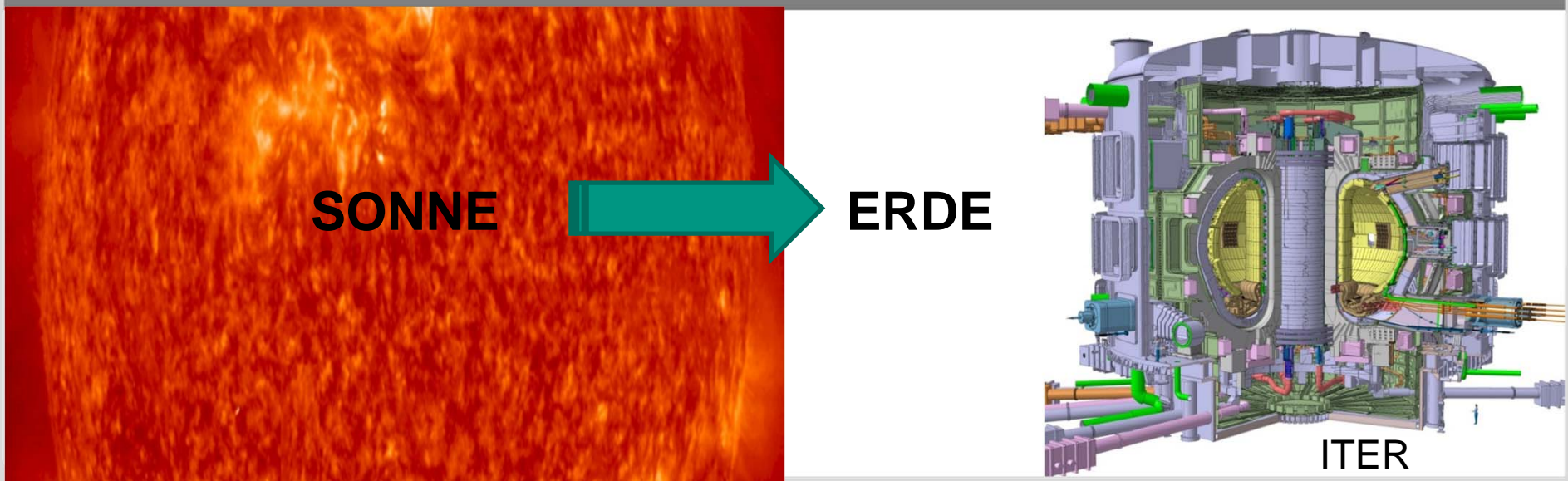


# „Fortschritte in der Fusionsforschung -ITER, Wendelstein und Wege zu einem Fusionskraftwerk“

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

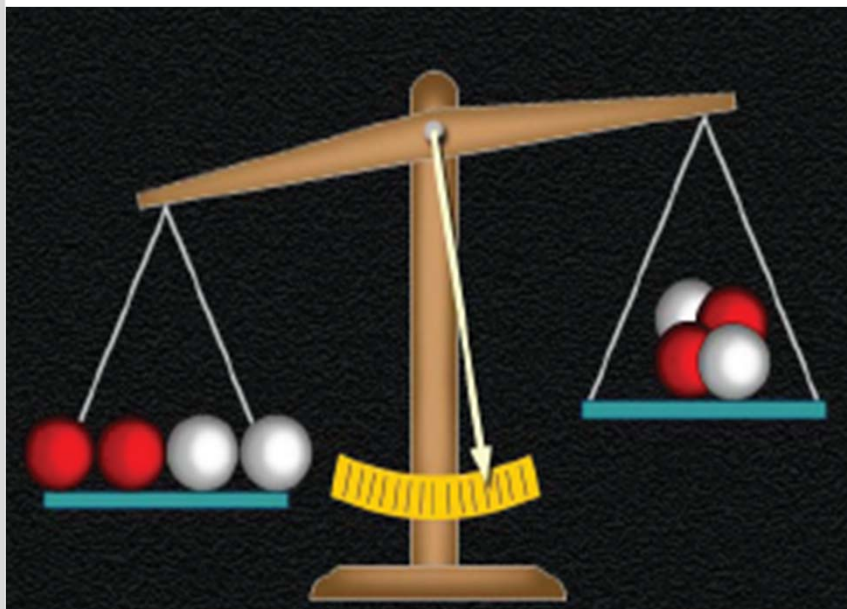
**WAS IST FUSION ?**



# 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:

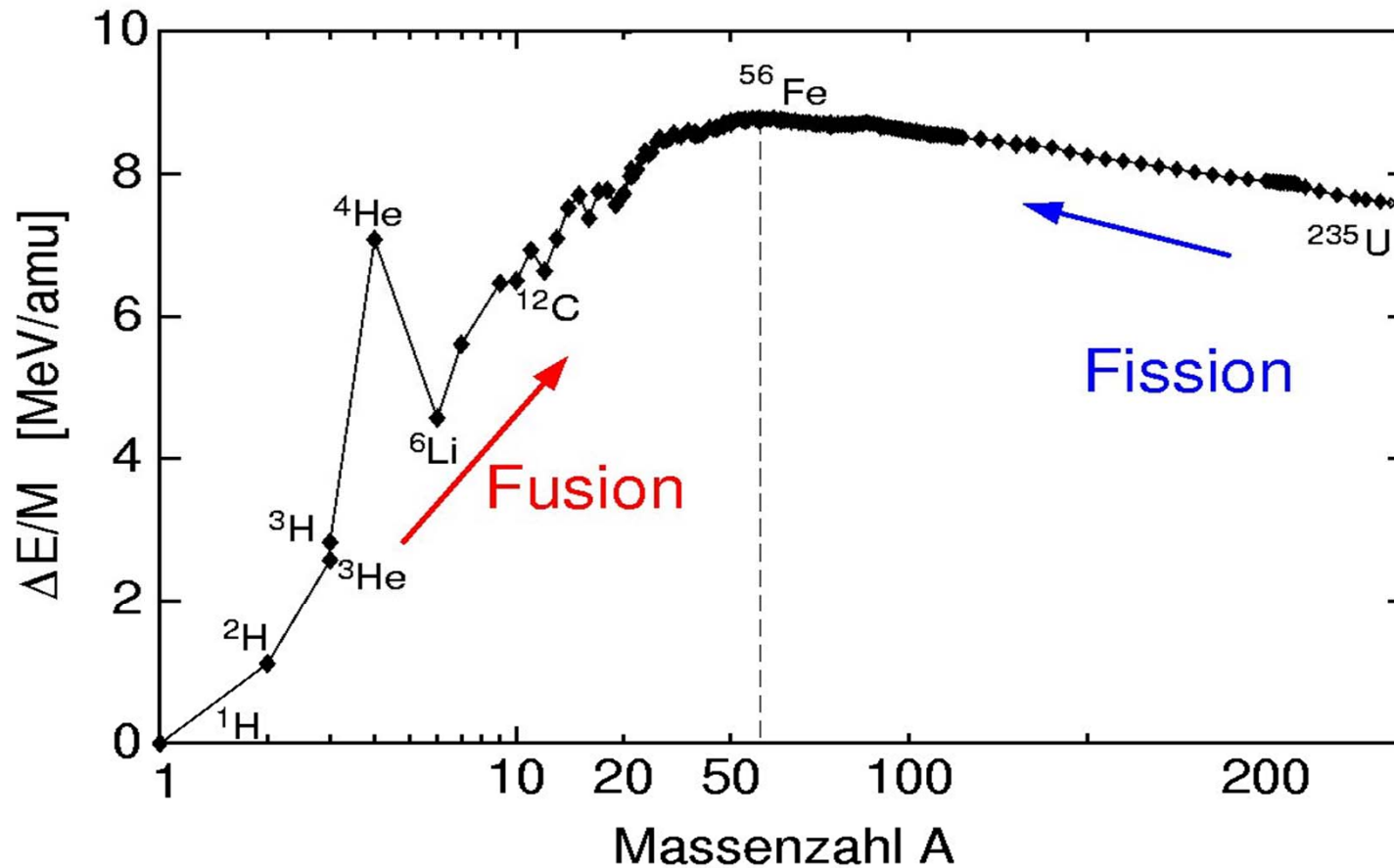
$$E = m c^2 = 10^{-3} \text{ kg} \cdot \left( 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Sprengkraft von 10.000t TNT !!

**ENORME ENERGIEINHALTE**

# Was ist Fusion ?

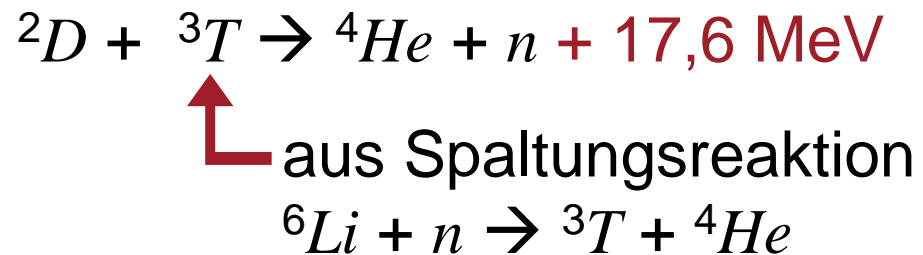
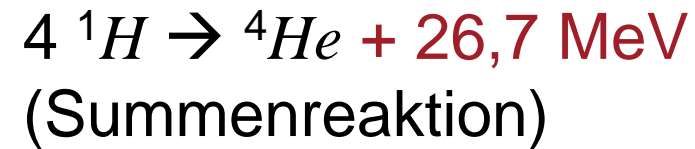
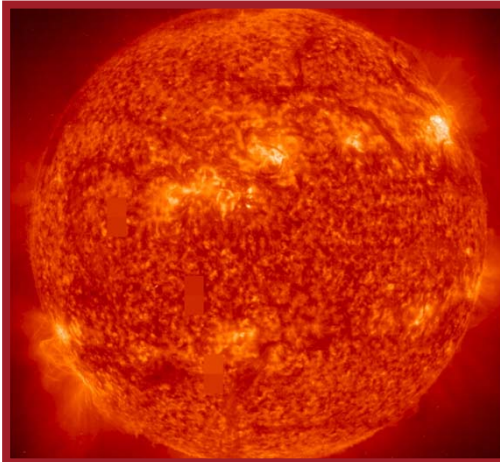
- Welche Elemente können fusionieren ?



Bindungsenergie  $E$  pro Nukleon als Funktion der Massenzahl  $A$

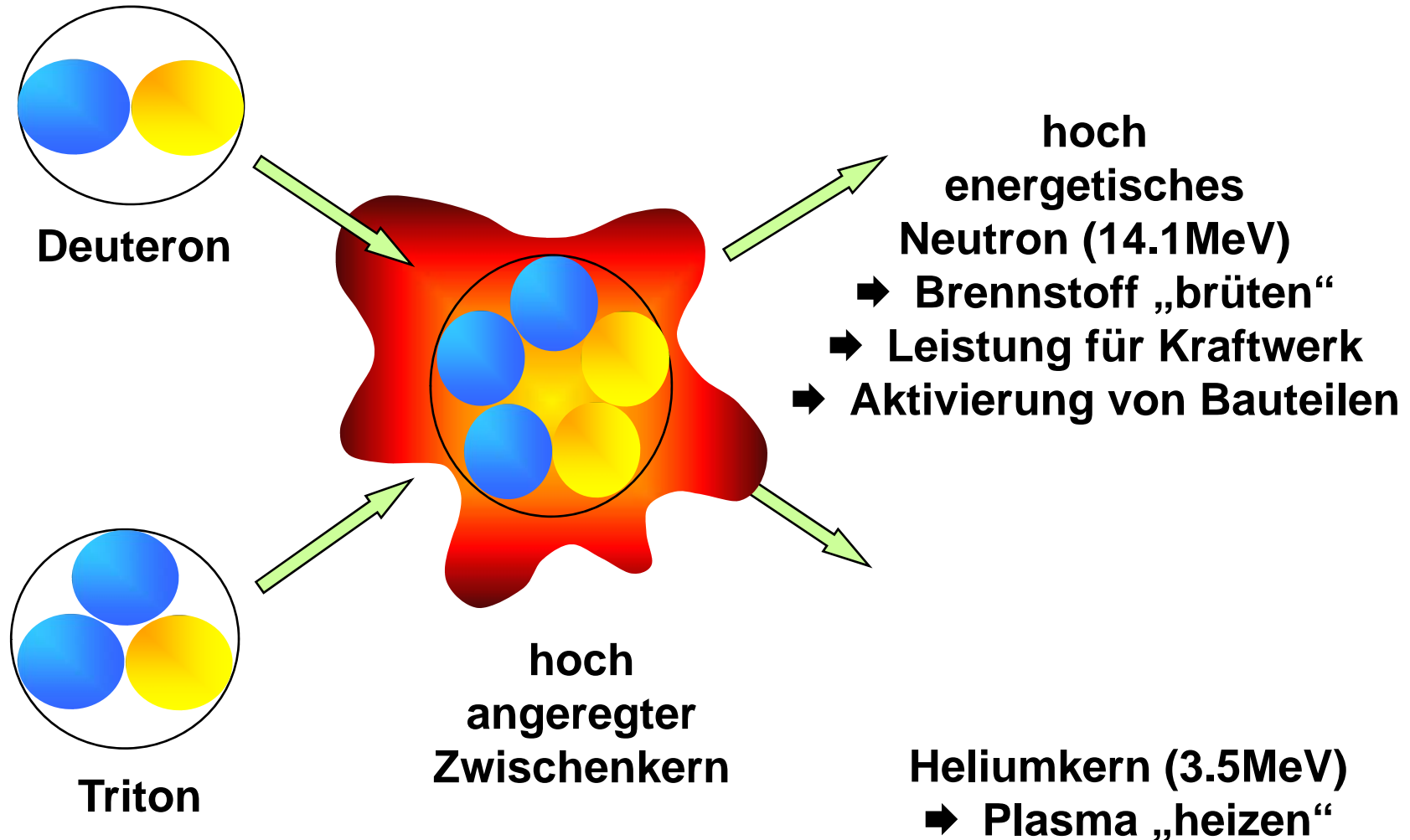
# Was ist Fusion ?

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

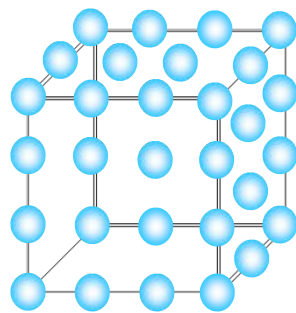
- Für ein Kraftwerk ( $1000\text{MW}_e = 2.700\text{MW}_{th}$ ) benötigt man:

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

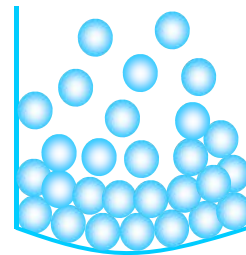
# Was ist Fusion ?

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

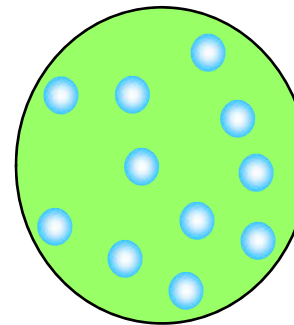
- **Betrachtung: Plasma = “Aggregatzustand”**



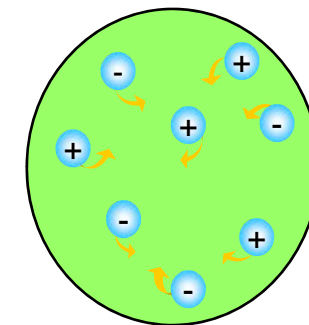
**kalt**  
fest: Eis



**warm**  
flüssig: Wasser



**heiß**  
gasförmig: Dampf



**100.000 °**  
Plasma

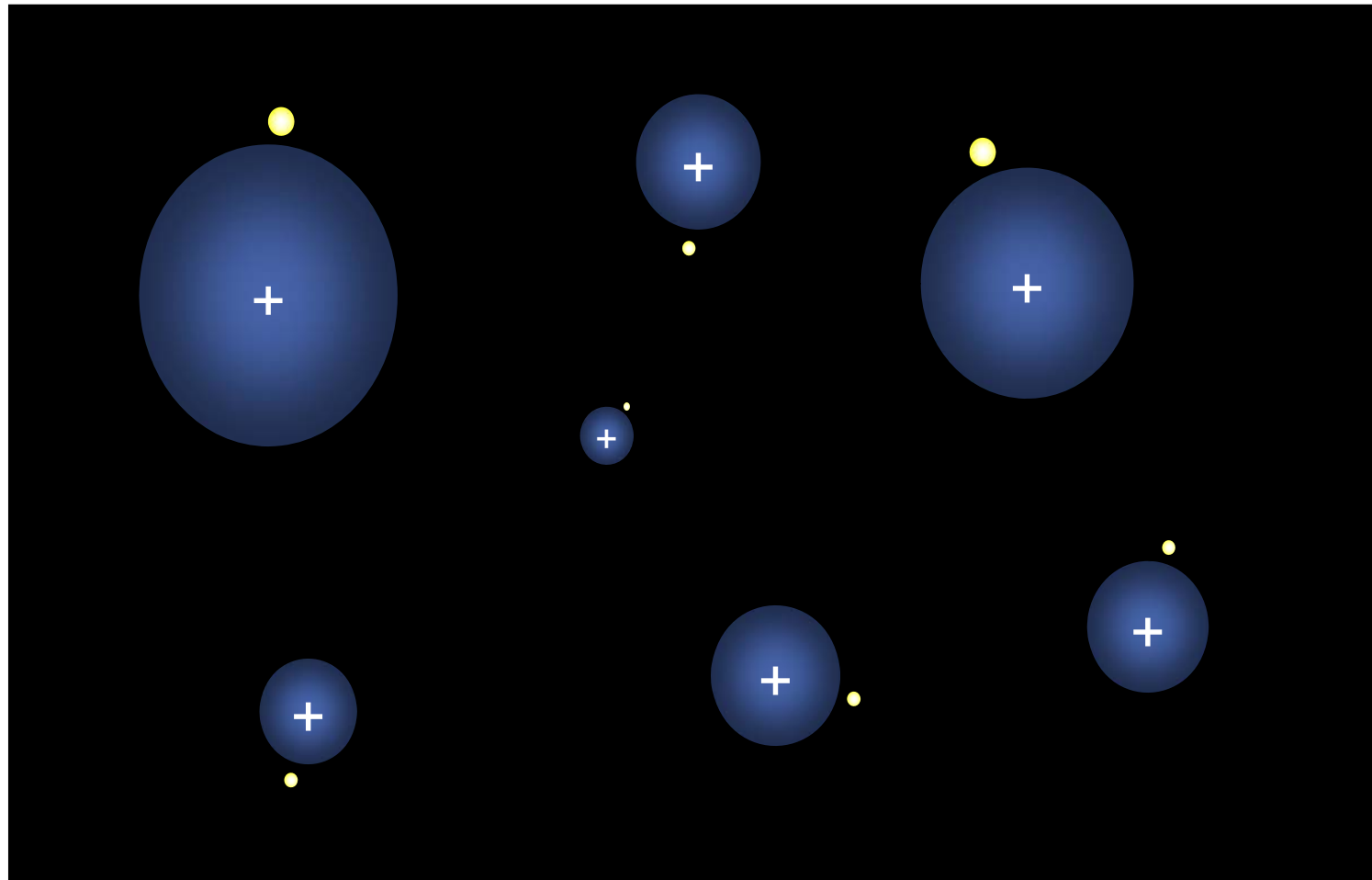
## Was passiert im Plasma ?

- Zerfall neutraler Atome in Ionen und Elektronen.
- therm. Energie  $\approx$  Größenordnung der Ionisationsenergie (13.6eV bei  $H_2$ ).
- Transition Gas  $\rightarrow$  Plasma kontinuierlicher Prozess (kein Phasenübergang).

# Was ist Fusion ?

Was ist ein Plasma ?

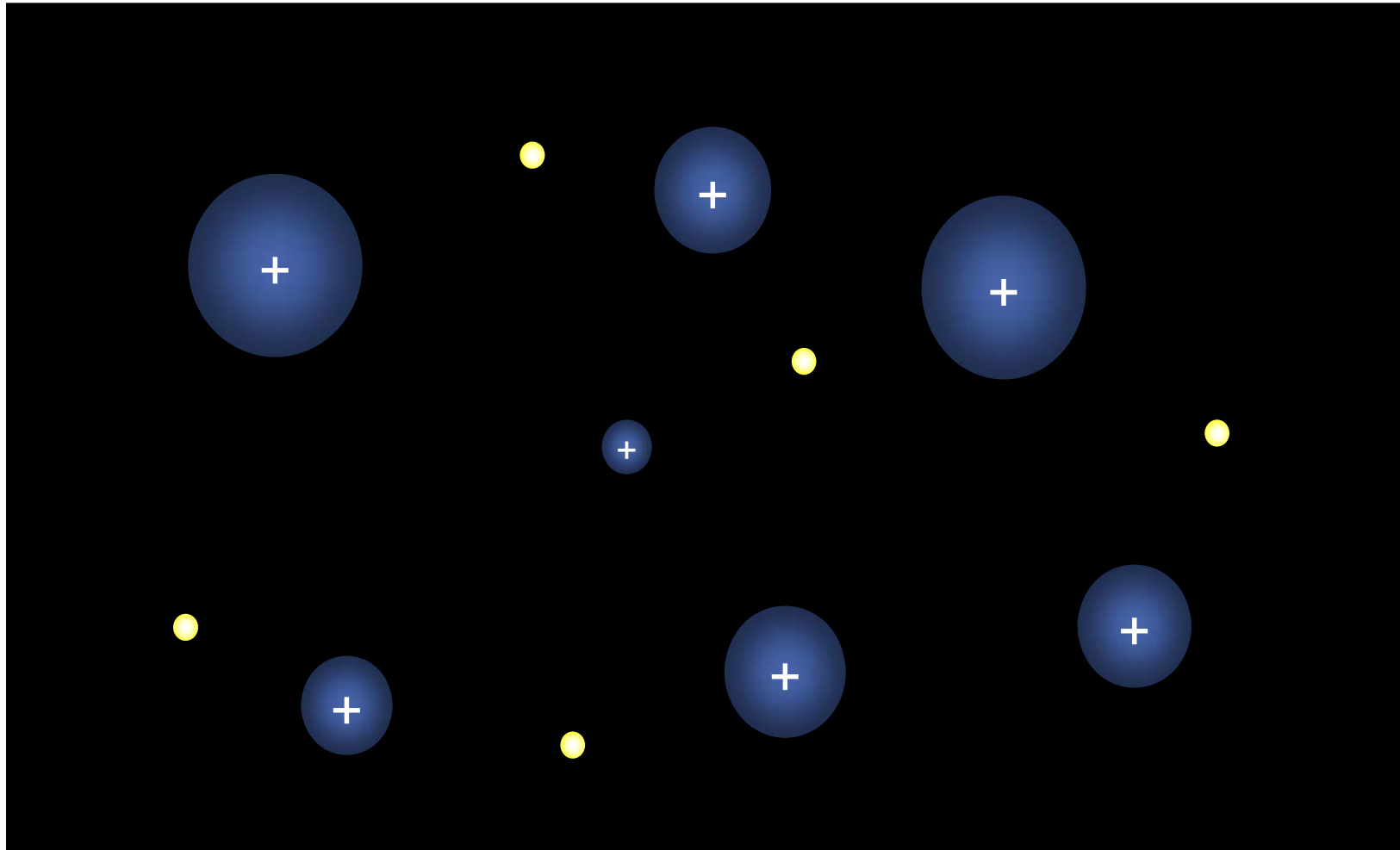
Beispiel: Atombewegung des Wasserstoffs bei  $T < 10^5 \text{°C}$  → **KEIN PLASMA**



# Was ist Fusion ?

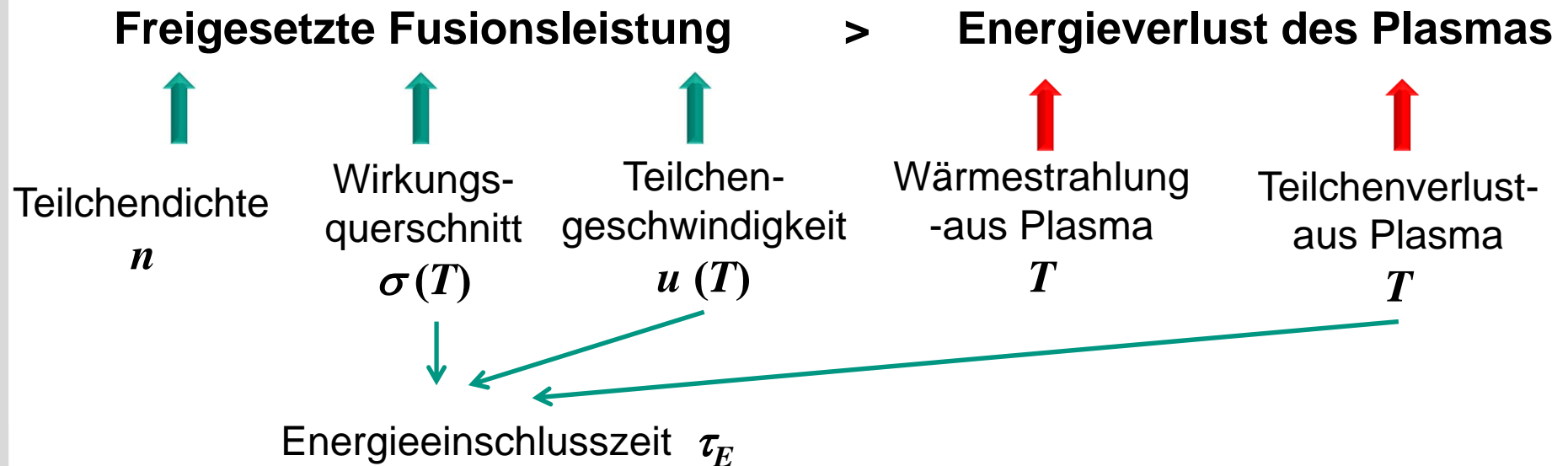
Was ist ein Plasma ?

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 / m<sup>3</sup>)**

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

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

**$\tau_E$ : Einschlusszeit (bei ITER ca. 3.7s)**

# Was ist Fusion ?

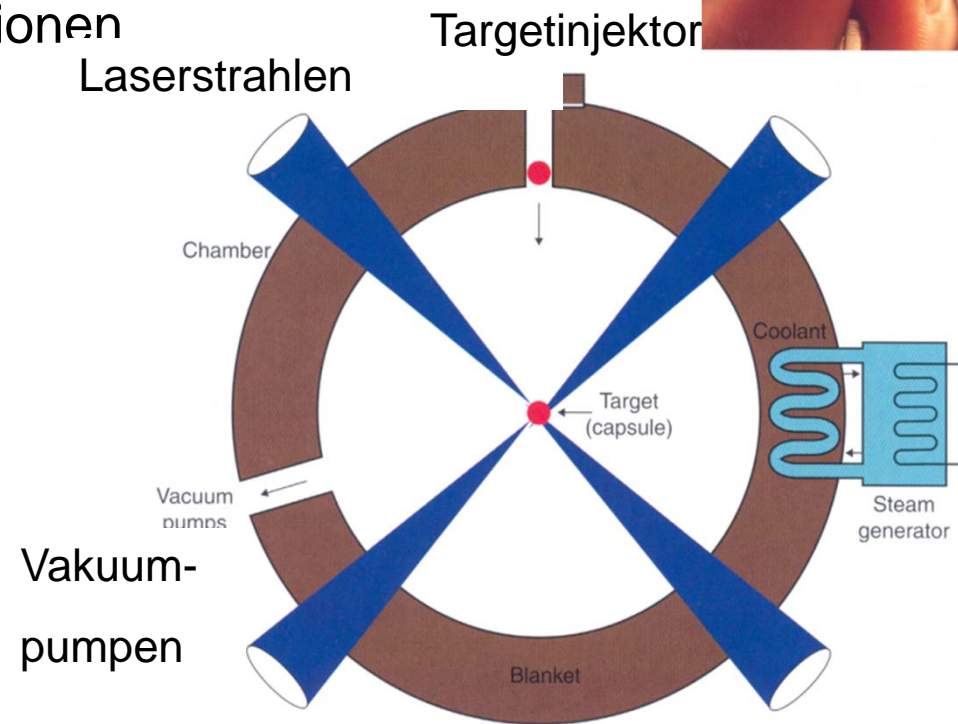
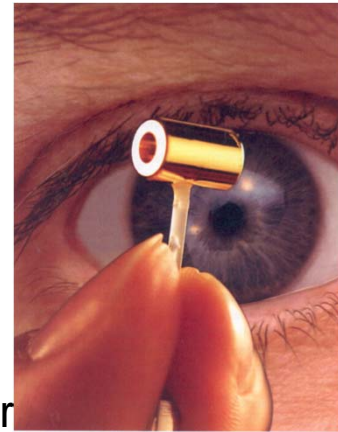
## Wie schlieÙe ich Plasma ein ? – techn. Optionen

### ■ Trägheitseinschluss

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

durch **schnellen** Energieeintrag.

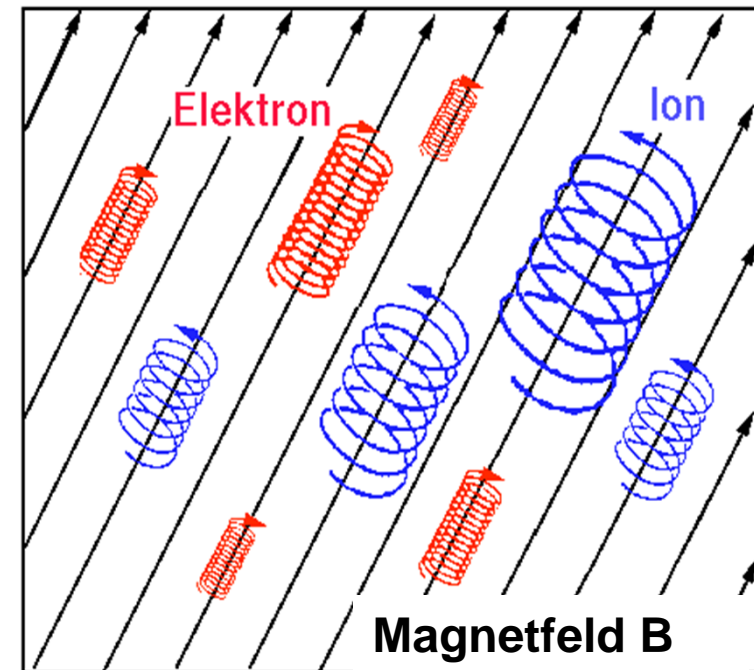
- ➔ kleine Thermonuklearexplosionen (Mini-H-Bombe). (diskontinuierlich)



# Was ist Fusion ?

## Was bewirkt der Magnetfeldeinschluss ?

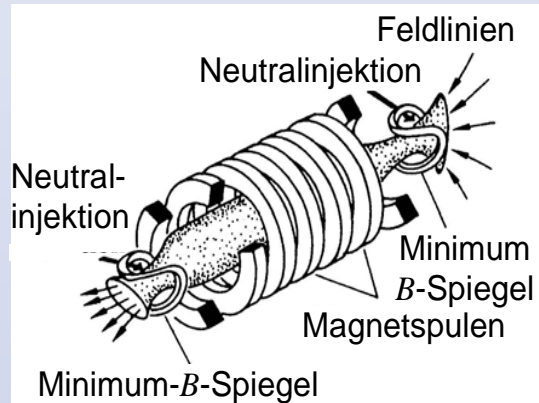
- Elektronen, Ionen fliegen entlang Feldlinie
- ➔ unendliche therm.& elektr. Leitfähigkeit  $\parallel \mathbf{B}$
- Elektronen & Ionen rotieren auf unterschiedlichen Kreisbahnen
- ➔ Heizung mit der Eigenfrequenz möglich (ICRH, ECRH, LHH)
- ➔ Aber unterschiedliches Stoßverhalten  $\perp \mathbf{B}$
- 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

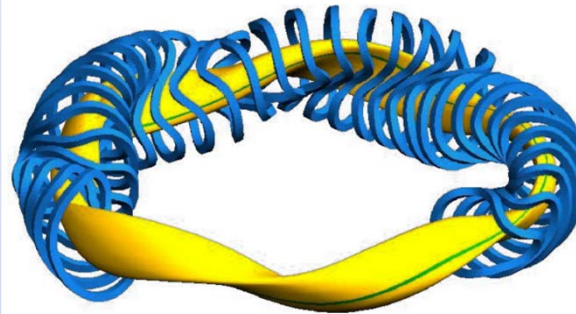


- Einfacher Aufbau
- Hohe Endverluste
- Komplexe Plasmasteuerung



**TMX-U** Livermoore  
ging nie in Betrieb

### ■ Stellerator

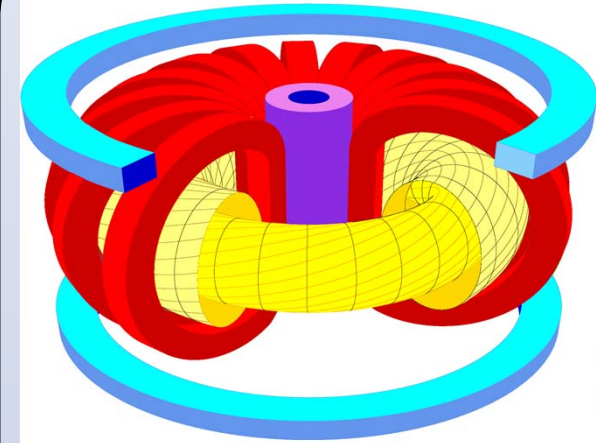


- kein Plasmastrom
- ➔ stabiles Plasma
- stationärer Betrieb
- komplexer Aufbau Spulen



**Wendelstein in Betrieb**  
(weniger Erfahrung)

### ■ Tokamak



- Einfacher Aufbau und Betrieb
- Plasmastromstrome
- ➔ Instationäre Maschine

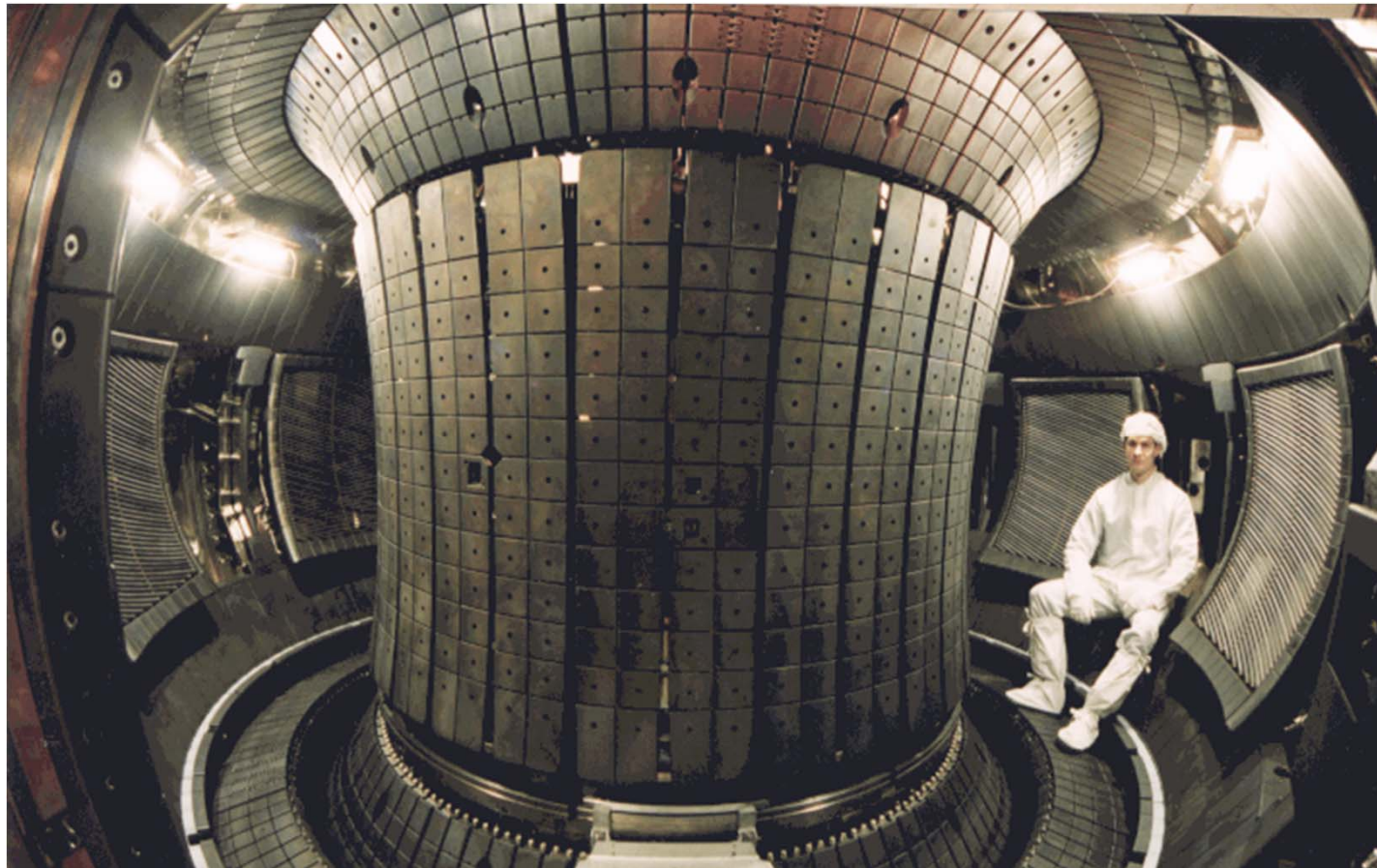


**Grundlage ITER und DEMO**



# 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

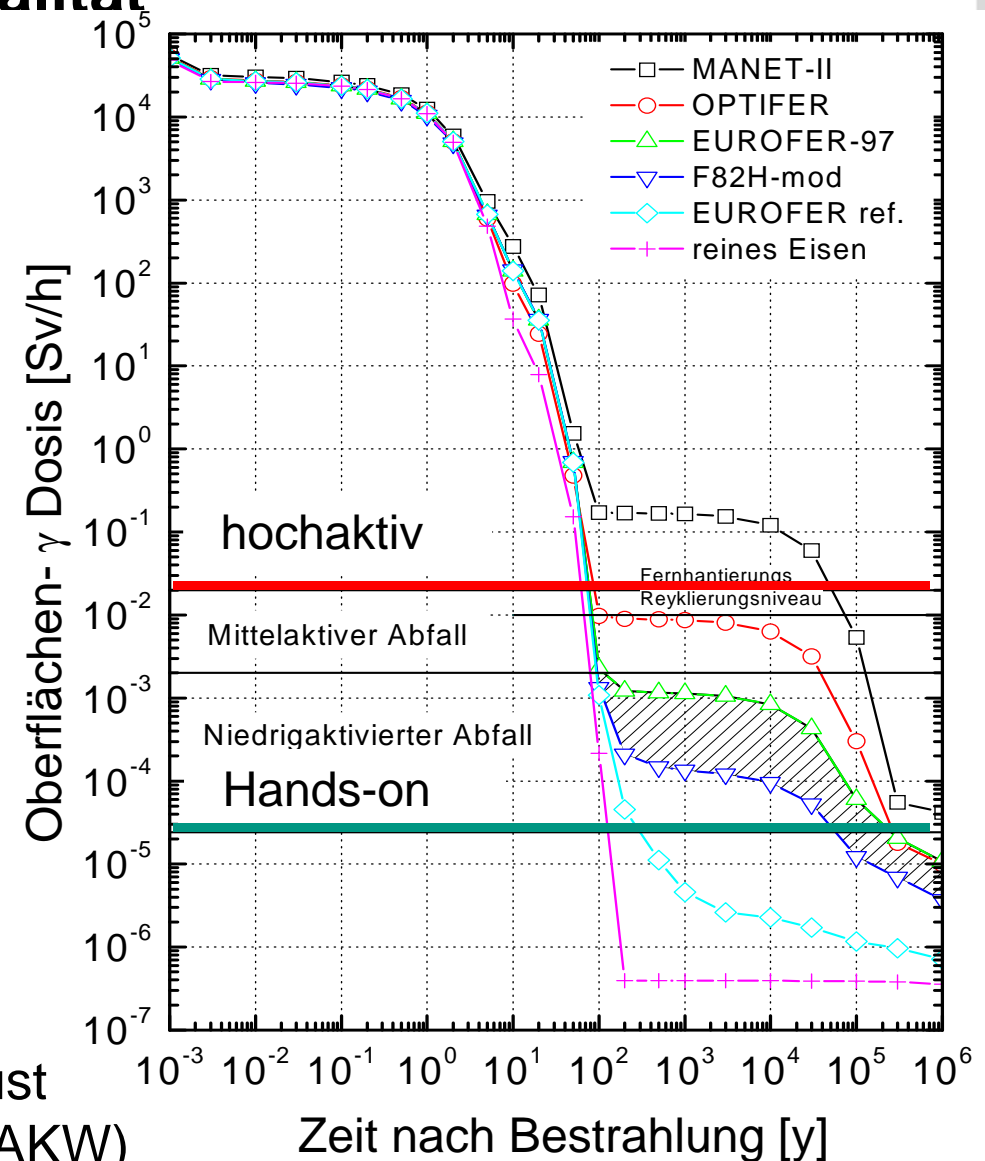
gene.rzg.mpg.de

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

# Was ist Fusion ?

## Fusion, Radioaktivität, Kritikalität

- Keine primäre Radioaktivität (außer  $^3\text{T}$ -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 ( $Q = 10$ )

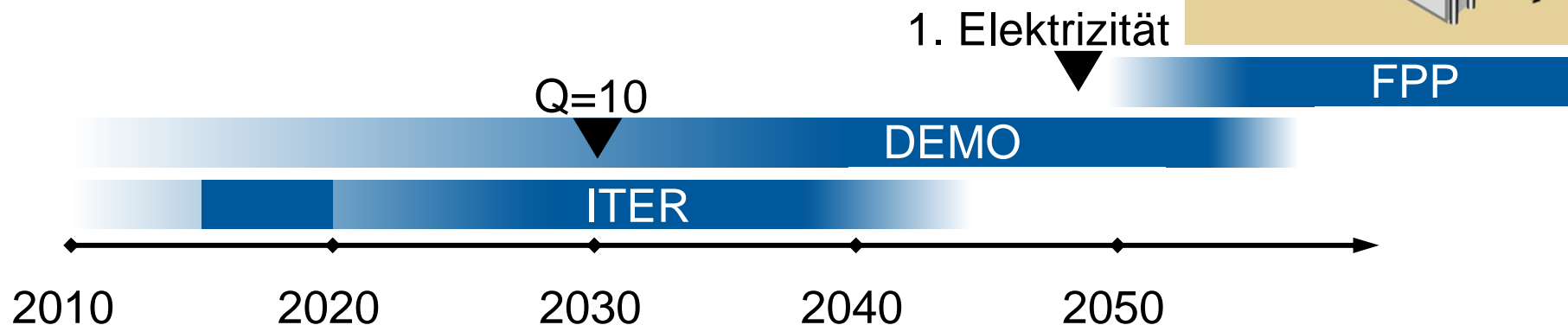
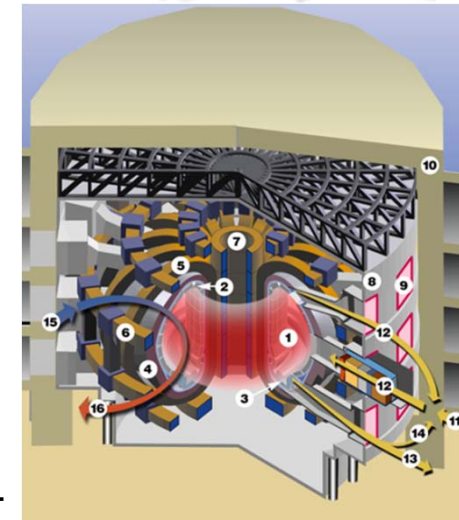
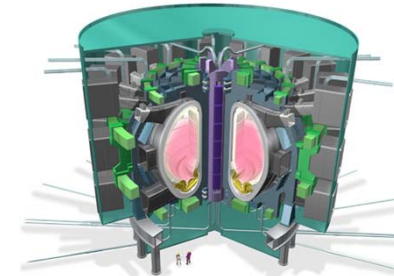
- Essentielle Physik & Technologieträger für DEMO

## DEMO: Demonstration der Machbarkeit eines Fusionkraftwerks (FPP)

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

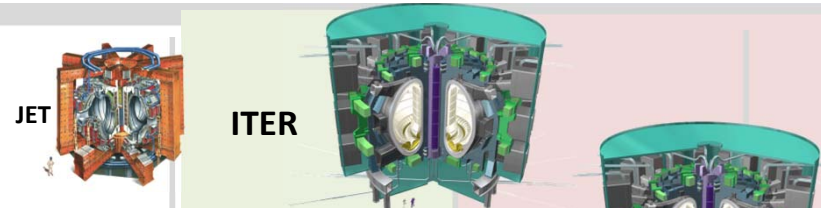
## FPP: Kommerzielles Fusionskraftwerk

- Stellarator oder Tokamak



# Missionen

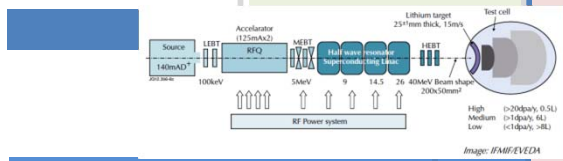
1. Plasmabetrieb
2. Wärmeabfuhr
3. Materialien
4. Tritiumbrüten
5. Sicherheit
6. DEMO
7. Kosten
8. Stellarator



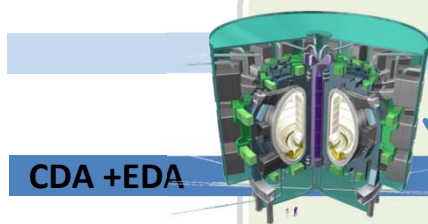
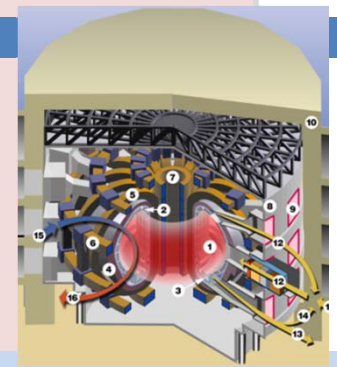
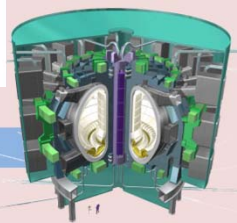
**Induktiv Stationär**



**Basisstrategie**  
Verbesserter Einschluss & Materialien



**ITER Testblanketprogramm**  
Parallele Blanketkonzepte



**DEMO Entscheidung**

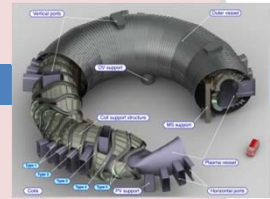
**Fusionselektrizität**

CDA + EDA

**Aufbau**

**Operation**

**Kapitalkostenreduktion und Langzeittechnologien**



W7-X

**Stellaratoroptimierung**

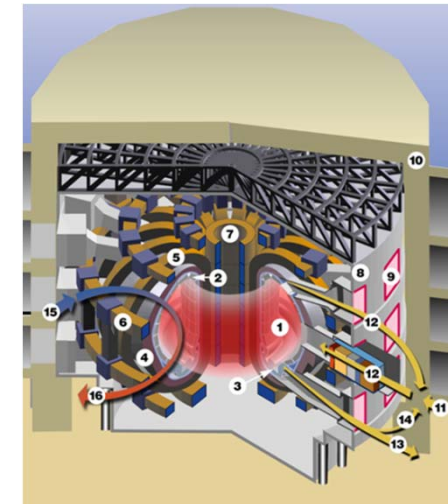
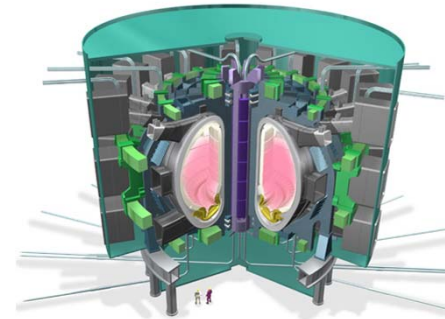
**Brennendes Plasma im Stellarator**



# EU “Fahrplan” – zentrale Aspekte

## ITER

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



## DEMO

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

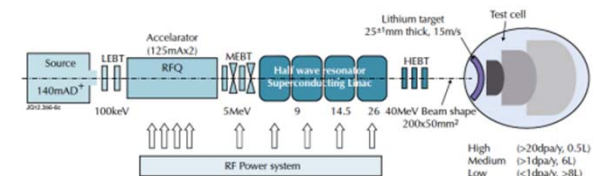
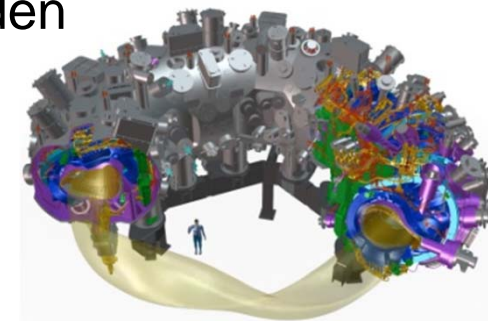


Image: IFMIF/EVEDA

## 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**



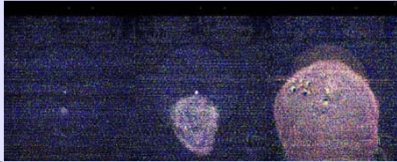
# FORTSCHRITTE IN DER FUSIONSFORSCHUNG

Ziel: Entwicklung von Technologien zur Realisierung der Fusion als Energiequelle

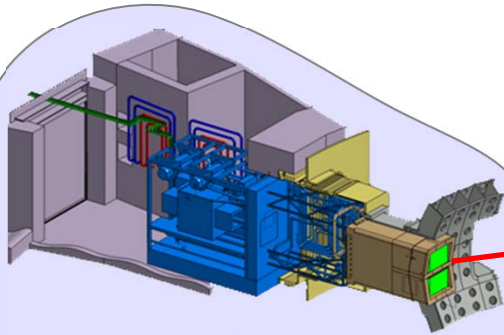
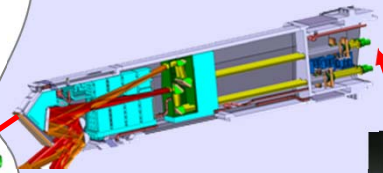
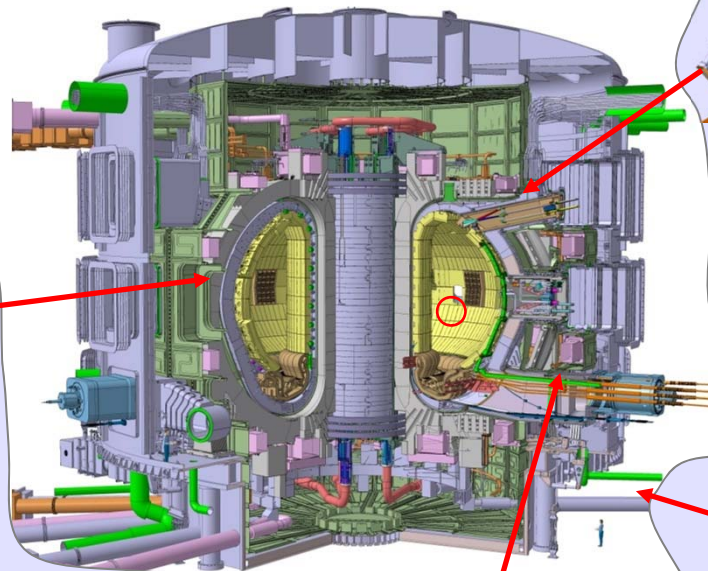
- Arbeitsgebiete am KIT
  - Ingenieurtechnik - „Fusion Engineering“-
  - „Fusionsmaterialentwicklung und -qualifizierung“

# 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<sub>c</sub> Stromzuführungen
  - Supraleitende Drähte &Kabel
  - HT<sub>c</sub> 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**



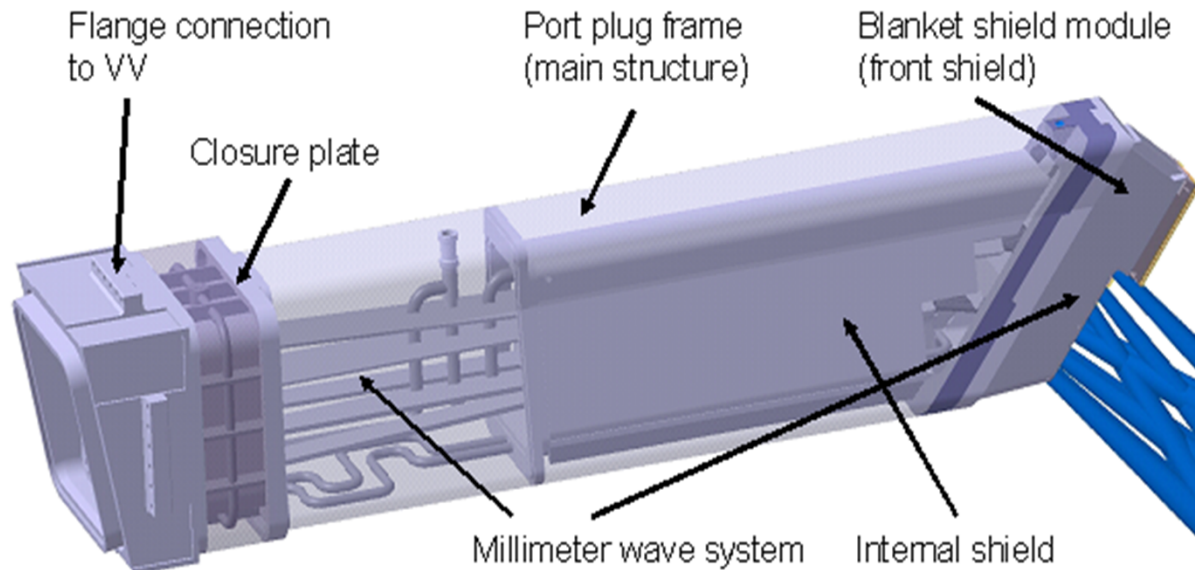
**Parameter:**

**Magnetfeld:** ca. 7 T

**Beschleunigung:** ca. 80 kV

**Elektronenstrahl:** ca. 80 A

# Mikrowellenheizung: ECRH-Launcher



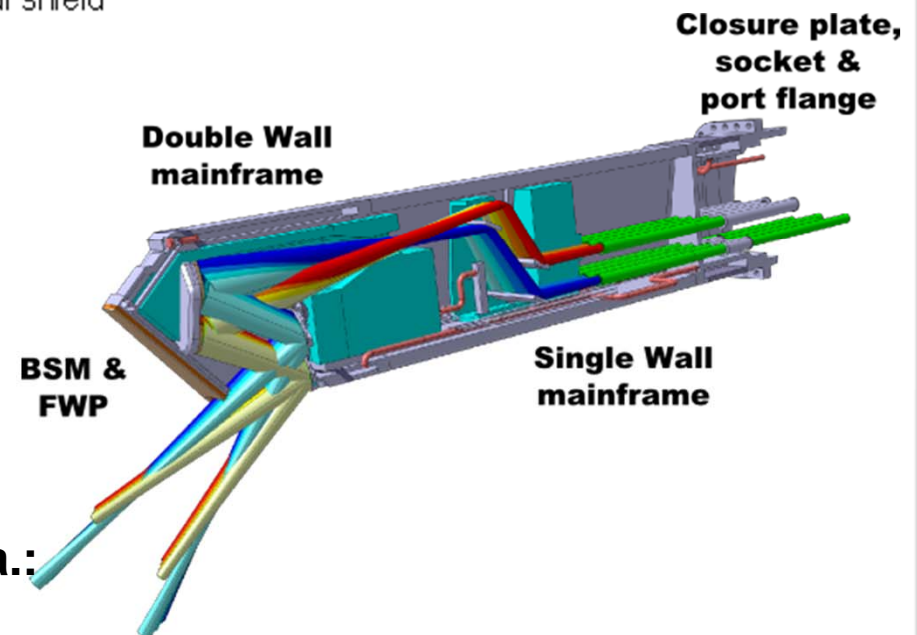
## Funktion:

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

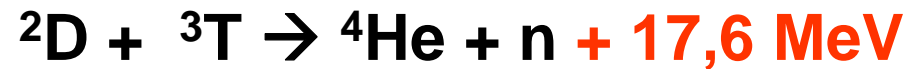
## Ziel

- 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:

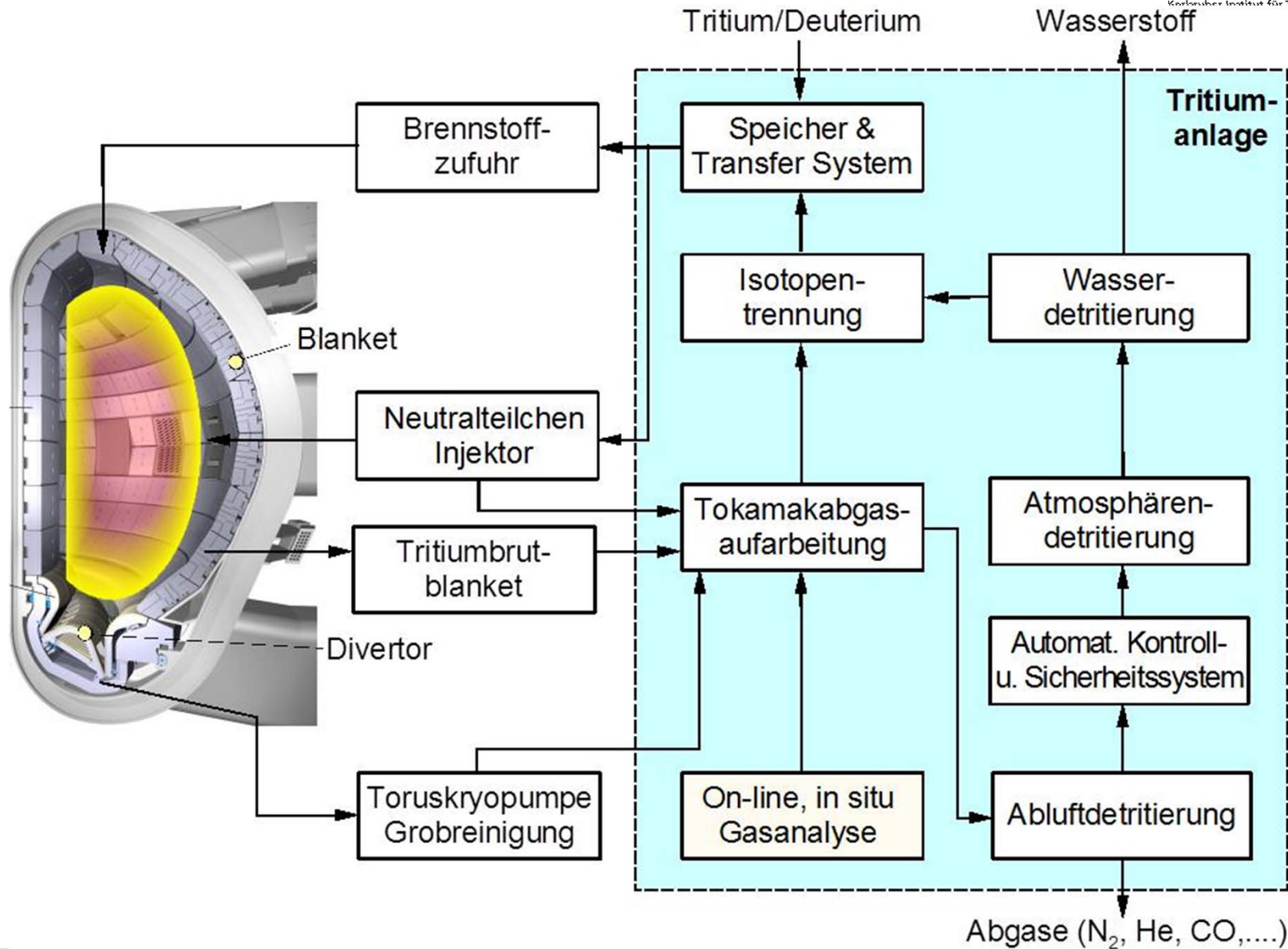
- weicher  $\beta$ -Strahler mit 20 keV Zerfallsenergie
- 12,3 Jahre Halbwertszeit
- physiologisch kritische Austauschreaktion von Wasserstoffatomen n



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



# ITER-Tritium-Kreislauf ("Fuel Cycle")

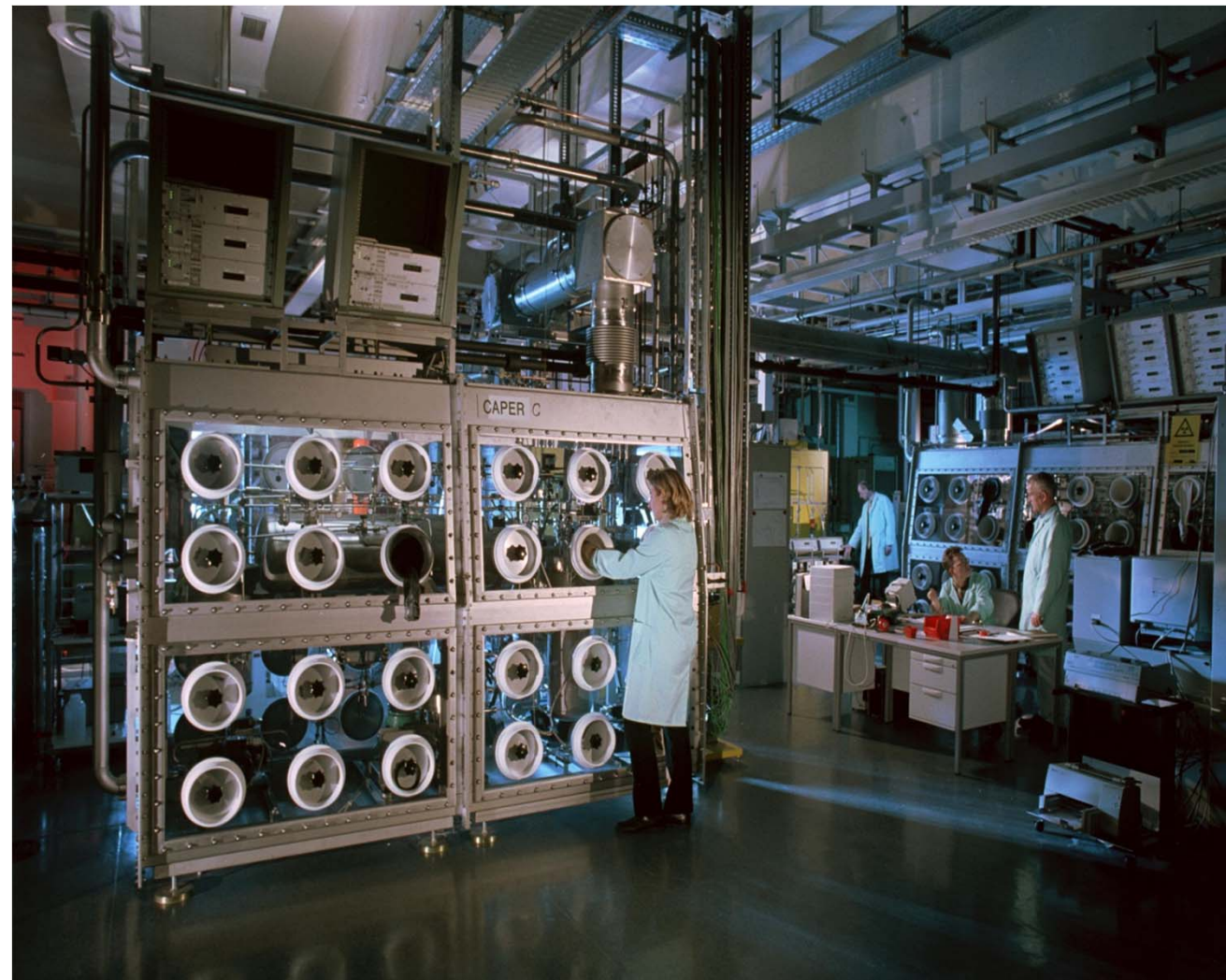


# ITER-Tritium-Kreislauf (“Fuel Cycle”)

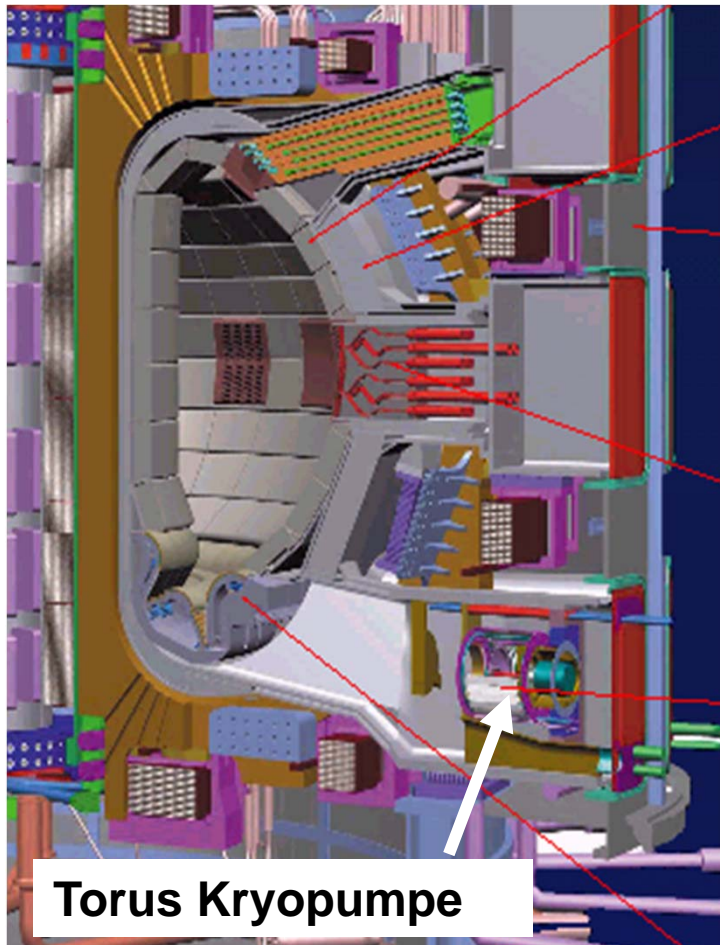
TLK –

Tritium-  
Labor  
Karlsruhe

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

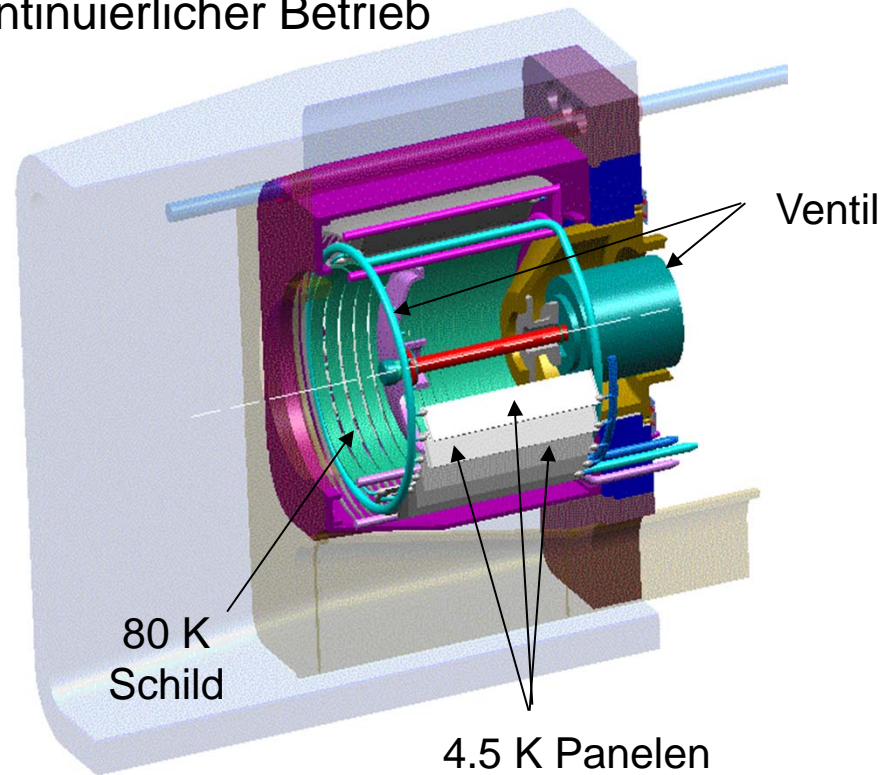


# ITER Fuel Cycle: Torus-Kryopumpen

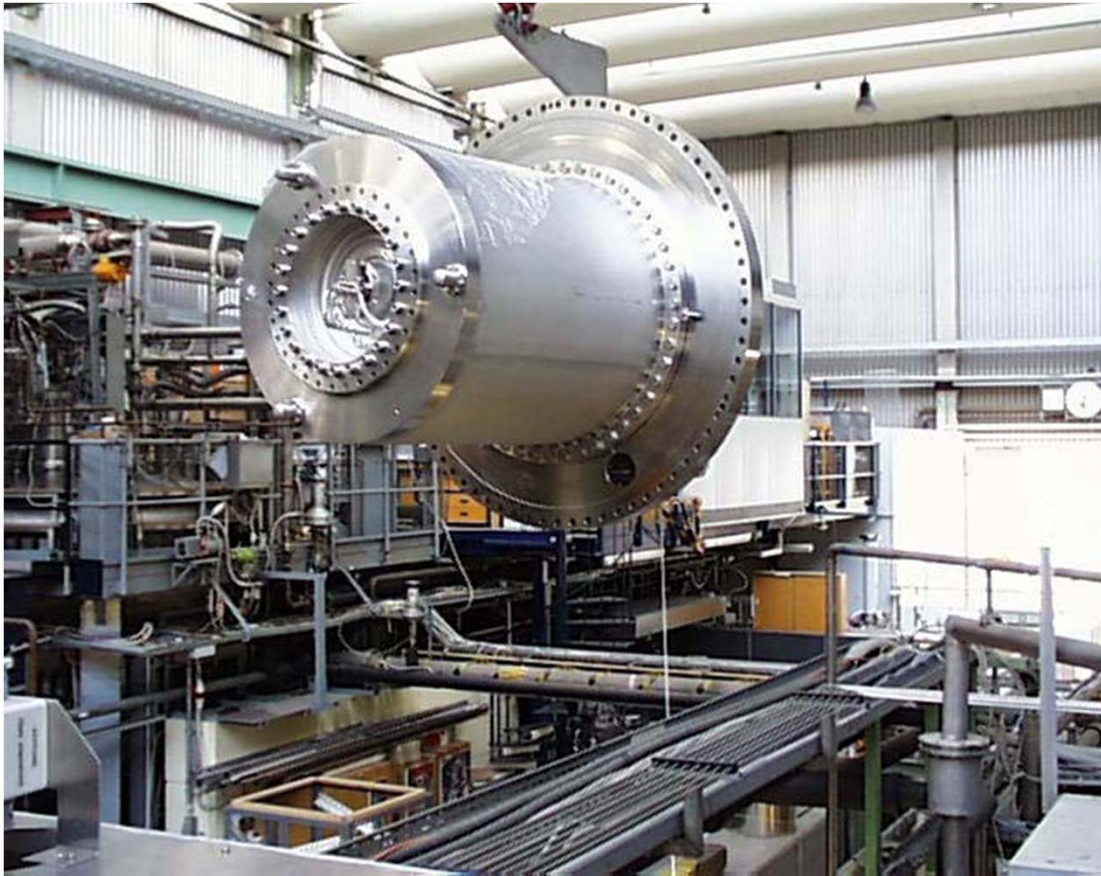


## ITER-Torus-Kryopumpe: ITeP-Entwicklung Funktionsweise:

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



# ITER Fuel Cycle: Torus-Kryopumpen

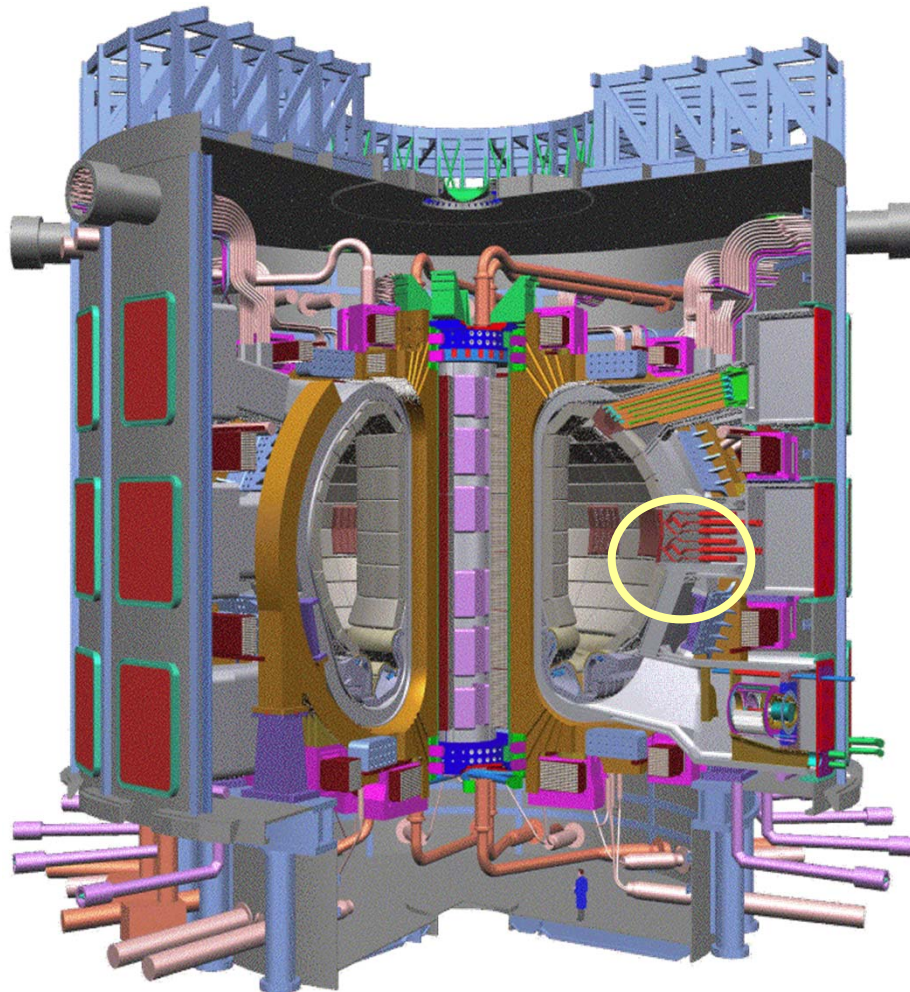


**Test der Modellpumpe im ITeP**

## 4.5 K - Kryopaneln



# Test-Blanket-Module

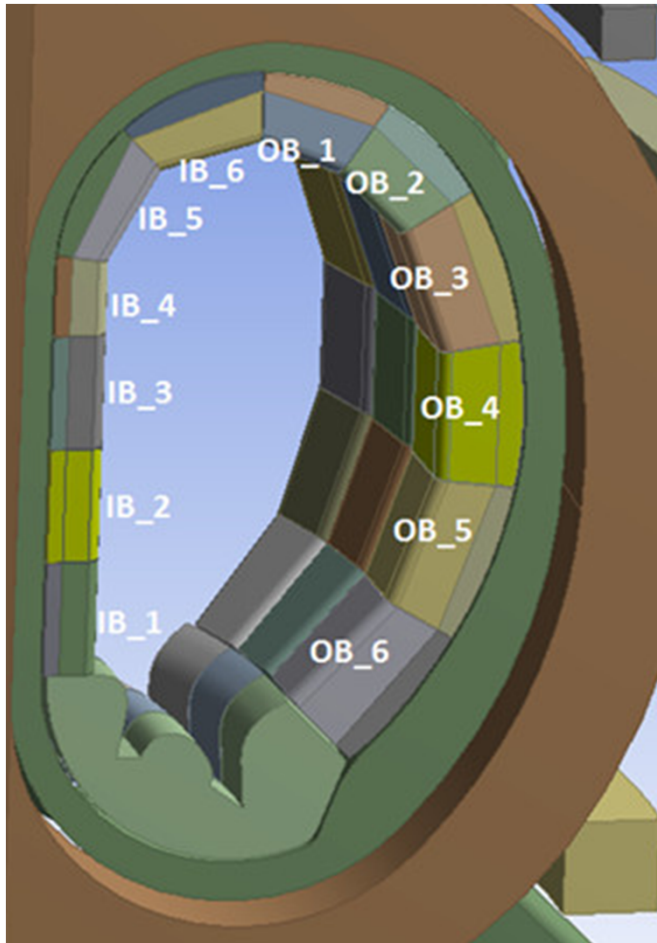


**ITER: Tritium-Versorgung  
extern,  
(aber Erprobung von  
Brutkonzepten  
für DEMO)**

## **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
- .....

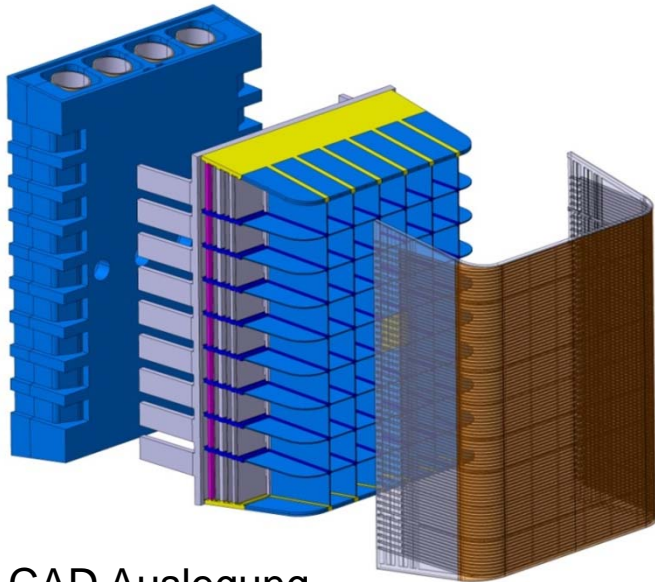
## Randbedingungen

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

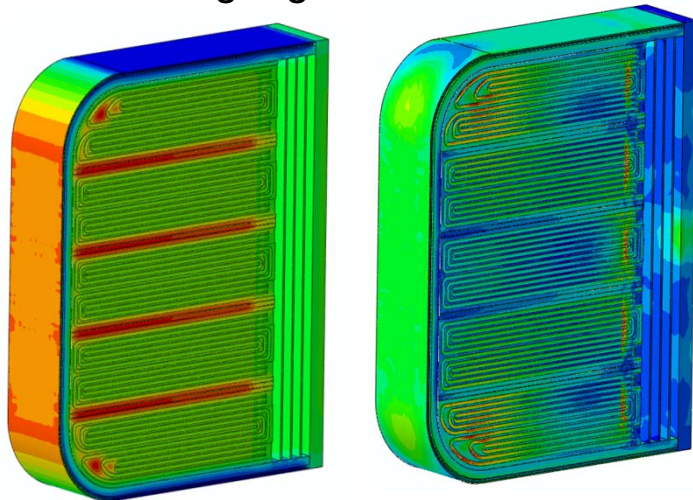
## Konzepte

- Festes Brutmaterial /Heliumkühlung
- Flüssiges Brut-/Kühlmaterial

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



CAD Auslegung



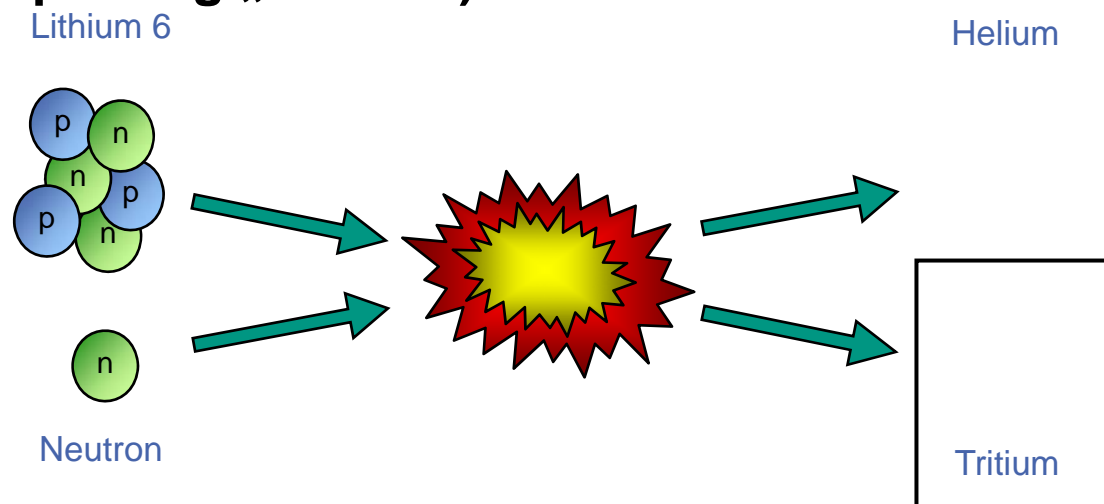
Berechnete therm. und mech. Spannungen

## Blanketauslegung (Design) und Analyse:

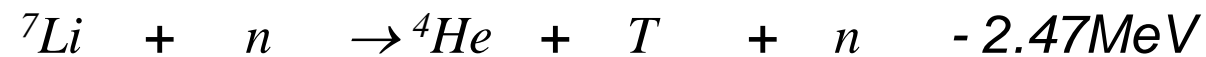
- CAD Design eines Testblanketmoduls.
- Neutronische Analyse für Leistungserzeugung und Tritiumbrüten.
- Thermohydraulik der Heliumkühlung.
- EM Analyse bei Plasmadisruptionen
- MHD –Analyse bei Flüssigmetallblankets
- Tritiumtransportmodellierung
- Sicherheitsberechnung hinsichtlich nuklearer Komponenten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



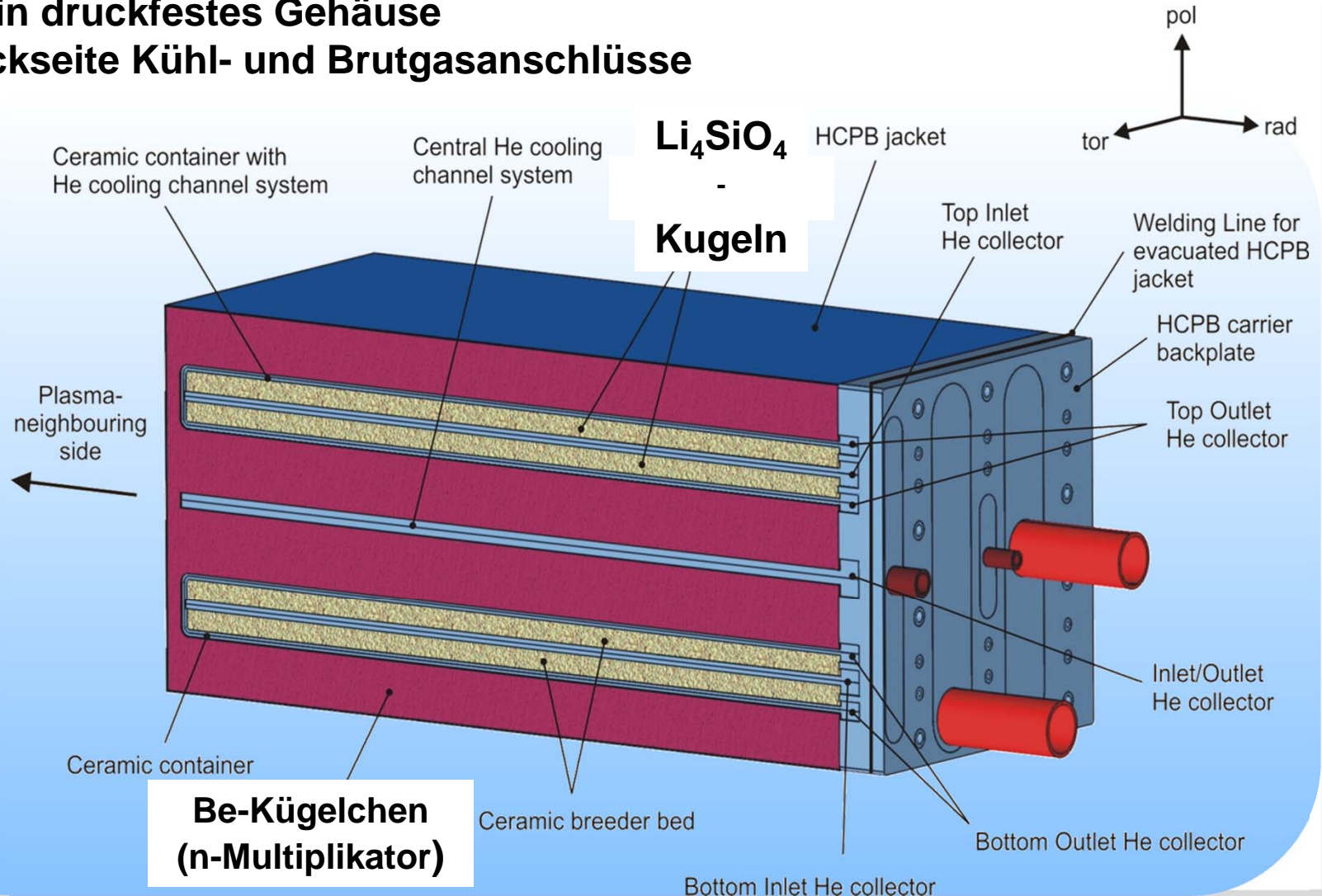


# HCPB-Test-Blanket-Modul-System

## Funktioneller Aufbau:

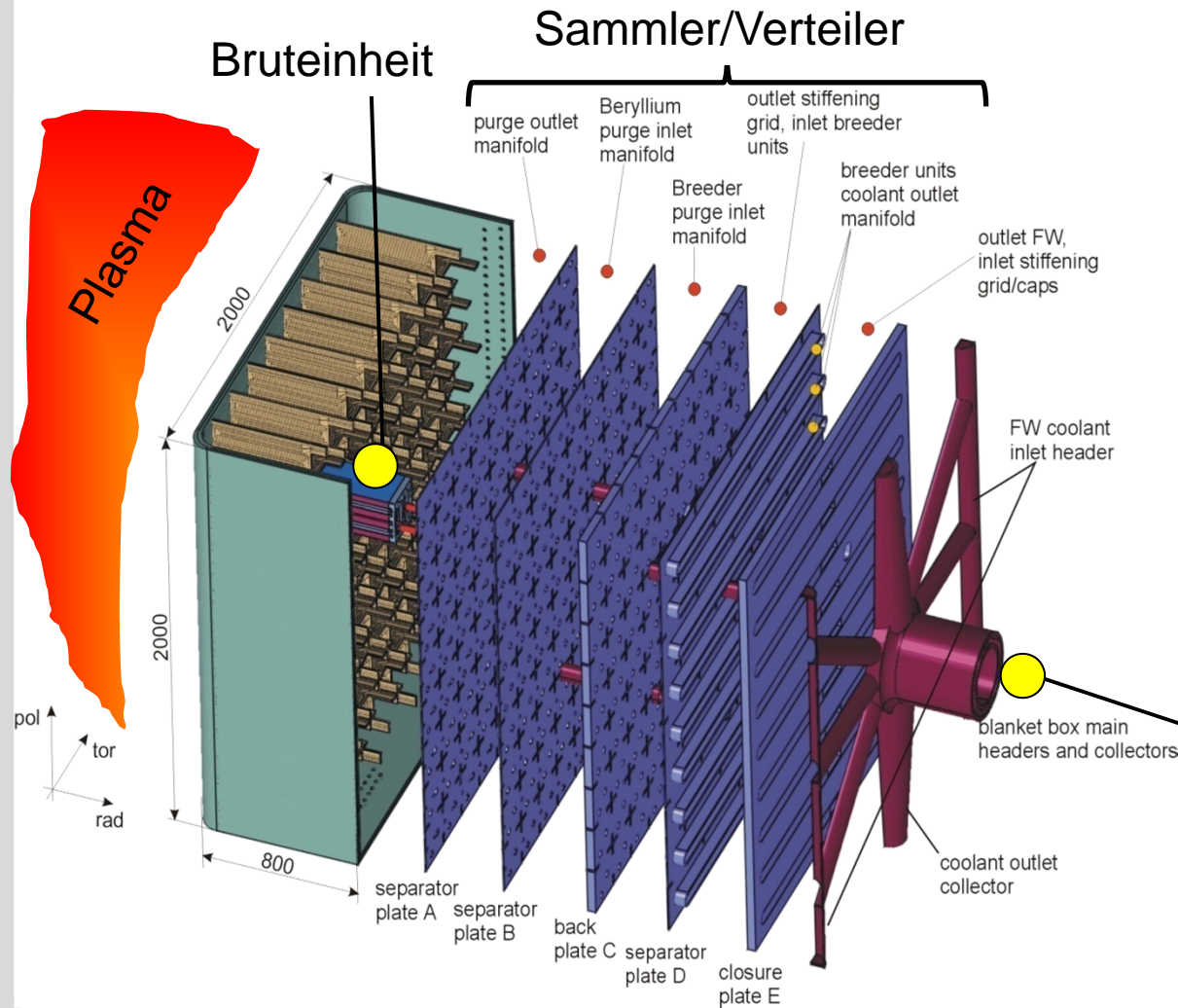
- viele Bruteinheiten parallelgeschaltet
- Einbau in druckfestes Gehäuse
- von Rückseite Kühl- und Brutgasanschlüsse

Bruteinheit Feststoffblanket



# HCPB-Test-Blanket-Modul-System

## ITER- TBM-System



## Herausforderungen:

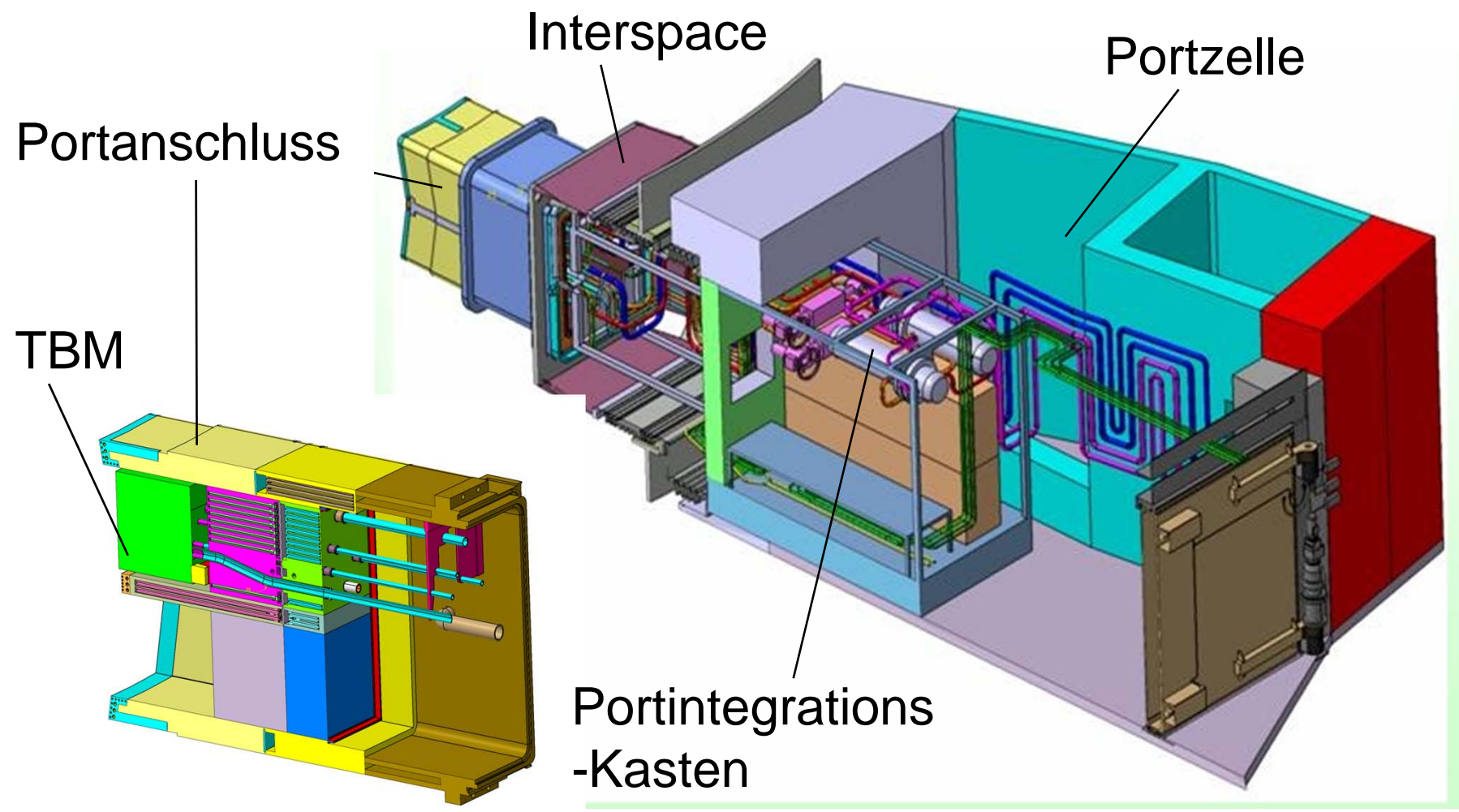
- Kräfte
- Temperaturen
- Zyklen
- Neutronenbeschuss

## Teilkomplexe:

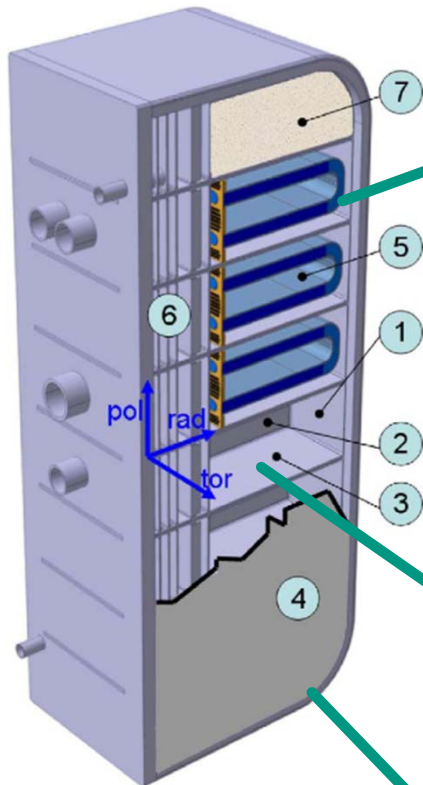
- He-Kühlung
- Tritium-Freisetzung
- Tritium-Transport
- Strukturmaterialien
- Verbindungstechnik

Gasanschluss  
an  
TBM System

# HCPB-Testblanket-Modul-System-ITER



# Testblanket-Modul- Herstellung ?

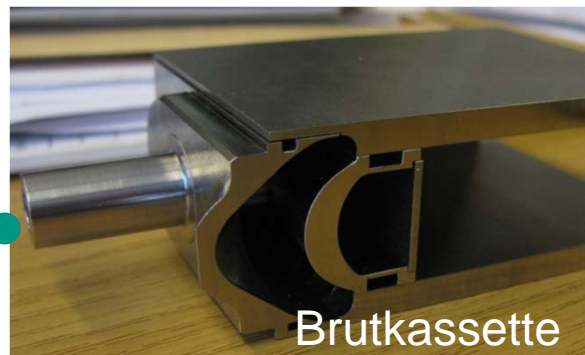


- 1 Erste Wand
- 2 Vertikales Gitter
- 3 Horizontales Gitter
- 4 Kappe
- 5 Kühlplatter
- 6 Sammler/Verteiler
- 7 Brutzelle (Be/Keramik)

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



Kühlplatte



Brutkassette



Halbschale-Erste Wand

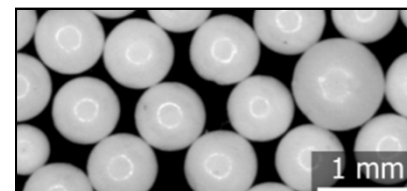
## Verwendete Verfahren:

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

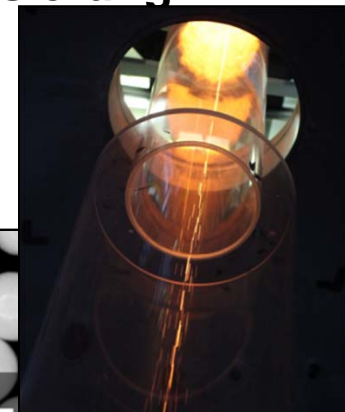
## Randbedingungen:

- Neue Materialien
- Höchste Beanspruchung
- Nukleare Lizenzierung

*Keramik-herstellung im freien Fall*



1 mm



# Divertor-Entwicklung

## Divertorfunktion:

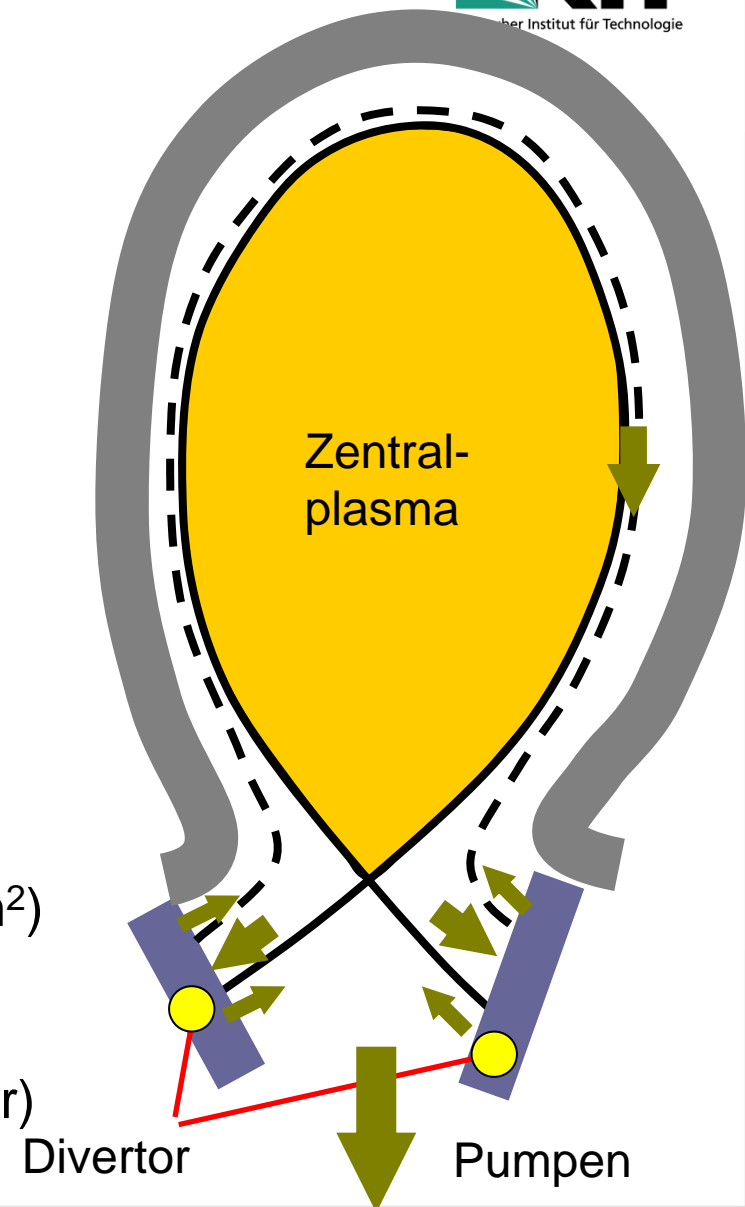
- Abfuhr der Asche (He, Partikel)

## 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.  $15\text{dpa/Jahr}$ )
- Starke therm. Wechselbelastung



# Divertor-Entwicklung

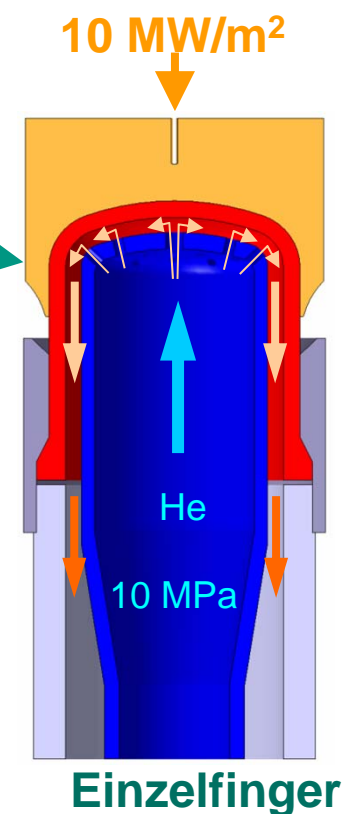
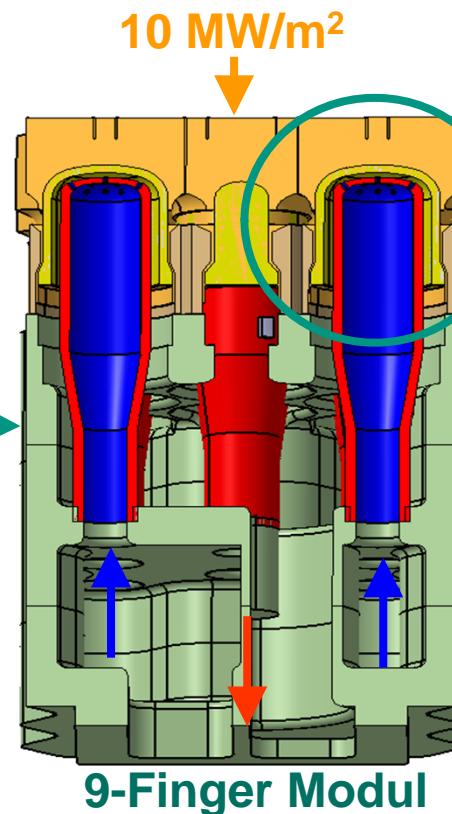
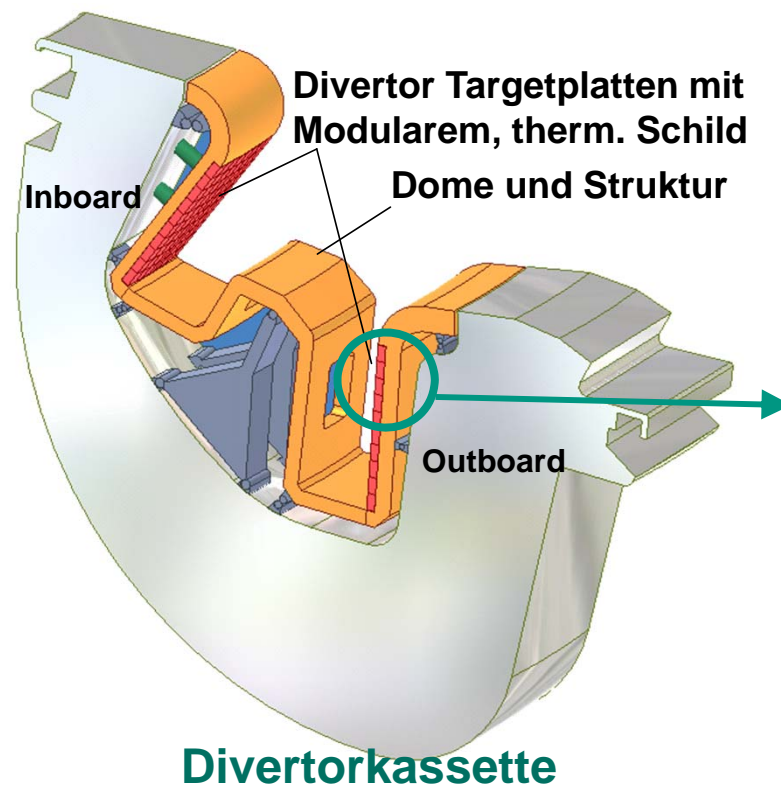
## Material & Design

### Eckpunkte:

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

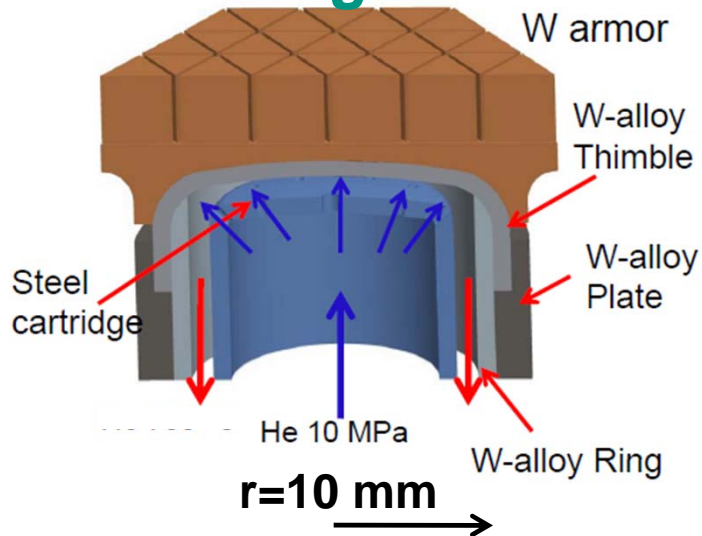
### Designneckpunkte:

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

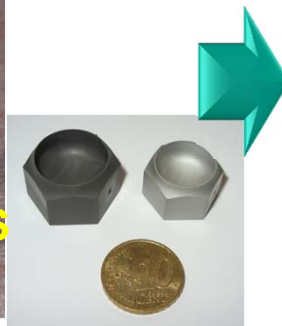
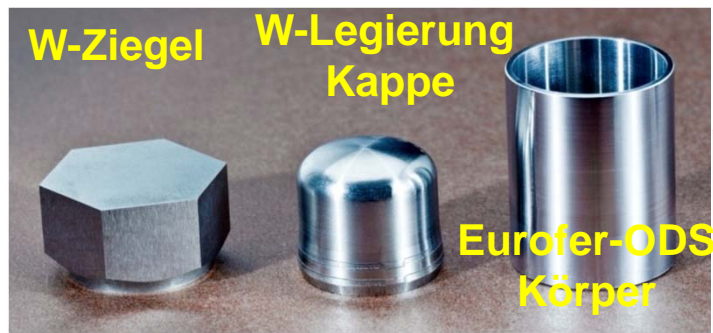


# Divertor-Entwicklung

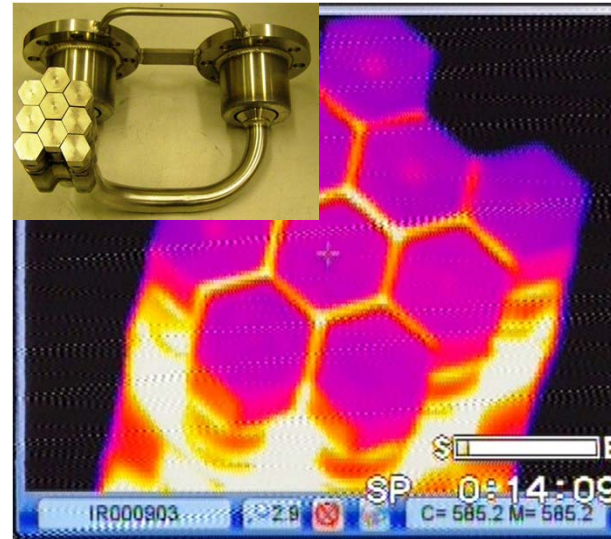
## Basisdesign



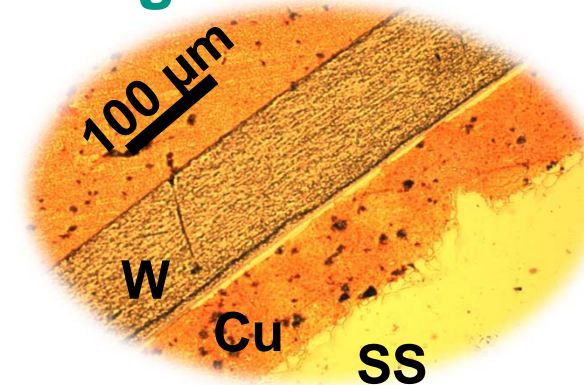
## Herstellung Einzelteile



## Validierung (10MW/m<sup>2</sup>)



## Fügeverfahren



## Reaktorskalierung

# Plasmaraumkomponenten

- Alles muss praxisnah getestet werden (Blanket, Divertor)



- Experimente bei prototyp. Maßen
- 30m<sup>3</sup> Vakuumkammer
- IR-Heizer ( → 500kW/m<sup>2</sup>)



- 1:1 Divertorexperiment (10-20MW/m<sup>2</sup>)
- 30m<sup>3</sup> 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



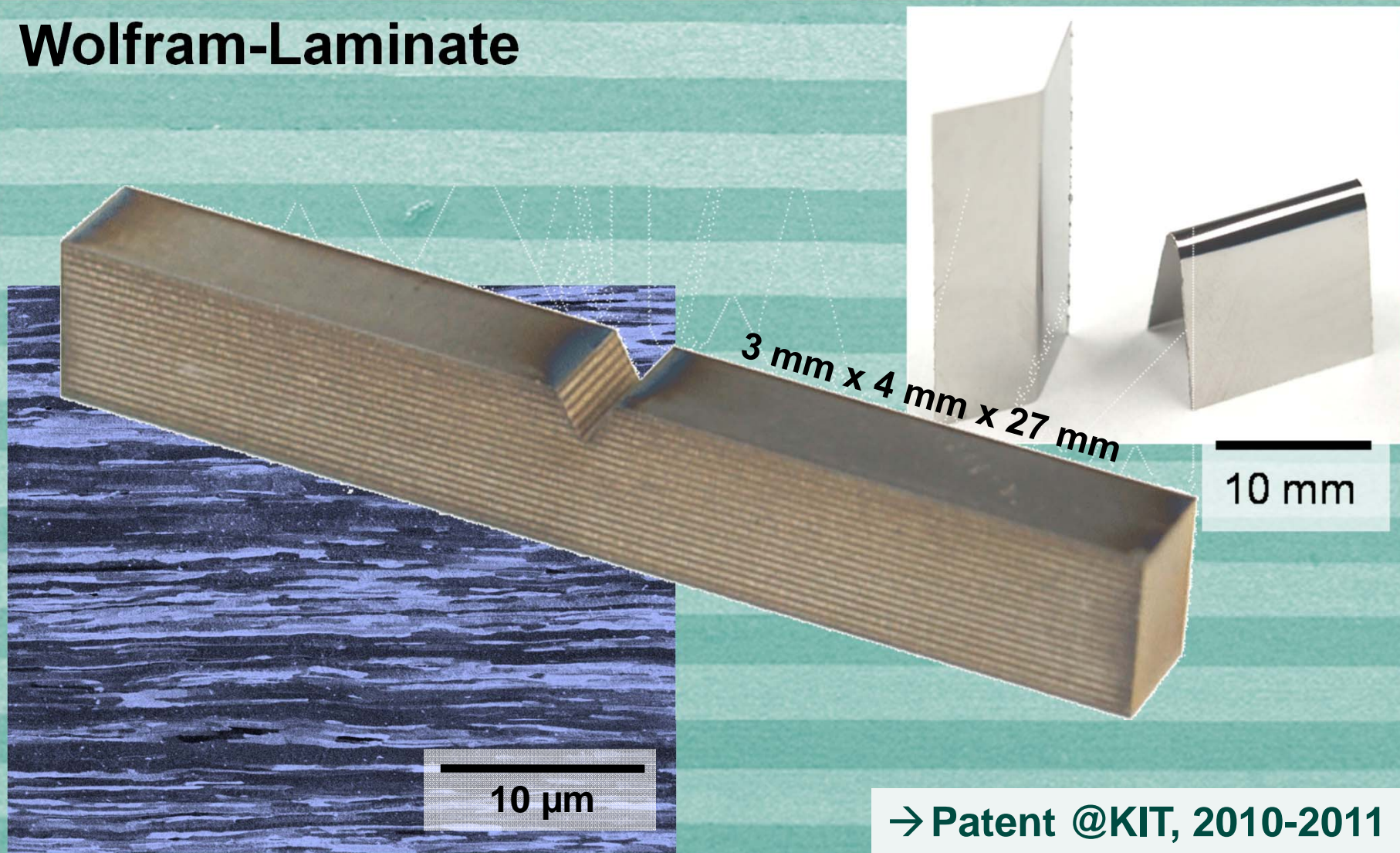
### Strategien

- Nanostrukturierung
- Komposite
- Legierung

### Problem: Mikrostrukturierung



## Wolfram-Laminat



# Starke Magnete brauchen Supraleiter

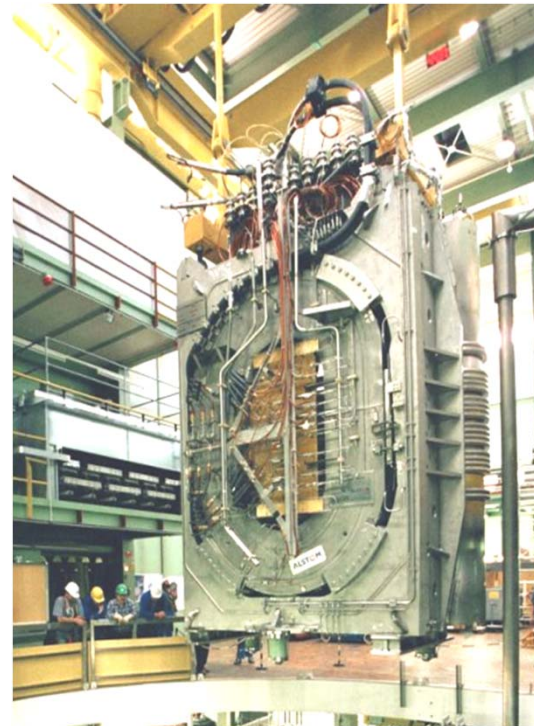
- Starke Magnete brauchen hohen Strom (einige bis viele 1000 Ampere)
- Kupfermagnete sind unwirtschaftlich (hohe Stromkosten, werden heiß)

## 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

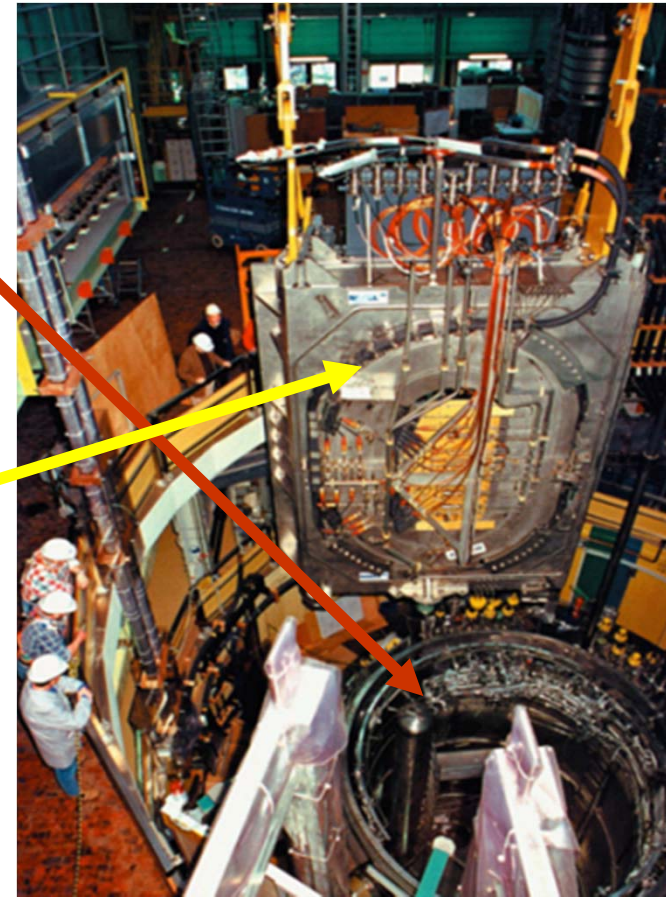
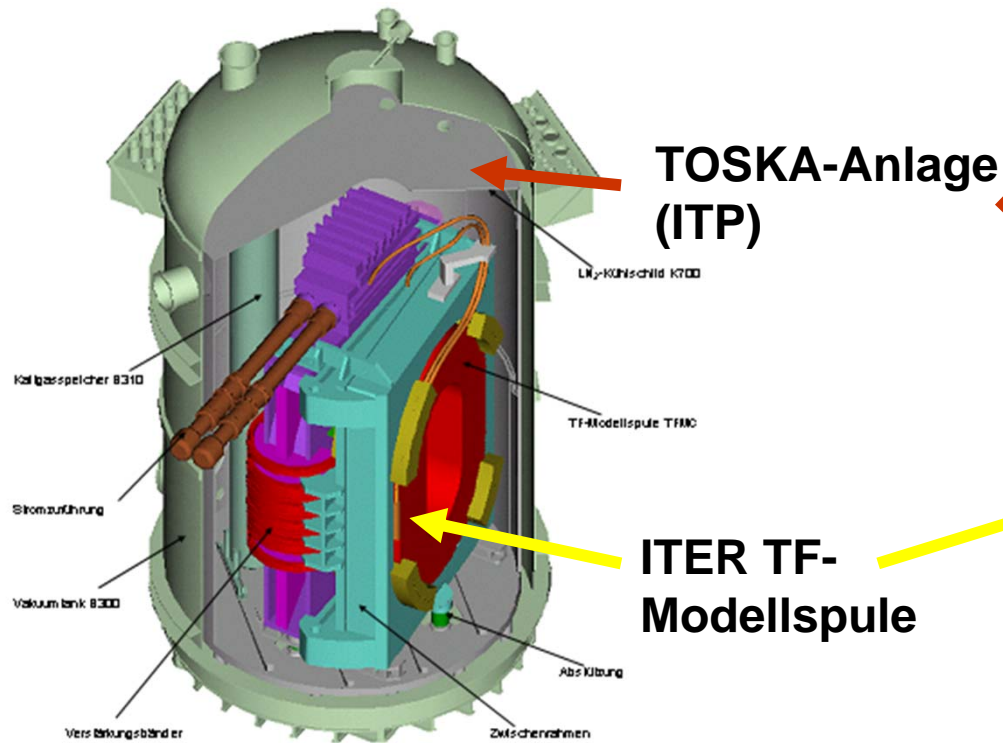
Strom 80.000 A

Spannung\* 3 V

Betrieb bei  $-270^{\circ}\text{C}$

\*nur nötig wegen normalleitender Zuleitungen

# Supraleiter und Spulen-Experimente



**ITER TF-Modellspule**

## TFMC-Tests 2001:

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



**Kabel: Nb<sub>3</sub>Sn in Edelstahlhülle, mit Kühlkanal.**

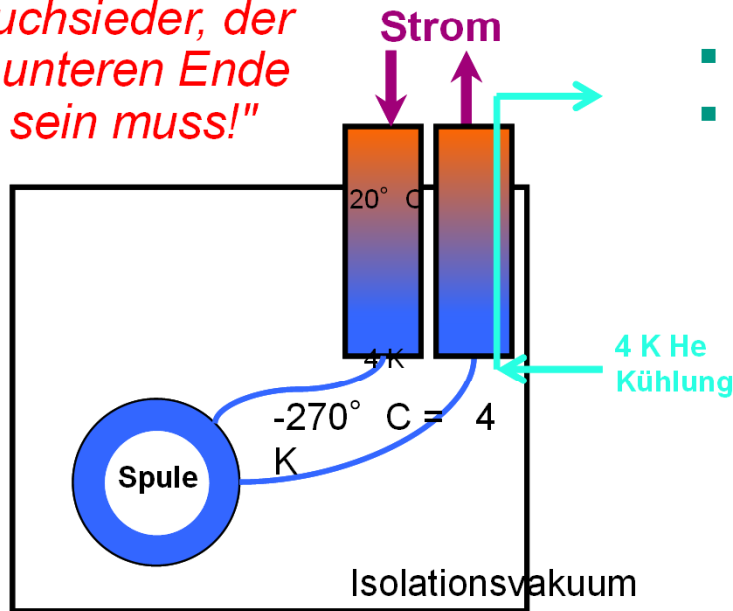
# Wie kommt der Strom zu den kalten Magneten?

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

Der Strom muss also über **Stromzuführungen**

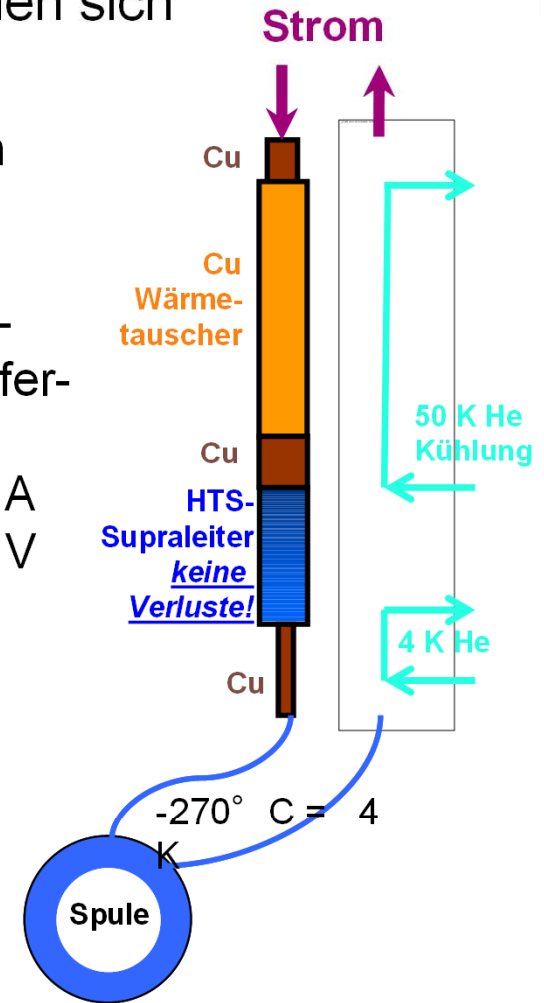
- elektrisch isoliert
- ins Vakuum und
- in die Kälte

*"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



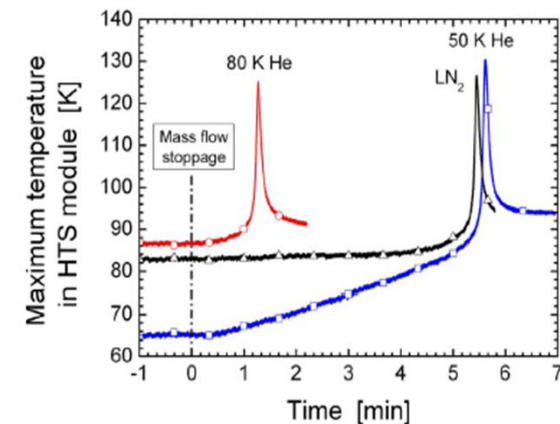
# Supraleiter und Spulen



## HTSL-Stromzuführung (Entwicklung von KIT & CRPP):

68 kA nicht nur bei 50 K He – Kühlung,  
sondern auch bei 81 K L-N<sub>2</sub>  
→ Kosteneinsparung bei Kühlanlage

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



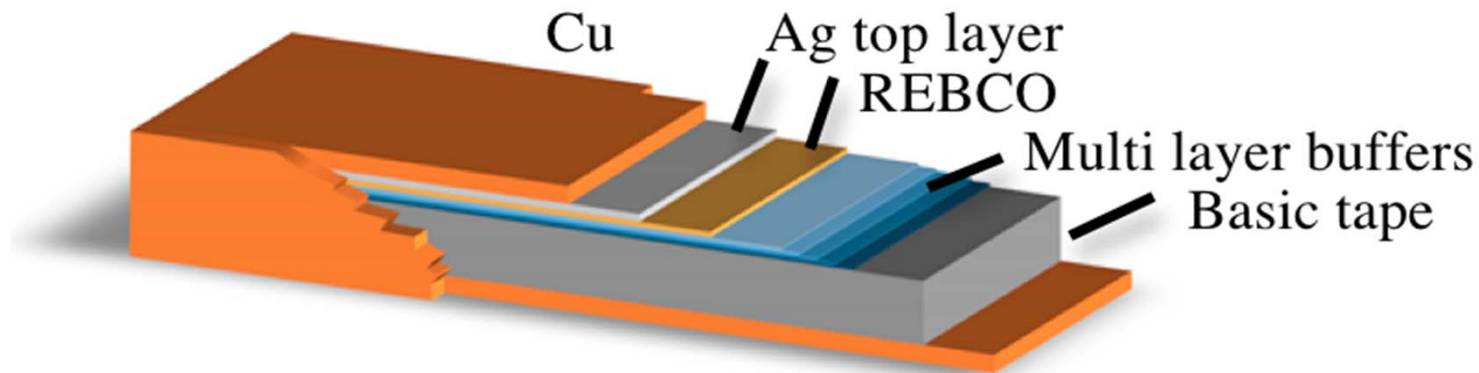
Aufwärmzeit nach Kühlungsstopp

# Hochtemperatursupraleiter (HTS)

Warum nicht den ganzen Reaktor aus HTS –Spulen bauen ?

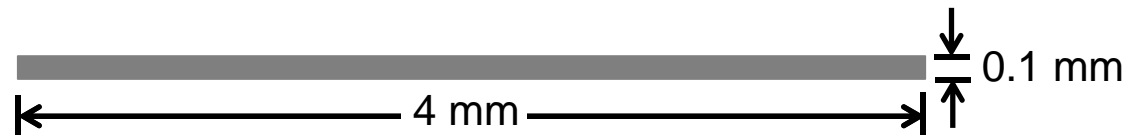
- HTS stehen noch am Anfang der Entwicklung

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



REBCO Band mit 1  $\mu\text{m}$  REBCO Schicht!

Wie erhalte ich ein Kabel aus einem REBCO Band ?

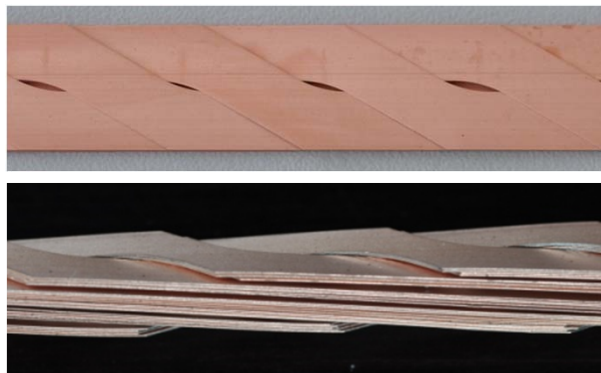
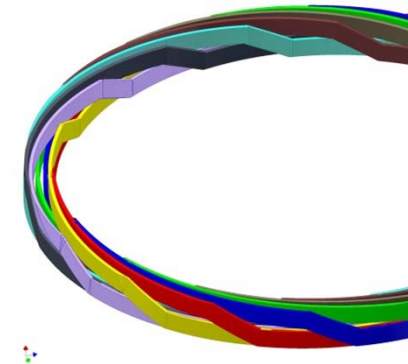




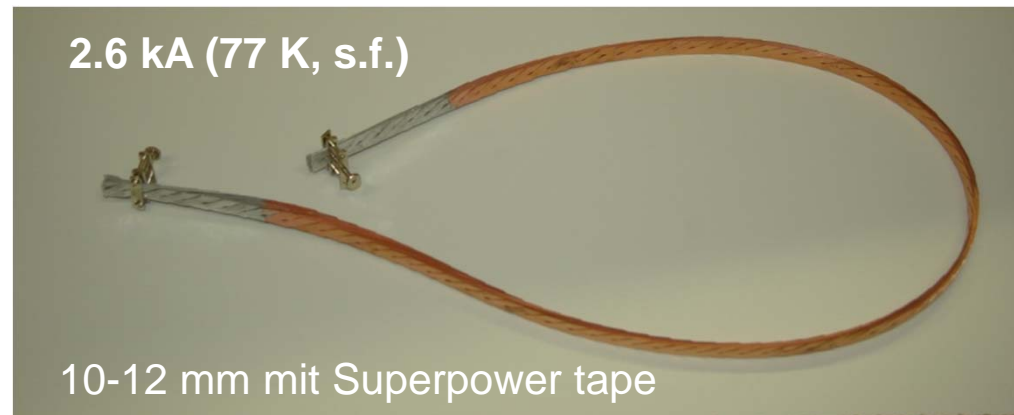
# Hochtemperatursupraleiter (HTS)

## Erstes ROEBEL –Kabel aus REBCO

- REBCO –Kabel (KIT) with DyBCO Bändern



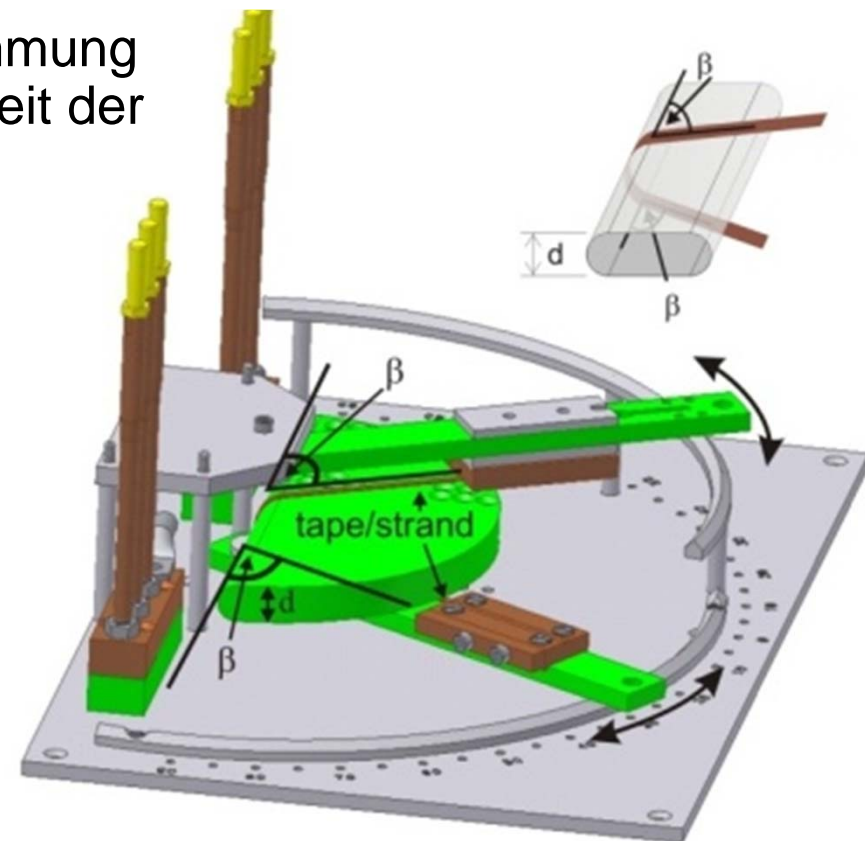
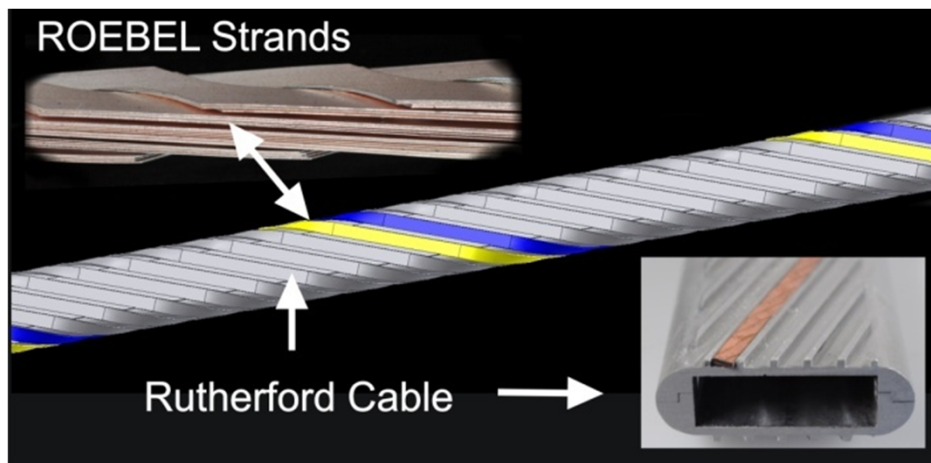
ROEBEL zusammengesetzt aus REBCO-Bändern mit 50 strands (10x5), 4mm Breite



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

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

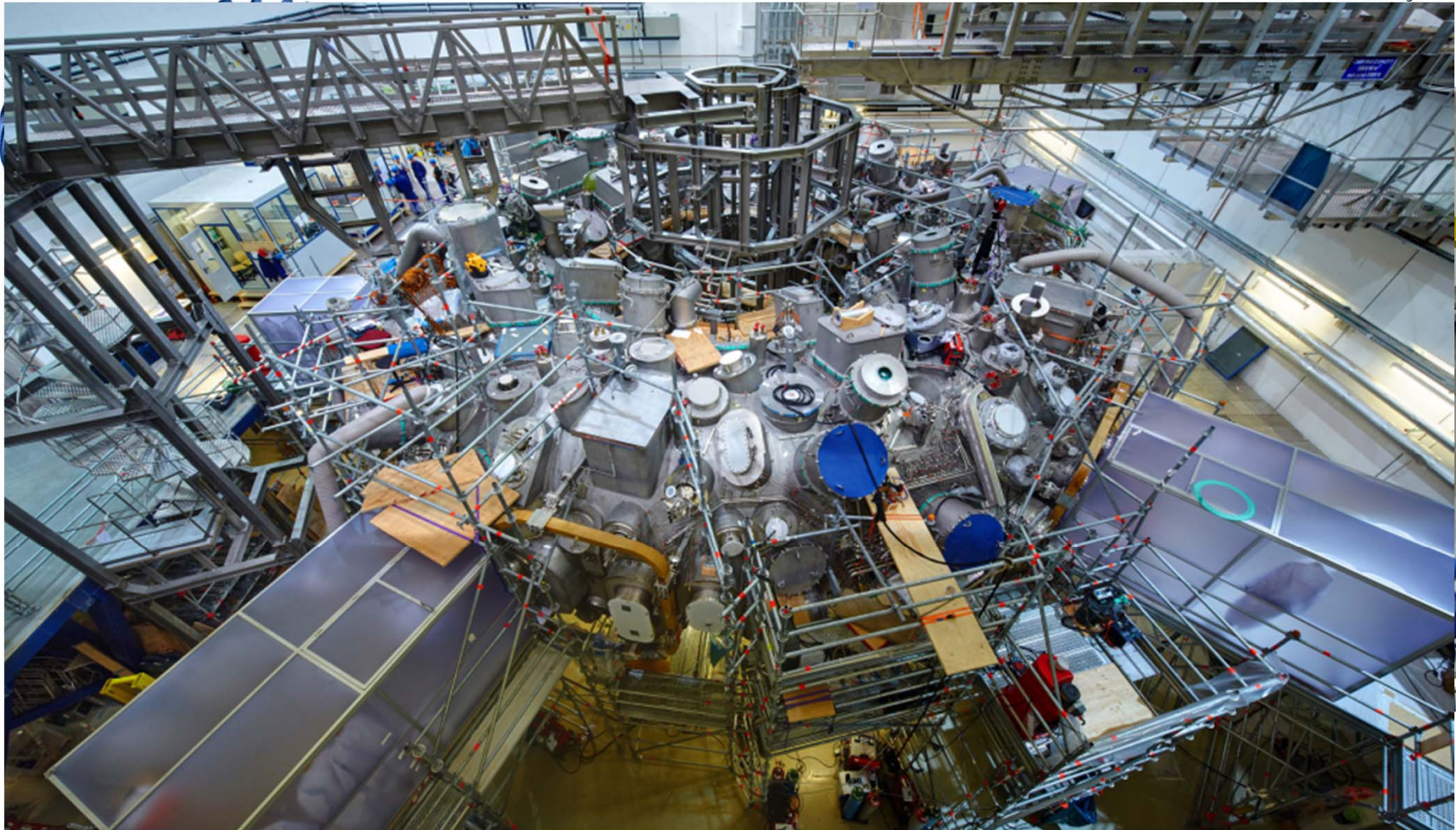
- Kanten-Biegewerkzeug zur Bestimmung von Winkel- und Radiusabhängigkeit der supraleitenden Eigenschaften
- CCRC Demonstrator-Kabel



# 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 CO<sub>2</sub>-Ausstoß
- keine Kritikalität – Unfallfolgen auf die Anlage beschränkt
- kein langlebigen Spaltprodukte (Aufbereitung, Endlagerung)
- Zwischenlagerung ~60-100 Jahre

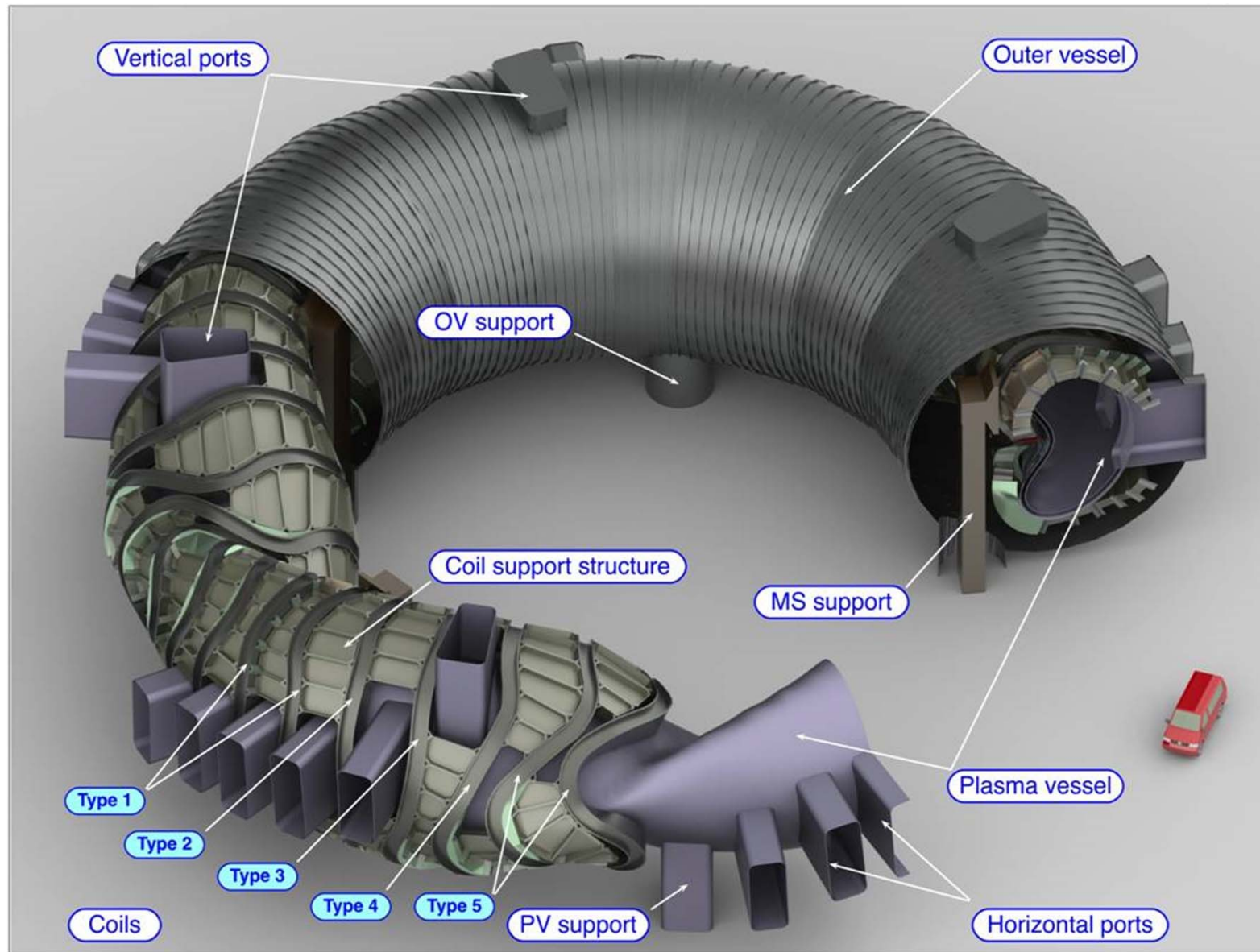
- Taschenfusion unmöglich → Großanlagen (Akzeptanz)
- Vielfältige technische Herausforderungen noch zu meistern

## **Aber heute wie in der Zukunft :**

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

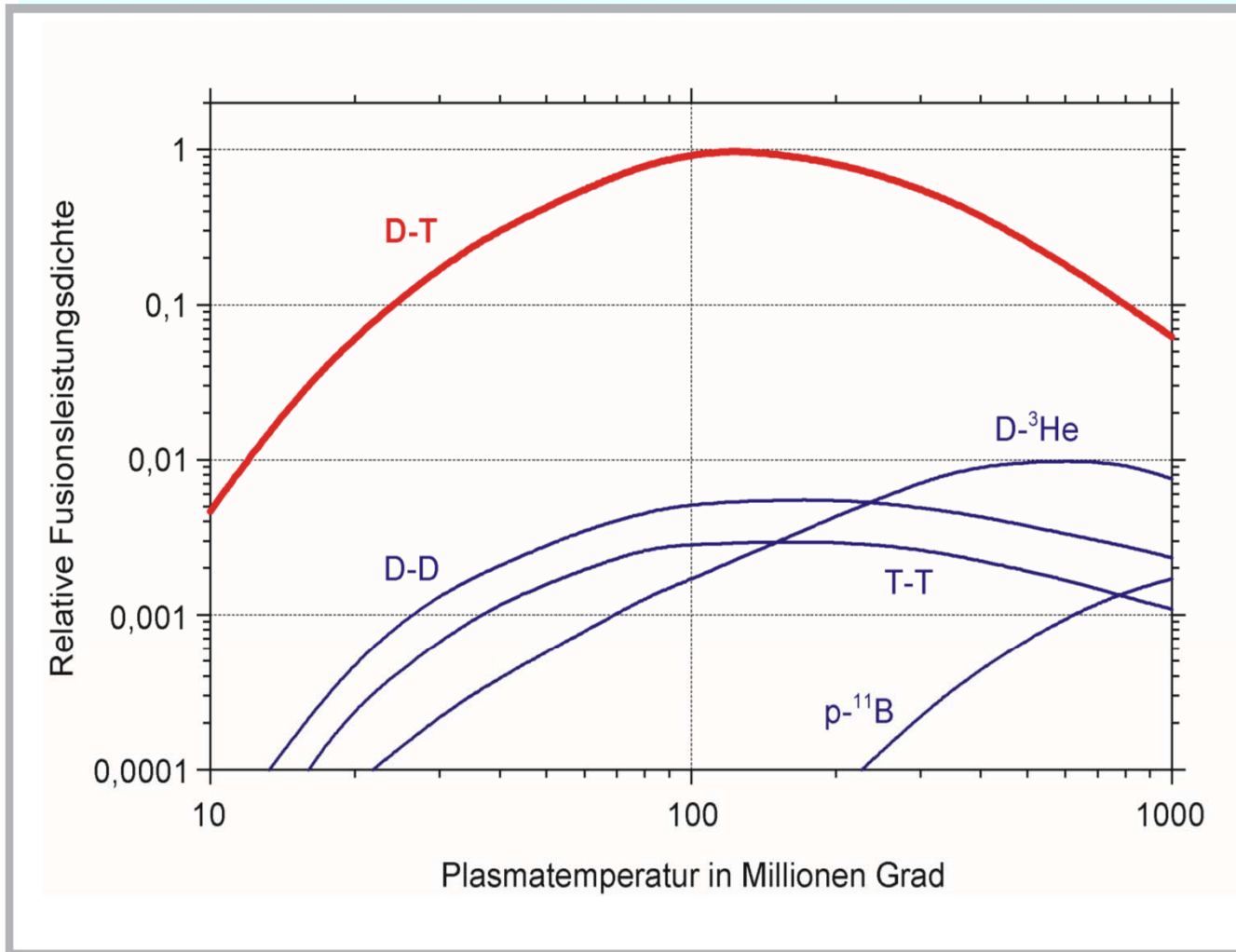


# Kraftwerk auf Stellaratorbasis - HELIAS



# ERGÄNZUNGSFOLIEN

# Fusionsreaktion- mögliche Reaktionen



## Abkürzungen

D	Deuterium
T	Tritium
He	Helium
B	Bor
p	Proton

## Reaktionen

<b>D + T</b>	<b>→</b>	<b><sup>4</sup>He + n</b>
D + D	→	<sup>3</sup> He + n
		→ T + p
D + <sup>3</sup> He	→	<sup>4</sup> He + p
T + T	→	<sup>4</sup> He + 2n
p + <sup>11</sup> B	→	3 <sup>4</sup> He

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