

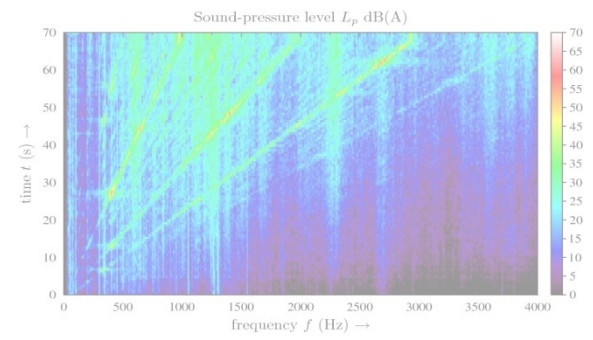
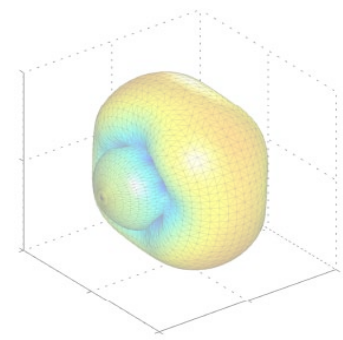
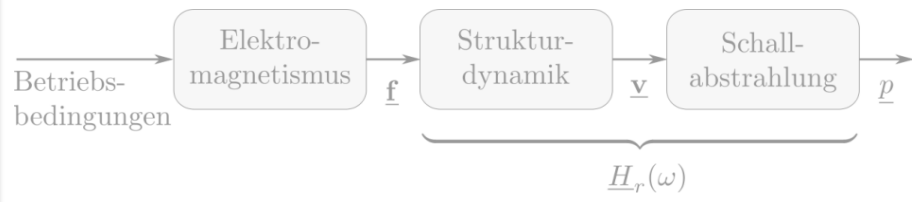
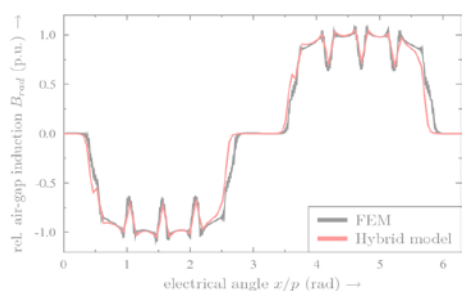
Simulation, Abstrahlung und Auralisation von E-Maschinen

Dipl.-Ing. David Franck

Dipl.-Ing. Pascal Dietrich

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Kay Hameyer

Prof. Dr. rer. nat. Michael Vorländer

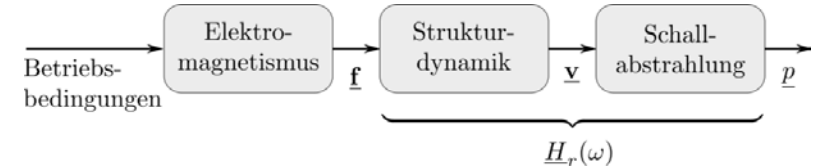


- Einsatz elektrischer Antriebe verändert Klangbild
- Stark tonale Geräusche
- Einzeltöne werden tendenziell als unangenehm wahrgenommen
- Diese Geräusche können im empfindlichen Bereich des menschlichen Ohrs liegen
- Simulationsmethoden zur Vorherberechnung notwendig
- Anpassung der Klangcharakteristik durch Design des elektromagnetischen Kreises möglich



Bild: <http://www.teslamotors.com/>
 Ton: <http://www.optionauto.com/>

- Grundlagen Geräuscentstehung von E-Maschinen

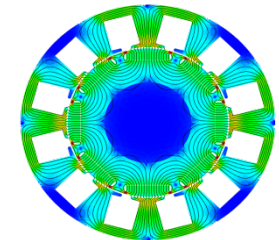


- Simulationskonzept

- Simulation und Zerlegung elektromagnetischer Kräfte

- Struktur-dynamik

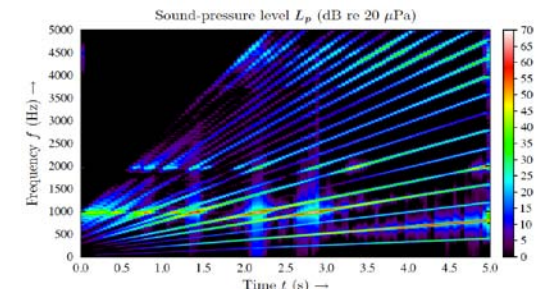
- Akustische Abstrahlung



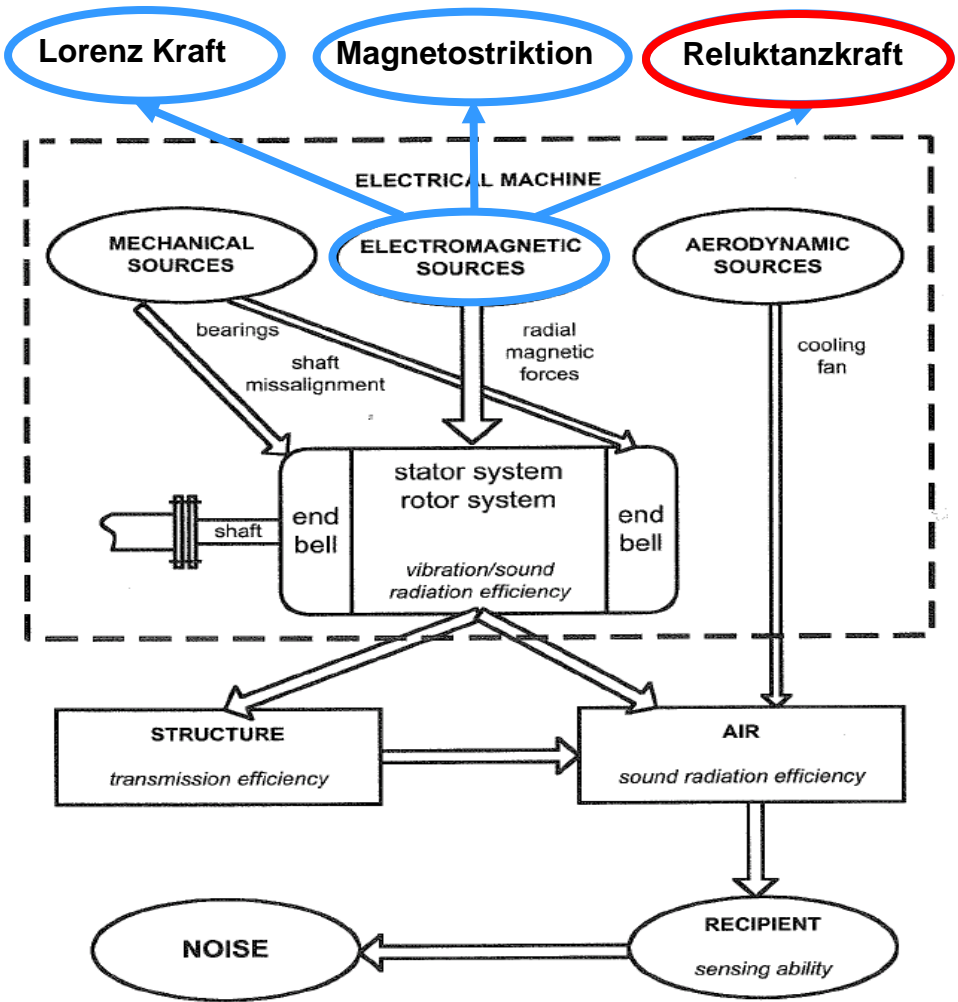
- Simulation eines Beschleunigungsvorgangs

- Optimierung der Schallabstrahlung einer E-Maschine

- Ausblick und Zusammenfassung



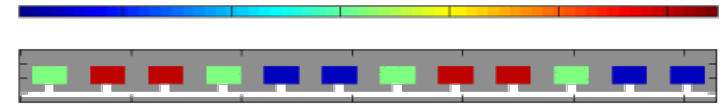
Geräuschursachen



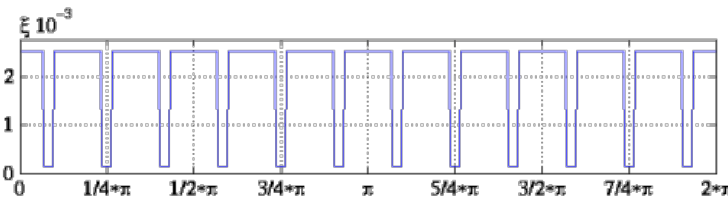
Source: [2]

Magnetgeräusch Anregung

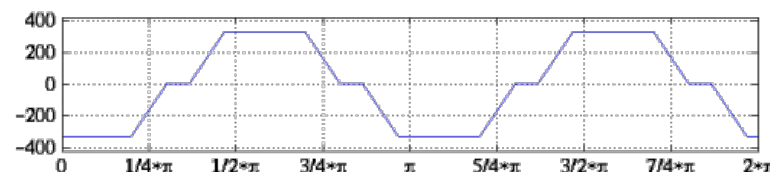
Maschine



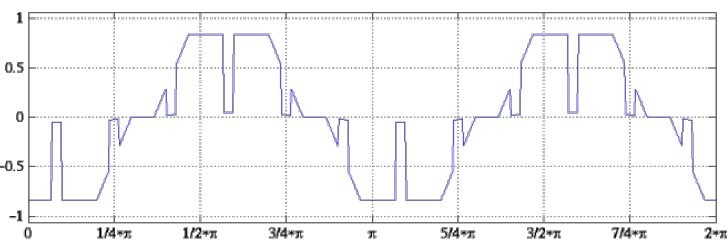
Nutungspermeanz



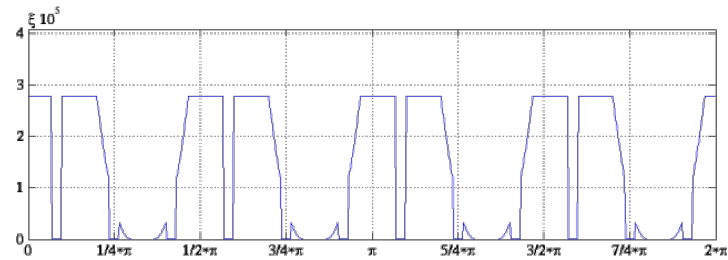
Durchflutung

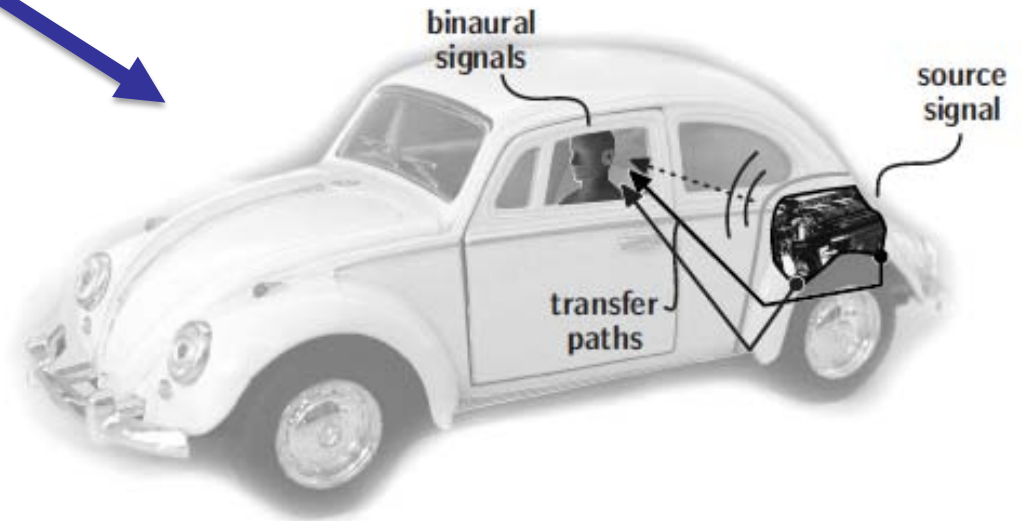
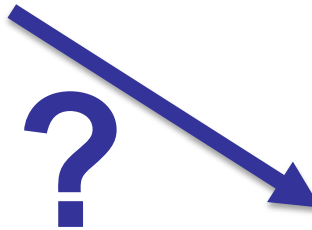


Magn. Flussdichte

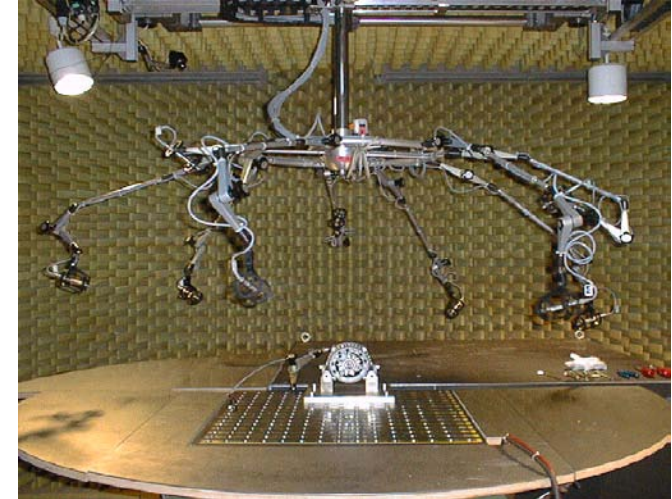
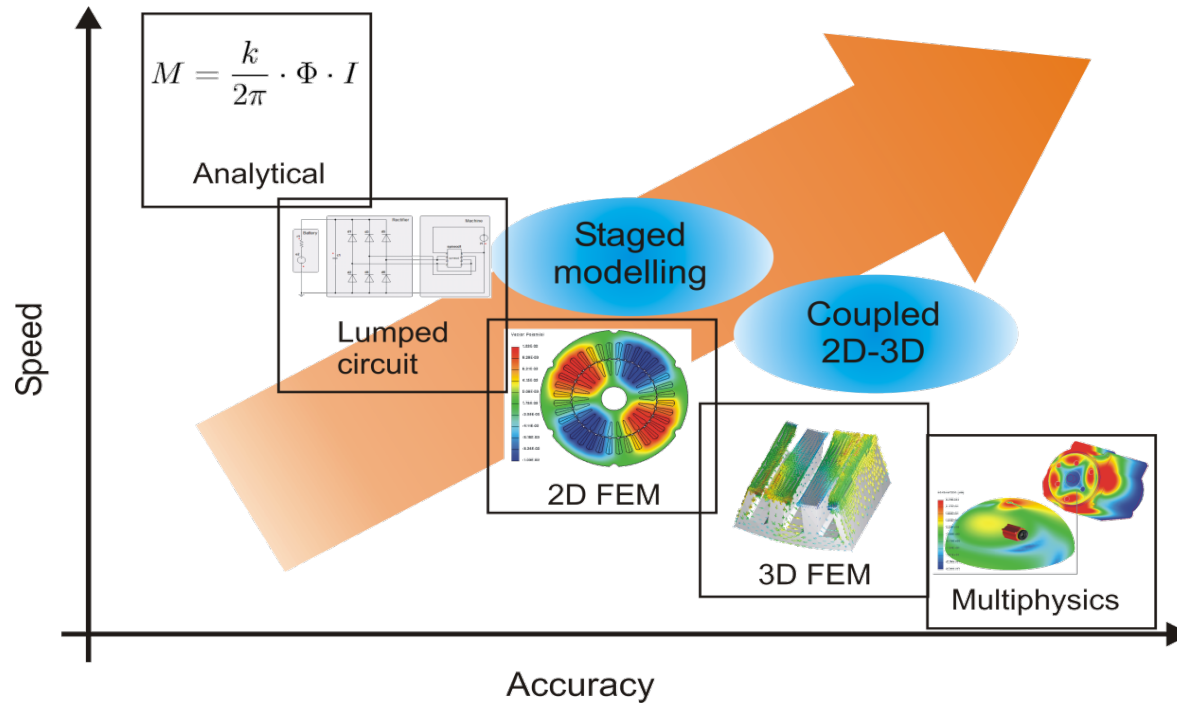


Magn. Kraftdichte

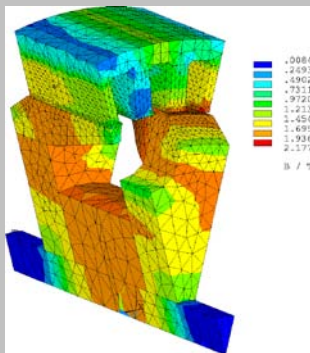




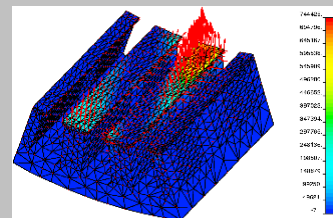
Quelle: Vorländer, M.: Auralization – Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality, Springer, 2007



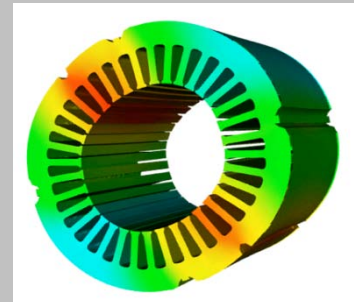
Magnetfeld



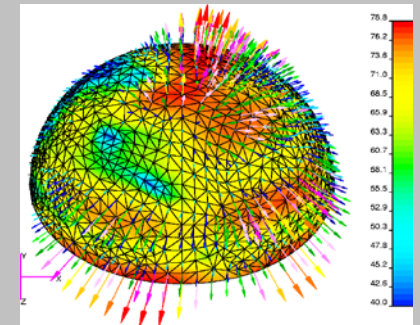
Kräfte



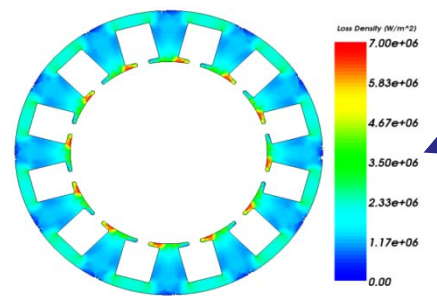
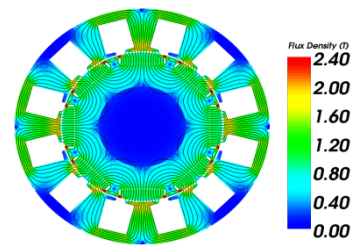
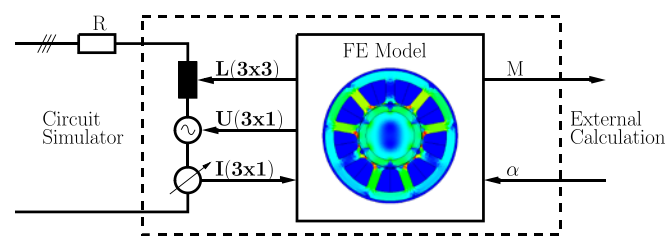
Verformung



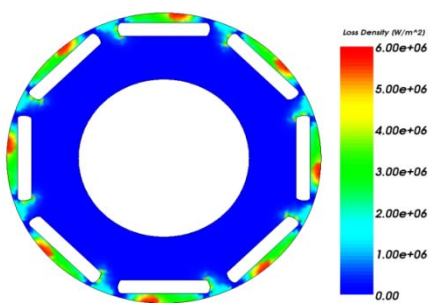
Akustische Abstrahlung



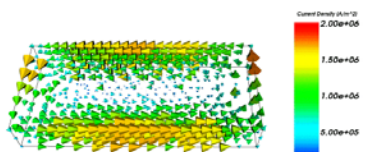
Betriebsstrategie



Verlustleistungsdichte



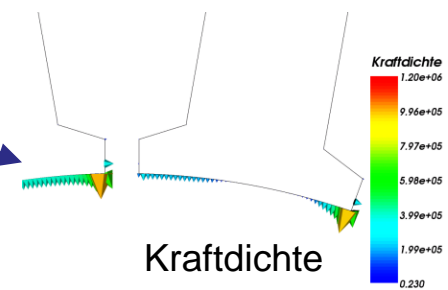
Verlustleistungsdichte



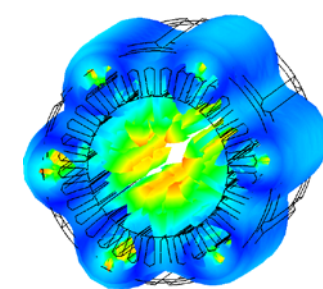
Wirbelstromdichte

Berechnung T, η

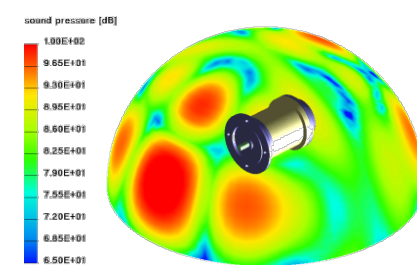
Berechnung lokaler Kräfte



Kraftdichte

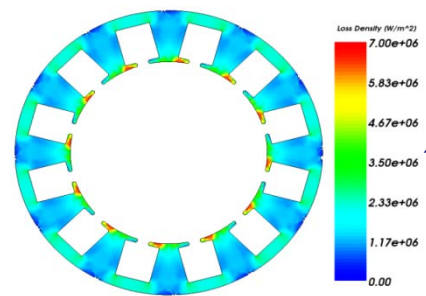
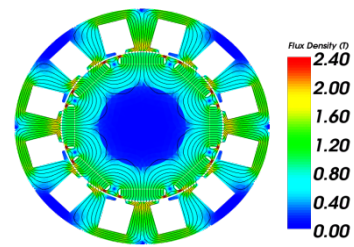
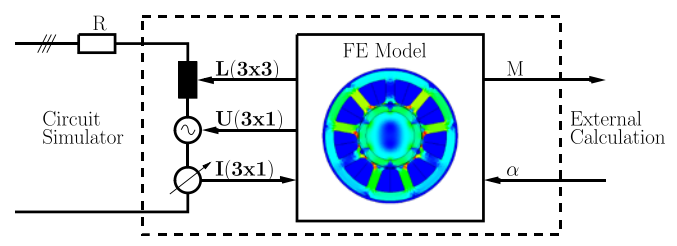


Verformung



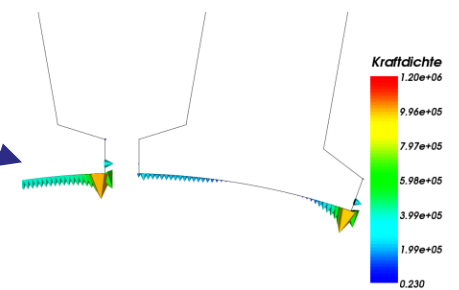
Abstrahlcharakteristik

Betriebsstrategie

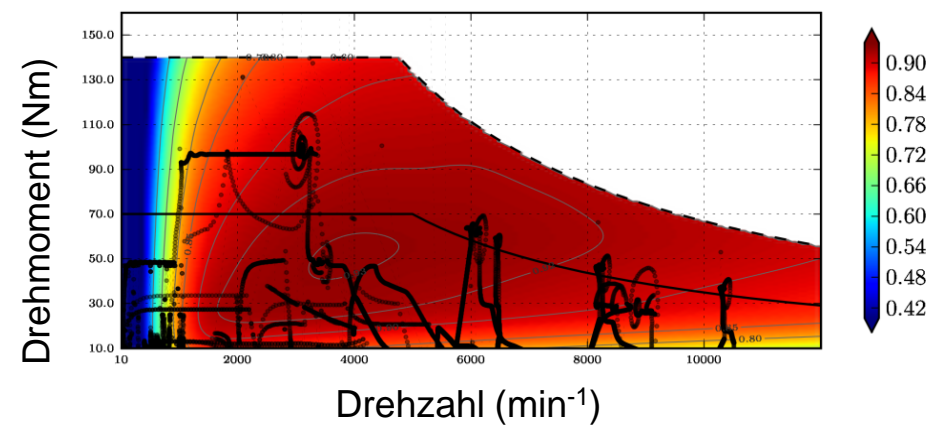


Berechnung T, η

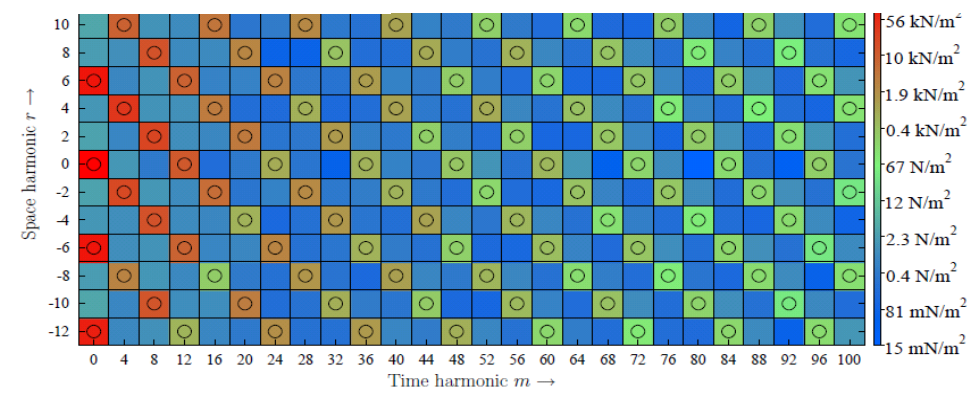
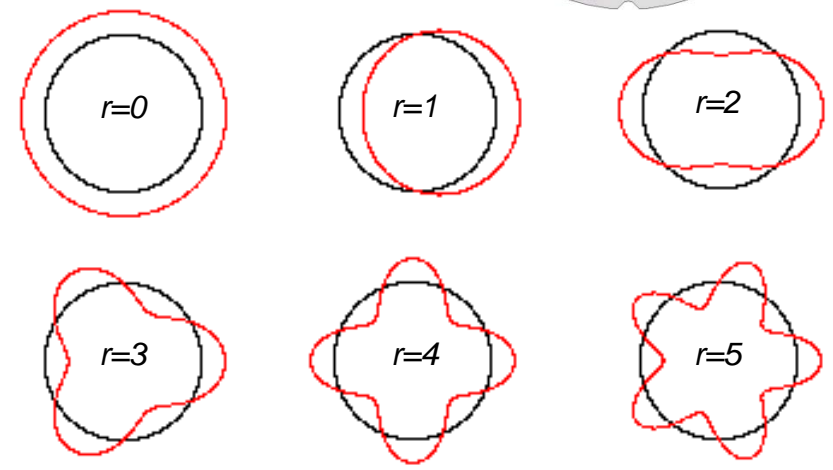
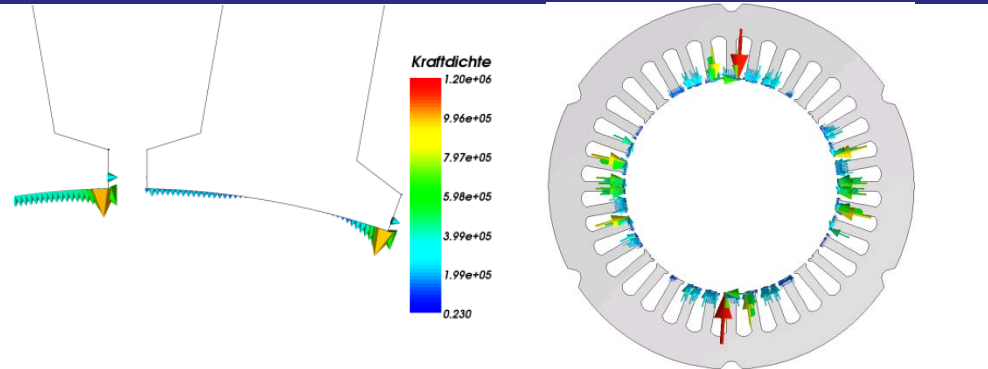
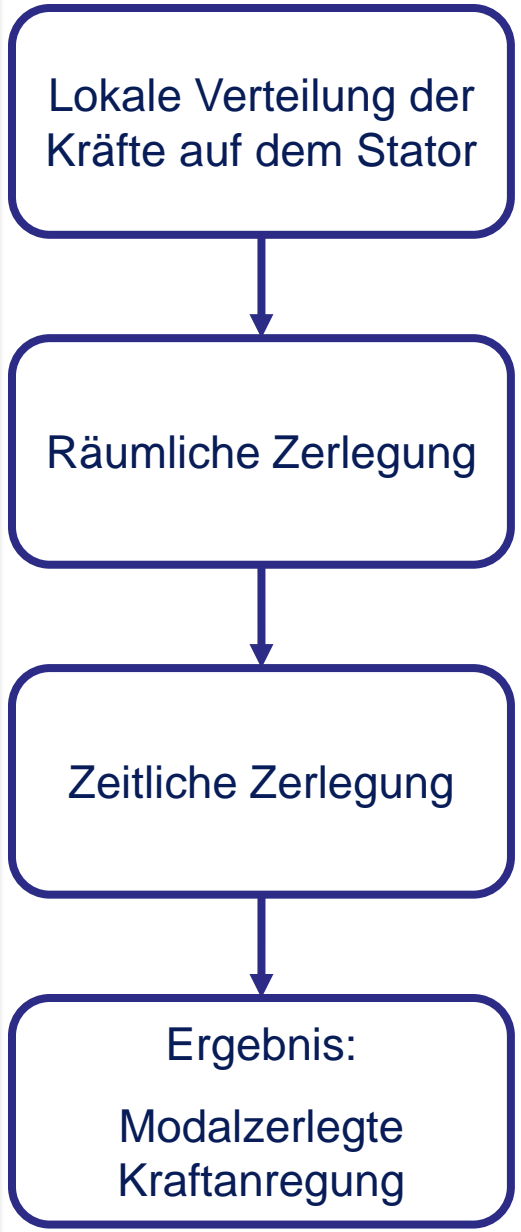
Berechnung lokaler Kräfte



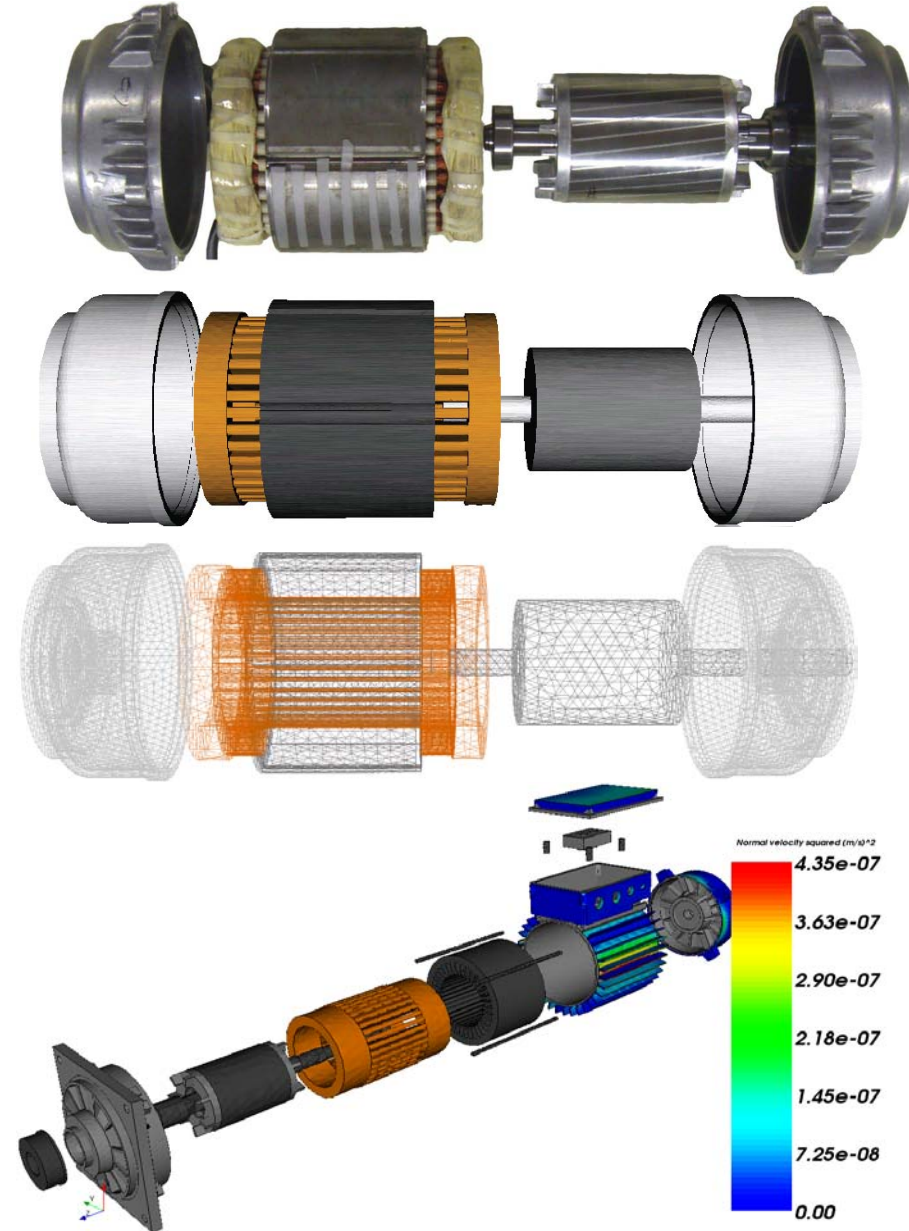
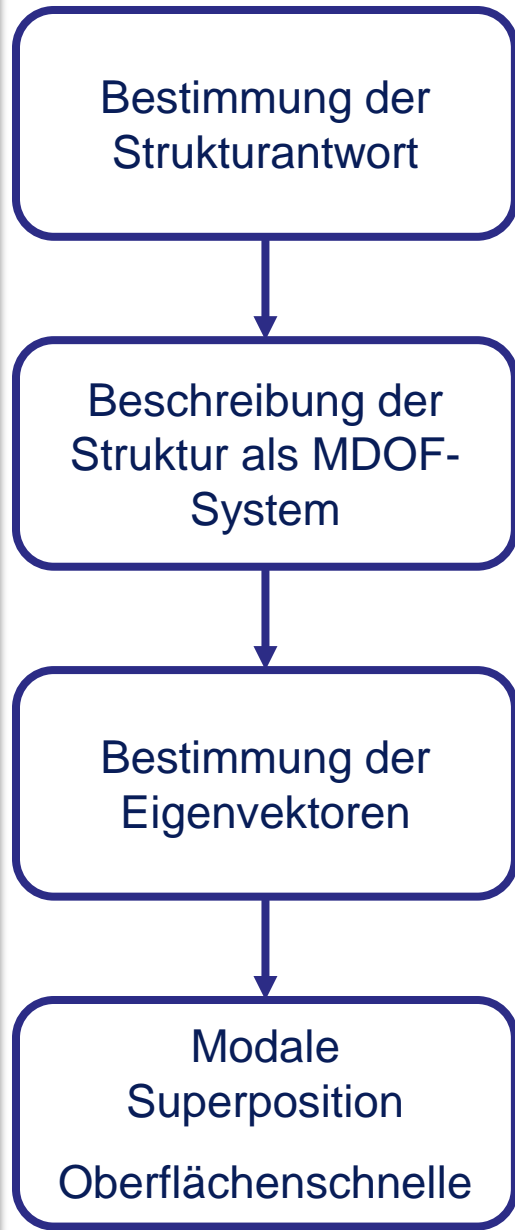
Wirkungsgradkennfeld

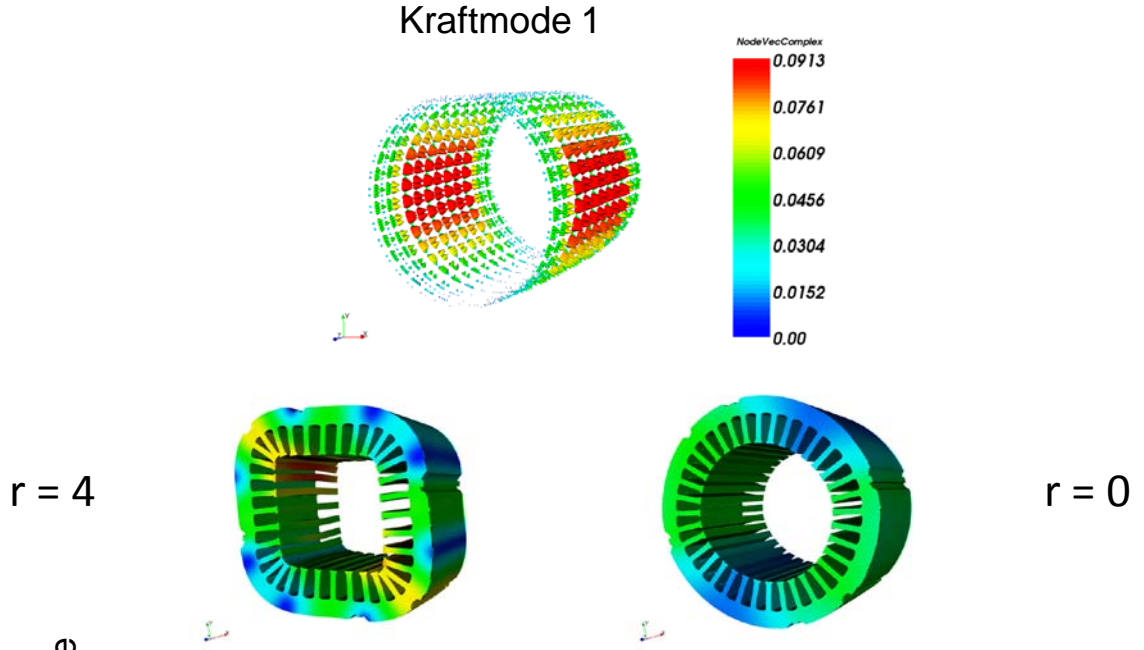
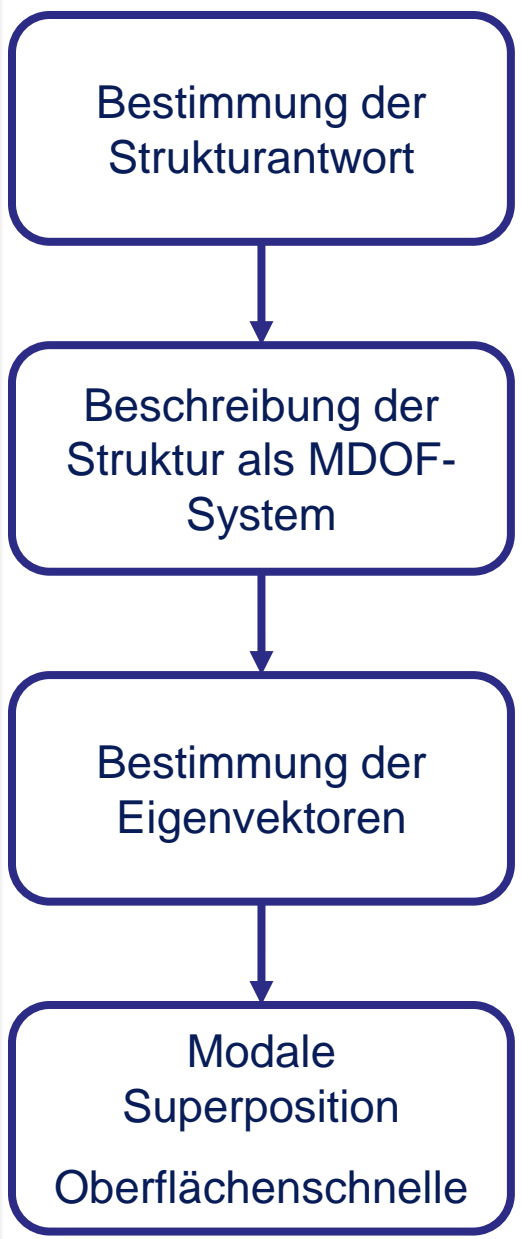


- Wirkungsgrad η : Berechnung diskreter Punkte aus Fahrzyklus ausreichend
- Akustisch relevante Kraftanregungen sind betriebspunktabhängig
- Obere Abschätzung: Beschleunigungsvorgang @ P_{max}
- Für genaue Betrachtung (inkl. Transferpfade): Simulation aller Betriebspunkte

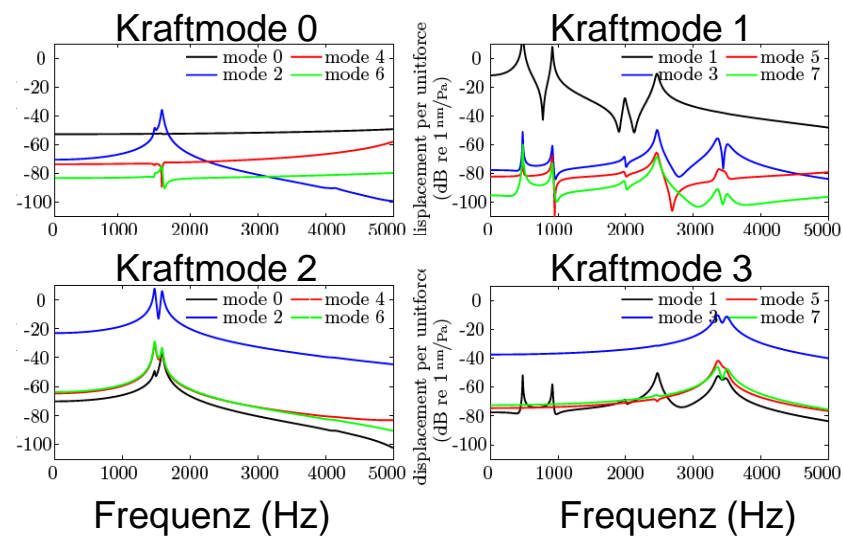


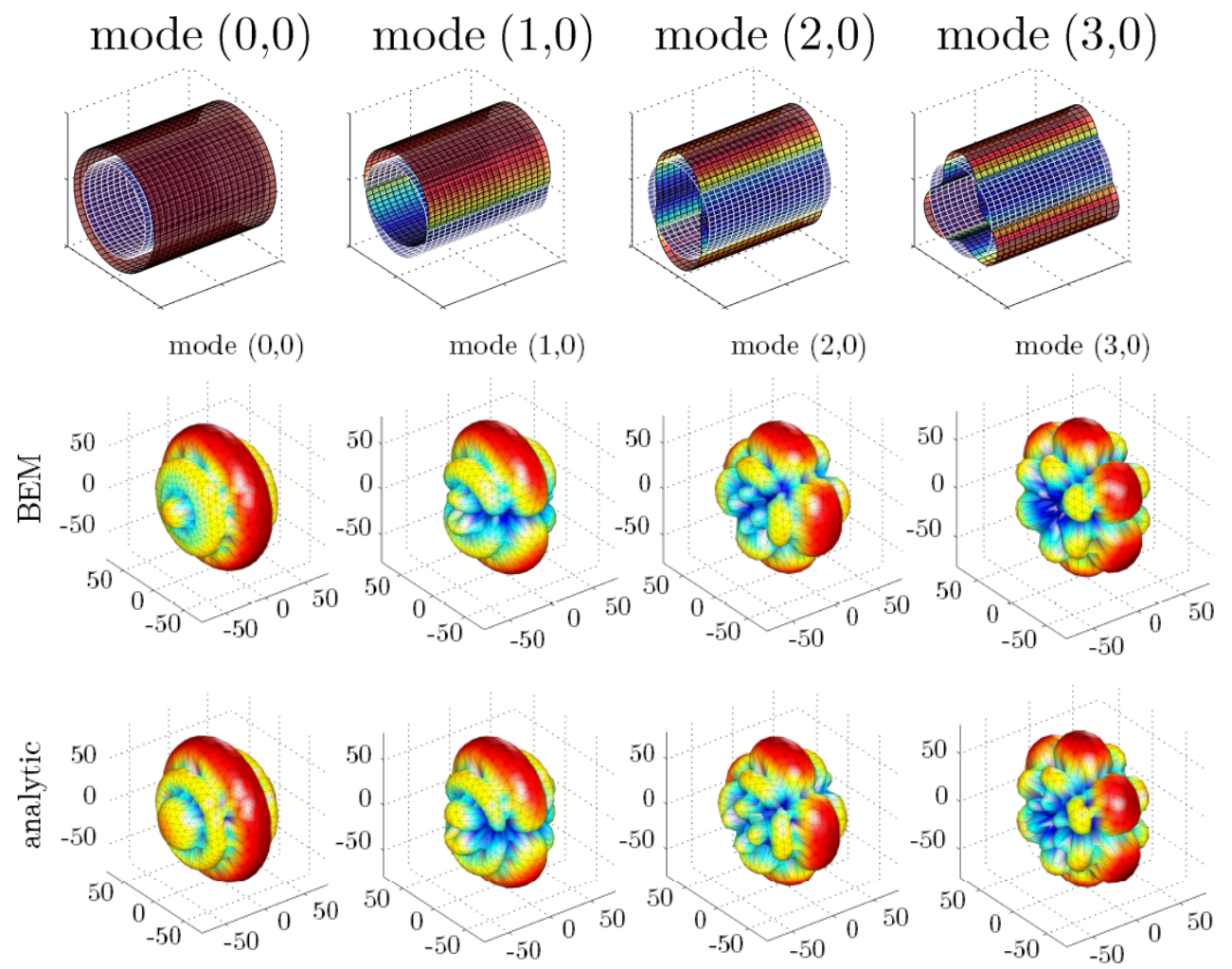
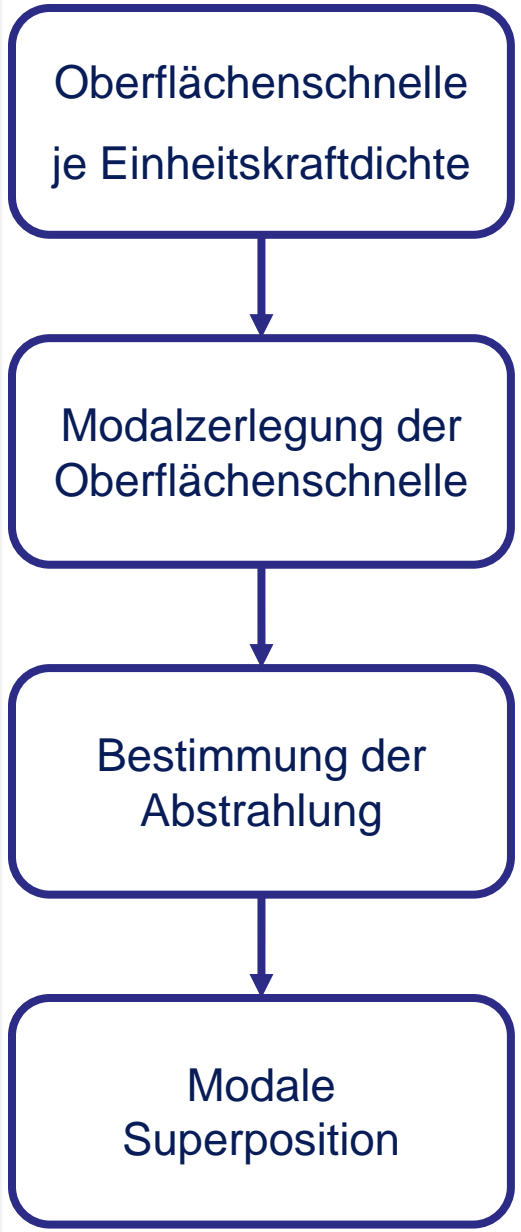
(a) Based on nodal forces.



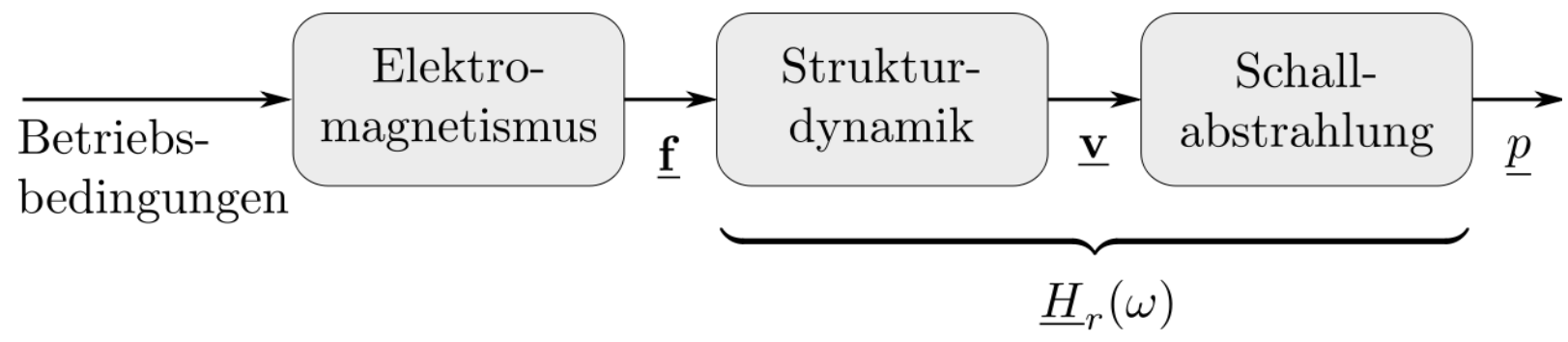


Verschiebung je Einheitskraftdichte
(dB re 1 mm/Pa)

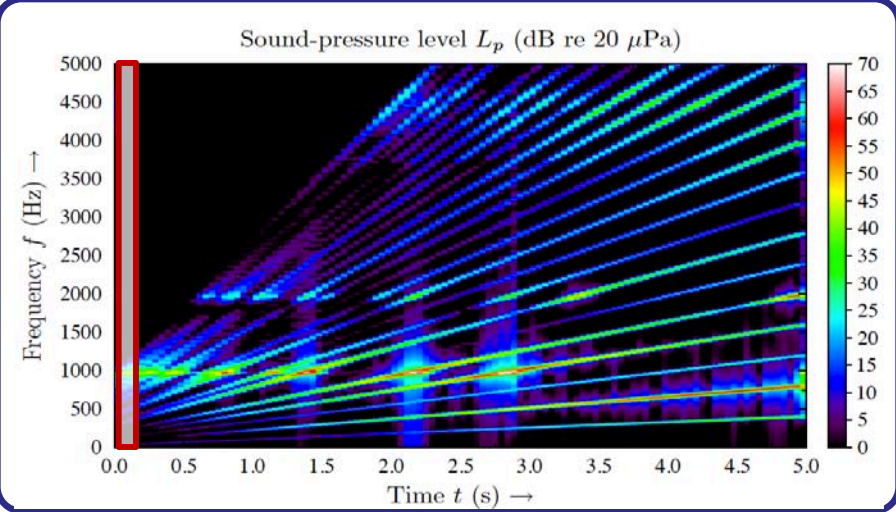




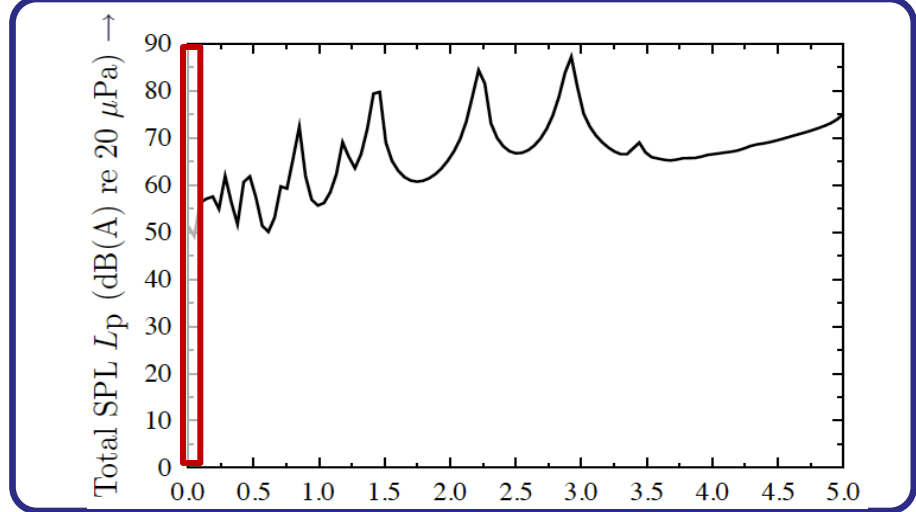
Anwendung der vorgestellten Simulationemethode



Spektrogramm

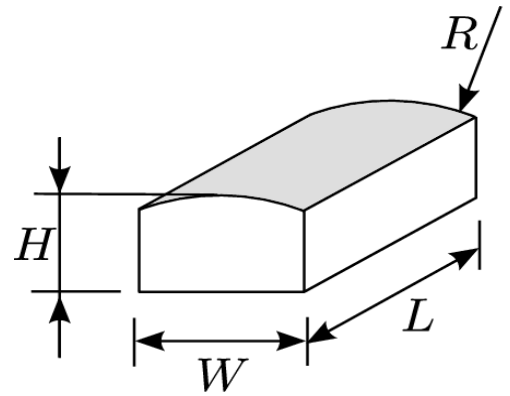


Schalldruckpegel



Magnetform

Größe	Min	Max
Magnethöhe	83%	133%
Magnetweite	78%	117%
Magnetradius	84%	115%
Luftspaltlänge	83%	117%

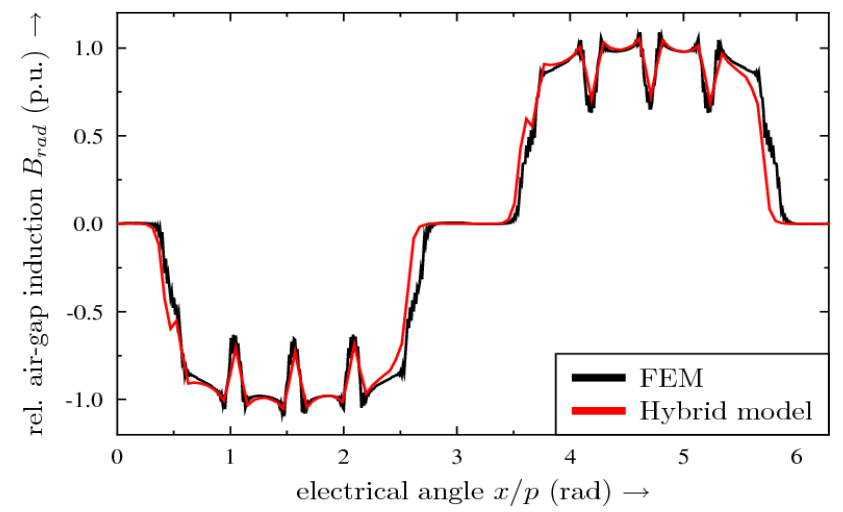


Optimierung

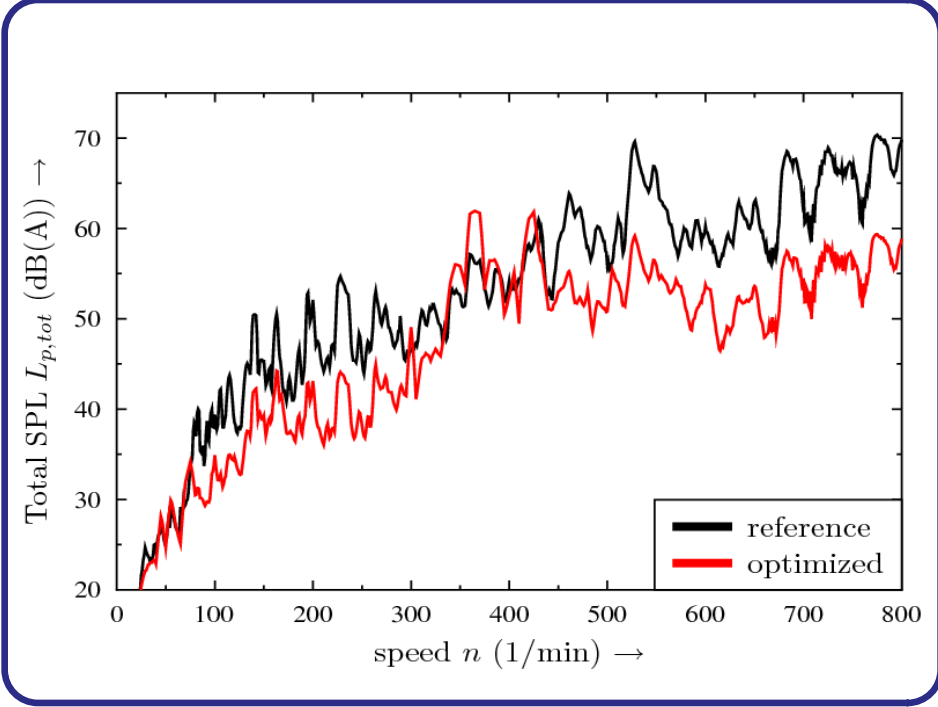
- Zielfunktion:

$$f(h_m, w_m, R_m, \delta) = \max_n L_p \rightarrow \min$$
- Übertragungsfunktion und hybride Modellierung

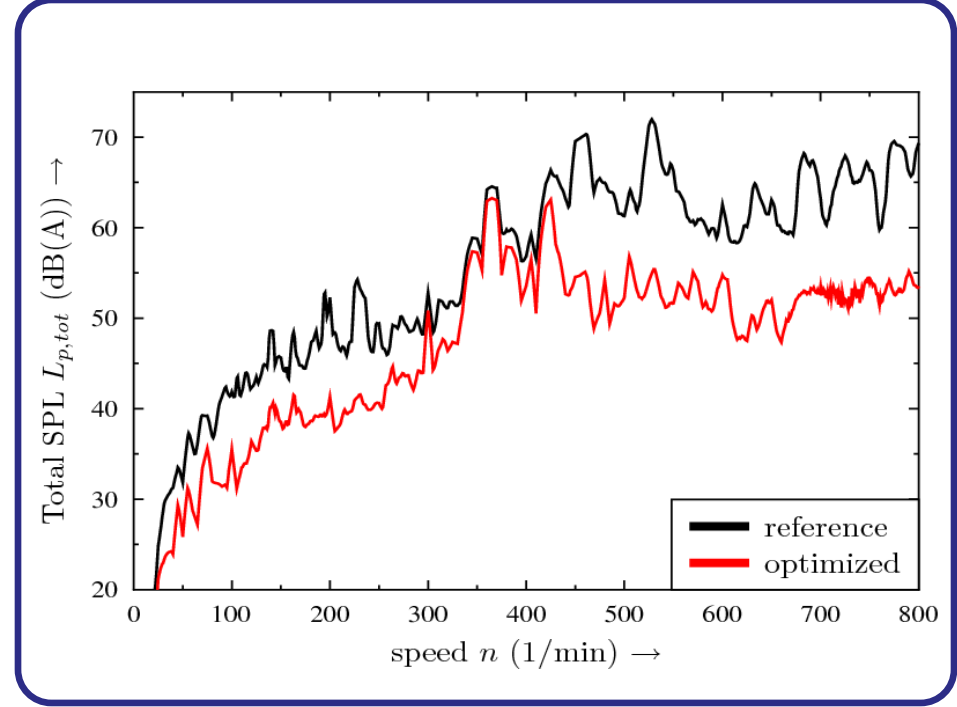
Hybride Modellierung



Leerlauf



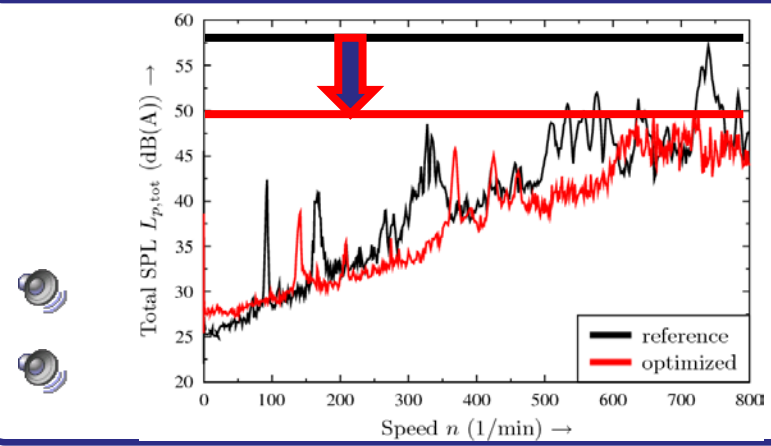
Unter Last



Optimierungsergebnisse

Größe	Min	Max	Ref.	Opt.
PM Volumen			100%	126%
Grundwellenflussdichte	95%	110%	100%	101%
THD des Luftspaltfeldes			35%	11%
Drehmomentmittelwert			100%	101%
Drehmomentwelligkeit			4.03%	2.96%
Max. Schalldruck dB(A)			59.1	50.3

Neuer Prototyp



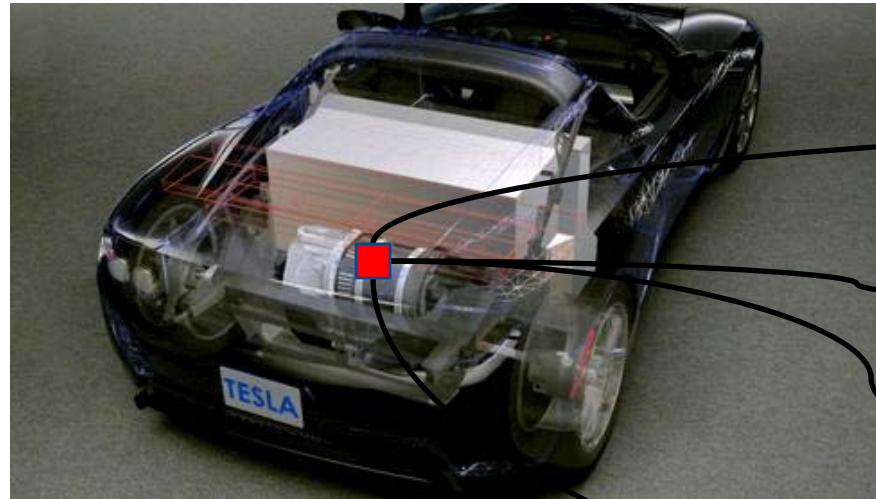
Bewertung

- Reduktion: 8 dB(A)
- Gleicher Stator
- 26% mehr PM-Material
- ca. 4% höhere Kosten

- Oberflächenschnelle zu Schalldruck im Freifeld reicht nicht aus
- Berechnung der Körperschallkräfte an den Kopplungspunkten
- Verknüpfung mit Fahrzeug-Transferpfad
- Berechnung eines üblichen Fahrzyklus

F, v
 Z

v_n



Luftschall

p

Körperschall

Bild oben: <http://www.handelsblatt.com/>
Bild unten: <http://www.hybrid-autos.info/>

- Simulation der elektromagnetisch erregten Kräfte
 - Lokale Verteilung und Zeitabhängigkeit radialer und azimuthaler Kräfte relevant
 - Berechnung aller relevanten Betriebspunkte notwendig
 - Örtliche Zerlegung der Kräfte
- Strukturübertragungsfunktion pro Einheitskraftmode
- Akustische Abstrahlung und Richtcharakteristik
 - Zylindergeometrie ermöglicht schnelle Berechnungsmethode
 - Frequenzabhängig
 - Welche Kraftmode strahlt auch wirklich viel Leistung ab ?
- Akustische Optimierung:
 - Gesamtheitliche Betrachtung notwendig :
Betriebsstrategie, Magnetkreis,
Gehäuse, Abstrahlung
und KFZ-Transferpfade

