

3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Marius Franck, M. Sc. RWTH, IEM RWTH Aachen University

Dennis Berft, M. Eng., Polytec GmbH

Dr. Jochen Schell, Polytec GmbH

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dres. h.c. Kay Hameyer, IEM RWTH Aachen University

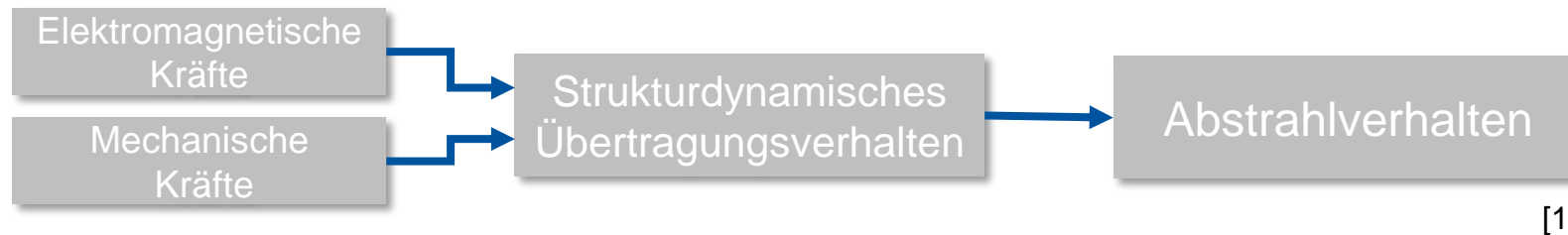
Magdeburg, 28.06.2023



3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Motivation

- Geräusche und Schwingungen von elektrischen Maschinen sind ein wichtiges Qualitäts- und Auslegungskriterium
- Das akustische Verhalten kann beschrieben werden durch:

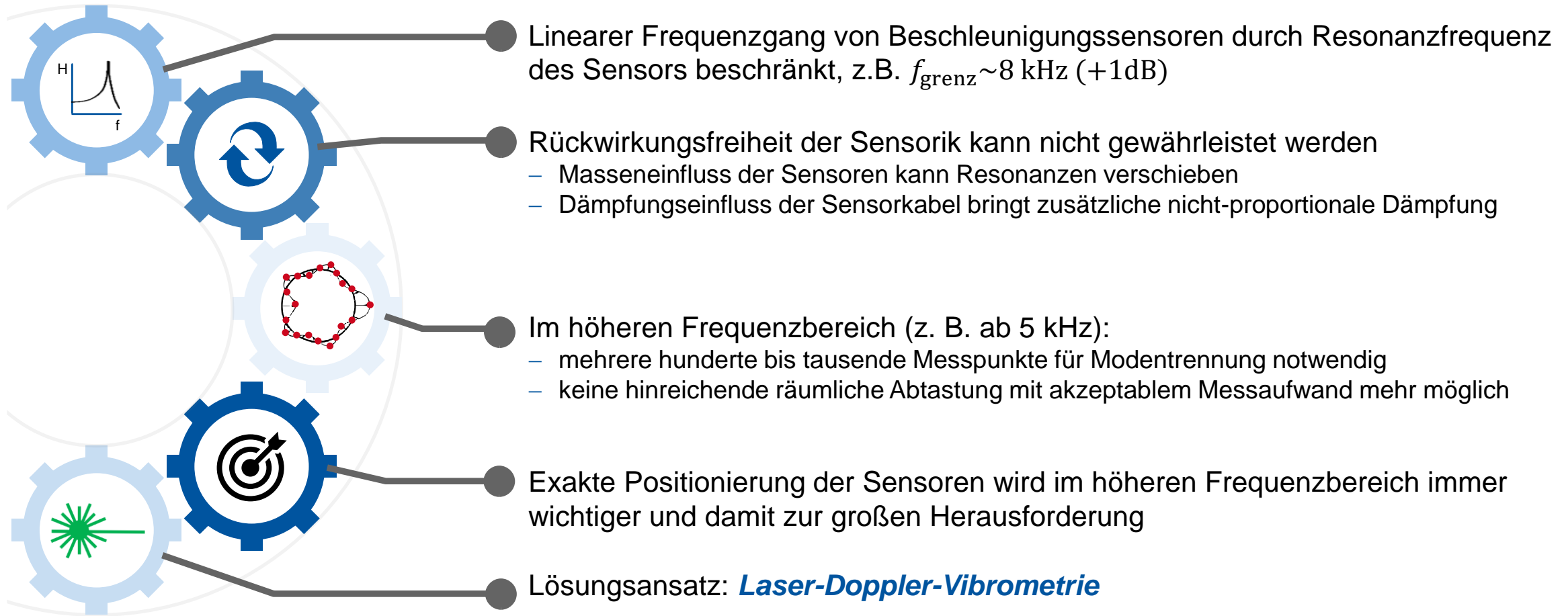


- Zur Modellierung der Strukturdynamik werden präzise Material- und Dämpfungsmodelle benötigt
- Zur Parametrierung und Validierung dieser Modelle wird häufig die **experimentelle Modalanalyse** eingesetzt



[1] J. F. Gieras, J. C. Lai, and C. Wang, Noise of polyphase electric motors, Boca Raton FL: CRC/Taylor & Francis, 2006.

Beschränkungen bei der Nutzung von Beschleunigungssensoren



3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Roboter-gestützte 3D-Laser-Doppler-Vibrometrie

3D Scanning LDV

- **3D Messung** durch Triangulation von drei Scanning Laser-Doppler-Vibrometern



Roboter-gestütztes 3D Scanning LDV

- **3D Messung** durch Triangulation von drei Scanning Laser-Doppler-Vibrometern
- **Positionierung** durch Industrieroboter

Einpunkt LDV

- Berührungsfreie Messung der Oberflächengeschwindigkeit an **einem Messpunkt** in **Laserstrahlrichtung**



1D Scanning LDV

- Messung in **Laserstrahlrichtung**
- Laserstrahl wird mit Hilfe von Spiegeln auf **mehrere Messpunkte** abgelenkt
- Nutzung von Bildverarbeitung zur Messpunktdefinition aus z.B. der FEM

Anzahl der messbaren Freiheitsgrade



3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur vollflächigen Schwingungsanalyse

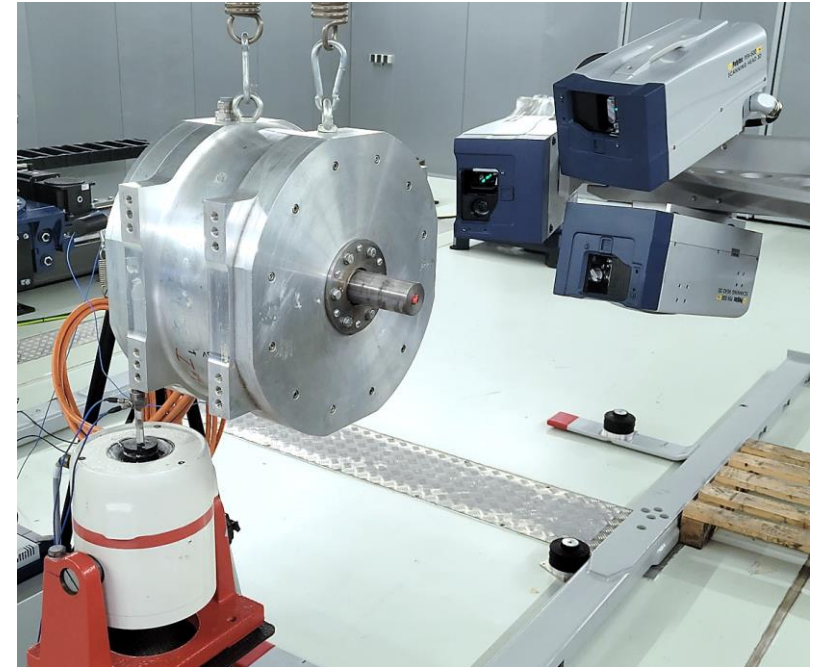
- Gemeinsame Messkampagne von der Polytec GmbH und dem IEM der RWTH Aachen

Ziel

- FEM-Validierung im hörbaren akustischen Bereich

Ansatz

- Vollflächige experimentelle Modalanalyse einer elektrischen Maschine mit Hilfe der PSV-3D-Scanning-Vibrometrie
 - Anregung und Messung bis 12,8 kHz realisierbar
 - Hohe Messpunktdichte (>5000) zur Modentrennung notwendig



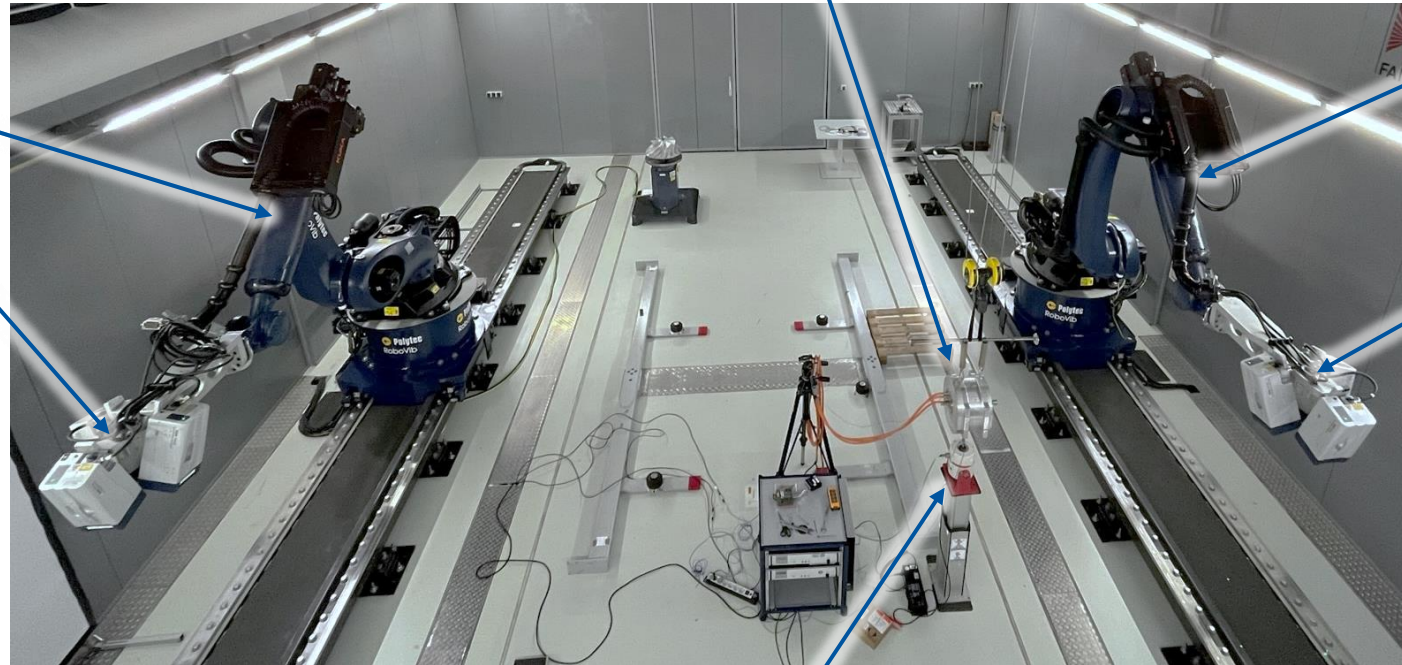
3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

RoboVib®-Testzentrum

*Untersuchte elektrische
Maschine*

Roboter 2

*3D Scanning
Laservibrometer*



Roboter 1

*3D Scanning
Laservibrometer*

Shaker bzw. Modalhammer

3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Aufbau mit Shaker

Anregung

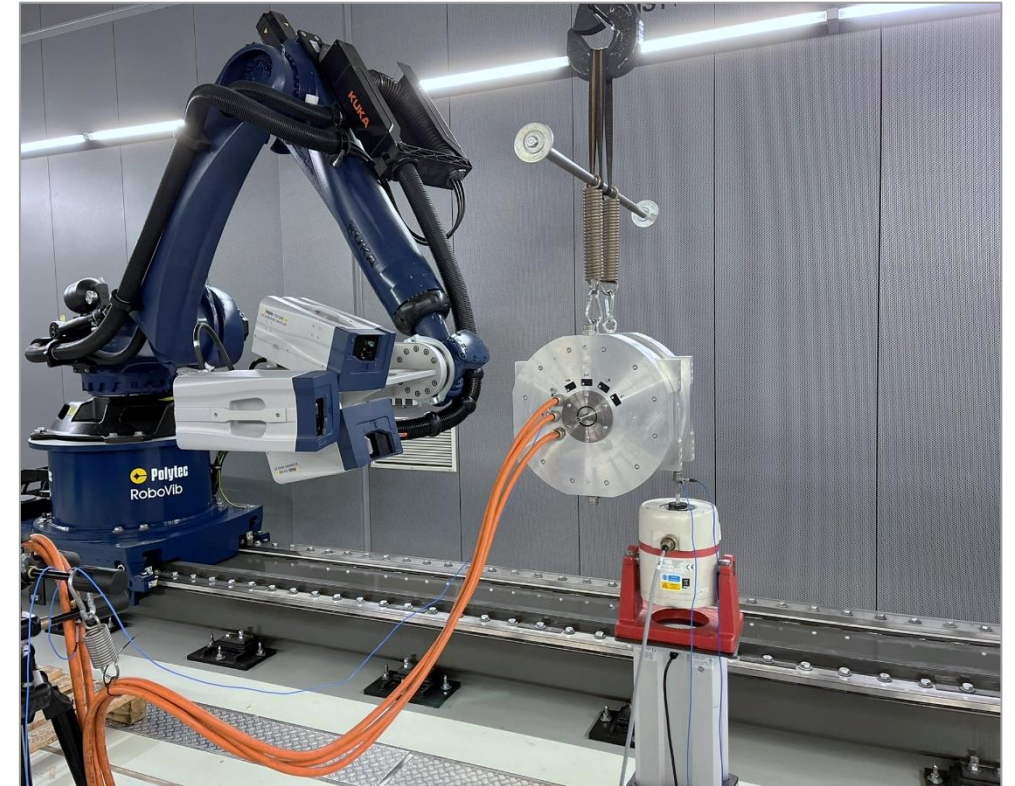
- Shaker: *LDS V406/8-P100E*
- Spezifikationen: *5 Hz – 9 kHz, bis 196 N*
- Sensorik: *Impedanz-Messkopf PCB-288D01*

Anregungssignal

- Amplitudenkorrigiertes Pseudo-Rauschen
- Frequenzbereich: *400 Hz - 8 kHz*

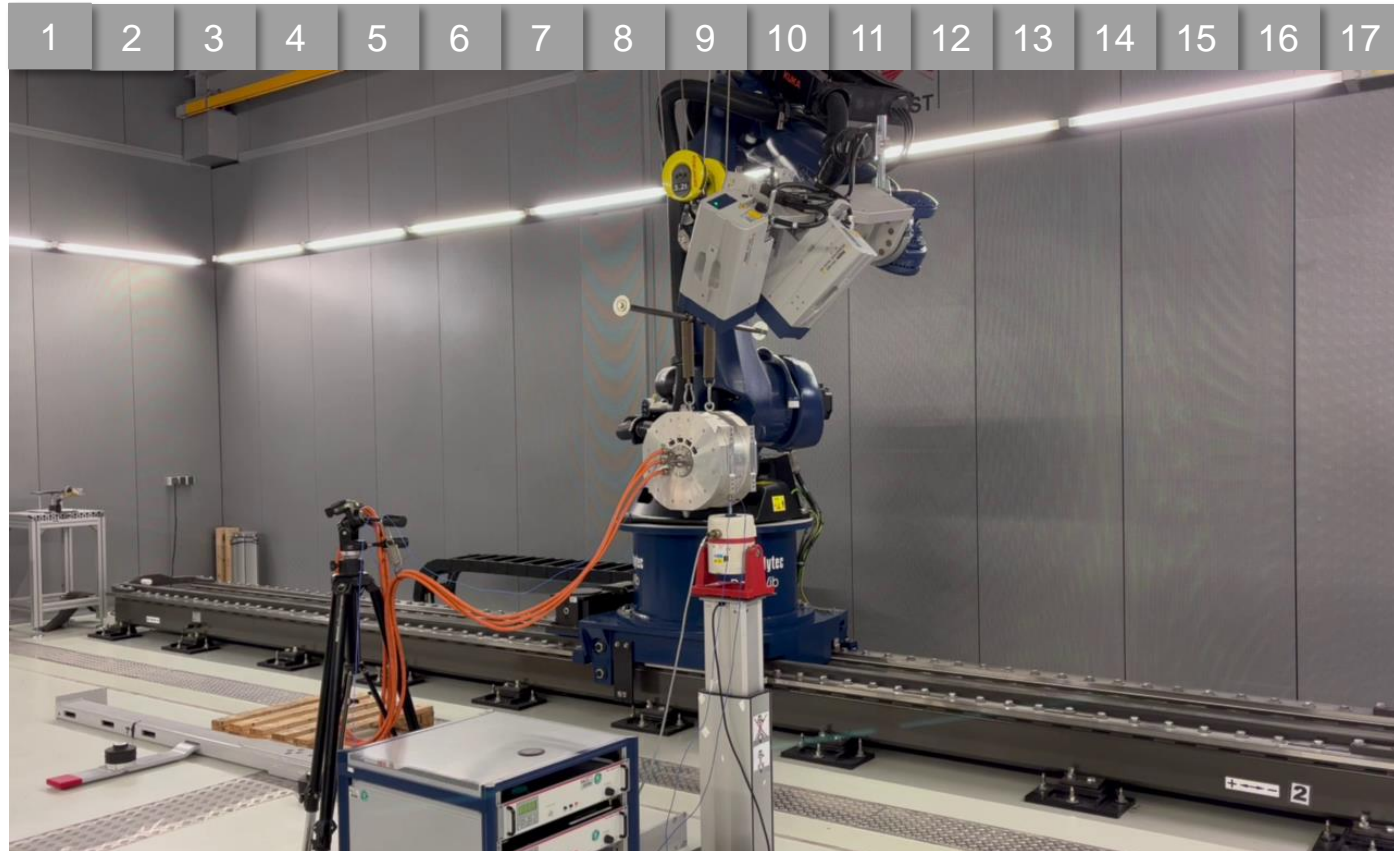
Vibrometer zur Schwingungserfassung

- PSV-3D-Xtra-Scanning-Vibrometer



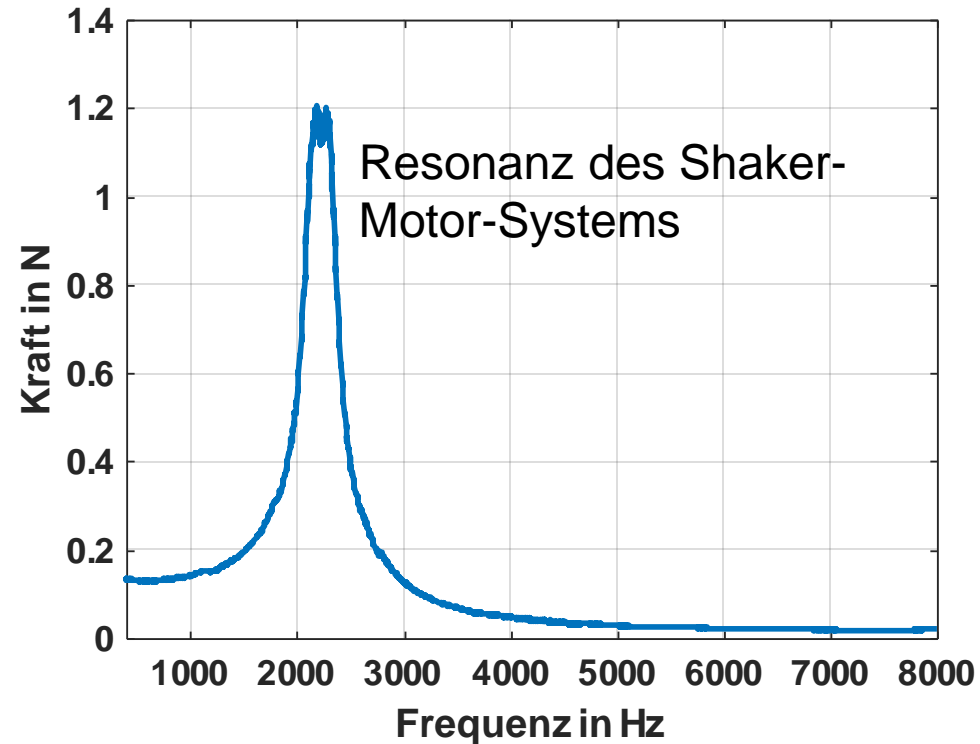
3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Durchführung der Messung

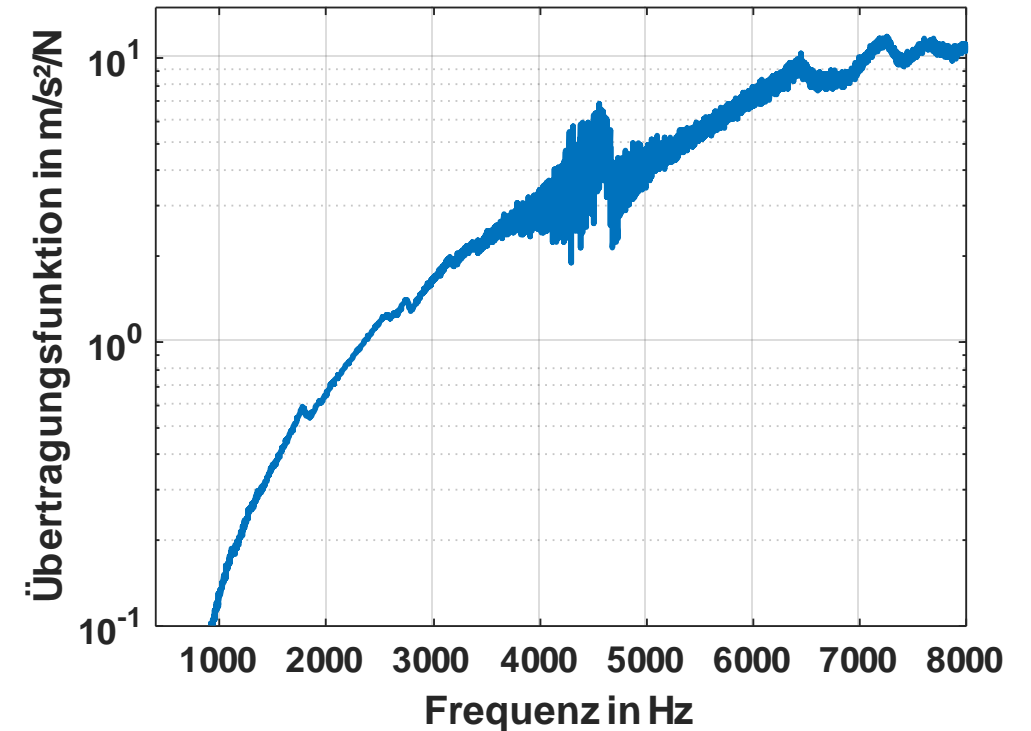


Unbehandeltes Anregungssignal des Shakers

Spektrum der Anregungskraft

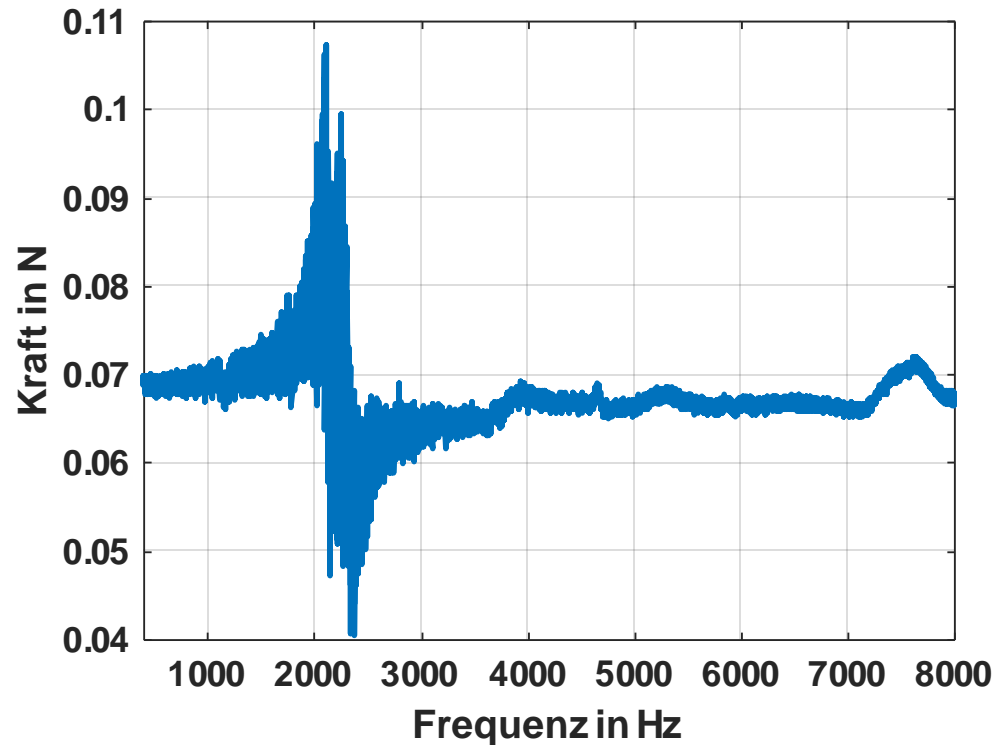


FRF am Anregungspunkt

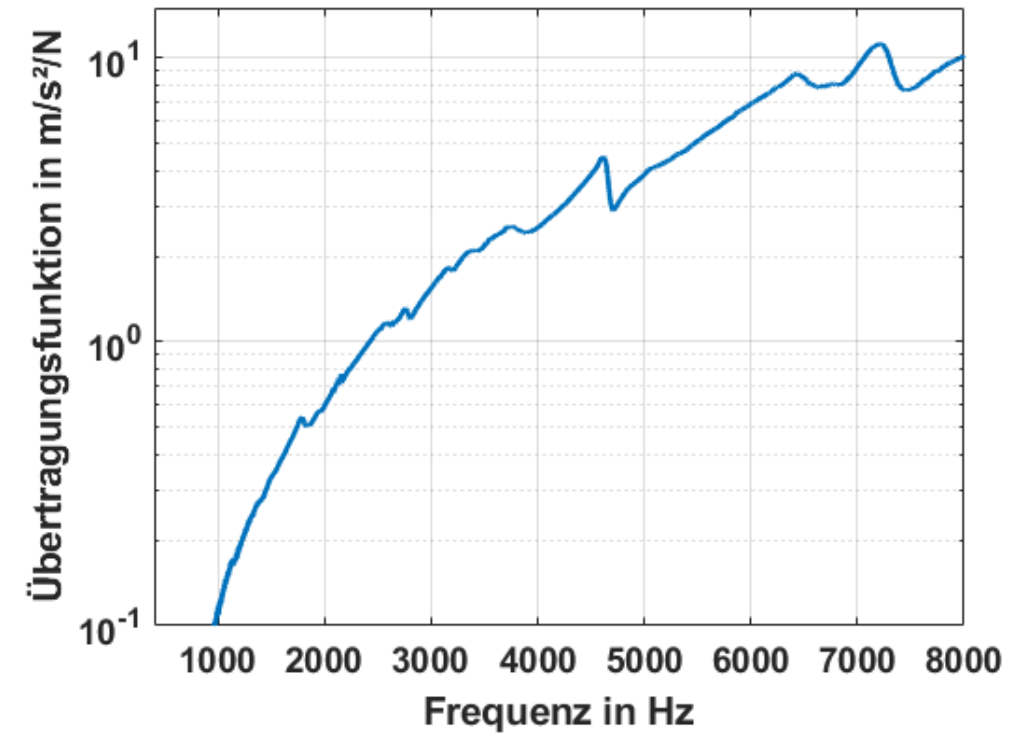


Optimiertes Anregungssignal des Shakers

Spektrum der Anregungskraft



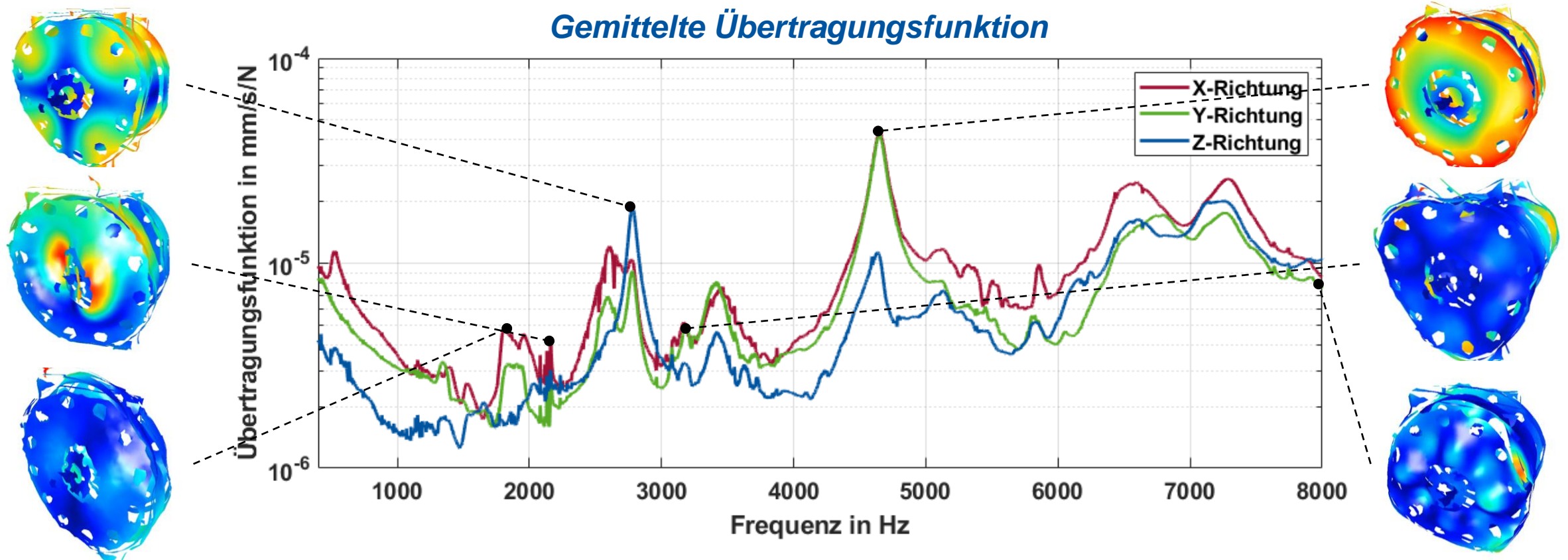
FRF am Anregungspunkt



Optimierung mittels Amplitudenkorrektur-Datei (Equalizer für das Kraftspektrum)

Ergebnisse aus Messung mit >5000 Messpunkten

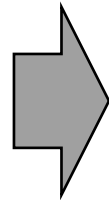
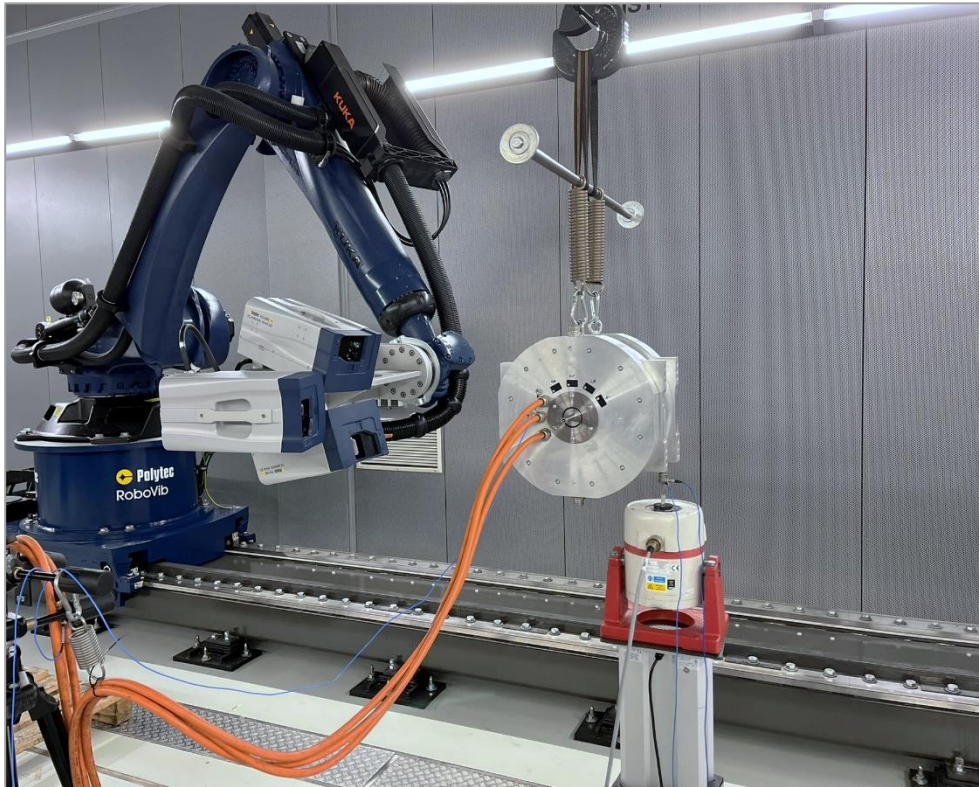
Gemittelte Übertragungsfunktion



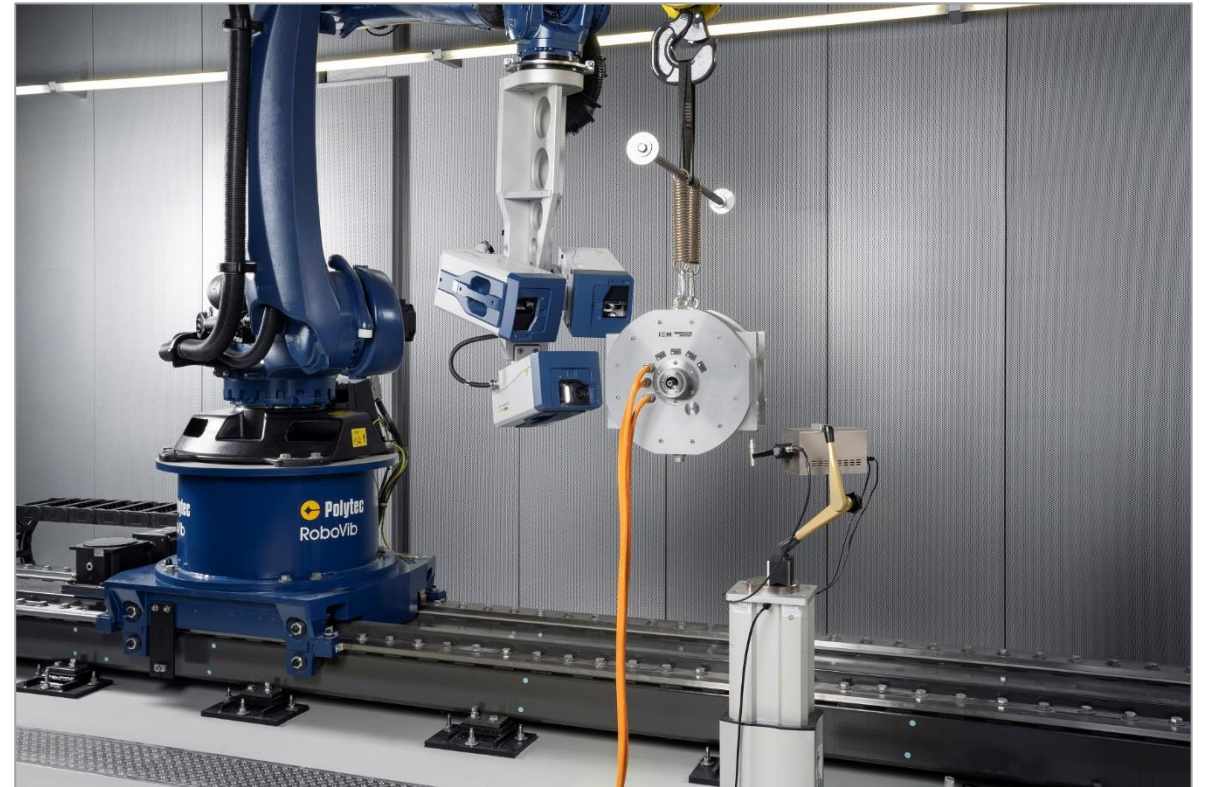
3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Anpassung des Versuchsaufbaus

Von: *Shaker und PSV Xtra*



Zu: *Automatischer Modalhammer und PSV QTec*



3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Aufbau mit automatischem Modalhammer

Anregung

- Automatischer Modalhammer: NV-Tech SAM3
- *Spezifikationen: bis 10 kHz, bis 2,2 kN*
- Versteifung der Anregungsstelle durch aufgeklebtes Stahlplättchen

Anregungssignal

- Impulsanregung
- Frequenzbereich: bis 12,8 kHz

Vibrometer zur Schwingungserfassung

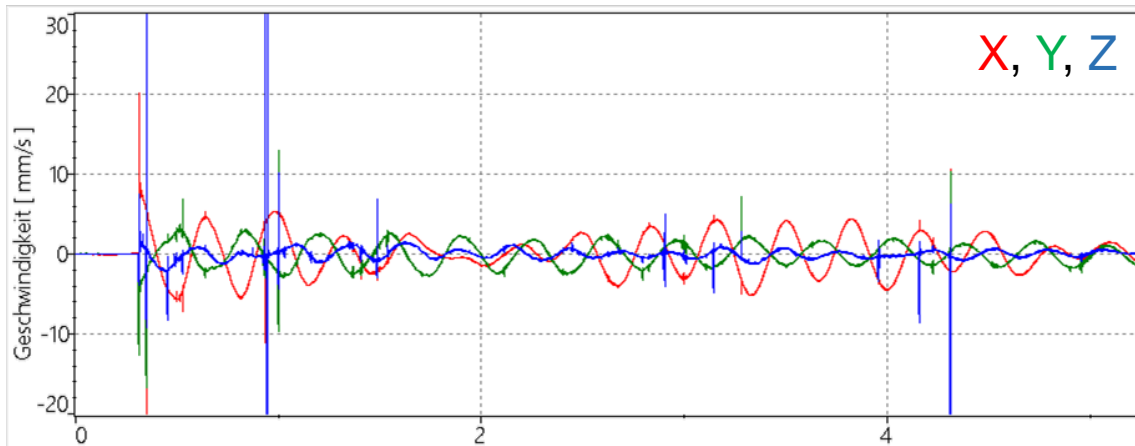
- PSV-3D-QTec-Scanning-Vibrometer



3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

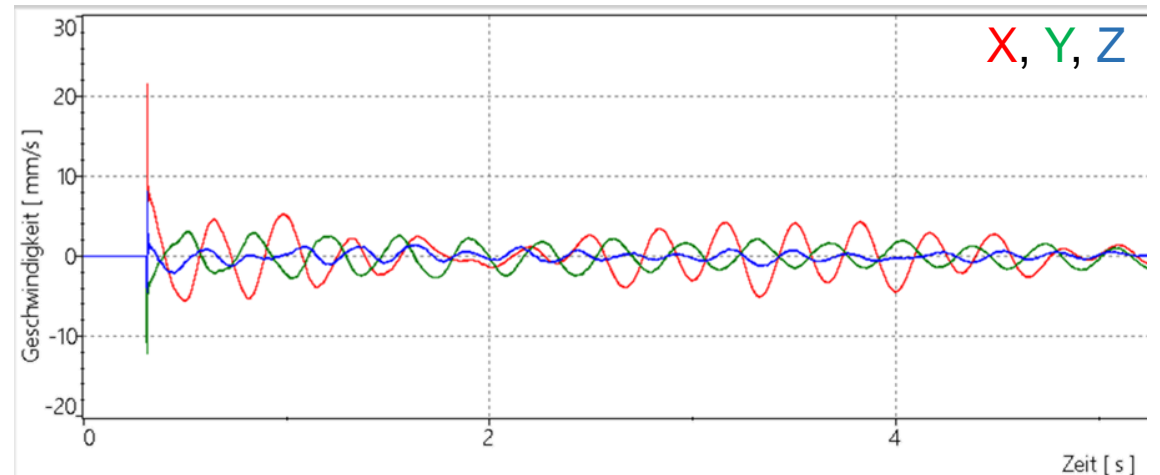
Signalverbesserung dank QTec

Ohne QTec



- Querbewegungen der Struktur durch Hammerschlag führen zu Signalaussetzern

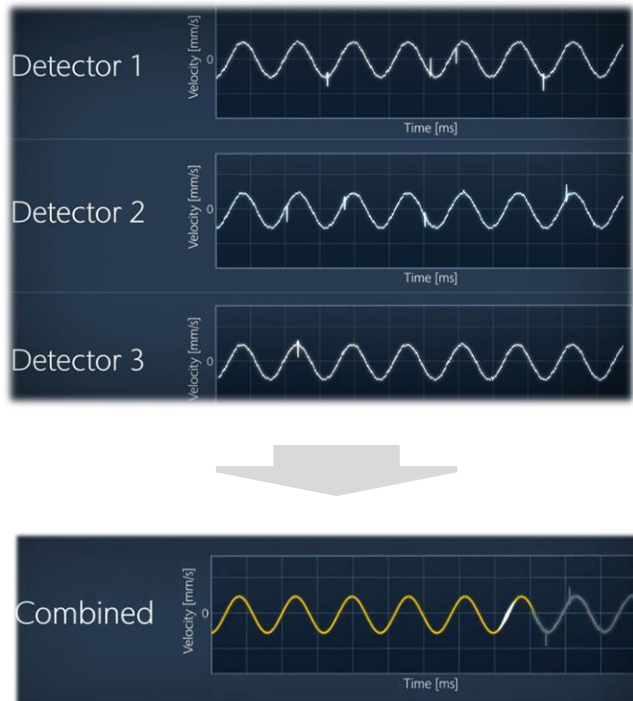
Mit QTec



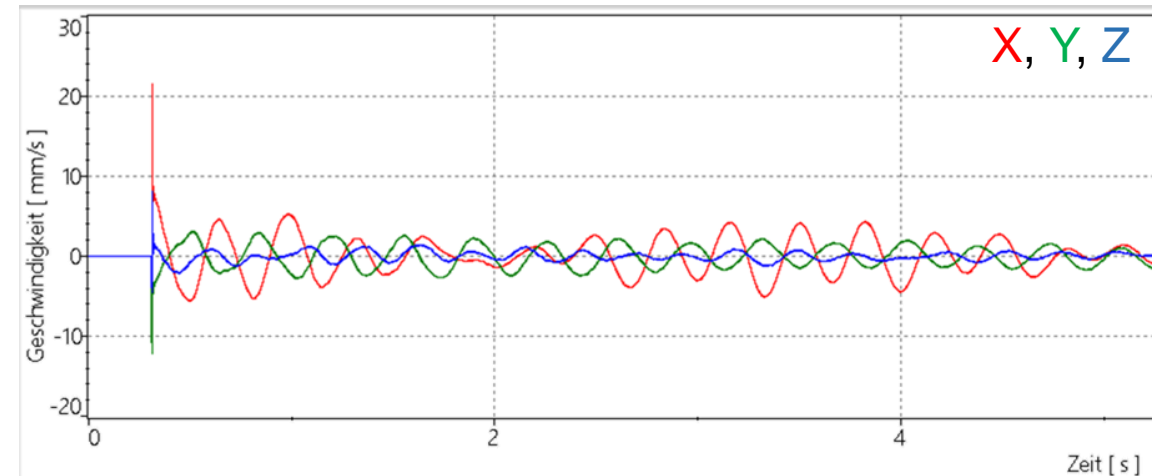
- QTec-Vibrometer besitzen mehrere Detektoren deren Signale intelligent verrechnet werden, um Signalaussetzer zu verhindern

Signalverbesserung dank QTec

QTec-Technologie



Mit QTec

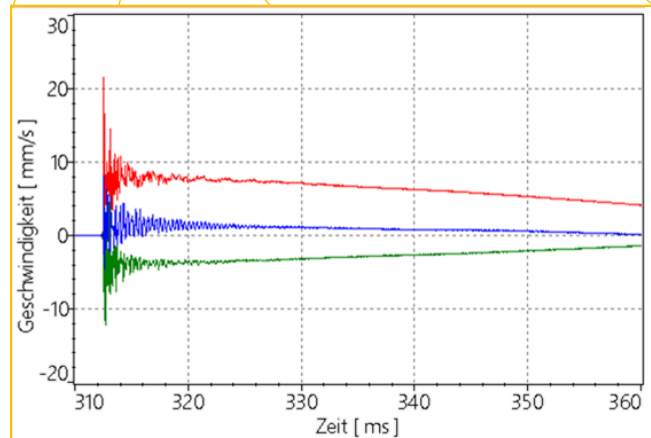


- QTec-Vibrometer besitzen mehrere Detektoren deren Signale intelligent verrechnet werden, um Signalaussetzer zu verhindern

Ausschwingen nach Hammerschlag der elastisch gelagerten Struktur



- Messzeit bis zum Ausschwingen viel zu lang für Scan

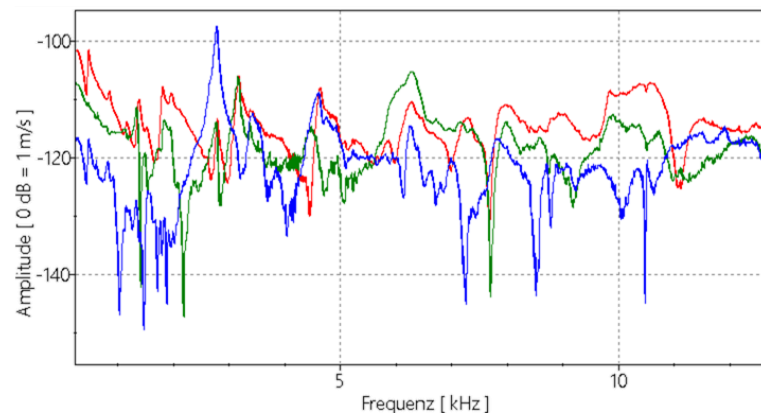
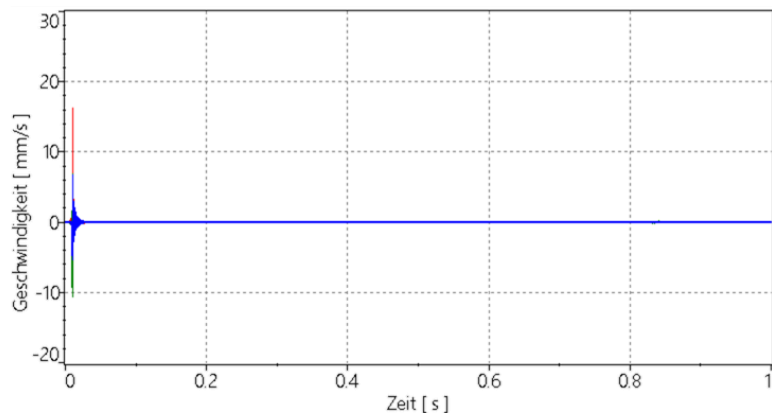
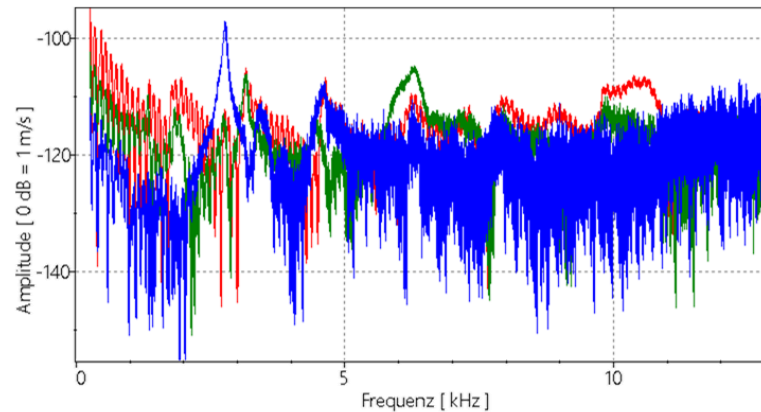
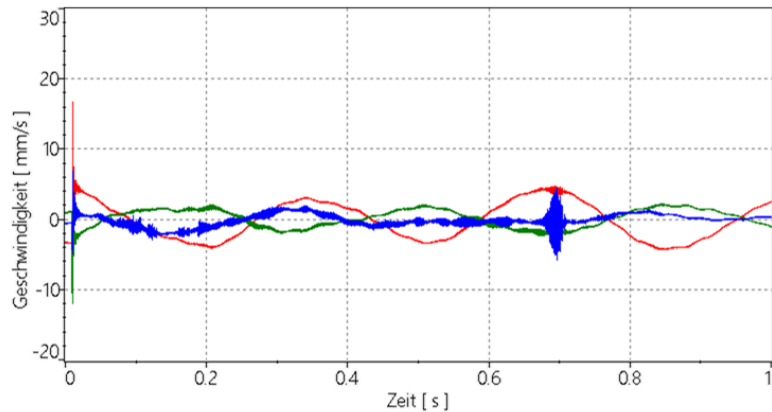


- Relevanter Informationsgehalt beschränkt sich auf die ersten 50 ms
- Feine Frequenzauflösung (längere Messzeit) gefordert

Zukünftige Messungen:

- Messzeit von 1 s für eine Frequenzauflösung von 1 Hz

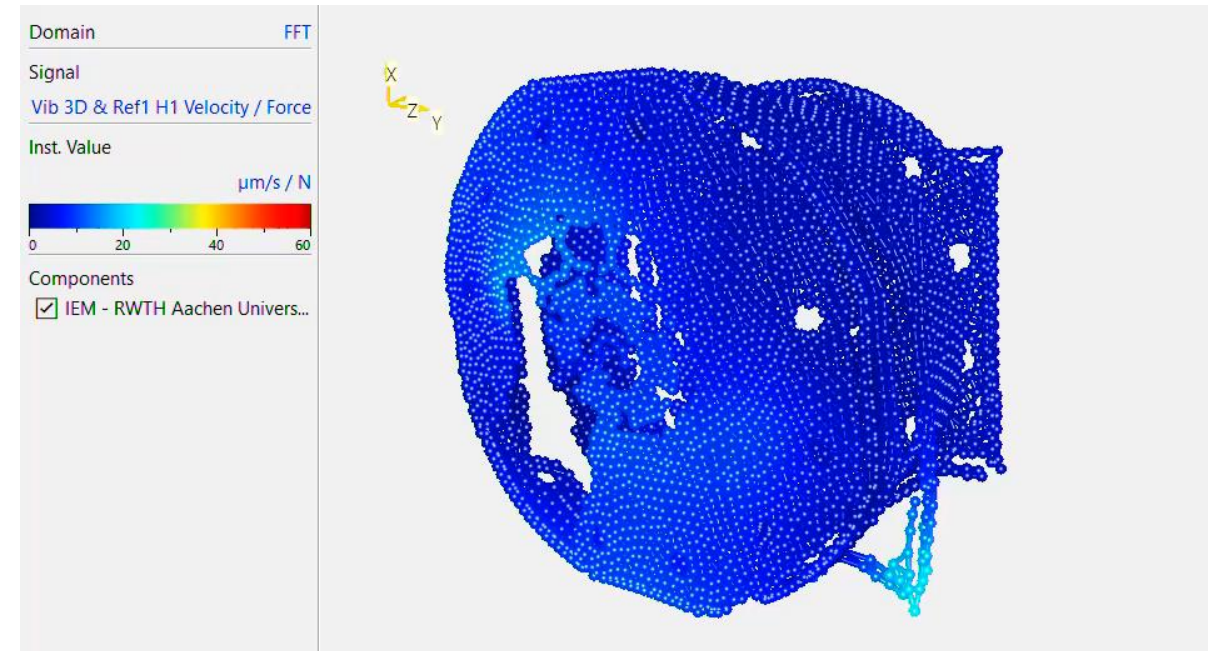
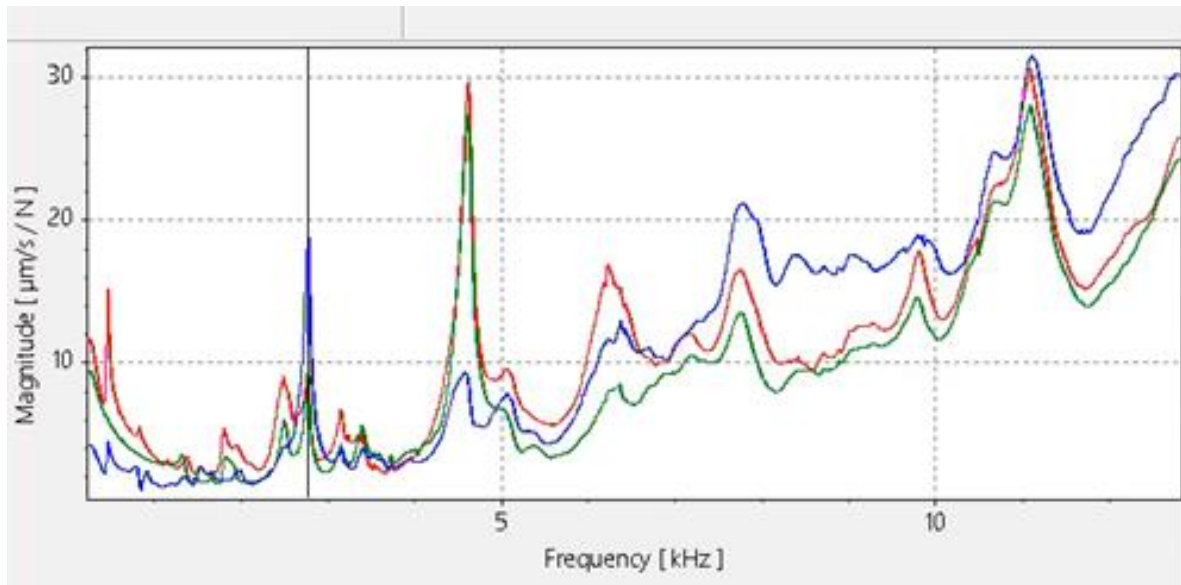
Filterung und Fensterung der Vibrometer-Signale



- Ohne Filter kommt es zum Leakage-Effekt im Spektrum und somit nicht verwendbaren Daten
- Hochpass-Filter (200 Hz) zur Minimierung des Leakage-Effekts
- Fenster (Signal auf 0 setzen nach ~50 ms), um SNR zu optimieren

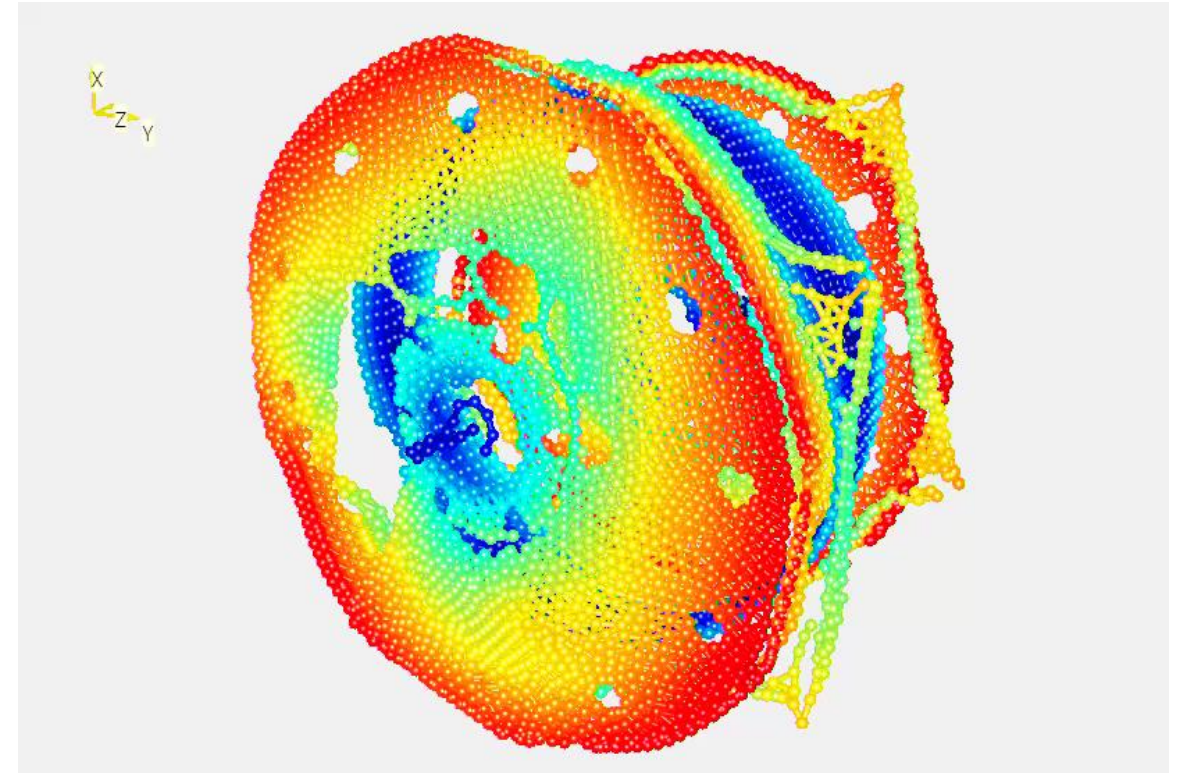
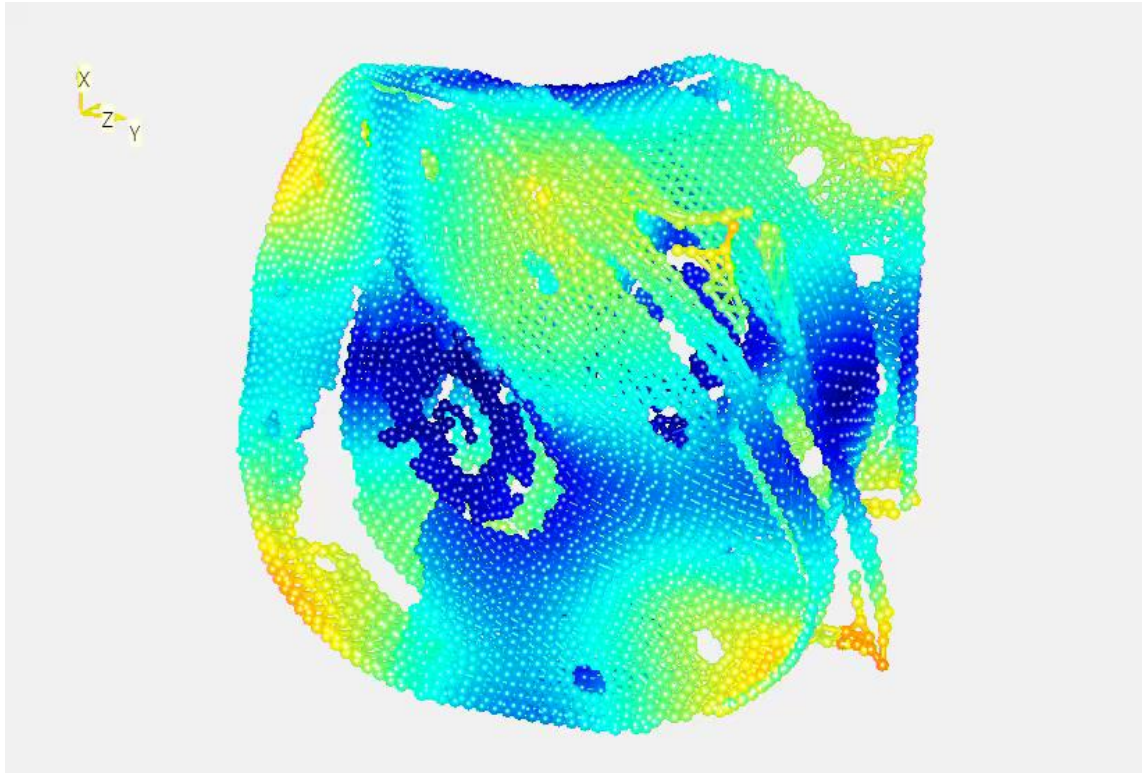
3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Schwingform bei 2,8 kHz



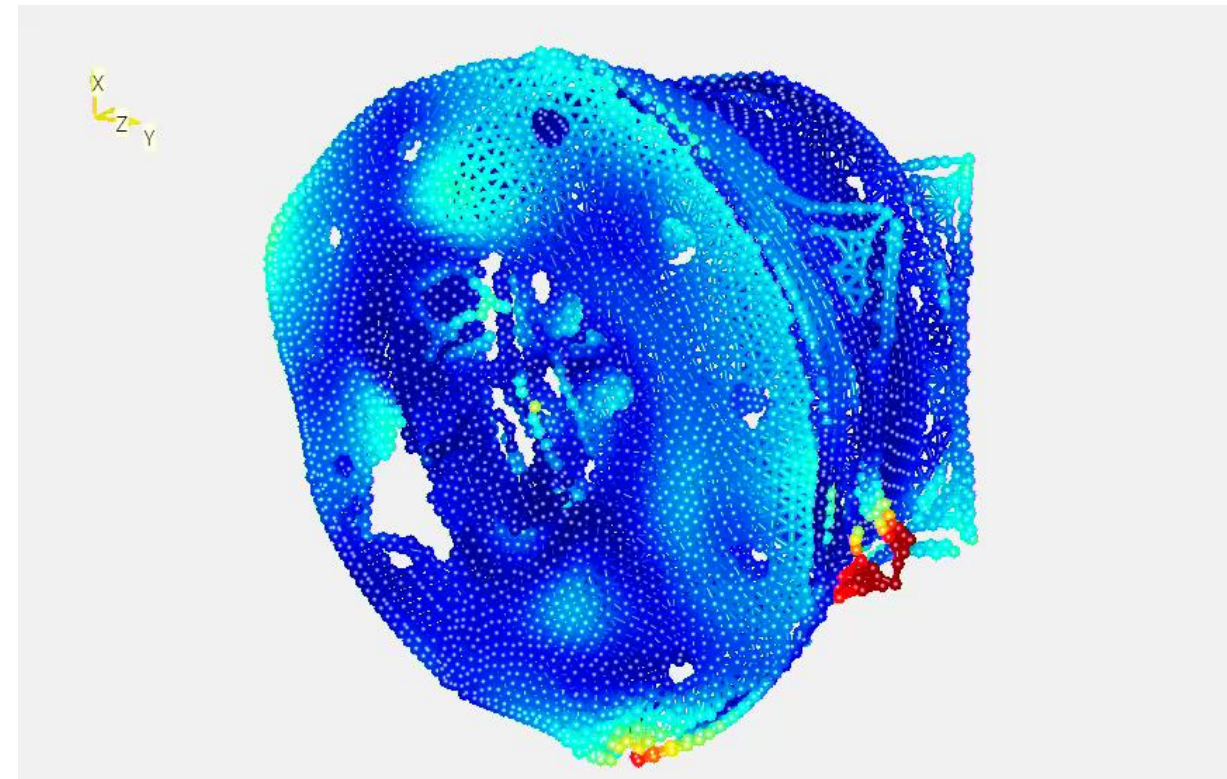
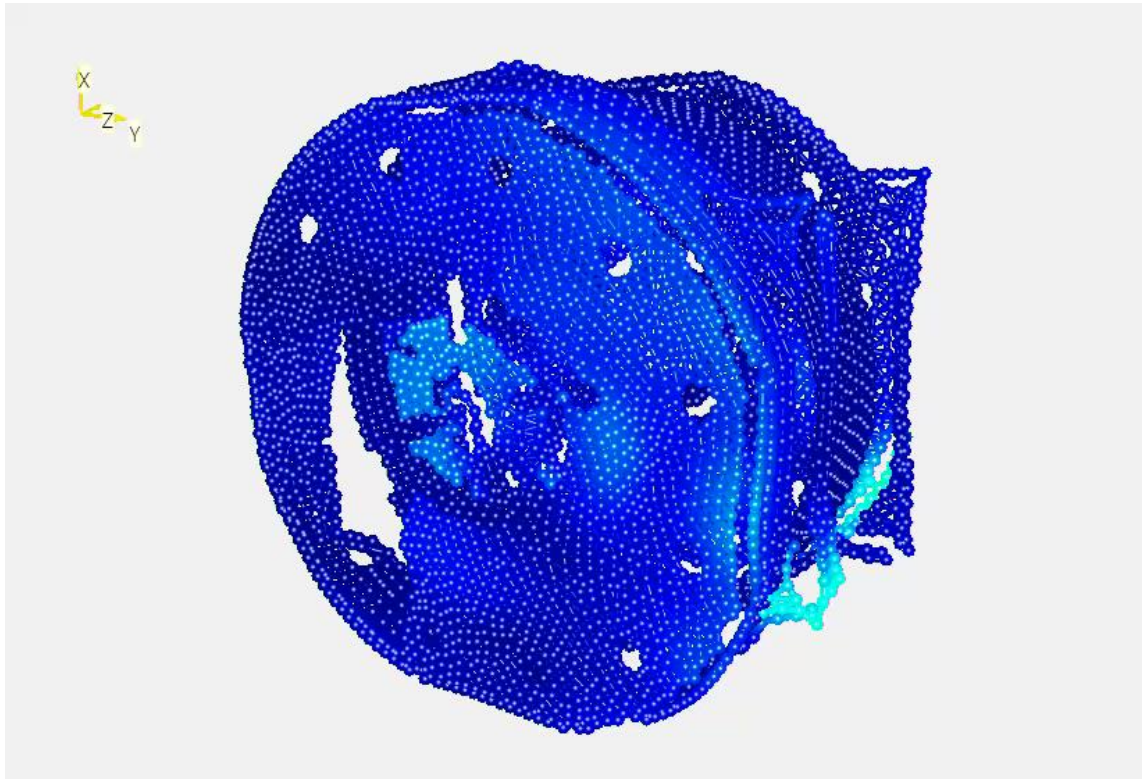
3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Schwingformen bei 2,8 kHz und 4,6 kHz



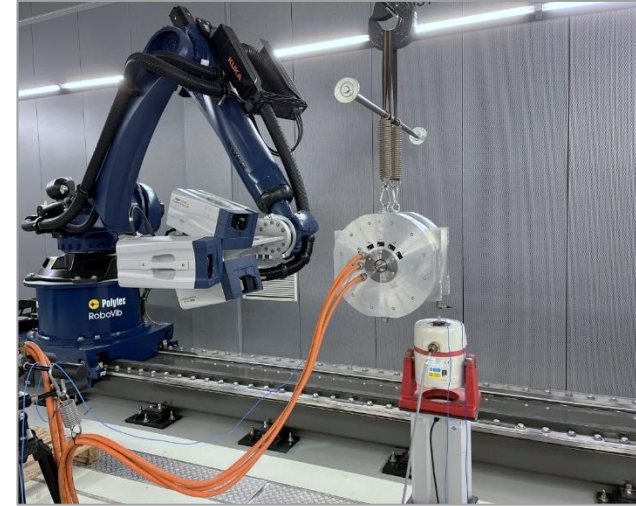
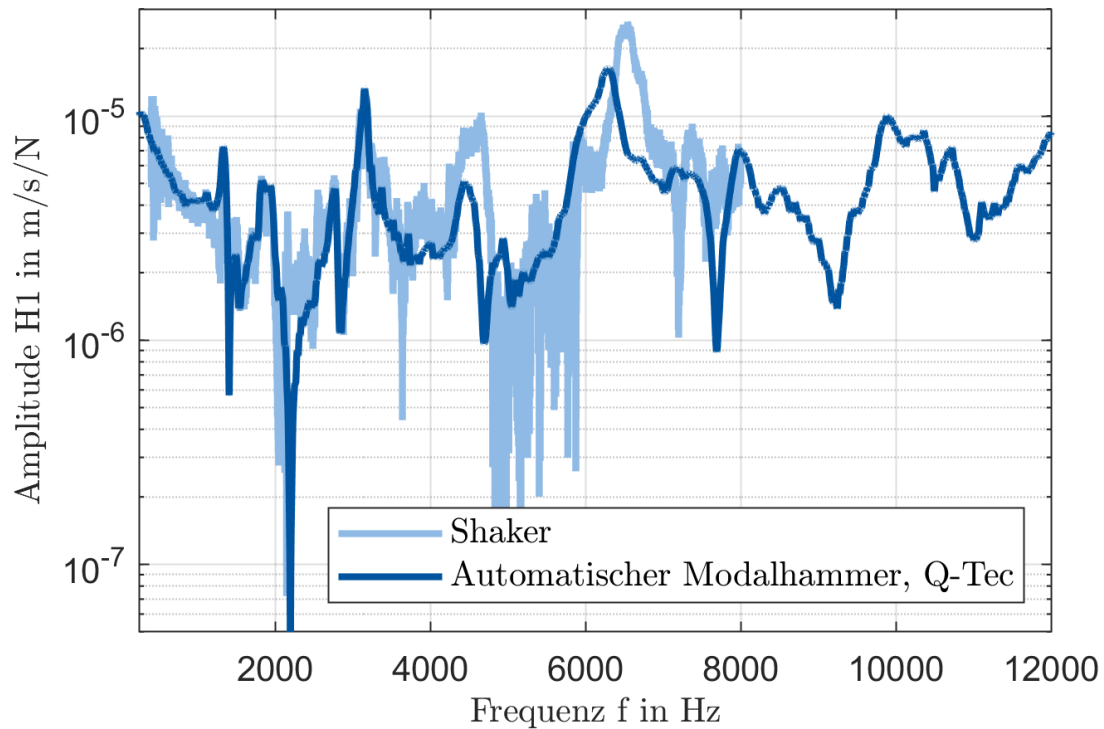
3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Schwingformen bei 6,2 kHz und 9,8 kHz

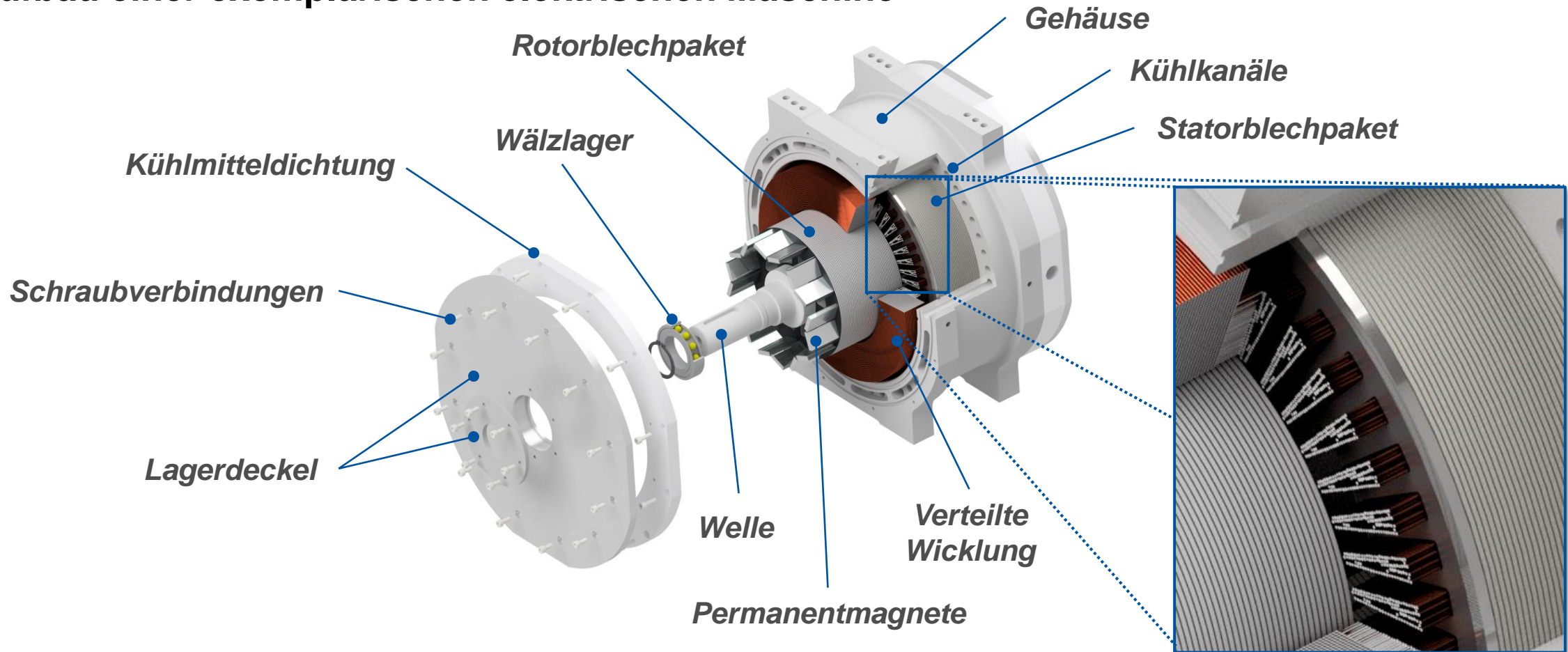


3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

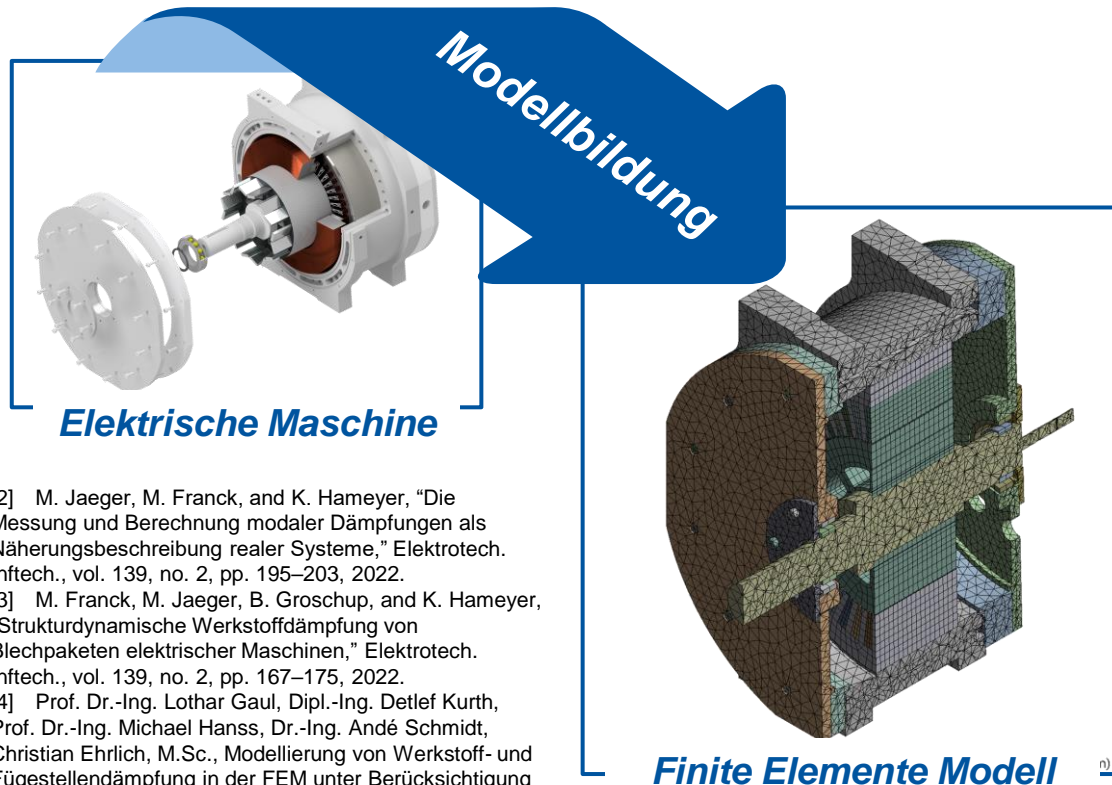
Verbesserung der Messdatenqualität



Aufbau einer exemplarischen elektrischen Maschine



Modellierung der Strukturdynamik mit der Finite Elemente Methode



[2] M. Jaeger, M. Franck, and K. Hameyer, "Die Messung und Berechnung modaler Dämpfungen als Näherungsbeschreibung realer Systeme," *Elektrotech. Inftech.*, vol. 139, no. 2, pp. 195–203, 2022.

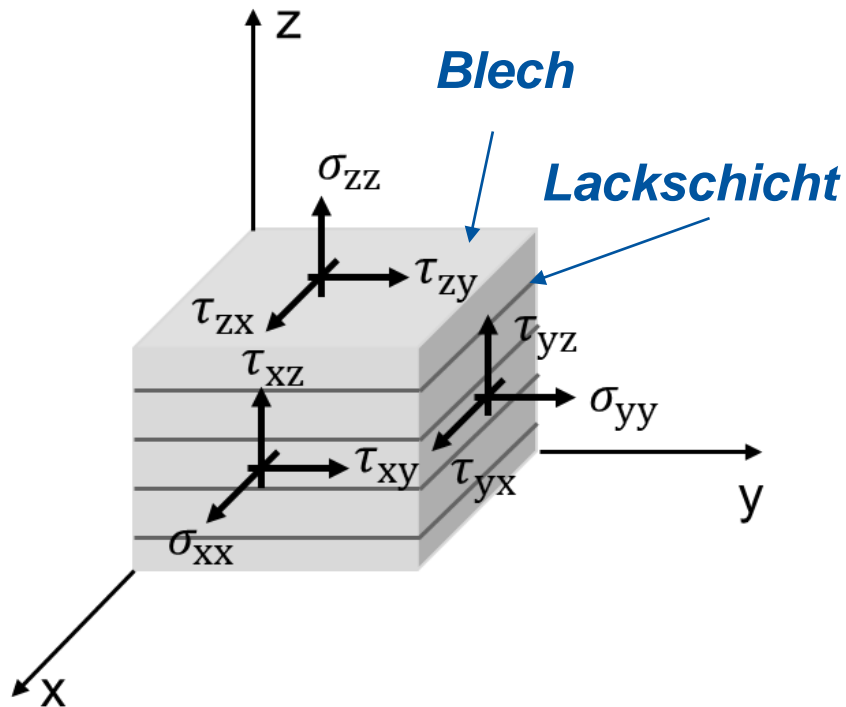
[3] M. Franck, M. Jaeger, B. Groschup, and K. Hameyer, "Strukturdynamische Werkstoffdämpfung von Blechpaketen elektrischer Maschinen," *Elektrotech. Inftech.*, vol. 139, no. 2, pp. 167–175, 2022.

[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 Fugestellendämpfung in der FEM unter Berücksichtigung von Unsicherheiten: Abschlussbericht über das Vorhaben Nr. 1119 (in Kooperation mit der DFG), 2015.



Homogenisierungsverfahren

Repräsentatives Volumenelement Blechpaket [3]



[3] M. Franck, M. Jaeger, B. Groschup, and K. Hameyer, "Strukturdynamische Werkstoffdämpfung von Blechpaketen elektrischer Maschinen," *Elektrotech. Inftech.*, 2022

Homogenisiertes Materialmodell des Blechpakets [3]

Dichte: $\rho = \rho_B \cdot \phi + \rho_L \cdot (1 - \phi)$
 E-Modul in Blechebene: $E_p = E_B \cdot \phi + E_L(1 - \phi)$

E-Modul senk. zur Blechebene: $E_z = \frac{E_L E_B}{E_L \phi + E_B(1 - \phi)}$

Querkontraktion in Blechebene: $\nu_p = \nu_B \phi + \nu_L(1 - \phi)$

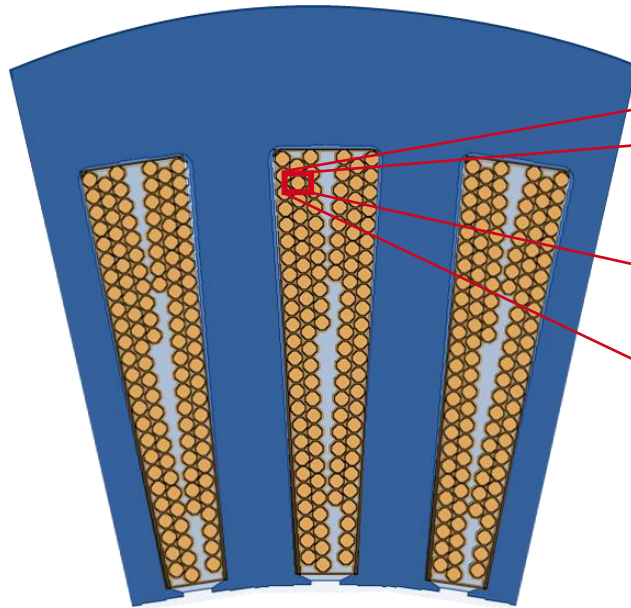
Querkontraktion senk. zur Blechebene: $\nu_{zp} = \nu_p \frac{E_z}{E_p}$

Schermodul senk. zur Blechebene: $G_{zp} = \frac{G_L G_B}{G_L \phi + G_B(1 - \phi)}$

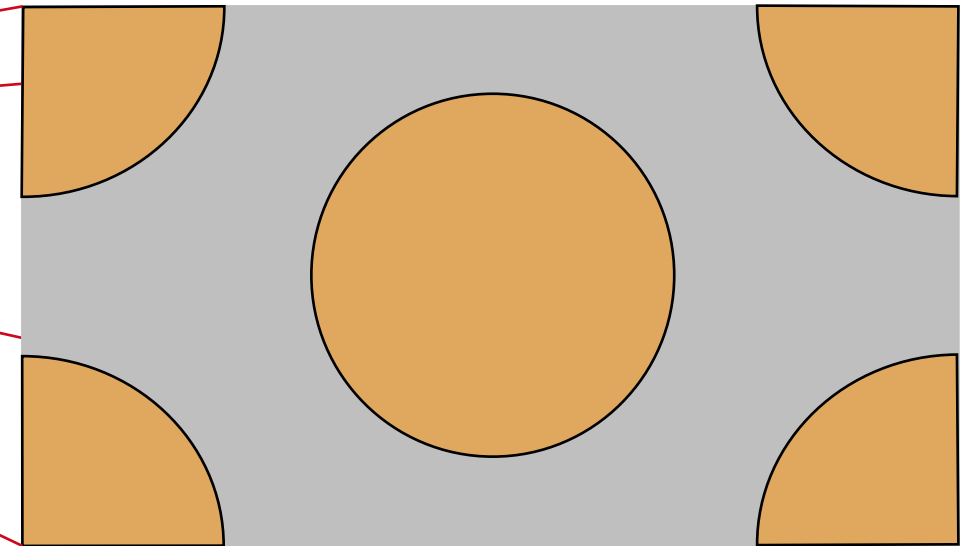
Schermodul in. Blechebene: $G_p = \frac{E_p}{2(1 + \nu_p)}$

Homogenisierungsverfahren

Schematische Runddrahtwicklung



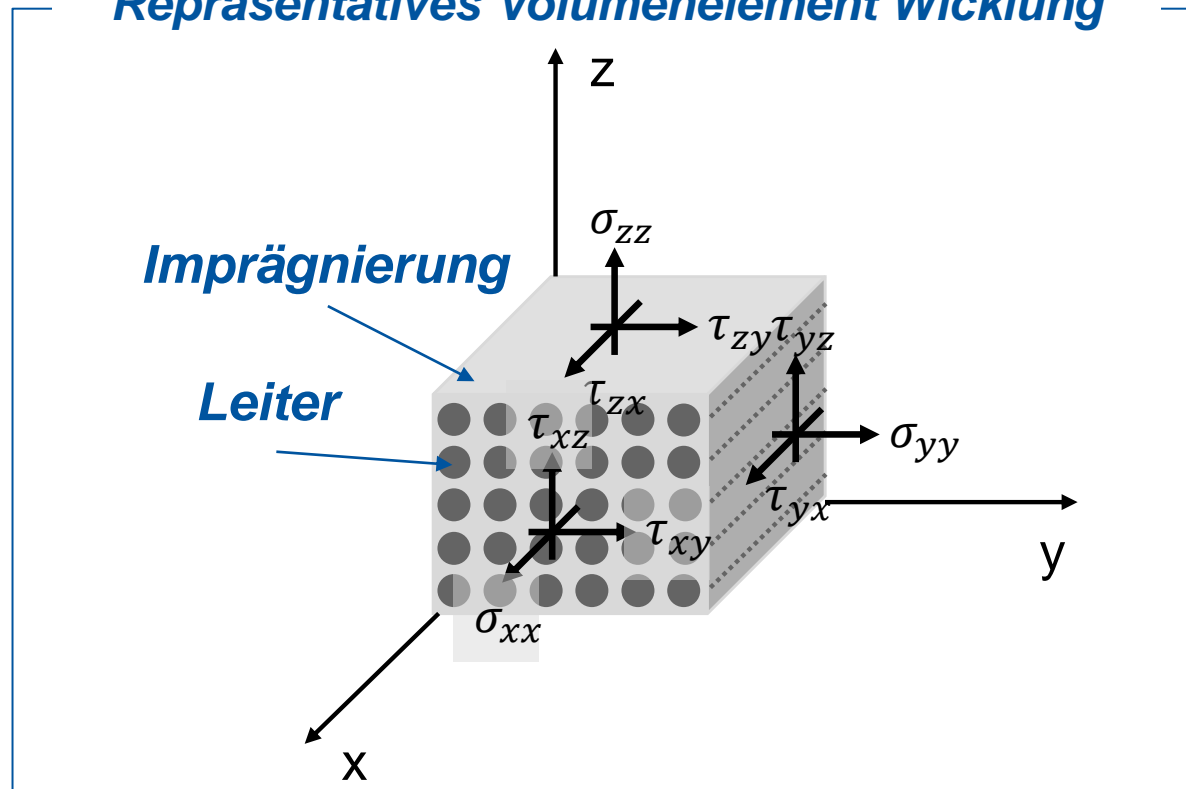
Repräsentatives Volumenelement



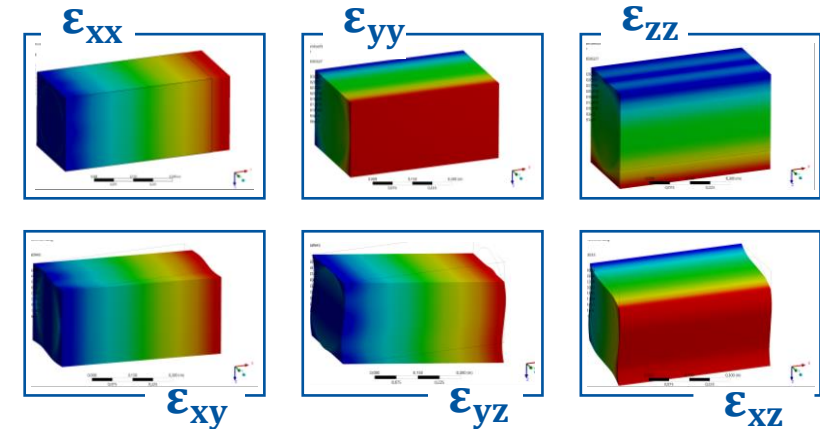
[5] R. Chandra, S. P. Singh, and K. Gupta, "Micromechanical damping models for fiber-reinforced composites: a comparative study," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, no. 6, pp. 787–796, 2002

Homogenisierungsverfahren

Repräsentatives Volumenelement Wicklung

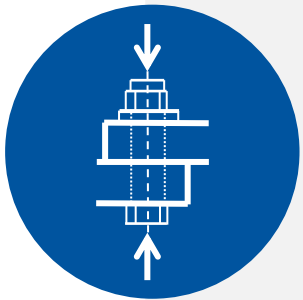


Numerische Homogenisierung



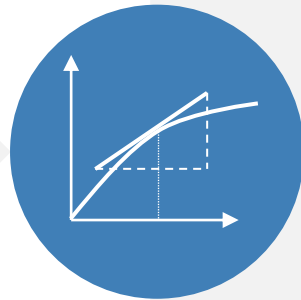
$$\begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ 2\epsilon_{yz} \\ 2\epsilon_{zx} \\ 2\epsilon_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{yz})}{E_y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

Linearisierung des Fügestellenkontaktproblems am Beispiel von Schraubverbindungen



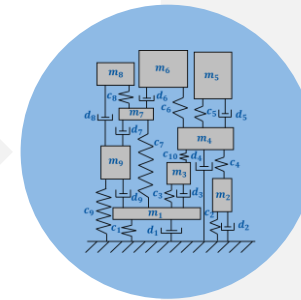
Nichtlineare Statisch-Mechanische Berechnung

- Definition von reibungsbehafteten Kontakten
- Einprägung der Schraubenvorspannkräfte



Linearisierung im Arbeitspunkt

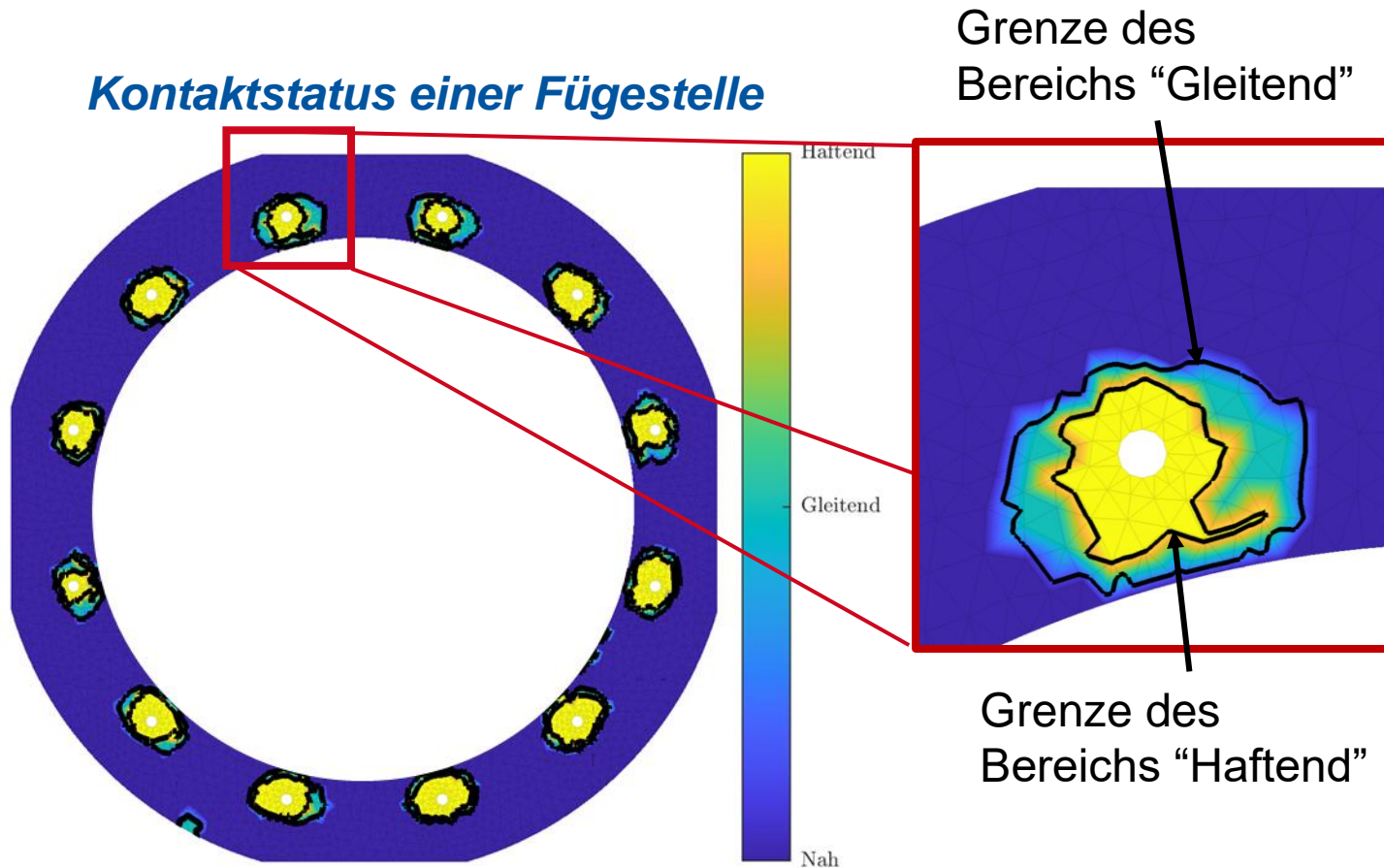
- Linearisierung der reibungsbehafteten Kontakte auf Basis des Kontaktstatus:
 - **Verbundkontakt:** Normal- und Tangentialkräfte
 - **Keine Trennung:** Normalkräfte



Lineare Modalanalyse

- Durchführung einer vorgespannten Modalanalyse
- Verformung und linearisierte Kontakte der nichtlinearen Analyse werden beibehalten

Linearisierung des Kontaktstatus am Beispiel der Festlagerdeckel Verschraubung



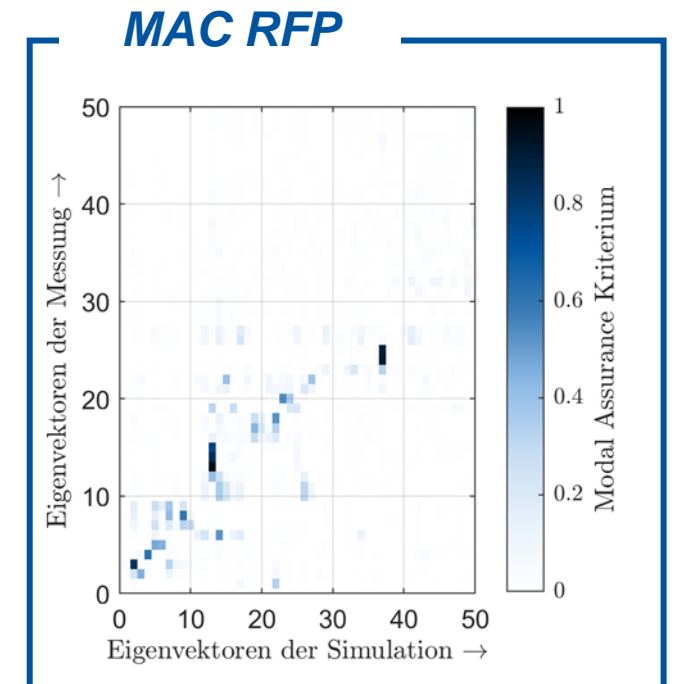
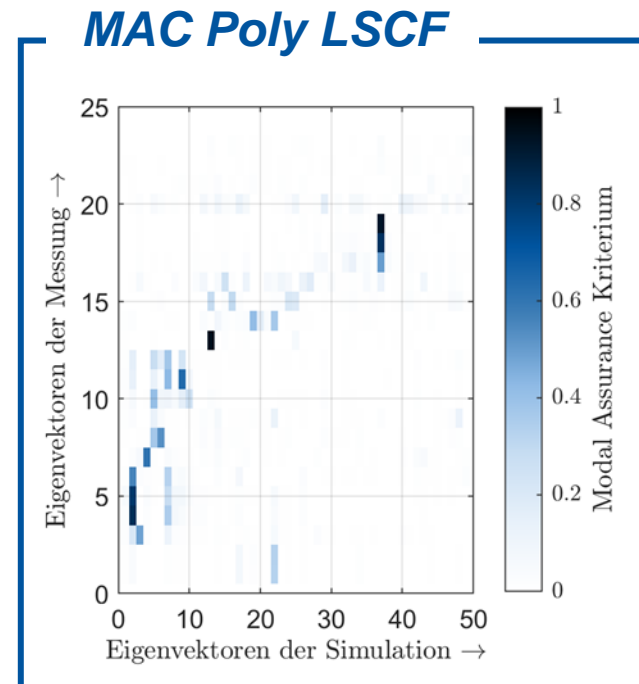
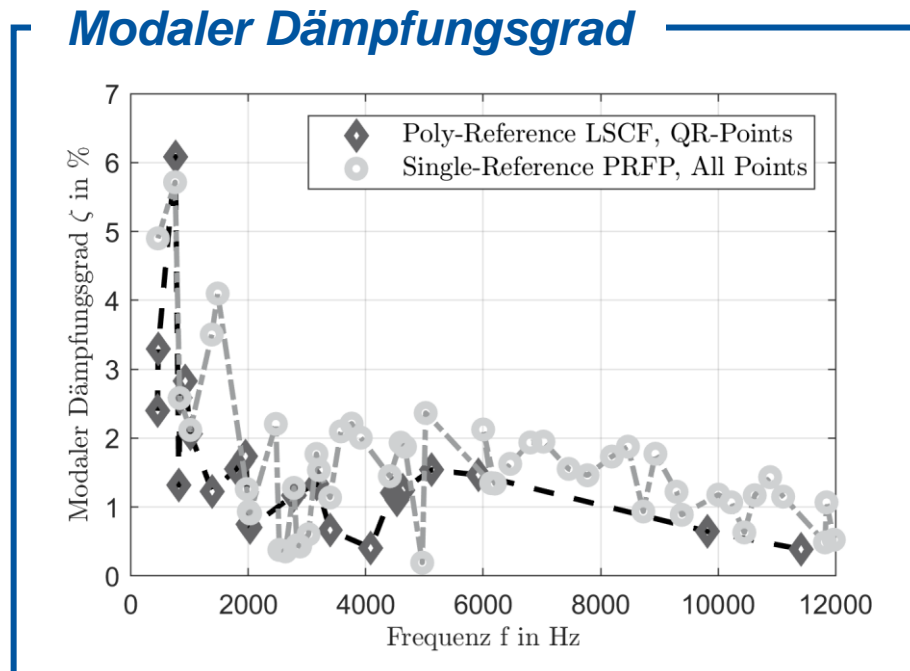
Modellrandbedingungen:

- Reibungsbehaftet Kontakt mit $\mu = 0.2$
- Schraubenvorspannkraft von $F = 5 \text{ kN}$

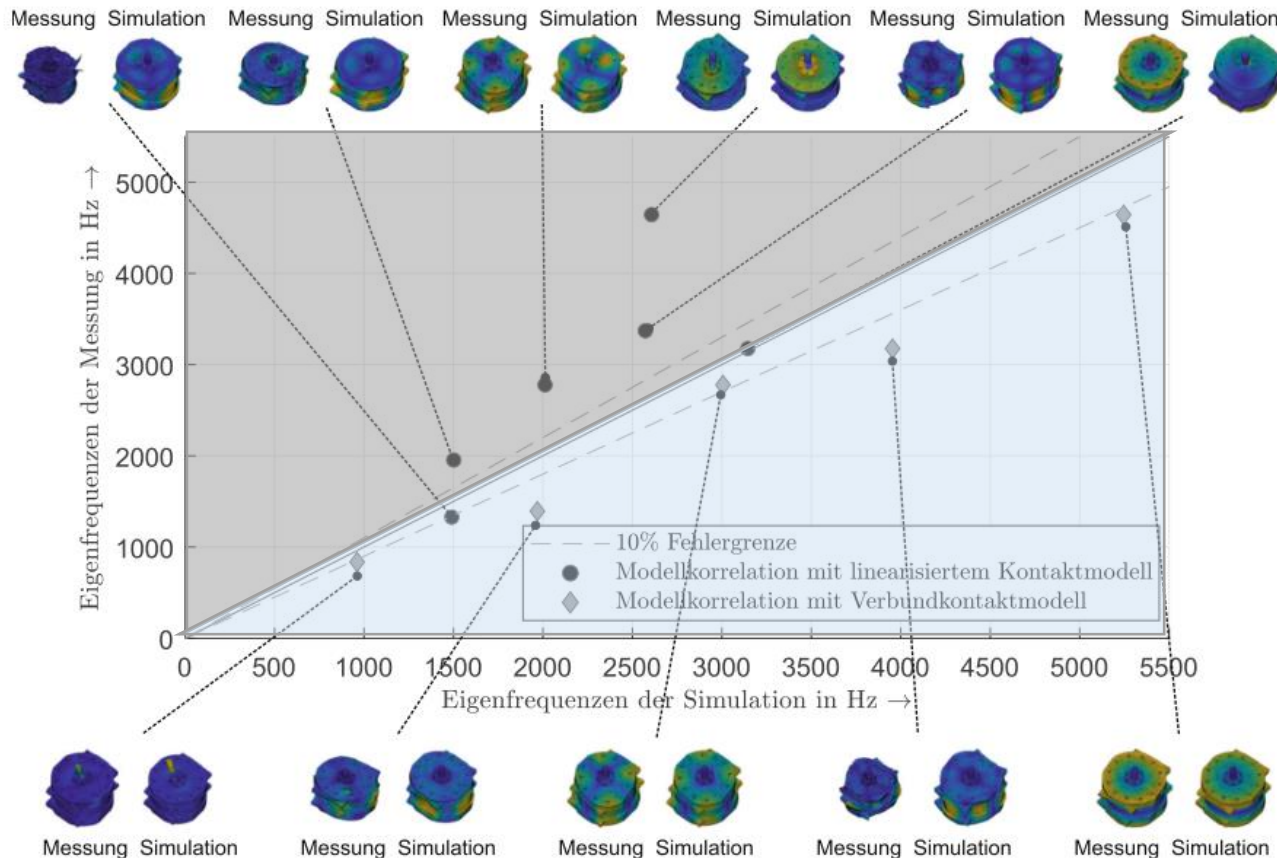
Linearisierung des Kontakts

- „**Wahrer Kontaktstatus**“:
 - Haftende Kontaktbereiche
→ Verbund
 - Gleitende Kontaktbereiche
→ Keine Trennung
- „**Verbund erzwingen**“:
 - Haftende Kontaktbereiche
→ Verbund
 - Gleitende Kontaktbereiche
→ Verbund

Ergebnis der Parameterschätzung



Modellkorrelation mit Verbundkontaktmodell und Kontakt-Linearisierung “Wahrer Status”



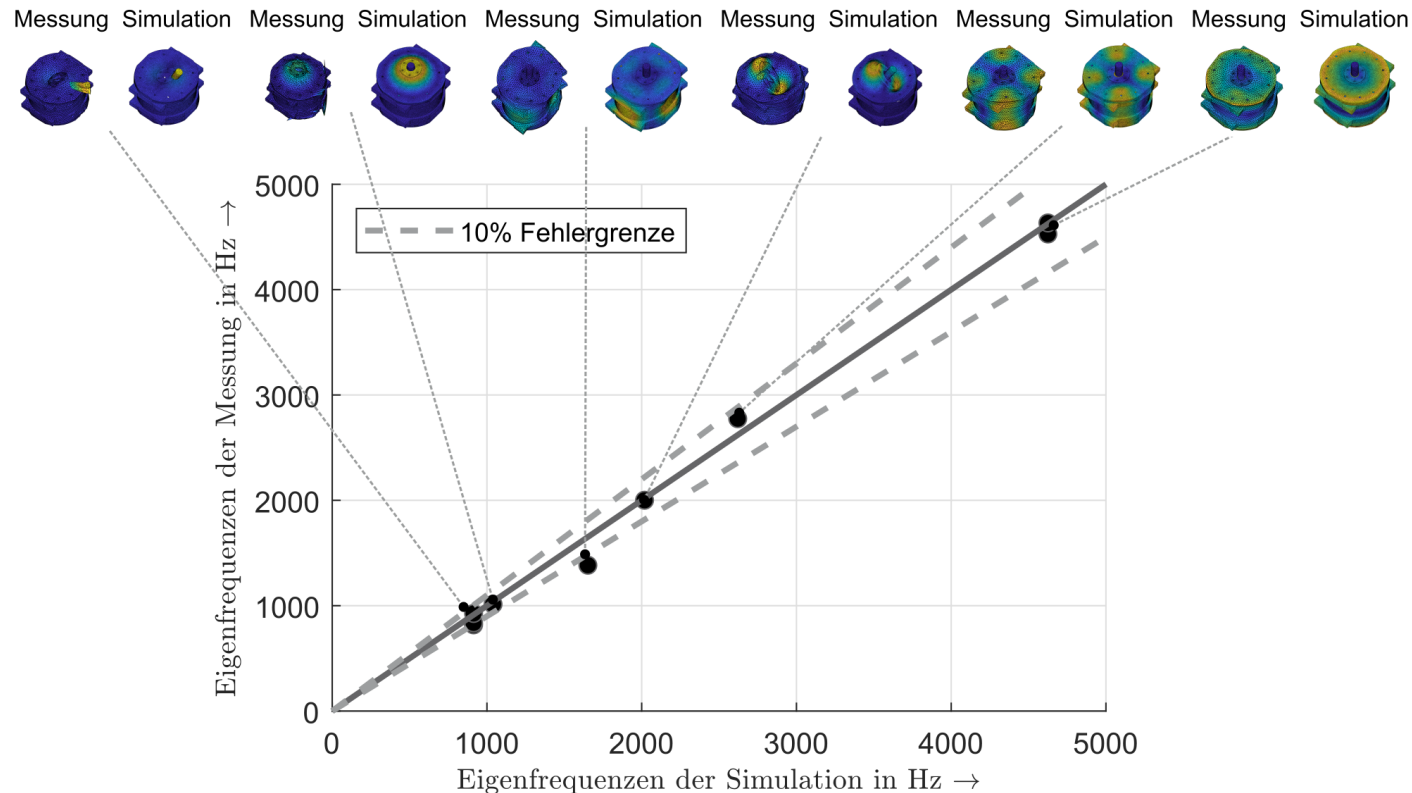
Verbundkontaktmodell

- Alle Verbindungen der Maschine als Verbund modelliert
- Kontaktsteifigkeit ist zu groß
- $f_{0,\text{mess}} < f_{0,\text{sim}}$

Kontaktstatus „Wahrer Status“

- Modellierung der Schraubenvorspannung mit anschließender Linearisierung
- Kontaktsteifigkeit ist z.T. zu gering
- z.T. $f_{0,\text{mess}} > f_{0,\text{sim}}$

Modellkorrelation mit Verbundkontaktmodell und Kontakt-Linearisierung “Verbund erzwingen”

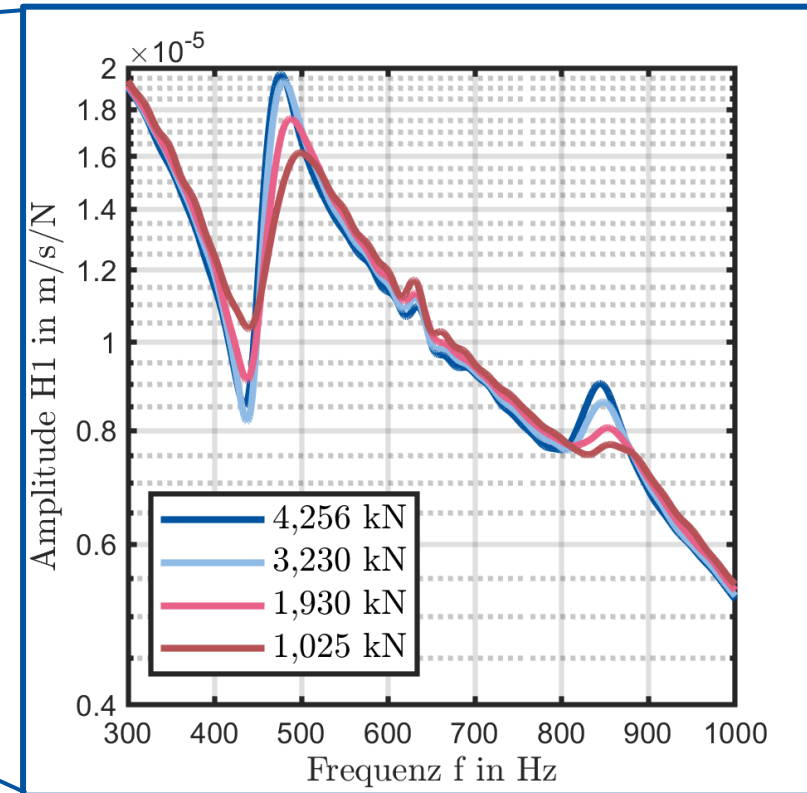
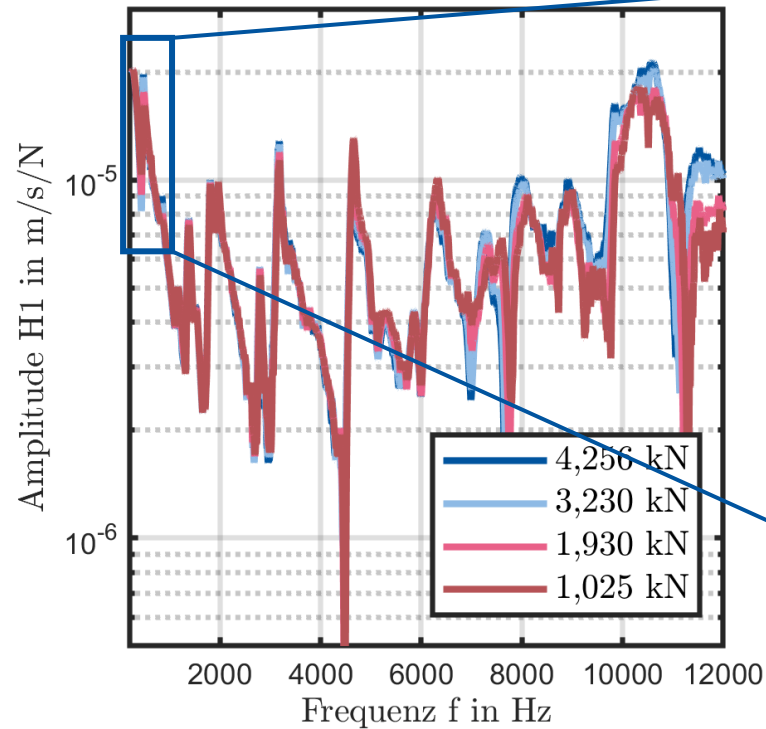


Kontaktstatus „Verbund erzwingen“

- Modellierung der Schraubenvorspannung mit anschließender Linearisierung
- Kontaktsteifigkeit wird am besten approximiert

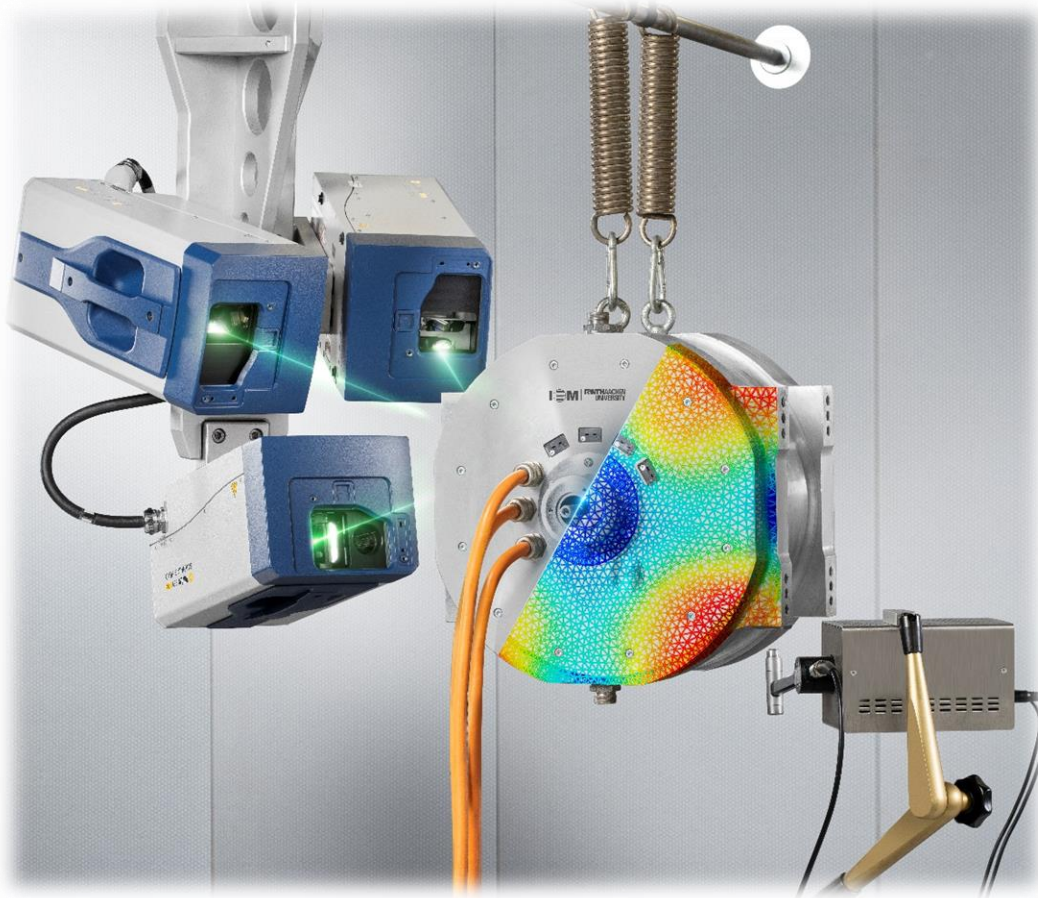
$$\text{➤ } \frac{|f_{0,\text{mess}} - f_{0,\text{sim}}|}{100} \leq 10\%$$

Übertragungsverhalten bei Variation der Anregungskraft



3D-Laser-Doppler-Vibrometrie zur experimentellen Modalanalyse von elektrischen Maschinen

Zusammenfassung



- Vollflächige experimentelle Modalanalyse an einer elektrischen Maschine
- QTec-Technologie und automatischer Modalhammer verbessern Messdatenqualität erheblich
- Nichtlineares Systemverhalten ist nachweisbar und bei Modellierung und Messung zu berücksichtigen
- Hohe Messpunktdichte ermöglicht Modentrennung bis 12,8 kHz
- Dämpfungsableitung im gesamten Frequenzbereich möglich
- Messdaten ermöglichen detaillierte Modellkorrelationen