SIEMENS

Bonn, 11.-12. März 2014, ZIEHL IV Konferenz

Teststand für Technologien eines HTS-Kraftwerksgenerators

Dr. Peter Kummeth
CT RTC PET SUC-DE
peter.kummeth@siemens.com

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Historie: Entwicklung von rotierenden HTS-Synchronmaschinen bei Siemens

SIEMENS

1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 ...

HTS I

HTS II

HTS III

Langzeittest

Modellmotor

- 400 kW
- 400 V
- 50 Hz
- 1500 U/min
- **Technologie-Demonstrator**

Generator

- 4000 kVA
- 6600 V
- 60 Hz
- 3600 U/min
- **hohe Drehzahl**

Motor

- 4000 kW
- 3300 V
- 8 Hz
- 120 U/min
- **hohes Drehmoment**

Generator

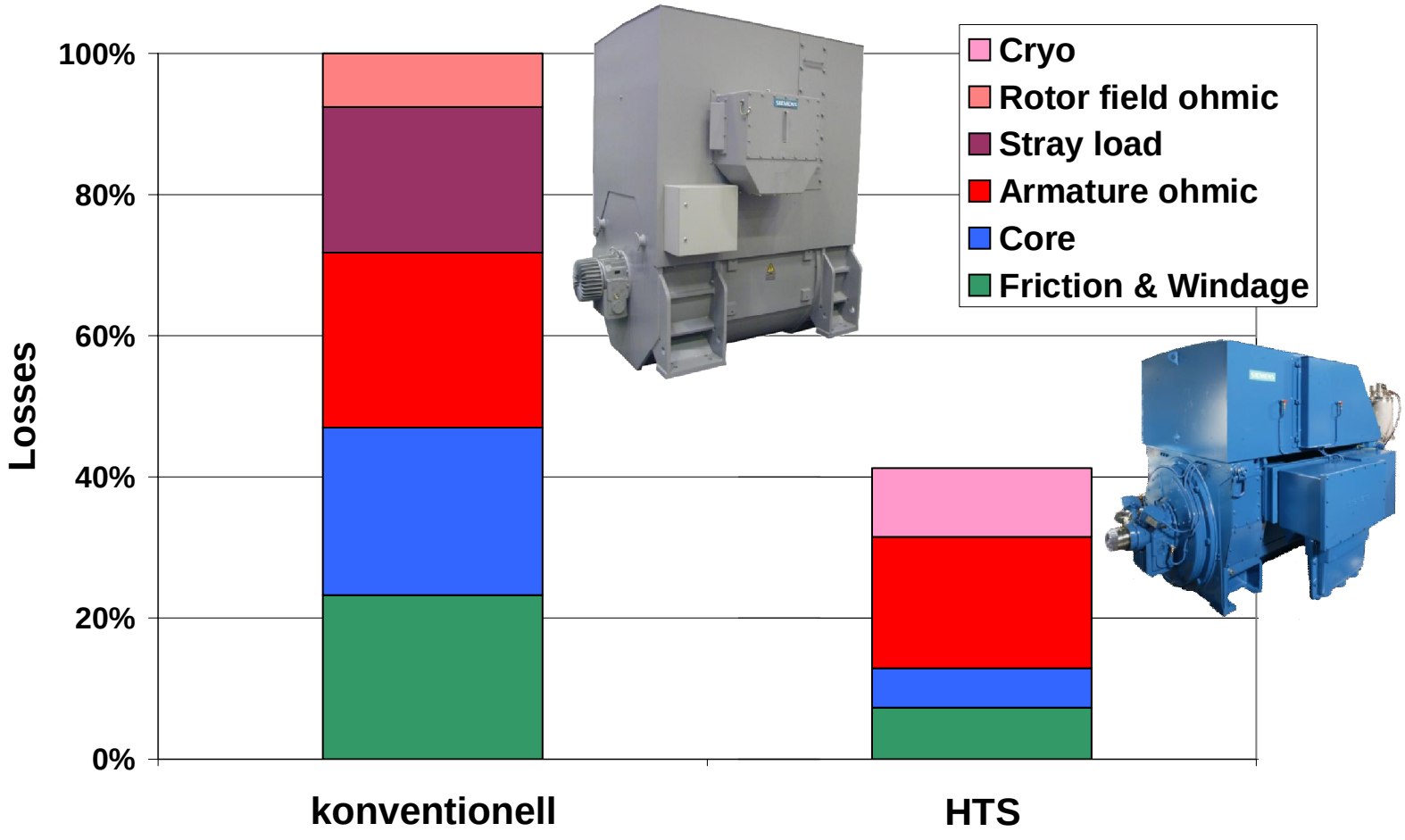
- HTS II
- Langzeittest
- am Netz (Siemens)
- Dauerbelastung
- **Langzeiterfahrung**

alle Entwicklungsprojekte wurden anteilig durch BMBF/BMWi gefördert

+ Experimentierplattform für neue Komponenten

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Besserer Wirkungsgrad am Beispiel 4MVA HTS-Generator (HTS II)



η = 97.0 % **η = 98.7 %**

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Vorteile von HTS-Kraftwerksgeneratoren

Vorteile

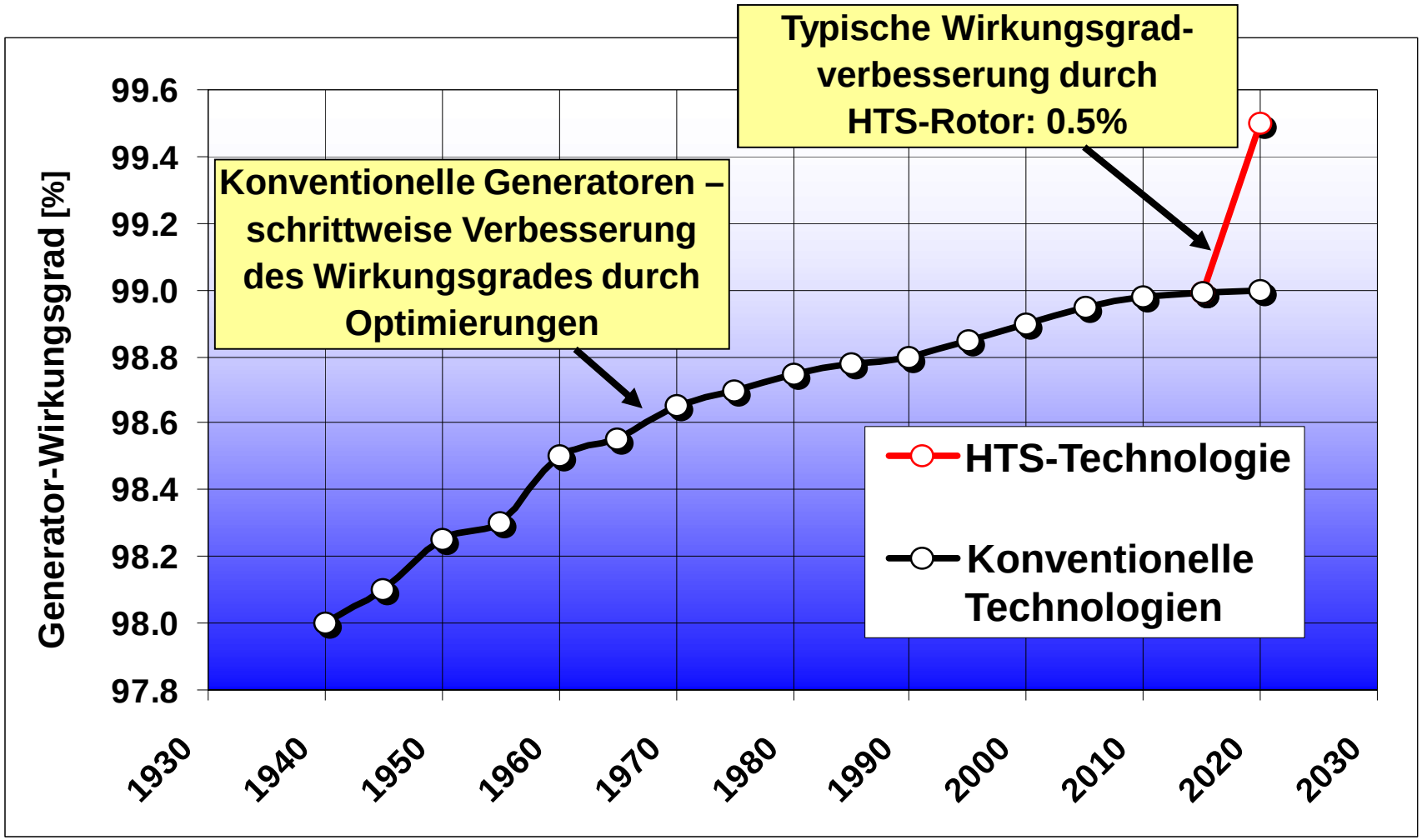
- geringere Verluste
- erhöhter Wirkungsgrad
- kleinere Baugröße
- geringeres Gewicht
- hohe Überlastbarkeit
- geringe Spannungsänderung bei Lastwechsel
- hohe Spannungsqualität
- Bereitstellung von Blindleistung
- Kühlung von Rotor und Stator unabhängig voneinander
- verbesserte Statorkühlung möglich

- reduzierte CO_2-Emissionen
- effiziente Nutzung von Energieträgern
- Schonung von Energie-Ressourcen
- Einsparung von Kosten

- verbesserte Netzstabilität

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Wirkungsgrad von Hochleistungsgeneratoren
Potential der HTS-Technologie

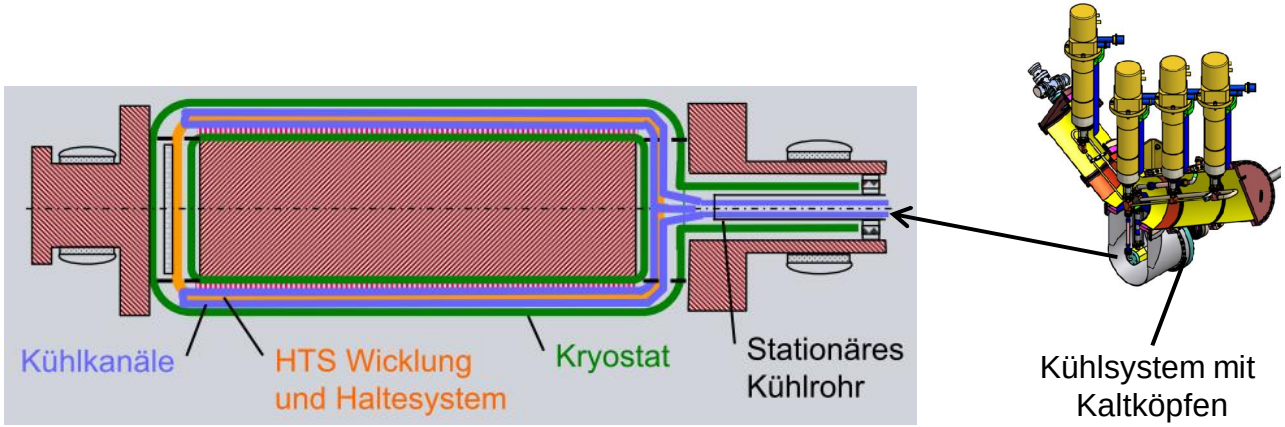


Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Neue Herausforderungen bei großen HTS-Kraftwerksgeneratoren

SIEMENS

- hohe Zentrifugalkräfte (~ 4500 g)
- hohe Drehzahl ~ 3000 U/min
- großer Radius ~ 0,45 m
- Betriebstemperatur ~ 30 K
- robuste HTS-Hochstromwicklungen nötig (einige kA → kleine Induktivität L → nötige Regelspannung klein)
- massiver Rotor mit großer Eisenmasse
  - kaltes Rotoreisen → lange Abkühldauer, großer Kryostat, hohe Kühlleistung nötig
  - Rotoreisen bei Raumtemperatur → HTS-Spulen in rotierendem Kryostat befestigen, neues Kühlkonzept für HTS-Spulen (Neon p ~ 175 bar)



Komponenten für zukünftige HTS-Generatoren müssen zuverlässig und verlässlich funktionieren!

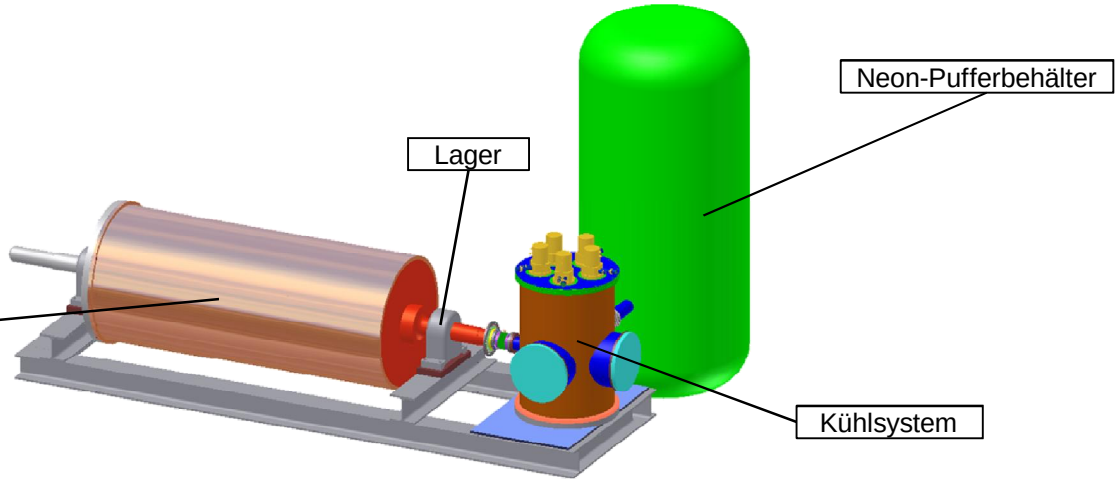
→ Teststand für Entwicklung und Test neuartiger Konzepte und Komponenten nötig!

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Entwicklung eines Rotationsteststands
Ansatz beim Projektstart

Realisierung eines Rotationsteststands für
realitätsnahe Grundlagenuntersuchungen an Generator-Komponenten
z.B.: große 2G-HTS-Spulen (1,5m x 0,9m), Kontakte, Kühlung, thermische Isolation, …

Radius ~ 0,45 m
3000 U/min (Zentrifugalkräfte)
T ~ 30 K
I ~ 3 kA



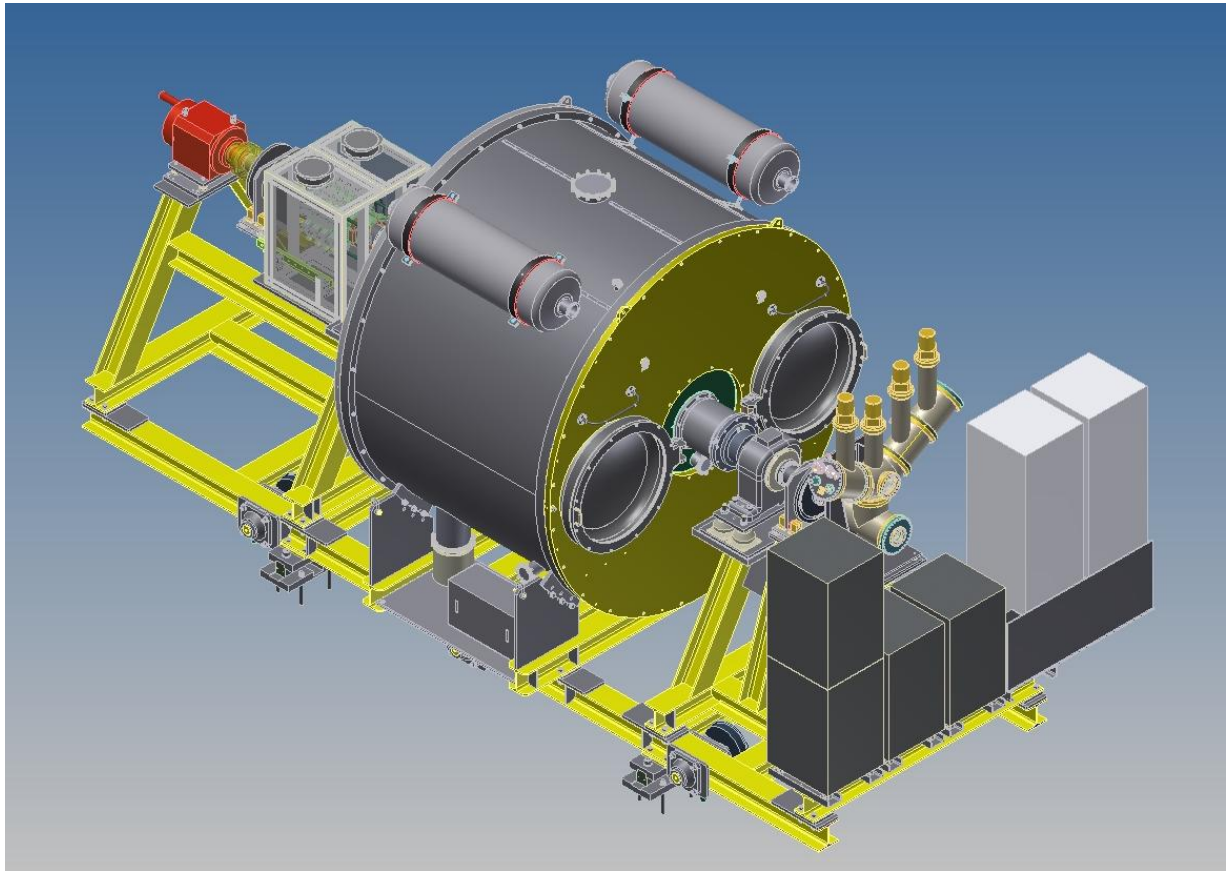
Nachteile:
- Luftreibung ca. 80 kW
- beschränkter Platz für Testobjekte im rotierenden Vakuumbehälter
- Zugang zu Testobjekten stark behindert, d.h. sehr hoher Montageaufwand
- hohe Zentrifugalbelastung des rotierenden Vakuumbehälters

→ Abhilfe: stehender Vakuumbehälter mit Drehdurchführungen

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Teststand - aktuelles Design

Stehender Vakuumbehälter mit Drehdurchführungen



Daten des Teststands:

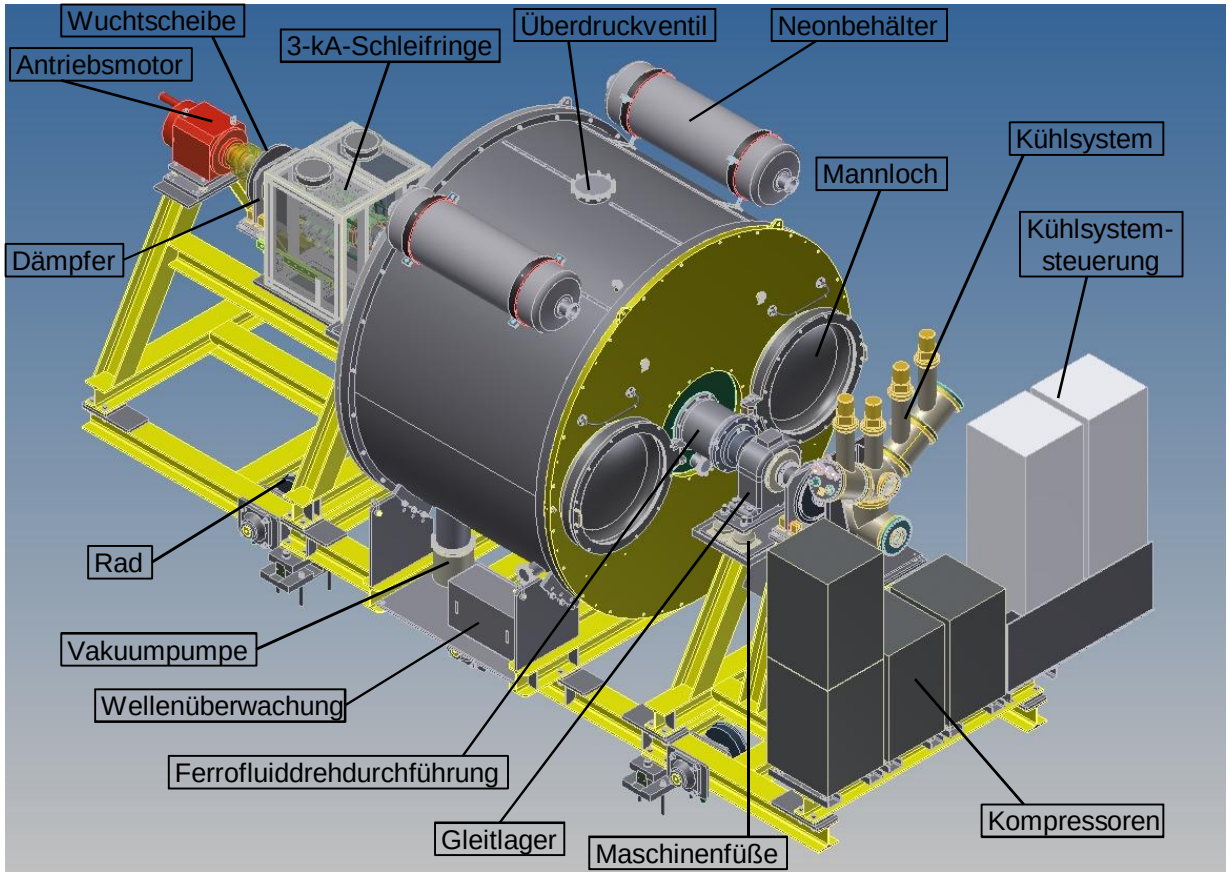
Länge:	8,07 m
Breite (komplett):	3,75 m
Breite (ohne KS-Steuerung):	3,12 m
Höhe:	3,95 m
Masse:	~ 32 t

Drehzahl:	3000 U/min
Radius:	0,45 m
Zentrifugalbeschleunigung:	~ 4500 g
Betriebstemperatur	~ 30 K
max. Betriebsstrom	~ 3 kA

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Teststand - aktuelles Design

Stehender Vakuumbehälter mit Drehdurchführungen



Daten des Teststands:

Länge:	8,07 m
Breite (komplett):	3,75 m
Breite (ohne KS-Steuerung):	3,12 m
Höhe:	3,95 m
Masse:	~ 32 t

Drehzahl:	3000 U/min
Radius:	0,45 m
Zentrifugalbeschleunigung:	~ 4500 g
Betriebstemperatur	~ 30 K
max. Betriebsstrom	~ 3 kA

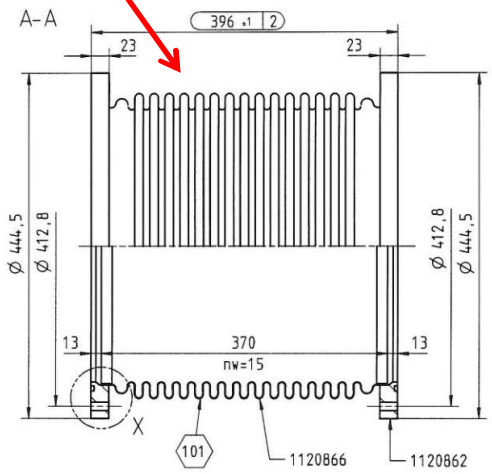
Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

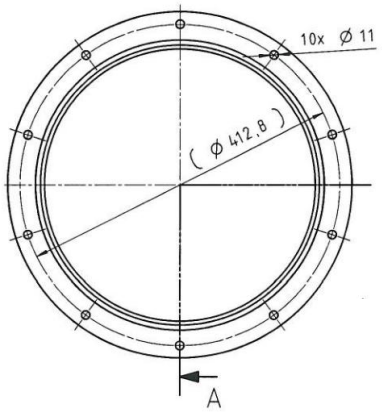
Vakuumdichte Ferrofluid-Drehdurchführungen mit großer Baulänge (für Vakuumbehälter)

2 x Drehdurchführung „groß“

2 x zugehöriger Kompensator (Wellbalg)

1 x Drehdurchführung klein



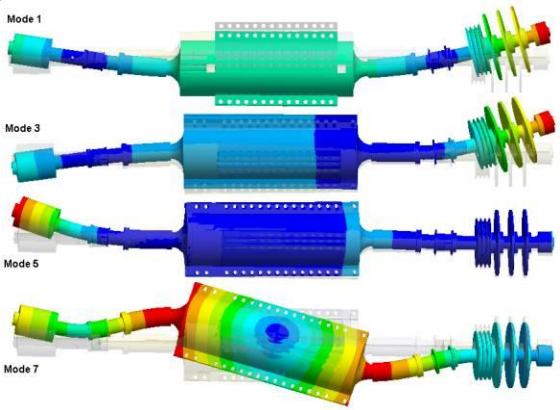


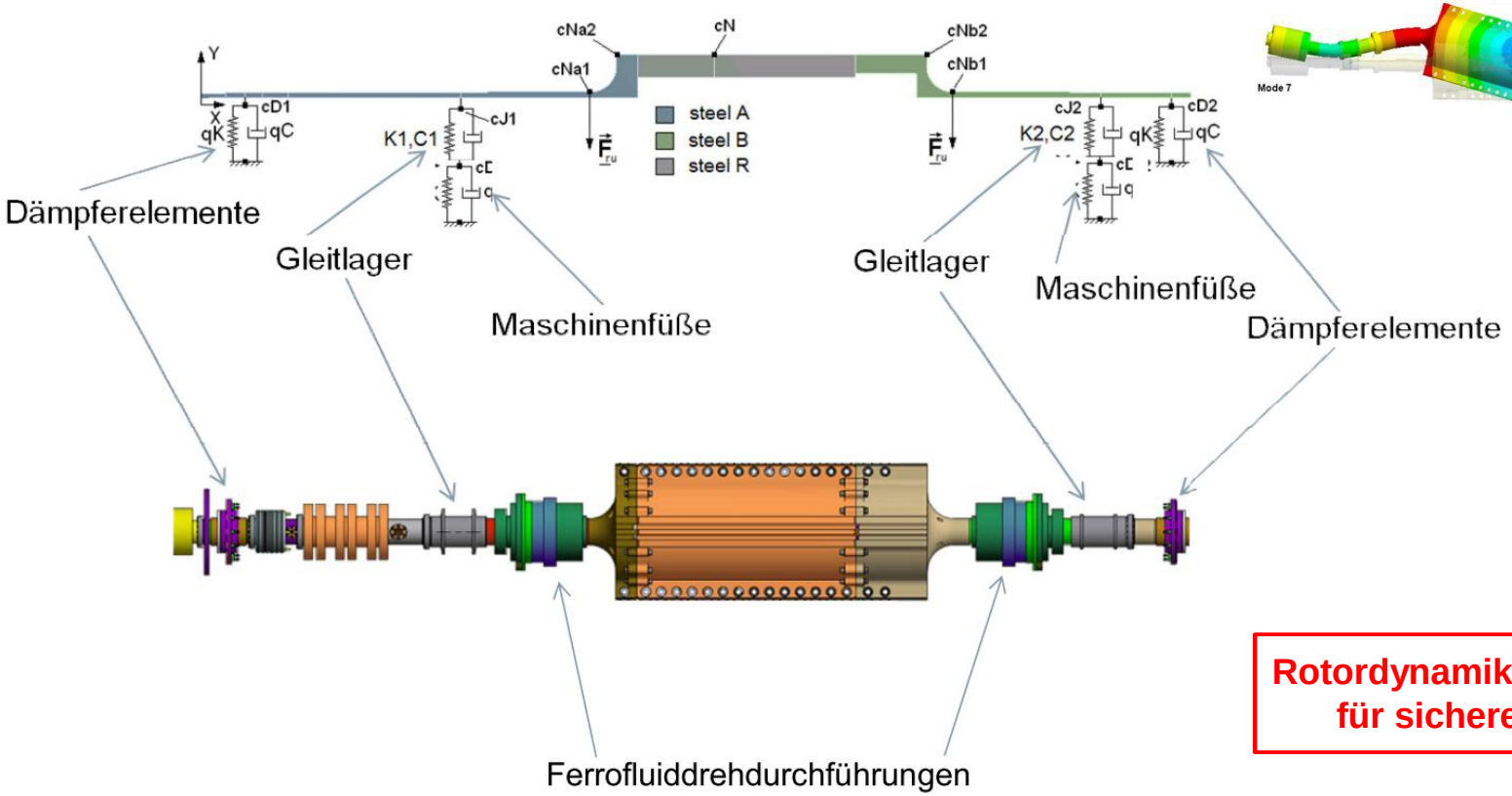
Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Rotordynamik
Analyse der Schwingungsmoden

Komplexer, langer Rotoraufbau
→ herausfordernde Schwingungsmoden

Ziel: im Bereich ± 15% um Betriebsfrequenz keine Resonanzstellen
(durch Optimierung von Dämpfung und Aufbau)



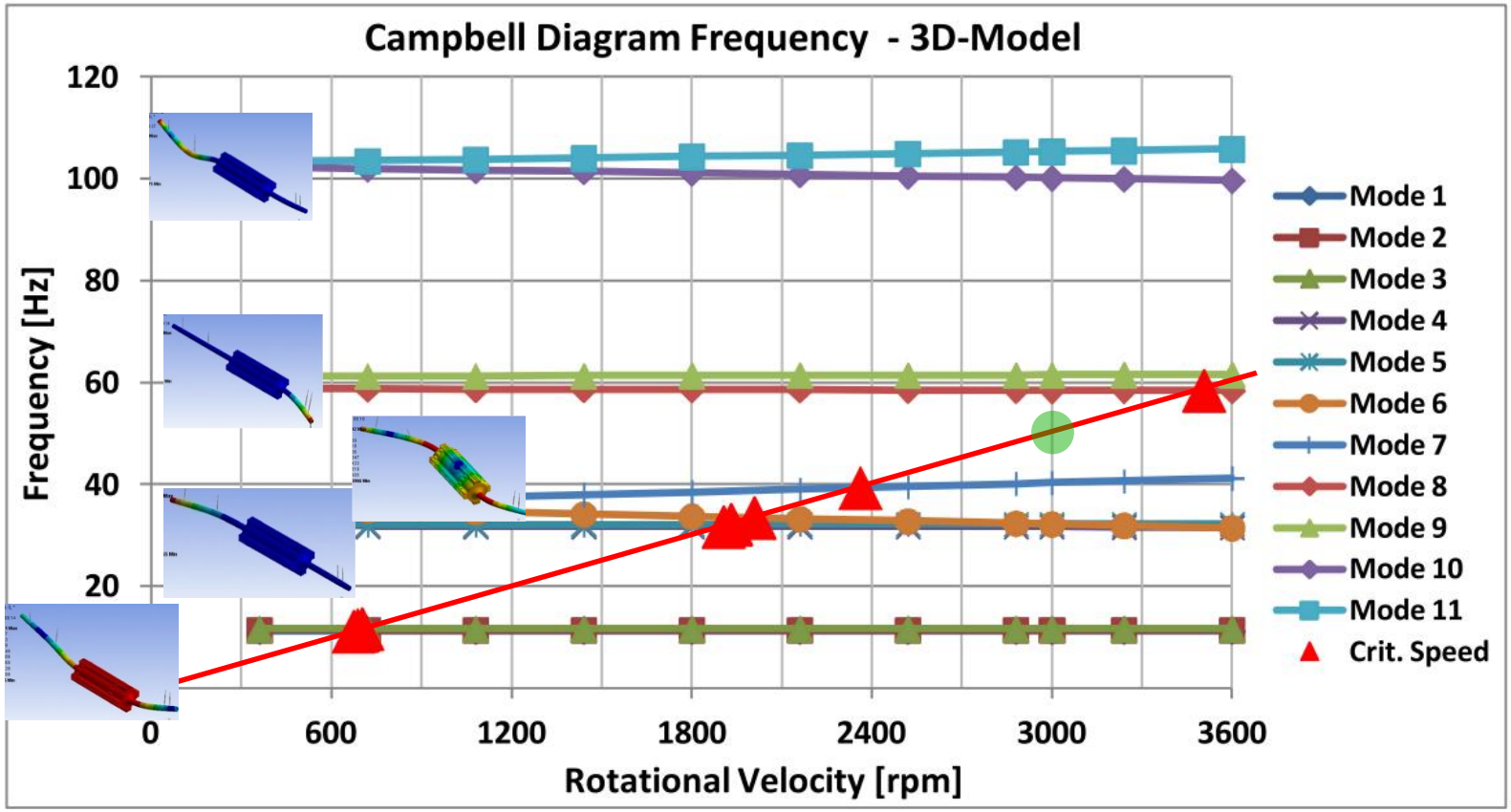


Rotordynamik ist essentiell für sicheren Betrieb!

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Rotordynamik
Eigenfrequenzen als Funktion der Drehzahl

3D-Modell:

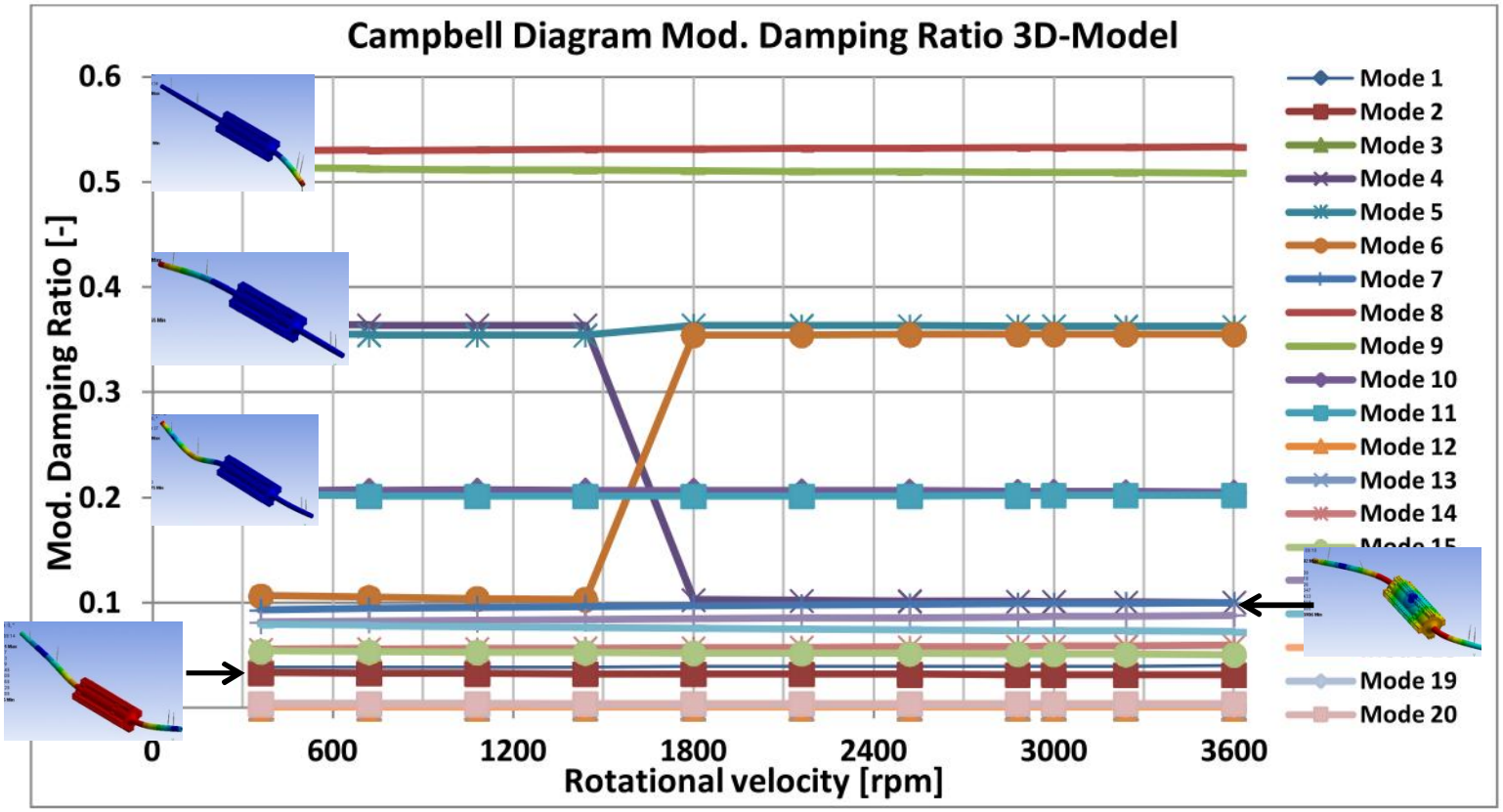


Fazit aus Sicht der Renonanzfrequenzen:
Betrieb bei 3000 U/min ist o.k. (< 500 U/min & 1200 - 1500 U/min wären auch möglich)

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Rotordynamik
Dämpfung der Schwingungen

3D-Modell:



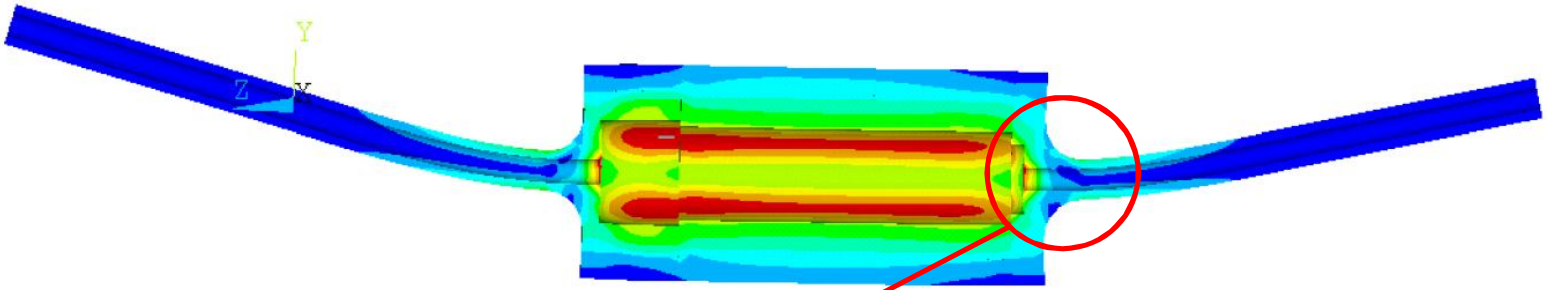
Fazit aus Sicht der Dämpfung:
Keine Instabilitäten, exzellente Dämpfung der Wellenenden

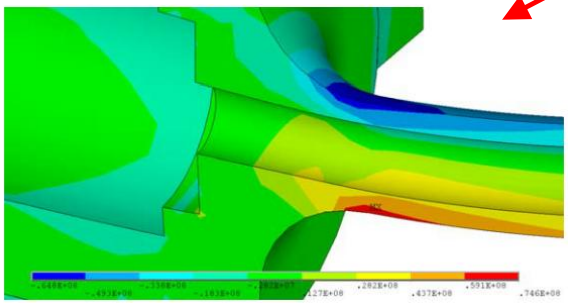
Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Dauerfestigkeitsanalyse für die Welle (nach FKM-Richtlinie)

SIEMENS

> Van Mises Vergleichsspannungen in N/mm²
> Rotation und statische Biegelinie überlagert





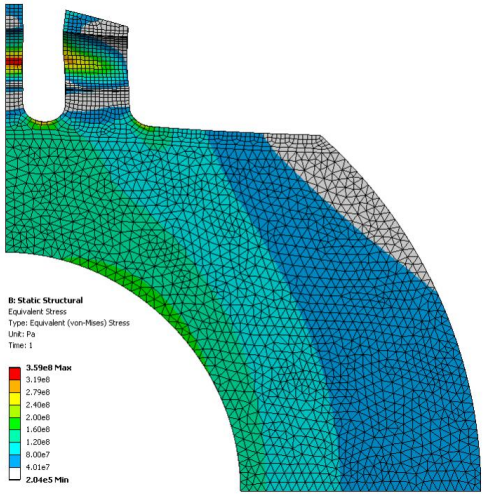
Material : 42CrMo4; Wechsellast: –65MPa ⇔ 75 MPa

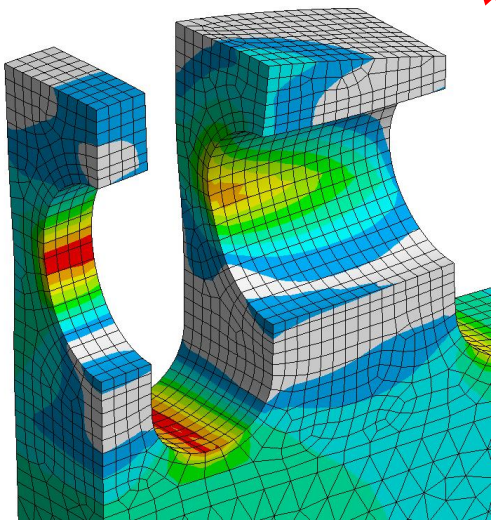
Analyse (nach FKM-Richtline):

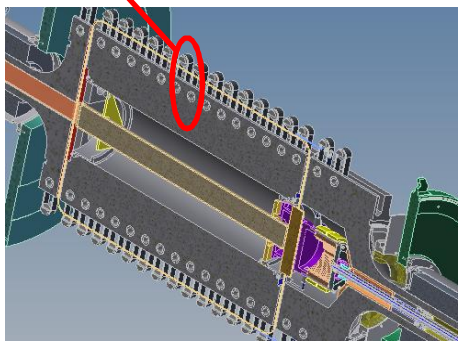
→Auslastung: 76% ☺ (Sicherheitsfaktor: 1.5)

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

FEM-Analysen zur Festigkeit der Zentralwelle z.B. Bolzenfixierung für Zugschlaufen



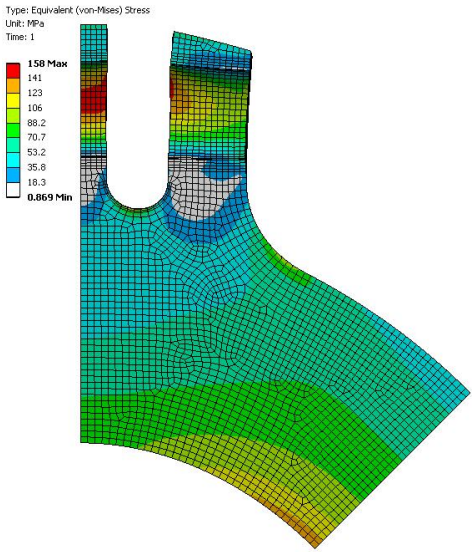


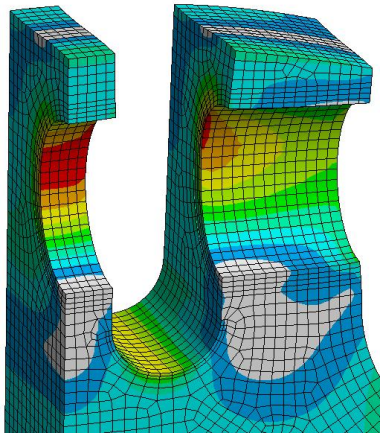


Optimierung:

- Bolzenabstand
- Bolzenlänge
- Innenradius
- Außenradius
- 4-fach-Symmetrie

360 MPa → 160 MPa



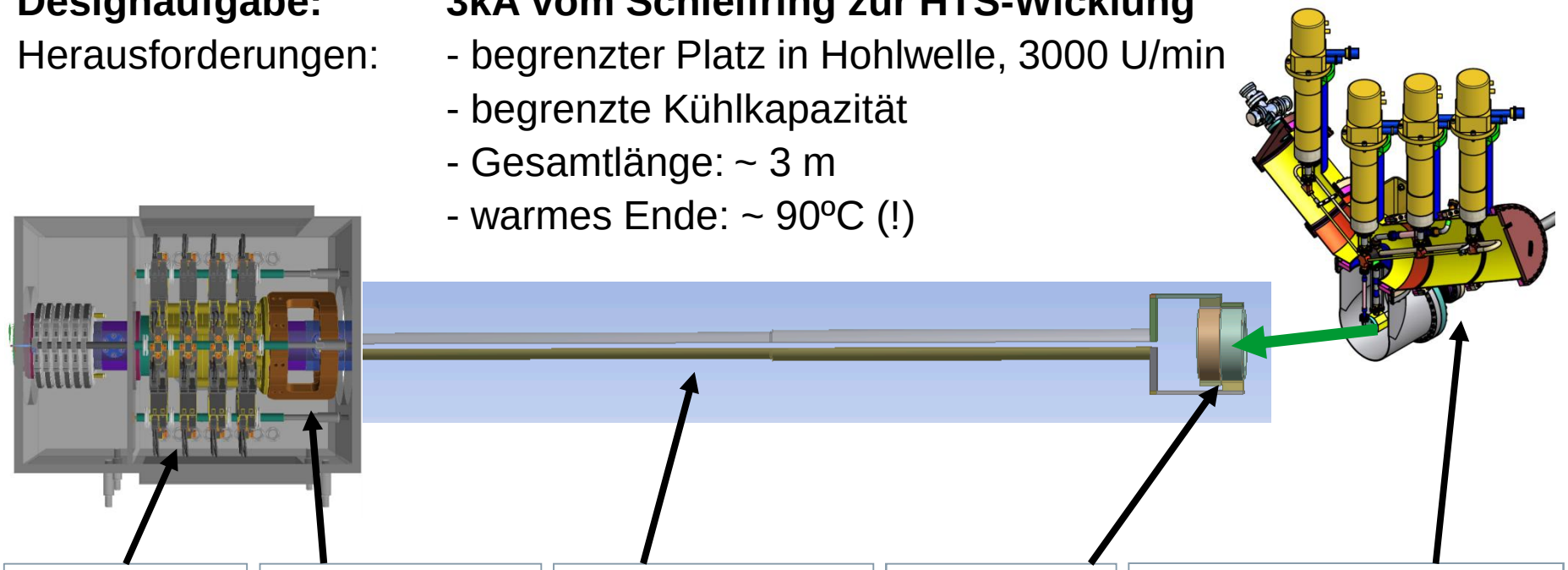


Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Thermische Analyse und Auslegung der 3-kA-Stromzuführung

Designaufgabe: **3kA vom Schleifring zur HTS-Wicklung**

Herausforderungen:
- begrenzter Platz in Hohlwelle, 3000 U/min
- begrenzte Kühlkapazität
- Gesamtlänge: ~ 3 m
- warmes Ende: ~ 90ºC (!)



Schleifring
3 kA, 2 Pole
360K

konvektive Vorkühlung
360K → 310K

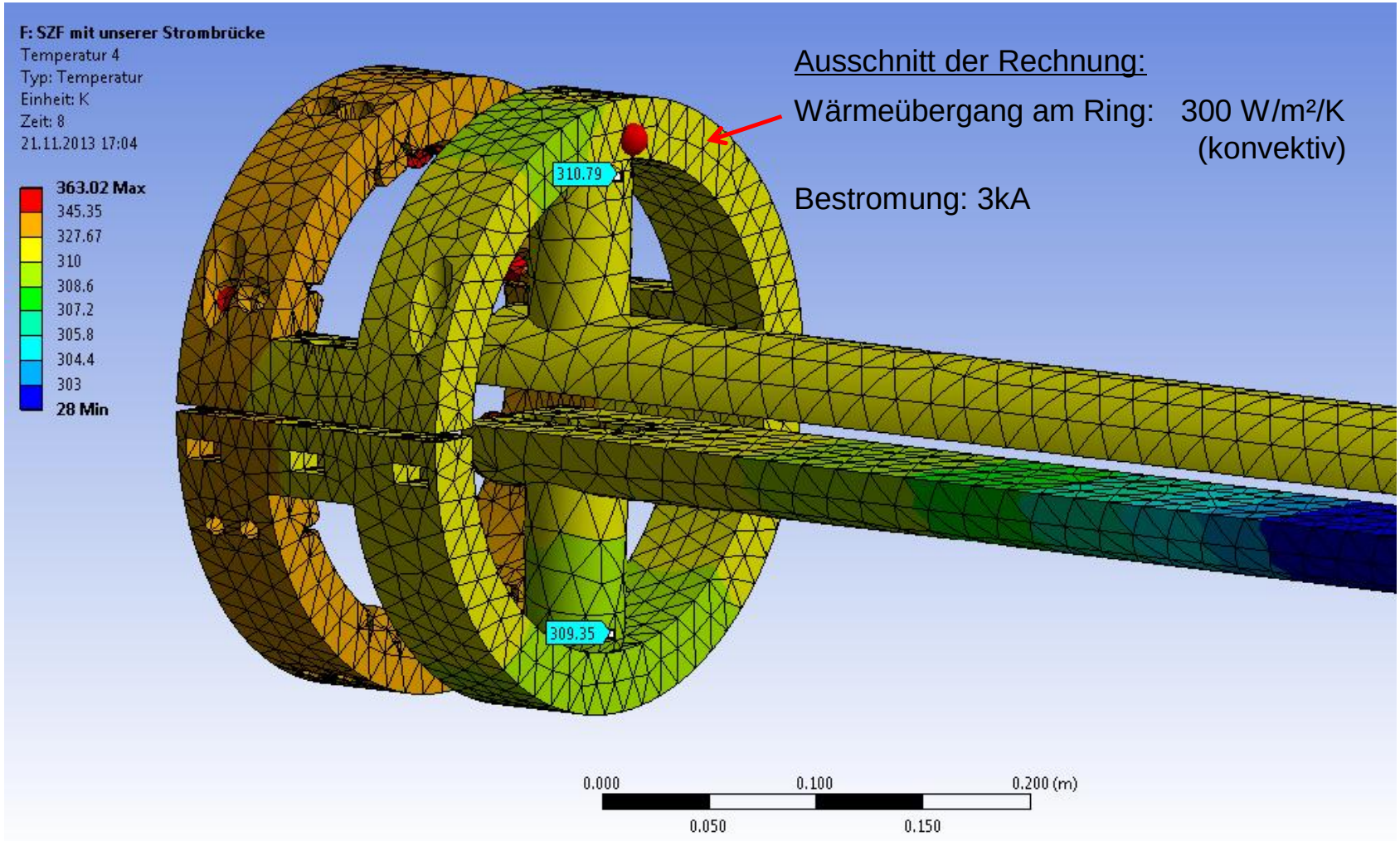
Stromzuführung
Paar für 3 kA
310K → 60K

thermische Anker
60K → 27K
2x150W (!)

Kühlsystem:
4 x AL325 (Cryomech)
liefert 400W @ 27K
Transfer zum Läufer mit Neon-Thermosiphon

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Konvektive Vorkühlung der Strombrücke (ANSYS)



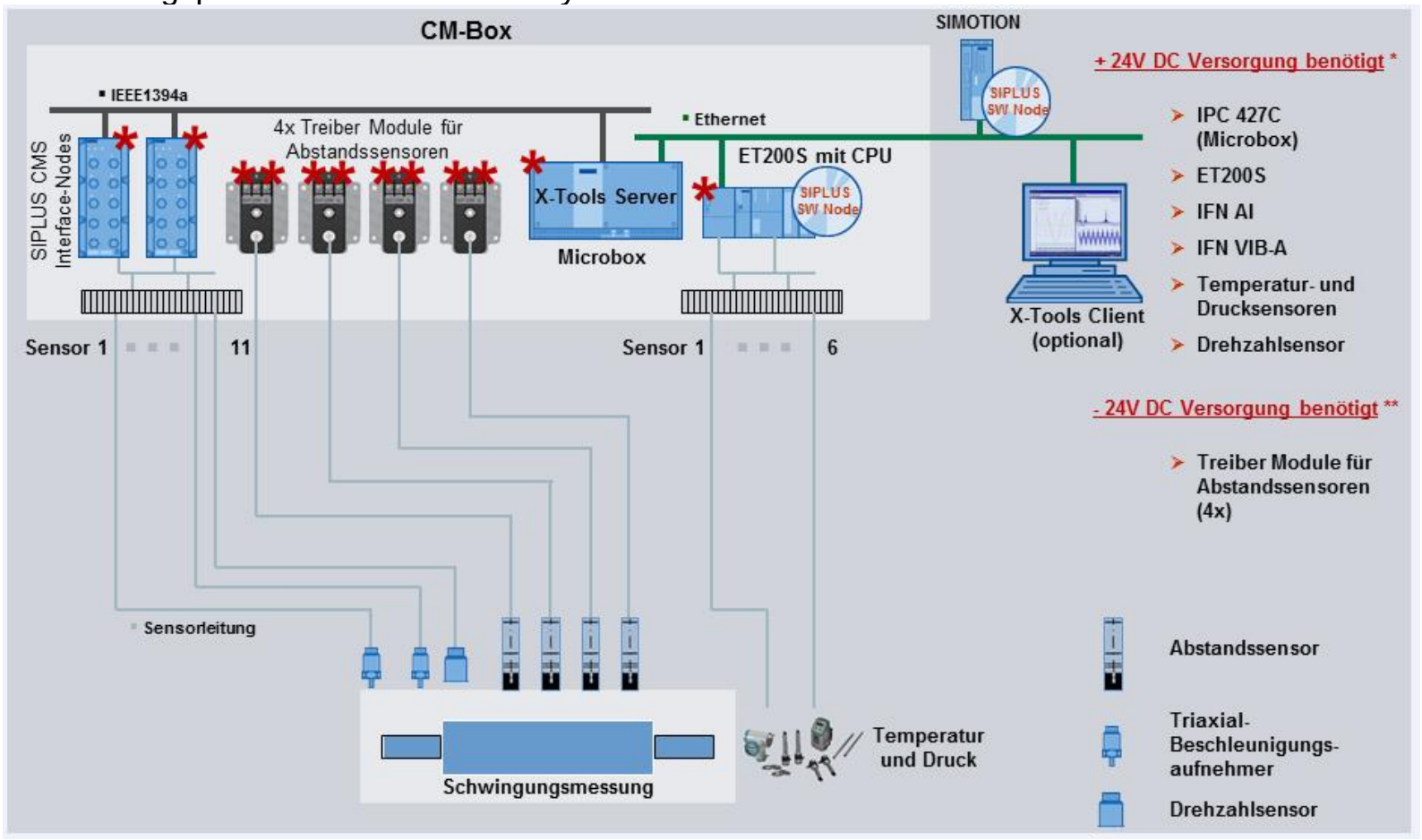
Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Details zu Antriebssystem (63 kW)
Überwachung, Betriebssicherheit

SIEMENS

Betriebs- und Sicherheitskonzept: nötig gemäß Richtlinie 2006/42/EG “EU-Maschinenrichtlinie” und BGI/GUV-I5139 → sicheres Antriebskonzept entwickelt

Entwicklungspartner: Siemens Industry



Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Schutzkonzept
Schleuderbunker am KIT

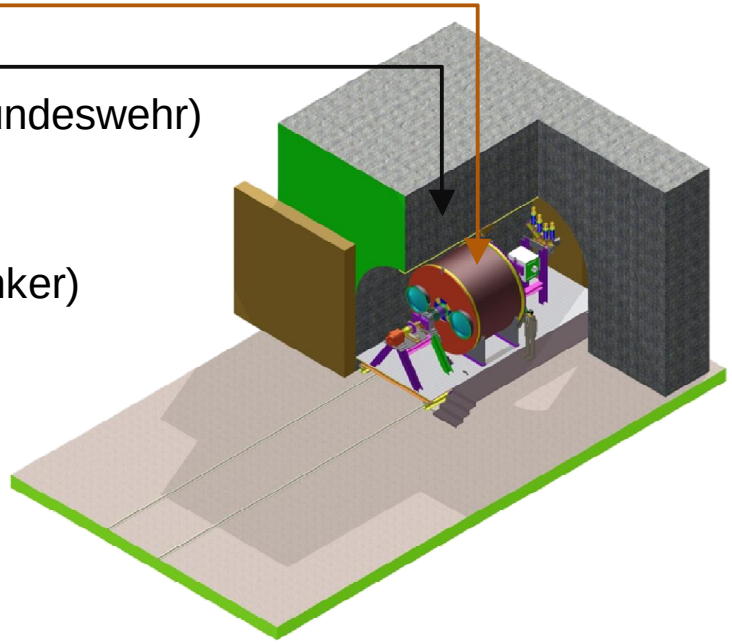
Testrig mit rotierenden Komponenten

→ Risiko des Versagens von Komponenten

→ Schutzkonzept nötig!

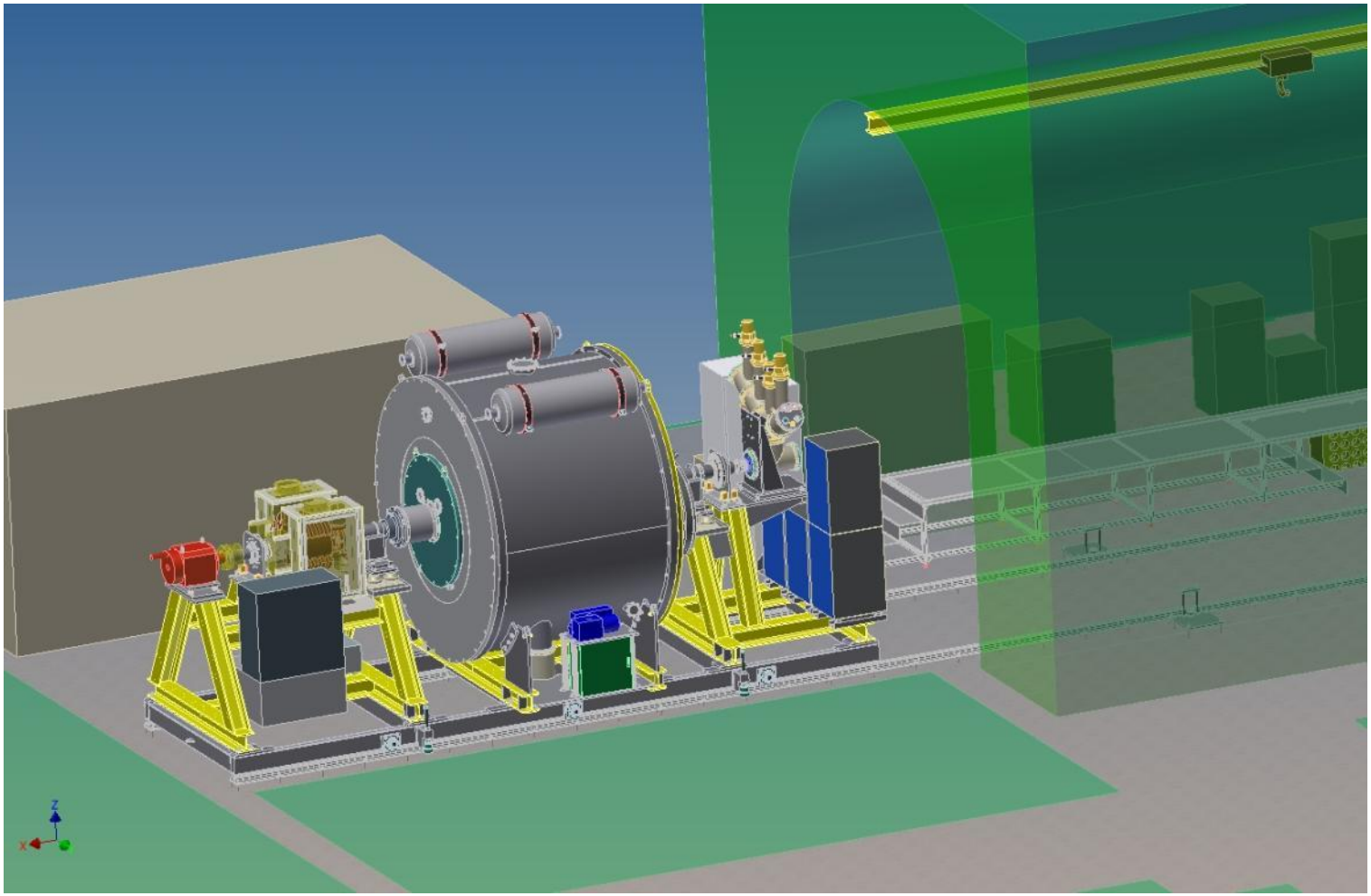
Mehrstufiges Schutzkonzept:

- **Design**, Rotordynamikuntersuchungen, FEM-Analysen, Dauerfestigkeitsuntersuchungen
- stehender **Vakuumbehälter aus Stahl**
- **Sandbunker mit Betonwänden**,
  Konzeptprüfung durch Studie (Universität der Bundeswehr)
- **Zugangskontrolle** zum Bunker
- **Betriebsvorschriften**
  (rotierende Experimente nur abgesichert im Bunker)



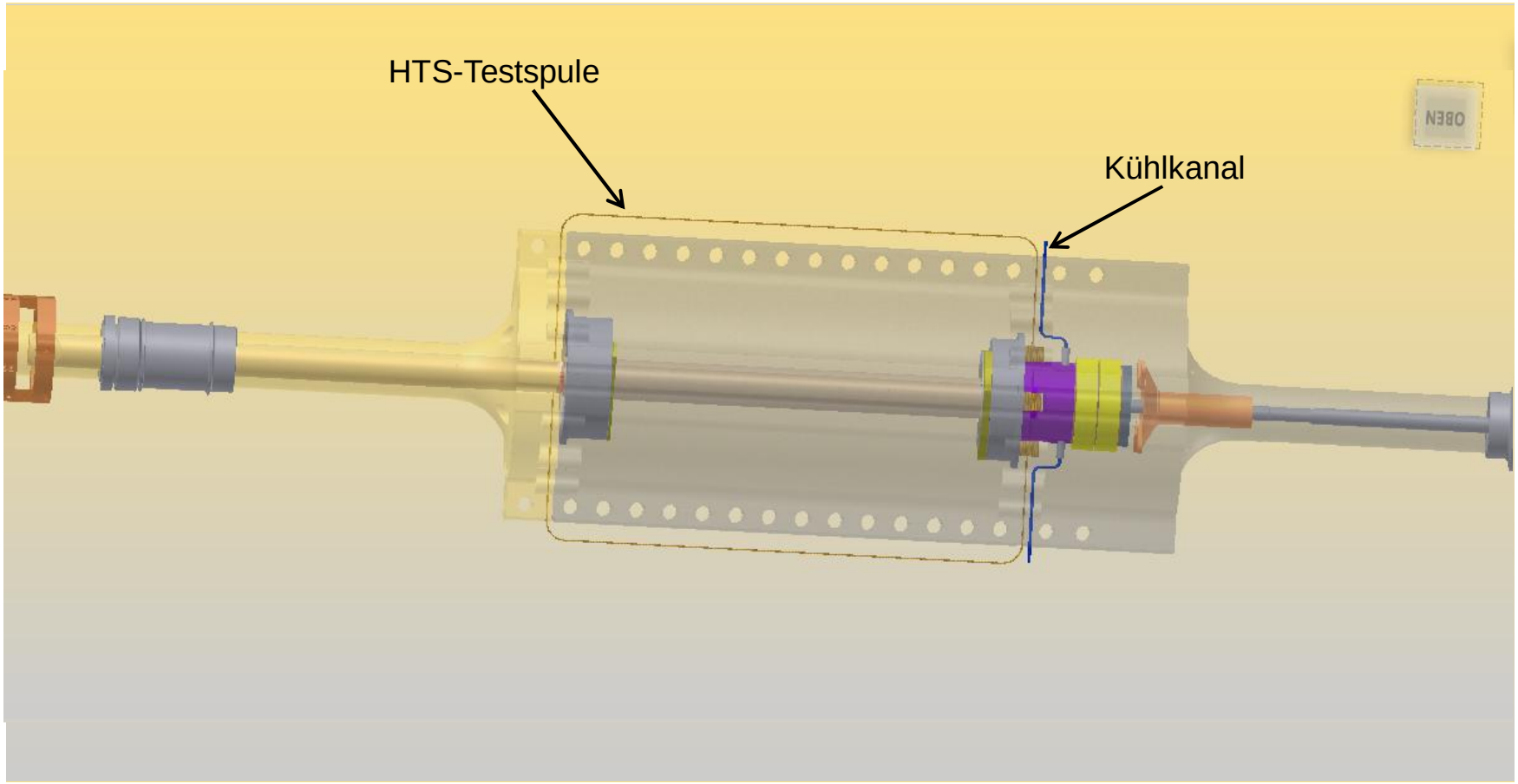
Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Zusammenbau des Teststands am Montageplatz vor dem Schleuderbunker (KIT)



Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Experimentierträger



Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Kleine Rennbahn-Testspulen aus 2G-HTS-Roebelleiter

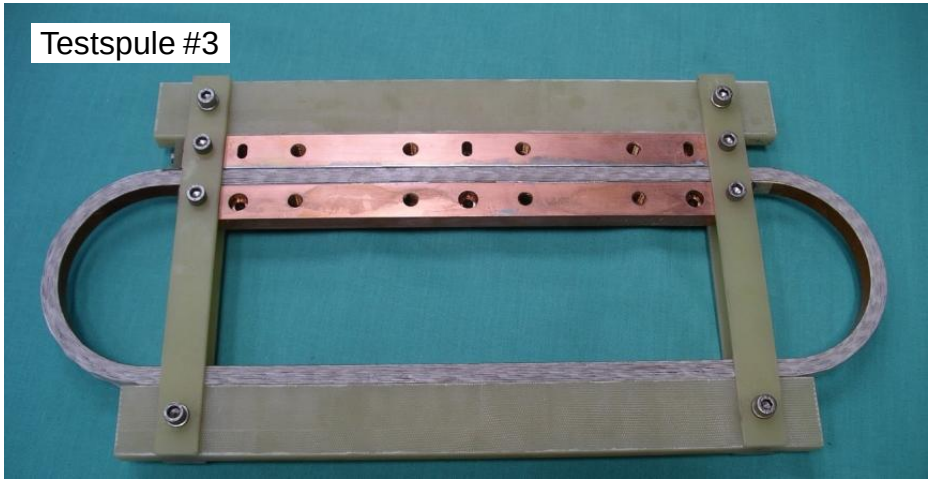
Parameter: kreisförmige Enden R=50mm, gerade Länge 300mm

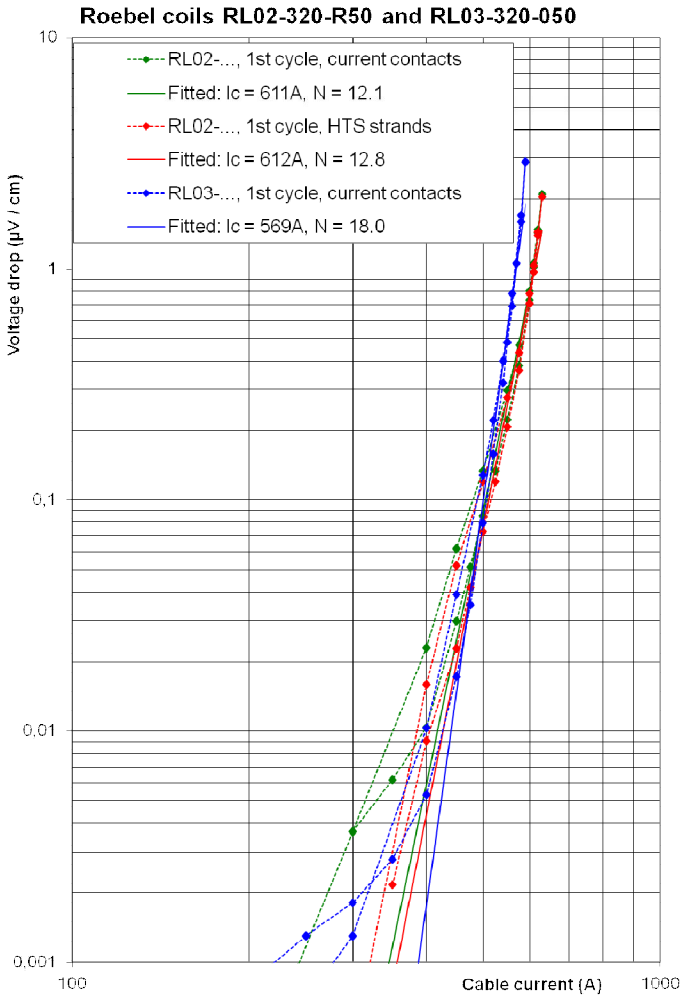
Optionen für Kontakte**:**

A): auf innerer Kabelseite B) von außen

3 Testspulen wurden hergestellt (I_c @ 77 K ~ 600 A) mit verschiedener Leiterorientierung und Kontakten

alle Spulen verhalten sich wie erwartet





Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Aktueller Stand der Ergebnisse

Ergebnisse zum Rotationsteststand:

- neues Bunkerkonzept gemeinsam mit KIT entwickelt
- Design des Teststands abgeschlossen
- Rotordynamik: FE-Analysen, Optimierung
  → Voraussetzungen für stabilen Betrieb (3000 U/min) erreicht
- Konzept für sicheren Betrieb des Teststands im Schleuderbunker erarbeitet
- Stromversorgung ausgelegt (3 kA @ 30 K, 3000 U/min)
- Sicherheitskonzept erarbeitet und mit KIT abgestimmt

Ergebnisse zu HTS-Technologie:

- 2G-HTS-Roebelleiter entwickelt und beschafft (hohe Ströme)
- kleine HTS-Rennbahnspulen erfolgreich entwickelt und getestet, $I_c \geq$ erwartet, Beitrag bei EuCAS 2013

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Weiteres Vorgehen

Nächste Schritte:

- Fertigstellung von Konstruktions- und Fertigungszeichnungen
- Einholen von Angeboten für die Teststandkomponenten
- Entwicklung einer großen 2G-Roebelleiterwicklung (1,5 m x 0,9 m), die für den Rotationsbetrieb im Teststand geeignet ist
- Vortest der Hochstromspule in fl. N_2 (bei T=77K)
- Bau des Spinbunkers und Vorbereitung der Infrastruktur am KIT
- Aufbau des Teststands und Experimente in Folgevorhaben

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Teststand für Technologien eines HTS-Kraftwerksgenerators

Herzlicher Dank gilt:

- dem BMWi für die Förderung unter FKZ 03ET1008B

- unserem Kooperationspartner KIT (ITEP)

- den Projektmitarbeitern: O.Batz, D. Bayer, K. Dennerlein, M. Frank, P. van Haßelt, W. Herkert, A. Kuhnert, W. Nick, M. Oomen

und

- **Ihnen für die Aufmerksamkeit!**

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved

Teststand für Technologien eines HTS-Kraftwerksgenerators

Kontaktadresse

Dr. Peter Kummeth
Projektleiter
CT RTC PET SUC-DE

Günther-Scharowsky-Str. 1
91058 Erlangen

Phone: +49 (9131) 7 34254
Fax: +49 (9131) 7 33323
Mobile: +49 (172) 48 25 57 7

E-mail:
peter.kummeth@siemens.com

siemens.com/innovation

Restricted © Siemens AG 2014. All rights reserved