

Aktueller Stand von Entwicklungen im Bereich Kernfusion (aus Sicht der Fusionsneutronik)

Axel Klix



Fusionsreaktoren sind kompliziert, Entwicklung und Konstruktion berühren viele Bereiche (Physik, Chemie, Strahlenschutz, Recht,...)

Dieser Vortrag ist aus der Sicht der Fusionsneutronik:

- Prinzipien der Energiegewinnung aus gesteuerter Kernfusion
- Einige Beispiele von Forschungsreaktoren und das europäische Entwicklungsprogramm
- Brennstoffkreislauf und Tritiumbrutblanket
- Experimentelle Entwicklungsarbeiten in der Fusionsneutronik

Stromerzeugungsprinzip eines Fusionskraftwerkes auf Grundlage Deuterium-Tritium-Reaktion ähnlich konventionellem Kraftwerk:

Wärmeproduktion → **Wasserdampf** → **elektrische Generatoren**

Stromerzeugung mittels Kernfusion ist langfristig von Interesse:

- Brennstoffe für einen langen Zeitraum vorhanden (bis zu 3×10^7 Jahre)
- Keine Treibhausgasemissionen
- Kein breites Spektrum langlebiger radioaktiver Abfälle
- Reaktor kann nicht außer Kontrolle geraten, da begrenzte Brennstoffzufuhr

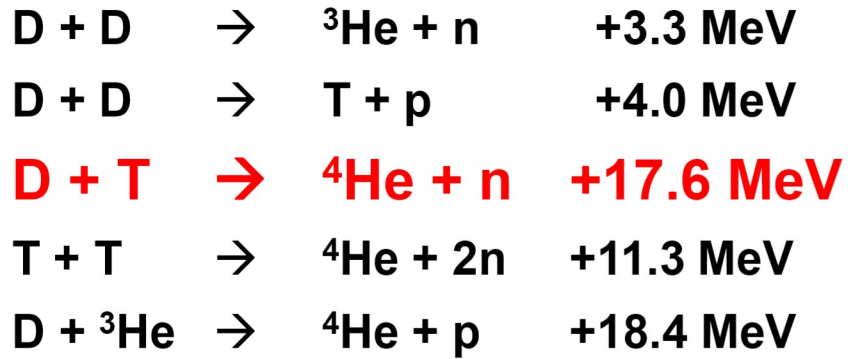
Stromerzeugungsprinzip eines Fusionskraftwerkes auf Grundlage Deuterium-Tritium-Reaktion ähnlich konventionellem Kraftwerk:

Wärmeproduktion → **Wasserdampf** → **elektrische Generatoren**
durch Fusion leichter Atomkerne

Stromerzeugung mittels Kernfusion ist langfristig von Interesse:

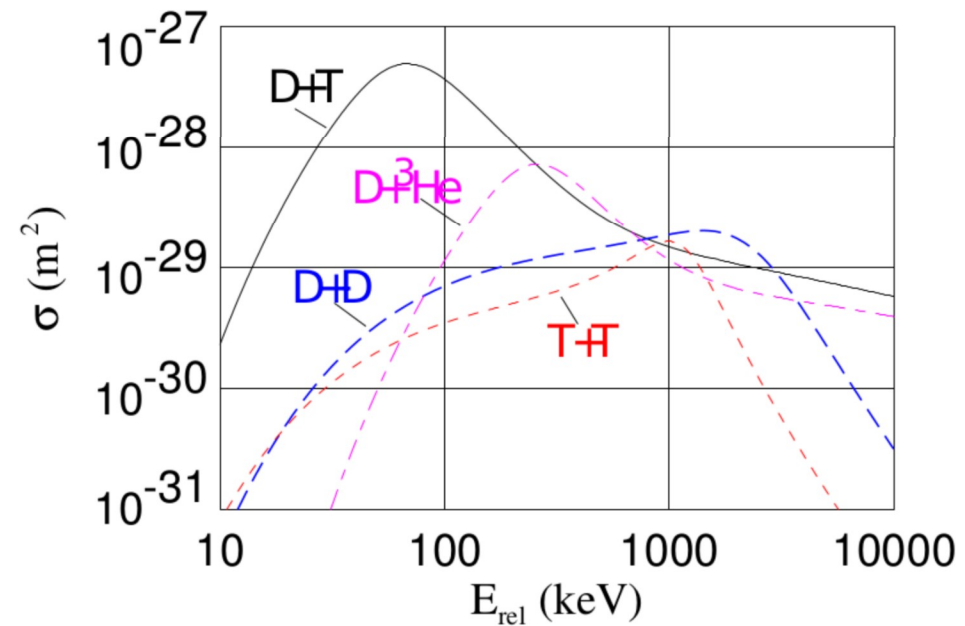
- Brennstoffe für einen langen Zeitraum vorhanden (bis zu 3×10^7 Jahre)
- Keine Treibhausgasemissionen
- Kein breites Spektrum langlebiger radioaktiver Abfälle
- Reaktor kann nicht außer Kontrolle geraten, da begrenzte Brennstoffzufuhr

Welche Fusionsreaktionen?



Für ein Gemisch aus D + T bedeutet das hohe Temperaturen
→ Plasmazustand

D+T ist attraktiv wegen des großen Wechselwirkungsquerschnitts



- Hohe Temperaturen, um 100 Millionen Grad Celsius, technisch beherrscht
- Hoher Gewinn (abgegebene Leistung / Heizleistung)
 - Dichte ausreichend hoch und thermische Isolierung ausreichend gut

Methoden für Plasmaeinschluß

- Magnetisch (Tokamak, Stellarator, Spiegel) + zusätzliches Heizen
- Trägheit (Laserfusion, Bombe)
- Z-Pinch
- Sonofusion
- ...

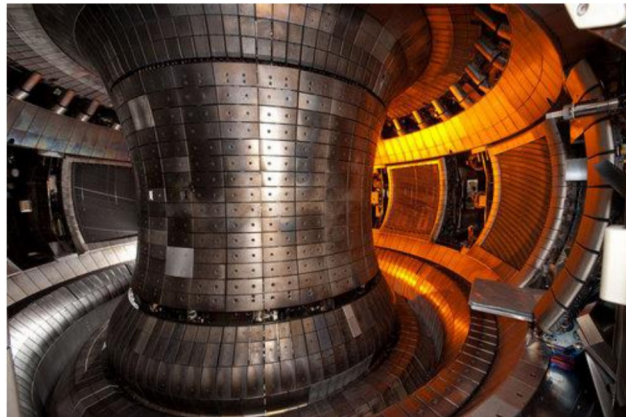
Im weiteren: Fokus auf magnetisch – Tokamak (seit 1962)

Beispiele großer Forschungsreaktoren



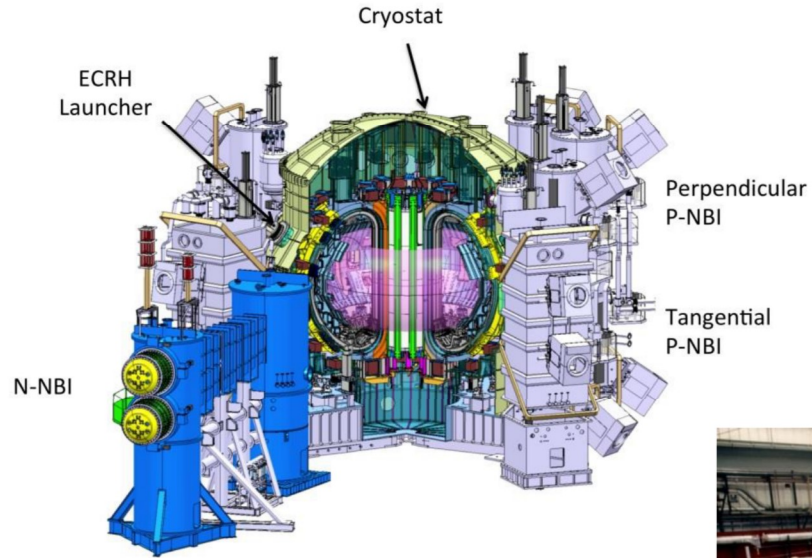
JET (Culham, UK)

Source: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/8/80/JointEuropeanTorus_external.jpg



ASDEX Upgrade (Garching, BRD)

Source: https://pbs.twimg.com/profile_images/2548176563/hccmkozdpcbsgedefb9x.jpeg

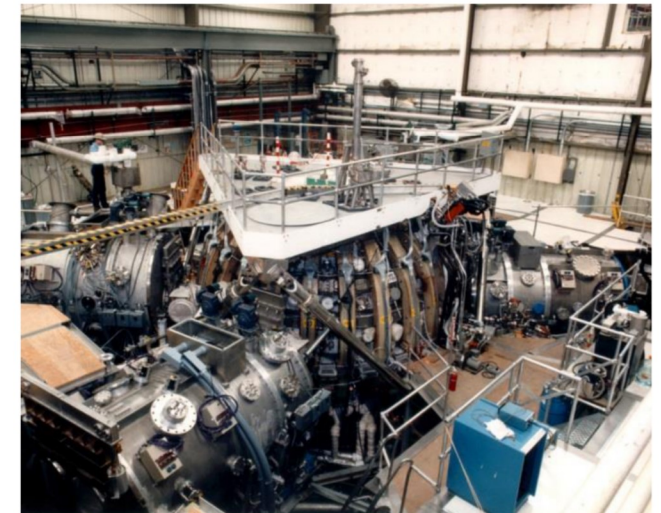


JT-60SA (Naka, Japan)

Source: http://www.jt60sa.org/pics/JT-60SA_cutaway3B.jpg

KSTAR (Korea) EAST (China)

...



DIII-D (San Diego, CA)

Source: <https://alltheworldstokamaks.files.wordpress.com/2012/07/diii-d.jpg>

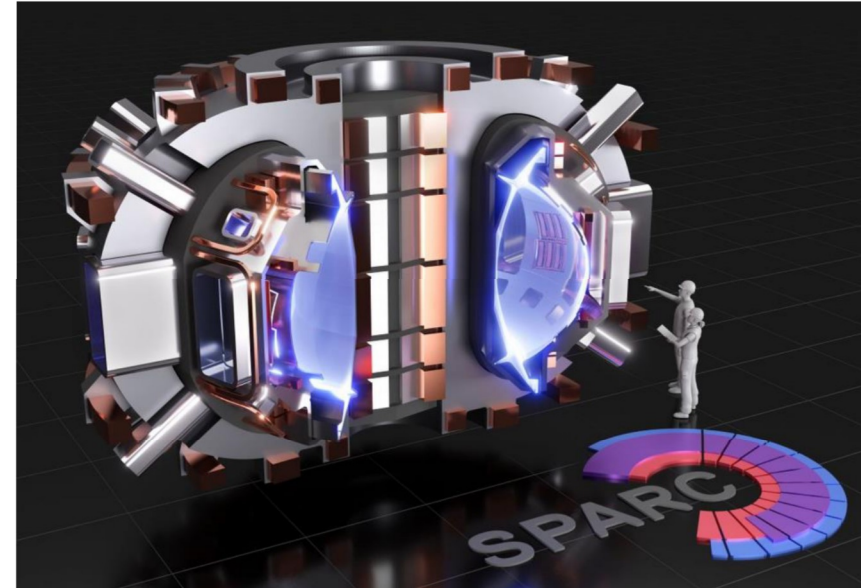
Unter Konstruktion (Beispiele)



ITER in Cadarache, Provence, Frankreich

Picture source: www.iter.org

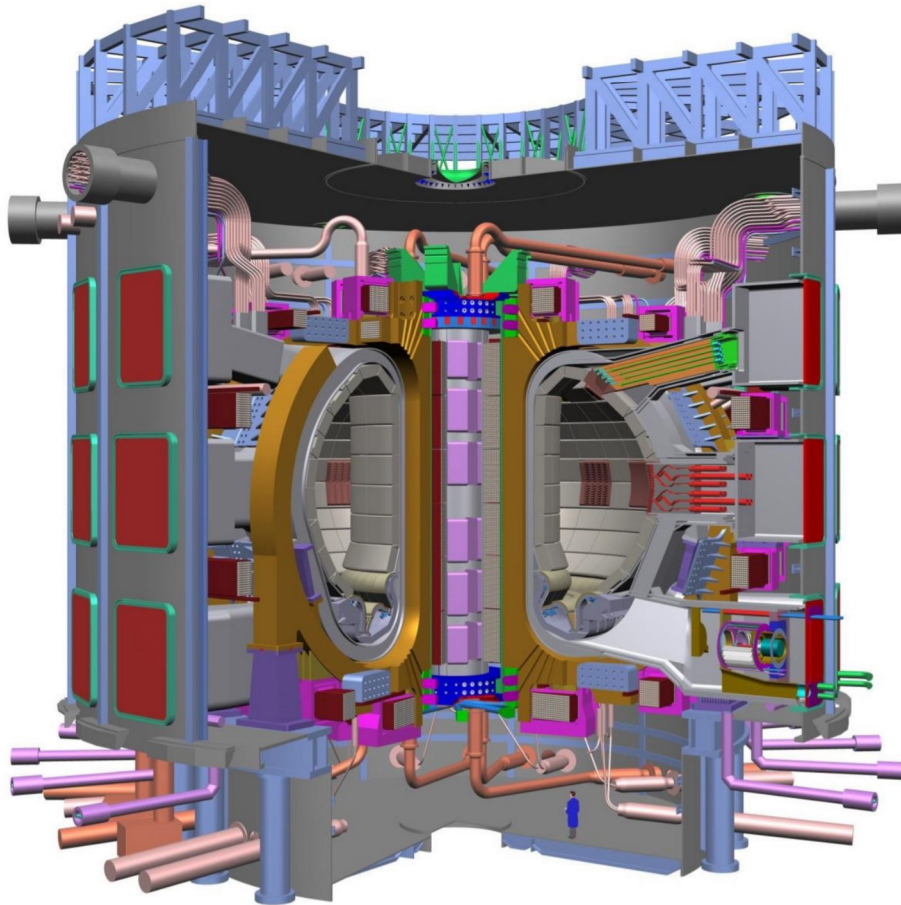
Internationales Projekt, 7 Partner



Commonwealth Fusion Systems SPARC

Picture source: <https://www.cfs.energy/technology>

Private Firma (Spin-off vom MIT),
Konstruktion in Devens (Massachusetts)



- Fusionsleistung bis 500 MW
- $Q=10$
- Pulslänge 400-600 s
- Für das Studium von Plasmaszenarien und Fusionsreakorttechnologie einschließlich Tritiumbrutsysteme
- Soll die Sicherheit einer Fusionsanlage demonstrieren
- Keine Stromerzeugung, diese erst mit DEMO

Europäischer Plan zur Entwicklung der Fusionstechnologie

Kurzfristig

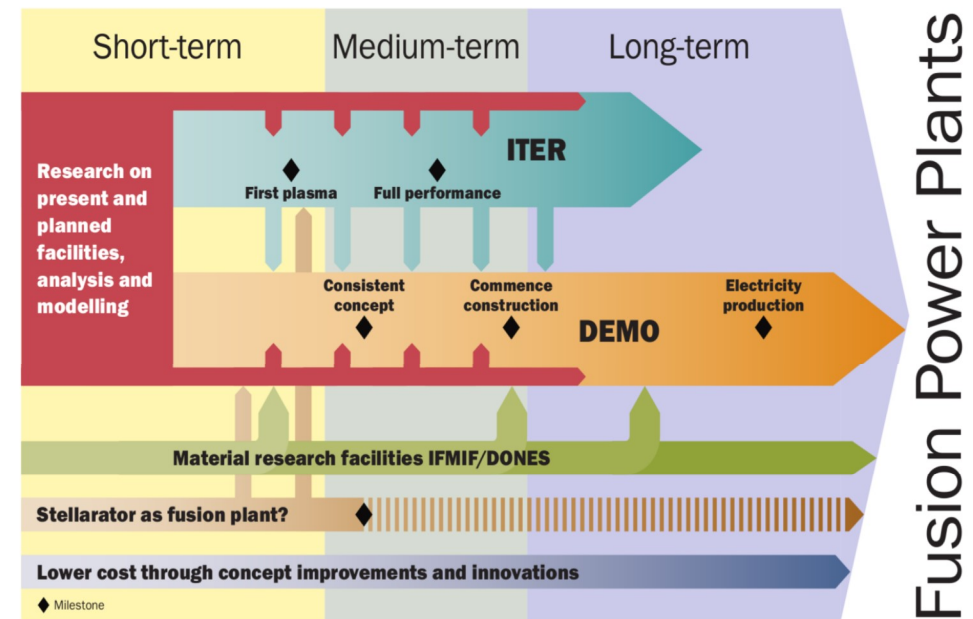
- ITER (Konstruktion, Forschung & Entwicklung)
- Deuterium-Tritium-Betrieb von JET
- DEMO (Konzept/Design-Phase, Forschung und Entwicklung)
- Konstruktion Bestrahlungsanlage für Fusionsmaterialien: IFMIF-DONES
- Wissenschaftliche + technologische Ausbeutung Stellarator-Konzepts

Mittelfristig

- ITER - erste wissenschaftliche und technologische Erfahrungen
- IFMIF-DONES - erste Erfahrungen und Ergebnisse
- DEMO - Engineering-Design-Phase, Einbeziehung der Industrie
- Entwicklung von Materialien und Technologien für Kraftwerke
- Mögliche Weiterentwicklung des Stellarator-Konzepts

Langfristig

- Laborbasiert + wissenschafts-orientiert -> industrie- und technologieorientiert
- Volle Einbeziehung der Industrie in Design, Konstruktion und **Betrieb von DEMO**
- Sichern der **Kommerzialisierung nach erfolgreichem DEMO-Betrieb**
- Bedarf zur Intensivierung der Zusammenarbeit mit der Industrie und Nutzung aller Möglichkeiten der Zusammenarbeit auch außerhalb Europas (Broader Approach)



Europäischer Plan zur Entwicklung der Fusionstechnologie

Kurzfristig

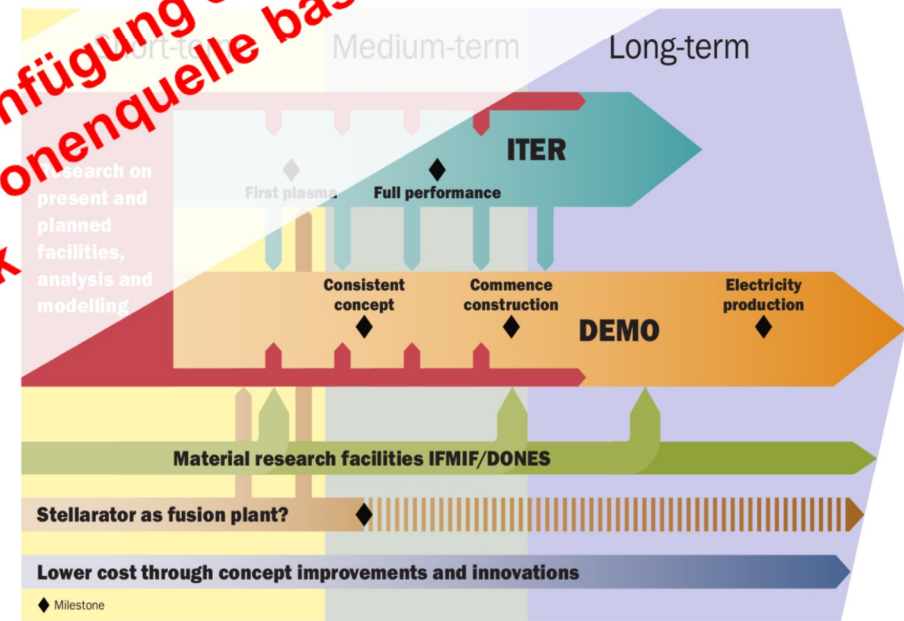
- ITER (Konstruktion, Forschung & Entwicklung)
- Deuterium-Tritium-Betrieb von JET
- DEMO (Konzept/Design-Phase, Forschung und Entwicklung)
- Konstruktion Bestrahlungsanlage für Fusionsmaterialien: IFMIF-DONES
- Wissenschaftliche + technologische Ausbeutung Stellarator-Konzepts

Mittelfristig

- ITER - erste wissenschaftliche und technologische Erfahrungen
- IFMIF-DONES - erste Erfahrungen und Ergebnisse
- DEMO - Engineering-Design-Phase, Einbindung der Industrie
- Entwicklung von Materialien für technologische Kraftwerke
- Mögliche Weiterentwicklung des Stellarator-Konzepts

Langfristig

- Labordesign - wissenschaftsorientiert -> industrie- und technologieorientiert
- Von Einbindung der Industrie in Design, Konstruktion und **Betrieb von DEMO**
- Sicherung der **Kommerzialisierung nach erfolgreichem DEMO-Betrieb**
- Bedarf zur Intensivierung der Zusammenarbeit mit der Industrie und Nutzung aller Möglichkeiten der Zusammenarbeit auch außerhalb Europas (Broader Approach)



Wird gerade überarbeitet und angepaßt. U.a. Einfügung einer zusätzlichen Testanlage: Volumetrische Neutronenquelle basierend auf einem kleinen, „angetriebenen“ Tokamak

Woher kommt das Tritium?

Natürliches Vorkommen: Produkt der kosmischen Strahlung $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{12}\text{C} + \text{T}$

Künstlich erzeugt: Nebenprodukt in Kernreaktoren mit schwerem Wasser D_2O (z.B. CANDU)
 $\text{D} + n \rightarrow \text{T} \sim 2 \text{ kg im Jahr}$

Nicht ausreichend, für den Betrieb eines Fusionsreaktors rechnet man mit **$\approx 0.5 \text{ kg am Tag}$**

Tritium kann im Fusionsreaktor selbst durch Neutronenbestrahlung von Lithium erzeugt werden:

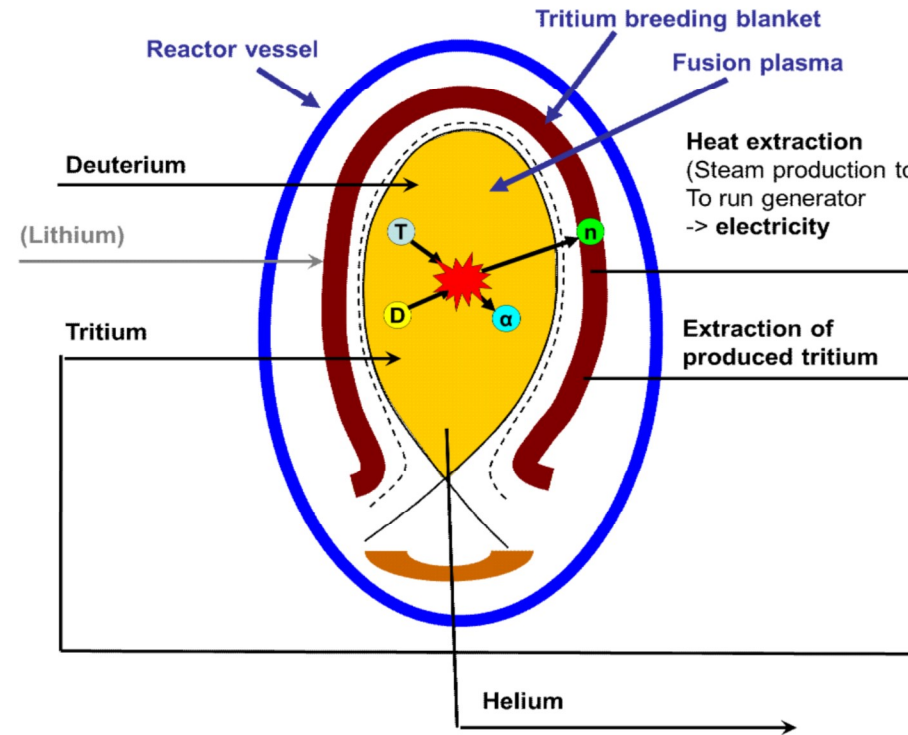
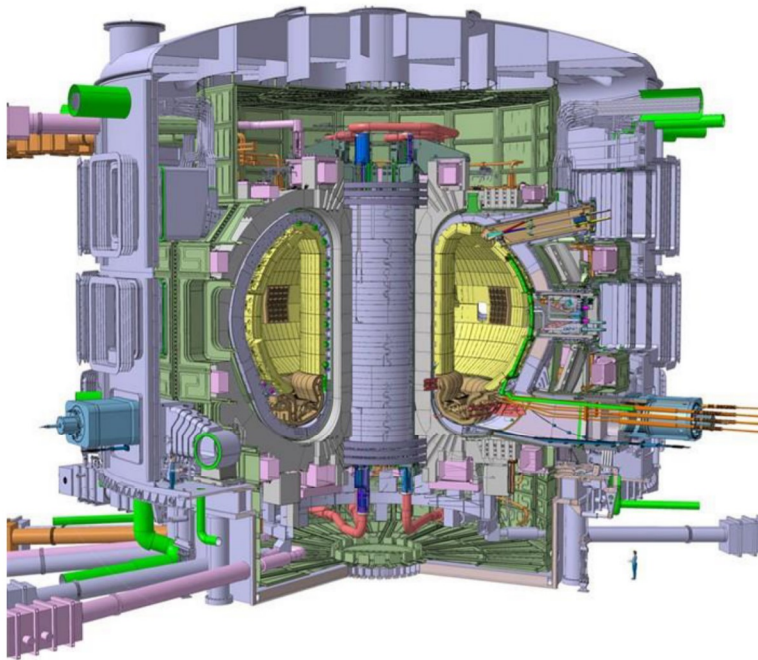
- $^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + \alpha \quad +4.8 \text{ MeV}$
- $^7\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + \alpha + n \quad -2.8 \text{ MeV}$

Natürliches Lithium: 7.5% ^6Li und 92.5% ^7Li

Lithium auf der Erdoberfläche:

- $10^{11} \text{ kg an Land}$
- $10^{14} \text{ kg in Ozeanen}$

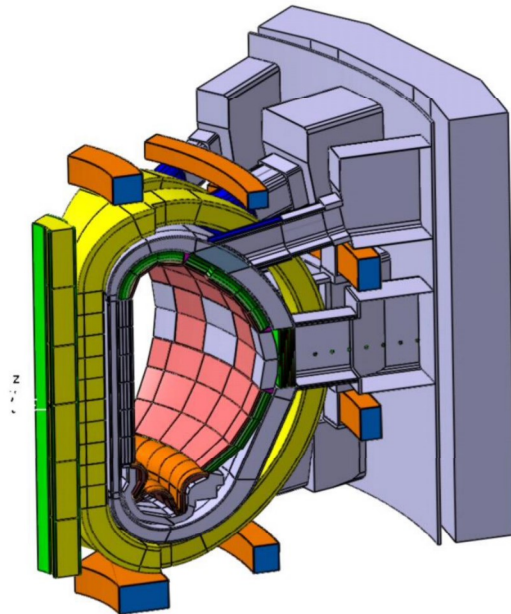
Brennstoffkreislauf eines DT-Fusionsreaktors



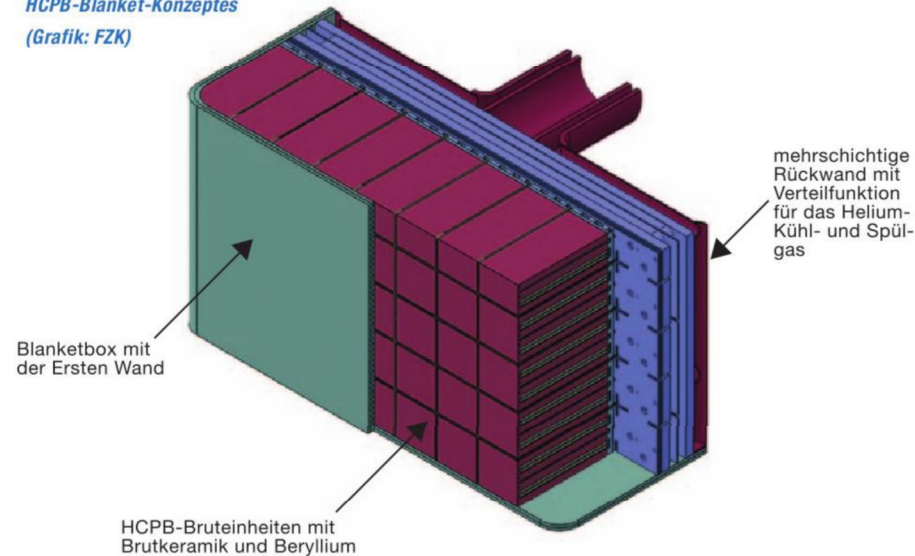
Brennstoffe: **Lithium** und **Deuterium**

Tritium für DT-Reaktion muß im Brutblanket produziert werden

Tritium-Brutrate **muß größer 1** plus einer Zugabe sein, die Verluste im Tritiumextraktionssystem ausgleicht plus einem Betrag für den Start weiterer Fusionsreaktoren



Schnitt durch die Box des
HCPB-Blanket-Konzeptes
(Grafik: FZK)



Das Brutblanket umgibt das Fusionsplasma und hat drei wichtige Funktionen:

- Tritiumproduktion
- Energieumwandlung (→ **Produktion hochwertiger Wärme**)
- Abschirmung für Magnetfeldspulen hinter dem Blanket

Wichtige nukleare Parameter für Fusionsreaktor-Brutblankets

- Tritiumproduktionsrate / Tritiumbrutrate – Muß deutlich größer 1 sein
- Nukleares Heizen
- Abschirmeigenschaften
- Materialaktivierung
- Gasproduktion (in Strukturmaterialien)
- weiteres

Wenig praktische Erfahrung, hauptsächlich numerische Simulationen

- Strahlungstransport-Software und evaluierte Kerndatenbibliotheken für Design
- Reaktor ist erhebliche Investition
- Eignungstests von Software und Datenbibliotheken

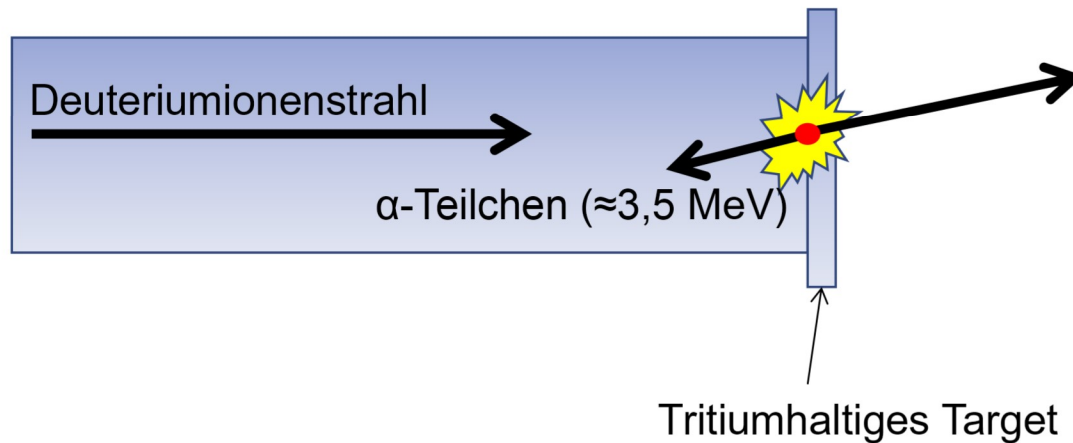
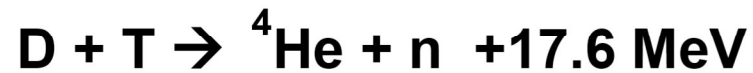
Simulation +/- Unsicherheiten
zu vergleichen mit
Experiment +/- Unsicherheiten

Instrumentierung

- Entwicklung und Test von Detektoren/Sensoren und Meßmethodik
- Tests unter reaktor-relevanten Bedingungen (z.B. Strahlenhärte)

DT-Fusionsreaktion: 14-MeV-Neutronen

- Derzeit weitgehend nur mit Neutronengeneratoren (nicht ganz richtig)
- Beschränkung auf kleine Volumen und relativ niedrige Flüsse
- Leistungsfähigere spezialisierte Neutronenquellen noch immer in Entwicklung (z.B. IFMIF-DONES)

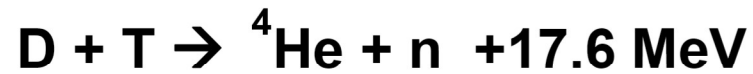


Neutron ($\approx 14,1 \text{ MeV}$)
Typisch bis 10^{12} s^{-1}
In alle Richtungen

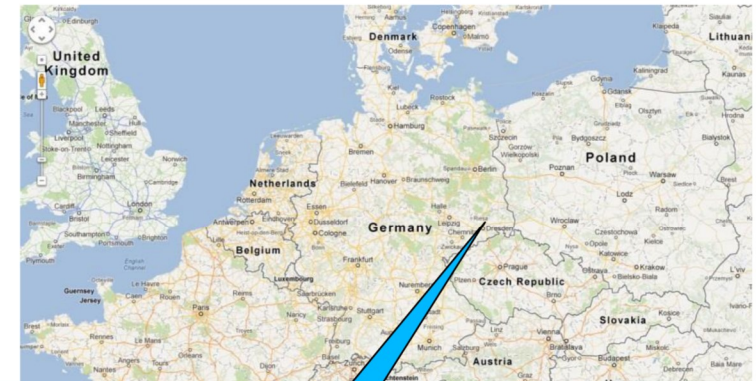
Zum Vergleich:
ITER-FW bis $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Gleiche Reaktion wie im DT-Fusionsreaktor
Verwendbar für Experimente, aber keine Nettoenergieerzeugung

Intensive DT-Neutronengeneratoren für Fusionsneutronikexperimente in der EU



FNG, ENEA Frascati
(bis ca. $4 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$)



TUD-NG, TU Dresden
(bis $1 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$)

Vorherige kleinere Anlage in Außenstelle Pirna

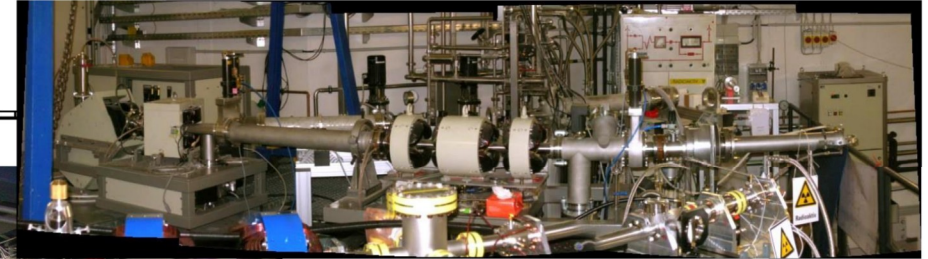
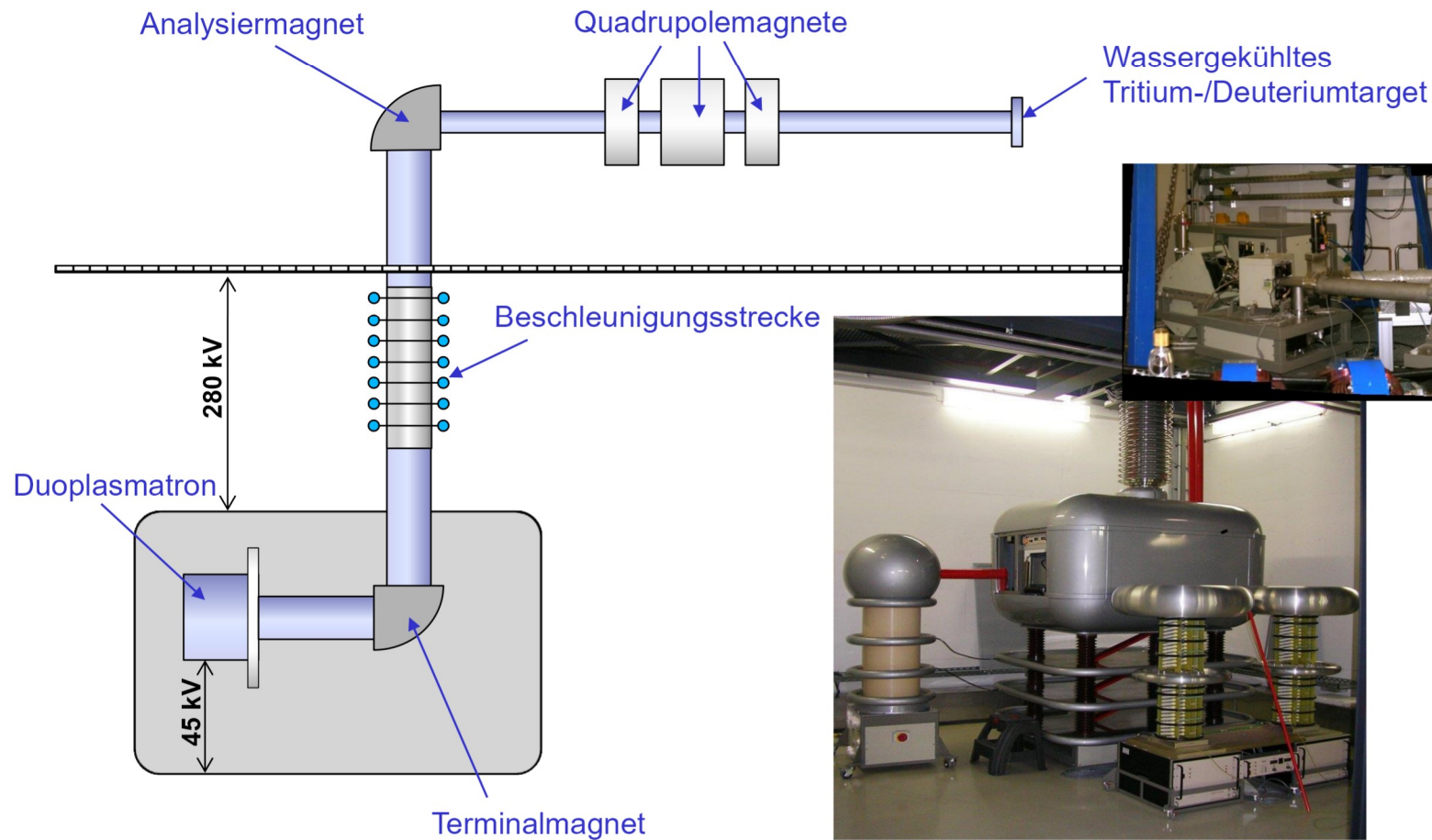
Konstruktion und Bau Ende 90er, Anfang 2000er, Institut für Kern- und Teilchenphysik

Eingebunden in die europäische Fusionsforschung seit Betriebsbeginn 2005
über Forschungszentrum Karlsruhe / Karlsruher Institut für Technologie

Experimentelle Arbeiten im Rahmen von

- **European Fusion Development Agreement (EFDA)**
- **Fusion For Energy**
- **Eurofusion**

Zusammenarbeit mit HZDR, KIT, PTB, ENEA (Italien), NPI (Tschechien), CEA (Frankreich), AGH (Polen), JSI (Slowenien), CCFE (UK), JAEA (Japan), ...



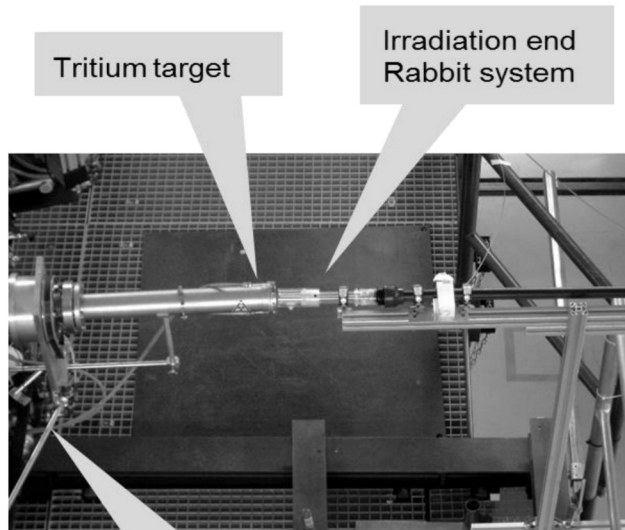
Deuteriumstrahl
 $\approx 100 - 345 \text{ keV}$
 $< \approx 8 - 10 \text{ mA}$

Kontinuierlich und gepulst:

- μs verfügbar
- ns möglich

Technische Universität Dresden – Neutronengenerator

Experimentelle Schlaglichter

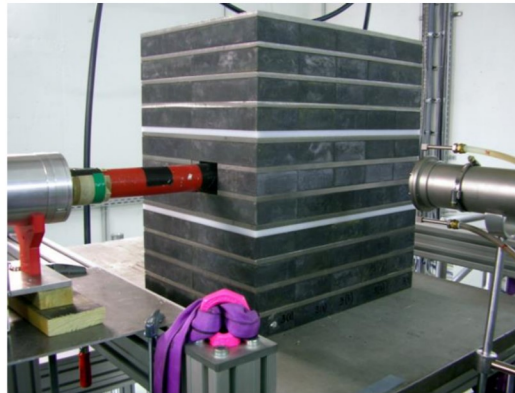


Tritium target

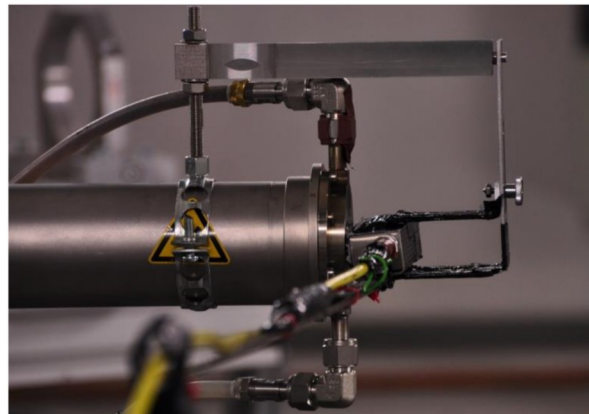
Irradiation end Rabbit system

Neutron generator

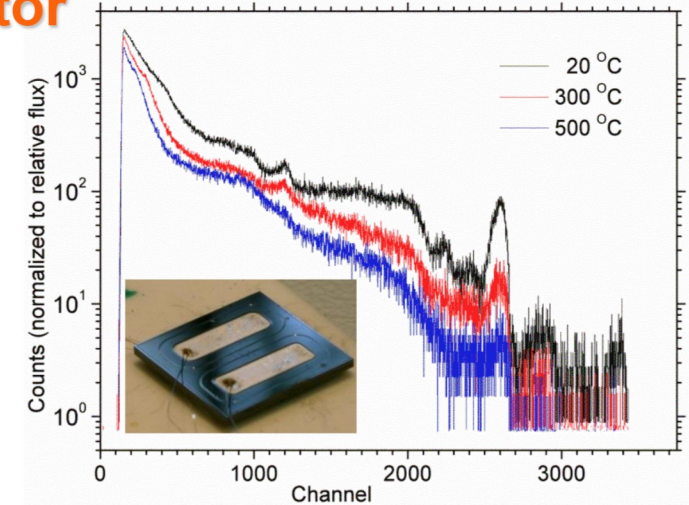
Pneumatisches Proben-transportsystem für Aktivierungsmessungen und zur Entwicklung eines Neutronenaktivierungssystems für die ITER Testblanketmodule



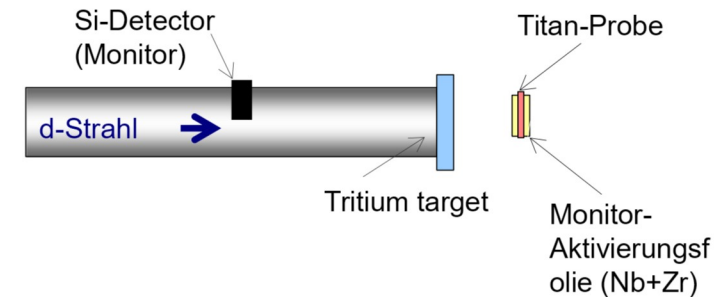
Messungen vone Neutronen- und Gammaspektren in einem Neutronik-Model des ITER HCLL-Testblanketmoduls..



Neue selbsterregte Neutronendetektoren für Neutronenflußmessungen in ITER-TBM und im HFTM von IFMIF-DONES



Test neuer Siliziumkarbid-Detektoren unter Brutblanketrelevanten Temperaturen und Magnetfeldern.



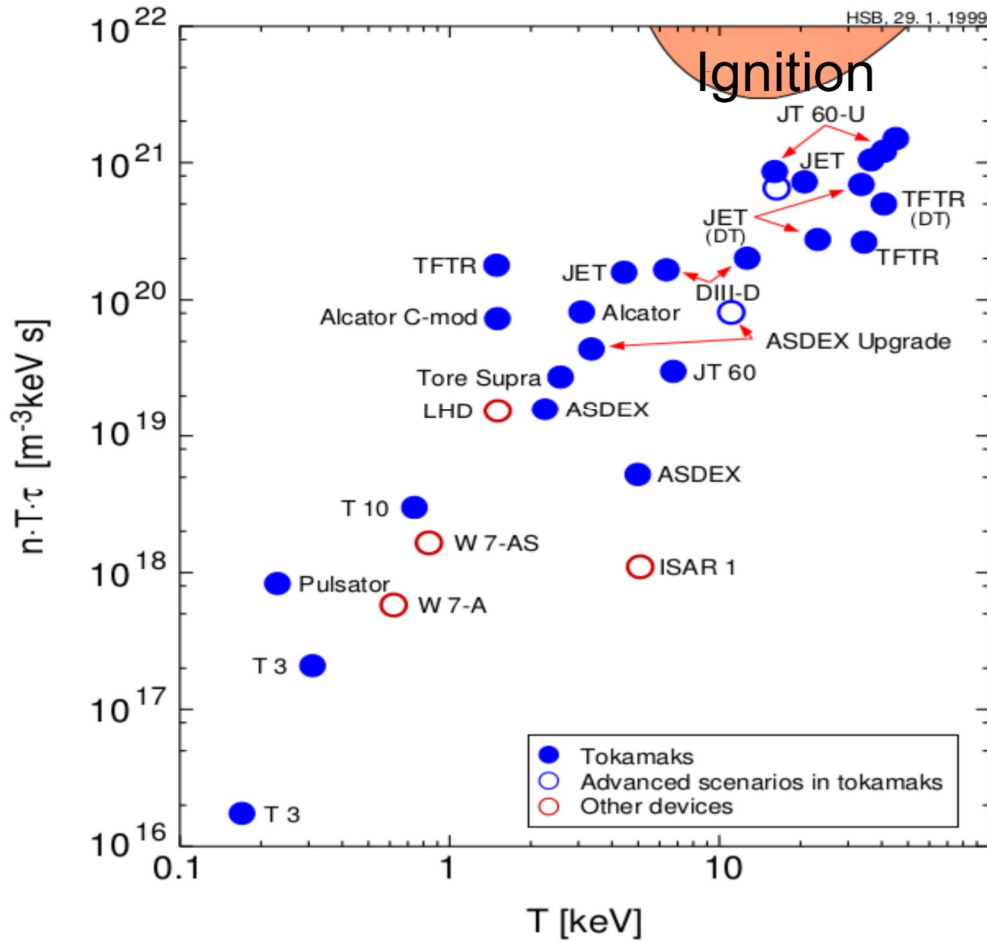
Materialaktivierungsmessungen unter DT-Neutronenbestrahlung zum Vergleich mit Simulationsrechnungen

- Strahlungsinduzierte Korrosion (z.B. Wassergekühltes Lithium-Blei-Brutblanket)
 - Radiolyse und chemische Reaktionen insbesondere an Grenzflächen, Neutronenaktivierung
- Transport und Ablagerung induzierter Aktivität (flüssige Brutmaterialien, flüssige Kühlmittel)
 - chemische Reaktionen
- Entwicklung und Test von nuklearer Instrumentierung
- Strahlungshärte und Optimierung von Elektronik und Sensoren
 - reversible Prozesse, irreversible Schädigungen
- Experimente zur Validierung von numerischen Modellen

Relevant für Genehmigung, Betrieb, Wartungsarbeiten, Entsorgung&Rückbau



Zündung des Fusionsplasmas



Gewinn des Fusionsplasmas

$$Q_{DT} = \frac{\Phi_{Fusion}}{\Phi_{Heizen}}$$

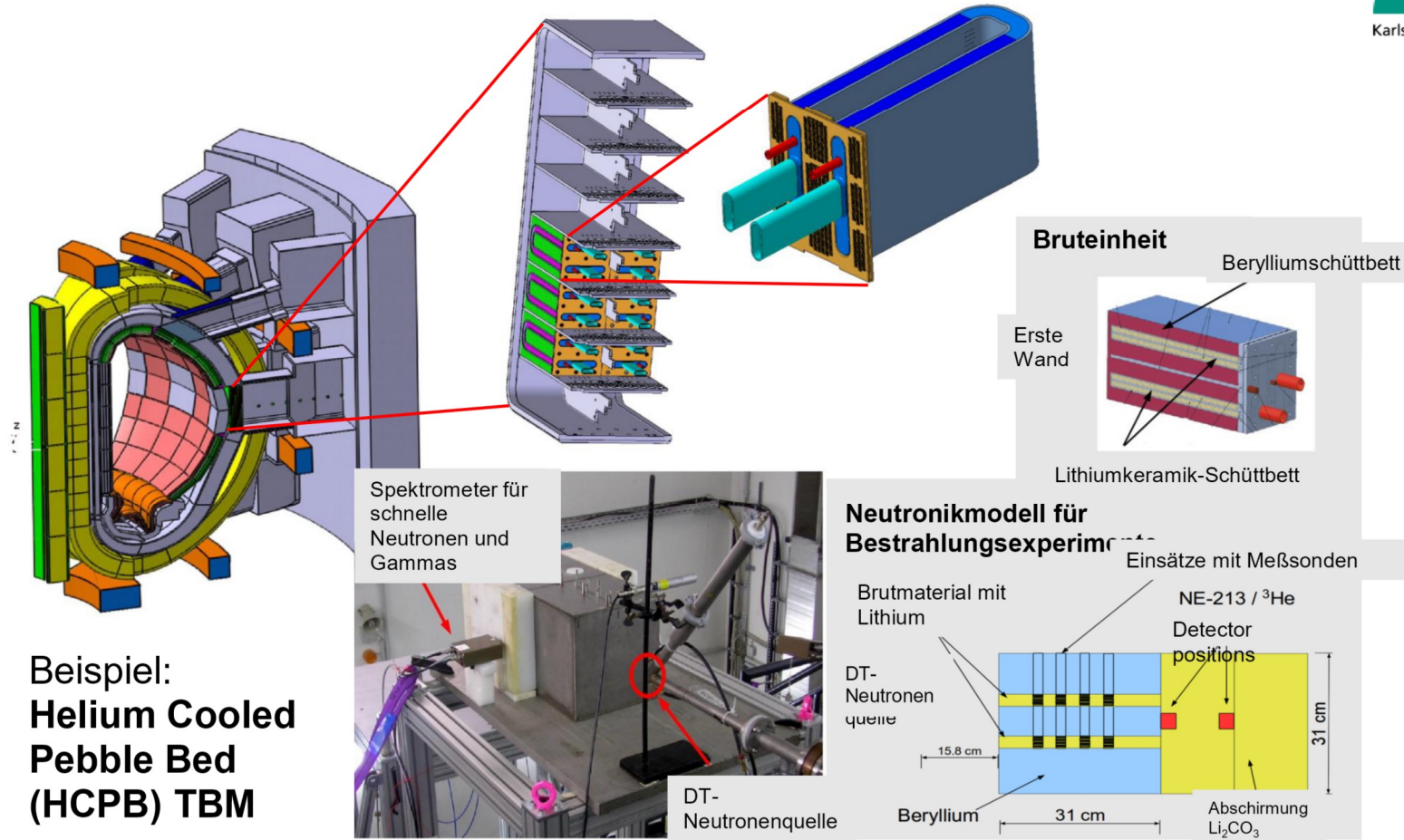
Zündung: Fusionsreaktion erfordert kein weiteres externes Heizen; $Q \rightarrow \infty$

Praktisch ist es für die Steuerung günstiger, den Reaktor im endlichen Q-Bereich zu betreiben.

Tripel-Produkt: $n_e T \tau$

Minimum des Fusionsprodukts bei:
 $n_e T \tau = 2,9 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{keV s}$ bei $T = 13 \text{ keV}$

Experimentelle Tests (aus nuklearer Sicht)



Beispiel:
**Helium Cooled
Pebble Bed
(HCPB) TBM**