



# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen am Beispiel eines Traktionsantriebs

**Marius Franck, M.Sc. RWTH**

Kevin Jansen, M.Sc. RWTH

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

Magdeburg, 29.06.2023

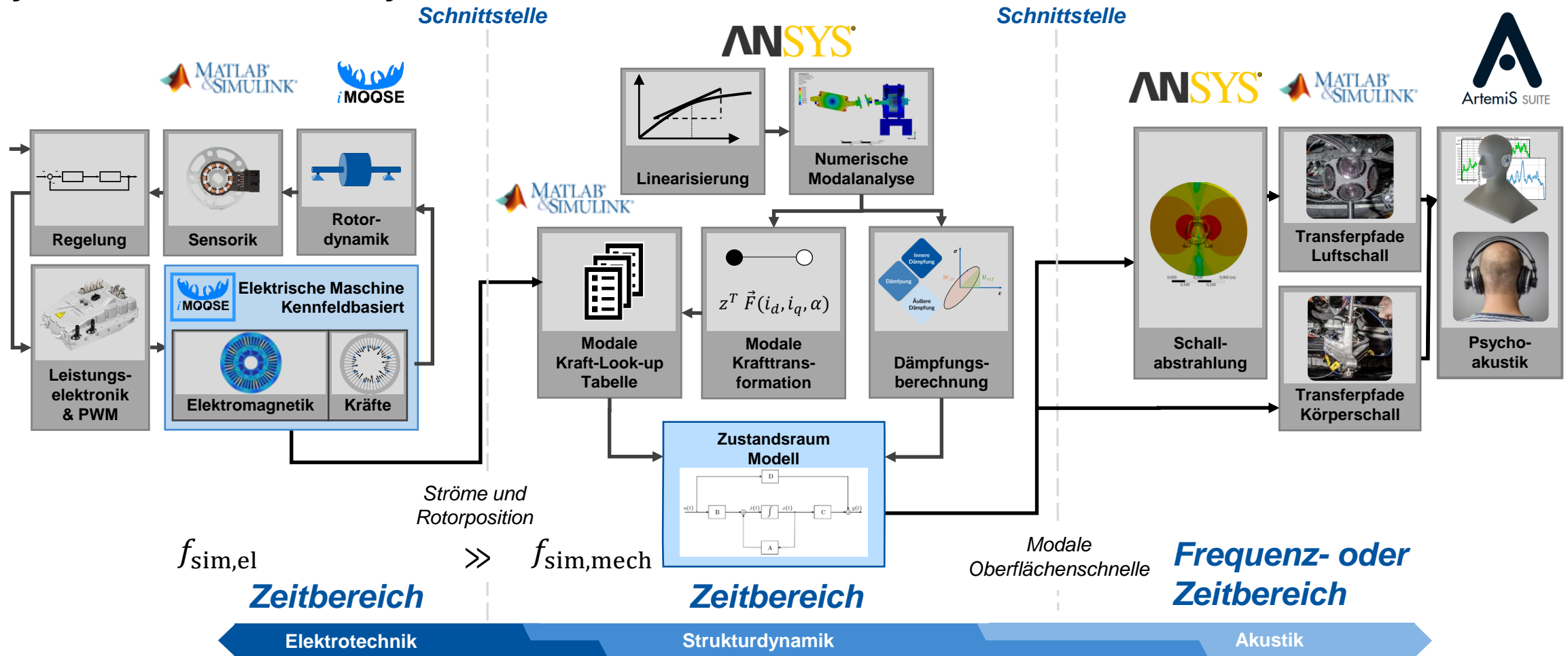
## Motivation

- Das Geräusch von elektrischen Maschinen als Traktionsantrieb unterscheidet sich von konventionellen Verbrennungsmotoren
- Zeitlich variable elektromagnetische Kräfte führen zu tonalen Geräuschen
- Bei elektrischen Fahrzeugen werden diese Geräusche nicht maskiert und häufig als störend empfunden
- Zur Bewertung des akustischen Verhaltens in der Entwurfsphase werden effiziente Modellierungsansätze benötigt
- Die strukturdynamischen Modellierung der Dämpfung von elektrischen Maschinen ist zur Bewertung der Geräuschamplituden wesentlich

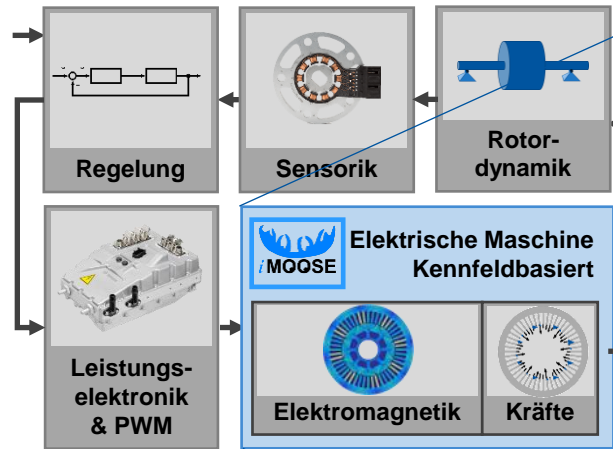


# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

## Systemmodell zur Analyse der Akustik von elektrischen Maschinen



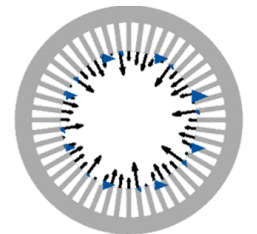
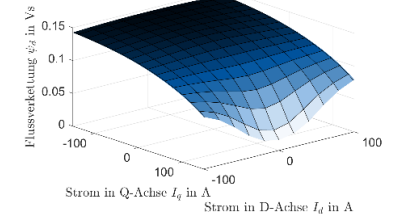
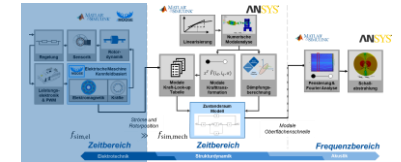
## Elektromagnetische Modellierung



### Erweitertes DQ-Modell

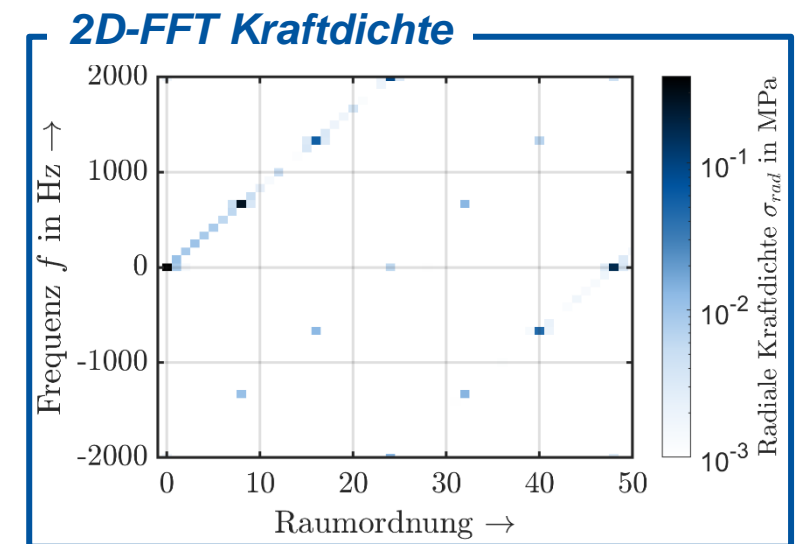
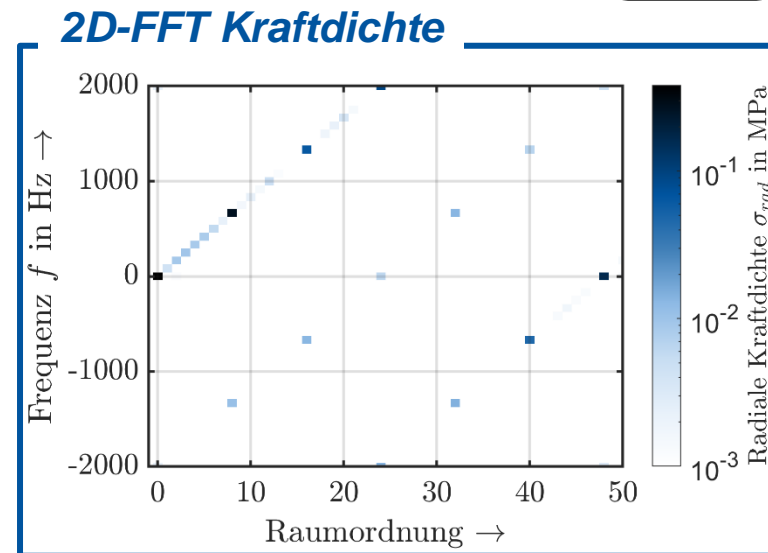
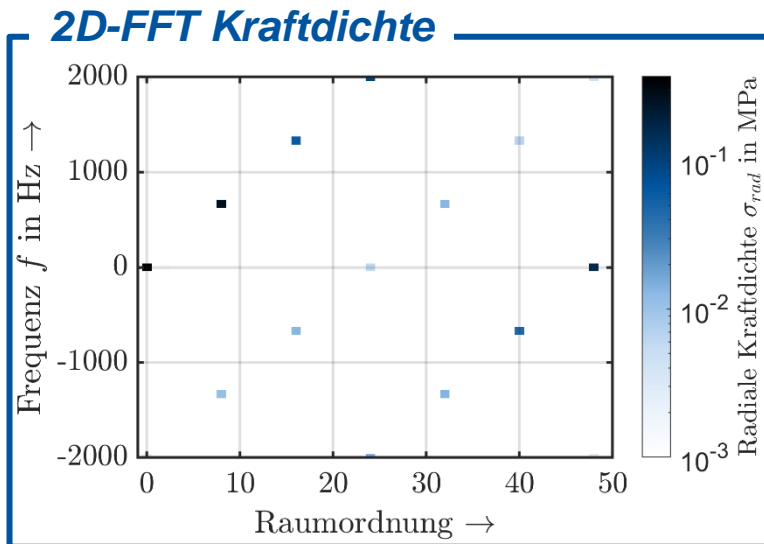
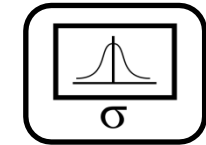
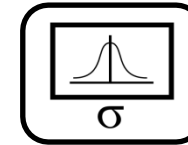
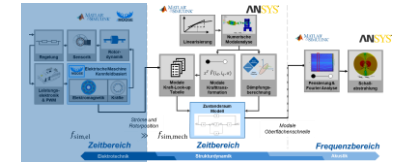
- elektromagnetische Zeitkonstante  $\gg$  Schaltzeit
- Kennfeldbasierte Vorausberechnung mit 2D FEM
  - Flussverkettungen  $\psi(i_d, i_q, \alpha)$
  - Lokale elektromagnetischen Kräfte  $F(i_d, i_q, \alpha)$
- Beschreibung durch Spannungsgleichung

$$u(t) = R \cdot i(t) + \frac{d}{dt} (\psi_f + L \cdot i(t))$$

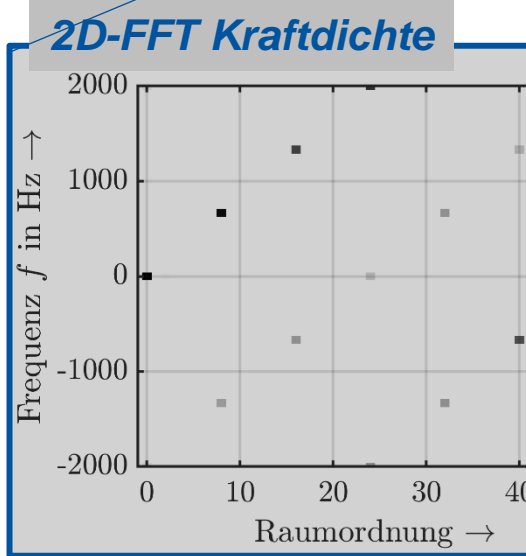
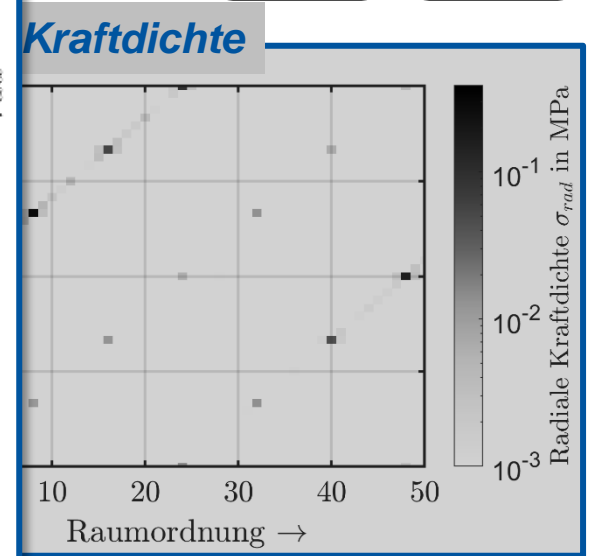
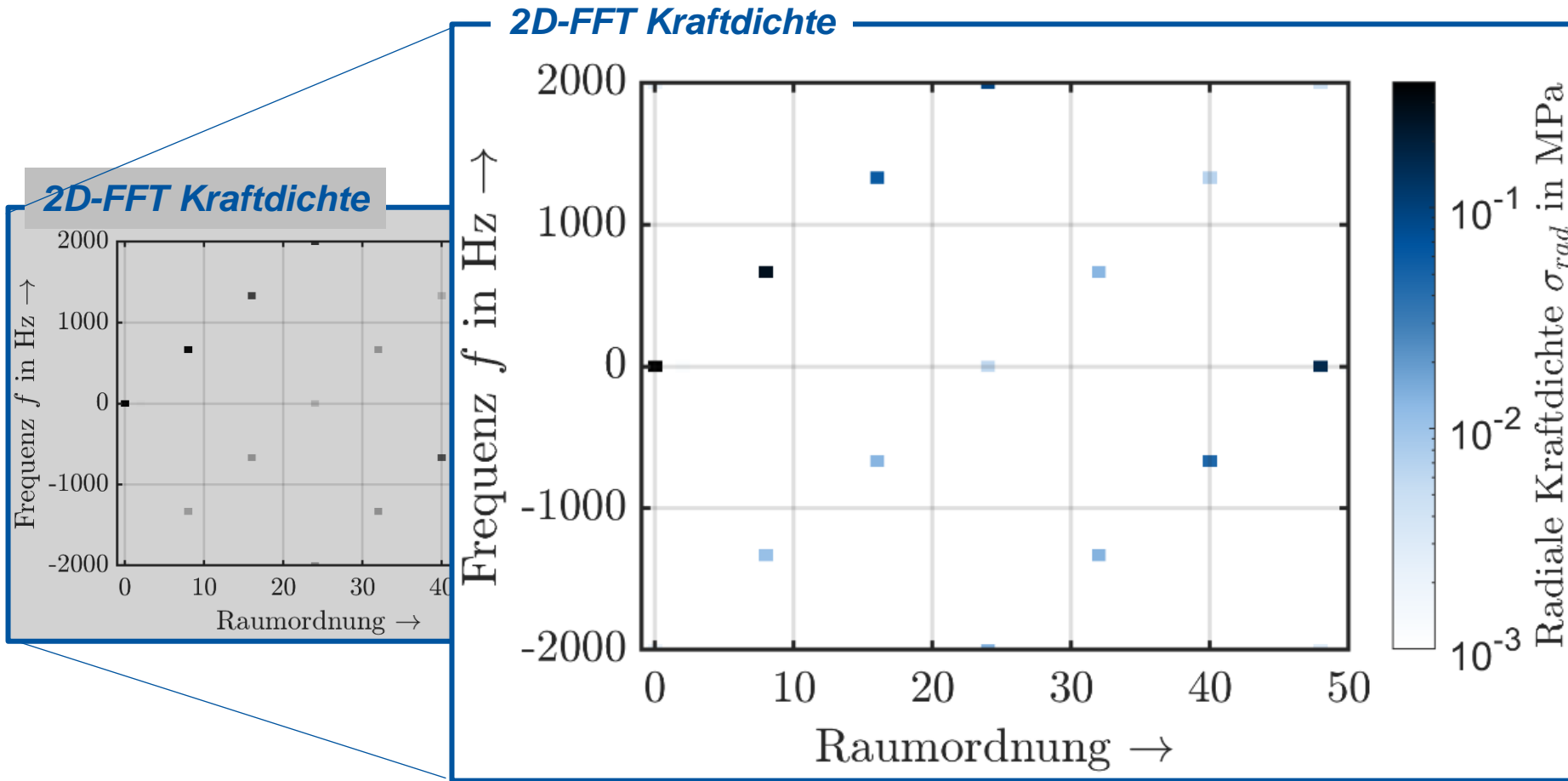
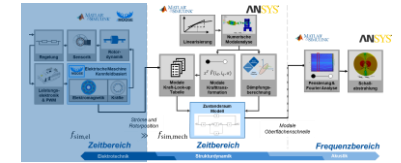


# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

## Elektromagnetische Modellierung

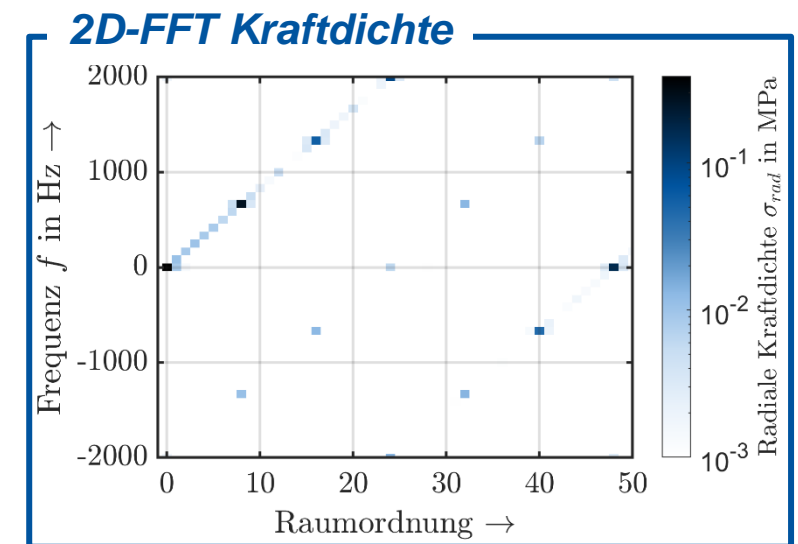
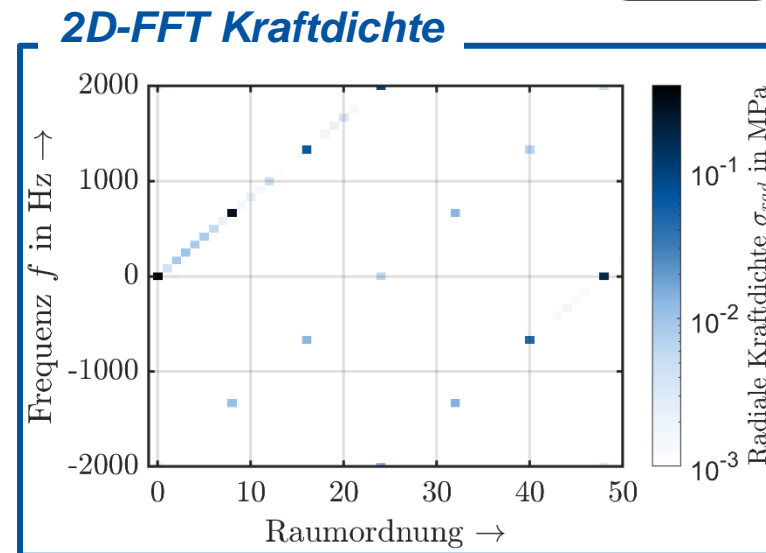
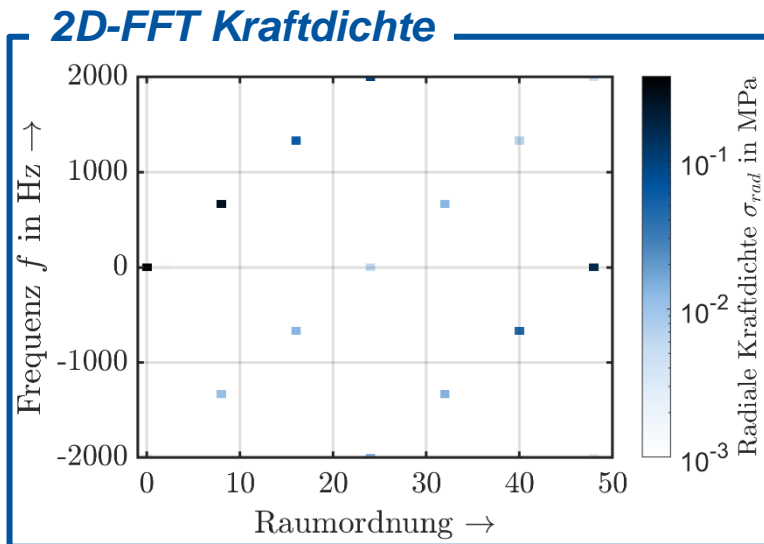
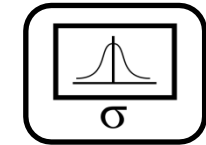
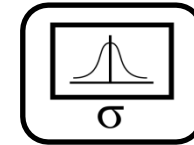
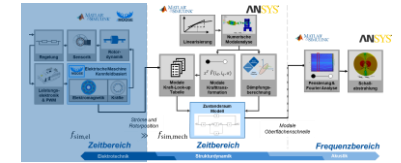


## Elektromagnetische Modellierung



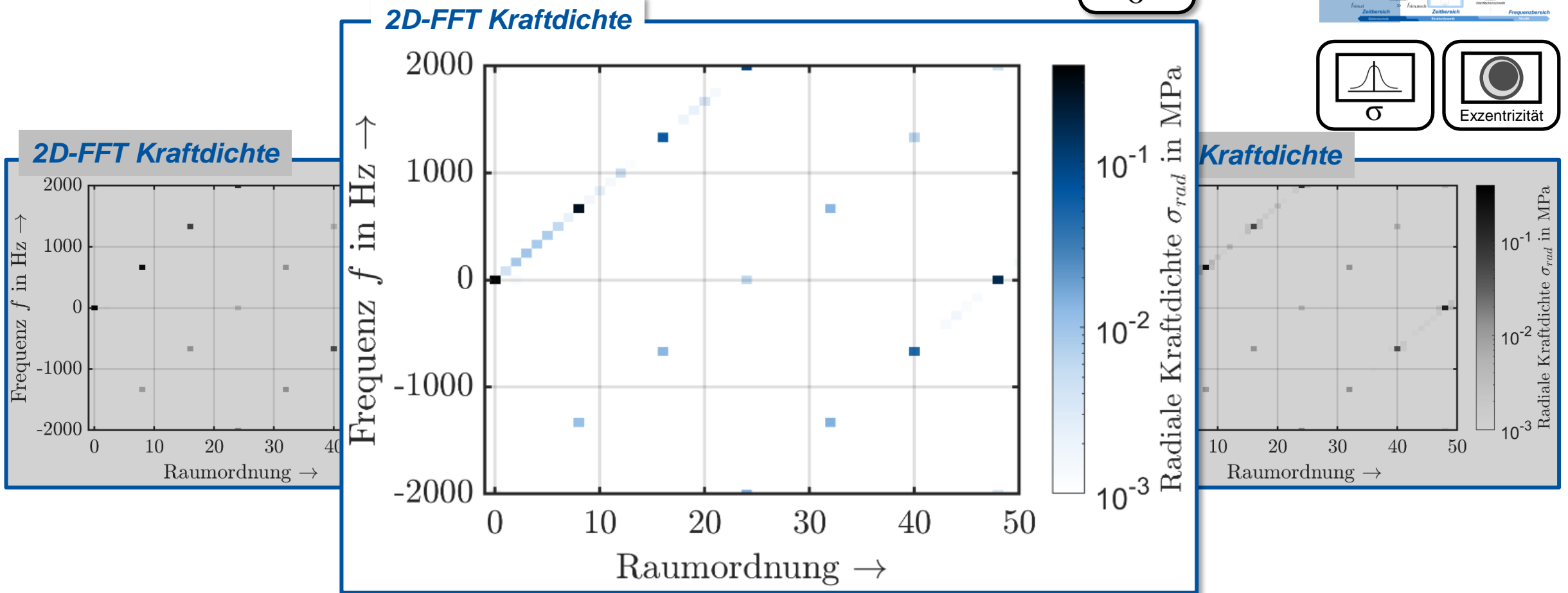
# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

## Elektromagnetische Modellierung



# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

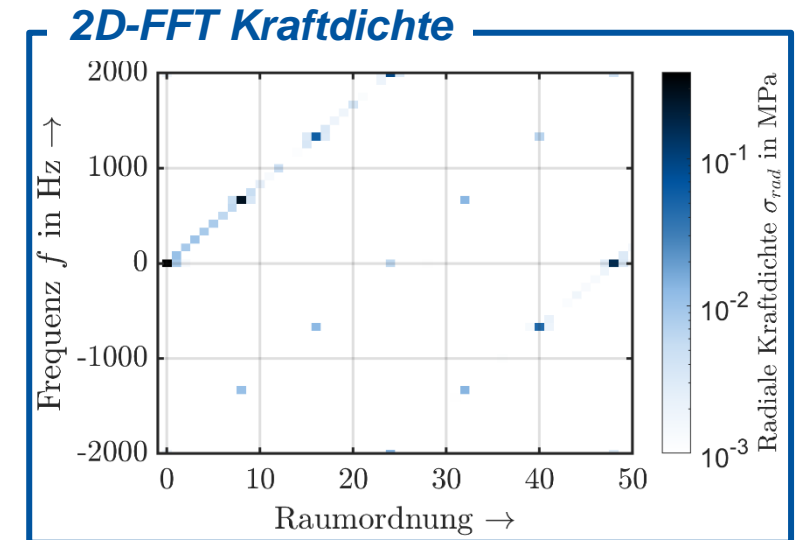
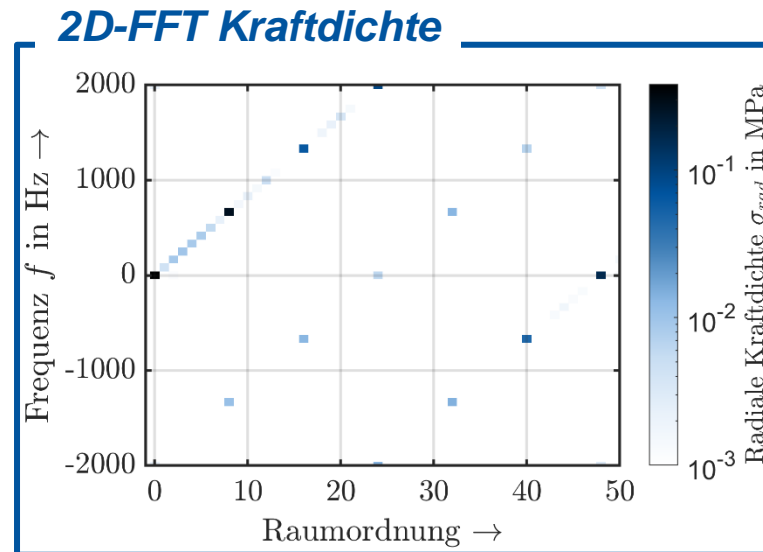
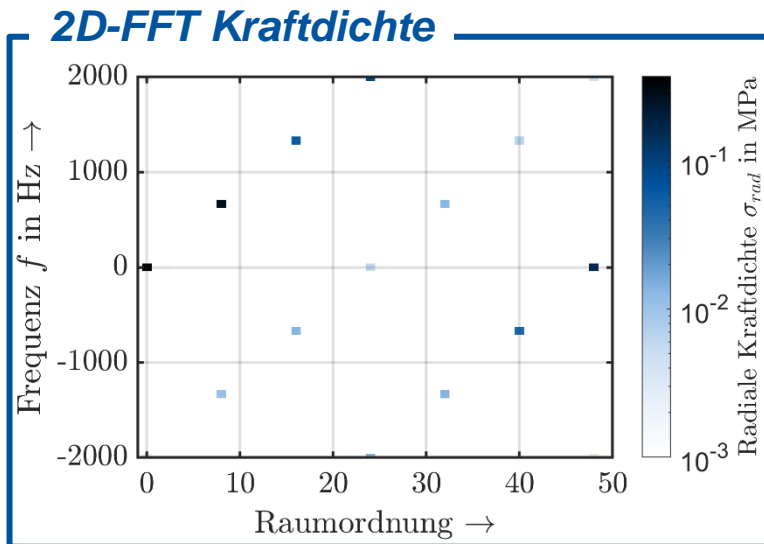
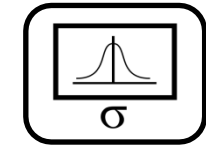
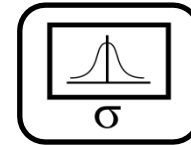
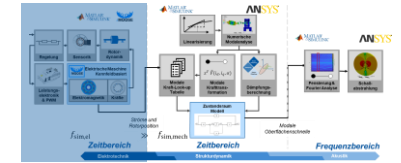
## Elektromagnetische Modellierung



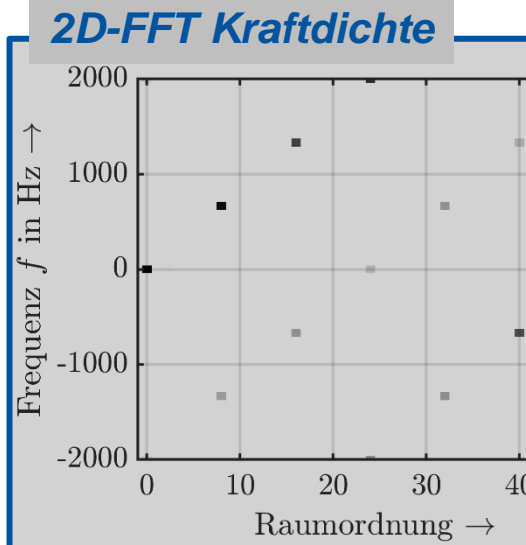
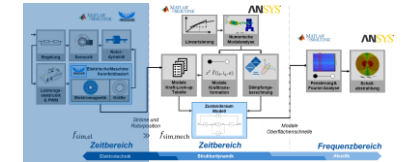
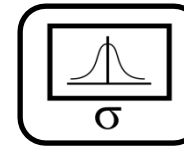


# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

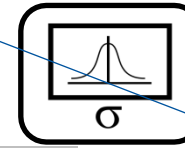
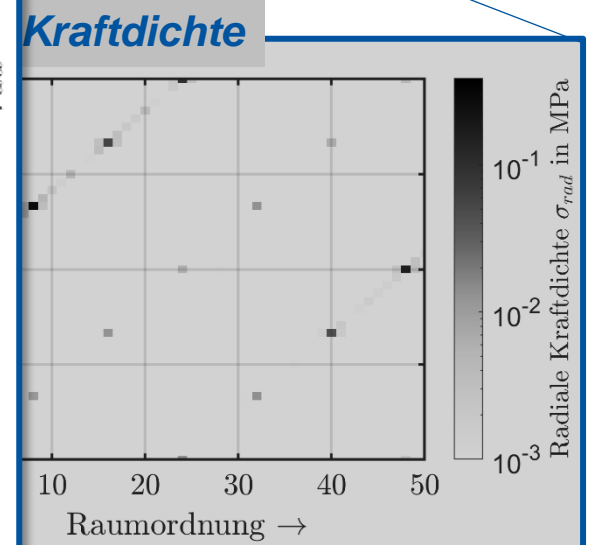
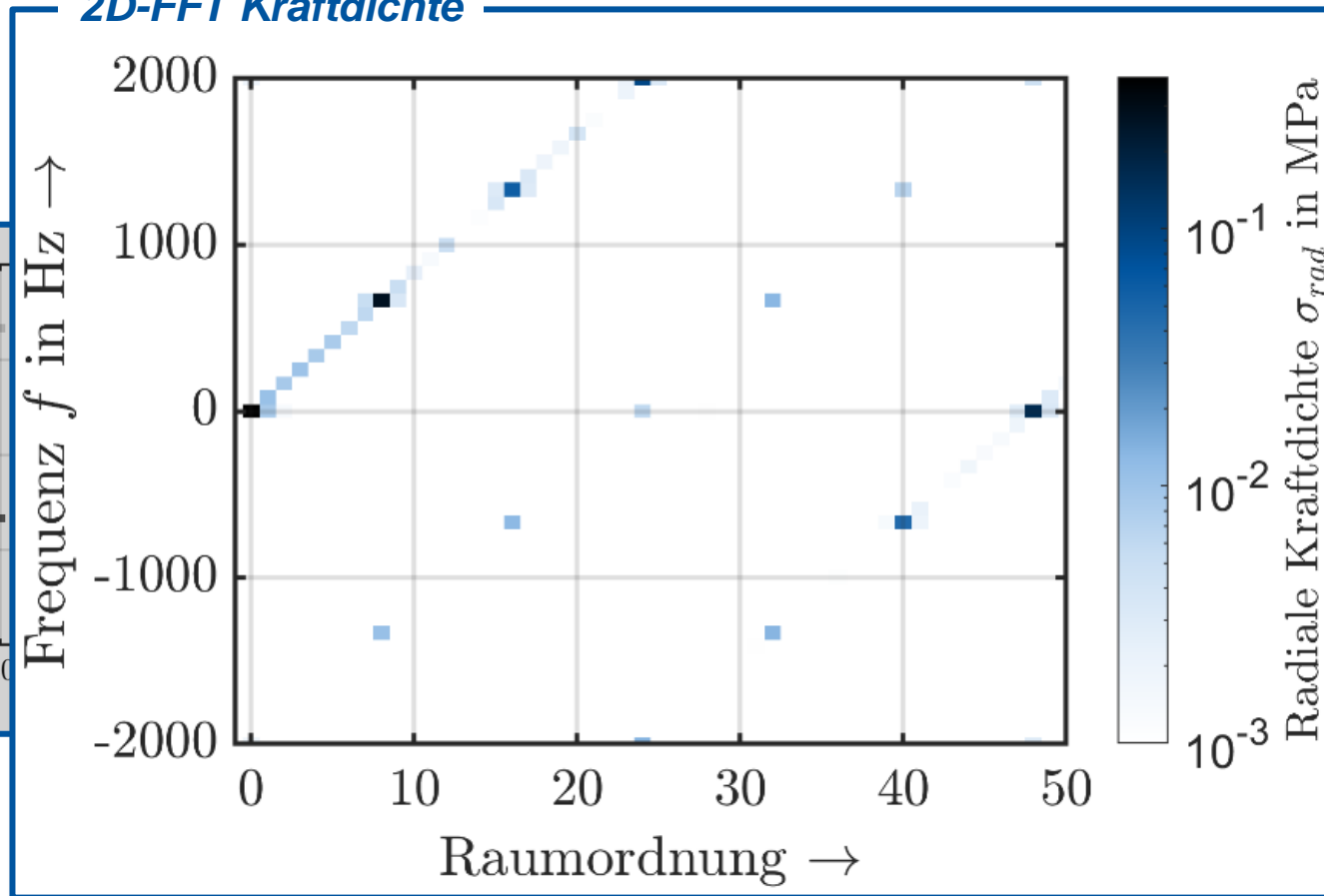
## Elektromagnetische Modellierung



## Elektromagnetische Modellierung

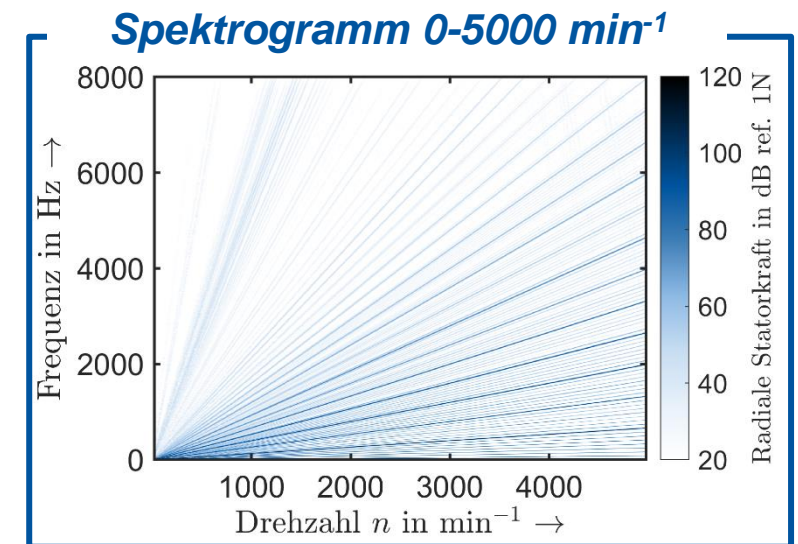
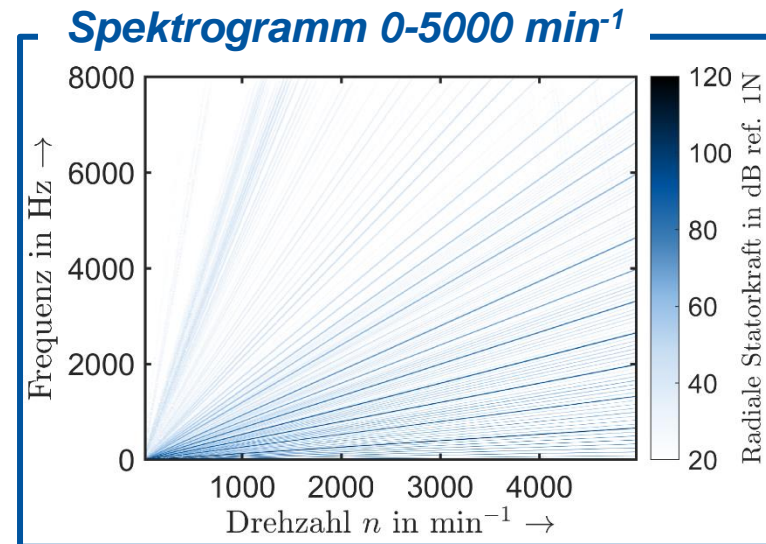
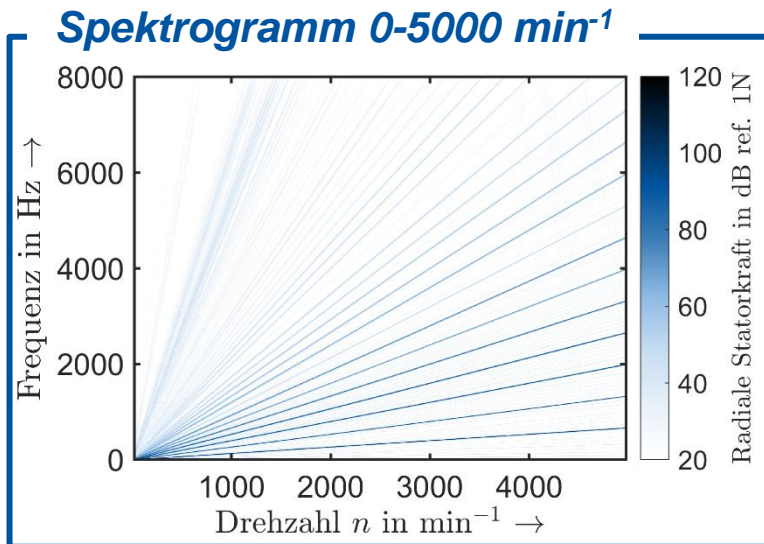
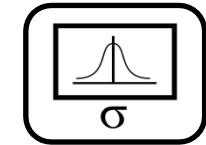
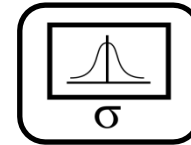
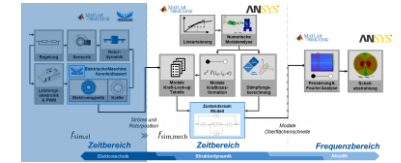


2D-FFT Kraftdichte

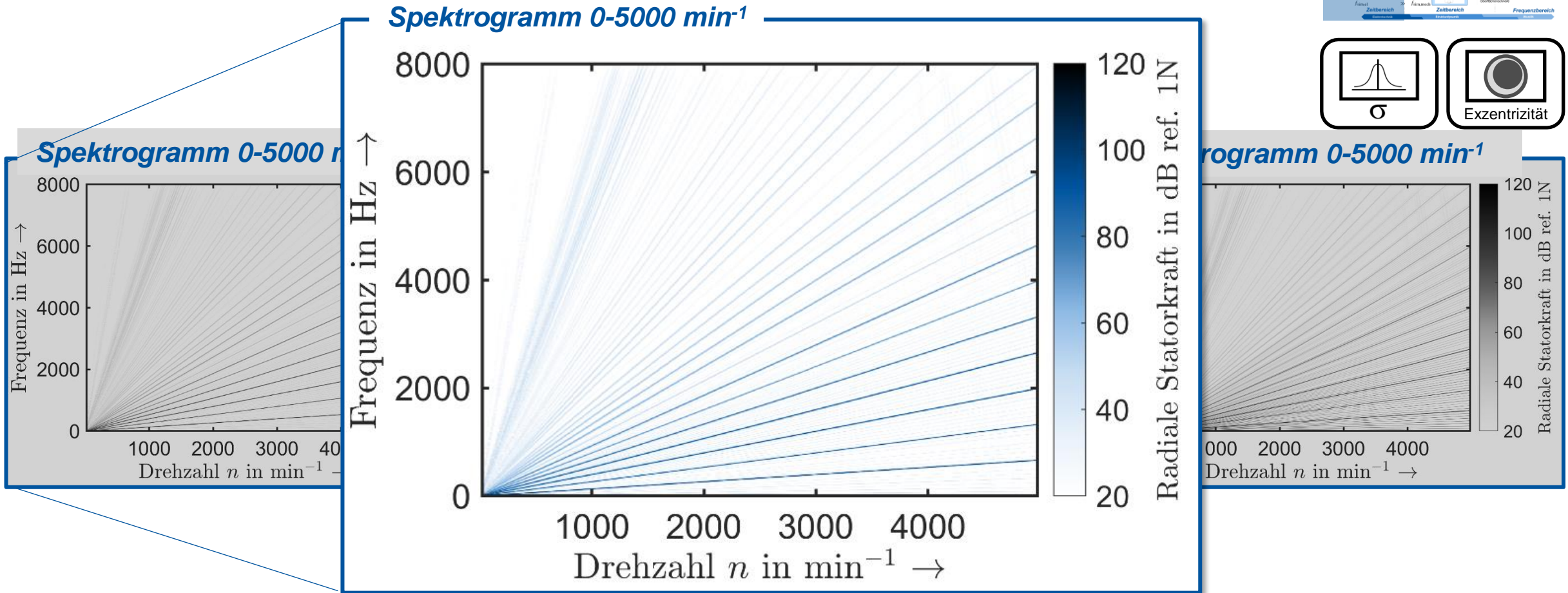
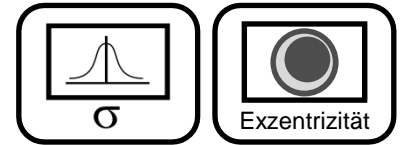
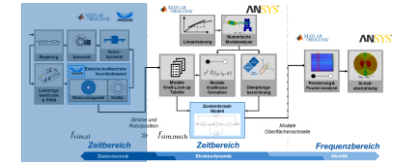


# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

## Elektromagnetische Modellierung

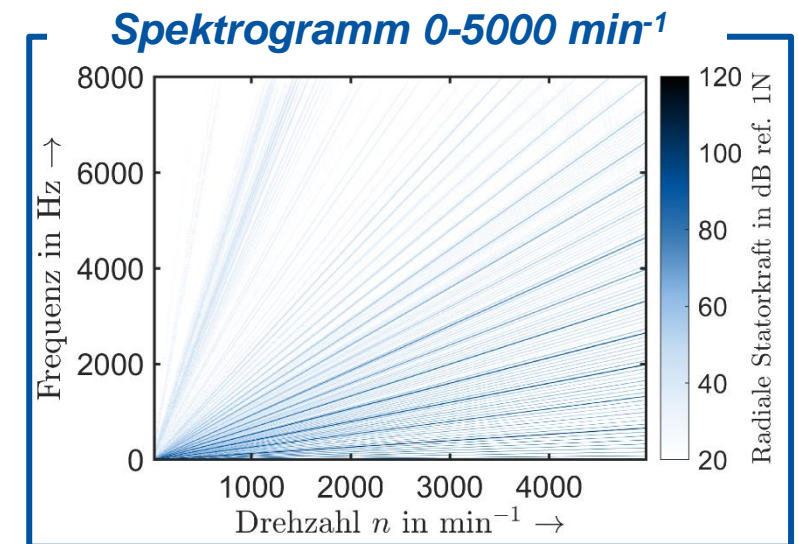
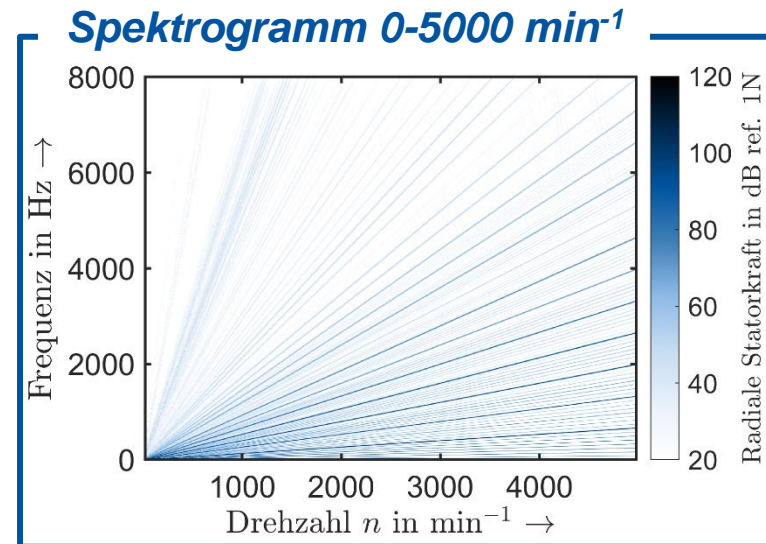
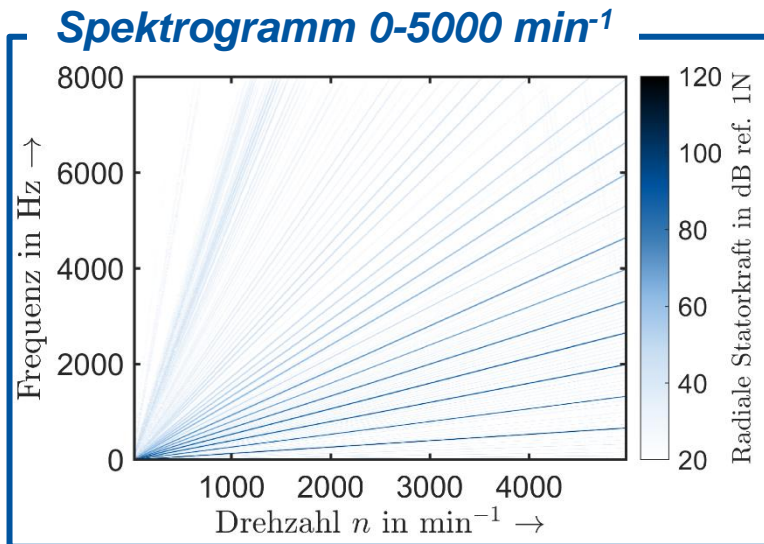
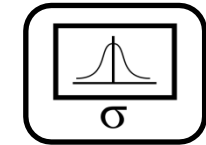
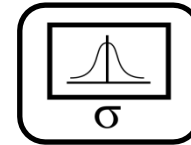
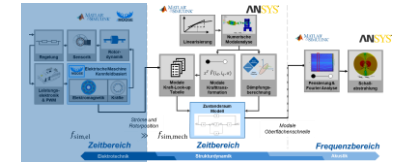


## Elektromagnetische Modellierung

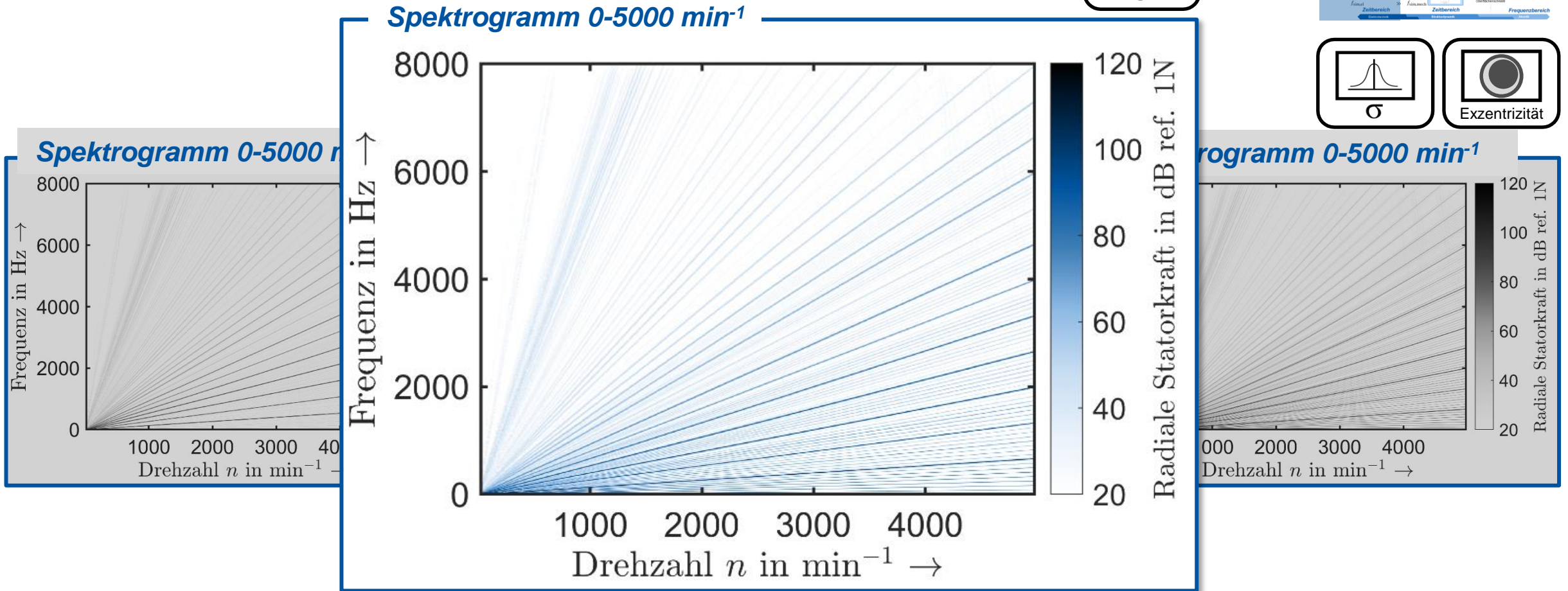


# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

## Elektromagnetische Modellierung

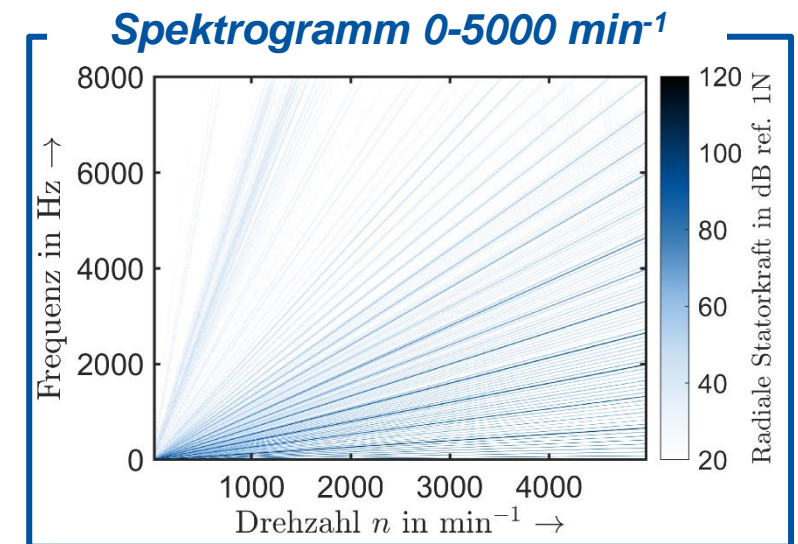
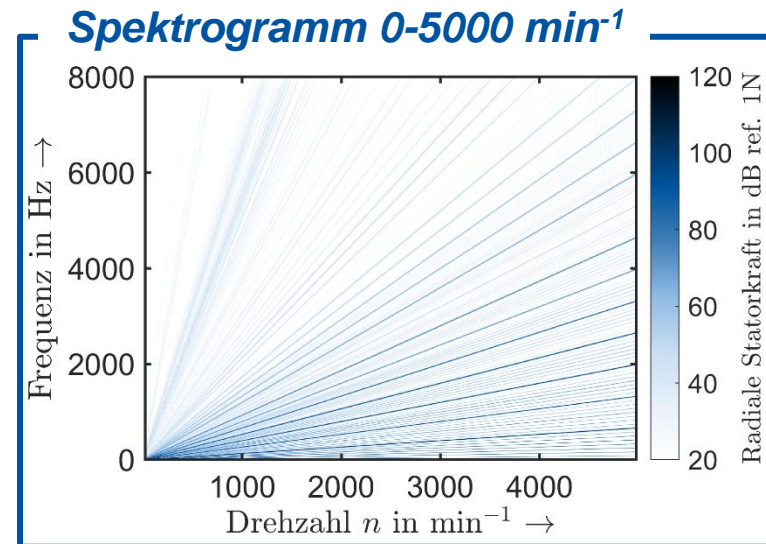
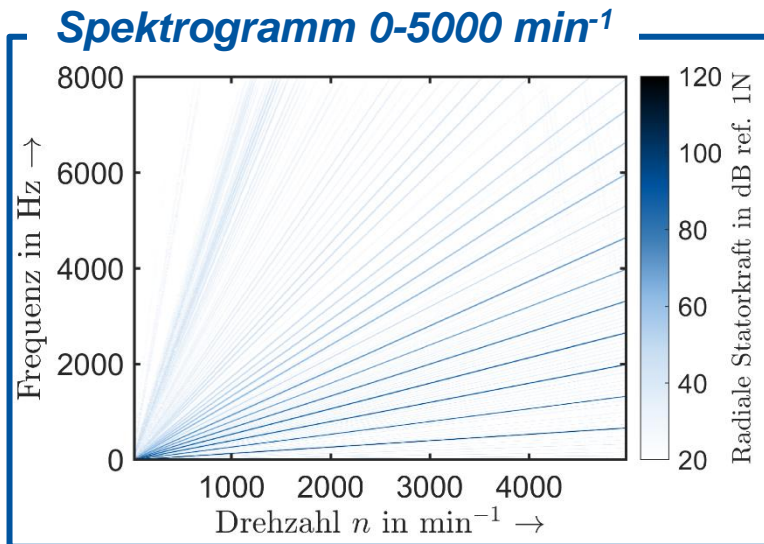
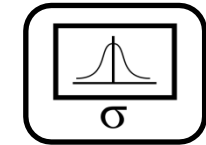
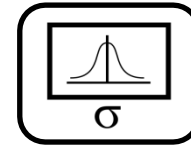
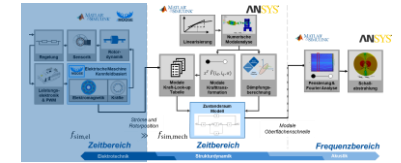


## Elektromagnetische Modellierung



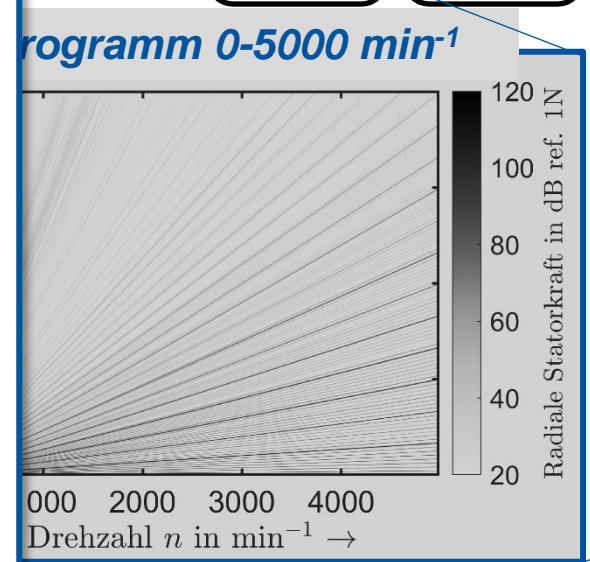
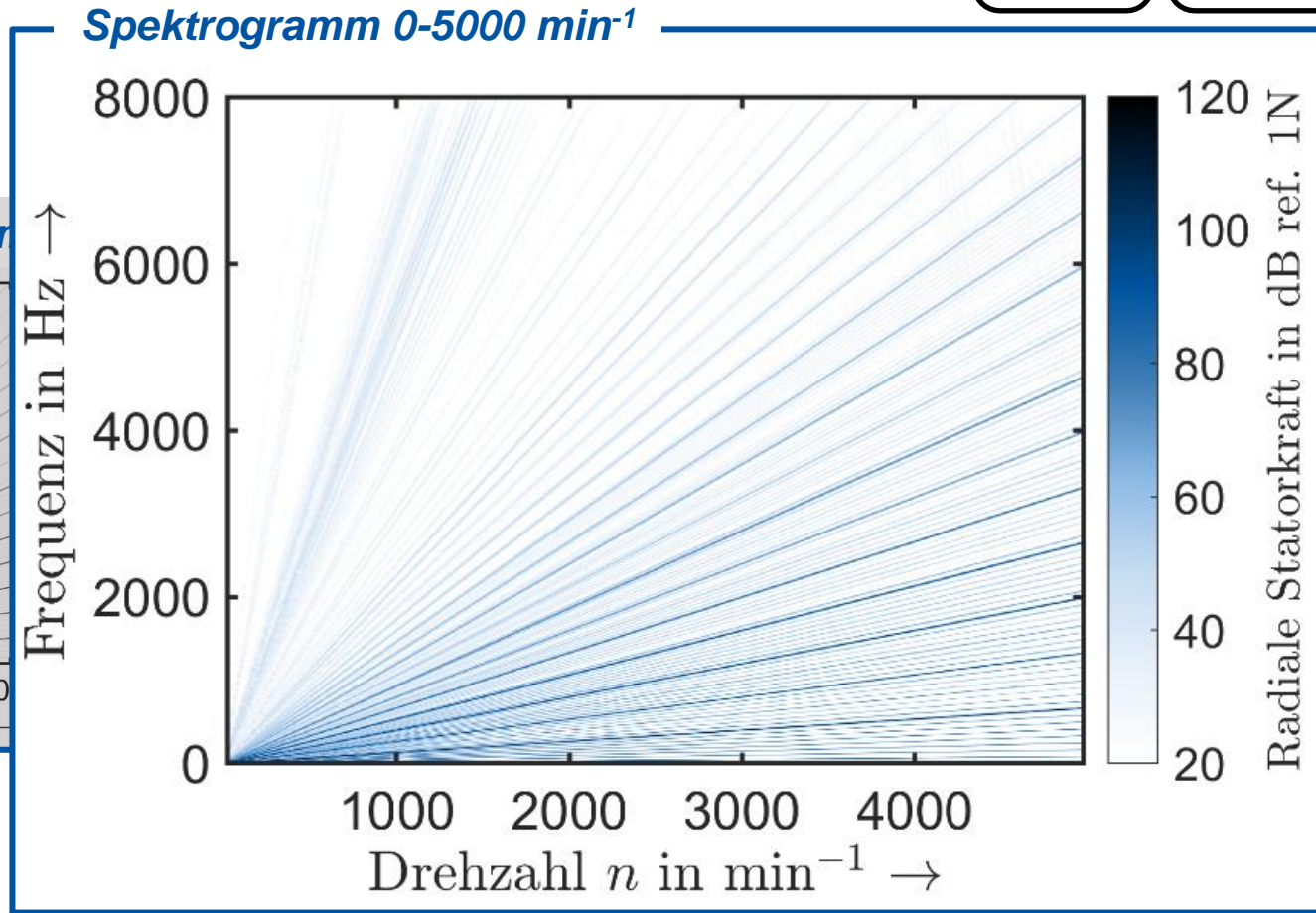
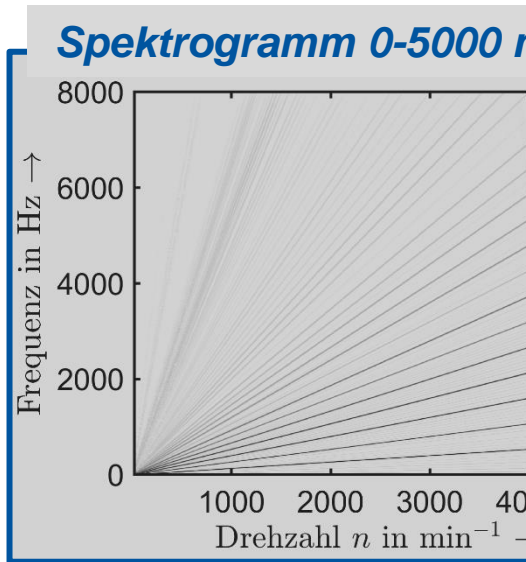
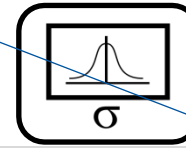
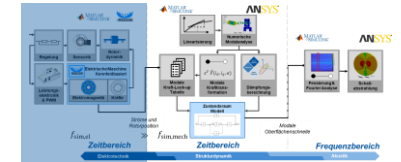
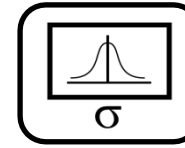
# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

## Elektromagnetische Modellierung



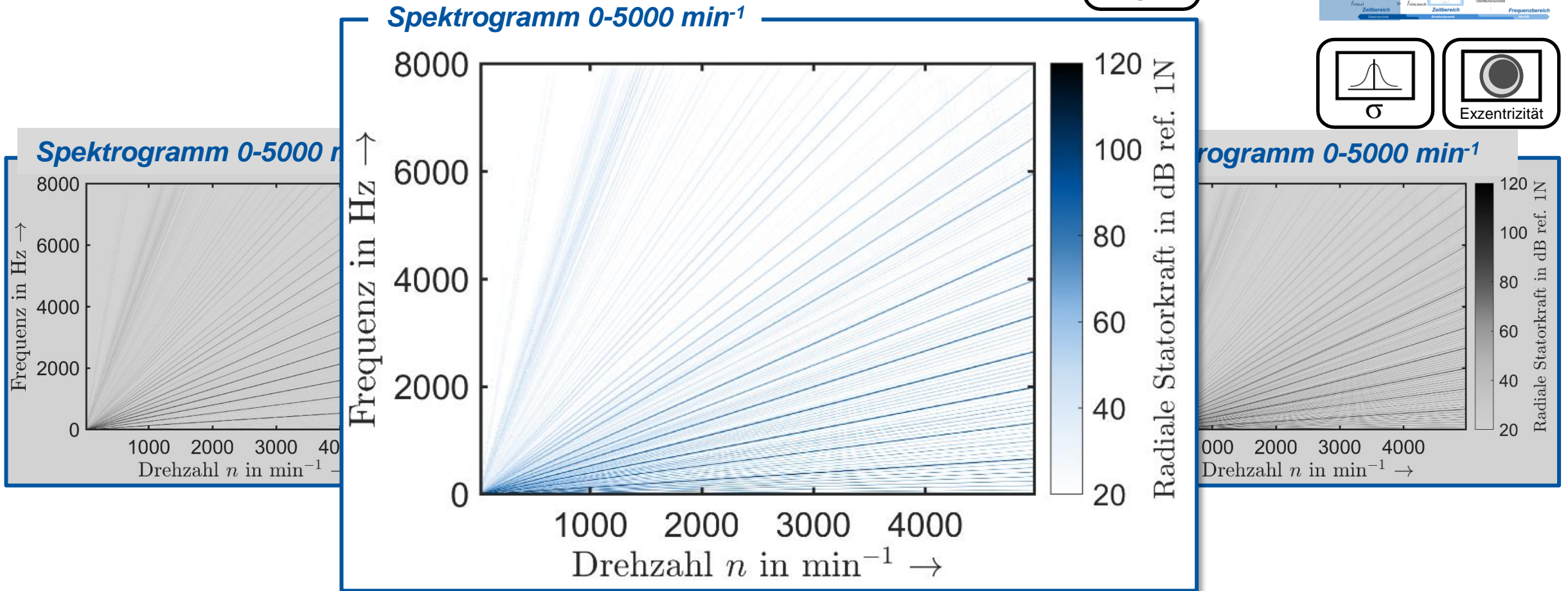
# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

## Elektromagnetische Modellierung

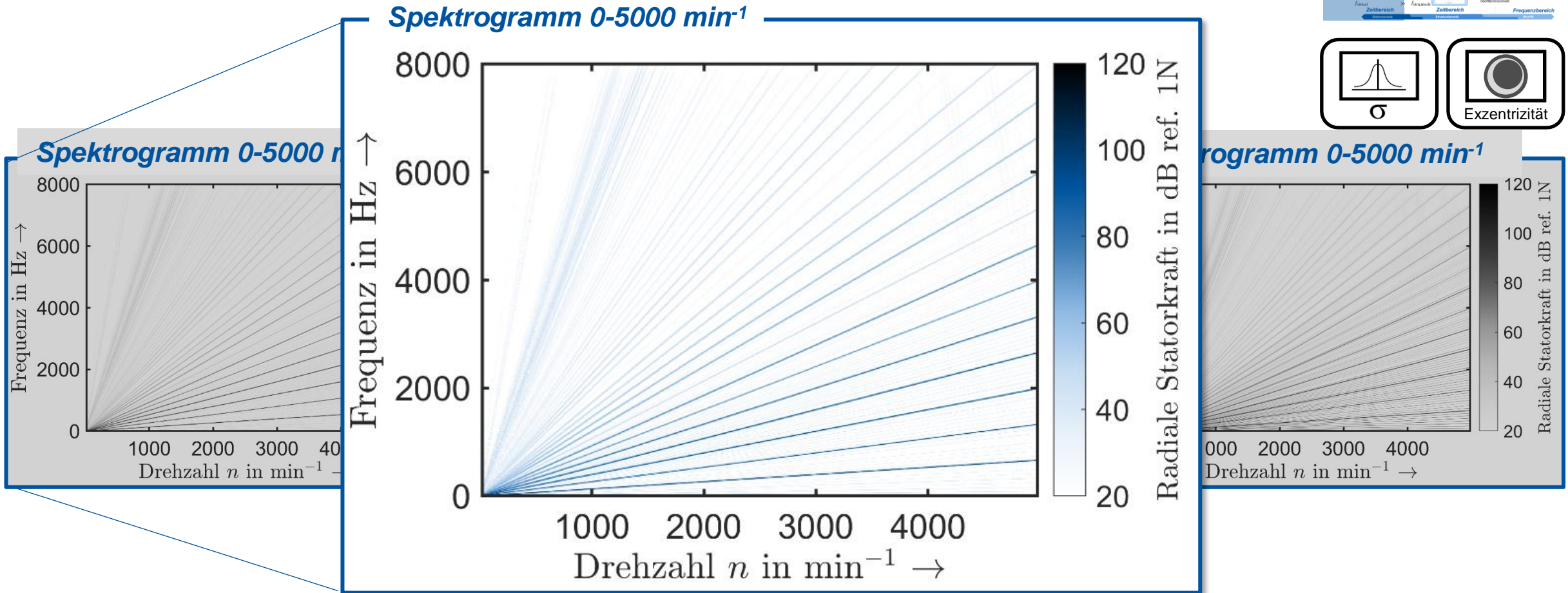
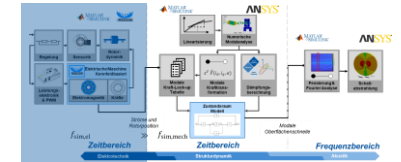




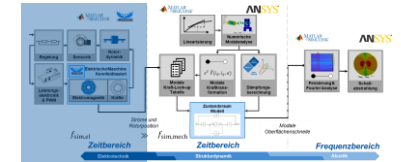
## Elektromagnetische Modellierung



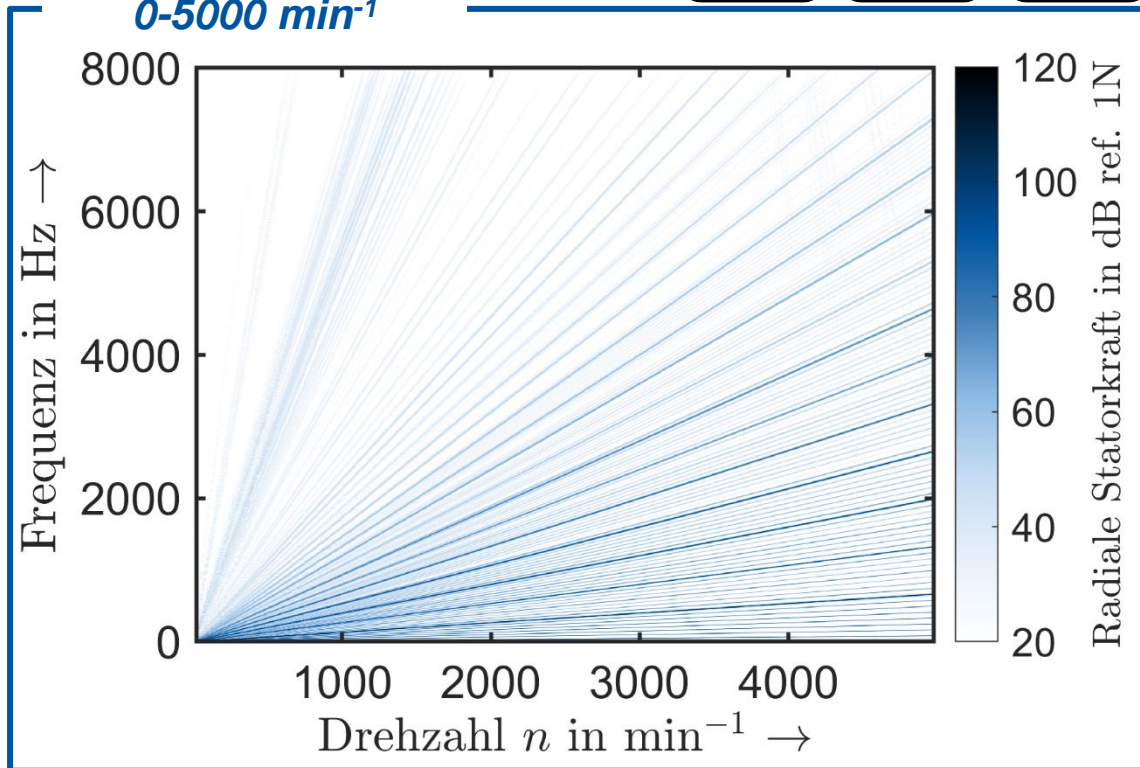
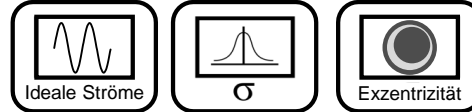
## Elektromagnetische Modellierung



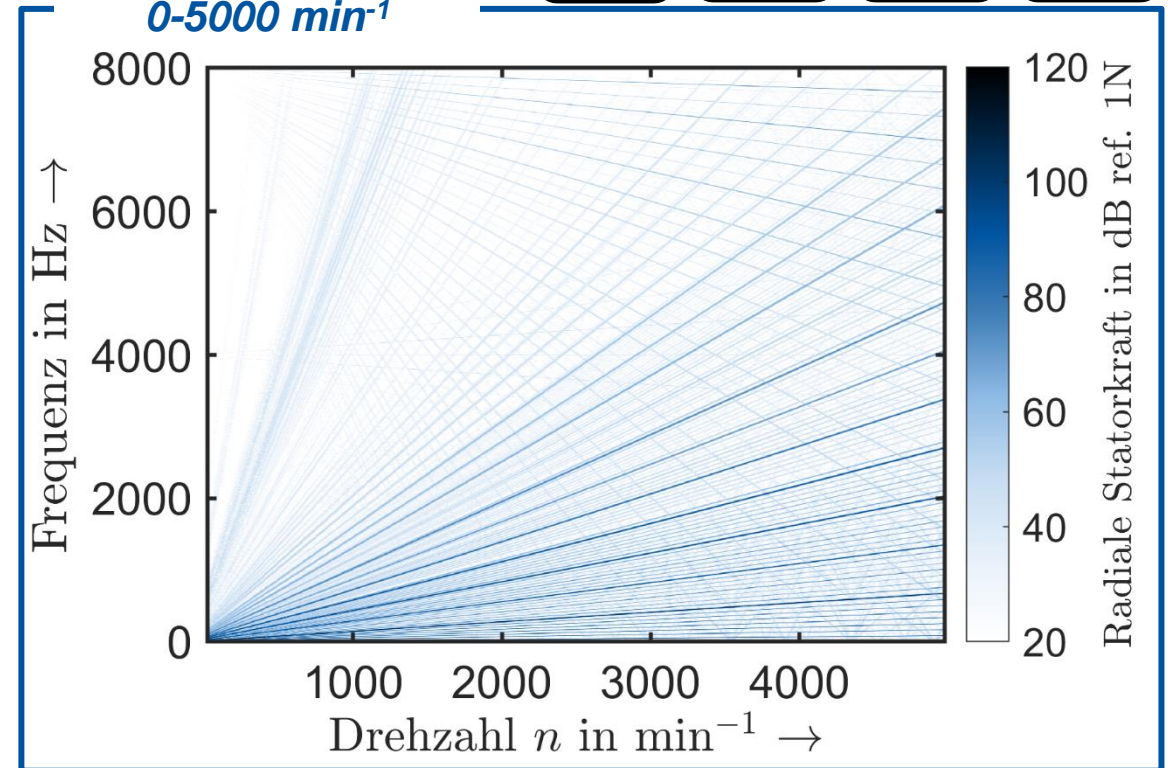
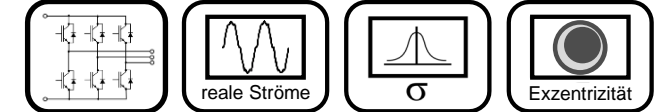
## Elektromagnetische Modellierung



**Spektrogramm**  
*0-5000 min<sup>-1</sup>*



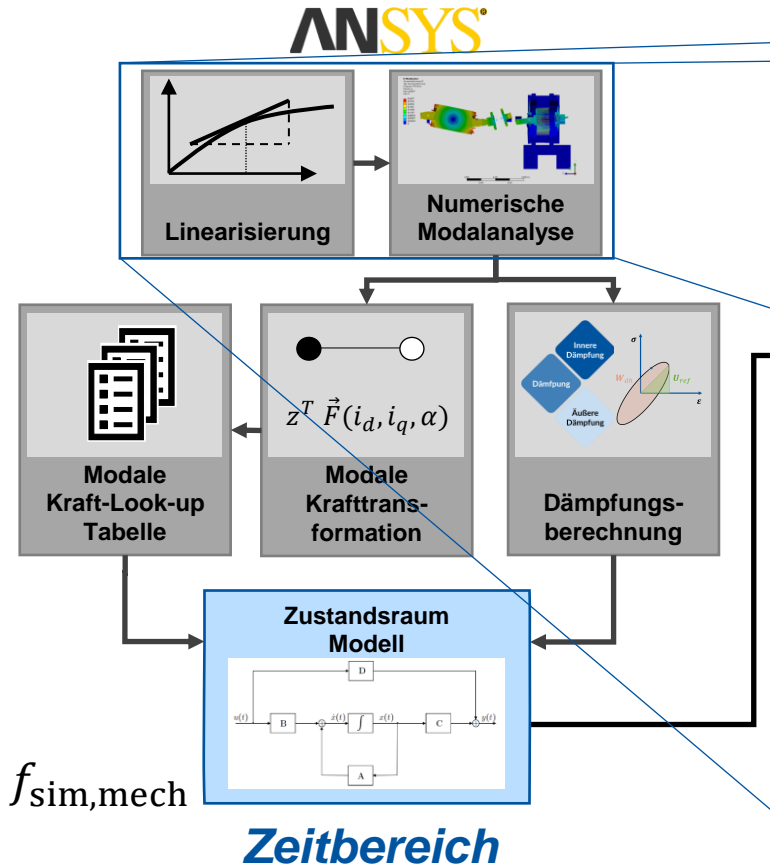
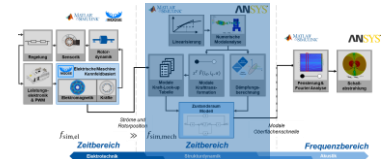
**Spektrogramm**  
*0-5000 min<sup>-1</sup>*



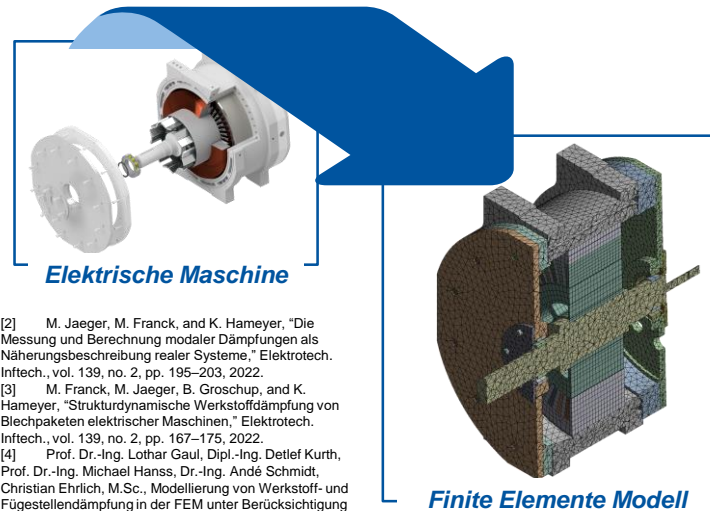
# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

## Strukturdynamische Modellierung

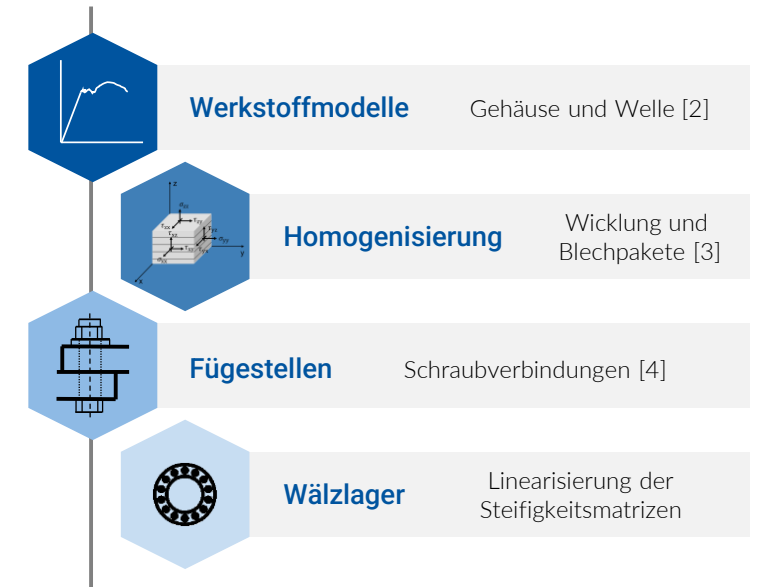
ANSYS



## Linearisiertes Strukturdynamisches FE-Modell



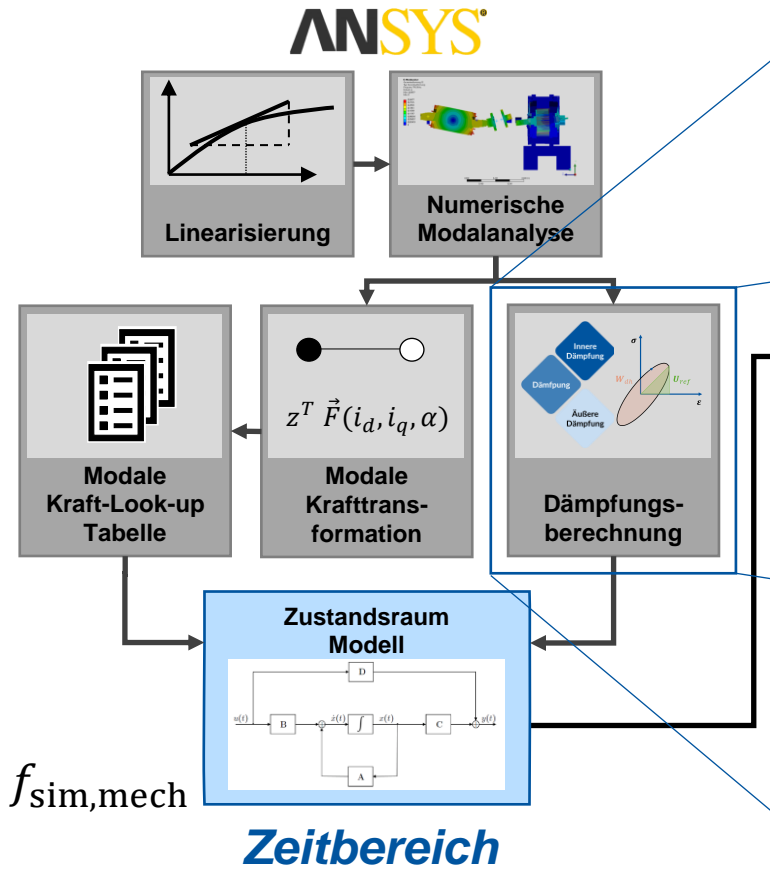
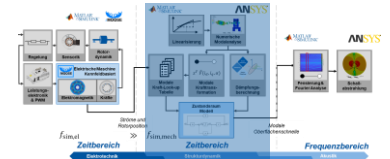
[2] M. Jaeger, M. Franck, and K. Hameyer, "Die Messung und Berechnung modaler Dämpfungen als Näherungsbeschreibung realer Systeme," *Elektrotech.*, vol. 139, no. 2, pp. 195–203, 2022.  
 [3] M. Franck, M. Jaeger, B. Groschup, and K. Hameyer, "Strukturdynamische Werkstoffdämpfung von Blechpaketen elektrischer Maschinen," *Elektrotech.*, vol. 139, no. 2, pp. 167–175, 2022.  
 [4] Prof. Dr.-Ing. Lothar Gaul, Dipl.-Ing. Detlef Kurth, Prof. Dr.-Ing. Michael Hanss, Dr.-Ing. André Schmidt, Christian Ehrlich, M.Sc., Modellierung von Werkstoff- und Fugstellendämpfung in der FEM unter Berücksichtigung von Unsicherheiten: Abschlussbericht über das Vorhaben Nr. 1119 (in Kooperation mit der DFG), 2015.



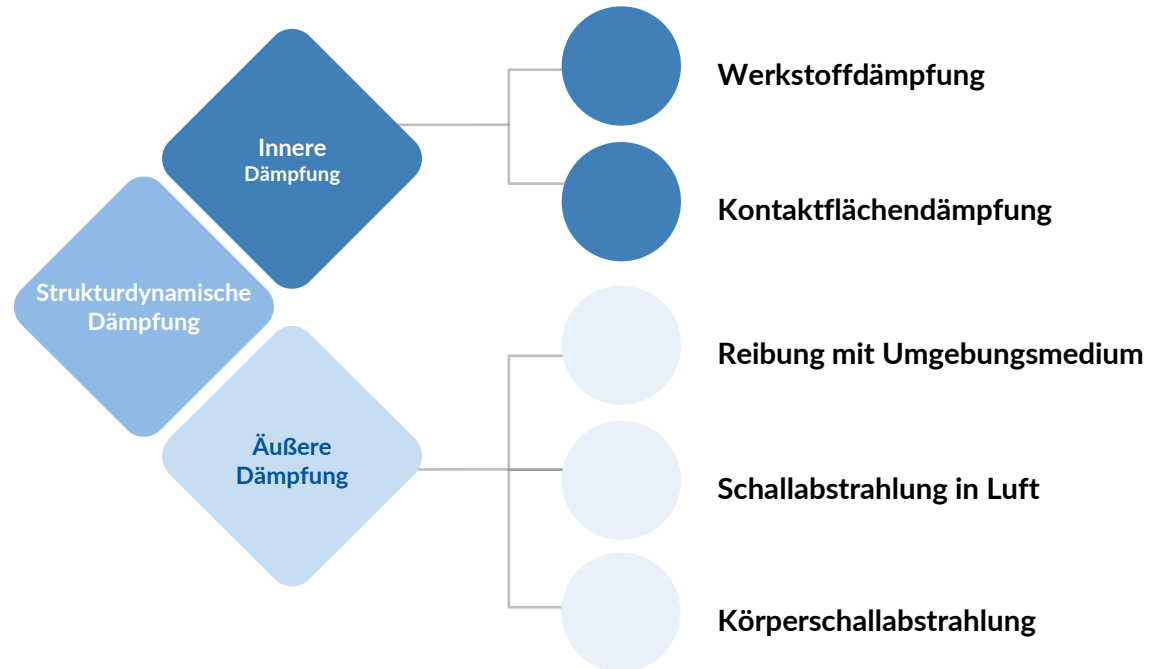
# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

## Strukturdynamische Modellierung

ANSYS

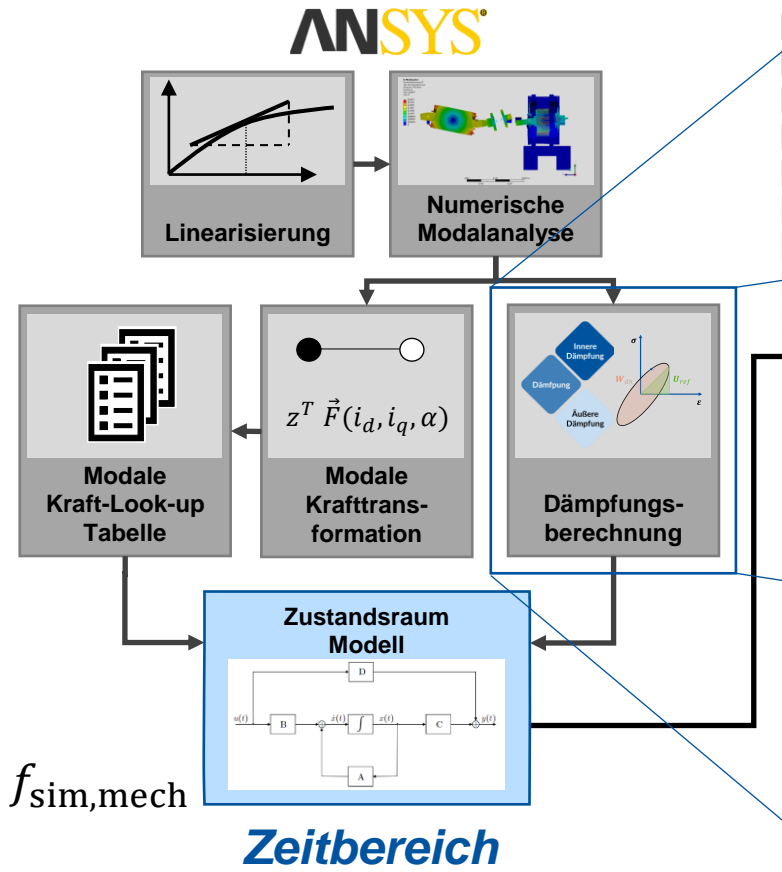
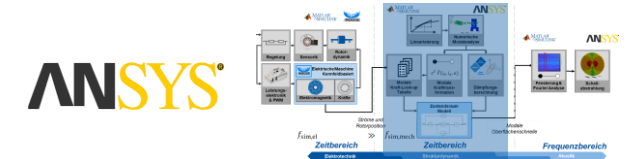


### Separation der Dämpfungseffekte



[5] VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (2004) VDI-Richtlinie 3830 Blatt 1 Werkstoff- und Bauteildämpfung: Einteilung und Übersicht

## Strukturdynamische Modellierung



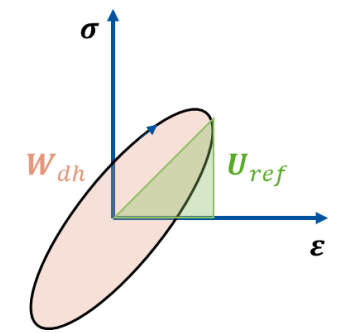
### Berechnung der Dämpfung über Verlustfaktoren

- Verlustfaktor  $\eta$ : Verlust an Schwingungsenergie pro Zyklus

$$\eta = \frac{\delta U}{2\pi U}$$

- Dissipierte Dehnungsenergie  $\delta U$ :

$$\delta U = \int_V \oint \sigma d\epsilon dV = \int_V \int_{\frac{2\pi}{\omega}} \sigma \frac{d\epsilon}{dt} dt dV$$



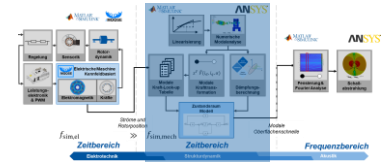
- Erweiterung der Beschreibung für innere und äußere Dämpfung:

$$\eta = \frac{\sum \delta U_{Di} + \sum \delta U_{DFi} + \sum \delta U_{DAi}}{2\pi U}$$

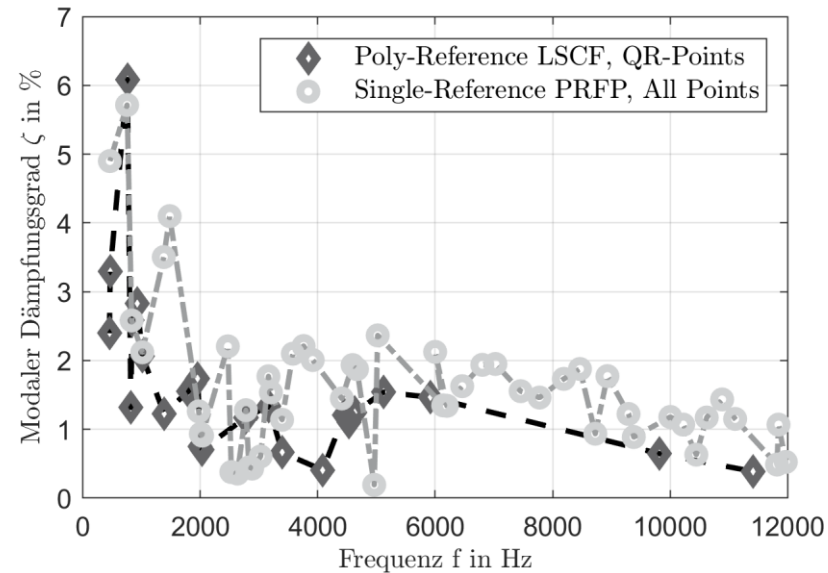
$\delta U_{Di}$ : diss. Dehnungsenergie aufgrund der Werkstoffdämpfung  
 $\delta U_{DFi}$ : diss. Dehnungsenergie aufgrund der Fugestellendämpfung  
 $\delta U_{DAi}$ : diss. Dehnungsenergie aufgrund der Strahlungsdämpfung

## Experimentelle Modalanalyse zum Modellabgleich

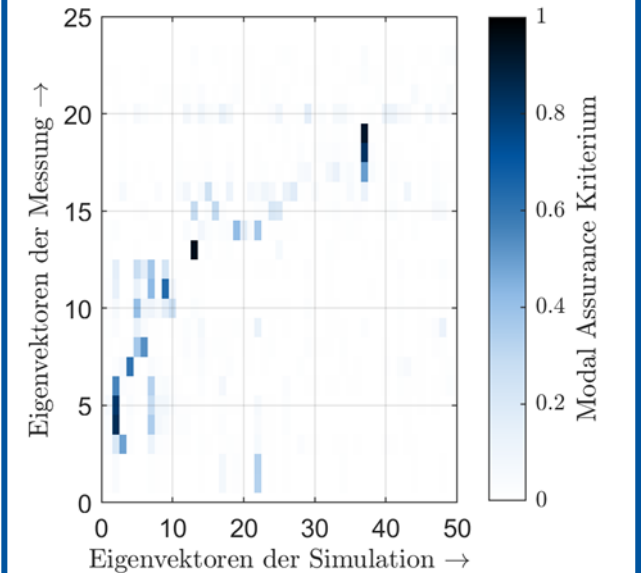
### 3D-Laser-Doppler-Vibrometrie



### Modaler Dämpfungsgrad



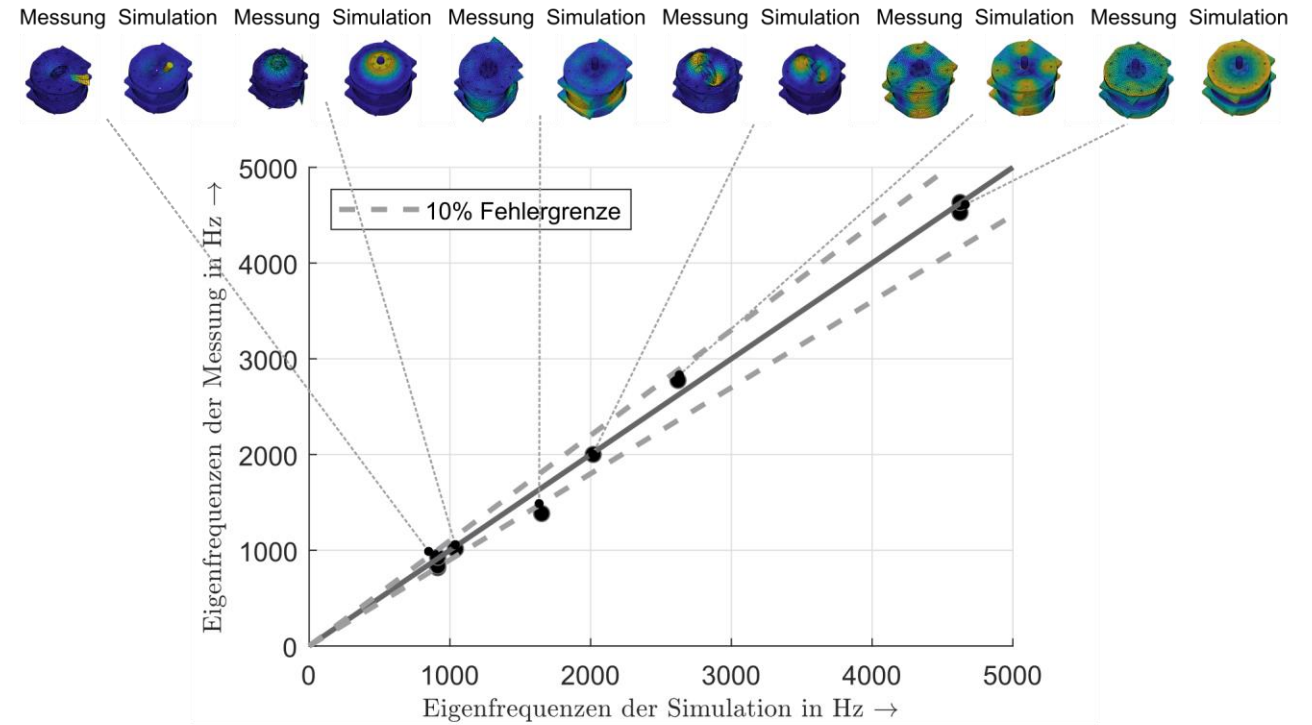
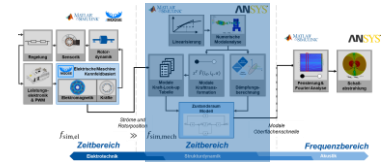
### MAC Poly LSCF



# Untersuchung und Modellierung des akustischen Verhaltens von elektrischen Maschinen

## Experimentelle Modalanalyse zum Modellabgleich

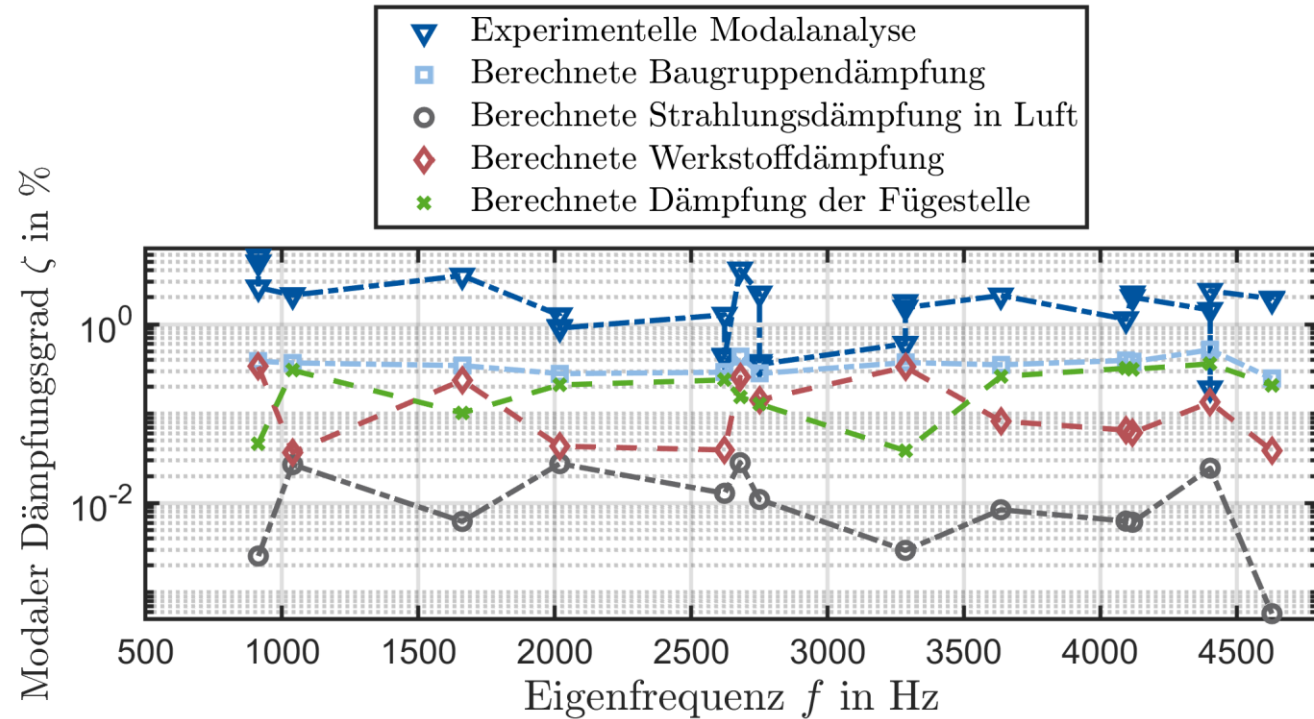
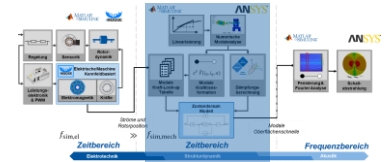
### 3D-Laser-Doppler-Vibrometrie





## Experimentelle Modalanalyse zum Modellabgleich

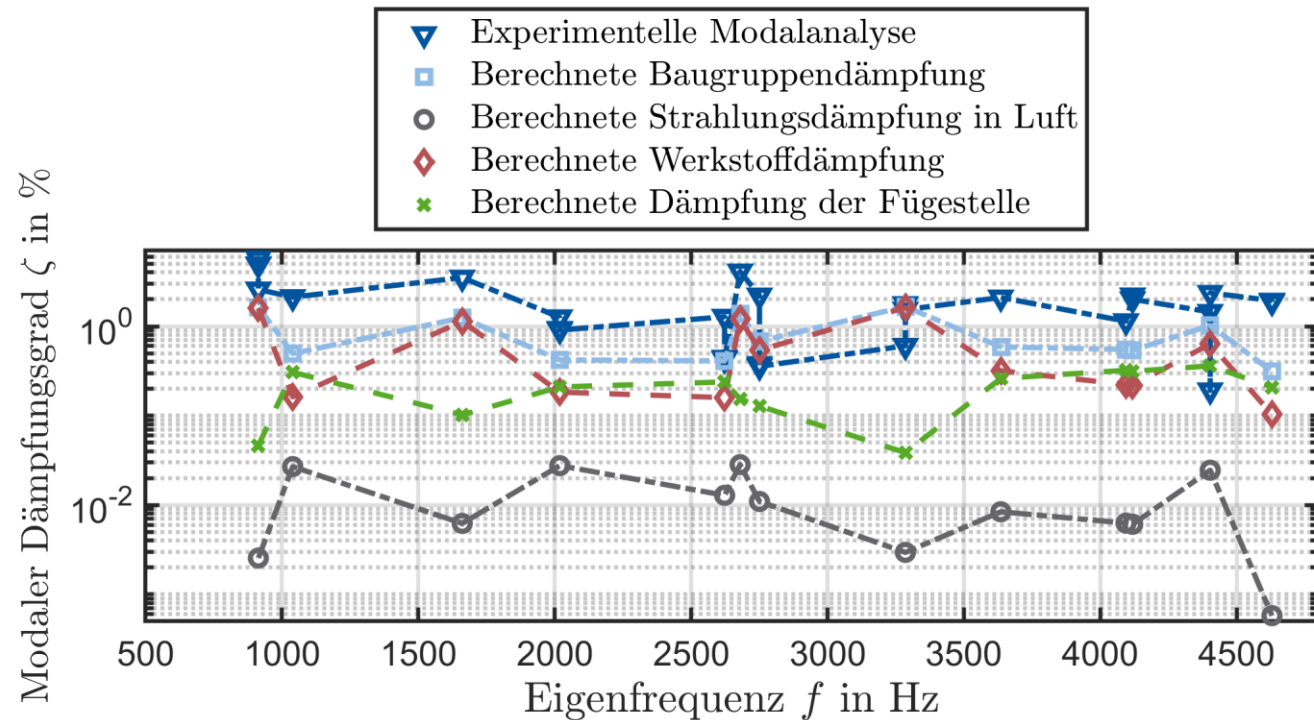
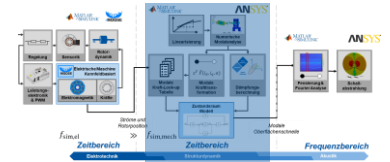
### 3D-Laser-Doppler-Vibrometrie



➤ Berechnung liefert im Vergleich kleinere modale Dämpfungsgrade

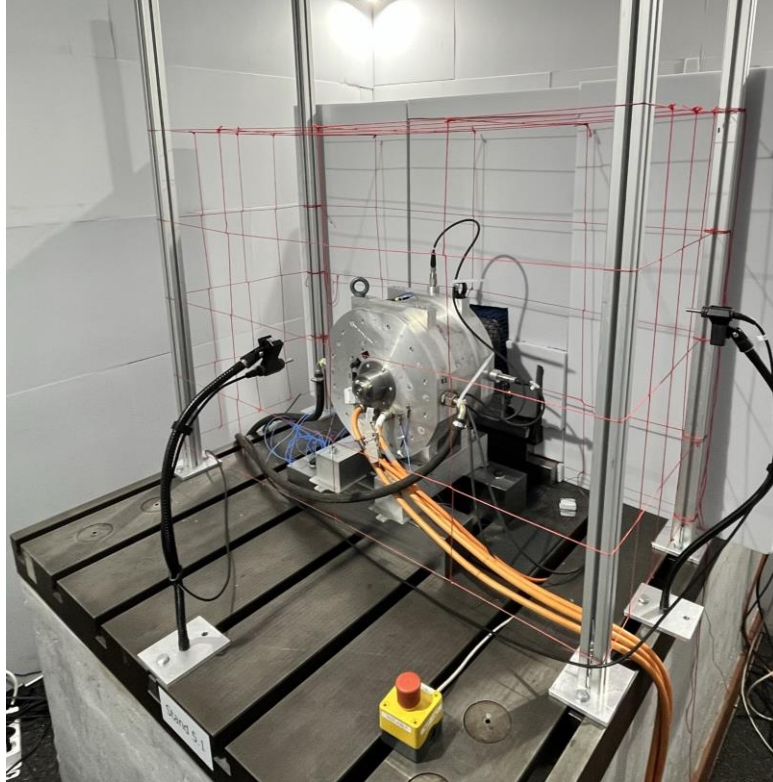
## Experimentelle Modalanalyse zum Modellabgleich

### 3D-Laser-Doppler-Vibrometrie



➤ Vergrößerung des Werkstoffverlustfaktors des Tränkharnes des Wicklungssystems z.B. um Faktor 5

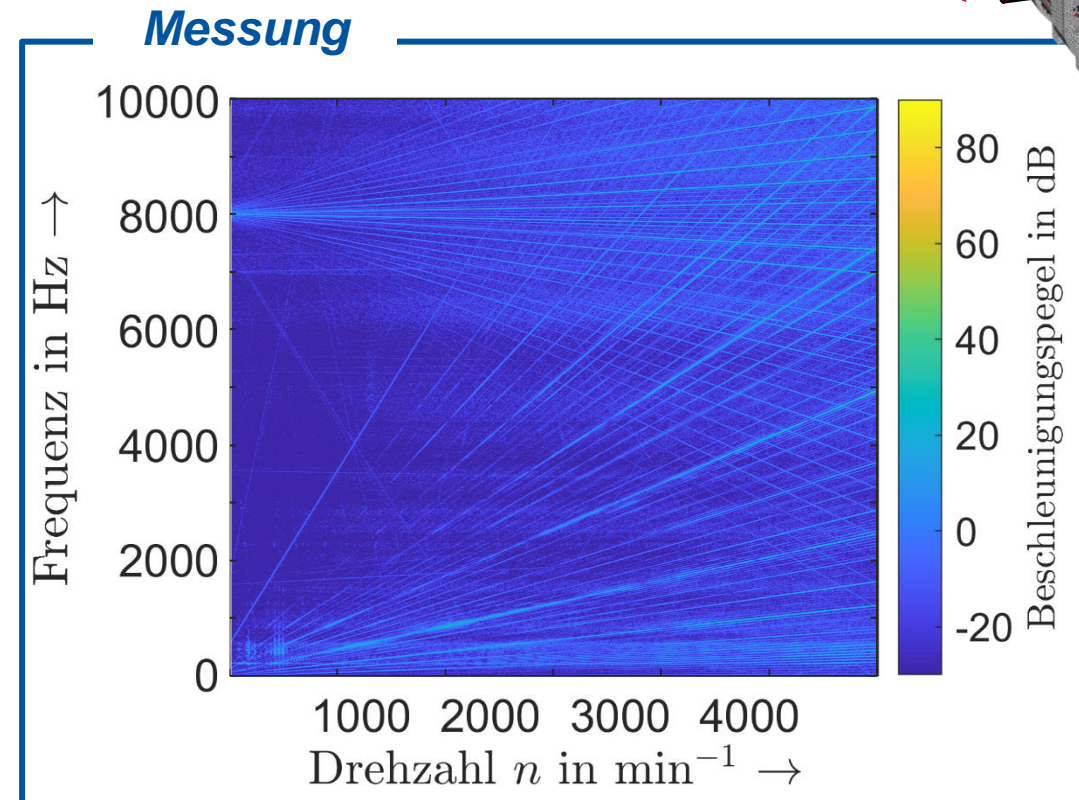
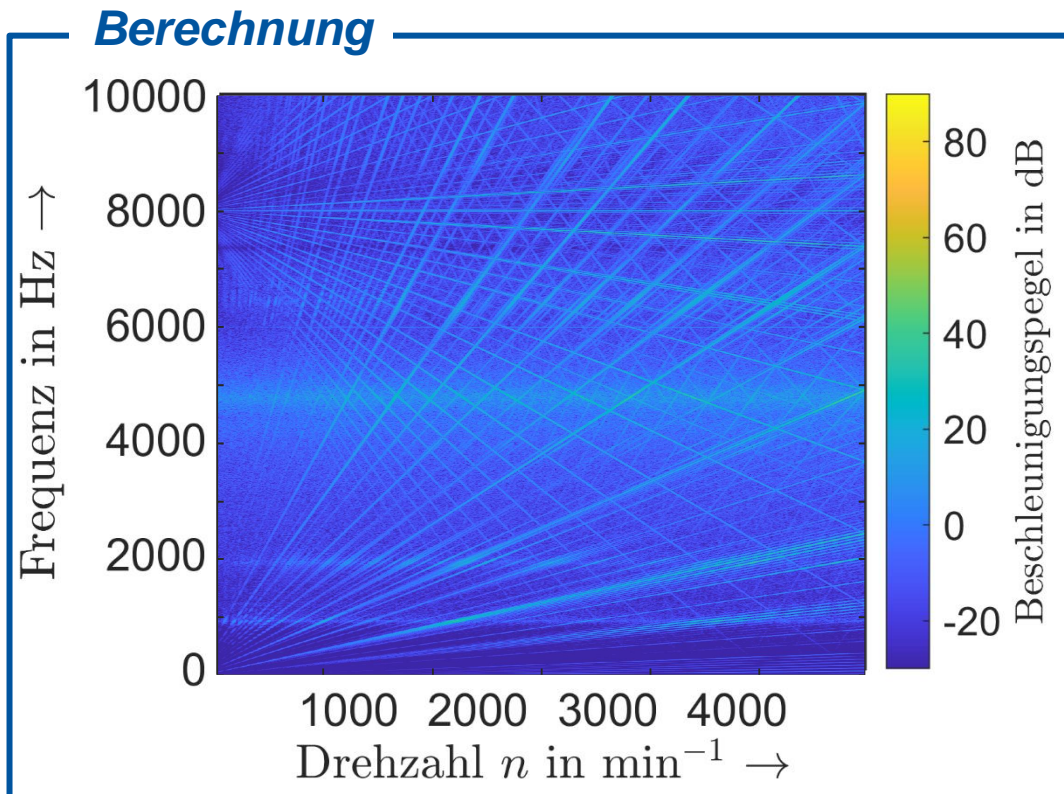
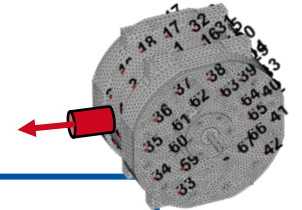
## Vermessung der Maschine auf einem Akustikprüfstand



**Versuchsaufbau am IEM**

- Versuchsaufbau am Akustikprüfstand des IEM
- Messtechnische Erfassung:
  - Körperschall an 67 Messposition in 3D
  - Luftschall an zwei festen Mikrofonpositionen
  - Bestimmung der Schallleistung durch Schallintensitätsmessung
  - Elektrische Größen, wie z.B. Spannungen und Ströme
  - Wickelkopftemperaturen
- Vermessung in Vollast und Teillast
- Hochläufe und konstante Betriebspunkte
- **Ziel:** Verifikation des vorgestellten Systemmodells

## Körperschallvergleich: Hochlauf von $n=0 - 5000 \text{ min}^{-1}$ bei $M=50 \text{ Nm}$



## Zusammenfassung

- Linearisiertes Systemmodell zur Berechnung des akustischen Verhalten im transienten Betrieb von elektrischen Maschinen
- Betrachtung von Fertigungsabweichungen und von Umrichterspeisung zur präzisen Kraftberechnung empfohlen
- Dämpfungsberechnung auf Basis modaler Dehnungsenergien liefert ohne Modellupdate zu geringe Dämpfungsgrade
- Ergebnisse des Körperschalls korrelieren mit Messungen, Amplituden werden jedoch noch überschätzt
- Analyse von akustischen Größen noch ausstehend

