

# **ENTWICKLUNG UND INBETRIEBNAHME DER ANTRIEBSTECHNIK FÜR DEN EINZELRAD-DIREKTANTRIEB DES NEXT GENERATION TRAIN**

Christian Weber



# Leitkonzept Next Generation Train

Beteiligung von 11 DLR Instituten

## Hochgeschwindigkeitszüge

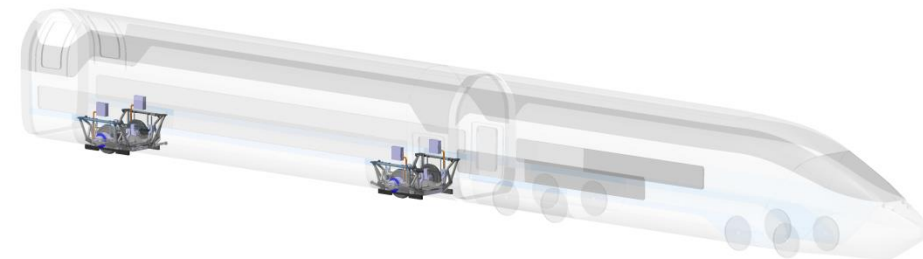
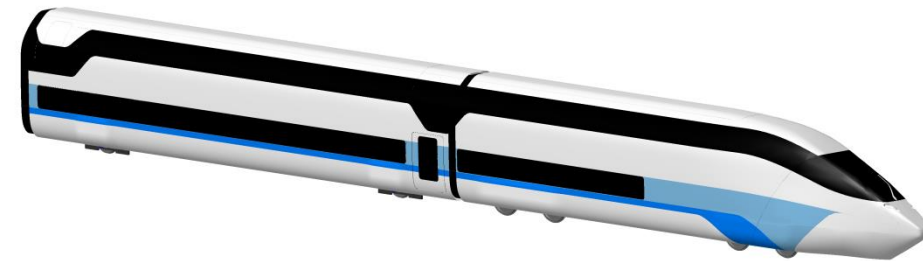
- Max. 400 km/h in Betrieb

## Doppelstock-Bauweise

- + 50% Sitzplätze / Länge
- - 50% Energieverbrauch / Sitzplatz
- - 45% Masse / Sitzplatz

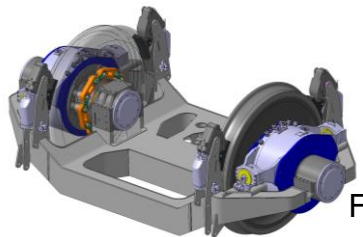
## Niederflurkonzept

- Keine Radsätze
- Sondern Einzelradfahrwerke

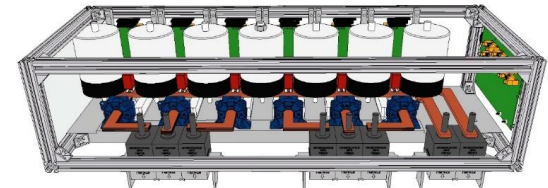


# NGT FuN Fahrwerksentwicklung

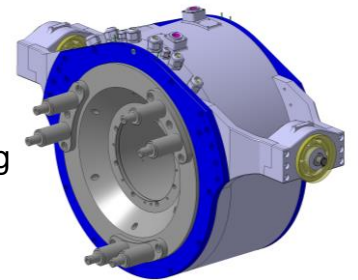
2 Institute  
an 3 Standorten



Stuttgart (FK)  
Fahrwerksentwicklung



Ilmenau (FK)  
Antriebsstrangentwicklung

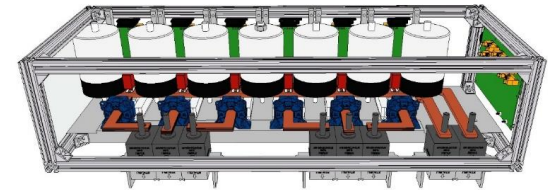


Oberpfaffenhofen (SR)  
Fahrwerksregelung

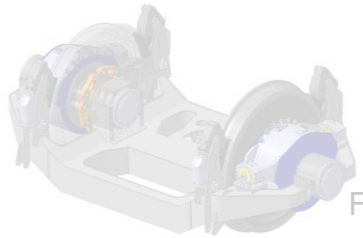
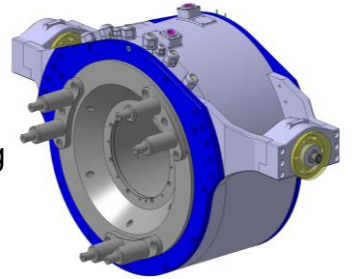


# NGT FuN Fahrwerksentwicklung

2 Institute  
an 3 Standorten

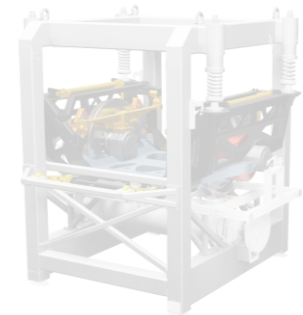


Ilmenau (FK)  
Antriebsstrangentwicklung

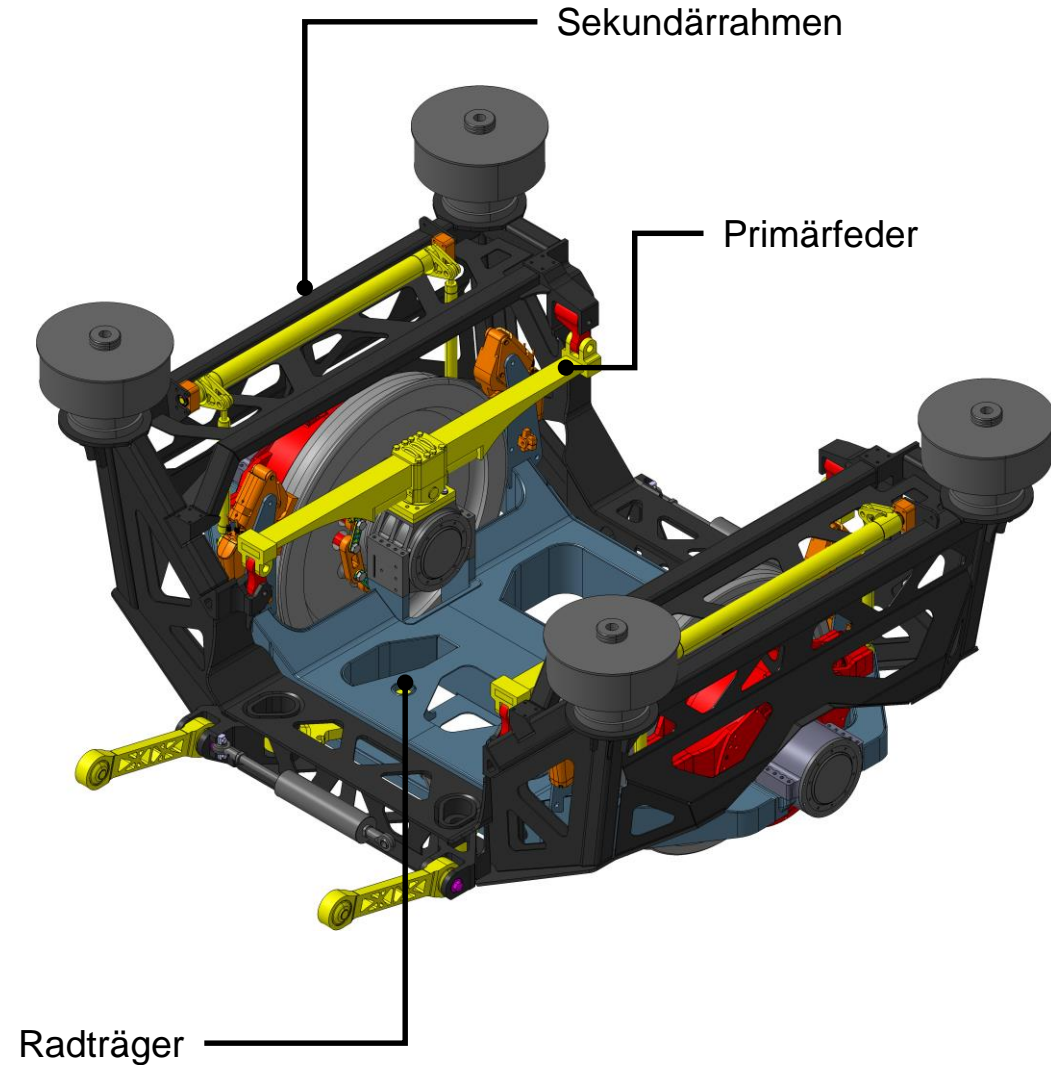


Stuttgart (FK)  
Fahrwerksentwicklung

Oberpfaffenhofen (SR)  
Fahrwerksregelung



# NGT HST Einzelrad-Einzelfahrfahrwerk



## **Mechatronische Spurführung**

- Verschleiß- und Lärmreduktion
- Fahrwerk als intelligenter Sensor und Aktor

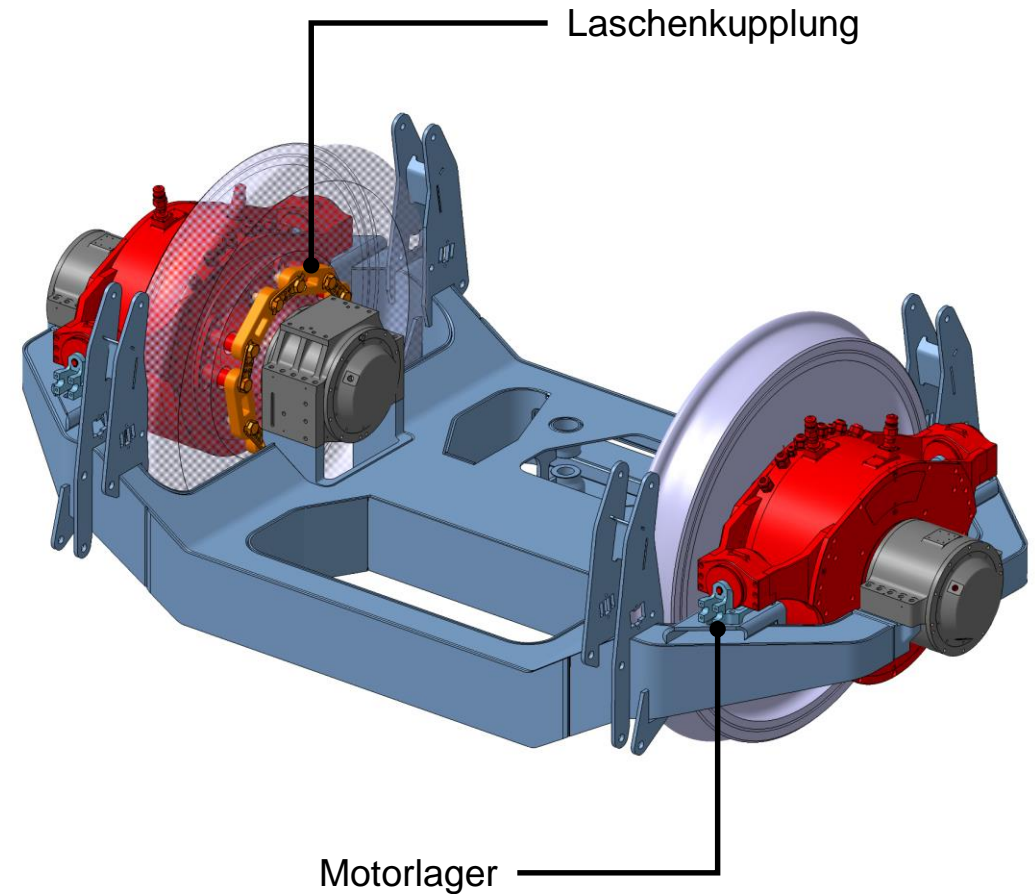
## **Leichtbauoptimierte Struktur**

- Höhere Nutzlast
- Reduzierter Energieverbrauch
- Niederflurdurchgang

# Motivation

## Antriebsstrang

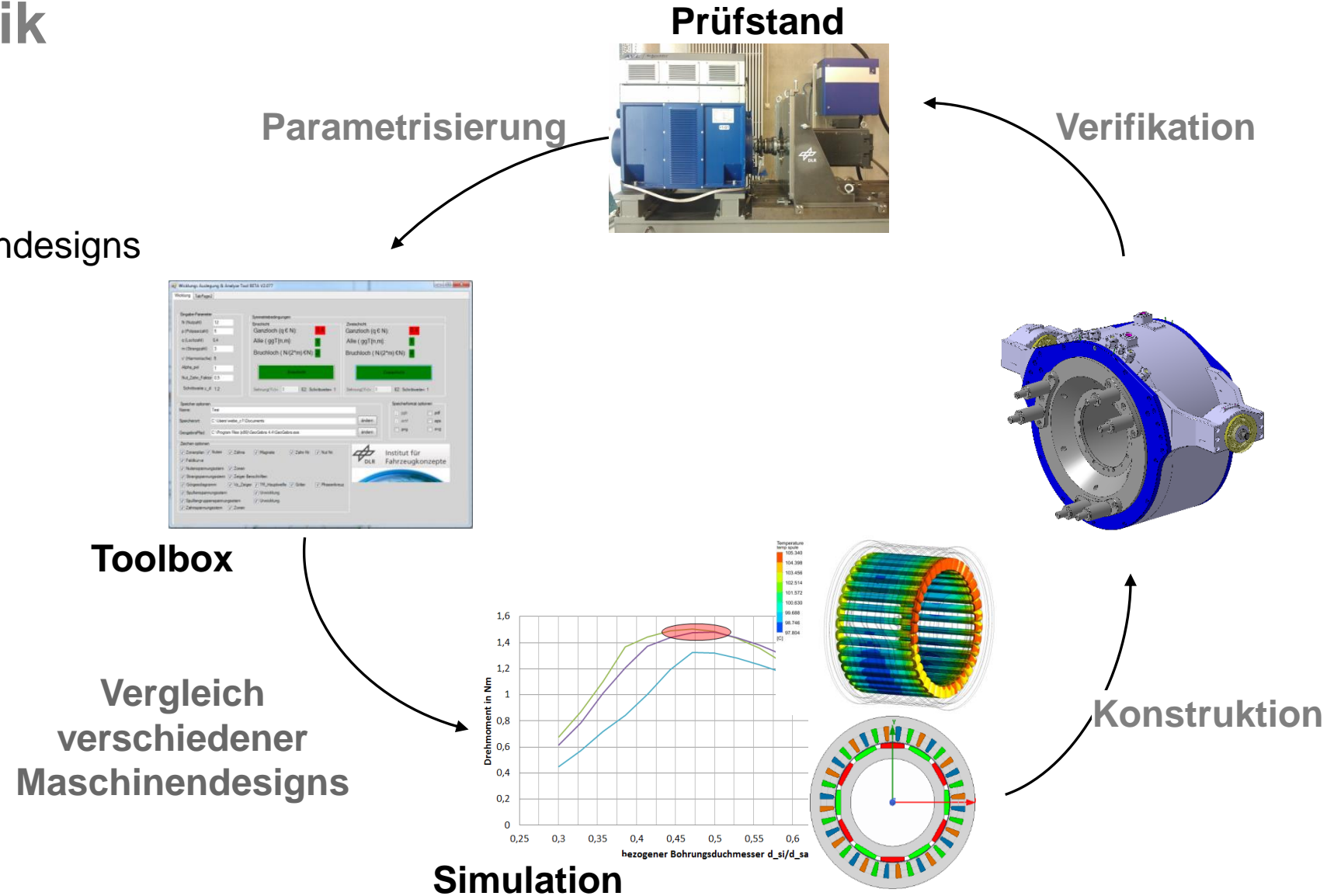
- Antriebsstrang für Niederflurkonzepte
  - Kompakte Bauweise
  - Hohe Leistungsdichte
- Energieeinsparung
  - Hohe Effizienz
- Mechatronische Längs- und Lateralregelungen
  - Hohe Dynamik
- Wartungsarm
  - Verzicht auf Getriebe



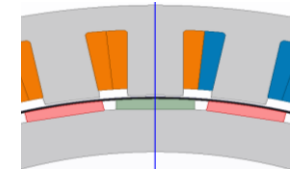
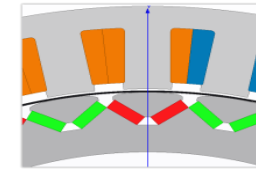
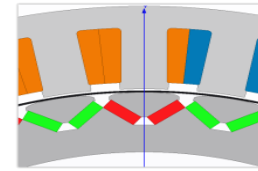
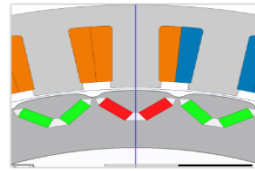


# Entwicklungsmethodik

- Toolbox für Elektrische Maschinendesigns
- Simulation (elektro-magnetisch, thermisch)
- Konstruktion und Fertigung
- Vermessung am Prüfstand

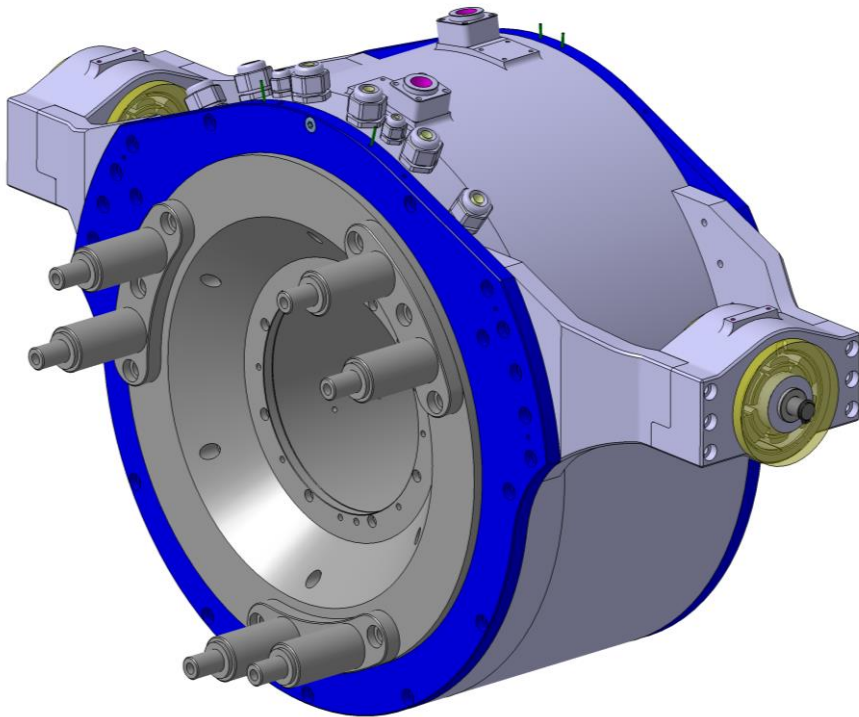


# Topologievergleich



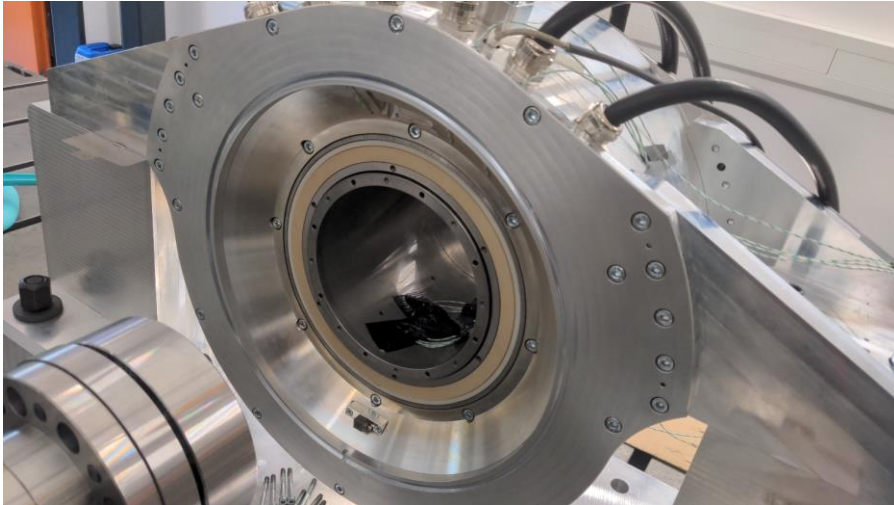
Type	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
	with bridge	without bridge	without bridge	---
slots/poles	36/32	36/32	36/32	36/32
stator steel	VACODUR 49	VACODUR 49	M250 A35	M250 A35
rotor steel	M250 A35	M250 A35	M250 A35	M250 A35
magnet material	N48H (1,32T)	N48H (1,32T)	N48H (1,32T)	N48H (1,32T)
magnet mounted	embedded	embedded	embedded	surface
relative mechanical power	1	1,15	0,89	1,06
efficiency (rated)	≈ 96%	≈ 96 %	≈ 97 %	≈ 97 %
costs	---	---	-	+
manufacturing	-	--	--	+





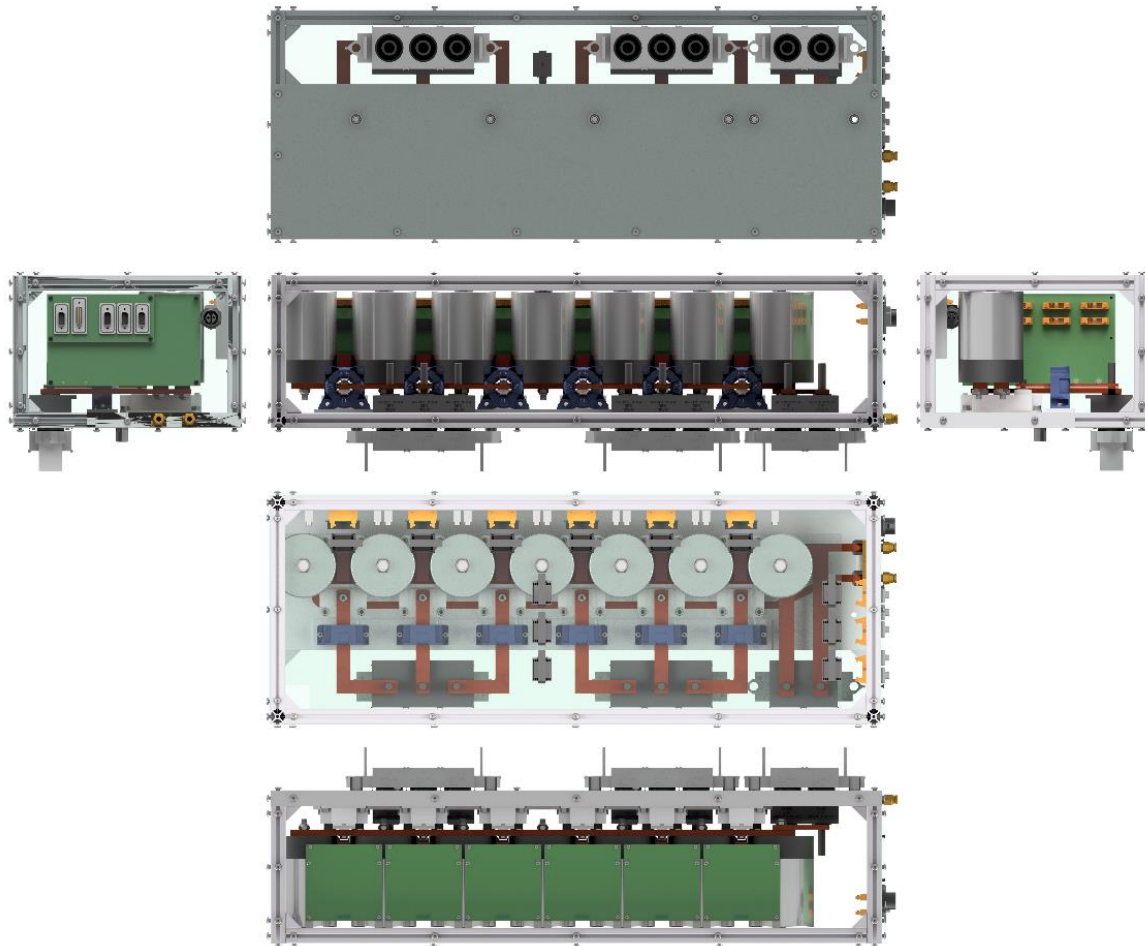
## Permanentmagnet Synchronmotor

Nutzahl	36
Polpaarzahl	16
Antriebsmoment	1700 Nm
Regelmoment	350 Nm
Maximaldrehzahl	2550 1/min
Zwischenkreisspannung	850 V
Kühlung	Wassermantelkühlung
Gewicht	245 kg



## Permanenterregter Synchronmotor

Nutzahl	36
Polpaarzahl	16
Antriebsmoment	1700 Nm
Regelmoment	350 Nm
Maximaldrehzahl	2550 1/min
Zwischenkreisspannung	850 V
Kühlung	Wassermantelkühlung
Gewicht	245 kg

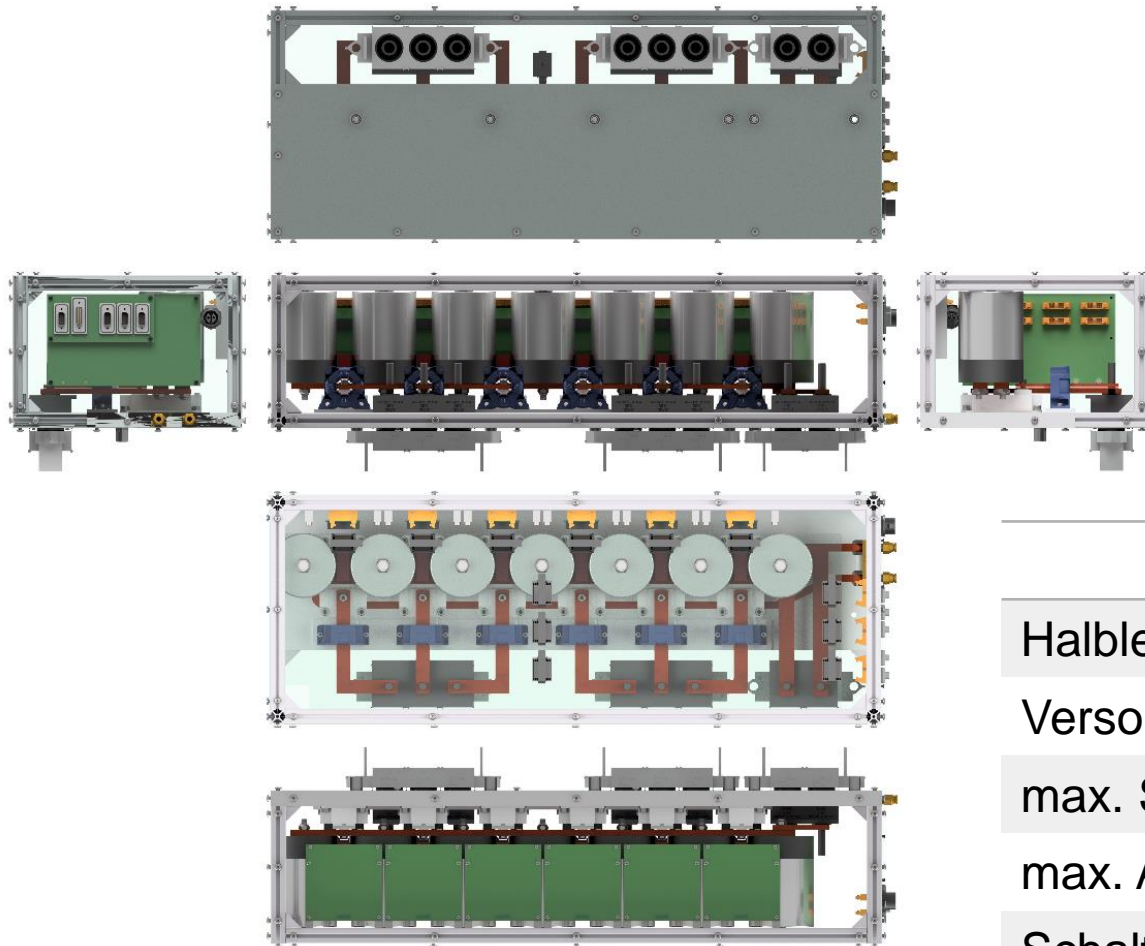


## Randbedingungen

- Hohe Statorfrequenzen der Maschine
- Aufgrund mechatronischer Spurführung erhöhte Anforderungen an Regeldynamik  
→ Notwendige Schaltfrequenz von 14 kHz

## Umsetzung

- Verwendung von SiC-Halbbrückenmodulen
- Parallelisierung zu 2x3-Phasensystemen
  - Leistungsbegrenzung der Halbbrückenmodule
  - Geringerer Querschnitt der Maschinenzuleitungen (50 mm<sup>2</sup>), somit geringere Verlegeradien möglich
  - Notlaufprogramm bei Ausfall eines Teilsystems möglich



## Technische Daten

Halbleitertechnologie	Voll-SiC-Module
Versorgungsspannung	Bis 850 V <sub>DC</sub>
max. Strangstrom	220 A <sub>eff</sub>
max. Abgabeleistung	320 kW
Schaltfrequenz	bis 100 kHz (14 kHz @ 320 kW)
Kühlung	wassergekühlt
Abmessungen	800 x 300 x 200 mm



## Besonderheiten des Forschungs-Wechselrichters

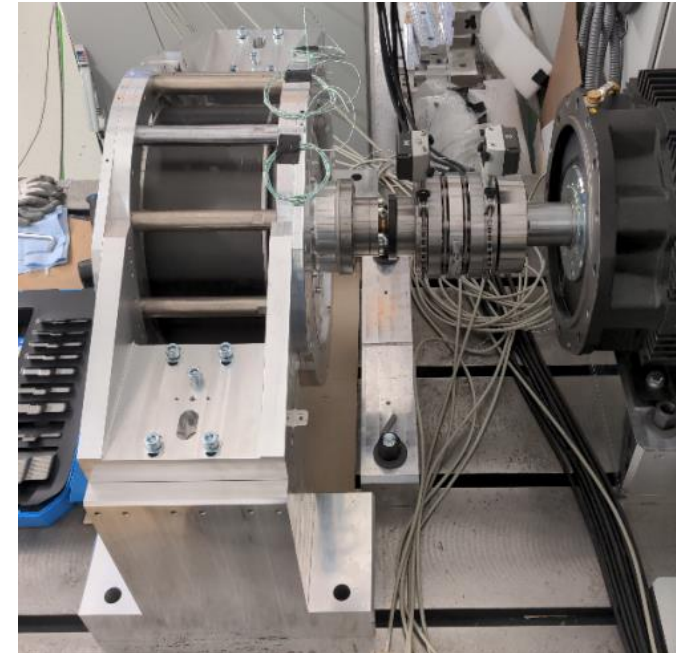
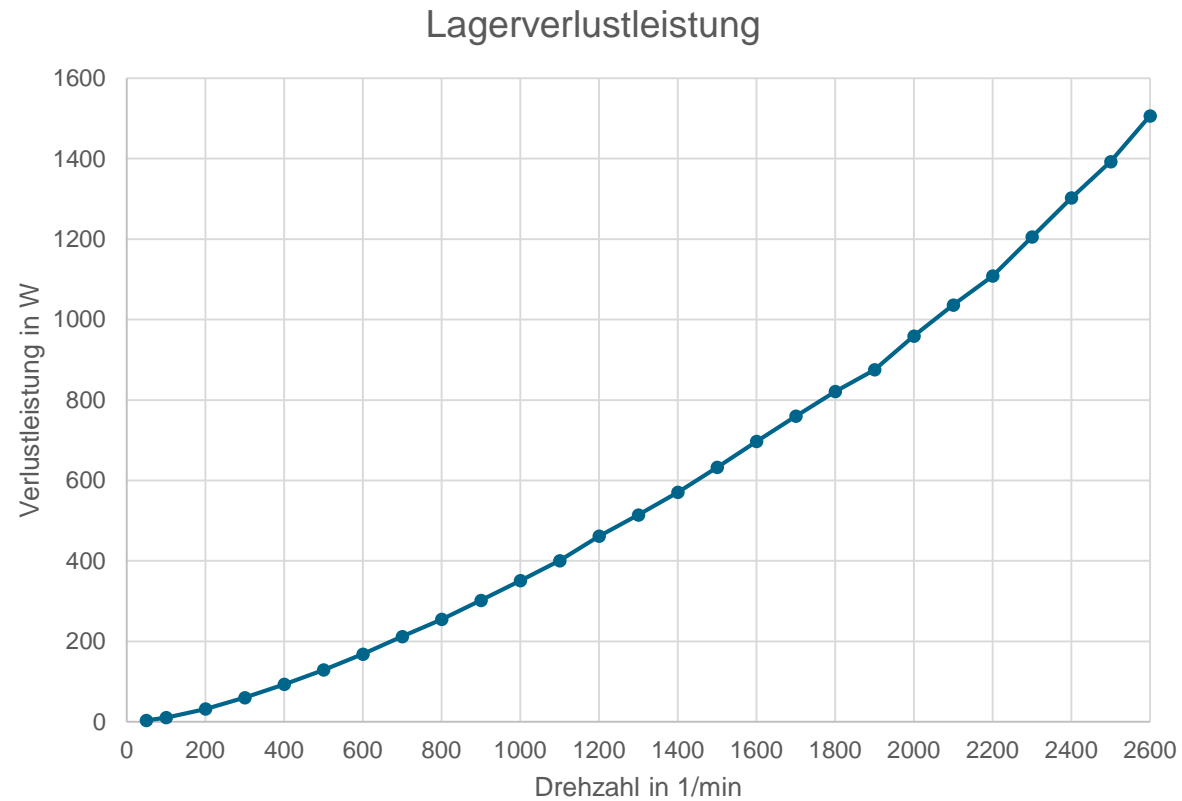
- Freie Programmierbarkeit
    - Spezielle Eigenschaften der Antriebsmaschine können im Regelalgorithmus berücksichtigt werden
    - Besondere Anforderungen seitens der Spurführregelung lassen sich im Entwicklungsprozess besser umsetzen
    - Untersuchung alternativer Betriebsmodi, bspw. sensorloser Betrieb
  - Anpassung der Hardware einfacher zu realisieren
    - Erweiterung Kommunikationsschnittstellen
    - Zusätzliche Sensorik gut nachrüstbar
- Ziel: Möglichst hohe Flexibilität im Forschungsprojekt



# Lagerverluste

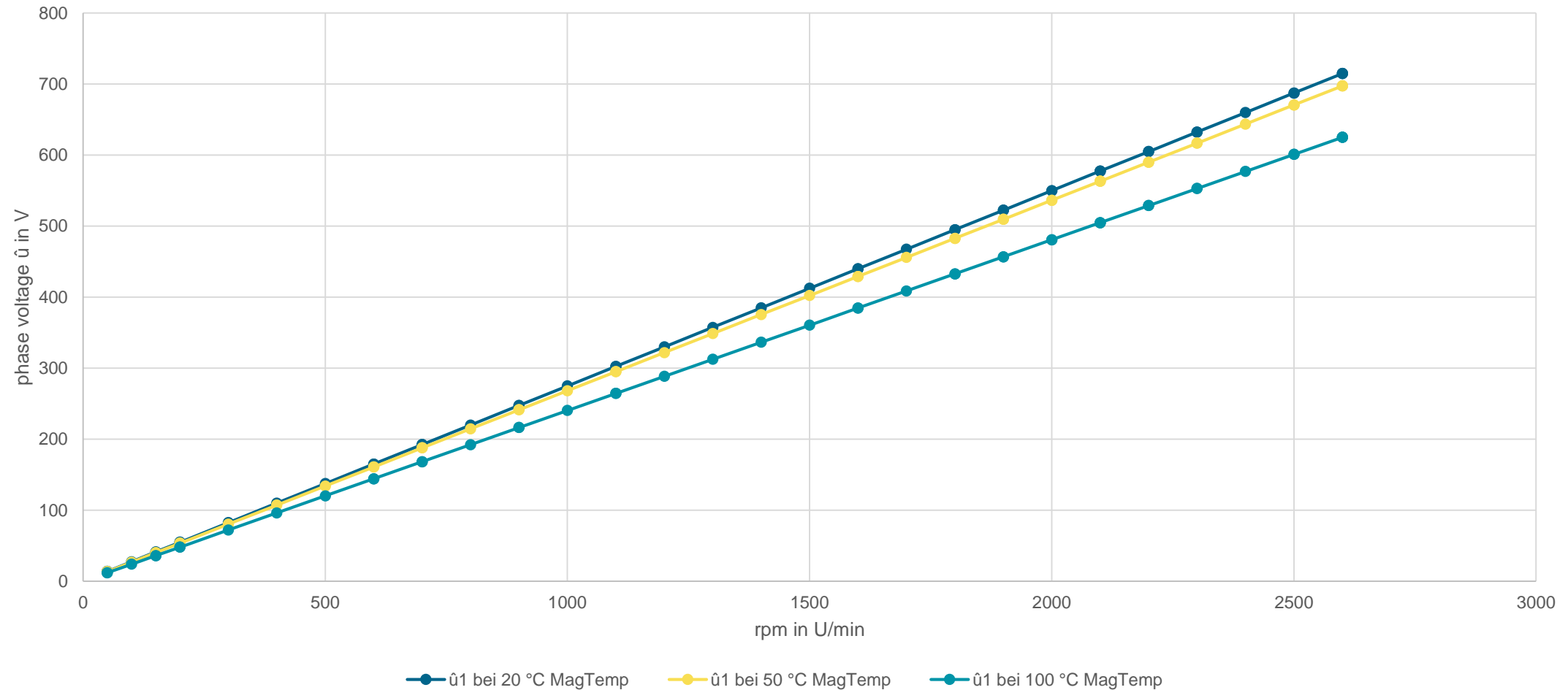
Vermessung der Lagerverluste im Leergehäuse

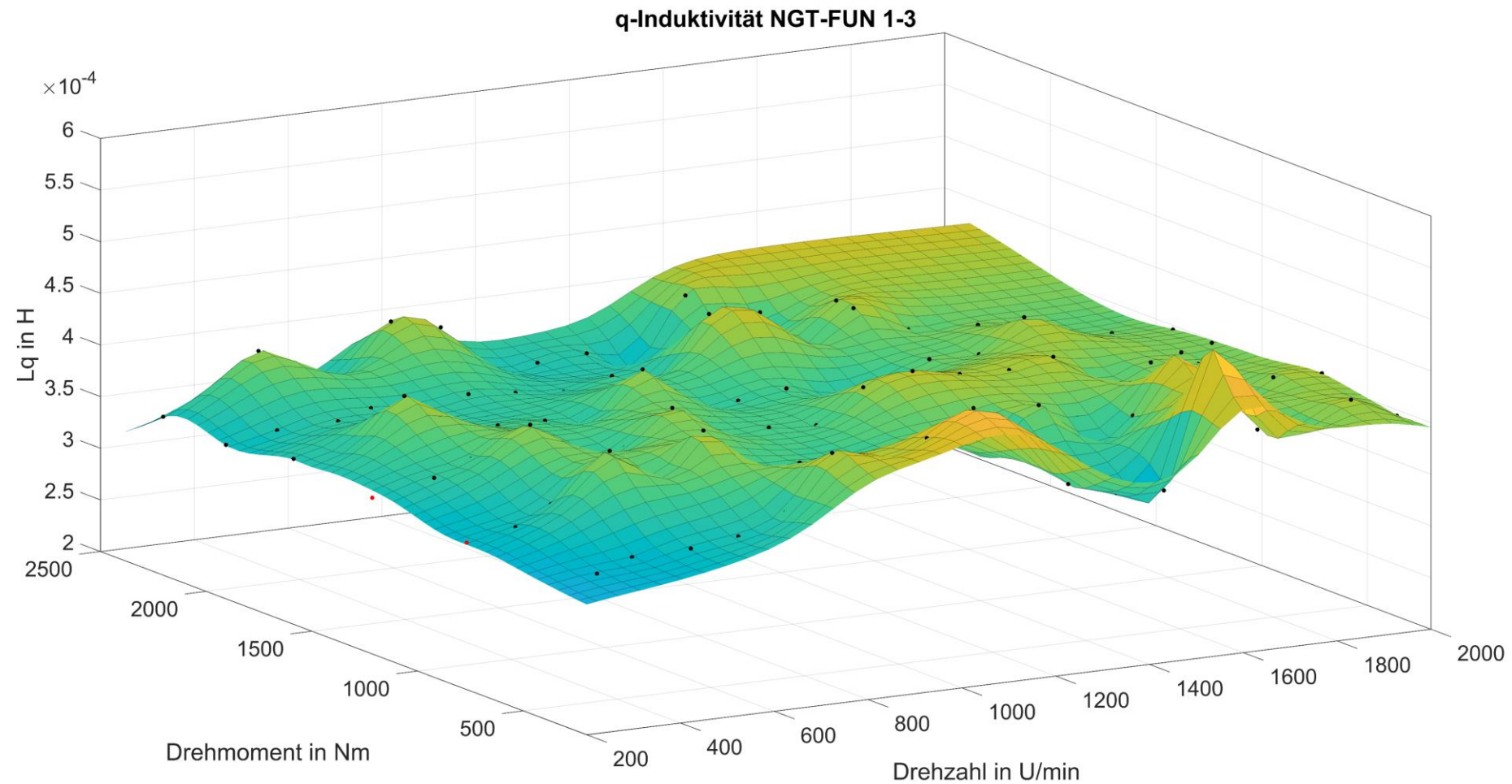
→ Keine weiteren Verlustquellen



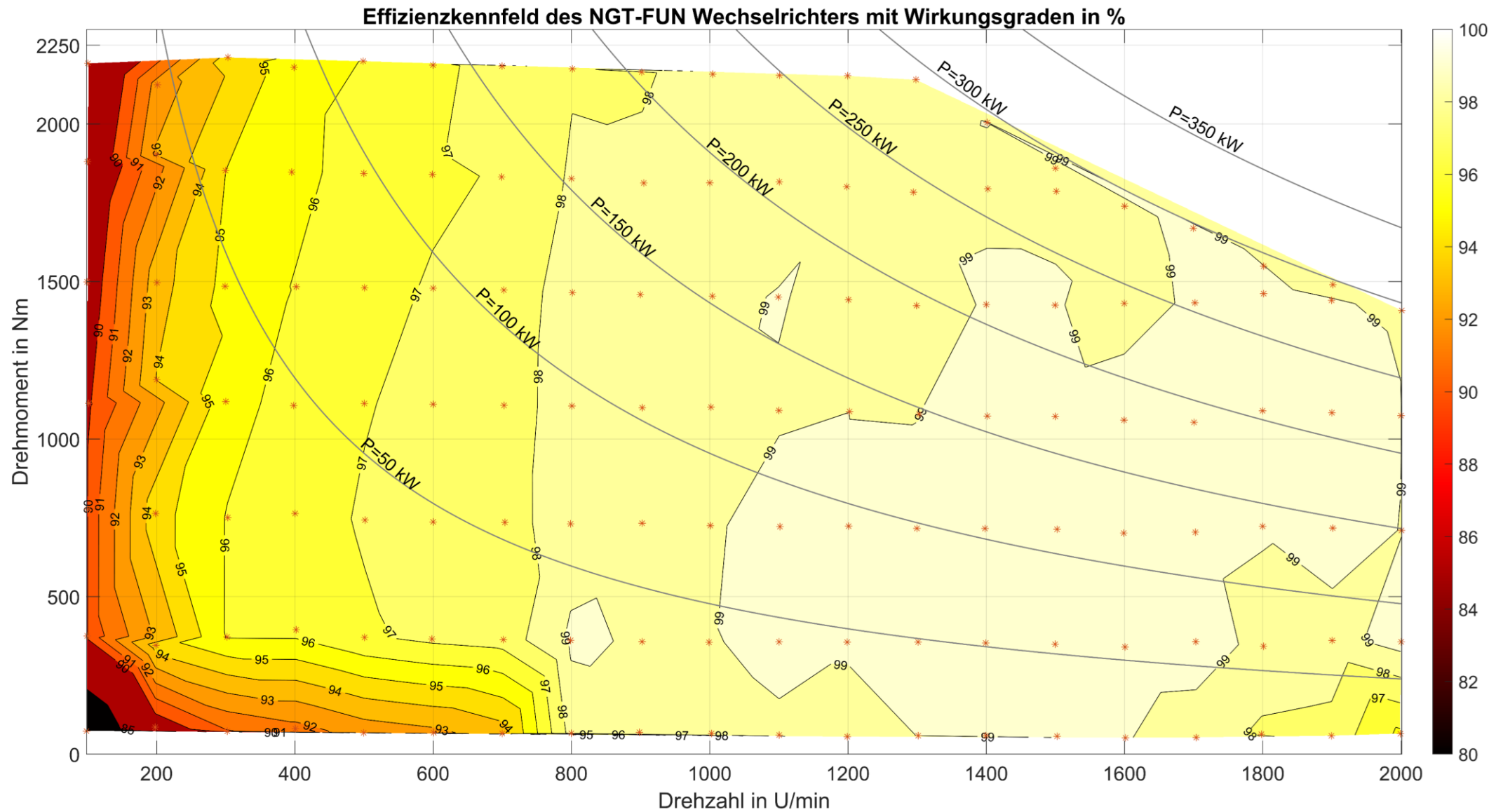


## Induzierte Spannung

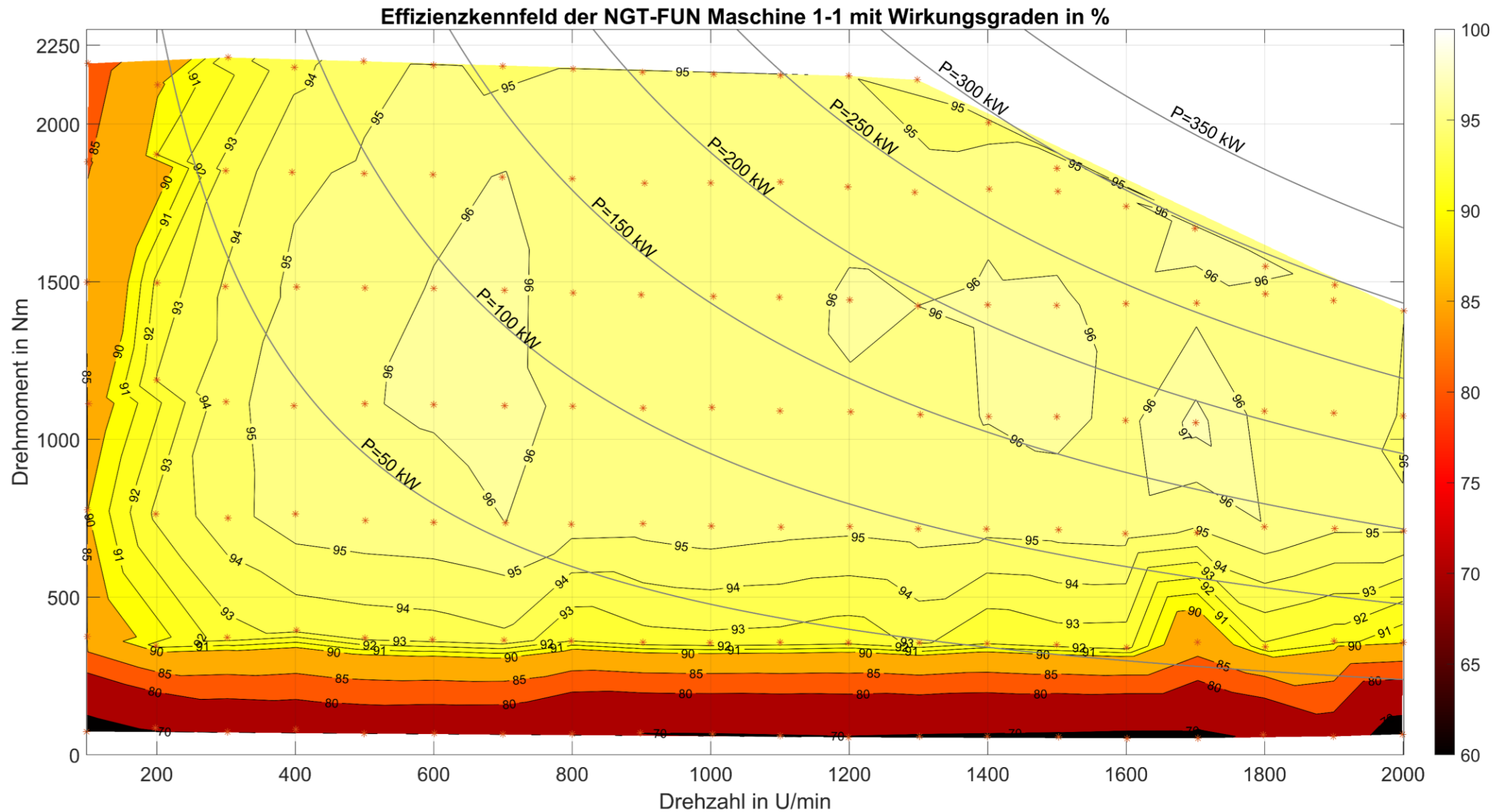


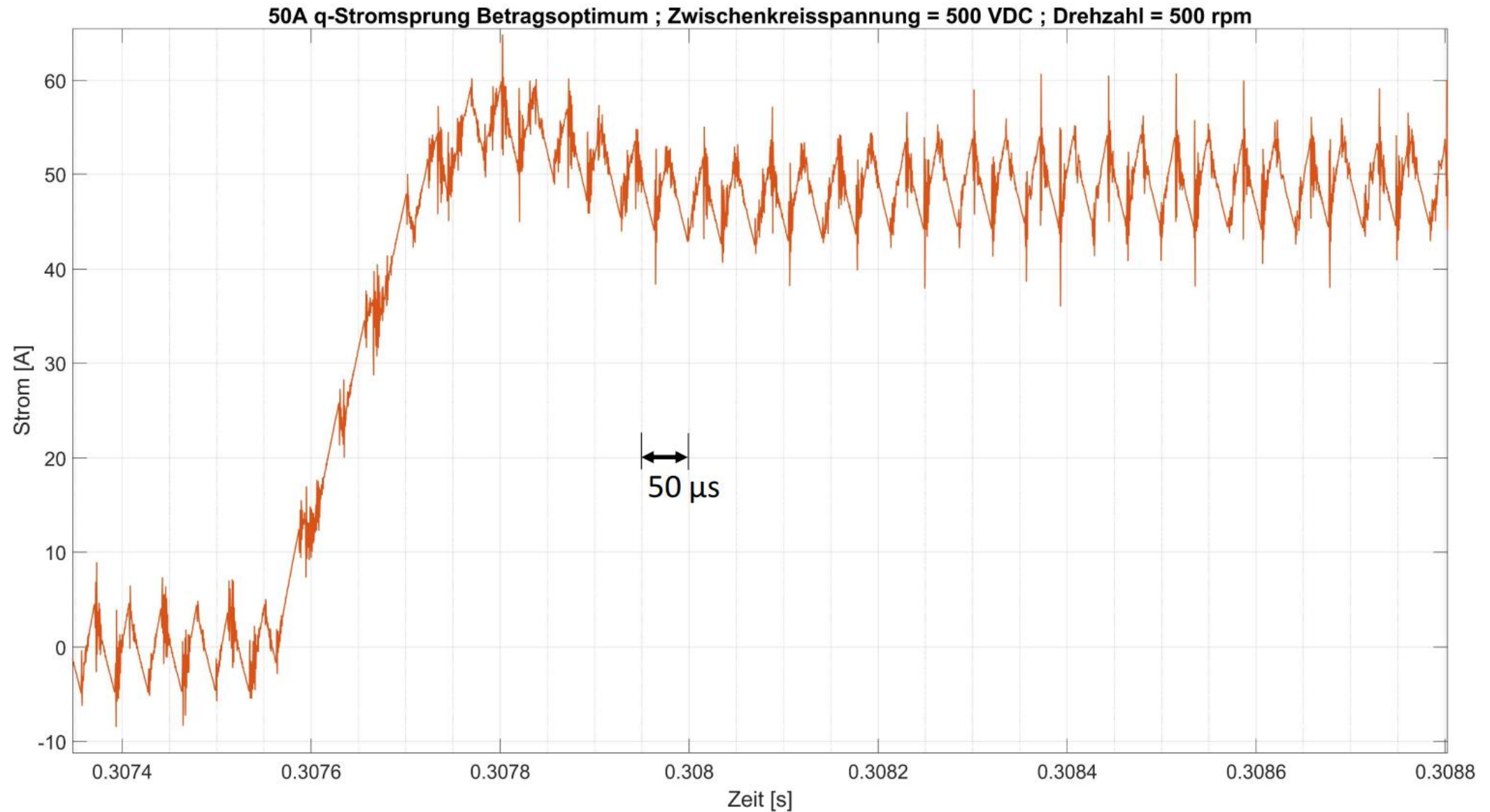


# Effizienzkennfeld Wechselrichter



# Effizienzkennfeld Maschine







# Aufbau und Inbetriebnahme eines neuen Leistungsprüfstandes für NGT - FuN

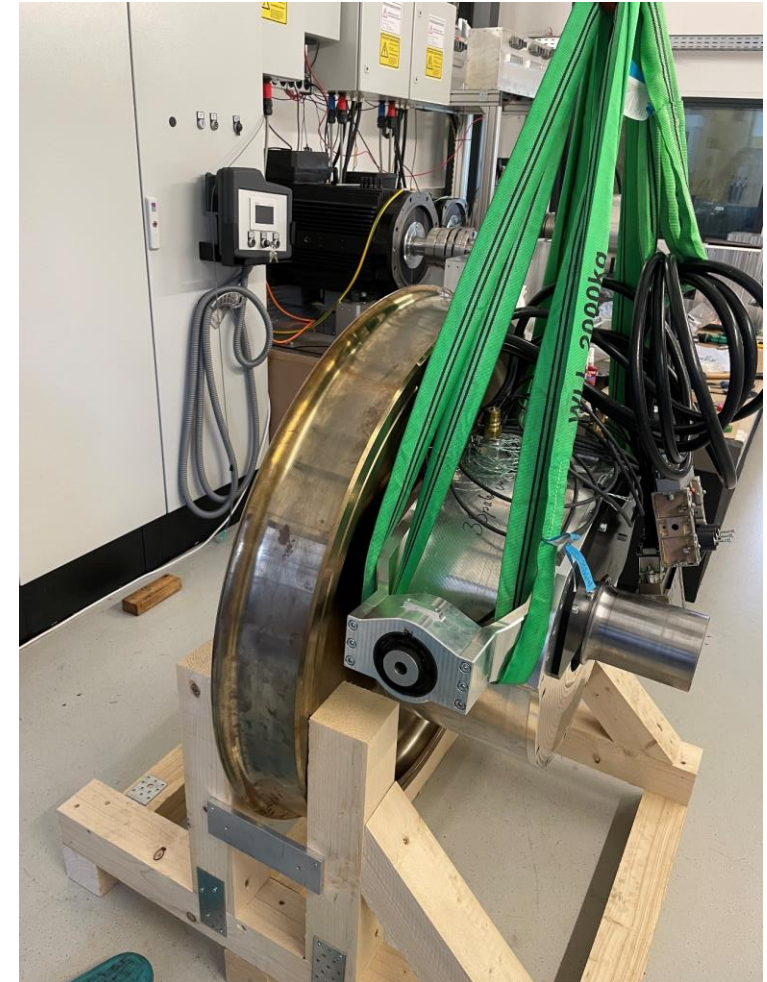
	Leistung in kW	Drehzahl in U/min	Drehmoment in Nm
Prüfstand 1 (Bosch)	59	2000 (8000)	285 (677)
Prüfstand 2 (Bosch)	120	1500 (3750)	764 (1800)
Prüfstand 3 (IAS)	400	(10.000)	(3000)

	Peripherie
Leistungsmessgerät	HBM GEN7ta Vermessung von bis zu 6 Phasensystemen (12 Phasensystem möglich)
Abtastraten el. Größen	2 MS/s
Sensoren	7 LEM-Wandler: IN500, (500 A) 2 Drehmomentmesswellen (3kNm, 100Nm) 24 Thermoelemente Typ K
Weitere Interface	CAN



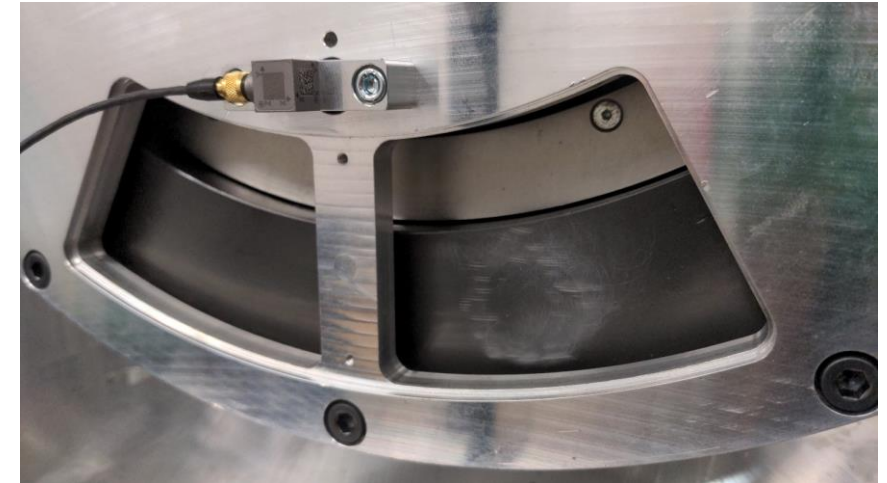


- Aufbau einer umfassenden Entwicklungsumgebung für die Auslegung von el. Maschinen
- Inbetriebnahme einer neuen Prüfstandinfrastruktur
- Aufbau hochpoliger Direktantriebe für den NGT-HST
- Aufbau von 6-phasigen SiC Forschungsumrichter



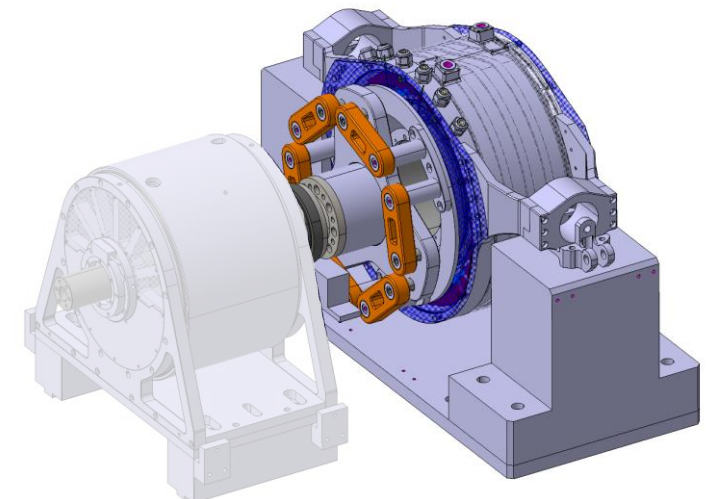
## Motor

- Applikation von Kühlkonzepten für den Rotor
- Schwingungsanalyse hinsichtlich Eigenfrequenzen, Anregungen im Betrieb und elastischer Aufhängung-/Radanbindung
- Sensorlose Regelung (ohne Drehgeber)



## Fahrwerk

- Test des Fahrwerks im Integrationsprüfstand mit red. Leistung (derzeit im Aufbau)
- Leistungstests auf Rollenprüfstand (geplant Ende 2025)
- Betrieb auf Teststrecke





# Kontakt Daten und Literatur

**Dipl.-Ing. (FH) Christian Weber, M.Eng.**  
ch.weber@dlr.de

**Dipl.-Ing. Christian Wachter**  
christian.wachter@dlr.de

**Dr.-Ing. Florian Liebetrau**  
florian.liebetrau@dlr.de

- [1] Dr.-Ing. Winter, Joachim. Next Generation Train - 20 Jahre Forschung für die Eisenbahn. Eisenbahntechnische Rundschau. 2019, 03.
- [2] Dr.-Ing. Winter, Joachim et al. NGT - Next Generation Train. Rail Technology Review Special. 2011.
- [3] Krüger, David und Dr.-Ing. Winter, Joachim. NGT LINK: Ein Zugkonzept für schnelle doppelstöckige Regionalfahrzeuge. ZEVrail. Oktober, 2014, Bd. 138, 10.
- [4] Dr.-Ing. Winter, Joachim et al. NGT CARGO - Schienengüterverkehr der Zukunft. Internationales Verkehrswesen. 2017, 2
- [5] König, Jens. Dissertation: Neuartige Leichtbaukonzepte und Bauweisen von Schienenfahrzeugen im Hochgeschwindigkeitsverkehr unter besonderer Berücksichtigung des Wagenkastenleichtbaus. Stuttgart : Universität Stuttgart, 2016.
- [6] Lüdicke, Daniel, Krüger, David, Weber, Christian, Goetjes, Björn und Heckmann, Andreas (2021) DLR Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk (NGT-FuN). ETR - Eisenbahntechnische Rundschau. DVV Media Group, März 2021.
- [7] Krüger, David et al. Next Generation Train Fahrwerk: Eine neuartige Methode für die Leichtbauoptimierung von Schienenfahrzeugfahrwerksstrukturen. ZEVrail. 2017, Bd. 141, Juni-Juli.
- [8] Weber, Christian. Teilautomatisiertes Entwicklungsverfahren von elektrischen Maschinen. 25. Kleinmaschinenkolloquium. 16.-17. März 2017, Ilmenau, Deutschland.