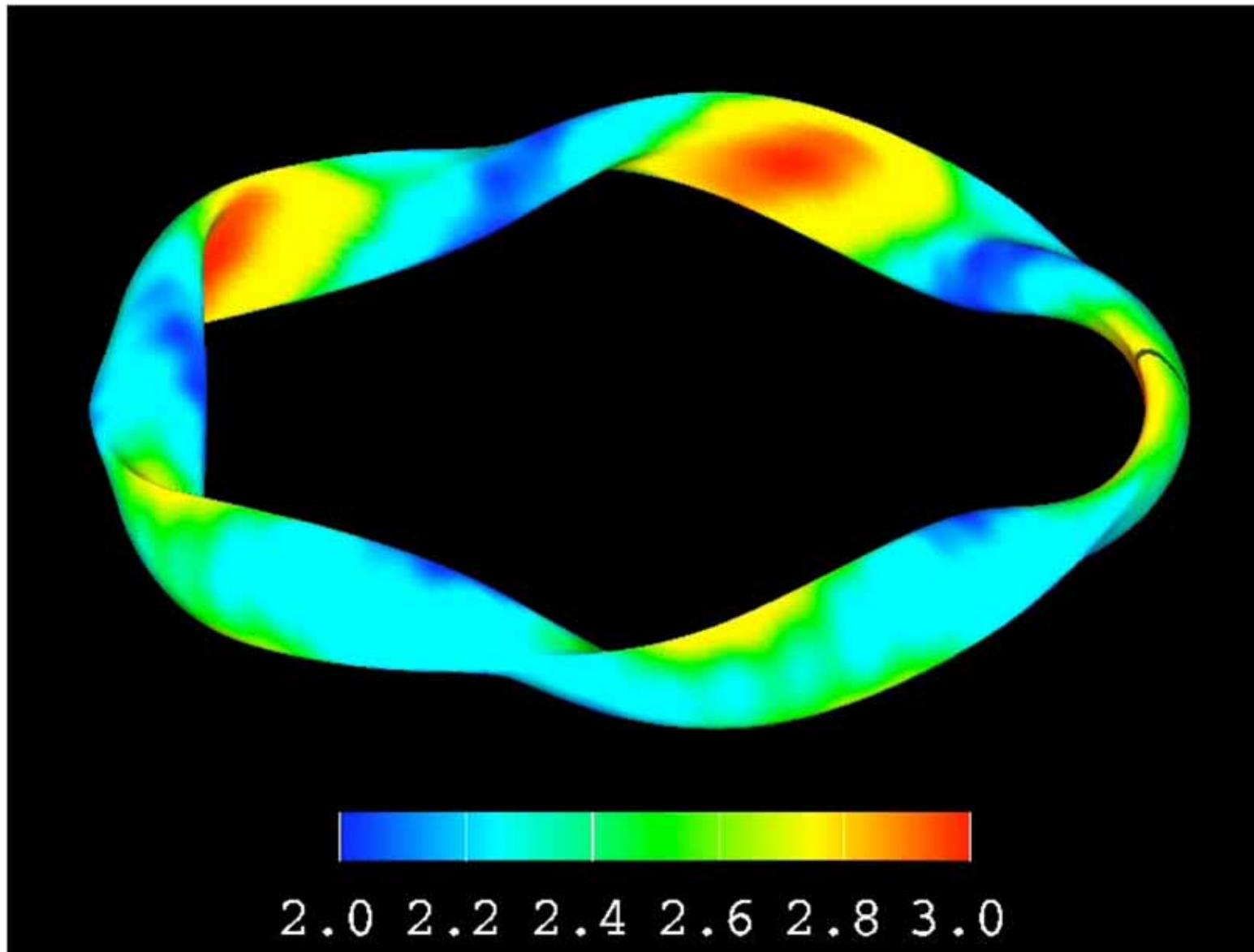
Wendelstein 7-X: Idee - Design - Konstruktion



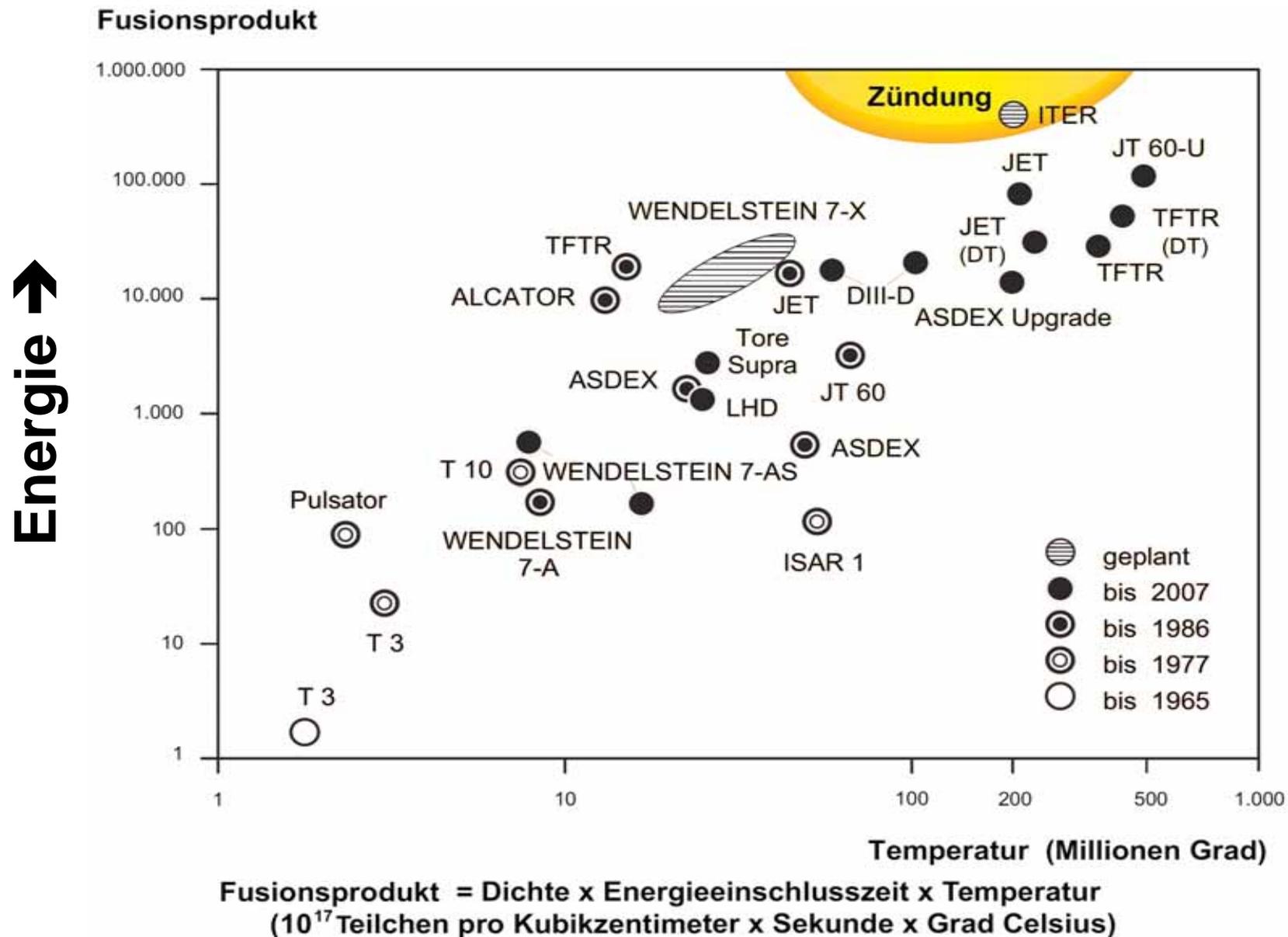
Herstellung der nicht-planaren supraleitenden Spulen

IPP

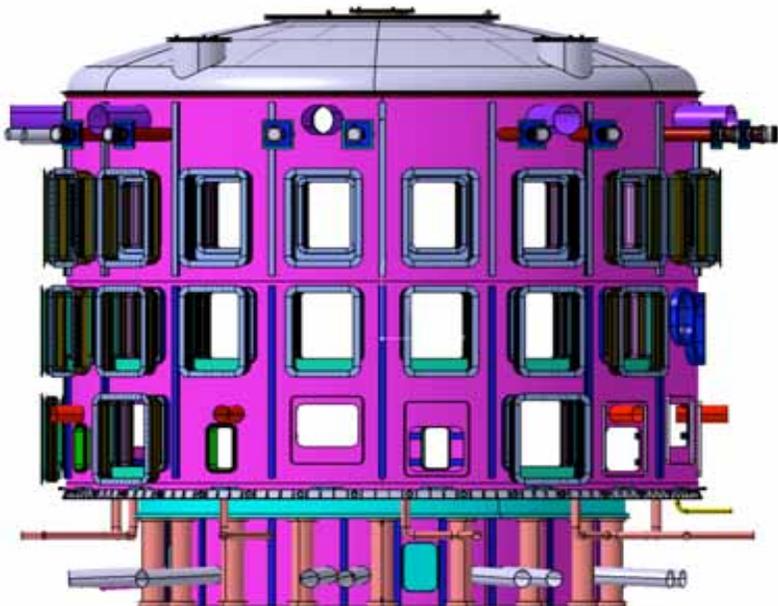




Das Tripelprodukt der Fusion: $\rho \tau T$



ITER Kryostat im Vergleich

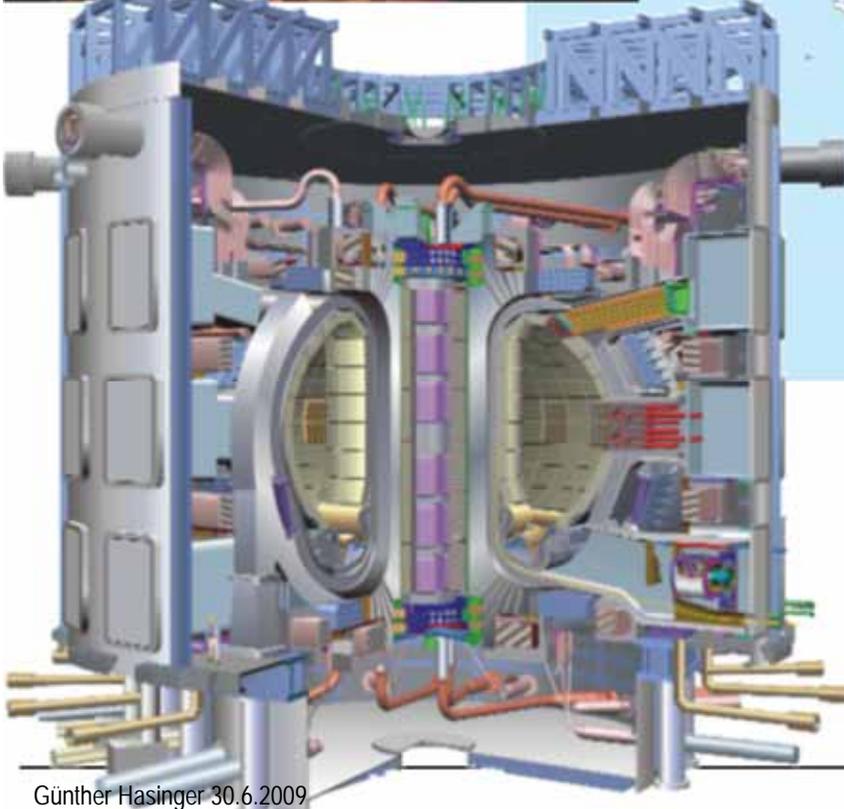
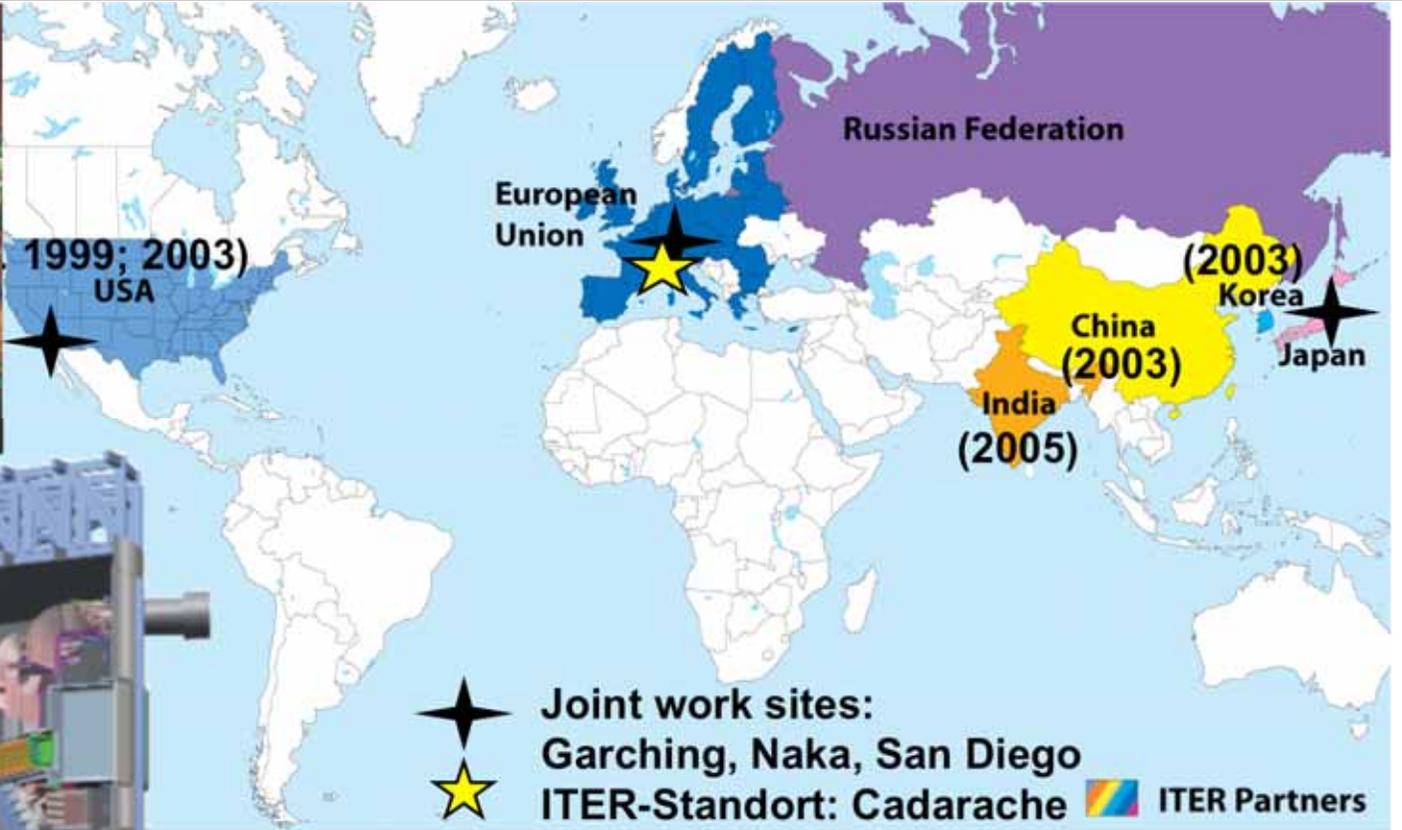


ITER Kryostat
~28 m Höhe x
29 m Durchmesser



Jefferson Memorial (Washington DC)
~29 m Höhe

ITER @ Cadarache



>50% der Weltbevölkerung und >80% des GDP
Größtes und komplexestes Wissenschaftsprojekt
Deutliche Kosten- und Laufzeit-Erhöhung (≈ISS)
ITER ist DAS Schlüsselexperiment
Rolle Deutscher Institute ist essentiell

ITER Bauplatz: bereit seit April 2009





Magnetspulenherstellung
Gebäude ~250 m x 45 m

**Cryo-Maschine – 65 kW bei 4.5 K
& 1300 kW bei 80 K**
Zweitgrößte Anlage der Welt
(Deutscher Beitrag möglich)

Tokamak & Assembly
Gebäude – 6 Stockwerke
166 m x 81 m x 57 m high
(~36000 m²)

Magnet Stromzufuhr
Konvertor-Gebäude
(~1 GW Ausgangsleistung)

Heiße Zellen – 60 m x 70 m

Tritium- Gebäude – 7 Stockwerke
@ 25 m x 80 m (~14000 m²)

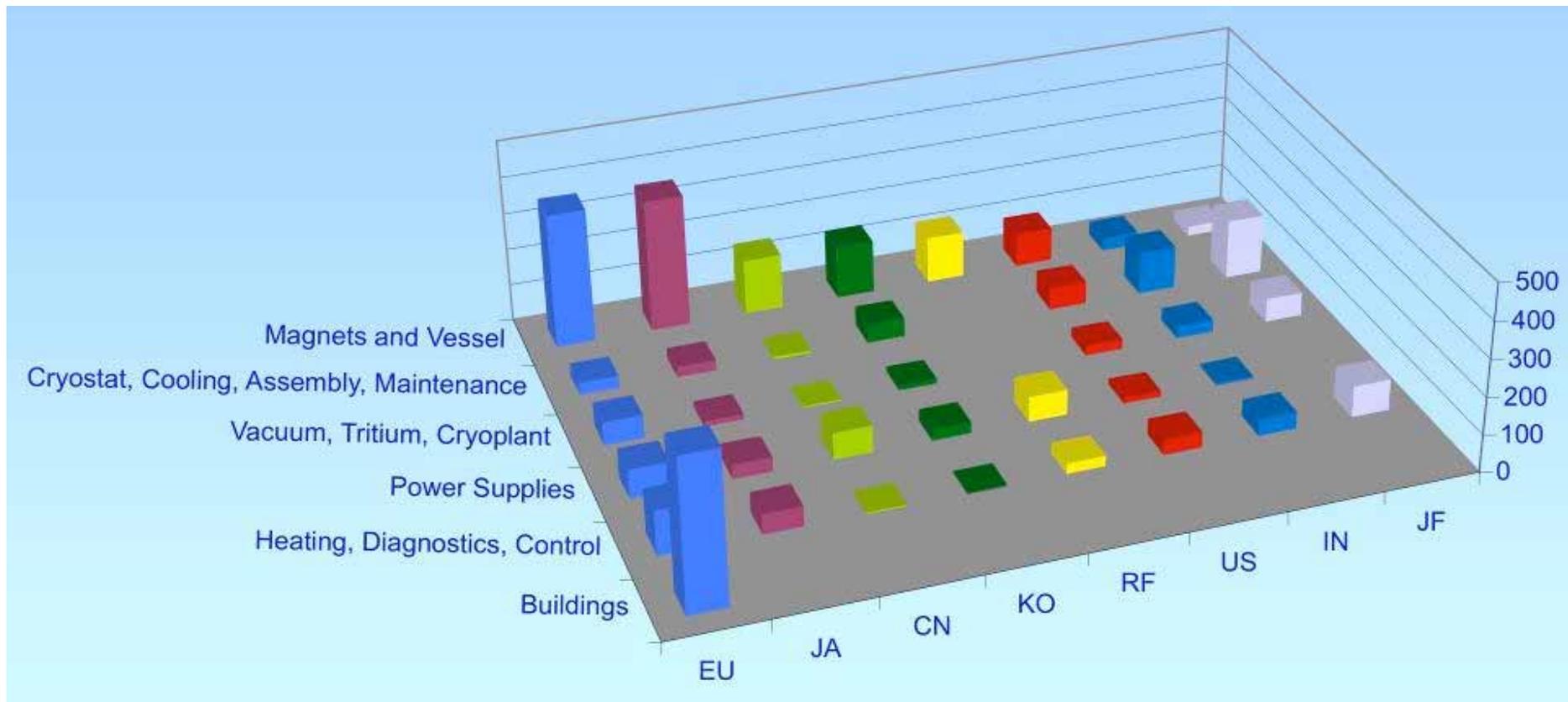
Größter Durchsatz weltweit
(~300 kg/yr).

Fläche – 60 Hektar

- | | | |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1. Tokamak building | 14. Main alternating current distribution building | 25. R.T.E. switchyard area |
| 2. Tokamak complex excavation support structure | 15. NB high voltage power supply building | 26. R.T.E. control building |
| 3. Assembly building | 16. Reactive power control building | 27. Cryopant compressor building |
| 4. Tritium building | 17. Reactive power compensator area | 28. Cryopant coldbox building |
| 5. RF heating building | 18. Steady state power high voltage substation area | 29. Cryopant infrastructure |
| 6. Cleaning facility building | 19. Fuel storage tanks (EPS train A) | 30. PF coil fabrication building |
| 7. Hot cell building | 20. Fuel storage tanks (EPS train B) | 31. Site services building |
| 8. Radioactive waste building | 21. Emergency power supply building (train A) | 32. Hot basin and cooling towers |
| 9. Personnel access control building | 22. Emergency power supply building (train B) | 33. Cooling water pumping station |
| 10. Magnet power conversion building 1 | 23. Medium voltage distribution building LC/1A | 34. Heat exchangers |
| 11. Magnet power conversion building 2 | 24. Medium voltage distribution building LC/2B | 35. Control building |
| 12. NB power supply building | | 36. Office building |
| 13. Pulse power high voltage substation area | | 37. Diagnostic building |
| | | 38. FC and switching network resistor building |
| | | 39. Temporary ITER HQ |

ITER: Internationale Aufteilung

- Hohe Komplexität des Projektes durch *in kind* Beiträge der Partner
- Europa: Gebäude, Kessel und Spulen: alle sehr früh notwendig
- Trotz Kostenerhöhungen und Zeitverzögerung: Volle Unterstützung des EU Rat
- Lobbying für Überbrückungsphase 2012 & 2013 und für FP8 notwendig.



The Next Steps – DEMO

DEMO objectives:

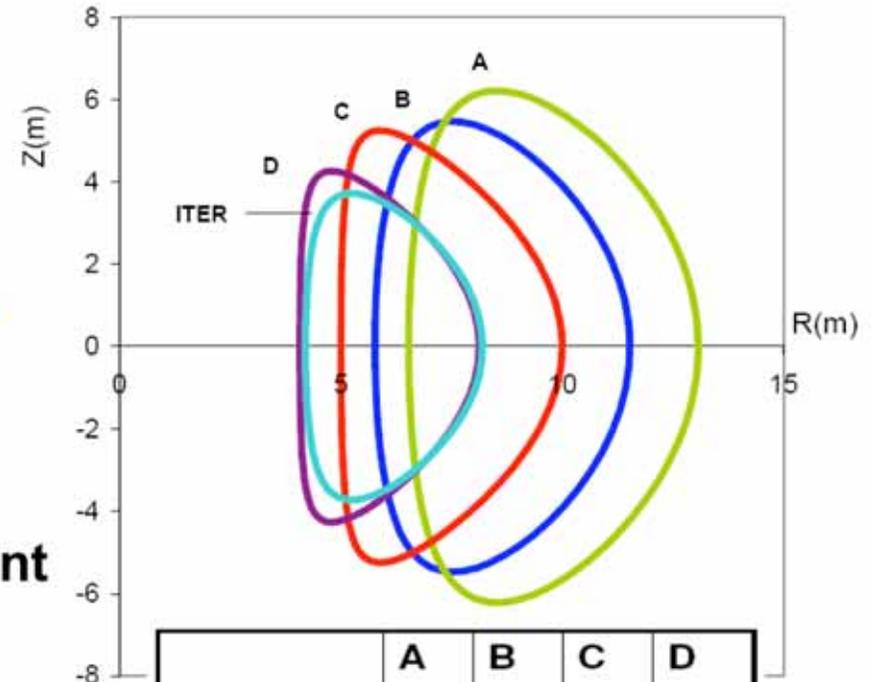
- demonstration workable solution for all physics and technology questions
- allow to access economic attractiveness
- demonstrate large scale delivery of electricity with self-sufficient fuel cycle

DEMO will be ,point design‘, not experiment

- needs validated ,numerical tokamak‘
- needs qualified materials for licensing

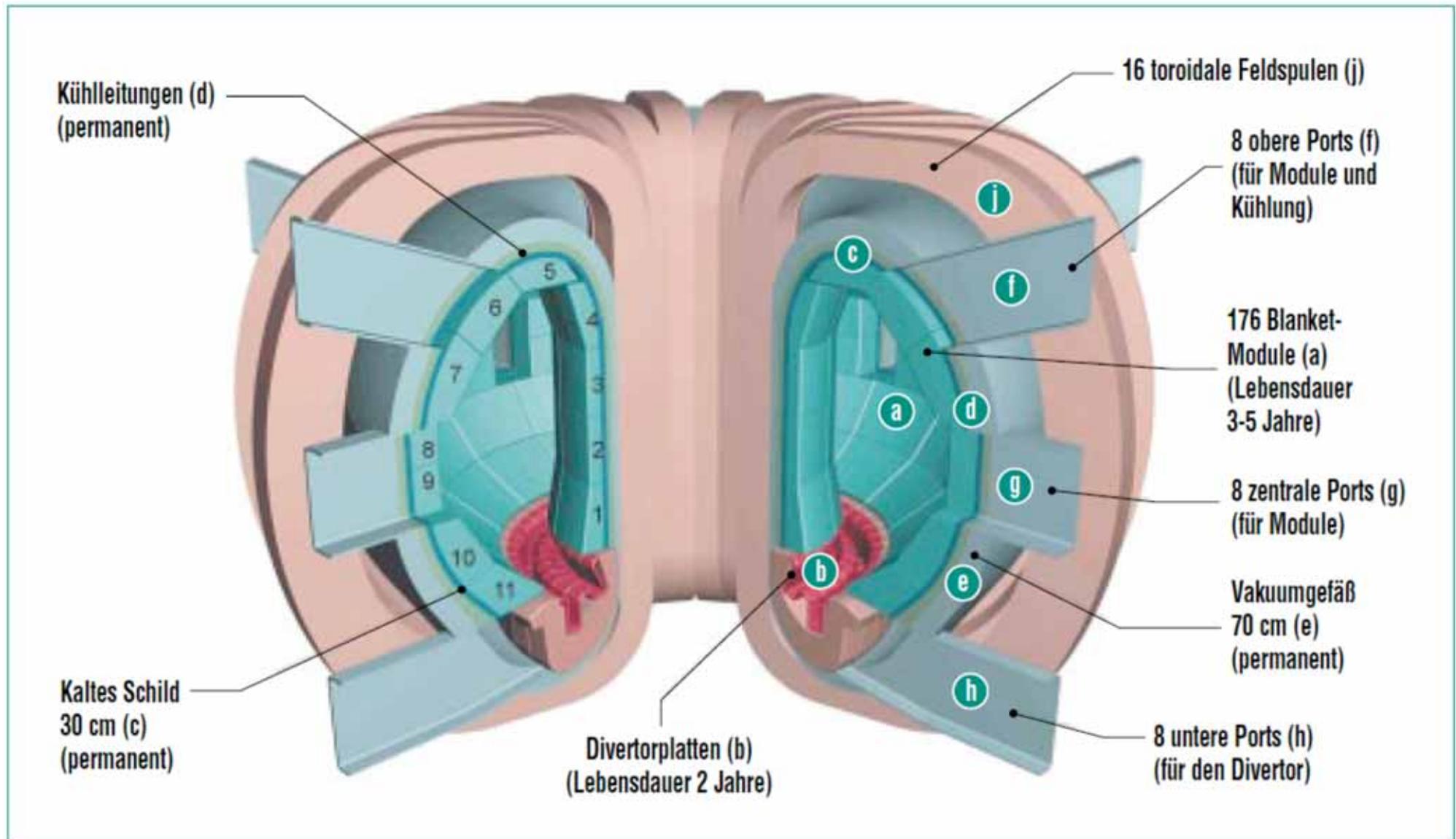
No detailed DEMO design exists today

- start as soon as possible with substantial DEMO design activity to guide physics and technology development!

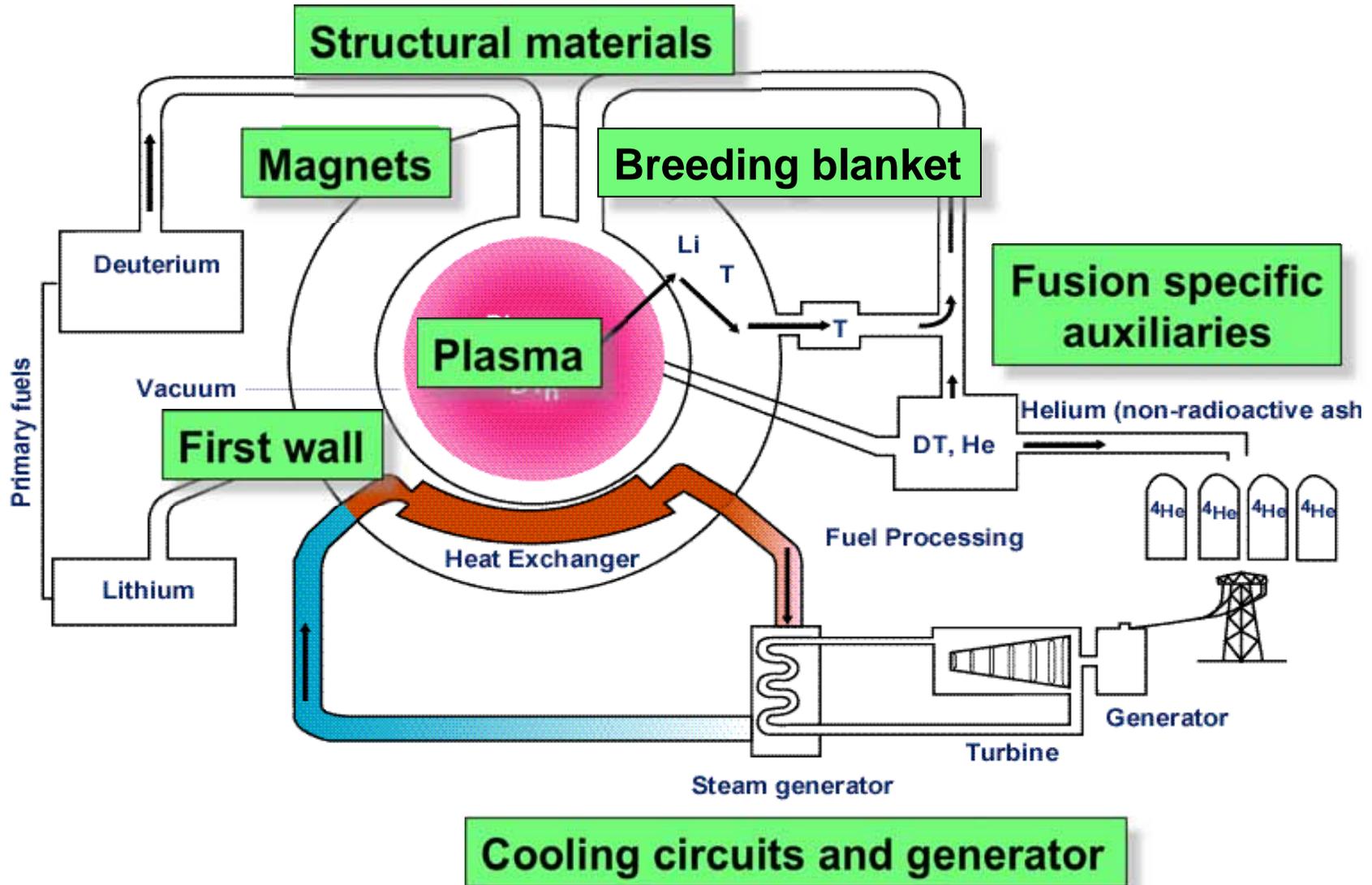


	A	B	C	D
Electrical power [GW]	1.5	1.3	1.5	1.5
Fusion power [GW]	5.0	3.6	3.4	2.5
Plasma current [MA]	30	28	20	14
Total β_N [% m/MA T]	3.5	3.4	4.0	4.5
coolant	H ₂ O	He	He	LiPb
Efficiency of H&CD [%]	60	60	70	70

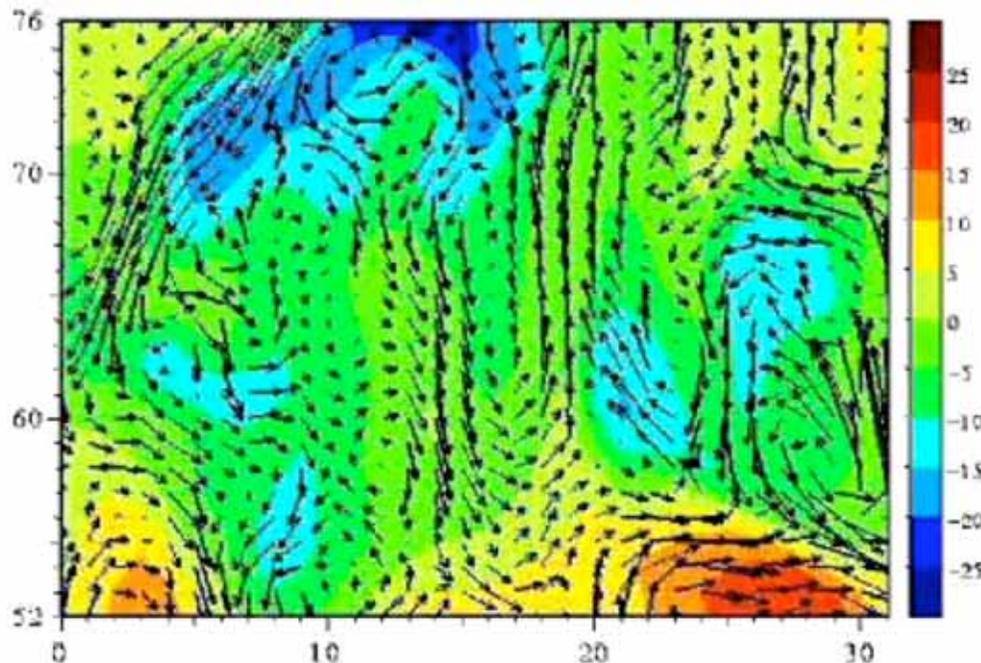
Komponenten eines Demonstrationskraftwerkes DEMO



Fusion Power Plant - Challenges



Simulation von Turbulenz in der Randschicht eines Hoch-Temperatur-Plasmas (B. Scott, IPP)

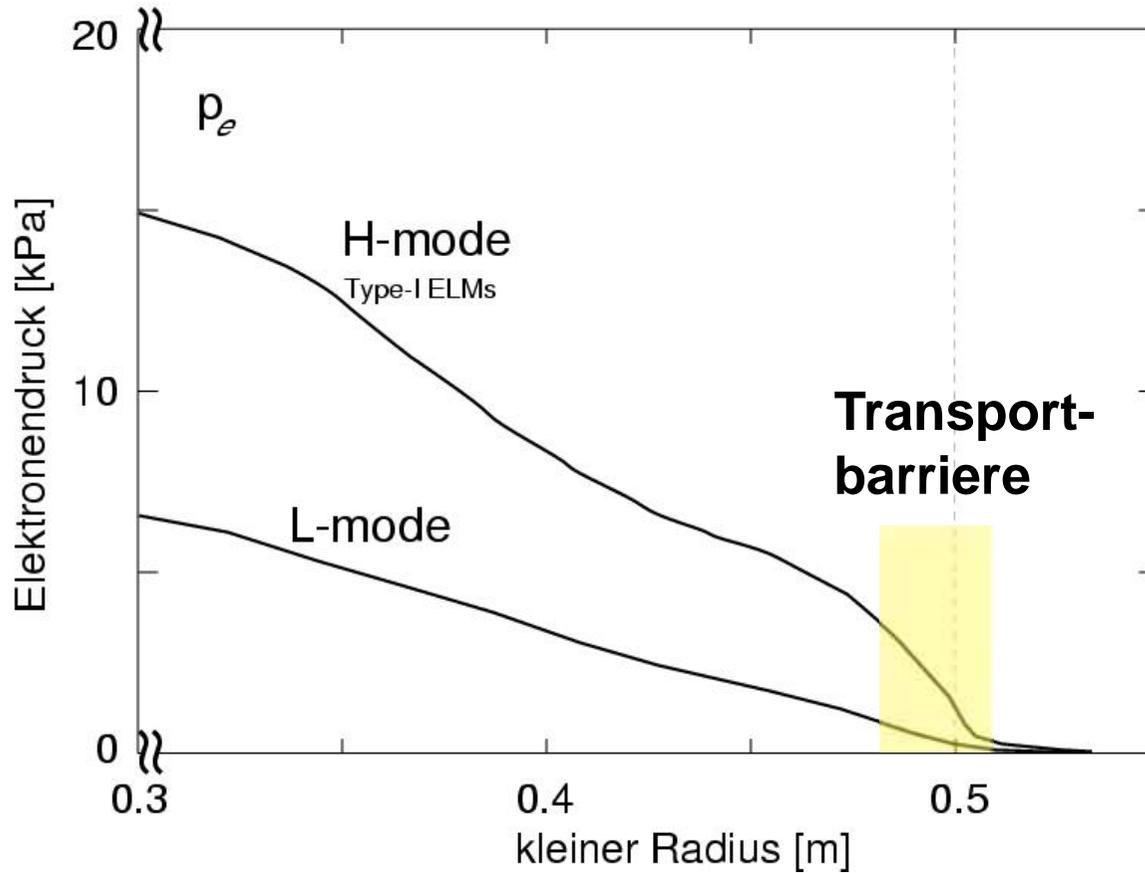


Ein Fusionsplasma ist ein hoch komplexes nichtlineares System das (noch) nicht vollständig selbstkonsistent beschrieben werden kann.

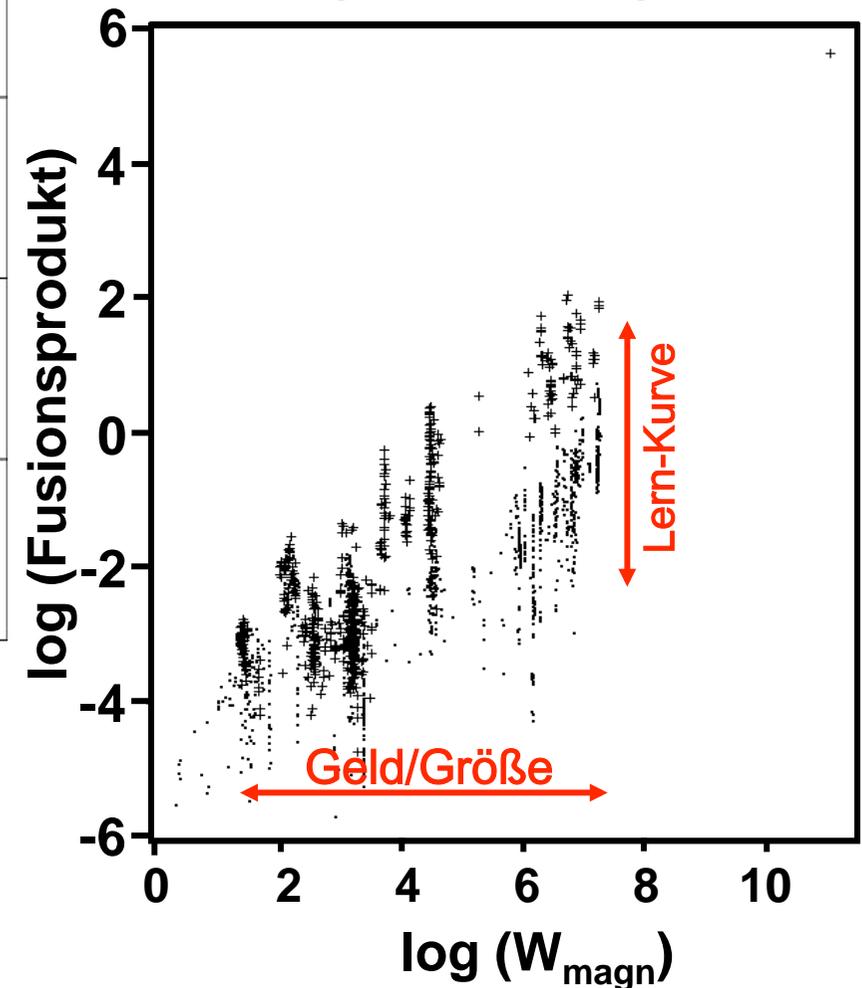
- **Energieeinschluss: Wärmetransport durch Turbulenz – Empirie**
- **Stabilität: Druck und Strom durch MHD-Instabilitäten begrenzt**
- **Asche: Plasma mit Wandkontakt muss kalt und dicht sein (Divertor)**
- **Selbstheizung durch α -Teilchen bisher nicht experimentell zugänglich**

Die große Herausforderung ist die Integration dieser Bereiche in ein stabiles Betriebskonzept

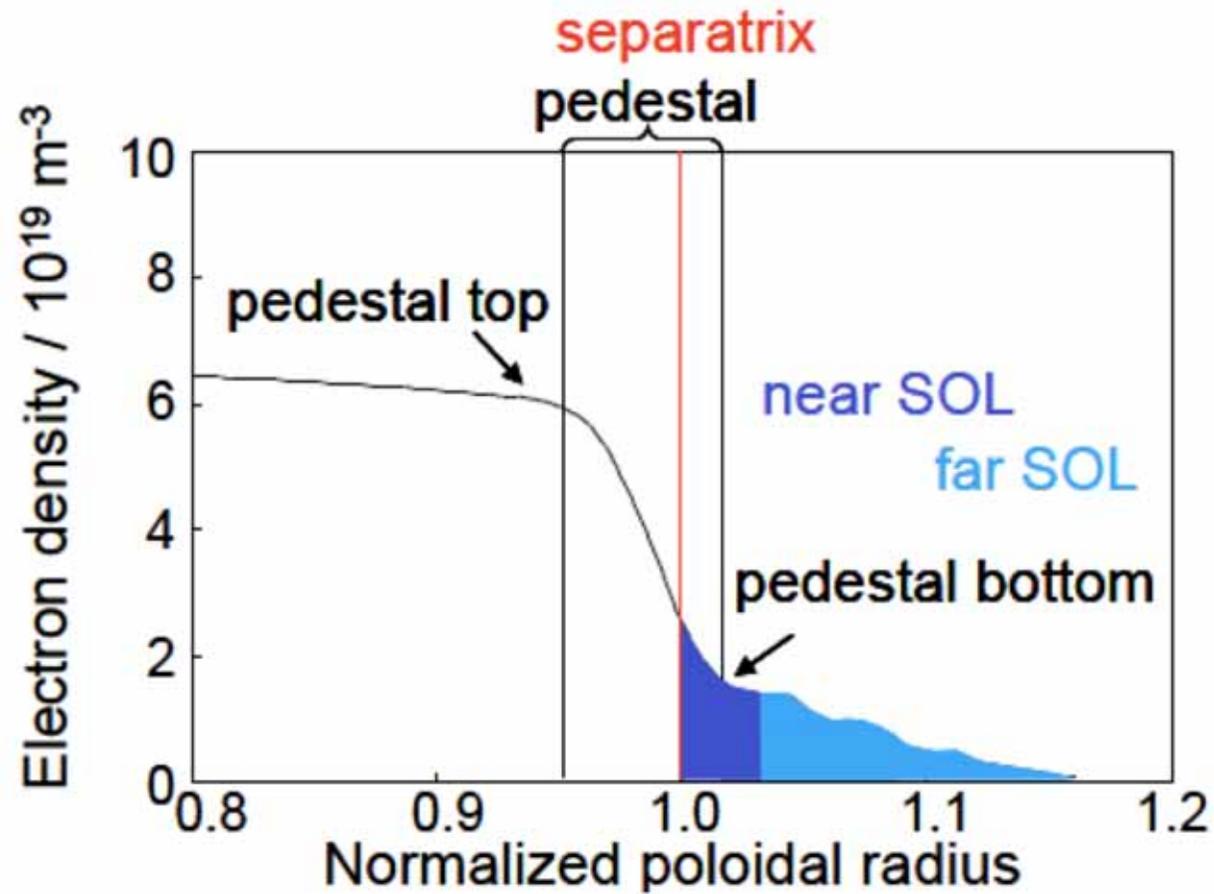
Die H-Mode: ein wichtiges selbst-organisierendes Prinzip



Fortschritt nicht nur durch reine Größe, sondern auch durch die Entdeckung neuer "Regimes"



Stern-Gerlach Medaille der DPG 2009 an Prof. Friedrich Wagner für die Entdeckung der H-Mode an ASDEX



Very sharp edge at H-mode heat transport barrier

Serious Problem: Edge Instabilities

So called „Edge localized Modes“ (ELMs)

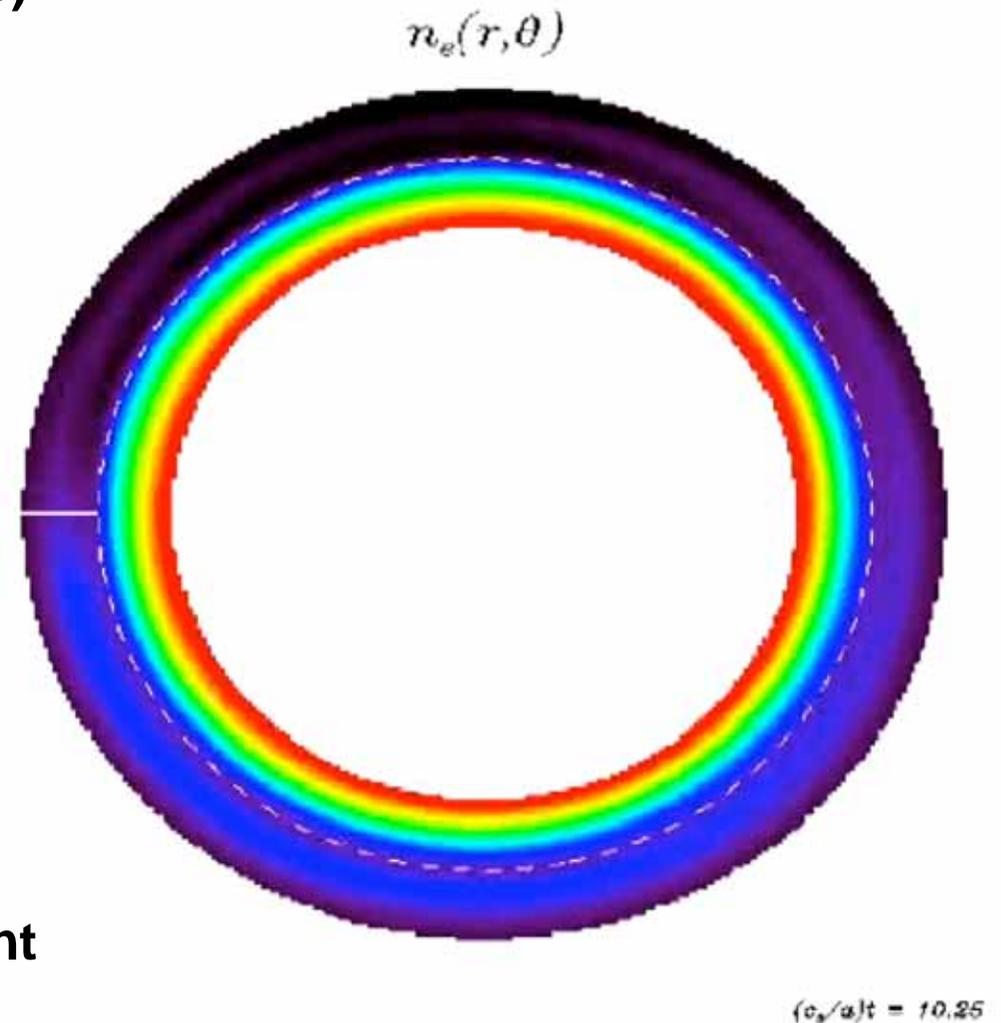
Short-term, repetitive eruptions of the plasma at the H-mode transport barrier

Strong short term load on the Plasma facing wall ($> 10 \text{ MW/m}^2$)

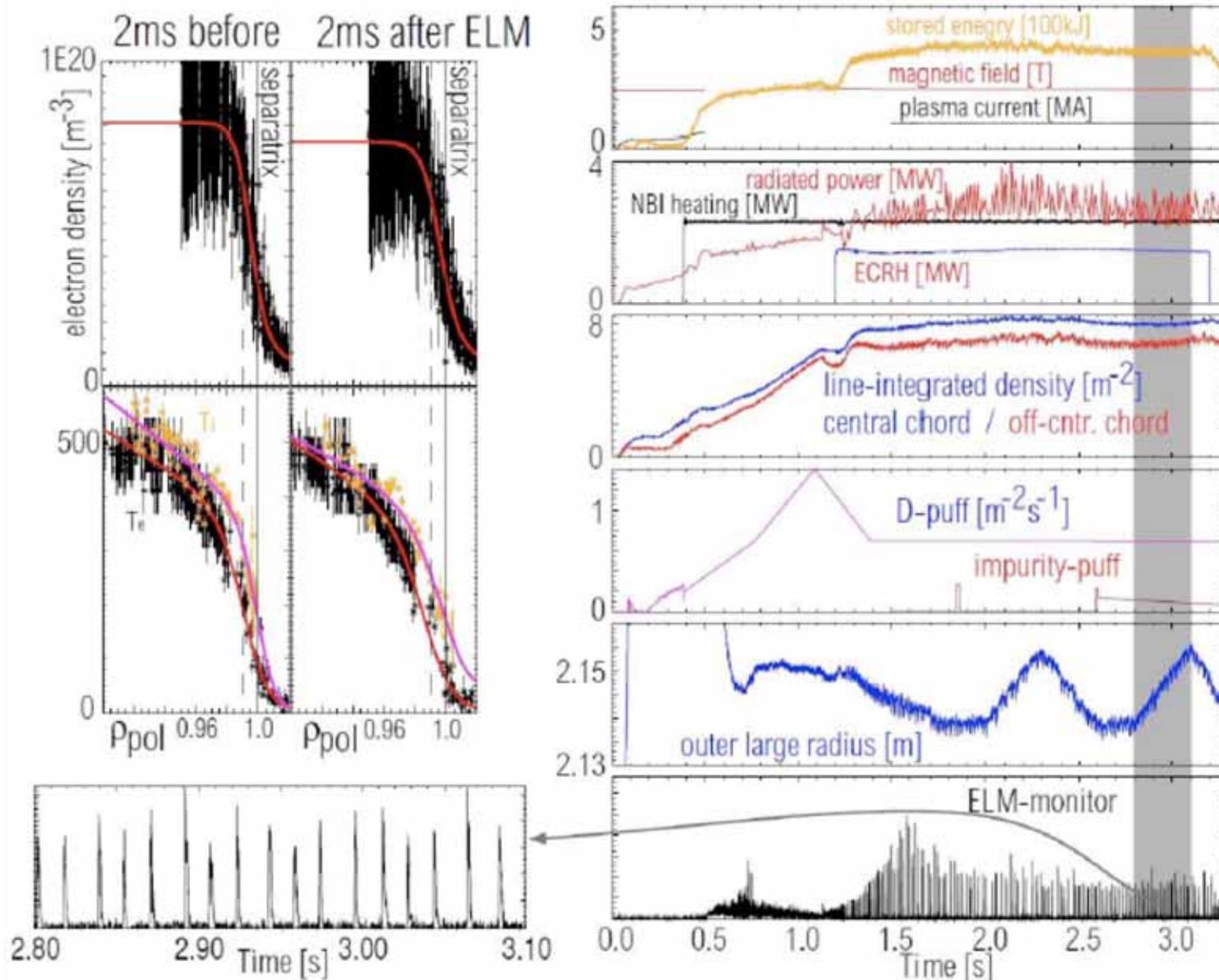
Extrapolation to ITER still uncertain, Could pose a severe problem

Countermeasures, e.g. dedicated „pacing“ of the plasma with Deuterium Pellets or impurity seeding

Internal ELM control coils in development

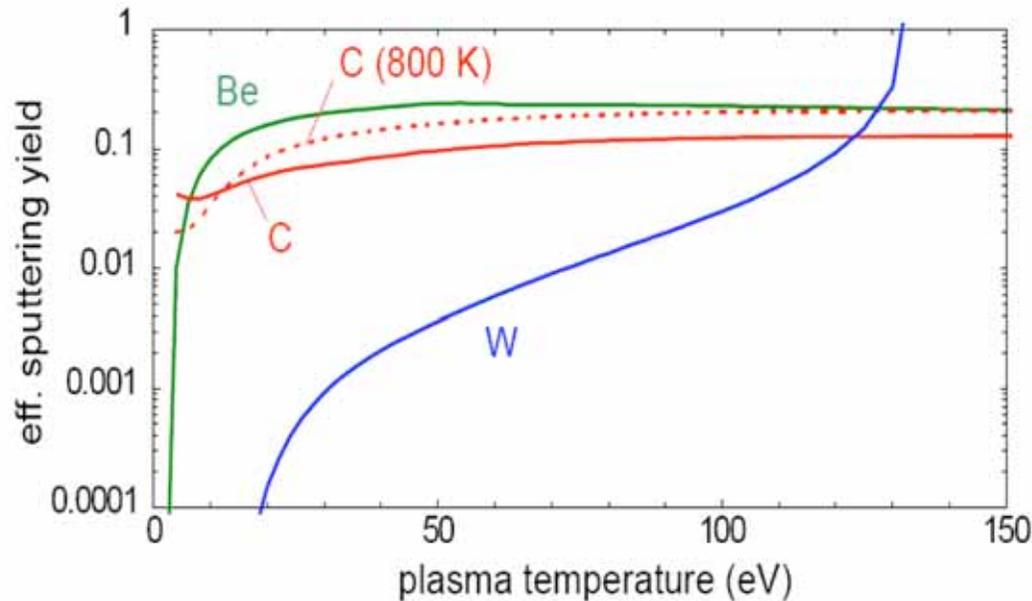


Impurity Transport during ELMs



- low ELM frequency (60Hz)
- Different impurities
- Edge-CXRS system
- Assume large, anomalous D no v inside ETB ($\rho < 0.98$)
- Find v and D at ETB ($\rho > 0.98$)

Fusion Power Plant Challenges: First Wall



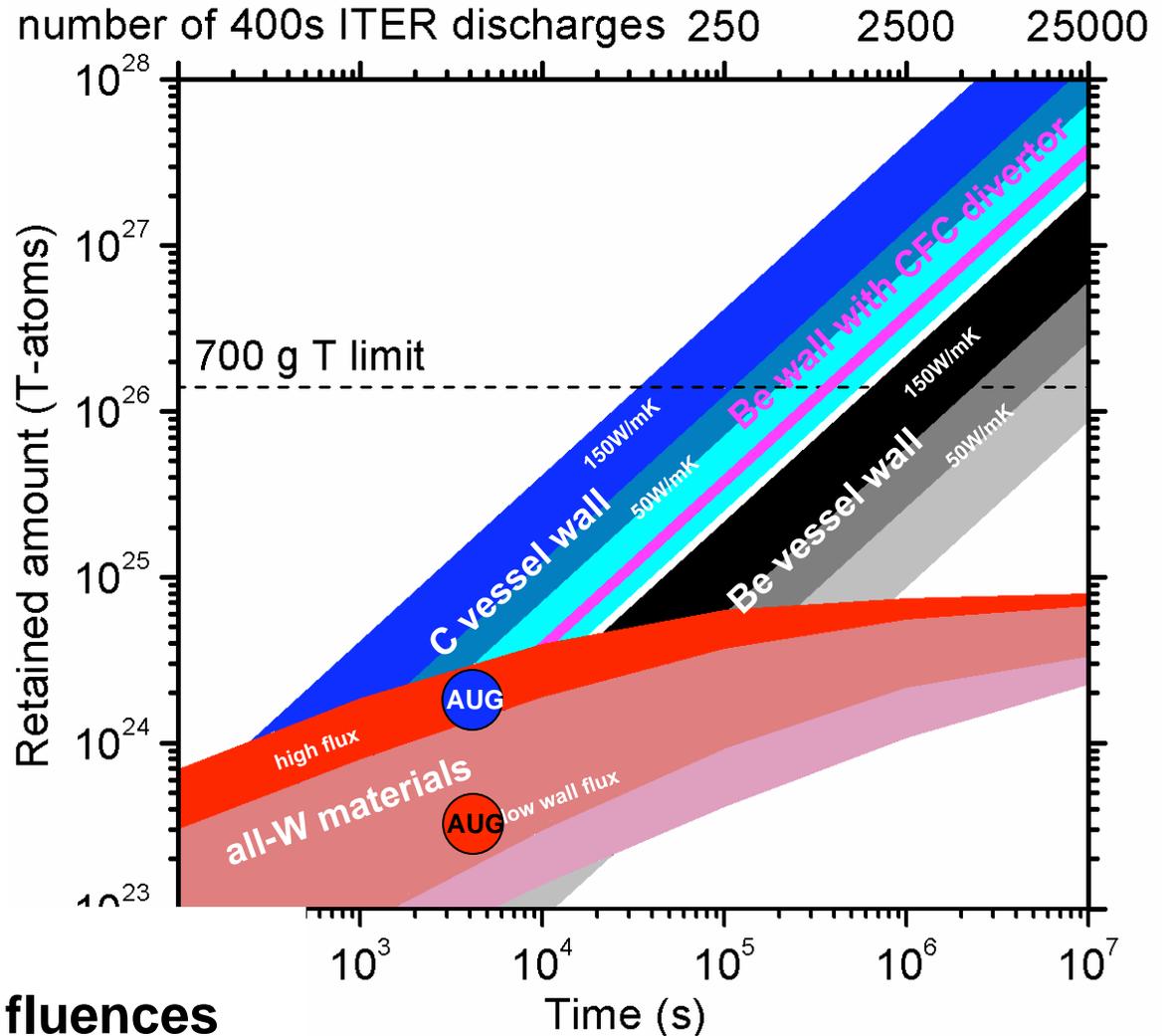
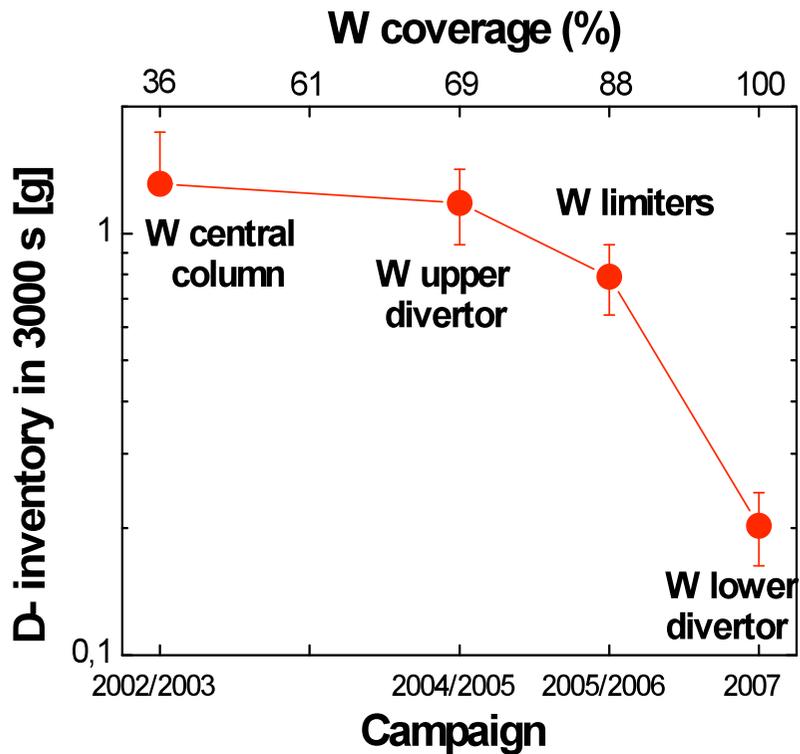
Full W-wall in ASDEX Upgrade

First wall material: withstand erosion / be compatible with plasma operation

- previously used low-Z (Carbon) materials have too high erosion
- C has additional problem of (chemical) fuel retention
- high-Z (metallic) materials better, but only very low concentration in plasma allowed (10^{-5} for W instead of 10^{-2} for C)

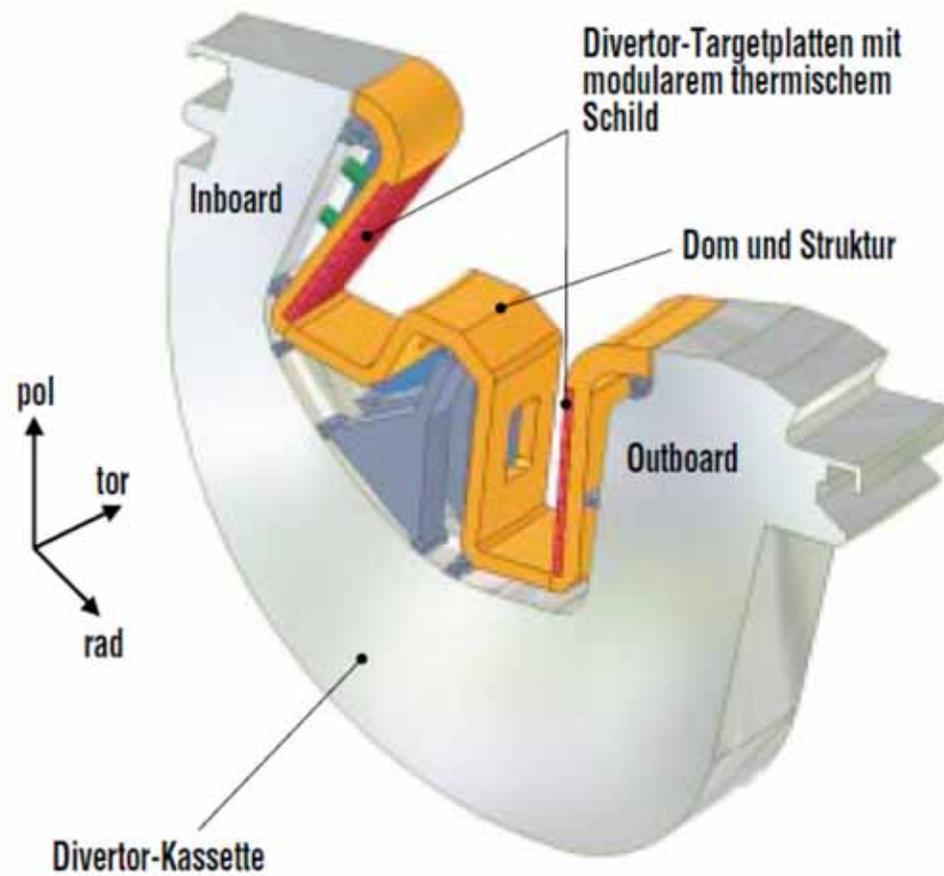
→ **First wall material choice intimately linked to plasma physics (exhaust)**

Deuterium inventory in AUG

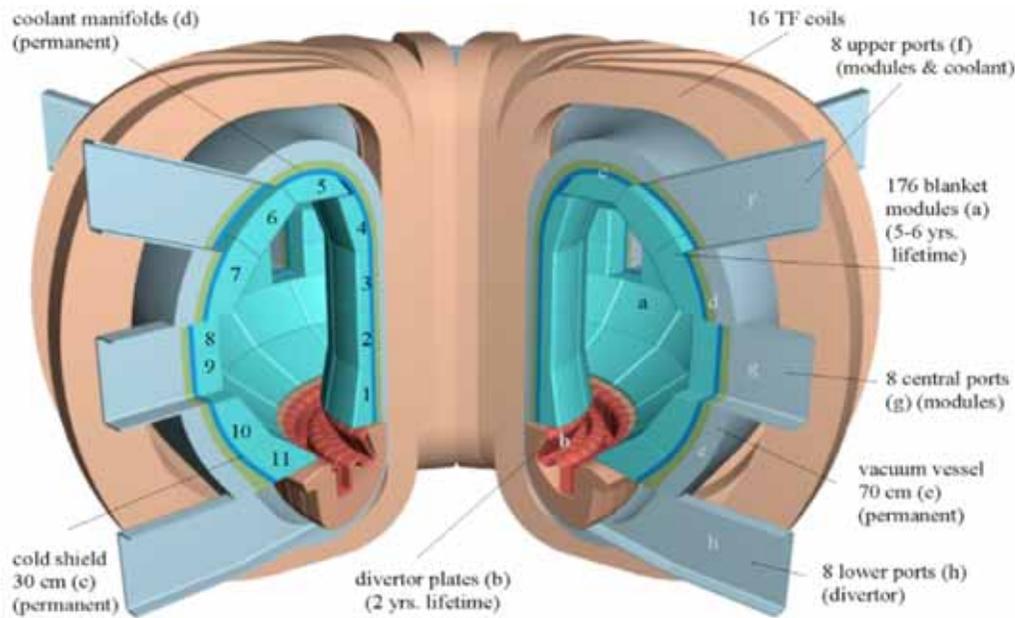


- Retention in W saturates at high fluences
- In AUG saturation reached for W (gas balance)

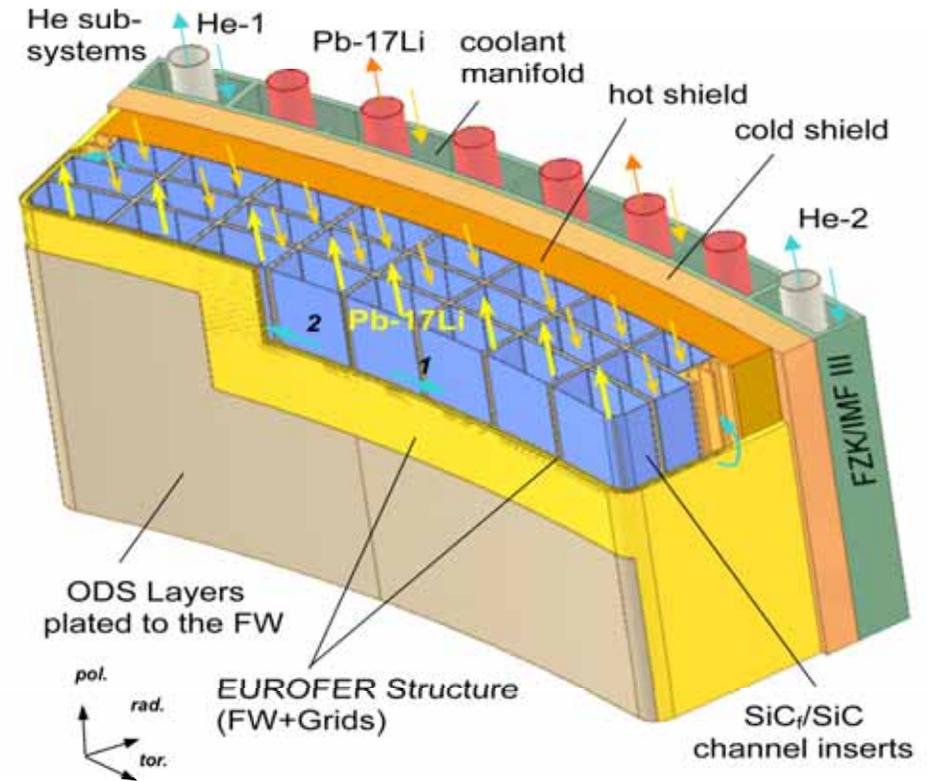
Collaboration ITPA SOL/DIV



Fusion Power Plant Challenges: Blanket



EU Power Plant Conceptual Design Study (PPCS)



“Dual Coolant” He-PbLi LM Blanket Design
 $T_{max} \geq 650^{\circ}\text{C}$, 80-150 dpa in DEMO

Breeding blanket must provide self-sufficient T-supply for fuel cycle

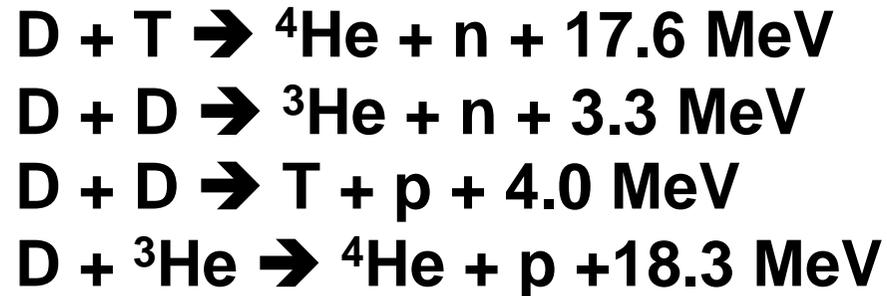
- **breeding ratio > 1 needed (1 neutron per fusion reaction)**

Blanket also crucial for providing high grade heat (the hotter the better)

Aufgaben des Brutblankets:

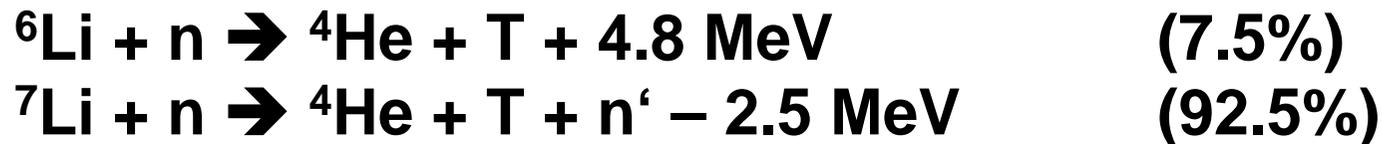
- 1. Abbremsung der Neutronen durch Stöße mit Atomkernen**
- 2. Abführen der entstehenden Wärme in den Kühlkreislauf**
- 3. Neutronenvermehrung um 30-50% (z.B. mit Beryllium, Blei)**
- 4. Erbrüten des notwendigen Tritiums aus Lithium**
- 5. Abschirmung der supraleitenden Magneten und Struktur**

Fusion



Höchster Wirkungsquerschnitt

Tritium-Brüten

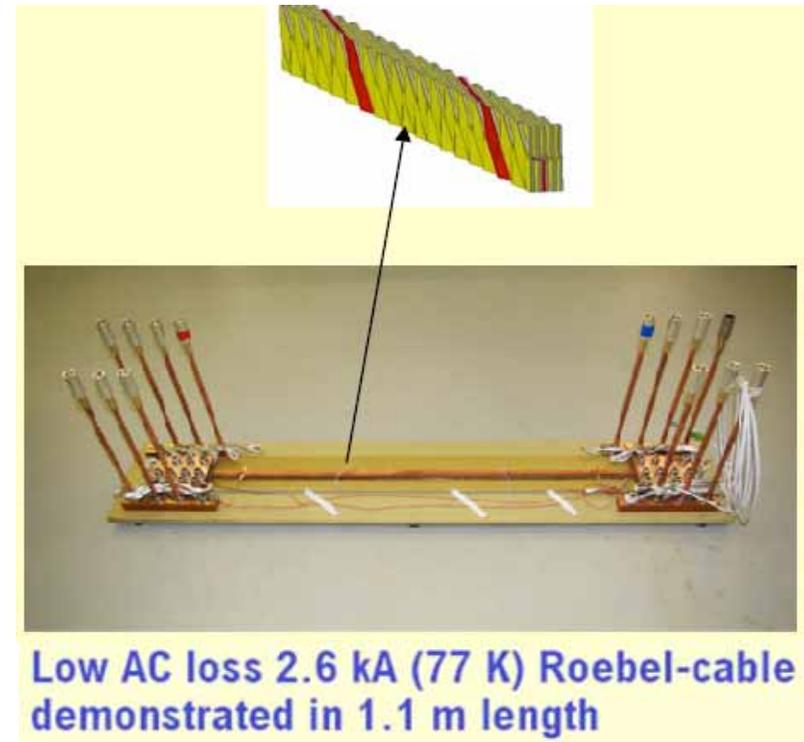
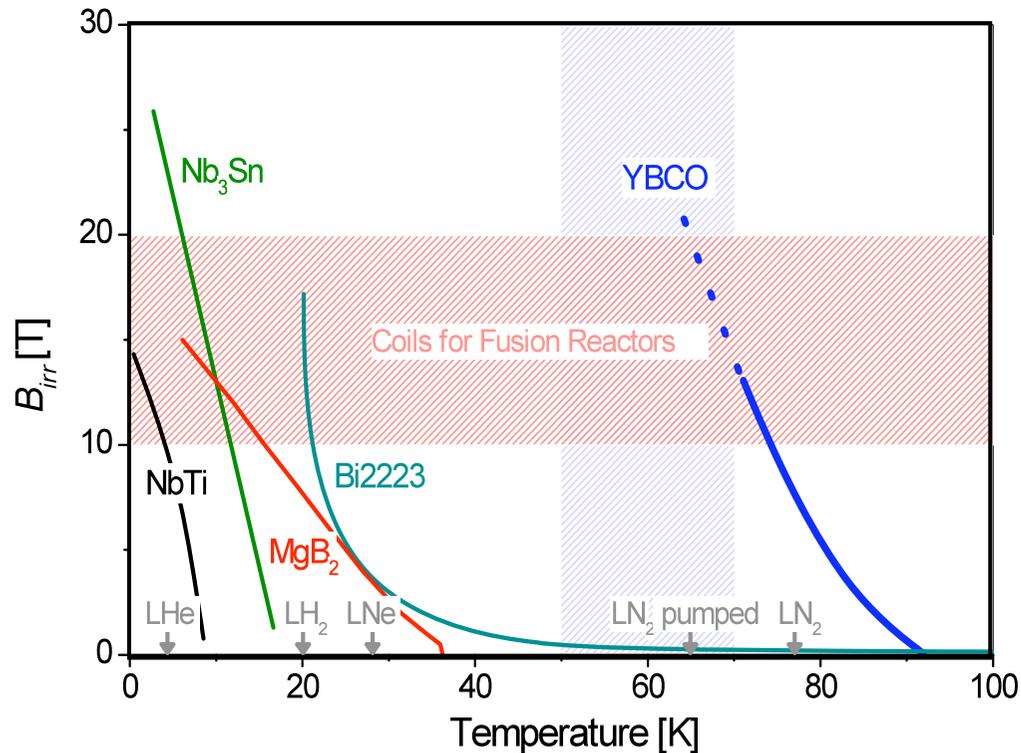


Neutronenvermehrung



Fusion Power Plant Challenges: Magnets

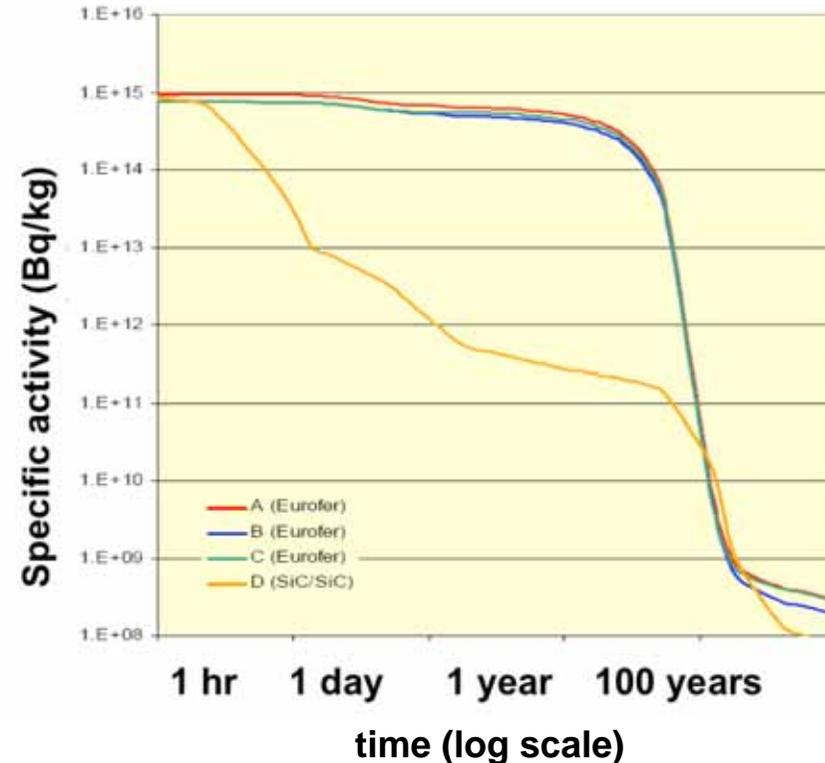
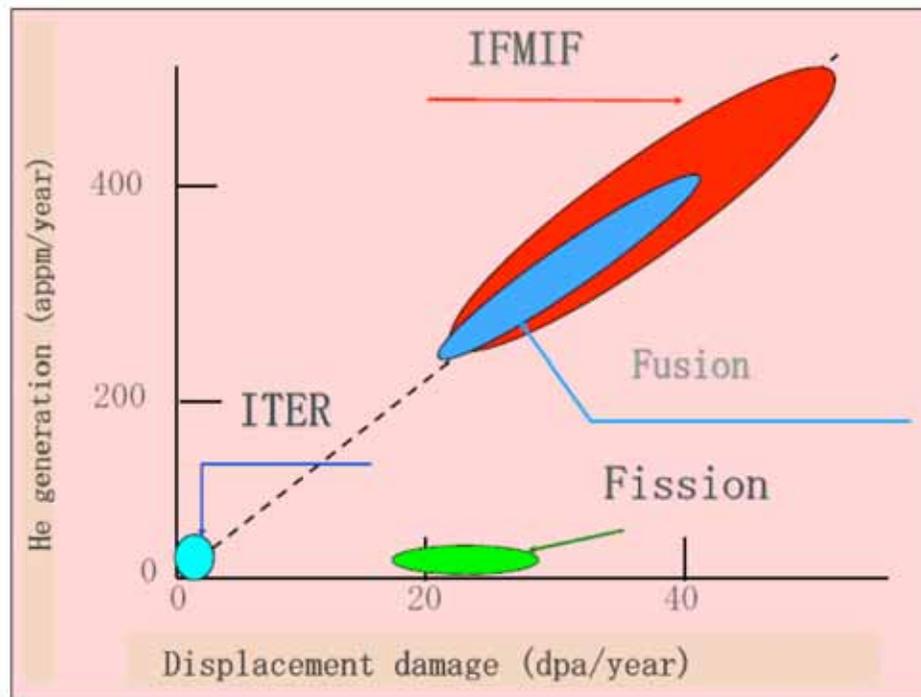
ITER TF and CS: Nb₃Sn, ITER PF: NbTi
W7-X: NbTi, KSTAR: Nb₃Sn



Fusion needs high field (≥ 10 T) superconducting magnets

- increase in field strength increases efficiency $\propto (P_{fus} \sim B^4 \text{ at const. } \beta)$
- progress in technology (high- T_c superconductors) could make plant less expensive (N₂ cooling instead of He cooling?)

Fusion Power Plant Challenges: Structural Materials

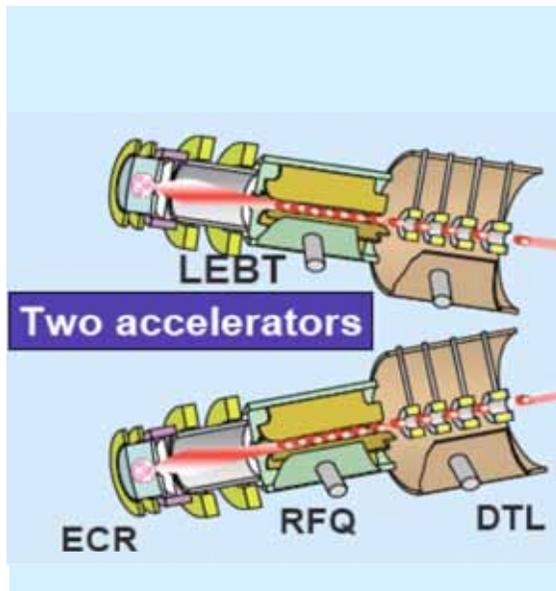


Progress in materials development needed to fully use fusion advantages

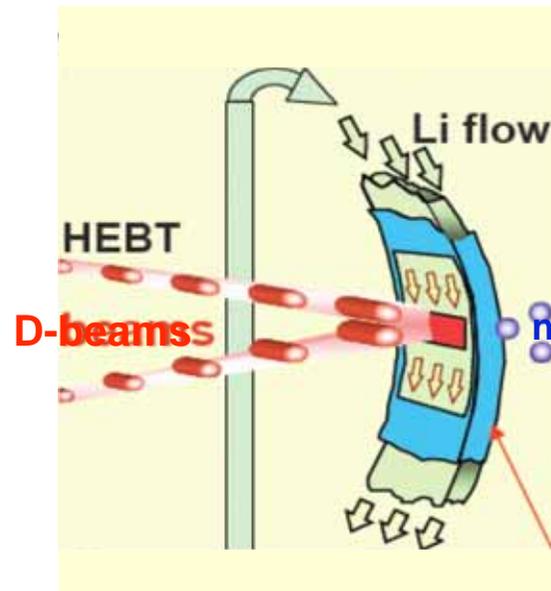
- **issues: structural stability at high temperature (Carnot efficiency) and under 14 MeV n-bombardment (rise of Ductile-Brittle Transition Temperature)**
- **EUROFER steels up to 550° C, better with ODS or SiC/SiC**
- **also reduce waste issues (fuel/burn products itself have short $\tau_{1/2} \leq 12$ yrs)**

The Next Steps – IFMIF

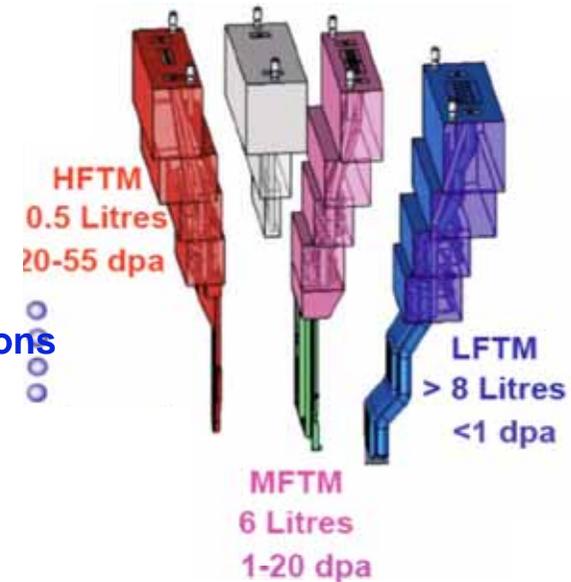
D-Accelerator



Liquid-Li Target



Test cell



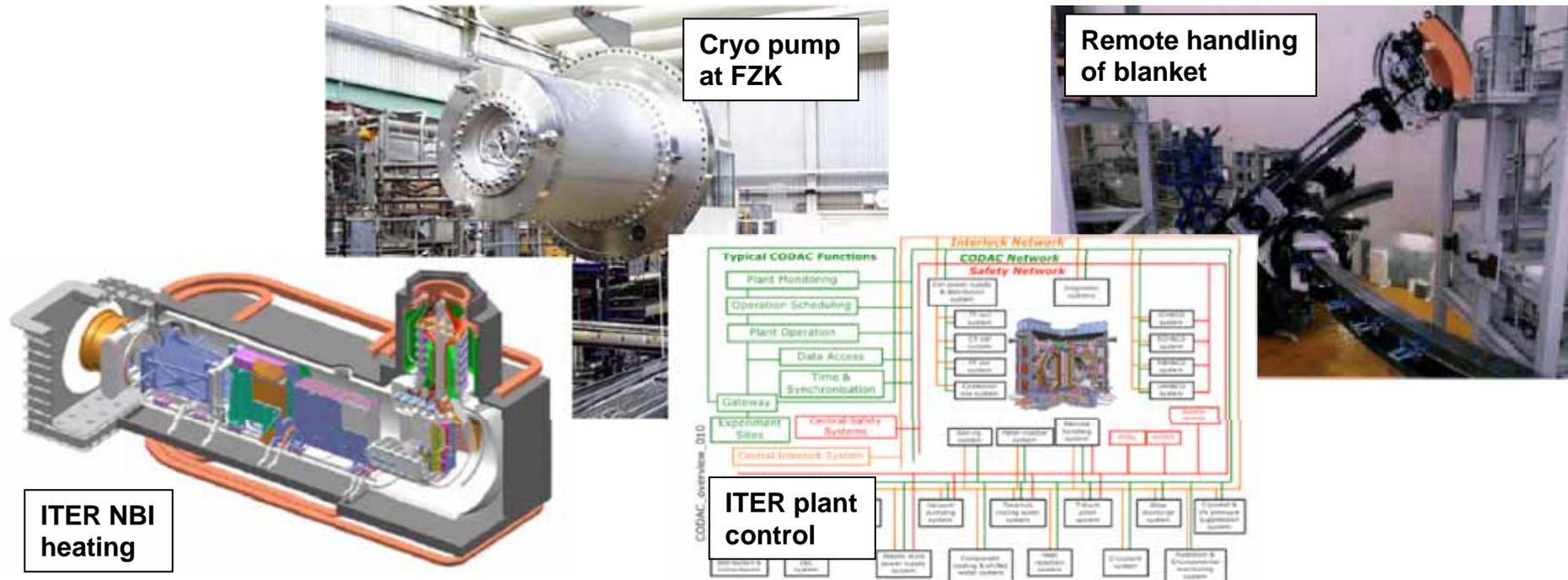
Construction of DEMO as first of a kind requires qualification of materials

- need dedicated facility with high n-fluence of fusion-specific spectrum

IFMIF can address this and must run several years before DEMO licensing

- high time to get IFMIF going if ,fast track‘ option should be kept
- present status: 5 years ,EVEDA‘ (Japan/EU), then ready to build

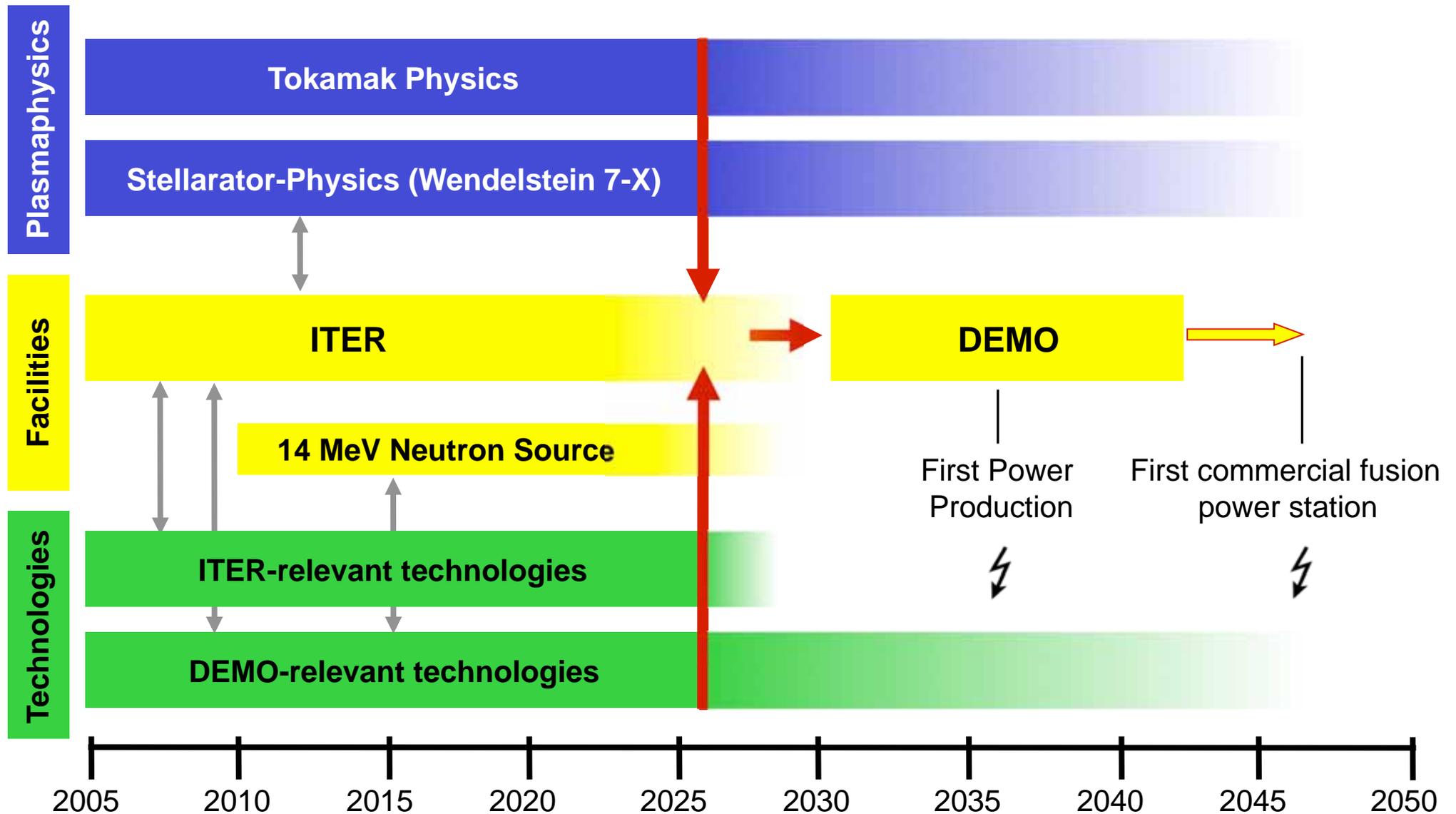
Fusion Power Plant Challenges: Auxiliaries



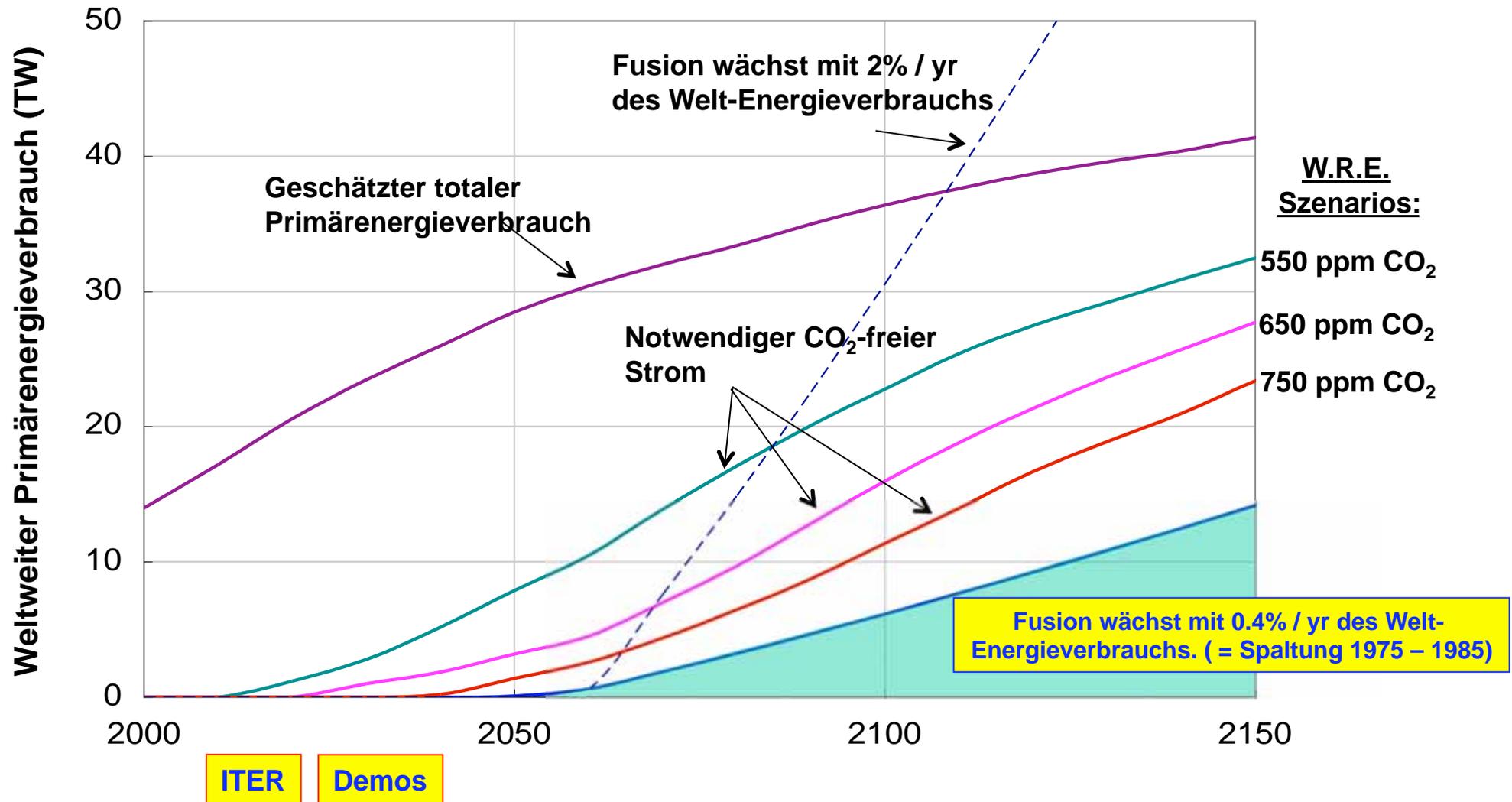
Fusion needs several specific auxiliaries, their performance entering into the plant efficiency in prominent ways

- **auxiliary heating and current drive – need reliability and efficiency**
- **Tritium plant – need on-site, contained Tritium processing**
- **diagnostics and real-time control systems – active control essential**
- **remote handling and hot cells – much more complex than fission**

Der Weg zu einem Fusionskraftwerk



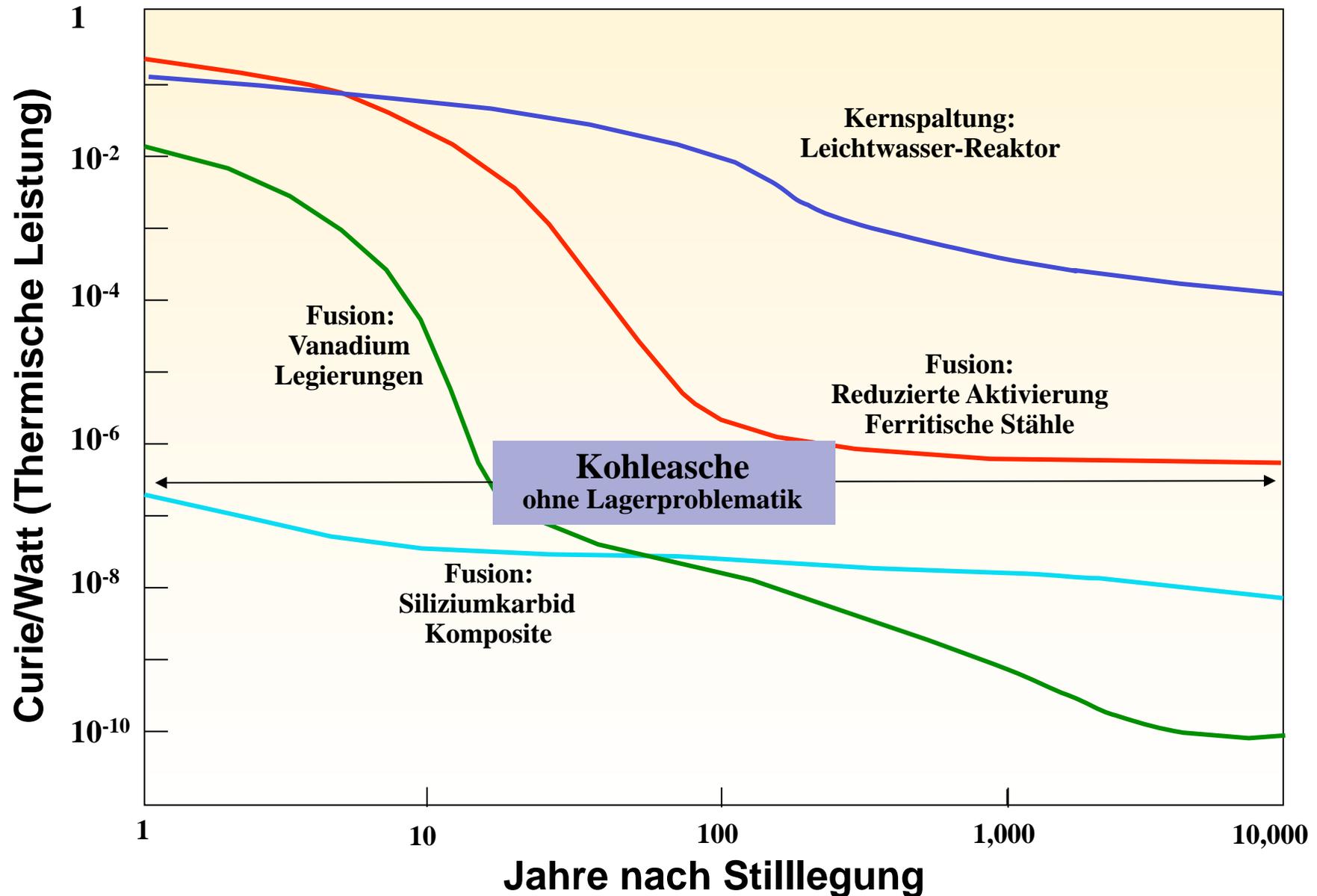
Fusion als wichtige Chance zur CO₂-Reduktion im 21. Jh



- **Brennstoffvorrat fast unbeschränkt und für alle Nationen verfügbar**
 - Deuterium (D aus Wasser) und Lithium (L aus Steinen und Meerwasser)
 - Praktisch unbegrenzte Vorräte
- **Vorteile für die Umwelt**
 - Keinerlei CO₂ Emissionen
 - Mittlere bis niedrige radioaktive Belastung, kein Endlagerproblem
 - Unfall- und Verunreinigungsrisiko minimal
- **Keine Explosionsgefahr, keine Kernschmelze**
 - <5 Minuten Brennstoff im Plasma
- **Niedriges Proliferationsrisiko nuklearer Materialien**
 - Keine spaltbaren Materialien
- **Extrem hohe Energie-Konzentration**
 - Minimale Landnutzung im Vergleich zu Solar-, Wind- und Wasserkraft
- **Unabhängig von Tages-, Jahres- oder Regionalen Variationen**
 - Keine Notwendigkeit zur Energiespeicherung oder globalem Transport

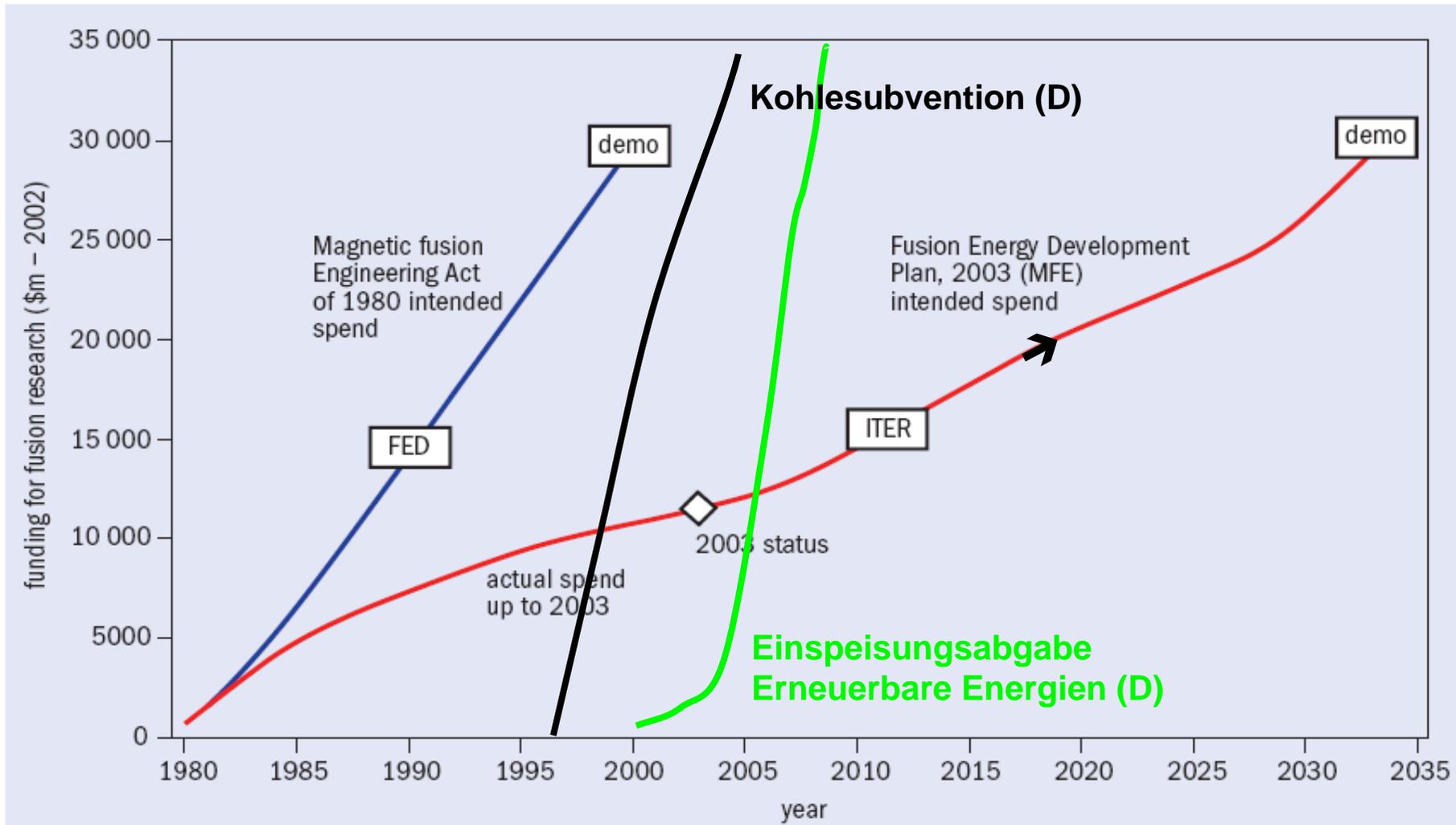
→ Deutliche Vorteile im Vergleich zu Spalteaktoren

Fusion benötigt keine geologische Endlagerung



Warum dauert die Fusion so lange ?

Ein wichtiger Grund: Die Finanzierung der großen Maschinen ist viel langsamer, als ursprünglich erhofft!
→ wir brauchen ein „Apollo-Programm“!



Weltweiter Energiemix für die 2. Hälfte des Jahrhunderts

