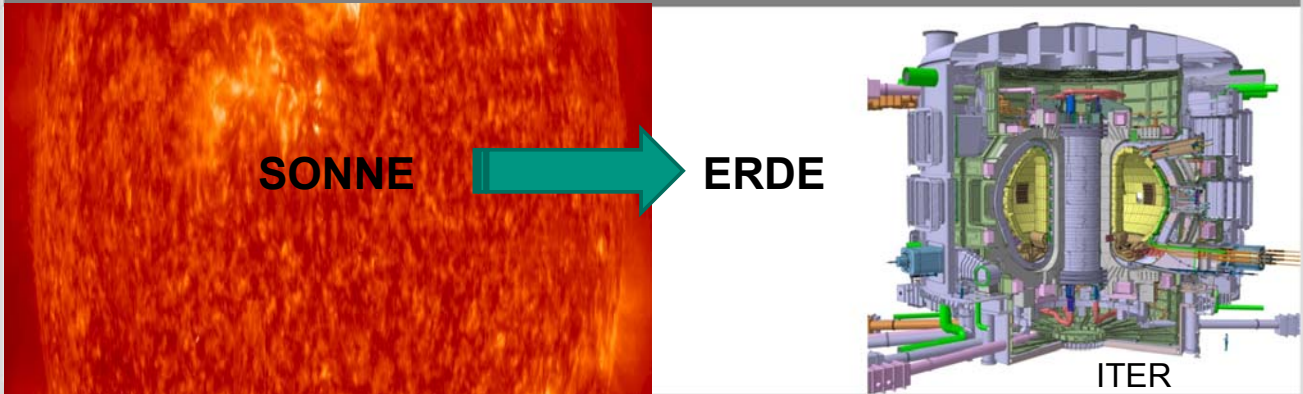


„Fusionskraftwerke- Funktionsweise- Wege zum Fusionskraftwerk – Technologieentwicklungen

Robert Stieglitz

Programm Fusion



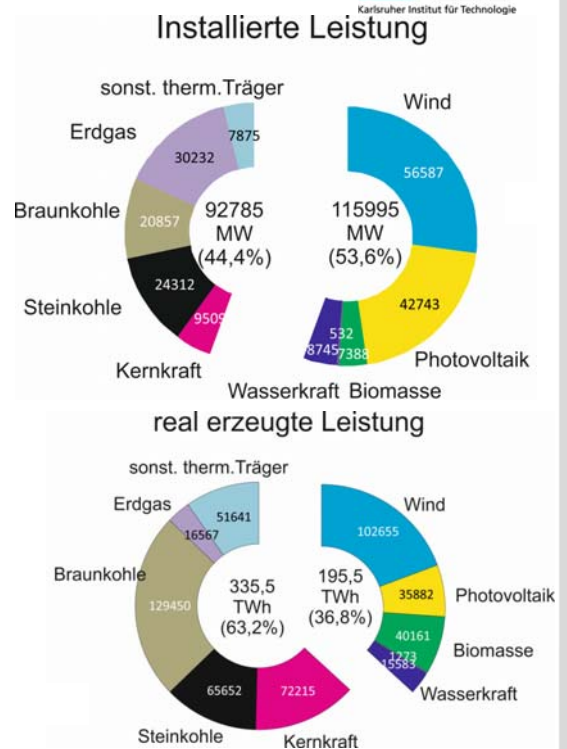
KIT – The research university in the Helmholtz Association

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 CO₂-Übergang bis 2050 vollständig bewältigen können



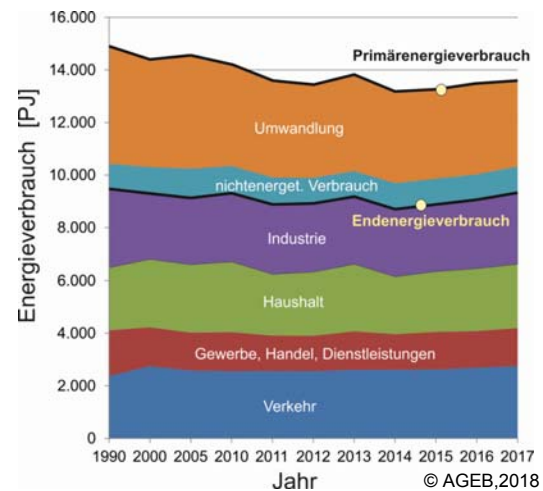
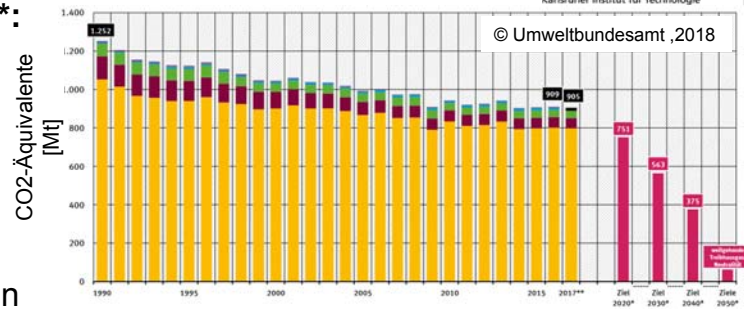
*A.J.H. Donne, Euratom Meeting, Brussels, 9th October 2018

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*:

- CO₂-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^{2,3}
- ➔ große Backup-Energiequellen nötig
- ➔ Kernenergie einzige Option fossile Träger zu ersetzen und CO₂-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.
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, 9th 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“



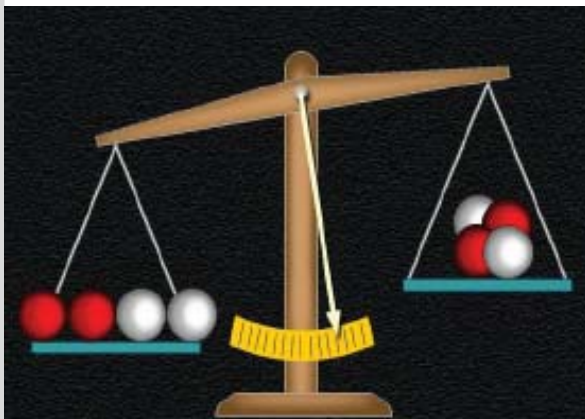
WAS IST FUSION ?

Was ist Fusion ?

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

- Massensumme: Nukleonen ($p+n$) > Zielelement
- Massendifferenz (Nukleonen Brennstoff und Zielelement) = 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:

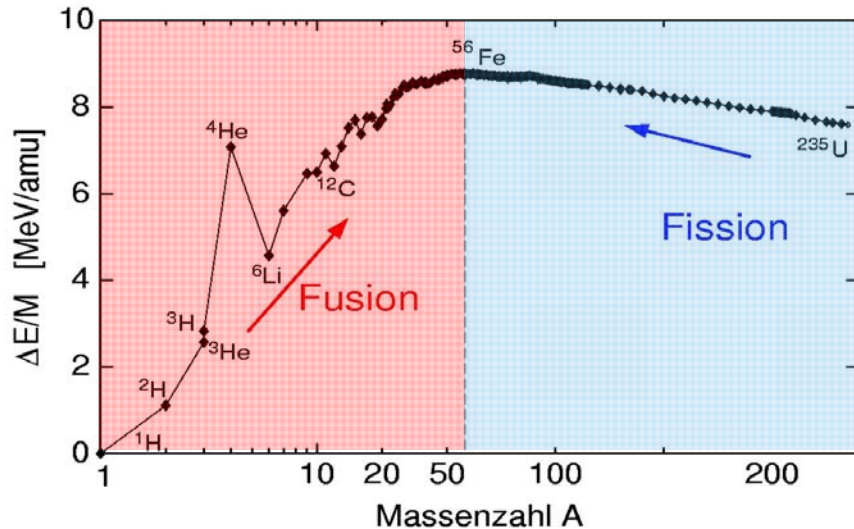
$$E = m c^2 = 10^{-3} \text{kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{J}$$

Sprengkraft von 10.000t TNT !!

ENORME ENERGIEINHALTE

Welche Fusionsreaktionen sind relevant?

- Welche Elemente können "fusionieren"?



Welche Energiemenge wird freigesetzt ?

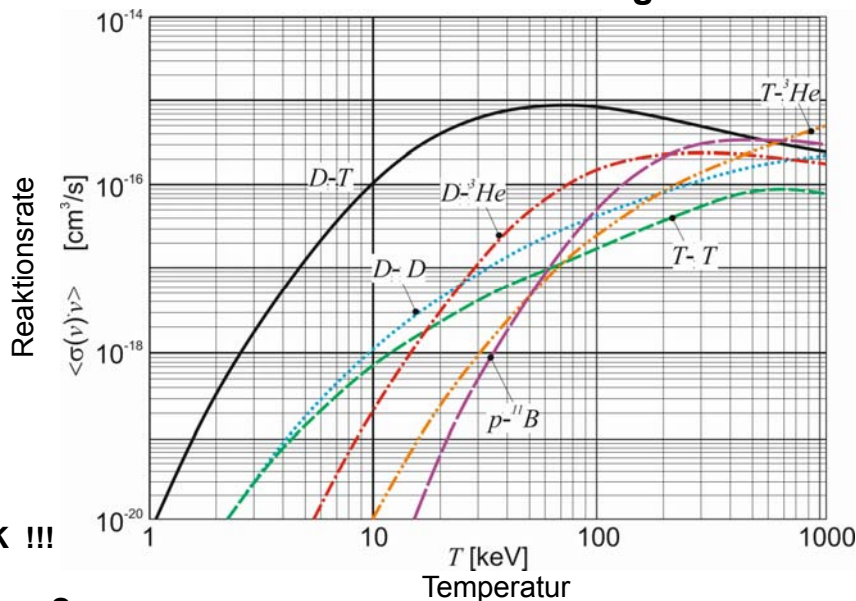
Brennstoffmenge [kg] für gleiche Energieerzeugung
1kg

- 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?



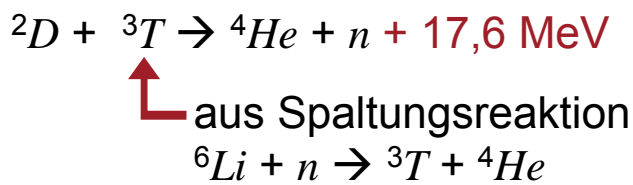
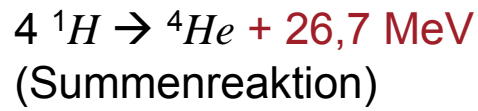
1eV ~11.600°K !!!

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 !**

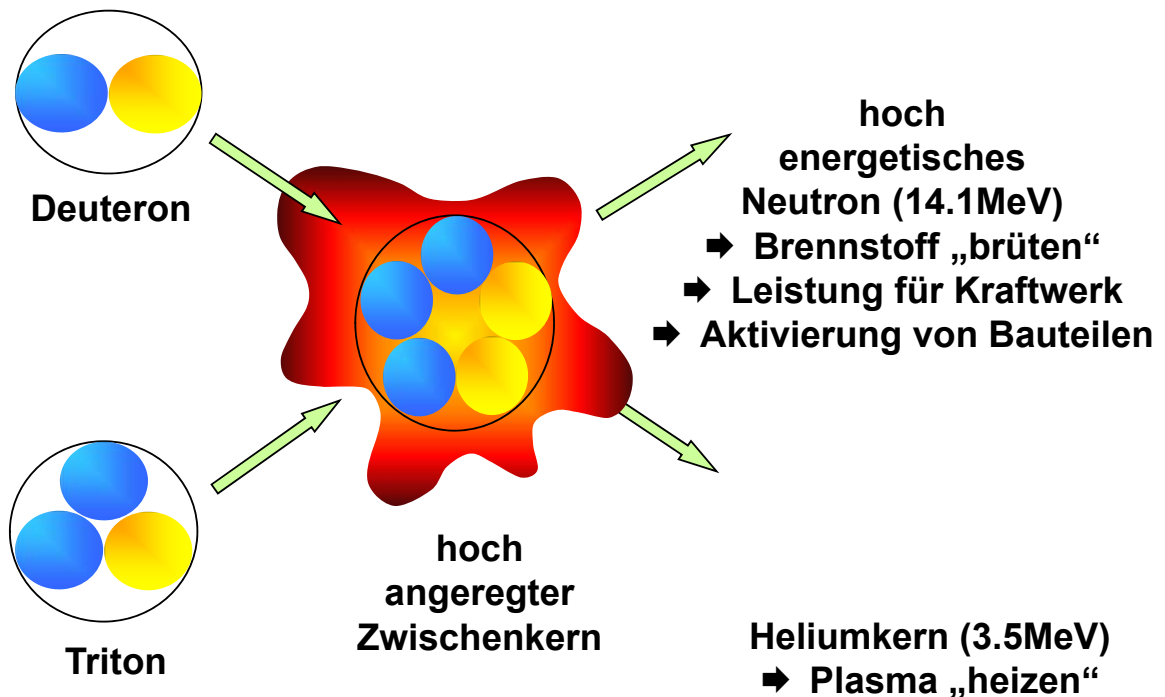
Was ist Fusion ?

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

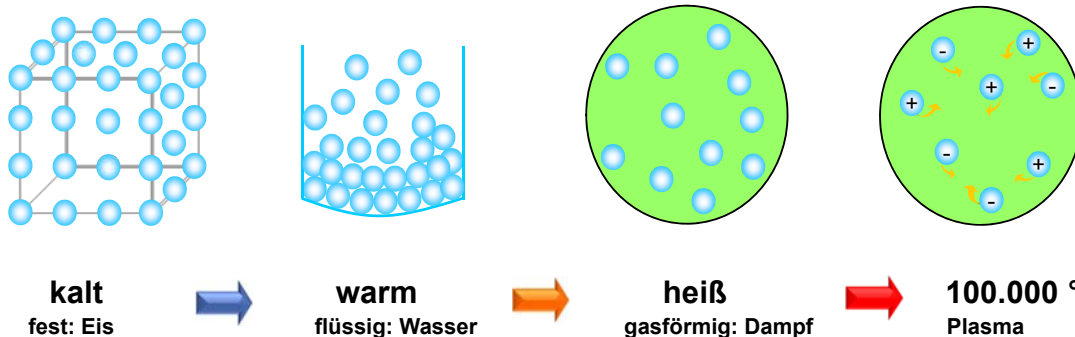
- Für ein Kraftwerk ($1000\text{MW}_e = 2.700\text{MW}_{th}$) benötigt man:

- pro Tag ca. 410g Tritium (^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"



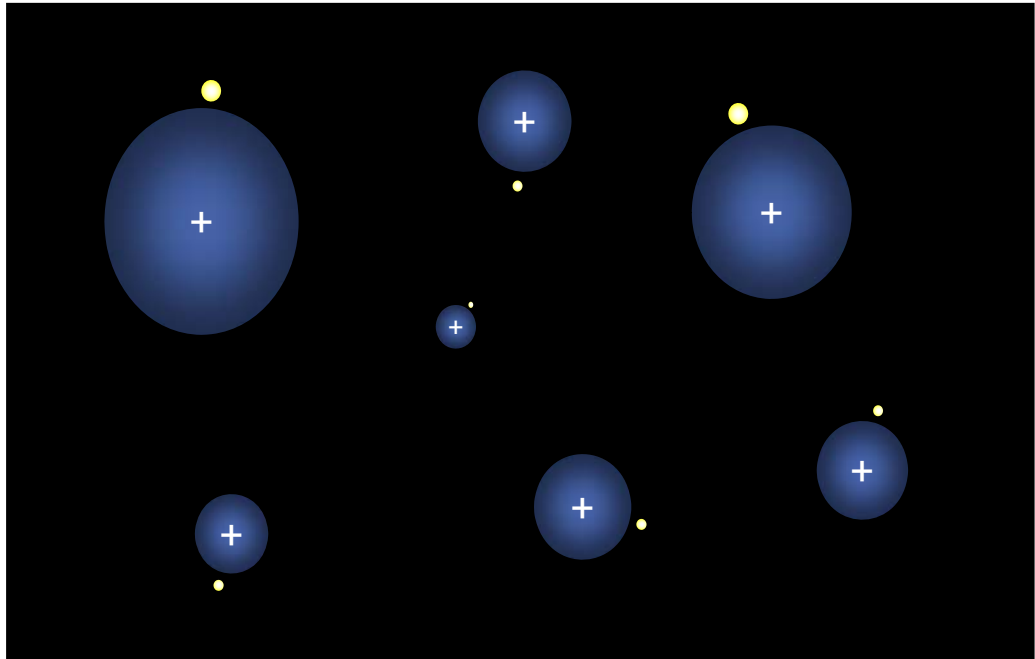
Was passiert im Plasma ?

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

Was ist Fusion ?

Was ist ein Plasma ?

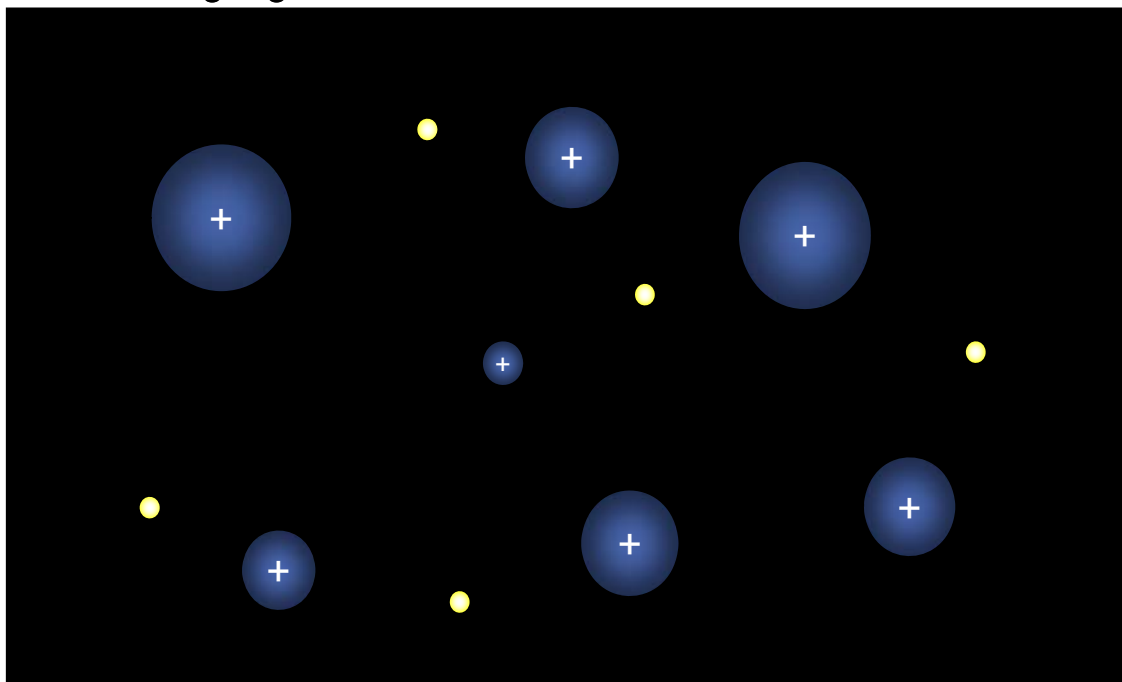
Beispiel: Atombewegung des Wasserstoffs bei $T < 10^5 \text{°C}$ → KEIN PLASMA



Was ist Fusion ?

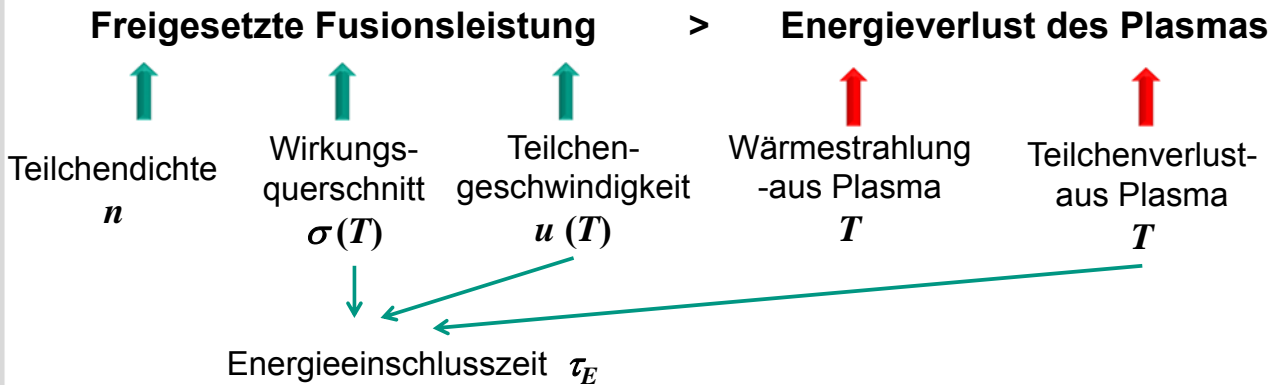
Was ist ein Plasma ?

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



Was ist Fusion ?

Wie zünde ich ein Plasma ? - Zündbedingung



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

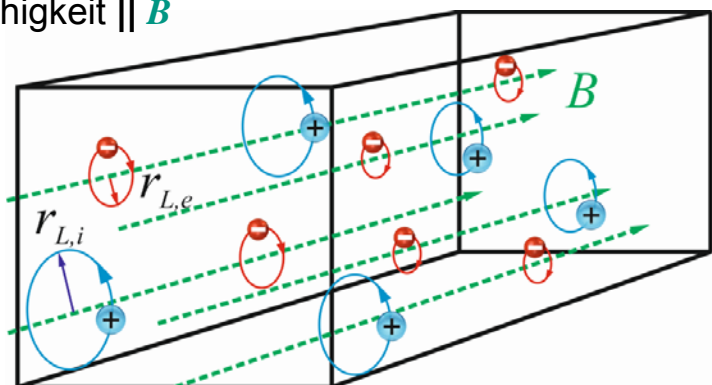
- n : Teilchendichte (Teilchen / m^3)
- T : Temperatur (10-20keV= 100 – 200 Mio K)
- $n \cdot T$: Plasmadruck (ca. **4.8bar · s**)
- τ_E : Einschlusszeit (bei ITER ca. 3.7s)

Was ist Fusion ?

Elektr. geladene Teilchen lassen sich in Magnetfeldern B einschließen

Was bewirkt der Magnetfeldeinschluss ?

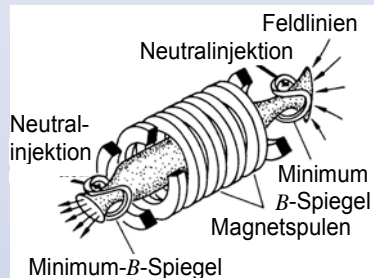
- Elektronen, Ionen fliegen entlang Magnetfeldlinie B
- ➔ unendliche therm.& elektr. Leitfähigkeit $\parallel B$
- Elektronen & Ionen rotieren auf unterschiedl. Kreisbahnen
- ➔ Heizung mit der Eigenfrequenz möglich (ICRH, ECRH, LHH)
- ➔ aber unterschiedliches Stoßverhalten der Teilchen $\perp B$
- Gradienten des Magnetfeldes führen zur Ladungstrennung
- ➔ 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

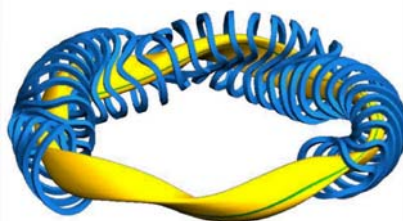


- einfacher Aufbau
- hohe Endverluste
- komplexe Plasmasteuerung



TMX-U Livermoore ging nie in Betrieb

■ Stellerator

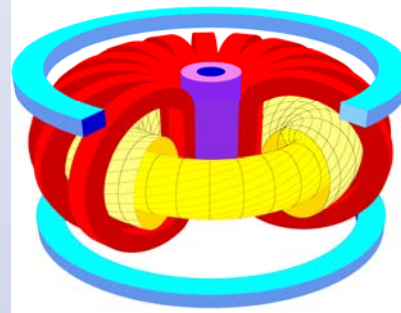


- kein Plasmastrom
- ➔ stabiles Plasma
- stationärer Betrieb
- komplexer Aufbau Spulen



Wendelstein in Betrieb (weniger Erfahrung)

■ Tokamak



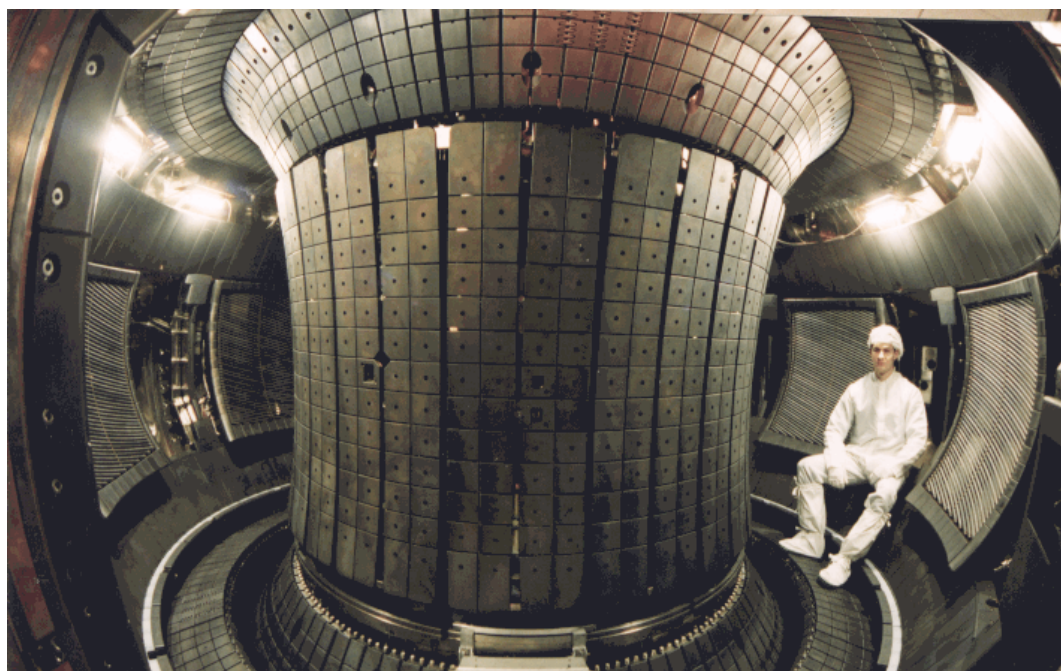
- einfacher Aufbau und Betrieb
- Plasmastromstriebe
- ➔ instationäre Maschine



Grundlage ITER und DEMO

Plasmaphysik- magnet. Einschluss

■ Plasmakammer



Plasmaphysik- magnet. Einschluss

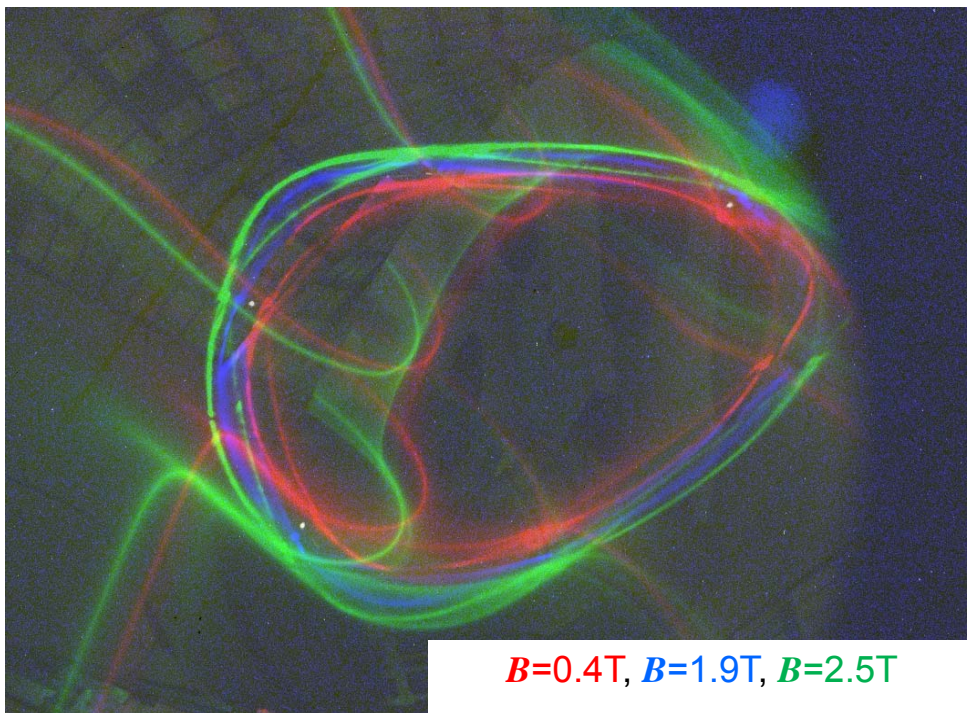
- Wie sieht ein Plasma aus ?



© Zohm,IPP

Plasmaphysik- magnet. Einschluss

- Wie muss man sich das vorstellen?



Fusion – Zusammenfassung der Physik

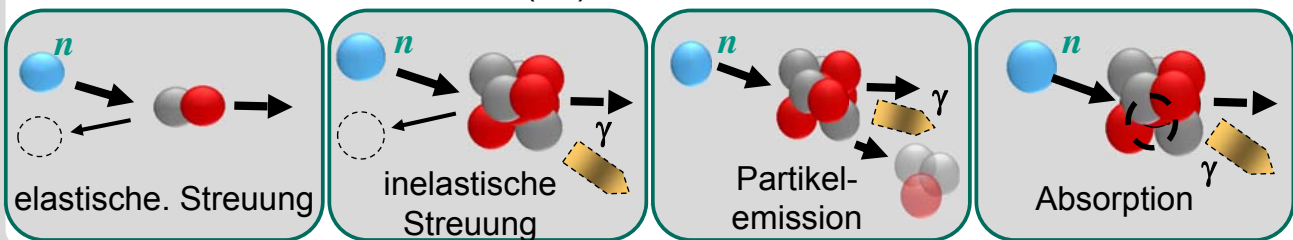


↑ Plasma heizen 3.5MeV
 ↑ Brennstoff erzeugen Wärme erzeugen 14.1MeV
 = Massendefekt 17.6MeV

- 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 η_{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

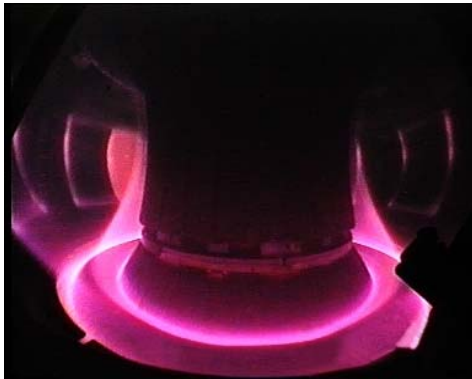
Fusion – Größenordnungsvergleich

Deuterium-Tritium Plasma

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

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

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



Wasser

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

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

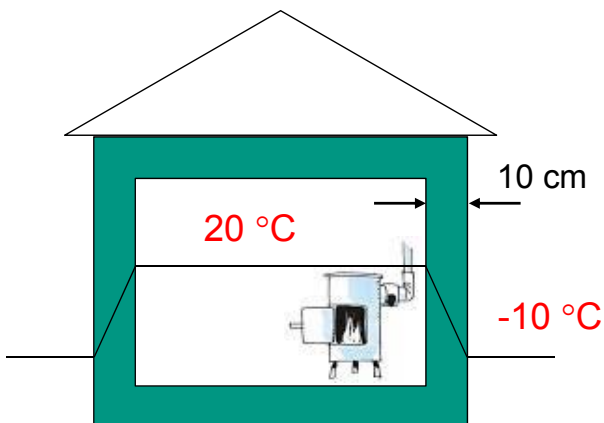
$$p = 1 \text{ bar}$$



Fusion – Größenordnungsvergleich

- Isolationsgüte

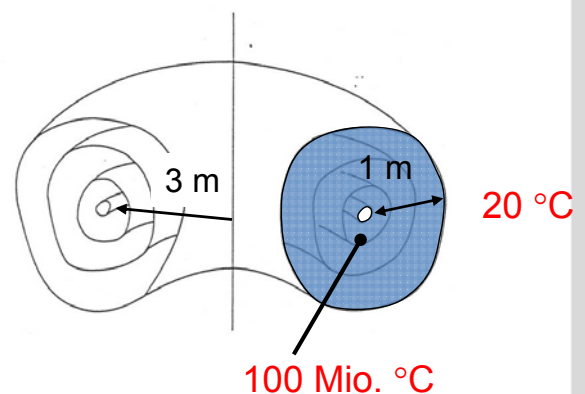
Haus



10 cm Styropor
400 m² Oberfläche

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

Plasma



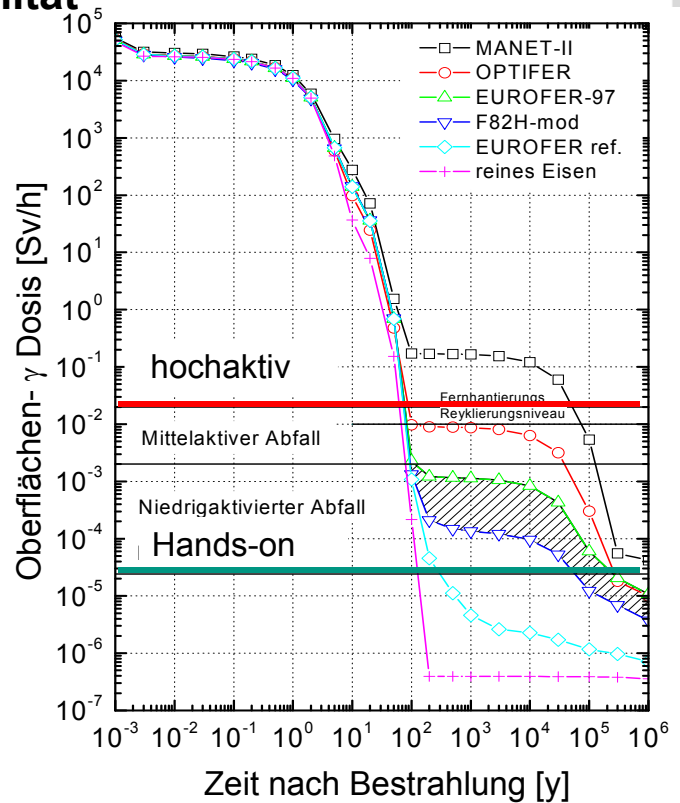
1 m Magnetfeldkammer
120 m² Oberfläche (JET torus)

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

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 ($Q = 10$)

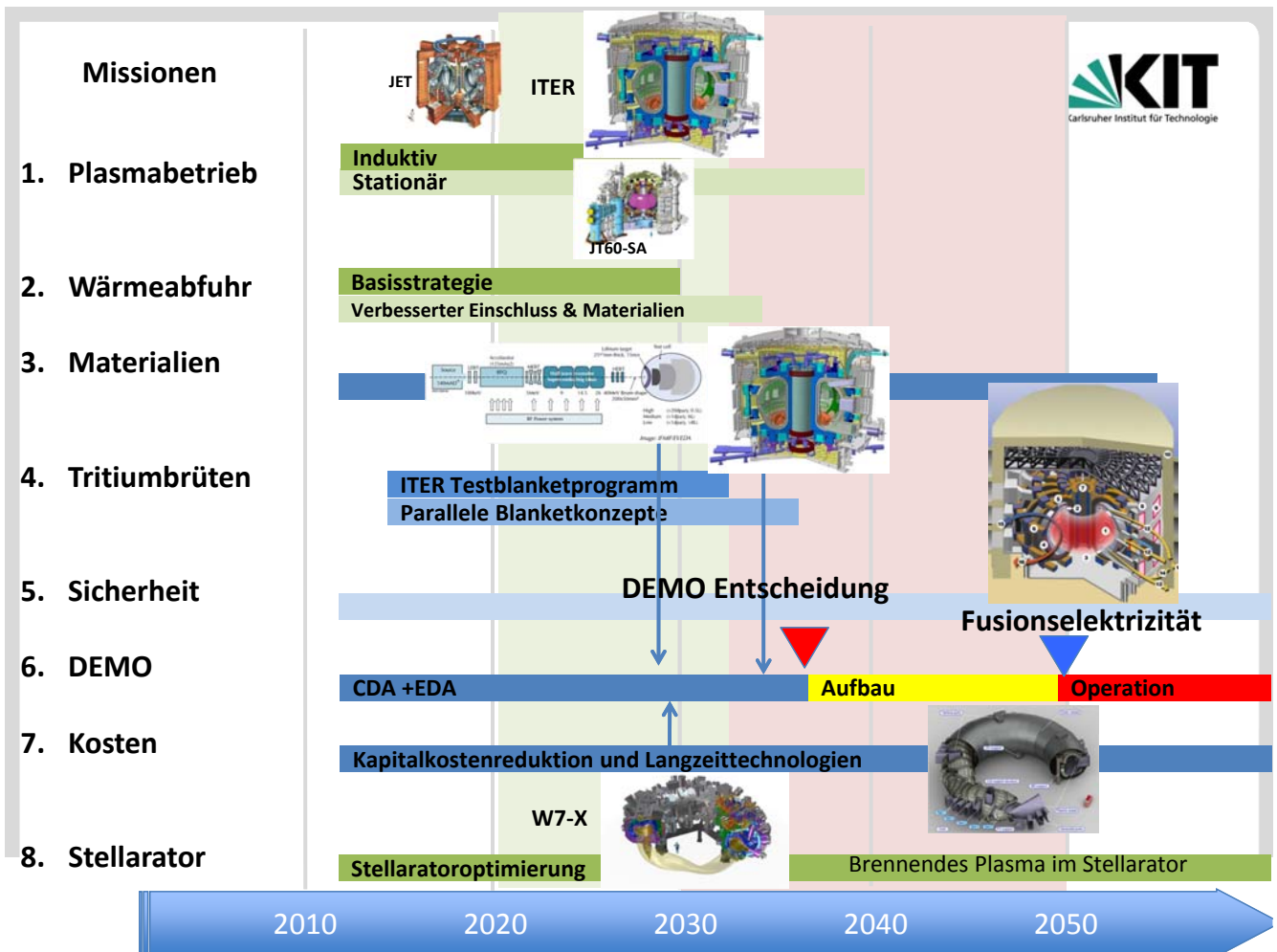
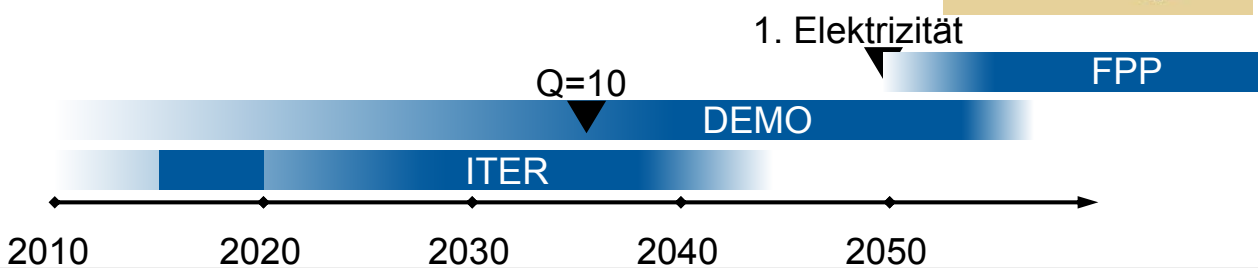
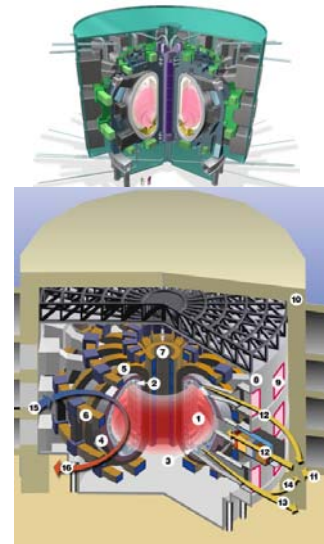
- Essentielle Physik & Technologieträger für DEMO

DEMO: Demonstration der Machbarkeit eines Fusionskraftwerks (FPP)

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

FPP: Kommerzielles Fusionskraftwerk

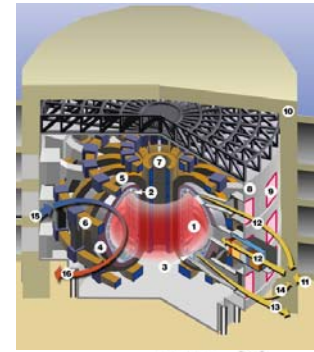
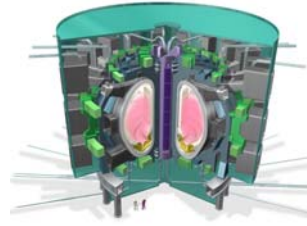
- Stellarator oder Tokamak



EU "Fahrplan" – zentrale Aspekte

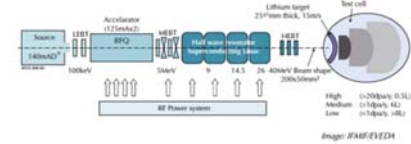
ITER

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



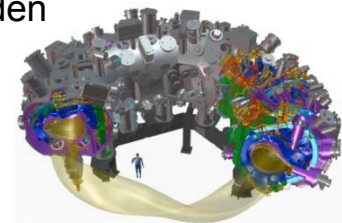
DEMO

- 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

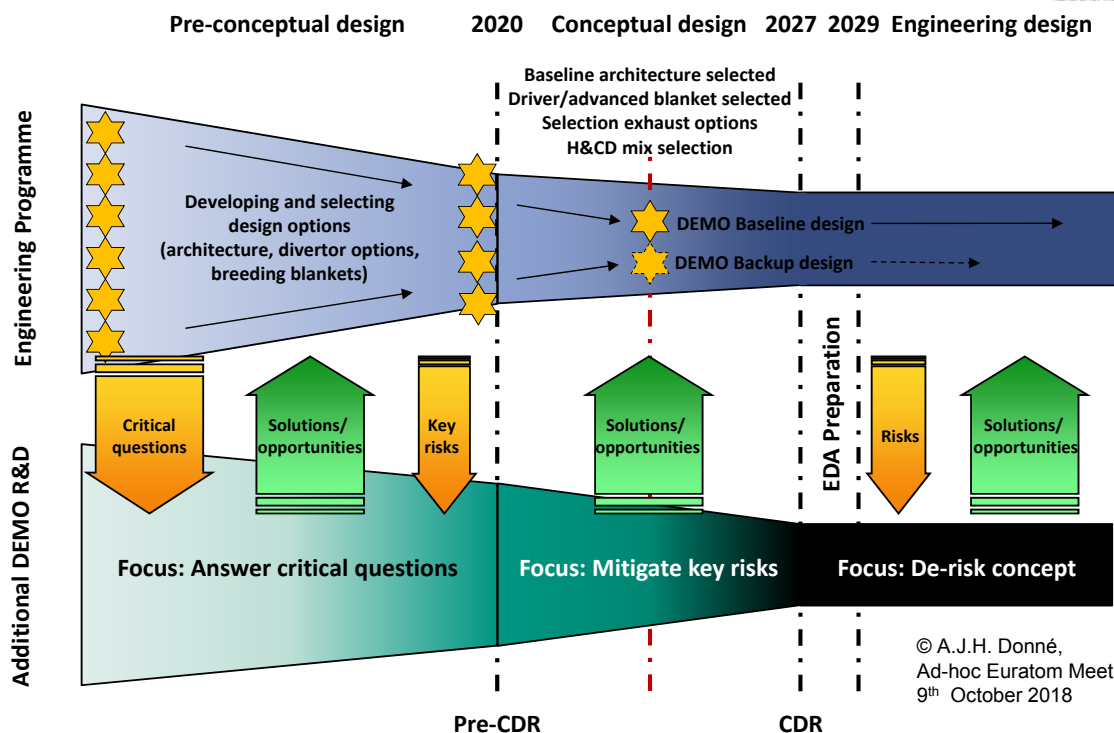


Stellarator

- 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:

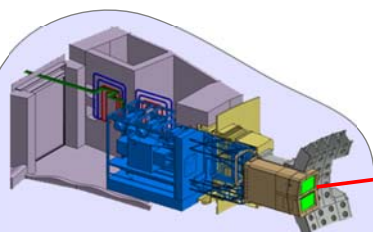
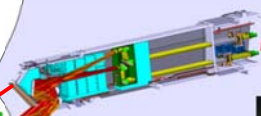
- Technologieentwicklung zur Realisierung der Fusion als Energiequelle
- Arbeitsgebiete am KIT
 - Ingenieurtechnik - „Fusion Engineering“- vom Kern zum Kraftwerk
 - Blankets - Design –Kühlung- Brutmaterialien
 - Divertoren – „Auspuffrohr“ des Reaktors
 - Magnete – vom Draht zum Magneten
 - Heizung
 -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

KIT- Beiträge zu ITER

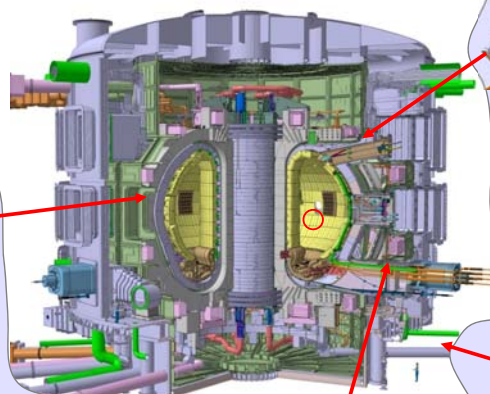
■ Sicherheitsforschung



- Plasmaheizung & Stromtrieb:
- Gyrotrons
- ECRH Upper Launcher



- Testblanket Modul & Systeme
- Brennstoffkreislauf
- Vakuumsysteme



- Magnetentwicklung vom Kabel bis zum Test
- Stromzuführungen



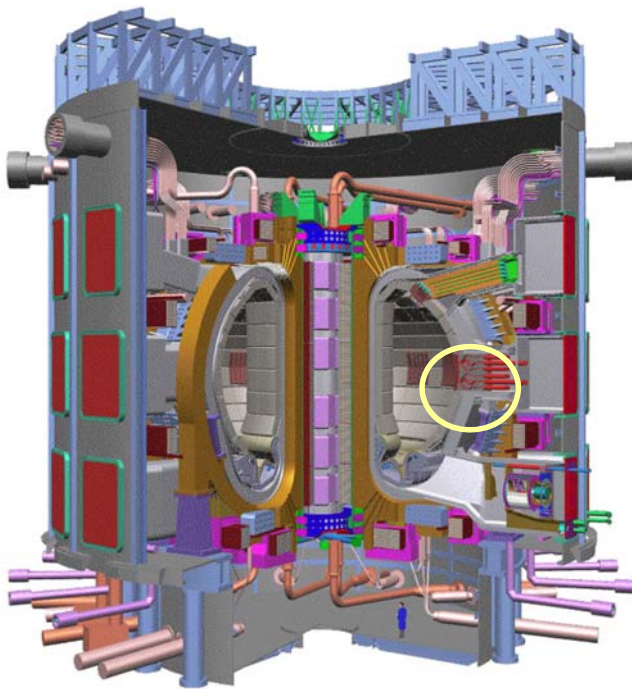
- **Plasma Heizung und Stromtrieb**
 - ECRH Quellen Entwicklung
 - ECRH Transport
- **Fusionsbrennstoffkreislauf**
 - Tritium-Handling-Messung
 - Vakuumsysteme-
Vakuumpumpen
- **Plasmanaher Komponenten**
 - Brutblanket
 - Divertor
 - Hochtemperatur -
Heliumtechnologie
- **Kraftwerksdesign u. -effizienz**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

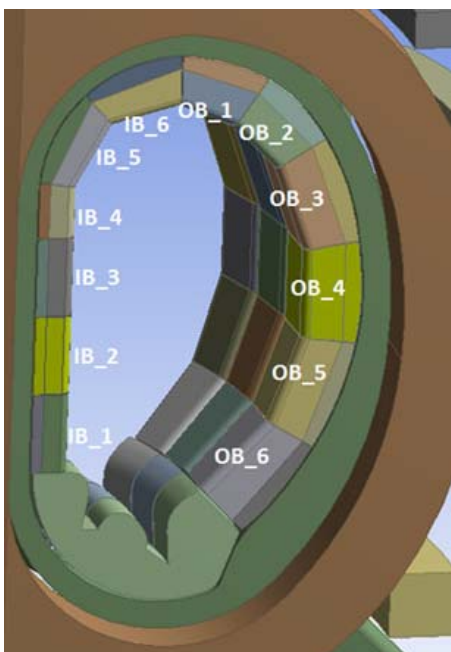


ITER: Tritium-Versorgung extern,
(aber Erprobung von Brutkonzepten für DEMO)

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
-

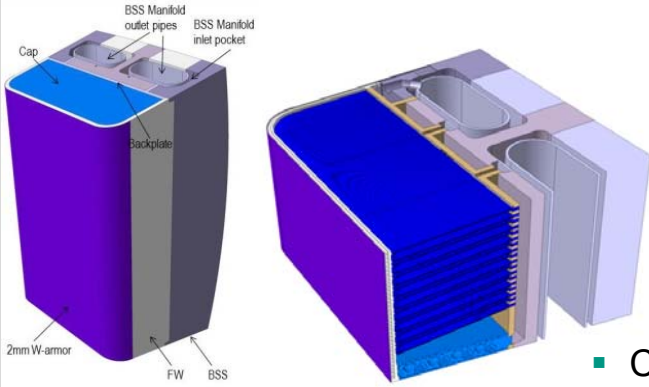
Randbedingungen

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

Konzepte ➔ modularer Aufbau

- Festes Brutmaterial /Heliumkühlung
- Flüssiges Brut-/Kühlmaterial

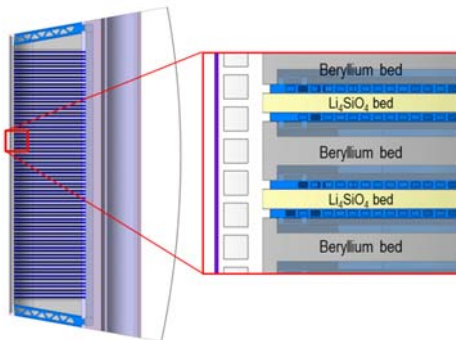
Blankets – das “Herz” des Reaktors



Beispiel : Helium gekühltes Schüttbett -Blanket

Blanketauslegung (Design) und Analyse:

CAD Auslegung



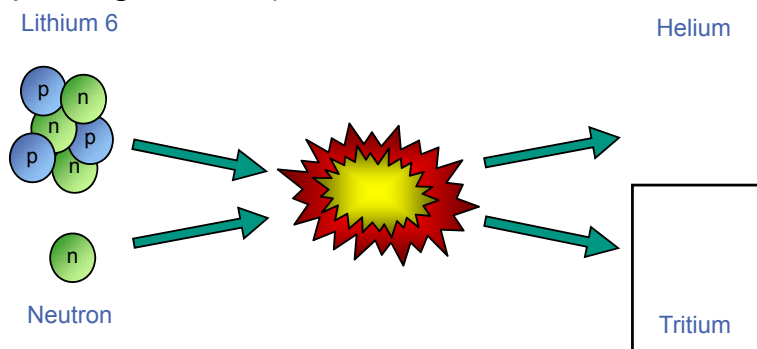
Berechnete therm. und mech. Spannungen

- 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).

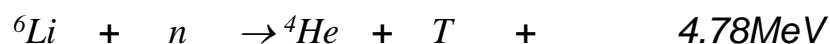
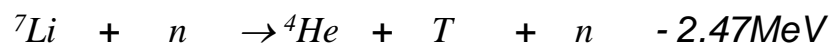
Blanket-das “Herz” des Reaktors

Blanketauslegung -“Brutfunktion“

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



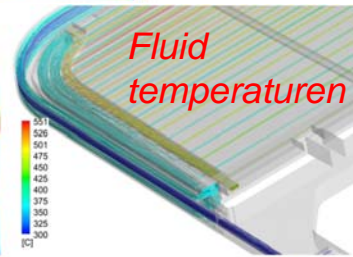
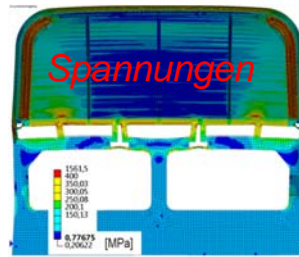
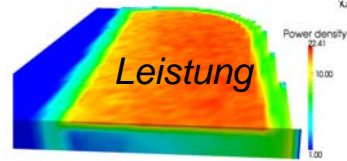
▪Potentielle Brutreaktionen



Blanket- das "Herz" des Reaktors -Aufbau

Auslegungs-Analyse

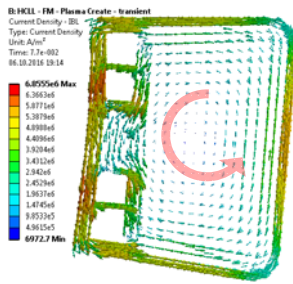
- neutronische, thermo-hydraulische und strukturmechanische Belastung.
- Beurteilung anhand Auslegungswerkzeugen (RCC-MRx, SDC-IC).



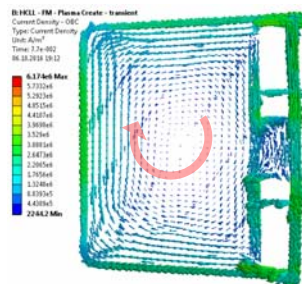
Nukleare Leistung, Temp. und Spannungsverteilung im HCPB

Inboard

Outboard



Wirbelstromverteilung bei einer Plasmadisruption



EM Analyse des Blankets:

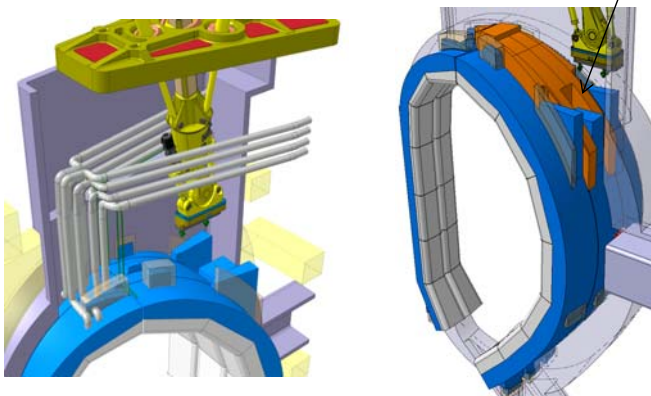
- Disruption
- Vertikale Plasmaauslenkung (VDE)
- Elektromagn. Kräfteverteilung (Ferromagnet. Materialien)

Beispiel : Helium gekühltes Schüttbett -Blanket

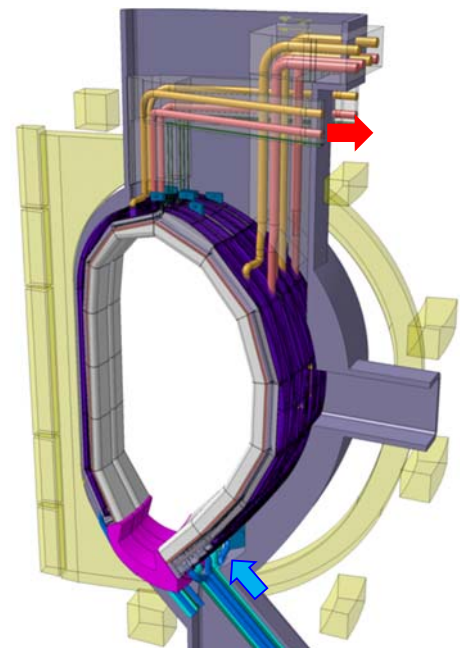
Blanket- das "Herz" des Reaktors - Reaktorintegration

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)

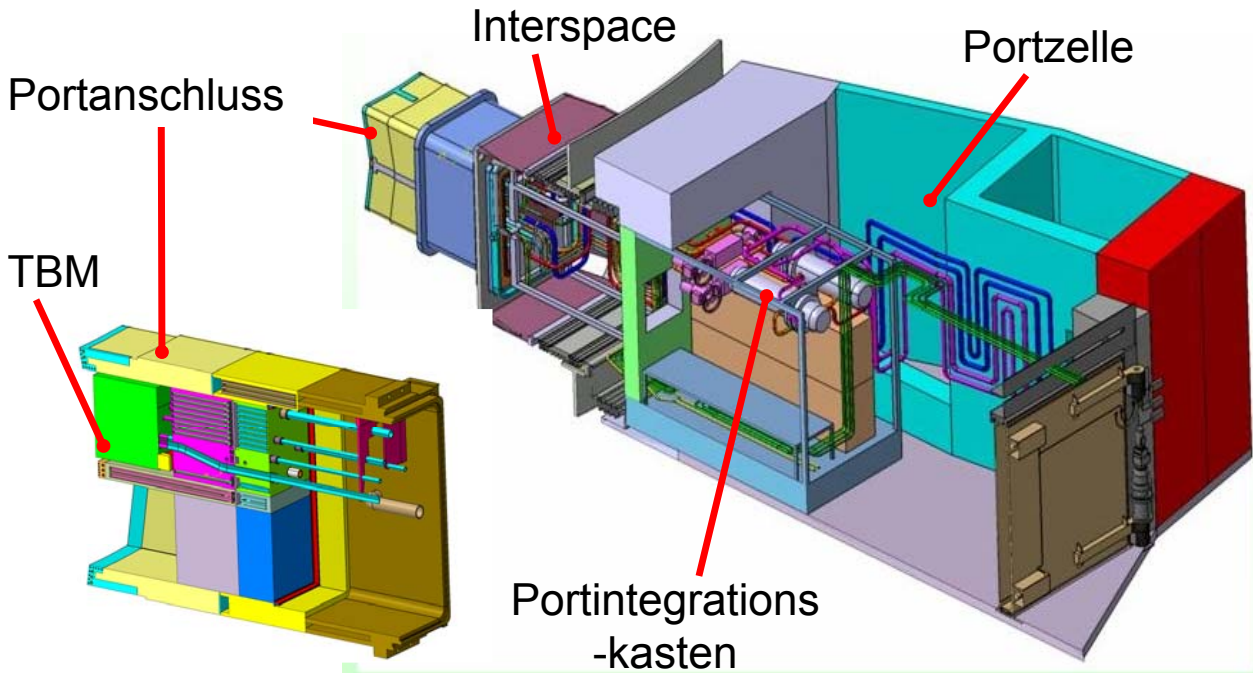


Blanket Rohrleitungslayout

Blanket- das "Herz" des Reaktors

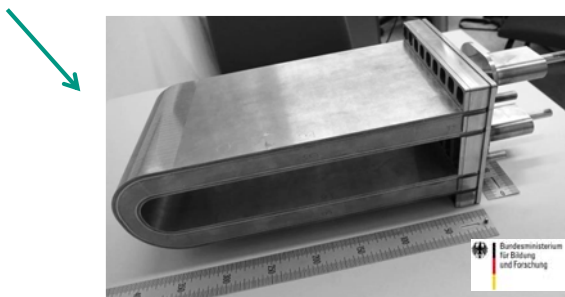
Funktionsnachweis in ITER

- 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

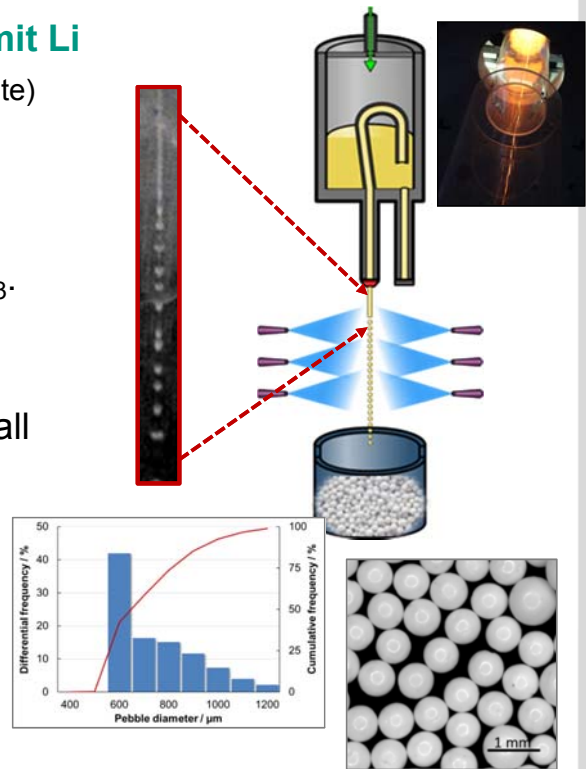


Prozessentwicklung

- 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:

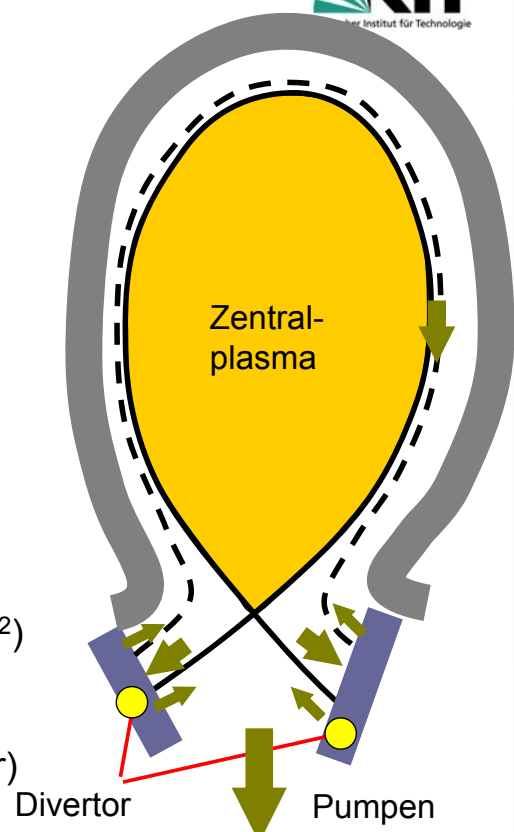
- Abfuhr der Asche (He, Partikel) = „Auspuff“

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

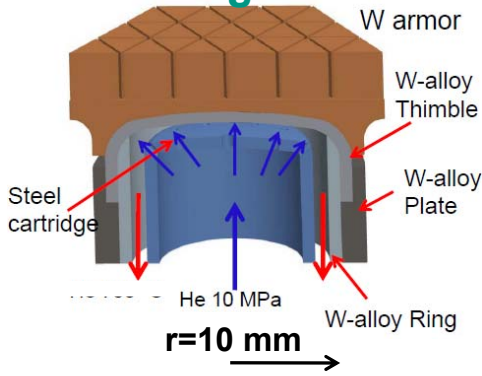
Techn. Herausforderungen Divertor

- hohe Temperaturen
- hohe Flächenleistungsdichten (10-20MW/m²)
- hoher Ionenbeschuss (geladene Partikel → Sputtern der Wand)
- hohe Neutronenschädigung (ca. 15dpa/Jahr)
- starke therm. Wechselbelastung



Divertor-Entwicklung

Basisdesign

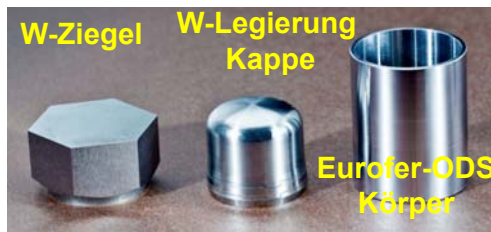


Validierung (10MW/m²)

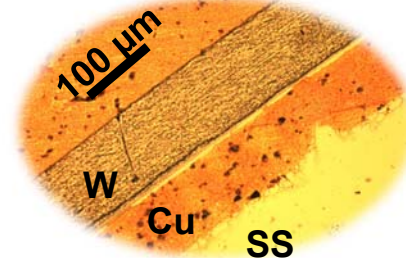


Reaktorskalierung

Herstellung Einzelteile



Fügeverfahren



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



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

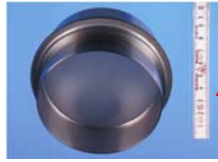
Beschleunigung: ca. 80 kV

Elektronenstrahl: ca. 80 A

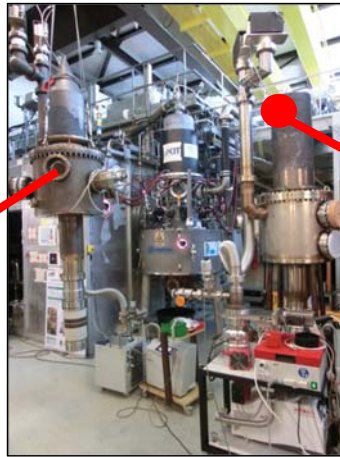
50

Mikrowellenheizung: Gyrotronentwicklung

Elemente



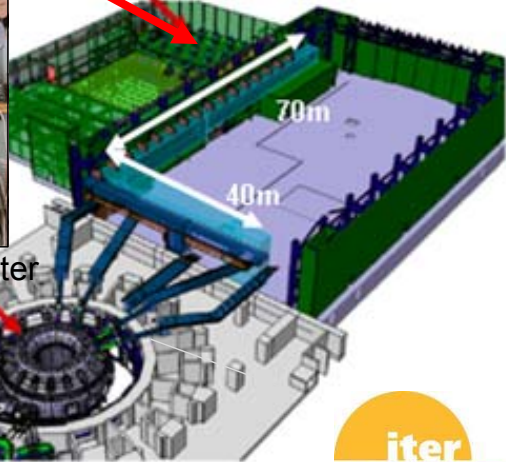
Gyrotron -Fenster



Gyrotron

Vakuumbehälter

Gyrotronhalle

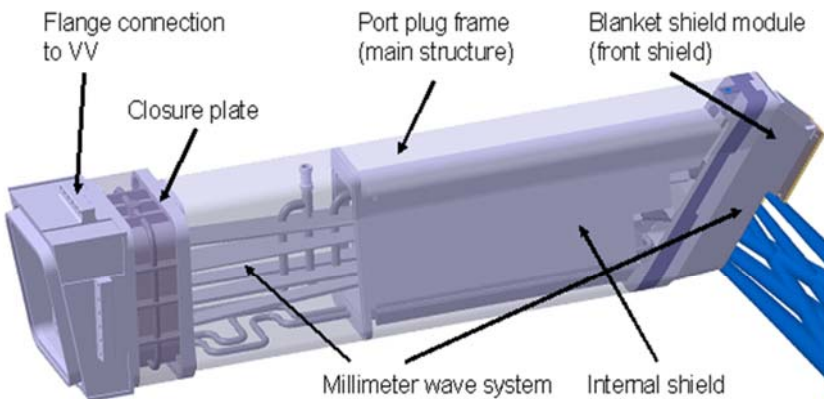


Einkopplung ins Plasma

Torusfenster



Mikrowellenheizung: ECRH-Launcher



technischer Aufbau des Launchers

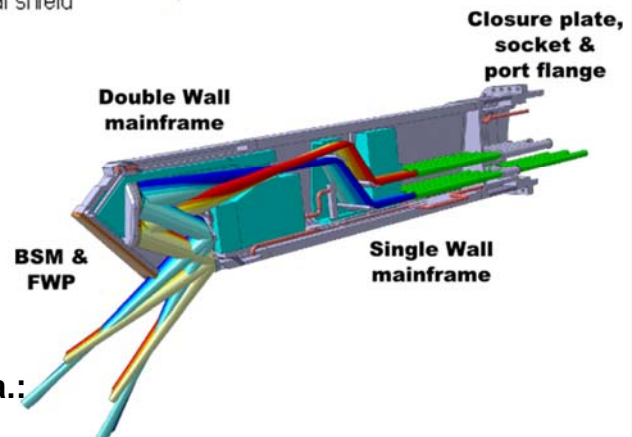
Funktion:

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

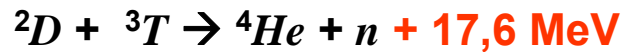
Ziel

- 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

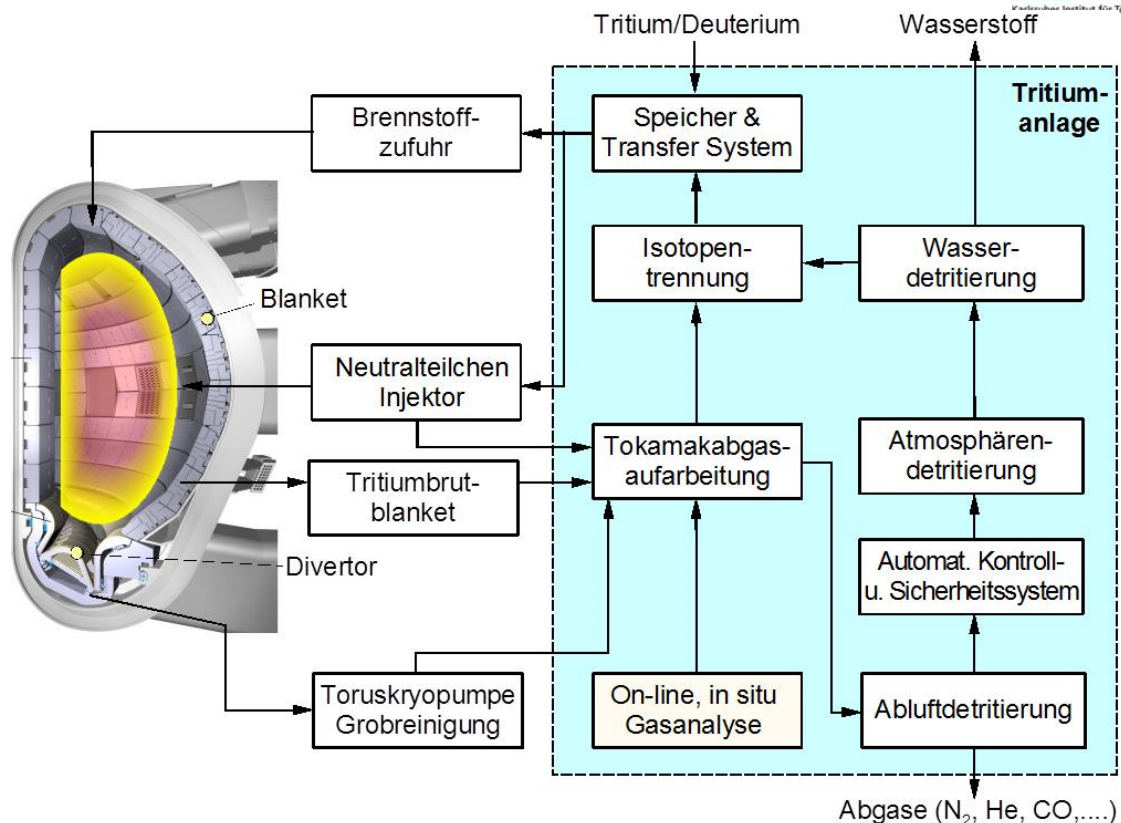
- neutroneninduzierte Aktivierung im Kühlwasser (☹)
- im Brutblanket (☺ , bei ITER: nur Testmodule)
- Transmutation im Strukturwerkstoff (☹)

Eigenschaften von Tritium:

- weicher 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")

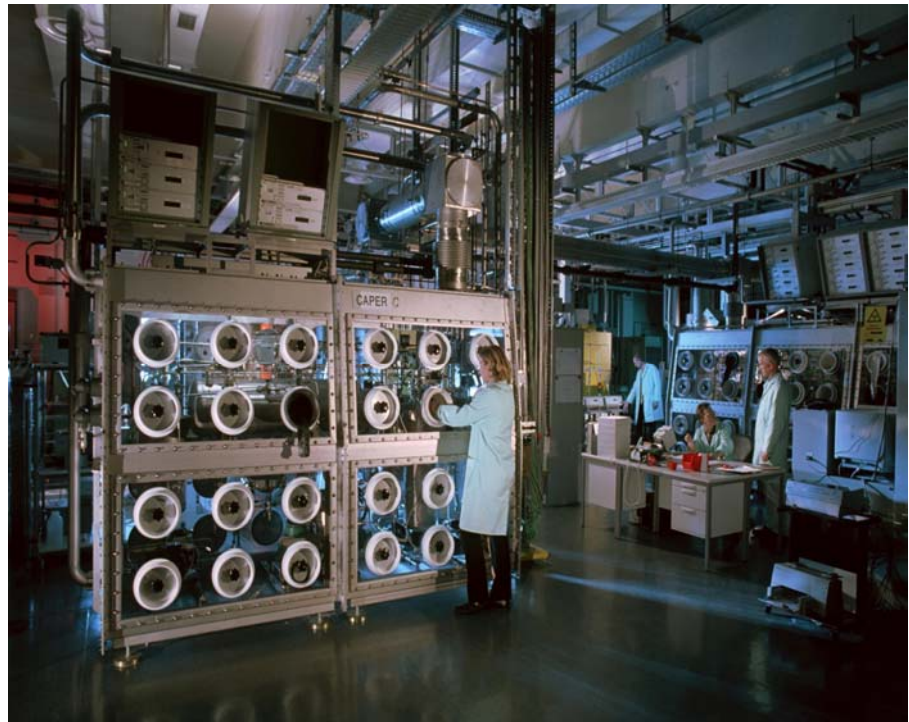


ITER-Tritium-Kreislauf ("Fuel Cycle")

TLK –

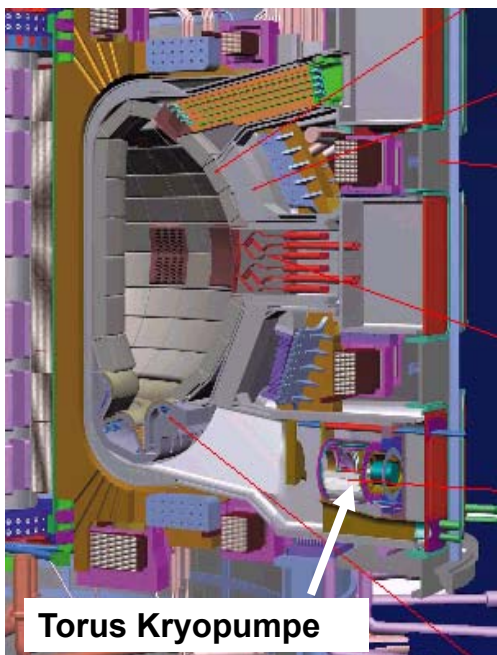
Tritium-
Labor
Karlsruhe

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



55

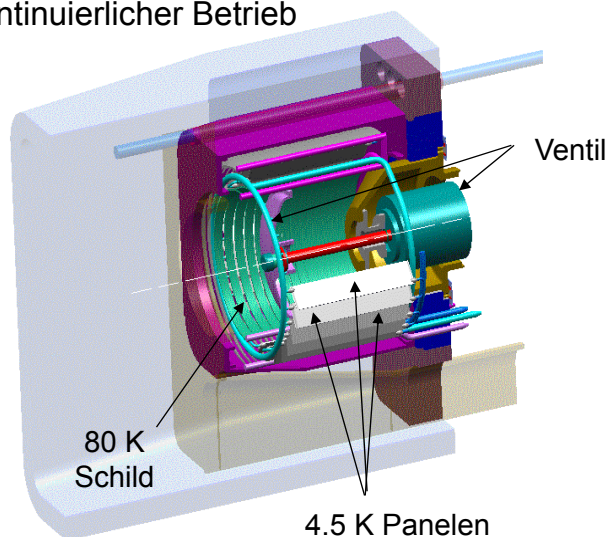
ITER Brennstoffkreislauf - Kryopumpen



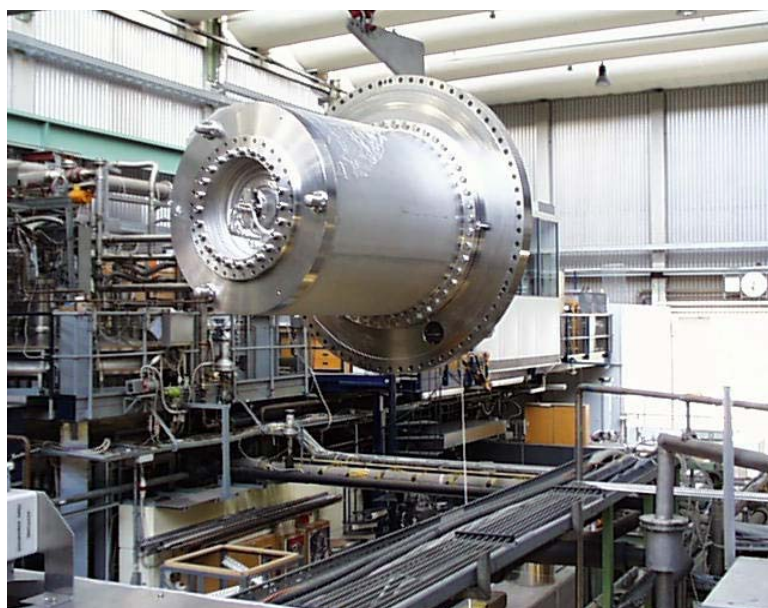
ITER-Torus-Kryopumpe: ITeP-Entwicklung

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 :

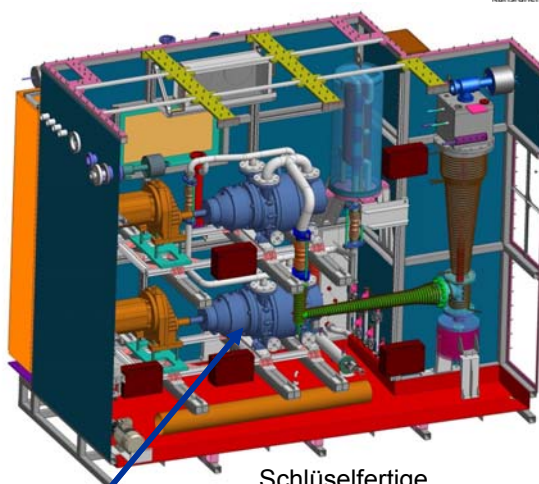
- diskontinuierlicher Betrieb

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



Materialinnovation

Plasma-Divertormaterial: 1.Option Wolfram (W)

Wolfram inhärent:

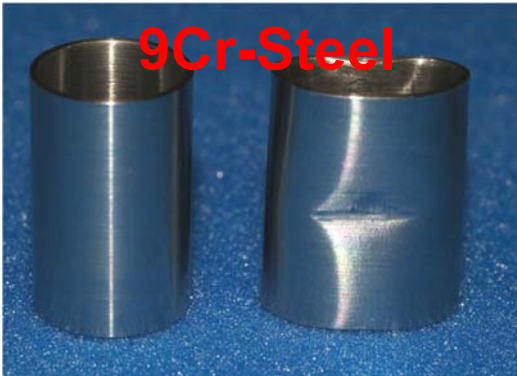
- spröde
- rekristallisiert bei höheren Temperaturen
 ➔ erneute Versprödung



Strategien

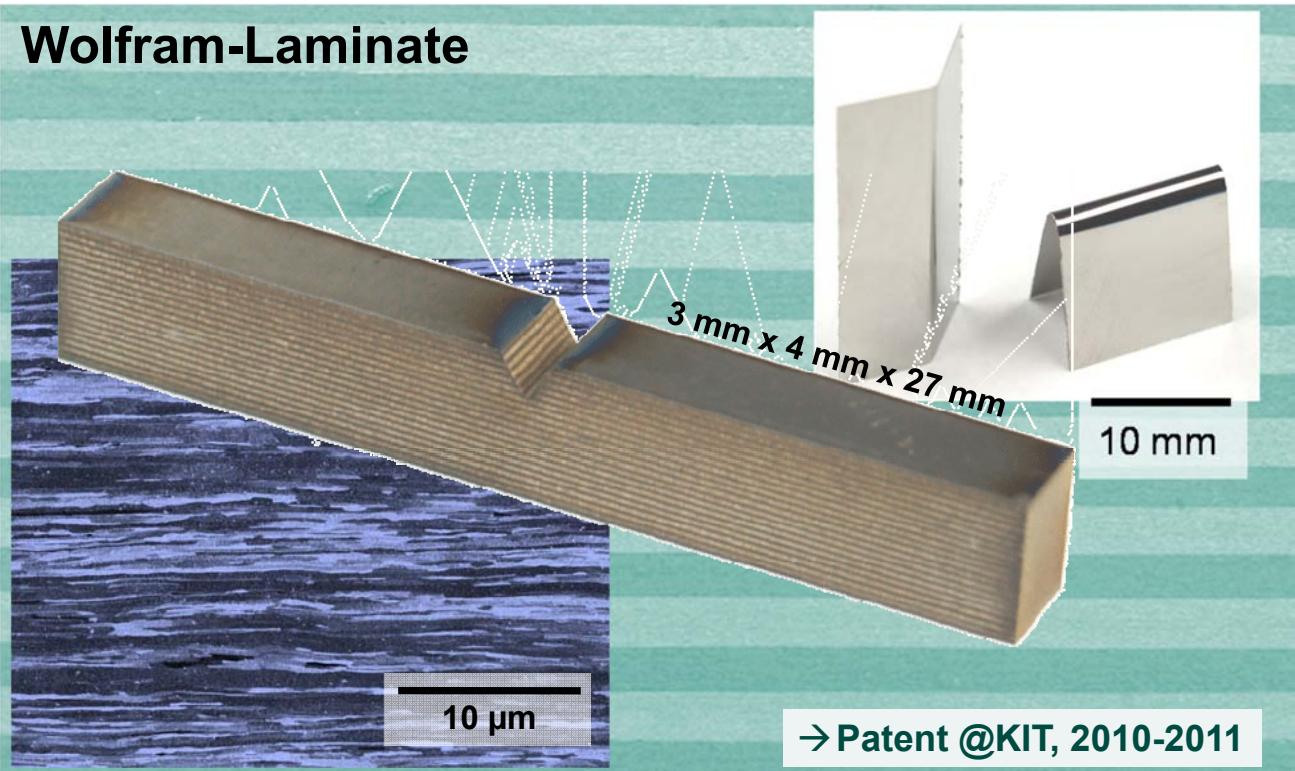
- Nanostrukturierung
- Komposite
- Legierung

Problem: Mikrostrukturierung



Materialinnovation

Wolfram-Laminate



Kann man reines Wolfram biegsam (duktil) machen ?

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



Wolfram, **extrem kaltgewalzt**
Test bei Raumtemperatur

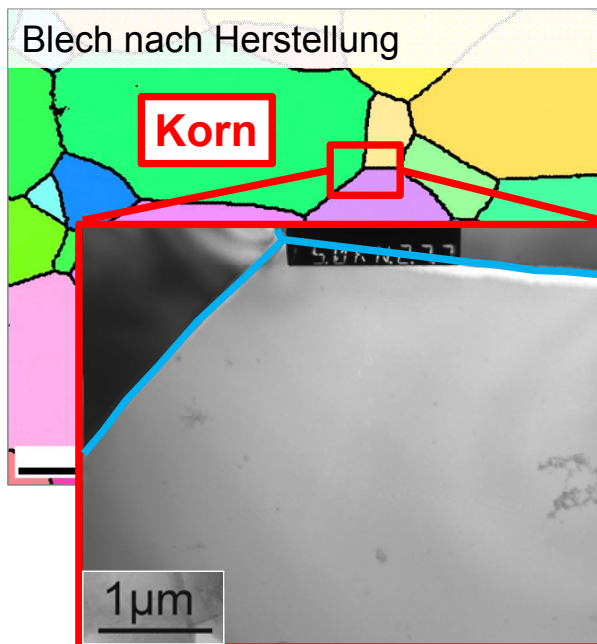


- Warum wird Wolfram nach **extremem Kaltwalzen** biegsam (duktil)?

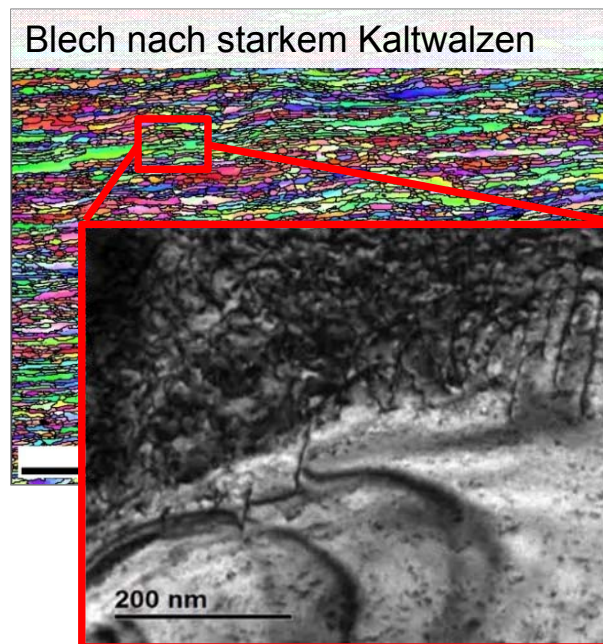
© Jens Reiser; europäischer Innovationspreisgewinner , 2018

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

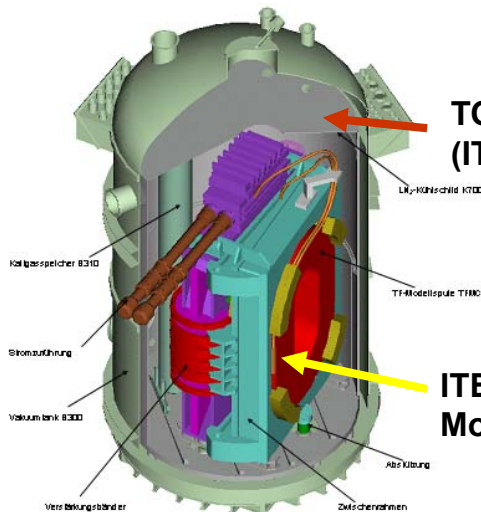
Strom 80.000 A

Spannung* 3 V

Betrieb bei -270°C

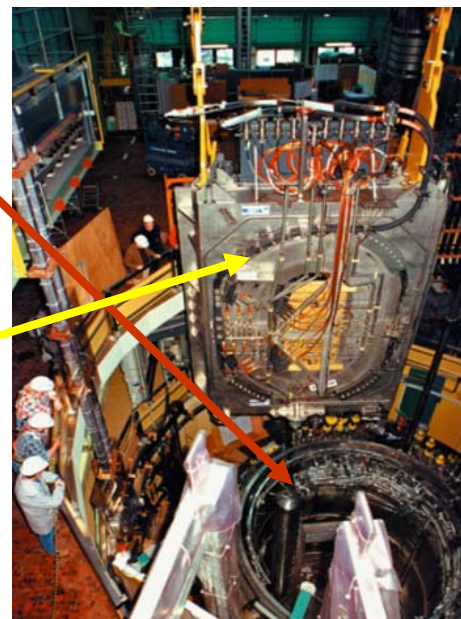
*nur nötig wegen normalleitender Zuleitungen

Supraleiter und Spulen-Experimente



TOSKA-Anlage (ITP)

ITER TF-Modellschule



TFMC-Tests 2001:

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



Kabel: Nb_3Sn in Edelstahlhülle, mit Kühlkanal.

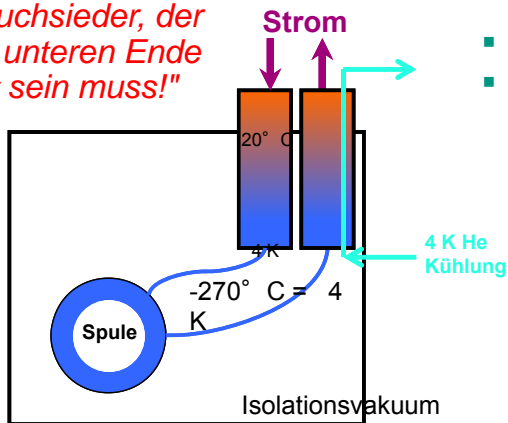
Wie kommt der Strom zu den kalten Magneten?

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

Der Strom muss also über **Stromzuführungen**

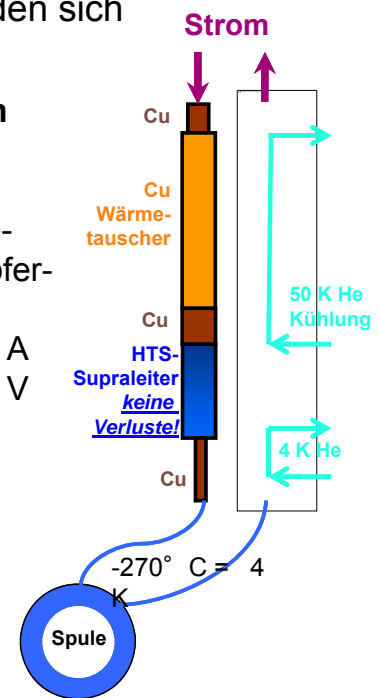
- elektrisch isoliert
- ins Vakuum und
- in die Kälte

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



KIT: Stromzuführungen mit Hochtemperatur-Supraleiter!

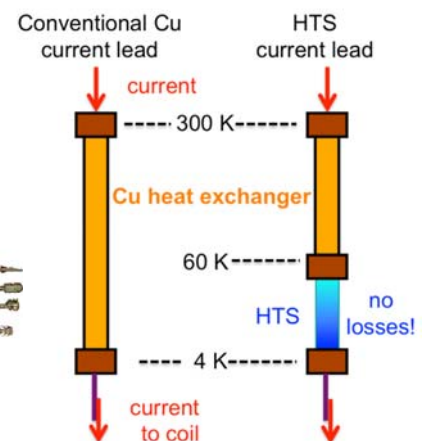
- 5x geringerer Energieverbrauch als bei Kupfer-Stromzuführungen
- Strom max. 80.000 A
- Isolation max. 13.000 V



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



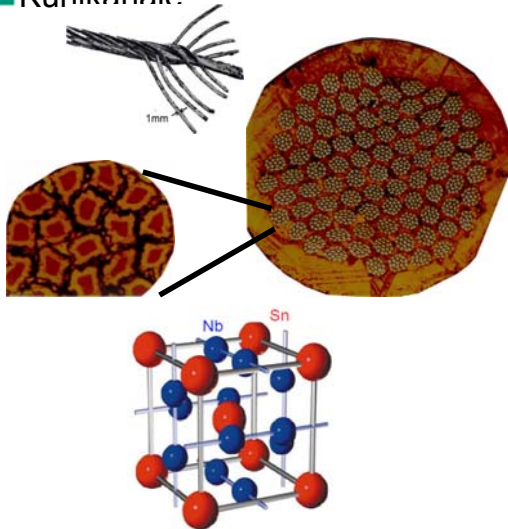
Hochtemperatursupraleiter (HTS)

Warum nicht den ganzen Reaktor aus HTS –Spulen bauen ?

- HTS stehen noch am Anfang der Entwicklung

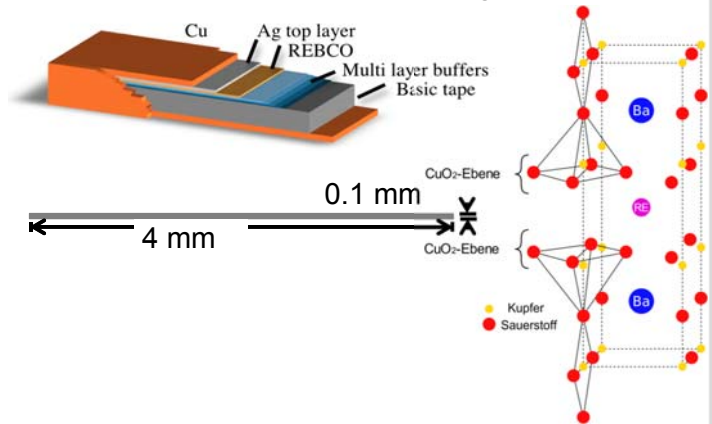
Techn. Supraleiter (Metalle $NbTi$, Nb_3Sn)

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



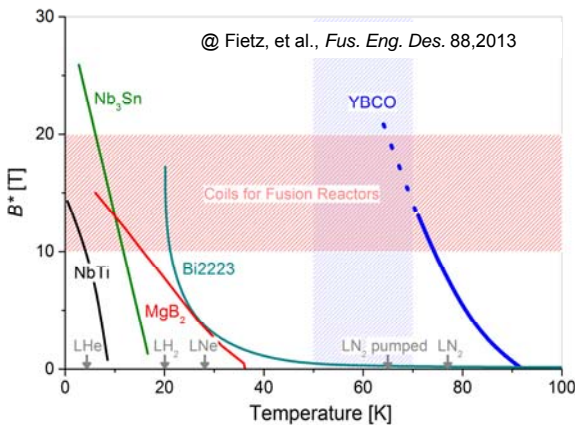
HTS Supraleiter (z.B. REBCO)

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

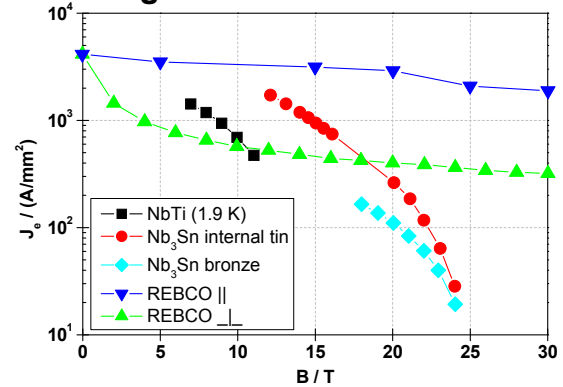


Hochtemperatur-supraleiter (HTS)

- 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



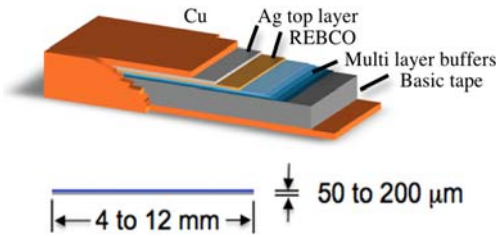
Charpy-Testing



Hochtemperatur-supraleiter (HTS)

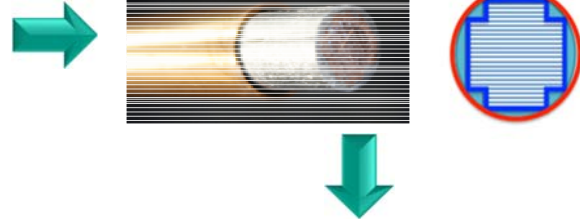
Wie kommt man mit HTS zu einem Kabel ?

HTSL - herstellbar als dünne Bänder



Bildung eines Kreuzleiters

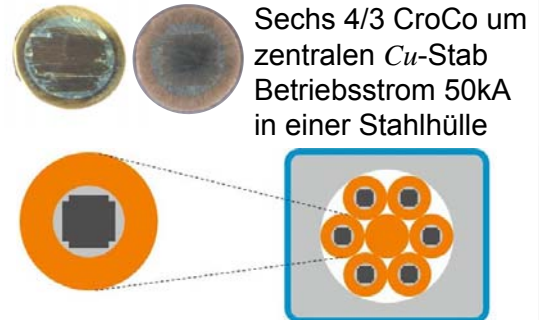
(CrossConductor CroCo) z.B. aus 3 und 4 mm breiten Bändern



Validierung am Prüfstand

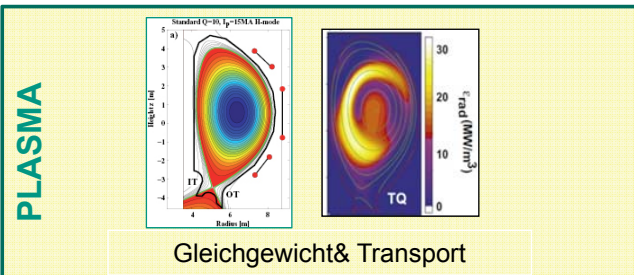
	6/4 CroCo	4/3 CroCo
Zahl REBCO Bänder	22 x 6 mm	28 x 4 mm
REBCO tapes Durchmesser	10 x 4 mm	10 x 3 mm
	~10 mm	7.7 mm
I_c (4.2 K, B 12 T, c)	> 10 kA	~ 10 kA

Kabelkonzept



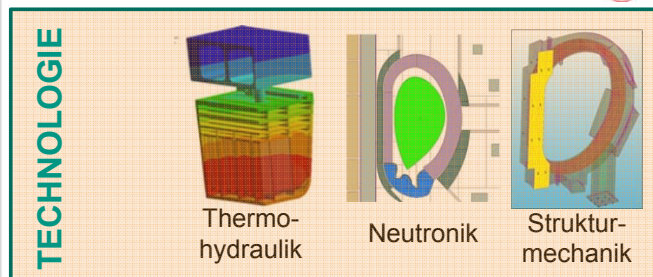
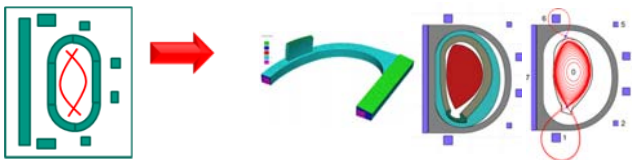
Reaktorauslegung

Beschreibung des Reaktorkerns



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

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

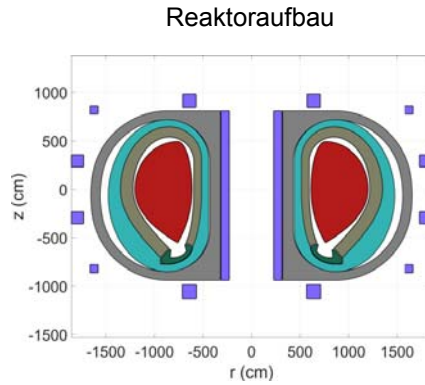


Reaktorauslegung

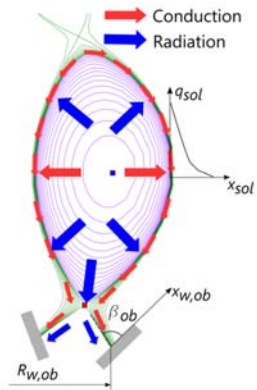
Fähigkeiten des Systemcodes

- Modelle:
 - Plasma
 - Magnetfelder
 - Blanket
 - Divertor
 - Brennstoffkreislauf

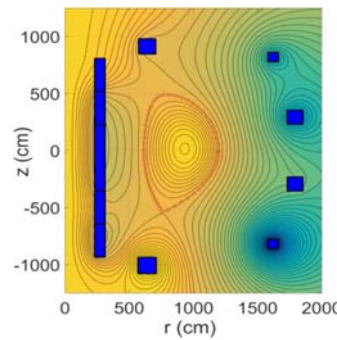
- Analysewerkzeuge:
 - Reaktorgeometrie
 - Leistungsflüsse
 - Neutronik
 - Magnetfeldkonfiguration
 - Kostenmodell



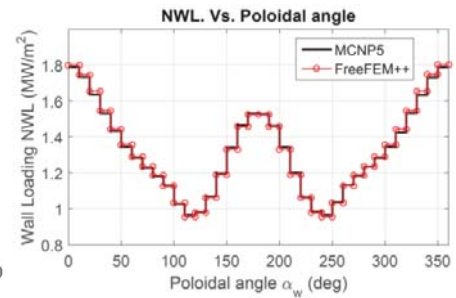
Plasmaphysik & Divertor



Magnetfeldkonfiguration



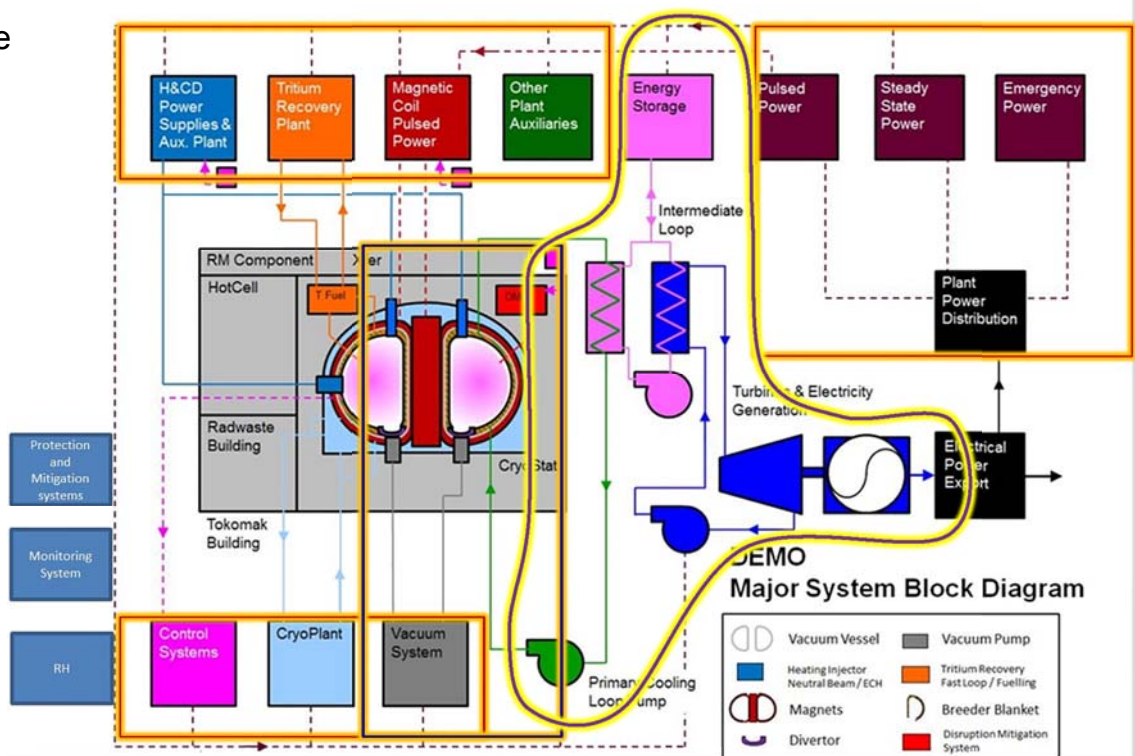
Neutronik



Reaktorsystem mit Hilfsaggregaten

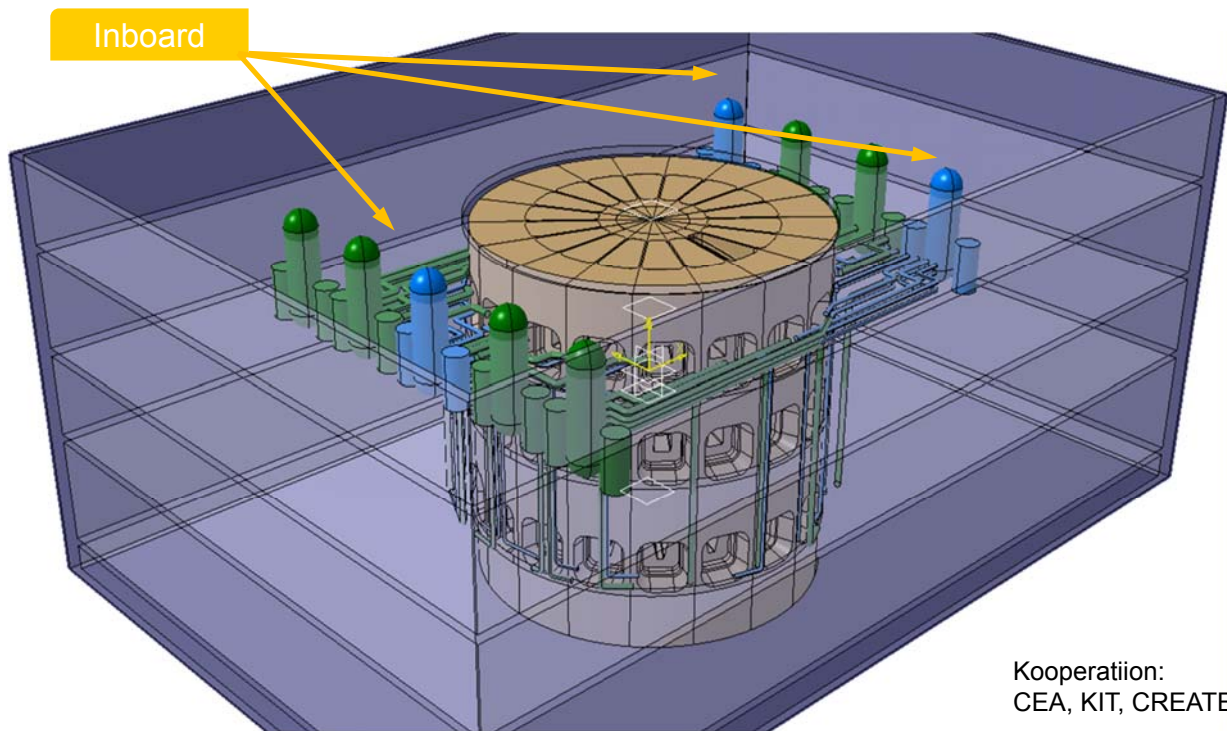
Verknüpfung des Kraftwerks Aggregaten & Leistungserzeugung

- Energie
- Fluid
- Logik



Reaktorsystem mit Hilfsaggregaten

- Arrangement des primären Wärmeabfuhrsystems



Kooperation:
CEA, KIT, CREATE

Reaktorsicherheit

Sicherheitsziele = Vermeidung radiologischer Gefährdung

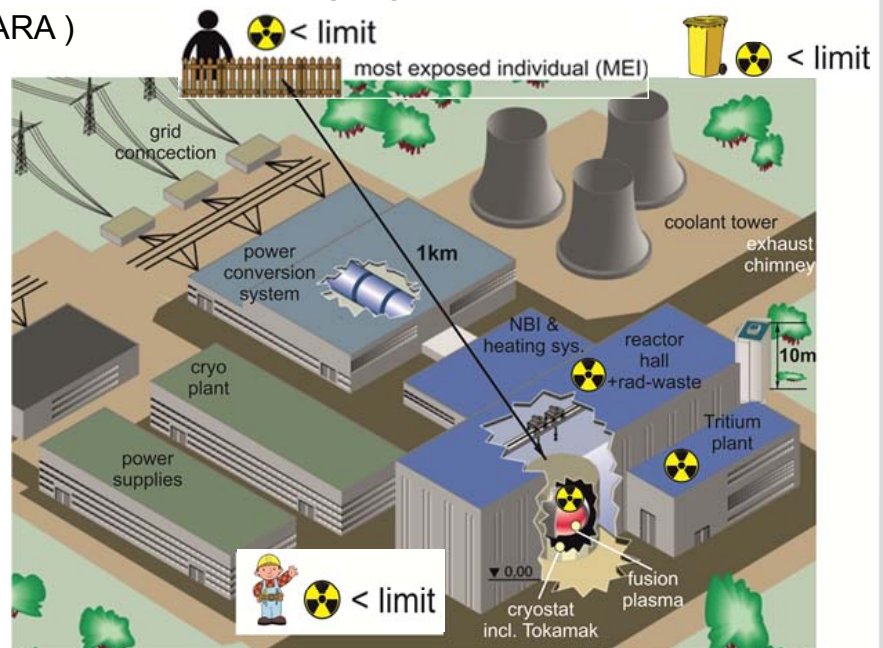
- Öffentlichkeit & Umwelt
- Personal (ALARA-principle)
- Radioaktiver Abfall (ALARA)

Mittel

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

➔ alle Bestandteile der
KIT Forschung

Auslegung eines Fusionskraftwerks



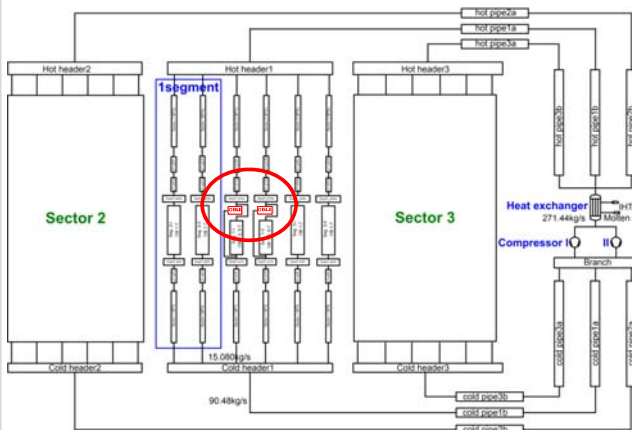
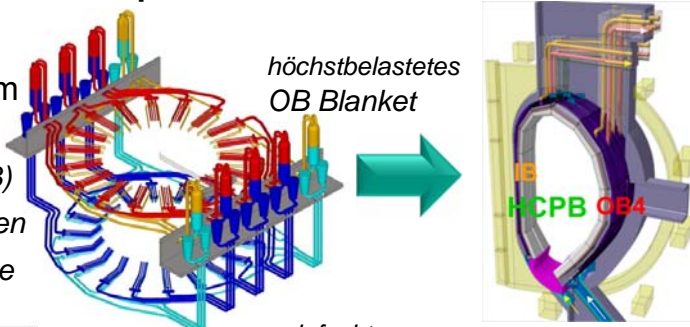
2 Integrale Sicherheitsanalyse

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

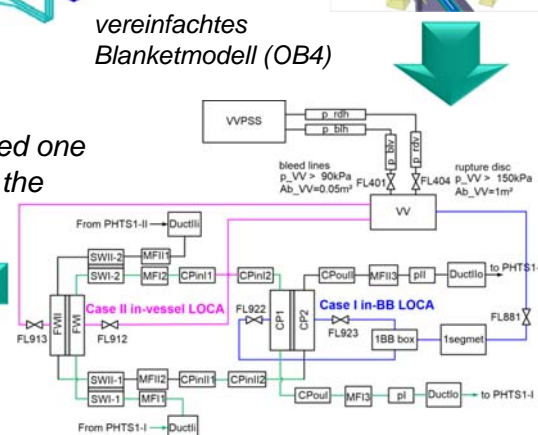
- Analyse eines Teilsystems

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



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 einfaches Modell– System

➔ Verifikation

- Experiment

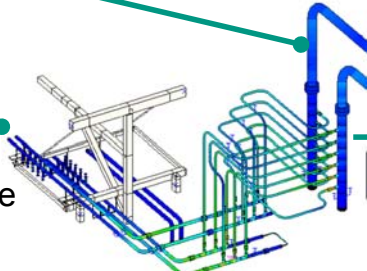
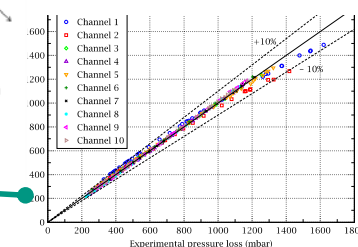
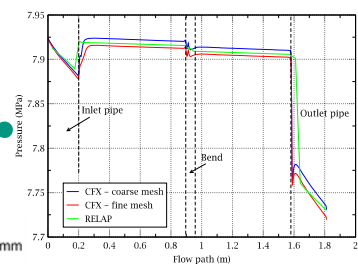
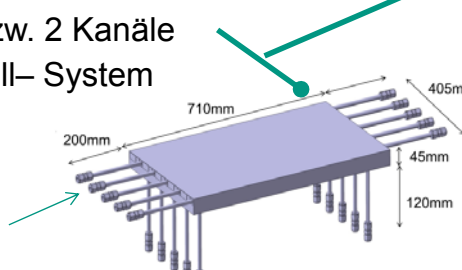
- Design Teststrecke
- Isotherme Validierung

- Integration in Heliumkreislauf

- Einzelerperiment

- Systemanalyse
- volle 3D Sicherheitsanalyse

➔ Validierung

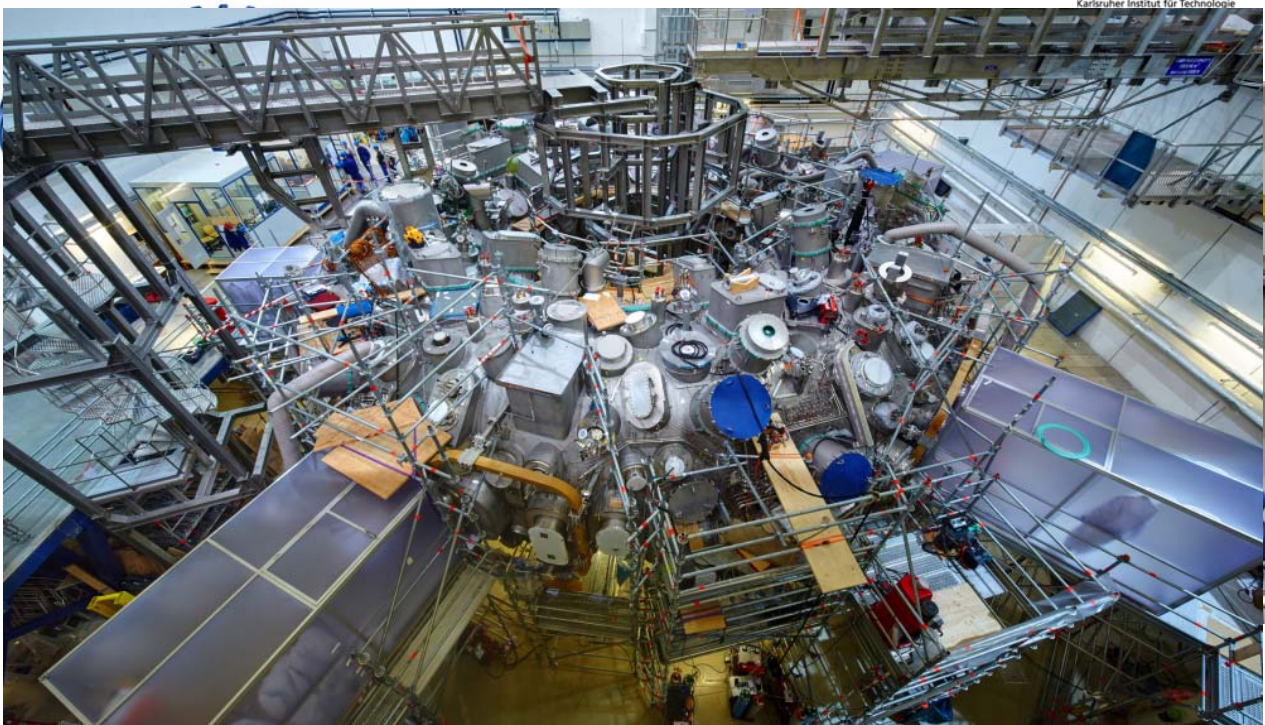


AKTUELLE FUSIONSPROJEKTE

Stand von Wendelstein und ITER

77

Wendelstein – Ein Projekt in Deutschland



- im Gegensatz zum Tokamak sind Stellaratoren intrinsisch stationär

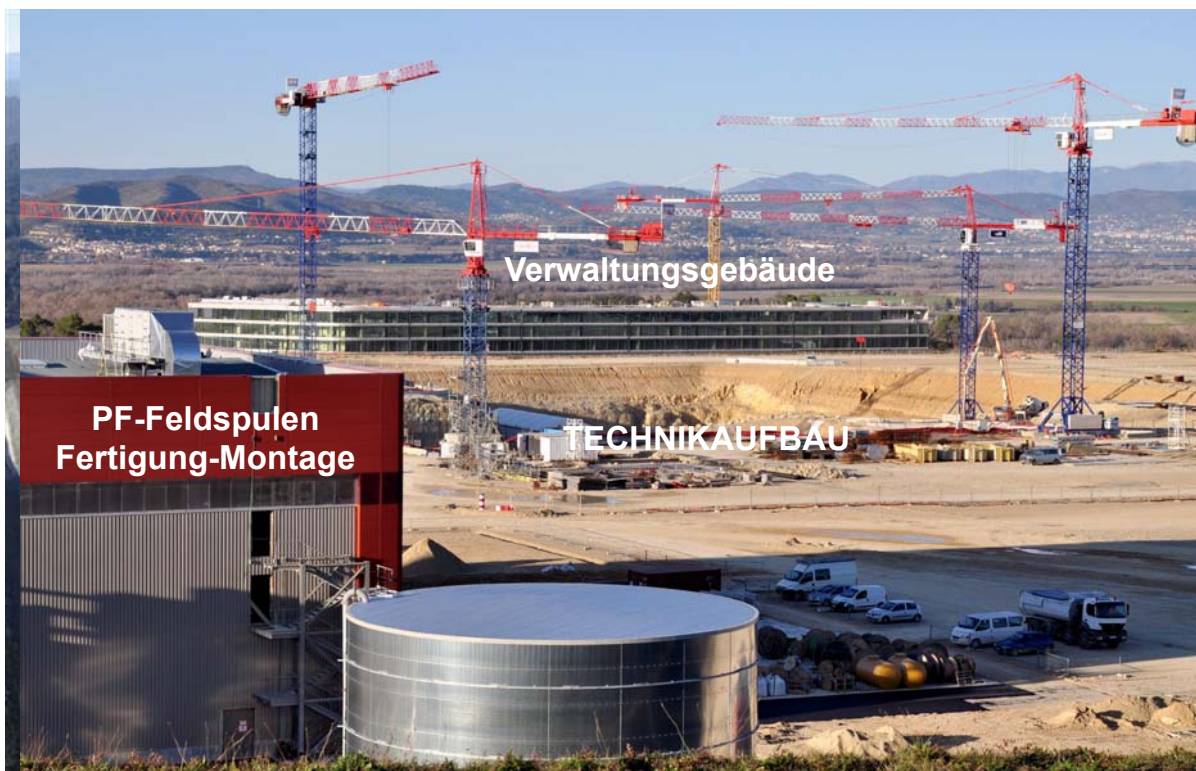
78

Wendelstein

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



ITER - Standort 2011



ITER - Standort 2014



ITER - Standort 2017





■ 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

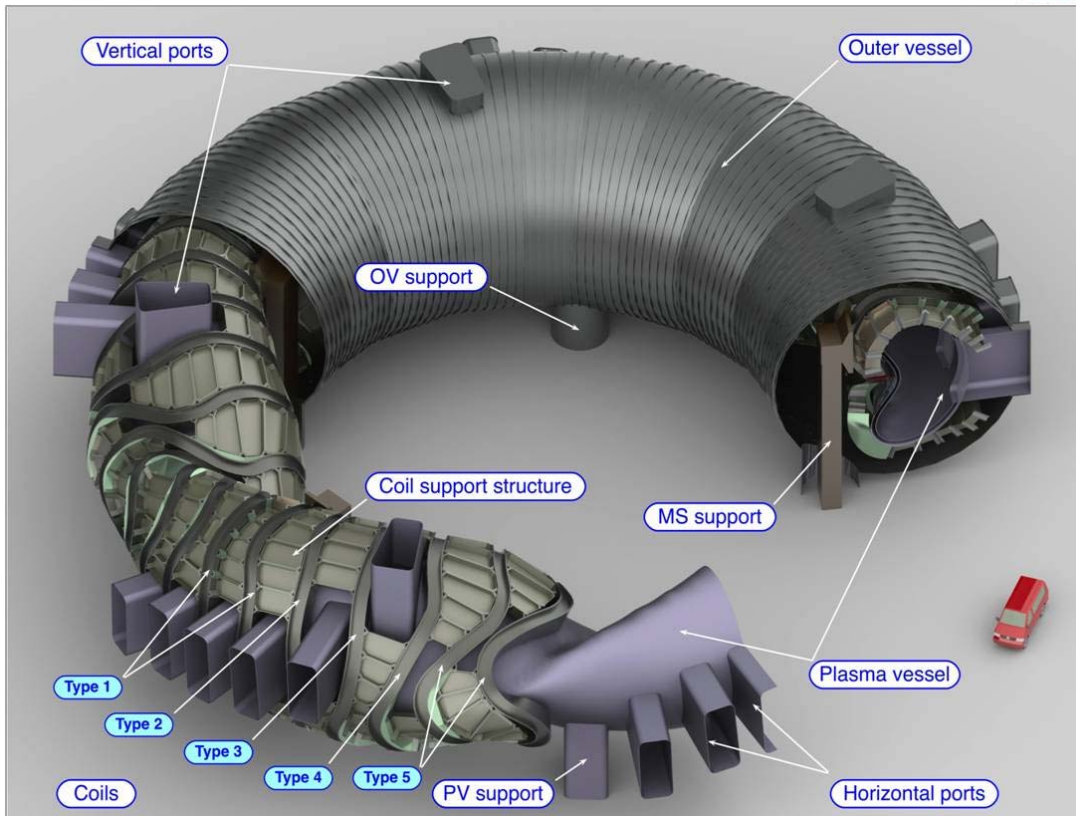
- praktisch unbegrenzte Ressourcen
 - geographische Gleichverteilung der Ressourcen
 - kein CO₂-Ausstoß
 - keine Kritikalität – Unfallfolgen auf die Anlage beschränkt
 - kein langlebigen Spaltprodukte (Aufbereitung, Endlagerung)
 - Zwischenlagerung ~60-100 Jahre

 - 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,.....)

„Take away“

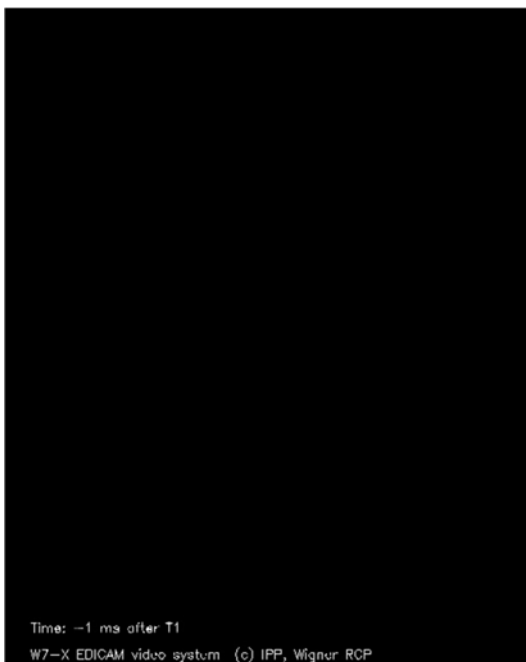
- Fusionsforschung muss Bestandteil einer diversitären Energieforschung einer Technologienation wie Deutschland sein. Sie sichert damit nicht nur den Erhalt einer künftigen Energieoption,
- sondern sie gewährleistet die Teilhabe und Beteiligung an zentralen weltweiten Entwicklungen auf unterschiedlichen 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