

Speedy_HTS: Ein Windkraftgenerator mit supraleitendem Rotor

Dr. Robin Köster, Prof. Dr. habil. Dr. h.c. Andreas Binder, Prof. Dr. Yves Burkhardt,
Dr. Roland Zeichfuß, Dr. Andreas Jöckel,
Prof. Dr. Tabea Arndt, Dr. Marion Kläser, Matthias Eisele,
Nick Thönelt, Prof. Dr. Marc Hiller,
Joachim Krämer

ZIEHL X
16.04.2026
Berlin

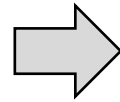


Motivation: Prognose Windkraft

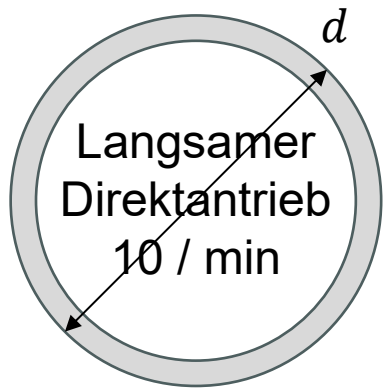
“Annual offshore wind installations are

(Prognose des Global Wind Energy Council 2024)

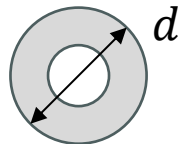
- expected to triple in 2027 (compared to 2024)
- and then sail past the milestones of 30 GW in 2030.”



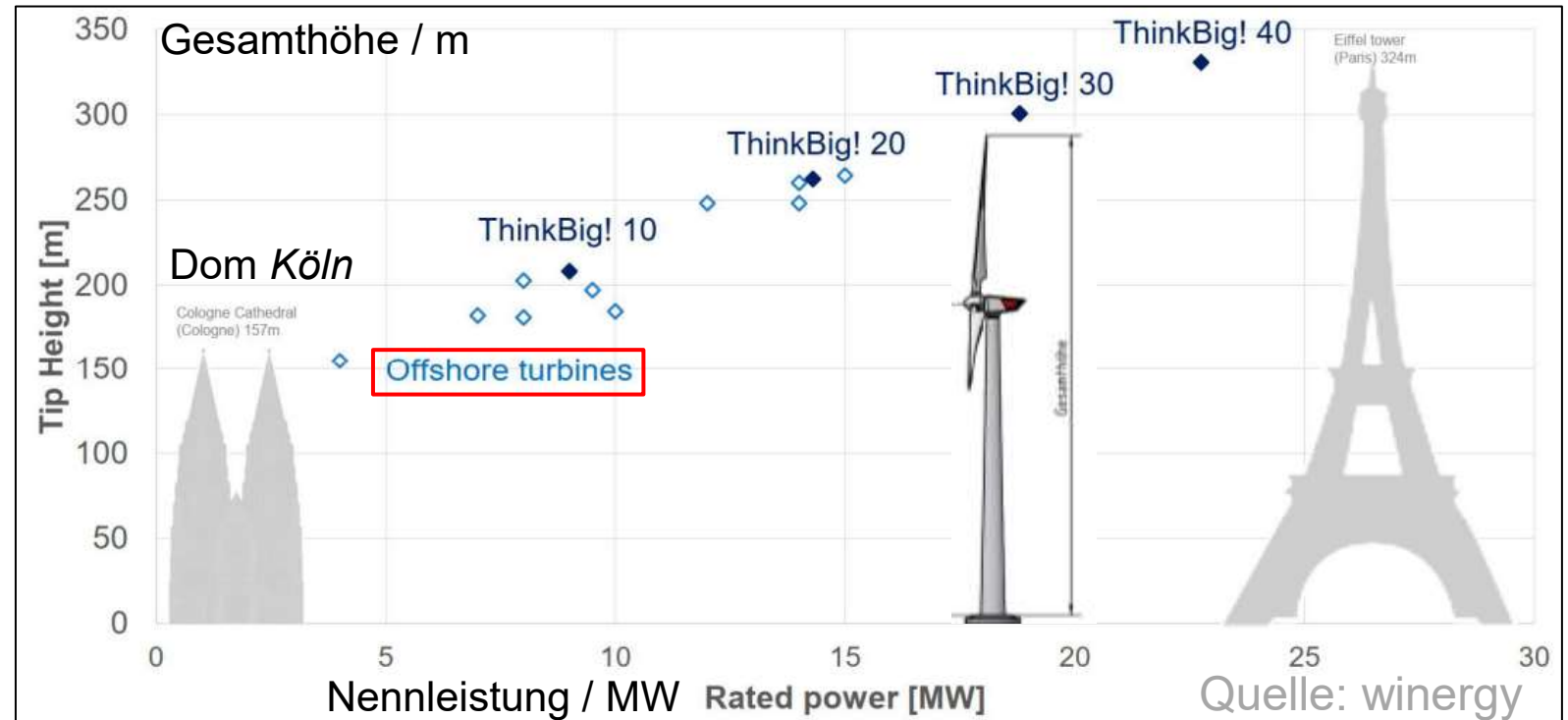
Ressourcen-effizient skalierbare Turbinenkonzepte erforderlich



Mittelschnell drehender Getriebegenerator 600 / min



Gleiche Generatorleistung



Projektvorstellung: Umfang und Ziele

Speedy_HTS: Mittelschnell-drehender Getriebegenerator für (On-) und Offshore-Windkraft mit HTS-Rotor

- 1) Mit existierendem, **Kupfer-Hochstrom-Stator**: Auslegung des HTS-Rotors in Originalgröße
- 2) Konstruktion und Fertigung des HTS-Rotors
- 3) Generatorvermessung und Charakterisierung im Prüffeld

Anspruch und Projektziel:



Anknüpfungspunkte an bestehende Arbeiten und Projekte zu HTS-Windgeneratoren

Zusätzlich zu berücksichtigende wirtschaftliche Randbedingungen



Quelle: winergy

HTS:
Hochtemperatur-
Supraleiter

Projektvorstellung: Innovationen und Zeitplan

HTS: Hochtemperatur-Supraleiter, NI: non insulated

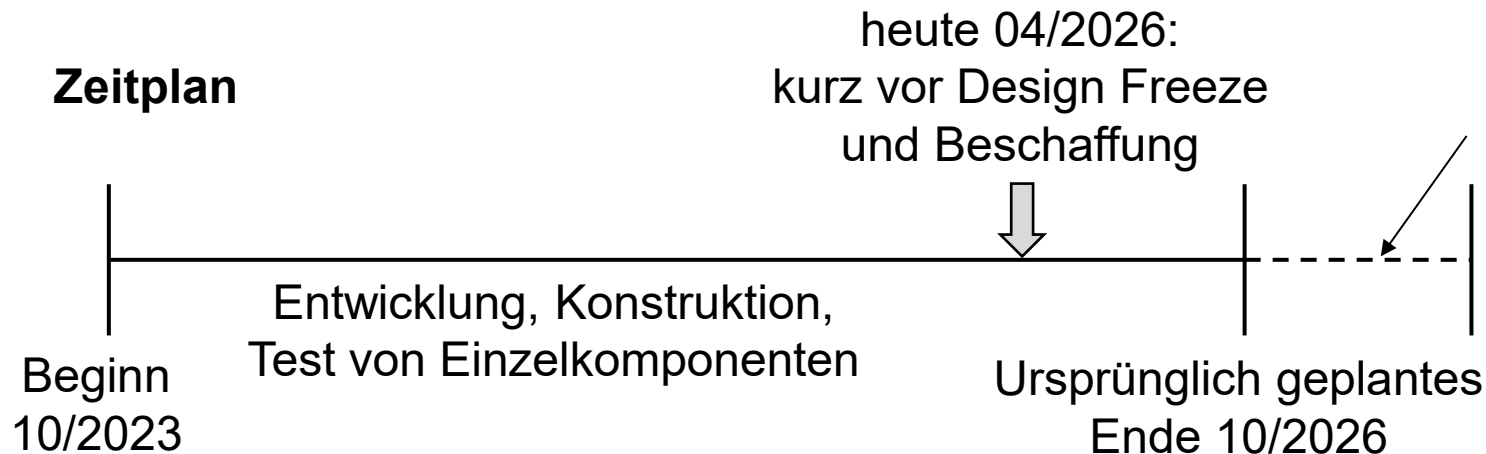
Einordnung der technischen Projektziele:

- **Leistungsdichterekord** eines Windgenerators: Nennleistung / Masse ≈ 1.23 kW/kg
- Erster 13 MW-Windgenerator mit **Leistungsfaktor 1** für minimale Umrichtergröße
- Weltweit erster **mittelschnell** (600 rpm) drehender **HTS-Windgenerator**
- Erster HTS-Windgenerator mit **NI-HTS-Spulen**
- Erster HTS-Windgenerator mit **stationären Kryo-Kühlern**

Innovationen
Windkraft

Innovationen
HTS-Anwendung

Zeitplan

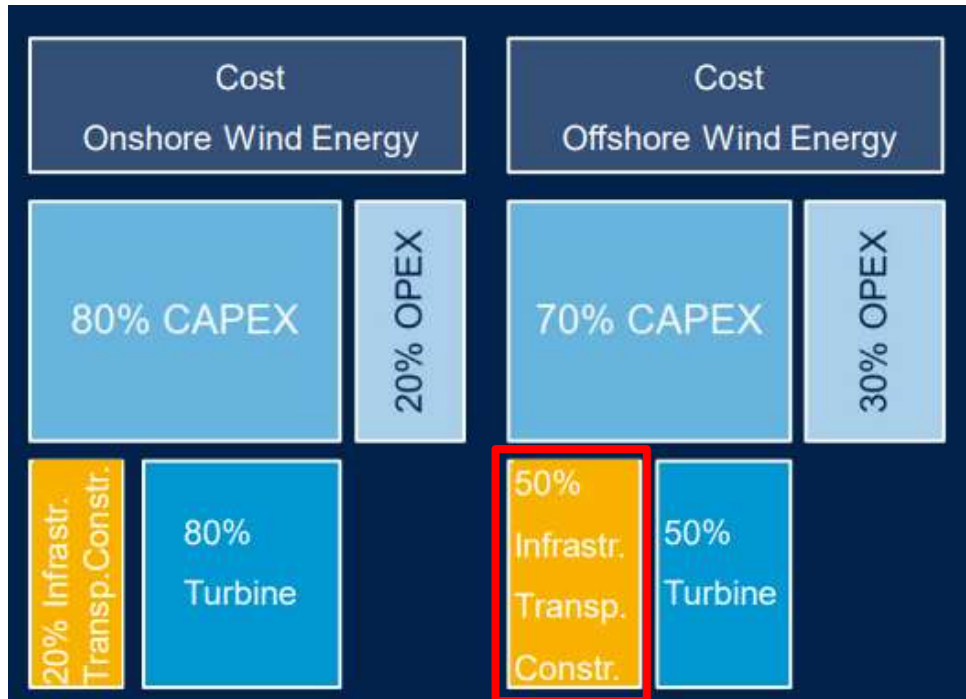


Förderung durch:



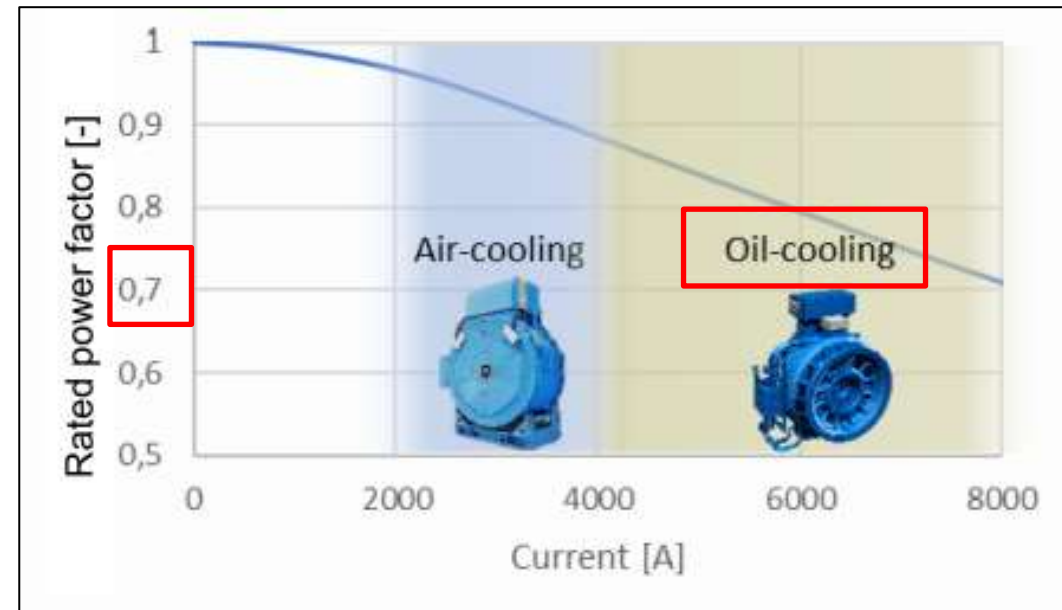
FKZ: 03EE3094

Einordnung HTS-Mid-Speed-Generator: Kostenstruktur Windkraftanlagen, Erhöhung der Einheitsleistung



- Verringern der Anzahl an Turbinen und Fundamente!
- Erhöhen der Leistung der Windturbinen!

Lösungsansatz 1 („konventionell“ = normalleitend):
Permanentmagnet-Rotor + Kupfer-Hochstromstator



- Rotorfeld ist fest (zeitlich konstant)
- $\cos \varphi$ (sehr) niedrig $\rightarrow S_N$ des Umrichters sehr hoch
- $I_S^2 R$ (sehr) hoch \rightarrow Wirkungsgrad reduziert

Quelle: winergy

Einordnung HTS-Mid-Speed-Generator: HTS-Rotor als Enabler höchster Windgeneratorleistungen

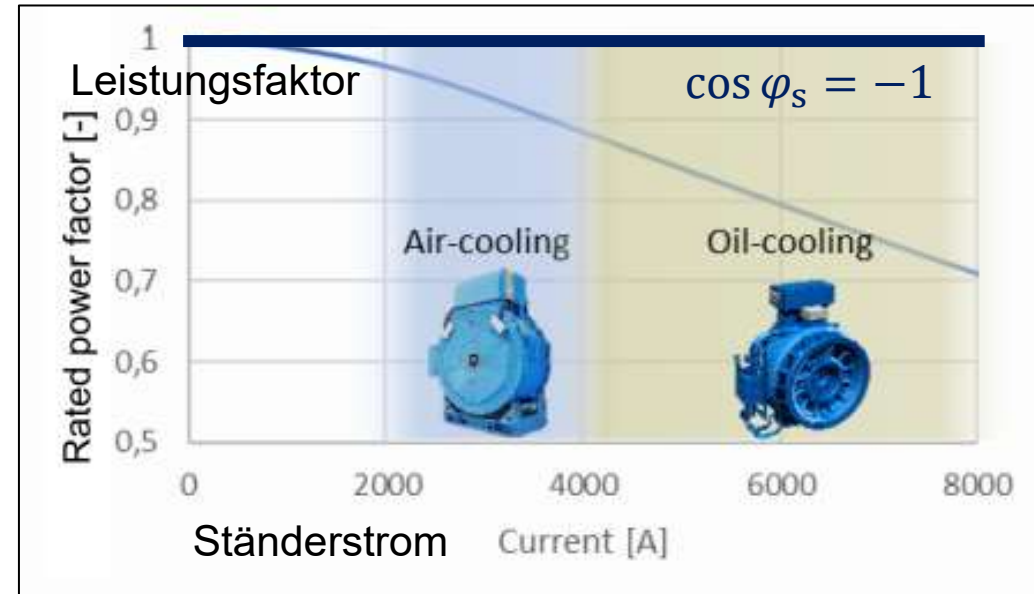
Lösungsansatz 2.0 (Speedy_HTS):

HTS-Rotor + Kupfer-Hochstromstator (vorhanden, ölgekühlt)
+ **Vollumrichter** zur Statorspeisung

- Rotorfeld verlustfrei einstellbar
 - o Freiheitsgrad für wirkungsgradoptimalen Betrieb
 - o Generator-Leistungsfaktor $\cos \varphi_s = -1$ im Nennpunkt
 - minimale Umrichter-Bemessungsscheinleistung
 - Ständer: nur Wirkstrom, reduzierte $I_s^2 R$ -Verluste
- Abgabeleistung stark erhöht (bei gleichen Abmessungen):
gravimetrische (P/m) und volumetrische (P/V) Leistungsdichte ↑

$$\text{Strombelag, Ständerbohrung: } A_s \approx 2247 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$\text{Elektromagnetische Ausnutzung (Nennpunkt): } 31.43 \frac{\text{kVA} \cdot \text{min}}{\text{m}^3}$$



Ähnliches Maschinen-Konzept:

Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor

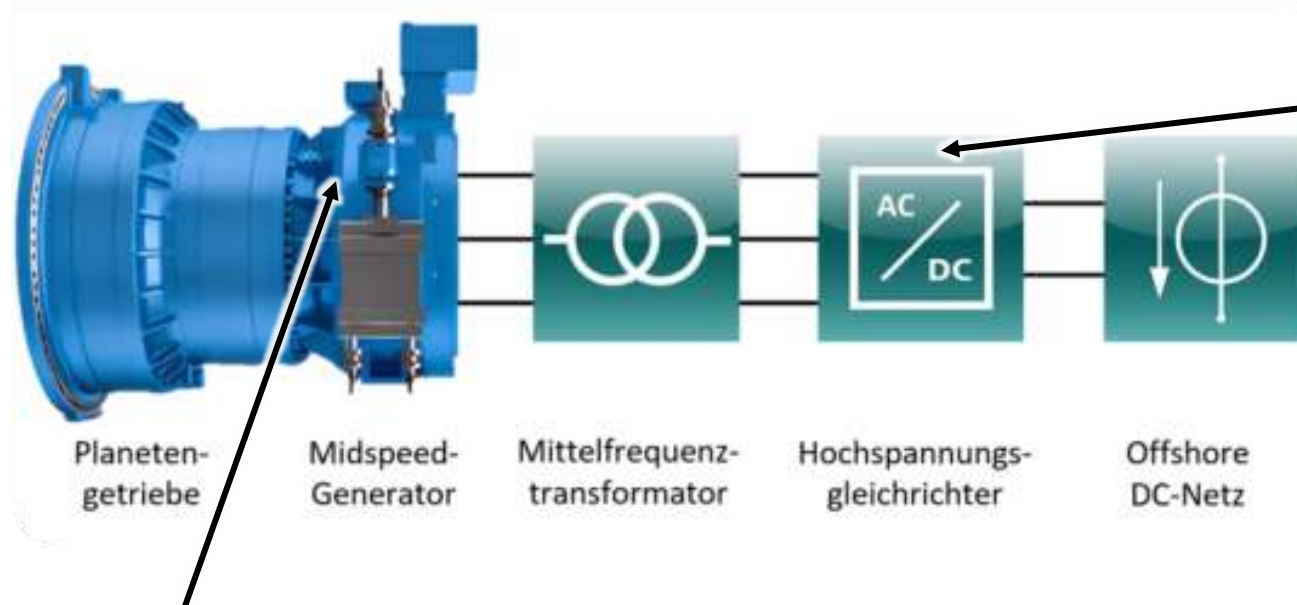
Bruce Gamble, Member IEEE, Georg Snitchler, Member IEEE, and Tim MacDonald, Member IEEE



Einordnung HTS-Mid-Speed-Generator: HTS-Rotor erhöht Flexibilität bei Netzanschlusstopologie

Lösungsansatz 2.1 (Speedy_HTS):

HTS-Rotor + Hochstromstator (normalleitend, ölgekühlt) + **Diodengleichrichter** für Netzanschluss



(passiver) Diodengleichrichter
vielfach günstiger als
Vollumrichter für AC-Netzanschluss

Generator-Spannung kann nachgeführt werden über
verlustarm variable HTS-Erregung des Rotormagnetfelds

Herausforderungen:

- 1) Erhöhte Stator-Strom-Oberschwingungen:
 - a) Mehr Zusatzverluste
 - b) Geräuschanregungen
- 2) Zeitkonstanten Erregervariation (NI-Spulen)

Abbildungs-Quelle: *winergy* + N. Thönel (KIT ETI)

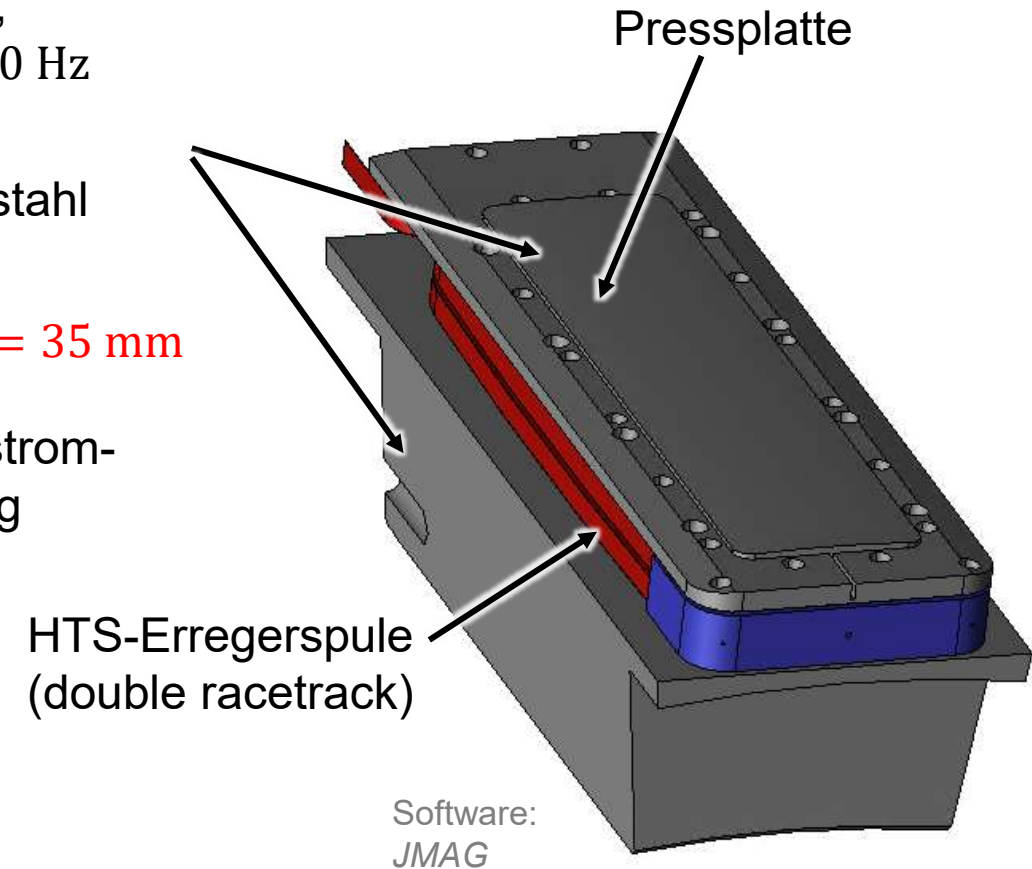
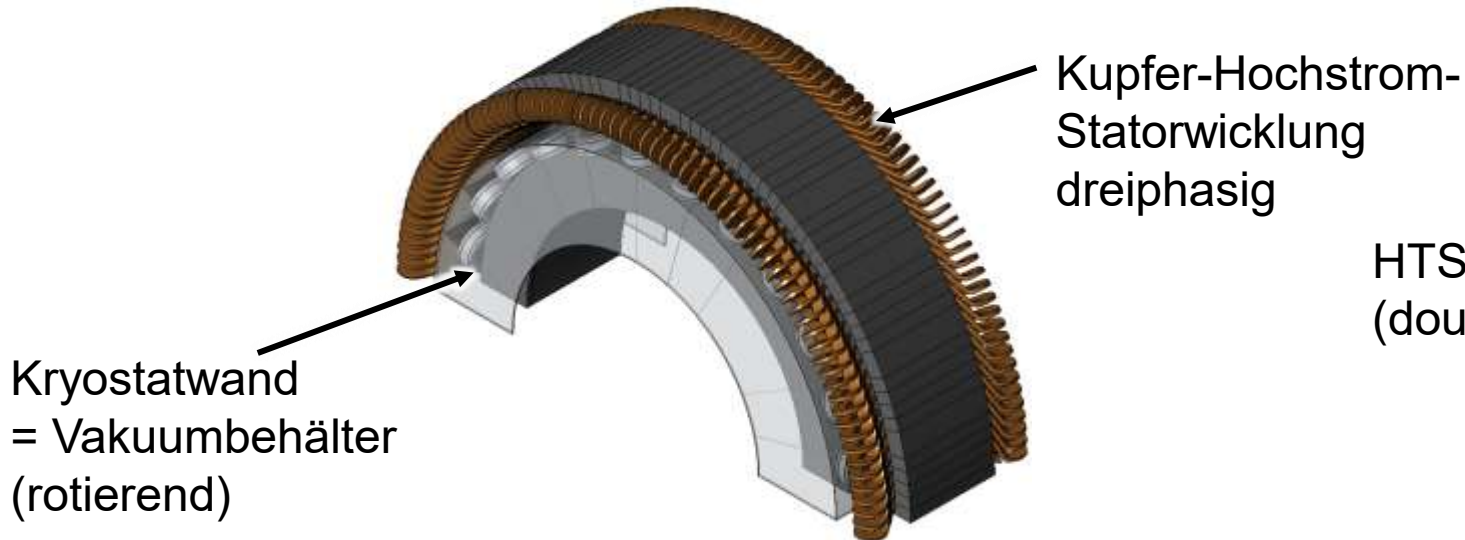
Generatorkonzept: Topologie, Nenndaten, Abmessungen

Kenndaten: Nennleistung $P_{el,N} = -13 \text{ MW}$, Nenndrehzahl $n_N = 600 \text{ /min}$ (3-stufiges Getriebe),
Nennspannung/-Strom $U_N = 750 \text{ V}$, $I_{sN} = 10 \text{ kA}$,
 $\cos \varphi_{sN} = -1$, $2p = 24$, Statorfrequenz $f_{sN} = 120 \text{ Hz}$

Topologie:

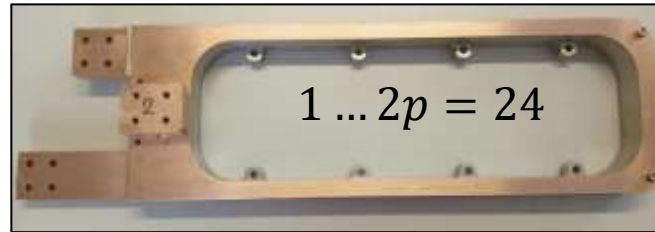
- 1) „warmer“ Stator mit Kupfer-Ständerwicklung
- 2) „kalter“ Rotor mit Joch und Polkern aus Kryostahl
- 3) eine rotierende Vakuumkammer als Kryostat

Geometrie: Außendurchmesser $d_{so} \approx 1.8 \text{ m}$, $l_{Fe} \approx 0.3 \text{ m}$, $\delta = 35 \text{ mm}$



Generatorkonzept: HTS-Spulen und Kühlkonzept

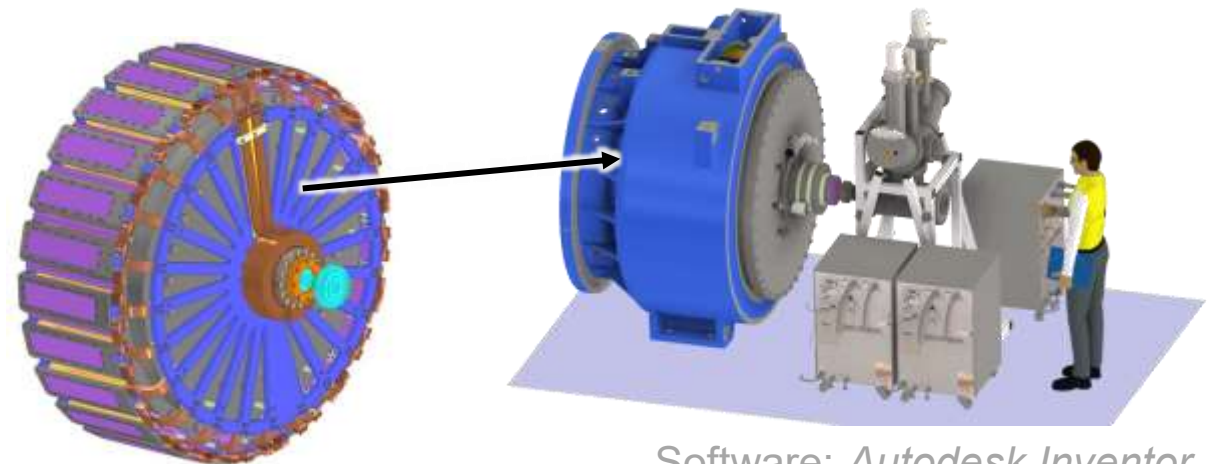
HTS- Erregerspule



- Double-racetrack-Spule mit Lagenüberstieg („window frame“)
- Nicht-isolierte (NI-) Spulen ohne zusätzlichen, aktiven Quench-Schutz, vakuumimprägniert
- Auslegung: $I_{fN} \approx 1 \text{ kA}$ bei $B_{\perp} \approx 2 \dots 2.5 \text{ T}$, $T = 30 \text{ K}$
→ für $\cos \varphi_s = -1$ @ $I_s = 10 \text{ kA}$ und $P = -13 \text{ MW}$
- Gesamtbedarf HTS-Band: „nur“ ca. 2 km für den 13 MW-Generator (!)
- Probespulen mit HTS-Band von *Fujikura* (EuBCO)

Kryogene Rotorkühlung ($T = 30 \text{ K}$)

- Neon-Thermosiphon-Kühlung, zentraler Wärmetauscher (Raumkonflikt mit Pitchrohr – gelöst)
- Kupfer-Kühlstern + Kühlbleche (Wärmeleitung)
- Nur ein Kryokühler in Produkt / Serie



Aktueller Stand: Tests von Einzelkomponenten – Rotor-Eisenkern

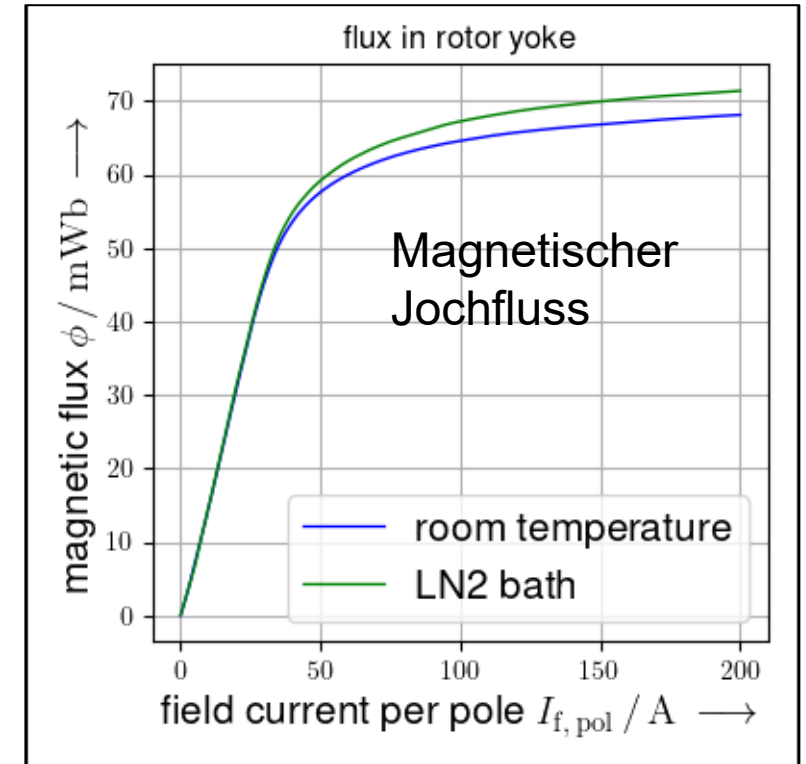
Magnetische Charakterisierung Kryostahl-Rotor



Zweipolige Motorette
mit Kupfer-Polspulen
an TU Darmstadt / EAS



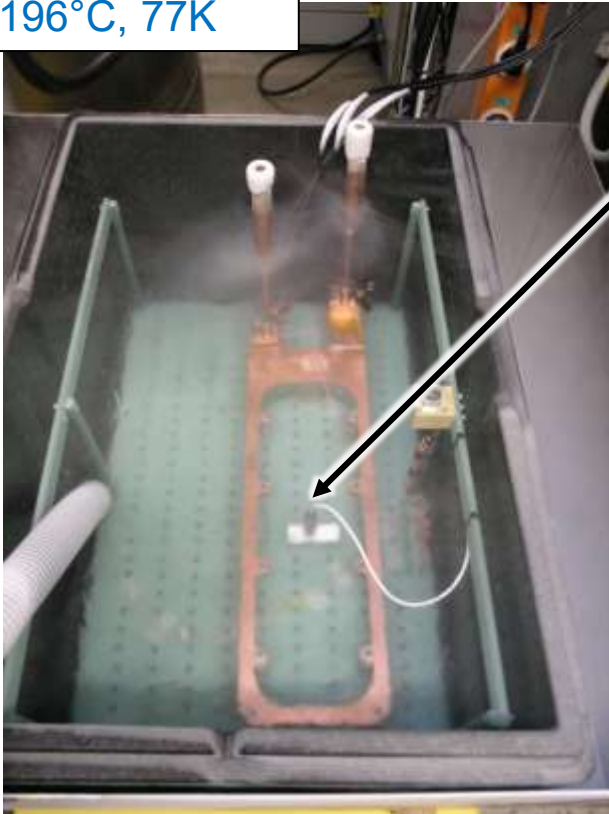
-196°C, 77K



Aktueller Stand: Tests von Einzelkomponenten – Rotor-Testspulen

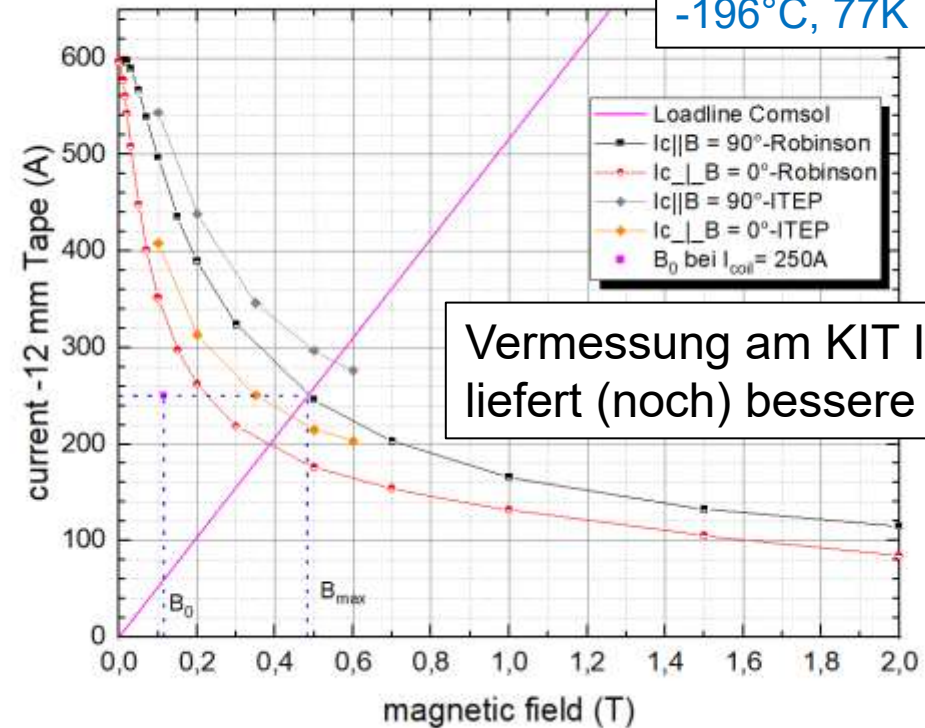
Elektrische Charakterisierung NI-HTS-Spulen

-196°C, 77K



Hall-Sensor

Vermessung
am KIT ITEP
als Luftspule
in LN2-Bad



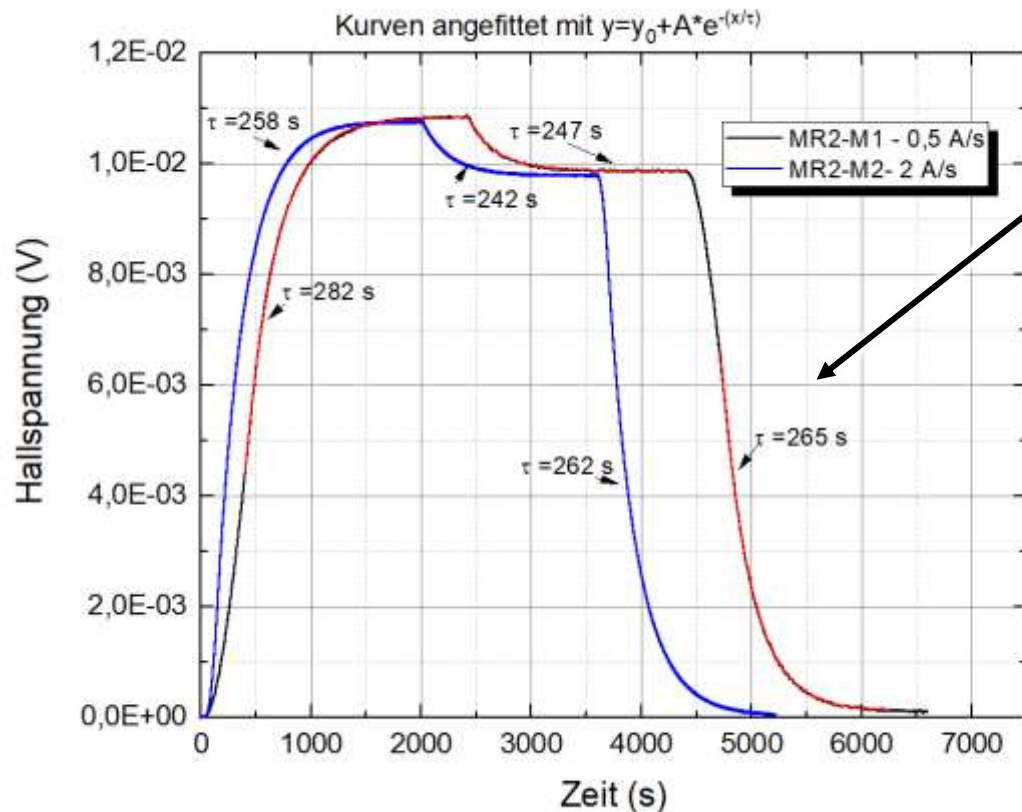
-196°C, 77K

Auslegungspunkt: $I \approx 1 \text{ kA} @ B_{\perp} \approx 2.5 \text{ T}, T = 30 \text{ K}$

HTS: Hochtemperatur-Supraleiter, NI: non insulated

Aktueller Stand: Tests von Einzelkomponenten – Rotor-Testspulen

Elektrische Charakterisierung NI-HTS-Spulen



Fits mit Zeitkonstanten

$\tau = 250 \dots 300 \text{ s}$ (magnetisch in Luft)

→ relevant für Leistungsvariation bei Betrieb am passiven Diodengleichrichter ständerseitig

→ erzielbare Leistungsrampen dP/dt der Windturbine

HTS: Hochtemperatur-Supraleiter, NI: non insulated

Hauptziel: Vermessung auf dem Prüfstand

Geplante Vermessung auf dem Prüfstand umfasst u.a.:

- Lastpunkte bis 4 MW, 600 /min am Vollumrichter
- Motorischer und generatorischer Leerlauf
- Stoßkurzschlüsse, Dauerkurzschlüsse
- Regulierkurven, Bohrungsfeldmessung
- Ggf. Vermessung bis 1 MW am Diodengleichrichter
- Kühlkapazität im Prüfstandsbetrieb:
4 Kälteköpfe, jeweils mit >130 W Kapazität bei 27K

Leerlaufmessung an einem
konventionellen Getriebegenerator



Quelle: *winergy*

HTS-Rotorüberwachung: Telemetrie-System in Entwicklung am KIT ITEP

Wrap up: Warum der HTS-Rotor?

- **Leistungssteigerung** von 6 MW auf 13 MW bei gleichen Abmessungen (+116% !)
- Leistungsfaktor 1 im Nennpunkt erlaubt minimale **Umrichtergröße**
- Ökonomischer Einsatz von HTS-Bandleiter im kleineren Generator durch mittelschnell drehende Getriebetopologie

- **Massive Reduktion des Bedarfs an “Seltenen Erden (RE)”**:



PM: Permanentmagnete

Quelle: *winergy*

- 13 MW **PM-Direktantrieb**: PM-Bedarf ca. 0.5 t / MW → 6.5 t NdFeB-Magnete, **>1.9 t RE**
- 13 MW **PM-Getriebegenerator**: PM-Bedarf ca. 50 kg / MW → 650 kg NdFeB-Magnete, **>190 kg RE**
- 13 MW **HTS-Getriebegenerator**: HTS-Bedarf ca. 2 km → **< 40 g RE**

- Nachteile: a) Höhere technische Komplexität, b) derzeit noch höherer Entwicklungsaufwand

Zusammenfassung

- **Speedy_HTS**: BMWI-gefördertes Projekt zu Entwicklung, Aufbau und Vermessung eines HTS-Getriebe-Windgenerators (Originalgröße)
- Abgeschlossen:
 - Elektromagnetische **Auslegung**, detaillierte Verlustberechnungen
 - **HTS-Wicklungsauslegung**, thermische Berechnungen des Kryo-Aufbaus
 - Grobdesign und –Konstruktion, **mech. Berechnungen**
- Aktueller Stand:
 - Finalisierung der **Konstruktion**
 - Anstoßen der **Beschaffungsprozesse**
 - Parallel: Aufbau von Einzelkomponenten

Ziel in 2027: Generatorvermessung auf dem Prüfstand

Speedy_HTS: Mid-Speed-Getriebe-Synchrongenerator mit Hochtemperatur-Supraleiterwicklung

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Speedy_HTS-Team:



Dr. Andreas Jöckel
Dr. Roland Zeichfüßl



Prof. Tabea Arndt
Dr. Marion Kläser
Matthias Eisele

Prof. Marc Hiller
Nick Thönelt



Joachim Krämer



Prof. Yves Burkhardt
Prof. Andreas Binder
Dr. Robin Köster
Laurenz Ziegler