



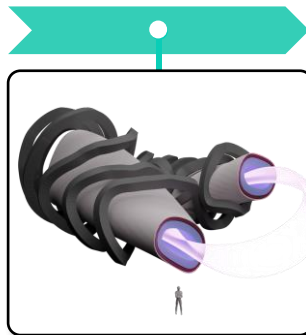
Proxima
Fusion

Der Weg zu einem HTS Stellarator Fusionskraftwerk in Europa

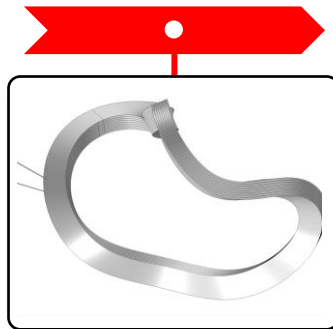
Dr. Cornelia Hintze

10.4.2024

Inhalt



**Proxima Fusion
und ein neuer
Weg zur Fusion**



**Multi-Physik
Simulation für
Magnet Design**



**Fertigungs-
verfahren: die
Herausforderung
von HTS**



Proxima Fusion und ein neuer Weg zur Fusion

The Case for Fusion

Sauber



Kein CO2 oder andere
schädliche Emissionen

Sicher



Keine Kernschmelze,
keine Endlager

Verlässlic h



Kontinuität

Hohe Energiedichte



Geringe FLächennutzung,
Modluarität, Skalierbarkeit

Kostengünstig



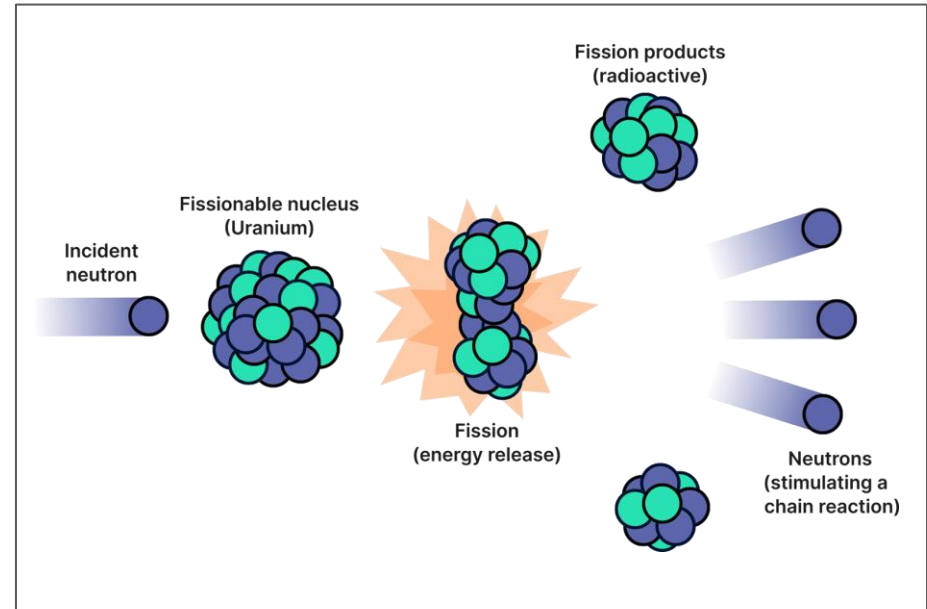
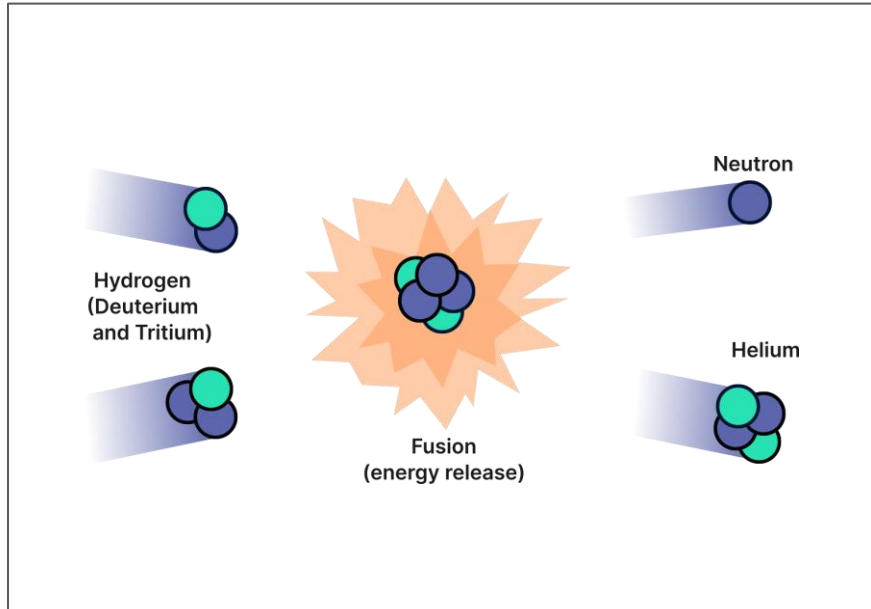
~5 \$ct/kWh

Unbegrenzt



Brennstoff aus Wasser kann
die Menschheit für Mio
Jahre mit Energie versorgen

Fusion vs. Fission



Fusion ist komplett verschieden von Kernspaltung. Fusion ist inherent sicher. Es gibt keine Kettenreaktion, keine langlebigen, radioaktiven Abfälle und kein Risiko von Kernschmelze oder Verstrahlung.

Fusion ergänzt Wind- und Solarenergie

- Fusion produziert **Grundlast**, kein Notwendigkeit großflächiger und teurer Energiespeichersysteme.
- Fusion produziert **Elektrizität und Wärme**
- Fusion kann mit **bis zu 35% zur Stromerzeugungsleistung** in einem dekarbonisierten europäischen Netz ab 2050 beitragen*

**Gemessen an den Energiekosten, nicht der Geschwindigkeit der Inbetriebnahme von Fusion, Quelle: McKinsey & Company (2022)*

2050 Klimaziele

Werden nur erreicht durch eine **Kombination verschiedener Technologien**

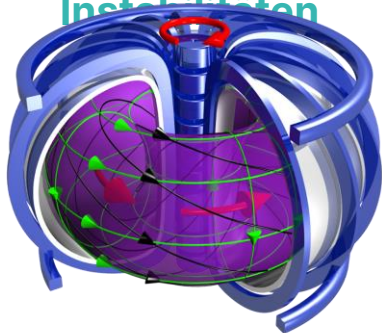
Um küstengünstig die letzten 10-20% fossiler Brennstoffe zu entfernen, wird eine **zusätzliche CO₂-freie Quelle neben Wind und Solar benötigt**
Quelle: Platt et al. (2017)

Fusion mit Magnetfeldeinschluss - die Vorreiter

Tokamaks

... erzeugen spiralförmige Magnetfelder mit externen Magnetspulen **und** hohem Plasmastrom, mit Hang zu

Instabilitäten



Einfach auszulegen, *schwierig* zu betreiben



plasma als Brennstoff



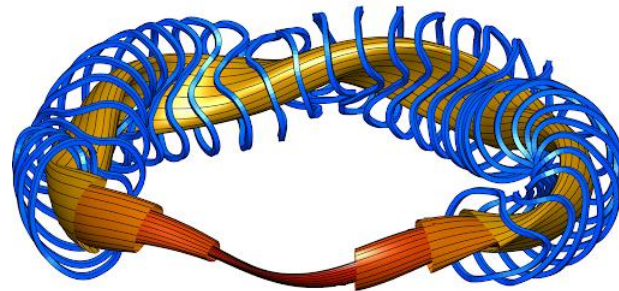
Magnete für Plasmakontrolle



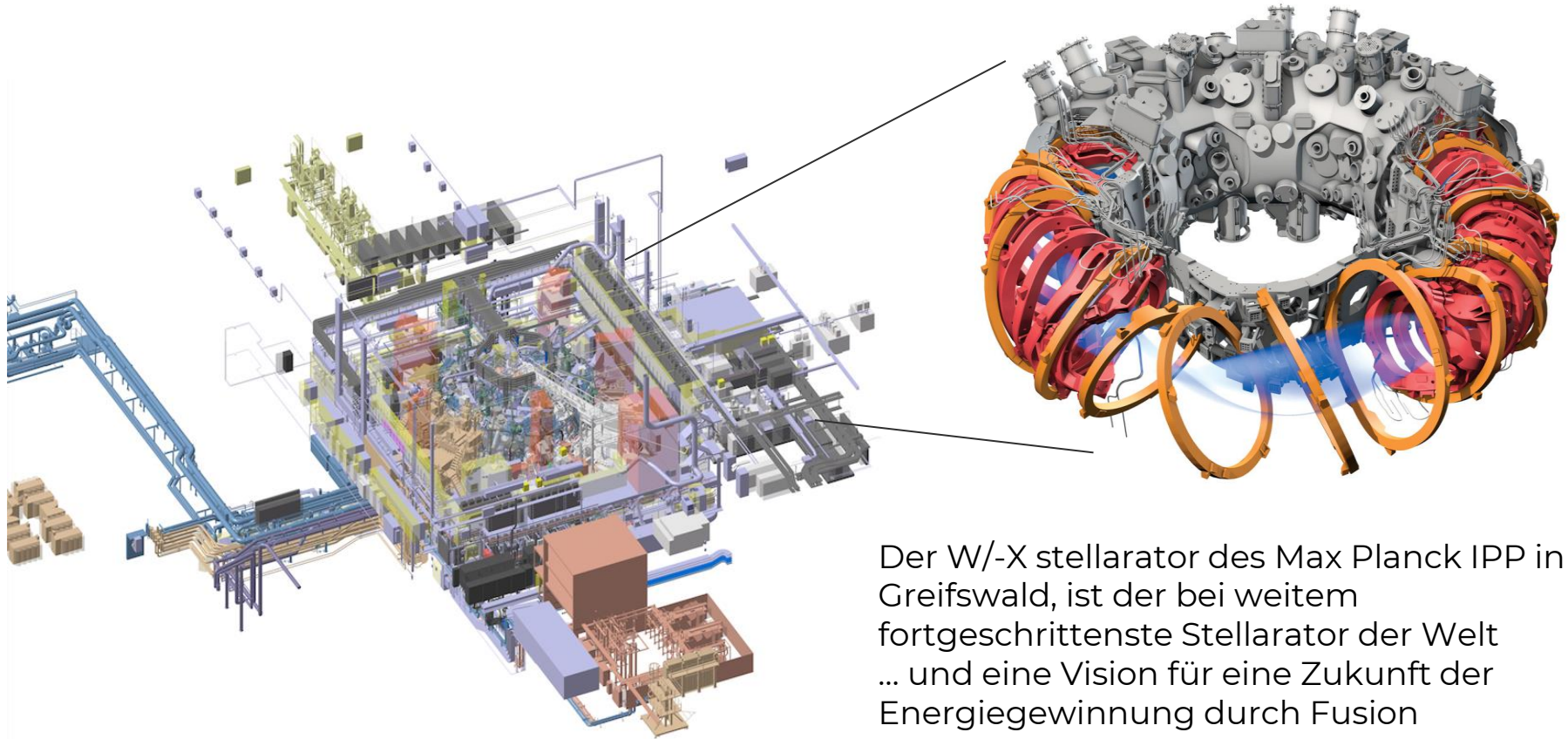
Stärkere Magnete bedeuten bessere Kontrolle und höhere Stabilität

Stellaratoren

... erzeugen ein spiralförmiges Magnetfeld **nur** durch externe Spulen, daher **intrinsisch stabil**



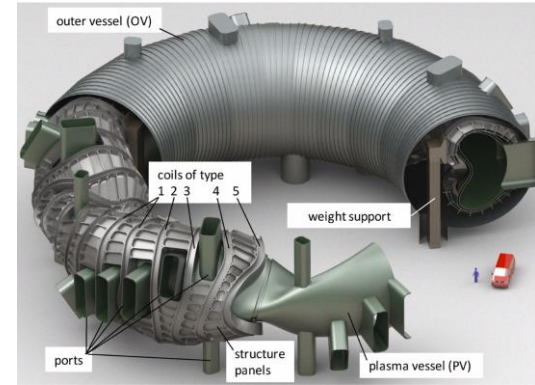
Schwierig (?) auszulegen, *einfach* zu betreiben



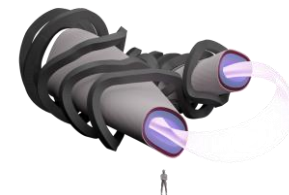
Der W7-X stellarator des Max Planck IPP in Greifswald, ist der bei weitem fortgeschrittenste Stellarator der Welt ... und eine Vision für eine Zukunft der Energiegewinnung durch Fusion

Nächster Schritt - Nutzung modernster Technologien

- Optimierungsalgorithmen und exponentiell verbesserte Computerleistung
- Einstufige, multikriterielle Optimierung
- Hochtemperatur-Supraleiter (ReBCO)
- Verbesserte Fertigungstechnologien



~3X
Größenreduktion

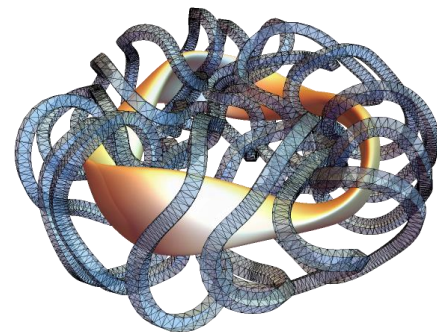
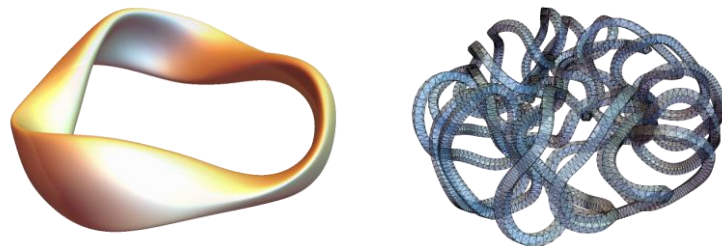


Einstufige Optimierung

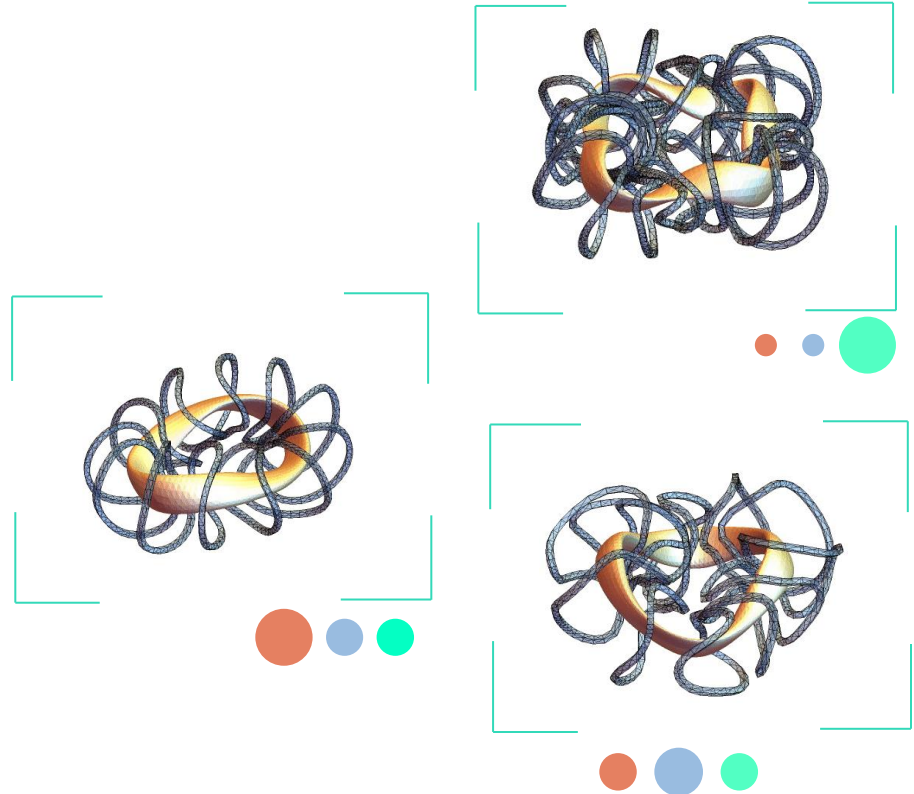
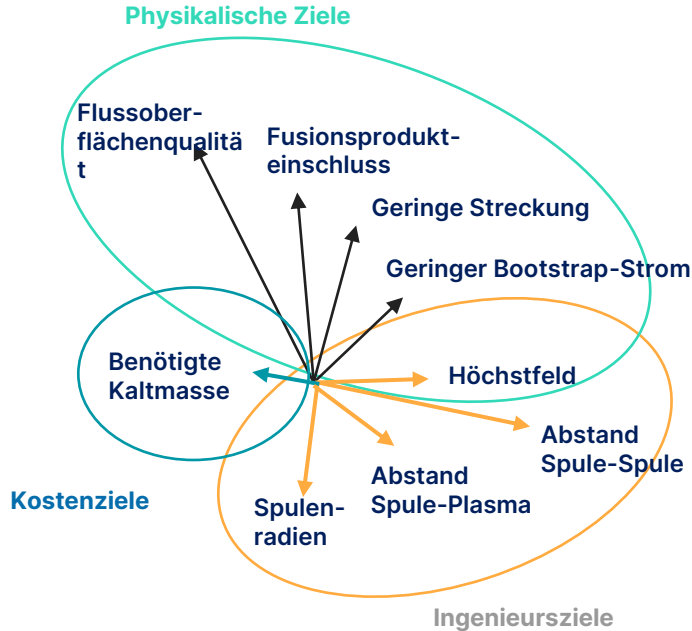
Jede neue Stellarator-Konfiguration muss "herstellbar" sein

- (klassischer) zweistufiger Ansatz:
 - Optimierte Magnetfeld (Konfiguration)
 - Optimierte Spulen

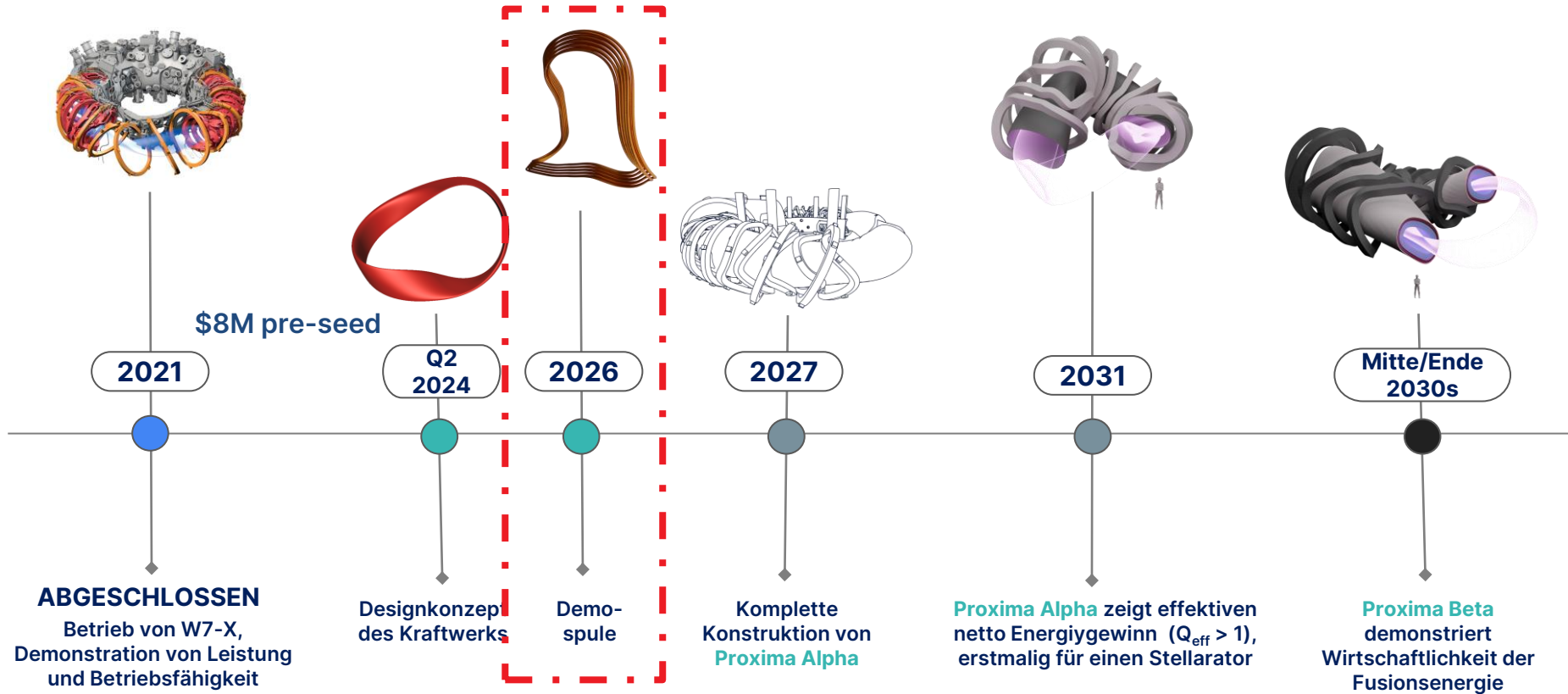
- (neuer) einstufiger Ansatz:
 - Optimierte Magnetfeld + Spulen gleichzeitig
 - Viel mehr Freiheitsgrade



Multikriterielle opt: Physik, Ingenieurwesen, Kosten

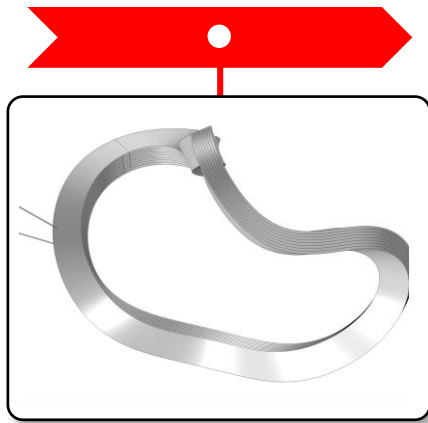


Roadmap und Zeitplan



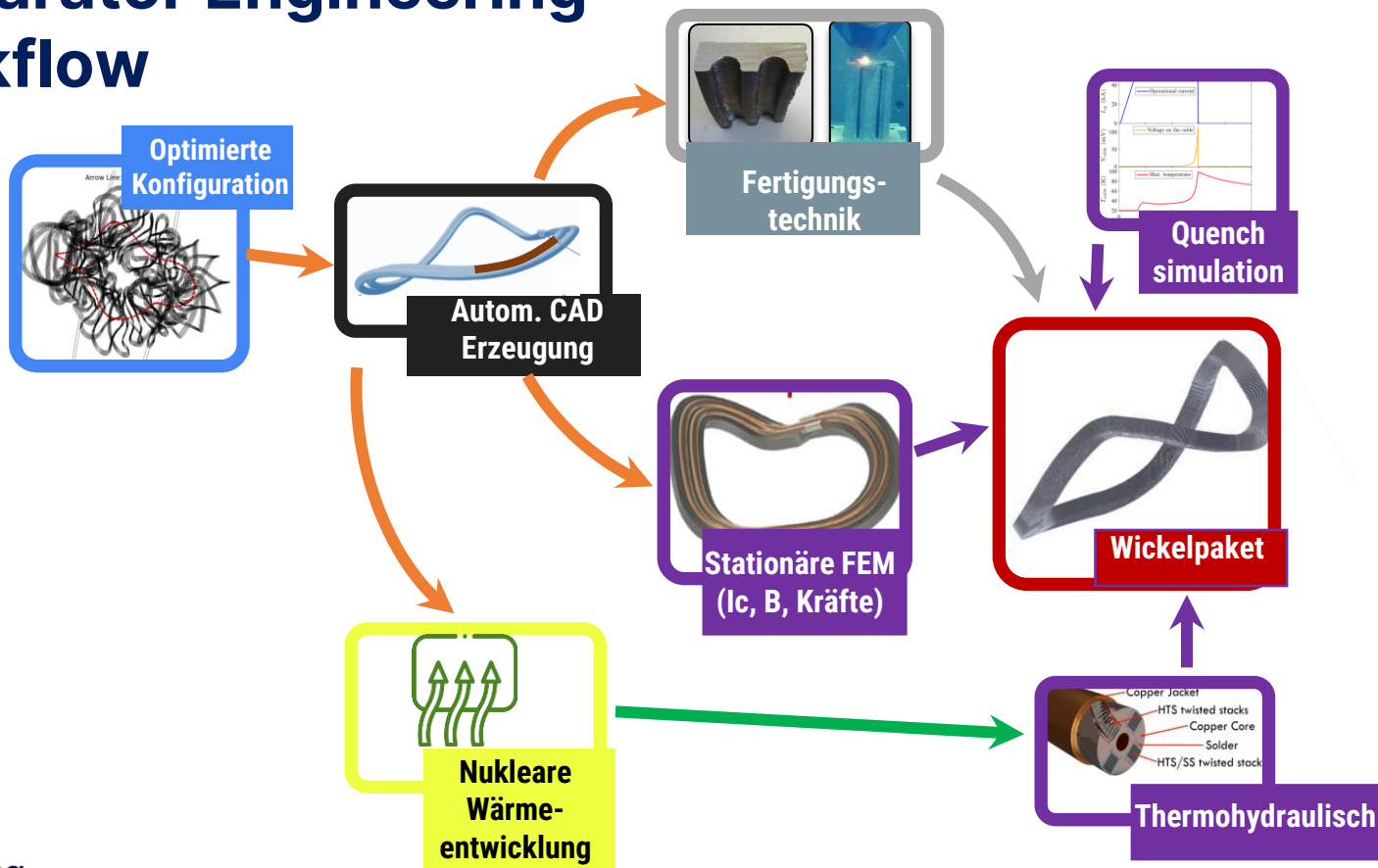
Welche Risiken adressiert die Demospule?

1. Erreicht $I \times B$ Last \geq Proxima Alpha/Beta (PAB) Auslegung
2. Erreicht Magnetfeld von Proxima Alpha (12 T) und Proxima Beta (18 T)
3. Demonstriert sicheren Quench des Gesamtmagneten bei einem Bruchteil der Energie von PAB
4. Demonstriert sichere Schnellabschaltung
5. Demonstriert Proportionalität des B-Feldes zum Einspeisestrom innerhalb von 0.1% des gewählten I_{op}/I_c
6. Demonstriert Methoden zur Vereinheitlichung des kritischen Stroms
7. Demonstriert Betriebssicherheit, auch gegenüber Tsunami Quench Szenarios
8. Demonstriert sichere Verbindungen auch oberhalb Betriebsstrom und $I \times B$ Last
9. Einsatz von Spulengeometrien, die identisch den für PAB vorgeschlagenen sind
10. Herstellungsmethoden validiert und einsatzbereit für PAB Magnetfertigung

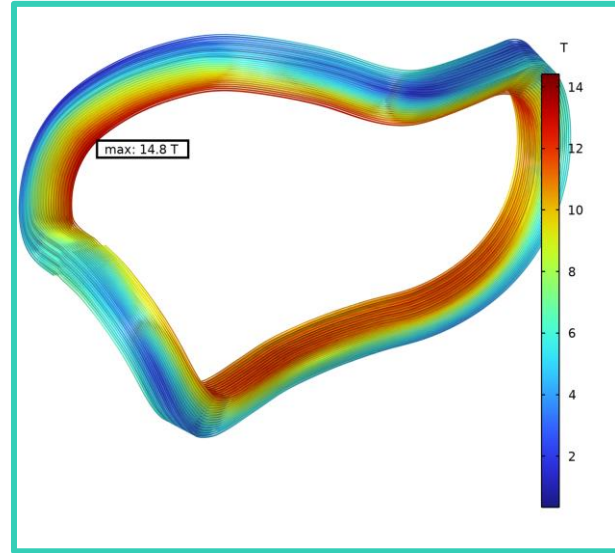
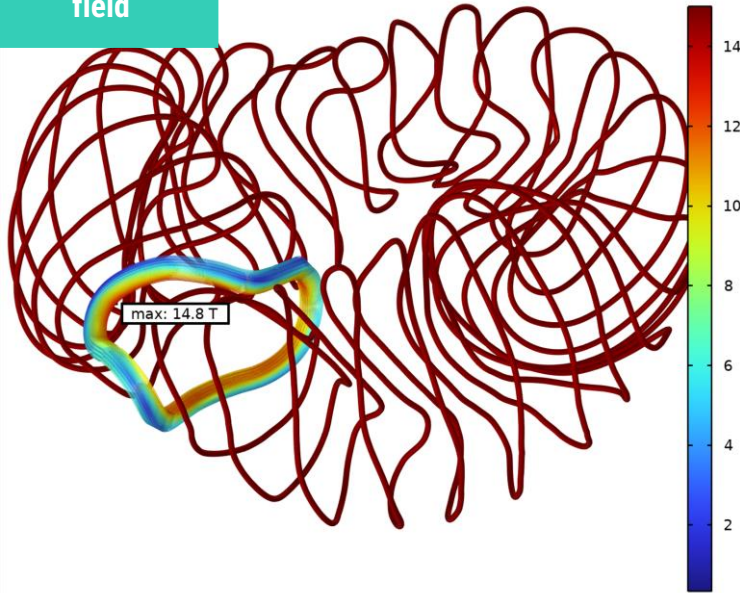


Multi-Physik Simulation für Magnet Design

Stellarator Engineering workflow

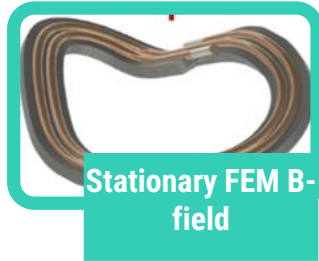


Magnetfeld

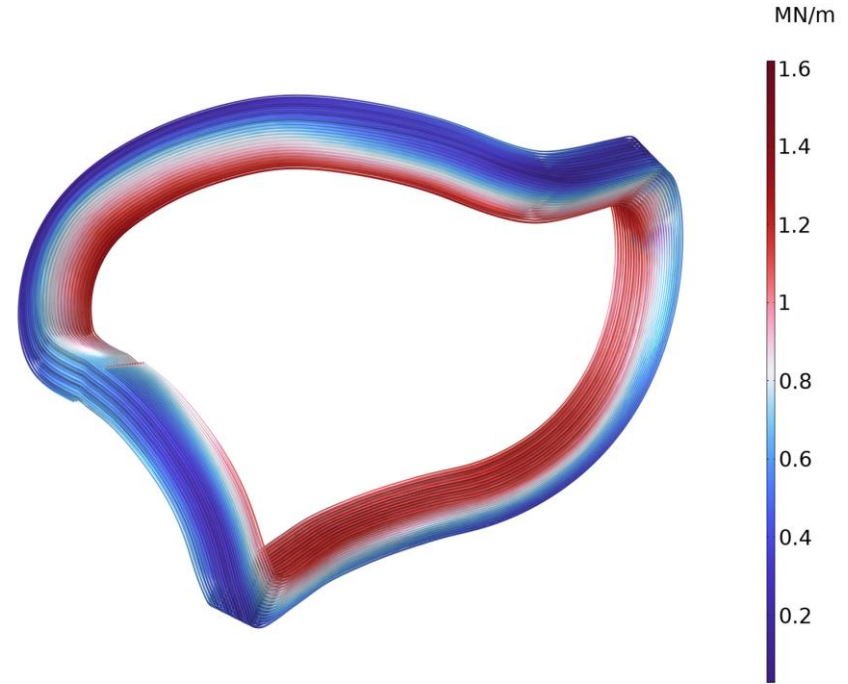


Max B ~ 14.8 T

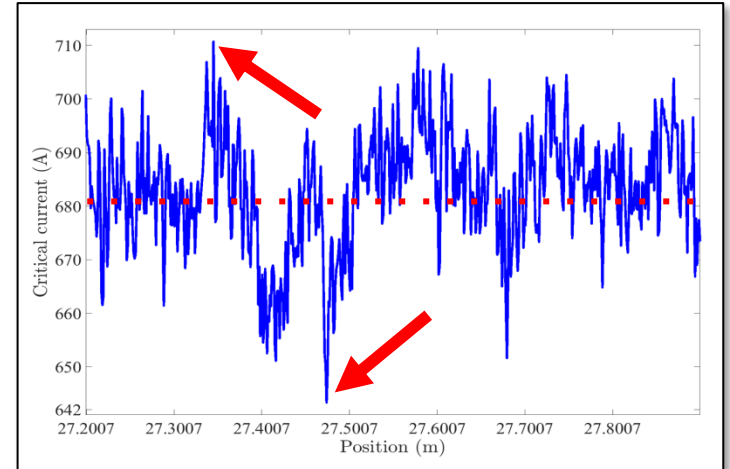
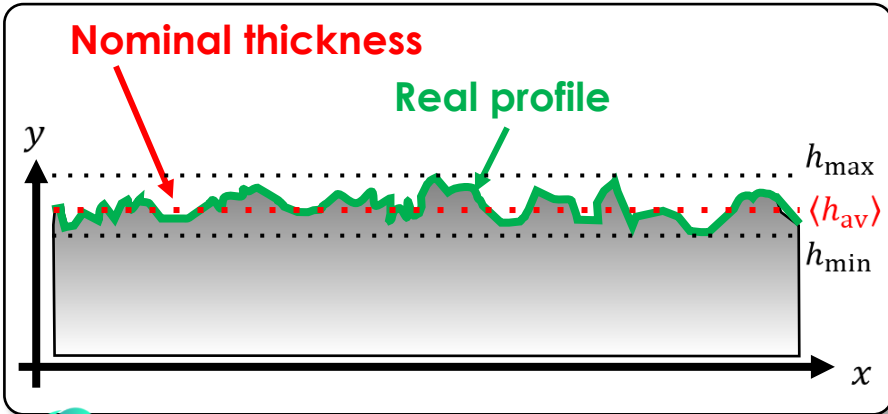
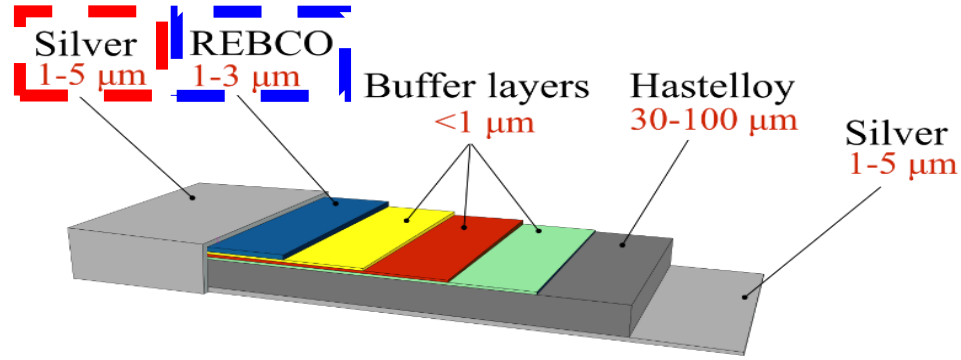
Lorentzlast und andere Kräfte



- Annahme: ENEA/VIPER Kabelquerschnitt
→ $A \sim 367 \text{ mm}^2$
- Maximale Lorentz Last ($I \times B$): $\sim 1.6 \text{ MN/m}$
- Im Schnitt über 200 Windungen, also
 $\sim 8 \text{ kN/m}$

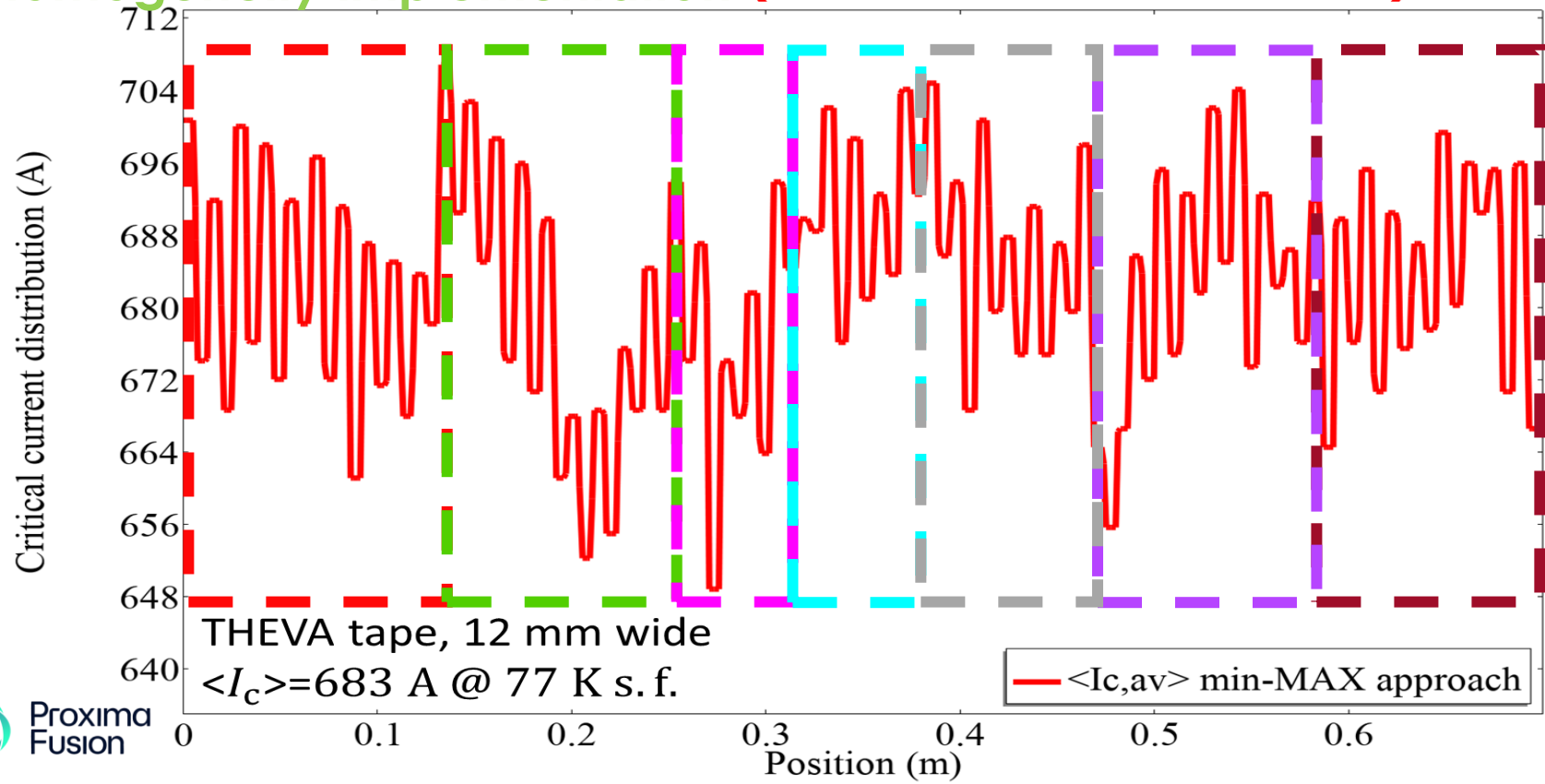


Risiko: Abweichungen in Geometrie und Ic



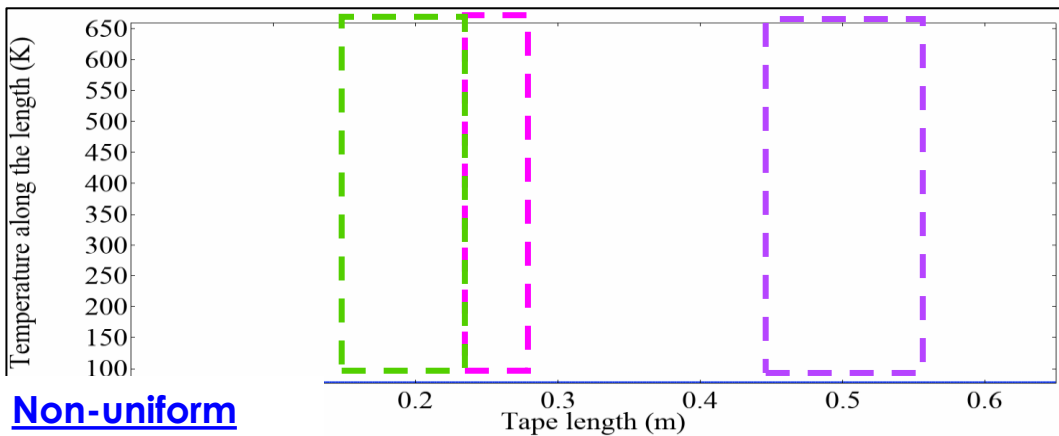
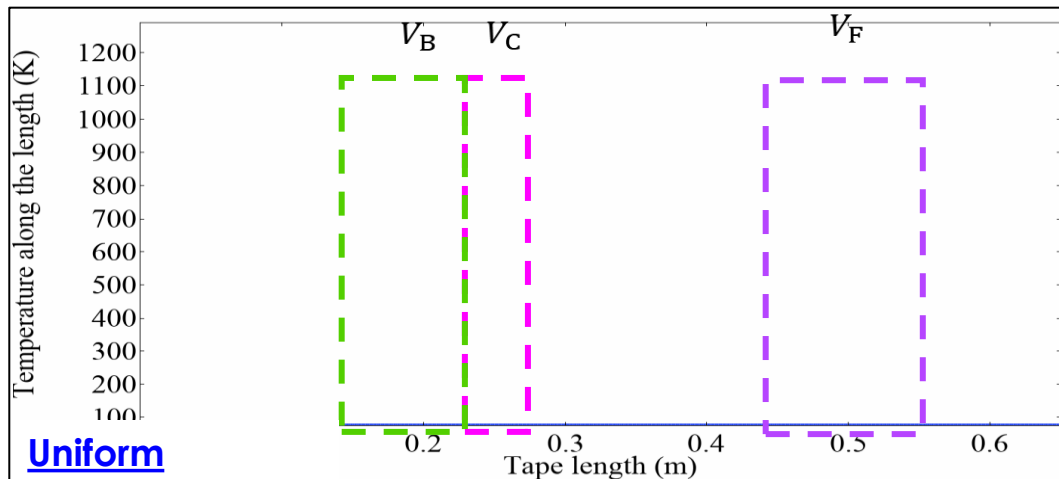
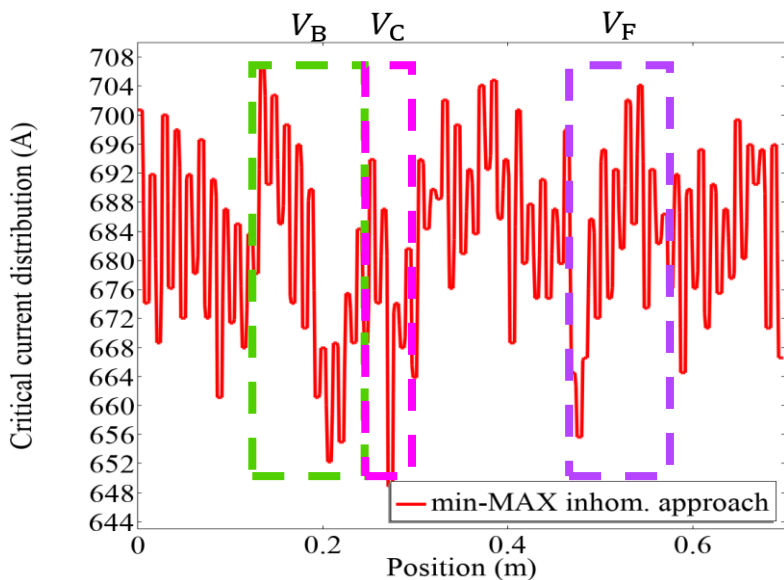
Kritischer Strom, beispielhaft an einem Bandleiter

Inhomogeneity implementation ($n = 100$ resistors sections)



Hotspot-Entstehung durch I_c -Variation

Temperature profile (inhom.)



- 30 ms DC pulse
@ $1.2 \cdot I_c = 820$ A



**Fertigungs-
verfahren: Die
Herausforderung
von HTS**

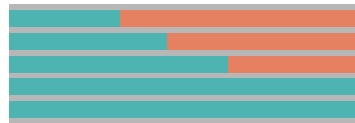
Einheitliche kritische Stromdichte zur Vermeidung von Hotspots

Option 1: "Grading"

- Verfügbar für planare und nicht-planare Spulen
- Lokale Reduktion durch Einfügen von Kupferbändern



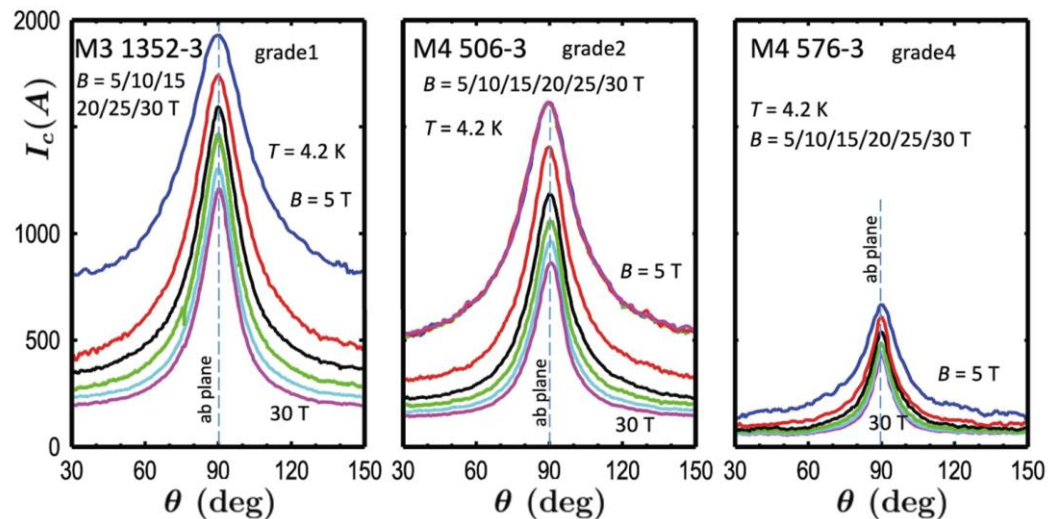
Ic Verteilung zufällig



Ic Verteilung kontrolliert

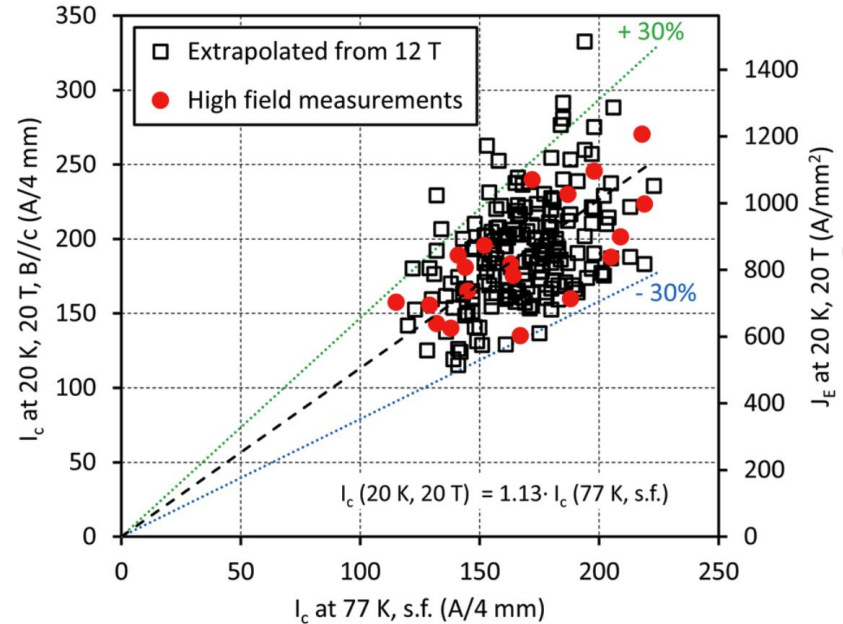
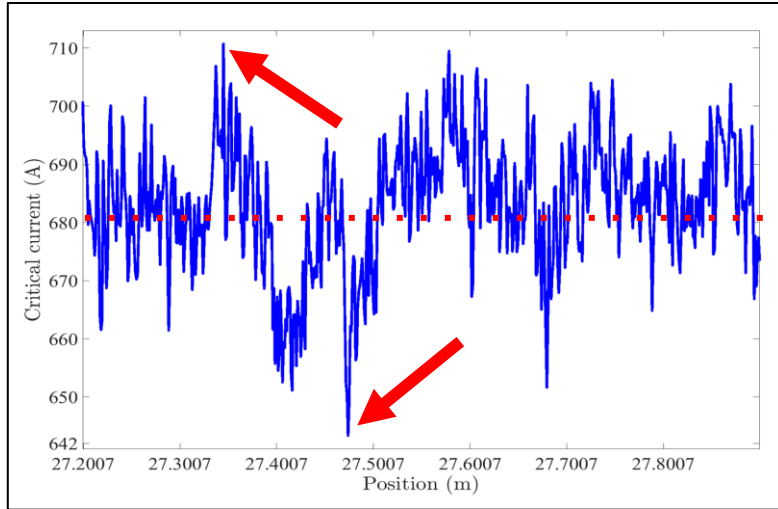
Option 2: Ausrichtung

- Verfügbar nur für nicht-planare Spulen
- Kontrolle durch $I_c(B, \theta)$

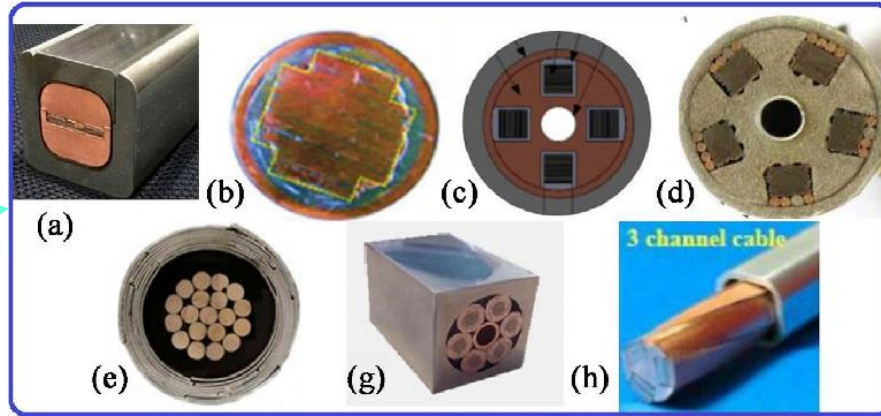


Voraussetzung: Kenntnis des lokalen kritischen Stroms

77K ,self-field



Vom Bandleiter zum Stellarator Magneten



Anforderungen an das Bandleiterkabel

- Gleichheit der kritischen Stromdichte
- Wickelfähigkeit
- Verfügbarkeit



HTS Dehnungsgrenzen

Fertigung

- Wickeln, Biegen, Verdrehen
- Risiko zu delaminieren
- Knicken durch Biegen über schmale Kante

Abkühlung auf 20 K

- Mehrere Zyklen
 - Anisotrope Materialspannung



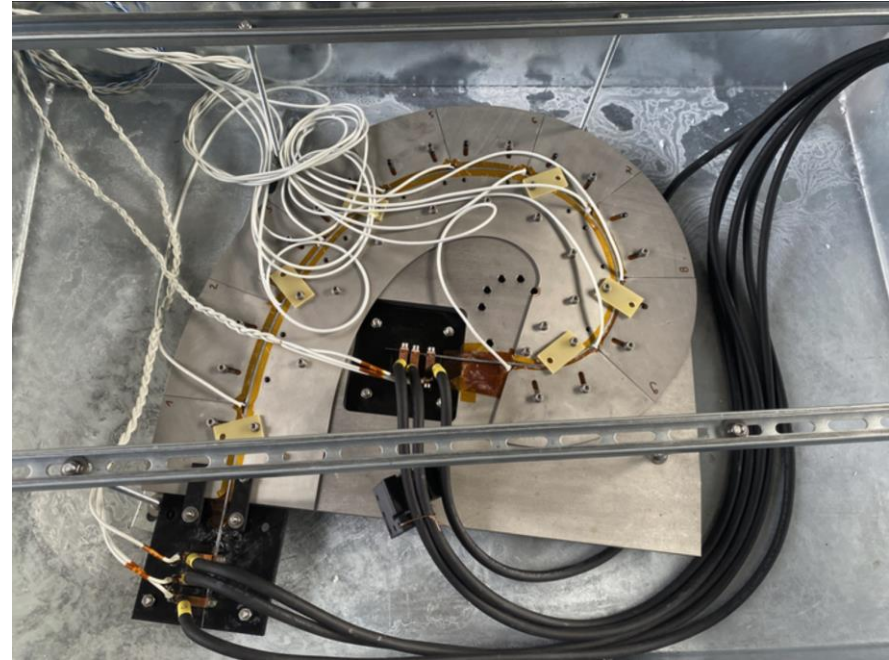
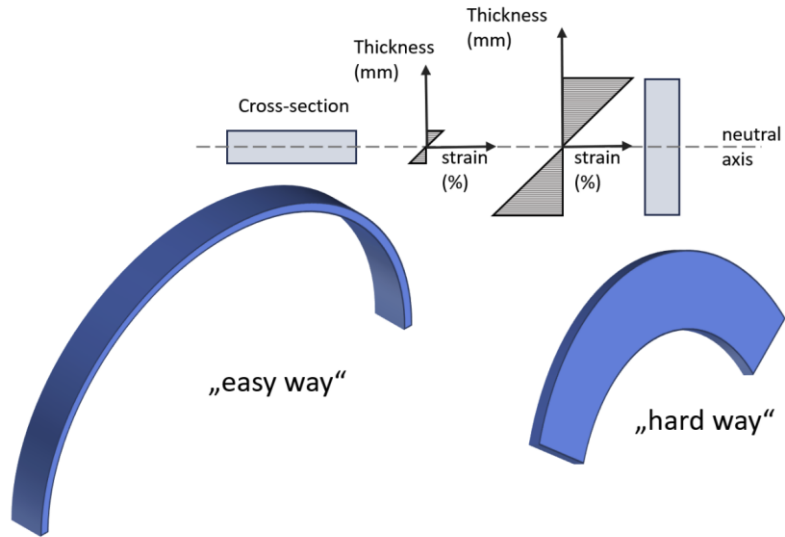
Quench

- Lokale Überhitzung
- Lokale Verformung
- Lokal auftretende hohe Kräfte

Lorentz Last

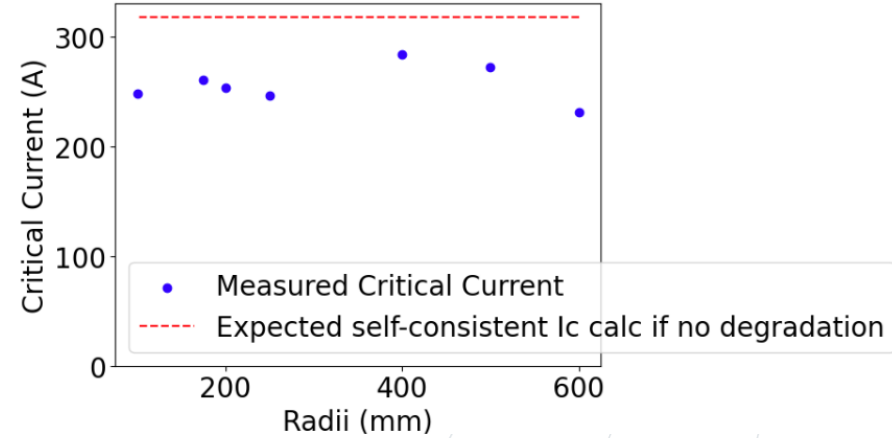
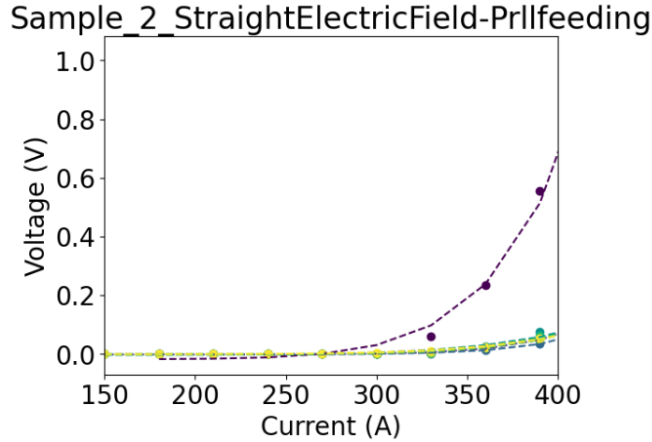
- Beim Ladevorgang (transient)
- Im Betrieb (statisch)

Stack bending

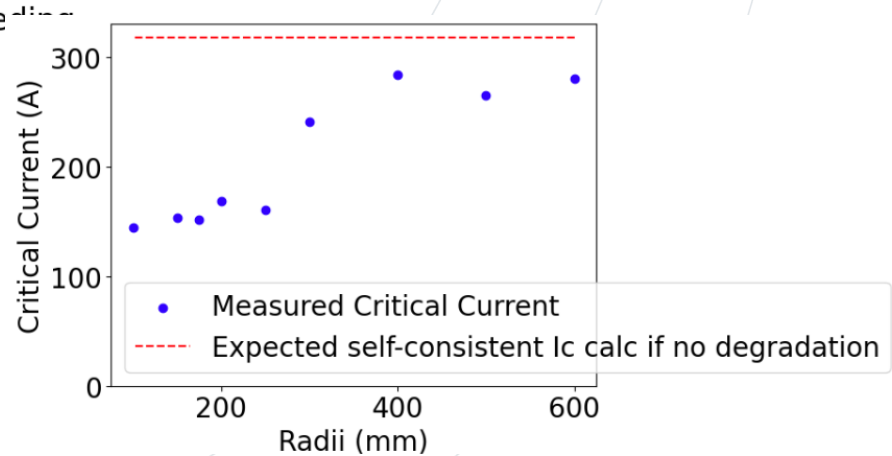
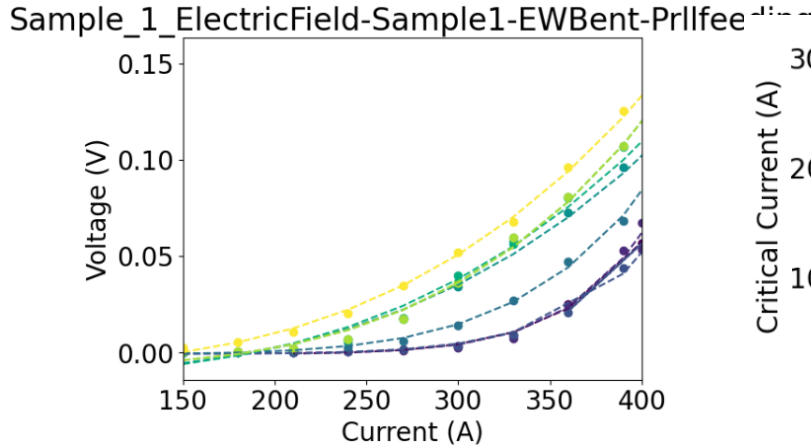


Stack bending test - Ergebnisse

“Easy way”



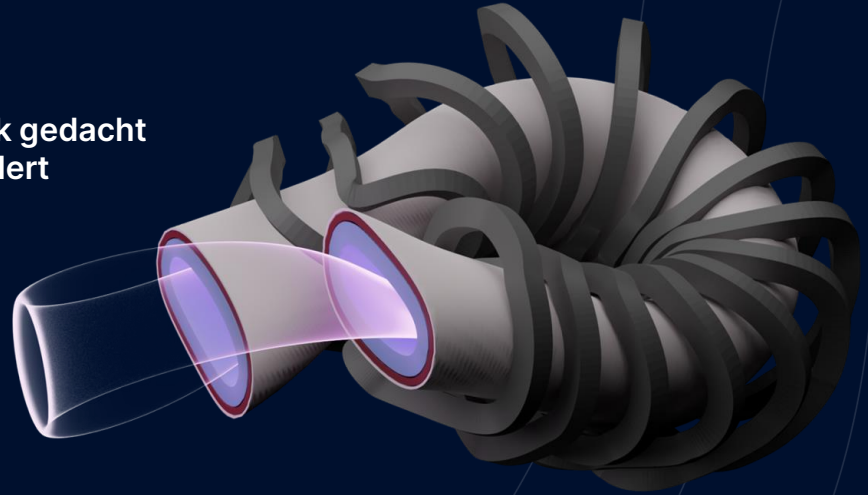
“Hard way”



Zusammenfassung

- Multikriterielle Herangehensweise, vom Kraftwerk gedacht
- Nutzung von Hochtemperatur-Supraleitern erfordert
 - Handhabung von engen Dehnungsgrenzen
 - Ausgereifte Fertigungstechniken
 - Kontrollierbarkeit des kritischen Stroms

Breaking news:



Wir stellen ein!

Example of stellarator coil WP

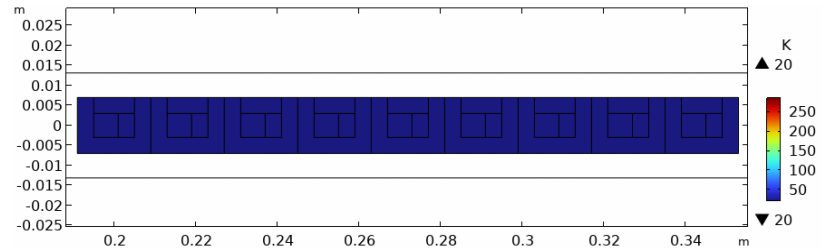
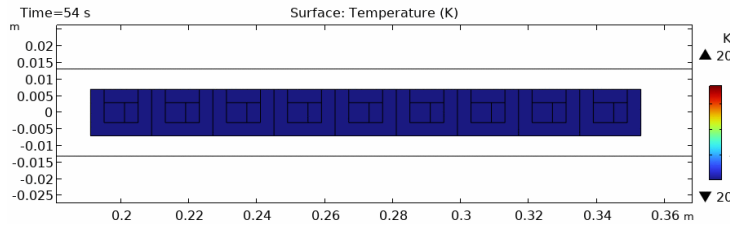


Parameters	Value	Unit
B max	14.8	T
N turns	208	-
I _{op}	63.8	kA
N pancakes	13	-
N layers	16	
Cable cross-sec	38*38	mm ²
Max Force	1.6	MN/m
Copper fraction	???	
SS fraction	???	
Coolant fraction	???	

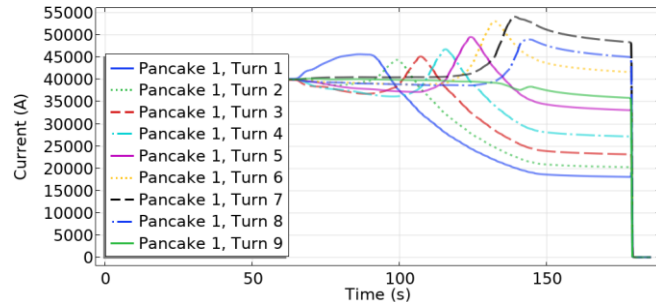
What can we do from a quench mitigation standpoint?

“Surprisingly” we learn that the quench

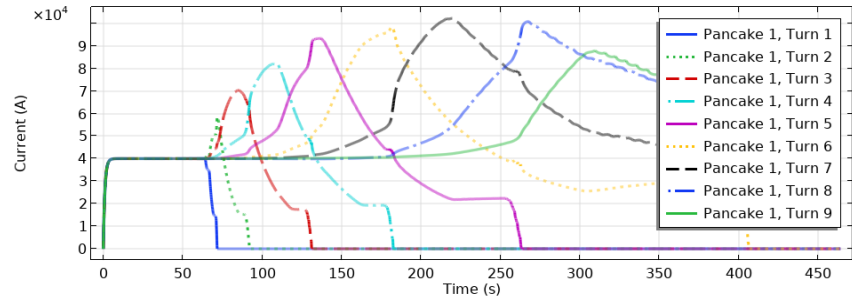
- ... needs to be uniform on the cable/entire winding pack
- ... should be monitored (also in a NI coil I think!)



Uniform quench in NI solenoid



NON-uniform quench in NI solenoid



What can we do from a quench mitigation standpoint?

- A slow “incubation” phase followed by quick “inductive” phase and “copper” phase leads to disastrous effects...
- Could we think of a “preemptive” quench protection system such that - given the very slow initial heating phase - will warm up the winding pack uniformly and rapidly enough?
- ...modeling and “*creativity*” efforts is ongoing...