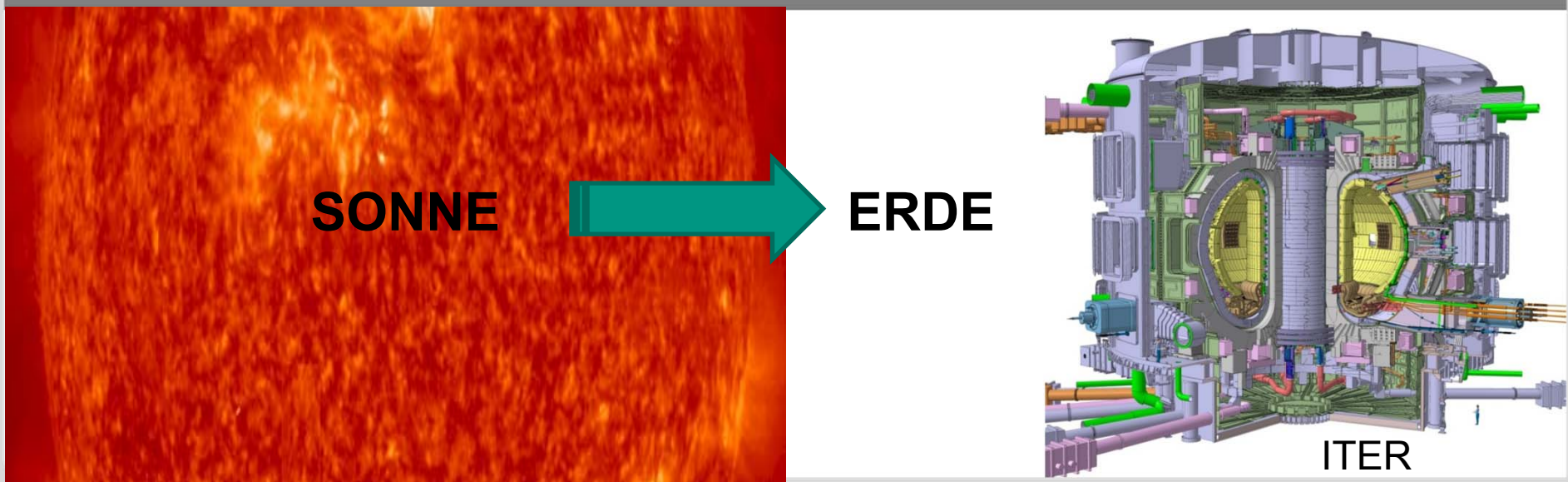


„Fusion- Wie funktioniert sie?- Wege zum Fusionskraftwerk und erforderliche Technologien

Robert Stieglitz & Klaus Hesch

Programm Fusion



Inhalt

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

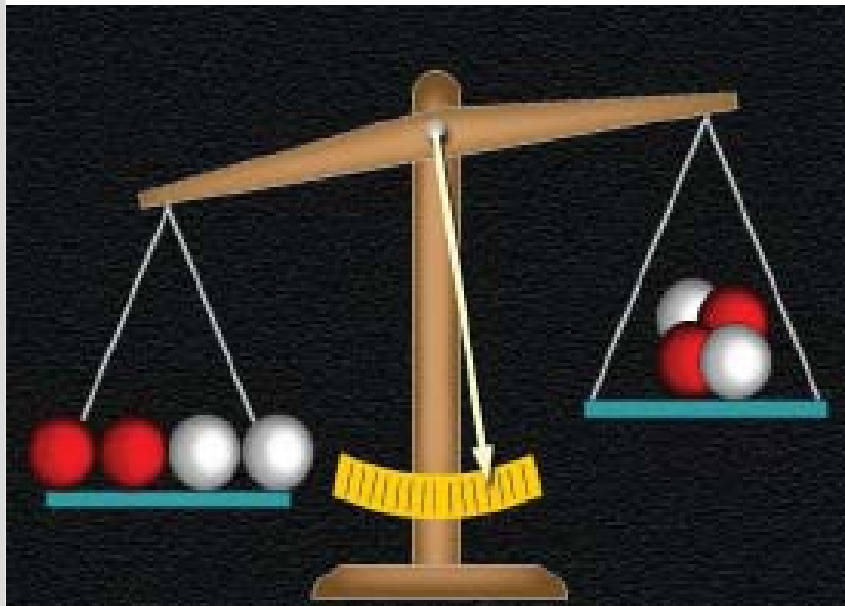
WAS IST FUSION ?



Was ist Fusion ?

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

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

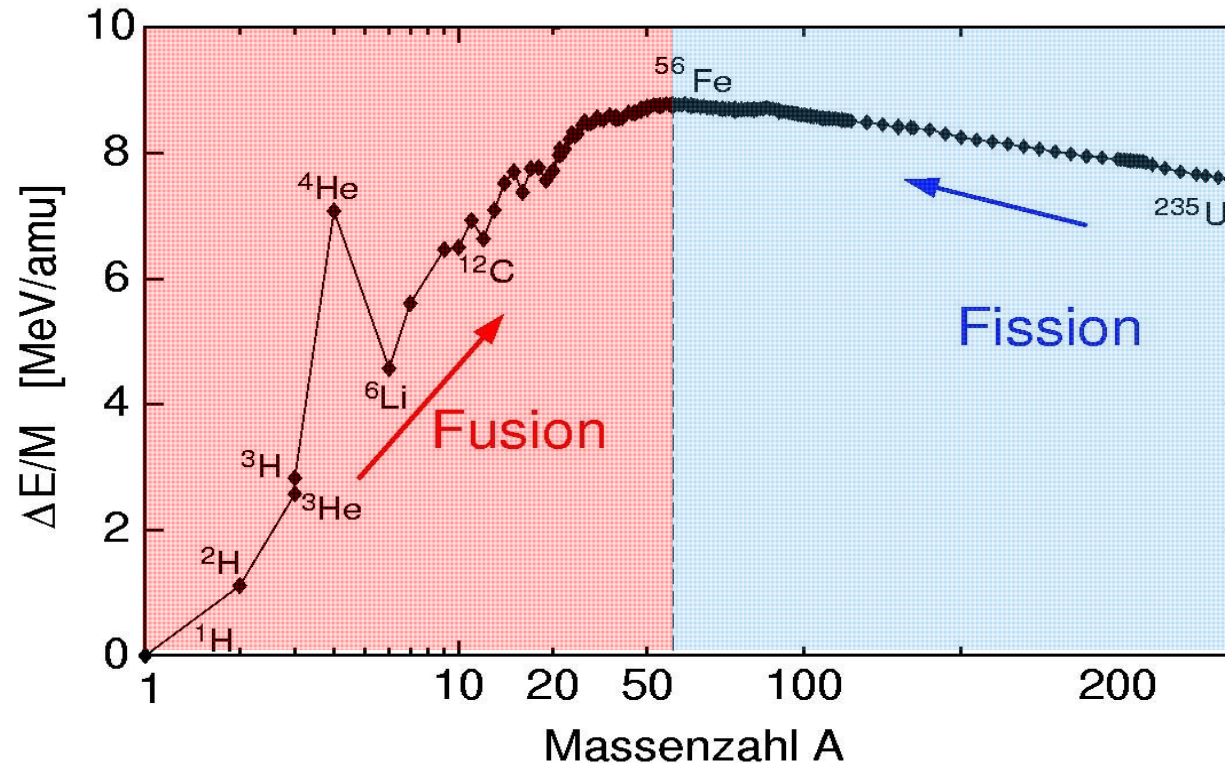
$$E = m c^2 = 10^{-3} \text{ kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Sprengkraft von 10.000t TNT !!

ENORME ENERGIEINHALTE

Welche Fusionsreaktionen sind relevant?

- Welche Elemente können "fusionieren"?



Welche Energiemenge wird freigesetzt ?

- Fusion: $D + T \rightarrow He + n + 17.6\text{MeV}$

zum Vergleich

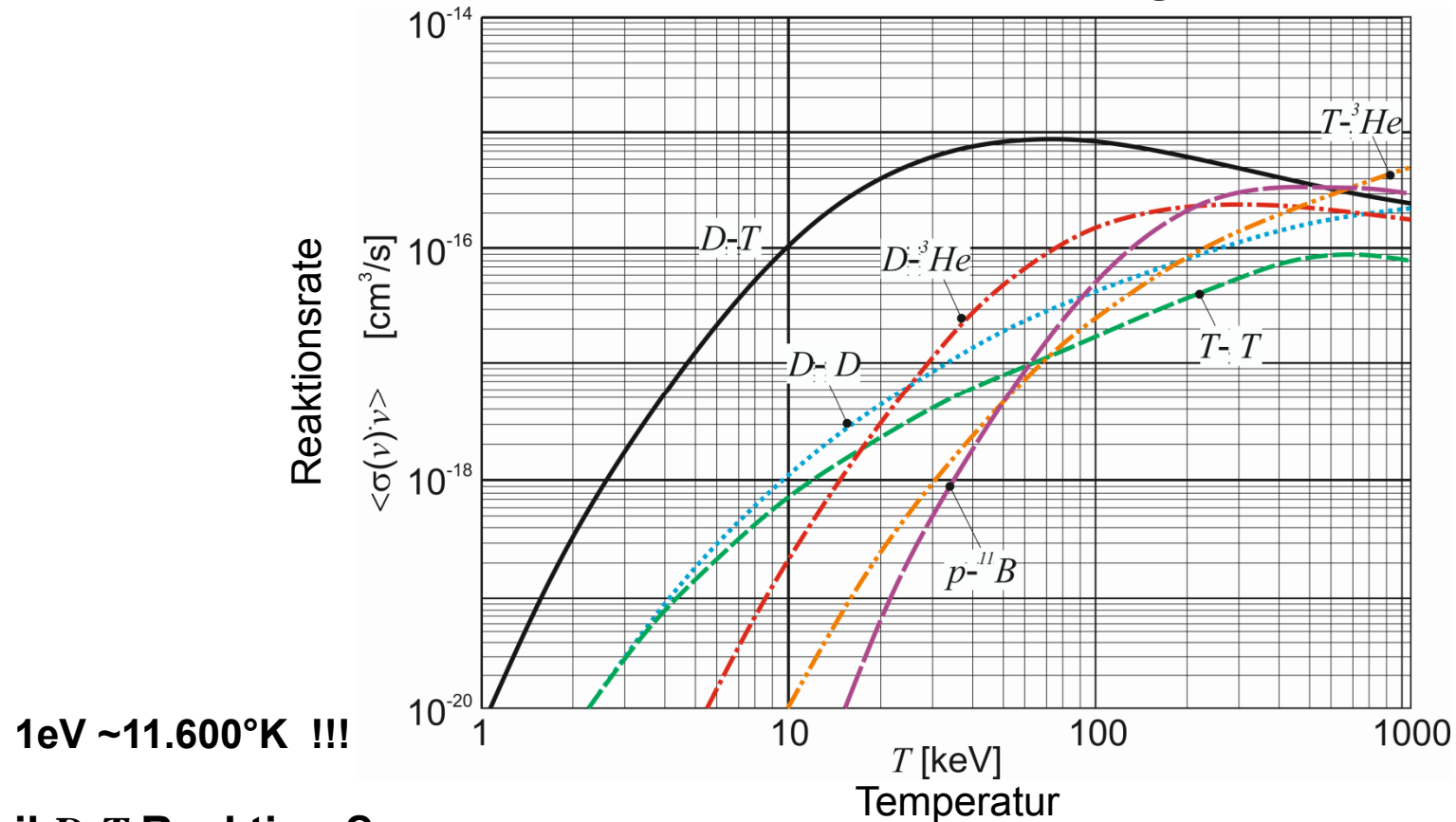
- Verbrennung: $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 4.9 \text{ eV}$ (real: 4.8eV)
- Batterie: $Li^+ + e \rightarrow Li + 0.12\text{meV}$ (real: 0.053meV)

Brennstoffmenge [kg] für
gleiche Energieerzeugung
1kg

3.600t
147.000t

Welche Fusionsreaktionen sind relevant?

- Welche Reaktion erfordert die kleinste Zündenergie?

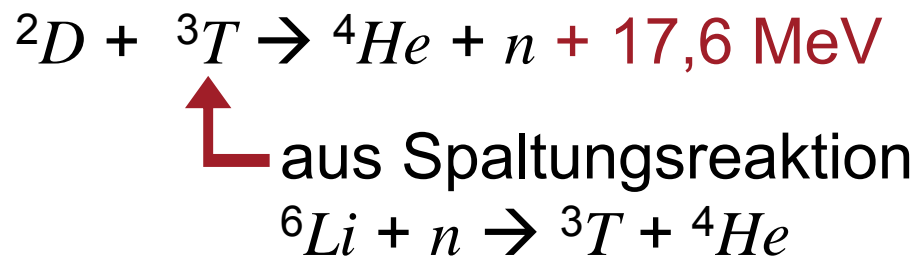
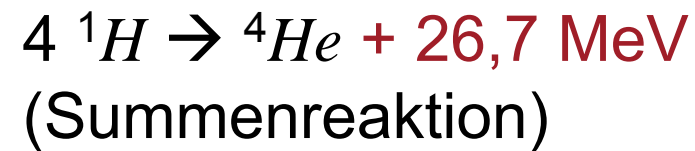
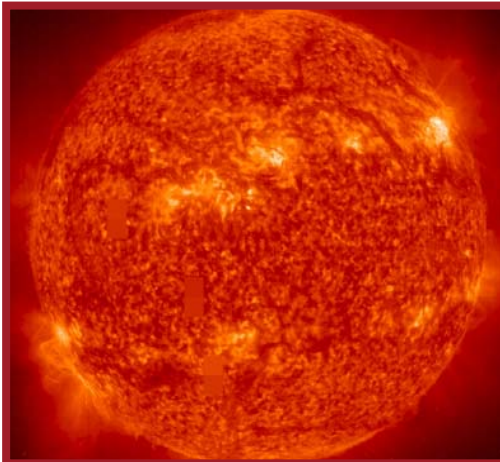


Weil $D-T$ Reaktion ?

- höchste Reaktionsrate bei den
- kleinsten Zündtemperaturen bereits ab **10keV** (>100Mio. Grad)
- mind. 100 mal effizienter als andere Reaktionen für Temperaturen bis 20keV
- ➔ techn. realisierbare **Fusion erfordert Tritium !**

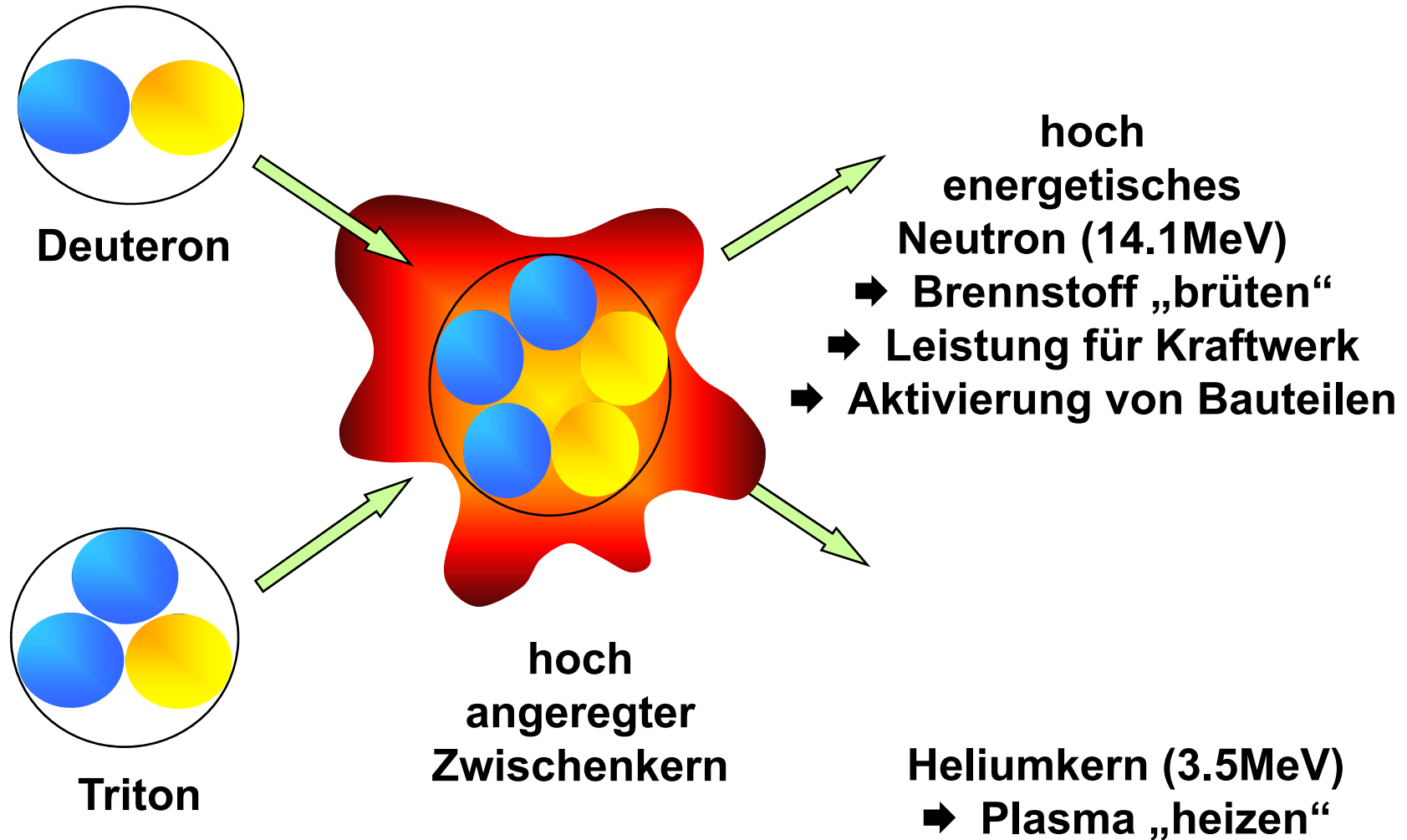
Was ist Fusion ?

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

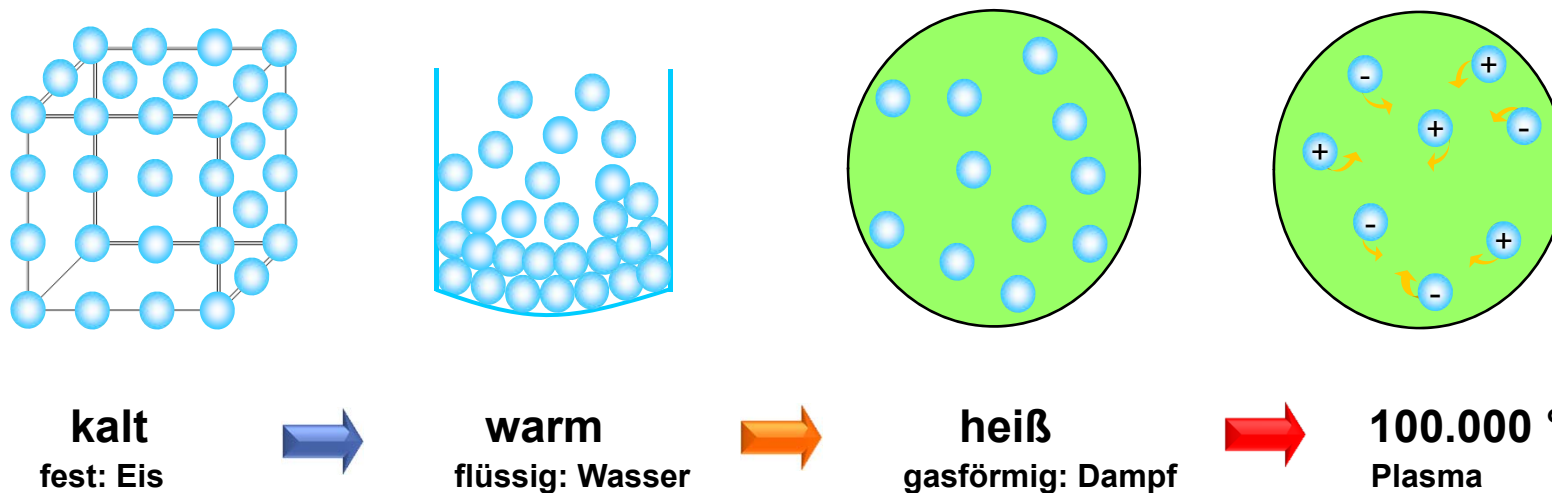
- Für ein Kraftwerk ($1000\text{MW}_e = 2.700\text{MW}_{th}$) benötigt man:

- 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”**



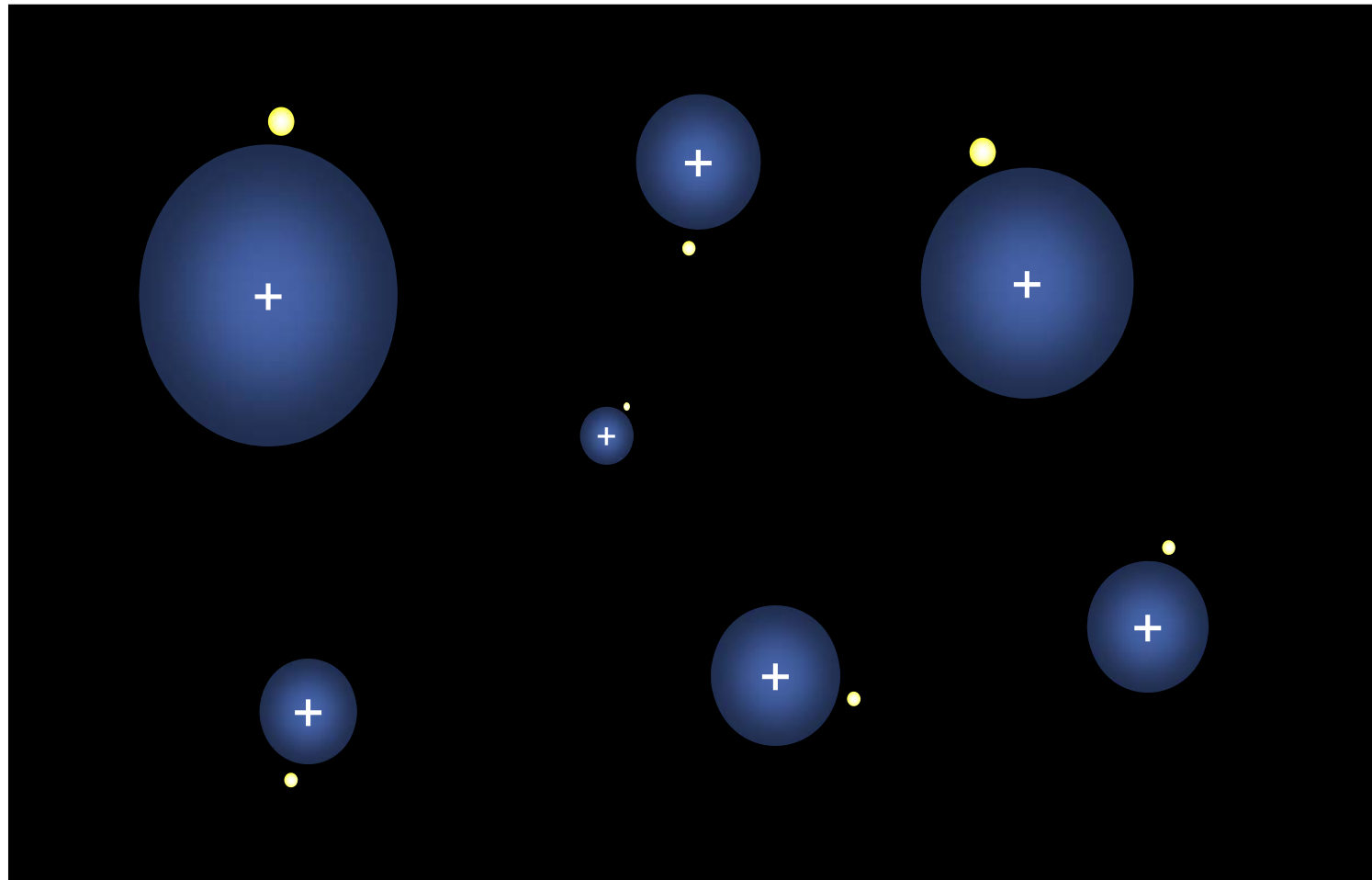
Was passiert im Plasma ?

- 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 ?

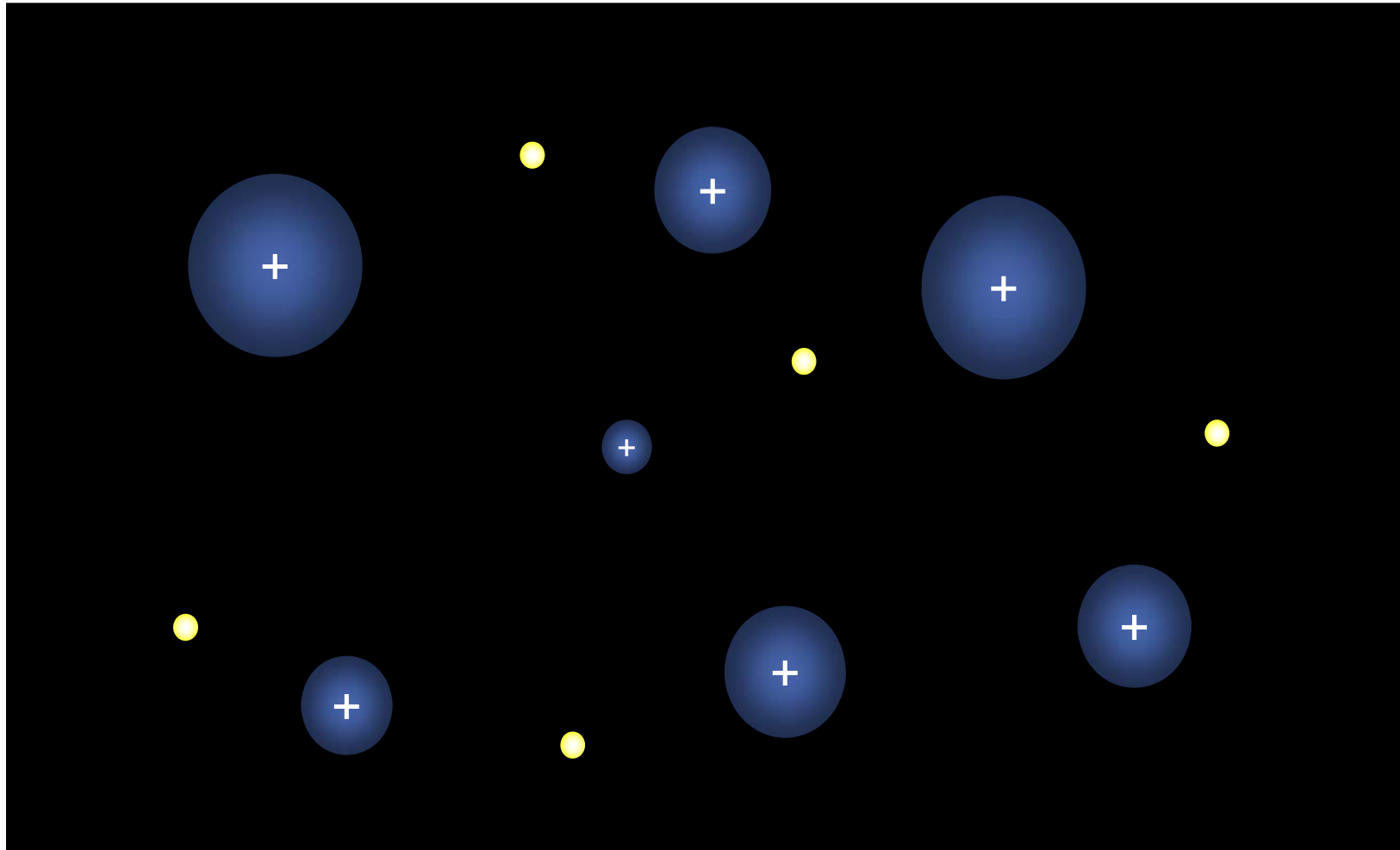
Beispiel: Atombewegung des Wasserstoffs bei $T < 10^5 \text{°C}$ → **KEIN PLASMA**



Was ist Fusion ?

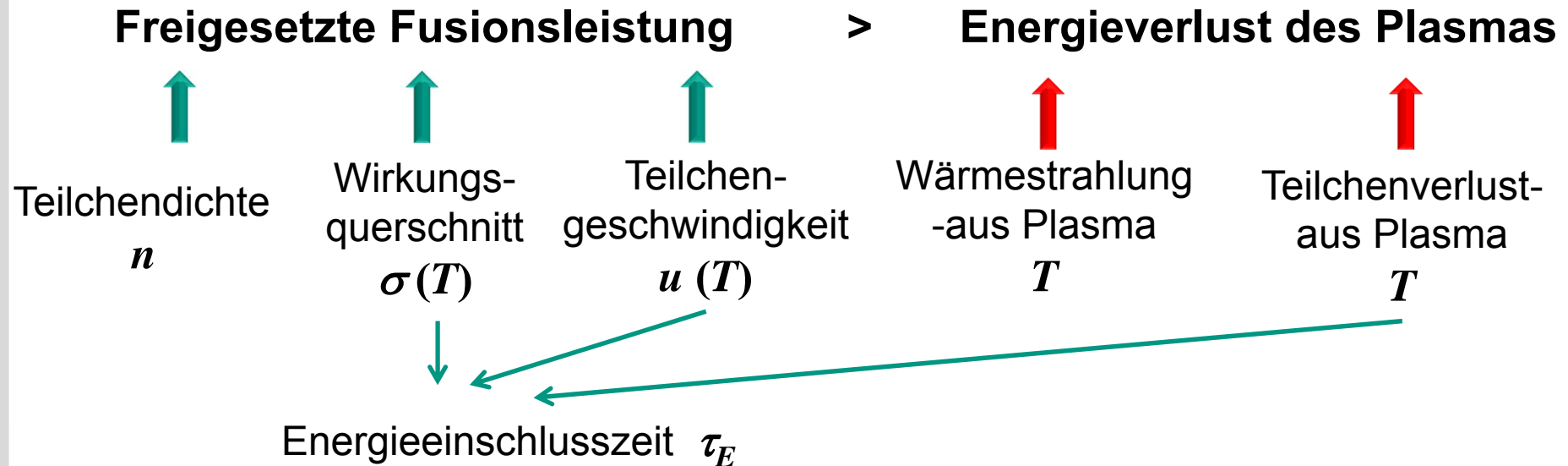
Was ist ein Plasma ?

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^3)

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

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

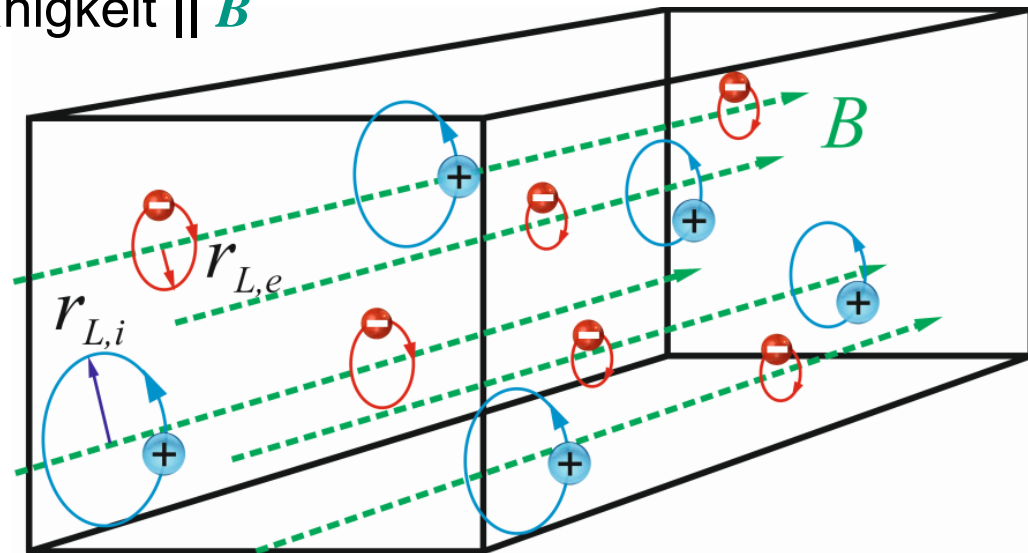
τ_E : Einschlusszeit (bei ITER ca. 3.7s)

Was ist Fusion ?

Elektr. geladene Teilchen lassen sich in Magnetfeldern B einschließen

Was bewirkt der Magnetfeldeinschluss ?

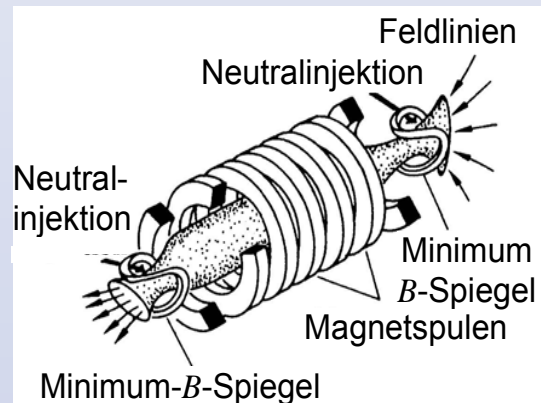
- Elektronen, Ionen fliegen entlang Magnetfeldlinie B
- ➔ unendliche therm.& elektr. Leitfähigkeit $\parallel B$
- Elektronen & Ionen rotieren auf unterschiedl. Kreisbahnen
- ➔ Heizung mit der Eigenfrequenz möglich (ICRH, ECRH, LHH)
- ➔ aber unterschiedliches Stoßverhalten der Teilchen $\perp B$
- Gradienten des Magnetfeldes führen zur Ladungstrennung
- ➔ Plasmastabilität (Verdrillung von Magnetfeldlinien B erforderlich)
- Plasmen kühlen bei Wandberührung ab.
- ➔ **berührungslosen Einschluss !!!**



Was ist Fusion ?

Wie schlieÙe ich magnetisch ein Plasma ein ?

■ Magnet. Spiegel

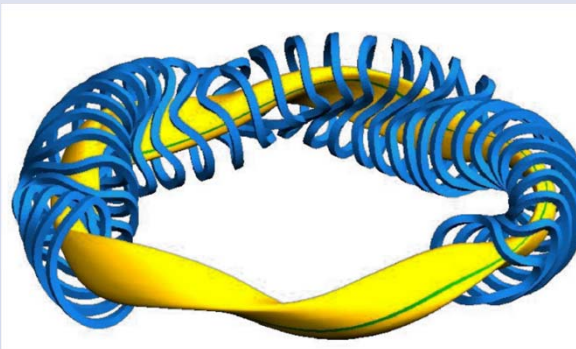


- einfacher Aufbau
- hohe Endverluste
- komplexe Plasmasteuerung



TMX-U Livermoore
ging nie in Betrieb

■ Stellerator

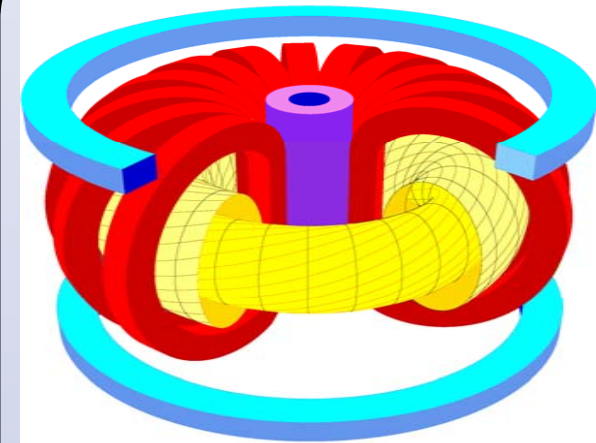


- kein Plasmastrom
- ➔ stabiles Plasma
- stationärer Betrieb
- komplexer Aufbau Spulen



Wendelstein in Betrieb
(weniger Erfahrung)

■ Tokamak



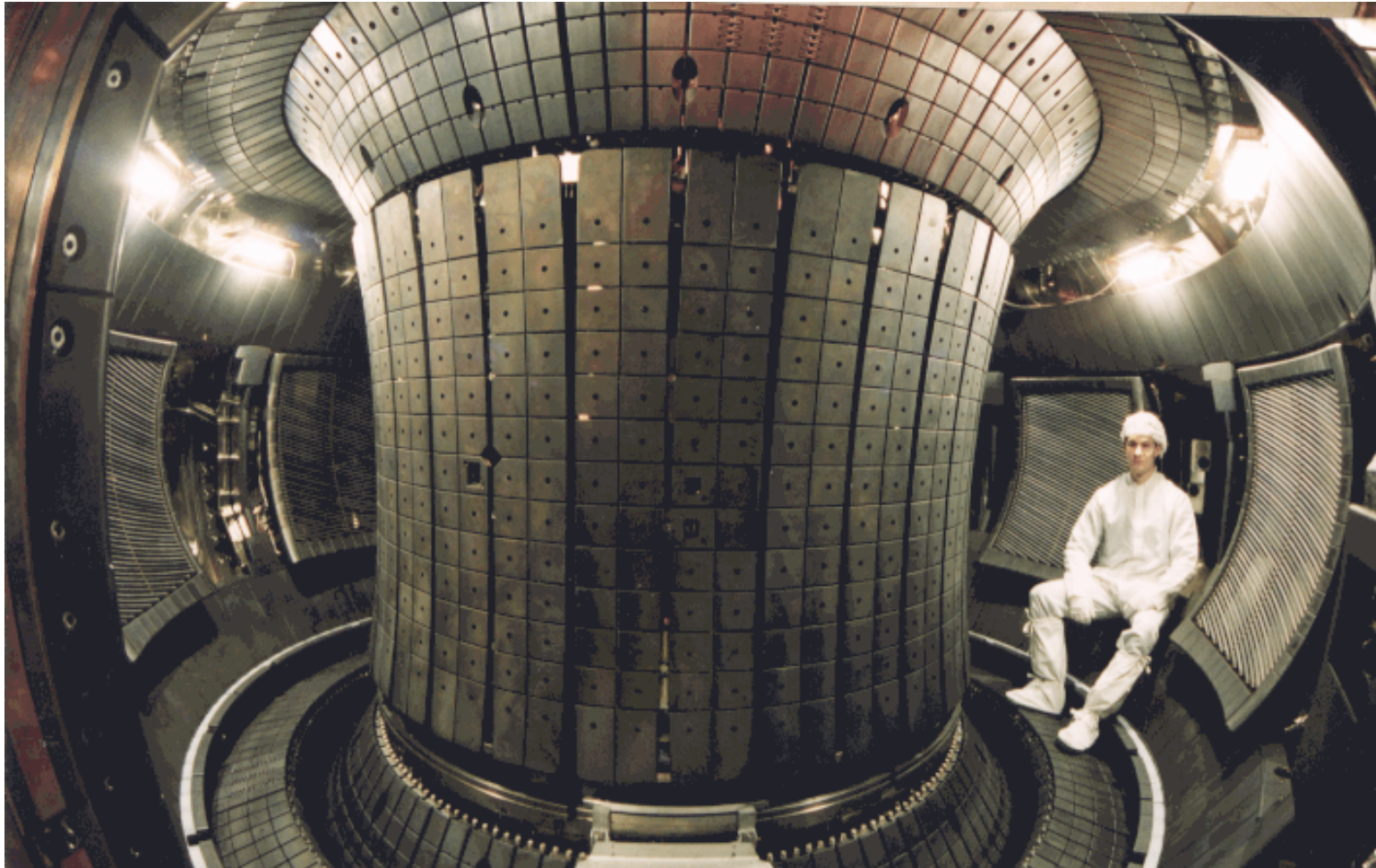
- einfacher Aufbau und Betrieb
- Plasmastromstrome
- ➔ instationäre Maschine



Grundlage ITER und DEMO

Plasmaphysik- magnet. Einschluss

■ Plasmakammer



© Zohm,IPP

Plasmaphysik- magnet. Einschluss

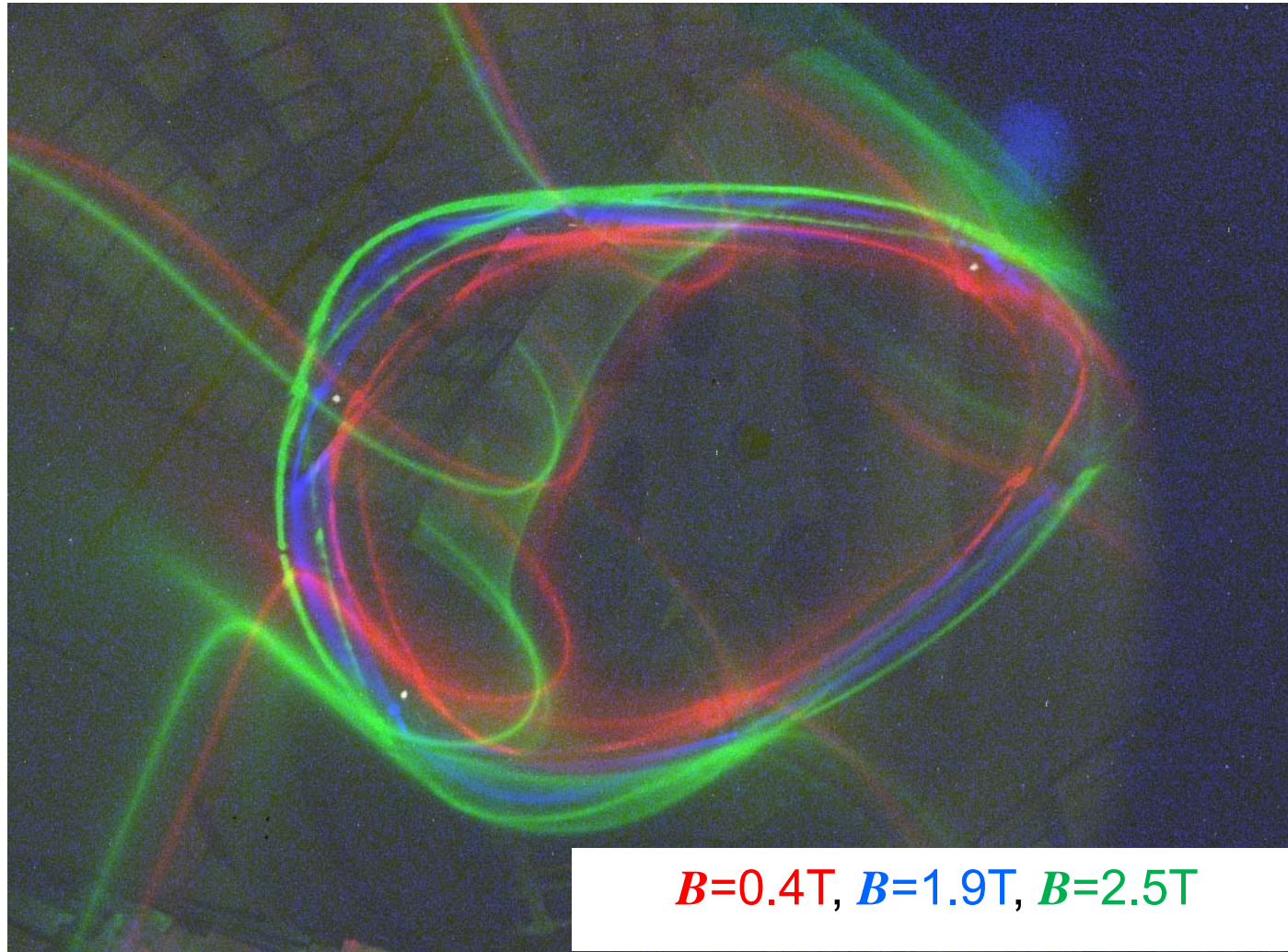
- Wie sieht ein Plasma aus ?



© Zohm,IPP

Plasmaphysik- magnet. Einschluss

- Wie muss man sich das vorstellen?



Fusion – Zusammenfassung der Physik

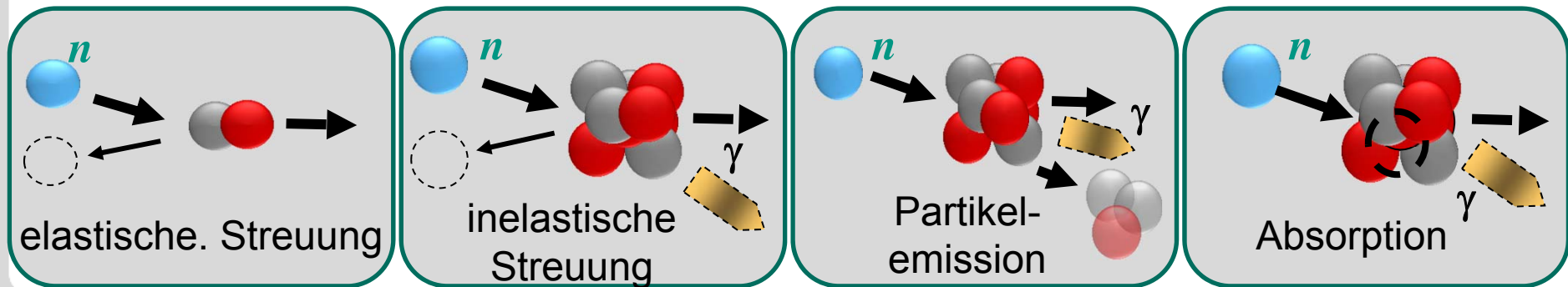


↑
Plasma heizen
3.5MeV
↑
Brennstoff erzeugen
Wärme erzeugen
14.1MeV
=
Massendefekt
17.6MeV

- höchste Reaktionsrate für $D-T$ bei kleinster Temperatur
- D gibt's jede Menge, T (Tritium) muss aus Lithium (Li) erbrütet werden



- Rohstoffe Lithium
- Brutprozess erzeugt keine Treibhausgase,
- aber **Aktivierung** der Plasmawandmaterialien durch **Neutronen**
- Reaktionen von Neutronen (●) mit Materie



Fusion – Zusammenfassung der Physik

Techn. Anforderung an einen Fusionsreaktor

- Plasmastabilität
- Begrenzung Supraleiter
(Lorenzkraft, mechan. Kräfte)
- ➔ max. Plasmadruck
- Zündbedingung $D-T$:
(für $T=10\text{keV}$ mit $p = n R T$)
- Leistungsbilanz für $D-T$:
(Energie He-Atome heizt Plasma)
- ➔ Energieeinschlusszeit
(Maß für die Wärmeisolation)
- Fusionskraftwerk :
($Q \rightarrow \infty$ erfüllt nicht Zündbedingung)
- ➔ Annahme $Q \sim 30$ und $\tau_E = 3\text{s}$
(Maß für die Wärmeisolation)
- ➔ thermodyn. Wirkungsgrad η_{th}
(Effizienz Umwandlung Wärme \rightarrow Strom)

$$\beta = \frac{p}{B^2 / (2\mu)} < 5\%$$

$$B \sim 5\text{T}$$

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

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

$$nT\tau_E > 3 \cdot 10^{21} \text{keVsm}^{-3}$$

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

$$Q = \frac{P_{Fusion}}{P_{Heizung}} \gg 10$$

$$P_{therm.} = P_{Fusion} = 3\text{GW}$$

$$P_{el} = \eta_{th} \cdot P_{therm} = 1\text{GW}$$



erreicht

$$\beta = 3-4\% \quad \checkmark$$

$$n > 10^{20} \text{m}^{-3} \quad \checkmark$$

$$T > 10 \text{keV} \quad \checkmark$$

$$\tau_E \sim 1 \text{sec} \quad \text{☹}$$

ITER

DEMO

(Fusionskraftwerk)

DEMO

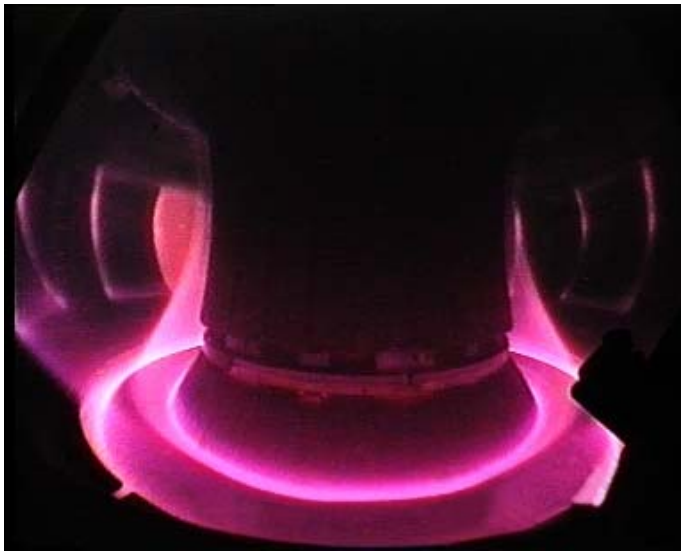
Fusion – Größenordnungsvergleich

Deuterium-Tritium Plasma

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

$$T = 100 \text{ Million } ^\circ\text{C} \text{ (100 MK)}$$

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



Wasser

$$n = 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (300 K)}$$

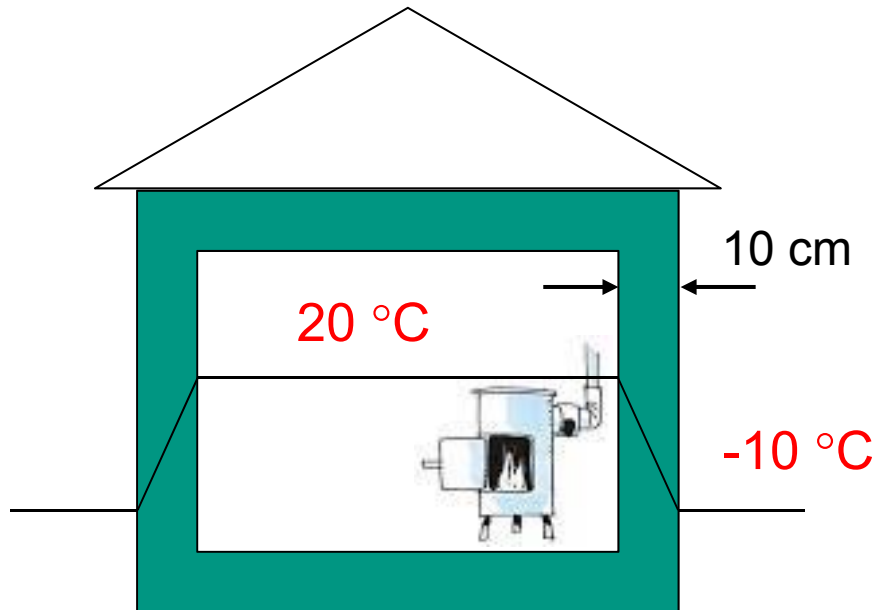
$$p = 1 \text{ bar}$$



Fusion – Größenordnungsvergleich

- Isolationsgüte

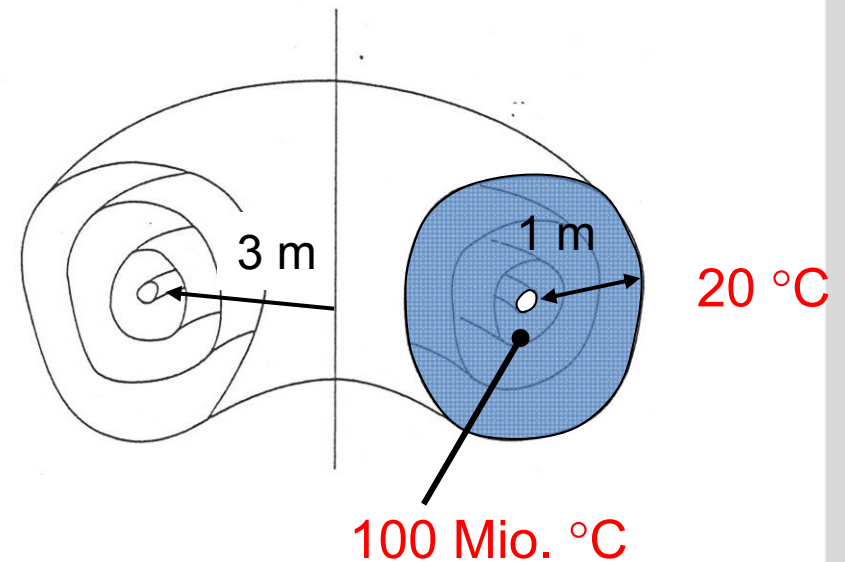
Haus



10 cm Styropor
400 m² Oberfläche

⇒ 5 kW

Plasma



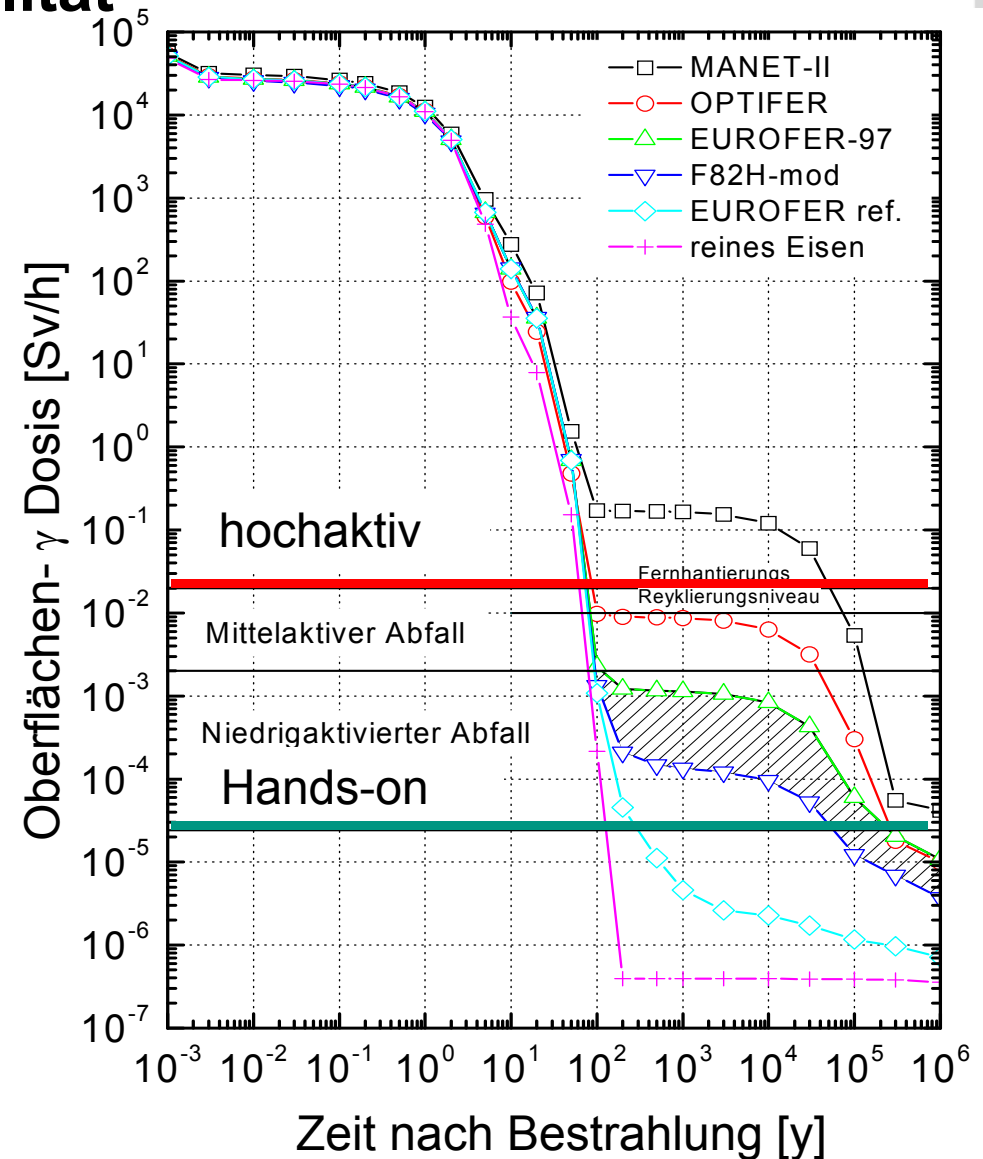
1 m Magnetfeldkammer
120 m² Oberfläche (JET torus)

⇒ 20 MW

Was ist Fusion ?

Fusion, Radioaktivität, Kritikalität

- Neutronen induzieren Kernreaktionen
 - ➔ Bildung neuer Nuklide (Absorption, Spaltung, Aktivierung)
 - ➔ intelligente Stoffauswahl
 - ➔ kurzlebige Aktivierung (~ 100 Jahre)
 - ➔ aktivierte Stoffe nicht volatil
- hoher Neutronenfluss
 - Nachwärmeezeugung
 - Schädigung des Materials (Schwellen, Versprödung)
 - ➔ Ingenieurherausforderung
- keine Leistungsexkursion bei Verlust Zündbedingung (im Gegensatz zu AKW)



WEGE ZUM FUSIONSKRAFTWERK

Transfer von Physik in reale Anlagen → Ingenieur

EU Fusionsstrategie – "Fahrplan"

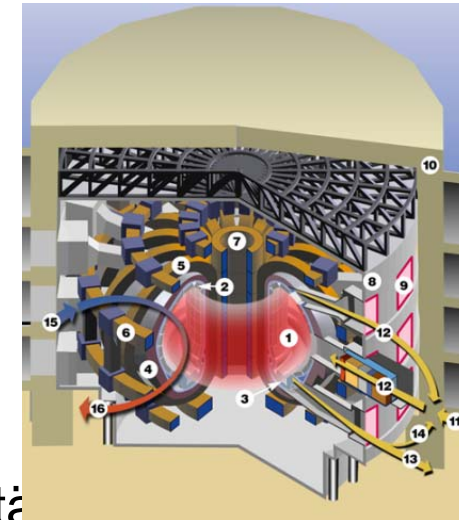
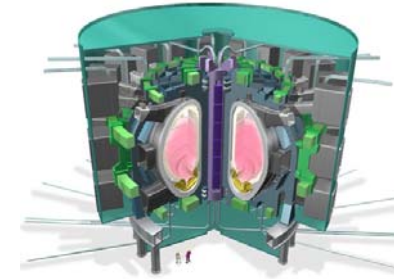
- **ITER: Erstes brennendes Fusionsplasma ($Q = 10$)**
 - Essentielle Physik & Technologieträger für DEMO

DEMO: Demonstration der Machbarkeit eines Fusionkraftwerks (FPP)

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

FPP: Kommerzielles Fusionskraftwerk

- Stellarator oder Tokamak



1. Elektrizität

FPP

$Q=10$

DEMO

ITER

2010

2020

2030

2040

2050

Missionen

1. Plasmabetrieb

2. Wärmeabfuhr

3. Materialien

4. Tritiumbrüten

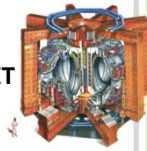
5. Sicherheit

6. DEMO

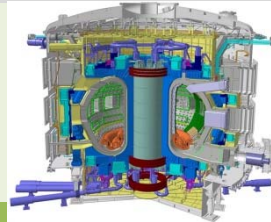
7. Kosten

8. Stellarator

JET



ITER

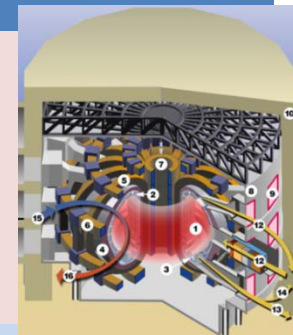
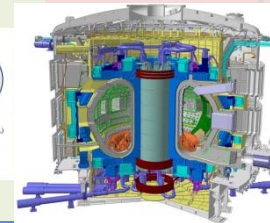
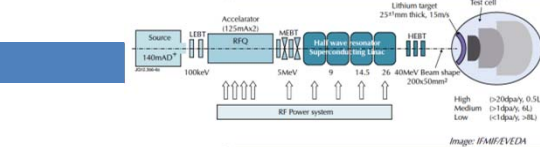


Induktiv
Stationär



JT60-SA

Basisstrategie
Verbesserter Einschluss & Materialien



ITER Testblanketprogramm
Parallele Blanketkonzepte

DEMO Entscheidung

Fusionselektrizität

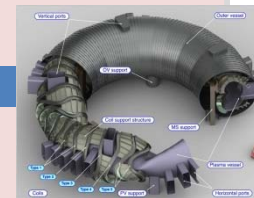
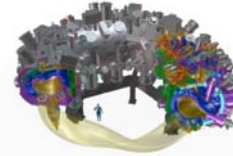
CDA +EDA

Aufbau

Operation

Kapitalkostenreduktion und Langzeittechnologien

W7-X



Stellaratoroptimierung

Brennendes Plasma im Stellarator

2010

2020

2030

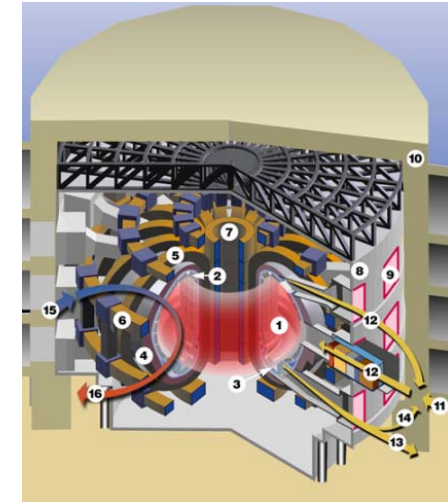
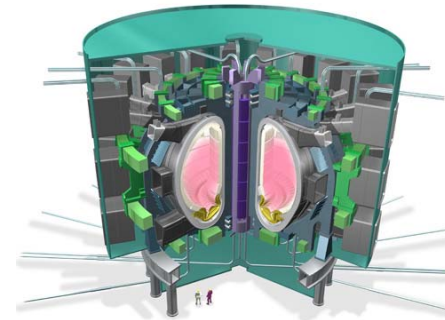
2040

2050

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

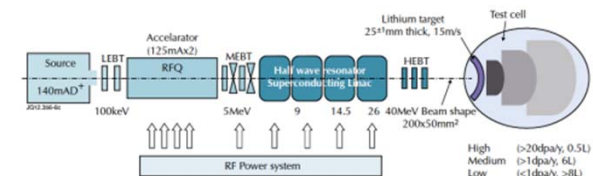
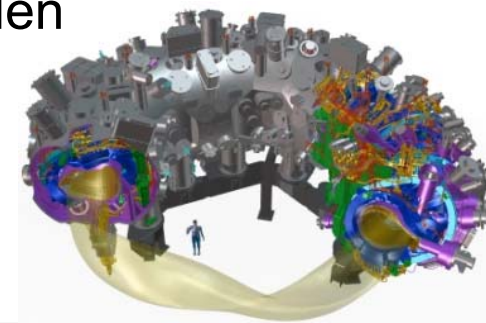


Image: IFMIF/EVEDA

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**

INGENIEURS-FORTSCHRITTE IN DER FUSIONSFORSCHUNG

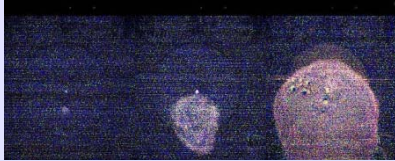
Ziel:

- Technologieentwicklung zur Realisierung der Fusion als Energiequelle

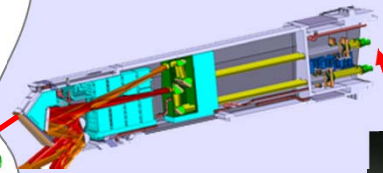
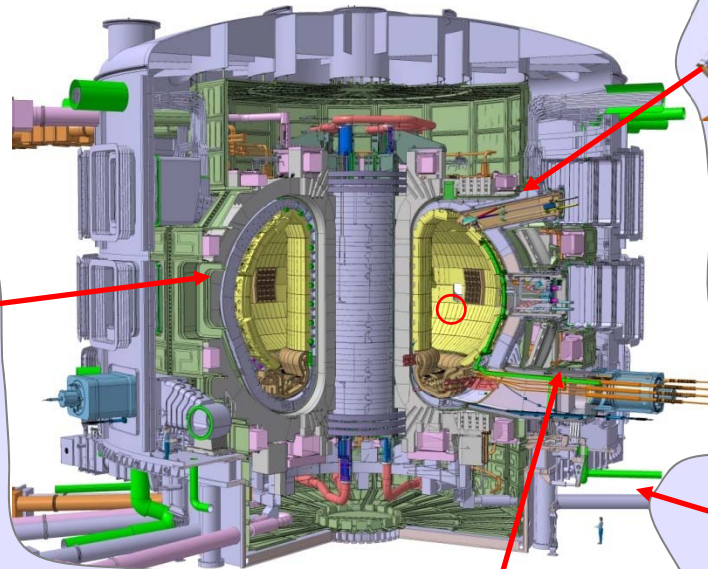
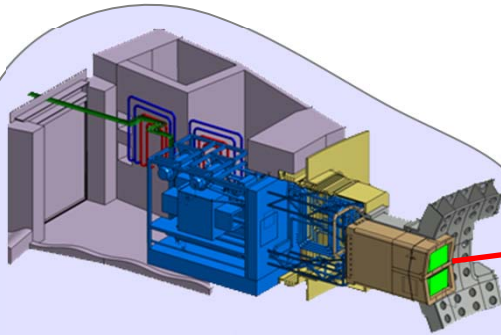
- Arbeitsgebiete am KIT
 - Ingenieurtechnik - „Fusion Engineering“- vom Kern zum Kraftwerk
 - Blankets - Design –Kühlung- Brutmaterialien
 - Divertoren – „Auspuffrohr“ des Reaktors
 - Magnete – vom Draht zum Magneten
 - Heizung
 - Sicherheit
 - „Fusionsmaterialentwicklung und -qualifizierung“

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

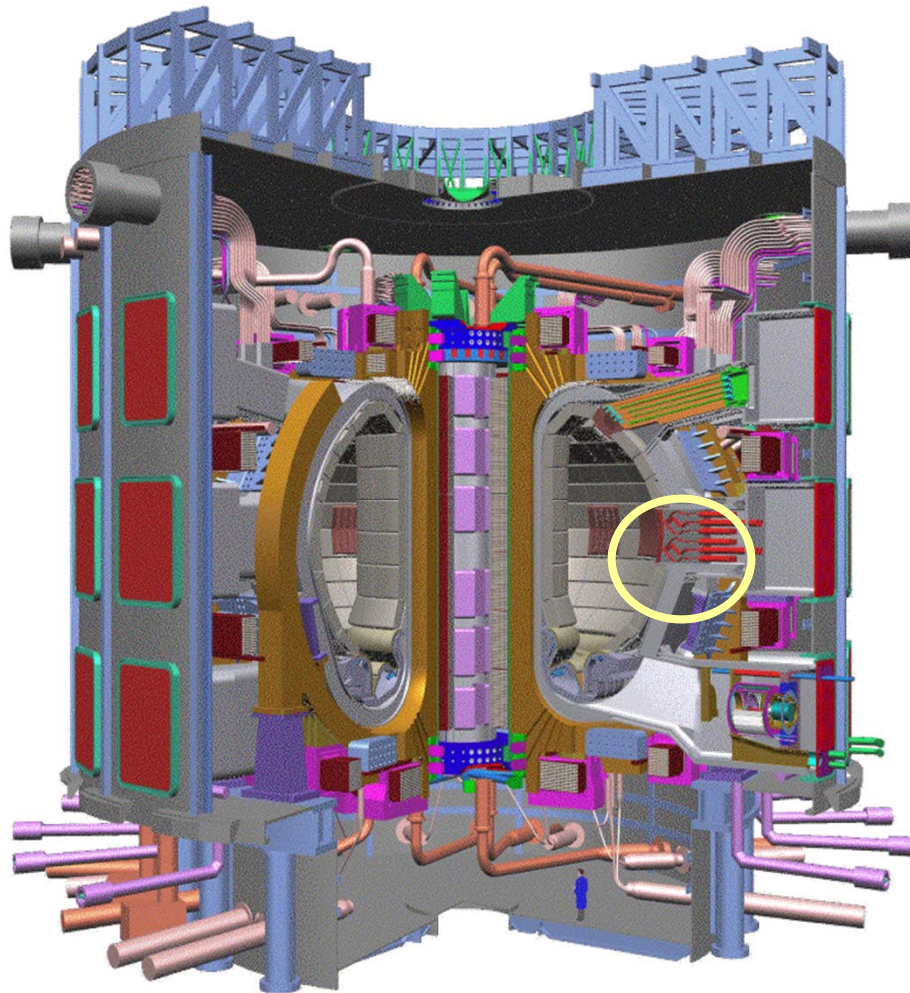
➡ **Sicherheit, Wartung, Verfügbarkeit**

■ **Fusionsbrutmaterialien**

- Lithiumkeramik
- Neutronenvervielfacher
- Flüssigmetallkorrosion
- Permeationsbarrieren

➡ **Brennstoff, Sicherheit, Haltbarkeit**

Blankets – das “Herz” des Reaktors

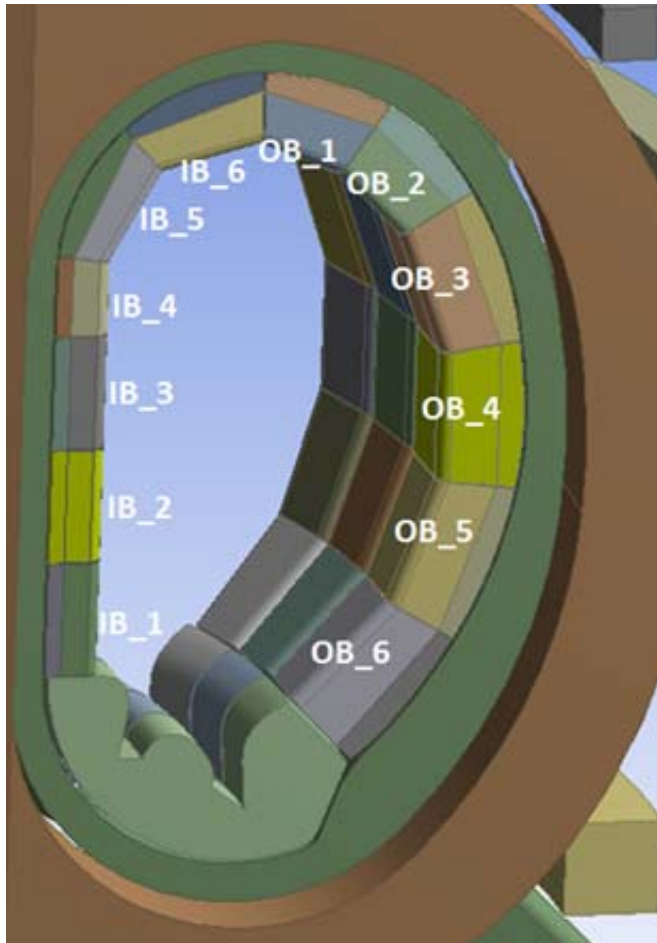


**ITER: Tritium-Versorgung extern,
(aber Erprobung von Brutkonzepten für DEMO)**

Aufgaben des Brutblankets:

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

Blankets – das “Herz” des Reaktors



Brutblanketanordnung in einem DEMO

Aufgaben

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

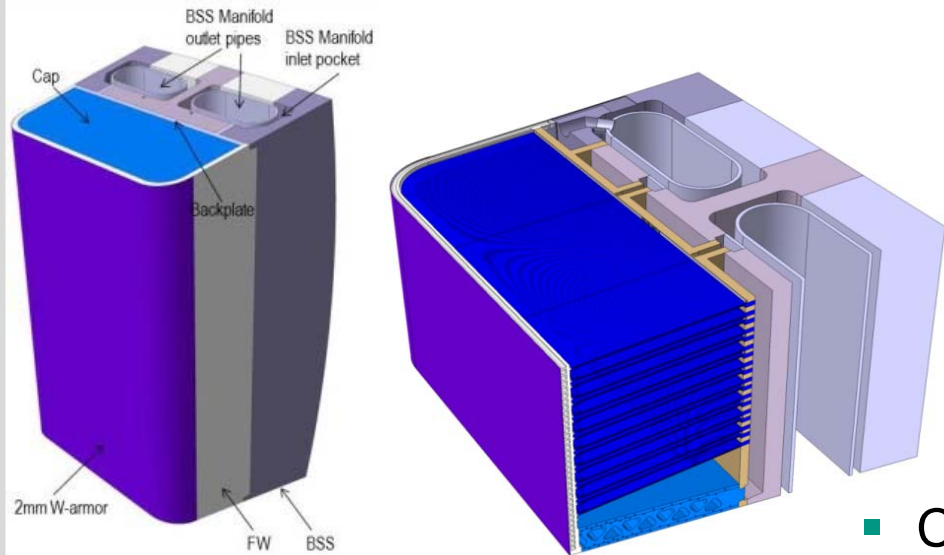
Randbedingungen

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

Konzepte ➔ modularer Aufbau

- Festes Brutmaterial /Heliumkühlung
- Flüssiges Brut-/Kühlmaterial

Blankets – das “Herz” des Reaktors

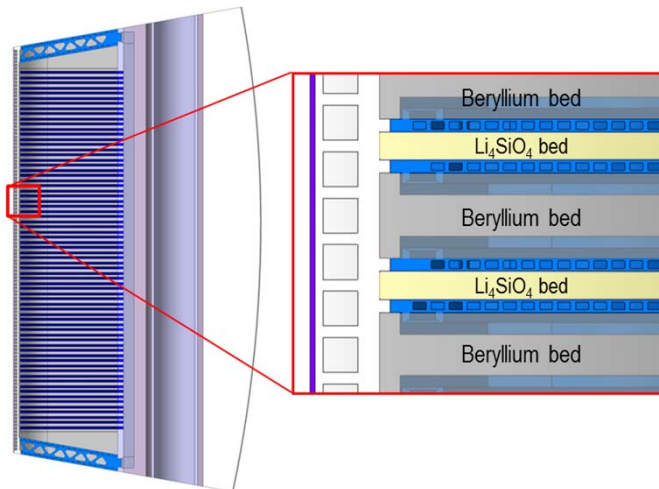


Beispiel : Helium gekühltes Schüttbett -Blanket

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).

CAD Auslegung

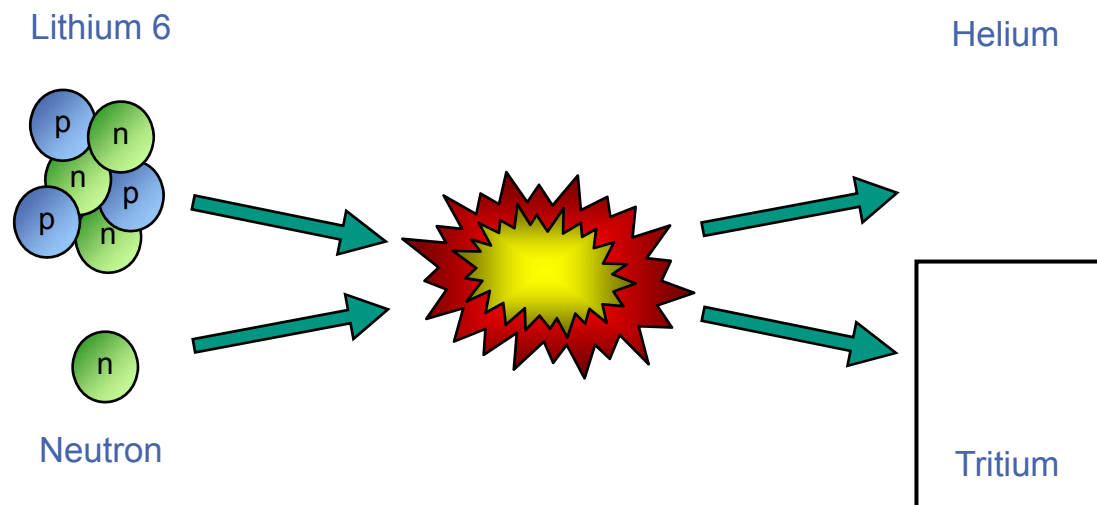


Berechnete therm. und mech. Spannungen

Blanket-das “Herz” des Reaktors

Blanketauslegung -“Brutfunktion“

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



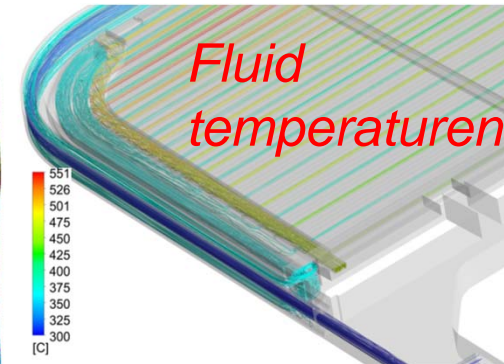
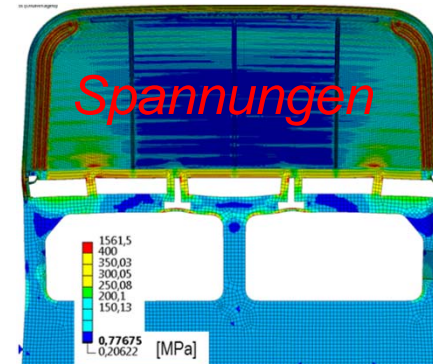
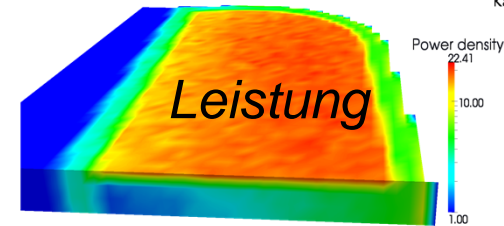
■Potentielle Brutreaktionen



Blanket- das "Herz" des Reaktors -Aufbau

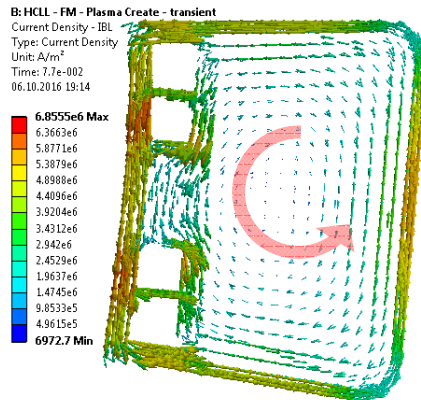
Auslegungs-Analyse

- neutronische, thermo-hydraulische und strukturmechanische Belastung.
- Beurteilung anhand Auslegungswerkzeugen (RCC-MRx, SDC-IC).

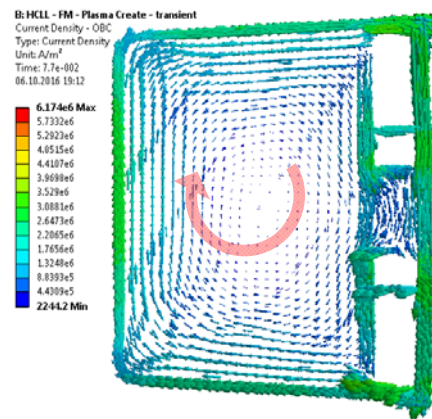


Nukleare Leistung, Temp. und Spannungsverteilung im HCPB

Inboard



Outboard



Wirbelstromverteilung bei einer Plasmadisruption

EM Analyse des Blankets:

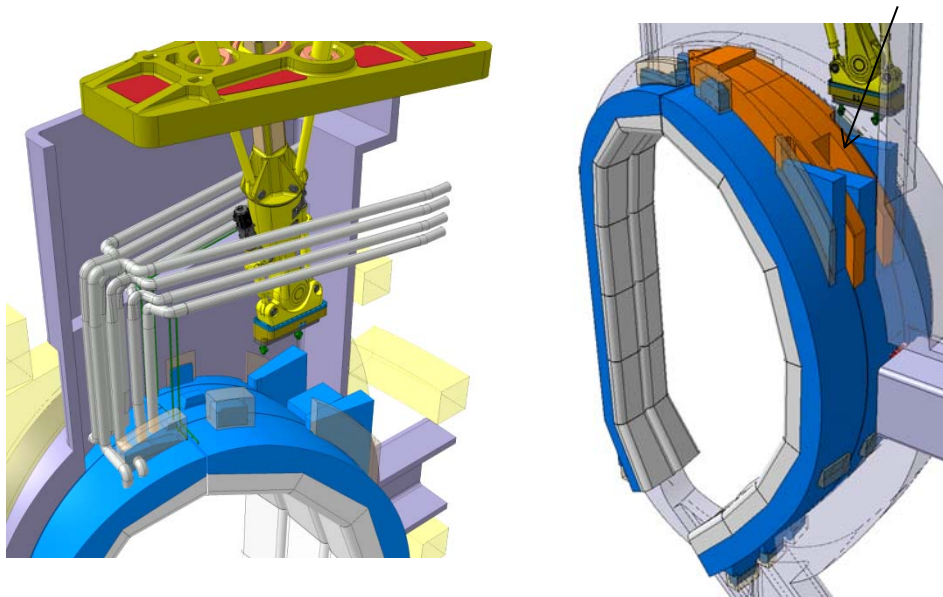
- Disruption
- Vertikale Plasmaauslenkung (VDE)
- Elektromagn. Kräfteverteilung (Ferromagnet. Materialien)

Beispiel : Helium gekühltes Schüttbett -Blanket

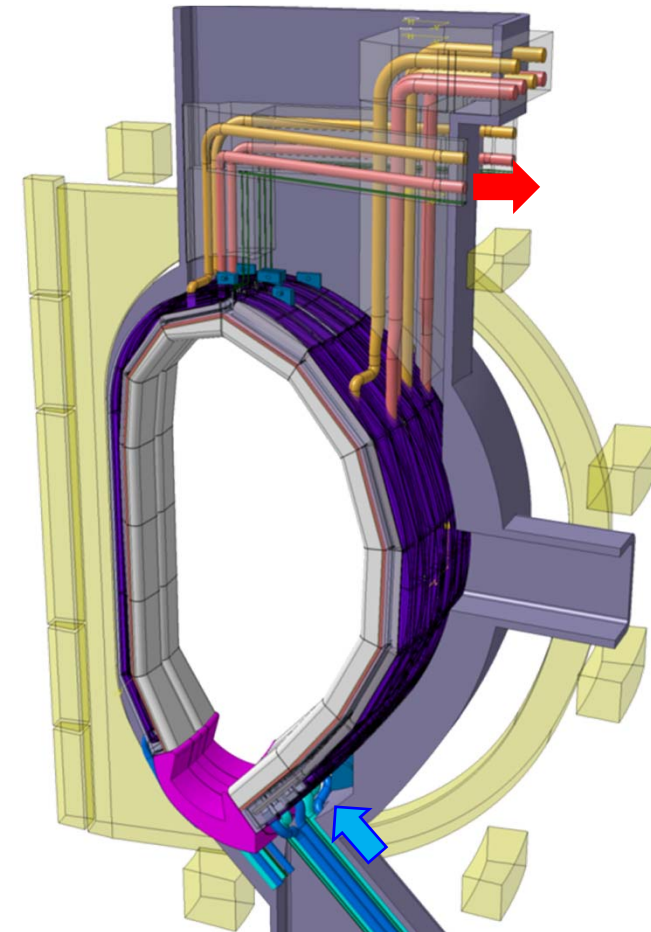
Blanket- das“Herz” des Reaktors - Reaktorintegration

■ Einbau in DEMO Reaktor

- Rohrleitungen
- Zugriff mit Fernhantierungsrobotern
- Integration der Brennstoffeinspritzung
- Heizung/ Stromtrieb –Schnittstellen



Befestigungssystem zum ferngesteuerten Ein-/Ausbau mit dem Reaktorfernhandlungssystem (Kooperation CCFE-KIT)

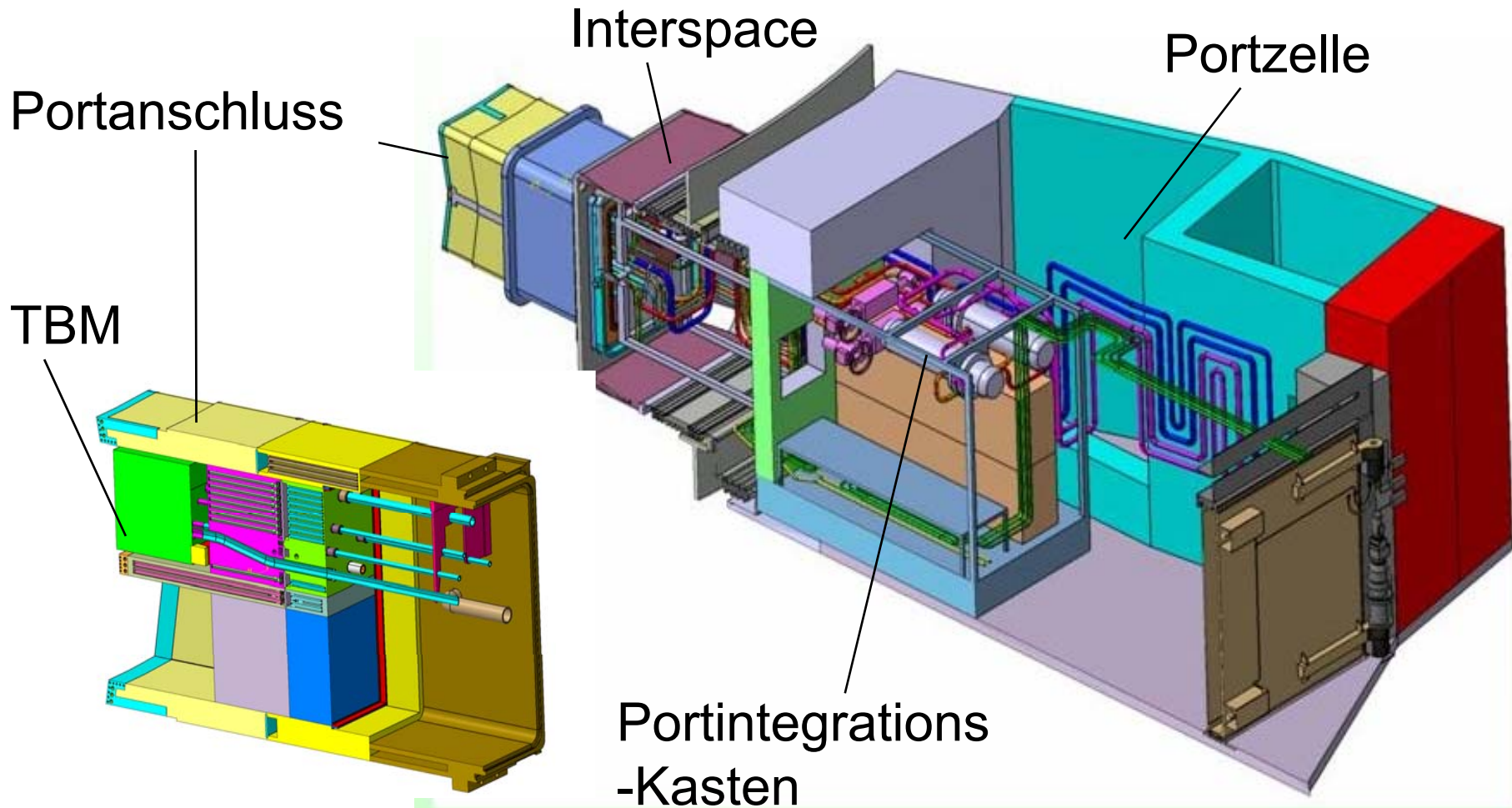


*Blanket
Rohrleitungslayout*

Blanket- das "Herz" des Reaktors

Funktionsnachweis in ITER

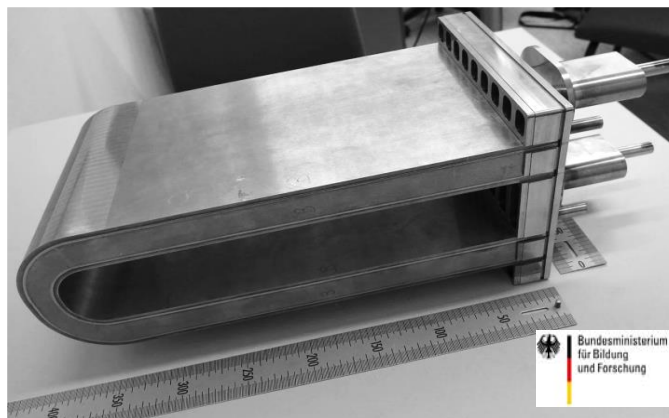
- HCPB-Testblanket-Modul-System-ITER



Blanket- das "Herz" des Reaktors- Herstellung

- **Biegen** massive Strukturen (2500x60x30) bis zu dünnen Kühlplatten (80x20x5).
 - **Drahterodieren** auf großen Längen (800- 2500) channels of different dimensions 3x3 to 15x15.
 - **HIP Schweißen** dicke Wände und Kühlstrukturen mit integrierten Kanälen.
 - **Selektives Laser Sintern (3D-Druck)**: für komplexe Strukturen oder gradierte Bauteile.
 - **EB Schweißen**
- ➔ alles mit kerntechn. Lizenzierungsnachweis

(Dimensionen alle in mm)



Blanket- das "Herz" des Reaktors- Herstellung

Brutmaterial = keramischer Grundstoff mit Li

- KALOS Prozess (Karlsruhe Lithium Orthosilicate)

Materialoptimierung

- Advanced material

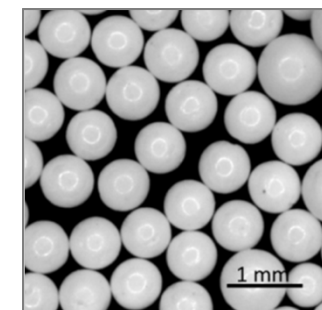
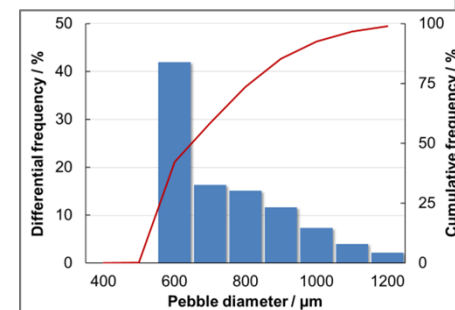
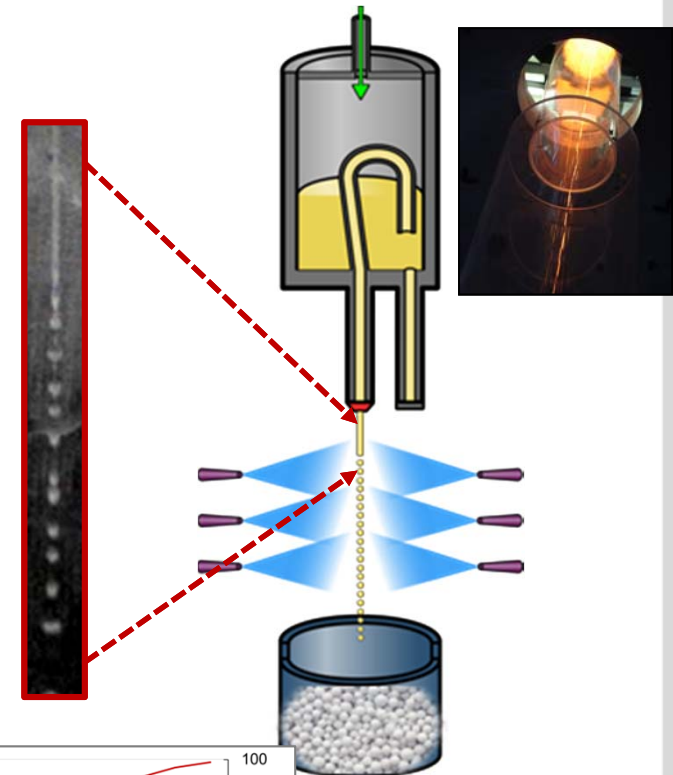


Prozessentwicklung

- Schmelzprozess bei 1350-1400 °C
- Tröpfchenerzeugung durch Strahlzerfall
- Erstarrung durch Kühlgasspray

Prozessbeurteilung

- Prozesseffizienz 85-90 mass%
- Mittlere Kugelgröße 650 µm (anpassbar)
- Prozessrezyklierung nachgewiesen



Divertor-Entwicklung

Divertorfunktion:

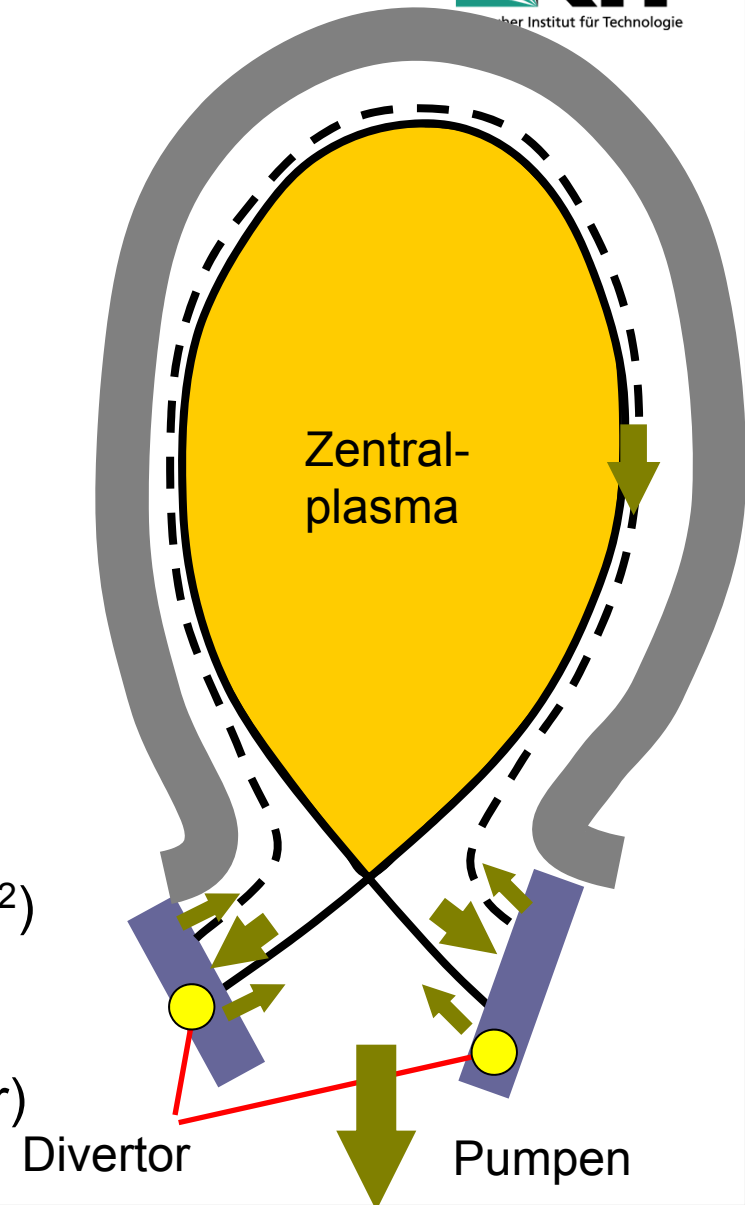
- Abfuhr der Asche (He, Partikel) = „Auspuff“

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

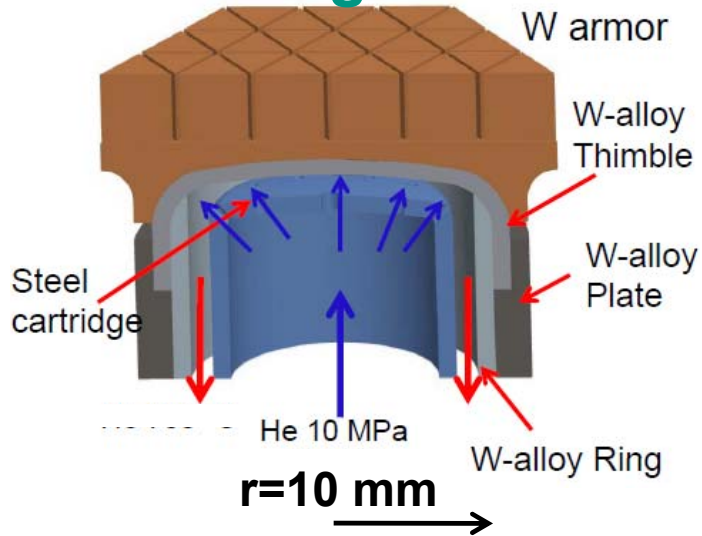
Techn. Herausforderungen Divertor

- 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

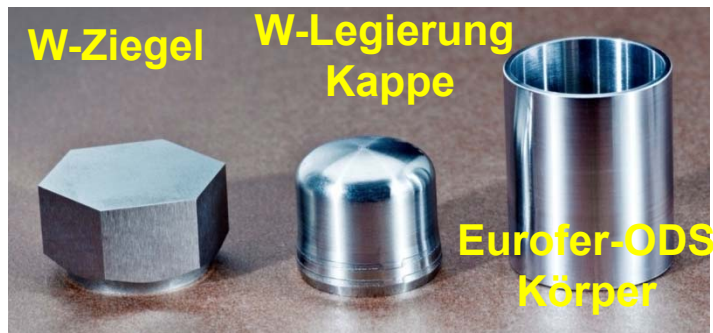


Divertor-Entwicklung

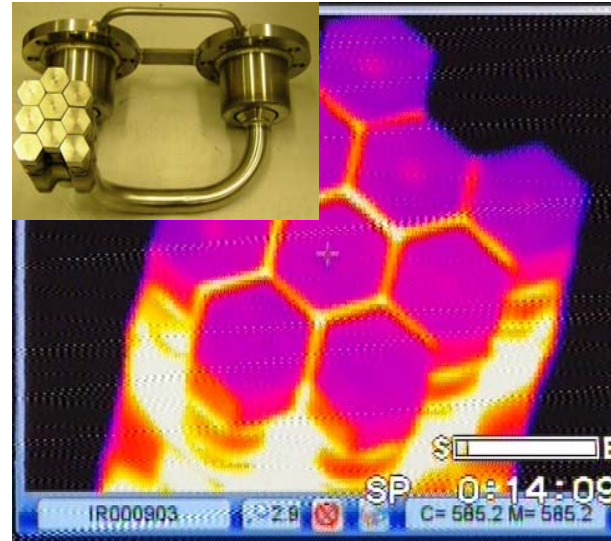
Basisdesign



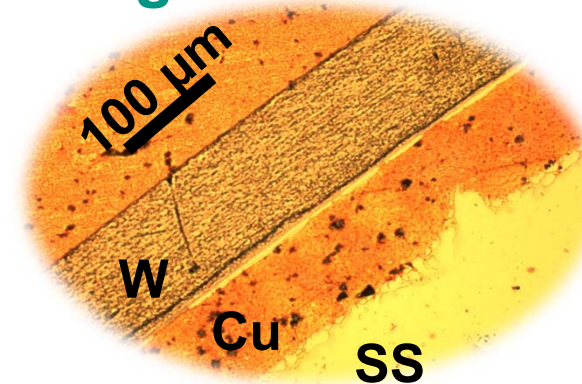
Herstellung Einzelteile



Validierung (10MW/m²)



Fügeverfahren



Reaktorskalierung

Plasmaraumkomponenten-Validierung

- alles muss bei prototypischen Parametern validiert werden



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



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

Plasmaraumkomponenten-Validierung

- 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



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

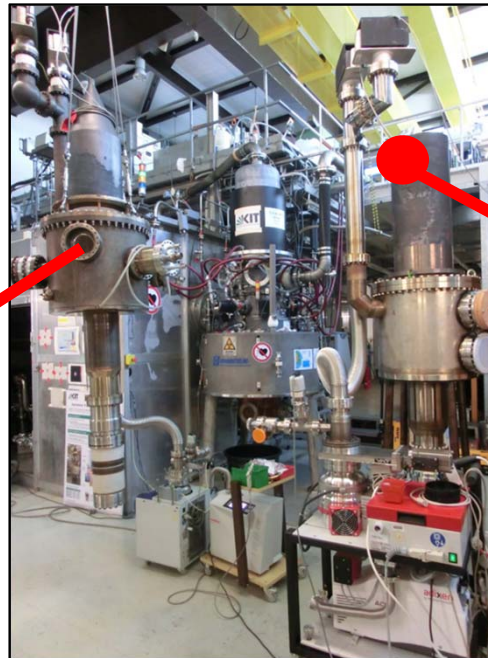
Mikrowellenheizung: Gyrotronentwicklung

Elemente

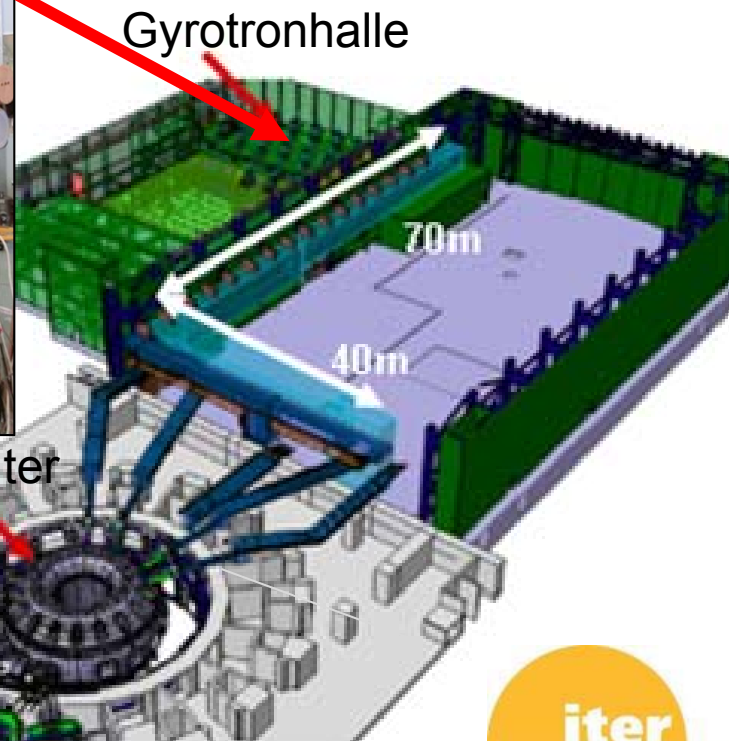


Gyrotron -Fenster

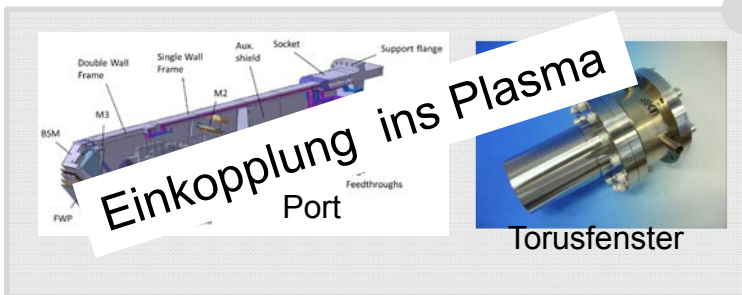
Gyrotron



Vakuumbehälter



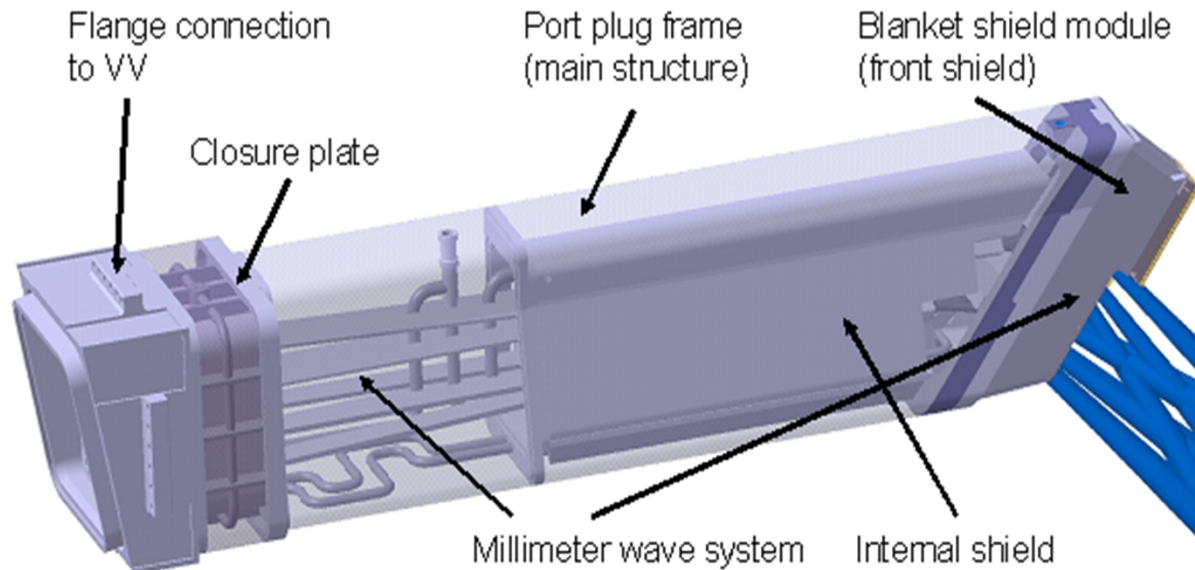
Gyrotronhalle



Einkopplung ins Plasma

Torusfenster

Mikrowellenheizung: ECRH-Launcher



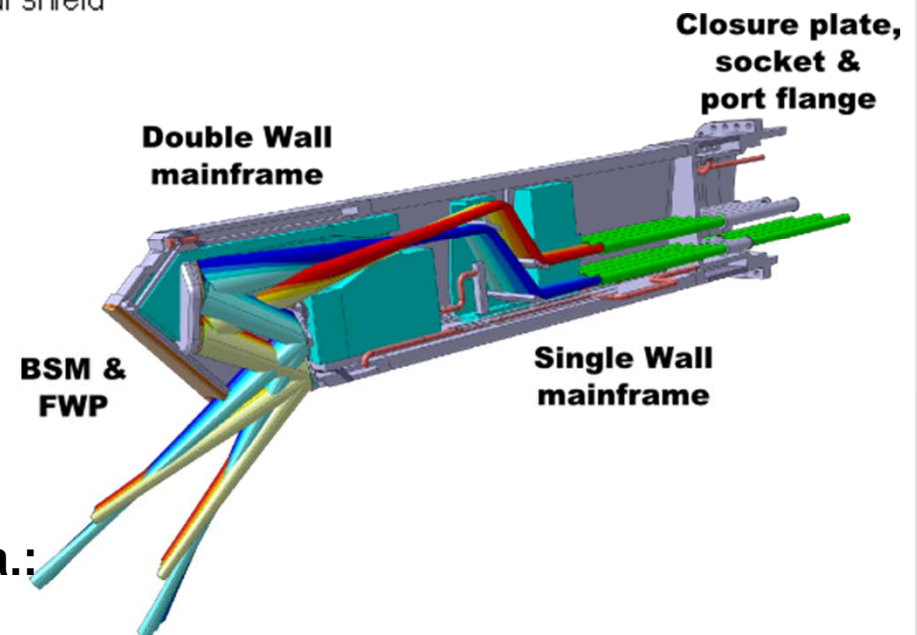
Funktion:

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

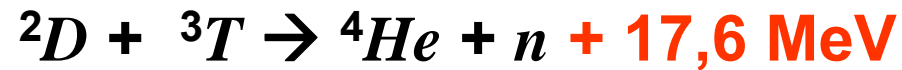
Ziel

- Heizung
- Stromtrieb
- Plasmastabilisierung

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



ITER-Tritium-Kreislauf (“Fuel Cycle”)



- im Plasma 1H , 2D , 3T 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

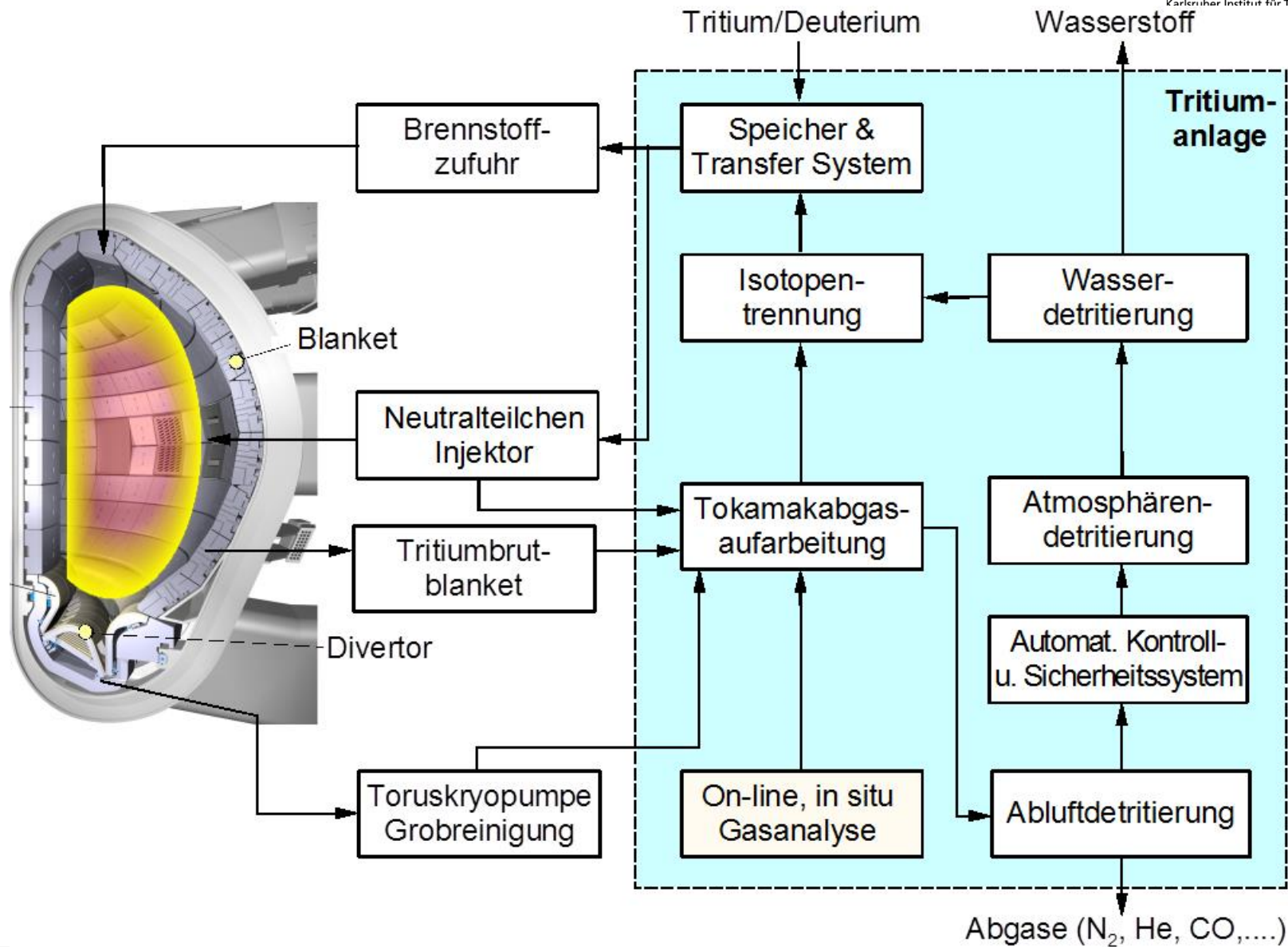
- neutroneninduzierte Aktivierung im Kühlwasser (☹)
- im Brutblanket (☺ , bei ITER: nur Testmodule)
- Transmutation im Strukturwerkstoff (☹)

Eigenschaften von Tritium:

- weicher β -Strahler mit 6 keV Zerfallsenergie
- 12,3 Jahre Halbwertszeit
- physiologisch kritische Austauschreaktion von Wasserstoffatomen

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

ITER-Tritium-Kreislauf (“Fuel Cycle”)

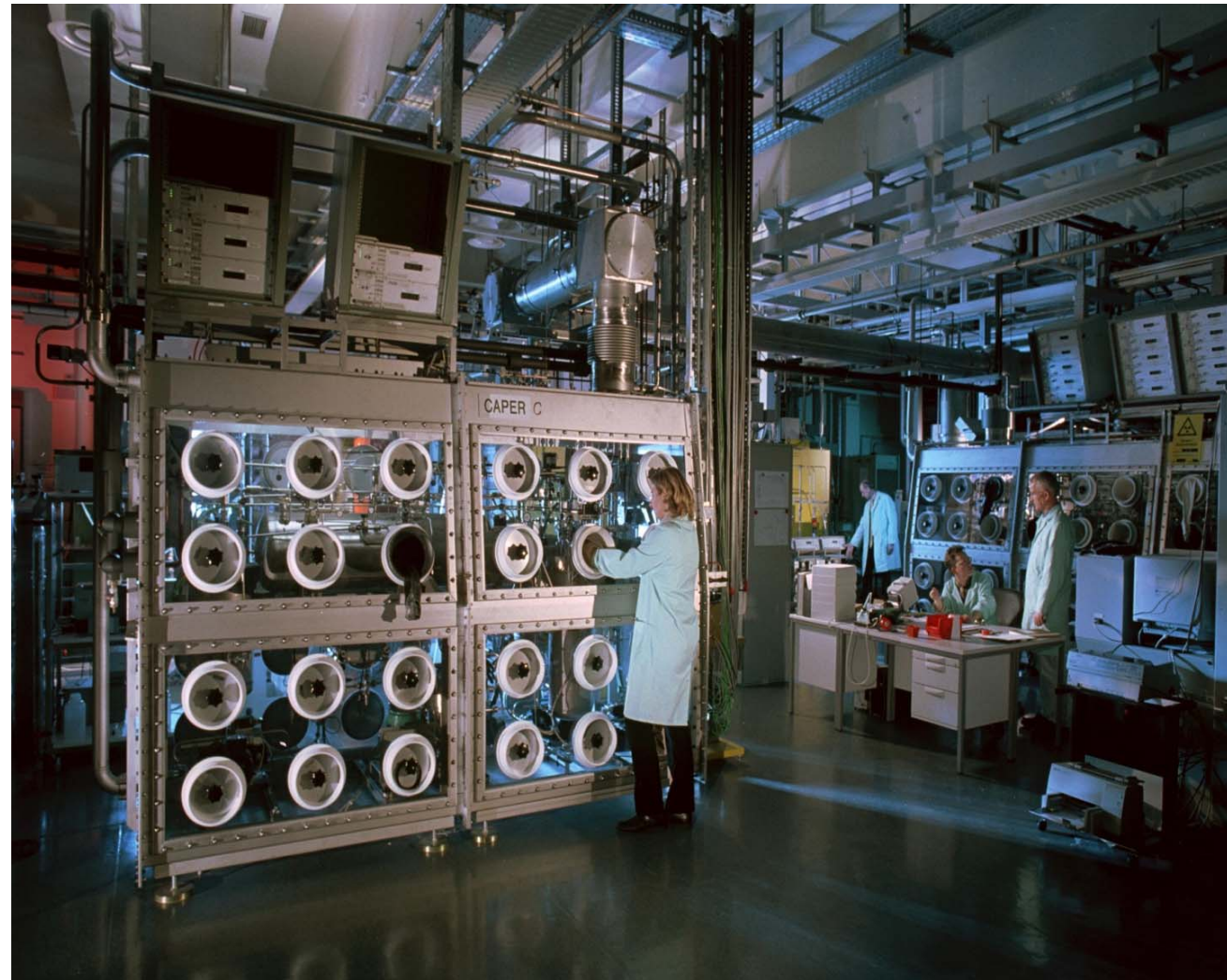


ITER-Tritium-Kreislauf (“Fuel Cycle”)

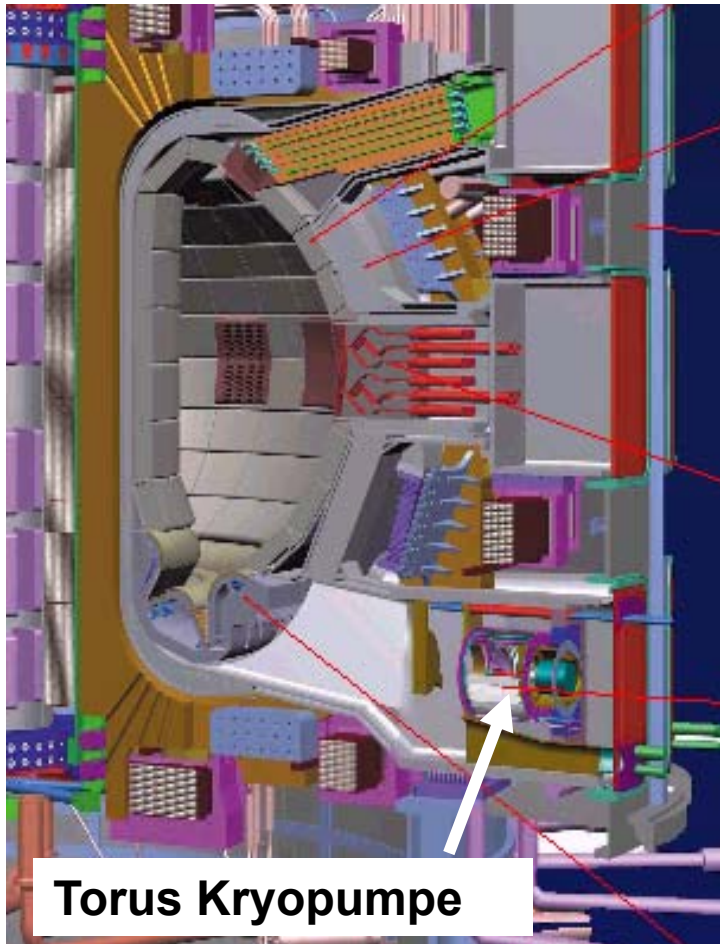
TLK –

Tritium-
Labor
Karlsruhe

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

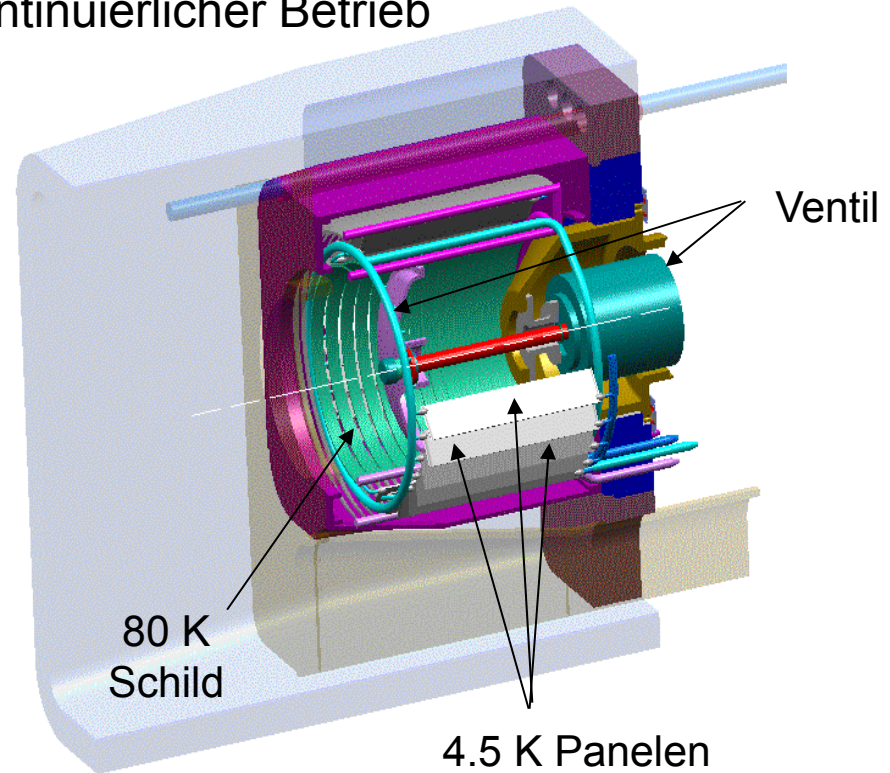


ITER Brennstoffkreislauf - Kryopumpen

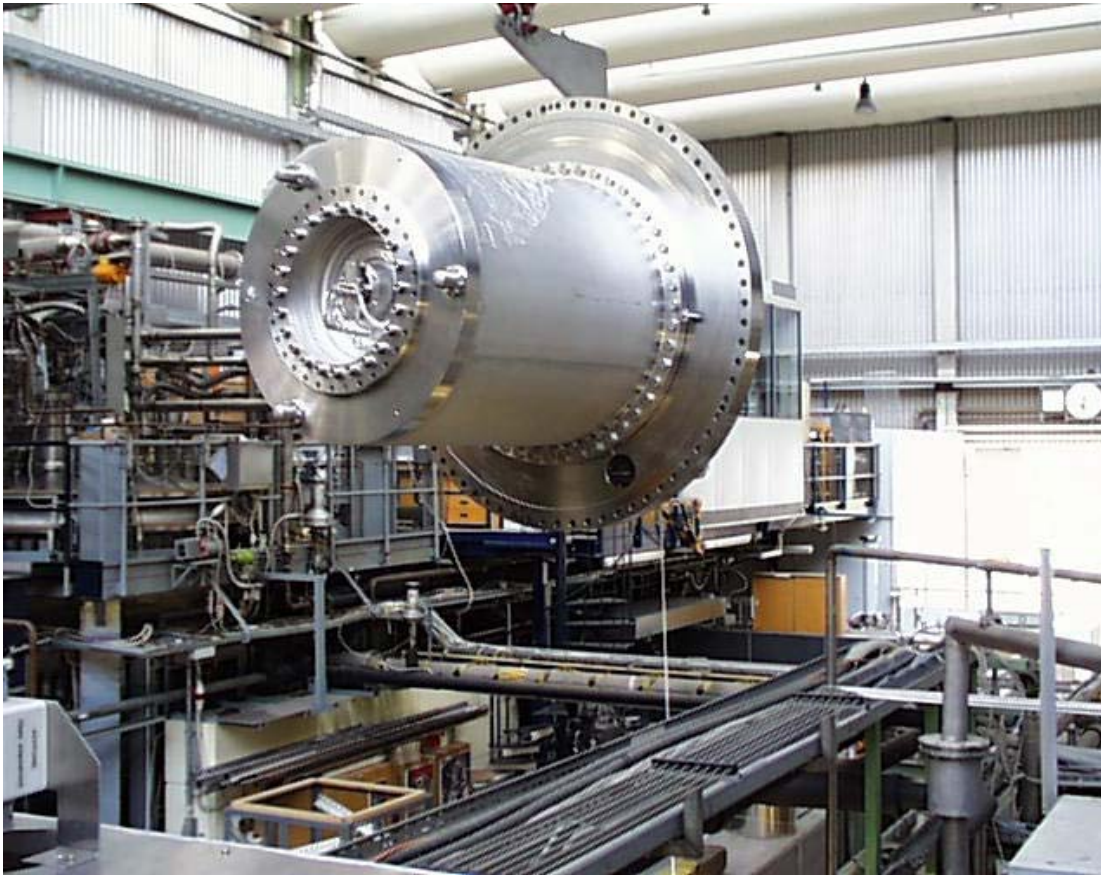


ITER-Torus-Kryopumpe: ITeP-Entwicklung Funktionsweise:

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



ITER Brennstoffkreislauf - Kryopumpen



Test der Modellpumpe im ITeP

4.5 K - Kryopanel



Brennstoffkreislauf - Vakuumpumpen

Nachteil Kryopumpen :

- diskontinuierlicher Betrieb

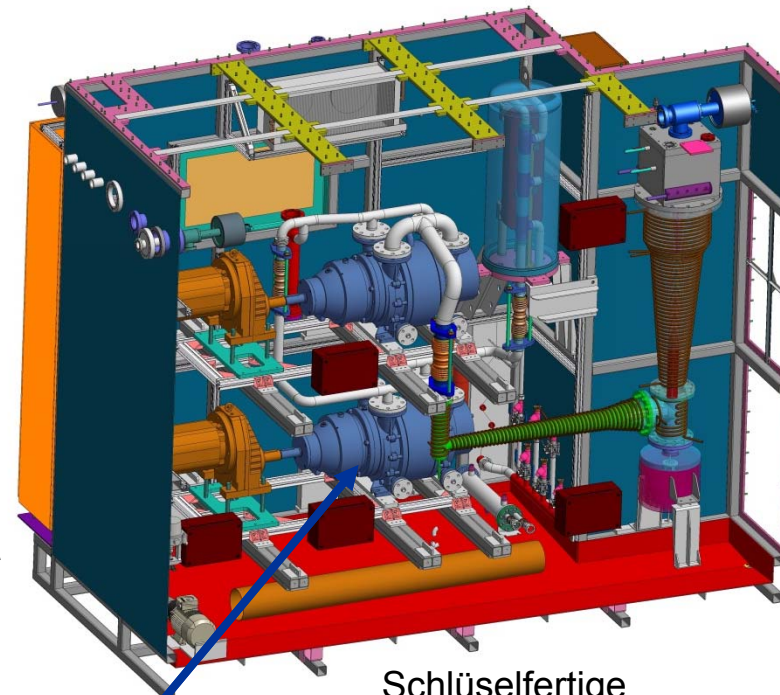
Ansatz:

- Gasadsorption über Flüssigmetalloberfläche

➔ Ringpumpe

Protoypenbau

- ➔ Tritiumkompatible Pumpe gebaut
- ➔ Test in THESEUS (ohne Tritium)
- ➔ Lizenzierung für JET.



Schlüsselfertige
Pumpeinheit für JET

Abnahmeprüfung
beim Hersteller



Innenleben der
Pumpe



Materialinnovation

Plasma-Divertormaterial: 1.Option Wolfram (W)

Wolfram inhärent:

- spröde
- rekristallisiert bei höheren Temperaturen
 ➔ erneute Versprödung



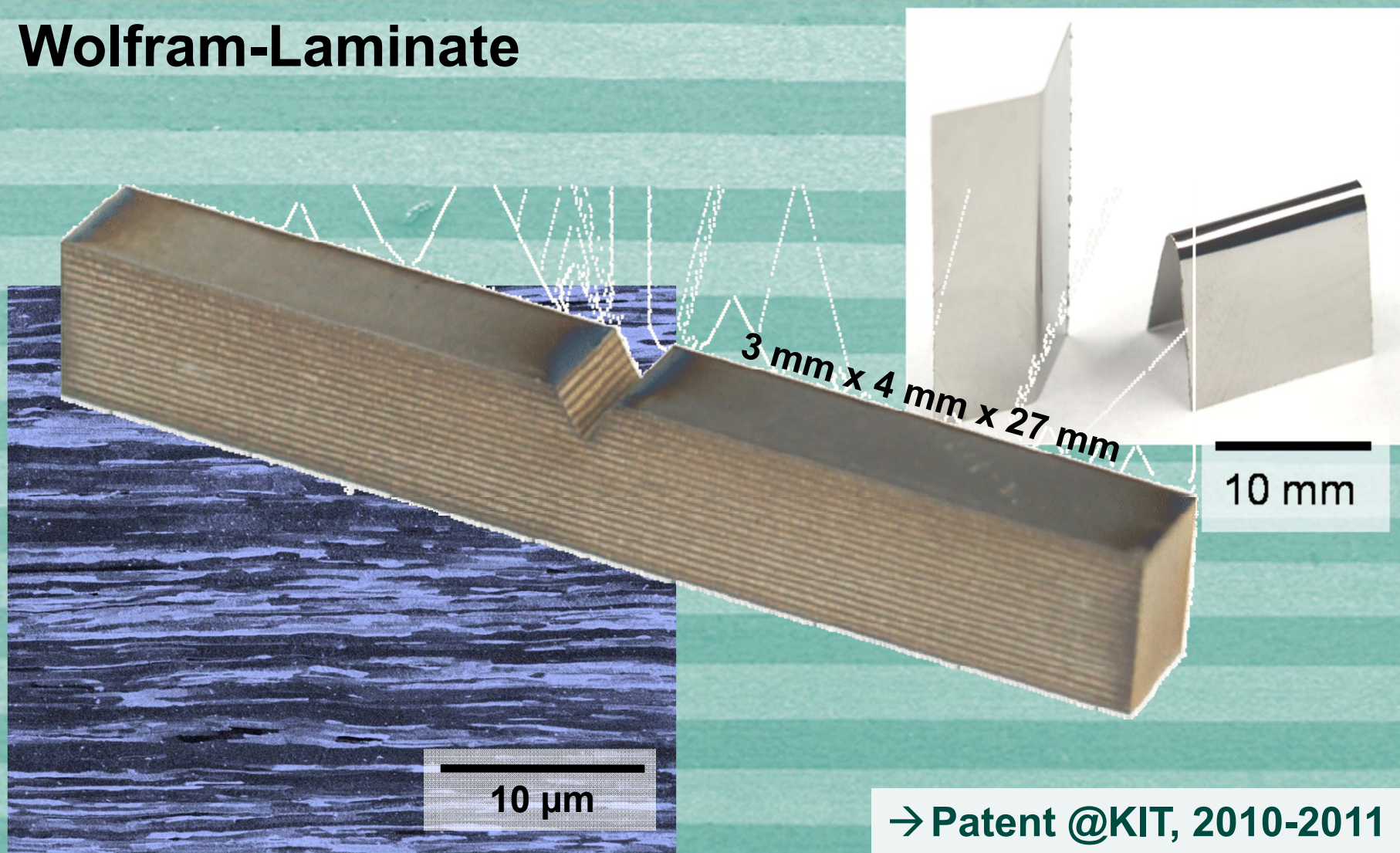
Strategien

- Nanostrukturierung
- Komposite
- Legierung

Problem: Mikrostrukturierung



Wolfram-Laminat



Starke Magnete brauchen Supraleiter

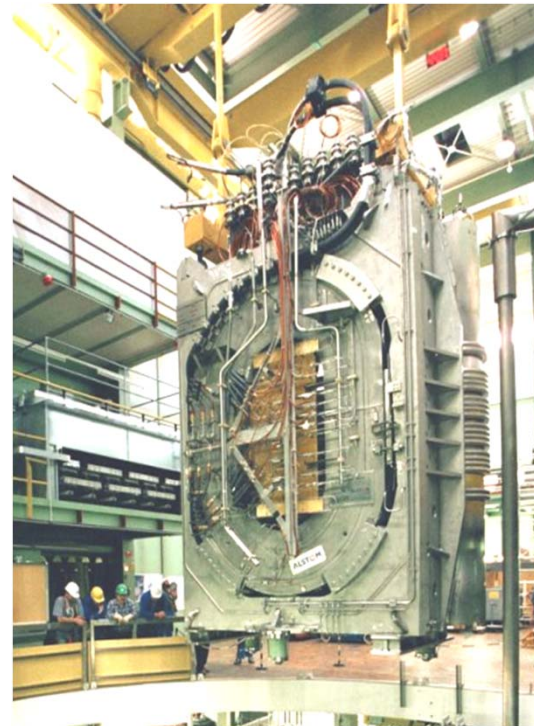
- starke Magnete brauchen hohen Strom (einige bis viele 1000 Ampere)
- Kupfermagnete sind unwirtschaftlich (hohe Stromkosten, werden heiß)

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

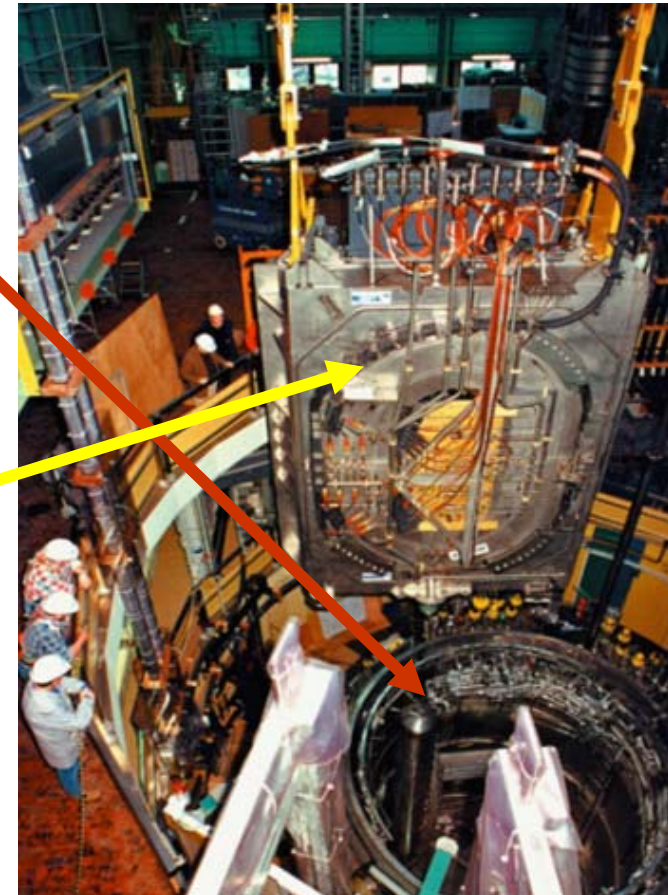
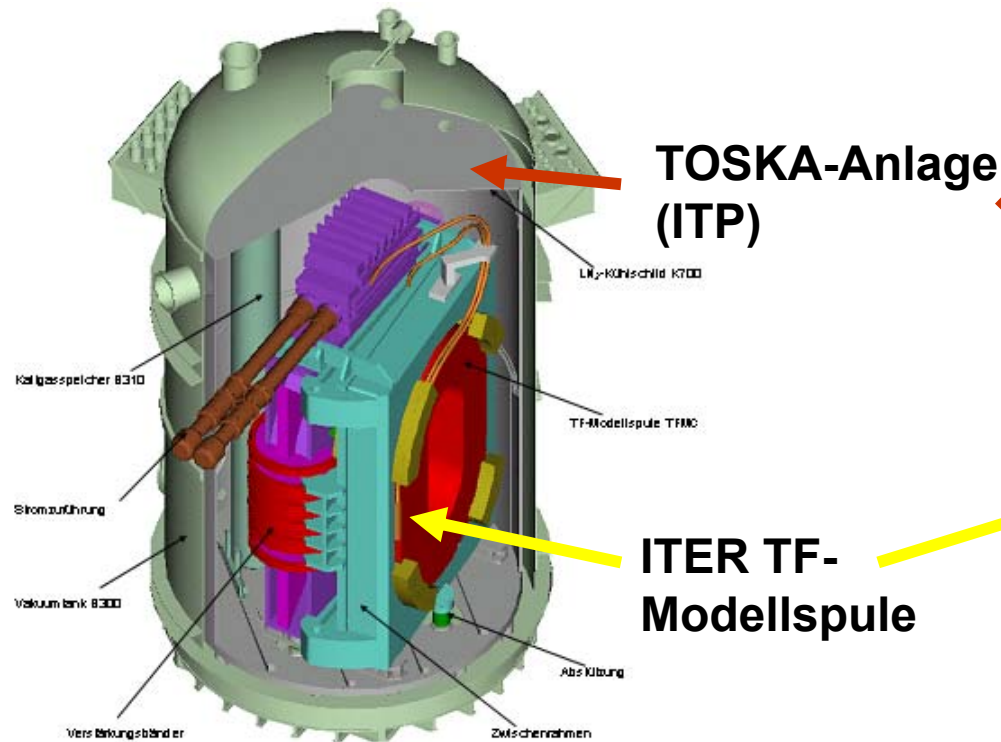
Strom 80.000 A

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.

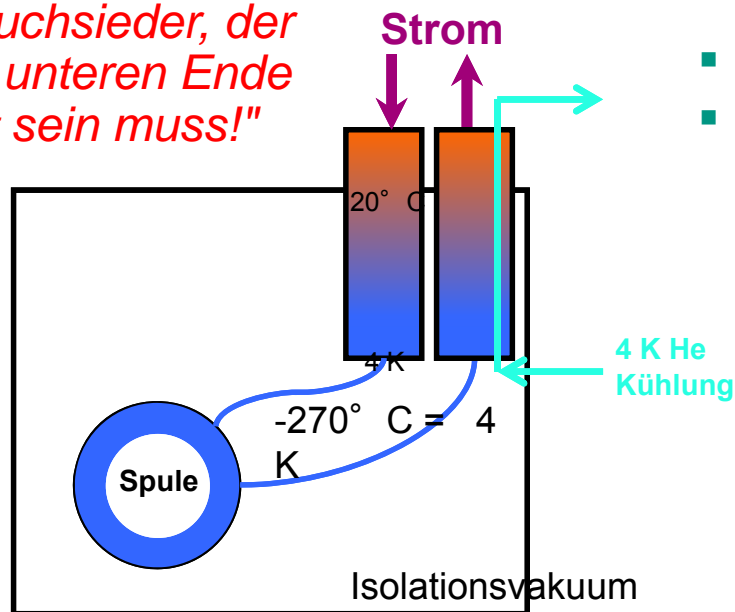
Wie kommt der Strom zu den kalten Magneten?

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

Der Strom muss also über **Stromzuführungen**

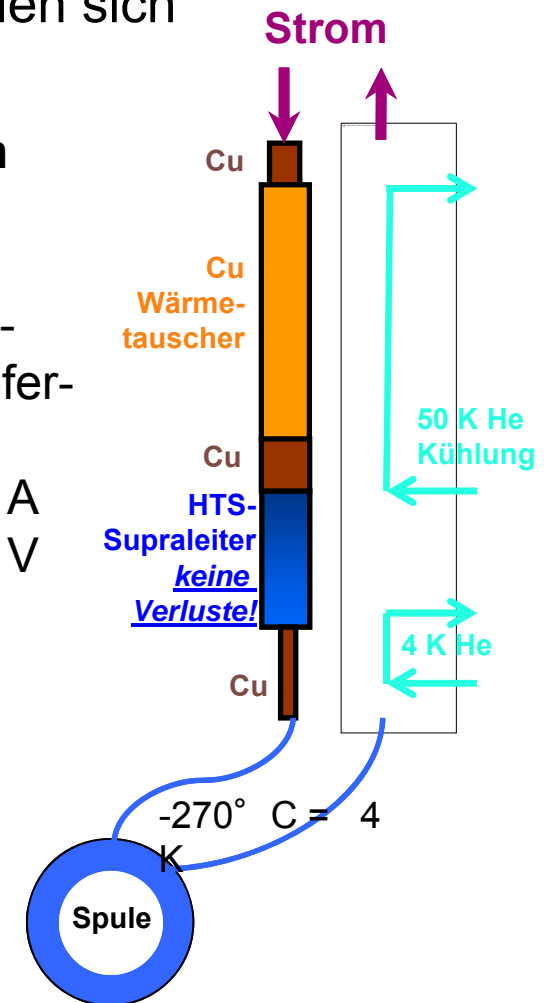
- elektrisch isoliert
- ins Vakuum und
- in die Kälte

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



KIT: Stromzuführungen mit Hochtemperatur-Supraleiter!

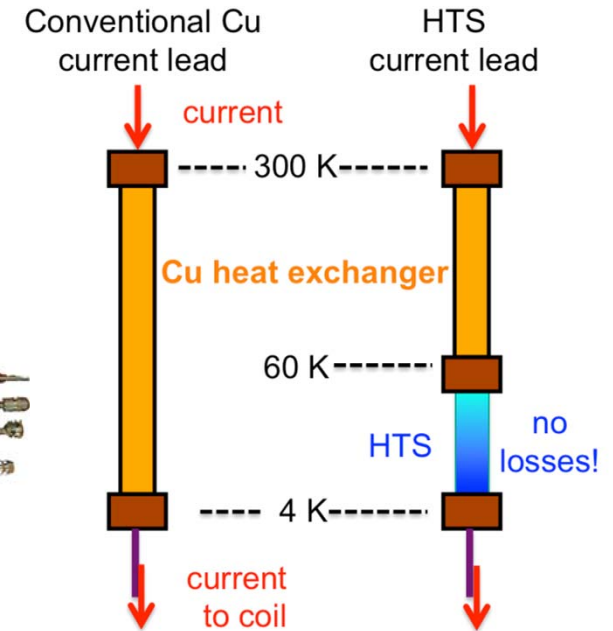
- 5x geringerer Energieverbrauch als bei Kupfer-Stromzuführungen
- Strom max. 80.000 A
- Isolation max. 13.000 V



Supraleiter und Spulen

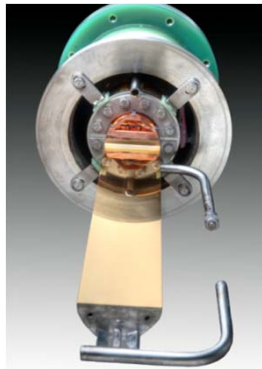
Hochtemperatursupraleiter (HTS) –Stromzuführung (CL) am KIT entwickelt und getestet

- HTS-CL reduzieren Kühlleistung um Faktor 3 to 5
- ➔ bei ITER Betriebskosteneinsparung von mehr >1 M€/Jahr



Umfangreicher Bau auch für W7X, JT60SA

- ➔ Prüfeinrichtungen



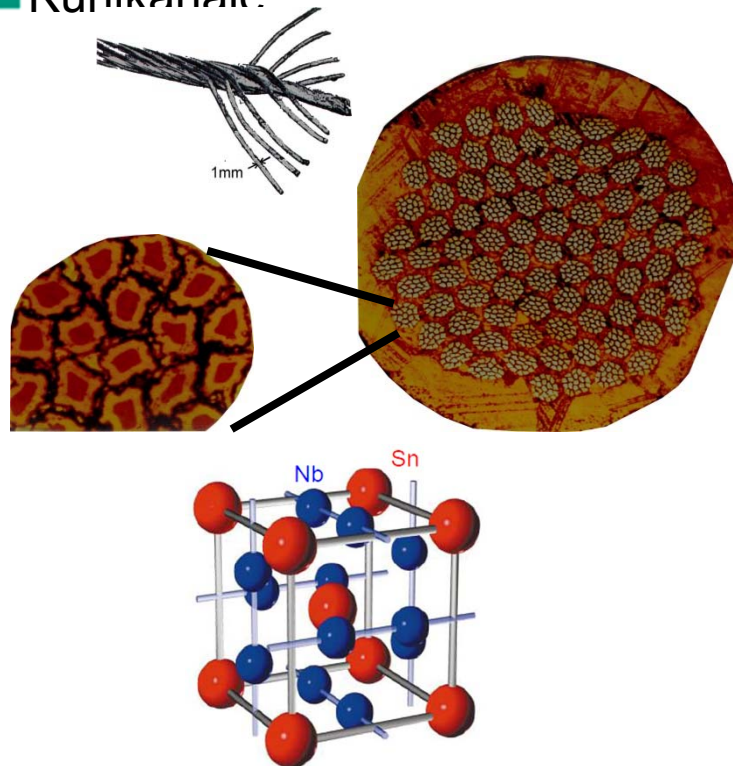
Hochtemperatursupraleiter (HTS)

Warum nicht den ganzen Reaktor aus HTS –Spulen bauen ?

- HTS stehen noch am Anfang der Entwicklung

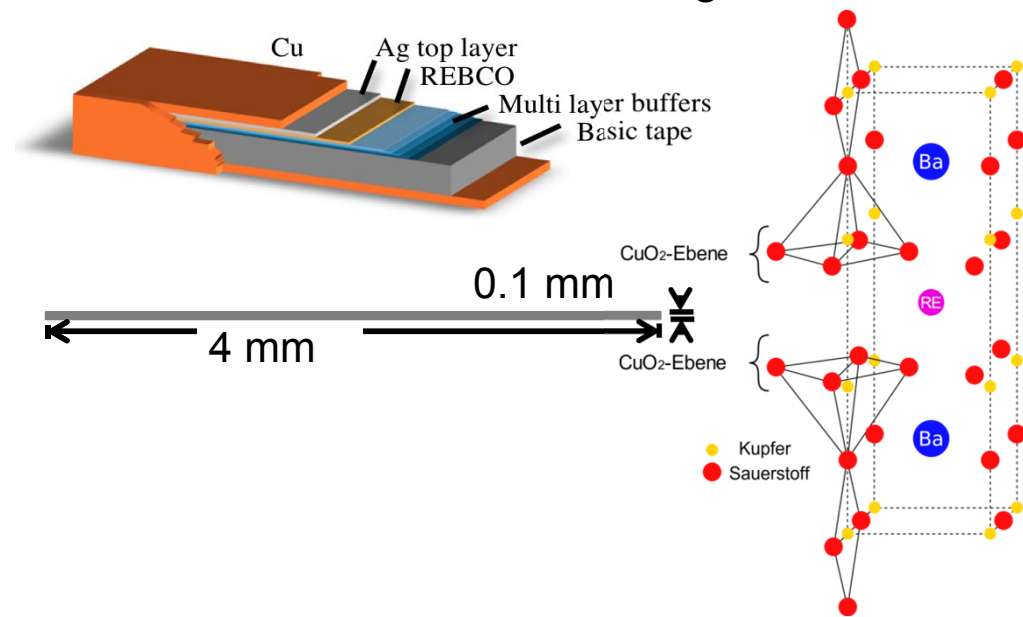
Techn. Supraleiter (Metalle $NbTi$, Nb_3Sn)

- duktil (nach Backen allerdings spröde)
- Kupferummantelung (Quenchschutz)
- Kühlkanäle



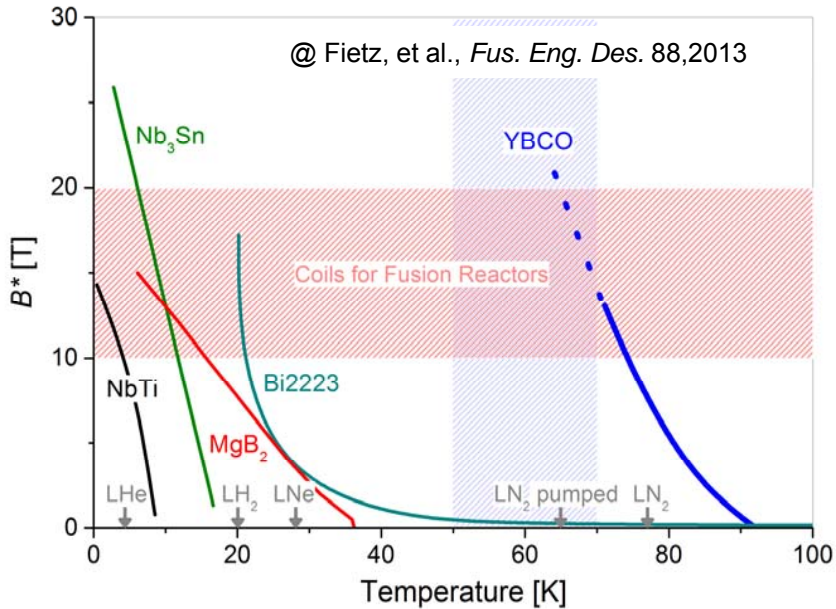
HTS Supraleiter (z.B. REBCO)

- spröde
- Kupferummantelung (Quenchschutz)
- Kühlkanäle
- nur dünne Bänder verfügbar

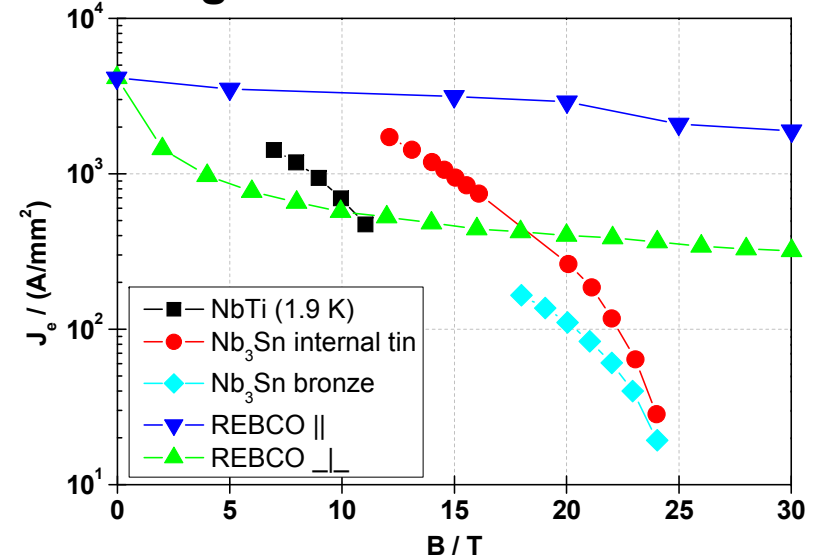


Hochtemperatur-supraleiter (HTS)

■ HTS sind potenzielle Feldmagneten



■ HTS zeigen höhere Feldstärken !

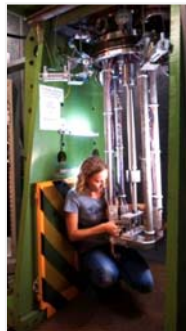


■ Richtungsabhängigkeit des krit. Stroms

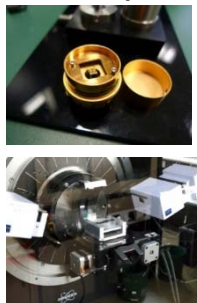
■ HTS müssen charakterisiert werden

➔ CryoMaK

PHOENIX
± 100 kN



PPMS -
Wärmekapazität



Torsion



Fall-Testing



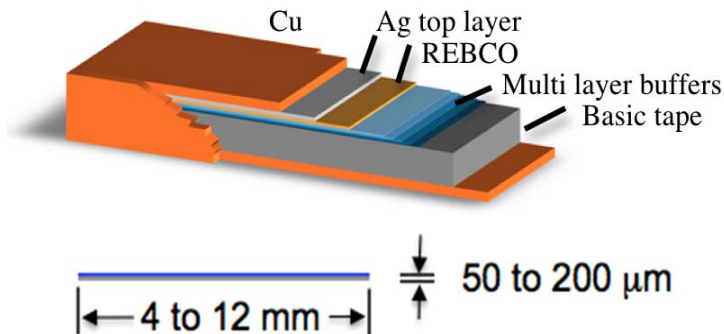
Charpy-Testing



Hochtemperatur-supraleiter (HTS)

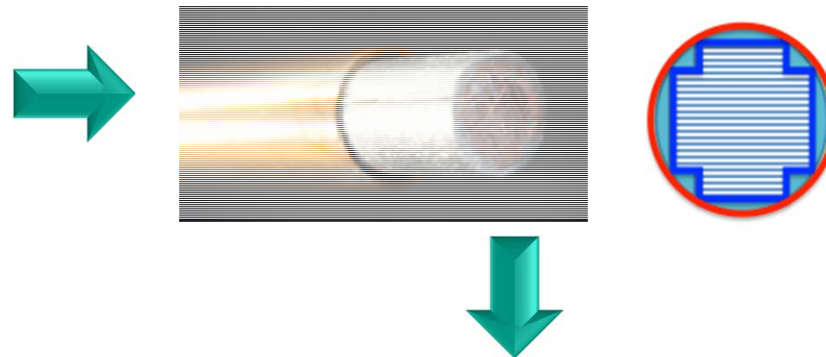
Wie kommt man mit HTS zu einem Kabel ?

HTSL - herstellbar als dünne Bänder



Bildung eines Kreuzleiters

(CrossConductor CroCo) z.B. aus 3 und 4 mm breiten Bändern

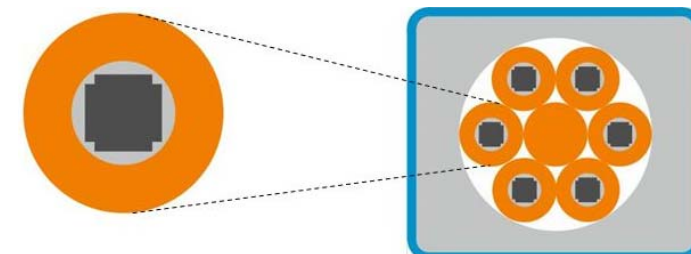


Validierung am Prüfstand

	6/4 CroCo	4/3 CroCo
Zahl REBCO Bänder	22 x 6 mm	28 x 4 mm
REBCO tapes	10 x 4 mm	10 x 3 mm
Durchmesser	~10 mm	7.7 mm
I_c (4.2 K, B 12 T, $\parallel c$)	> 10 kA	~ 10 kA

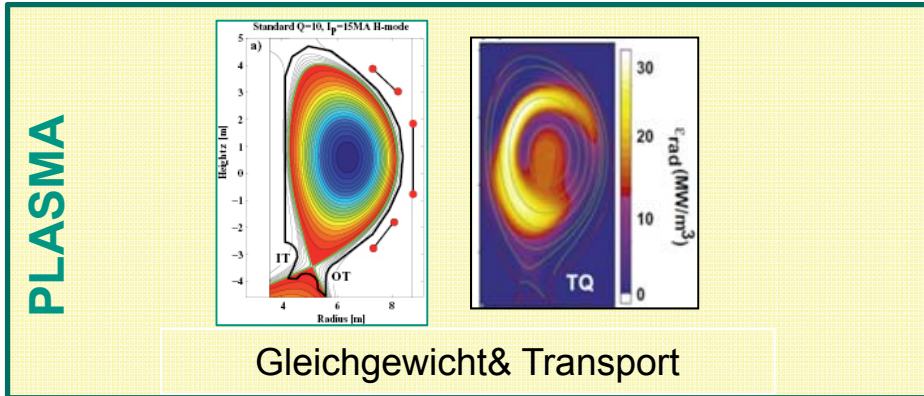
Kabelkonzept

Sechs 4/3 CroCo um zentralen *Cu*-Stab
Betriebsstrom 50kA
in einer Stahlhülle



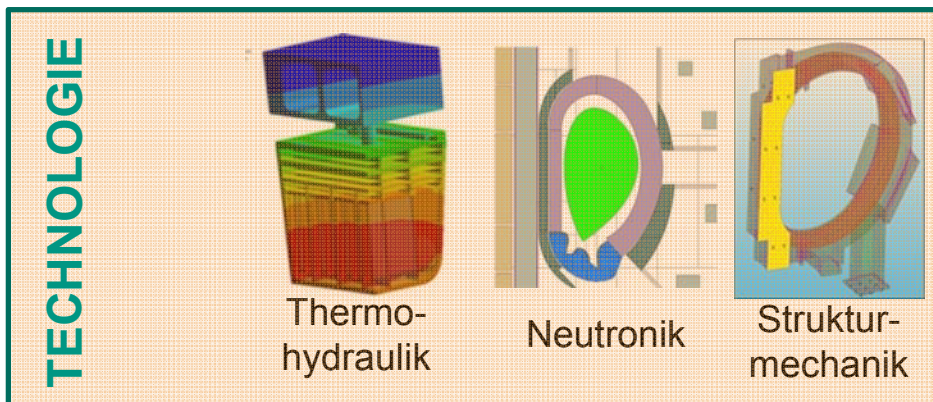
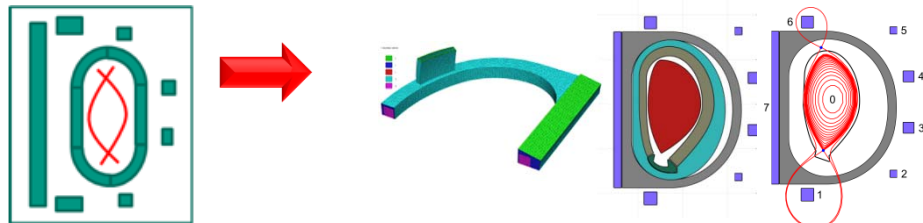
Reaktorauslegung

■ Beschreibung des Reaktorkerns



- Integrale Reaktorbeschreibung (vereinfachte Modelle aber)
 - zeitabhängig und
 - ortsabhängig
- Optimierung
- Integration neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse.

Systemcode (0D/1D) neuer KIT -Systemcode (2D/3D)

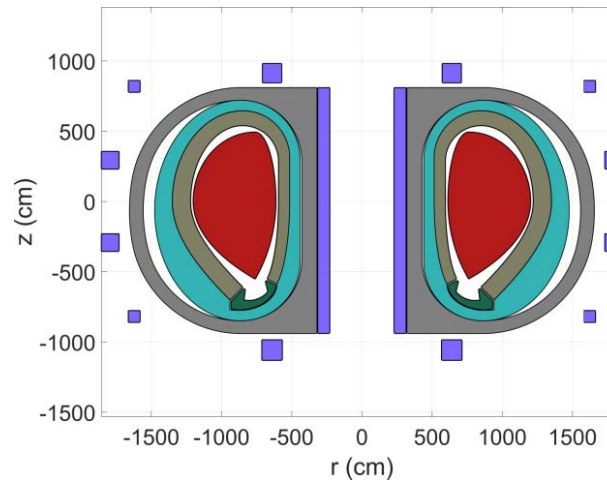


Reaktorauslegung

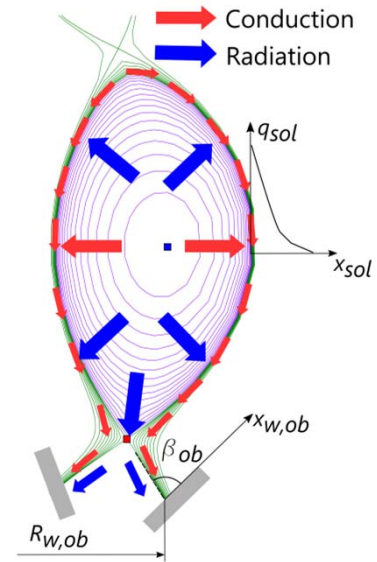
Fähigkeiten des Systemcodes

- Modelle:
 - Plasma
 - Magnetfelder
 - Blanket
 - Divertor
 - Brennstoffkreislauf
- Analysewerkzeuge:
 - Reaktorgeometrie
 - Leistungsflüsse
 - Neutronik
 - Magnetfeldkonfiguration
 - Kostenmodell

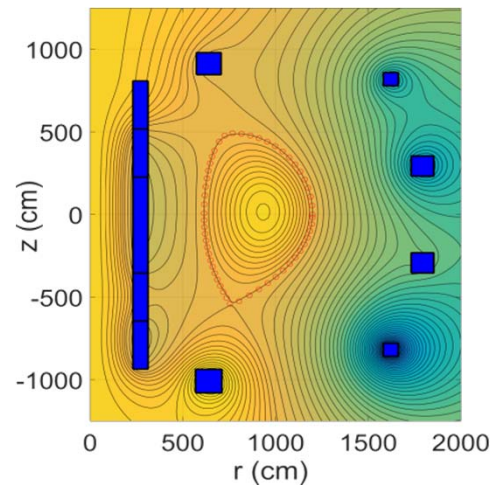
Reaktoraufbau



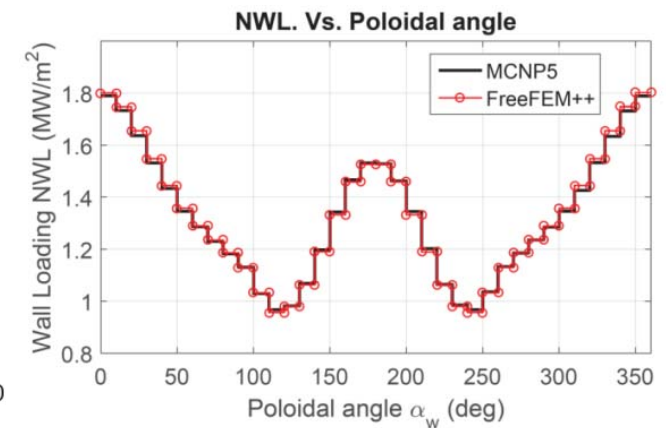
Plasmaphysik & Divertor



Magnetfeldkonfiguration



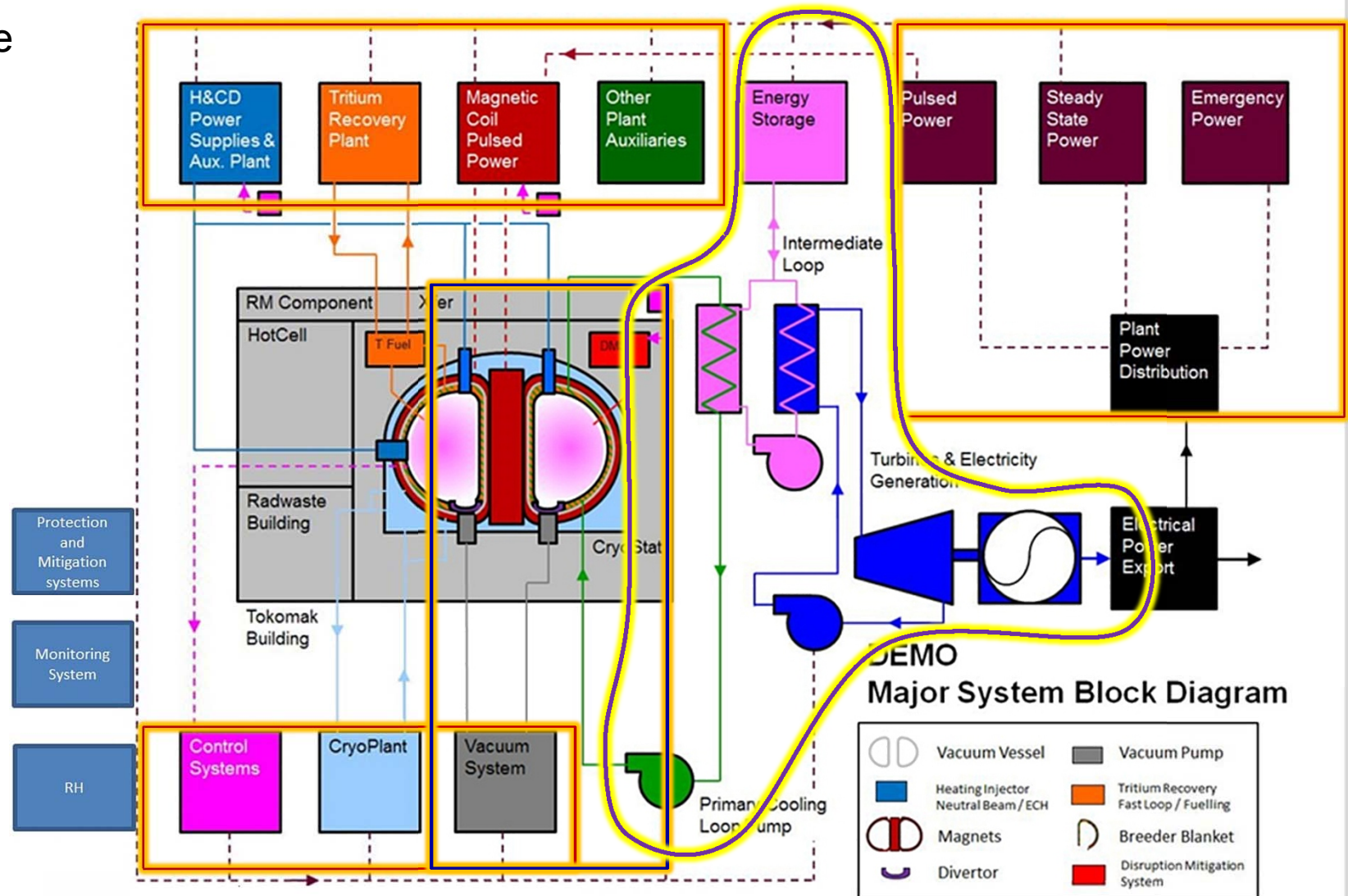
Neutronik



Reaktorsystem mit Hilfsaggregaten

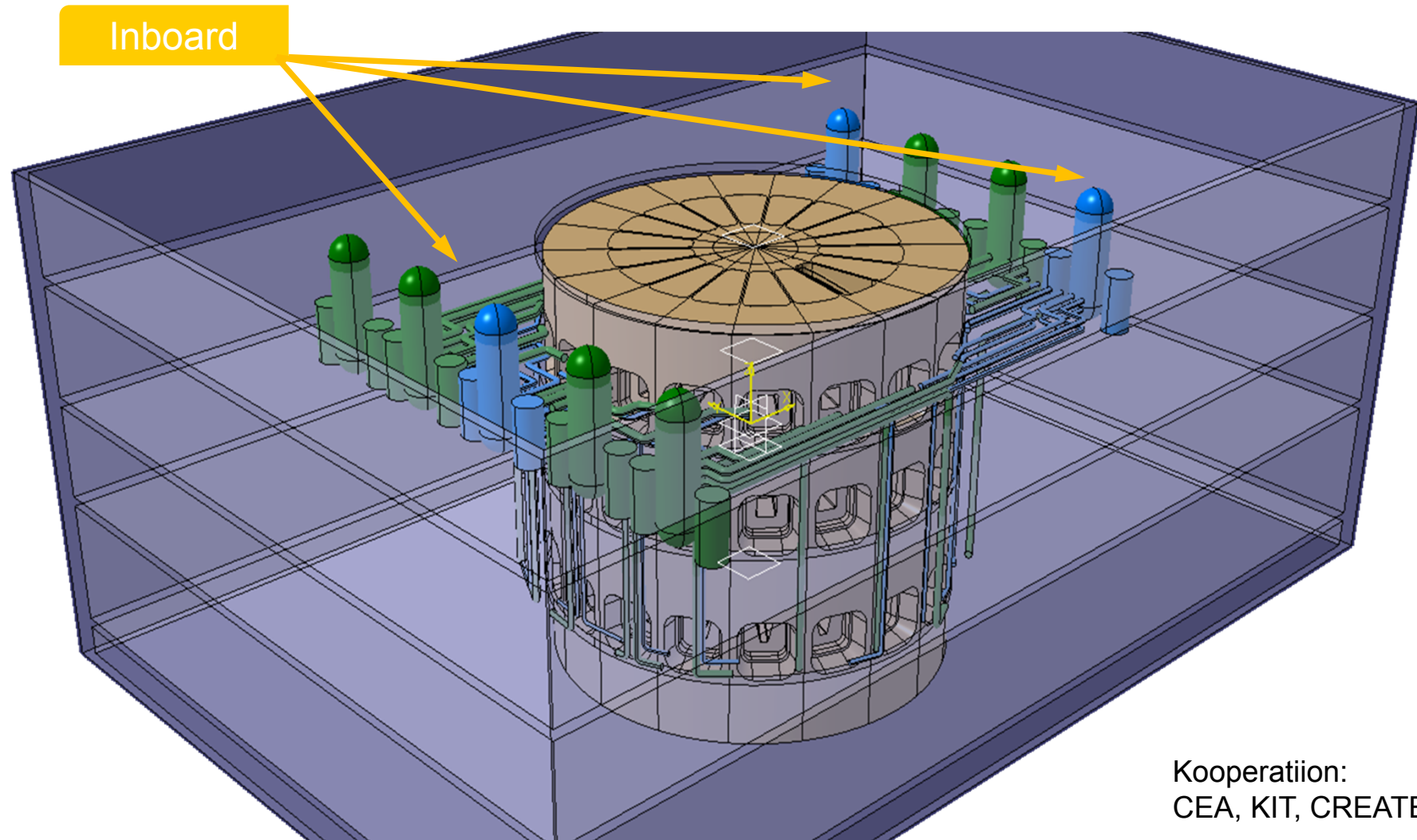
Verknüpfung des Kraftwerks Aggregaten & Leistungserzeugung

- Energie
- Fluid
- Logik



Reaktorsystem mit Hilfsaggregaten

- Arrangement des primären Wärmeabfuhrsystems



Kooperation:
CEA, KIT, CREATE

Reaktorsicherheit

Sicherheitsziele = Vermeidung radiologischer Gefährdung

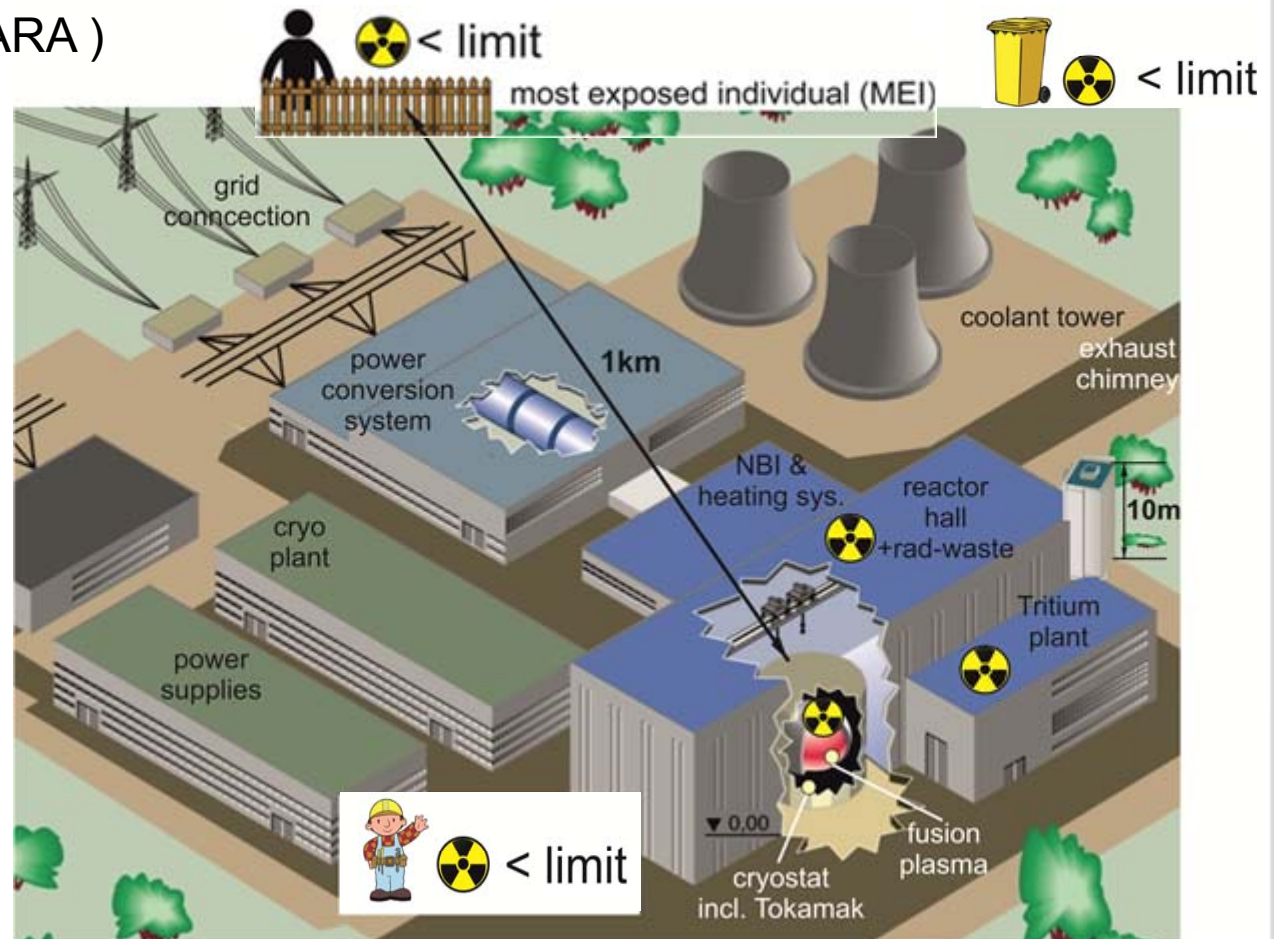
- Öffentlichkeit & Umwelt
- Personal (ALARA-principle)
- Radioaktiver Abfall (ALARA)

Mittel

1. Design & Lizenzierung
2. Integrale Sicherheitsanalyse/ Quellterme/ Modelle/Codes
3. Radioaktives Abfallmanagement

➔ *alle Bestandteile der
KIT Forschung*

Auslegung eines Fusionskraftwerks

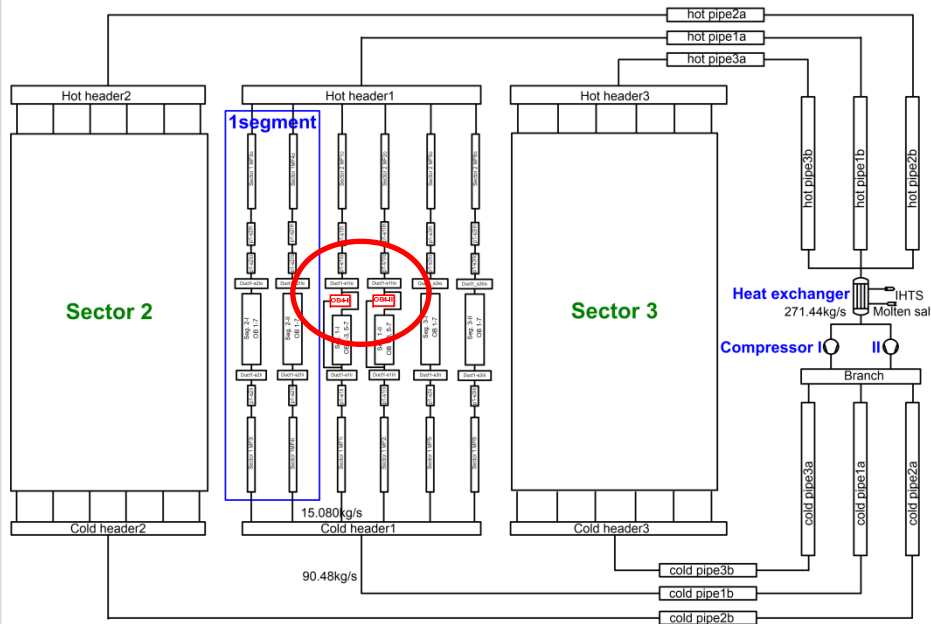
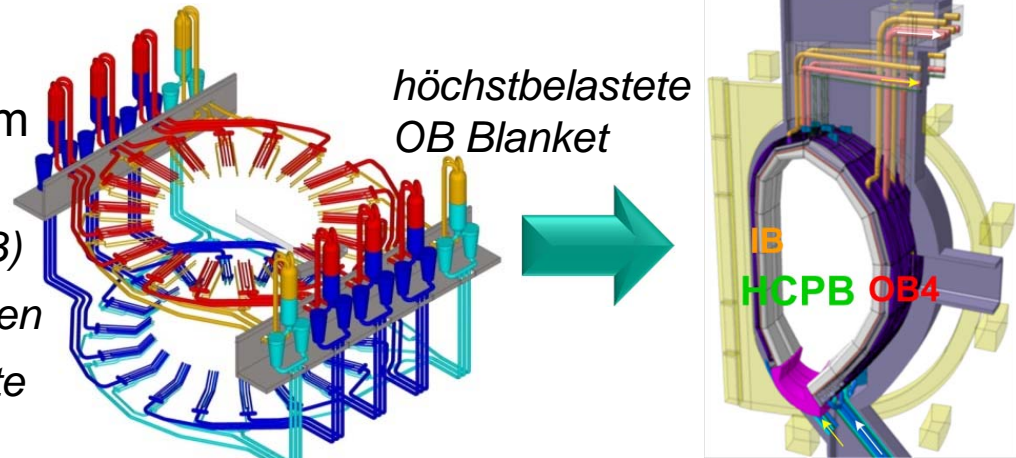


2

Integrale Sicherheitsanalyse

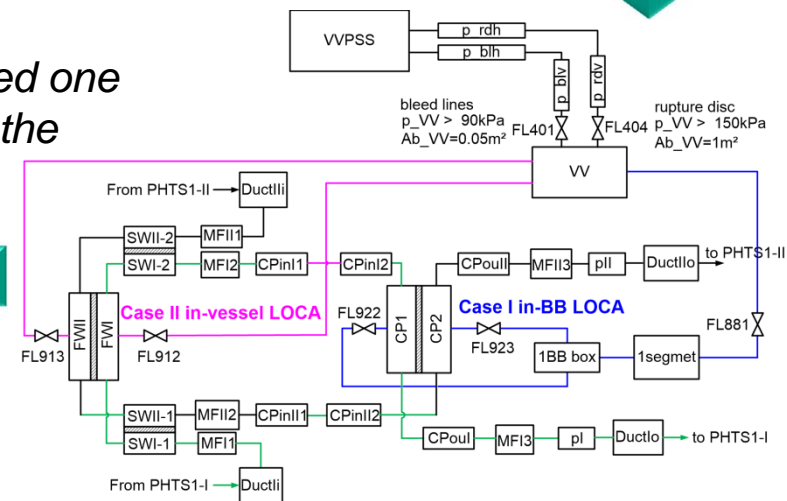
Kühlmittelverluststörfall (LOCA) in einer Kühlplatte einer Bruteinheit/1. Wand

- Analyse eines Teilsystems
- HCPB in 18 Sektoren – Primärkühlsystem (PHTS) Design:
 - 6 loops outboard (OB), 3 loops inboard (IB)
 - 1 OB-loop 3 Sektoren / 1 IB-loop 6 Sektoren
 - 1 Sektor: 3 OB Segments & 2 IB Segmente



vereinfachtes Blanketmodell (OB4)

simplified one loop of the PHTS



2 Integrale Sicherheitsanalyse

Codeanwendung und Validierung:

Kühlmitteldurchflussstop (LOFA) in der 1. Wand (FW)

Validierungssequenz

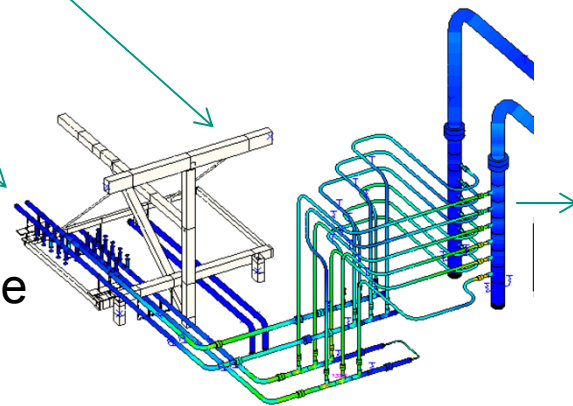
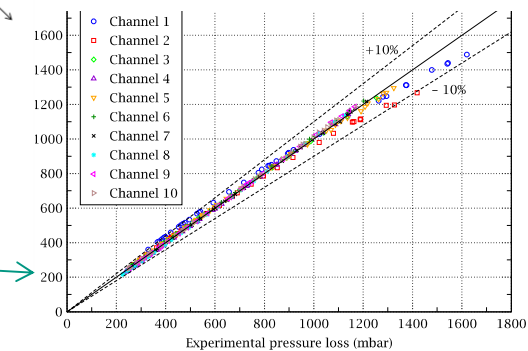
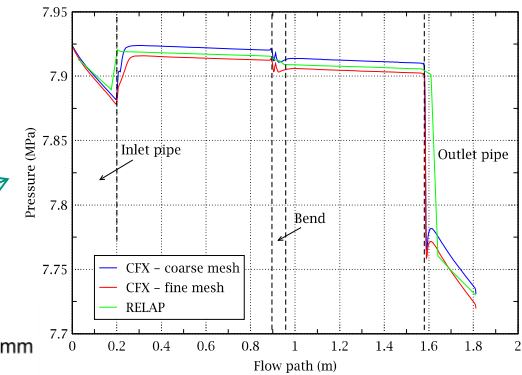
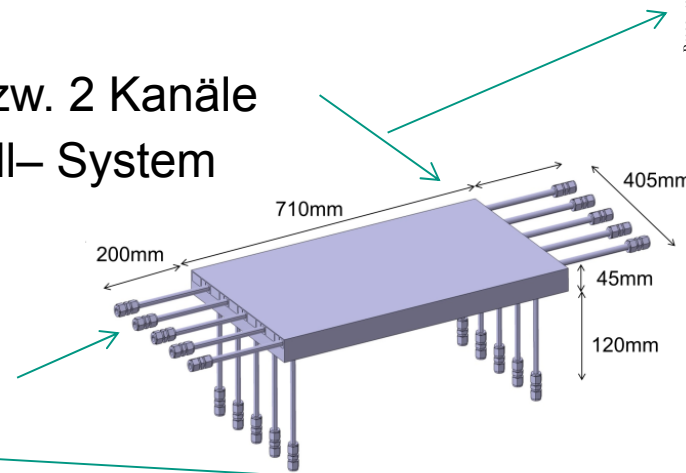
- CFD Modellaufbau für 1 bzw. 2 Kanäle
- Reduktion einfache Modell- System

➔ *Verifikation*

- Experiment
 - Design Teststrecke
 - Isotherme Validierung

- Integration in Heliumkreislauf
- Einzelexperiment

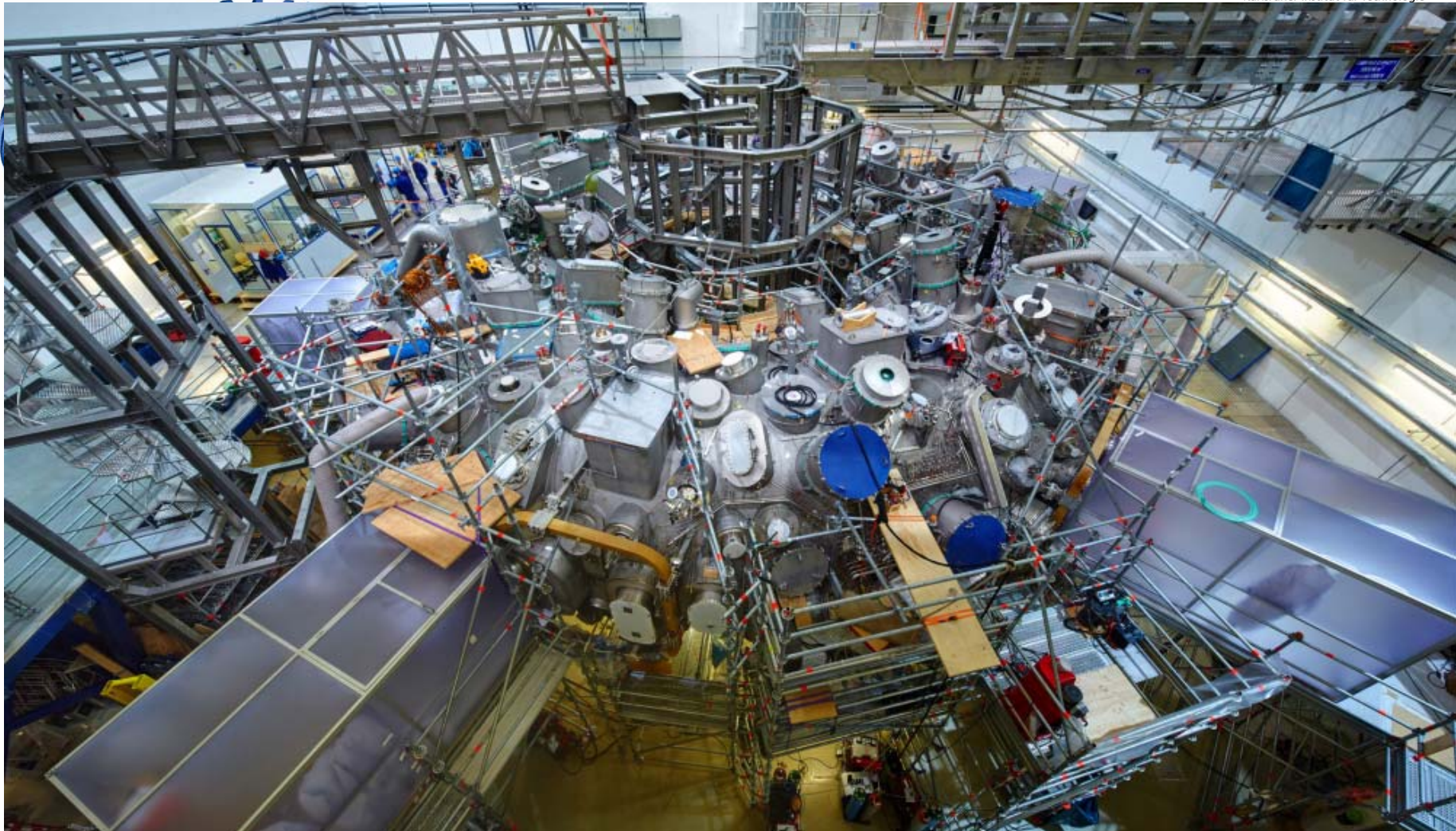
- Systemanalyse
 - volle 3D Sicherheitsanalyse
- ➔ *Validierung*



AKTUELLE PROJEKTE

Stand von Wendelstein und ITER

Wendelstein – Ein Projekt in Deutschland



- im Gegensatz zum Tokamak sind Stellaratoren intrinsisch stationär

Wendelstein

- in 2012/2013 „Innenausbau“ - heute „betriebsbereit“



ITER - Standort 2011



ITER - Standort 2014

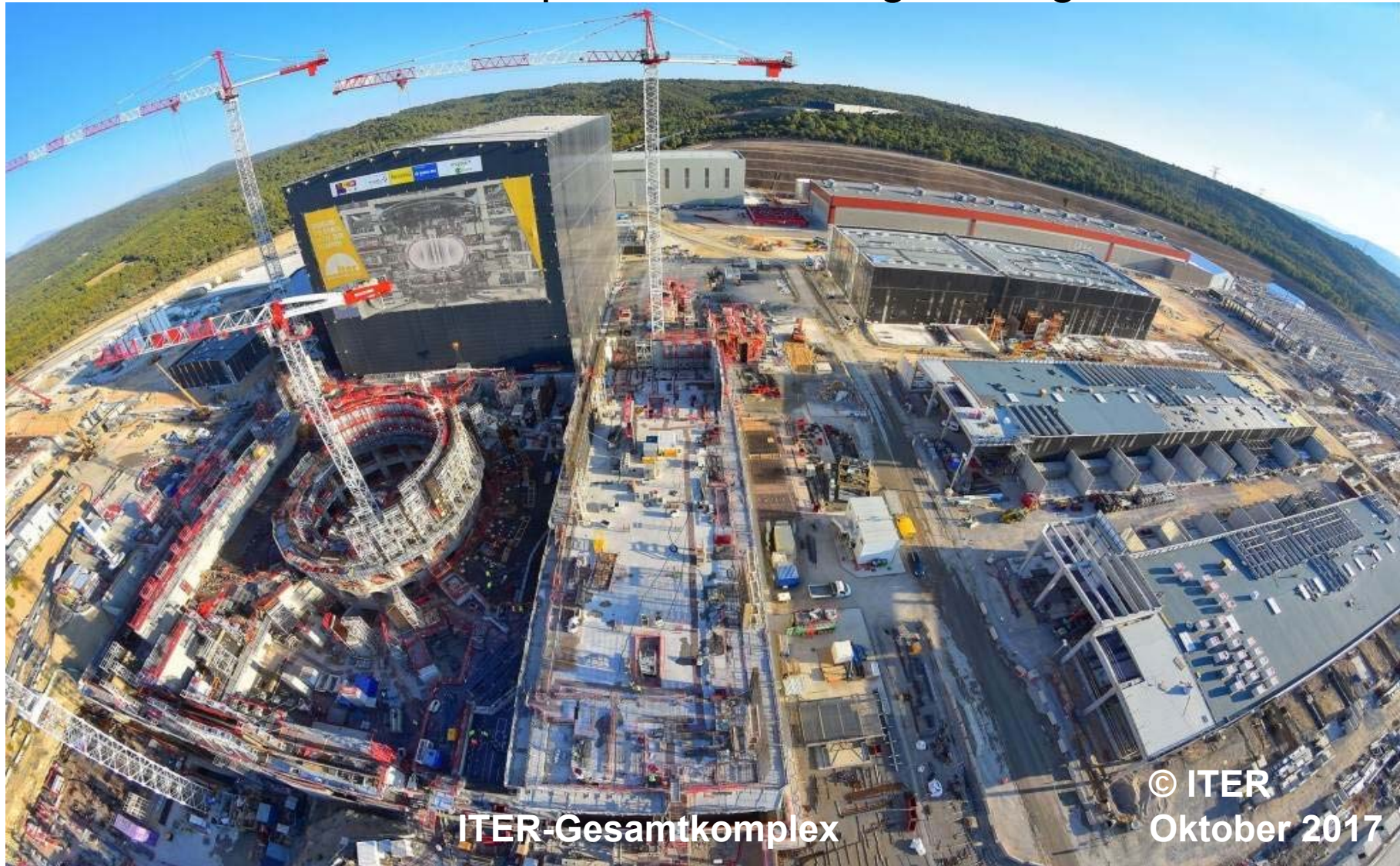


© ITER
29. April 2014
29. April 2014

ITER-Gesamtkomplex
Токамакнае-Гуноуменбау

ITER - Standort 2017

- aktuelle Bilder unter <https://www.iter.org/news/galleries>



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

