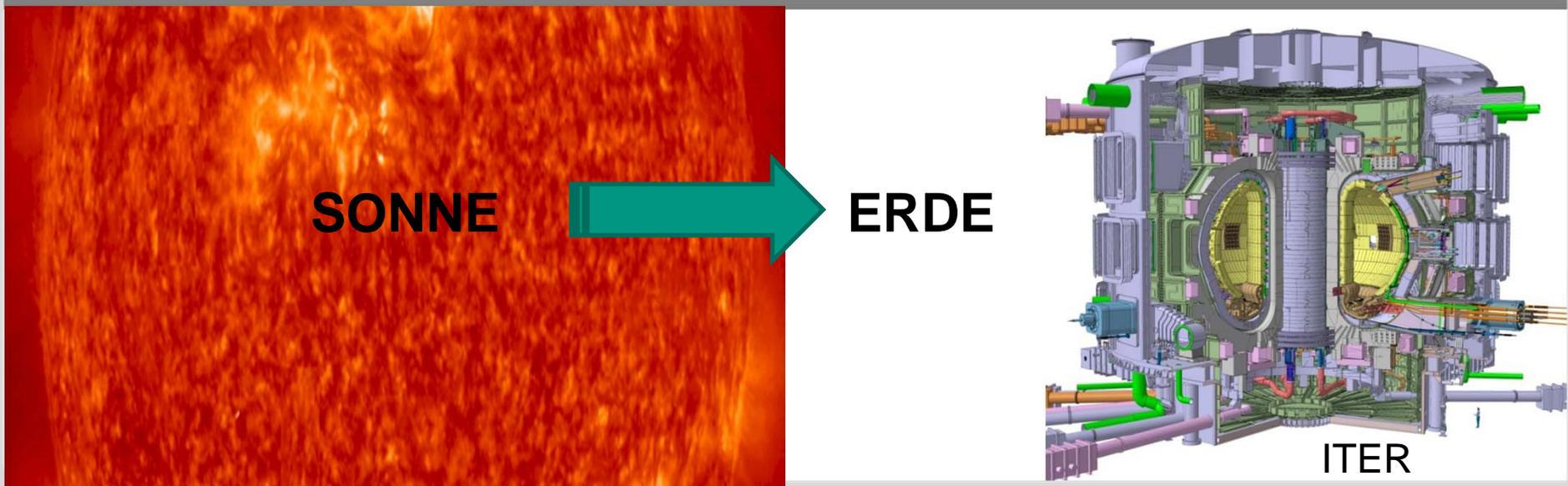


„Fortschritte in der Fusionsforschung -ITER, Wendelstein und Wege zu einem Fusionskraftwerk“

Robert Stieglitz & Klaus Hesch

Programm Fusion



Inhalt

- „Was ist Fusion ?“
- Wege zum Fusionskraftwerk- Europa
- Herausforderungen- Technologiefortschritte
- Aktuelle Projekte Wendelstein/ITER
- „Ausblick“

Was ist Fusion ?

Ein Beispiel: Zwei Wassertropfen



➡ Reduktion der Oberfläche führt zu einem Energiegewinn

WAS IST FUSION ?



Was ist Fusion ?

Umwandlung von Masse in Energie $E=m \cdot c^2$

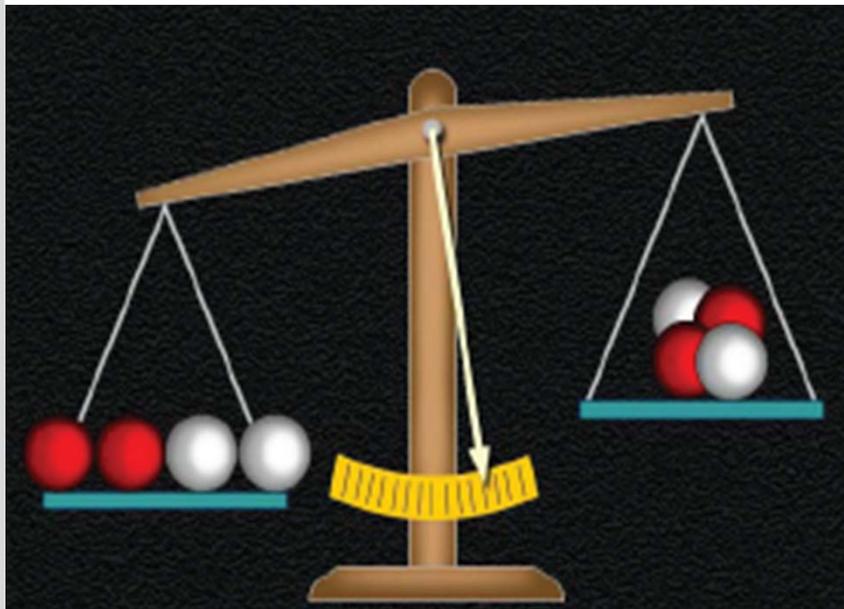
- Massensumme:
Nukleonen ($p+n$) > Zielement

- Massendifferenz Nukleonen und
Zielement = Massendefekt

- Beispiel:
Reaktion:

$${}^2D + {}^3T \rightarrow {}^4He + n$$
AMU

$$2.01 + 3.02 \rightarrow 4.0 + 1.01 + 17.6\text{MeV}$$



Weiteres Beispiel:

Umwandlung 1g Wasser in Energie:

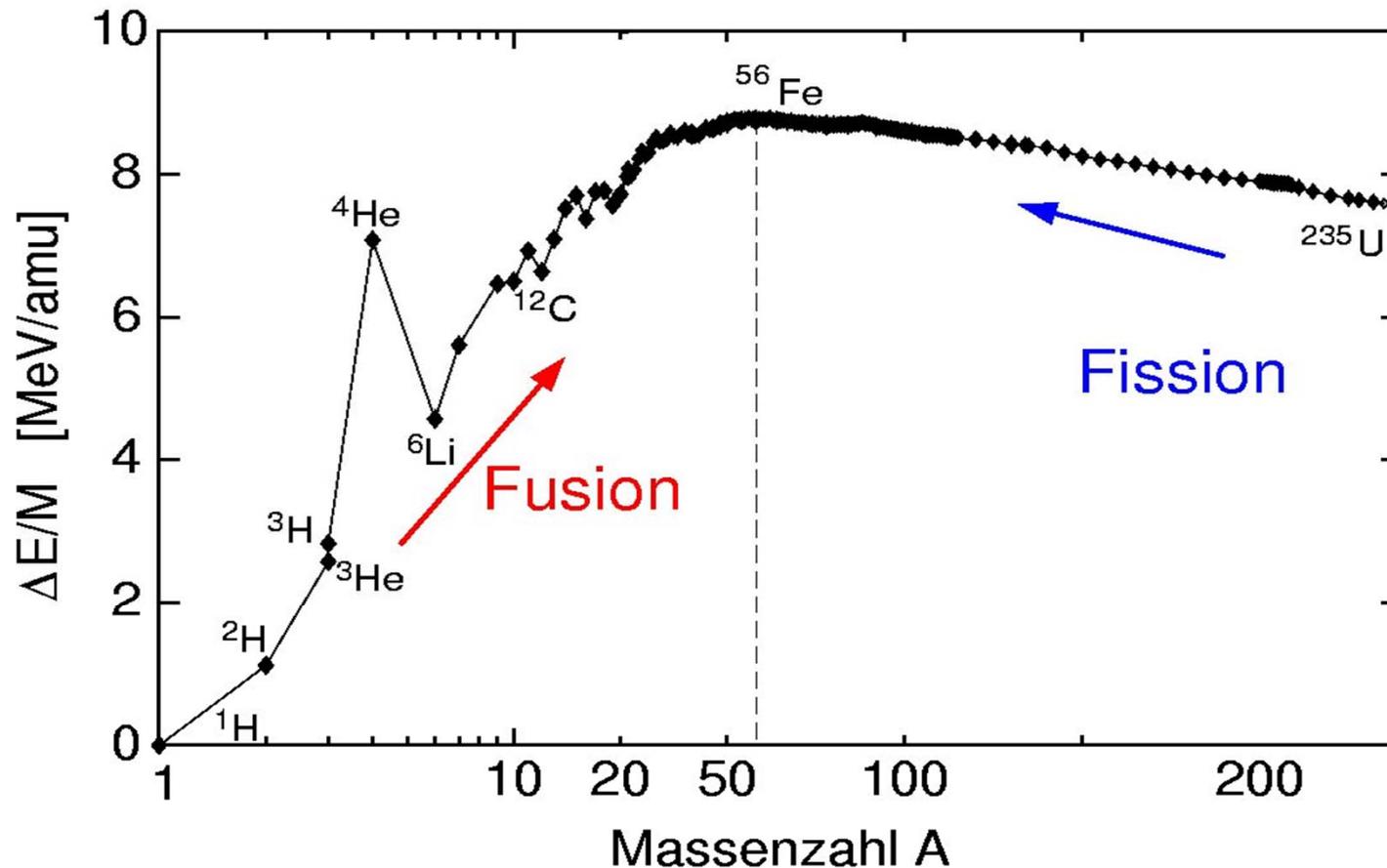
$$E = m c^2 = 10^{-3} \text{ kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Sprengkraft von 10.000t TNT !!

ENORME ENERGIEINHALTE

Was ist Fusion ?

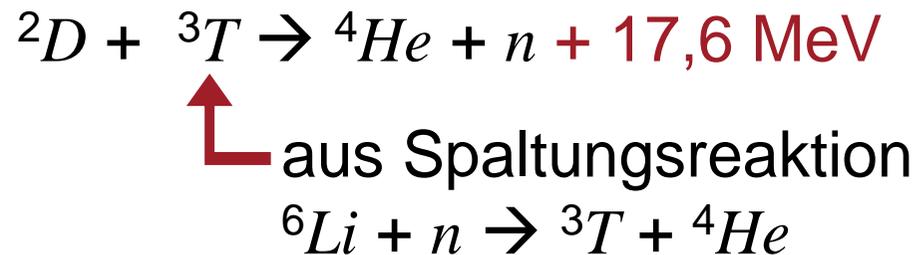
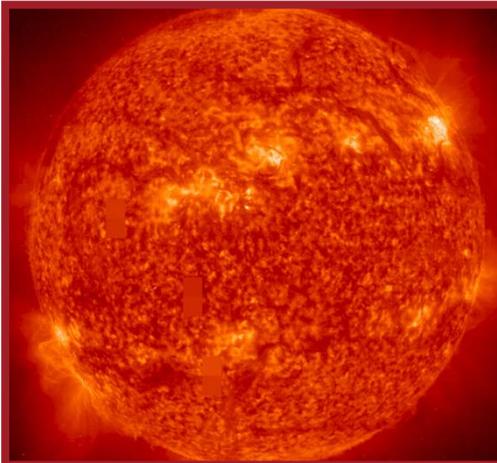
- Welche Elemente können fusionieren ?



Bindungsenergie E pro Nukleon als Funktion der Massenzahl A

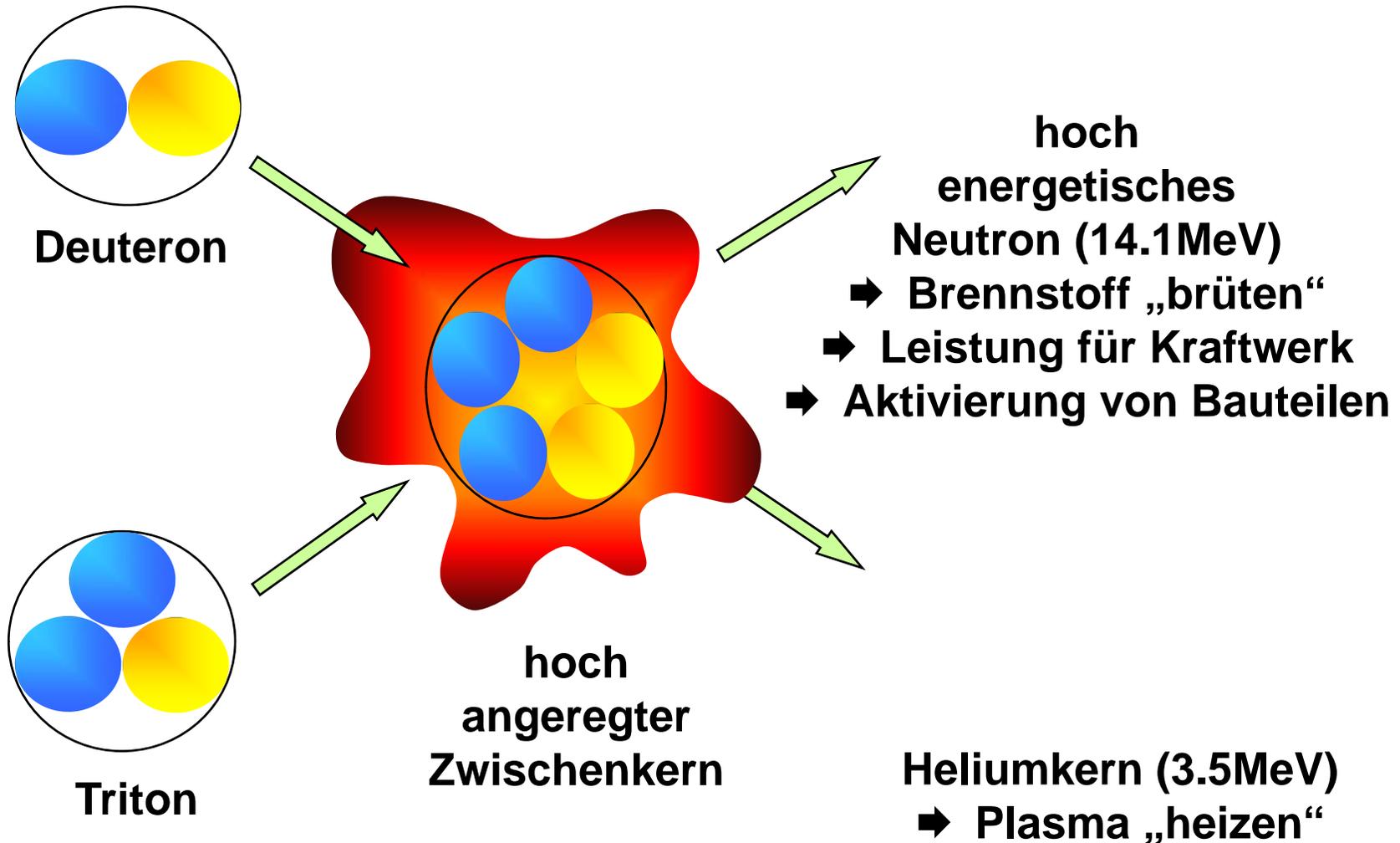
Was ist Fusion ?

Mögliche Kernreaktionen: SONNE \leftrightarrow ERDE



Was ist Fusion ?

Wie muss man sich die Reaktion vorstellen ?



Was ist Fusion ?

Gibt es genügend Brennstoff ?

- elektr. Jahresenergieverbrauch vierköpfiger Familie passt in Rucksack !

75 mg Deuterium
225 mg Lithium

zu finden in:

2 Litern Wasser und
250 g Gestein

Energiegehalt:

48 000 Millionen Joule
entsprechend
1 000 Litern Öl



Quelle: Forschungszentrum Jülich

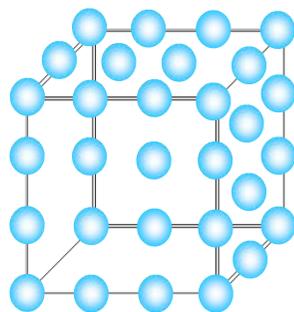
- Für ein Kraftwerk ($1000\text{MW}_e = 2.700\text{MW}_{th}$) benötigt man:

- Pro Tag ca. 410g Tritium (^3T) und 270g Deuterium (^2D)
- Pro Jahr ca. 150kg Tritium (^3T) und ~100g Deuterium (^2D)
- ➔ entspricht Gewicht von 5 Säcken Zement !!!!!

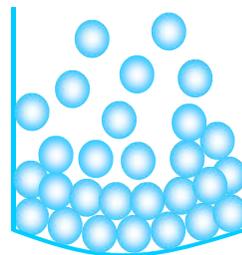
Was ist Fusion ?

Was ist ein Plasma ? Plasma- “Feuer der Fusion”

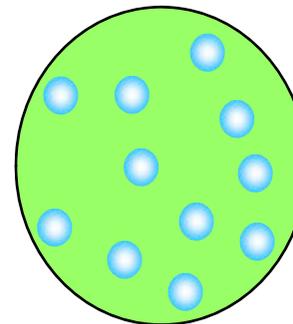
- **Betrachtung: Plasma = “Aggregatzustand”**



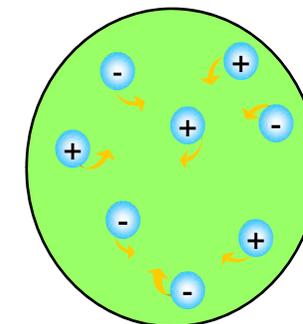
kalt
fest: Eis



warm
flüssig: Wasser



heiß
gasförmig: Dampf



100.000 °
Plasma

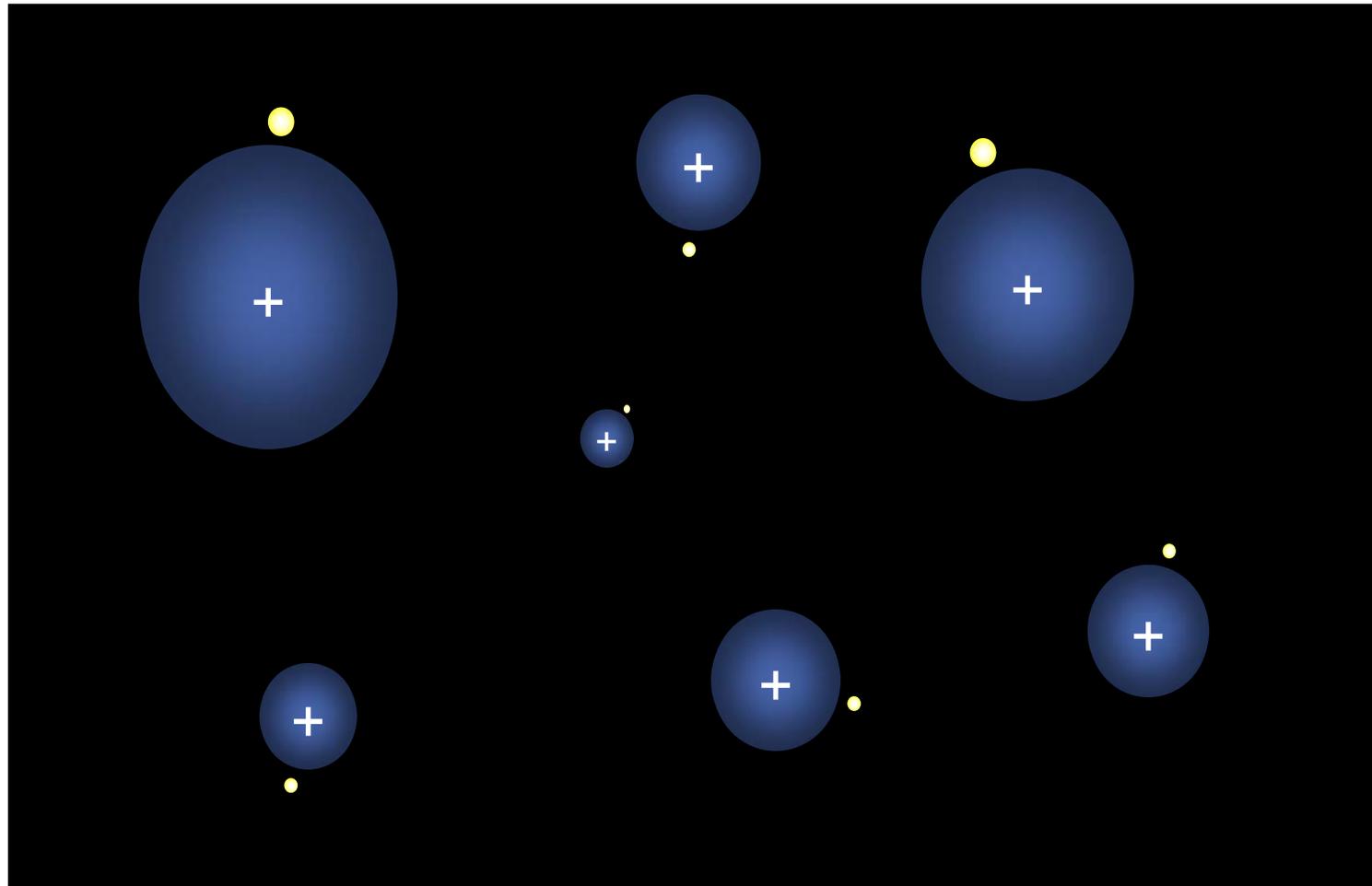
Was passiert im Plasma ?

- Zerfall neutraler Atome in Ionen und Elektronen.
- therm. Energie \approx Größenordnung der Ionisationsenergie (13.6eV bei H₂).
- Transition Gas \rightarrow Plasma kontinuierlicher Prozess (kein Phasenübergang).

Was ist Fusion ?

Was ist ein Plasma ?

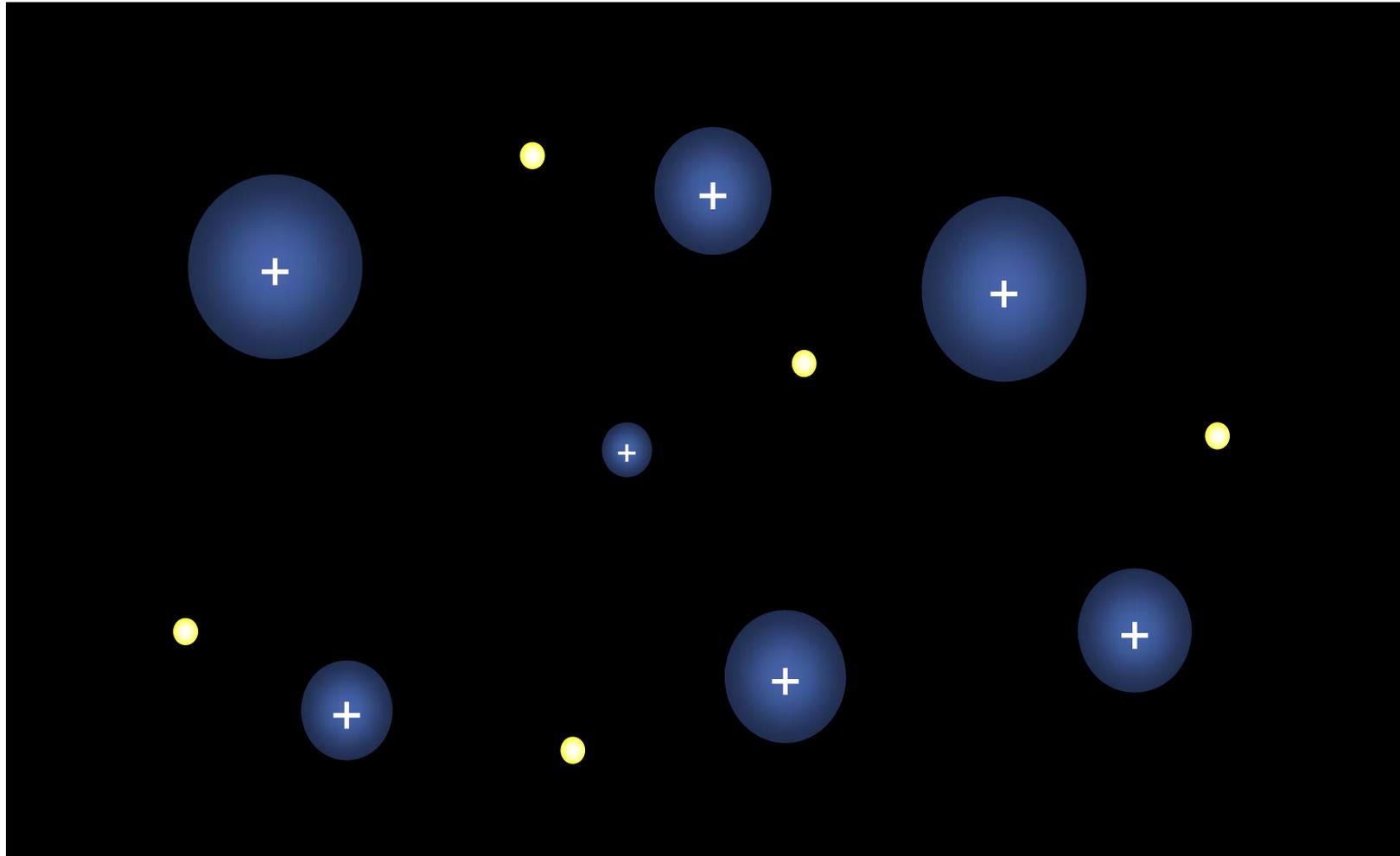
Beispiel: Atombewegung des Wasserstoffs bei $T < 10^5 \text{°C}$ → **KEIN PLASMA**



Was ist Fusion ?

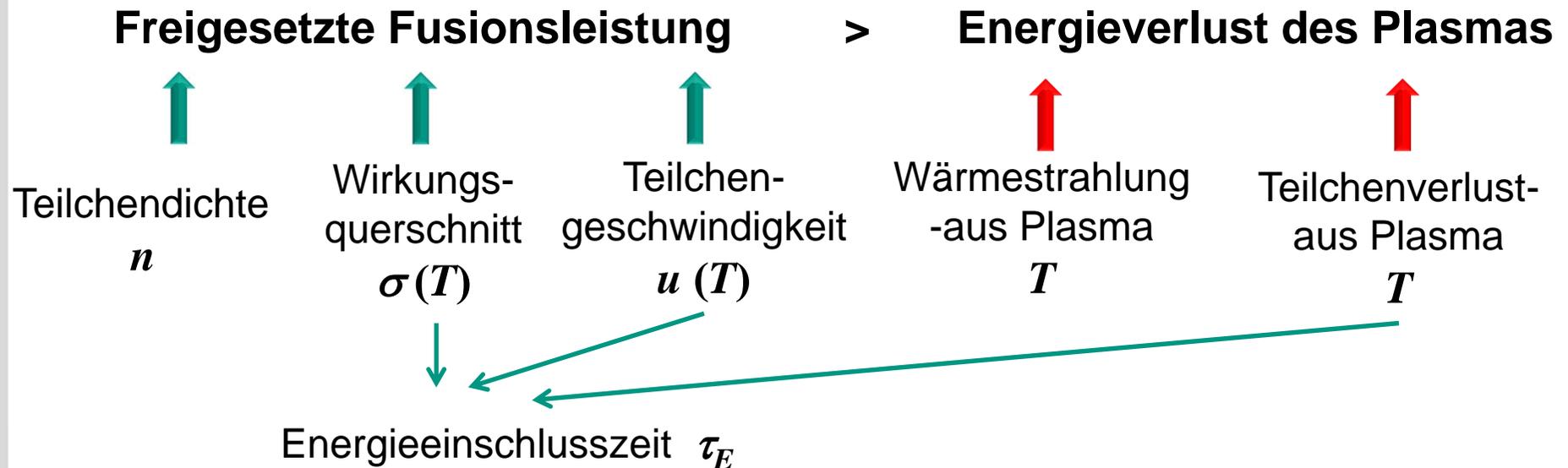
Was ist ein Plasma ?

Beispiel : Atombewegung des Wasserstoffs bei $T > 10^5 \text{°C}$ → **PLASMA**



Was ist Fusion ?

Wie zünde ich ein Plasma ? - Zündbedingung



Ergebnis: „Tripelprodukt“: $n T \tau_E > 3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$

n : Teilchendichte (Teilchen / m³)

T : Temperatur (10-20keV= 100 – 200 Mio K)

$n \cdot T$: Plasmadruck (ca. 4.8bar · s)

τ_E : Einschlusszeit (bei ITER ca. 3.7s)

Was ist Fusion ?

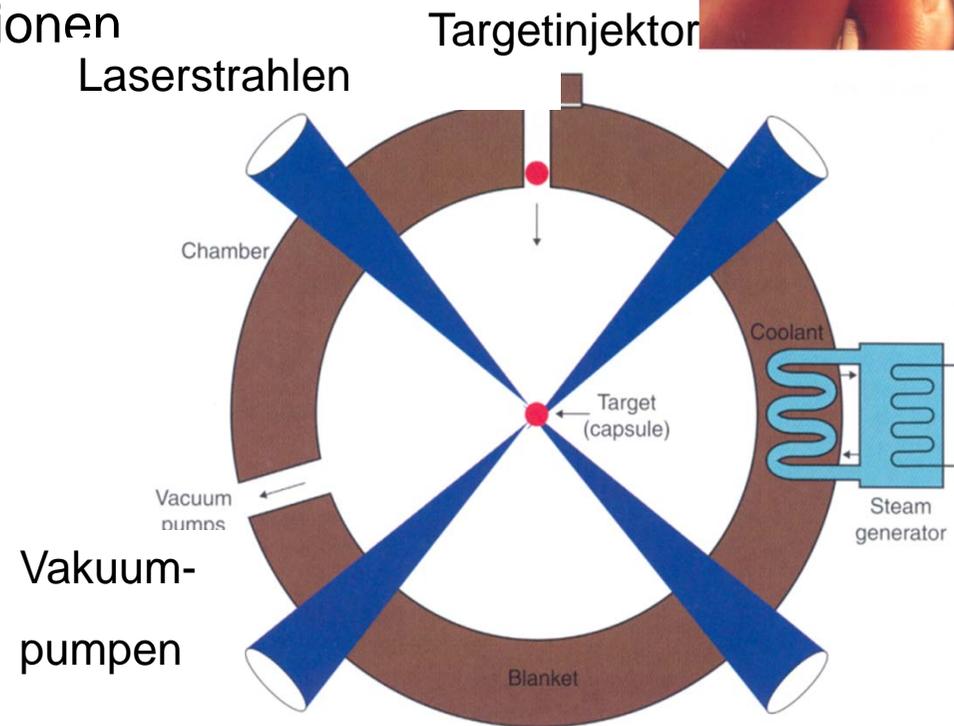
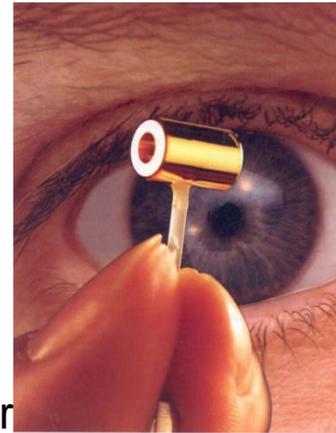
Wie schlieÙe ich Plasma ein ? – techn. Optionen

■ Trägheitseinschluss

- Kompression kleiner *D-T*-Kugeln (TARGET)

durch **schnellen** Energieeintrag.

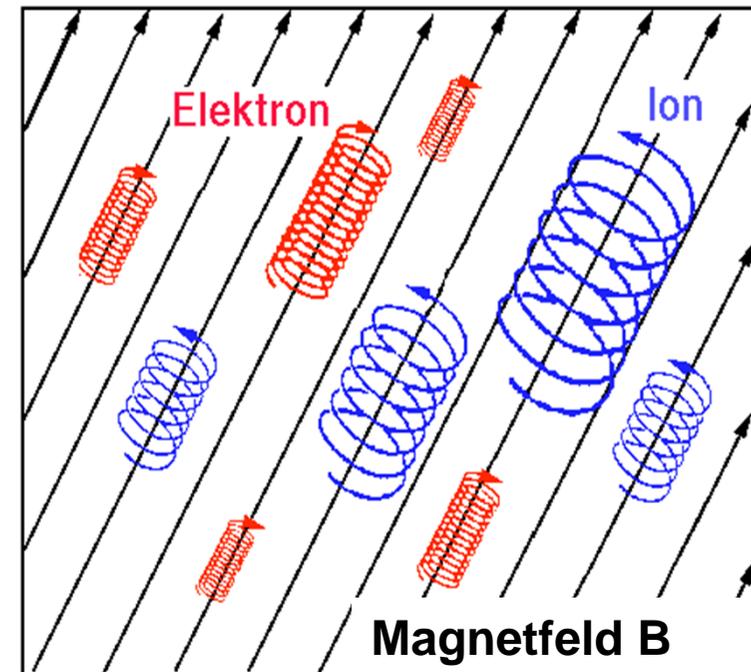
- ➔ kleine Thermonuklearexplosionen (Mini-H-Bombe). (diskontinuierlich)



Was ist Fusion ?

Was bewirkt der Magnetfeldeinschluss ?

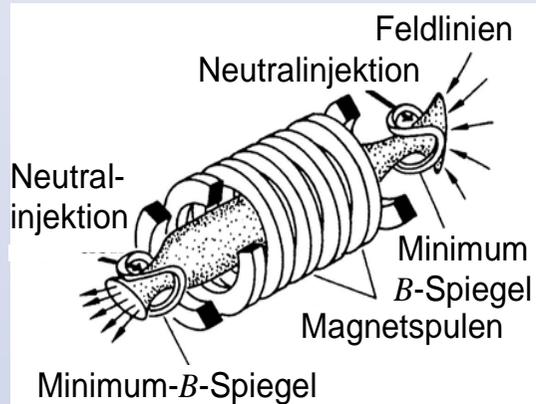
- Elektronen, Ionen fliegen entlang Feldlinie
- ➔ unendliche therm.& elektr. Leitfähigkeit $\parallel \mathbf{B}$
- Elektronen & Ionen rotieren auf unterschiedlichen Kreisbahnen
- ➔ Heizung mit der Eigenfrequenz möglich (ICRH, ECRH, LHH)
- ➔ Aber unterschiedliches Stoßverhalten $\perp \mathbf{B}$
- Gradienten des Magnetfeldes führen zu Ladungstrennung
- ➔ Plasmainstabilität (Verdrillung von \mathbf{B} erforderlich ➔ zusätzliche regelbare Spulen)
- ➔ **PLASMA berührungslos in einem Torus (Donught) einschließbar !!!**



Was ist Fusion ?

Wie schlieÙe ich magnetisch ein Plasma ein ?

■ Magnet. Spiegel

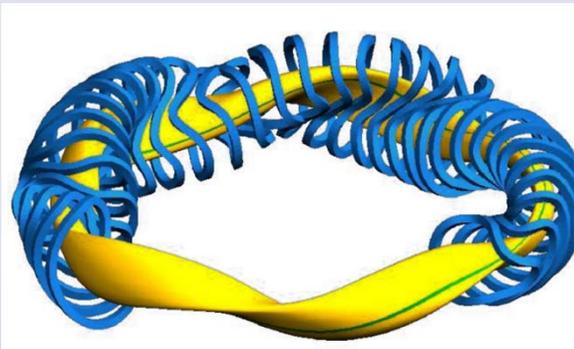


- Einfacher Aufbau
- Hohe Endverluste
- Komplexe Plasmasteuerung



TMX-U Livermoore
ging nie in Betrieb

■ Stellerator

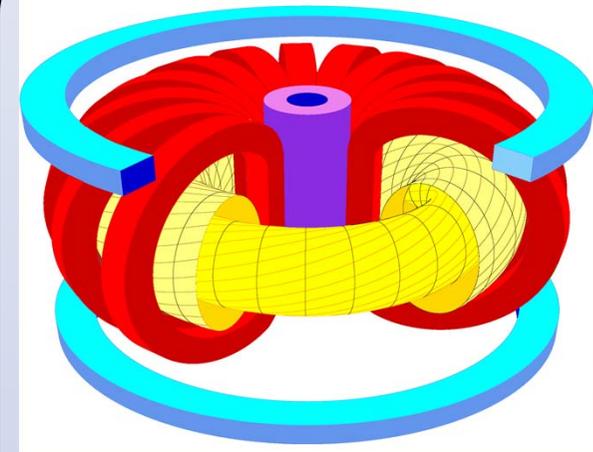


- kein Plasmastrom
- ➔ stabiles Plasma
- stationärer Betrieb
- komplexer Aufbau Spulen



Wendelstein in Betrieb
(weniger Erfahrung)

■ Tokamak



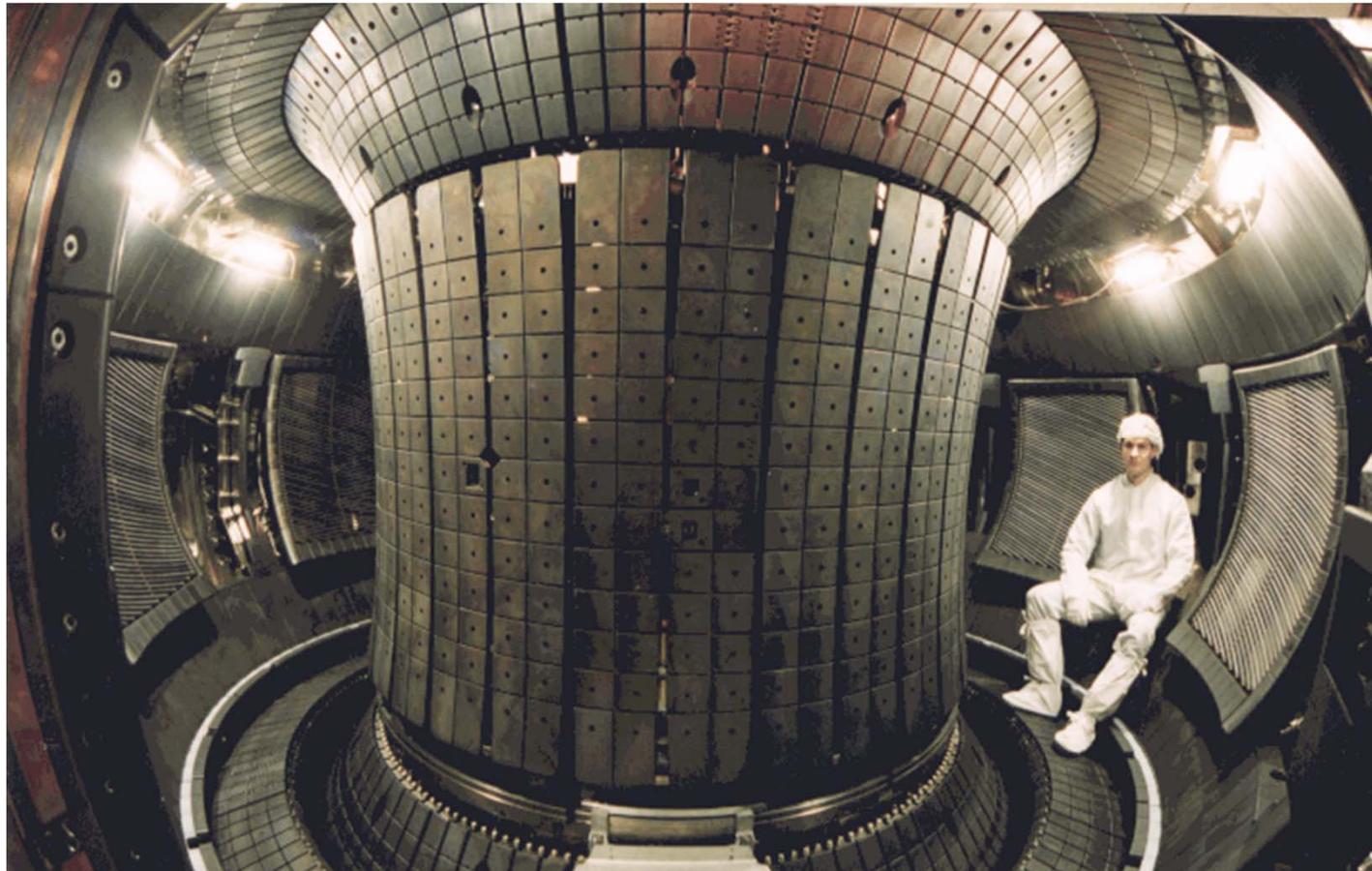
- Einfacher Aufbau und Betrieb
- Plasmastromstrome
- ➔ Instationäre Maschine



Grundlage ITER und DEMO

Plasmaphysik- magnet. Einschluss

- ~~Was ist die Maschine?~~ **Was ist die Maschine?**
- Stabiler Einschluss in H-mode



Plasmaphysik- magnet. Einschluss

- Kann man das rechnen? Ziel Voraussage für einen Reaktor

Global Gyrokinetic Simulation of
Turbulence in
ASDEX Upgrade



GENE

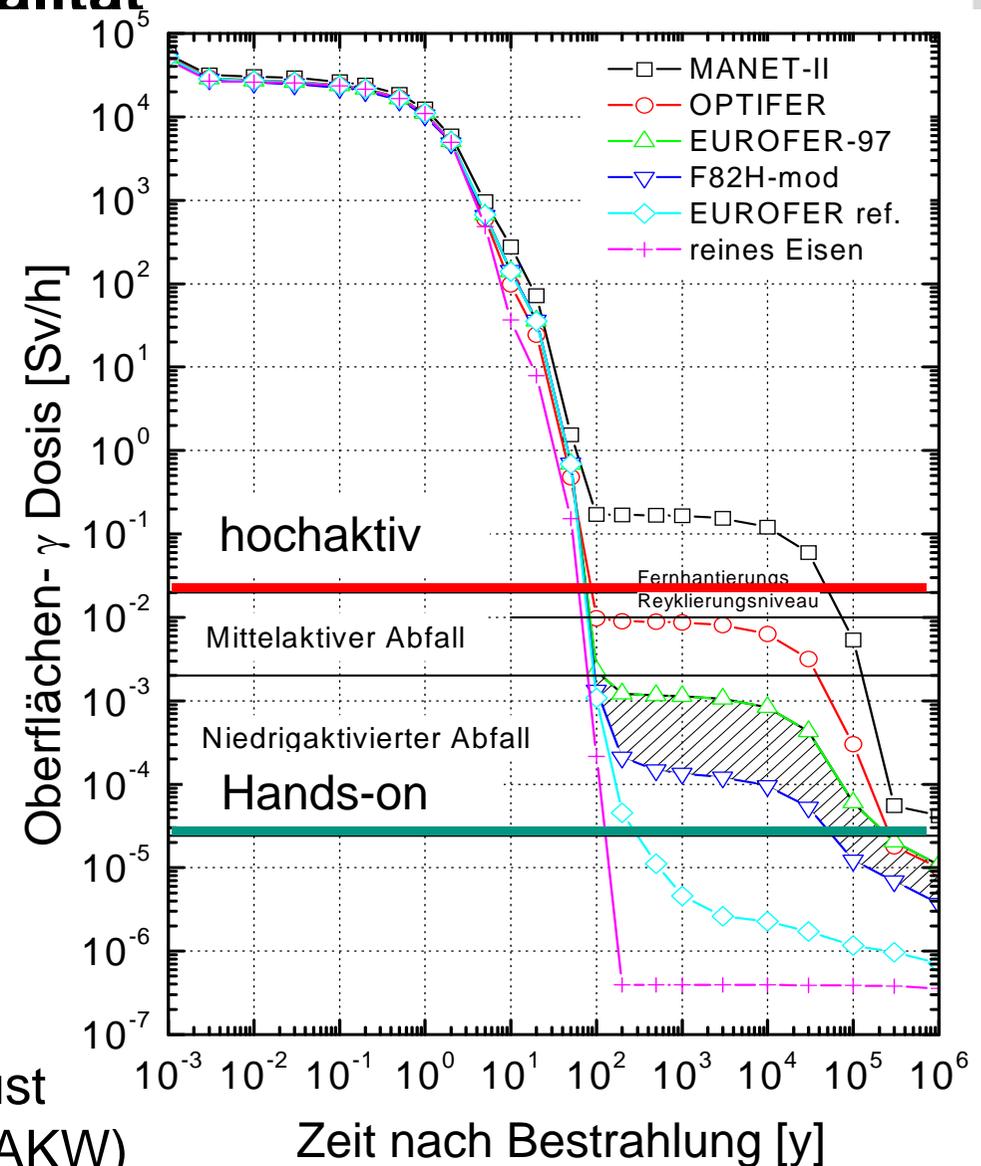
gene.rzg.mpg.de

- Gute Übereinstimmung mit Experiment - Defizite noch an Rändern
- Anisotropes Teilchenverhalten

Was ist Fusion ?

Fusion, Radioaktivität, Kritikalität

- Keine primäre Radioaktivität (außer ^3T -Tritium- 12.3 HWZ)
- Neutronen induzieren Kernreaktionen
 - ➔ Bildung neuer Nuklide (Absorption, Spaltung, Aktivierung)
 - ➔ Intelligente Stoffauswahl
 - ➔ kurzlebige Aktivierung (~ 100 Jahre)
 - ➔ Aktivierte Stoffe nicht volatil
- Hoher Neutronenfluss
 - Nachwärmeerzeugung
 - Schädigung des Materials (Schwellen, Versprödung)
 - ➔ Ingenieurherausforderung
- Keine Leistungsexkursion bei Verlust Zündbedingung (im Gegensatz zu AKW)



WEGE ZUM FUSIONSKRAFTWERK

EU Fusionsstrategie – "Fahrplan"

■ ITER: Erstes brennendes Fusionsplasma ($Q = 10$)

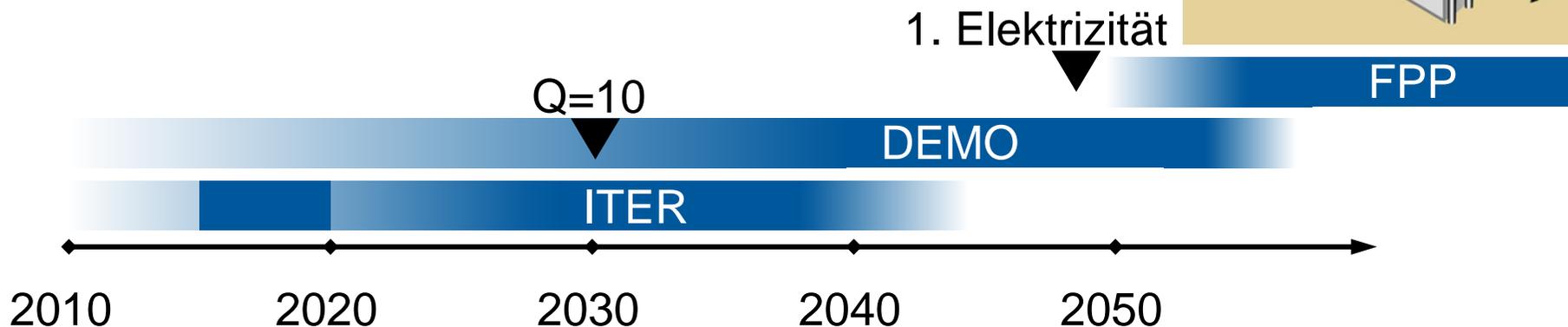
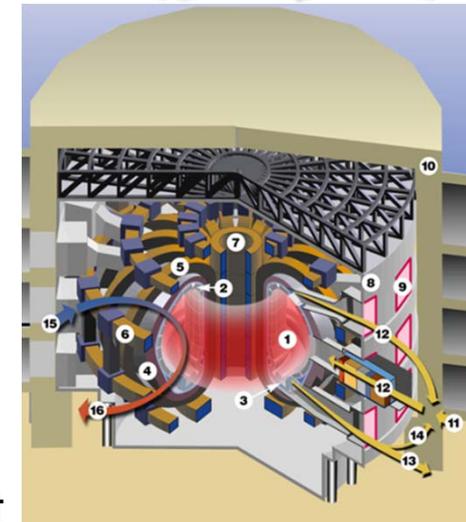
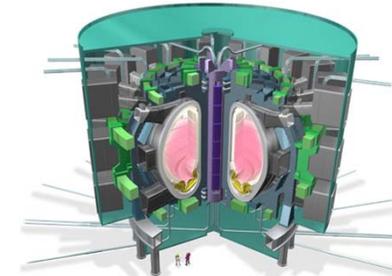
- Essentielle Physik & Technologieträger für DEMO

DEMO: Demonstration der Machbarkeit eines Fusionkraftwerks (FPP)

- Wahrscheinlich Tokamak
- Nettoproduktion elektr. Stroms ($Q_{eng} > 1$)

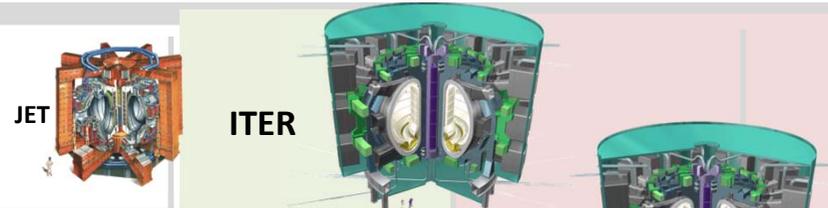
FPP: Kommerzielles Fusionskraftwerk

- Stellarator oder Tokamak



Missionen

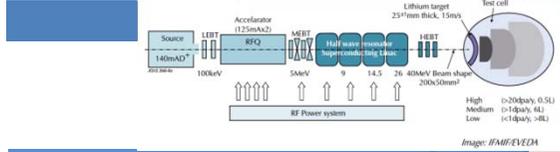
1. Plasmabetrieb
2. Wärmeabfuhr
3. Materialien
4. Tritiumbrüten
5. Sicherheit
6. DEMO
7. Kosten
8. Stellarator



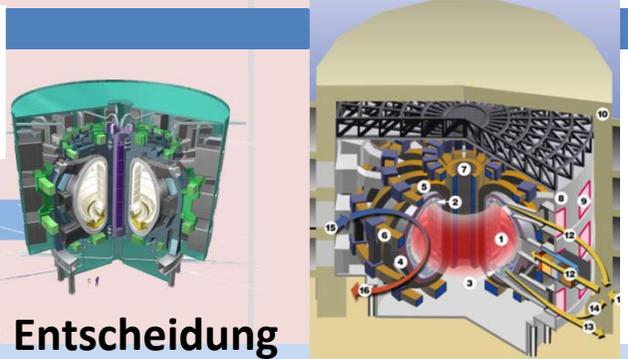
Induktiv Stationär



Basisstrategie
Verbesserter Einschluss & Materialien



ITER Testblanketprogramm
Parallele Blanketkonzepte



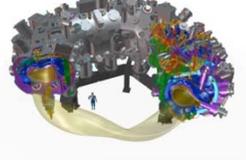
DEMO Entscheidung

Fusionselektrizität

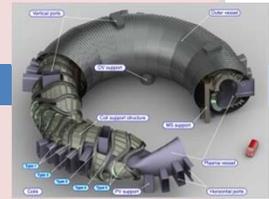
CDA + EDA **Aufbau** **Operation**

Kapitalkostenreduktion und Langzeittechnologien

W7-X
Stellaratoroptimierung



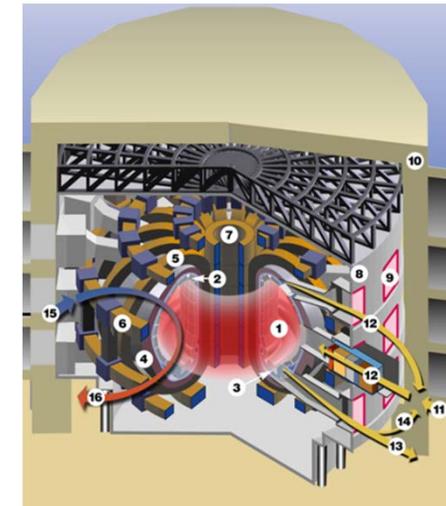
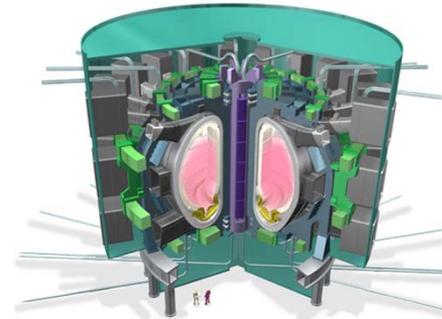
Brennendes Plasma im Stellarator



EU “Fahrplan” – zentrale Aspekte

ITER

- $Q = 10$, 500 MW Fusionsleistung
- nukleare Umgebung (~ 1 dpa)



DEMO

- Nettostromerzeugung ($Q_{eng} > 1$)
- Qualifikation von Materialien bei hohen Neutronenflüssen (~ 100 dpa)
 - ➔ Materialbestrahlungseinrichtung IFMIF
- Tritiumselbstversorgung
- einziger Schritt zwischen DEMO und Kraftwerk
- DEMO Design muss parallel zu ITER entwickelt werden

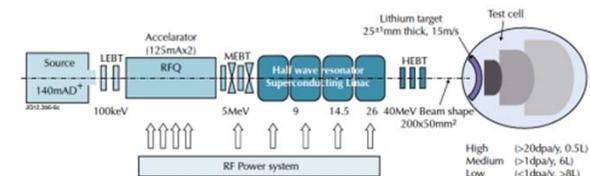
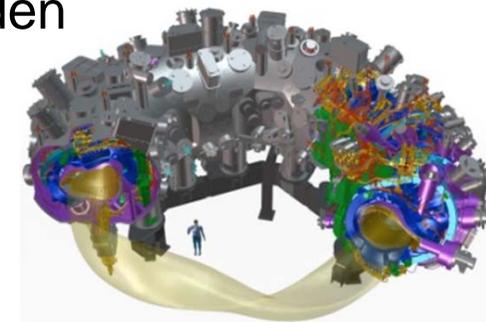


Image: IFMIF/EVEDA

Stellarator

- inhärent stationär
- gutmütige Betriebsbedingungen



Eckpunkte auf dem Weg zum Fusionskraftwerk

- **Leistungsfähigkeit eines Fusionskraftwerks definiert durch**
 - Tripelprodukt: Dichte, Temperatur, Einschlusszeit
 - ➔ Plasmaexperimente bei prototypischen Werten
 - Fusionsleistung und Effizienz (Kraftwerk)
 - ➔ Technologien zum Betrieb, Brennstoff- u. Leistungsmanagement
- **Grundvoraussetzung:**
 - Hinreichendes Plasmavolumen (➔ Gesamtgröße)
 - Technologienachweise (prinzipielle Machbarkeit, Effizienz, Sicherheit)
- **Energieversorgungsaspekt**
 - (Quasi-)stationäres Kraftwerk ➔ DEMO
- **Fusion ist eine internationale Herausforderung**
- ➔ **Grundvoraussetzungen**
 - ➔ **Internationalität**
 - ➔ **Interdisziplinarität**
 - ➔ **Mobilität**

FORTSCHRITTE IN DER FUSIONSFORSCHUNG

FUSION am KIT

Ziel: Entwicklung von Technologien zur Realisierung der Fusion als Energiequelle

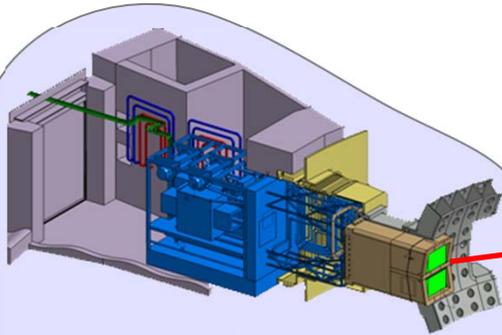
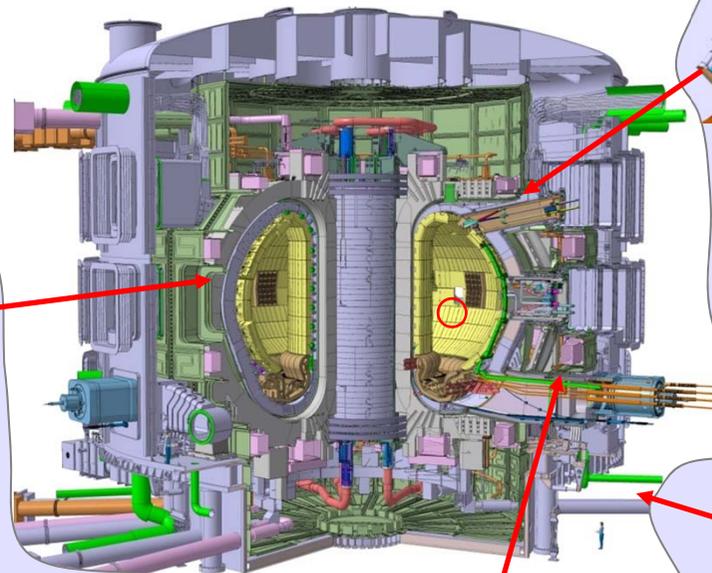
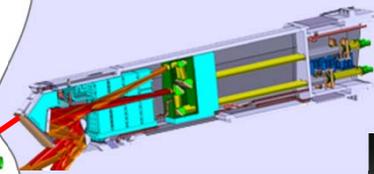
- Arbeitsgebiete am KIT
 - Ingenieurtechnik - „Fusion Engineering“-
 - „Fusionsmaterialentwicklung und -qualifizierung“

KIT- Beiträge zu ITER

■ Sicherheitsforschung



- Plasmaheizung & Stromtrieb:
- Gyrotrons
- ECRH Upper Launcher



- Testblanket Modul & Systeme
- Brennstoffkreislauf
- Vakuumsysteme



- Magnetentwicklung vom Kabel bis zum Test
- Stromzuführungen



- **Plasma Heizung und Stromtrieb**
 - ECRH Quellen Entwicklung
 - ECRH Transport
- **Fusionsbrennstoffkreislauf**
 - Tritium-Handling-Messung
 - Vakuumsysteme-
Vakuumpumpen
- **Plasmanahe Komponenten**
 - Brutblanket
 - Divertor
 - Hochtemperatur -
Heliumtechnologie
- **Kraftwerksdesign u. -effizienz**
 - Fernhantierte Wartung
 - Port Plug Engineering
 - Kraftwerkssystem &- dynamik
- **Fusionsmagnete & Magnet
komponenten**
 - HT_c Stromzuführungen
 - Supraleitende Drähte &Kabel
 - HT_c Fusionsmagnete
 - Magnetsicherheit

Material –Schlüsselschlüsseltechnologie der Fusion

■ **Niedrigaktivierbare Strukturmaterialien (Blanket, Divertor)**

- EUROFER Qualifizierung
- Nanostrukturierte Stähle
- “pfiffige” Refraktärwerkstoffe
- Alternativmaterialien
- Simulation und Modellierung

➡ **Abfall, Aufbereitung, Sicherheit**

■ **Fusionsmagnetmaterialien**

- Substrate
- Qualifizierung von Hilfs- und Hüllstrukturen
- HT_c -Supraleiter Charakterisierung

➡ **Plasmaeinschluss, Performance**

■ **Herstellungs- und Fügeverfahren**

- Herstellung & Formung von Refraktärmetallen.
- Fügeverfahren für Refraktärwerkstoffe
- Verbinden niedrig-aktiverbarer Stähle
- Material-Design Schnittstellen

➡ **Sicherheit, Wartung, Verfügbarkeit**

■ **Fusionsbrutmaterialien**

- Lithiumkeramik
- Neutronenvervielfacher
- Flüssigmetallkorrosion
- Permeationsbarrieren

➡ **Brennstoff, Sicherheit, Haltbarkeit**

Mikrowellenheizung: Gyrotronentwicklung

Funktionsweise

- Energietransfer von EM-Wellen auf Elektronen bei deren Eigenfrequenz

Zweck:

- Plasmaheizung, Stromtrieb,
- Plasmastabilisierung durch bekämpfen lokaler „Blasen“

Vorteile ECRH:

- Hohe Frequenz erlaubt optische Übertragung mit Spiegeln
- Bei Einsatz mehrerer Frequenzen und Spiegel beliebiger Einstrahlort im Plasma

KIT-Entwicklung (mit CRPP u.a. und TED):

- 170 GHz Koaxialgyrotron für ITER – 1(2) MW

ECRH-Versorgung von W7-X:

- 10 Gyrotrons 1 MW (140 GHz, cw)



Einkopplung ins Plasma mit Launcher



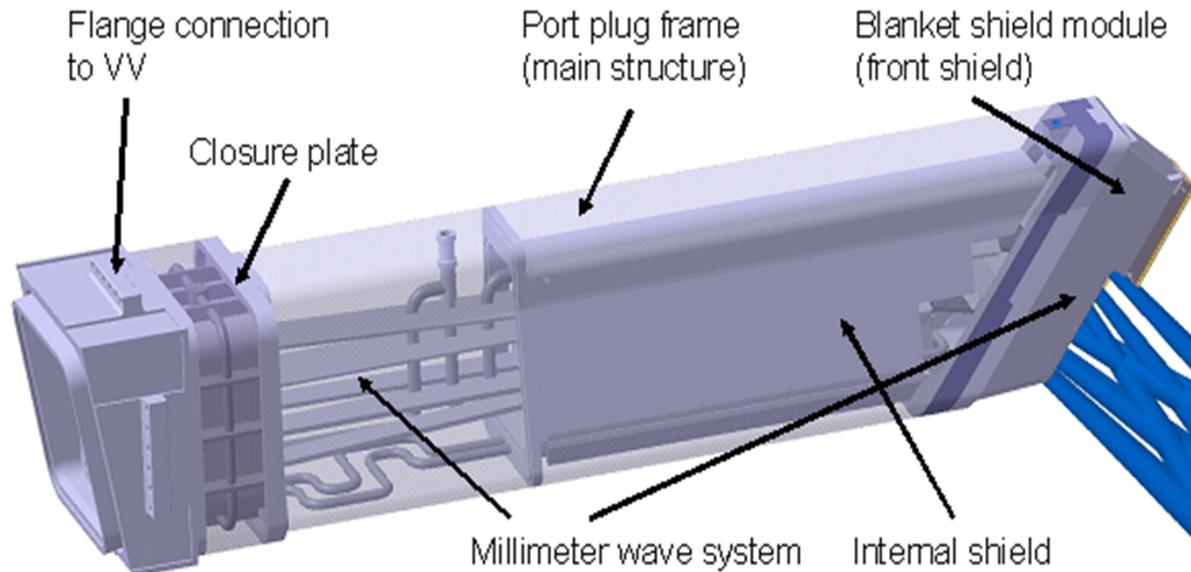
Parameter:

Magnetfeld: ca. 7 T

Beschleunigung: ca. 80 kV

Elektronenstrahl: ca. 80 A

Mikrowellenheizung: ECRH-Launcher



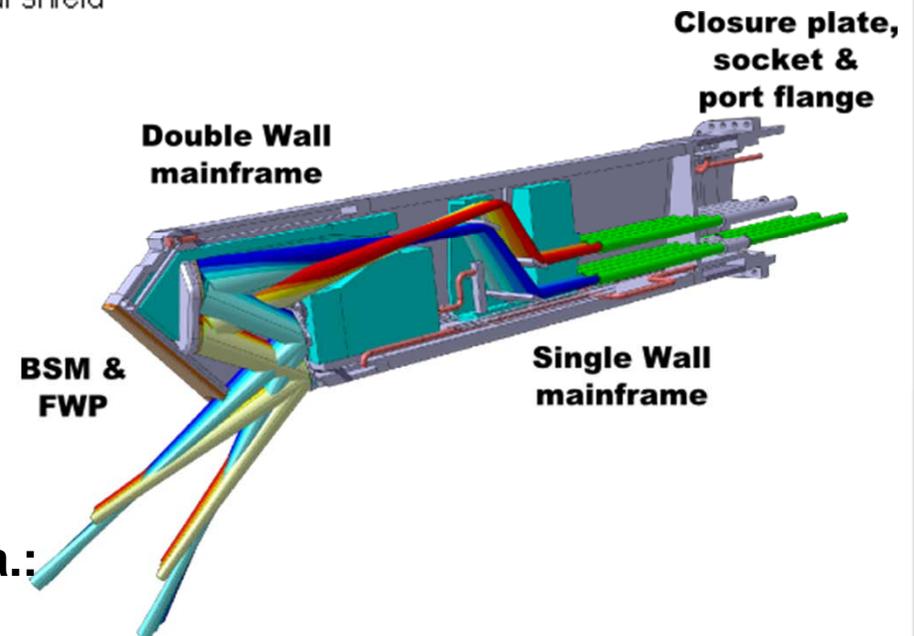
Funktion:

- Transfer der EM-Wellen in Plasma
- Fokussierung der Wellen auf Plasmaort

Ziel

- Heizung
- Stromtrieb
- Plasmastabilisierung

KIT-Entwicklung (in Koop. CRPP, IPP u.a.:
ECHUL-CA-Konsortium)



ITER-Tritium-Kreislauf (“Fuel Cycle”)



- Im Plasma ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{D}$, ${}^3\text{T}$ und He + Verunreinigungen (Partikel von Wänden)
- Abpumpen nötig zur Entfernung der „He-Asche“ & Partikel
- Abgas hat gleiche Zusammensetzung wie Plasma → beinhaltet Tritium
- Weitere Tritiumentstehung durch
 - neutroneninduzierte Aktivierung im Kühlwasser (☹)
 - im Brutblanket (☺ ,bei ITER: nur Testmodule)
 - Transmutation im Strukturwerkstoff (☹)

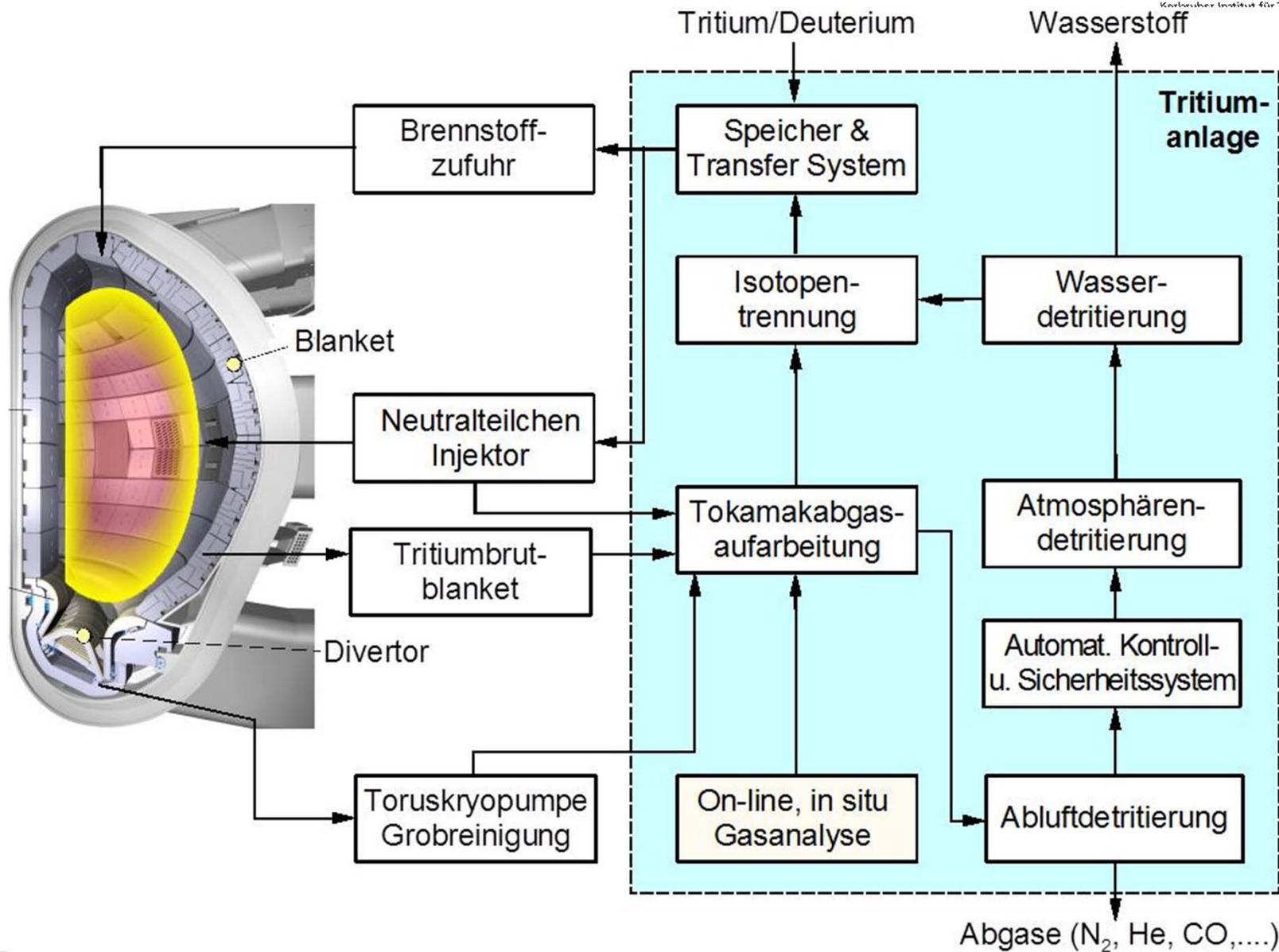
Eigenschaften von Tritium:

- weicher β -Strahler mit 20 keV Zerfallsenergie
- 12,3 Jahre Halbwertszeit
- physiologisch kritische Austauschreaktion von Wasserstoffatomen n



Tritium muss vollständig aus ITER-Stoffströmen abgetrennt und ins Plasma zurückgeführt werden

ITER-Tritium-Kreislauf ("Fuel Cycle")

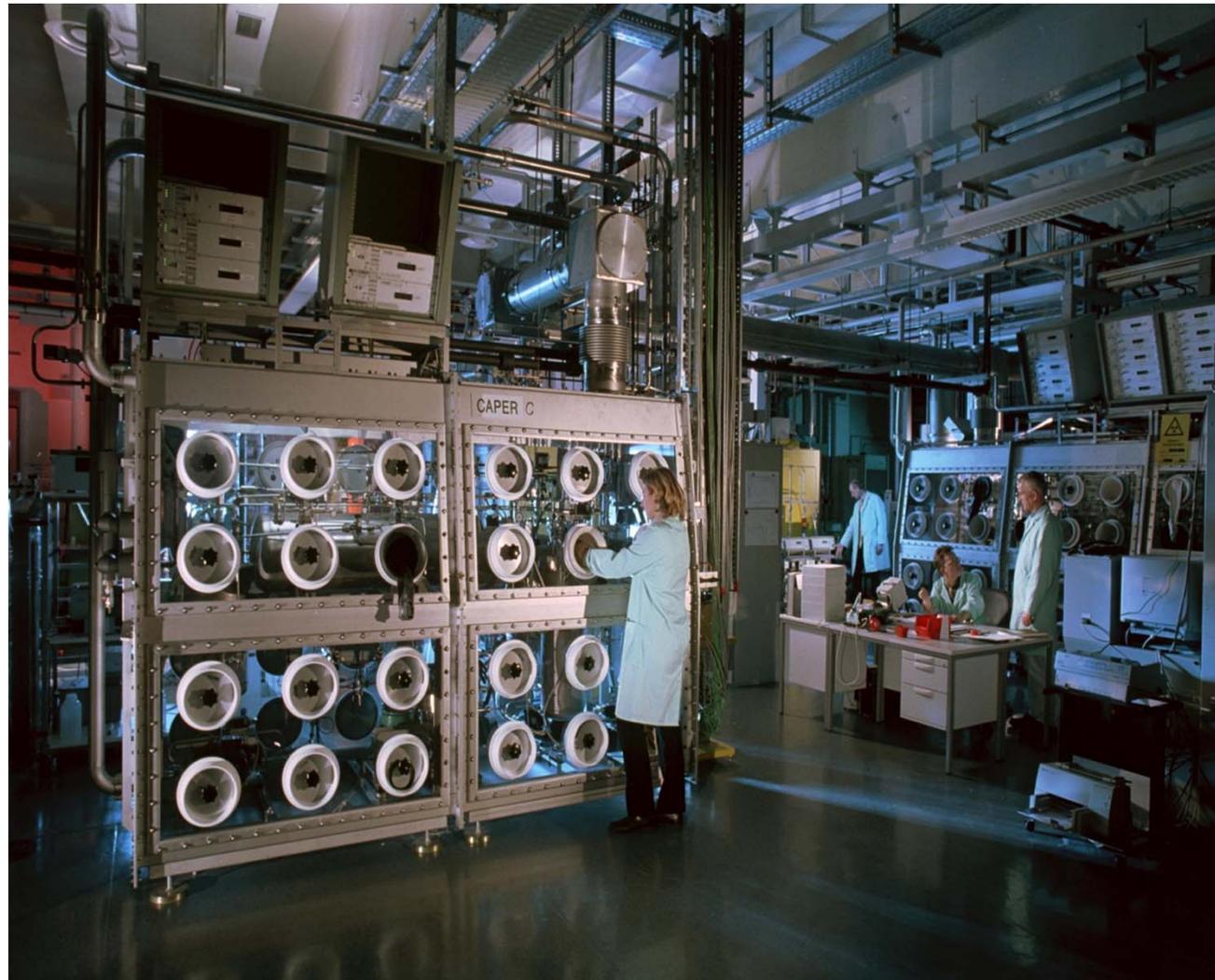


ITER-Tritium-Kreislauf (“Fuel Cycle”)

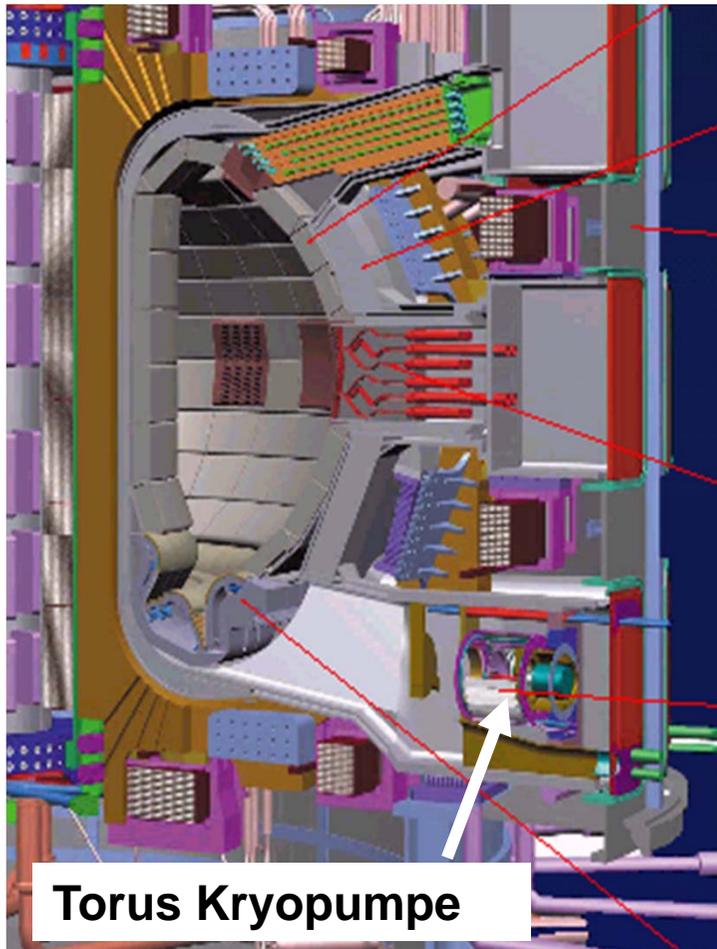
TLK –

Tritium-
Labor
Karlsruhe

- Umgangs-
genehmigung
für 40 g Tritium
- Erfahrung seit
1995
- Weltweit
einzigartig

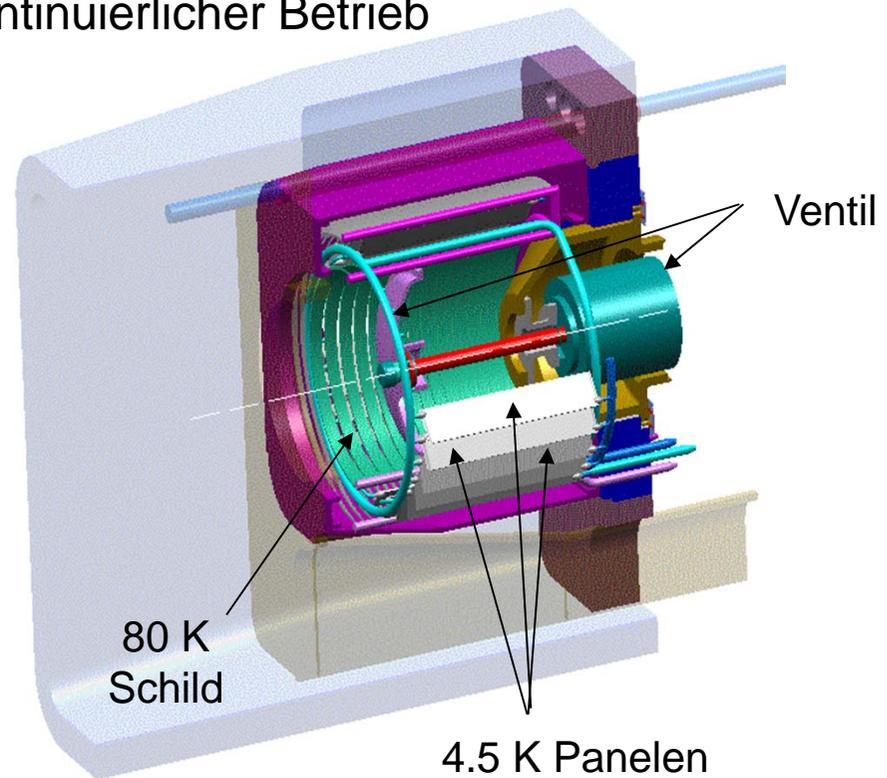


ITER Fuel Cycle: Torus-Kryopumpen

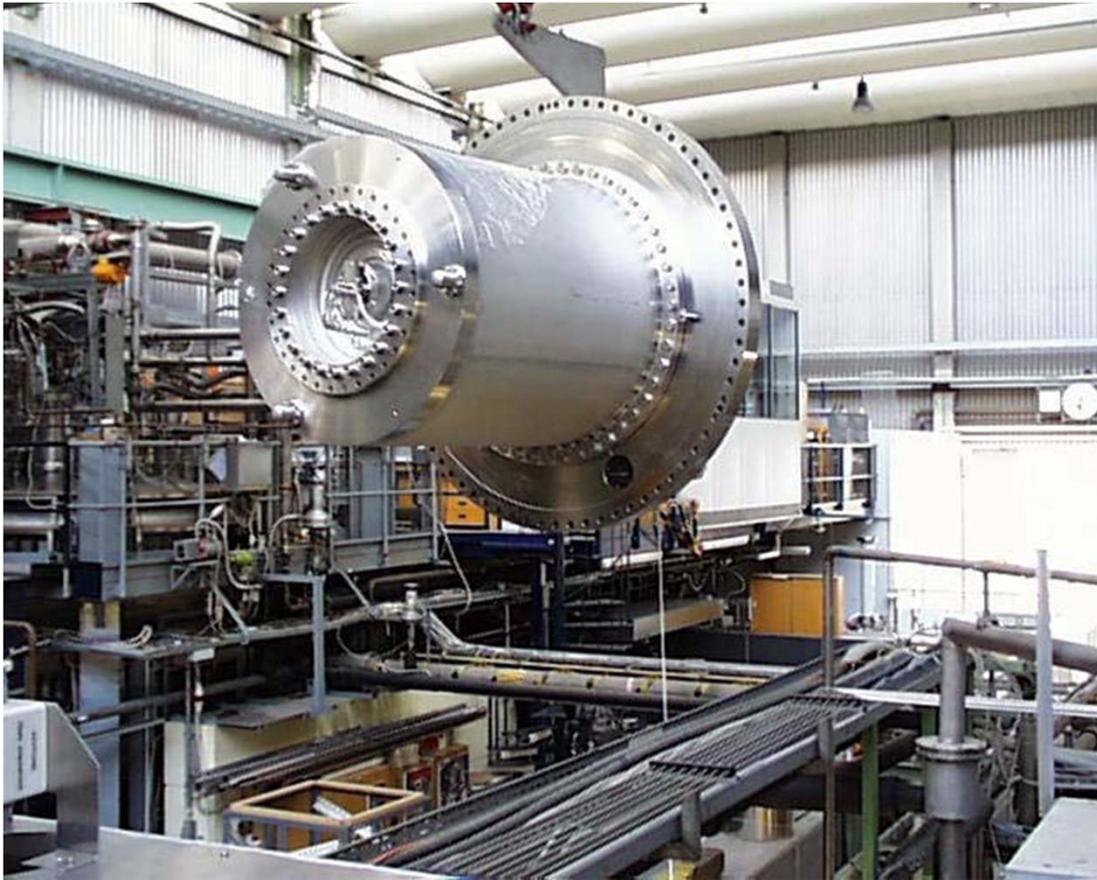


ITER-Torus-Kryopumpe: ITeP-Entwicklung Funktionsweise:

- Kondensation von Gasen & Partikeln an kalter Oberfläche
- keine bewegten Teile im Magnetfeld
- diskontinuierlicher Betrieb



ITER Fuel Cycle: Torus-Kryopumpen

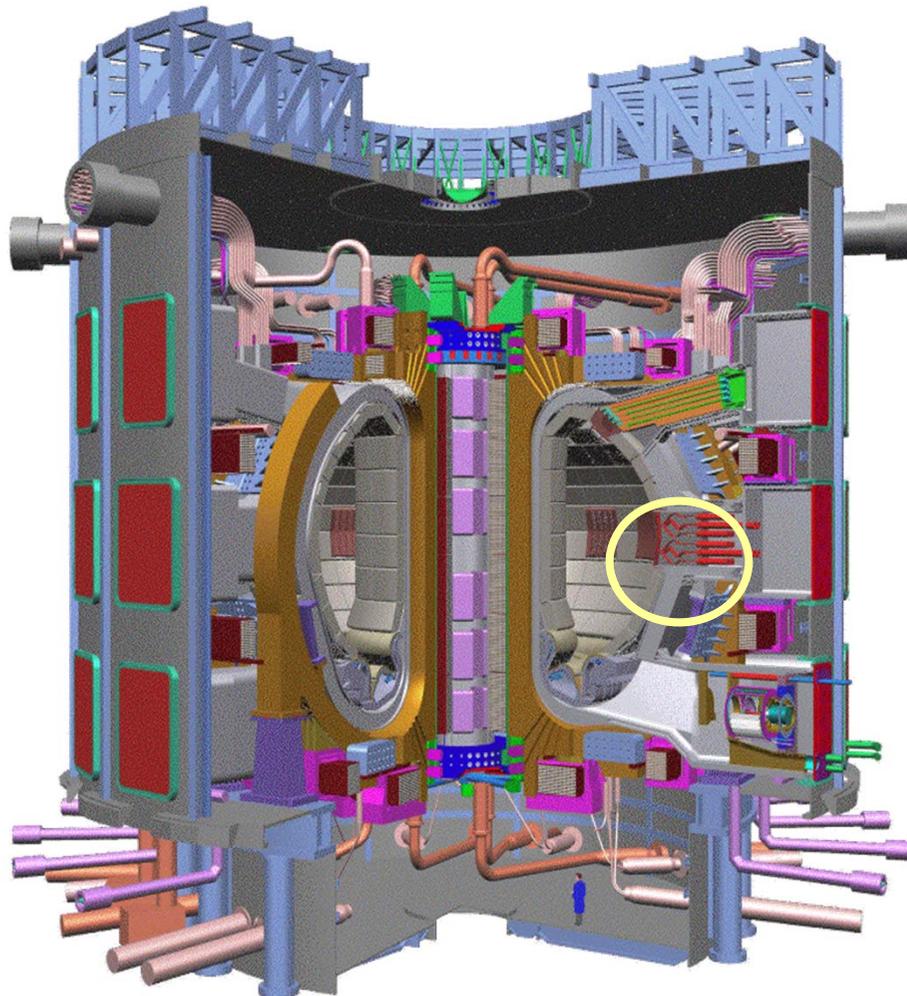


Test der Modellpumpe im ITeP

4.5 K - Kryopaneln



Test-Blanket-Module

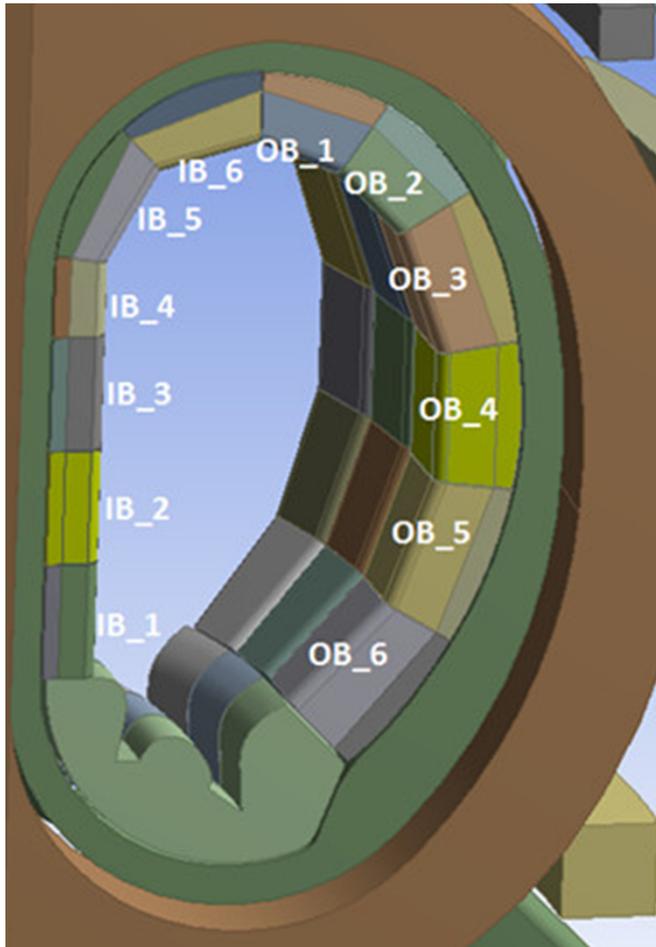


**ITER: Tritium-Versorgung
extern,
(aber Erprobung von
Brutkonzepten
für DEMO)**

Aufgaben des Brutblankets:

- Brennstoffherzeugung („Brüten“)
- Wärmeabfuhr zur Leistungserzeugung
- Abschirmung der supraleitenden Magnete vor Neutronen

Test-Blanket-Modul – das “Herz” des Reaktors



Brutblanketanordnung in einem DEMO

Aufgaben

- Erbrüten des Tritiums
- Abfuhr der Wärme
- Beitrag zur Abschirmung der Magnete
-

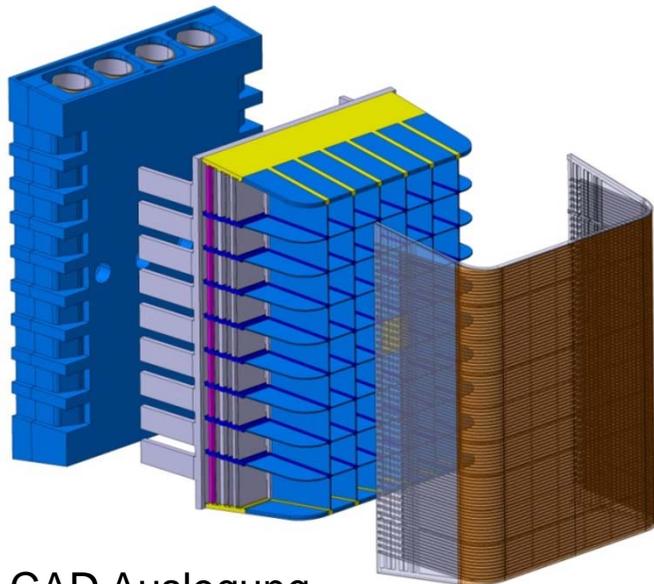
Randbedingungen

- Hohe Neutronenflüsse
- Große Wärmebelastung
- Schnelle Transienten
- Hinreichende Lebensdauer
- Fertigung – Ein- und Ausbau

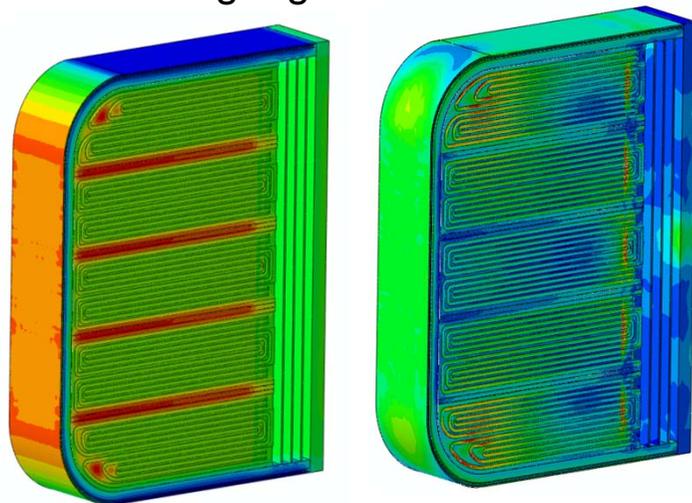
Konzepte

- Festes Brutmaterial /Heliumkühlung
- Flüssiges Brut-/Kühlmaterial

Test-Blanket-Modul – das “Herz” des Reaktors



CAD Auslegung



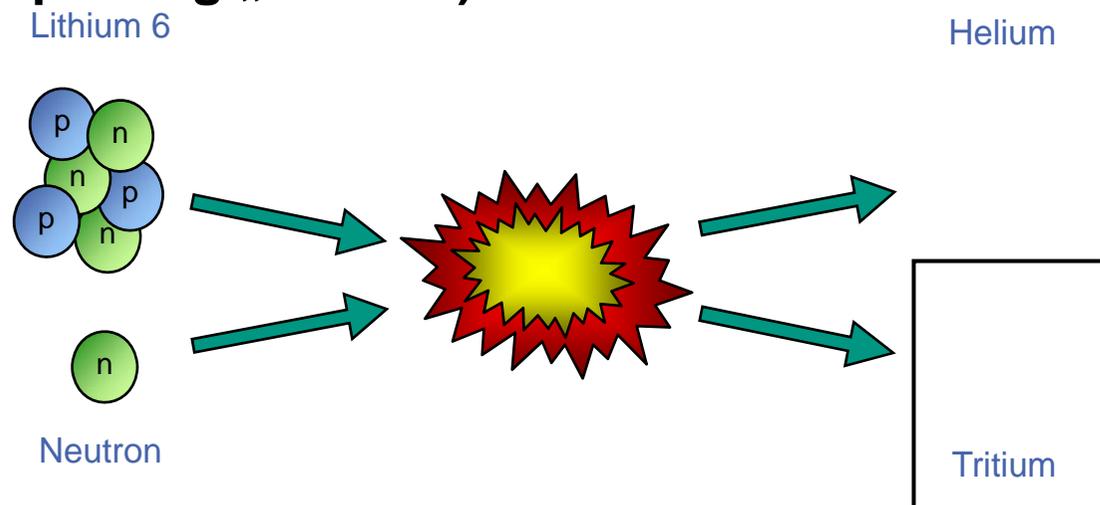
Berechnete therm. und mech. Spannungen

Blanketauslegung (Design) und Analyse:

- CAD Design eines Testblanketmoduls.
- Neutronische Analyse für Leistungserzeugung und Tritiumbrüten.
- Thermohydraulik der Heliumkühlung.
- EM Analyse bei Plasmadisruptionen
- MHD –Analyse bei Flüssigmetallblankets
- Tritiumtransportmodellierung
- Sicherheitsberechnung hinsichtlich nuklearer Komponenten (z.B.. RCC-MRx).

Test-Blanket-Modul

- Tritium ist radioaktiv.
- Halbwertszeit nur 12 Jahren → in Natur nicht vorhanden.
- Tritium muss der Reaktor aus Lithium herstellen (durch Spaltung „brüten“).



■ Potentielle Brutreaktionen

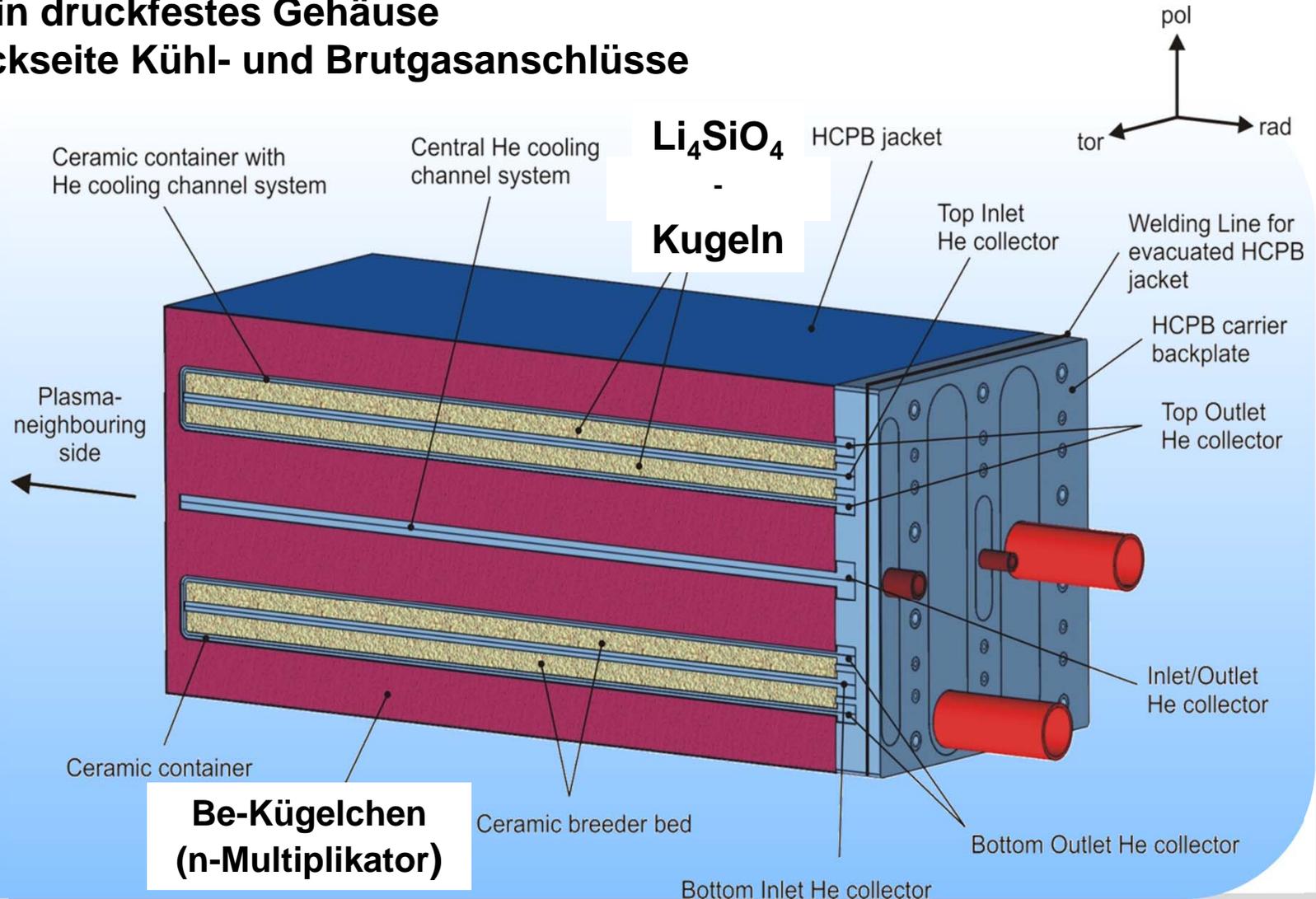


HCPB-Test-Blanket-Modul-System

Funktioneller Aufbau:

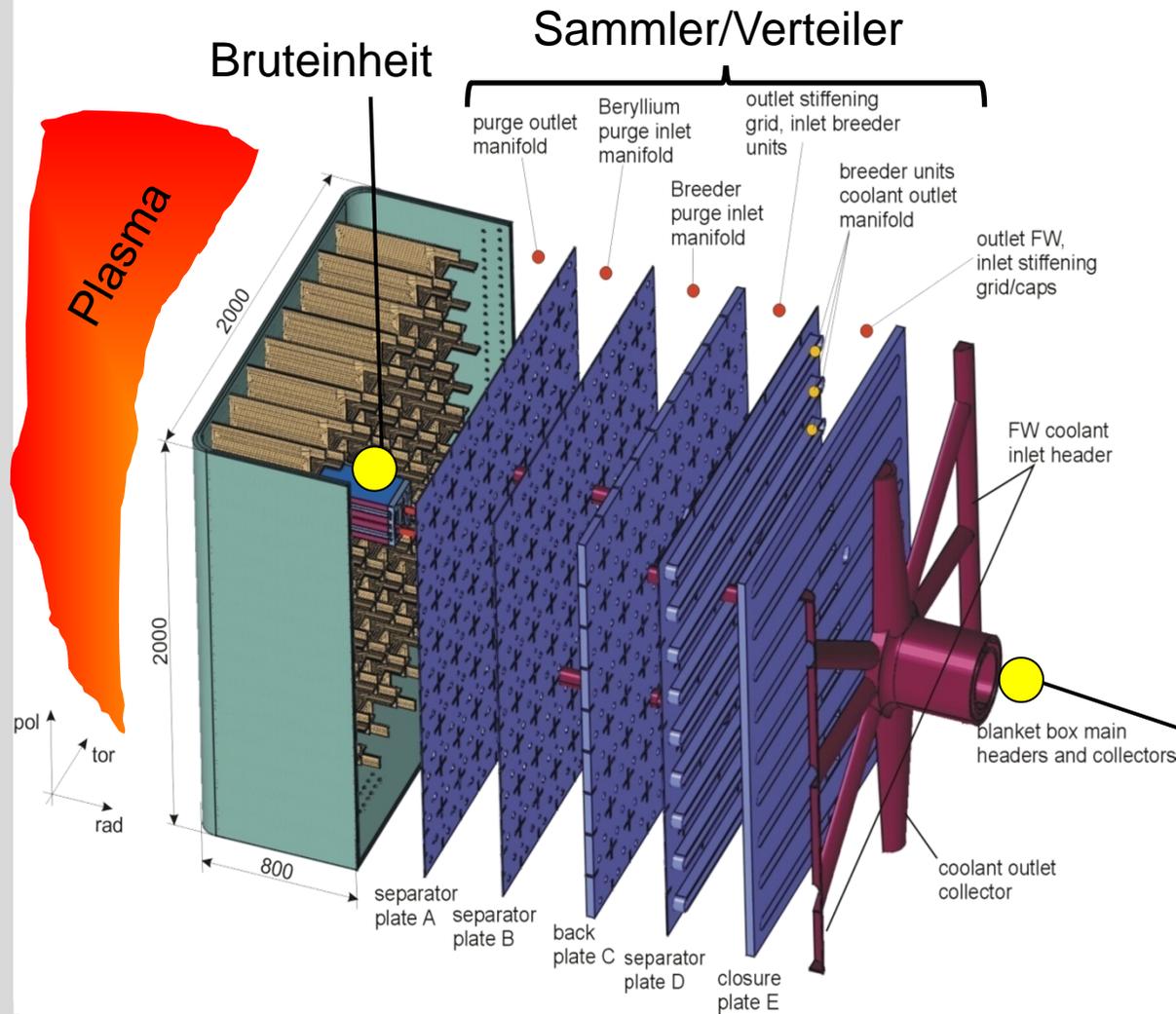
- viele Bruteinheiten parallelgeschaltet
- Einbau in druckfestes Gehäuse
- von Rückseite Kühl- und Brutgasanschlüsse

Bruteinheit Feststoffblanket



HCPB-Test-Blanket-Modul-System

ITER- TBM-System



Herausforderungen:

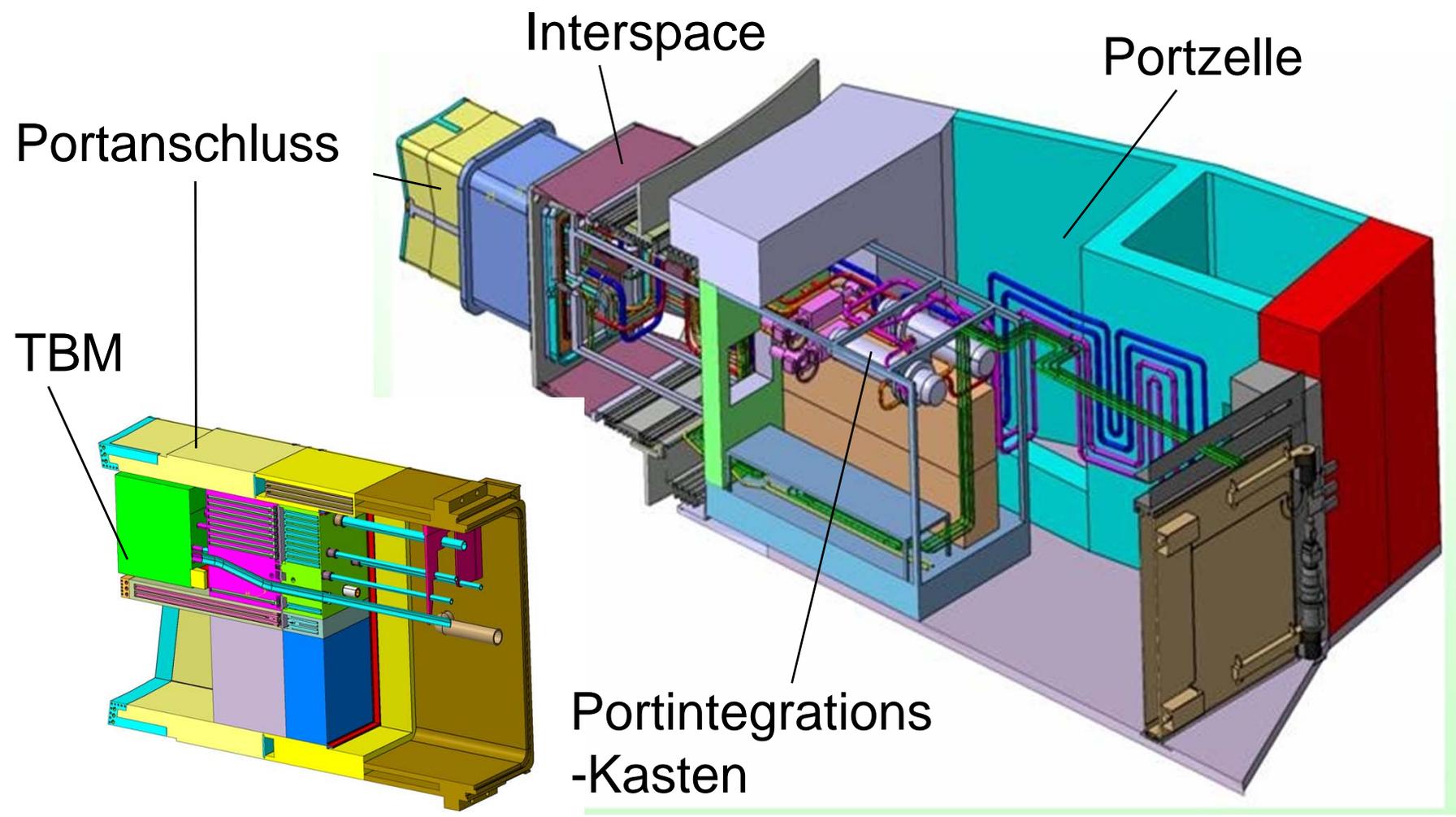
- Kräfte
- Temperaturen
- Zyklen
- Neutronenbeschuss

Teilkomplexe:

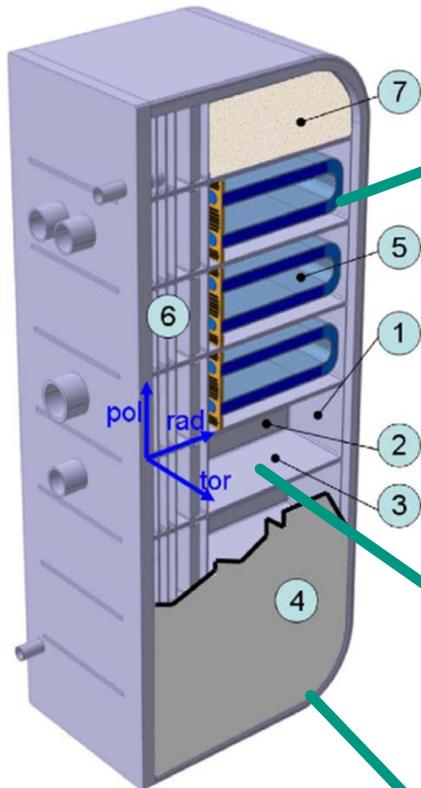
- He-Kühlung
- Tritium-Freisetzung
- Tritium-Transport
- Strukturmaterialien
- Verbindungstechnik

Gasanschluss
an
TBM System

HCPB-Testblanket-Modul-System-ITER

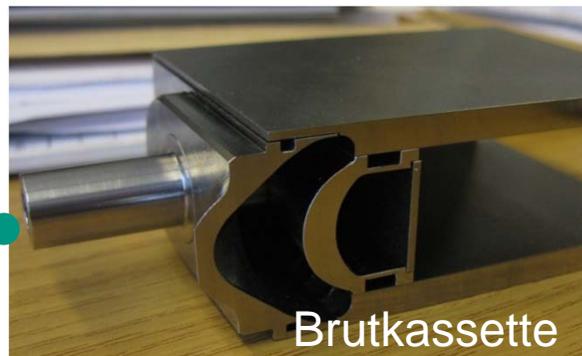


Testblanket-Modul- Herstellung ?



- 1 Erste Wand
- 2 Vertikales Gitter
- 3 Horizontales Gitter
- 4 Kappe
- 5 Kühlplatter
- 6 Sammler/Verteiler
- 7 Brutzelle (Be/Keramik)

H. Neuberger et al., *Fusion Eng. Des.* 86 (2011) 2039.



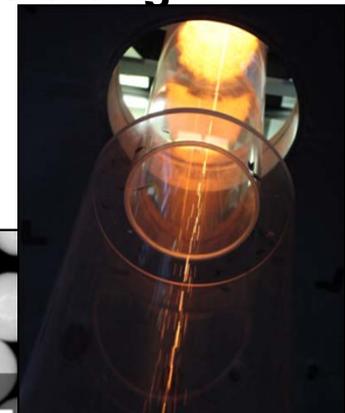
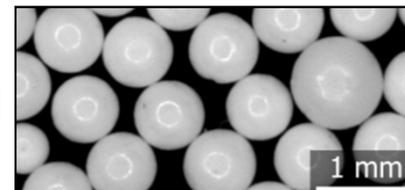
Verwendete Verfahren:

- Erodieren (Draht, Funken)
- Heiss-isostatisches Pressen (HIP)
- Biegen
- Fügetechniken (TIG, EB, Lötverfahren)
- Neue Herstellungsrouten

Randbedingungen:

- Neue Materialien
- Höchste Beanspruchung
- Nukleare Lizenzierung

Keramik-herstellung im freien Fall



Divertor-Entwicklung

Divertorfunktion:

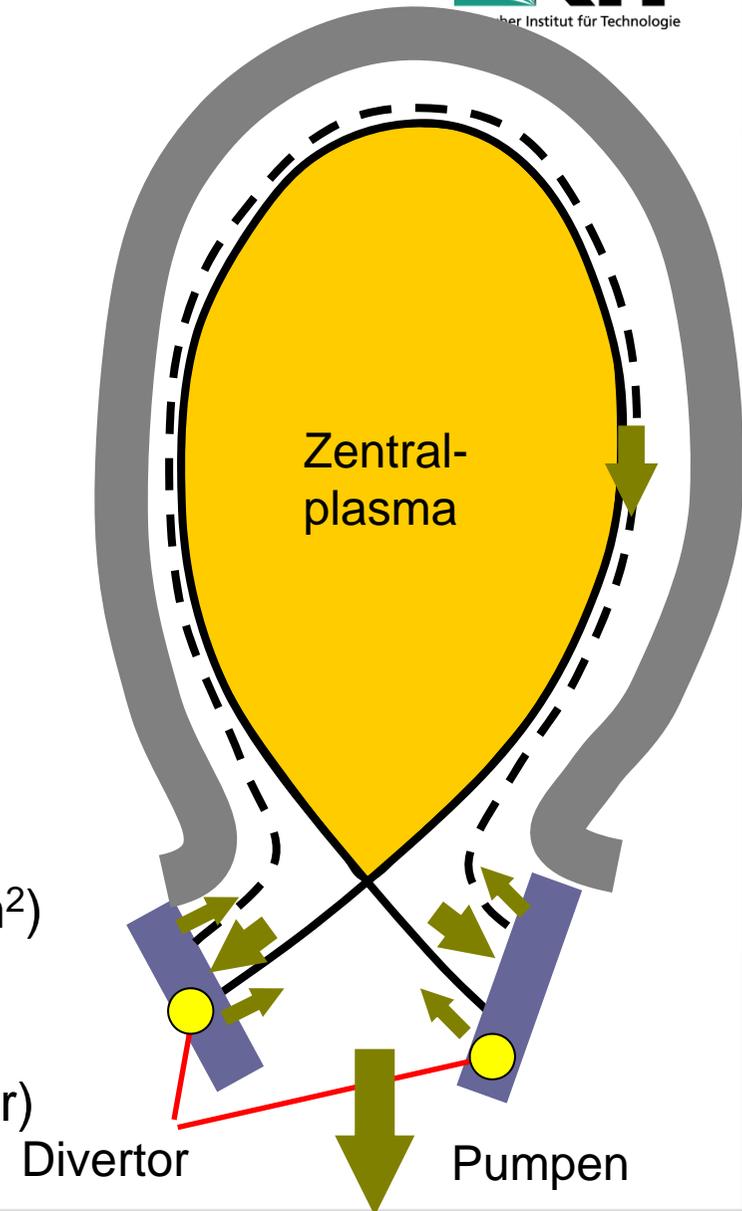
- Abfuhr der Asche (He, Partikel)

Physikalische Effekte

- Geladene Teilchen folgen Feldlinien
- X-Punkt trennt Zentralplasma von Sekundärplasma
- Durch Stöße und Druckgradient verlassen Abgase und Partikel Zentralplasma
- Abführung der Asche über Divertor

Techn. Herausforderungen Divertor

- Hohe Temperaturen
- Hohe Flächenleistungsdichten ($10\text{-}20\text{MW/m}^2$)
- Hoher Ionenbeschuss (geladene Partikel → Sputtern der Wand)
- Hohe Neutronenschädigung (ca. 15dpa/Jahr)
- Starke therm. Wechselbelastung



Divertor-Entwicklung

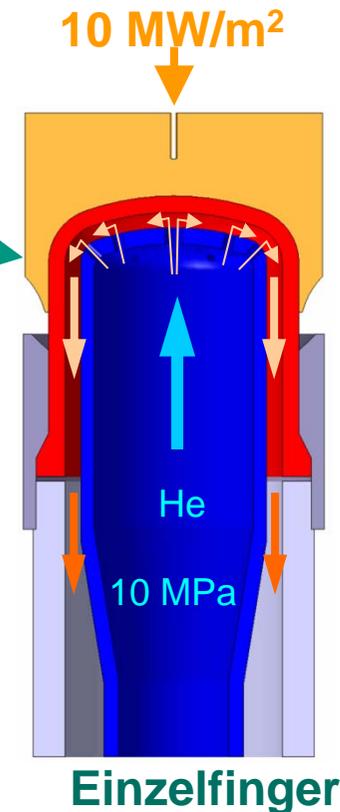
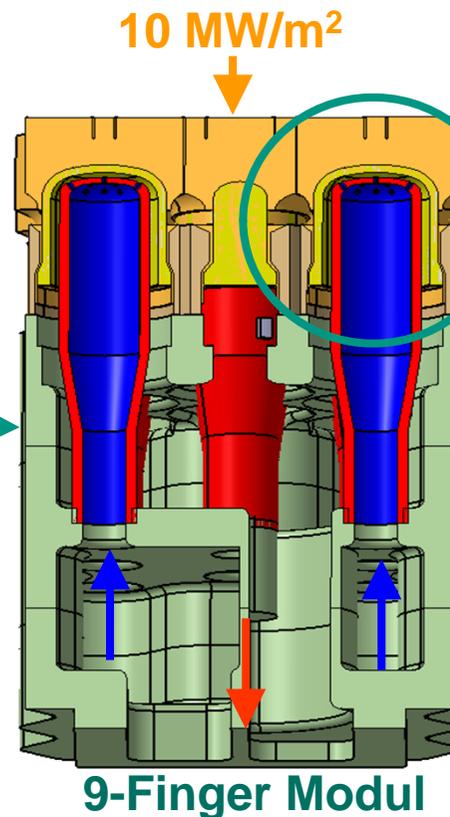
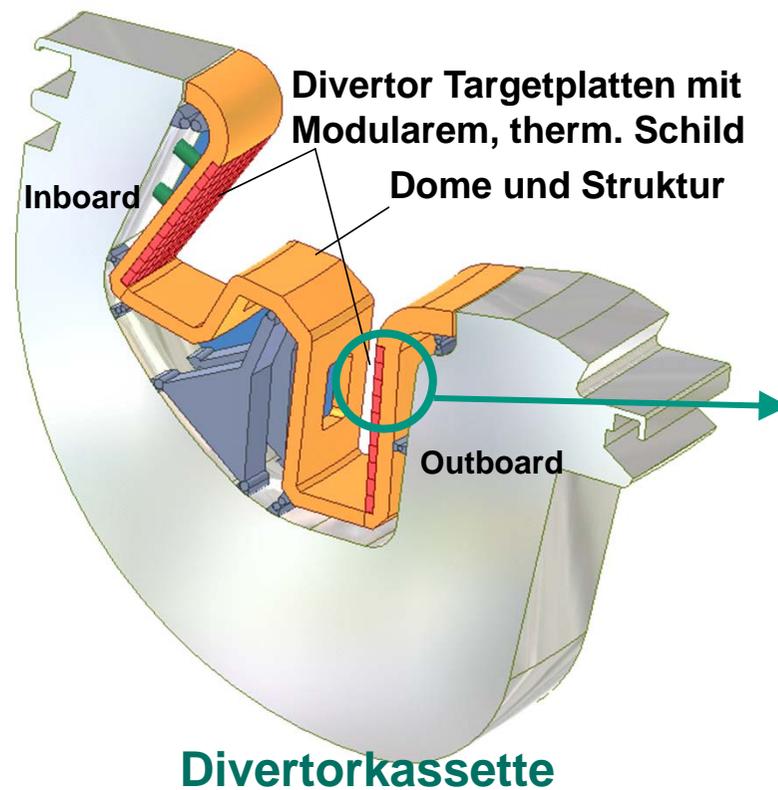
Material & Design

Eckpunkte:

- Temperaturspitzen $>1800^{\circ}\text{C}$
- Heliumerzeugung im Strukturmaterial durch Neutronen
- Intelligentes Design erforderlich

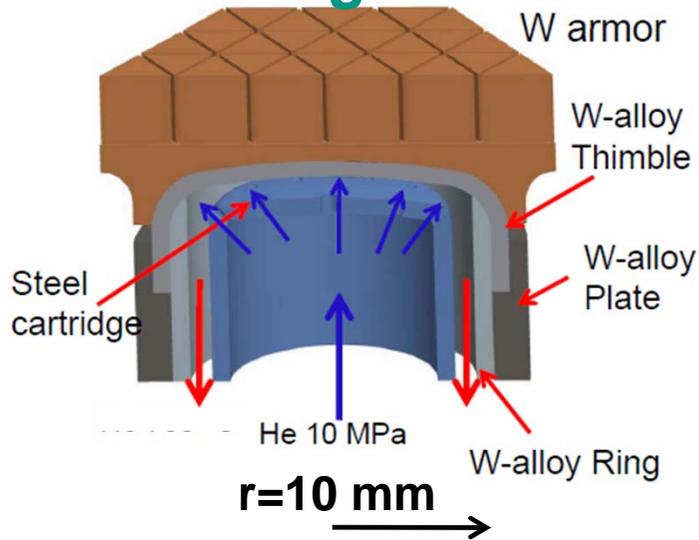
Designneckpunkte:

- Modularer Aufbau
- Zusammenfassung zu Modulen
- Nachweis der Machbarkeit bei prototyp. Leistungsdaten



Divertor-Entwicklung

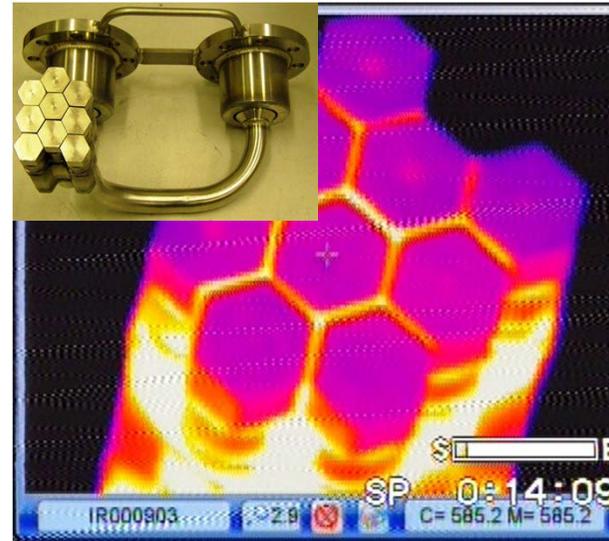
Basisdesign



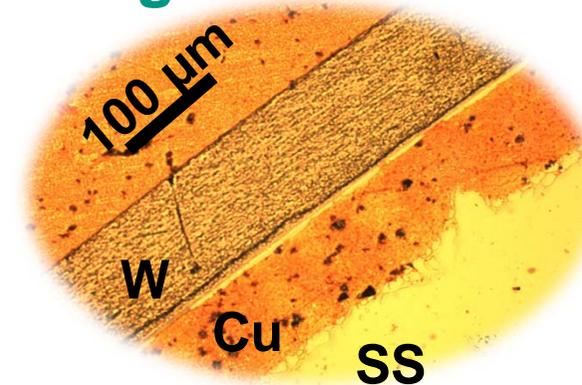
Herstellung Einzelteile



Validierung (10MW/m²)



Fügeverfahren



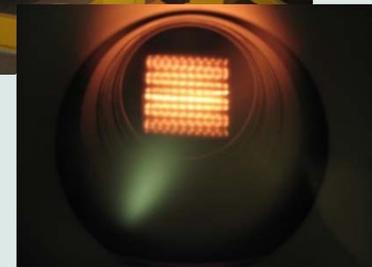
Reaktorskalierung

Plasmaraumkomponenten

- Alles muss praxisnah getestet werden (Blanket, Divertor)



- Experimente bei prototyp. Maßen
- 30m³ Vakuumkammer
- IR-Heizer (→ 500kW/m²)



- 1:1 Divertorexperiment (10-20MW/m²)
- 30m³ Vakuumkammer
- Elektronenstrahlkanone 800kW

Kühlkreislauf- HELOKA

- Test der Blanketmodule (1:1) und Erfahrung bei Auslegung/Betrieb von hochbelasteten Kühlsystemen
- Betrieb seit 2011
- Parameter
 - Druck: 4-9.2MPa
 - Temperatur: 70-500°C
 - Durchsatz: 0.8-1.8kg/s
- Heizleistung: 750kW



Materialinnovation

Plasma-Divertormaterial: 1.Option Wolfram (W)

Wolfram inhärent:

- spröde
- rekristallisiert bei höheren Temperaturen
 ➔ erneute Versprödung



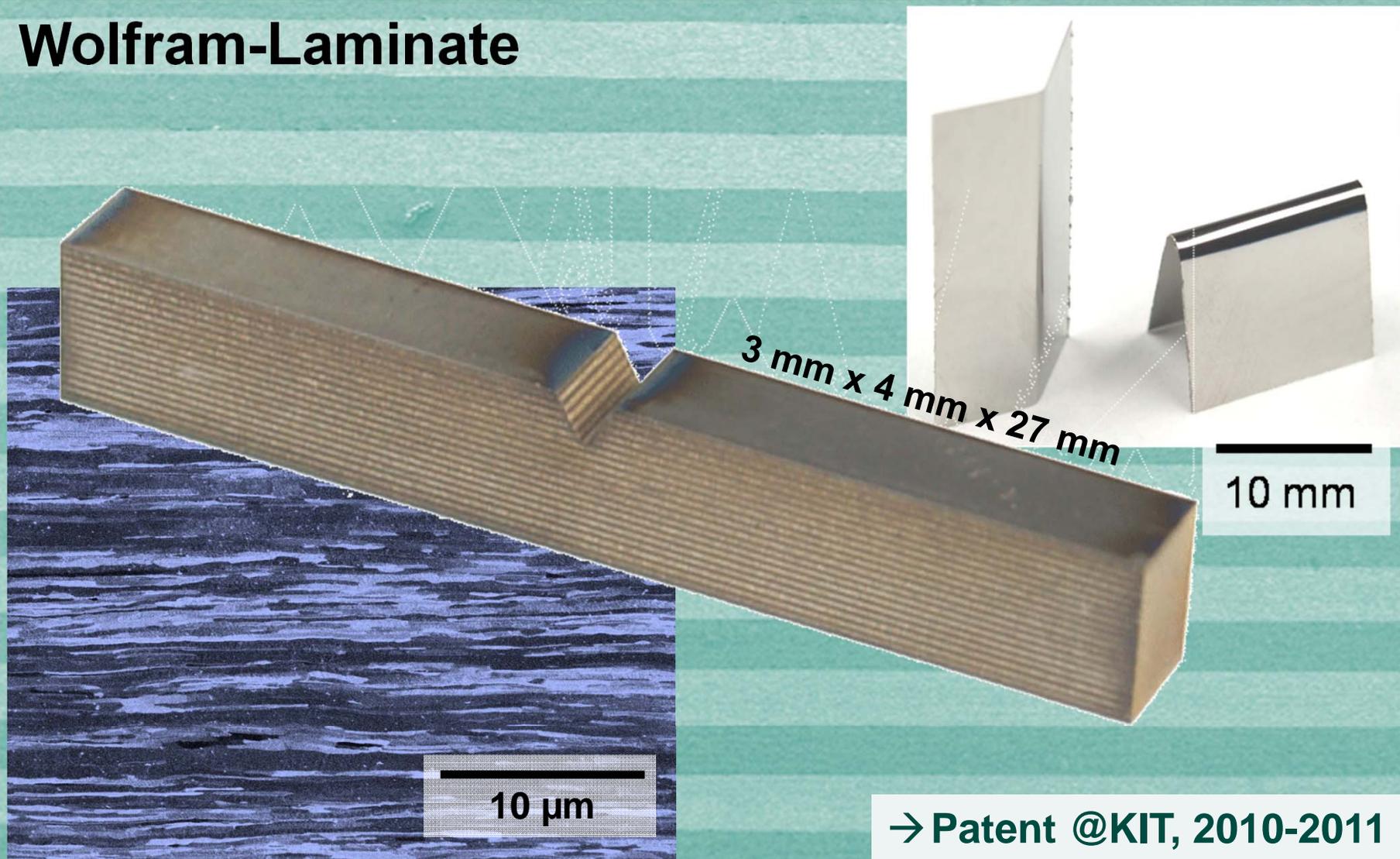
Strategien

- Nanostrukturierung
- Komposite
- Legierung

Problem: Mikrostrukturierung



Wolfram-Laminat



Starke Magnete brauchen Supraleiter

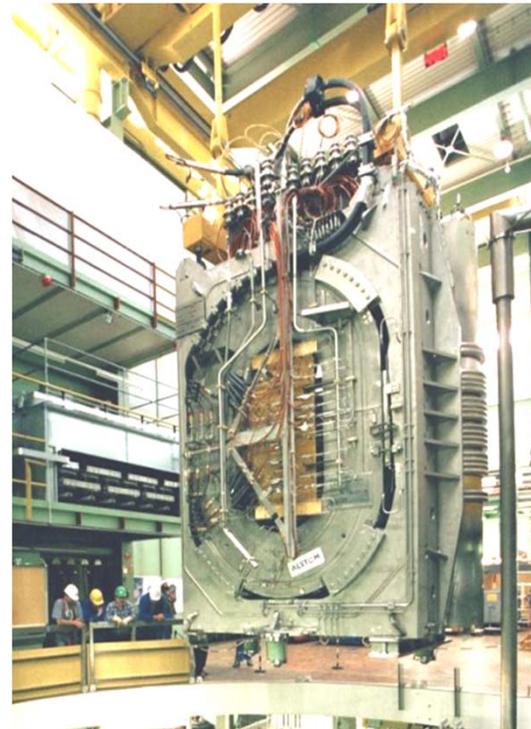
- Starke Magnete brauchen hohen Strom (einige bis viele 1000 Ampere)
- Kupfermagnete sind unwirtschaftlich (hohe Stromkosten, werden heiß)

Lösung: Supraleiter

- Kein Widerstand bei tiefen Temperaturen
- Betrieb mit vielen 1000 Ampere bei wenigen Volt Spannung!
- Vorteil: Günstiger Betrieb
- Nachteil: Kühlung nötig

Andere Beispiele für Supraleitereinsatz heute:

- MRI-Magnet (Krankenhaus)
- Beschleunigermagnet (CERN)



Beispiel:

Fusionsspule in KIT

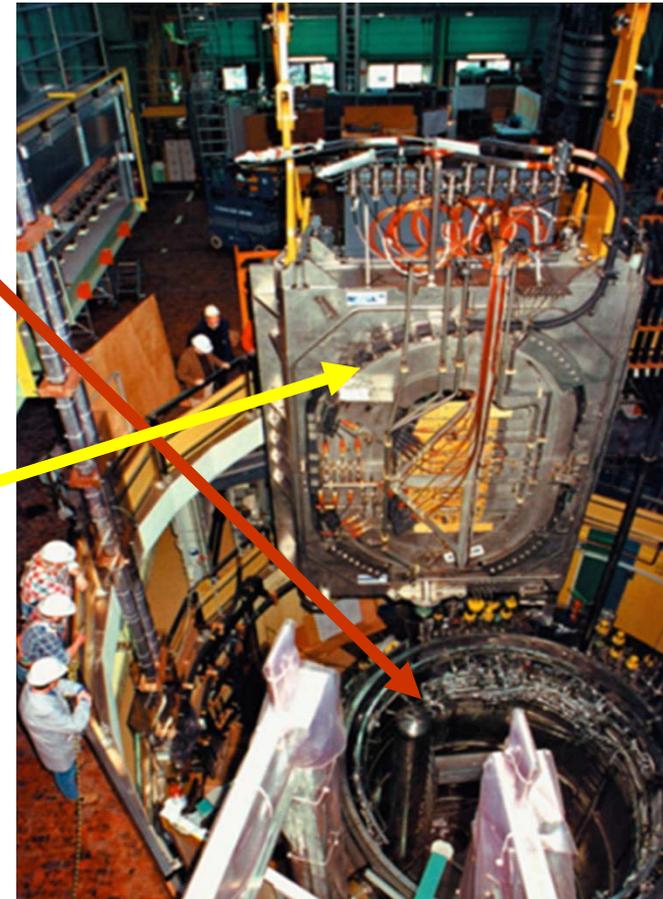
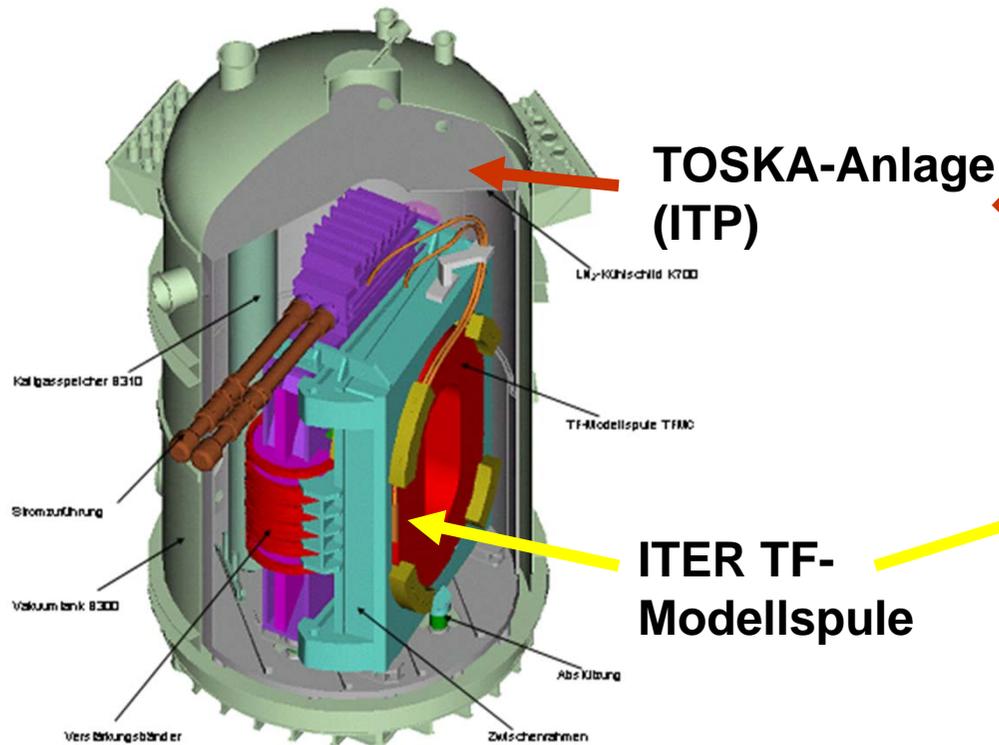
Strom 80.000 A

Spannung* 3 V

Betrieb bei -270°C

*nur nötig wegen normalleitender Zuleitungen

Supraleiter und Spulen-Experimente



ITER TF-Modellspule

TFMC-Tests 2001:

- Spezifikation: 68 kA
- Ergebnis: 80 kA sind möglich



Kabel: Nb₃Sn in Edelstahlhülle, mit Kühlkanal.

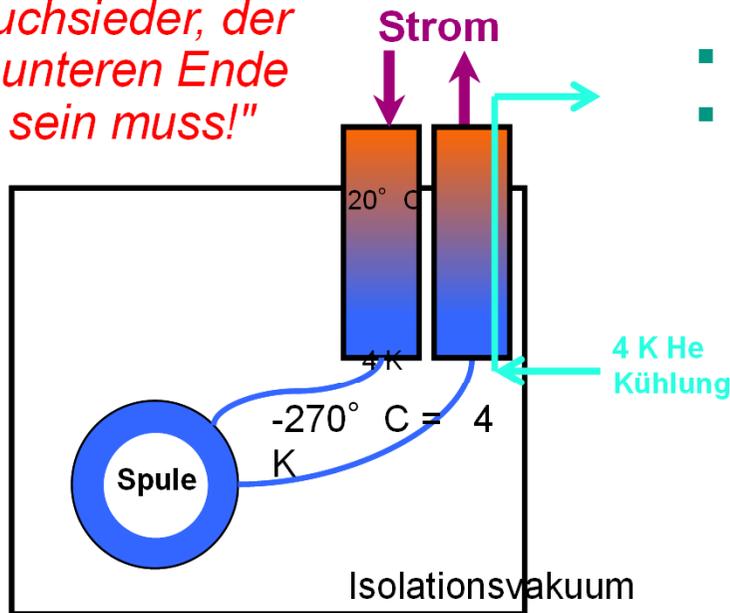
Wie kommt der Strom zu den kalten Magneten?

Analog zum heißen Kaffee in der Thermoskanne befinden sich die kalten supraleitende Magnete im Vakuum.

Der Strom muss also über **Stromzuführungen**

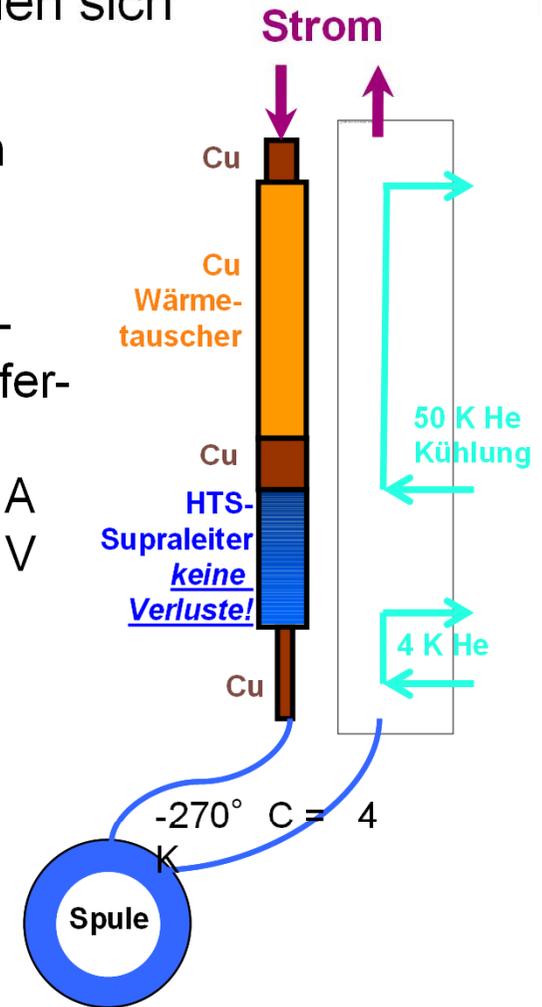
- elektrisch isoliert
- ins Vakuum und
- in die Kälte

"Tauchsieder, der am unteren Ende kalt sein muss!"



KIT: Stromzuführungen mit Hochtemperatur-Supraleiter!

- 5x geringerer Energieverbrauch als bei Kupfer-Stromzuführungen
- Strom max. 80.000 A
- Isolation max. 13.000 V



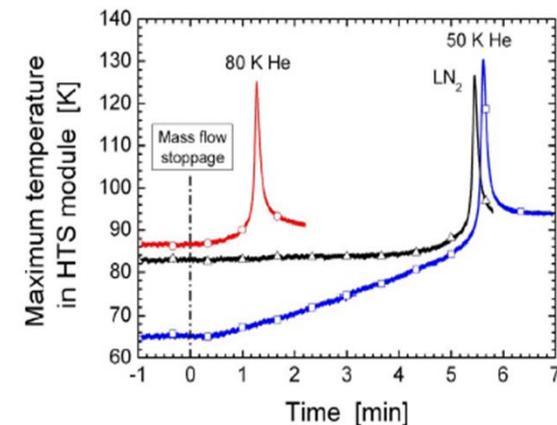
Supraleiter und Spulen



HTSL-Stromzuführung (Entwicklung von KIT & CRPP):

68 kA nicht nur bei 50 K He – Kühlung,
sondern auch bei 81 K L-N₂
→ Kosteneinsparung bei Kühlanlage

Procurement-Package an China vergeben,
dort besteht Interesse an Kooperation



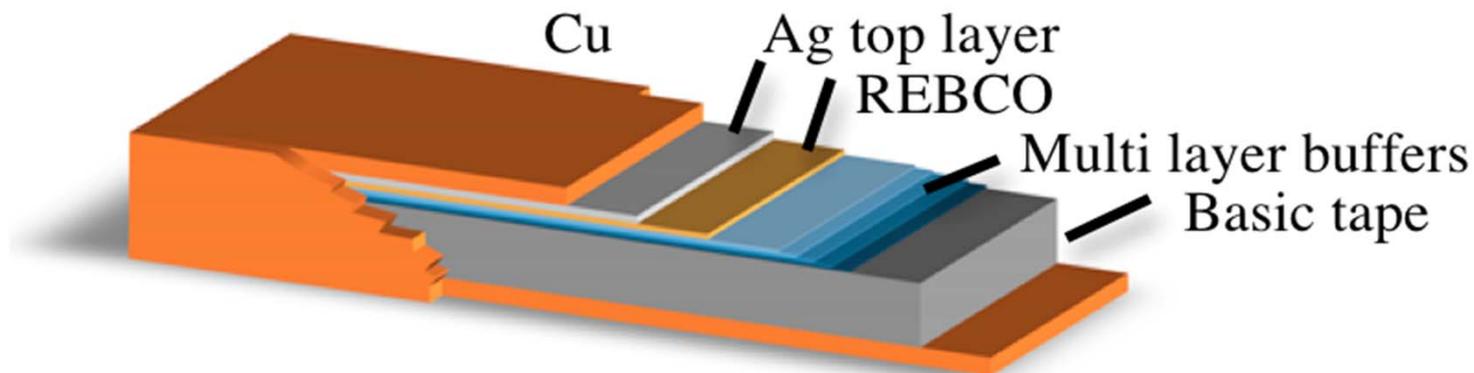
Aufwärmzeit nach Kühlungsstopp

Hochtemperatursupraleiter (HTS)

Warum nicht den ganzen Reaktor aus HTS –Spulen bauen ?

- HTS stehen noch am Anfang der Entwicklung

REBCO aktuell beste Lösung aber nur als dünnes Band (tape) erhältlich



REBCO Band mit 1 μm REBCO Schicht!

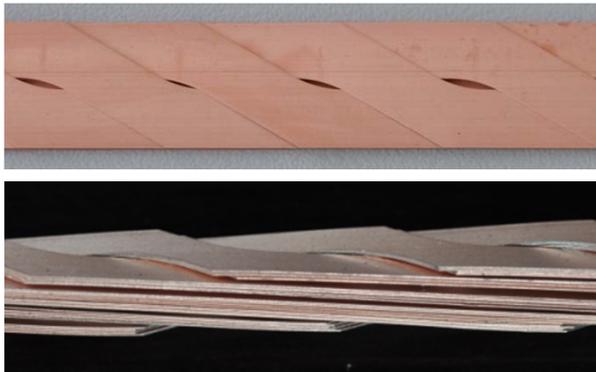
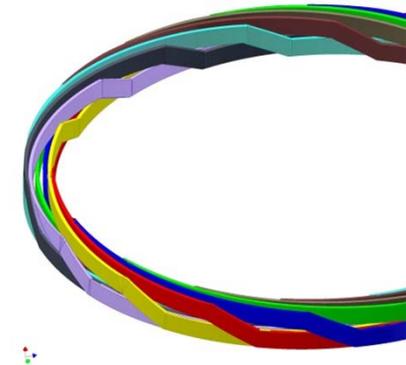
Wie erhalte ich ein Kabel aus einem REBCO Band ?



Hochtemperatursupraleiter (HTS)

Erstes ROEBEL –Kabel aus REBCO

- REBCO –Kabel (KIT) with DyBCO Bändern



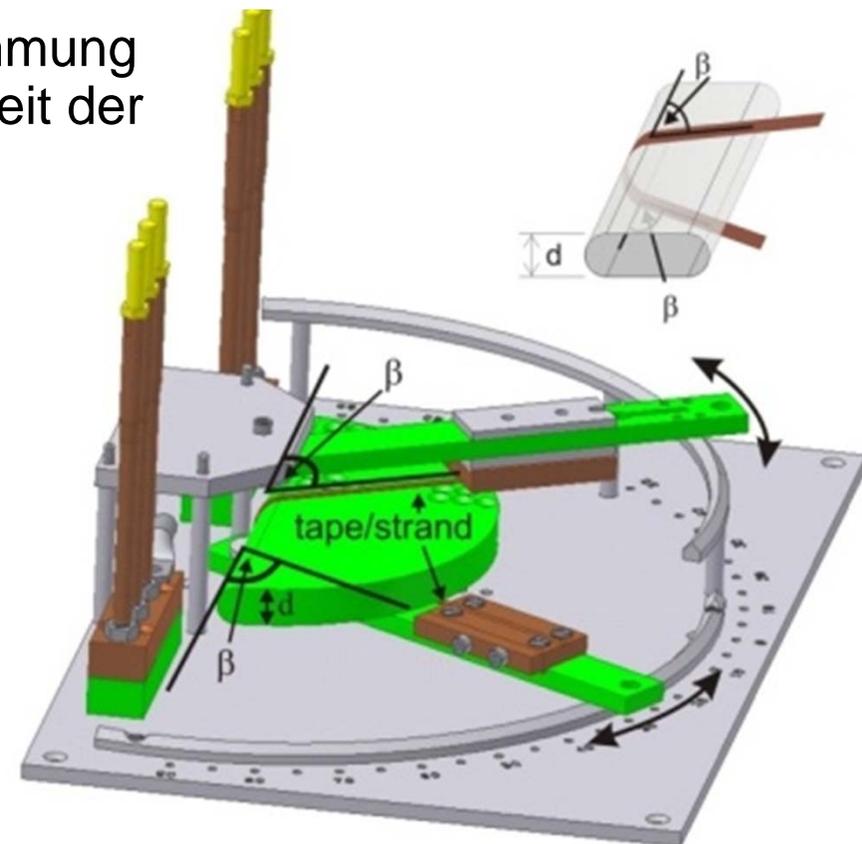
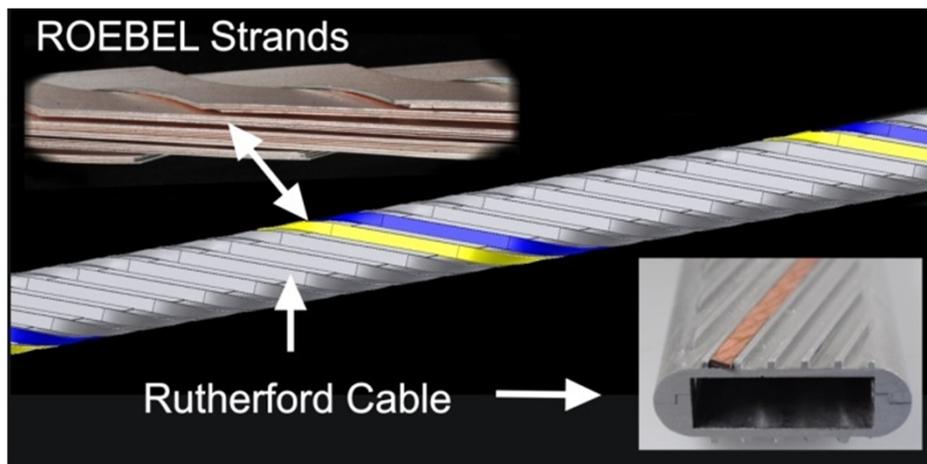
ROEBEL zusammengesetzt aus REBCO-Bändern mit 50 strands (10x5), 4mm Breite



Hochtemperatur-Supraleiter: Coated Conductor Rutherford Kabel (CCRC) mit Roebel-Strands

Anforderungen für TF Spulen: $I > 10 \text{ kA}$ @ $B > 10 \text{ T}$, $T > 50 \text{ K}$

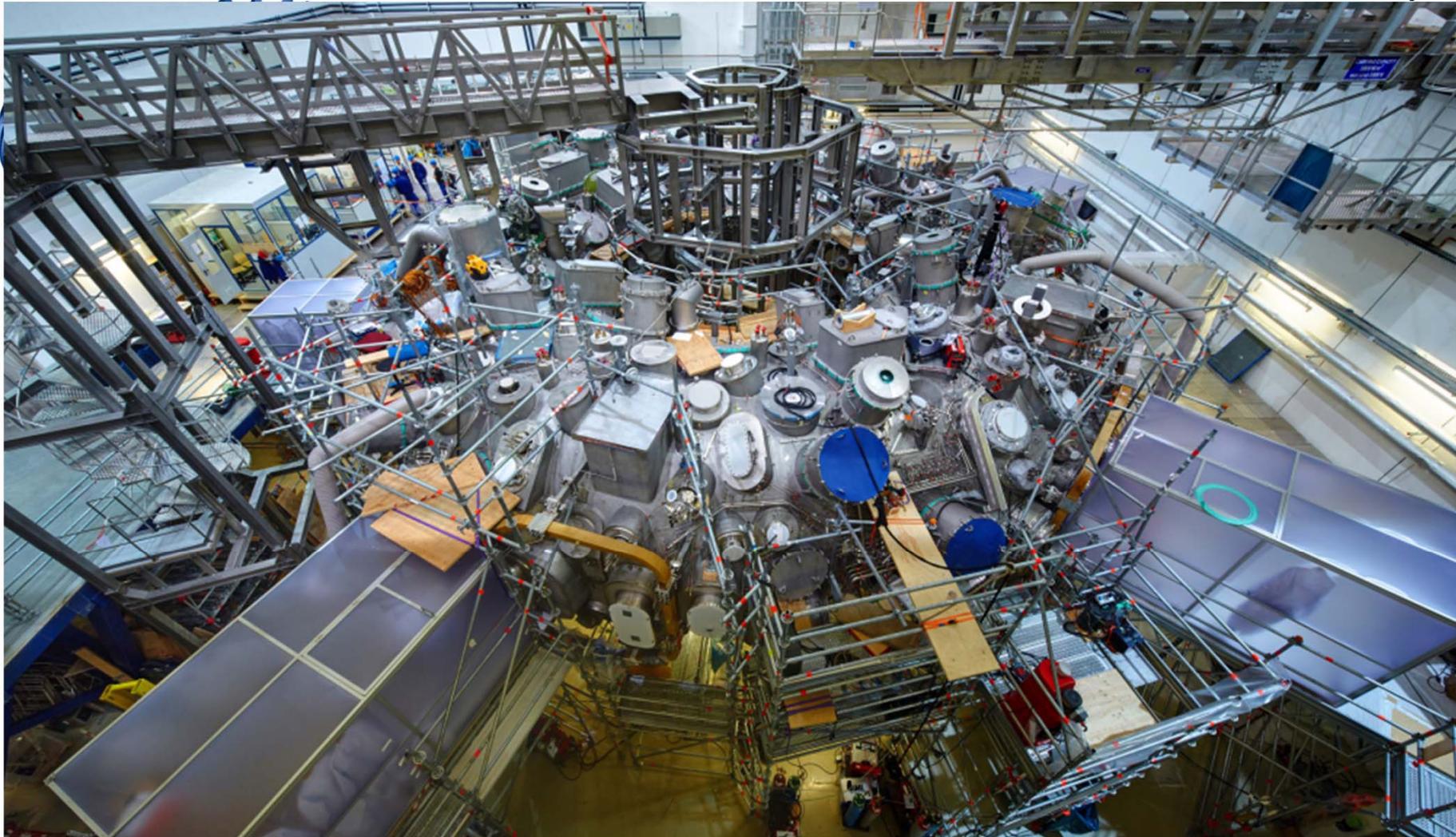
- Kanten-Biegewerkzeug zur Bestimmung von Winkel- und Radiusabhängigkeit der supraleitenden Eigenschaften
- CCRC Demonstrator-Kabel



AKTUELLE PROJEKTE

Stand von Wendelstein und ITER

Wendelstein – Ein Projekt in Deutschland



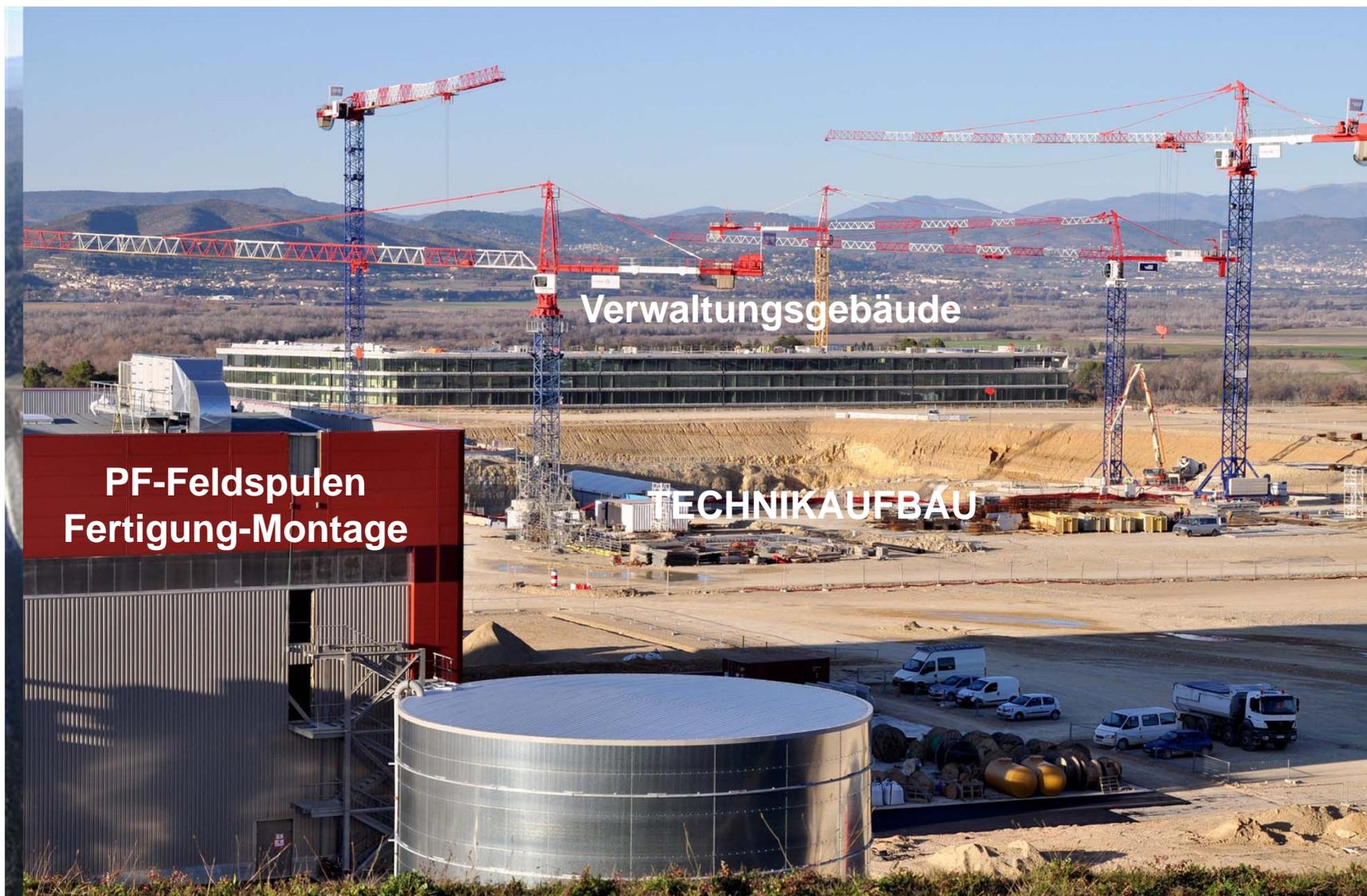
- im Gegensatz zum Tokamak sind Stellaratoren intrinsisch stationär

Wendelstein

- Seite 2012/2013 „Innenausbau“



ITER - Standort 2011



ITER - Standort 2014



Vision der FUSION

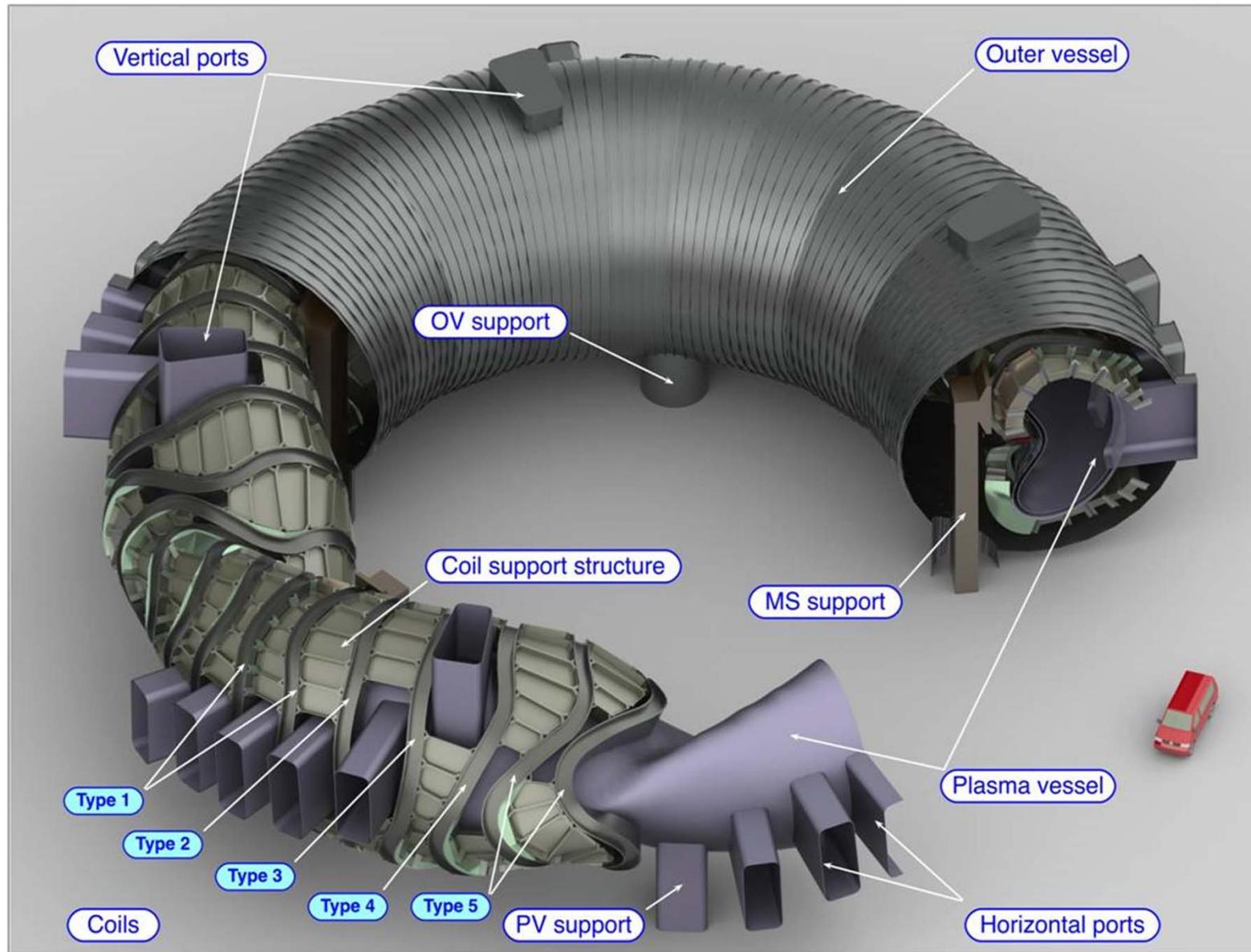
- praktisch unbegrenzte Ressourcen
- geographische Gleichverteilung der Ressourcen
- kein CO₂-Ausstoß
- keine Kritikalität – Unfallfolgen auf die Anlage beschränkt
- kein langlebigen Spaltprodukte (Aufbereitung, Endlagerung)
- Zwischenlagerung ~60-100 Jahre

- Taschenfusion unmöglich → Großanlagen (Akzeptanz)
- Vielfältige technische Herausforderungen noch zu meistern

Aber heute wie in der Zukunft :

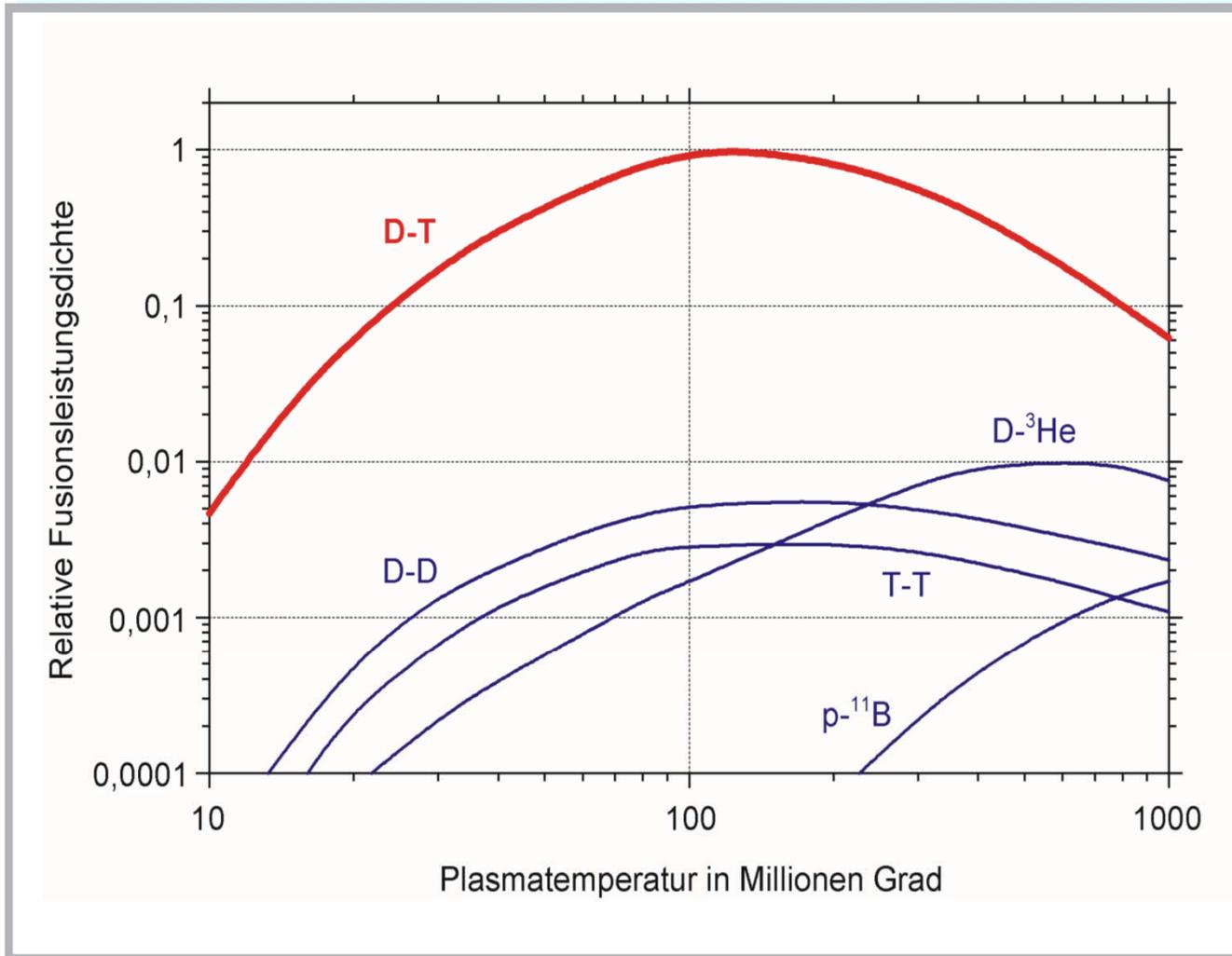
- Spin-off in viele Technologiefelder (Supraleitung, Werkstoffe, Systemdynamik, Plasma, Vakuum, Fernhantierung,.....)

Kraftwerk auf Stellaratorbasis - HELIAS



ERGÄNZUNGSFOLIEN

Fusionsreaktion- mögliche Reaktionen



Abkürzungen

D	Deuterium
T	Tritium
He	Helium
B	Bor
p	Proton

Reaktionen

D + T	→	⁴He + n
D + D	→	³ He + n
	→	T + p
D + ³ He	→	⁴ He + p
T + T	→	⁴ He + 2n
p + ¹¹ B	→	3 ⁴ He

- Optimal nur *D-T* Reaktion bei 100 Mio Grad Plasmatemperatur