



Fusionsforschung am IPP

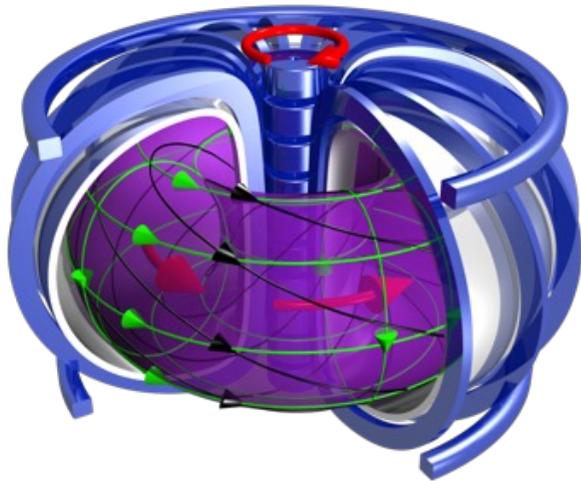
Sibylle Günter
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik





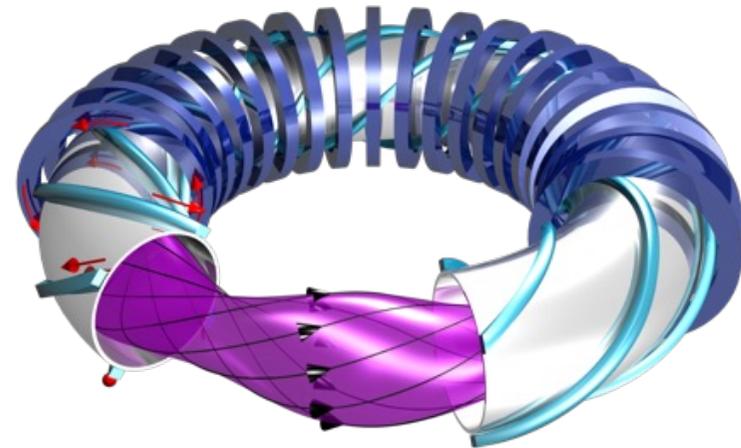
Magnetfusion: Zwei Typen von Magnetfeldkäfigen

Tokamak



starker Strom im Plasma
Magnetfeld durch Spulen und Plasmastrom
im Normalfall gepulster Betrieb

Stellarator



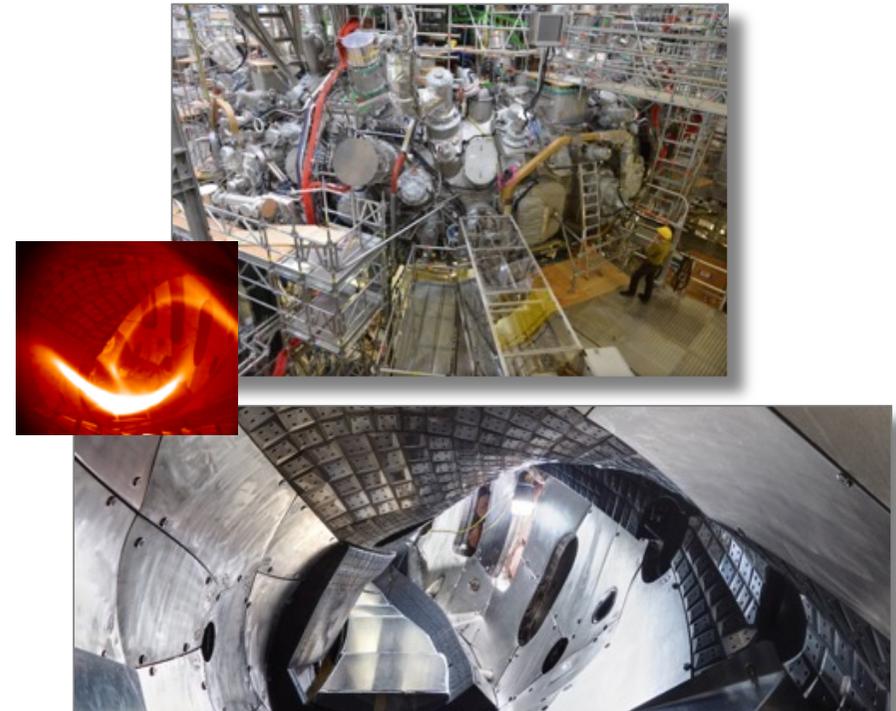
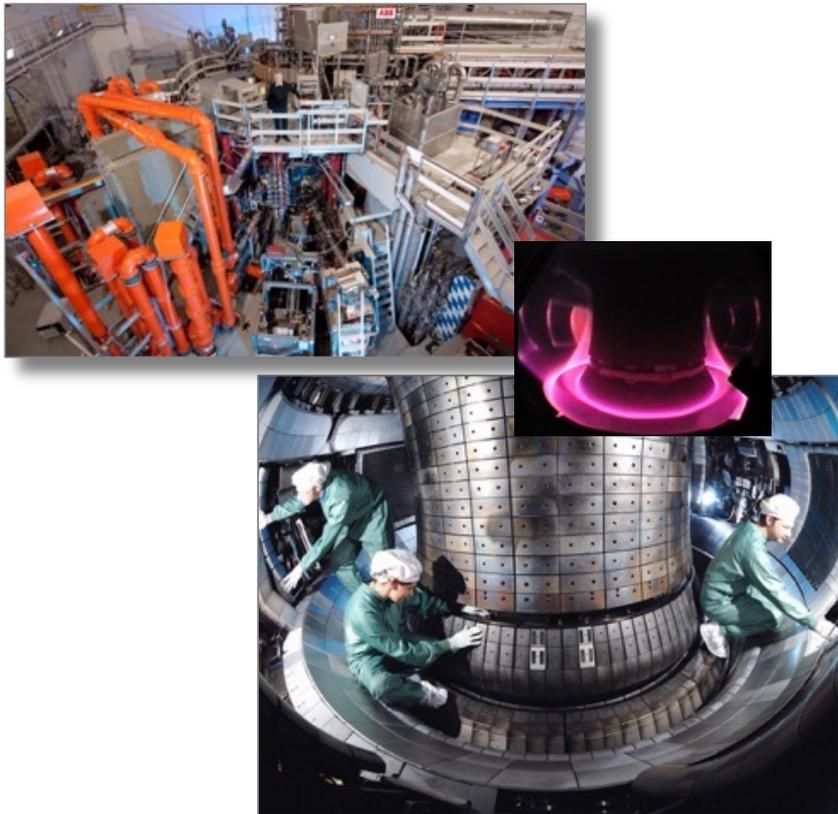
kein Strom im Plasma
Magnetfeld nur durch äußere Spulen
durchgehender Betrieb
(Optimierung erforderlich!)



Alleinstellungsmerkmal: Beide Konzepte am IPP untersucht

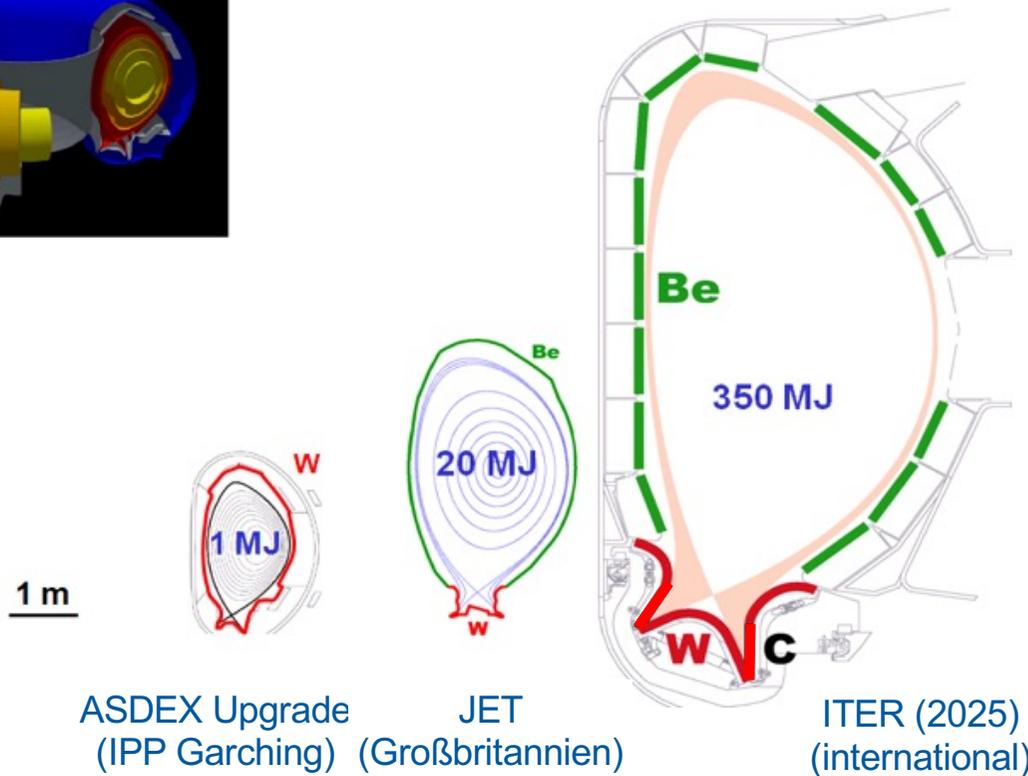
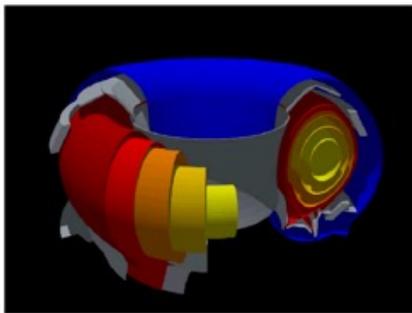
ASDEX Upgrade Tokamak, Garching

Wendelstein 7-X Stellarator, Greifswald





ASDEX Upgrade: Wegbereiter für Tokamak-Kraftwerk



- ASDEX Upgrade ist klein genug, um neue Ideen zu testen
- Groß genug, um relevant zu sein
- Aufgabe: Vorbereitung von Betriebs-Szenarien für ITER und ein Kraftwerk



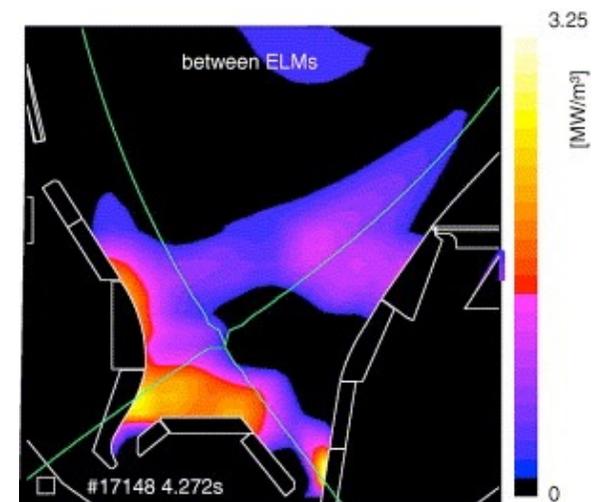
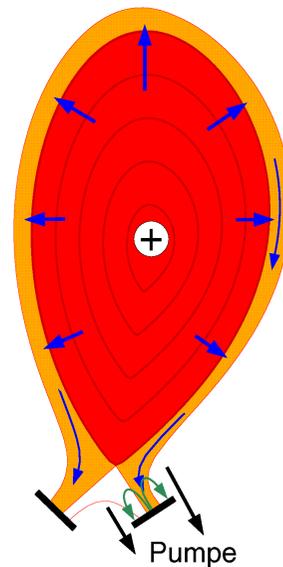
Beispiel: Wärmeabfuhr

Problem:

Bei direktem Kontakt zwischen Plasma und Wand ist der Wärmefluss so groß wie auf der Sonnenoberfläche ($\sim 200 \text{ MW/m}^2$). Das technologische Limit liegt eine Größenordnung darunter ($\sim 10 \text{ MW/m}^2 - 20 \text{ MW/m}^2$).

Lösungsstrategien:

- Abstrahlung von Leistung im Divertor





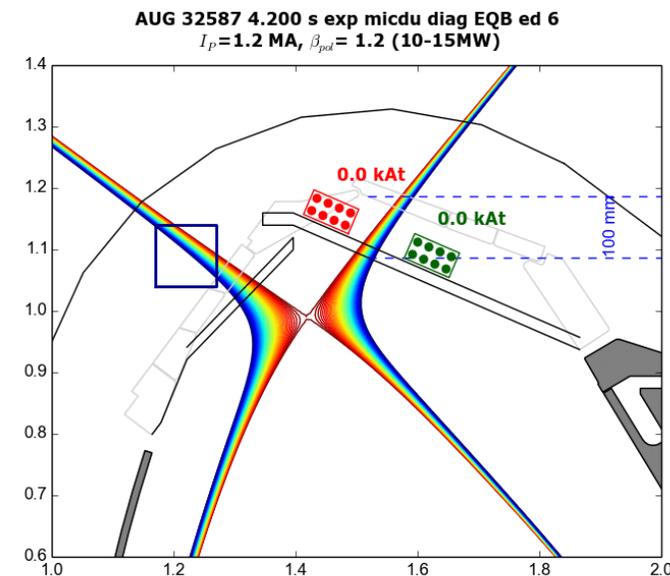
Beispiel: Wärmeabfuhr

Problem:

Bei direktem Kontakt zwischen Plasma und Wand ist der Wärmefluss so groß wie auf der Sonnenoberfläche ($\sim 200 \text{ MW/m}^2$). Das technologische Limit liegt eine Größenordnung darunter ($\sim 10 \text{ MW/m}^2 - 20 \text{ MW/m}^2$).

Lösungsstrategien:

- Abstrahlung von Leistung im Divertor
- ASDEX Upgrade kann Wärmeflüsse testen wie sie bei ITER/DEMO zu erwarten sind
- Test von verschiedenen Divertor-Geometrien (modifizierter/oberer Divertor an ASDEX Upgrade mit 50% EUROfusion-Beteiligung)





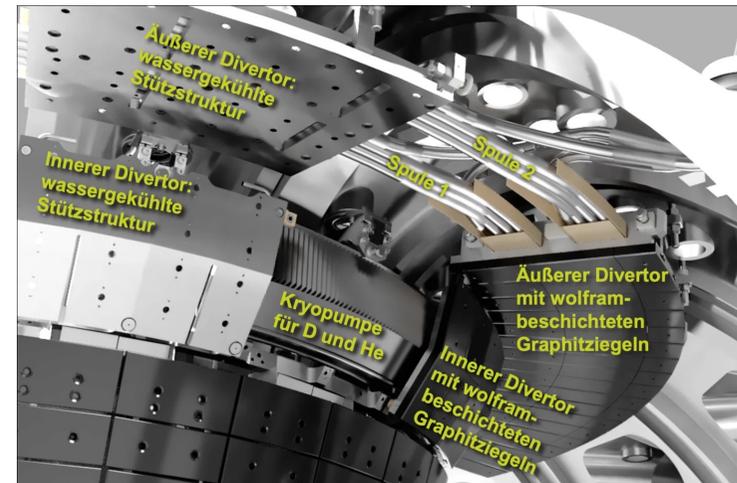
Beispiel: Wärmeabfuhr

Problem:

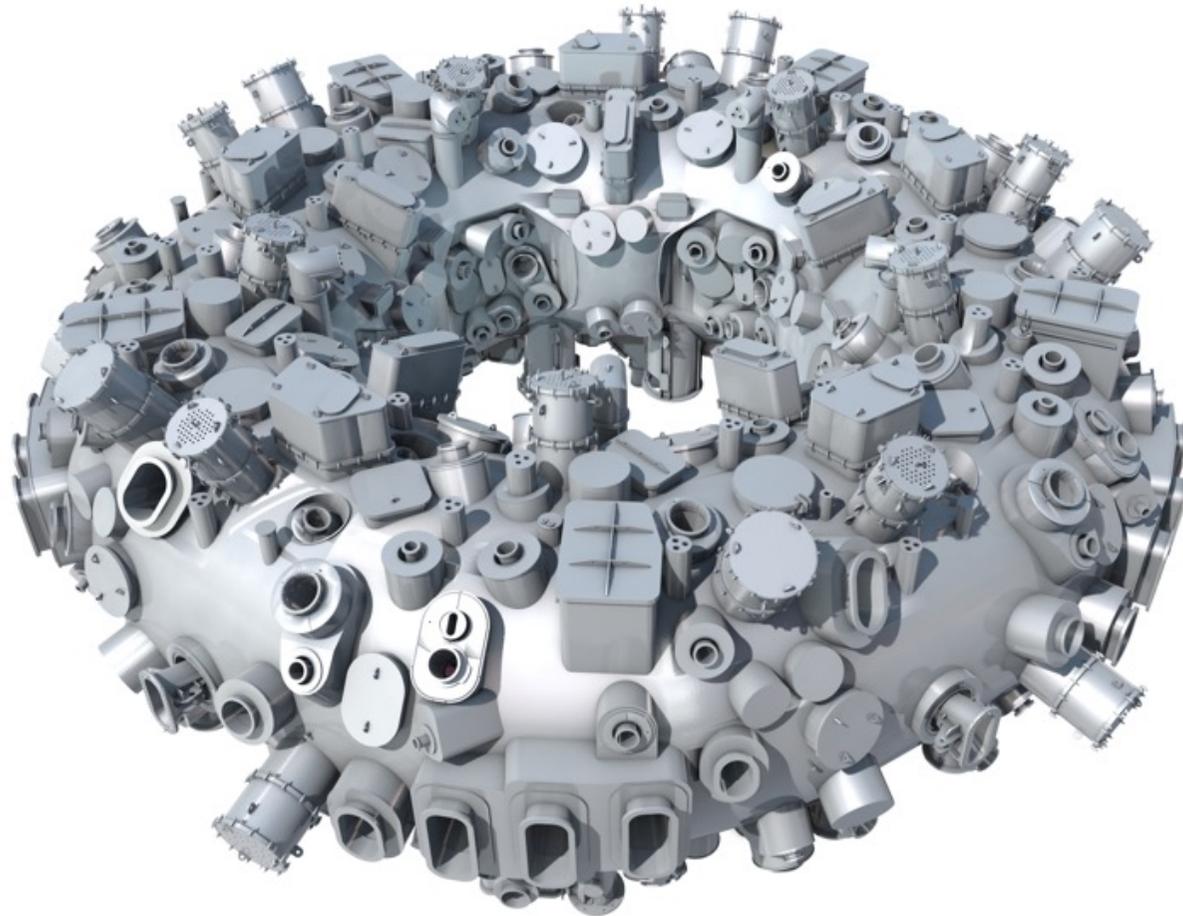
Bei direktem Kontakt zwischen Plasma und Wand ist der Wärmefluss so groß wie auf der Sonnenoberfläche ($\sim 200 \text{ MW/m}^2$). Das technologische Limit liegt eine Größenordnung darunter ($\sim 10 \text{ MW/m}^2 - 20 \text{ MW/m}^2$).

Lösungsstrategien:

- Abstrahlung von Leistung im Divertor
- ASDEX Upgrade kann Wärmeflüsse testen wie sie bei ITER/DEMO zu erwarten sind
- Test von verschiedenen Divertor-Geometrien (modifizierter/oberer Divertor an ASDEX Upgrade mit 50% EUROfusion-Beteiligung)



Der optimierte Stellarator Wendelstein 7-X



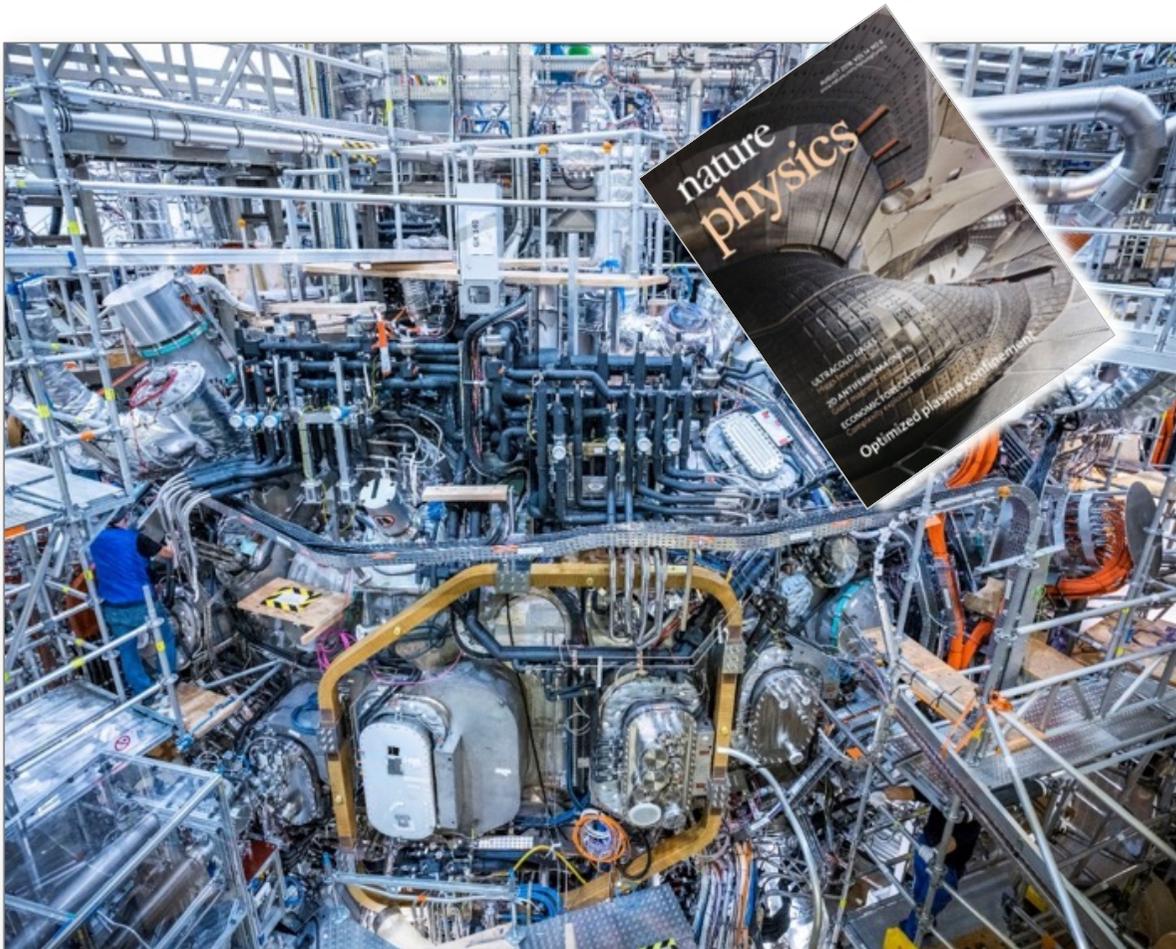
Optimierung des Magnetfeldkäfigs
entsprechend 7 Kriterien

Passende supraleitende Magnete

Kryostat für Kühlung auf -270 °C



Wendelstein 7-X erfolgreich aufgebaut



Nachweis des Erfolgs der Optimierung und erste Weltrekorde bereits in ersten Kampagnen

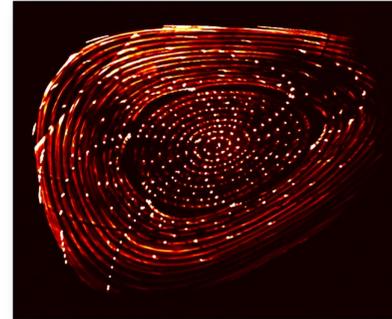


Seit 2022 für Dauerbetrieb gerüstet



Die Optimierungskriterien von W7-X

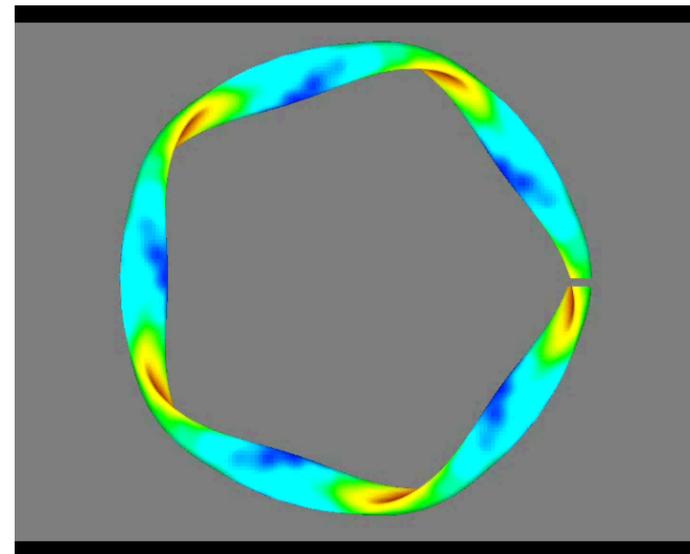
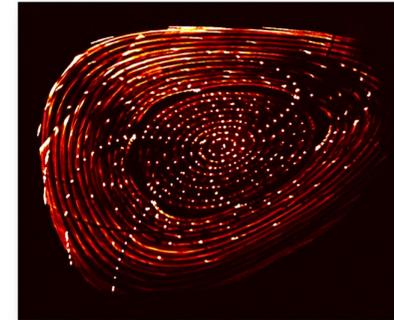
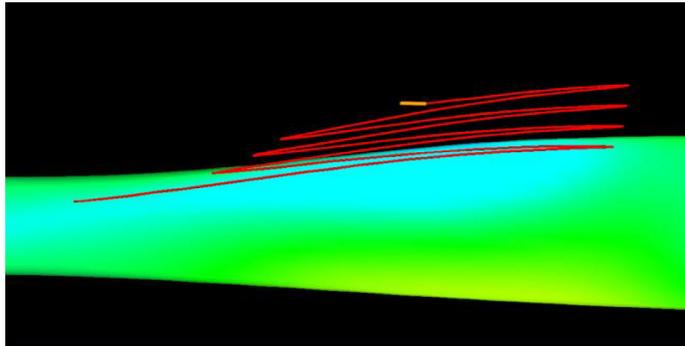
- Gute magnetische Flussflächen





Die Optimierungskriterien von W7-X

- Gute magnetische Flussflächen
- Hoher Plasmadruck (bei gegebenem Magnetfeld)
 - bei niedrigem Plasmastrom
- Gute Stabilitätseigenschaften
- Modulare Spulen
- Kleiner (neoklassischer) Transport
- **Guter Einschluss Schneller Teilchen**

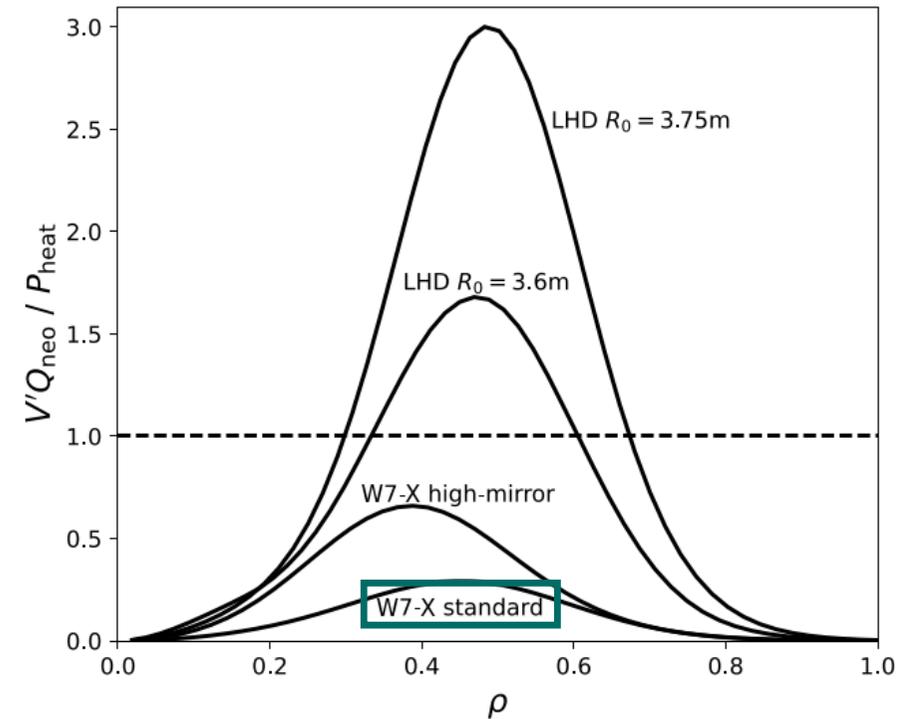




Nachweis der „neoklassischen“ Optimierung

Experimente: W7-X Standard-Konfiguration

- Zum Vergleich: berechnete neoklassische Energieverluste bei gleichen angenommenen Dichte- und Temperaturprofilen für andere W7-X-Konfigurationen bzw. Stellarator-Anlagen (hier LHD)
- In nicht-optimierten Konfigurationen übersteigt der neoklassische Energieverlust die gesamte Heizleistung, d.h. für so hohe Temperaturen wäre eine viel höhere Heizleistung erforderlich

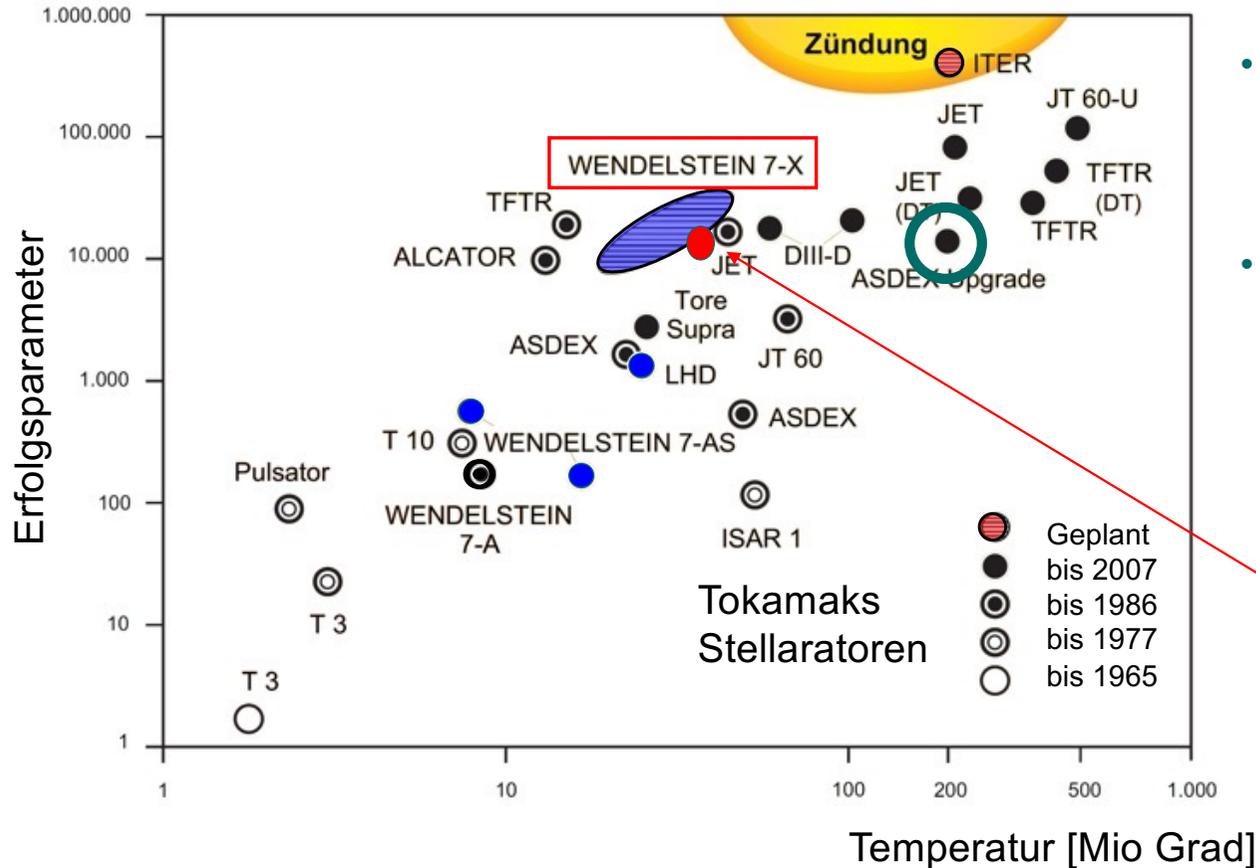


Beidler et al, Nature (2021)

Beweis der neoklassischen Optimierung konnte erbracht werden.



Magnetfusion auf dem Weg zum Kraftwerk

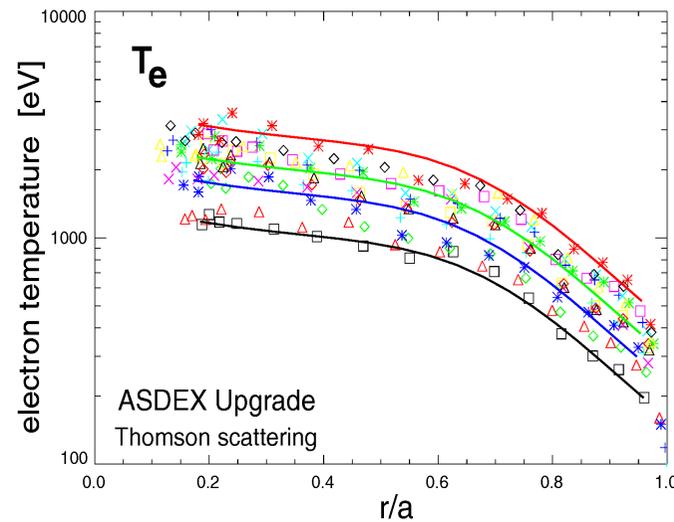
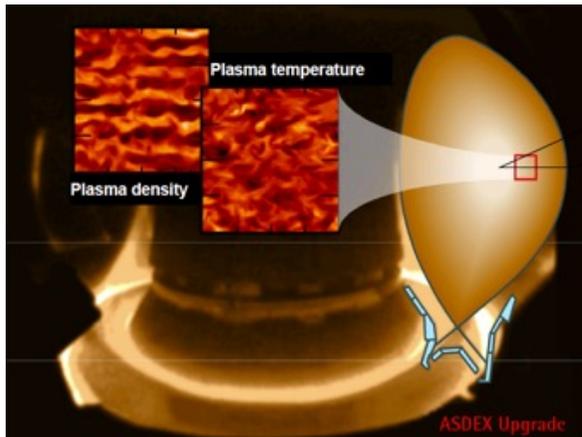


- Erforderliche Temperaturen (>150 Mio Grad) und Dichten erreicht, noch bessere Wärmeisolierung nötig (ITER!)
- Stellaratoren brauchen Optimierung (Hochleistungsrechner!), daher Tokamaks weiter fortgeschritten

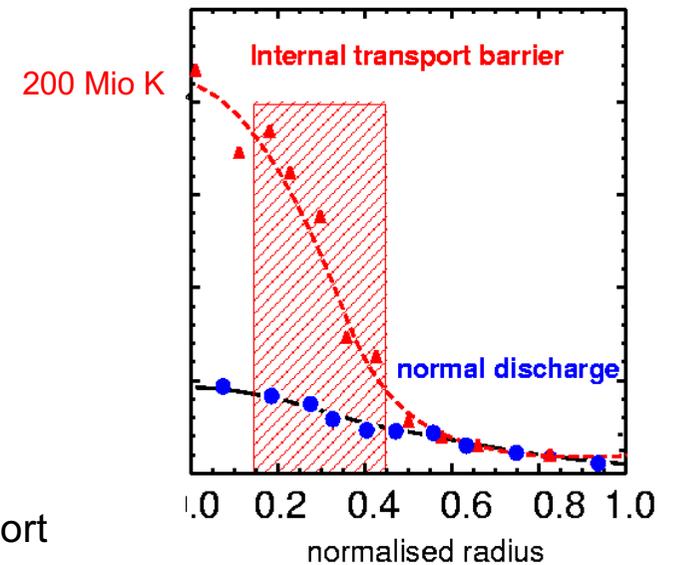
Rekordwerte für Stellaratoren in den ersten Betriebsmonaten

Turbulenter Transport bestimmt Wärmeisolierung

.... und damit die minimale Größe eines Fusionskraftwerks



Unter bestimmten Bedingungen wird Turbulenz unterdrückt

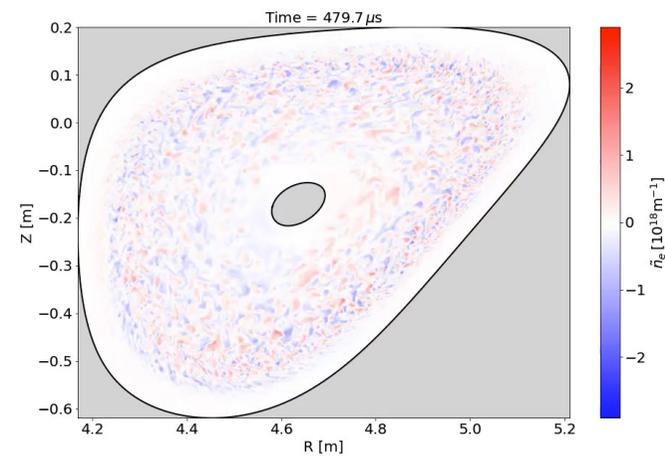
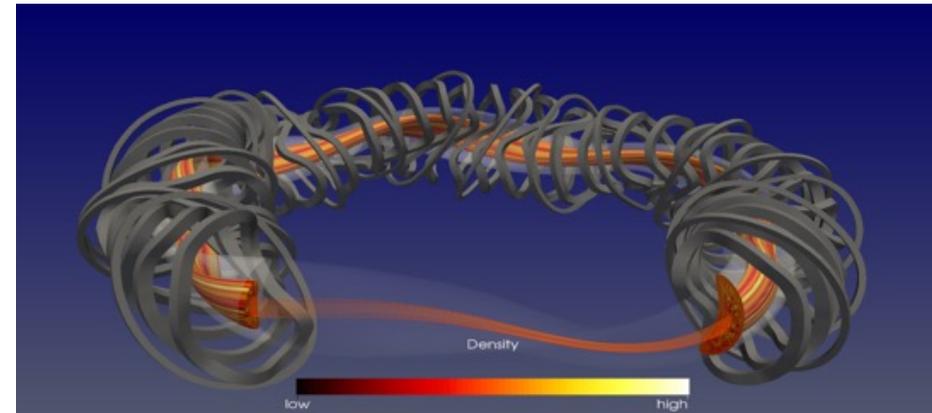
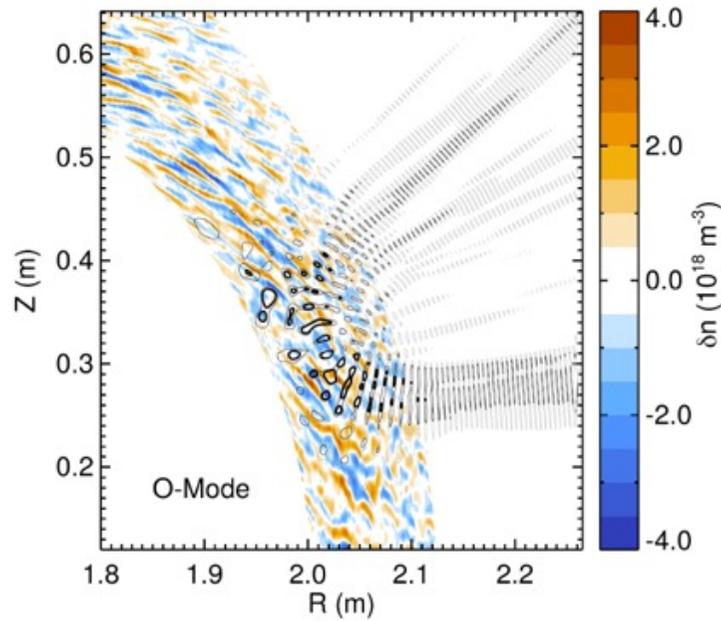


Temperaturprofile sind i.allg. selbstähnlich wegen turbulentem Transport (Turbulenz steigt mit Heizleistung)



Theoretisches Verständnis bringt beide Konzepte voran

Detaillierte mikroskopische Messungen und theoretisches Verständnis ermöglichen Extrapolation zu einem Kraftwerk

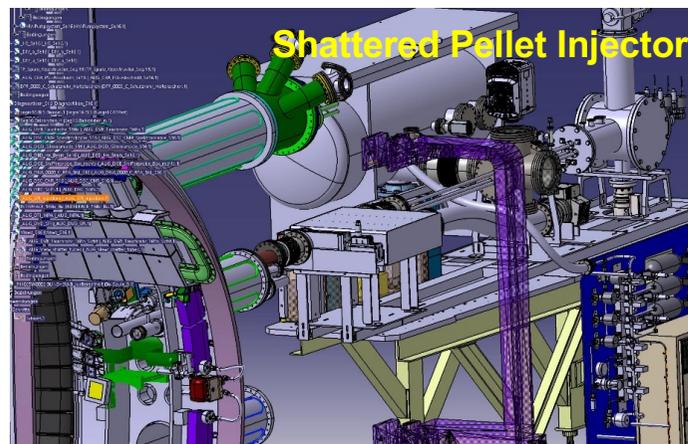
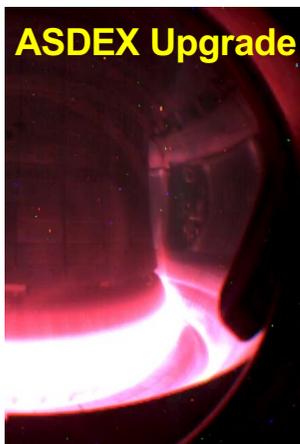




Unterstützung für ITER durch IPP

Entwicklung von Betriebs-Szenarien & Problemlösung

- Betrieb von ASDEX Upgrade and theoretische Extrapolationen



- Physik schneller Teilchen (alpha-Teilchen, Runaways)
- Disruptionen (Mitigation, Kräfte, Ströme)

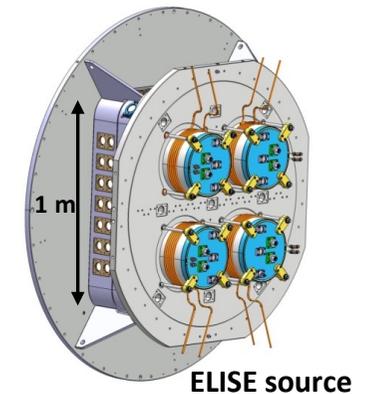
ITER CODAC Entwicklungen

- ITER Plasma Control System (PCS)
- ITER PCS Real-Time Framework und Compact Controller

Entwicklung von Heiz-Systemen

- + ICRH Antenne (Optimierung)
- + ECRH: Physik-Unterstützung

RF Quelle für ITER NBI

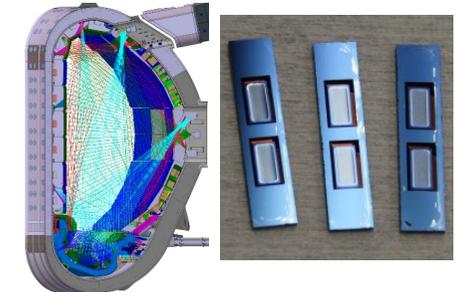


Diagnostik-Entwicklung

ITER Manometer



ITER Bolometer



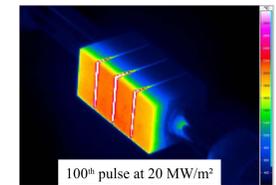
Materialien und Komponenten

Forschung am IPP im Bereich der plasmabelasteten Komponenten für zukünftige Fusionsreaktoren, z.B.

- Metallische Verbundwerkstoffe, z.B. wolframfaserverstärkte Materialien



wolframfaserverstärktes Wolfram nach Bruchtest

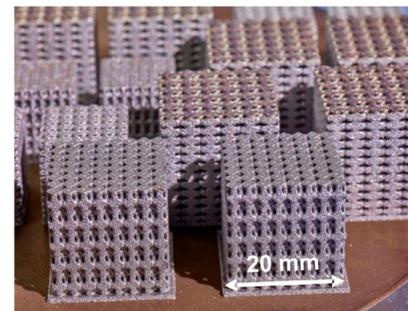


- GLADIS (Garching LArge DIvertor Sample test facility) für Komponententests unter hoher Wärmelast



GLADIS @ IPP Garching

- Additive Fertigung (3D-Druck) von Materialien für plasmabelastete Komponenten



Wolfram-Gitter hergestellt mittels selektivem Laserstrahlschmelzen



Zusammenfassung

- Tokamak- und Stellaratorforschung an einem Institut
- Tokamak ASDEX Upgrade unterstützt Vorbereitung des ITER Betriebs und Entwicklung des DEMO-Designs
- Wendelstein 7-X nun vollständig ausgebaut für Höchstleistungsplasmen mit langen Entladungsdauern
- IPP unterstützt ITER beim Aufbau der Plasma-Heizungen und bei der Diagnostik-Entwicklung
- Umfangreiche Expertise mit Materialien der ersten Wand (Wolfram!)