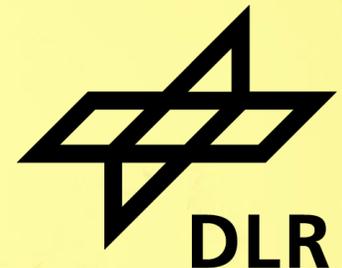


VORUNTERSUCHUNG DER AKUSTISCHEN EMISSION EINER ELEKTRISCHEN MASCHINE FÜR EINEN PARALLEL-HYBRIDEN HUBSCHRAUBERANTRIEB

Sebastian Hakansson, D. Richter, T. F. Geyer

Institut für Elektrifizierte Luftfahrtantriebe

Sebastian.Hakansson@dlr.de



Motivation

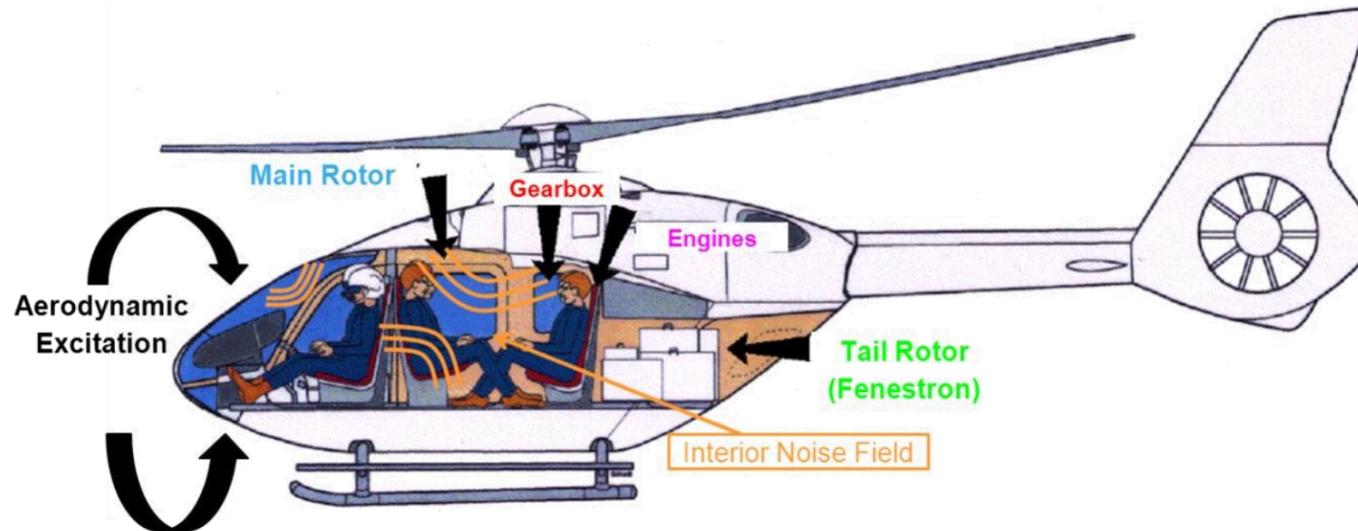
- Ziel EU: bis 2050 Emission Luftfahrt deutlich reduzieren [[Euc](#)]
- neuartige Flugzeugkonzepte mit elektrifizierten Luftfahrtantrieben
- Im DLR-internen Projekt ROME wird Elektrifizierung Hubschrauber bewertet
- Dabei auch Untersuchung Schallentstehung und –abstrahlung elektrischer Maschinen



Rettungshubschrauber vom Typ BK 117 C-2 (EC145) der Schweizerischen Rettungsflugwacht [[Zep](#)].

Motivation

- Verschiedene Lärmquellen in einem Helikopter
- In unmittelbarer Umgebung zu den Insassen mit kurzen Transferwegen

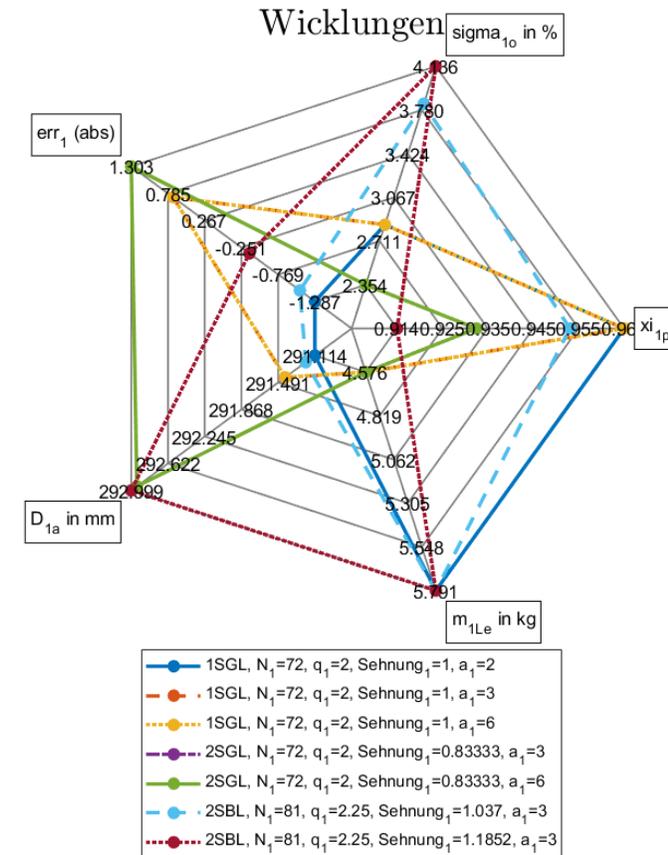


Geräusche im inneren eines Helikopters und entsprechende Herkunft [Sch+14].

- Neue Lärmsignatur, wenn elektrische Maschine integriert wird

Aktuelle „wissenschaftliche“ Fragestellung

- Etablierung geeigneter Werkzeuge
- Aufbau Verständnis für verschiedene Einflussfaktoren
- Identifikation erster Abhängigkeiten für spätere Optimierung
- Fokus hier: elektromagnetisch erzeugte Geräusche



Aus "Electric_Machine_Design"
von Svenja Kalt [Kal21]

Vorteile der (hybrid-elektrischen) Elektrifizierung



■ Vorteile

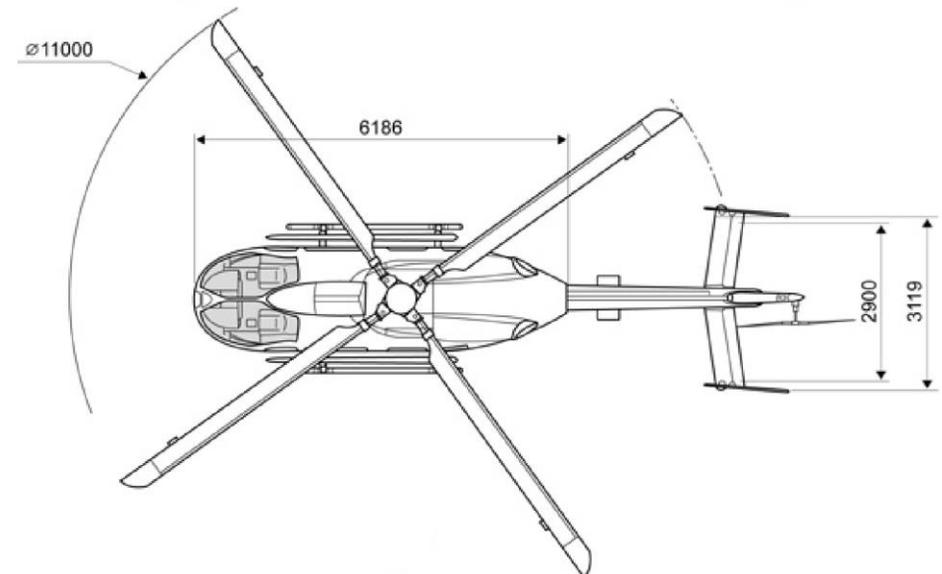
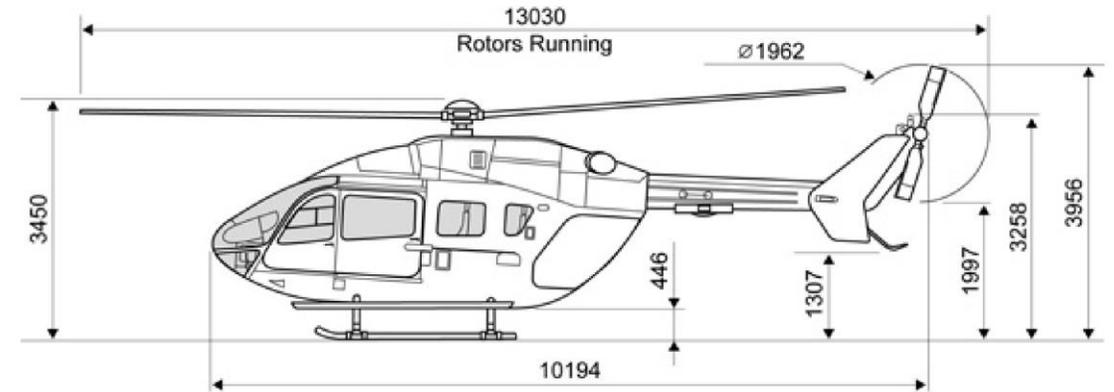
- EM stellen hohes Drehmoment bei Start und Landung bereit
- GT kann kleiner ausfallen (*downsizing*) und für Cruise ausgelegt werden
- dadurch optimierte Triebwerksleistung und besserer Wirkungsgrad
- ggf. Verzicht auf Getriebe wenn GT Generator treibt
- Entkopplung Drehzahl Heckrotor
- Höhenabhängige Leistung der GT
- ...

■ Nachteile:

- Schwere Energiespeicher
- Neue Anforderungen an Kühlung
- EMI
- Höheneinfluss Partial Discharge
- Neue Massenverteilung
- ...

Ziel-Plattform

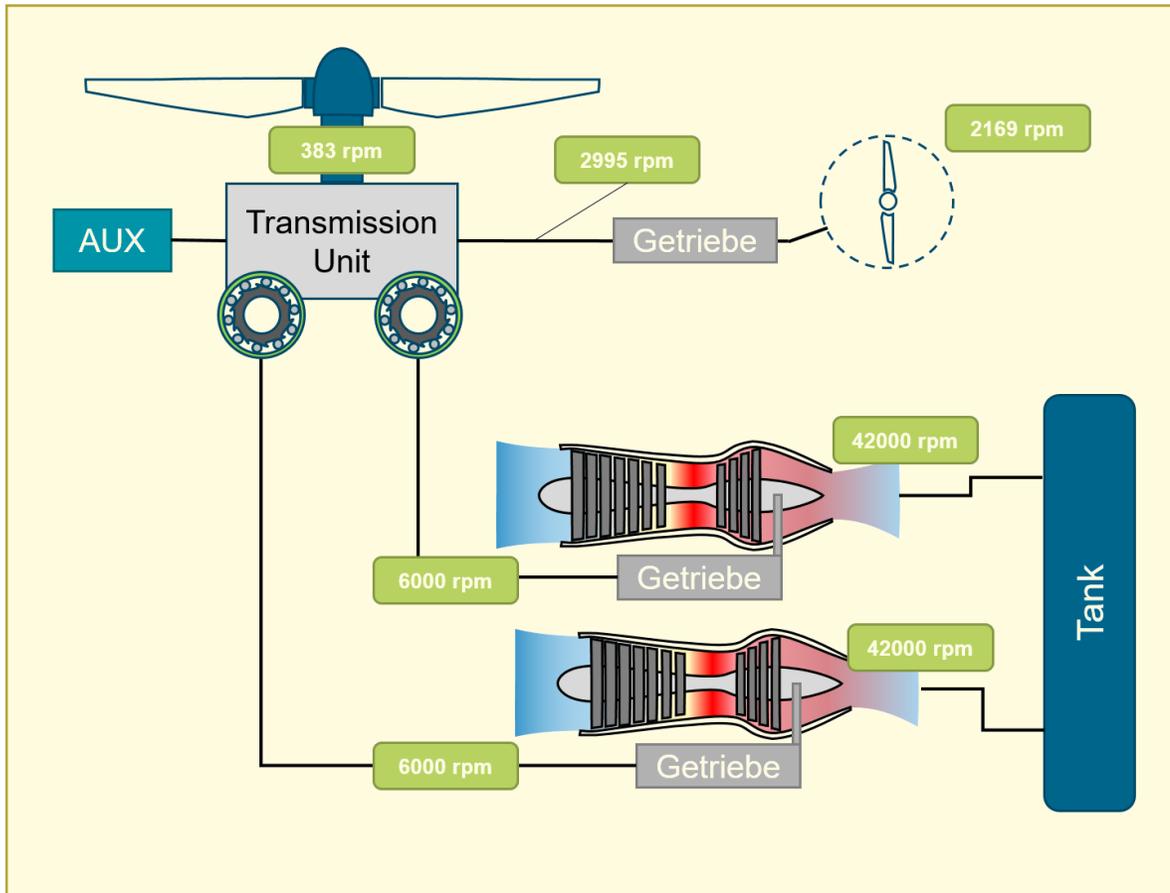
- Leichter Mehrzweckhubschrauber EC145 (BK 117 C-2)
- Zwei freilaufende Gasturbinen mit je 400 kW (MCP) / 550 kW (2,5 min OEI)
- Bis zu 8 PAX
- Für Lufttransport, VIP, medizinische Notfalleinsätze, Search and Rescue
- Ansatz: eine Gasturbine durch Elektrische Maschine ersetzen



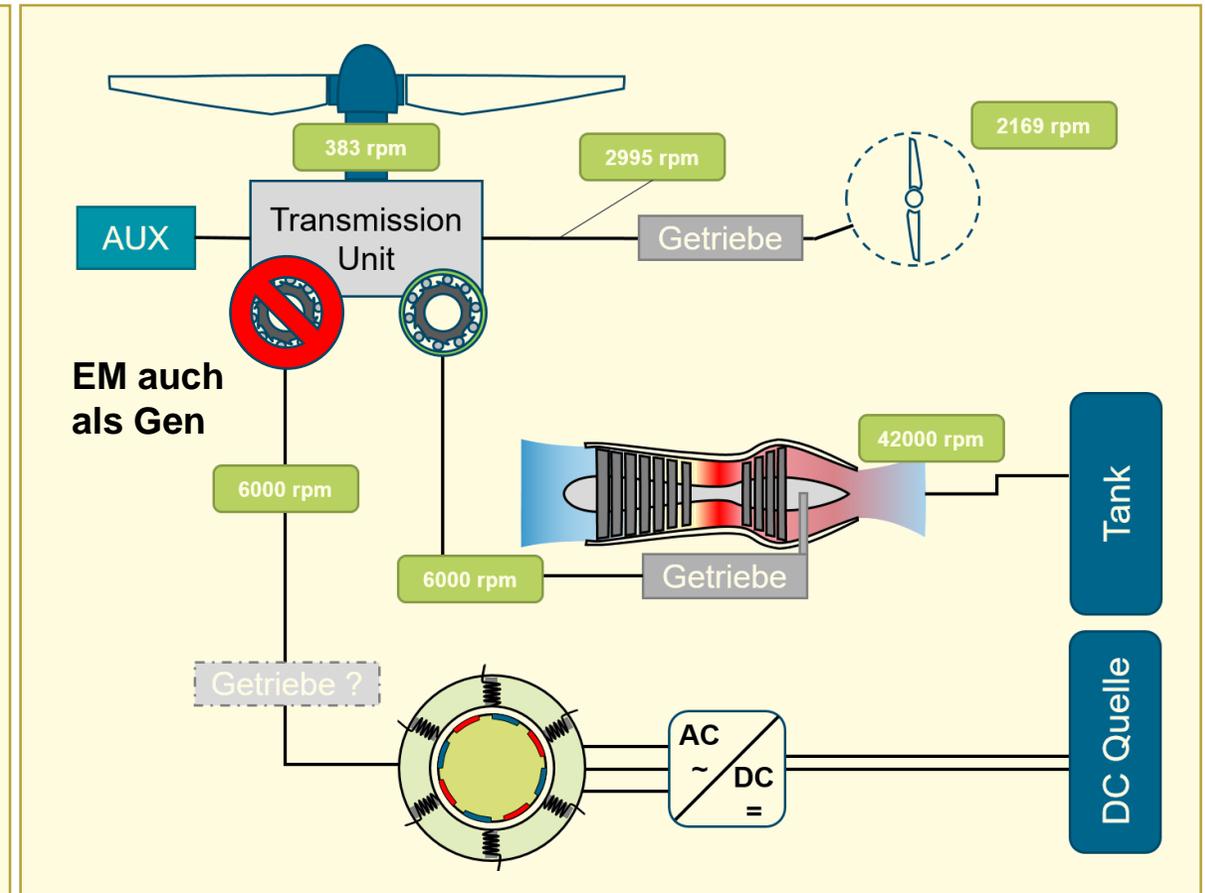
Abmaße des BK 117 C-2 [Eur].

Antriebsstrang

Klassischer Antriebsstrang



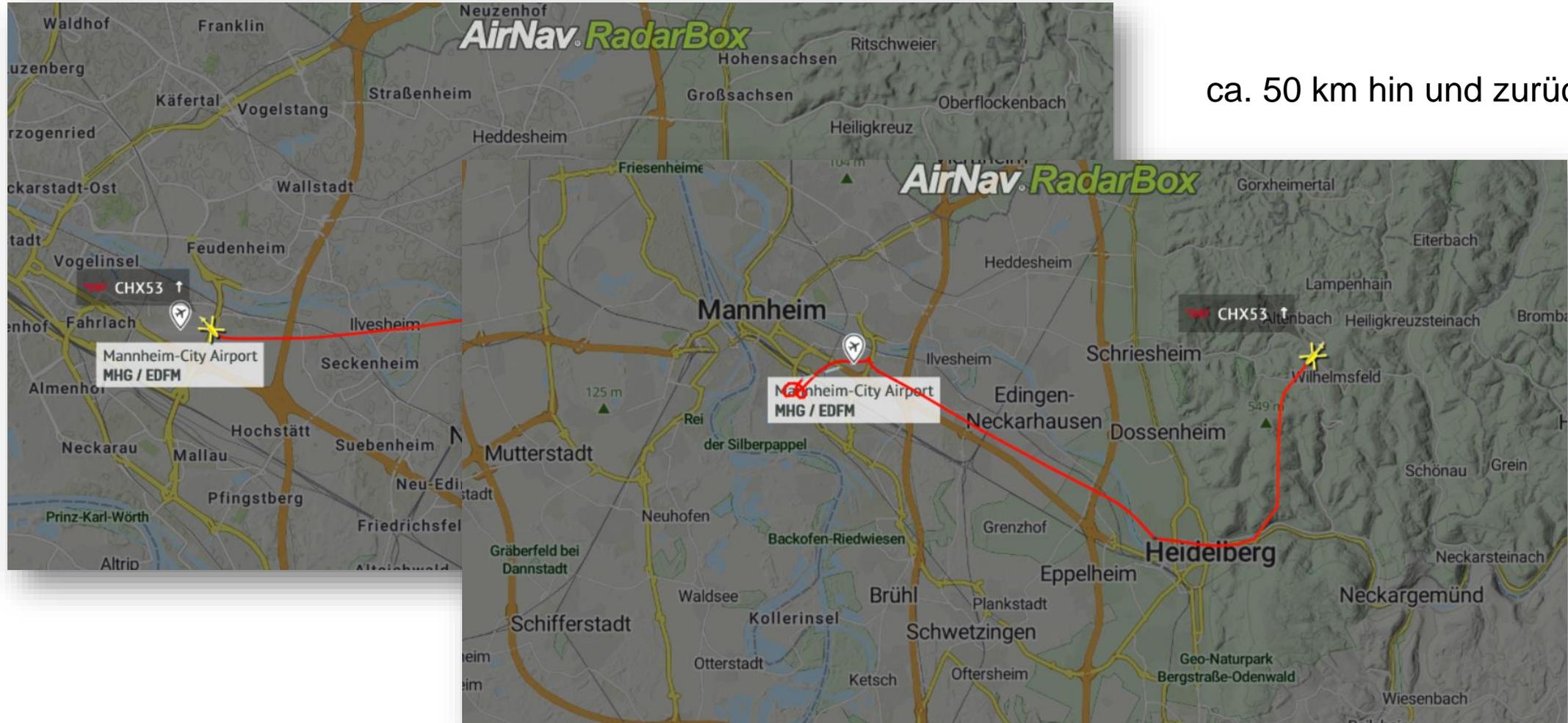
Antriebsstrang mit EM



Beispielmissionsprofil CHX3 der DRF

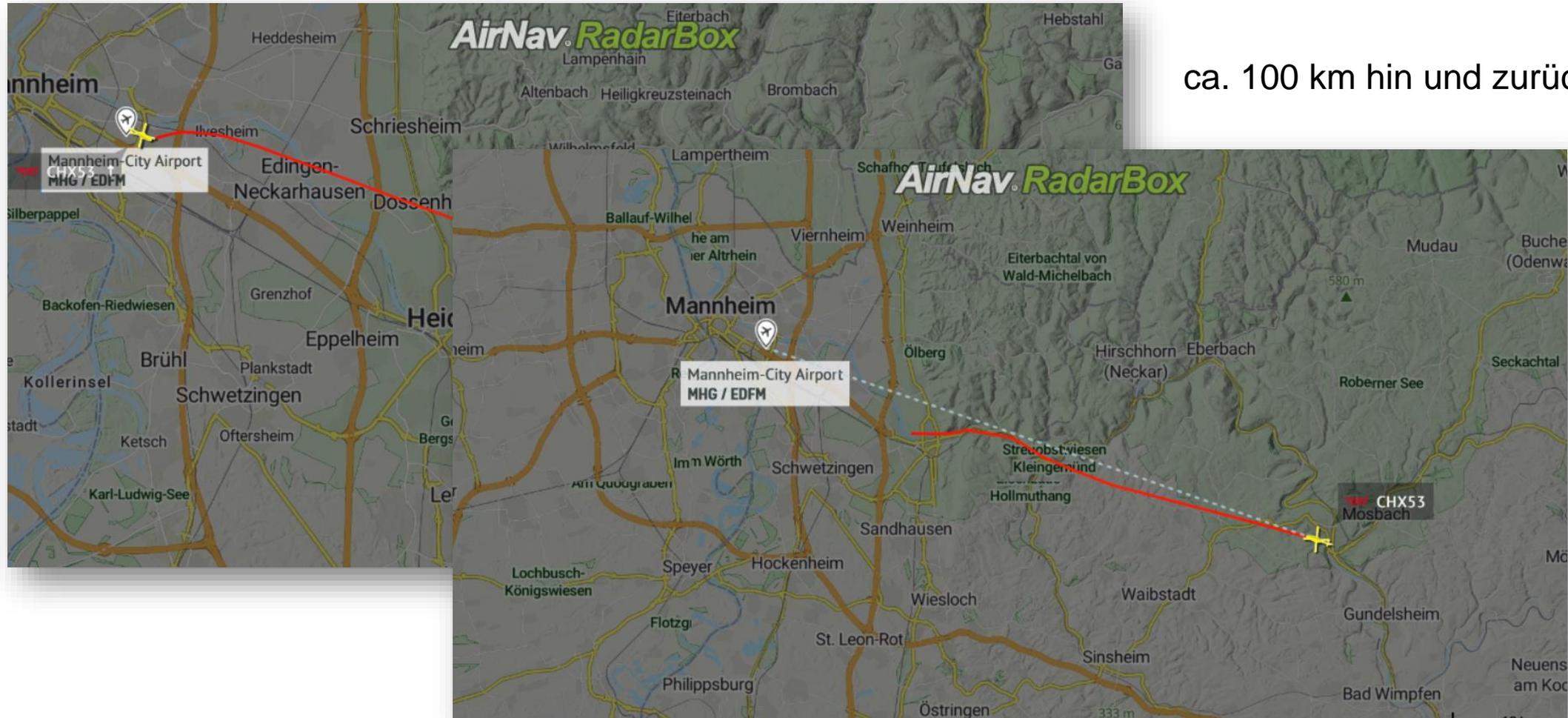


ca. 50 km hin und zurück



Quelle: AirNav RadarBox <https://www.radarbox.com/data/flights/null/2203245697>

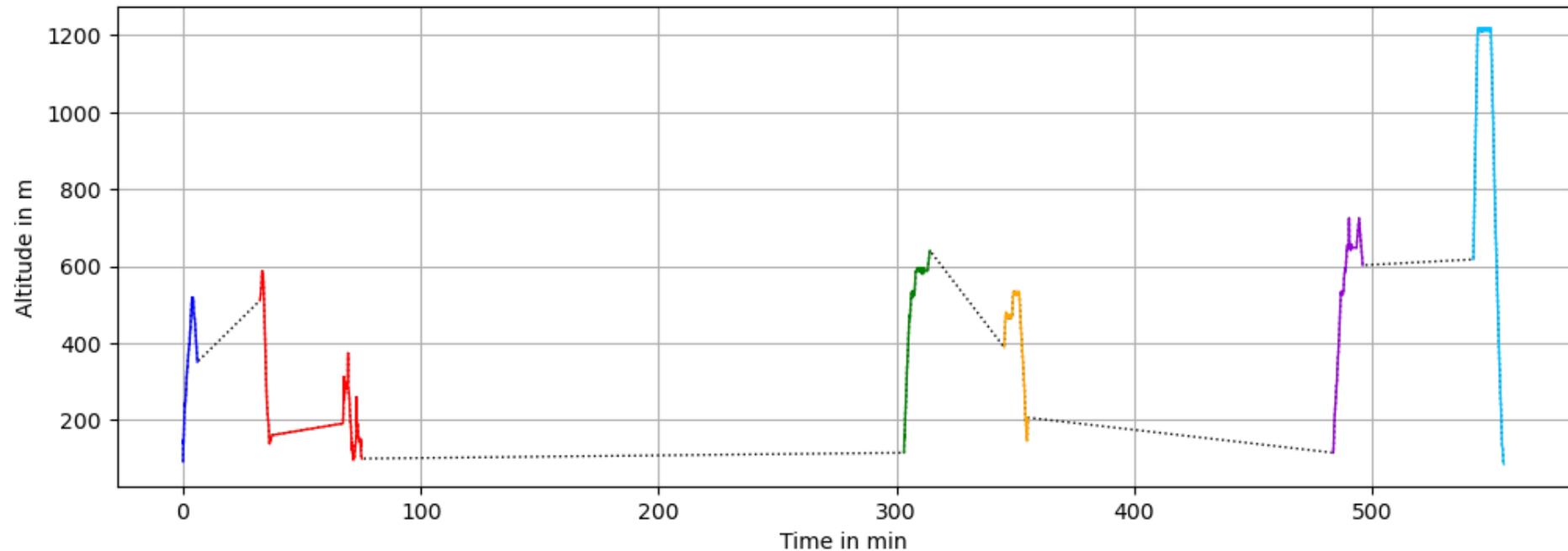
Beispielmissionsprofil CHX3 der DRF



ca. 100 km hin und zurück

Quelle: AirNav RadarBox <https://www.radarbox.com/data/flights/null/2203245697>

Beispielmissionsprofil CHX3 der DRF



Quelle: AirNav RadarBox <https://www.radarbox.com/data/flights/null/2203245697>

Überschlagene Abflugmasse



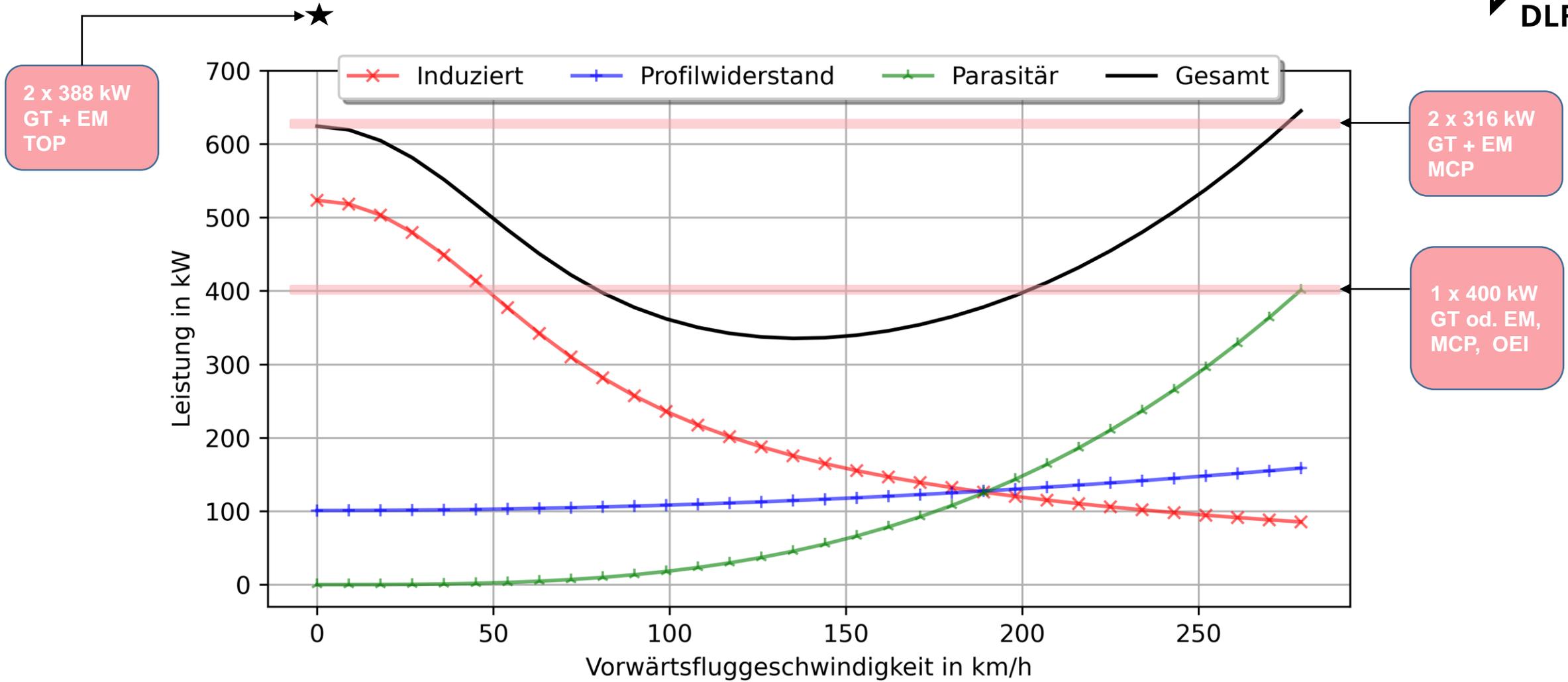
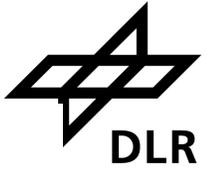
Parameter	Wert
Leergewicht	1792 kg
Pilot	80 kg
Arzt	80 kg
Patient	80 kg
EMR-Equipment	250 kg
Kraftstoff inkl. Reserve*	514 kg
Motor + Getriebe**	110 kg
Inverter	20 kg
Batterie***	715 kg
Gasturbine	-125 kg
Summe	3515 kg

* Bei Geschwindigkeit von 194 km/h (80% WRG), SFC 254 kg/h, 300 km Reichweite, 30 min Reserve

** kombiniertes Leistungsgewicht von 5 kW/kg

*** Leistungsdichte von 350 Wh/kg, elektr. Antriebsstrang 30 min aktiv

Leistungsbedarf im Vorwärtsflug

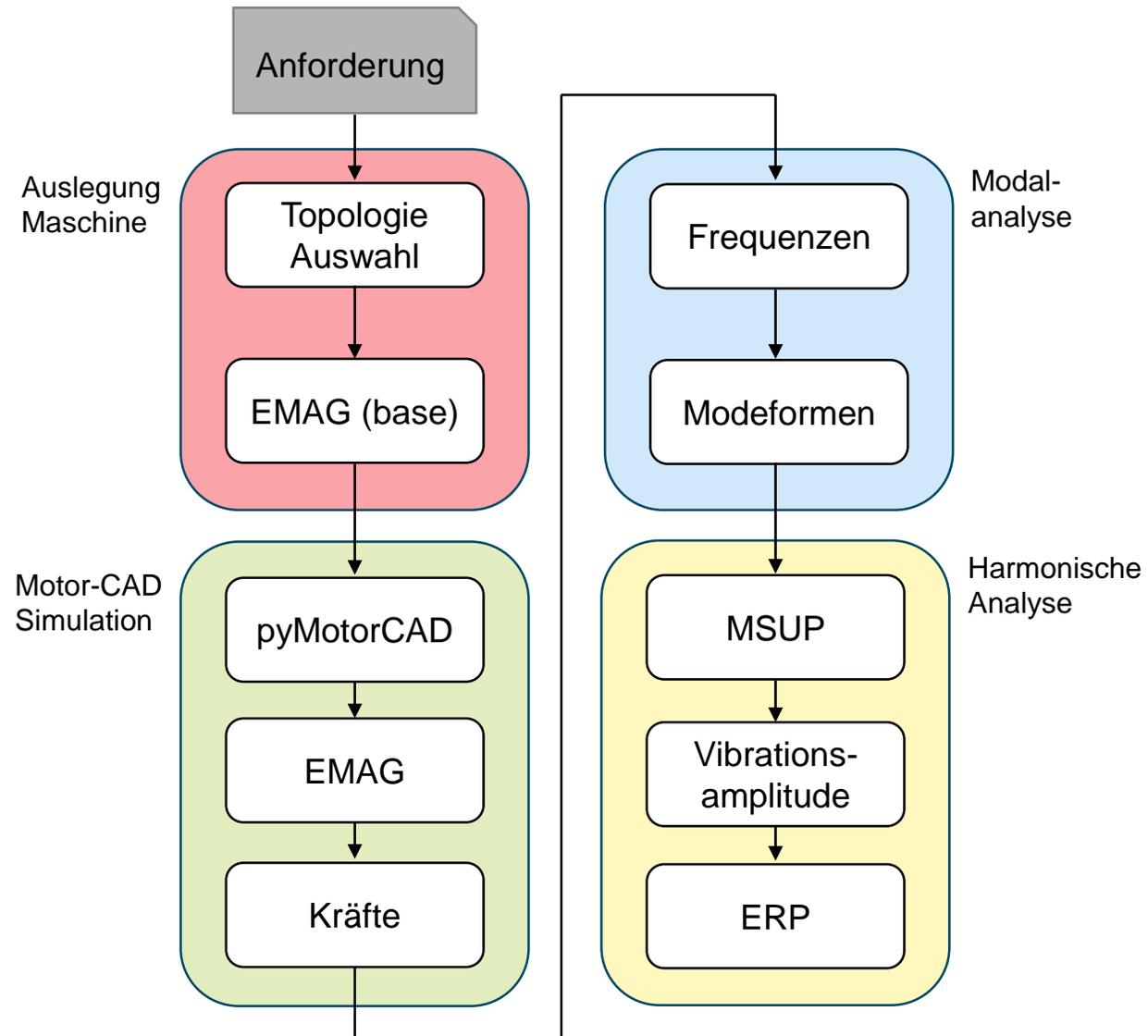


Anforderungen an die Maschine



Parameter	Symbol	Wert
Nennleistung (peak)	P_{peak}	500 kW
Drehzahl	n	12000 rpm
Nennfrequenz	f_{el}	1200 Hz
Anzahl Phasen	m	3
Luftspalt	d_{gap}	$\leq 1,5$ mm
Bus-Spannung	U_{Bus}	1400 VDC
Stromdichte	J	~ 18 Arms/mm ²
max. Zahninduktion	$B_{z,max}$	1,6 T
max. Rückeninduktion im Stator	$B_{r,max}$	1,5 T
Material Rotor + Stator		Vacoflux 50
Material Magnete		Vacodym 238 TP
Material Wicklung		Kupfer

Ablauf der Prozesskette



Auslegung der Maschine

- Auslegung der Maschine via freiverfügbarer Software
 - “Electric_Machine_Design”
 - von Svenja Kalt [Kal21]
- Simulation der Maschine in Ansys Motor-CAD
- Verwendung einer API zur Ansteuerung Motor-CAD via python (pyMotorCAD)
- Auslegung von Radialfluss-SPMSM mit drei unterschiedlichen Wicklungen

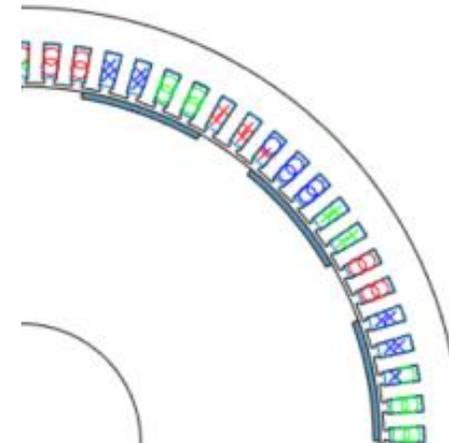
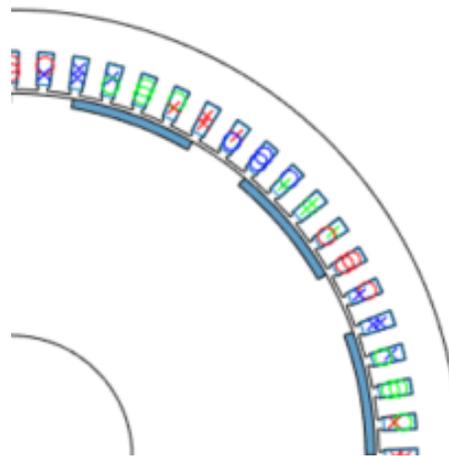
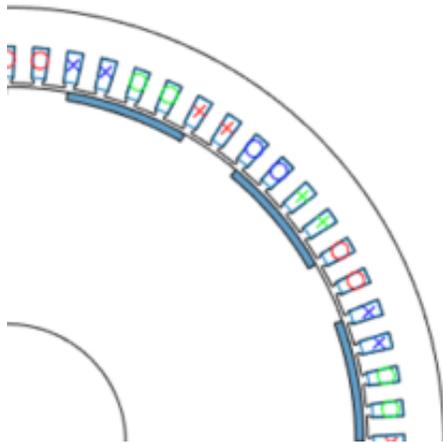


Die drei untersuchten Wicklungen

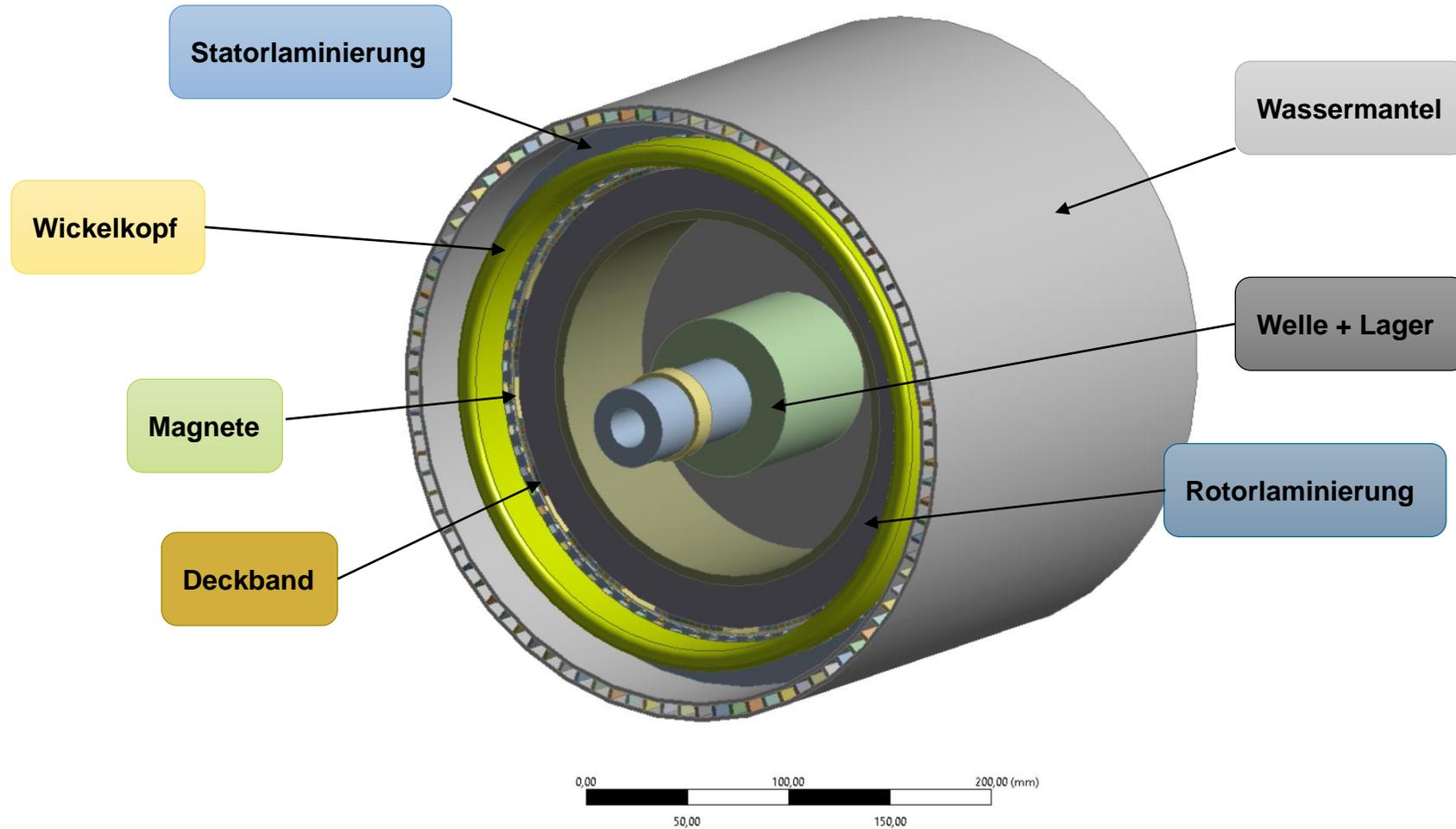
Case1: 1SGL
(N=72, q=2, S=1)

Case2: 2SGL
(N=72, q=2, S=0.8333)

Case3: 2SBL
(N=81, q=2.25, S=1.037)



Resultierende Maschine (Case 1: 1SGL)



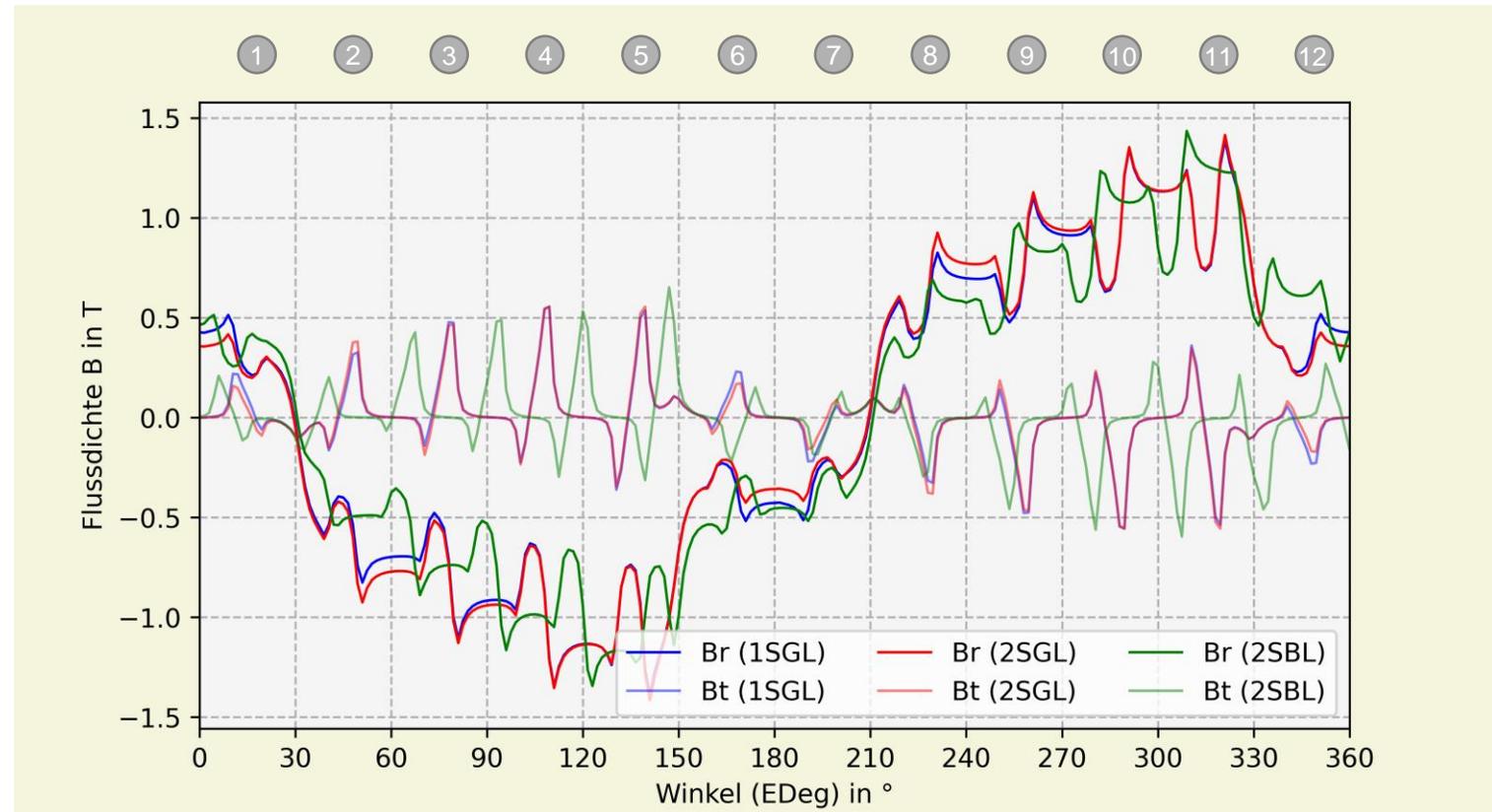
EMAG Ergebnisse der Maschinen



Parameter	Symbol	Case1: 1SGL	Case2: 2SGL	Case3: 2SBL
Stator Außendurchm.	D_{oD}	291 mm	293 mm	291 mm
Stator Innendurchm.	D_g	241 mm	241 mm	241 mm
Aktive Länge	L_{act}	155 mm	155 mm	155 mm
Nuten / Pole	–	72 / 12	72 / 12	81 / 12
Luftspalt	d_g	1,32 mm	1,32 mm	1,32 mm
Magnethöhe	h_{mag}	2,7 mm	3,1 mm	2,1 mm
Anzahl Phasen	–	3	3	3
Leistung (Peak)	P_{peak}	512 kW	511 kW	508 kW
Drehmoment (Peak)	M_{peak}	407 Nm	407 Nm	405 Nm
Drehzahl	n	12000 rpm	12000 rpm	12000 rpm
Strombelag	A	46 kA/m	46 kA/m	52 kA/m
Elektrische Frequenz	$f_{el,max}$	1200 Hz	1200 Hz	1200 Hz
Effizienz	η	96,3	96,3	95,9 %
Stromdichte	J_{rms}	18,9 Arms / mm ²	18,9 Arms / mm ²	16,8 Arms / mm ²

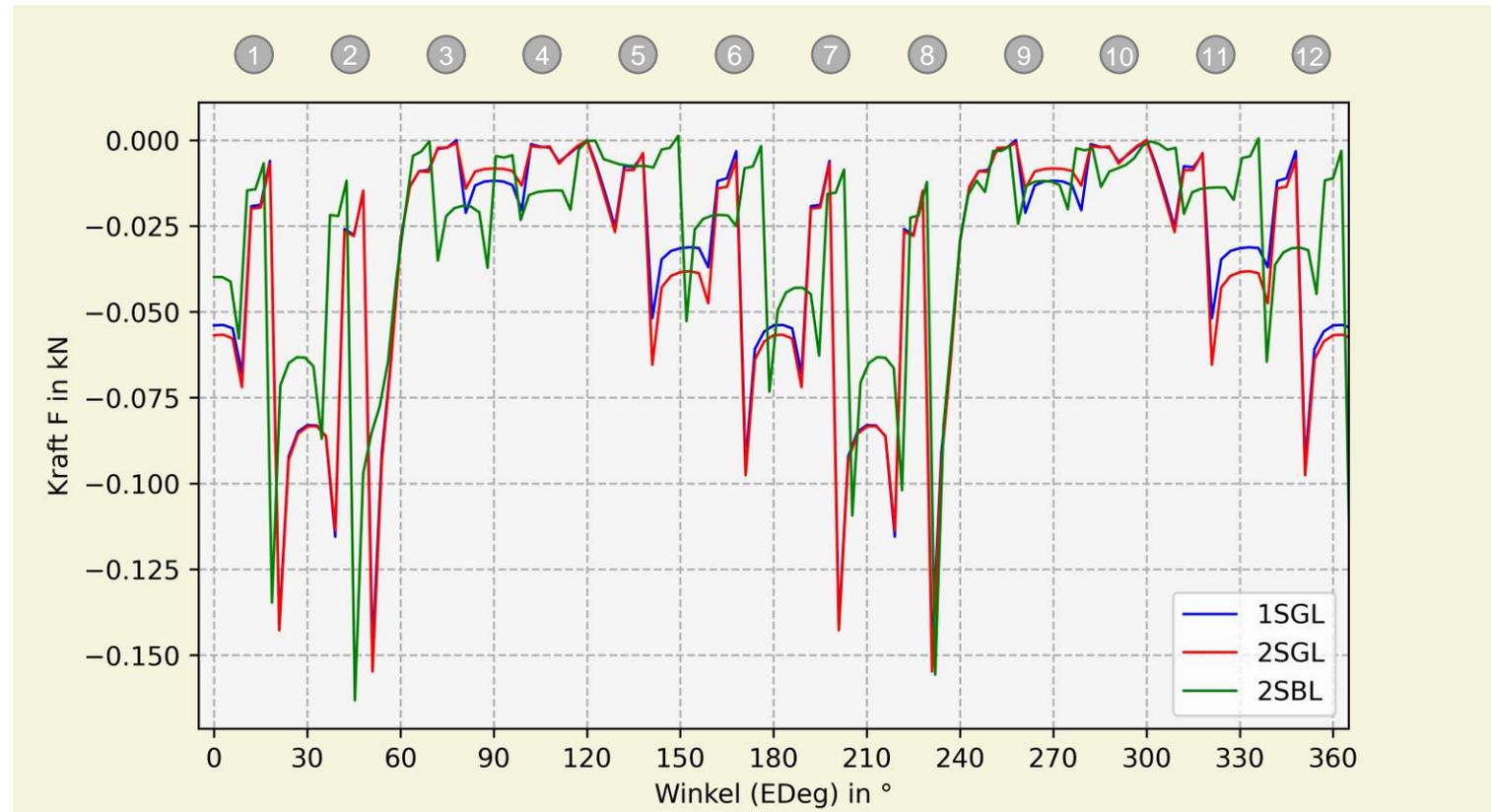
Flussdichte im Luftspalt bei Auslegungsdrehzahl

- Zu einem Zeitpunkt t
- 12 Nuten pro Polpaar in den ersten beiden Cases (EDeg!)
- 13,5 Nuten für 2SBL



Luftspaltkräfte bei Auslegungsdrehzahl

- Zu einem Zeitpunkt t
- Radialkraft
- ermittelt auf Basis der Flusssichte im Luftspalt (B_t und B_r)
- also 2D



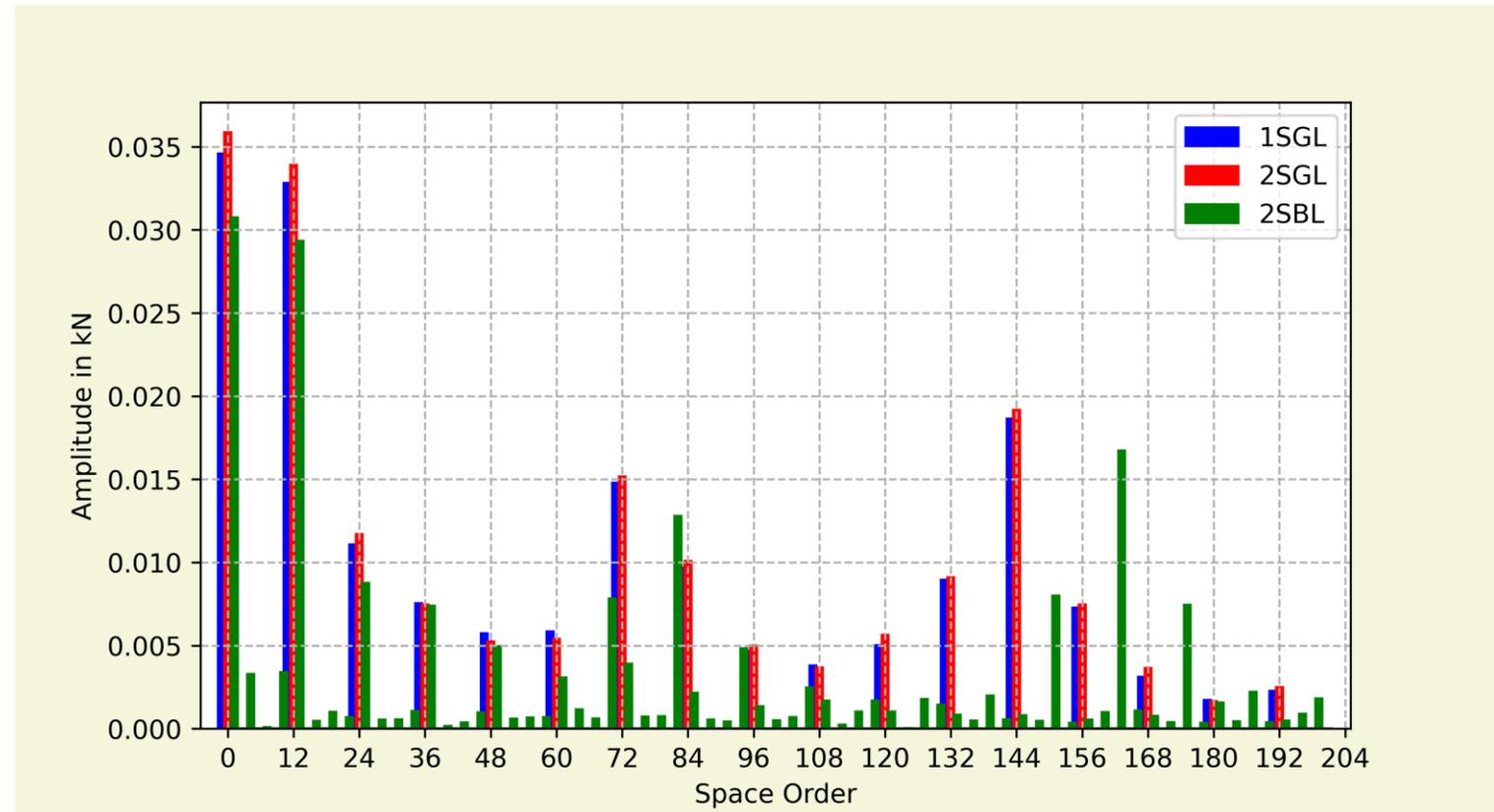
Space Orders r bei Auslegungsdrehzahl

Mode $r_0 = 0$
(‘Breathing’)

Mode $r_{n,SGL} = 12n$

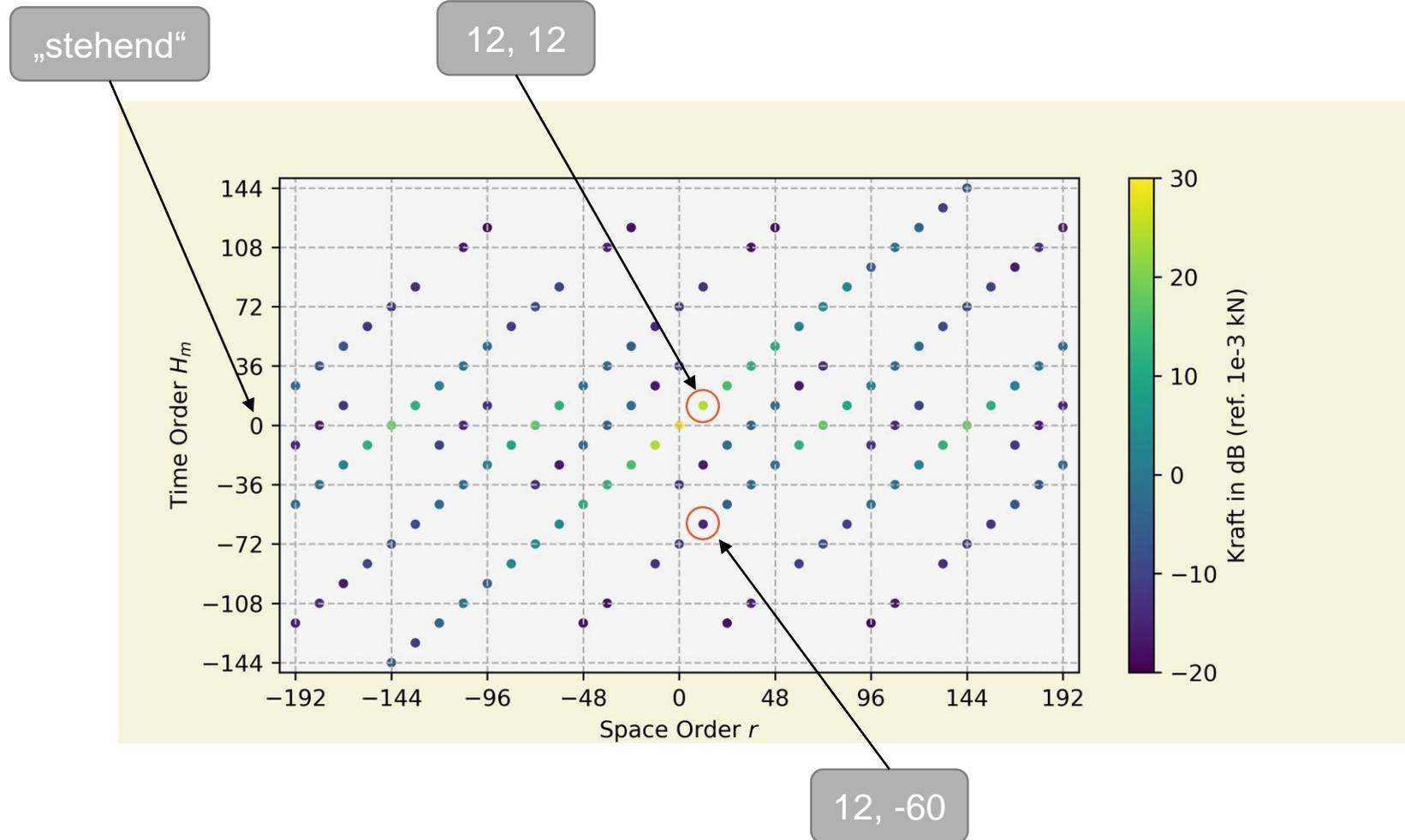
Mode $r_{n,SBL} = 3n$

- Fourier-Zerlegung der Kraftwelle
- zeitabhängig
- Zeigt Form der Kraftwelle und zugehörige Amplitude der Kraft



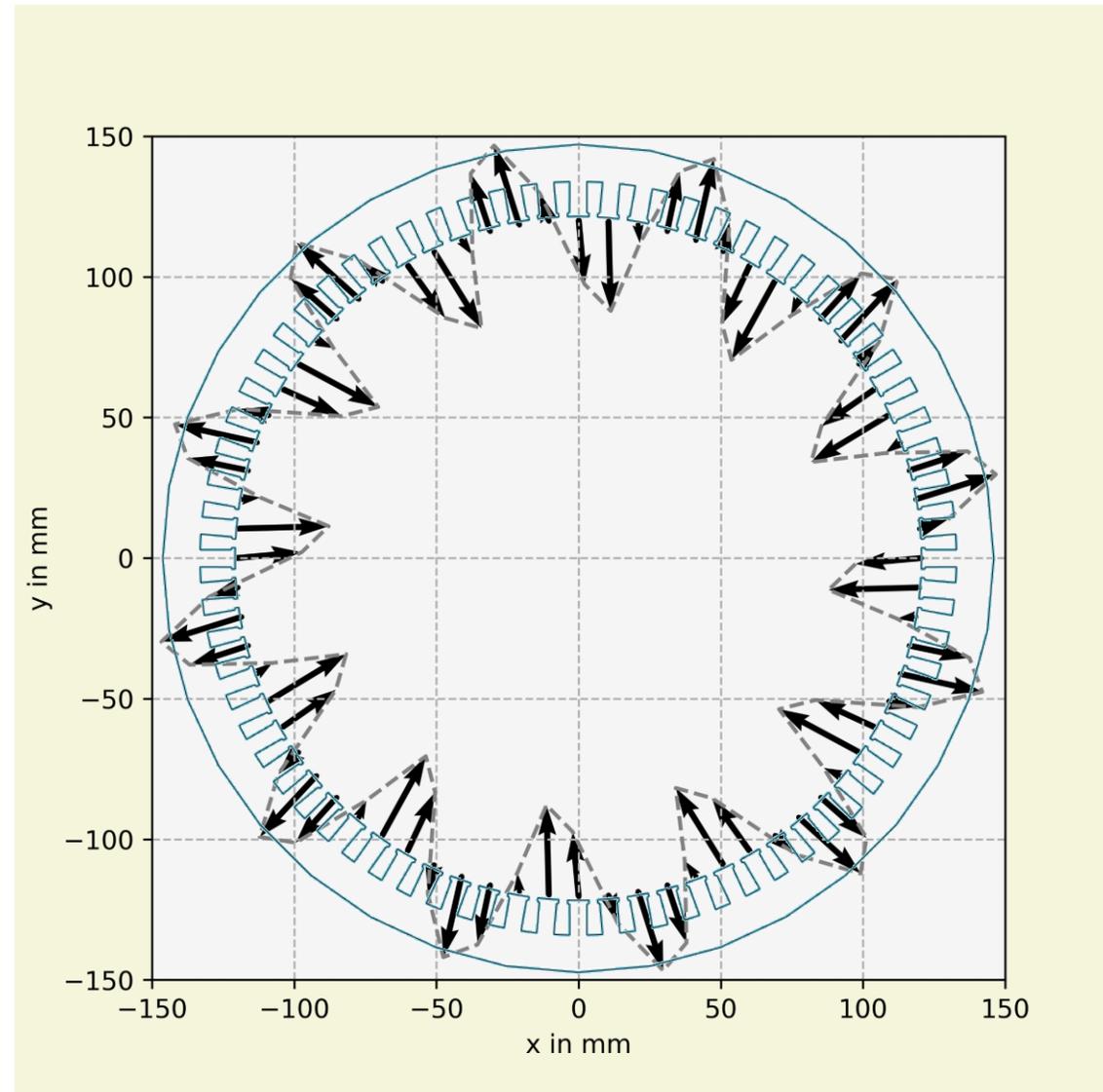
Space vs. Time Order

- Space Orders treten bei Vielfachen der mechanischen Drehzahl auf
- Analytisch ermittelbar via *GCD* und *LCM*
- Noch keine Akustik



Lumped Forces Modell

- Luftspaltkräfte an den Statorzähnen
- Vereinfachung: *Lumped Force*
- durch Integration der Maxwell-Spannungen
- für $r = 12$ und $H_m = 12$ (H12)

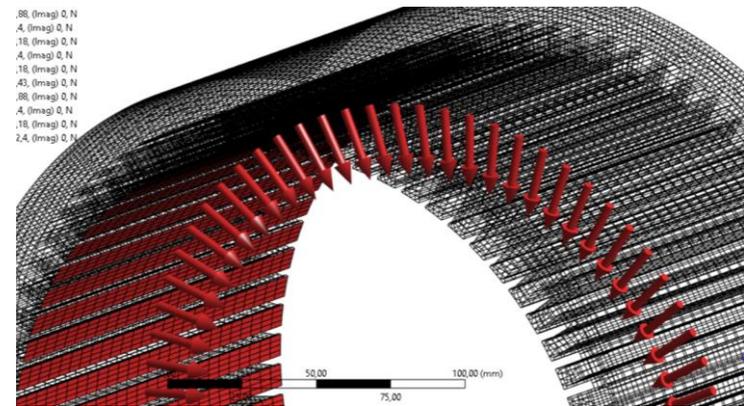
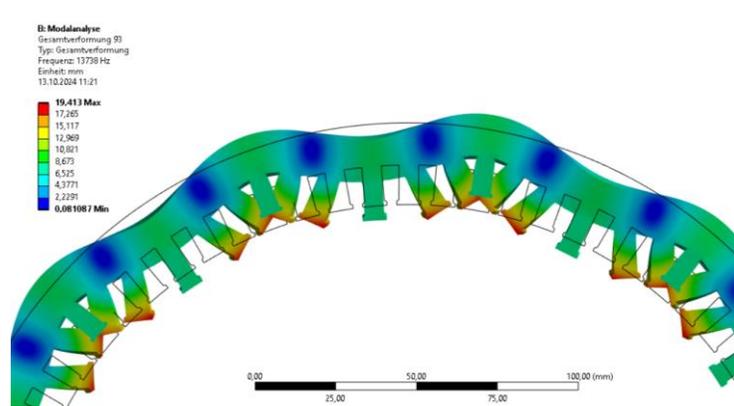
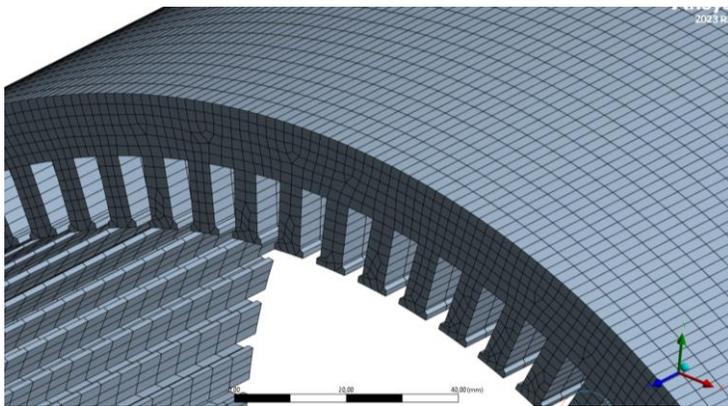


Modal- und Harmonische Analyse

FEM Netz mit 118k Elementen.
Keine Netzstudie durchgeführt.

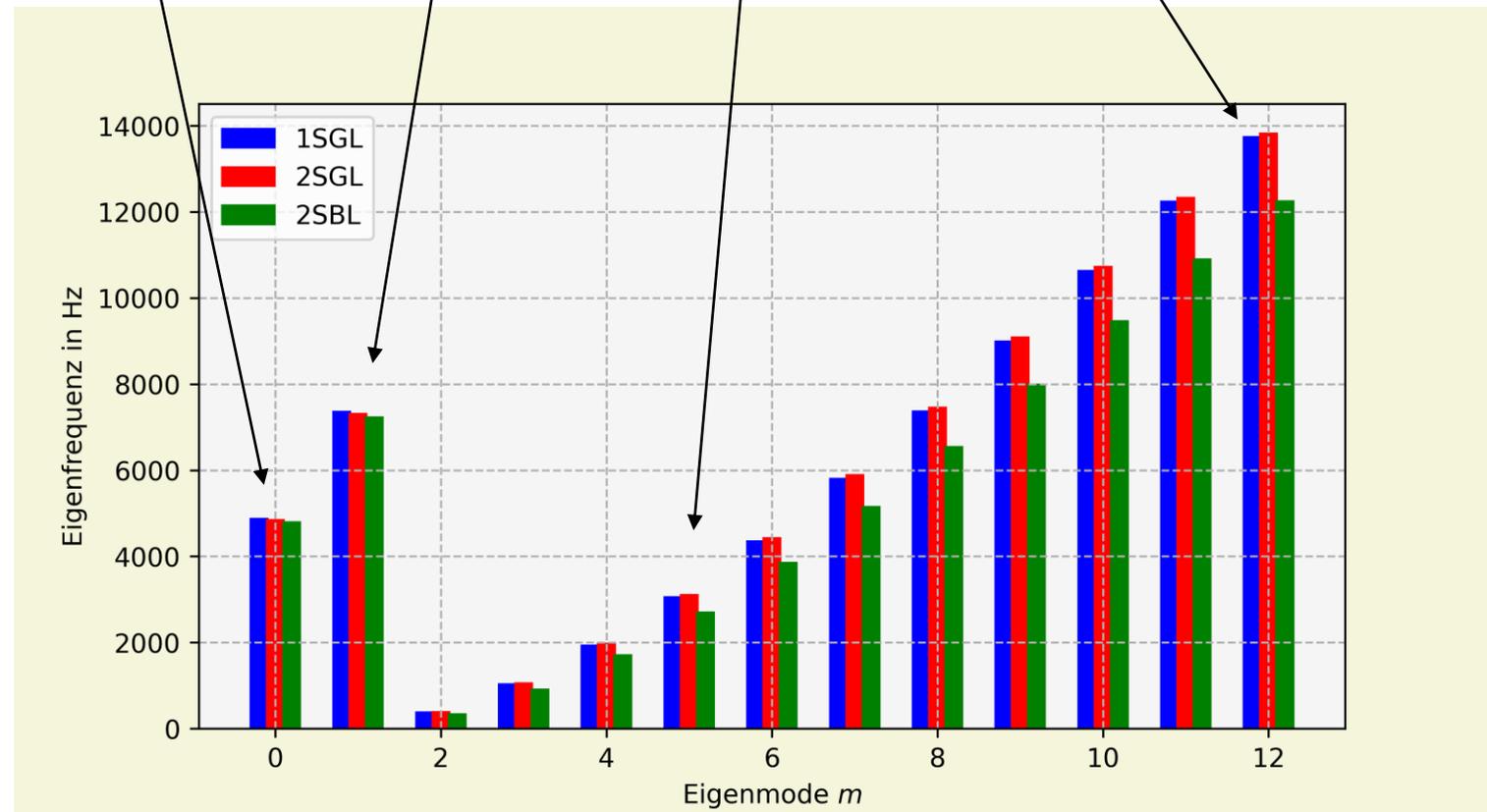
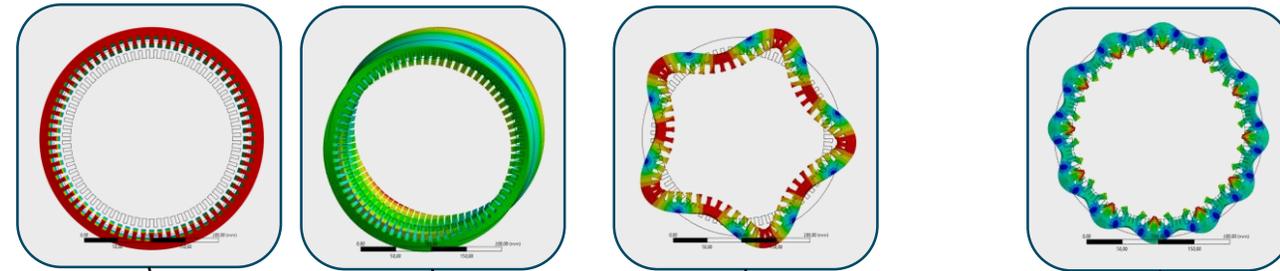
Modalanalyse
für die ersten 200 Moden.

Harmonische Analyse für 21
Drehzahlen von 250 bis 20 krpm.



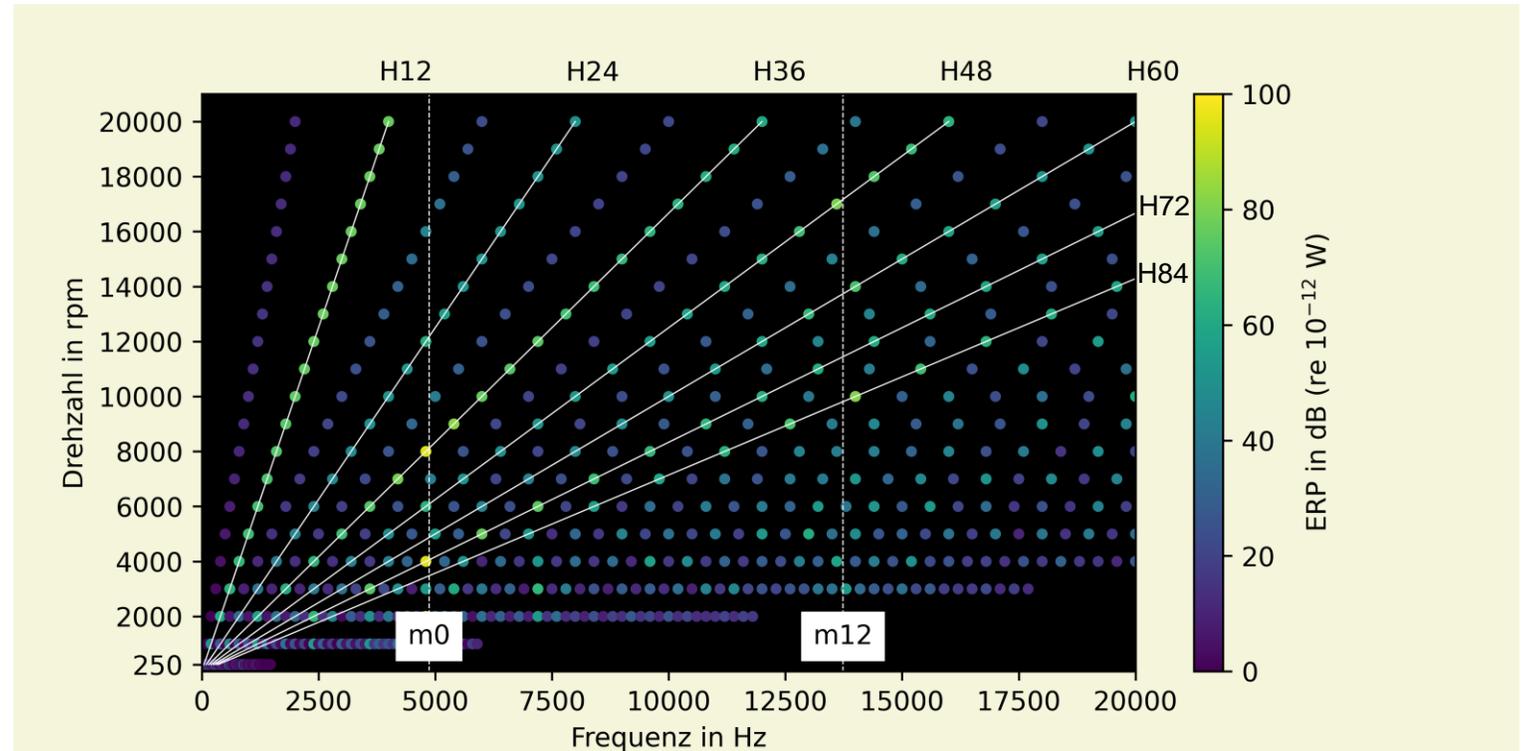
Eigenfrequenzen (des Stators)

- Nur Betrachtung des Stators
- Erhöhtes Geräusch bei Anregung (Resonanz)



Wasserfalldiagramm

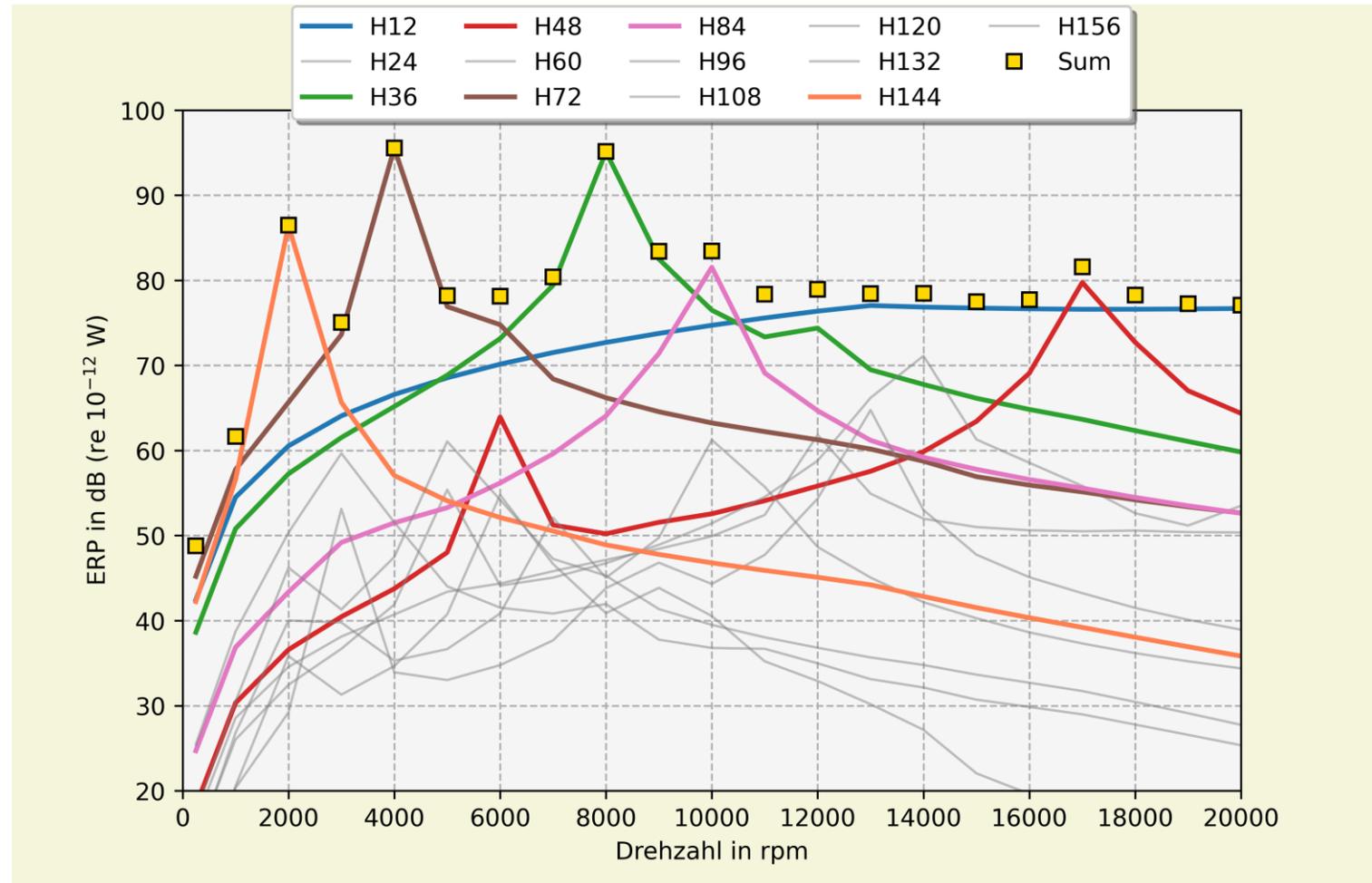
- beispielhaft für Maschine 1SGL
- Eigenfrequenz für m0 und m12 eingetragen
- Drehzahlharmonische H12 bis H84



Order Tracking : 1SGL

- Time Order mit hohem ERP Beitrag hervorgehoben
- Anregung m0 und m12

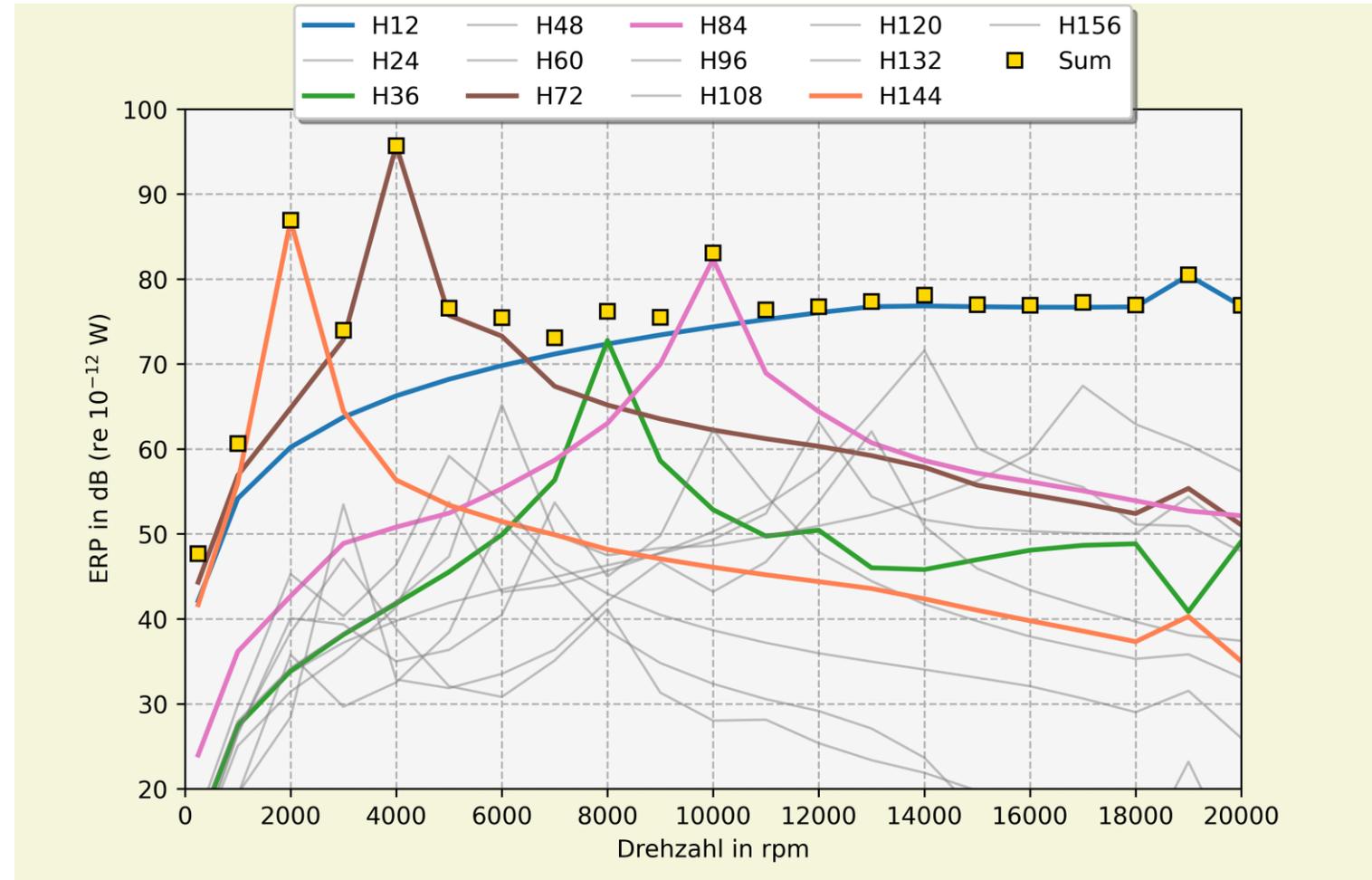
H12	m12
H36	m0
H48	m0 + m12
H72	m0
H84	m12
H144	m0



Order Tracking : 2SGL

- Time Order mit hohem ERP Beitrag hervorgehoben
- Anregung m0 und m12

H12	m12
H36	m0
H48	m0 + m12
H72	m0
H84	m12
H144	m0



Zusammenfassung und nächste Schritte



- Auslegung dreier SPMSM Maschinen im Kontext elektrifizierter Hubschrauber
- Emag-, Modal- und Harmonische Analyse durchgeführt
- dabei nur Berücksichtigung des Stators
- Etablierung der Prozesskette

Zusammenfassung und nächste Schritte



- Maschinen detaillierter untersuchen
- Abgleich mit analytischer Modellierung (B-Feld, Kraft, ERP)
- Berücksichtigung Gehäuse, Wicklung, etc.
- Eigenformen in Axialrichtung
- Abgleich mit weiterer FEM Software
- Ganzheitliche Optimierung bei Auslegung der Maschine
- Motoransteuerung mittels PWM

Vielen Dank für das Interesse

Kontakt:

Sebastian Hakansson

Institut für Elektrifizierte Luftfahrtantriebe, Umweltwirkungen und Sensorik

Telefon +49 355 28888 002

Sebastian.Hakansson@dlr.de

**Auslegung der Maschine mit „Electric_Machine_Design“ Tool von Svenja Kalt
Elektromagnetische Simulation mit Ansys MotorCAD
Modalanalysen und ERP Berechnung mit Ansys Mechanical**

Quellen



(Euc)	European Commission (2011): Flightpath 2050: Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs. Publications Office of the European Union Luxembourg
(Zep)	Matthias Zepper. Rettungshubschrauber vom Typ BK 117-C2 (EC-145) der Schweizerischen Rettungsflugwacht. Zugriff: 2024-07-02. URL: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5755382 .
(Sch+14)	Schatz, R., Heger, R., & Korntheuer, P. (2014). EC145 Mercedes-Benz Style with advanced interior acoustics. <i>Proceedings of ISMA2014 including USD, 2014</i> , 4047-4062.
(Eur)	Eurocopter. Eurocopter: EC145 Technical Data. Zugriff: 2024-05-29. URL: https://web.archive.org/web/20061111163435/http://www.eurocopter.com/ec145/TD_EC145.pdf .
(Eura)	Eurocopter. Eurocopter: EC145 Technical Data. Zugriff: 2024-05-29. URL: http://www.helicomontage.fr/photosecour/DOC_EC145_data.pdf .
(Kal21)	Kalt, Svenja. Automatisierte Auslegung Elektrischer Antriebsmaschinen zur Anwendungsspezifischen Optimierung. 2021. Doktorarbeit. Technische Universität München.
(Far+18)	Faria, C. T., Chauvicourt, F., Hallez, R., Colangeli, C., Cuenca, J., Van der Auweraer, H., ... & Broca, O. (2018, July). Early-stages comfort simulation of an e-aircraft. In <i>2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)</i> (pp. 1-16). IEEE.

(Bol+22)	Bolvashenkov, I., Kammermann, J., Rubinraut, A., Herzog, H. G., Frenkel, I., Bolvashenkov, I., ... & Frenkel, I. (2022). Design and Feasibility of Electrical Version of Search-and-Rescue Helicopter Based on Eurocopter. <i>Vehicle Electrification: On Water, in Air and Space</i> , 41-61.
(Lak+21)	Lakkis, J., & Bil, C. (2021). Conceptual Design Study of a High-Altitude Mountain Rescue Rotorcraft. In <i>Transdisciplinary Engineering for Resilience: Responding to System Disruptions</i> (pp. 487-496). IOS Press.
(Ser+19)	Serafini, J., Cremaschini, M., Bernardini, G., Solero, L., Ficuciello, C., & Gennaretti, M. (2019). Conceptual all-electric retrofit of helicopters: Review, technological outlook, and a sample design. <i>IEEE Transactions on Transportation Electrification</i> , 5(3), 782-794.
(Dur+10)	Durkee, S. R., & Mütze, A. (2010). Conceptual design of an electric helicopter powertrain.
(Weg+24)	Wegener, E., & Waimer M., & Schatrow P. (2024). Crashworthy Battery Integration For A Medium-Lift Hybrid-Electric Helicopter. <i>50th European Rotorcraft Forum</i>
(Zag+23)	Zaghari, B., Kiran, A., Sinnige, T., Pontika, E., Enalou, H. B., Kipouros, T., & Laskaridis, P. (2023). The impact of electric machine and propeller coupling design on electrified aircraft noise and performance. In <i>AIAA SciTech 2023 Forum</i> (p. 2133).

(Man+24)	Mane, M. V., Sonawwanay, P. D., Solanki, M., & Patel, V. (2024). A Comprehensive Review on Advancements in Noise Reduction for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). <i>Journal of Vibration Engineering & Technologies</i> , 1-23.
(Huf+18)	Huff, D. L., & Henderson, B. S. (2018). Electric motor noise for small quadcopters: Part 1–Acoustic Measurements. In <i>2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference</i> (p. 2952).