

Konstruktion und Fertigung einer drehmomentstarken PMSM mit Zahnspulenwicklung und massivem Rotorjoch



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für
Elektrische
Energiewandlung

VEM Technischer Tag 2021

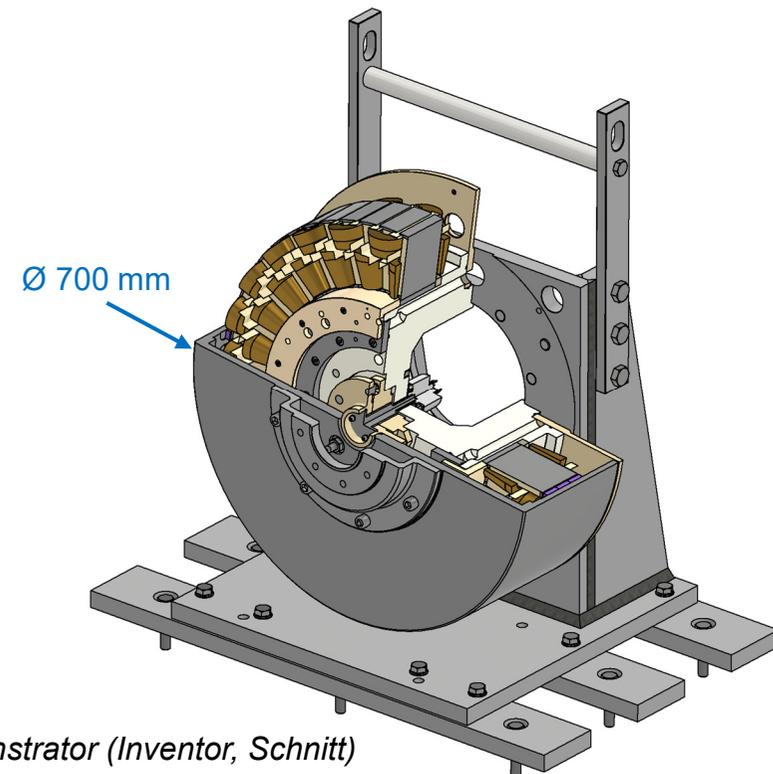
M.Sc. Nicolas Erd

(nerd@ew.tu-darmstadt.de)

Prof. Andreas Binder

(abinder@ew.tu-darmstadt.de)

Institut für Elektrische Energiewandlung
TU Darmstadt
Darmstadt, Deutschland



Demonstrator (Inventor, Schnitt)



- Einleitung: Getriebelose PMSM für Windgeneratoren
- Demonstrator:
 - Ziele / Vorgaben
 - Optimierung
 - Nachrechnung
 - Fertigung
- Zusammenfassung

Einleitung: Getriebelose PMSM für Windgeneratoren

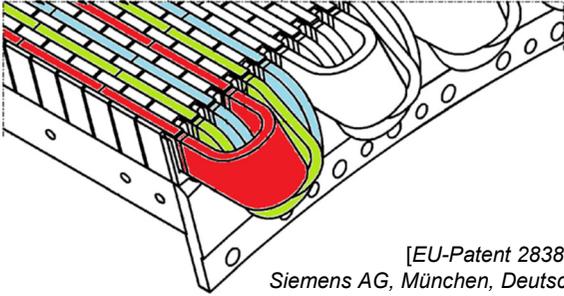
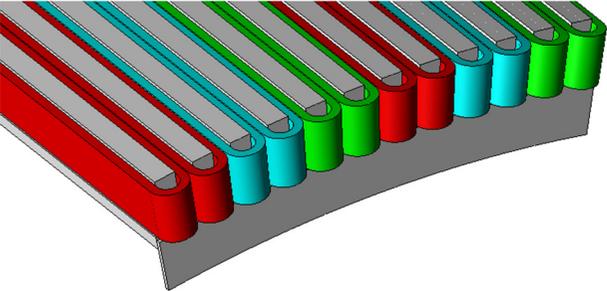
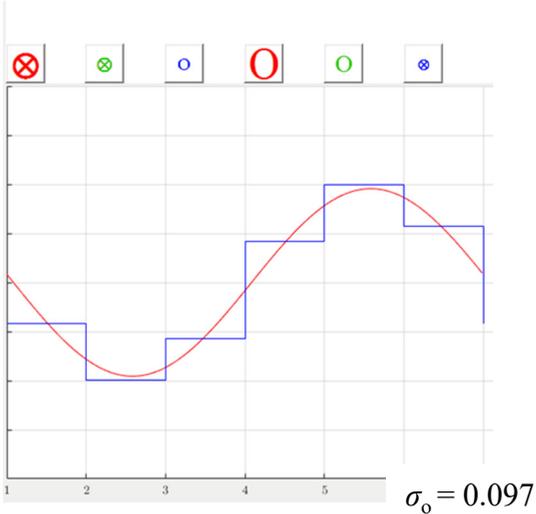
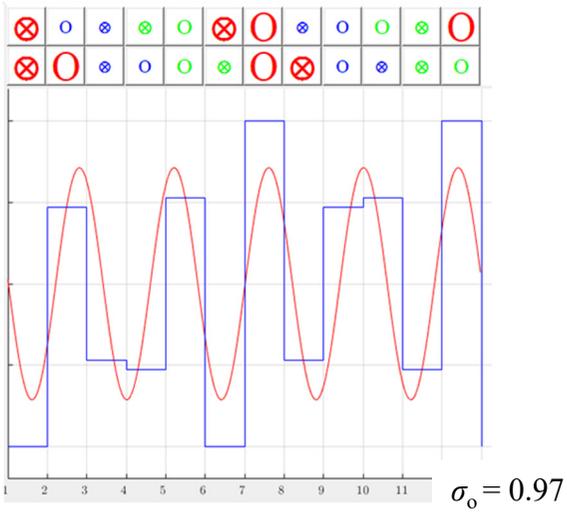
- Offshore Windgeneratoren:
 - Getriebelose PMSM
 - Außenläufer mit Oberflächenmagneten und massivem Rotorjoch
 - 8 MW-Klasse: $n_N = 10.2 \text{ min}^{-1}$, $M_N = 8.3 \text{ MNm}$
 - Rototaußendurchmesser 6.4 m, $l_{Fe} = 1.6 \text{ m}$
 - Zwei dreiphasige Umrichter
- Fragestellungen und Probleme
 - Zahnspulenwicklungen
 - Redundanzbetrieb

Statorfeldharmonische
→ Rotorwirbelströme

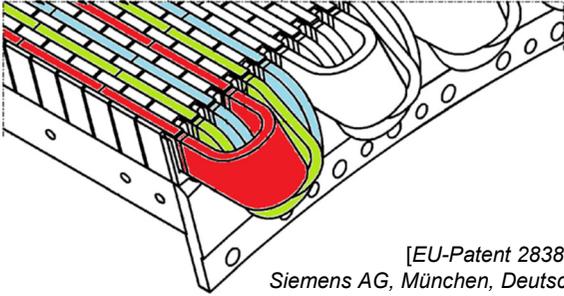
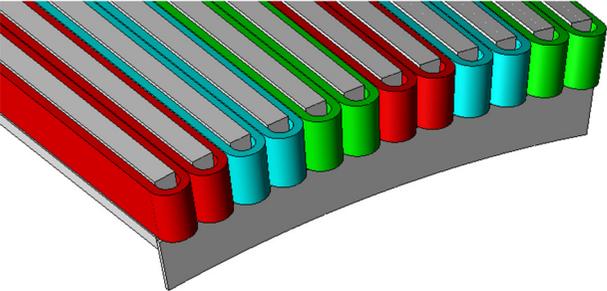
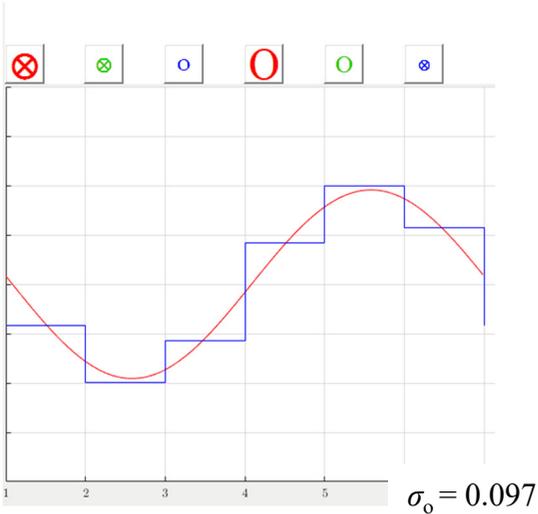
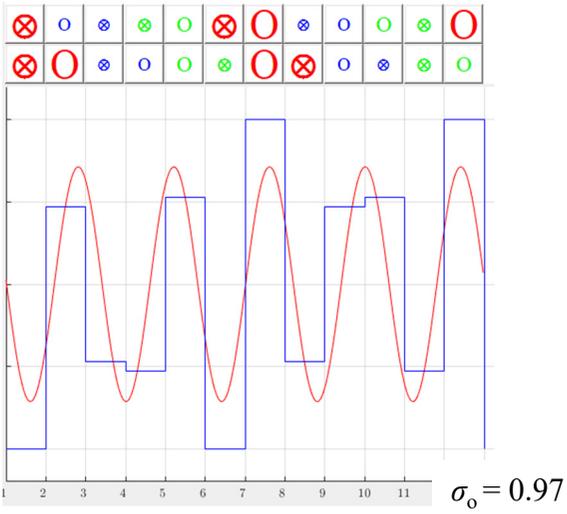


Getriebelose Offshore-Windenergieanlage
[Siemens Gamesa, Zamudio, Spanien]

Einleitung: Zahnspulenwicklungen

	Ganzloch-Einschichtwicklung mit $q = 1$	Zweischicht-Zahnspulenwicklung mit $q = 2/5$
<p><u>Wickelköpfe</u></p>	 <p>[EU-Patent 2838182A1 Siemens AG, München, Deutschland]</p> <p>gekreuzte, große Wickelköpfe</p>	 <p>ungekreuzte, kleine Wickelköpfe</p>
<p><u>Statorfeld</u></p> <p>(1D, analytisch ohne Einfluss der Nutöffnung)</p> <p>rot: Arbeitswelle blau: Gesamtfeld</p>	 <p>$\sigma_o = 0.097$</p> <p>geringer Oberwellengehalt</p>	 <p>$\sigma_o = 0.97$</p> <p>hoher Oberwellengehalt → Rotorwirbelströme</p>

Einleitung: Zahnspulenwicklungen

	Ganzloch-Einschichtwicklung mit $q = 1$	Zweischicht-Zahnspulenwicklung mit $q = 2/5$
<p><u>Wickelköpfe</u></p>	 <p>[EU-Patent 2838182A1 Siemens AG, München, Deutschland]</p> <p>gekreuzte, große Wickelköpfe</p>	 <p>ungekreuzte, kleine Wickelköpfe</p>
<p><u>Statorfeld</u></p> <p>(1D, analytisch ohne Einfluss der Nutöffnung)</p> <p>rot: Arbeitswelle blau: Gesamtfeld</p>	 <p>$\sigma_o = 0.097$</p> <p>geringer Oberwellengehalt</p>	 <p>$\sigma_o = 0.97$</p> <p>hoher Oberwellengehalt → Rotorwirbelströme</p>

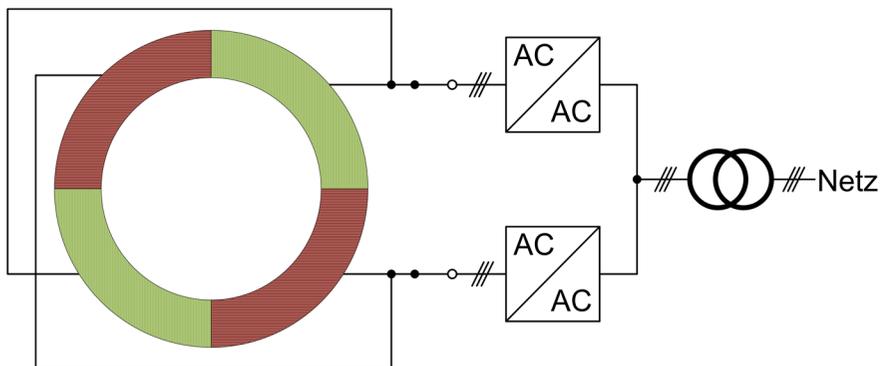
Einleitung: Redundanzbetrieb

- Zwei dreiphasige Umrichter speisen parallele Zweige der Statorwicklung
- 4-Quadranten-Schema: **Kraftkompensation** und **minimale Zusatzverluste**
- Ausfall eines Umrichters → **Notbetrieb mit nur einem Umrichter:**
 - 2 Quadranten laufen leer
 - 2 Quadranten sind gespeist

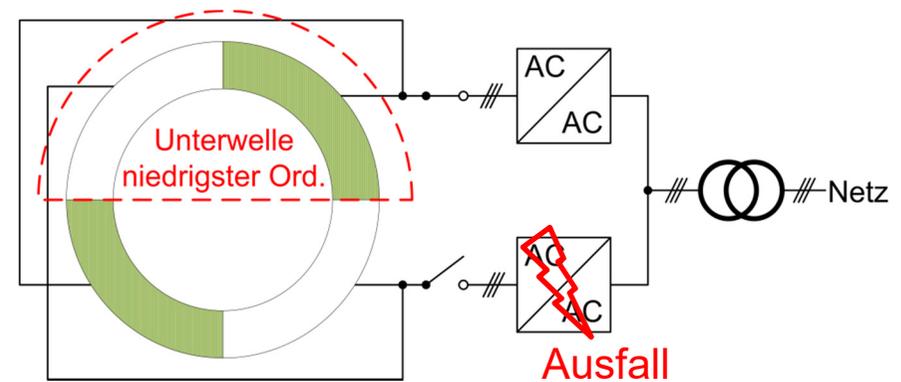


Weitere Ober- und Unterwellen →
Rotorwirbelströme

Normalbetrieb



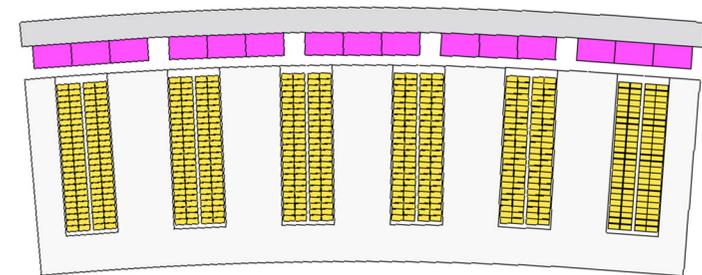
Redundanzbetrieb



Einleitung: Auslegung Windgenerator

- Bemessungspunkt: $P_{el,N} = 8.3 \text{ MW}$, $n_N = 10.2 \text{ min}^{-1}$
 - Voruntersuchung verschiedener Zweischicht-Zahnspulenwicklungen
 - Kandidaten mit zulässigen Rotorverlusten: $[m = 3, q = 1/2]$; $[m = 3, q = 2/5]$
 - Blechschnittoptimierung und Simulation
- Vorgaben: Bauraum und $m_{Mag} = 4344 \text{ kg}$
Ziel: Maximaler Wirkungsgrad im Bemessungspunkt

	$[m = 3, q = 1/2]$	$[m = 3, q = 2/5]$
Statorstromwärmeverluste	548 kW $k_{ws} = 0.866$	408 kW $k_{ws} = 0.933$
Rotorwirbelstromverluste	27.2 kW	198.1 kW
Wirkungsgrad	93.0 %	92.8 %
Drehmomentwelligkeit	7 %	0.3 %
Magnetisches Geräusch	Atemmode ($r = 0$) wird angeregt	unauffällig



$[m = 3, q = 2/5, 2p = 180]$ 2D FEM-Modell (JMAG)

Details: [Erd, Binder: *Windgeneratoren mit Zahnspulenwicklungen* in e&i Heft 4-5, S. 266-279, 2020]

- Einleitung: Getriebelose PMSM für Windgeneratoren
- Demonstrator:
 - Ziele / Vorgaben
 - Optimierung
 - Nachrechnung
 - Fertigung
- Zusammenfassung

Demonstrator

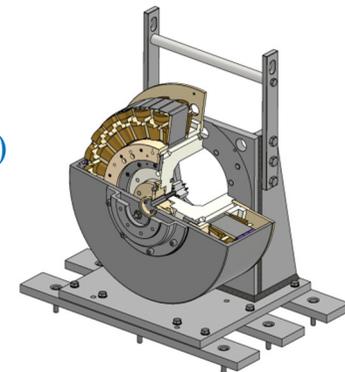
Ziele und Vorgaben

- Ziele:

- Messtechnische Untersuchung von Rotorjochwirbelstromverlusten
- Demonstration: Machbarkeit und Vorteile modularer Fertigung

- Vorgaben:

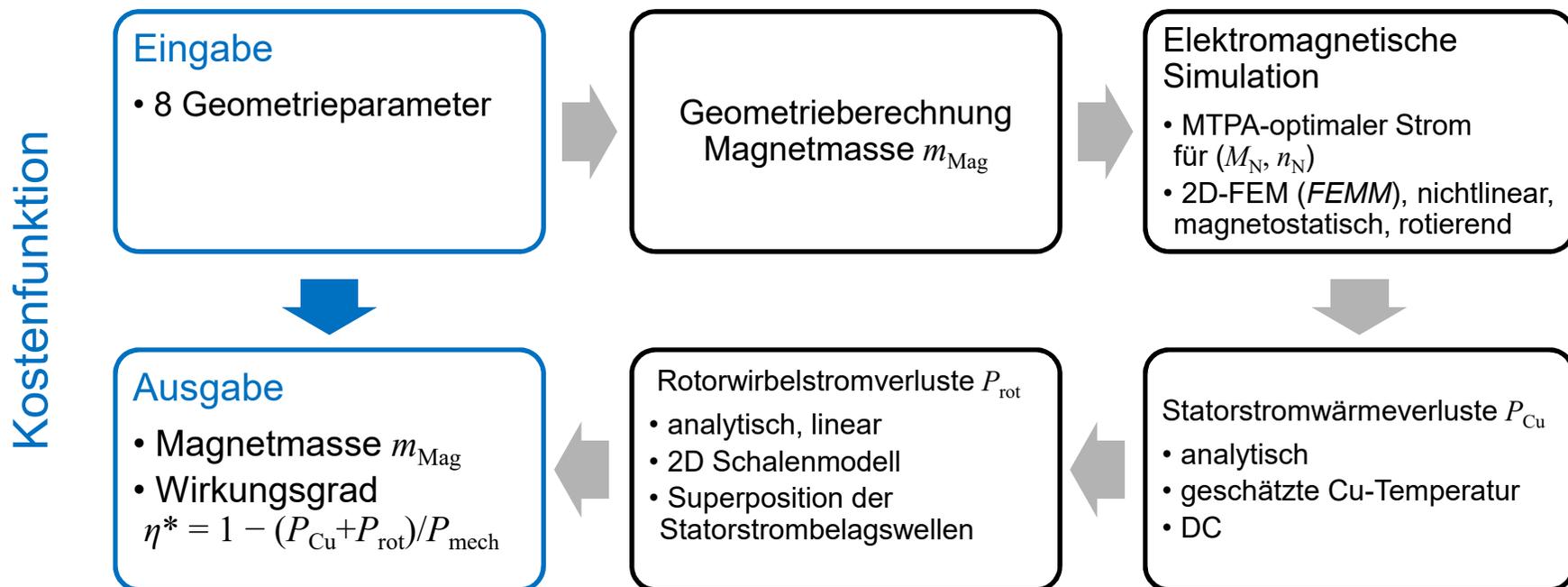
- $U_N \approx 400 \text{ V}$ mit Zweischichtzahnspulenwicklung $q = 2/5$ und Aufsteckformspulen
- Oberflächenmagnete und halbgeschlossene Nuten
- Materialvorgabe: Stator: M350-50A, Rotor: S355, NdFeB-PM: $B_r = 1.24 \text{ T @ } 100 \text{ °C}$
- Statorinnen-Ø: $d_{s,i} = 400 \text{ mm}$; Rotoraußen-Ø $d_{r,o} = 700 \text{ mm}$; Blechpaketlänge $l_{fe} = 90 \text{ mm}$
- Wicklung: $2p = 40$, $a = 4$
- Grunddrehzahlbereich bis $f_s = 20 \text{ Hz}$ ($n = 60 \text{ min}^{-1}$)
- Wasserinnenmantelkühlung mit thermischer Ausnutzung ca. $A \cdot J = 3000 \text{ (A/mm}^2) \cdot \text{(A/cm)}$
Wärmeklasse H (180)
- geschätzter Nutfüllfaktor $k_{Cu} = 60 \%$
- Bemessungsdrehmoment: $M_N = 2800 \text{ Nm}$



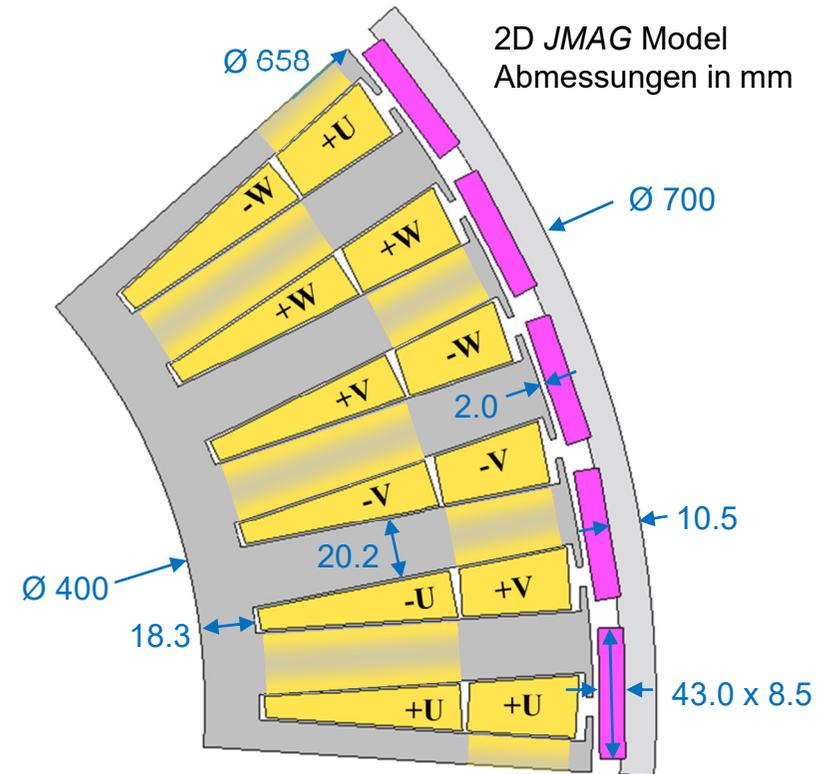
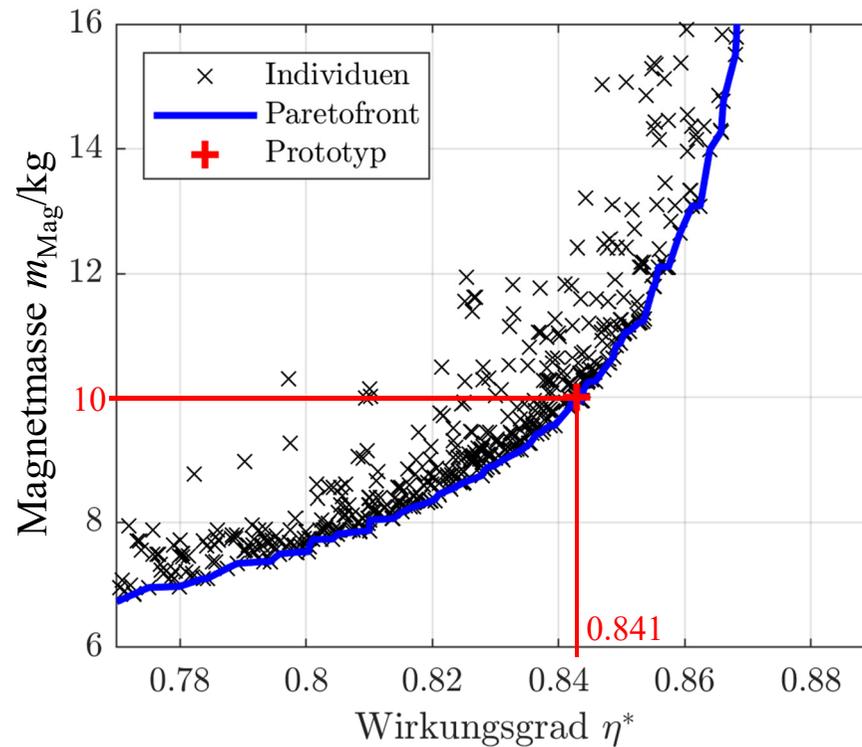
Demonstrator

Optimierung der Maschinengeometrie

- **Ziele:** Maximaler Wirkungsgrad und minimaler Magnetmaterialeinsatz
- **Freiheitsgrade:** Blechschnitt und Rotorgeometrie
- **Optimierer:** Genetischer Mehrzieloptimierer (*MATLAB* gamultiobj())



Demonstrator: Optimierungsergebnis



- letzten 100 Generationen mit ca. 2000 Individuen
- Rotorjoch dünn → Große Bohrung, große Nutfläche

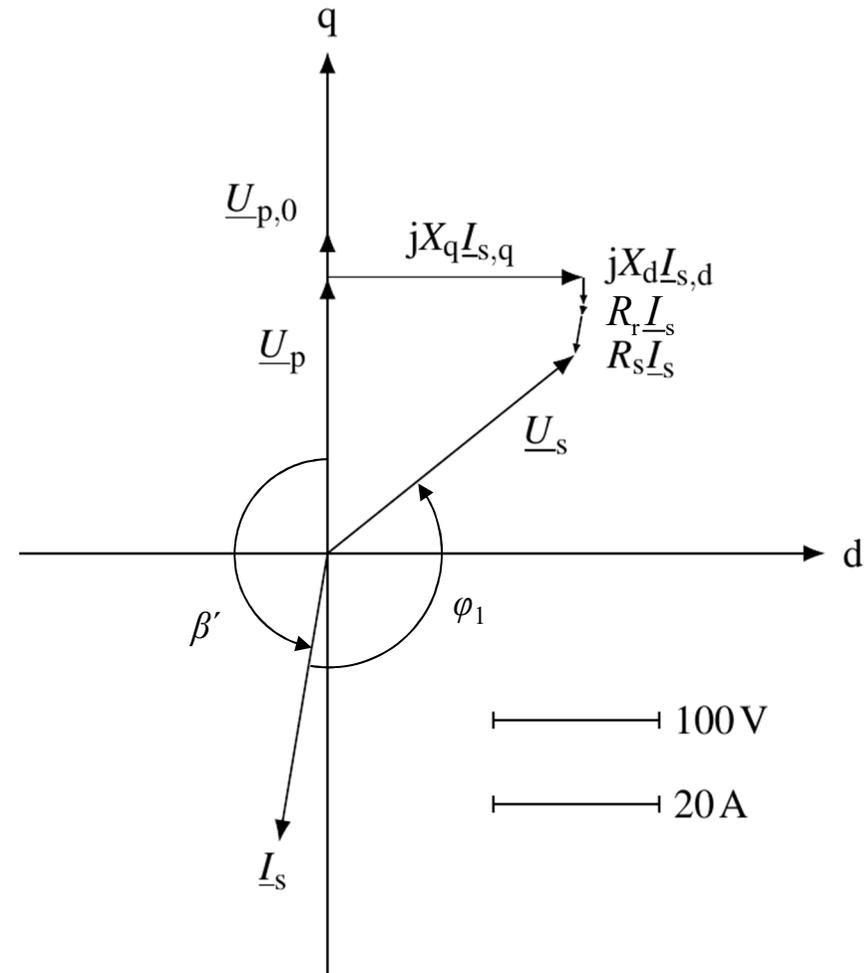
- Wicklungsauslegung: $d_{Cu} = 1.8$ mm;
 $N_{c,Os} = 198$; $N_{c,Us} = 207$; $N_s = 810$; $k_{Cu} = 58.1\%$

Demonstrator:

Bemessungspunkt: Elektromagnetische Simulation

Drehzahl n_N , Statorfrequenz f_s	60 min ⁻¹ , 20 Hz
Drehmoment M_N	2828 Nm
Mechanische Leistung P_{mech}	17.77 kW
Gesamtverluste P_d	2895 W (100 %)
Stromwärmeverluste $P_{\text{Cu,AC}}$	2487 W (86 %)
Stator-Ummagnetisierungsverluste $P_{\text{Fe,s}}$	222.7 W (8 %)
Wirbelstromverluste: Magnete P_{mag}	40.1 W (1 %)
Wirbelstromverluste: Rotorjoch P_{rot}	145.3 W (5 %)
Statorstrom $I_{s,1}$	35.01 A
MTPA: Vorsteuerwinkel β'	170°
Statorstromspannung $U_{s,1}$	190.4 V
Wirkungsgrad	83.7 %
$\cos(\varphi_1)$	0.74 (ind.)
Drehmomentwelligkeit	1.2 %

Tab. und Zeigerdiagramm:
2D, nichtlineare, transiente FEM (JMAG)



Demonstrator:

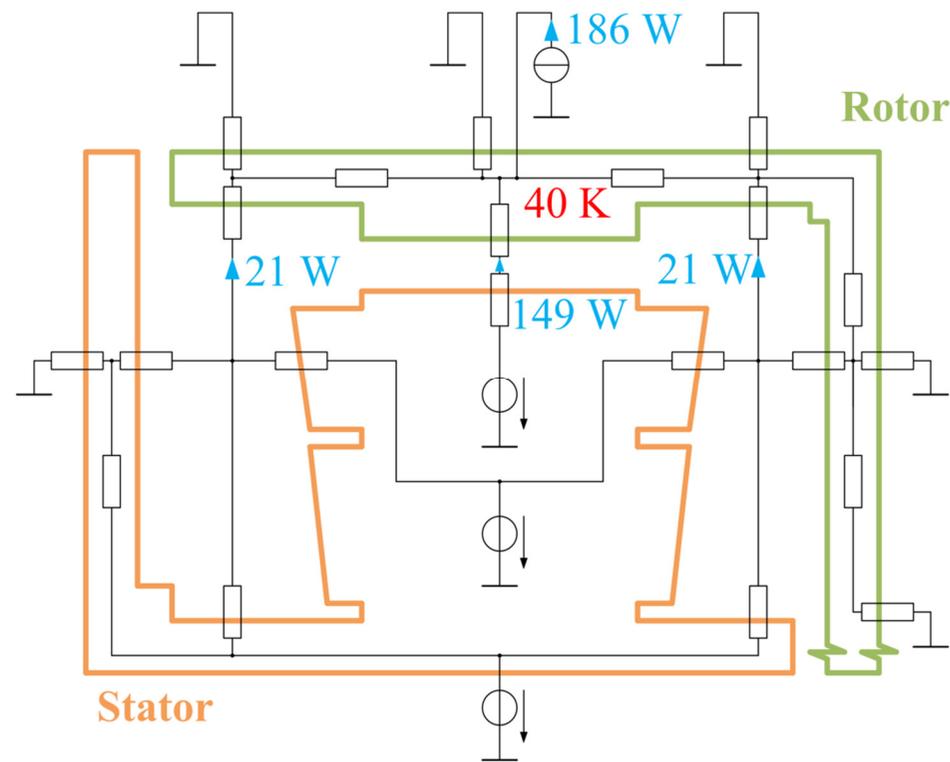
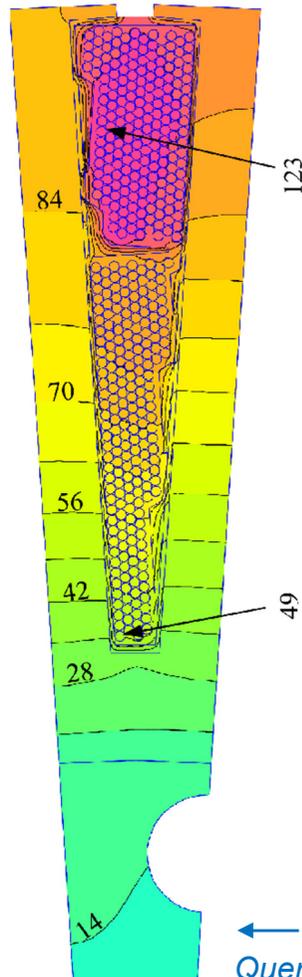
Bemessungspunkt: Thermische Simulation

- Erwärmen ggü. Umgebungsluft
- Stationäres Modell
- Kopplung von Querschnitt- und Längsschnittmodell

Umgebungstemp.	40 °C
Min. Kühlmittelstrom	8 l/min
Mittlere Kühlmittelerwärmung	7 K
WÜZ Wasserkanal	2282 W/(m ² ·K)

Mittlere Erw. Cu	100 K
Max. Erw. Cu	123 K
Min. Erw. Cu	49 K
Mittlere Erw. Stator-Fe	64 K
Erw. Zahnkopf	96 K
Mittlere Erw. Statorträger	14 K

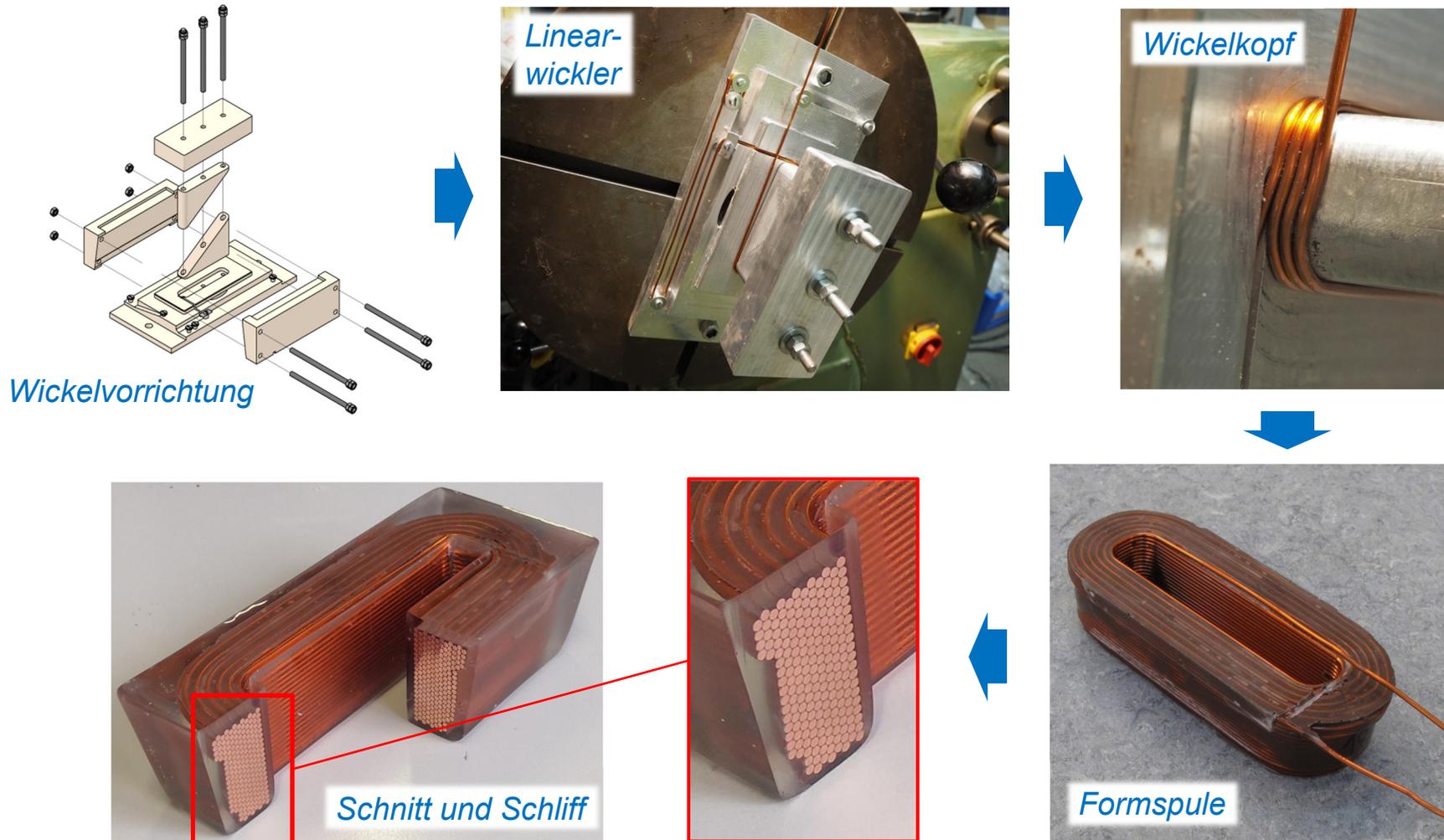
Mittlere Erw. Rotor	40 K
---------------------	------



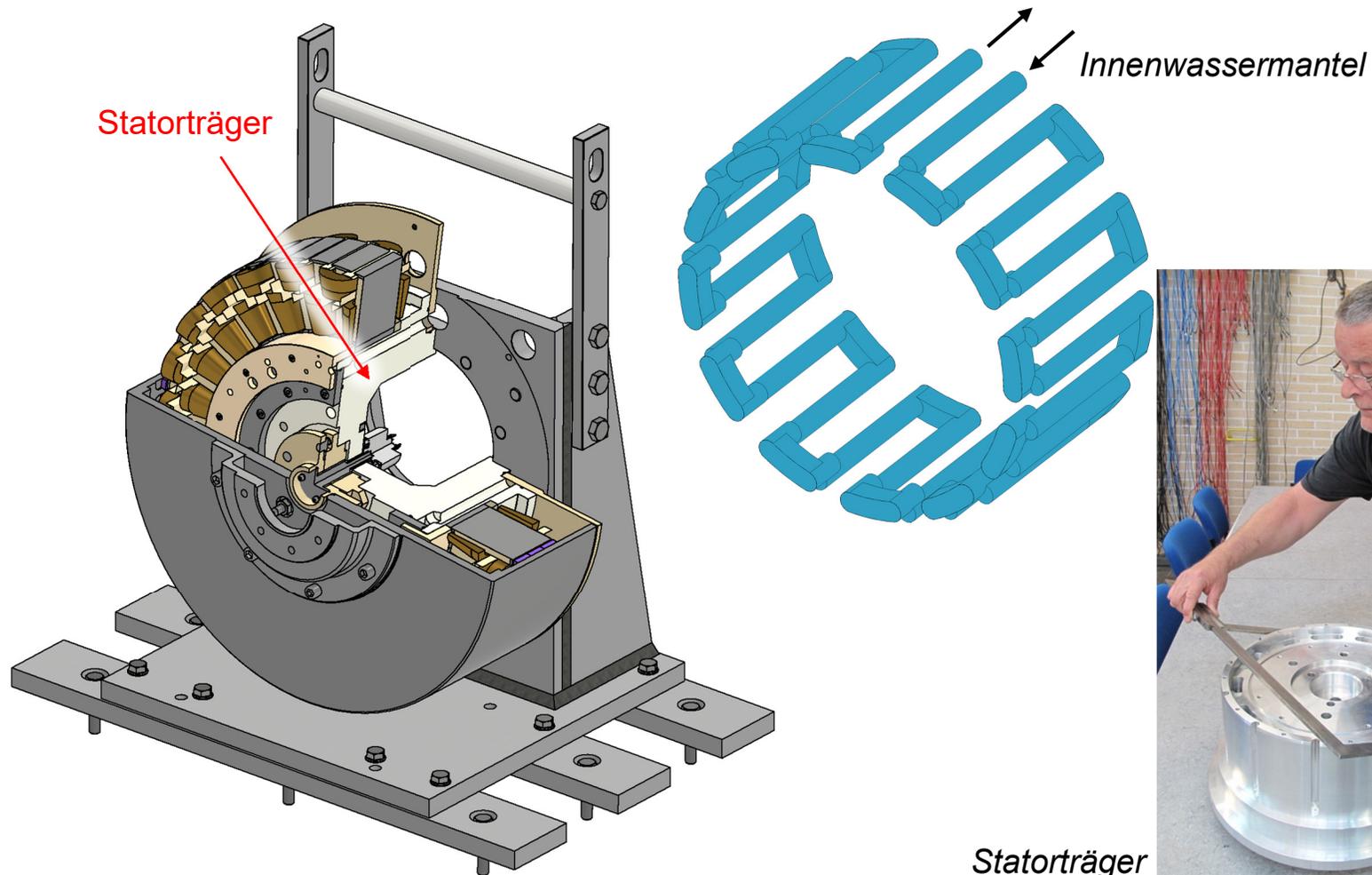
↑ Längsschnitt-Modell: Thermisches, stationäres ESB

← Querschnitt-Stator-Modell: 2D FEM Simulation (FEMM); Erwärmen in K

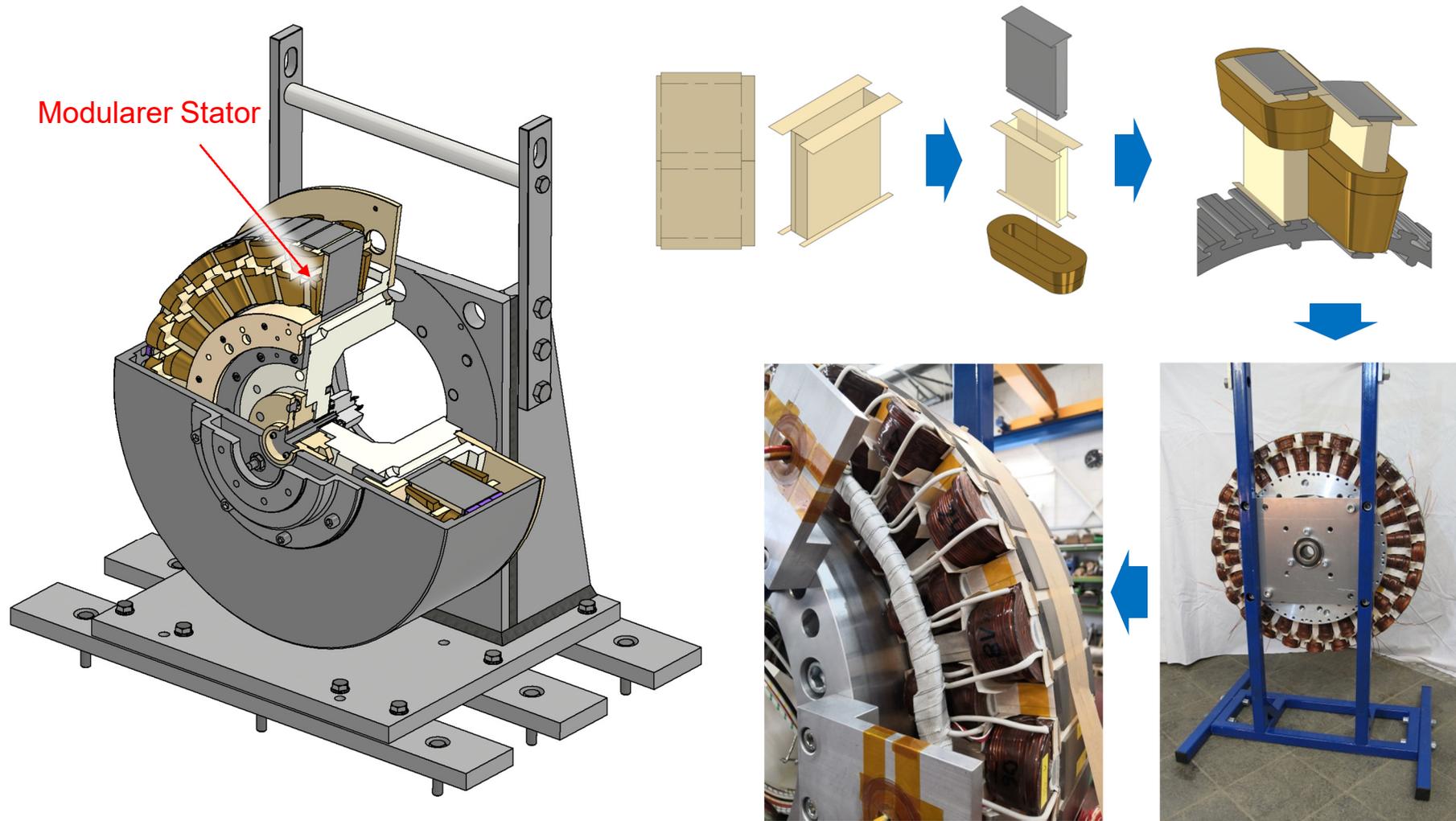
Demonstrator: Statorwicklung



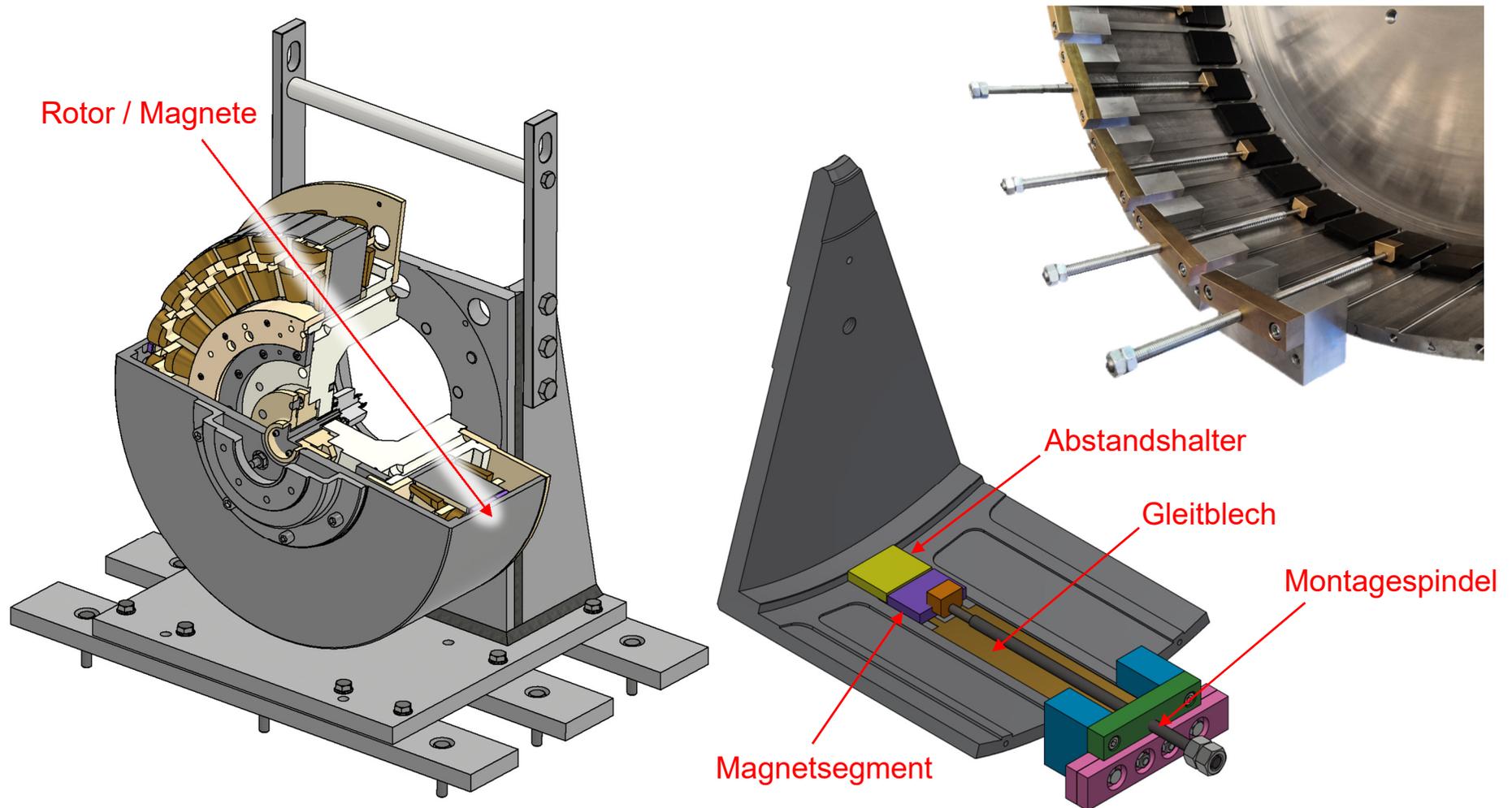
Demonstrator: Konstruktion – Statorträger



Demonstrator: Konstruktion – Modularer Stator

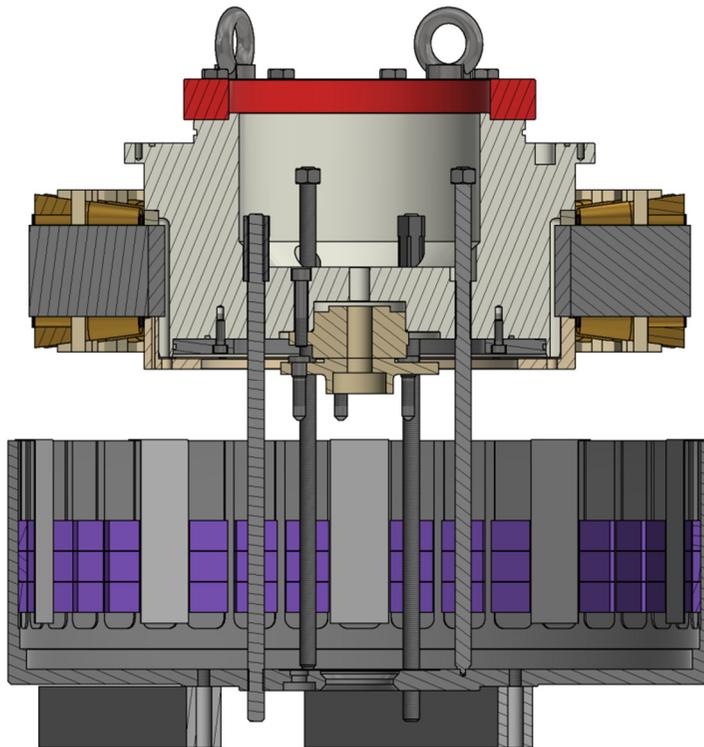


Demonstrator: Konstruktion – Rotor und Magnete



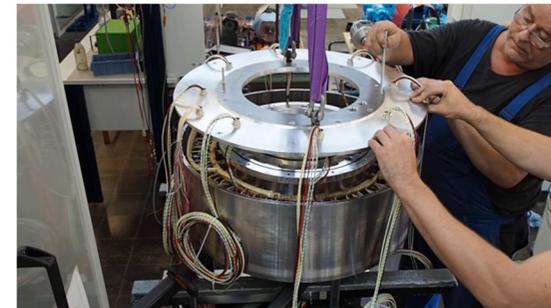
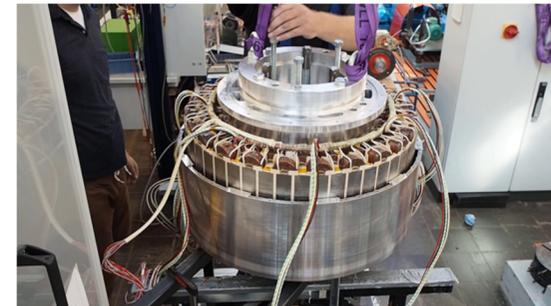
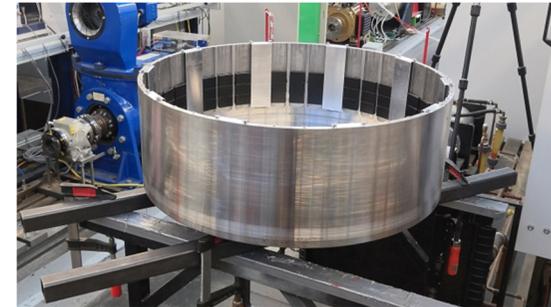
Demonstrator: Hochzeit

- Einfahren mit 3 Zug- und 3 Druckspindeln
- Axialer magnetischer Zug max. 7000 N
- 10 eingehangene Schutzbleche für Magnetoberflächen



links: Montage im Schnitt (Inventor)

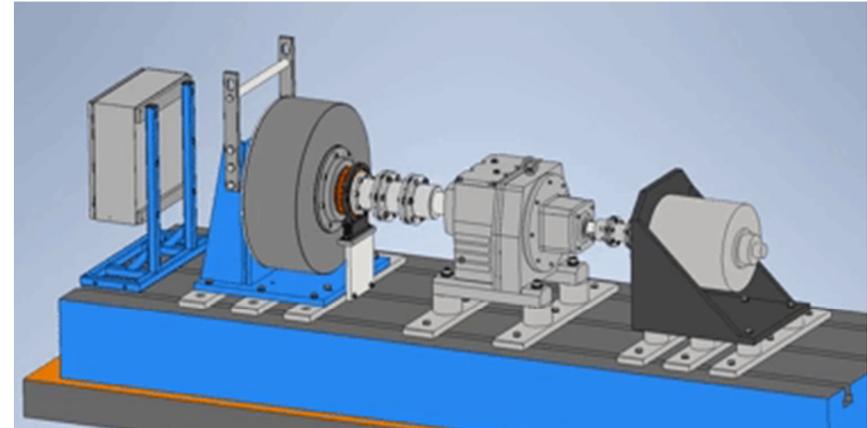
rechts: Montageschritte



- Einleitung: Getriebelose PMSM für Windgeneratoren
- Demonstrator:
 - Ziele / Vorgaben
 - Optimierung
 - Nachrechnung
 - Fertigung
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Zahnspulenwicklungen für getriebelose PMSM Windgeneratoren
 - Modularität
 - Kurze Wickelköpfe (P_{Cu} senken); kleiner axialer Bauraum (Ausnutzung senken)
 - Statorfeldharmonische induzieren massives Rotorjoch; rel. geringer $\cos(\varphi_1)$
- Auslegung und Bau eines Demonstrators
 - Konsequente Modularisierung in Konstruktion und Fertigung
 - Überwiegend Fertigung in institutseigenen Werkstätten
- Ausblick
 - Prüfstand, Inbetriebnahme
 - Messung



Forschungsförderung

Industriepartner und Zulieferer



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg (*EnBW Energie Baden-Württemberg AG*) Projektnummer A 336 19

- i. Autodesk Inc., San Rafael, USA, <http://www.autodesk.com>
- ii. Brenner GmbH Elektrotechnik, Bürstadt, Germany, <https://brenner-gmbh.de>
- iii. Danfoss A/S (Vacon), Nordborg, Denmark, <https://www.danfoss.com>
- iv. Elantas GmbH, Wesel, Germany, <https://www.elantas.com>
- v. Flender GmbH, Bocholt, Germany, <https://www.flender.com>
- vi. Fritz Diel Isoliermaterial für die Elektrotechnik GmbH & Co. KG, Dortmund, Germany, <https://www.diel.de>
- vii. GREMAKO GmbH & Co. KG, Lennestadt, Germany, <https://www.gremako.de>
- viii. Henke GmbH Zerspanungstechnik, Lampertheim, Germany, <https://www.henke-lampertheim.de>
- ix. Hottinger Brüel & Kjær GmbH, Darmstadt, Germany, <https://www.hbm.com>
- x. JSOL Corporation, Tokyo, Japan, <https://www.jmag-international.com>
- xi. Magnetworld AG, Jena, Germany, <https://www.magnet-world.de>
- xii. Hans-Joachim Marx Heizungsbau, Schmitten, Germany
- xiii. D. Meeker, FEMM 4.1, USA, <https://www.femm.info>
- xiv. Nestech, Valdastico, Italy, <https://www.nestech.it>
- xv. Schwering & Hasse Elektrodraht GmbH (SHWire), Lügde, Germany, <https://www.sh-wire.de>
- xvi. SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, Bruchsal, Germany, <https://www.sew-eurodrive.de>
- xvii. SICK AG, Waldkirch, Germany, <https://www.sick.com>
- xviii. SKF GmbH, Schweinfurt, Germany, <https://www.skf.com/de>
- xix. Volkmann Elektromaschinenbau GmbH, Werder (Havel), Germany, <https://www.volkmann-elmot.de>

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

