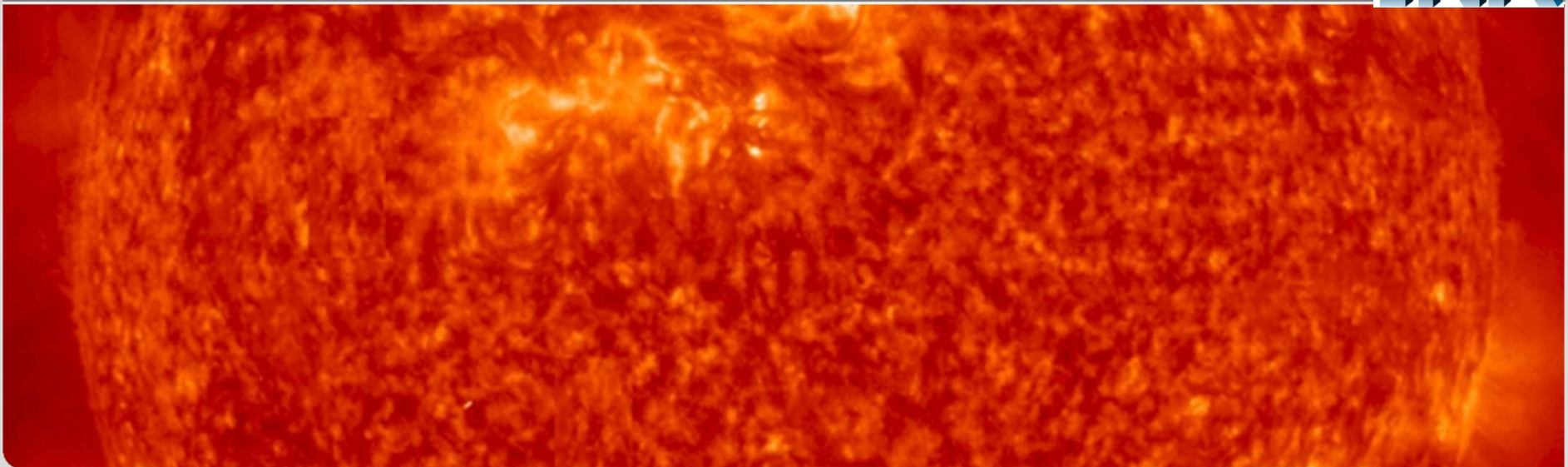


Kernfusion und Neutronik am Beispiel des Stellarator Leistungsreaktors HELIAS

André Häußler

andre.haeussler@kit.edu

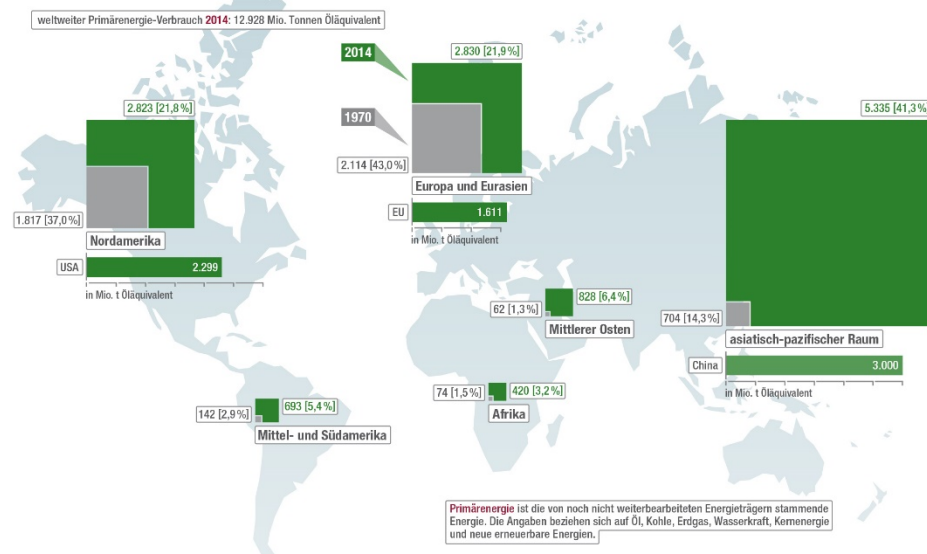
Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik (INR) / Neutronik und Kerndaten (NK)



Weltweiter Primärenergieverbrauch

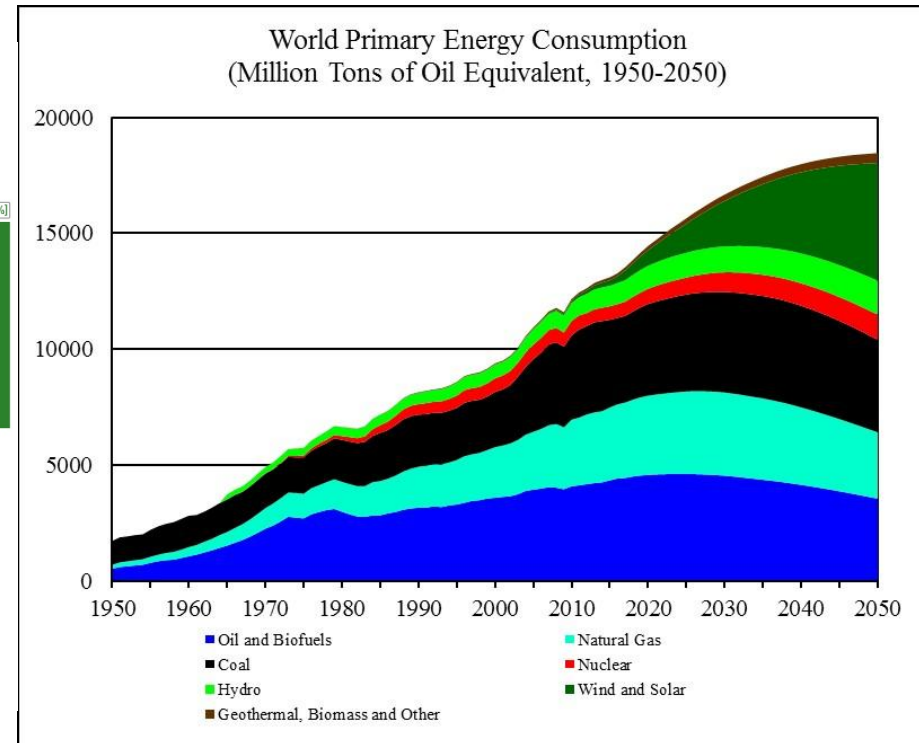
Verbrauch von Primärenergie nach Regionen

In absoluten Zahlen und Anteile am weltweiten Verbrauch in Prozent, 1970 und 2014



Quelle: British Petroleum (BP): Statistical Review of World Energy 2015
Lizenz: Creative Commons by-nc-nd/3.0/de
Bundeszentrale für politische Bildung 2016 | www.bpb.de

Anstieg des Primärenergieverbrauchs nach Regionen zwischen 1970 (grau) und 2014 (grün)

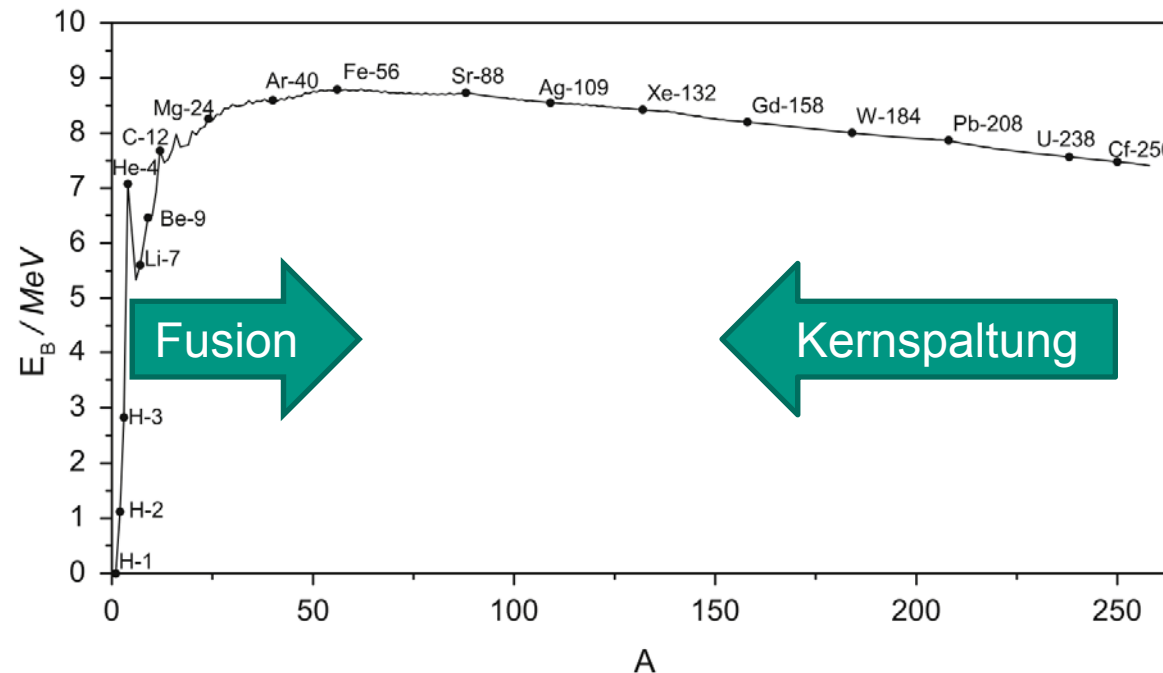


Weltweiter Primärenergieverbrauch von 1950 – 2016 und Vorhersage von 2017 - 2050

Quelle: Bundeszentrale für politische Bildung, British Petroleum (BP): Statistical Review of World Energy 2015; Dr. Minqi Li, *World Energy 2017-2050: Annual Report*, Department of Economics, University of Utah

Was ist Kernfusion?

- Fusion = Verschmelzung
- Kernfusion = Verschmelzung von zwei Atomkernen zu einem neuen Kern
- Kernfusion findet hauptsächlich bei Atomen mit kleiner Massenzahl statt



Mittlere Bindungsenergie E_B pro Nukleon in Abhängigkeit der Massenzahl A

Quelle: Ziegler, Allelein - Reaktortechnik

Vorteile der Kernfusion

- Rohstoffe verfügbar auf der Erde für einen langen Zeitraum (~ 30 Mio Jahre)



Wasser



Lithium



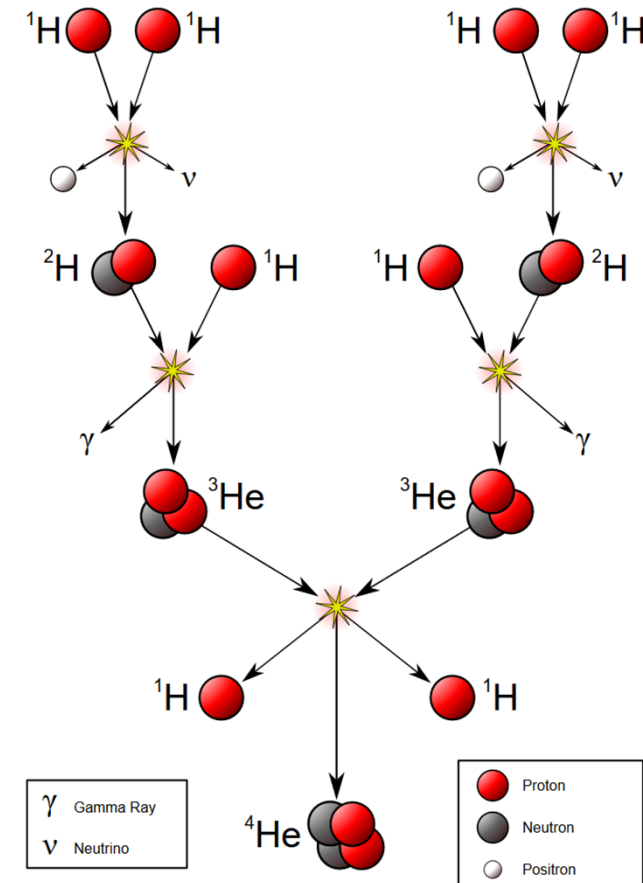
Mittlerer Stromverbrauch eines Einfamilienhauses in Europa pro Jahr

Quelle: newsgag.net, apple.com,
staticelectricbrisbane.com.au

- Wenig Brennstoff notwendig zur Erzeugung einer großen Energiemenge → z.B. ein Gramm Brennstoff kann ~90 MWh Energie freisetzen, was einer Verbrennungswärme von 11 t Kohle entspricht
- Keine Emission von Treibhausgasen
- Kaum Erzeugung von langlebigem radioaktivem Abfall
- Energie ist in einem Fusionsreaktor zu jeder Zeit klein genug um nicht plötzlich unkontrolliert freigesetzt zu werden

Fusion in der Sonne

- Dominante Reaktion: Proton-Proton-Zyklus
- Temperatur ~ 10 Mio $^{\circ}\text{C}$
- Reaktionen finden hauptsächlich im Sonnenzentrum bei sehr hohem Druck statt
- Konsequenz für die Erde:
 - Langwierige ^1H - ^1H Reaktion
 - Sehr hoher Druck technisch nicht möglich
 → Randbedingungen der Sonne auf der Erde nicht umsetzbar



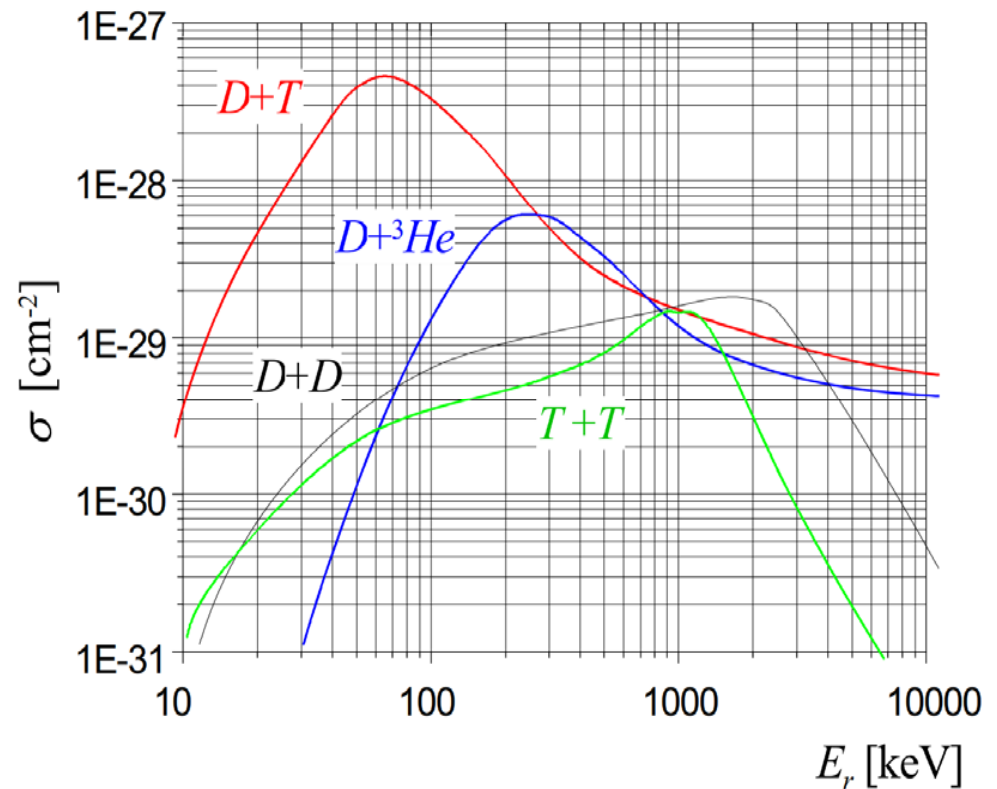
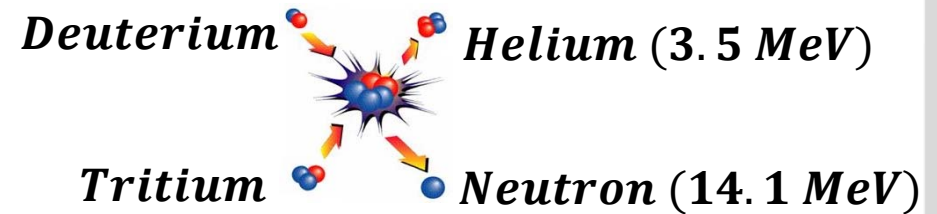
Quelle: Von Borb, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=680469>

Kernfusion auf der Erde

■ Vorherrschende Fusionsreaktion:

- $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3.3 \text{ MeV}$
- $D + D \rightarrow T + p + 4.0 \text{ MeV}$
- $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$
- $T + T \rightarrow {}^4\text{He} + 2n + 11.3 \text{ MeV}$
- $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + 18.4 \text{ MeV}$

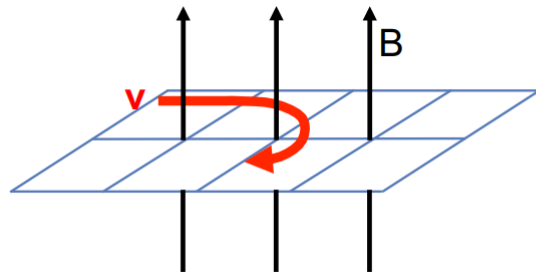
→ D + T ist aufgrund des Wirkungsquerschnittes / Reaktionswahrscheinlichkeit σ [cm⁻²] und der vergleichsweise “niedrigen” benötigten Reaktionstemperatur bevorzugt



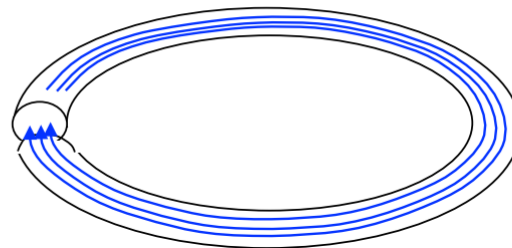
$D + T \rightarrow E_r[\text{max}] = 64 \text{ keV} \rightarrow \sim 75 \text{ Mio } ^\circ\text{C}$

Plasmaeinschluss

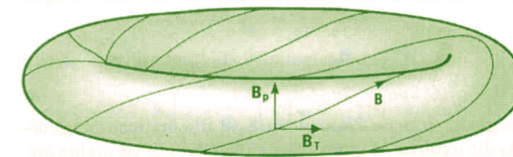
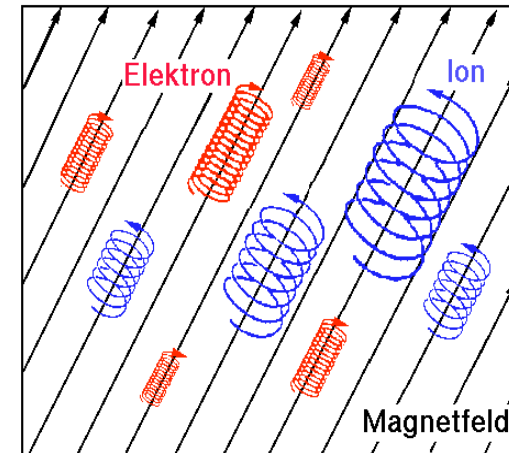
- Plasma = vierter Aggregatzustand → Atome zerfallen in Ionen und Elektronen
- Nur geladene Teilchen werden im Magnetfeld eingeschlossen
- Einschluss durch einen magnetischen Käfig:



Geladene Teilchen bewegen sich entlang eines Magnetfeldes



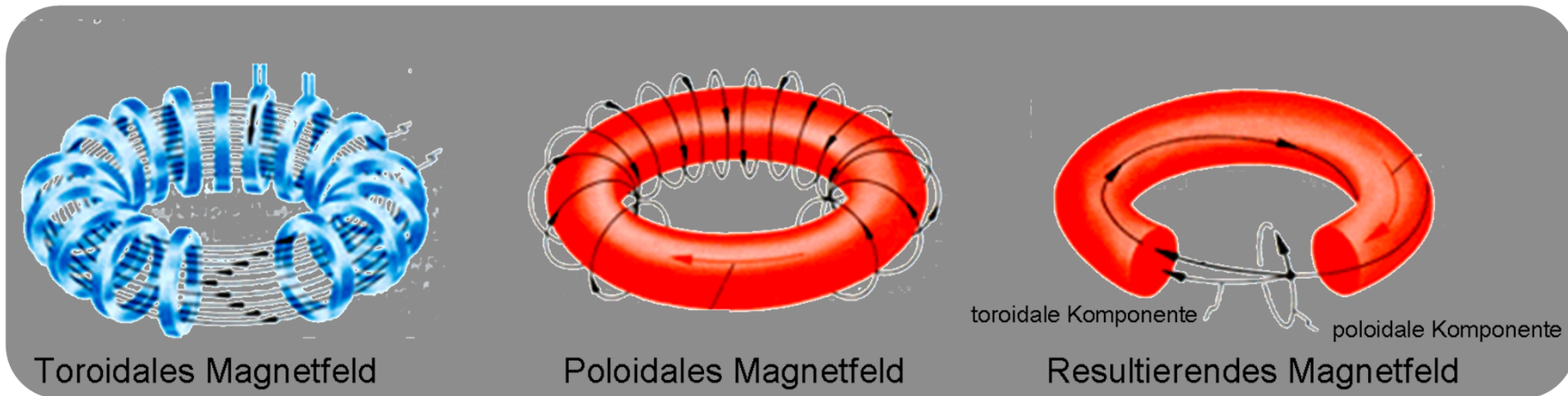
Ringförmiges Magnetfeld wichtig für magnetischen Einschluss → ansonsten Verlust der Teilchen



Ringförmiges Magnetfeld ist in seiner Stärke nicht homogen und nimmt nach außen hin ab → verdrilltes Magnetfeld notwendig

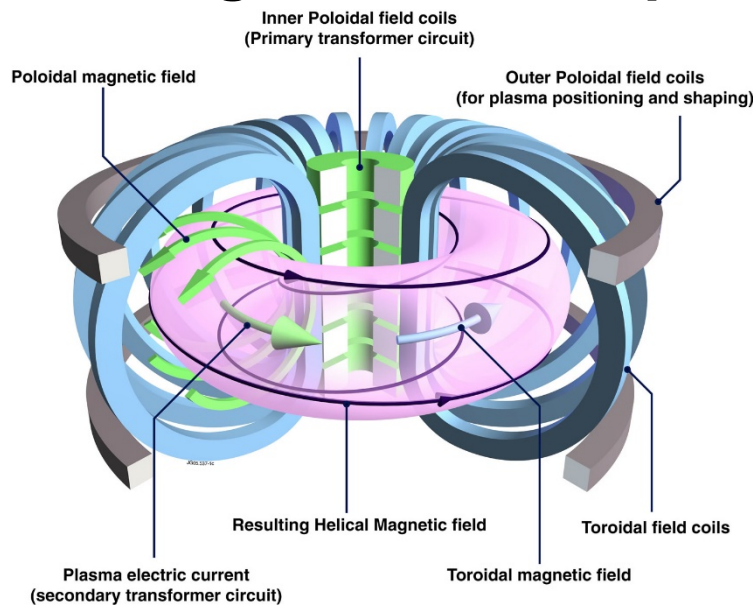
Erzeugung des Magnetfeldes im Fusionsreaktor

- Supraleitende Magnetfeldspulen erzeugen mehrere, sich überlagernde Magnetfelder



- Toroidales Magnetfeld schließt Plasma ein
- Poloidales Magnetfeld verhindert Driften des Plasmas
- Zusätzliche Korrekturspulen zur Stabilisierung des Plasmas

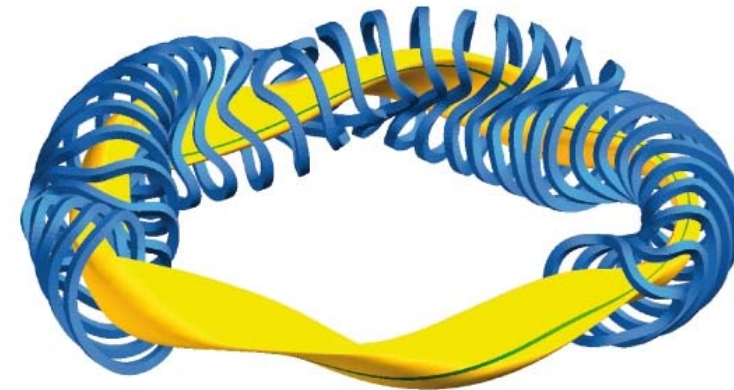
Zwei Magnetfeldkonzepte für Leistungsreaktoren



Tokamak

Quelle: euro-fusion.org

- Tokamak (russisch “toroidalnaya kamera magnitnaya katishka”)
- Teil des Magnetfeldes durch den Plasmastrom (Transformatorprinzip) → Pulsbetrieb
- ITER soll erstmalig durch kontrollierte Fusion die Energiegewinnung zeigen

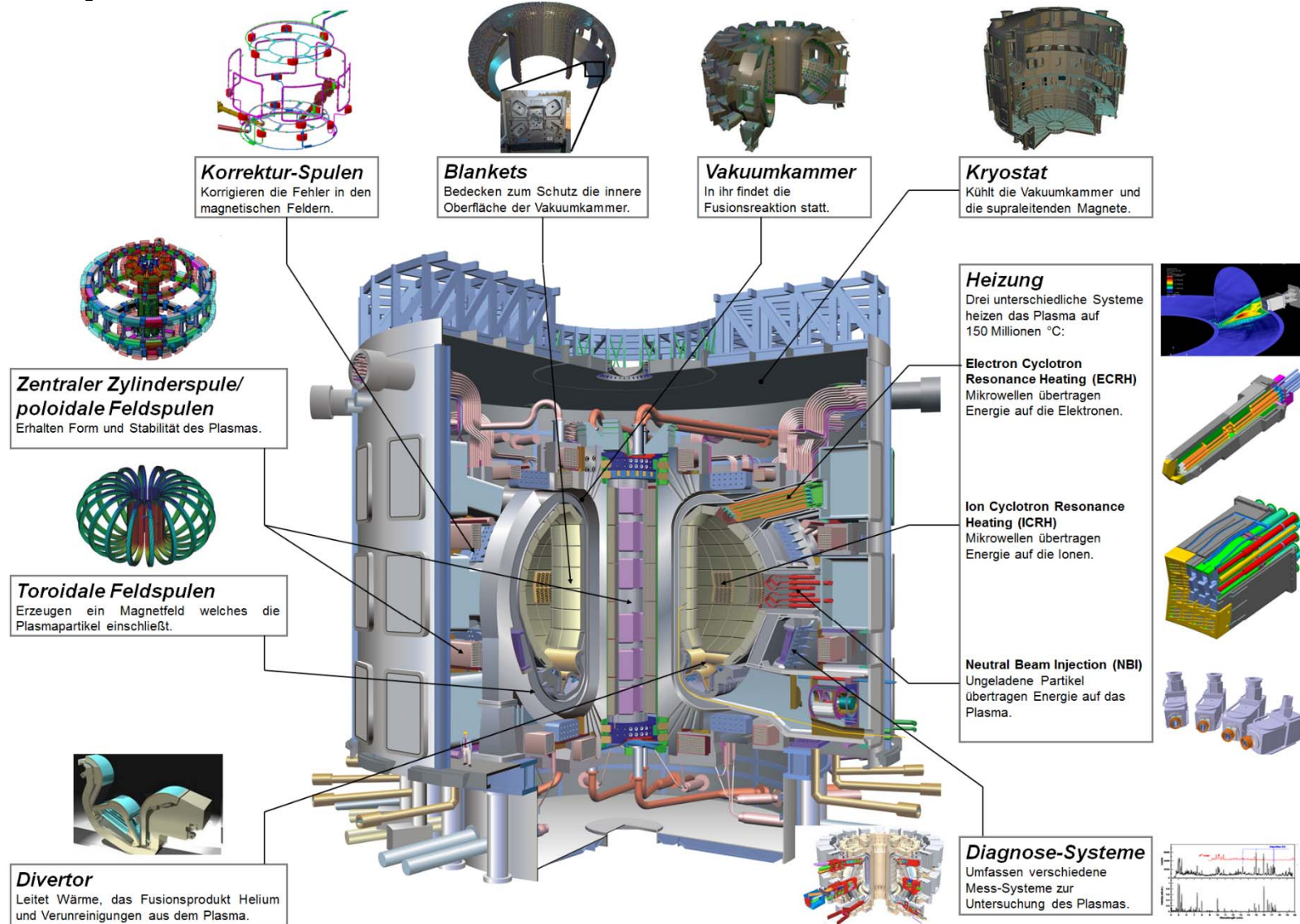


Stellarator

Quelle: ipp.mpg.de

- Stellarator (bedeutet etwa: Anwendung der Sternenenergie)
- Magnetfeld ausschließlich durch externe Spulen → Dauerbetrieb
- Wendelstein 7-X soll demonstrieren, dass das Plasma die Anforderungen an einen Leistungsreaktor erfüllt

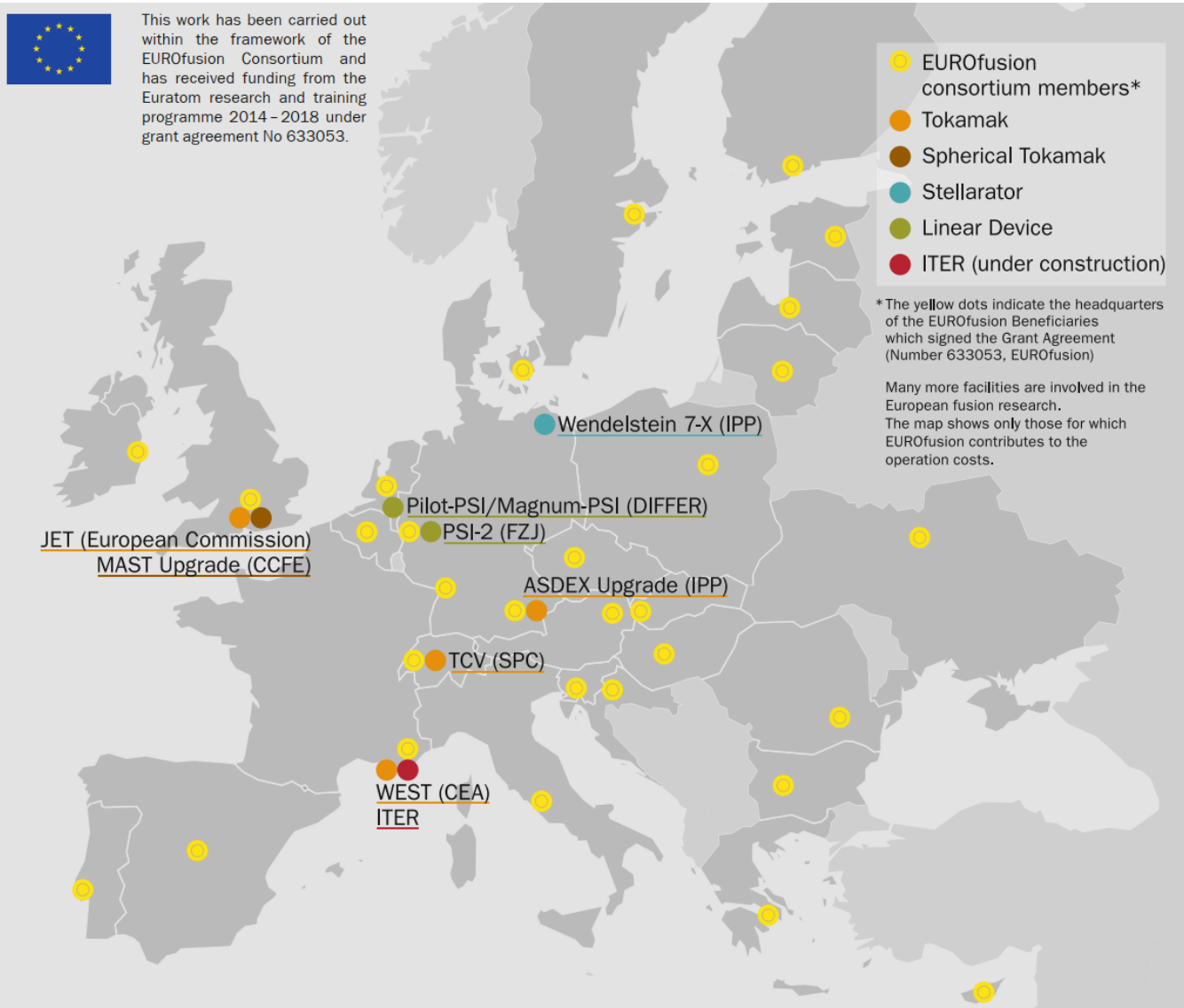
Komponenten des Fusionsreaktors ITER



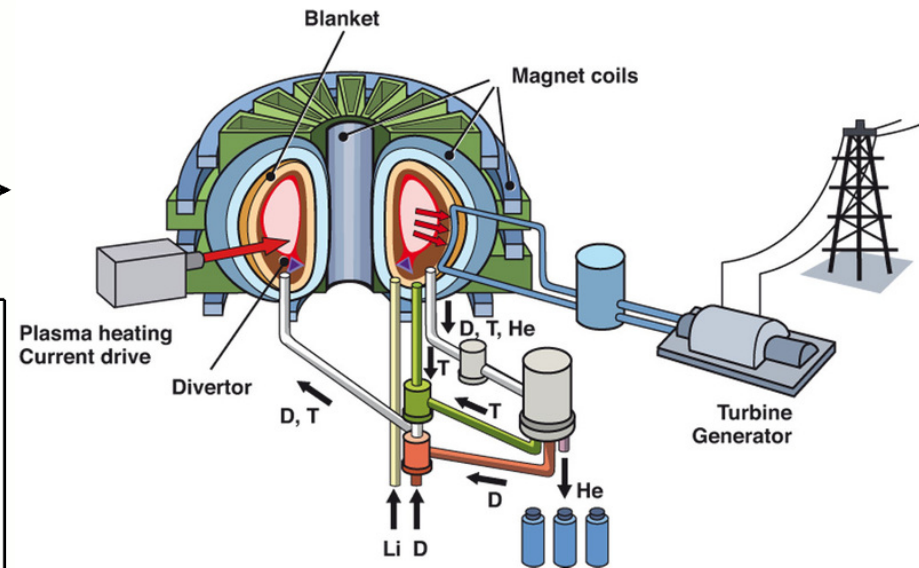
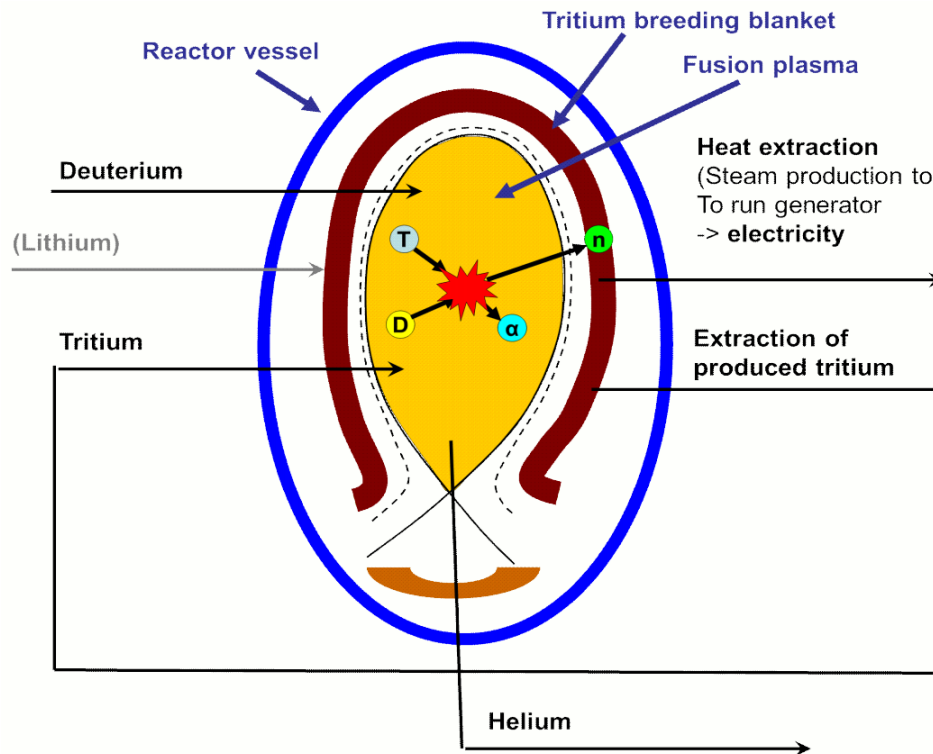
Baustelle des Fusionsreaktors ITER (Quelle: iter.org)



Fusionsforschung in Europa (Quelle: euro-fusion.org)



Schematische Übersicht eines Leistungsreaktors

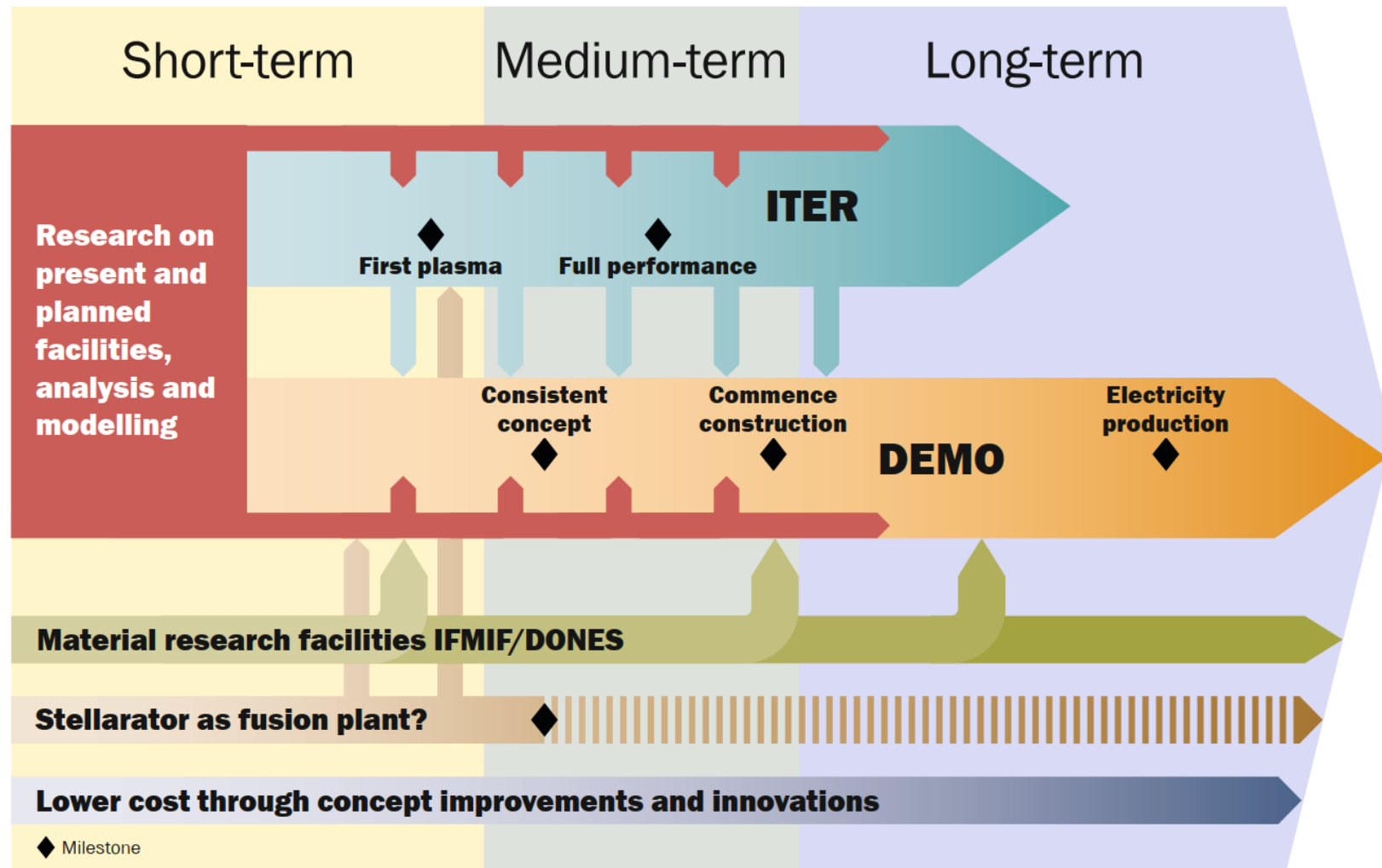


Ansicht innerhalb des Plasmagefäßes
 → Helium wird durch den magnetischen Einschluss gefangen, Neutronen verlassen den Magnetfeldkäfig und verursachen Reaktionen in den Komponenten

Übersicht über den Brennstoff- und Wasser-Dampf-Kreislauf
 → Umwandlung der erzeugten Wärme in elektrische Energie

EUROfusion Roadmap (Quelle: euro-fusion.org)

Fusion Power Plants



Credit: EUROfusion

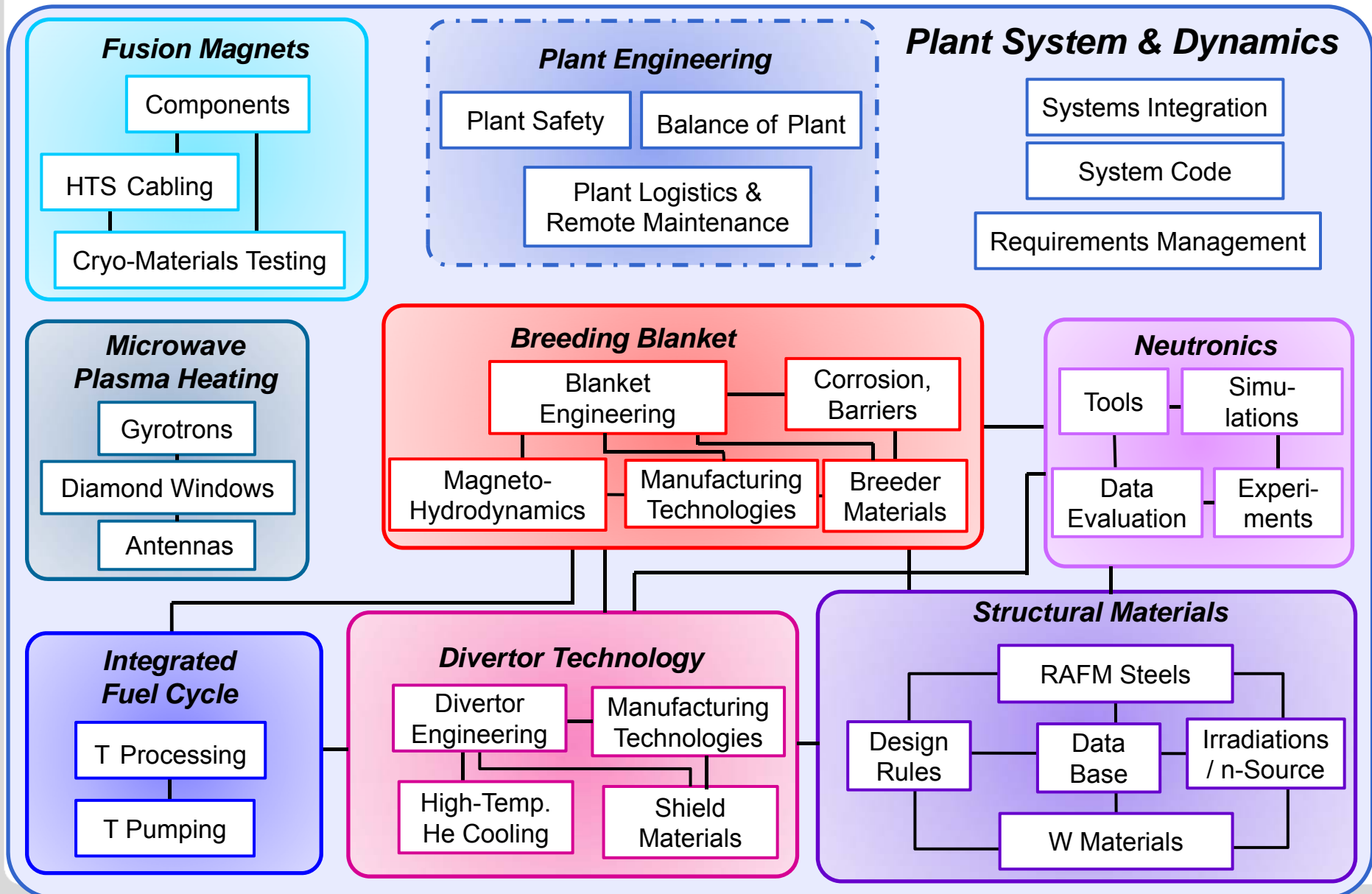
KIT Programm Fusion

- **Ziel:**
Entwicklung von Schlüsseltechnologien & Materialien für Fusionsenergie

- **Fokussierung auf drei Linien von Fusionsexperimenten:**
 - Design, Technik, Realisierung und testen der Komponenten und Systeme für ITER
 - Schlüsselentwicklungen in Richtung DEMO (Weiterentwicklung von ITER) und Fusionsleistungsreaktor (u.a. Broader Approach, Fusionsneutronenquelle)
 - Beteiligungen bei Wendelstein-7X

- **Mitarbeiter:**
 - ~ 230 Wissenschaftler, Ingenieure und unterstützendes Personal
 - 6 KIT Institute beteiligt
 - ~ 26 M€ Jahresbudget / Aufwendungen

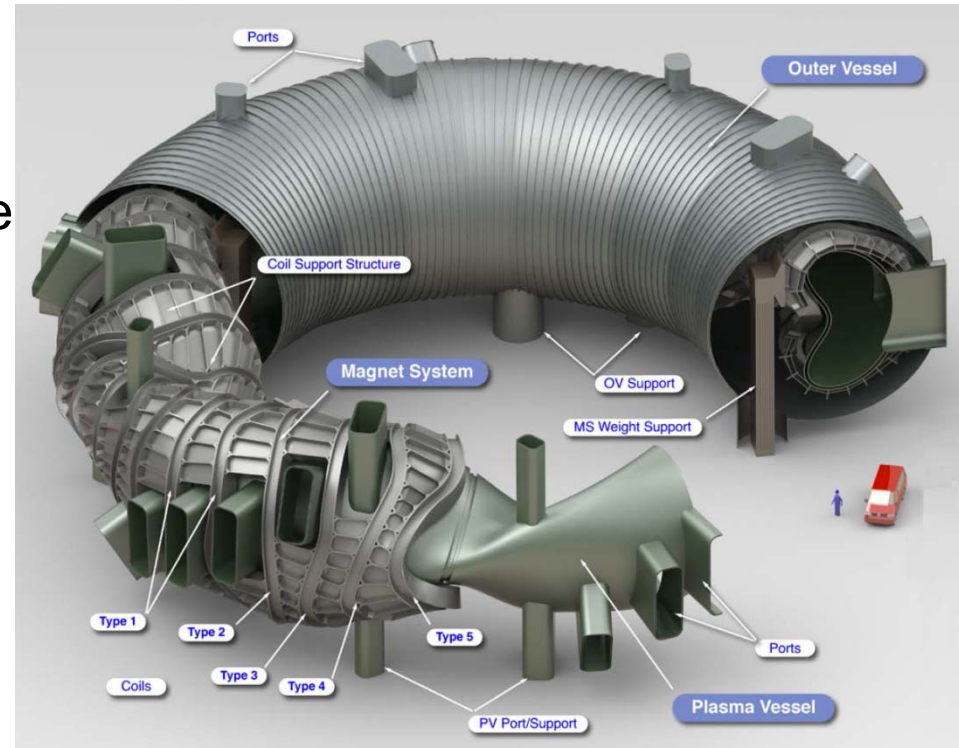
KIT Themen im Helmholtz Programm Kernfusion



LEISTUNGSREAKTOR HELIAS

HELIAS – ein Überblick

- HELIAS = **HEL**ical-Axis **A**dvanced Stellarator
- Extrapolierte und weiterentwickelte Version von Wendelstein 7-X
- Demonstrationsleistungsreaktor Studie mit D-T Brennstoff
- Plasmavolumen: $\sim 1400 \text{ m}^3$
- Fusionsleistung: $\sim 3000 \text{ MW}$



HELIAS 5-B

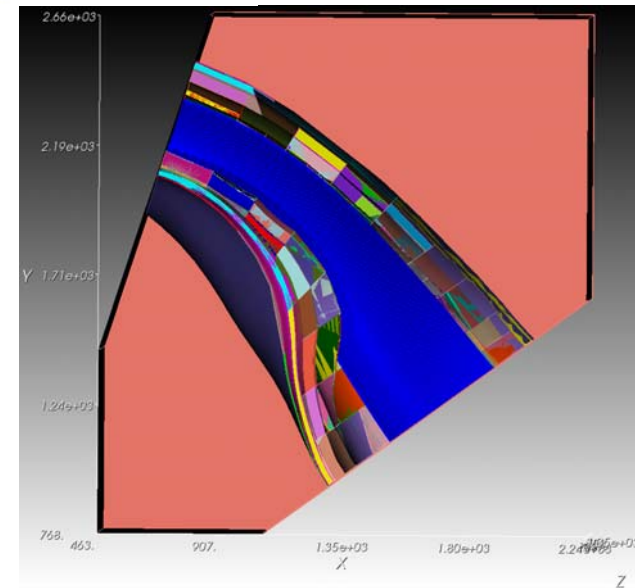
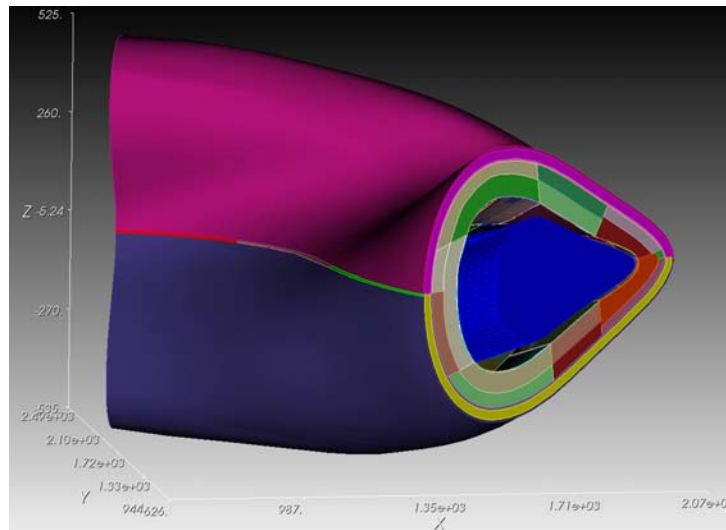
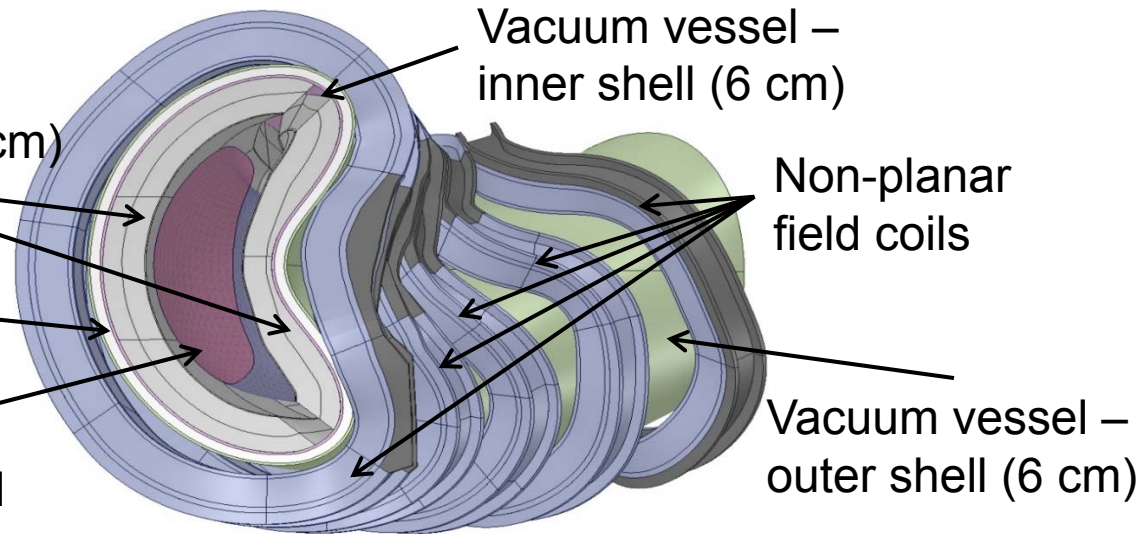
Source: [Sch13] – F. Schauer, et al., *HELIAS 5-B magnet system structure and maintenance concept*, Fus. Eng. Des. 88 (2013)

HELIAS Geometriemodell

Blanket modules incl. support structure and shield (~65 - 90 cm)

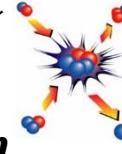
Vacuum vessel – shield (~20 cm)

Plasma : Last Closed Flux Surface (LCFS)



Neutronik Grundlagen

Deuterium



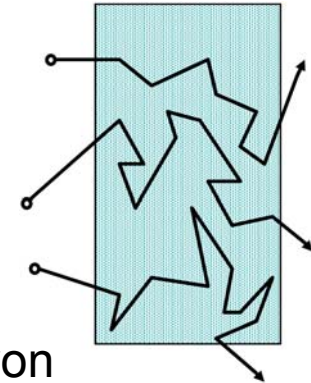
Helium (3.5 MeV)

Tritium

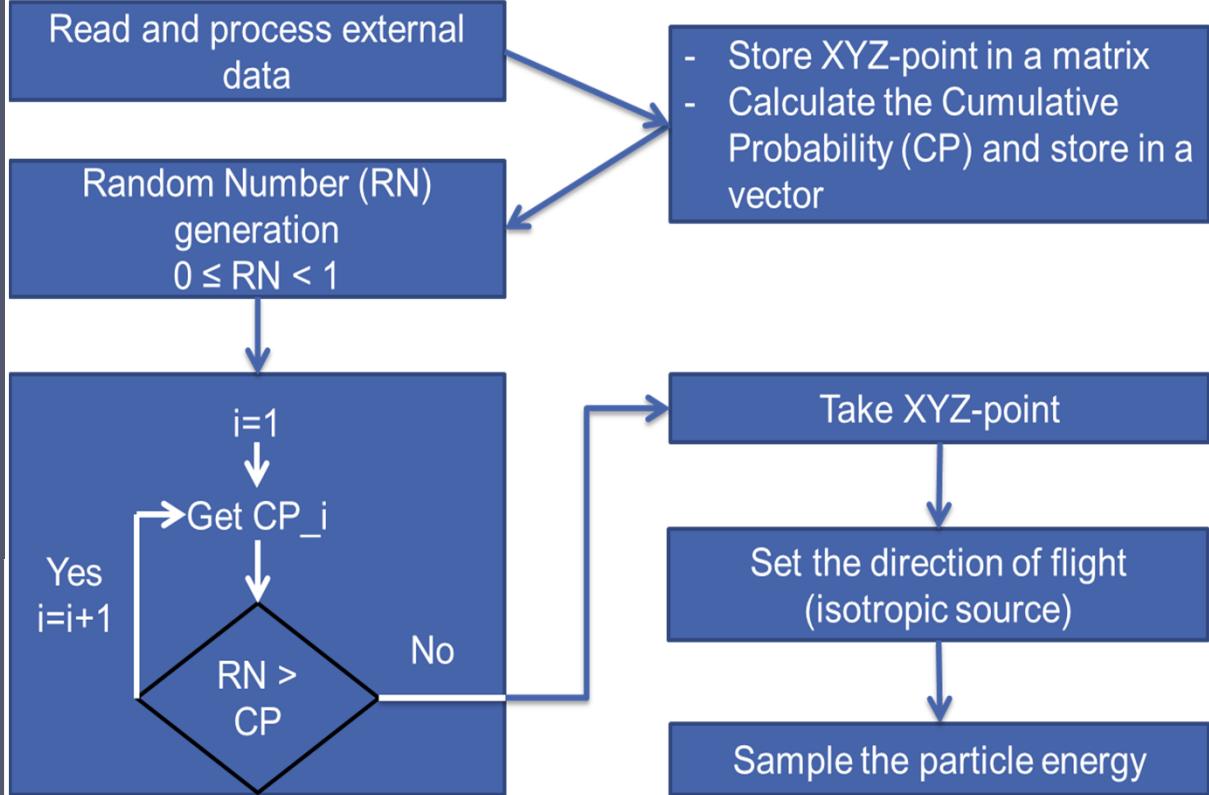
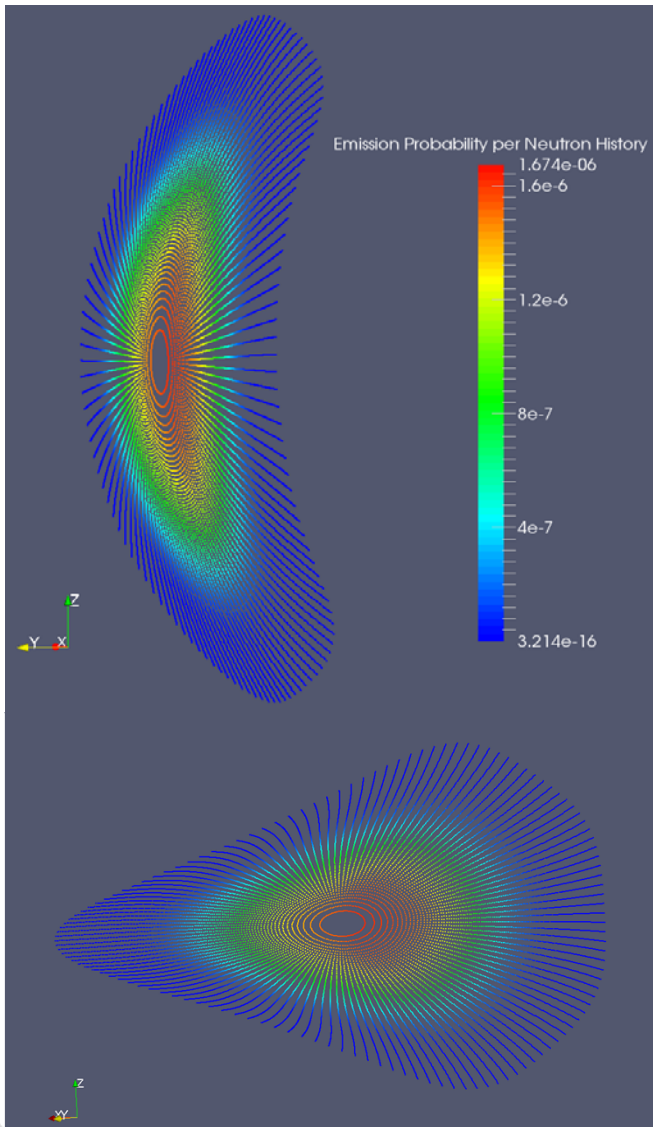
Neutron (14.1 MeV)



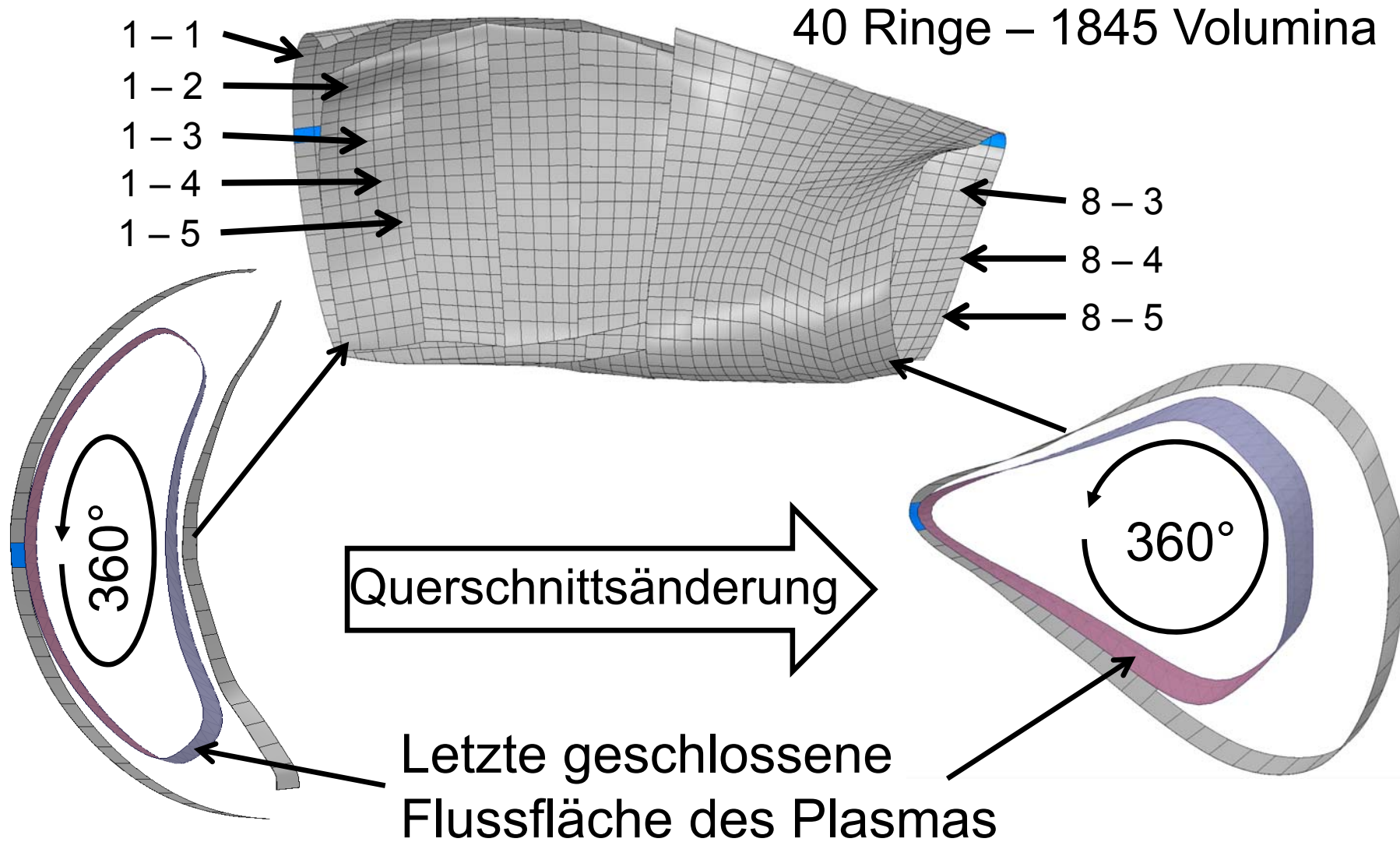
- Anwendung auf Basis des Monte Carlo Verfahrens:
 - Simulation eines wahren physikalischen Prozesses auf mikroskopischer Ebene
 - Probabilistische Methode → statistische Aufzeichnung von stochastischen Prozessen
 - Aufzeichnen sehr vieler Versuchsdurchläufe → Generierung von statistisch verlässlichen Ergebnissen
 - Strahlentransportcode MCNP (**M**onte-**C**arlo **N**-**P**article) ist Standard Code in der Fusionsneutronik
- Berechnungen auf Basis von Geometrie, Strahlungsquelle (räumliche Verteilung, Energie, Teilchenart), Materialdatenbanken mit nuklearen Reaktionswahrscheinlichkeiten
- Ergebnis sind die angeforderten nuklearen Informationen, bspw. Neutronenflussverteilung, Materialbelastungen (nukleare Aufheizung und Schädigung), Tritium Brutrate, Abschirmung, Abschaltdosisrate...



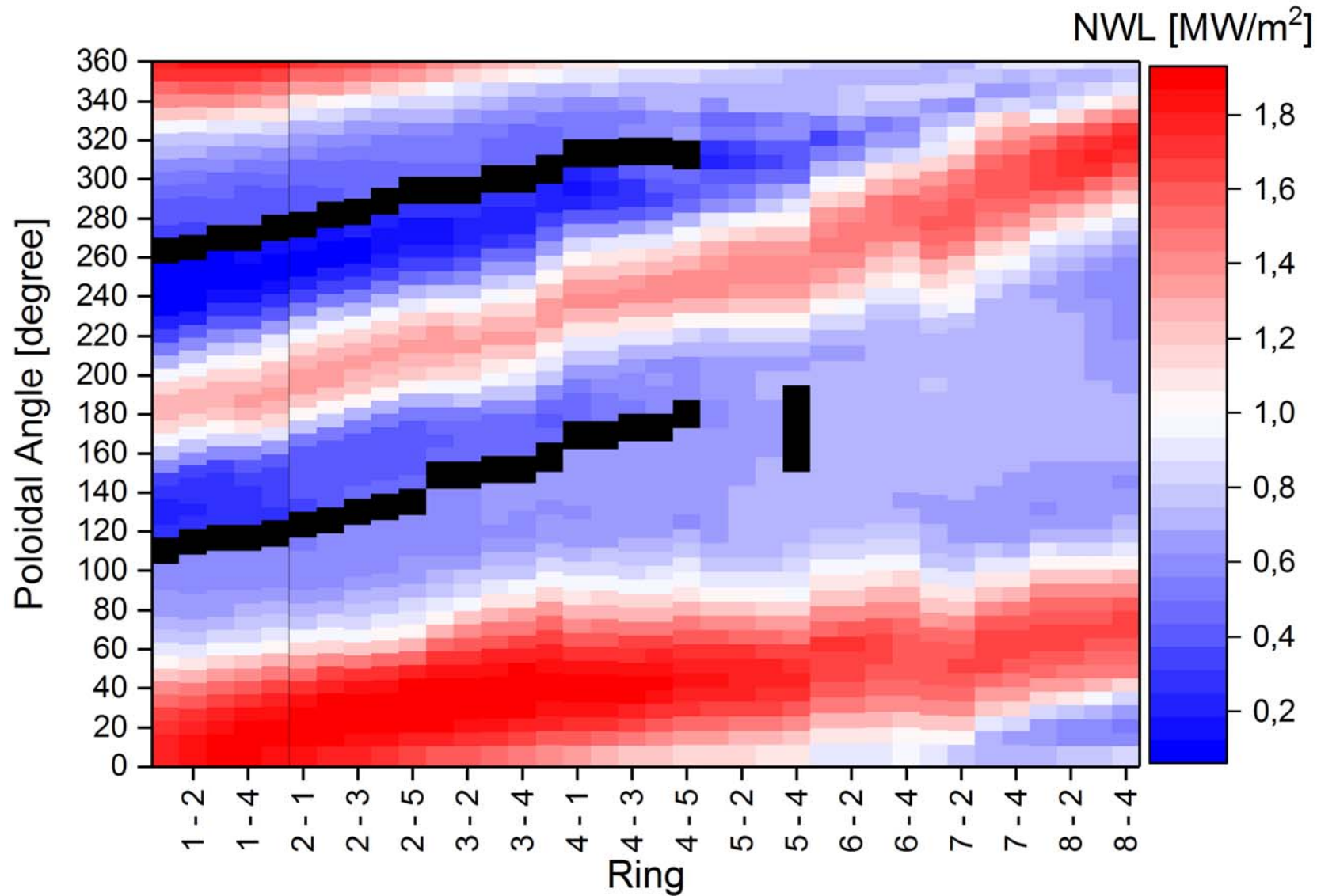
Neutronenquelle



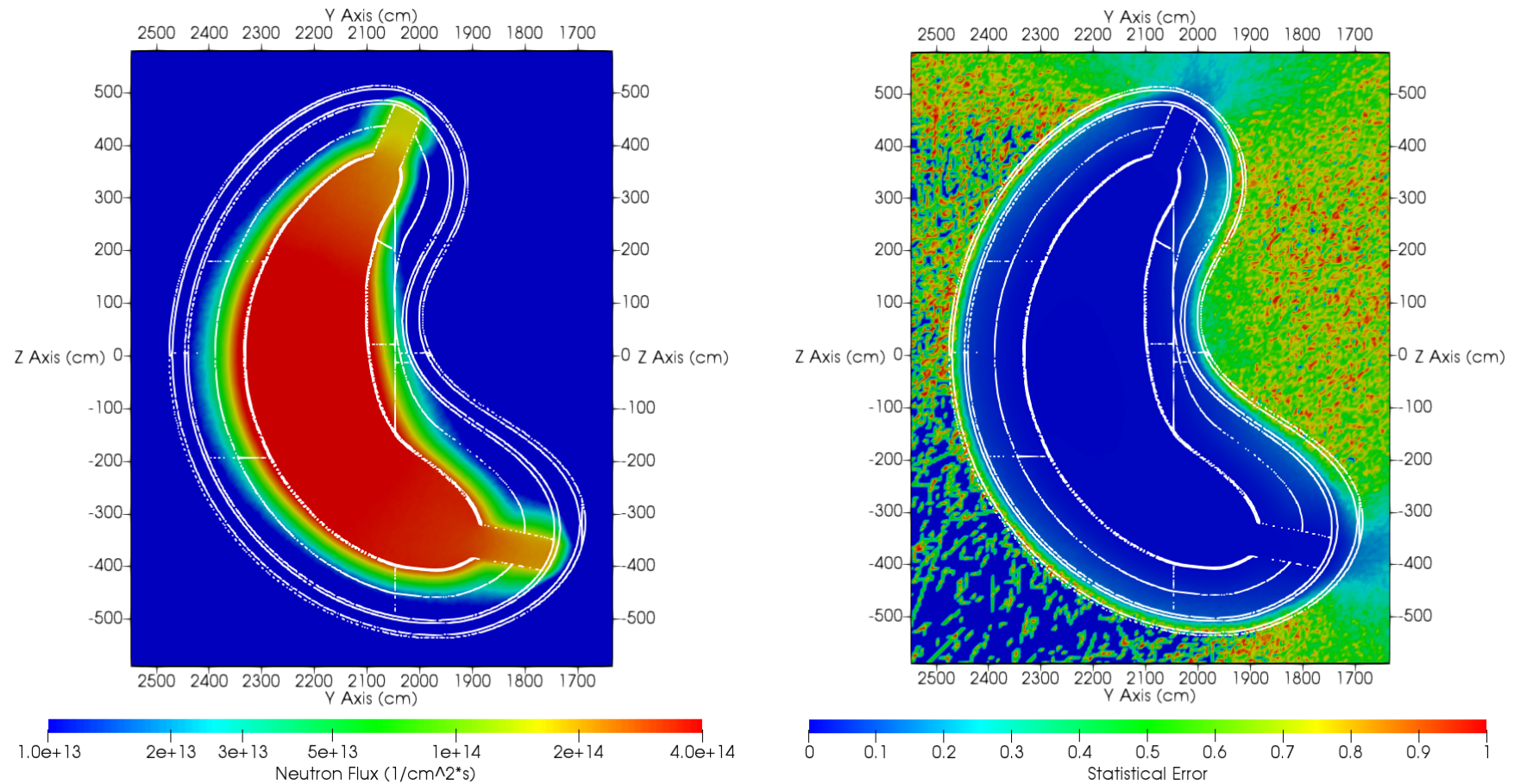
Neutronen Wandbelastung – Geometrie



Neutronen Wandbelastung

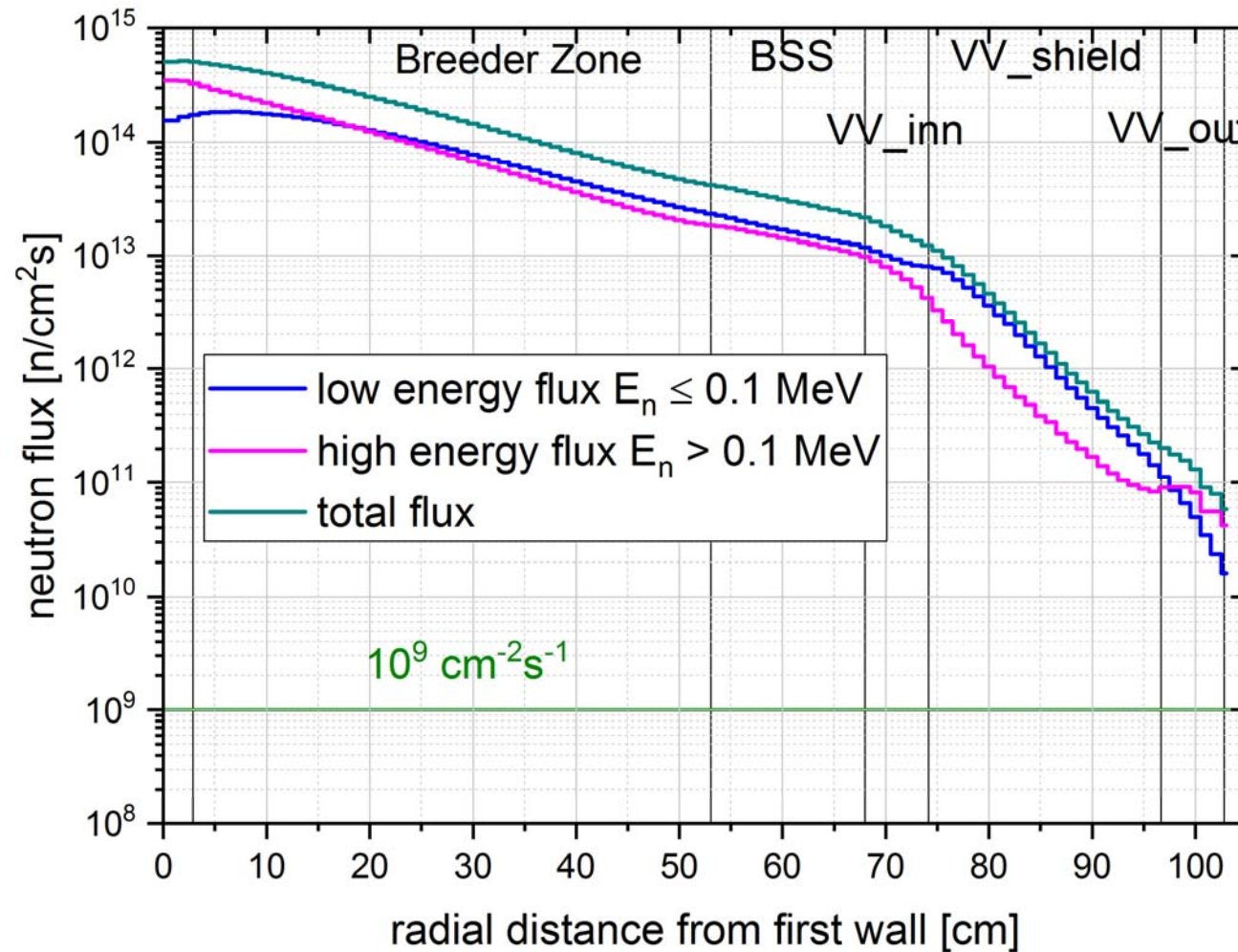


Neutronflussverteilung



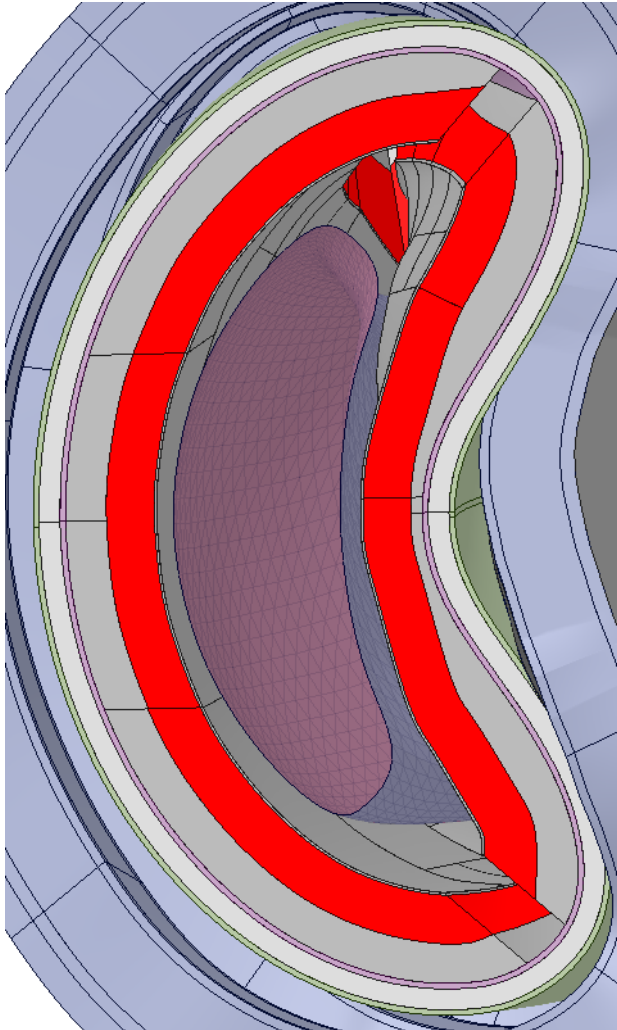
Neutronflussverteilung mit Geometrie in der Bohnenebene und dazugehörigem statistischem Fehler.

Neutronfluss



DEMO Kriterium: “Maximale Neutronenfluenz an der Epoxy Isolierung der Magnetfeldspule” → Ziel: 10^{22} m^{-2} → $10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Bestrahlungszeit: 20 CY, 6 FPY)

Tritium Brutrate (TBR)



Rot = Brutzone

- Tritium Selbstversorgung ($TBR \geq 1.10$) ist Grundvoraussetzung eines jeden D-T Fusionsleistungsreaktors
- Helium Cooled Pebble Bed (HCPB) Brutblanket wird als denkbare Option für HELIAS angesehen
- Homogenisierte Materialmischung mit 60% Lithium-6 Anreicherung \rightarrow wichtigste Reaktion: $Li-6 + n \rightarrow He-4 + T + 4.78 \text{ MeV}$
- Sehr hoher TBR Wert von 1.387 ± 0.001 ist erreicht \rightarrow sehr idealisierte Annahme einer homogenisierten Brutzone welche fast die gesamte Plasmakammer abdeckt
- Resultat ist ein sehr guter Ausgangspunkt zur Stellarator Brutblanket Entwicklung

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassung

- Kernfusion ist eine potentiell nutzbare Energiequelle zur Stromproduktion für die Zukunft
- Fusionsforschung wird in Europa und Weltweit betrieben
- Tokamak und Stellarator sind potentiell als Leistungsreaktoren geeignet → Tokamak vorangeschrittener in Entwicklung als Stellarator
- Neutronik für HELIAS zeigt Eignung als Leistungsreaktor, aber auch Schwachstellen im aktuellen Design
- Weiterentwicklung des Konzepts auf Basis bisher erlangter Ergebnisse
- Integration von Designkomponenten, z.B. hochdetailliertes Brutblanket