

Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik

Kraftwerkstauglichkeit von Fusionsanlagen des Typ „Stellarator“:

Die Experimentieranlage Wendelstein 7-X

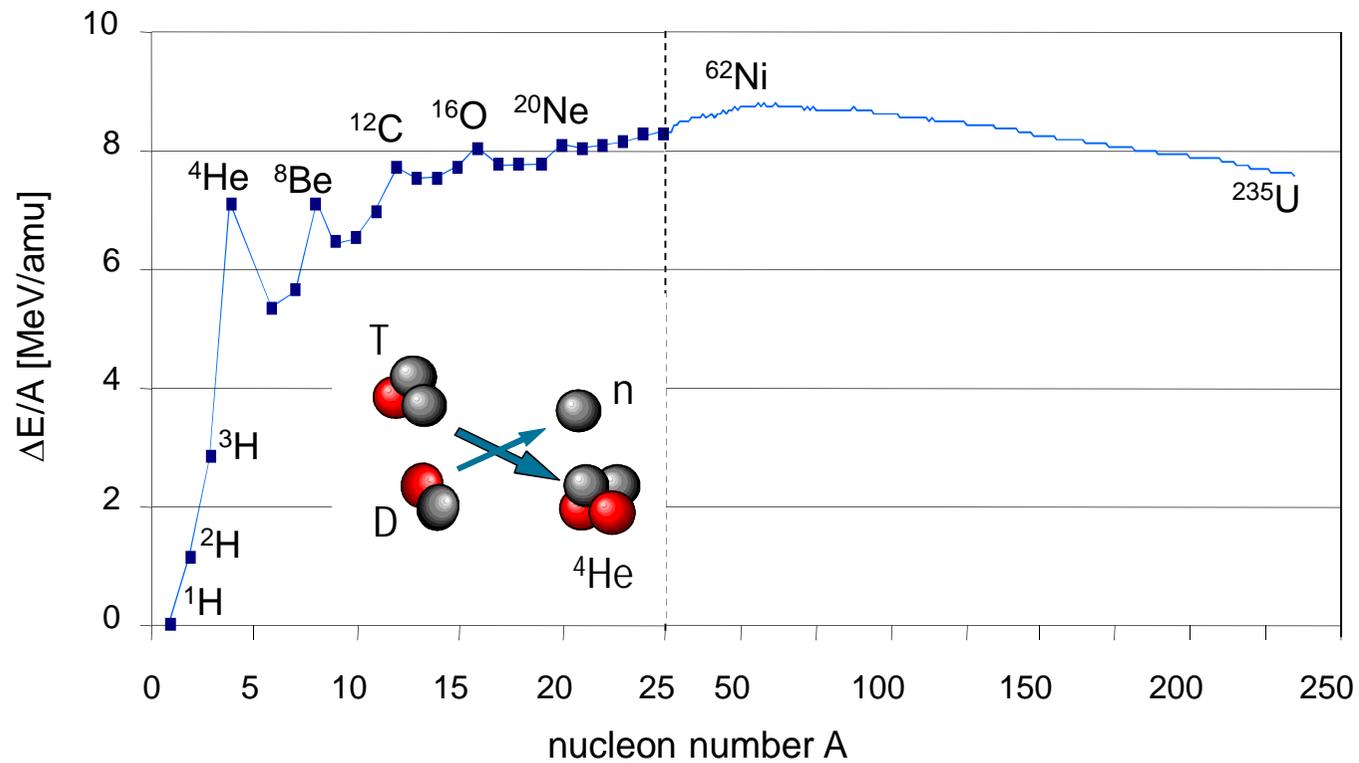
Olaf Grulke

Max-Planck Institut für Plasmaphysik, Greifswald

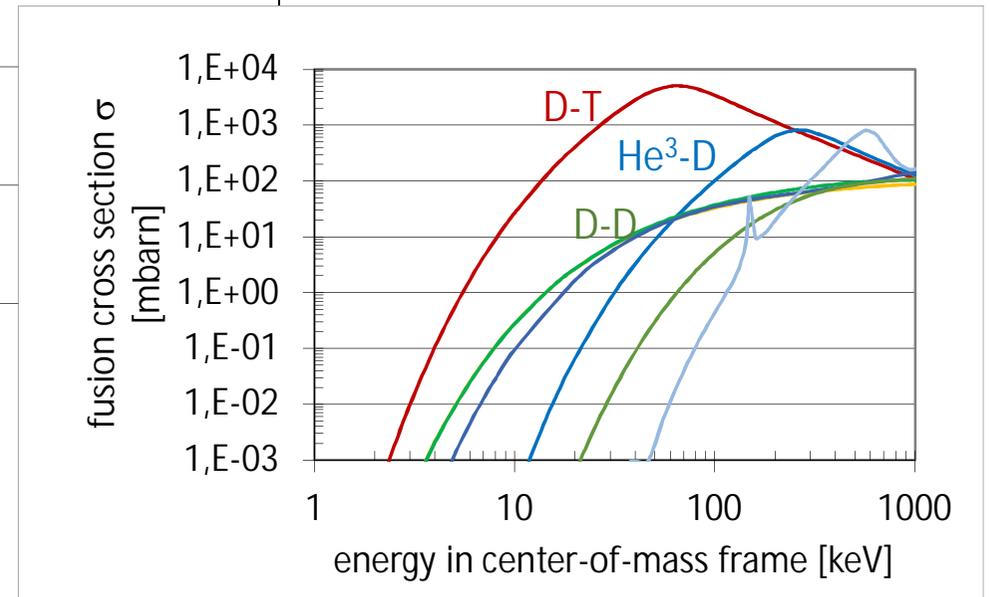
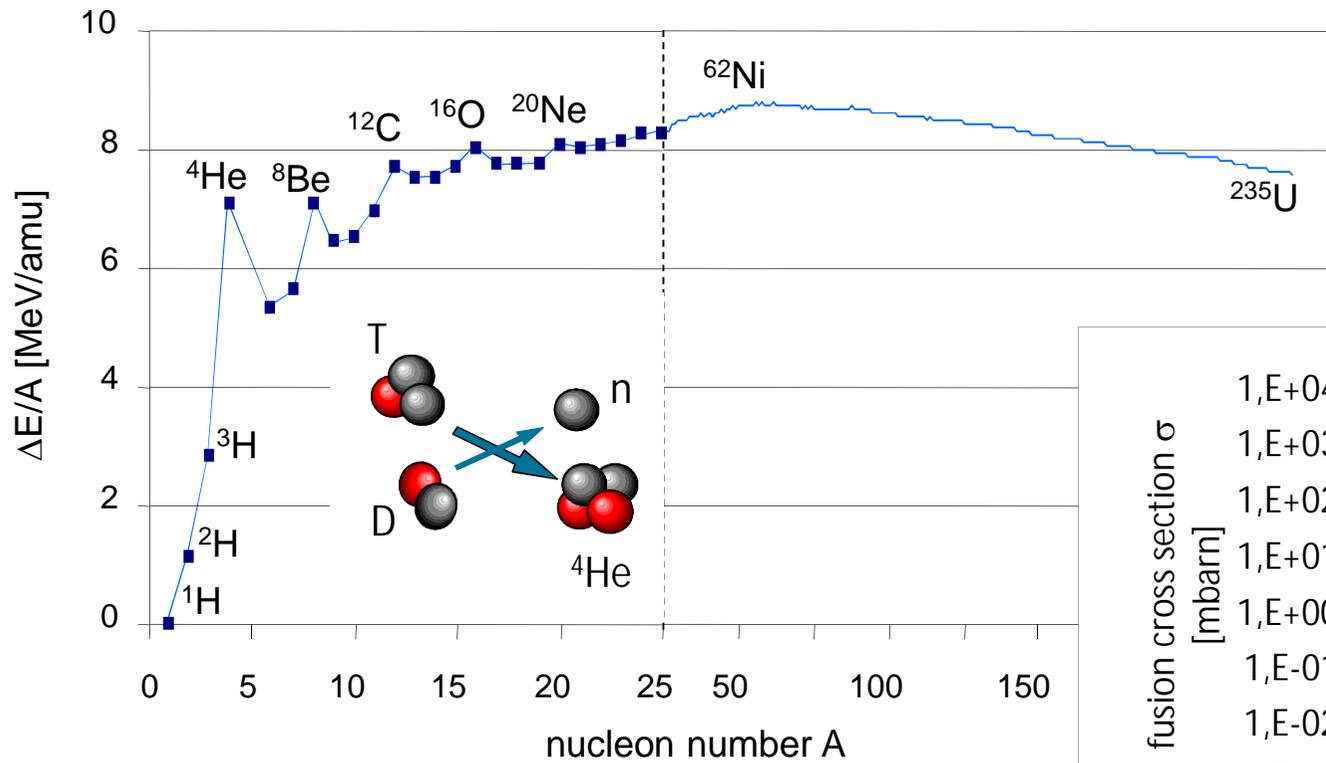


- Grundlagen der Fusion
- zwei Konzepte: Tokamak und Stellarator
- der Stellarator Wendelstein 7-X
- wesentliche Ergebnisse der ersten Betriebsphasen
- Fazit

Grundlagen zur Fusion



Grundlagen zur Fusion



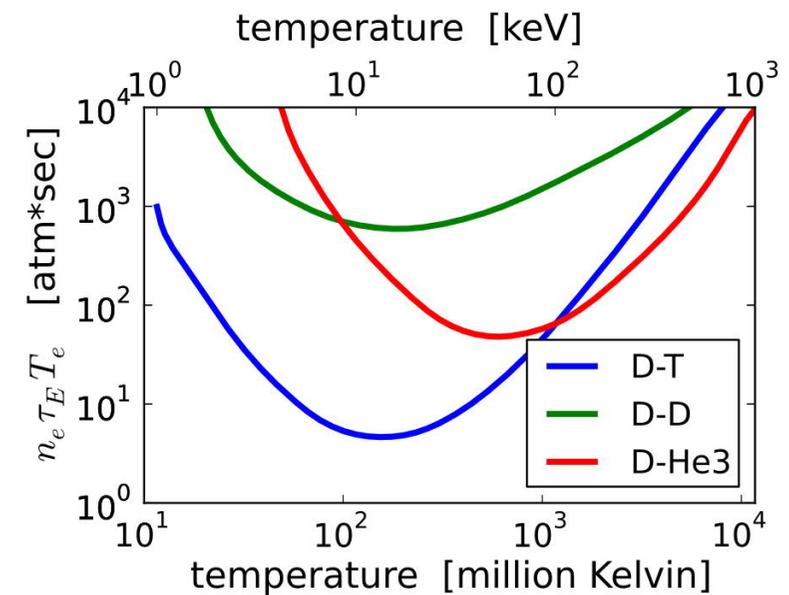
Anforderungen

- Fusionsleistung > Verlustleistung

$$P_{fusion} \geq P_{Verluste}$$

- Lawson-Kriterium / Triple-Produkt

$$n T \tau \approx 3 \cdot 10^{21} \text{ keV s/m}^3$$



Anforderungen

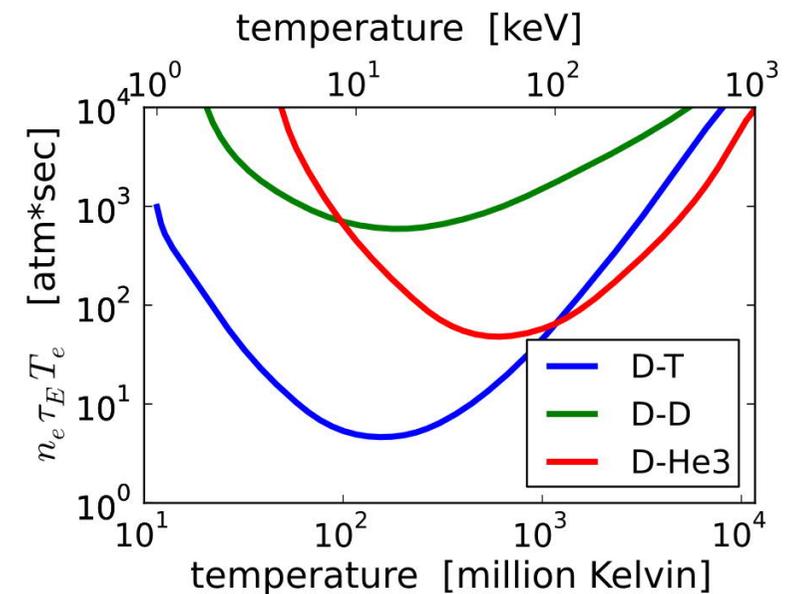
- Fusionsleistung > Verlustleistung

$$P_{fusion} \geq P_{Verluste}$$

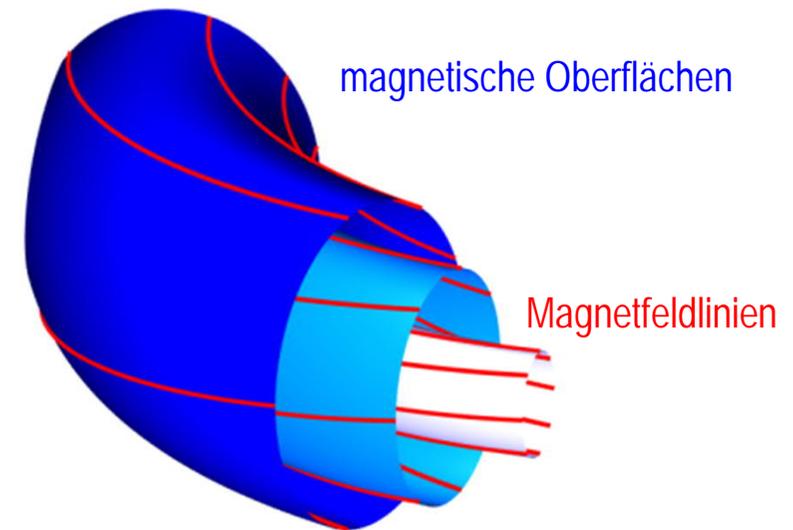
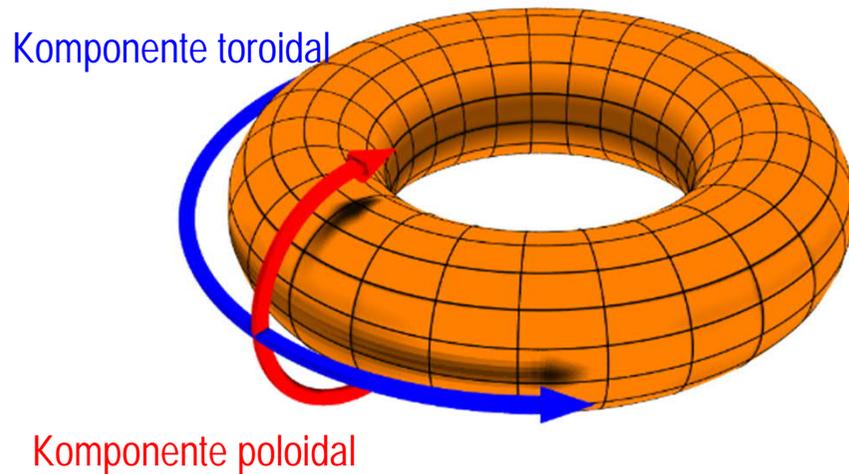
- Lawson-Kriterium / Triple-Produkt

$$n T \tau \approx 3 \cdot 10^{21} \text{ keV s/m}^3$$

- $T \approx 14 \text{ keV}$ (~100 Millionen °C)
- $n \approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$ (1/100000 Atmosphärendichte)
- $\tau \approx$ ein paar s
- guter Einschluß der schnellen α -Teilchen (3.5 MeV)
- kontrollierte Abfuhr des He (Asche des Fusionsprozesses)

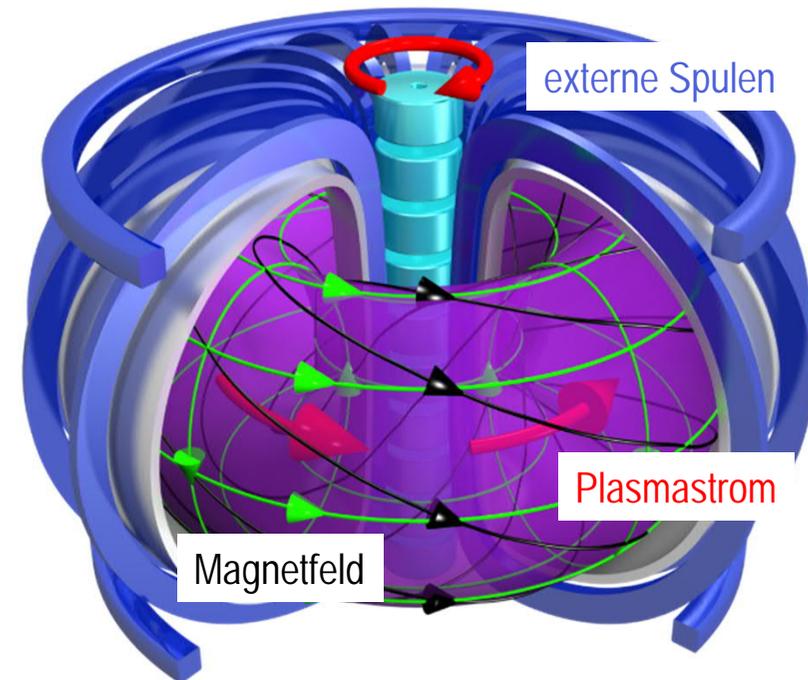
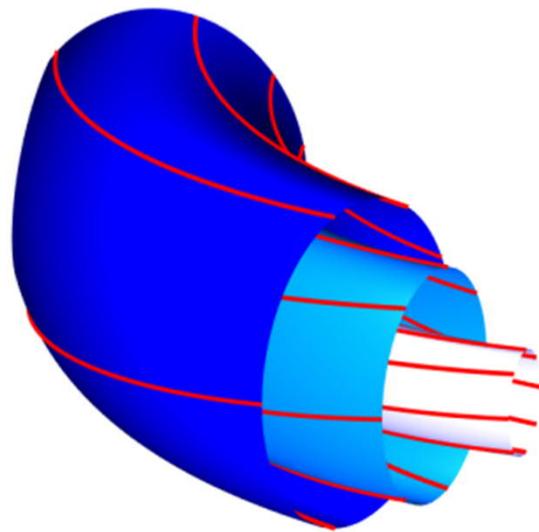


Magnetischer Einschluß



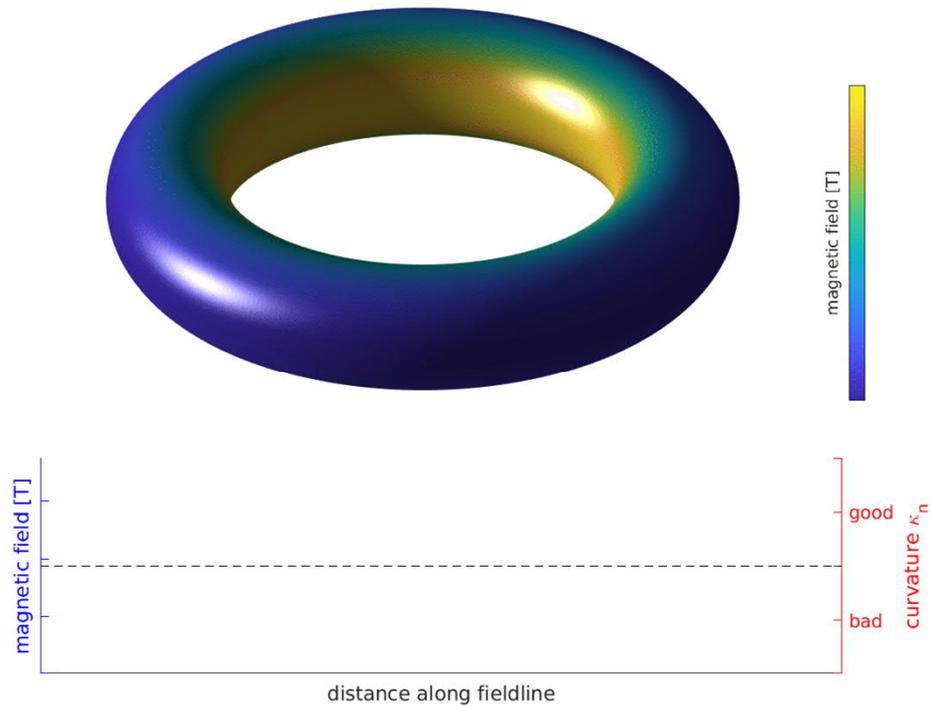
- Konzepte für magnetischen Einschluß benötigen eine toroidale und eine poloidale Komponente des Magnetfeldes
 - Das Resultat ist ein verdrilltes Magnetfeld, das magnetische "Oberflächen" bildet
- ⇒ fundamentale Unterschiede, wie die Komponenten des Magnetfeldes erzeugt werden

Magnetischer Einschluß - Tokamak



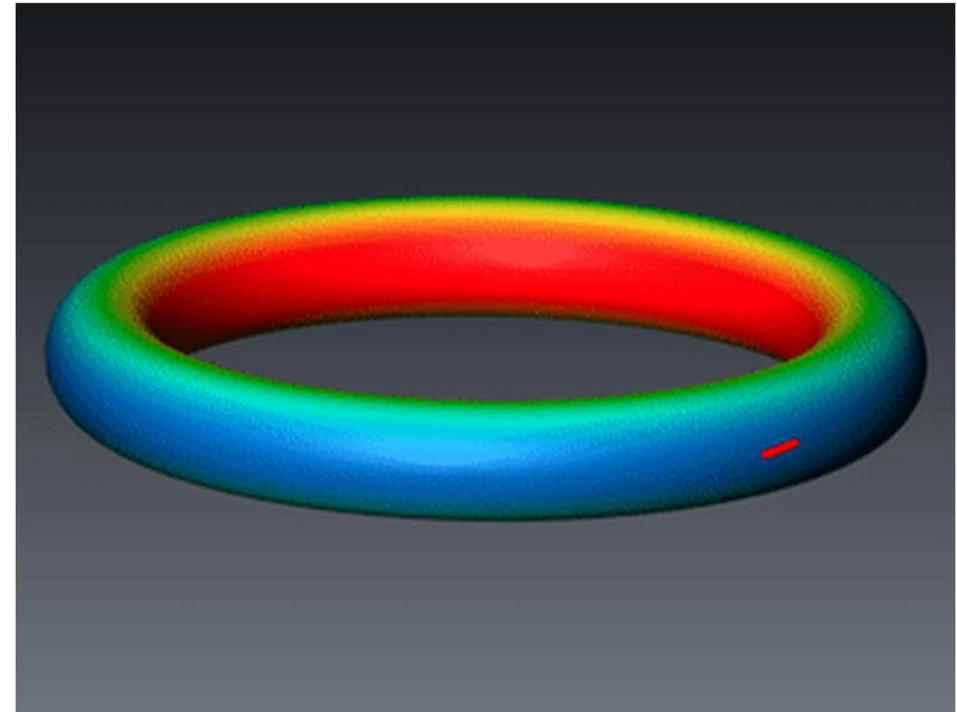
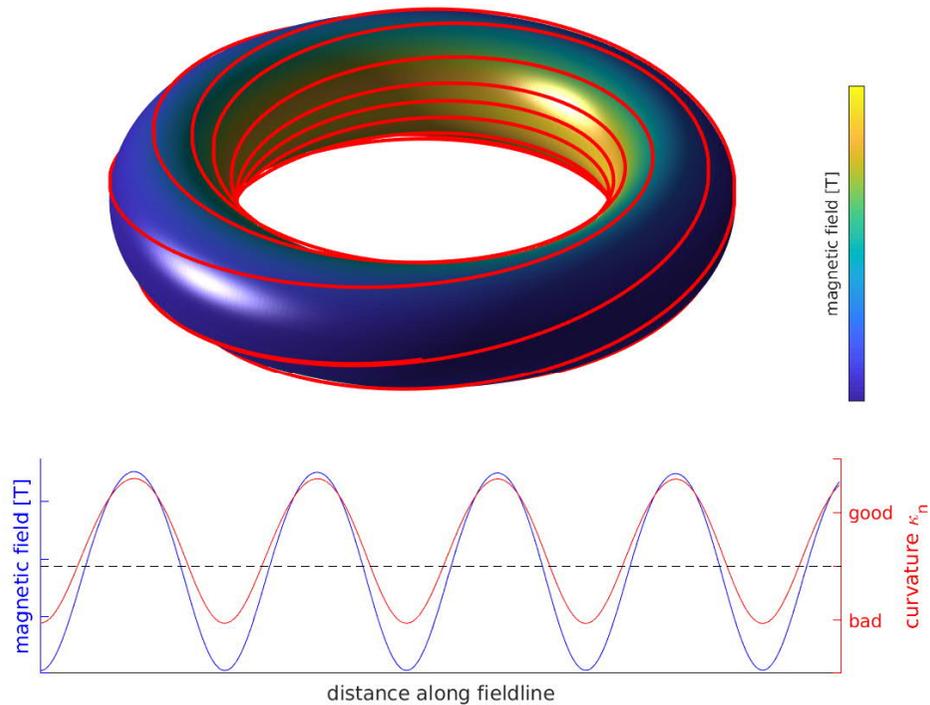
- externe planare Spulen erzeugen toroidale Magnetfeldkomponente
- induktiv getriebener Strom im Plasma erzeugt poloidale Magnetfeldkomponente

Magnetischer Einschluß - Tokamak



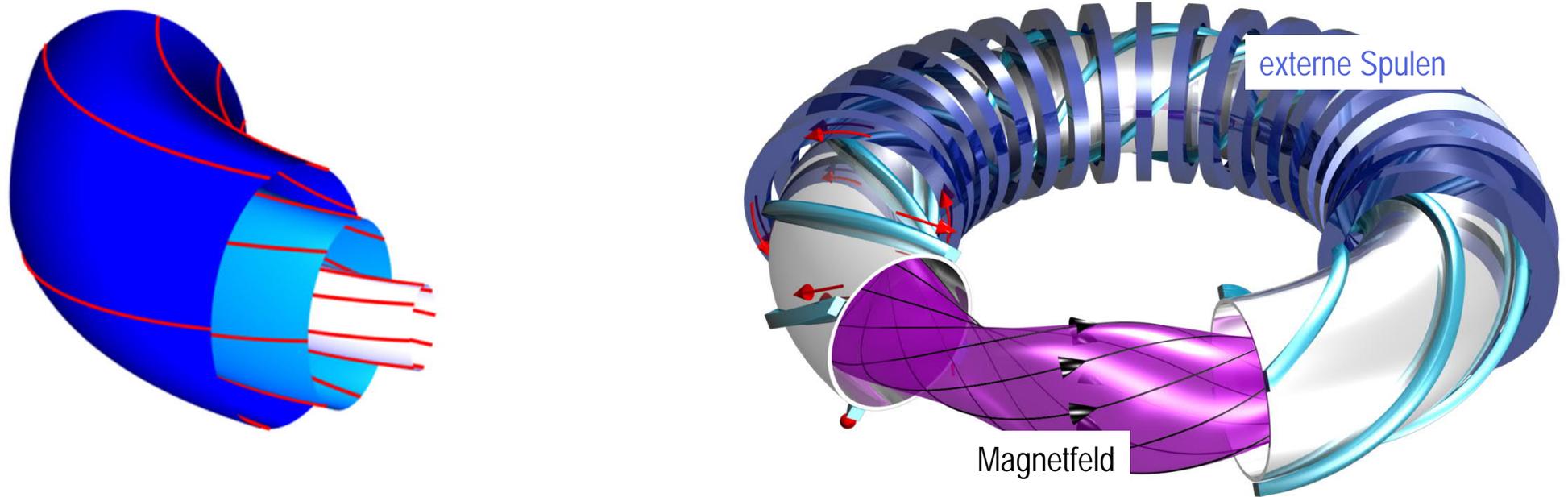
- hohe toroidale Symmetrie des Magnetfeldes

Magnetischer Einschluß - Tokamak



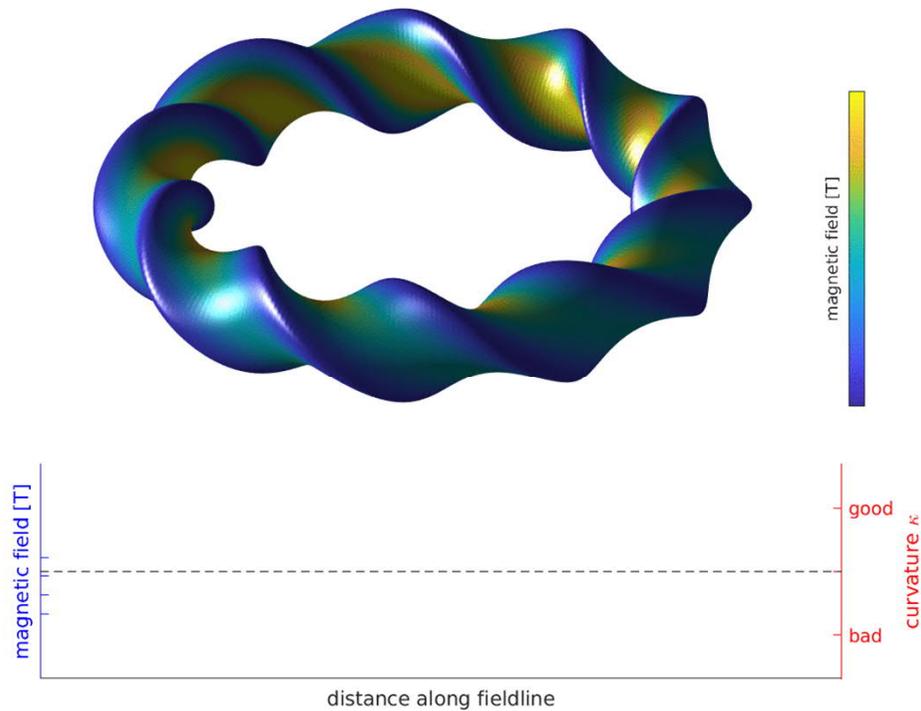
- hohe toroidale Symmetrie des Magnetfeldes
- sehr gutes Einschlußverhalten der Teilchen

Magnetischer Einschluß - Stellarator



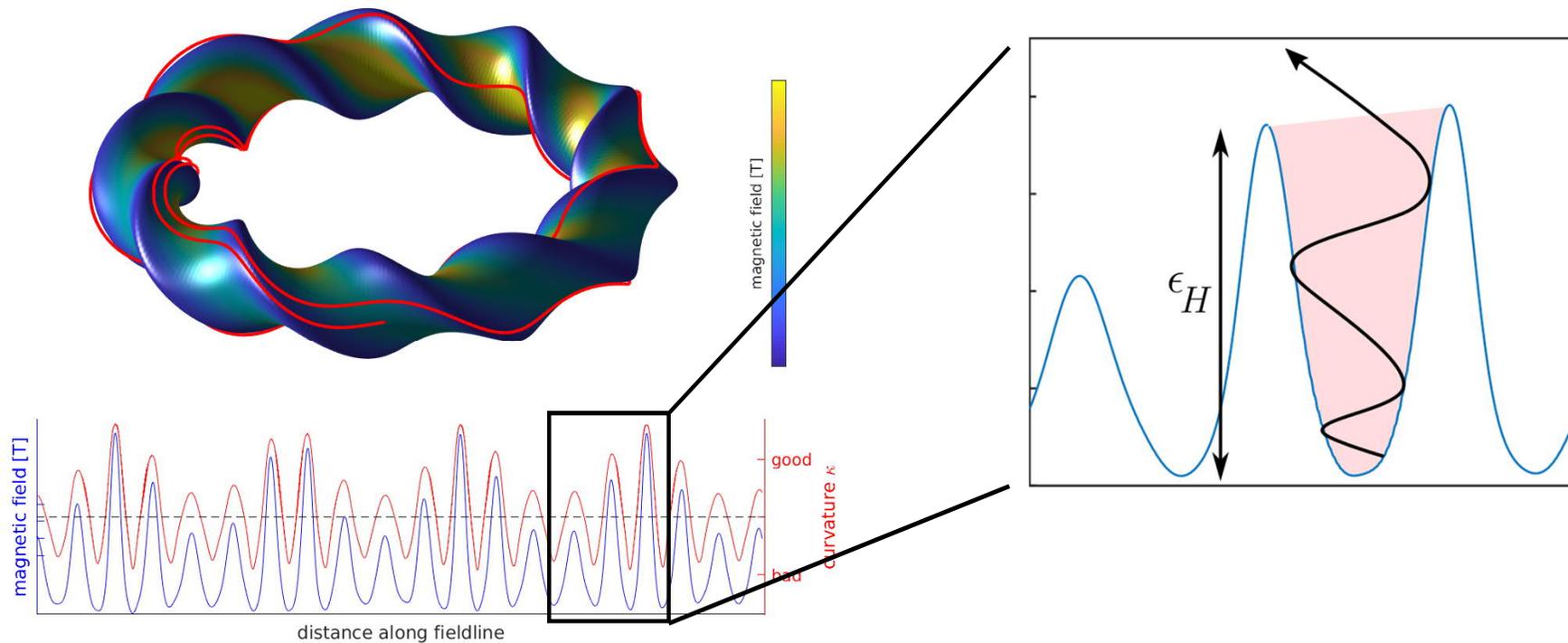
- das Magnetfeld wird ausschließlich von externen Spulen erzeugt
- eine große Variation von Konfigurationen möglich

Magnetischer Einschluß - Stellarator



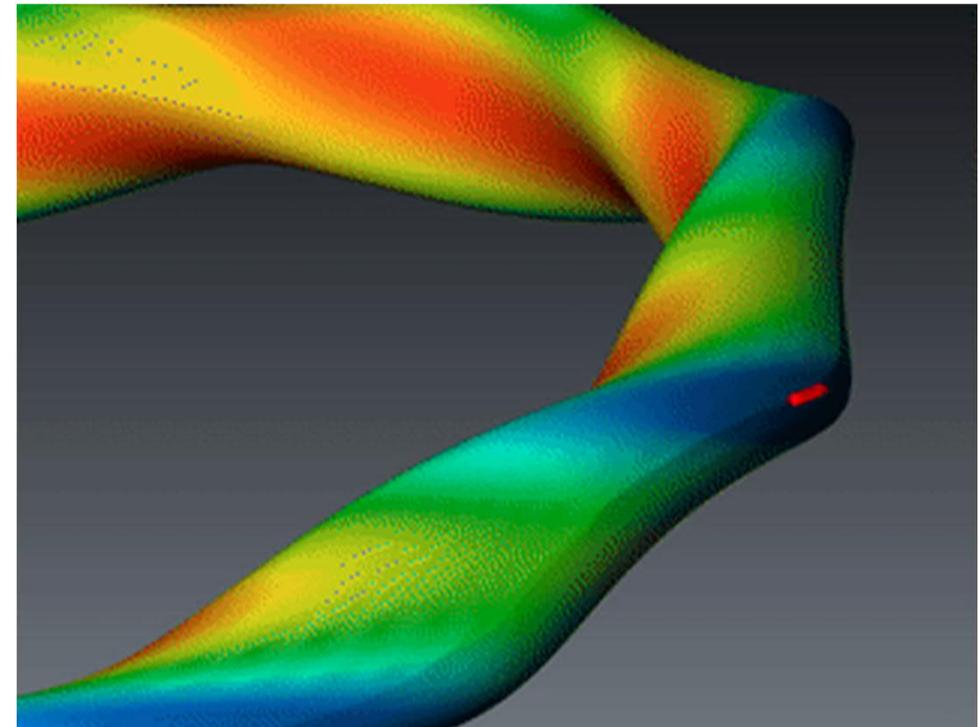
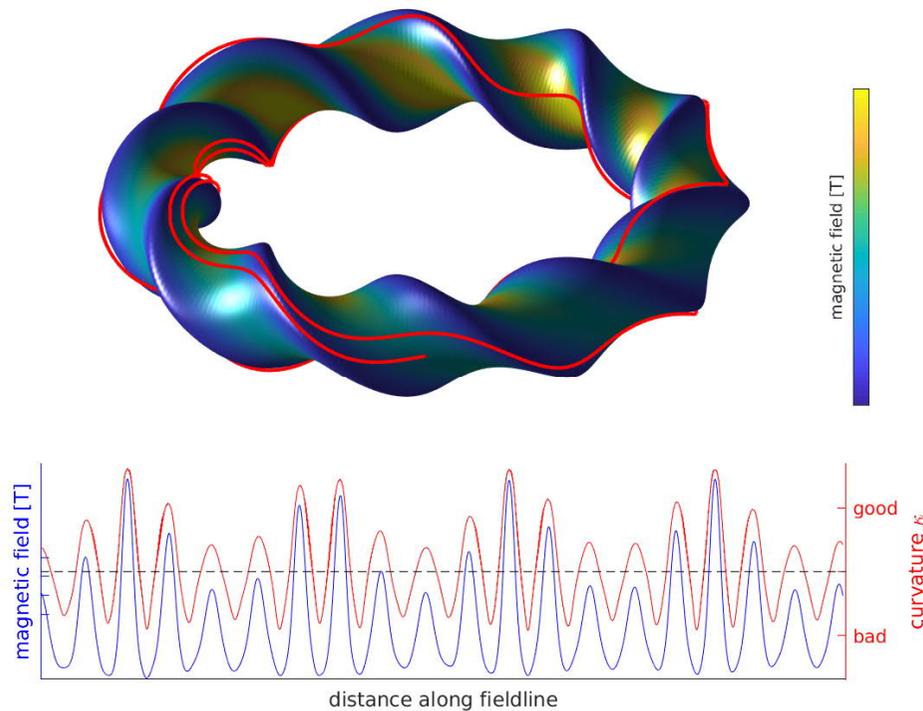
- Der Preis ist, dass das Magnetfeld keine toroidale Symmetrie mehr besitzen kann

Magnetischer Einschluß - Stellarator



- das Magnetfeld besitzt keine toroidale Symmetrie mehr
- Variation der Magnetfeldstärke führt zu erhöhten Verlusten von Teilchen

Magnetischer Einschluß - Stellarator



- das Magnetfeld besitzt keine toroidale Symmetrie mehr
- Variation der Magnetfeldstärke führt zu erhöhten Verlusten von Teilchen

Vergleich Tokamak - Stellarator



Tokamak

- hohe Symmetrie des Magnetfeldes
 - ⇒ planare Magnetfeldspulen
 - ⇒ Technologie etabliert
- sehr gutes Einschlußverhalten
 - ⇒ geringer Transport durch Magnetfeldgeometrie
 - ⇒ guter Einschluß schneller Teilchen
- hoher Plasmastrom benötigt (typisch MA)
 - ⇒ induktiver Stromtrieb verkompliziert
Dauerstrichbetrieb
 - ⇒ Instabilitäten begrenzen Operationsgebiet
(Disruptionen)

Kontrolle der Instabilitäten und Stationarität

Stellarator

- komplizierte Magnetfeldgeometrie erforderlich
 - ⇒ nicht-planare Magnetfeldspulen
 - ⇒ sehr komplizierte Technologie
- Einschlußverhalten generell schlechter, als in Tokamaks
 - ⇒ Transport durch Magnetfeldgeometrie
 - ⇒ schlechter Einschluß schneller Teilchen
- kein Plasmastrom benötigt
 - ⇒ intrinsisch dauerstrichfähig
 - ⇒ keine strominduzierten Instabilitäten

Optimierung des Einschlußverhaltens

Wendelstein 7-X

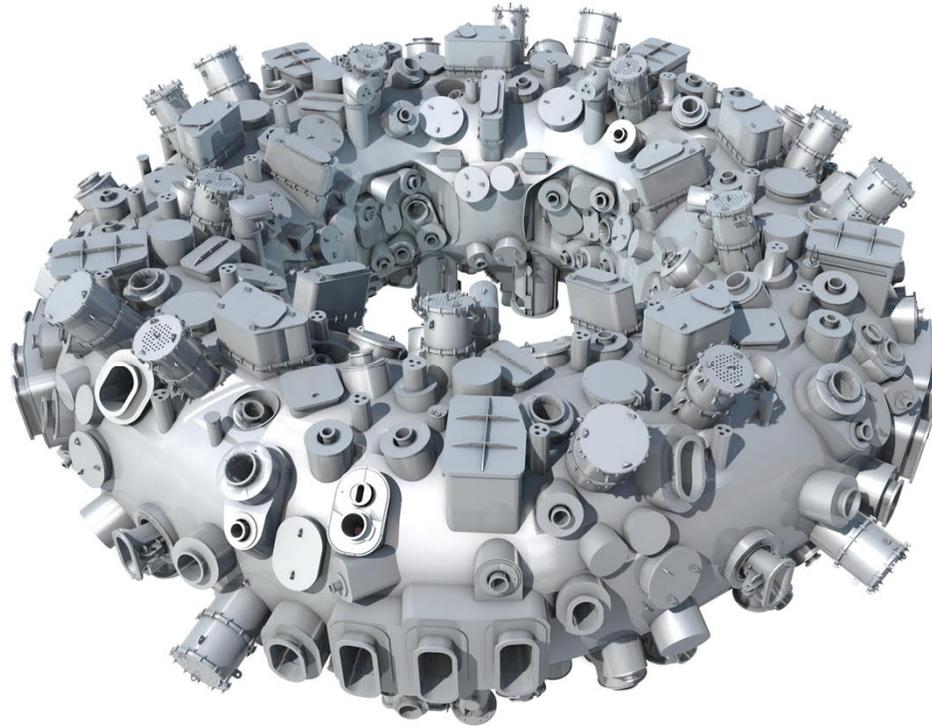


50 nicht-planare NbTi Spulen
5 Typen DC <18 kA

Plasmavolumen 30 m³

20 planare NbTi Spulen
2 Typen DC <16 kA

254 Ports 120 Formen



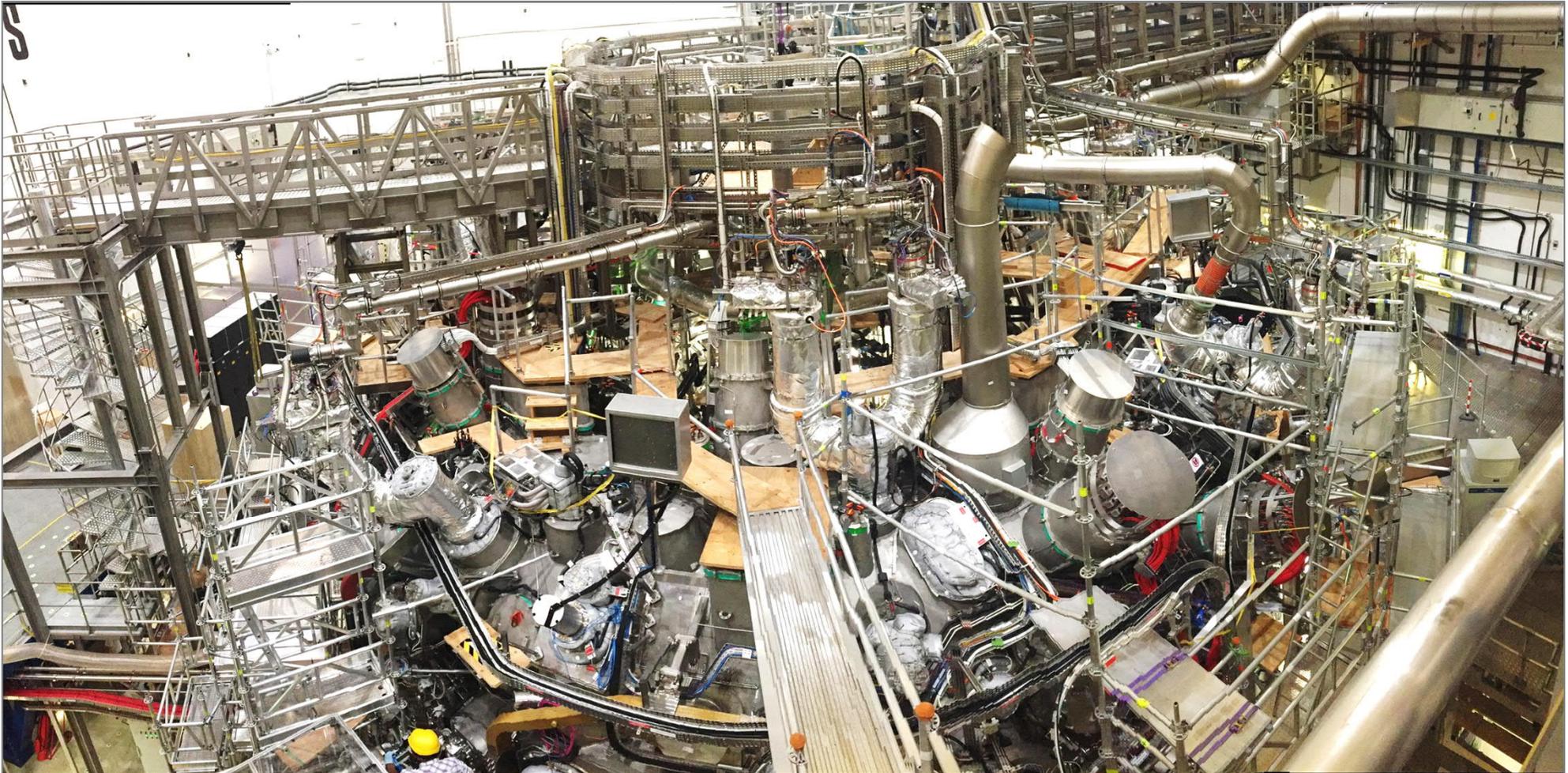
Plasmagefäß 80 m³
265 m² Komponenten im Gefäß

113 NbTi Zuleitungen
14 HTSC Stromzuführungen
ca. 1000 Heliumrohre
10 Elemente des zentralen Stützringes

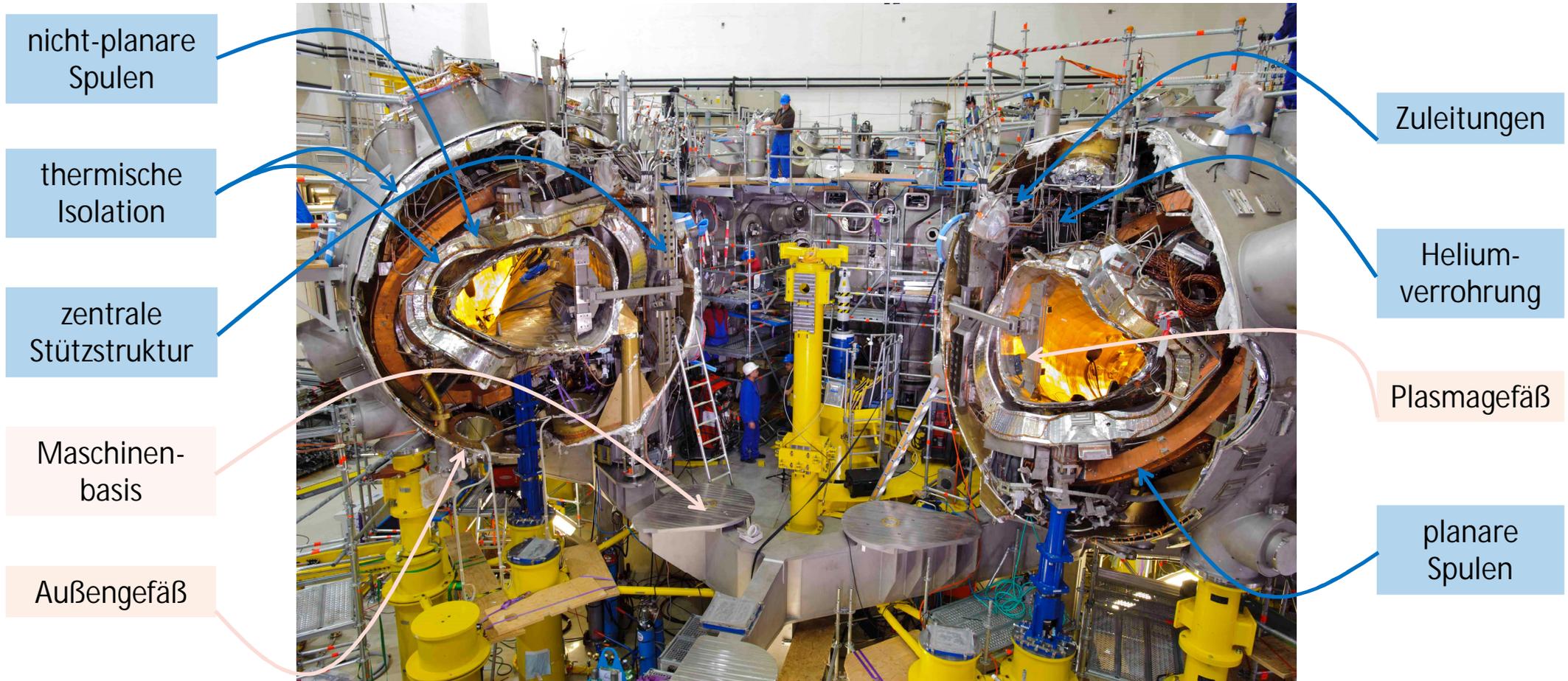
4.5 m Höhe
16 m Durchmesser
735 t Gesamtgewicht
435 t kalte Masse bei 3.4 K

Kryostatvolumen 420 m³
thermische Isolation

So sieht die Realität aus...



Während der Aufbauphase (2011)



Optimierungskriterien von Wendelstein 7-X



- reduzierter geometrieinduzierter Transport

- verbesserter Einschluss schneller Teilchen

Probleme des klassischen Stellarators

1. Einschlussverhalten bei hohen Temperaturen
2. Steifigkeit der magnetischen Konfiguration
3. Kontrolle Abfuhr von Teilchen und Energie (Divertorkonzept)

- steifes Plasmagleichgewicht
- reduzierte interne Plasmaströme

- modulares Spulensystem
- ineinander geschachtelte magnetische Oberflächen

- gutes Stabilitätsverhalten

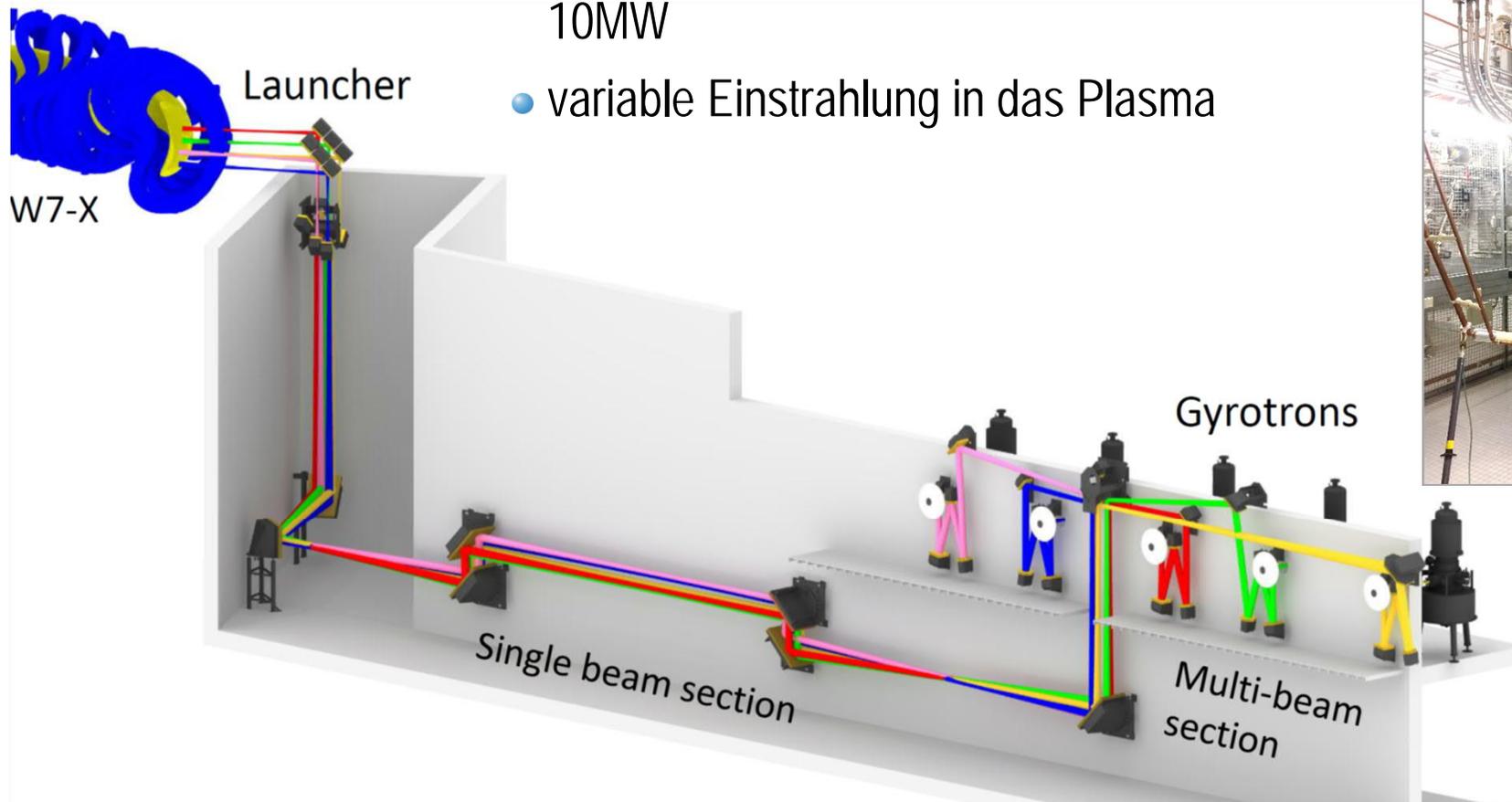
Wendelstein 7-X wird nicht mit D-T betrieben
(Experimentieranlage, kein Reaktor)

Messung der magnetischen Oberflächen

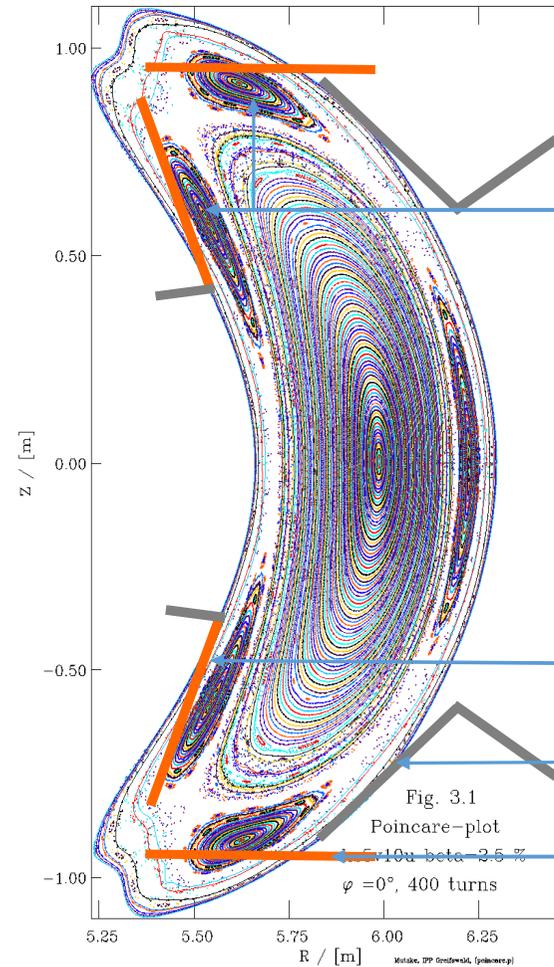
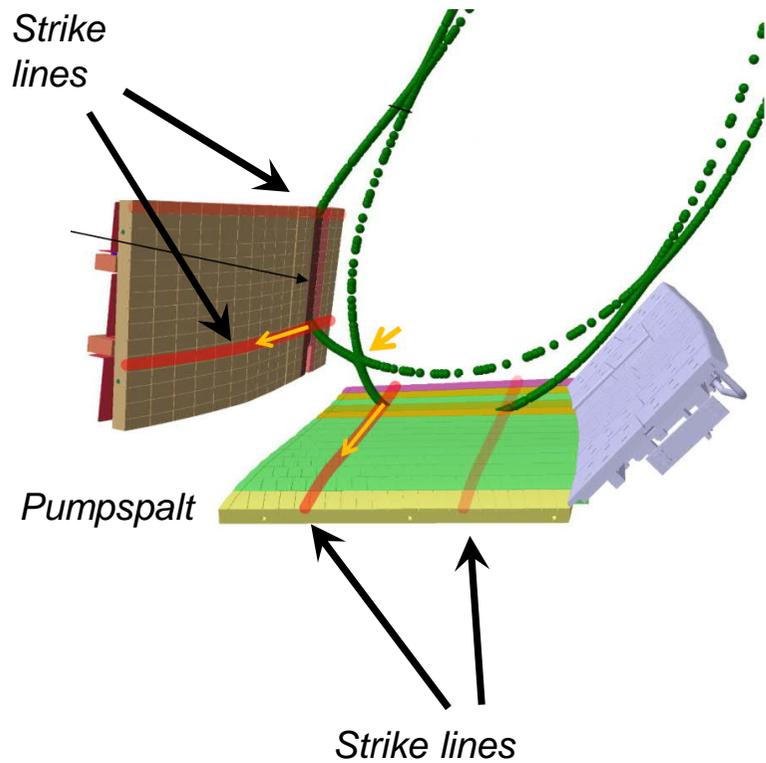


Plasmaheizung - Mikrowelle

- 10 Gyrotrons mit einer Gesamtleistung von 10MW
- variable Einstrahlung in das Plasma



Innovatives Konzept – Divertor im Stellarator



magnetische Insel

Gesamtfläche 19 m²

Wärmefluß ≤ 10 MW/m²

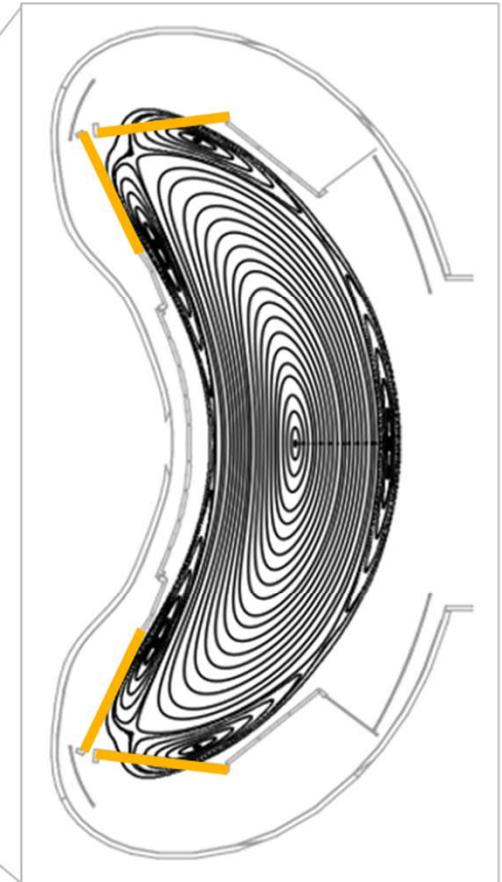
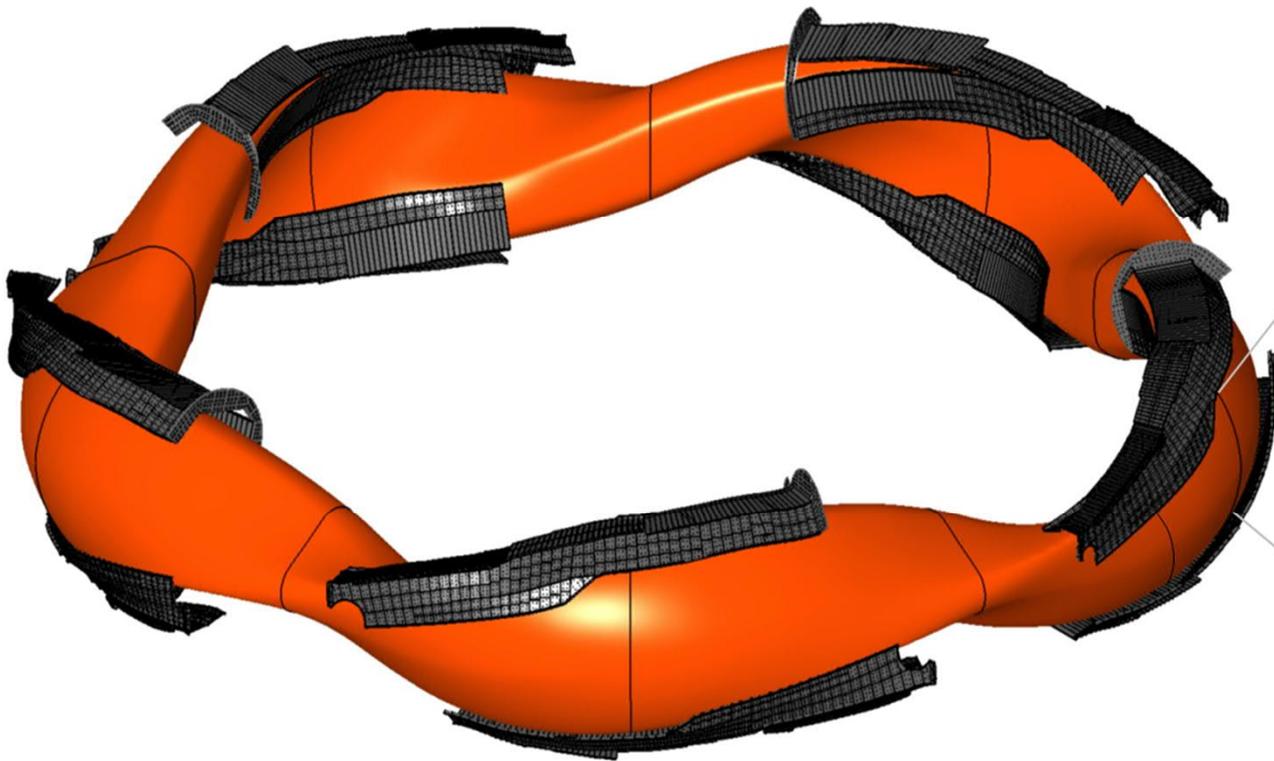
vertikaler Divertor

Prallplatte

horizontaler Divertor

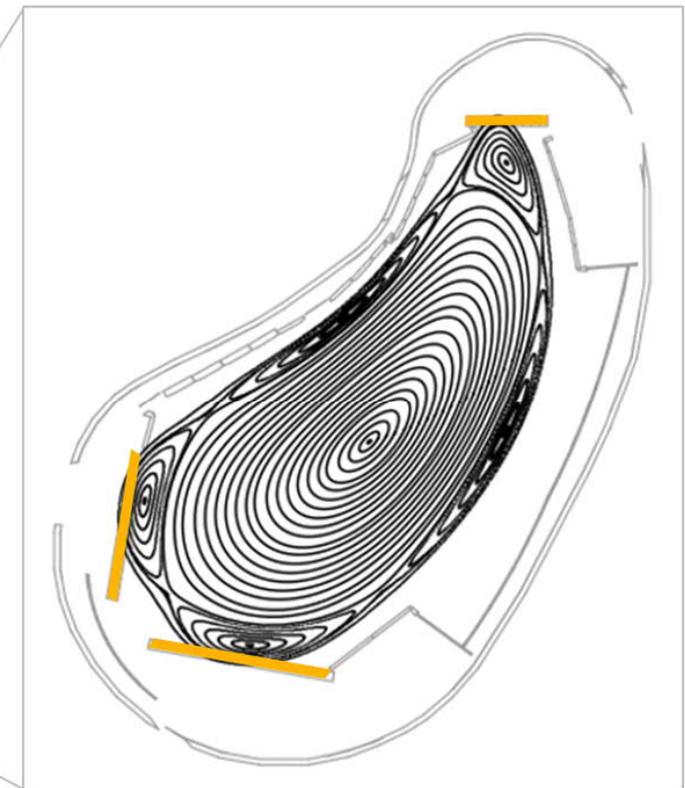
Innovatives Konzept – Divertor im Stellarator

- Divertorstruktur folgt der Magnetfeldgeometrie



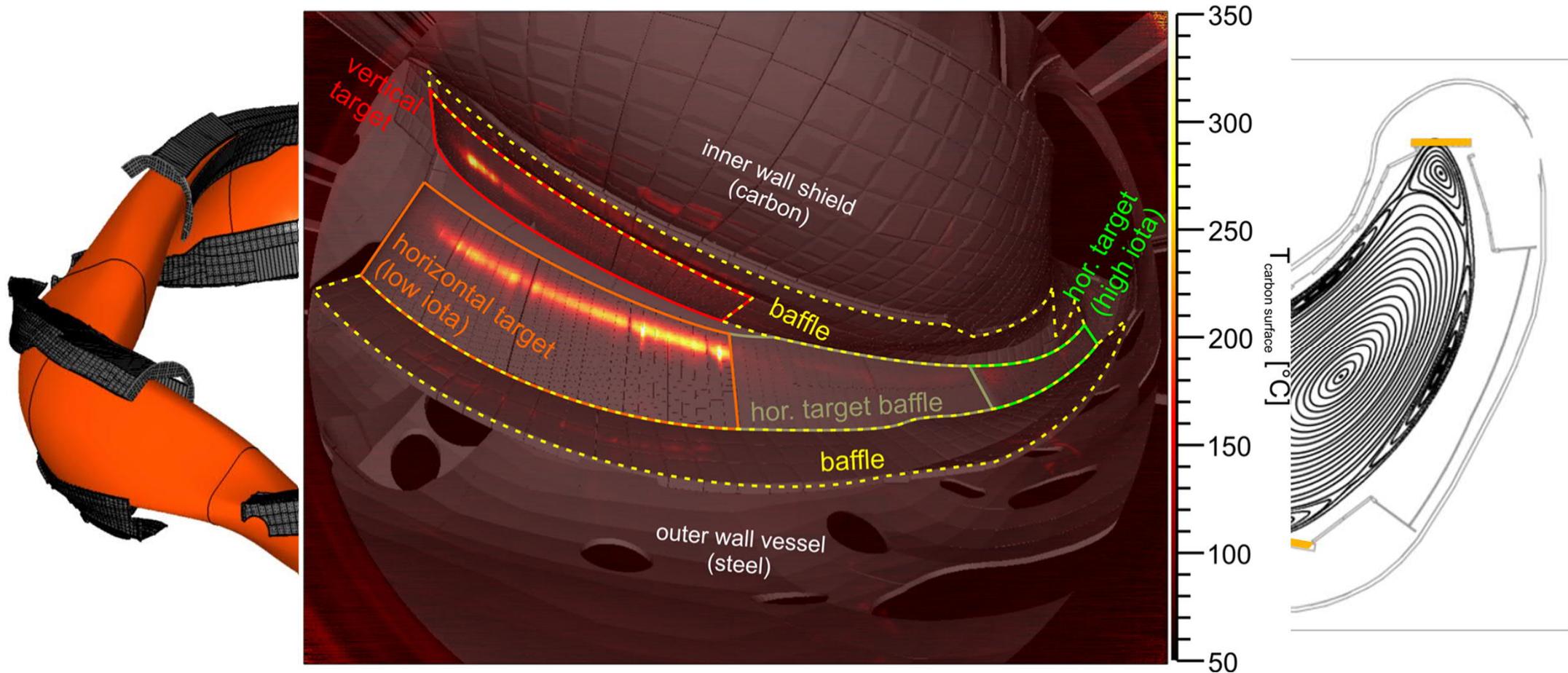
Innovatives Konzept – Divertor im Stellarator

- Divertorstruktur folgt der Magnetfeldgeometrie

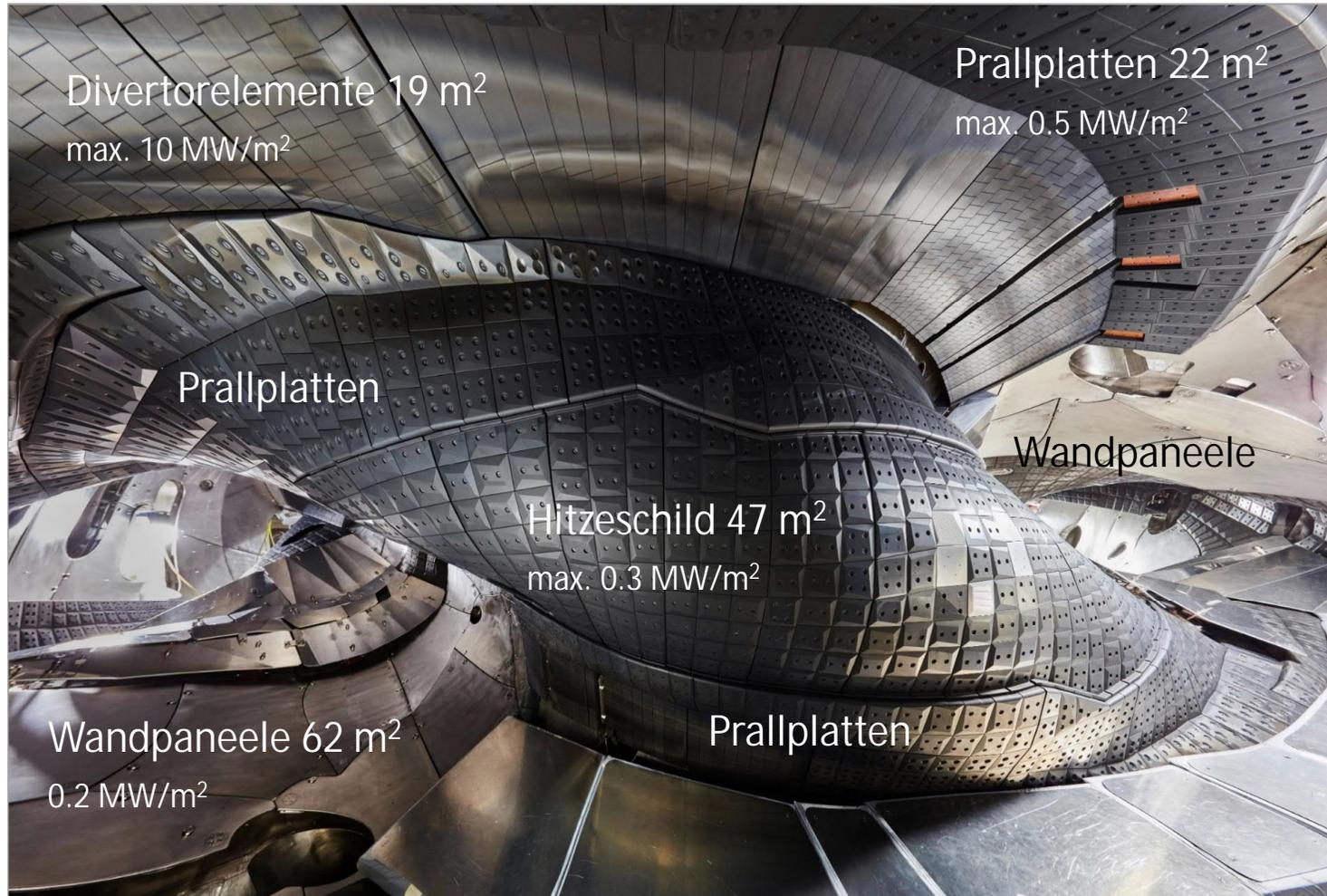


Innovatives Konzept – Divertor im Stellarator

- Divertorstruktur folgt der Magnetfeldgeometrie



Blick in das Innere

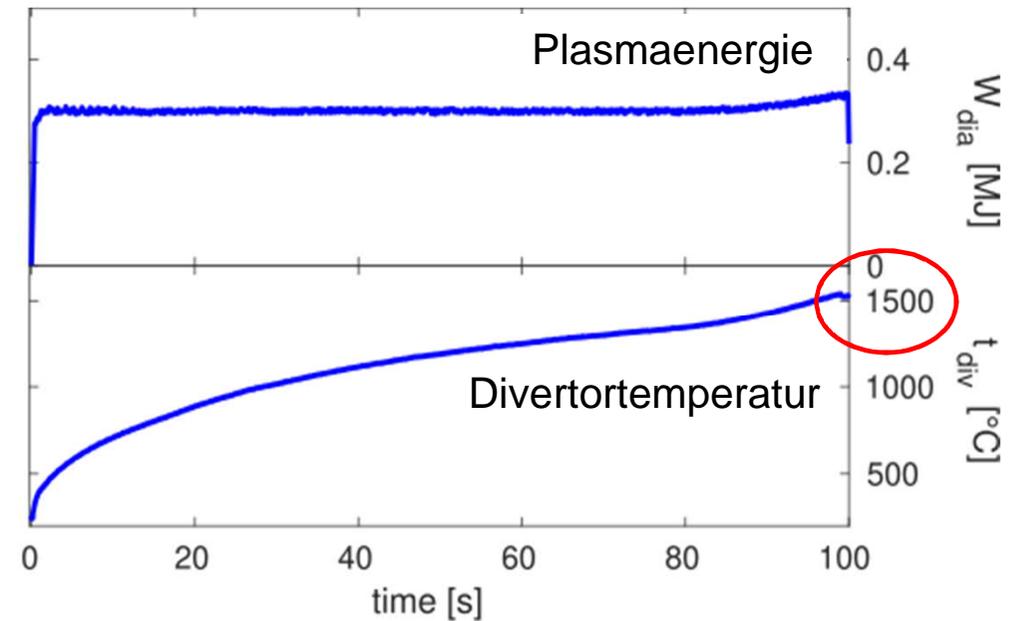
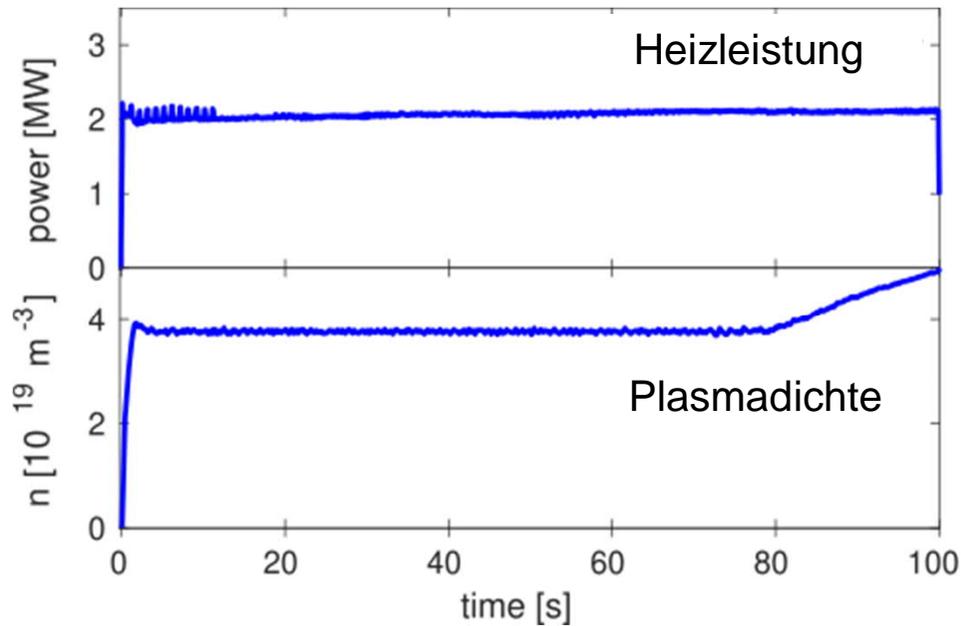


Betriebsphasen

- kein Divertor und nackte Wände
kurze Entladungen mit wenig Heizleistung



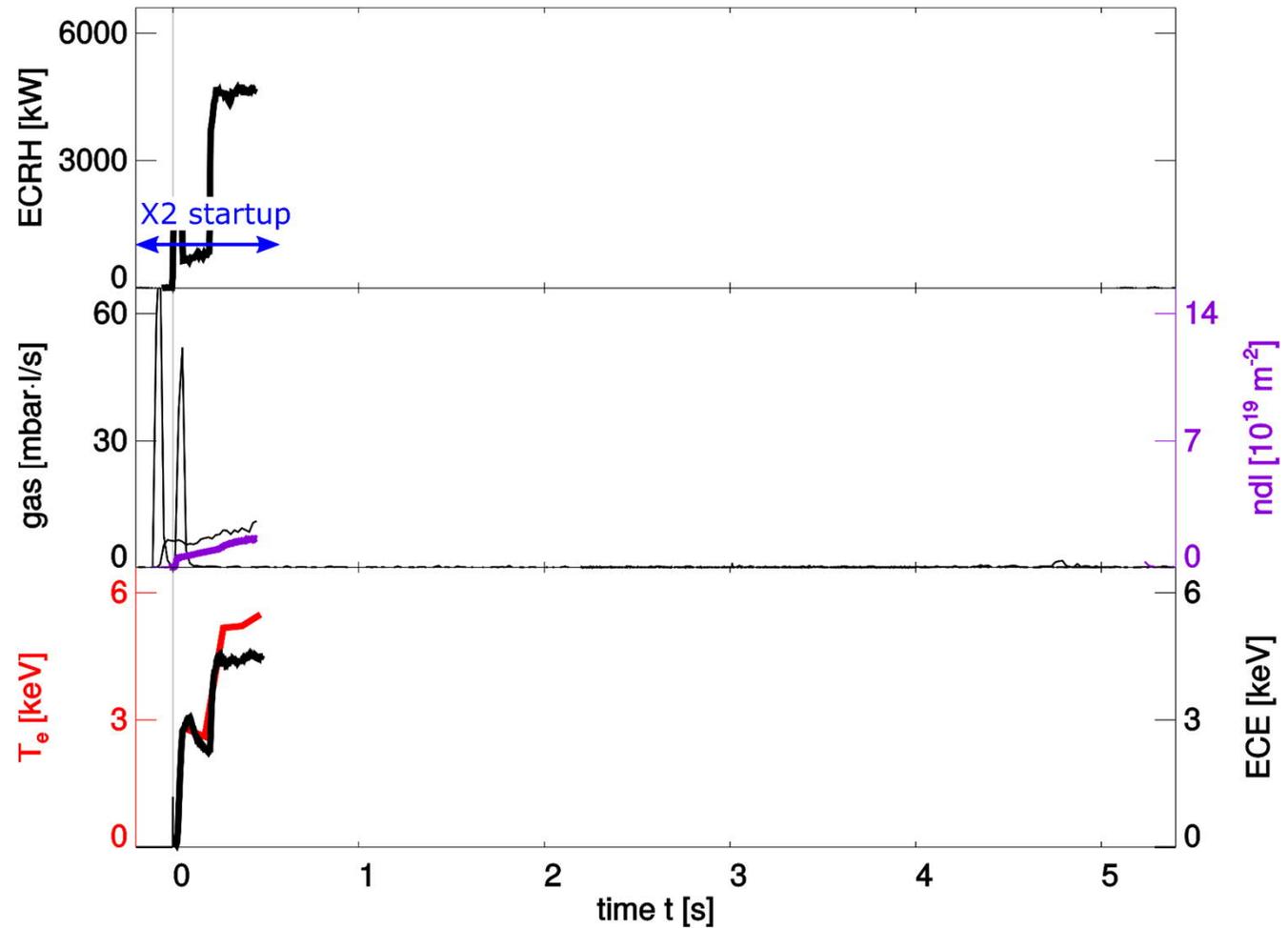
Lange stationäre Entladung – moderate Dichte



- stationäre Entladung mit Entladungslänge 100s
⇒ Entladungslänge limitiert durch Temperatur des Divertors

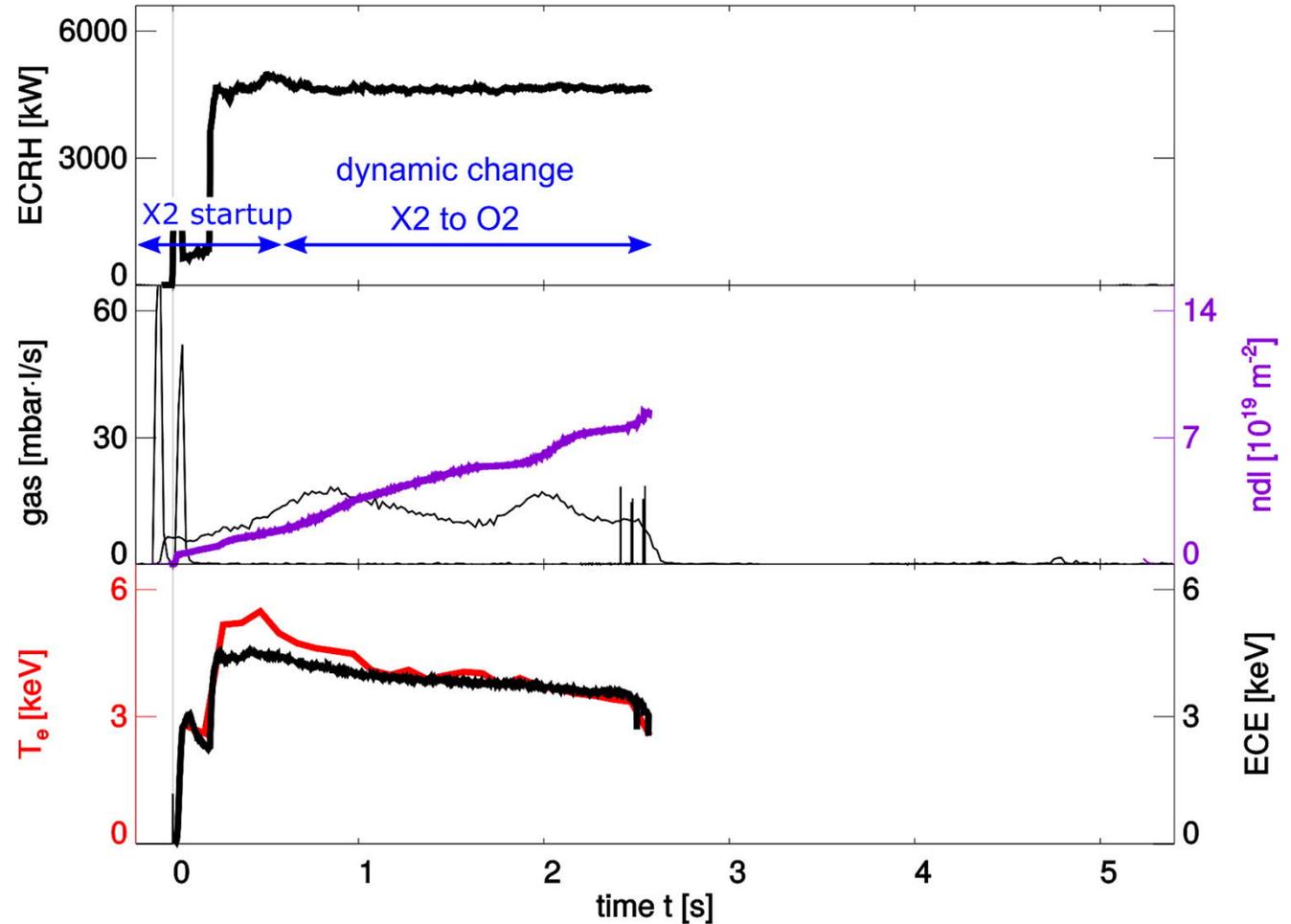
Hochdichteentladung mittels Mikrowellenheizung

- Plasmastart



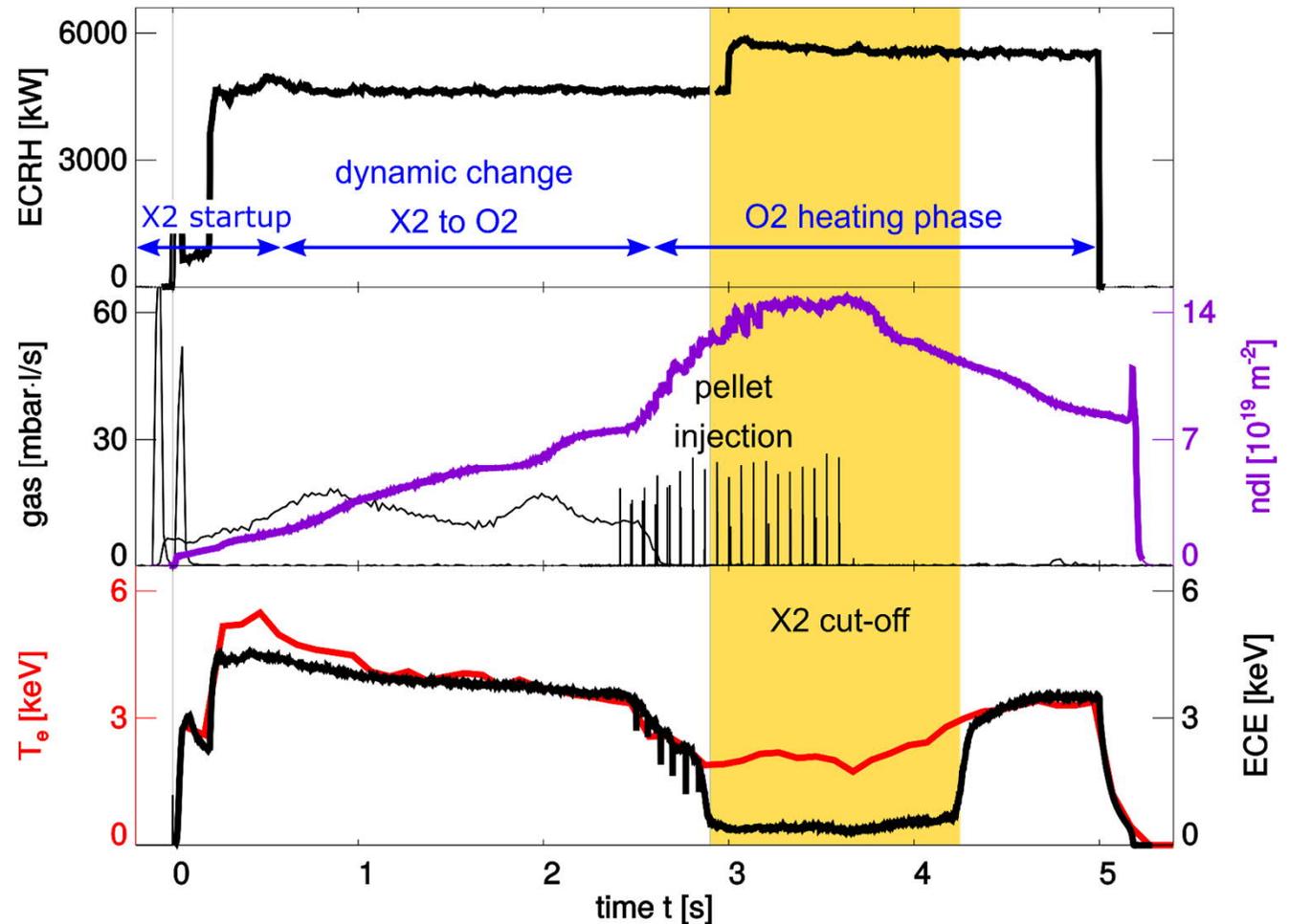
Hochdichteentladung mittels Mikrowellenheizung

- Plasmastart
- dynamische Änderung der Wellenpolarisation für hohe Plasmadichte

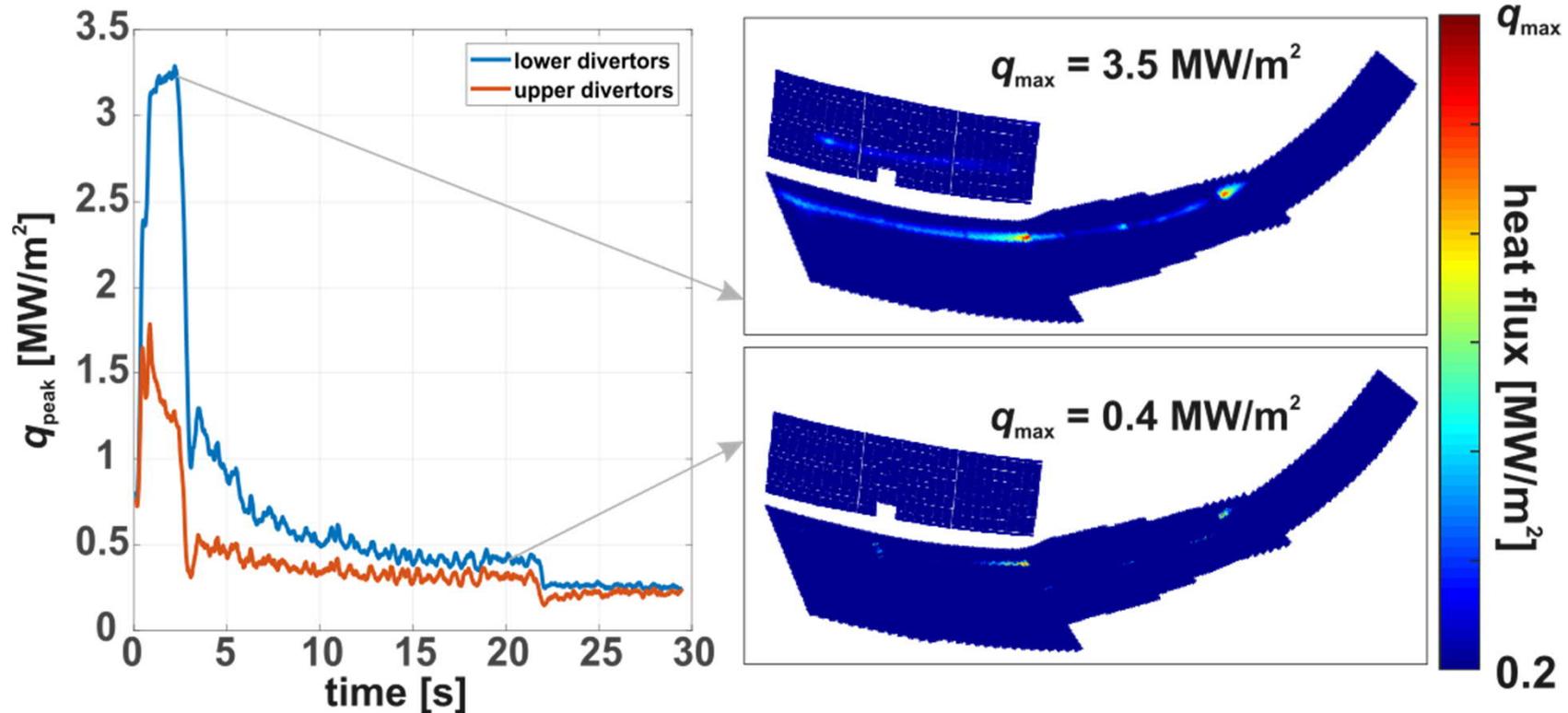


Hochdichteentladung mittels Mikrowellenheizung

- Plasmastart
- dynamische Änderung der Wellenpolarisation für hohe Plasmadichte
- Leistungserhöhung mit gleichzeitiger Injektion von gefrorenen Wasserstoffpellets

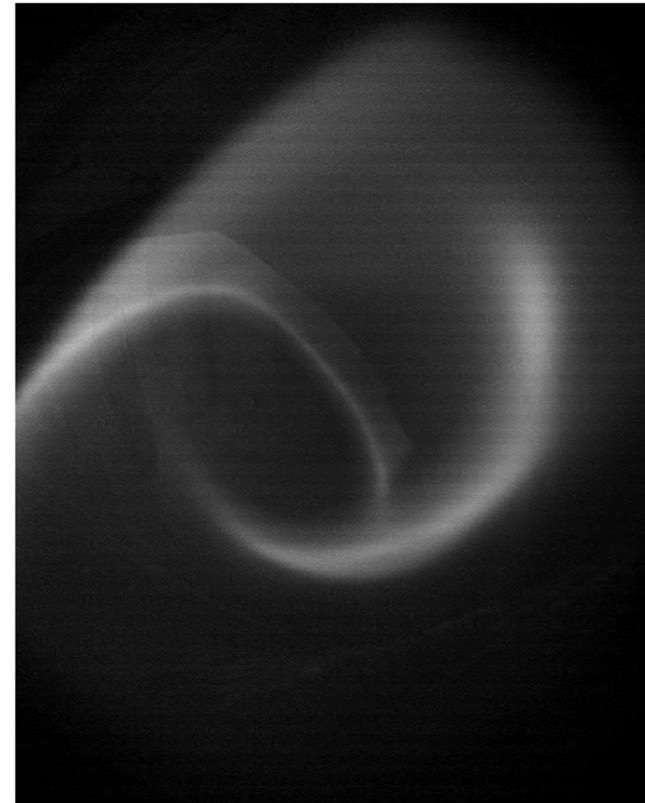
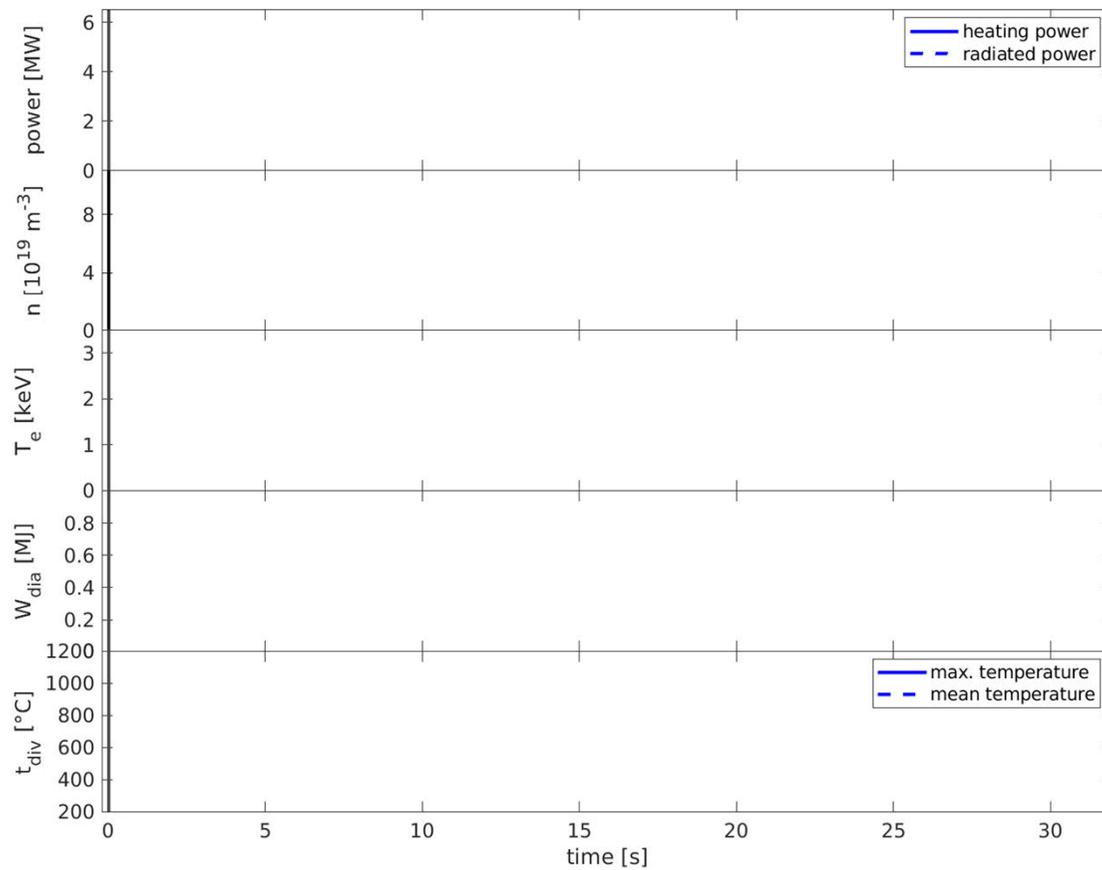


Ablösen der Wärmelast vom Divertor bei hoher Plasmadichte



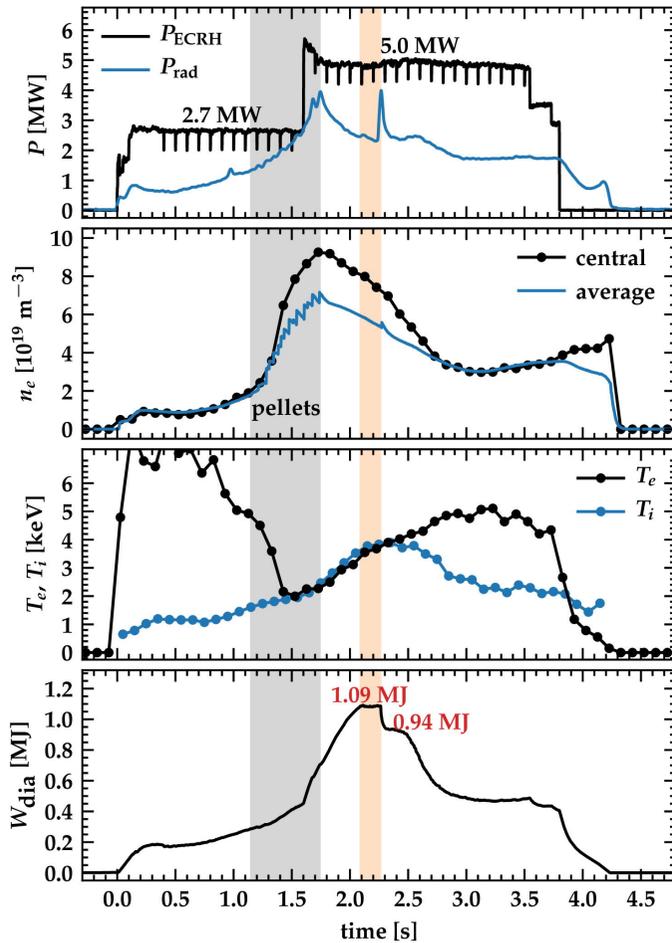
- starke Reduktion der Wärmelasten auf dem Divertor durch vermehrte Plasmastrahlung

Stationäre Plasmaentladung mit abgelöster Wärmelast



Einschlussverhalten

W7X 20171207.006



- Demonstration der Verringerung der geometrieinduzierten Verluste
- Hochdichteentladung mit stark erhöhter Plasmaeinschlusszeit

$$\tau_E = 220ms \approx 1.4\tau_{ISS04}$$

- Rekord des Tripelprodukts für Stellaratoren

$$n T_i \tau_E = 6.8 \cdot 10^{19} \frac{keV s}{m^3}$$

demonstriert:

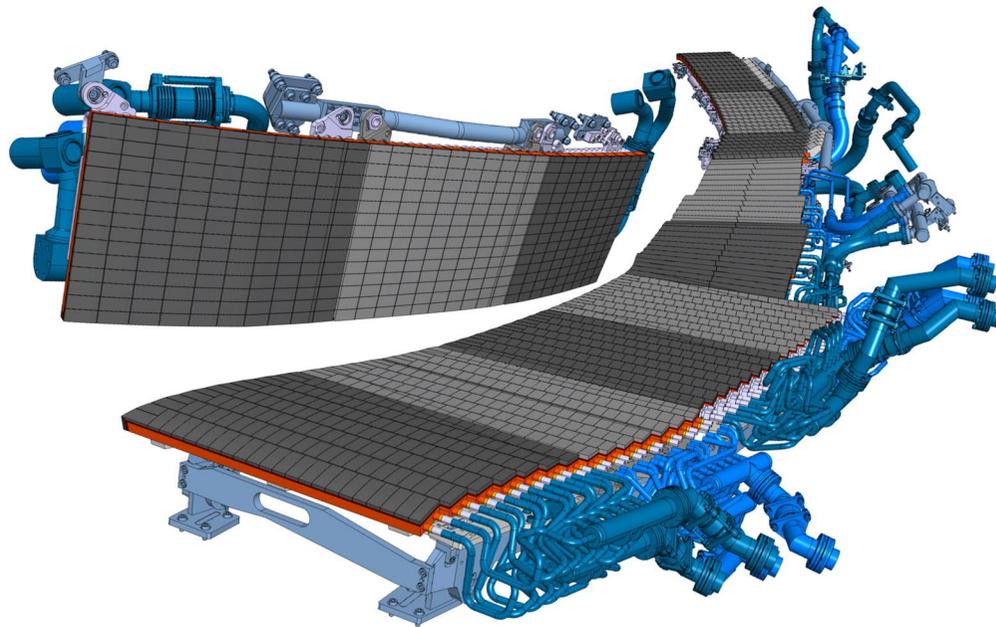
- stationäre Entladungen hoher Dichte mit stark verbessertem Einschlussverhalten demonstriert
 - ⇒ kontrollierte lange Entladungszeiten, Rekordwerte des Tripelprodukts für Stellartoren
- innovatives Divertorkonzept erfolgreich
 - ⇒ Energieabfuhr über Divertorplatten, Kontrolle der Wärmelasten

ausstehend:

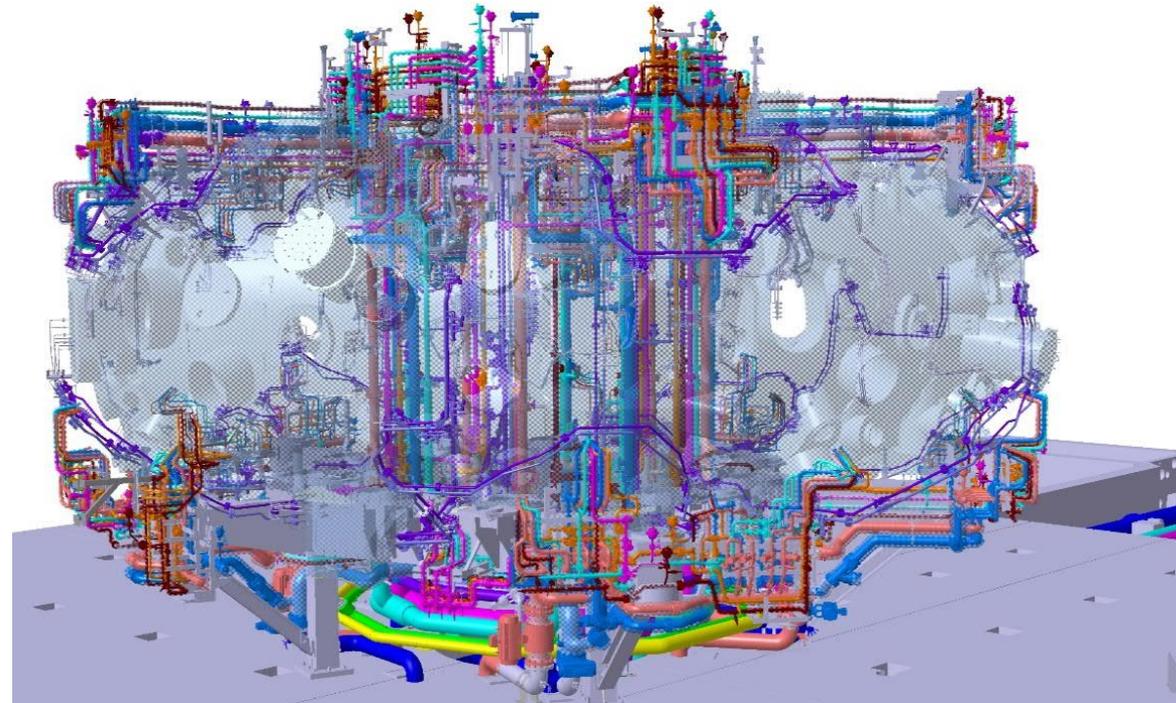
- Erhöhung der Plasmatemperatur
 - ⇒ Erhöhung der Heizleistung
- Einschluss schneller Teilchen
 - ⇒ Erzeugung schneller Ionen
- aktive Kühlung der Gefäßkomponenten

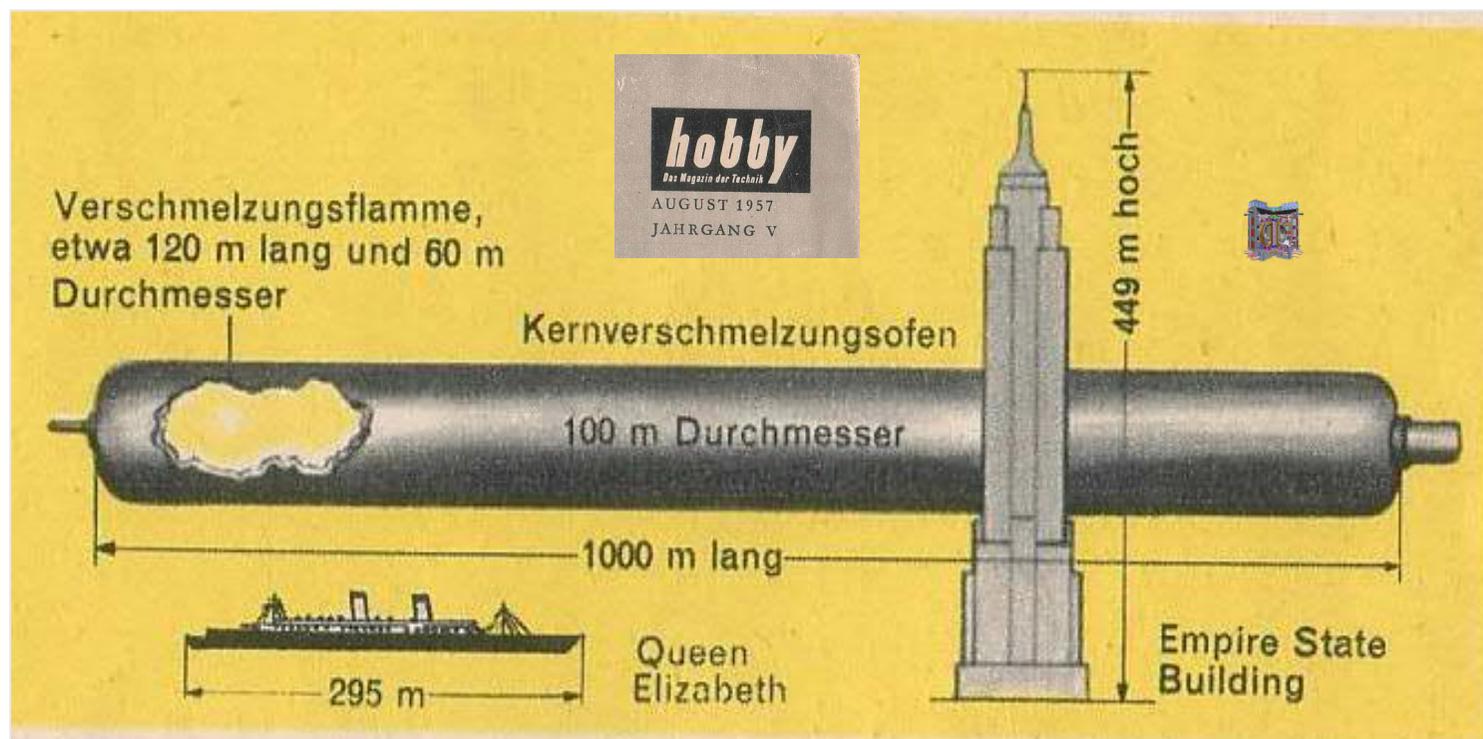
Kühlung der Gefäßkomponenten

- aktiv gekühlter Divertor



- Kühlleitungsausbau
(600 Teilkreise)





Vielen Dank!