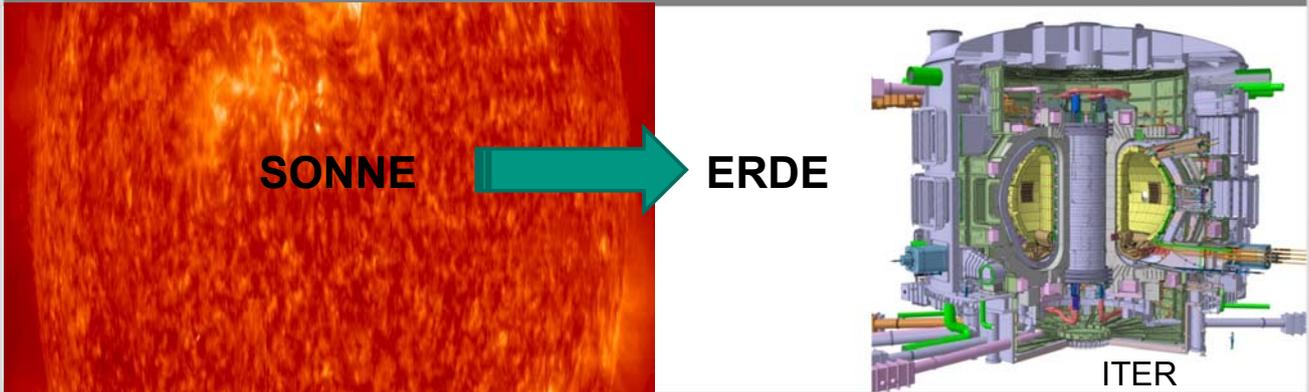


# „Fusionskraftwerke- Funktionsweise- Wege zum Fusionskraftwerk – Technologieentwicklungen

Robert Stieglitz

## Programm Fusion



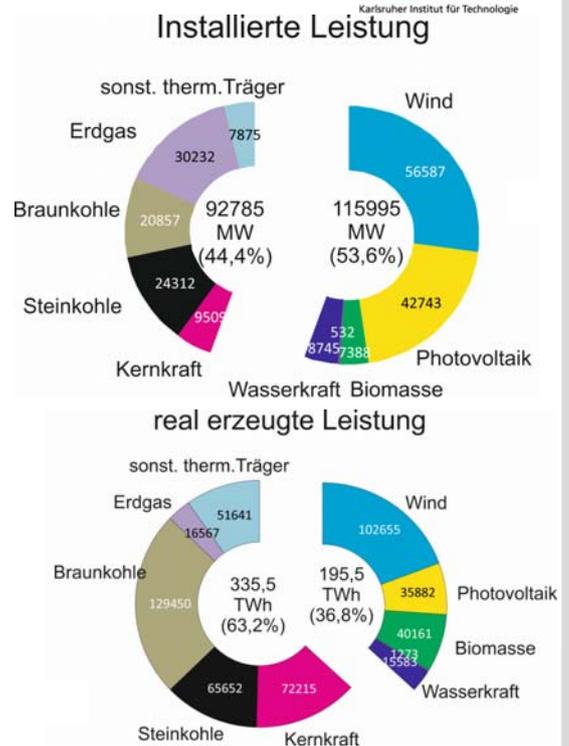
KIT – The research university in the Helmholtz Association

www.kit.edu

## Brauchen wir Fusionsenergie ?

### Some lessons from Germany\*:

- Deutschland subventioniert Wind und Solar mit ~ 25 Milliarden Euro pro Jahr
- Wind- und Solarenergie tragen im Durchschnitt zu ca. 35-40% zur Stromerzeugung bei
- An einem windigen Tag werden die Strompreise negativ, da Deutschland mehr produziert, als es benötigt
- Es gibt die Überzeugung, dass Wind und Sonne den CO<sub>2</sub>-Übergang bis 2050 vollständig bewältigen können



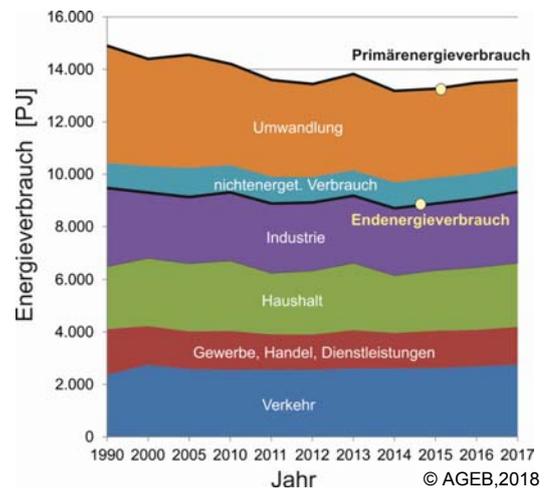
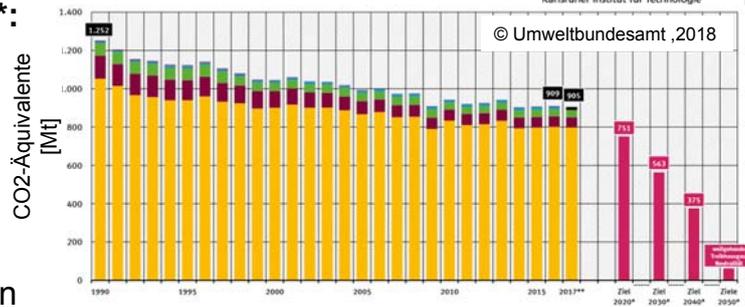
\*A.J.H. Donne, Euratom Meeting, Brussels, 9<sup>th</sup> October 2018

AGEB 2018, <https://ag-energiebilanzen.de/>  
<https://www.smard.de/page/home/marktdaten>  
<https://www.bundesnetzagentur.de/DE/>

# Brauchen wir Fusionsenergie ?

## Einige Lektionen aus Deutschland\*:

- CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Stromerzeugung nicht rückläufig
- Studien zeigen, dass erneuerbare Quellen wie Wind und Sonne selbst bei Speicher- und EU-Supernetzen nicht mehr als 50-60% zum Strombedarf beitragen können<sup>2,3</sup>
- ➔ große Backup-Energiequellen nötig
- ➔ Kernenergie einzige Option fossile Träger zu ersetzen und CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren
- ➔ Fusion eine der nuklearen Optionen, Nutzung sollte mit Nachdruck verfolgt werden



1 [www.cleanenergywire.org/news/german-co2-emissions-rise-2015-despite-renewables-surge](http://www.cleanenergywire.org/news/german-co2-emissions-rise-2015-despite-renewables-surge).  
 2 F. Wagner, *Eigenschaften einer Stromversorgung mit intermittierenden Quellen*, Proc. Deutsche Physikalische Gemeinschaft, Arbeitskreis Energie, Berlin, 138-155 (2015).  
 3 H.W. Sinn, Buffering volatility: a study on the limits of Germany's energy revolution, <http://www.nber.org/papers/w22467>

\*A.J.H. Donne, Euratom Meeting, Brussels, 9<sup>th</sup> October 2018

# Inhalt

- „Was ist Fusion ?“ –
  - Funktionsprinzip
  - Brennstoff- Energieinhalte
  - Magnetischer Einschluss
- Wege zum Fusionskraftwerk- Europa
  - Strategien und Zeitpläne
  - Eckpunkte und erforderliche Infrastrukturen
- Herausforderungen- Technologiefortschritte am KIT
- Aktuelle Projekte Wendelstein/ITER
- „Ausblick“



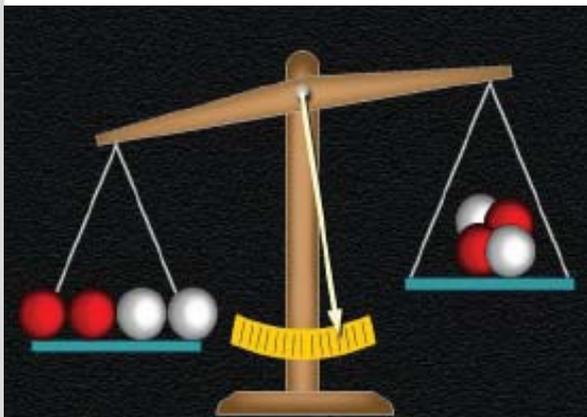
# WAS IST FUSION ?

## 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:

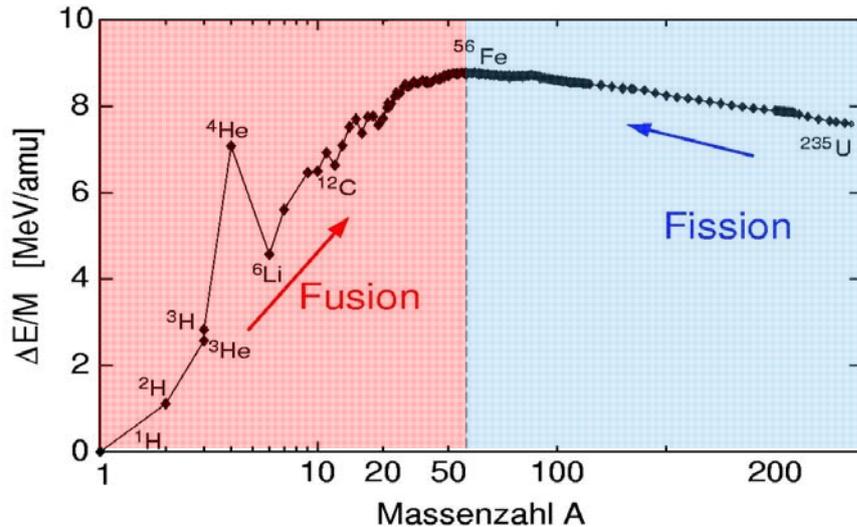
$$E = m c^2 = 10^{-3} \text{kg} \cdot \left( 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{J}$$

Sprengkraft von 10.000t TNT !!

**ENORME ENERGIEINHALTE**

# Welche Fusionsreaktionen sind relevant?

- Welche Elemente können "fusionieren"?



## Welche Energiemenge wird freigesetzt ?

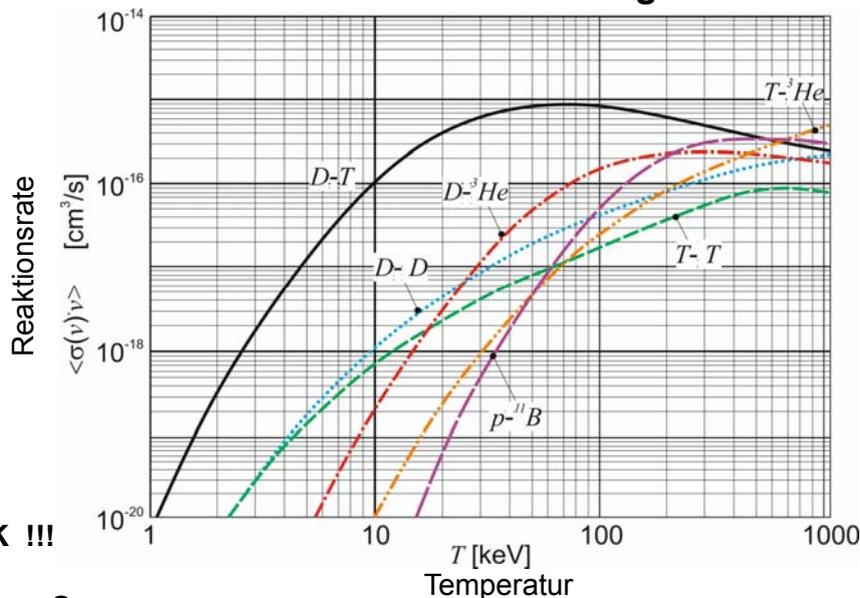
Brennstoffmenge [kg] für gleiche Energieerzeugung  
**1kg**

- 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)

3.600t  
**147.000t**

# Welche Fusionsreaktionen sind relevant?

- Welche Reaktion erfordert die kleinste Zündenergie?



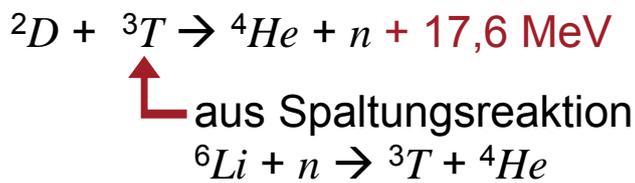
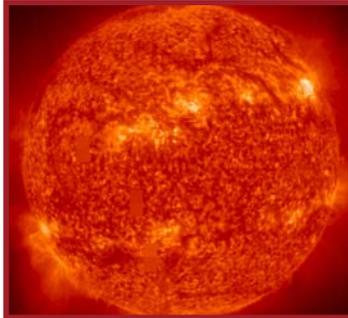
1eV ~11.600°K !!!

## 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 !**

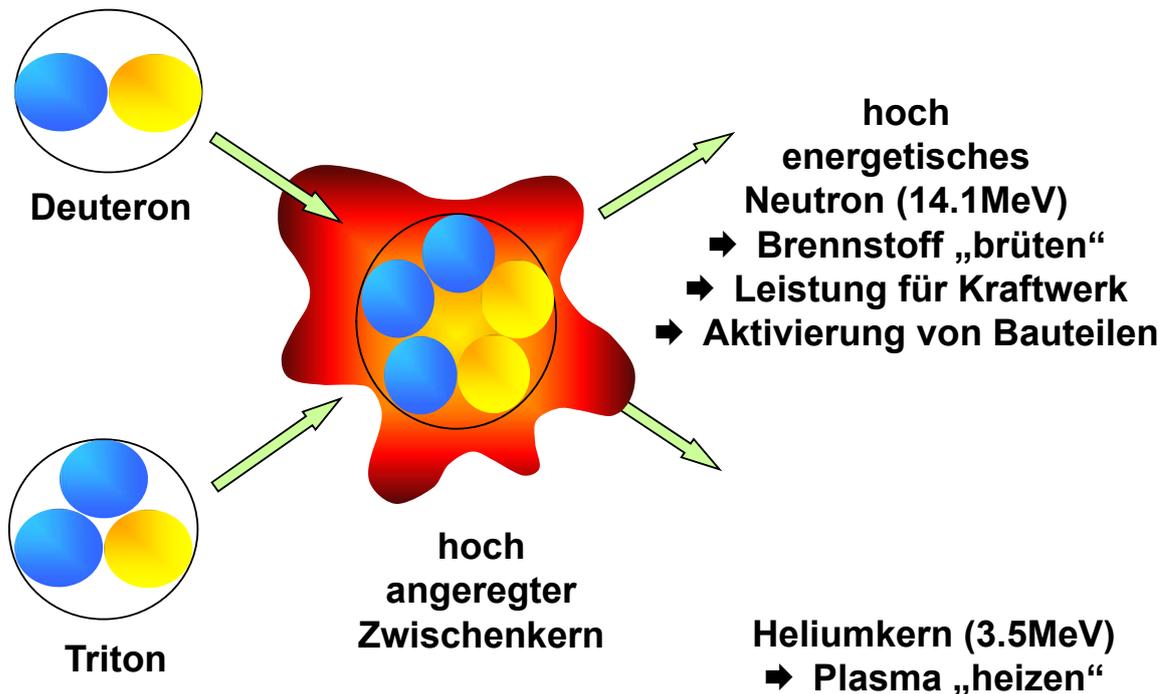
# Was ist Fusion ?

Mögliche Kernreaktionen: SONNE ↔ 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

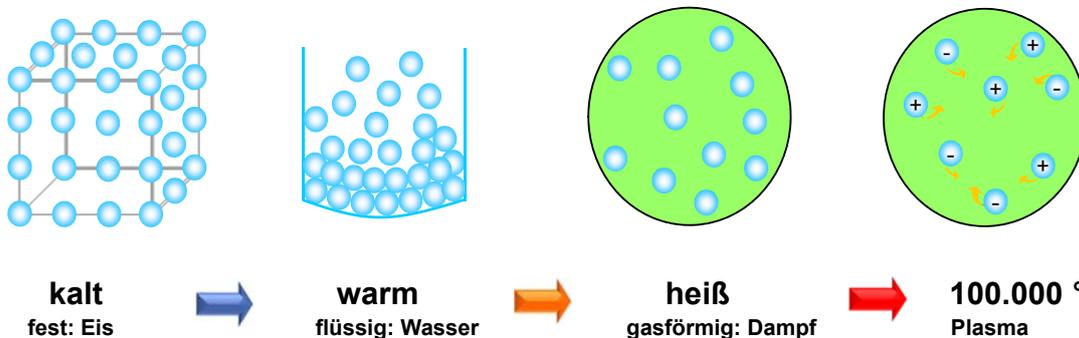
- Für ein Kraftwerk ( $1000\text{MW}_e = 2.700\text{MW}_{th}$ ) benötigt man:

- 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"



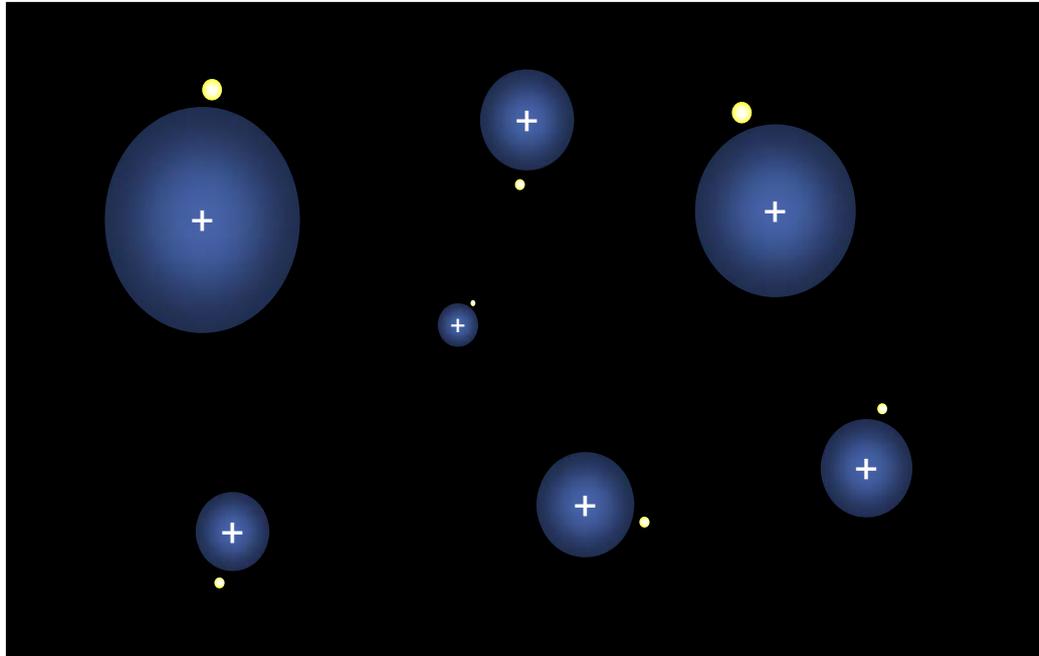
## Was passiert im Plasma ?

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

# Was ist Fusion ?

Was ist ein Plasma ?

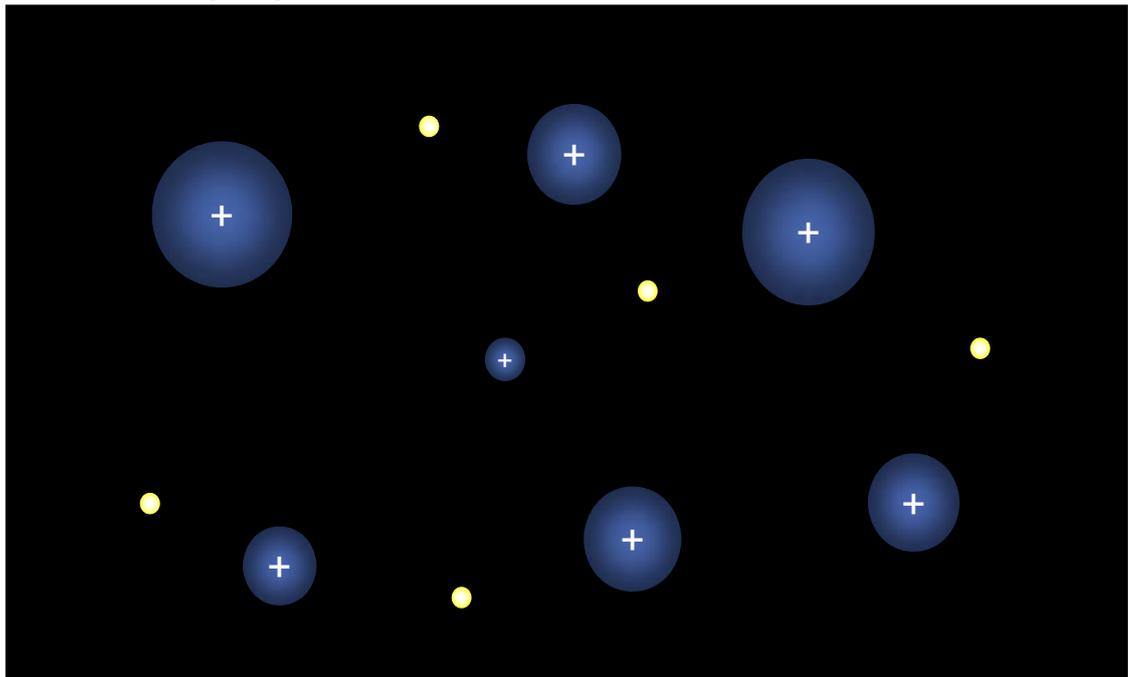
Beispiel: Atombewegung des Wasserstoffs bei  $T < 10^5 \text{°C}$  → KEIN PLASMA



# Was ist Fusion ?

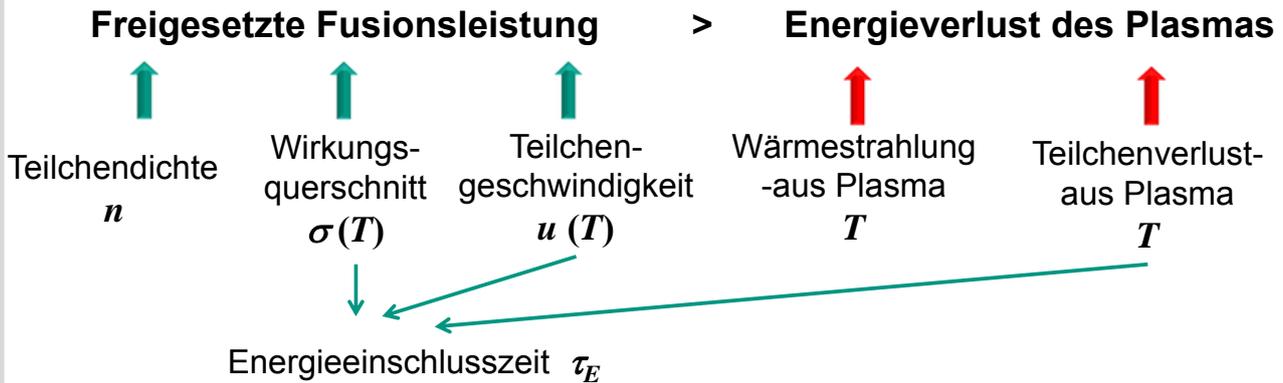
Was ist ein Plasma ?

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



# Was ist Fusion ?

## Wie zünde ich ein Plasma ? - Zündbedingung



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

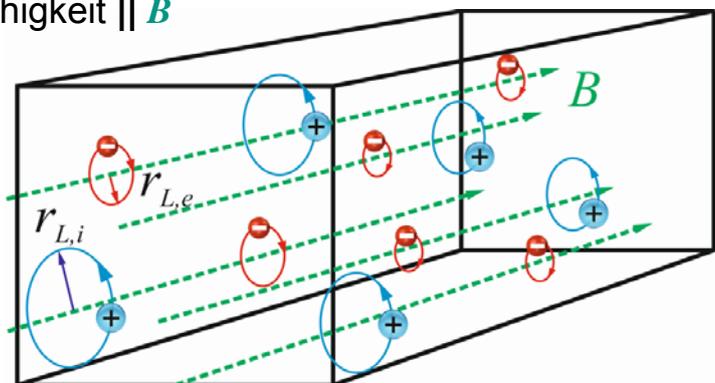
- $n$ : Teilchendichte (Teilchen /  $\text{m}^3$ )
- $T$ : Temperatur (10-20keV= 100 – 200 Mio K)
- $n \cdot T$ : Plasmadruck (ca. **4.8bar · s**)
- $\tau_E$ : Einschlusszeit (bei ITER ca. 3.7s)

# Was ist Fusion ?

Elektr. geladene Teilchen lassen sich in Magnetfeldern  $B$  einschließen

## Was bewirkt der Magnetfeldeinschluss ?

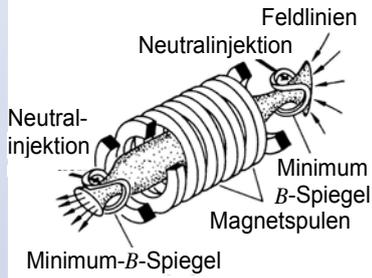
- Elektronen, Ionen fliegen entlang Magnetfeldlinie  $B$
- ➔ unendliche therm.& elektr. Leitfähigkeit  $\parallel B$
- Elektronen & Ionen rotieren auf unterschiedl. Kreisbahnen
- ➔ Heizung mit der Eigenfrequenz möglich (ICRH, ECRH, LHH)
- ➔ aber unterschiedliches Stoßverhalten der Teilchen  $\perp B$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



# Was ist Fusion ?

## Wie schlieÙe ich magnetisch ein Plasma ein ?

### ■ Magnet. Spiegel

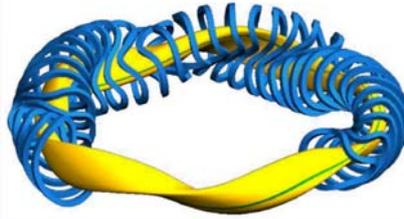


- einfacher Aufbau
- hohe Endverluste
- komplexe Plasmasteuerung



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

### ■ Stellerator

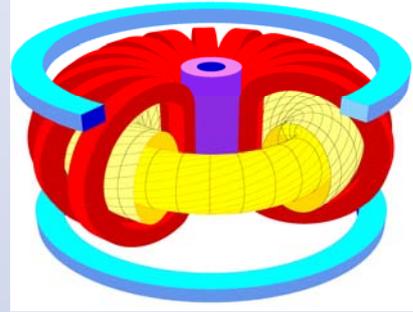


- kein Plasmastrom
- ➔ stabiles Plasma
- stationärer Betrieb
- komplexer Aufbau Spulen



**Wendelstein in Betrieb** (weniger Erfahrung)

### ■ Tokamak



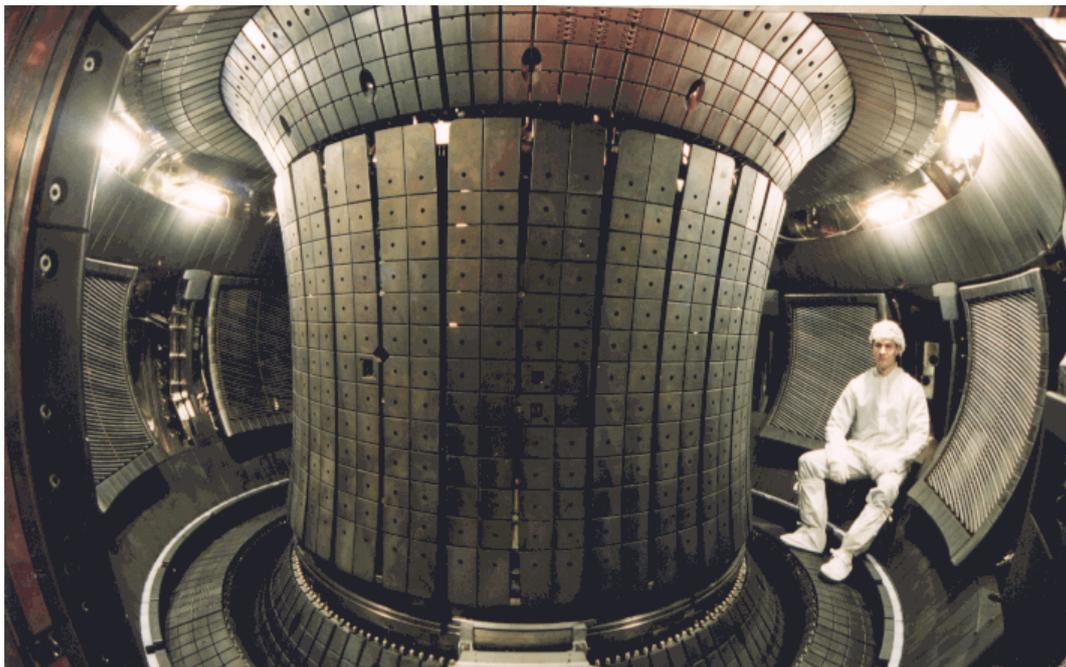
- einfacher Aufbau und Betrieb
- Plasmastromstriebe
- ➔ instationäre Maschine



**Grundlage ITER und DEMO**

# Plasmaphysik- magnet. Einschluss

## ■ Plasmakammer



# Plasmaphysik- magnet. Einschluss

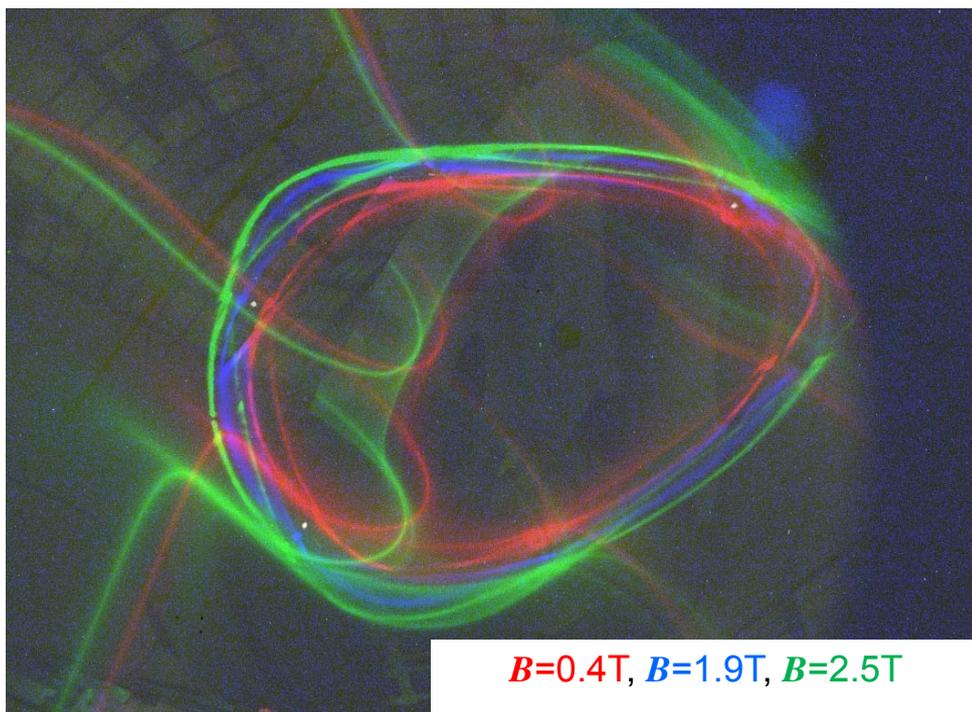
- Wie sieht ein Plasma aus ?



© Zohm,IPP

# Plasmaphysik- magnet. Einschluss

- Wie muss man sich das vorstellen?



# Fusion – Zusammenfassung der Physik

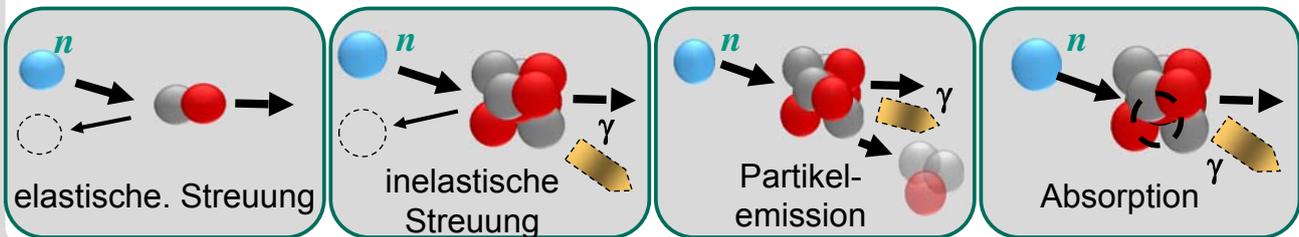


↑ Plasma heizen 3.5MeV     
 ↑ Brennstoff erzeugen Wärme erzeugen 14.1MeV     
 =     Massendefekt 17.6MeV

- 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  $\tau_E = 3s$  (Maß für die Wärmeisolation)
- ➔ thermodyn. Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  (Effizienz Umwandlung Wärme  $\rightarrow$  Strom)

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

$$B \sim 5T$$

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

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

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

$$\tau_E \geq 3s$$

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

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

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

erreicht

$\beta = 3-4\%$  ✓

$n > 10^{20} \text{ m}^{-3}$  ✓

$T > 10 \text{ keV}$  ✓

$\tau_E \sim 1 \text{ sec}$  ☹️

**ITER**

**DEMO**

(Fusionskraftwerk)

**DEMO**

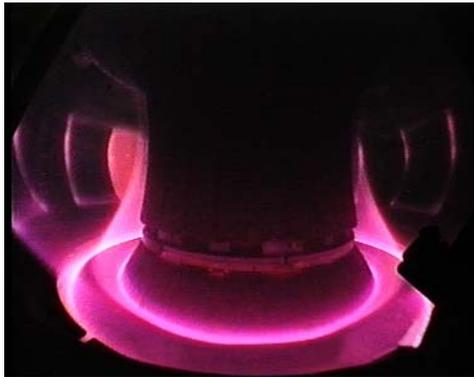
# Fusion – Größenordnungsvergleich

Deuterium-Tritium Plasma

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

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

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



Wasser

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

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

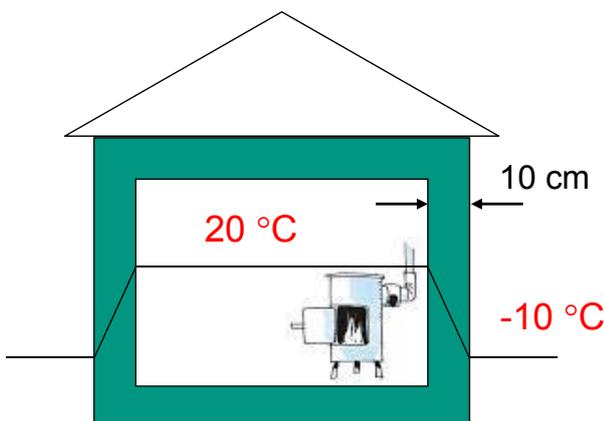
$$p = 1 \text{ bar}$$



# Fusion – Größenordnungsvergleich

- Isolationsgüte

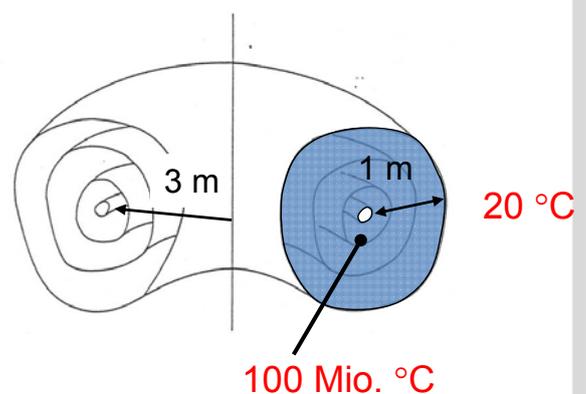
Haus



10 cm Styropor  
400 m<sup>2</sup> Oberfläche

$$\Rightarrow 5 \text{ kW}$$

Plasma



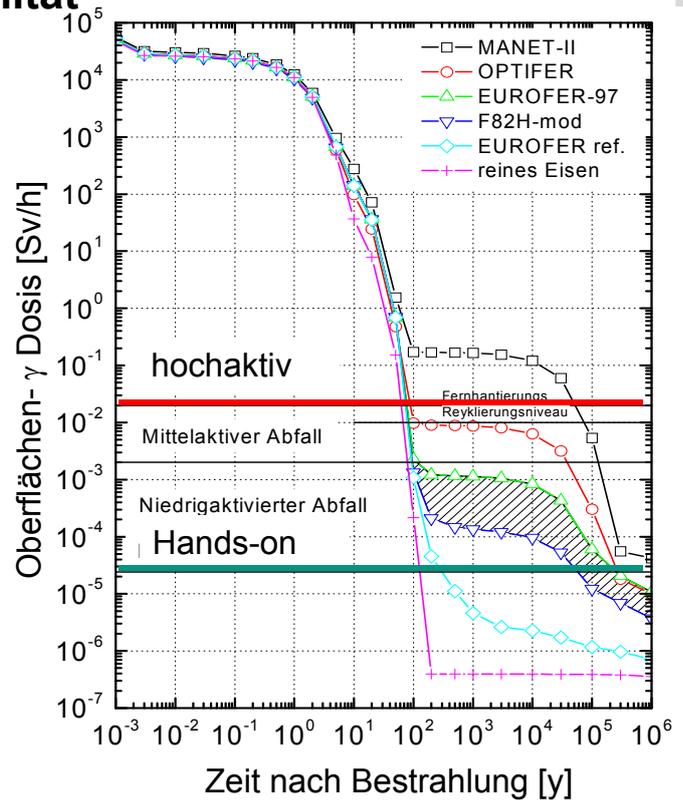
1 m Magnetfeldkammer  
120 m<sup>2</sup> Oberfläche (JET torus)

$$\Rightarrow 20 \text{ MW}$$

# 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
  - Nachwärmeerzeugung
  - 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 ( $Q = 10$ )

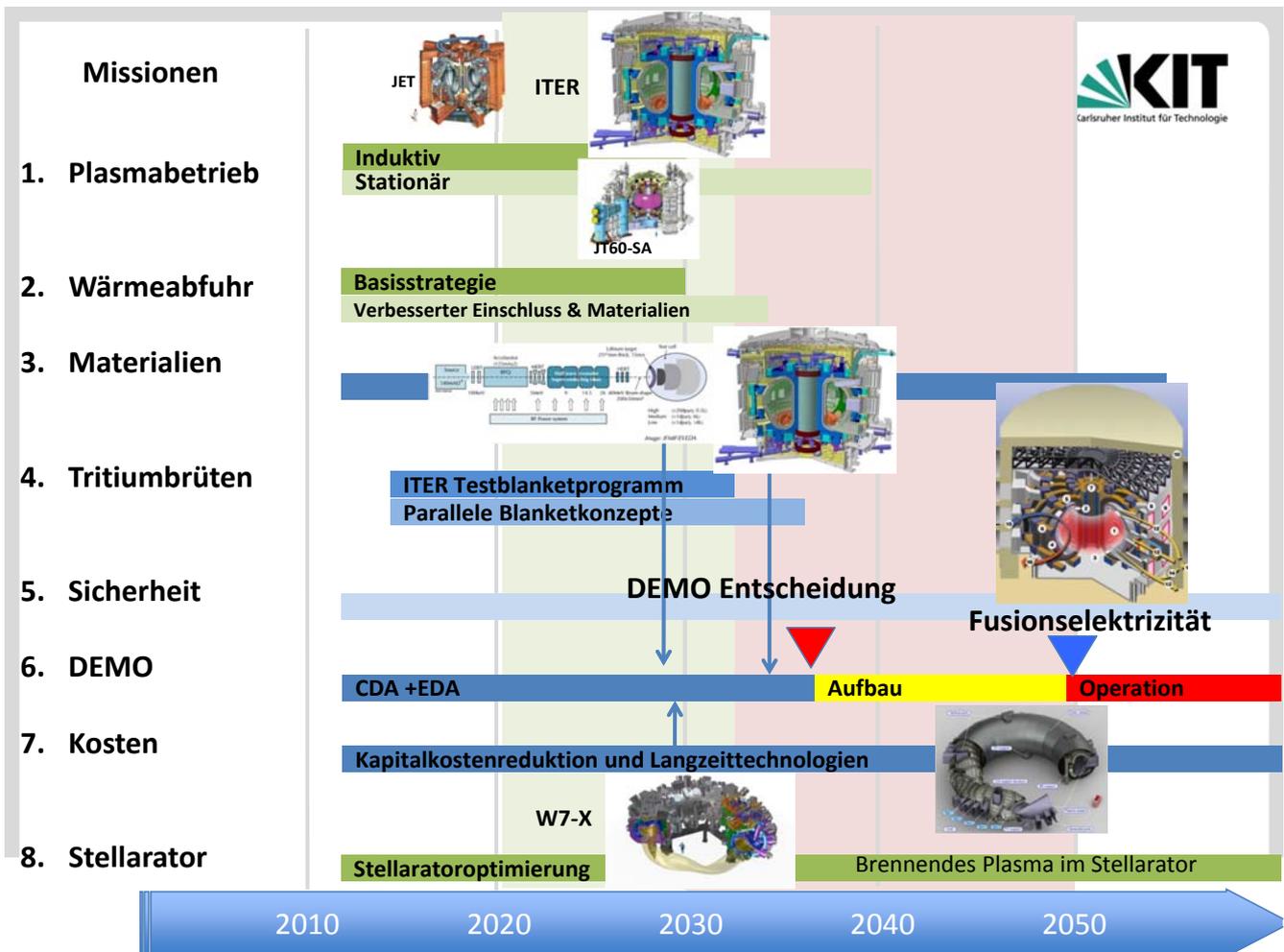
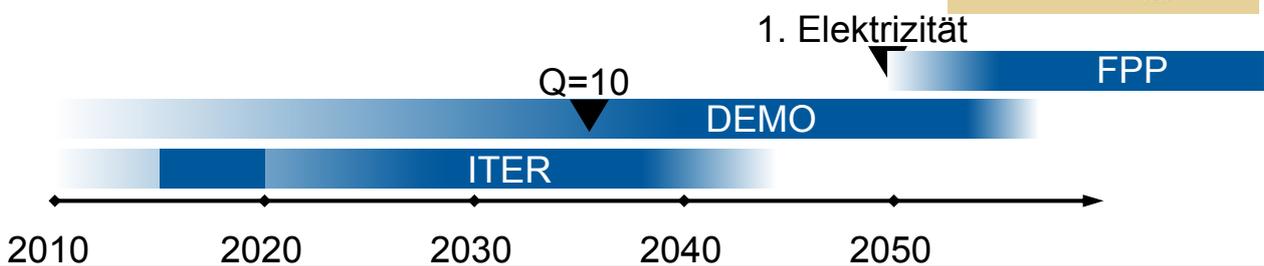
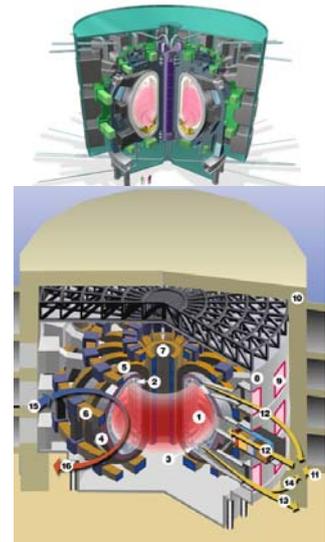
- Essentielle Physik & Technologieträger für DEMO

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

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

## FPP: Kommerzielles Fusionskraftwerk

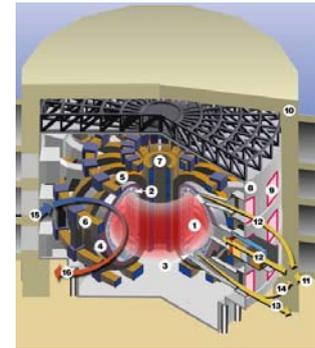
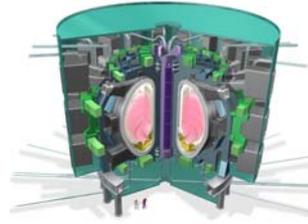
- Stellarator oder Tokamak



# EU "Fahrplan" – zentrale Aspekte

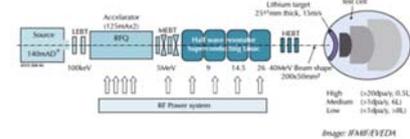
## ITER

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



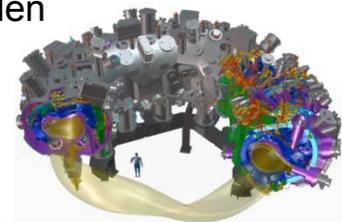
## DEMO

- 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

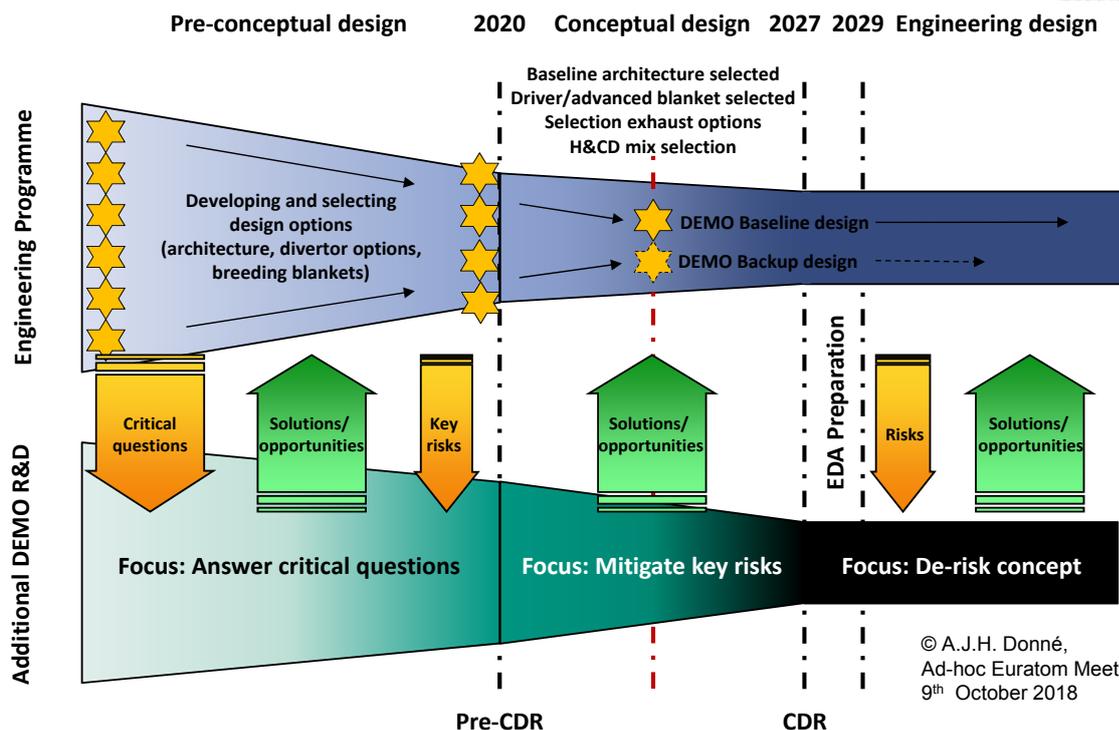


## Stellarator

- inhärent stationär
- gutmütige Betriebsbedingungen



# EU "Fahrplan" – Organisation



➔ Kraftwerksplanung muss heute beginnen, um ITER Resultate maximal zu nutzen

# 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:

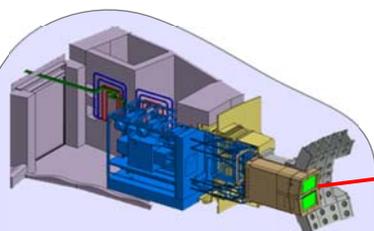
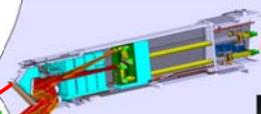
- Technologieentwicklung zur Realisierung der Fusion als Energiequelle
- Arbeitsgebiete am KIT
  - Ingenieurtechnik - „Fusion Engineering“- vom Kern zum Kraftwerk
    - Blankets - Design –Kühlung- Brutmaterialien
    - Divertoren – „Auspuffrohr“ des Reaktors
    - Magnete – vom Draht zum Magneten
  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

## KIT- Beiträge zu ITER

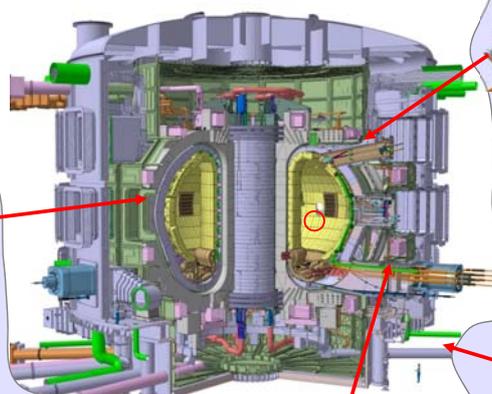
### ■ Sicherheitsforschung



- Plasmaheizung & Stromtrieb:
- Gyrotrons
- ECRH Upper Launcher



- Testblanket Modul & Systeme
- Brennstoffkreislauf
- Vakuumsysteme



- Magnetentwicklung vom Kabel bis zum Test
- Stromzuführungen



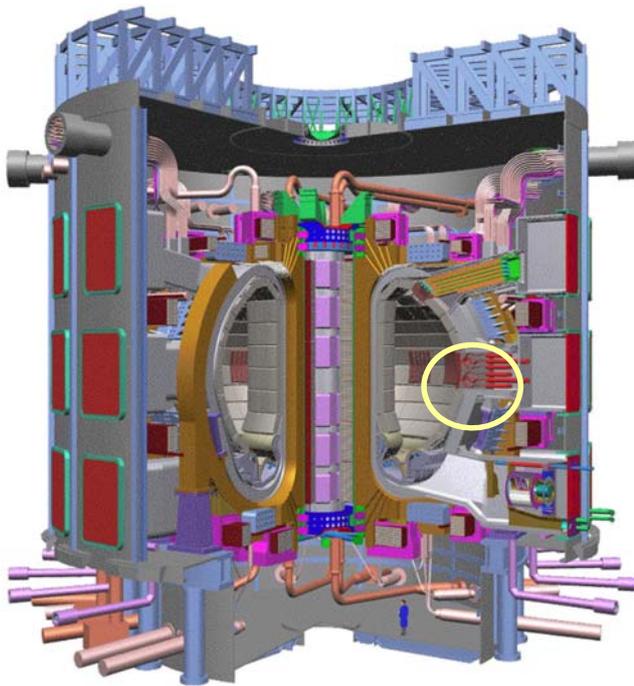
- **Plasma Heizung und Stromtrieb**
  - ECRH Quellen Entwicklung
  - ECRH Transport
- **Fusionsbrennstoffkreislauf**
  - Tritium-Handling-Messung
  - Vakuumsysteme-  
Vakuumpumpen
- **Plasmanaher Komponenten**
  - Brutblanket
  - Divertor
  - Hochtemperatur -  
Heliumtechnologie
- **Kraftwerksdesign u. -effizienz**
  - Fernhantierte Wartung
  - Port Plug Engineering
  - Kraftwerkssystem &- dynamik
- **Fusionsmagnete & Magnetkomponenten**
  - HT<sub>c</sub> Stromzuführungen
  - Supraleitende Drähte &Kabel
  - HT<sub>c</sub> Fusionsmagnete
  - Magnetsicherheit

## Fusionsmaterialien

### 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<sub>c</sub> -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

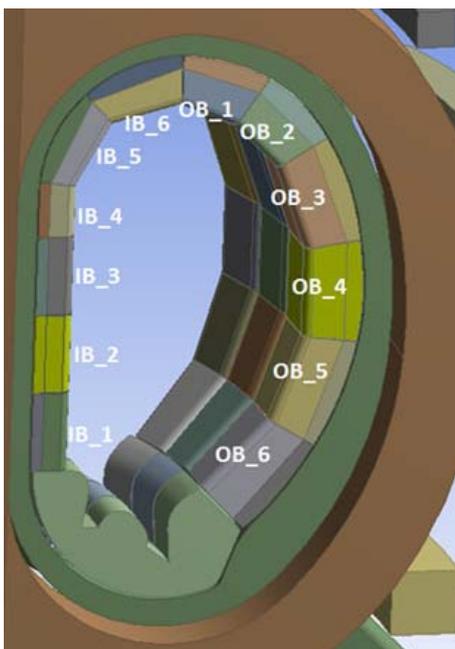


ITER: Tritium-Versorgung extern,  
(aber Erprobung von Brutkonzepten für DEMO)

## 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
- .....

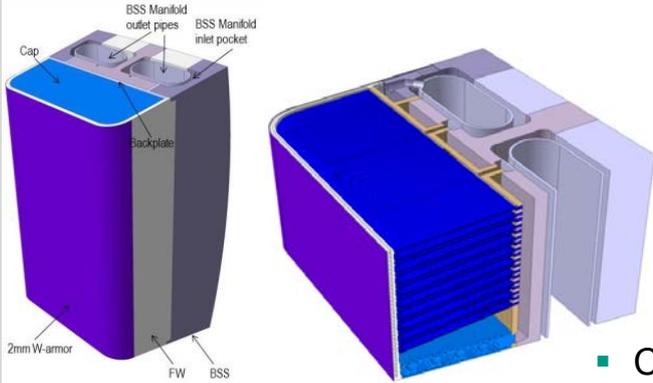
## Randbedingungen

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

## Konzepte ➔ modularer Aufbau

- Festes Brutmaterial /Heliumkühlung
- Flüssiges Brut-/Kühlmaterial

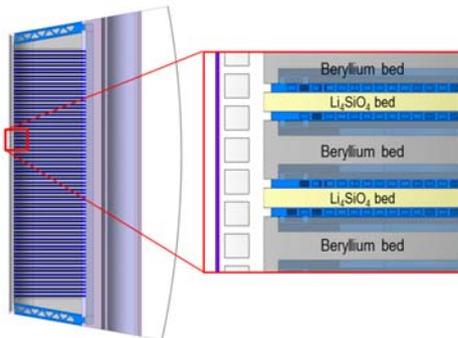
# Blankets – das “Herz” des Reaktors



Beispiel : Helium gekühltes Schüttbett -Blanket

## Blanketauslegung (Design) und Analyse:

CAD Auslegung



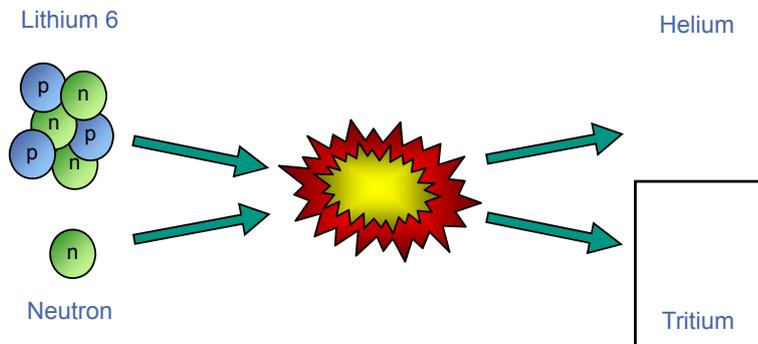
Berechnete therm. und mech. Spannungen

- 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).

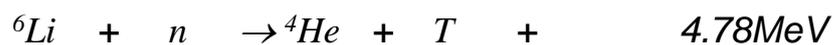
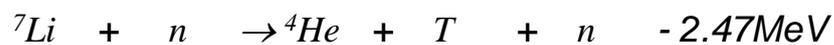
# Blanket-das “Herz” des Reaktors

## Blanketauslegung -“Brutfunktion“

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



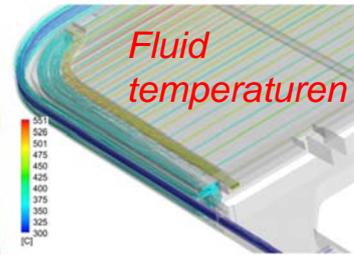
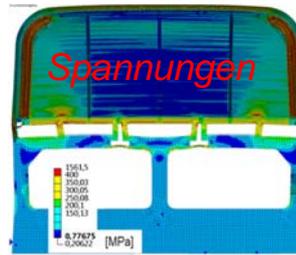
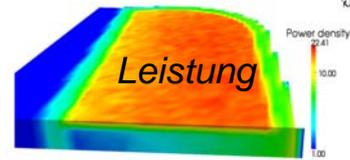
### ▪Potentielle Brutreaktionen



# Blanket- das "Herz" des Reaktors -Aufbau

## Auslegungs-Analyse

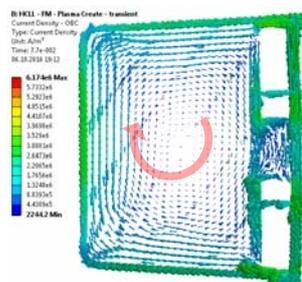
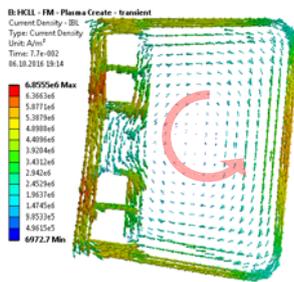
- neutronische, thermo-hydraulische und strukturmechanische Belastung.
- Beurteilung anhand Auslegungswerkzeugen (RCC-MRx, SDC-IC).



Nukleare Leistung, Temp. und Spannungsverteilung im HCPB

Inboard

Outboard



Wirbelstromverteilung bei einer Plasmadisruption

## EM Analyse des Blankets:

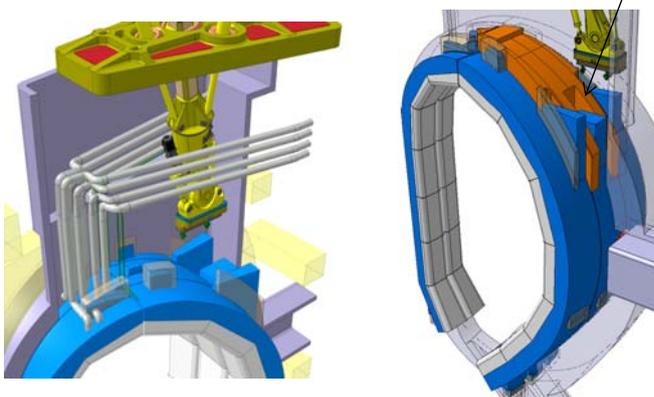
- Disruption
- Vertikale Plasmaauslenkung (VDE)
- Elektromagn. Kräfteverteilung (Ferromagnet. Materialien)

Beispiel : Helium gekühltes Schüttbett -Blanket

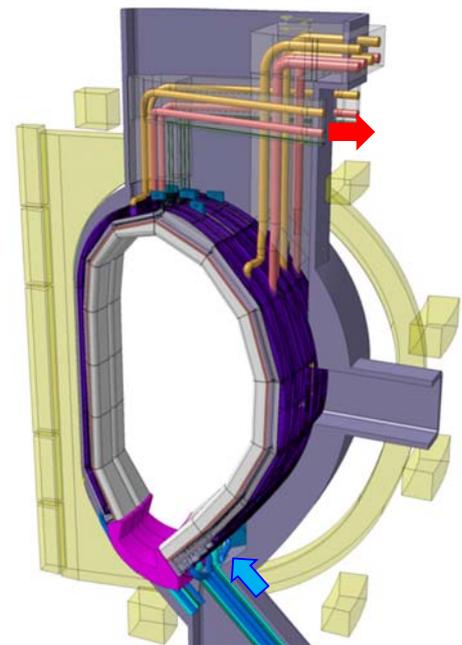
# Blanket- das "Herz" des Reaktors - Reaktorintegration

## Einbau in DEMO Reaktor

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



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

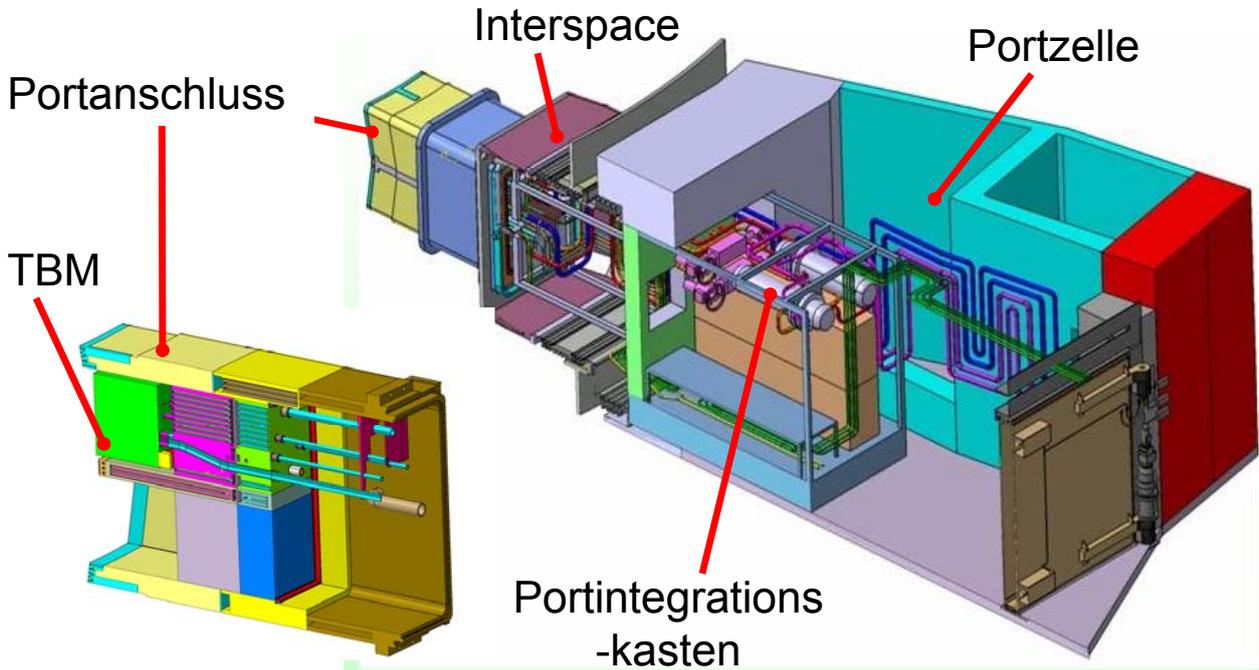


Blanket Rohrleitungslayout

# Blanket- das "Herz" des Reaktors

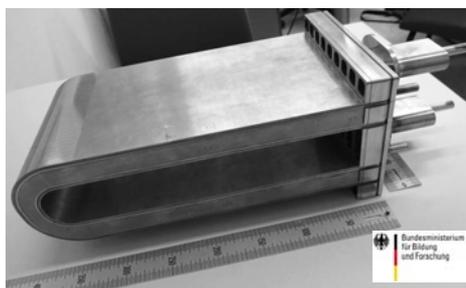
## Funktionsnachweis in ITER

- HCPB-Testblanket-Modul-System-ITER



# Blanket- das "Herz" des Reaktors- Herstellung

- **Biegen** massive Strukturen (2500x60x30) bis zu dünnen Kühlplatten (80x20x5). (Dimensionen alle in mm)
- **Drahtrodieren** 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



# Blanket- das "Herz" des Reaktors- Herstellung

## Brutmaterial = keramischer Grundstoff mit Li

- KALOS Prozess (Karlsruhe Lithium Orthosilicate)

## Materialoptimierung

- Advanced material

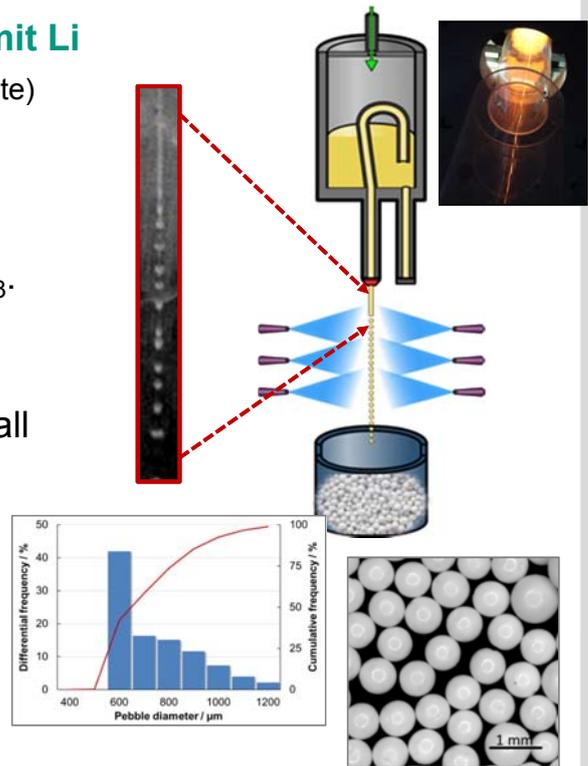


## Prozessentwicklung

- 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:

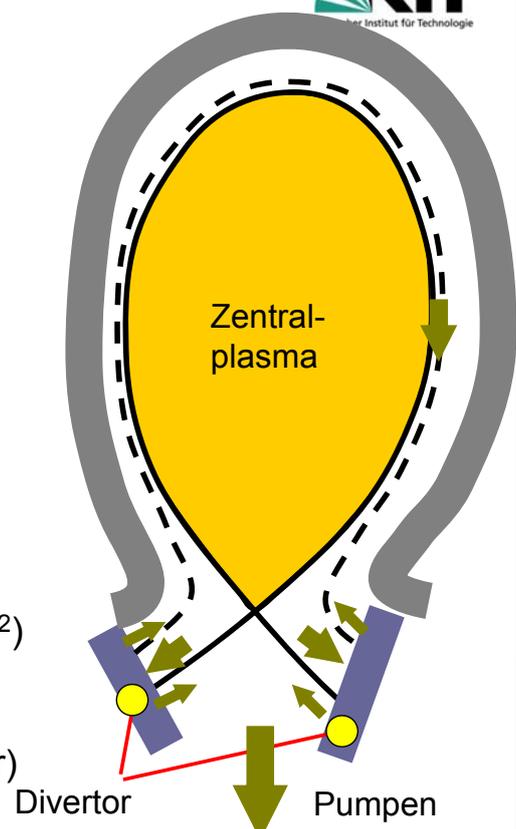
- Abfuhr der Asche (He, Partikel) = „Auspuff“

## 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

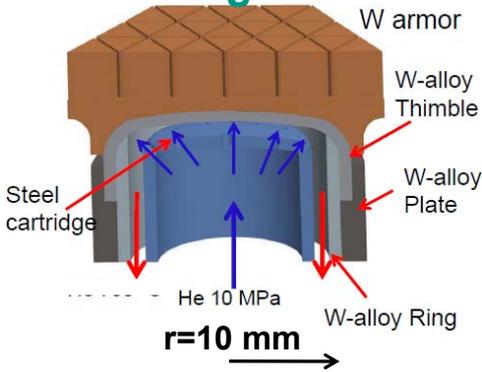
## Techn. Herausforderungen Divertor

- hohe Temperaturen
- hohe Flächenleistungsdichten (10-20MW/m<sup>2</sup>)
- hoher Ionenbeschuss (geladene Partikel → Sputtern der Wand)
- hohe Neutronenschädigung (ca. 15dpa/Jahr)
- starke therm. Wechselbelastung



# Divertor-Entwicklung

## Basisdesign



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

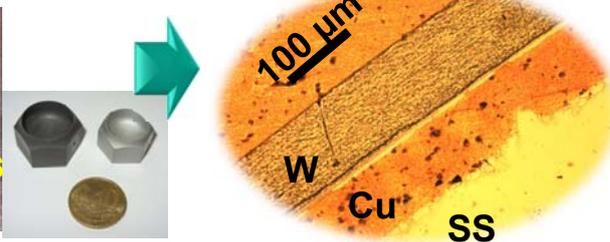


Reaktorskalierung

## Herstellung Einzelteile



## Fügeverfahren



# Plasmaraumkomponenten-Validierung

- alles muss bei prototypischen Parametern validiert werden



- 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

- 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



49

## 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

50

# Mikrowellenheizung: Gyrotronentwicklung

## Elemente



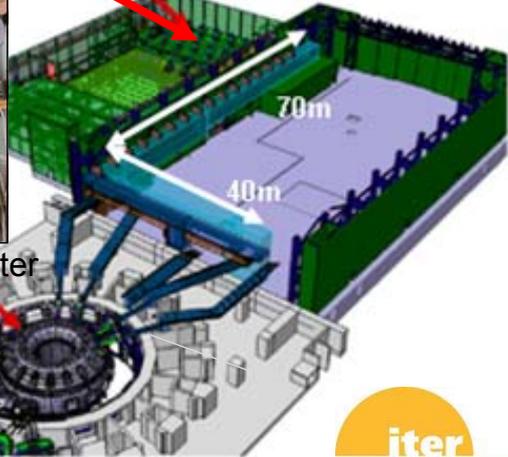
Gyrotron -Fenster



Gyrotron

Vakuumbehälter

Gyrotronhalle

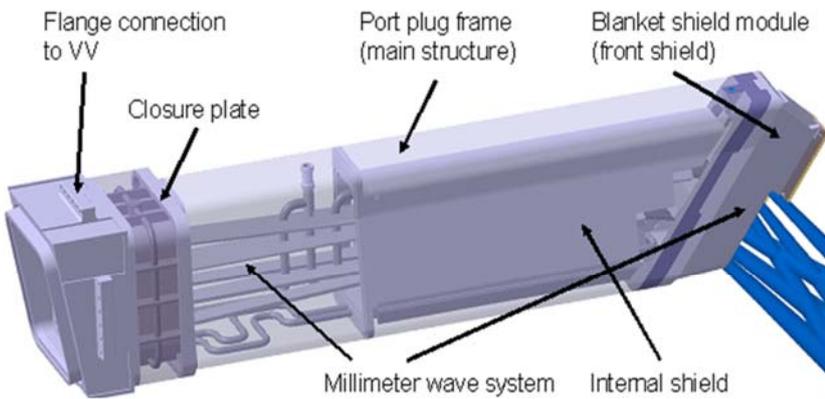


Einkopplung ins Plasma

Torusfenster



# Mikrowellenheizung: ECRH-Launcher



technischer Aufbau des Launchers

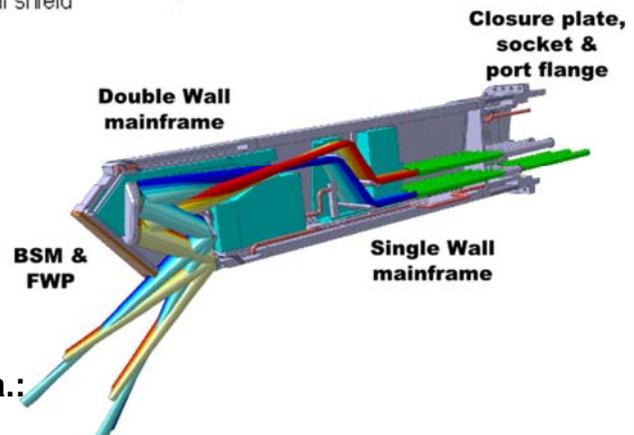
## Funktion:

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

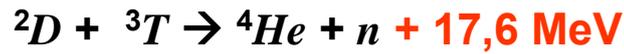
## Ziel

- 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

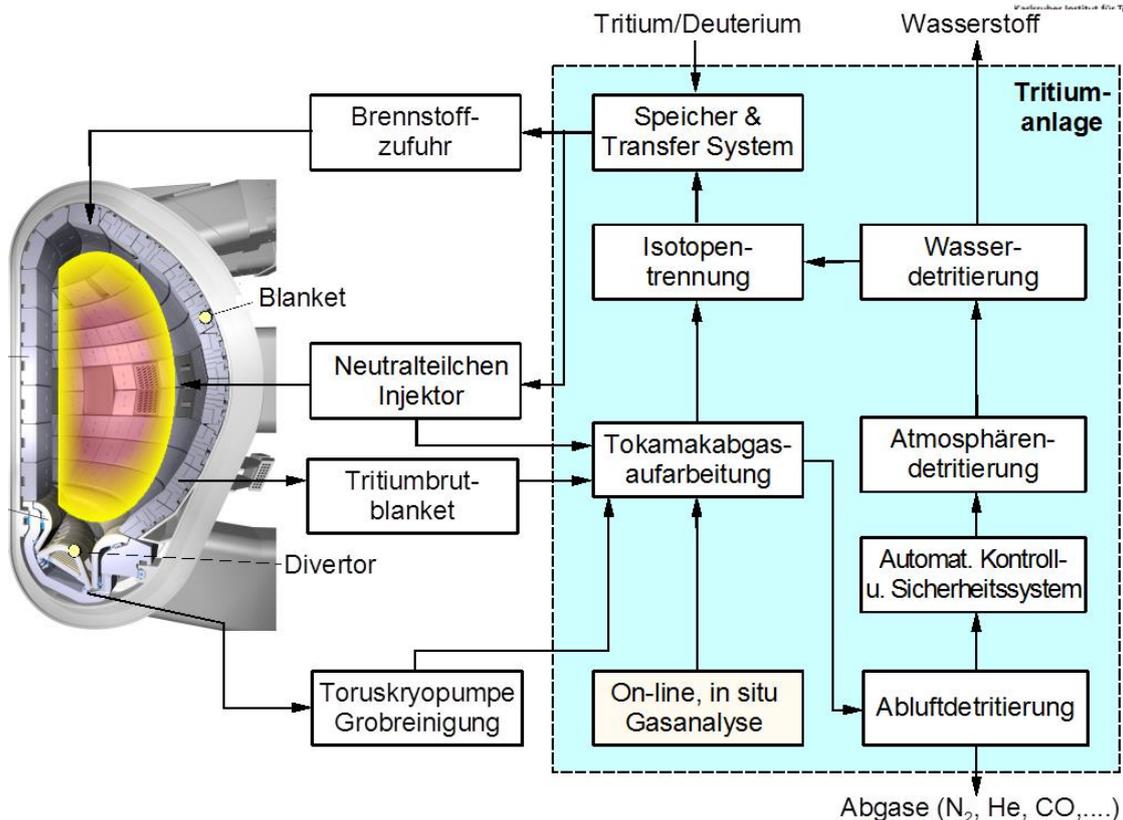
- neutroneninduzierte Aktivierung im Kühlwasser (☹)
- im Brutblanket (☺ , bei ITER: nur Testmodule)
- Transmutation im Strukturwerkstoff (☹)

## Eigenschaften von Tritium:

- weicher  $\beta$ -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")

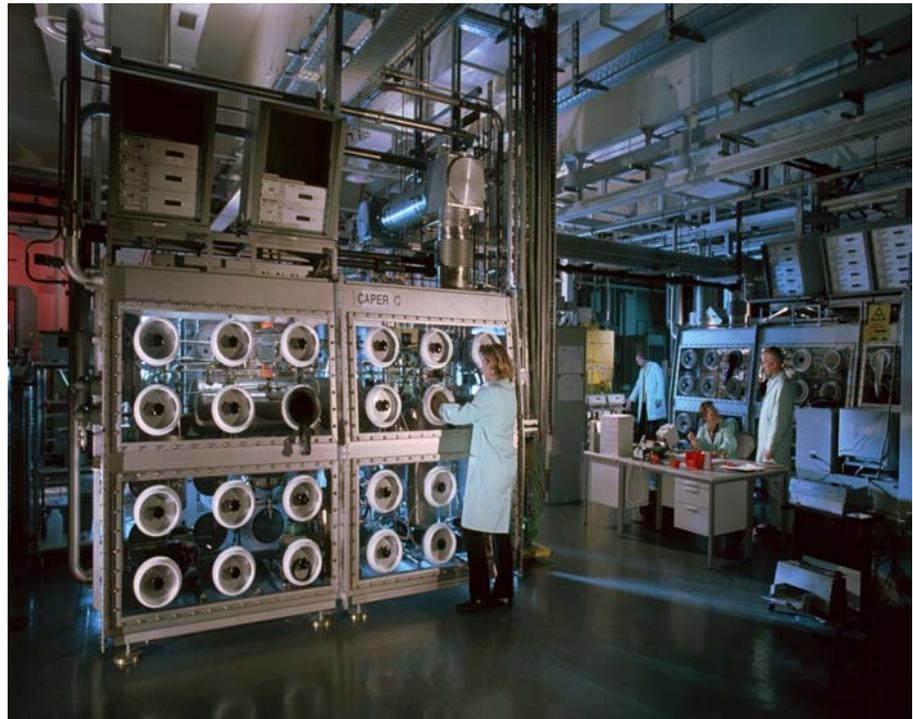


# ITER-Tritium-Kreislauf ("Fuel Cycle")

TLK –

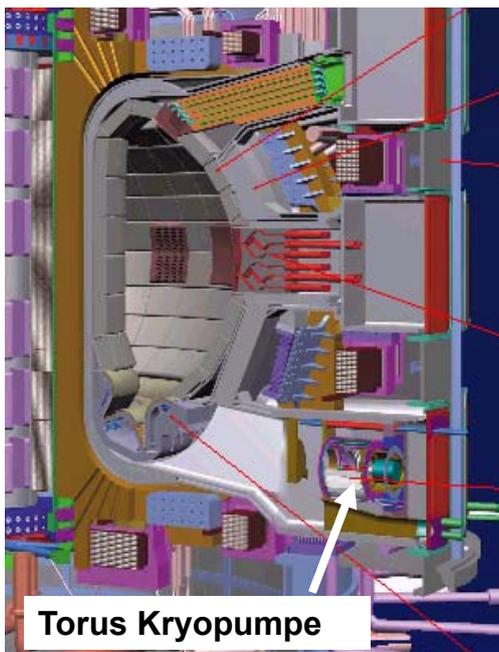
Tritium-  
Labor  
Karlsruhe

- Umgangs-genehmigung für 40 g Tritium
- Erfahrung seit 1995
- weltweit in der zivilen Nutzung einzigartig



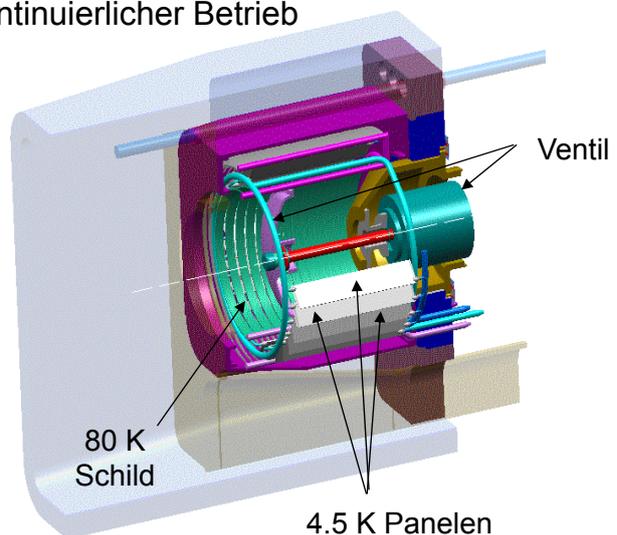
55

# ITER Brennstoffkreislauf - Kryopumpen

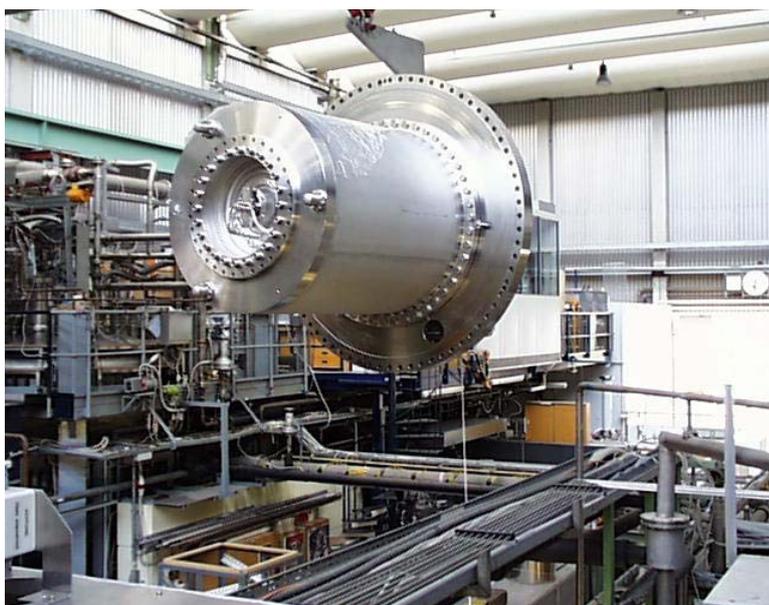


ITER-Torus-Kryopumpe: ITeP-Entwicklung  
**Funktionsweise:**

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



56



Test der Modellpumpe im ITeP

## 4.5 K - Kryopanel



# Brennstoffkreislauf - Vakuumpumpen

## Nachteil Kryopumpen :

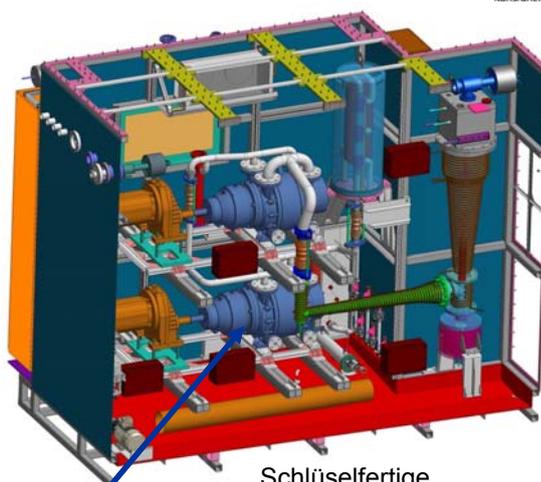
- diskontinuierlicher Betrieb

## 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



## Plasma-Divertormaterial: 1.Option Wolfram (W)

### Wolfram inhärent:

- spröde
- rekristallisiert bei höheren Temperaturen  
    ➔ erneute Versprödung



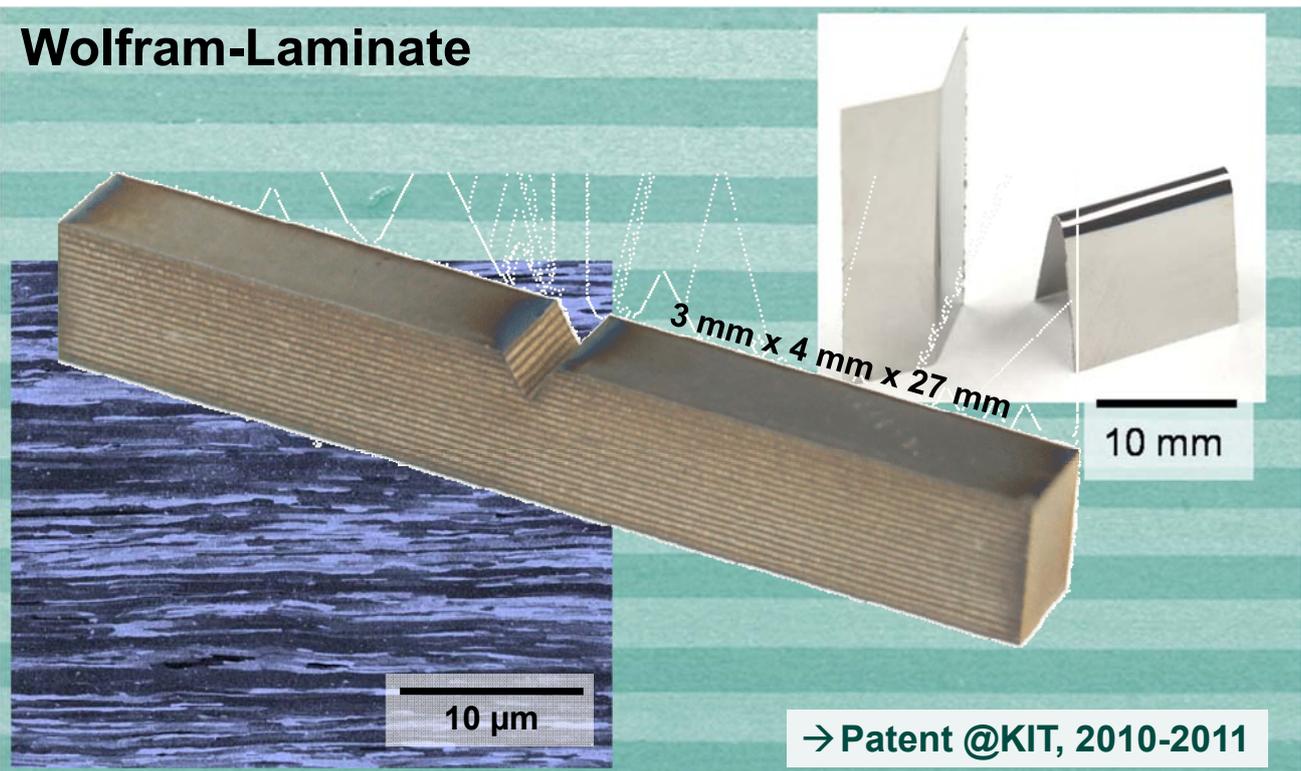
### Strategien

- Nanostrukturierung
- Komposite
- Legierung

### Problem: Mikrostrukturierung



## Wolfram-Laminate



## Kann man reines Wolfram biegsam (duktil) machen ?

Wolfram, **warmgewalzt (Standard)**  
Test bei Raumtemperatur



Wolfram, **extrem kaltgewalzt**  
Test bei Raumtemperatur

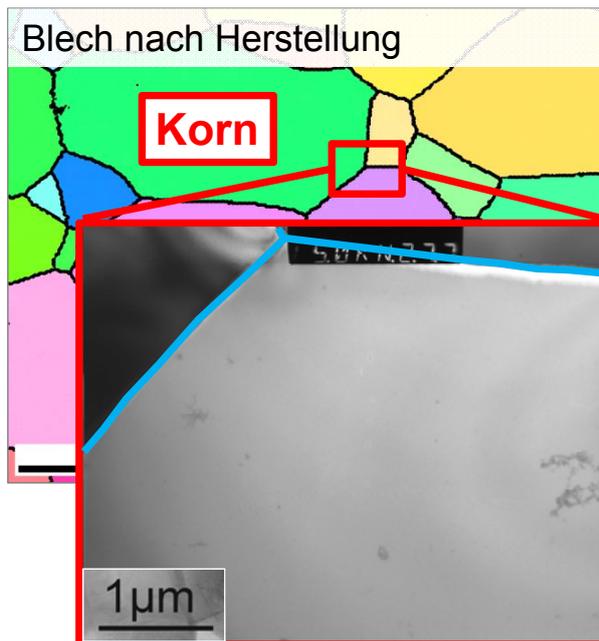


- Warum wird Wolfram nach **extremem Kaltwalzen** biegsam (duktil)?

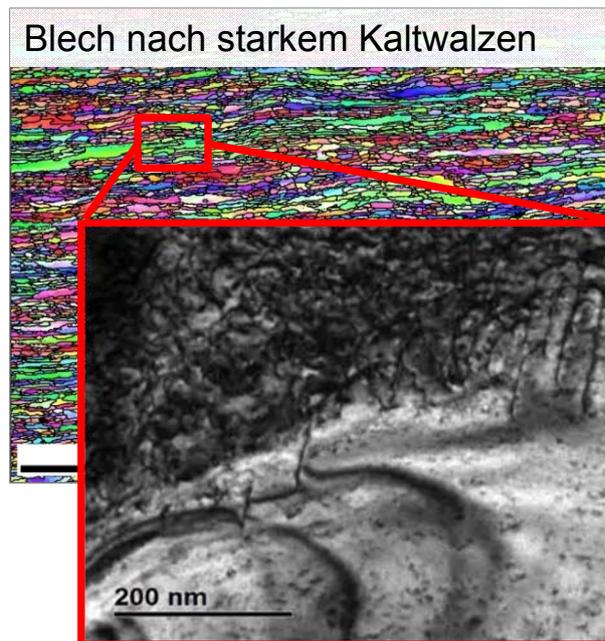
© Jens Reiser; europäischer Innovationspreisgewinner , 2018

## Reise ins Innere von Metallen

- Biegsamkeit (Duktilität) erfordert Versetzungsbewegung



M. Klimenkov, U. Jäntsch, KIT



M. Klimenkov, S. Bonk, KIT

# Starke Magnete brauchen Supraleiter

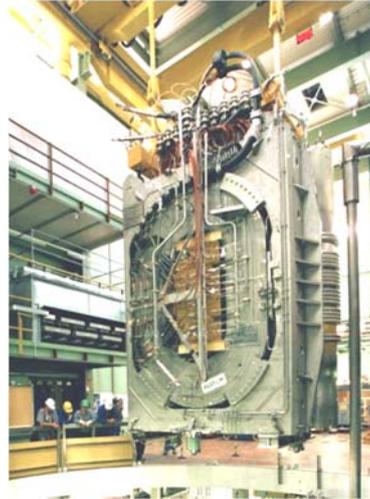
- starke Magnete brauchen hohen Strom (einige bis viele 1000 Ampere)
- Kupfermagnete sind unwirtschaftlich (hohe Stromkosten, werden heiß)

## 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

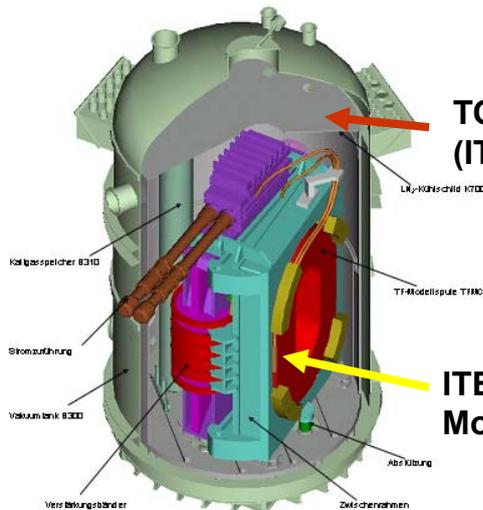
Strom 80.000 A

Spannung\* 3 V

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

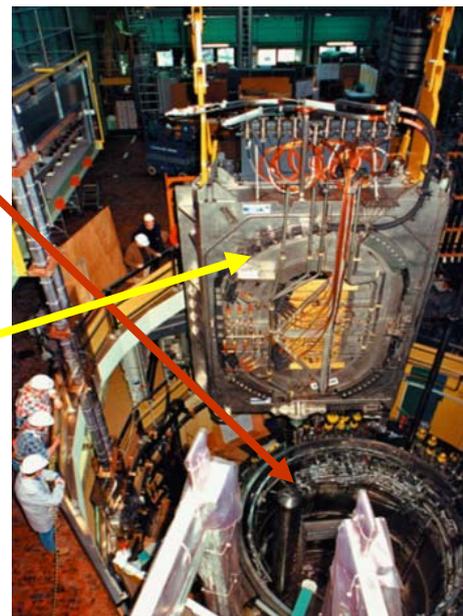
\*nur nötig wegen normalleitender Zuleitungen

# Supraleiter und Spulen-Experimente



TOSKA-Anlage (ITP)

ITER TF-Modellschule



### TFMC-Tests 2001:

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



Kabel:  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  in Edelstahlhülle, mit Kühlkanal.

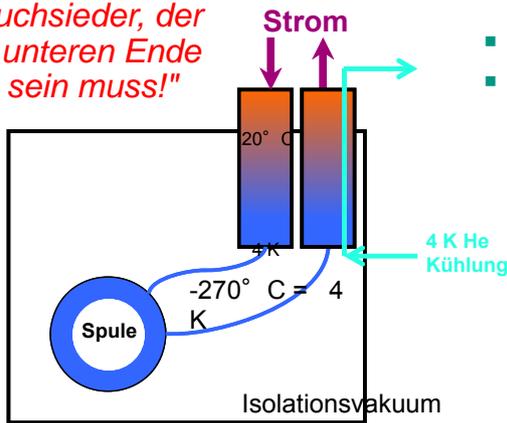
# Wie kommt der Strom zu den kalten Magneten?

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

Der Strom muss also über **Stromzuführungen**

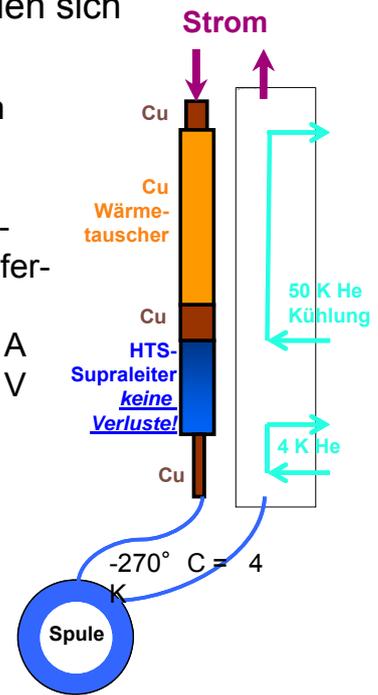
- elektrisch isoliert
- ins Vakuum und
- in die Kälte

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



**KIT: Stromzuführungen mit Hochtemperatur-Supraleiter!**

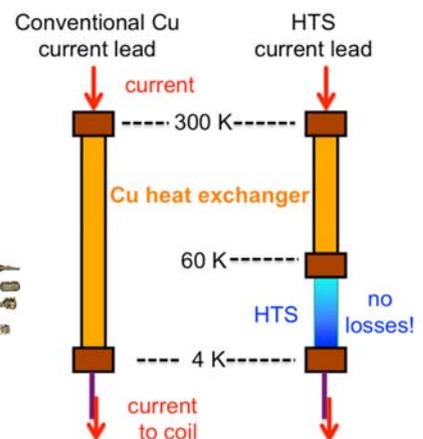
- 5x geringerer Energieverbrauch als bei Kupfer-Stromzuführungen
- Strom max. 80.000 A
- Isolation max. 13.000 V



# Supraleiter und Spulen

## 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



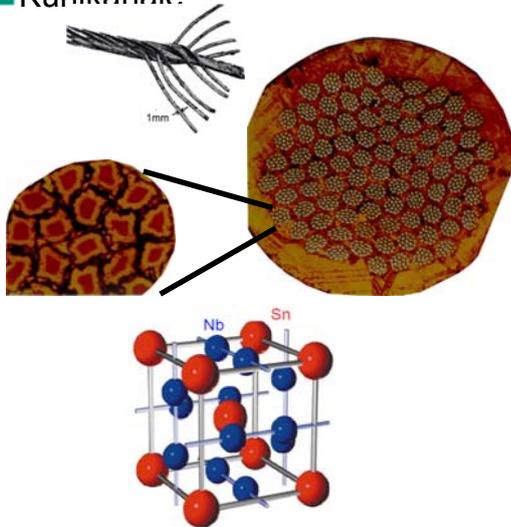
# Hochtemperatursupraleiter (HTS)

## Warum nicht den ganzen Reaktor aus HTS –Spulen bauen ?

- HTS stehen noch am Anfang der Entwicklung

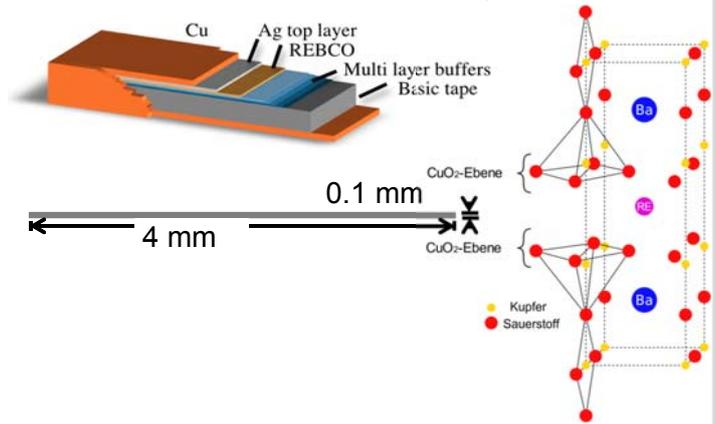
### Techn. Supraleiter (Metalle $NbTi$ , $Nb_3Sn$ )

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



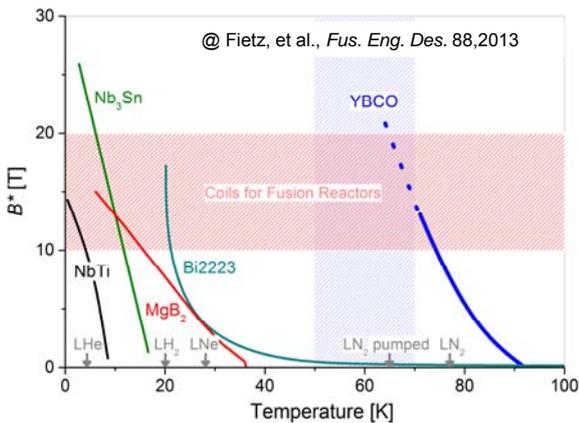
### HTS Supraleiter (z.B. REBCO)

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

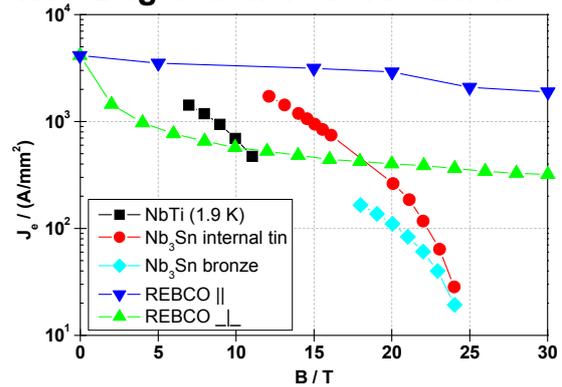


# Hochtemperatur-supraleiter (HTS)

- 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



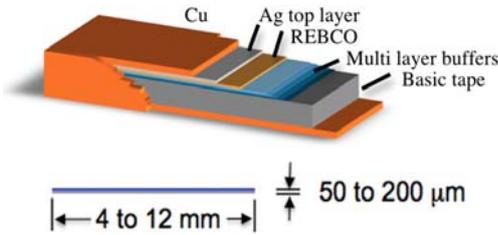
Charpy-Testing



# Hochtemperatur-supraleiter (HTS)

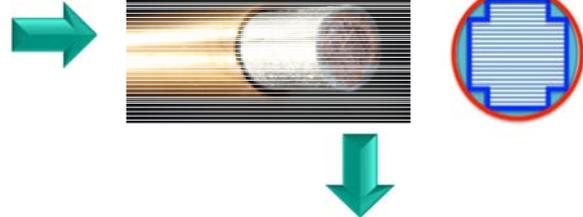
Wie kommt man mit HTS zu einem Kabel ?

## HTSL - herstellbar als dünne Bänder



## Bildung eines Kreuzleiters

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



## Validierung am Prüfstand

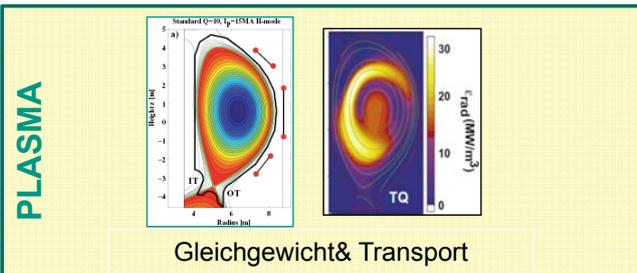
|                             | 6/4 CroCo | 4/3 CroCo |
|-----------------------------|-----------|-----------|
| Zahl REBCO Bänder           | 22 x 6 mm | 28 x 4 mm |
| REBCO tapes Durchmesser     | 10 x 4 mm | 10 x 3 mm |
| $I_c$ (4.2 K, B 12 T,    c) | > 10 kA   | ~ 10 kA   |

## Kabelkonzept



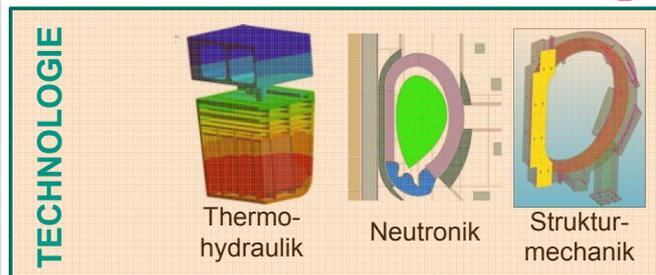
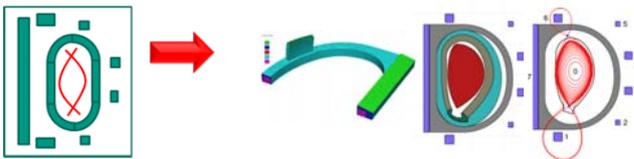
# Reaktorauslegung

## Beschreibung des Reaktorkerns



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

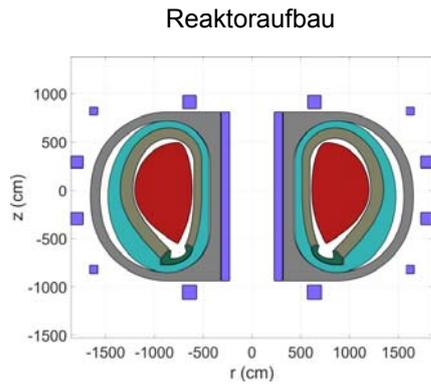
Systemcode (0D/1D)    neuer KIT -Systemcode (2D/3D)



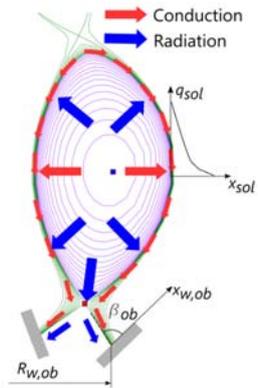
# Reaktorauslegung

## Fähigkeiten des Systemcodes

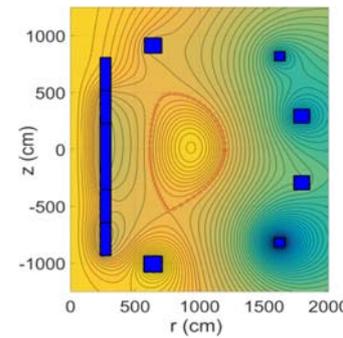
- Modelle:
  - Plasma
  - Magnetfelder
  - Blanket
  - Divertor
  - Brennstoffkreislauf
  
- Analysewerkzeuge:
  - Reaktorgeometrie
  - Leistungsflüsse
  - Neutronik
  - Magnetfeldkonfiguration
  - Kostenmodell



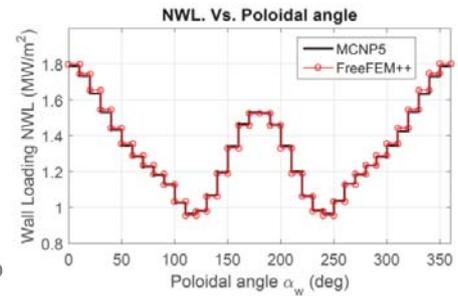
## Plasmaphysik & Divertor



## Magnetfeldkonfiguration



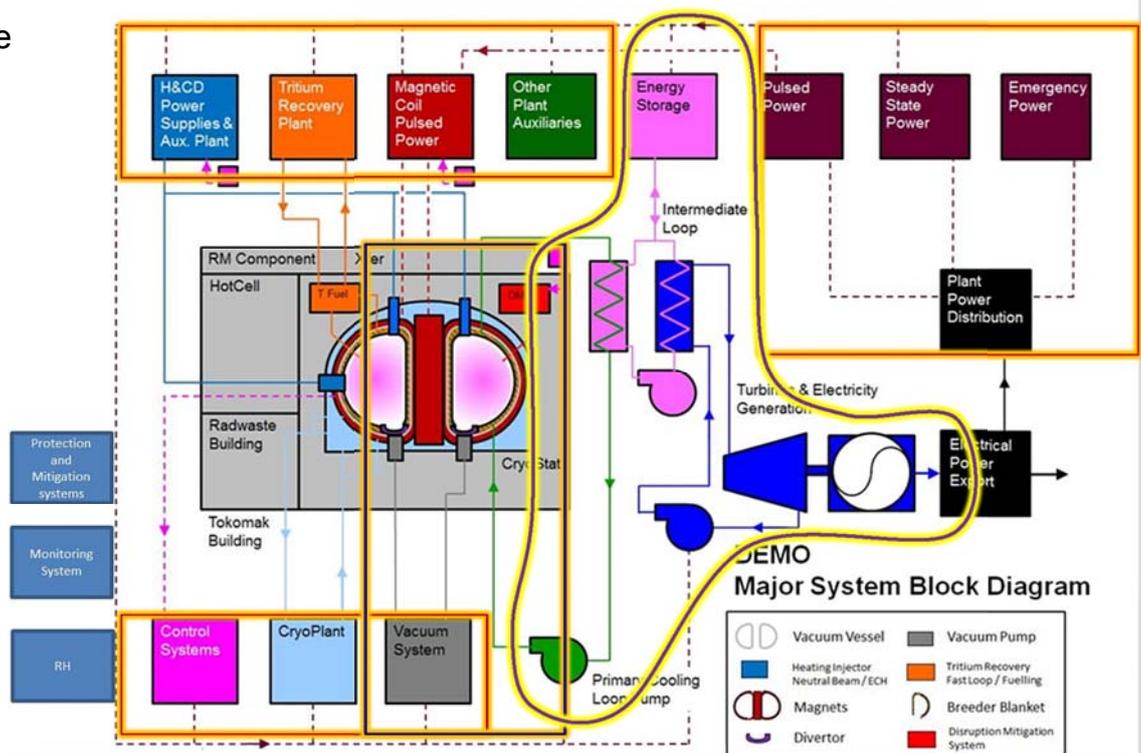
## Neutronik



# Reaktorsystem mit Hilfsaggregaten

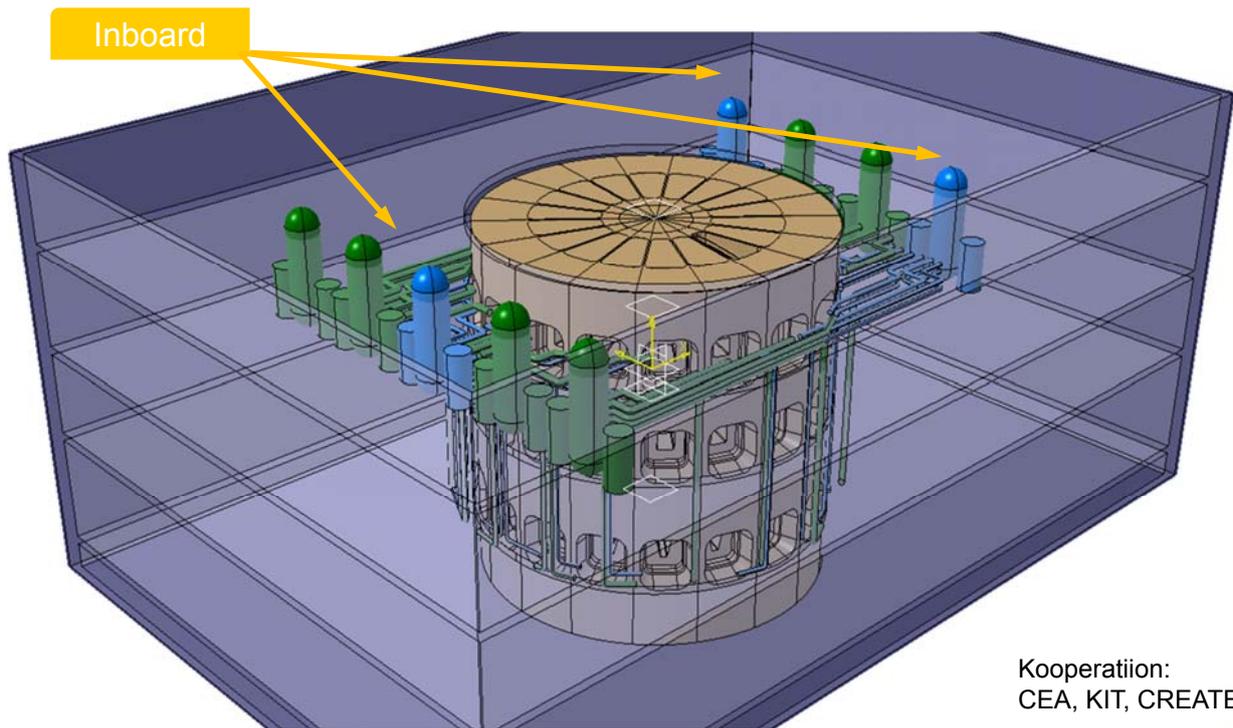
## Verknüpfung des Kraftwerks Aggregaten & Leistungserzeugung

- Energie
- Fluid
- Logik



# Reaktorsystem mit Hilfsaggregaten

- Arrangement des primären Wärmeabfuhrsystems



Kooperation:  
CEA, KIT, CREATE

# Reaktorsicherheit

## Sicherheitsziele = Vermeidung radiologischer Gefährdung

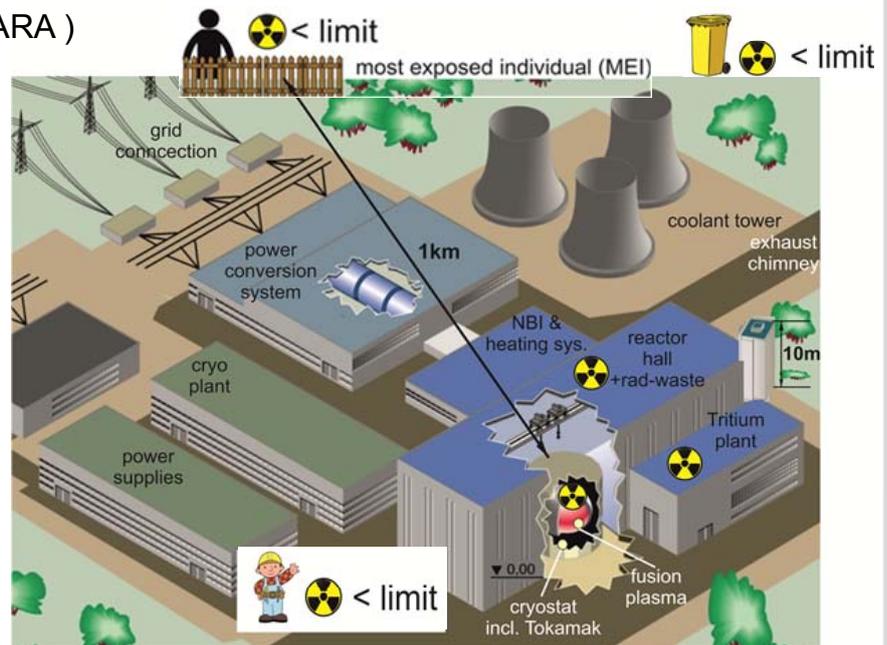
- Öffentlichkeit & Umwelt
- Personal (ALARA-principle)
- Radioaktiver Abfall (ALARA)

## Mittel

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

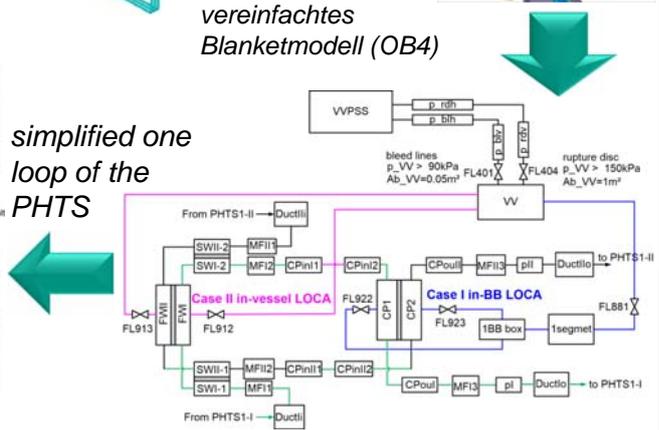
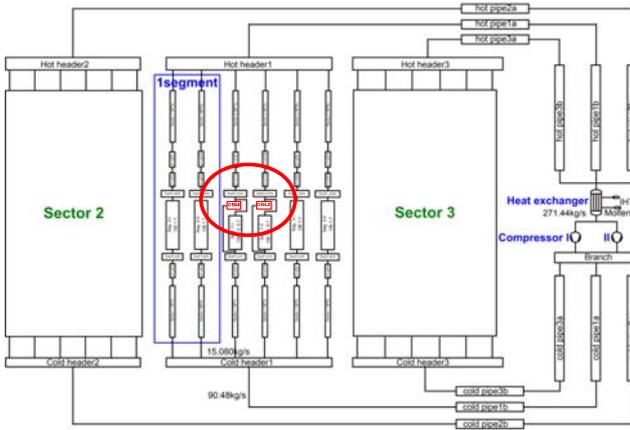
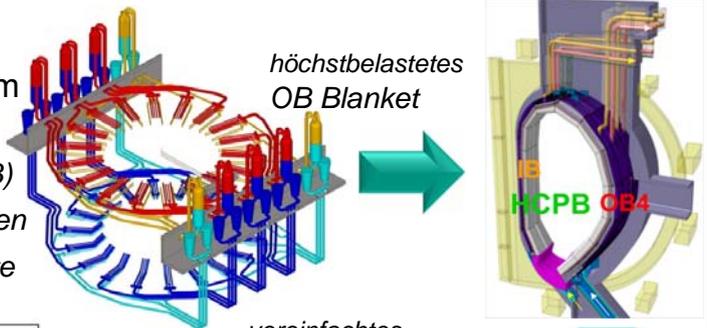
➔ alle Bestandteile der  
KIT Forschung

## Auslegung eines Fusionskraftwerks



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

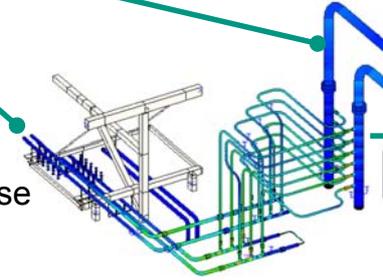
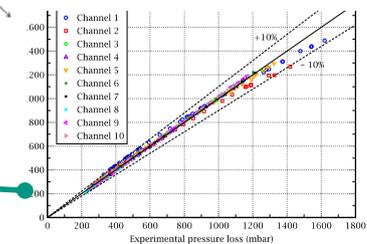
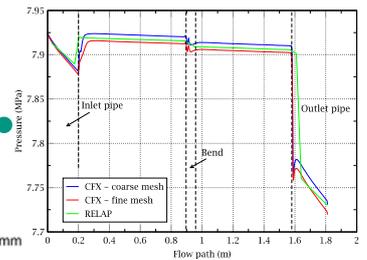
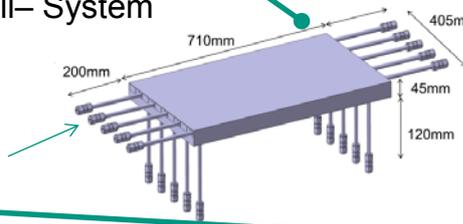
- Analyse eines Teilsystems
- HCPB in 18Sektoren– Primärkühlsystem (PHTS) Design:
  - 6 loops outboard (OB), 3 loops inboard (IB)
  - 1 OB-loop 3 Sektoren / 1 IB-loop 6 Sektoren
  - 1 Sektor: 3 OB Segments & 2 IB Segmente



## Codeanwendung und Validierung: Kühlmitteldurchflussstop (LOFA) in der 1. Wand (FW)

### Validierungssequenz

- CFD Modellaufbau für 1 bzw. 2 Kanäle
- Reduktion einfaches Modell– System
  - ➔ Verifikation
- Experiment
  - Design Teststrecke
  - Isotherme Validierung
- Integration in Heliumkreislauf
- Einzalexperiment
- Systemanalyse
- volle 3D Sicherheitsanalyse
  - ➔ Validierung

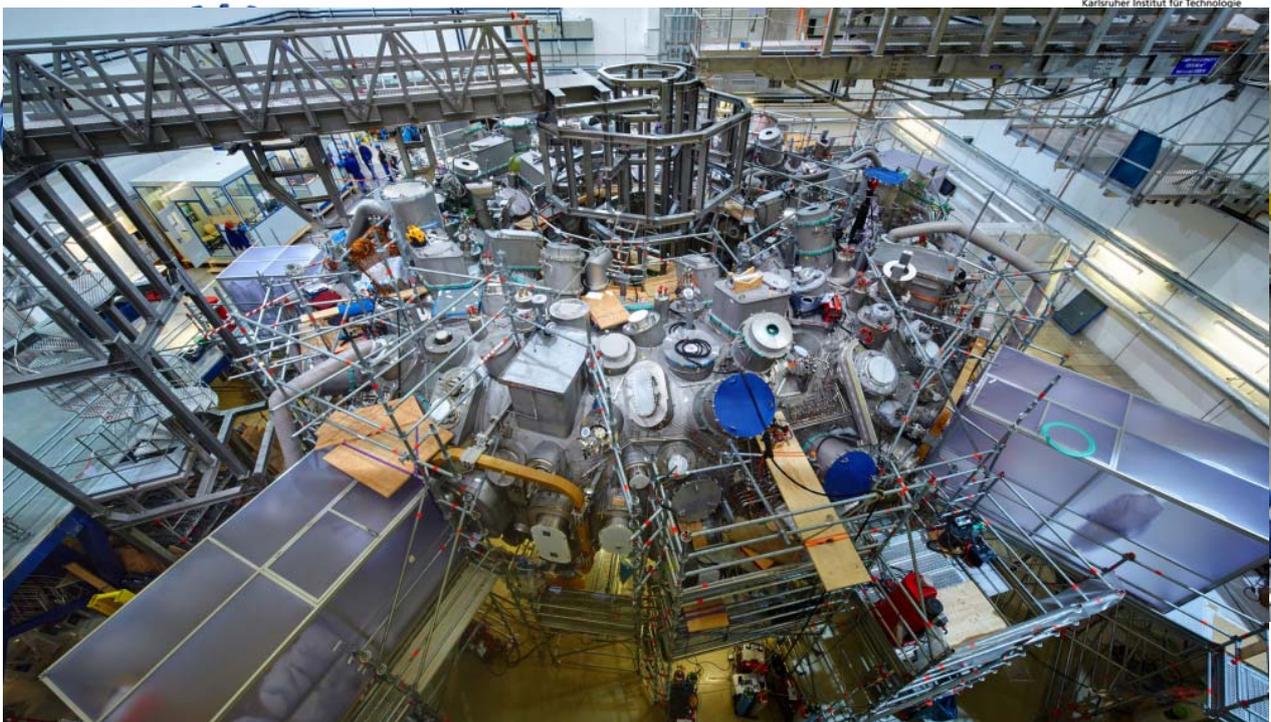


# AKTUELLE FUSIONSPROJEKTE

## Stand von Wendelstein und ITER

77

## Wendelstein – Ein Projekt in Deutschland



- im Gegensatz zum Tokamak sind Stellaratoren intrinsisch stationär

78

# Wendelstein

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



© IPP Garching

# ITER - Standort 2011



Verwaltungsgebäude

PF-Feldspulen  
Fertigung-Montage

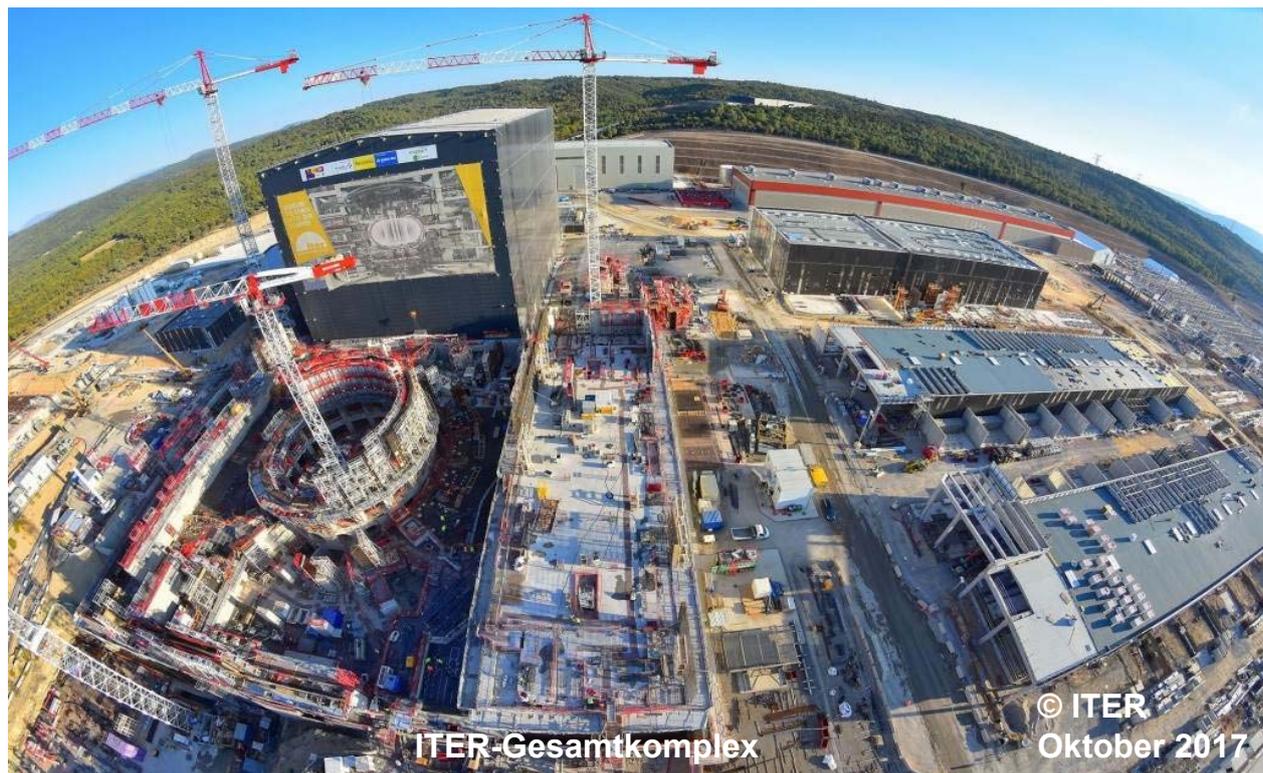
TECHNIKAUFBAU

# ITER - Standort 2014



81

# ITER - Standort 2017



82



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

## ITER –Komponentenherstellung

Spulen wickeln



Spulen isolieren

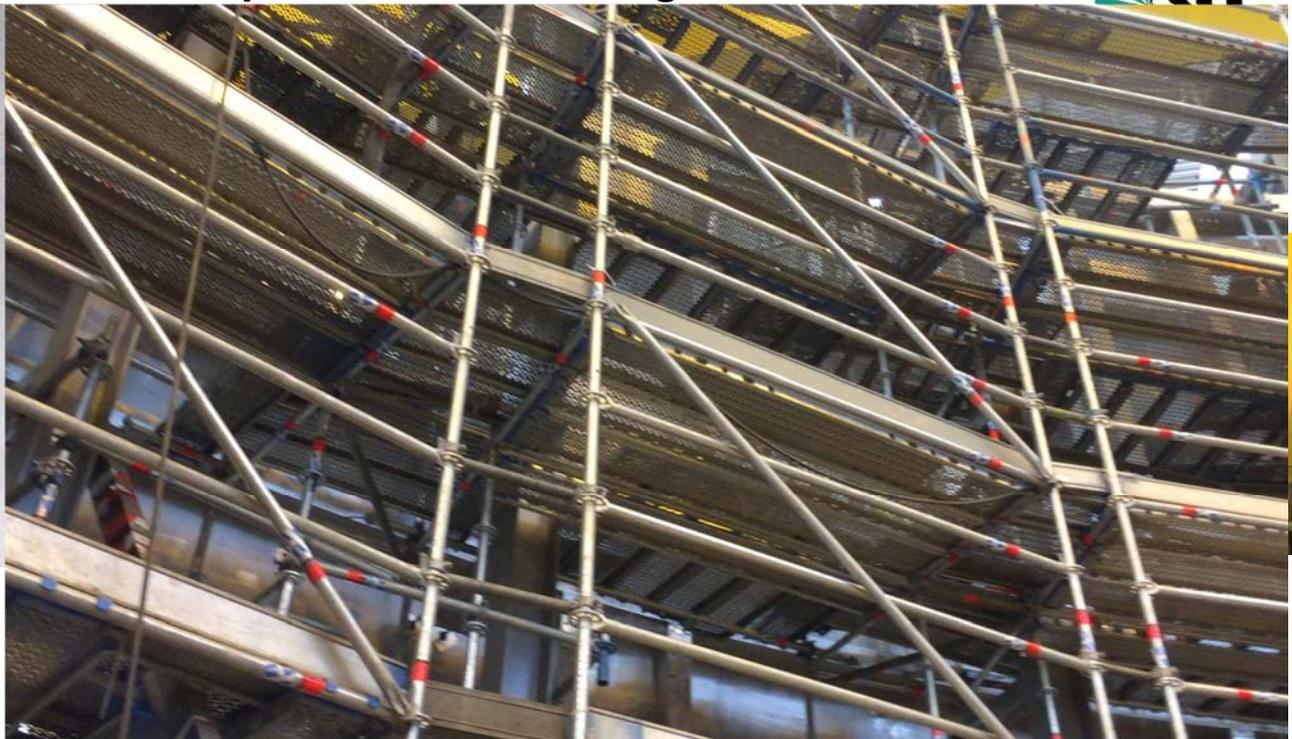


Spulen stapeln



Spulen „backen“





Es gibt eine virtual tour mit 3D Kino: <https://www.iter.org/news/galleries>

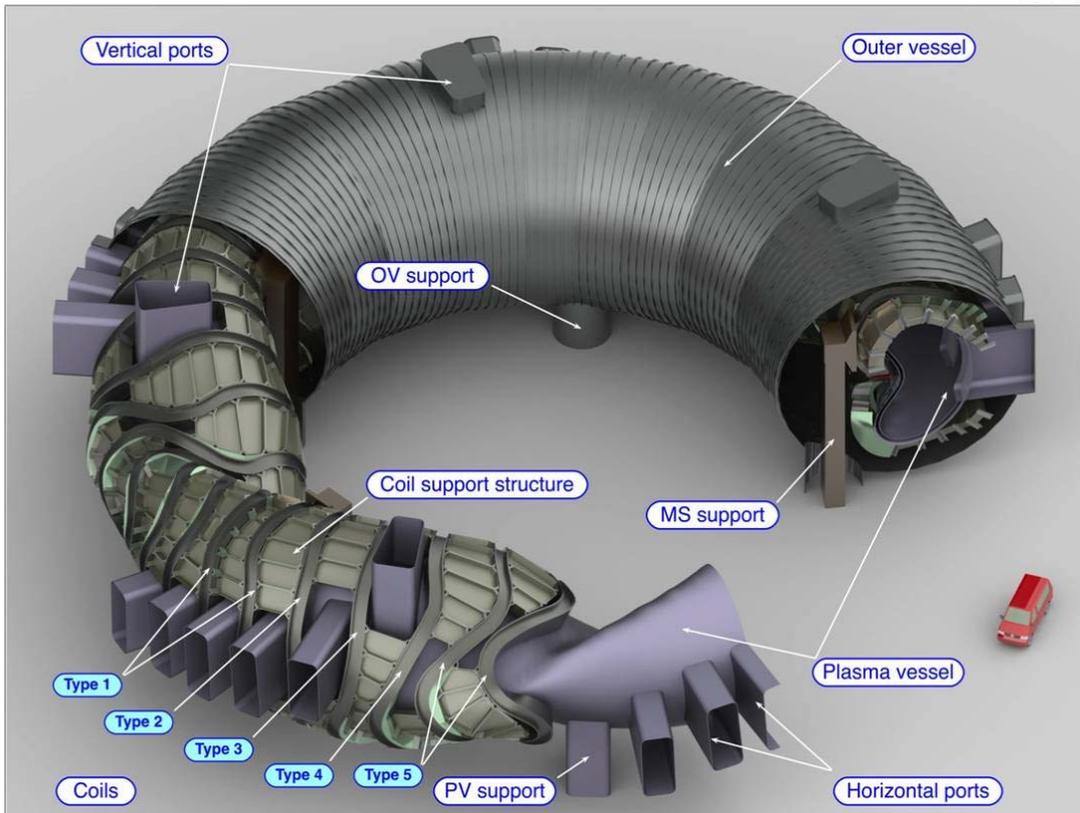
## Vision der FUSION

- 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,.....)

## „Take away“

- Fusionsforschung muss Bestandteil einer diversitären Energieforschung einer Technologienation wie Deutschland sein. Sie sichert damit nicht nur den Erhalt einer künftigen Energieoption,
- sondern sie gewährleistet die Teilhabe und Beteiligung an zentralen weltweiten Entwicklungen auf unterschiedlichen Zukunftstechnologiefeldern und dies
- für einen vergleichsweise **geringen monetären** Beitrag.
- Fusion steht für
  - **Internationalität** und internationalen Wettbewerb
  - **freien Austausch zwischen allen Nationen**
  - **Hightech** auf allen Technologiegebieten

# ZUSATZFOLIEN



## Plasmen sind nicht stationär

- Plasma in Wendelstein-Stellarator
- Kann man die Plasmaturbulenz rechnen ? – Tokamak



Beispiel aus Wendelstein 7X  
© R. Wolf, IPP

Global Gyrokinetic Simulation of  
Turbulence in  
ASDEX Upgrade

gene.rzg.mpg.de

Beispiel Plasmaturbulenz in  
ASDEX-Upgrade  
© H. Zohm, IPP