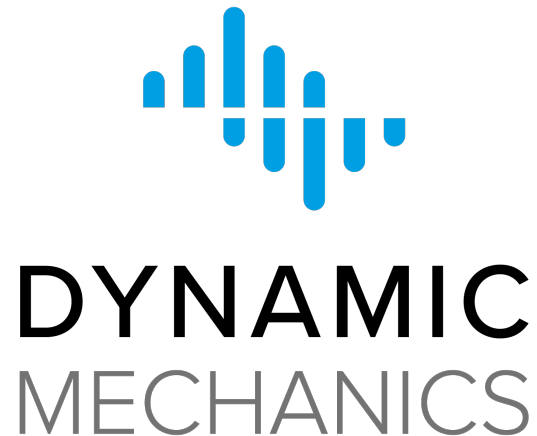


Strukturdynamische Untersuchungen im höheren Frequenzbereich

13. Tagung „Feinwerktechnische Konstruktion“ vom 26. bis 27.09.2019 in Dresden

Dipl.-Ing. Eric Hensel (Fraunhofer IWU), Dr.-Ing. Martin Brucke (dynamic mechanics)

26.09.2019



Problemstellung und Motivation

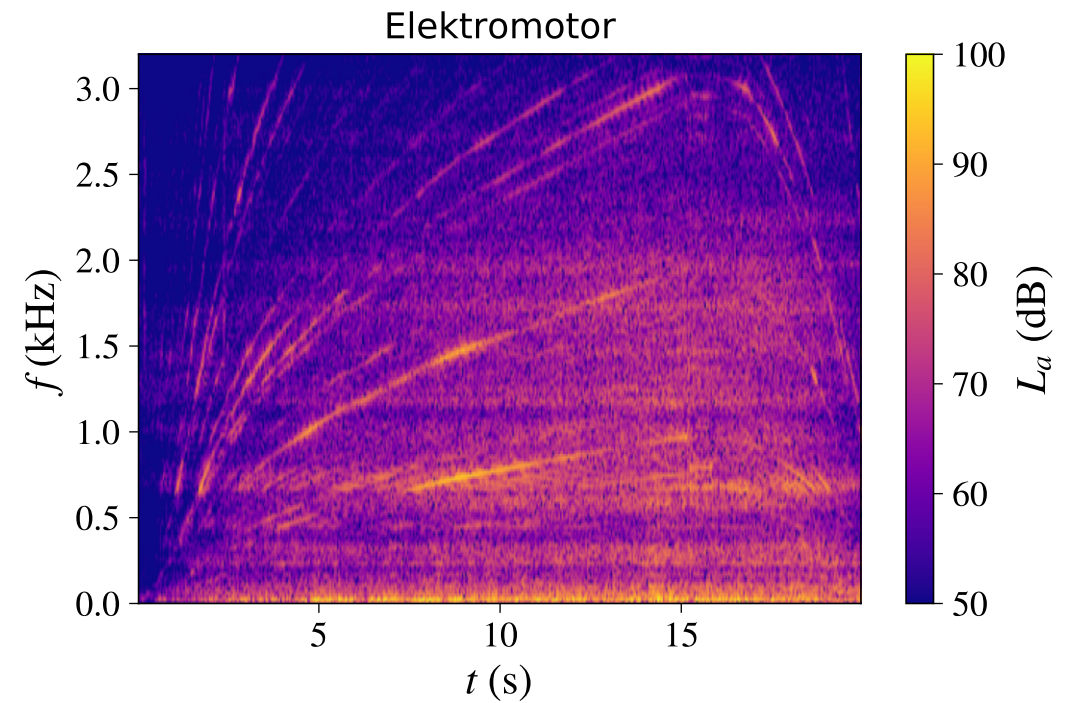
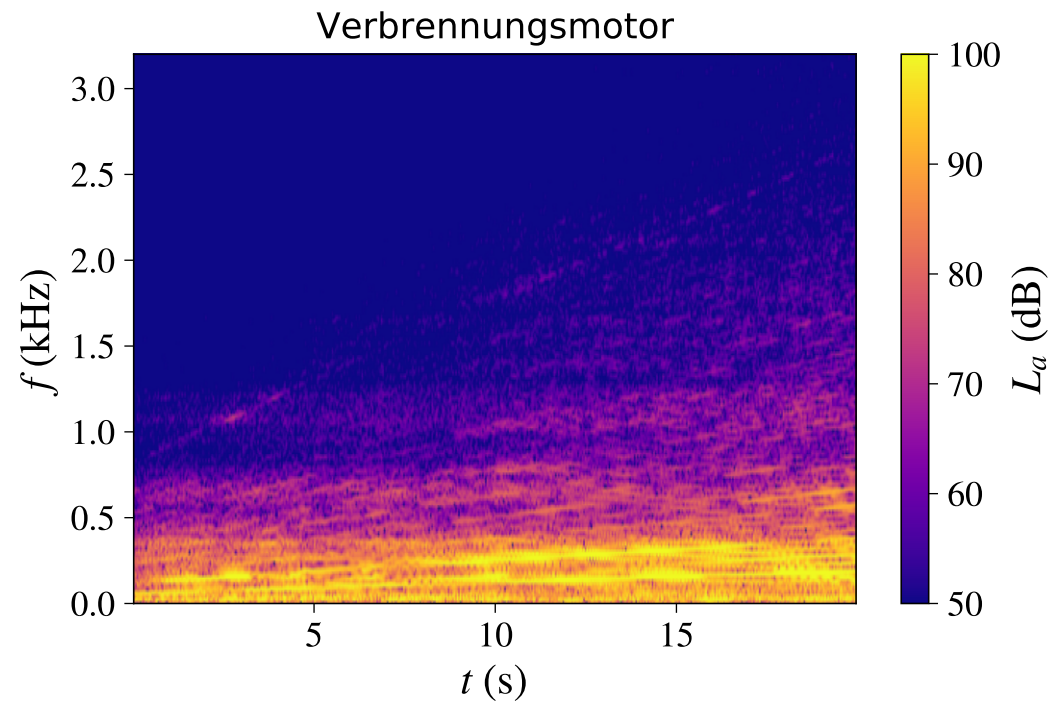
Warum rücken höhere Frequenzanteile immer mehr in den Fokus?

- Was versteht man unter „höheren Frequenzen“?
 - keine einheitliche Definition → im Folgenden: $f > 3 \text{ kHz}$
- Ein aktuelles (und populäres) Beispiel ist die Elektrifizierung von Fahrzeugantrieben.
 - Wegfall des Verbrennungsmotors führt zum **Wegfall von sogenannten Maskierungseffekten**.
 - dadurch **Wahrnehmung höherfrequenter Anteile**, welche vorher (mit Verbrennungsmotor) aufgrund der Maskierung nicht wahrgenommen werden konnten
 - Beispiel: Getriebeordnungen (vor allem tonale Geräuschanteile durch Zahneingriffe)
 - Zudem sind beim Einsatz von Elektromotoren weitere höherfrequente Geräuschquellen identifizierbar (z. B. Frequenzumrichter).
- weitere Beispiele bzw. Industriezweige
 - Luft- und Raumfahrt, Musikinstrumentenbau, mikro-elektromechanische Systeme (MEMS)

Problemstellung und Motivation

Ein Beispiel

- Vergleich der Spektrogramme eines konventionellen Verbrennungsmotors und eines Elektromotors



Problemstellung und Motivation

Agenda

- Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades
- Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker
- Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile
- Zusammenfassung

Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

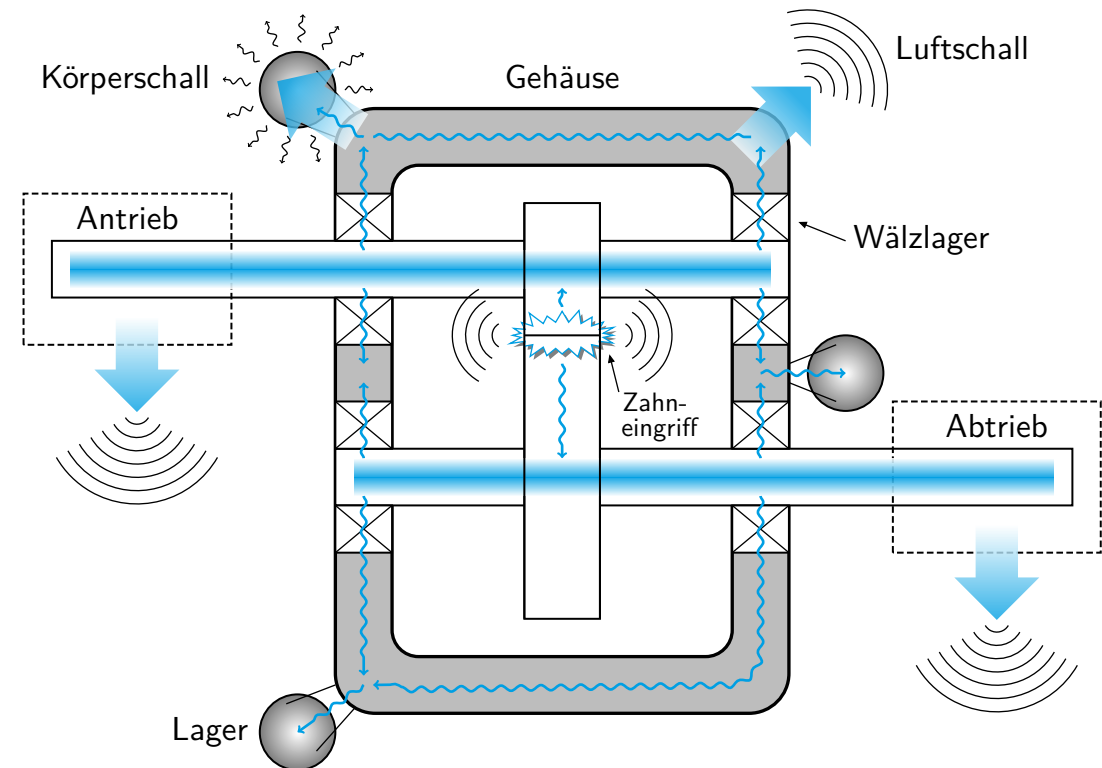
Agenda

- Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades
- Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker
- Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandteile
- Zusammenfassung

Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

Prinzip der Getriebeakustik

- Akustik von Getrieben in unterschiedlichen Bereichen von großer Bedeutung (Wahrnehmung, Komfort, Schadensdetektion)
- verschiedene Körperschallquellen (Wälzlager, Verzahnungen etc.)
- Zahneingriff in den meisten Fällen als Hauptkörperschallquelle mit unterschiedlichen Anregungsmechanismen (Parameteranregung, Weganregung, Kraftanregung)
- komplexe Zusammensetzung von Transferpfaden
- Zahnradkörper als erstes Element des Transferpfades



Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

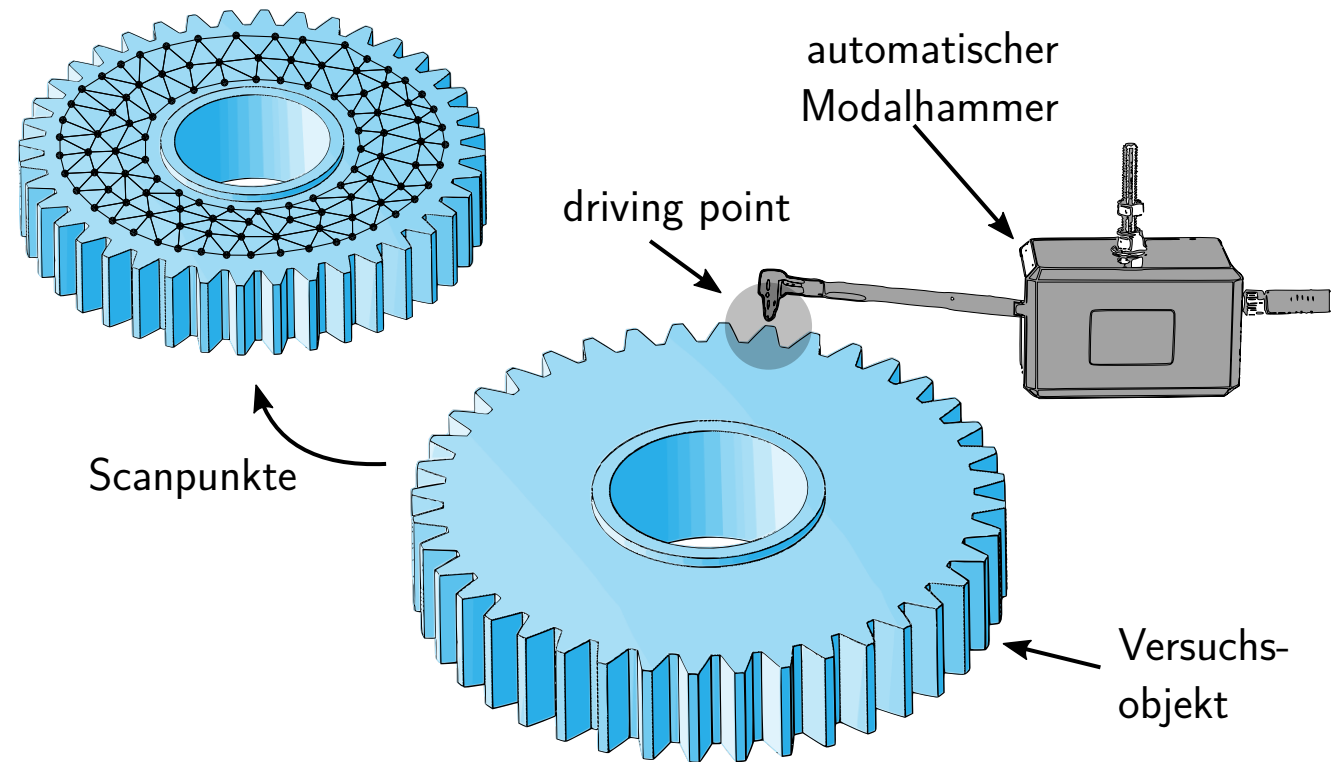
Kurzübersicht zur Experimentellen Modalanalyse

- Die experimentellen Modalanalyse (EMA) dient zur Ermittlung und Beurteilung der natürlichen Schwingeigenschaften von Strukturen unterschiedlicher Natur.
- Die „natürliche Schwingeigenschaften“ (modale Parameter) werden beschrieben durch
 - Eigenfrequenzen (Eigenwerte),
 - Schwingformen (Eigenwerte bzw. Moden) und
 - Dämpfung (modale Dämpfung, Verlustfaktoren etc.).
- in der Praxis verschiedene Herausforderungen
 - Anregung (Hammer oder Shaker?)
 - Antworterfassung (Beschleunigungsaufnehmer oder optische Erfassung?)
 - Randbedingung (frei/frei oder fixiert?)
- Weiterverwendung der Ergebnisse einer EMA bspw. für sogenanntes *model updating*

Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

Versuchsaufbau

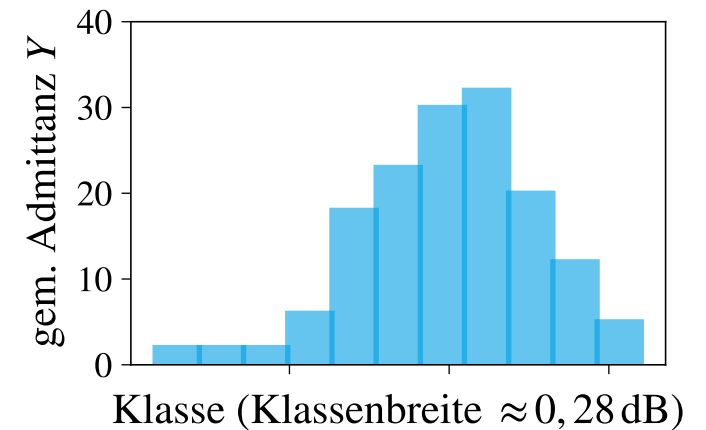
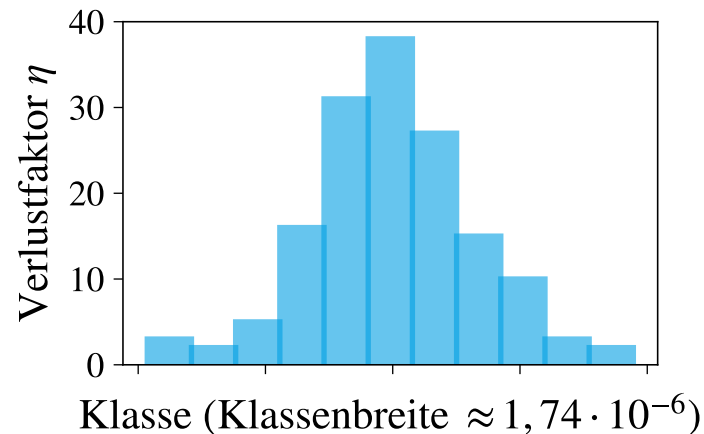
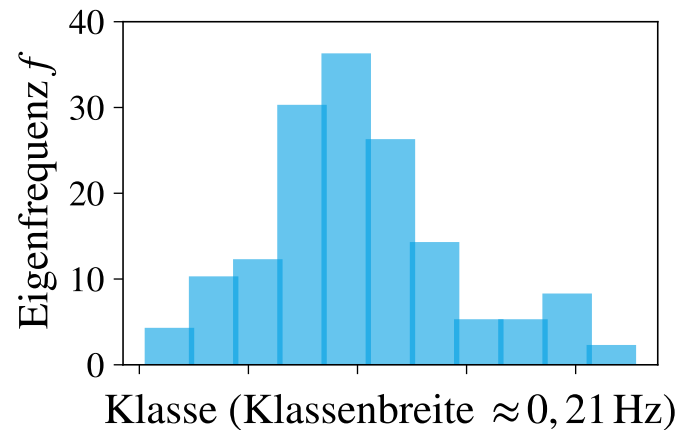
- frei/frei-Lagerung auf akustischem Dämmmaterial (CARUSO-ISO-BOND®)
- Anregung mittels automatisiertem Impulshammer (MAUL-THEET GmbH, Typ: *vImpact-60*)
- Antworterfassung mittels 3D Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer (SLDV, Polytec GmbH, Typ: *PSV-400-3D*)
- Ergebnis der Messung: Transferadmittanzen Y ($Y = v/F$) der einzelnen Messpunkte (im Folgenden mit FRF abgekürzt, *engl.*: frequency transfer function)



Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

Messdatenverarbeitung und Auswertung

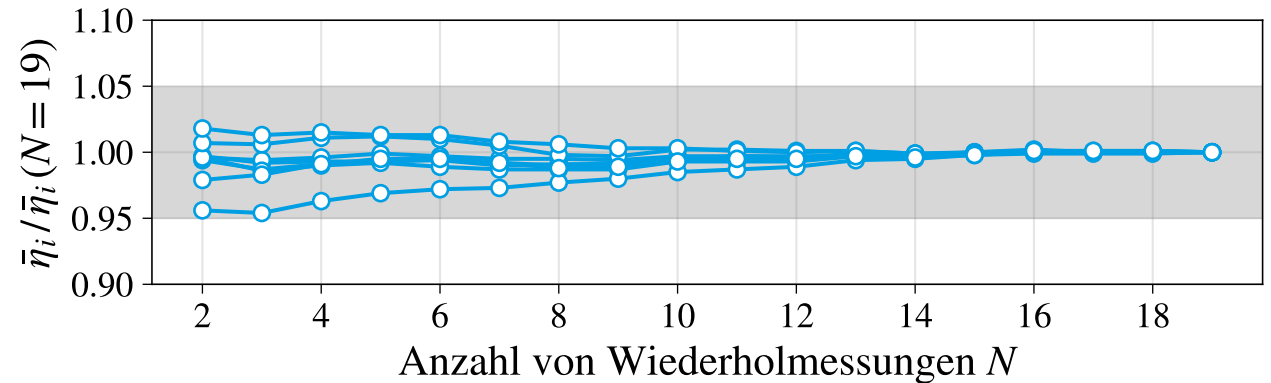
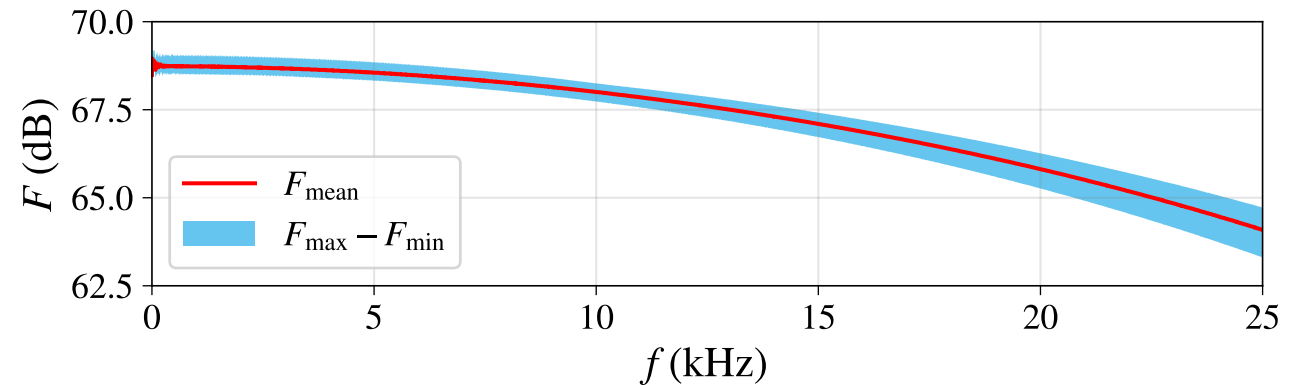
- Weiterverarbeitung der erfassten FRF mittels *curve fitting* zur Ermittlung der Modalparameter
- Bewertung der „Tauglichkeit“ des Versuchsaufbaus
 - 13 Wiederholmessungen mit *wiederholtem Auf- und Abbau* des Versuchstandes
 - *statistische Betrachtung der ermittelten Modalparameter*



Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

Kraftanregung und Wiederholbarkeit

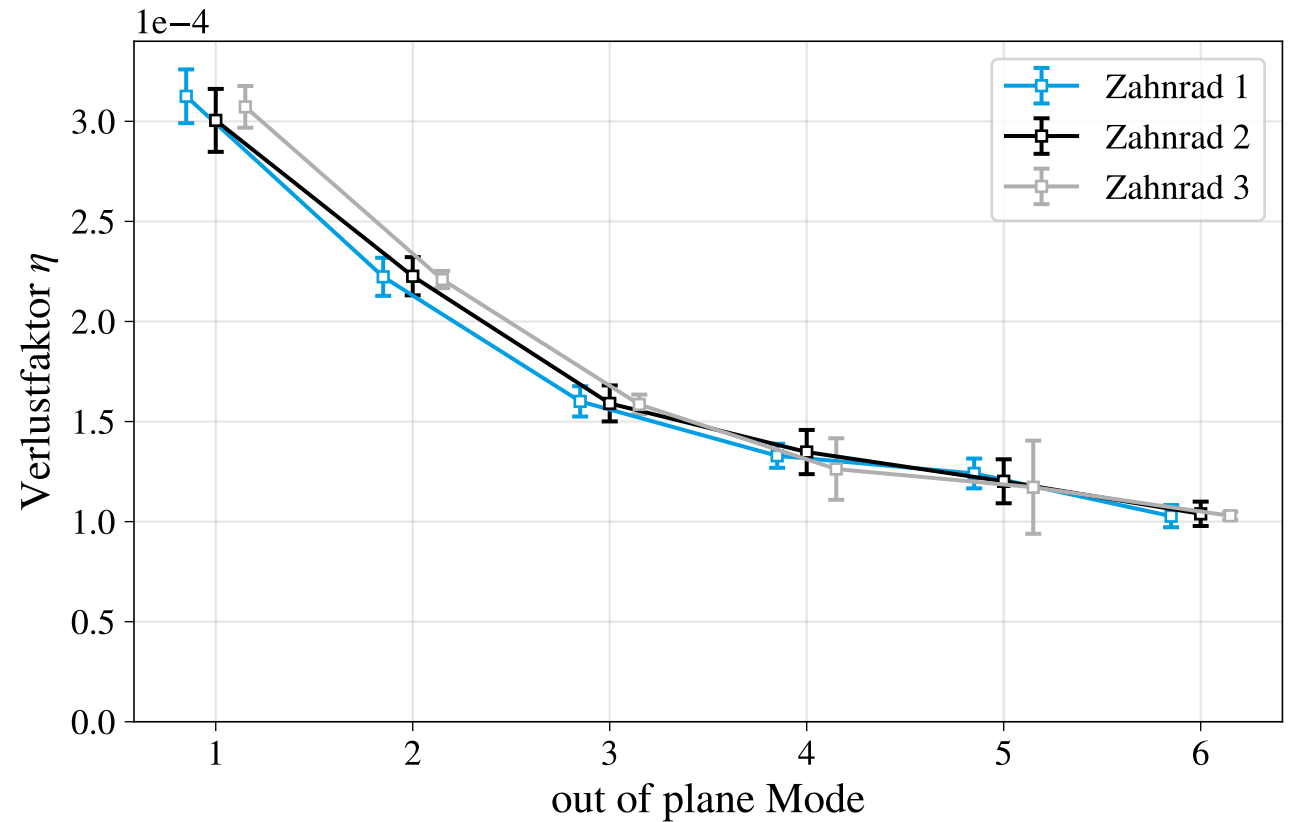
- zunächst Betrachtung zur reproduzierbaren Anregung (Abweichungen im Anregungsspektrum, dB-Referenz $F_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ N) sowie zur Ermittlung einer minimalen Anzahl von Messungen (hier in Bezug auf die Verlustfaktoren)
- Anregungsspektrum mit **guter Reproduzierbarkeit** nach wiederholtem Auf- und Abbau (Abweichungen $\pm 0,5$ dB)
- Abweichungen der ermittelten Verlustfaktoren der einzelnen Moden $< 5\%$ (bezogen auf Erwartungswert bei $N = 19$ Messungen)



Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

Ergebnisse der Verlustfaktoren

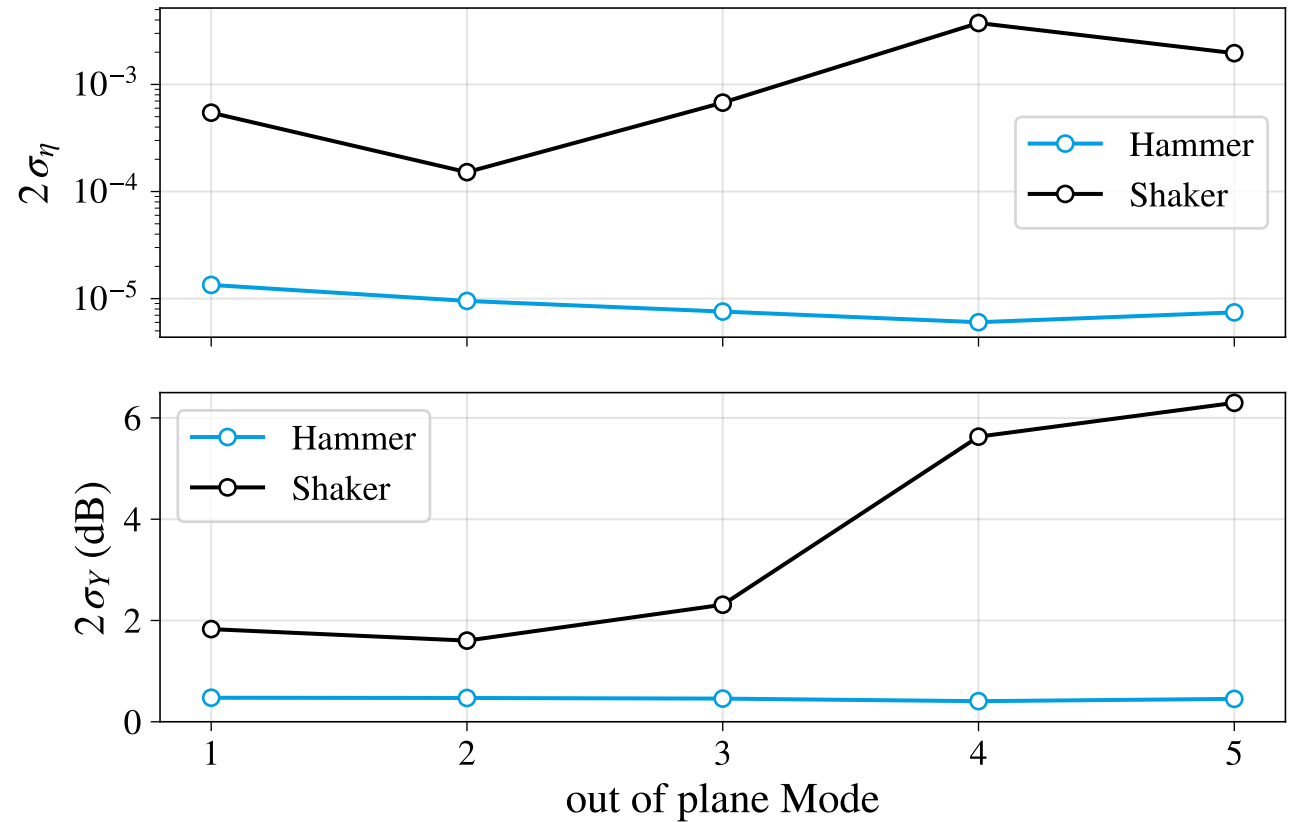
- 13 Wiederholmessungen für drei unterschiedliche Zahnräder aus einer Charge
- Betrachtung der *out of plane Moden* im Frequenzbereich von $\approx 4,6$ kHz bis $\approx 21,7$ kHz
- Ermittlung der Verlustfaktoren mit guter Reproduzierbarkeit
- *geringe Abweichungen* der einzelnen Versuchsteile
- Der Einfluss der Lagerung (zusätzliche Dämpfungsanteile durch Dämmmaterial) ist in der gezeigten Darstellung noch nicht herausgerechnet.



Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

Vergleich zwischen Hammer und Shaker

- gleiche Randbedingung (frei/frei) im Versuchsaufbau mit Shaker und Hammer
- Shaker (*dynamic mechanics*, Typ: *dm2*) mit direkter Ankopplung über Kraftmesszelle (*PCB Piezotronics, Inc.*, Typ: *208C01*) an die Struktur
- 13 Wiederholmessungen (wiederholter Auf- und Abbau inklusive Erneuerung der Klebeverbindung)
- Vergleich zeigt teils **signifikante Unterschiede** zwischen Hammer- und Shaker-Messung
 - Verstimmung des Systems durch Shaker-Ankopplung



Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

Eine Frage die man sich stellen muss...

Ist von einer Messung mit Shaker-Anregung im höheren Frequenzbereich abzusehen?

Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker

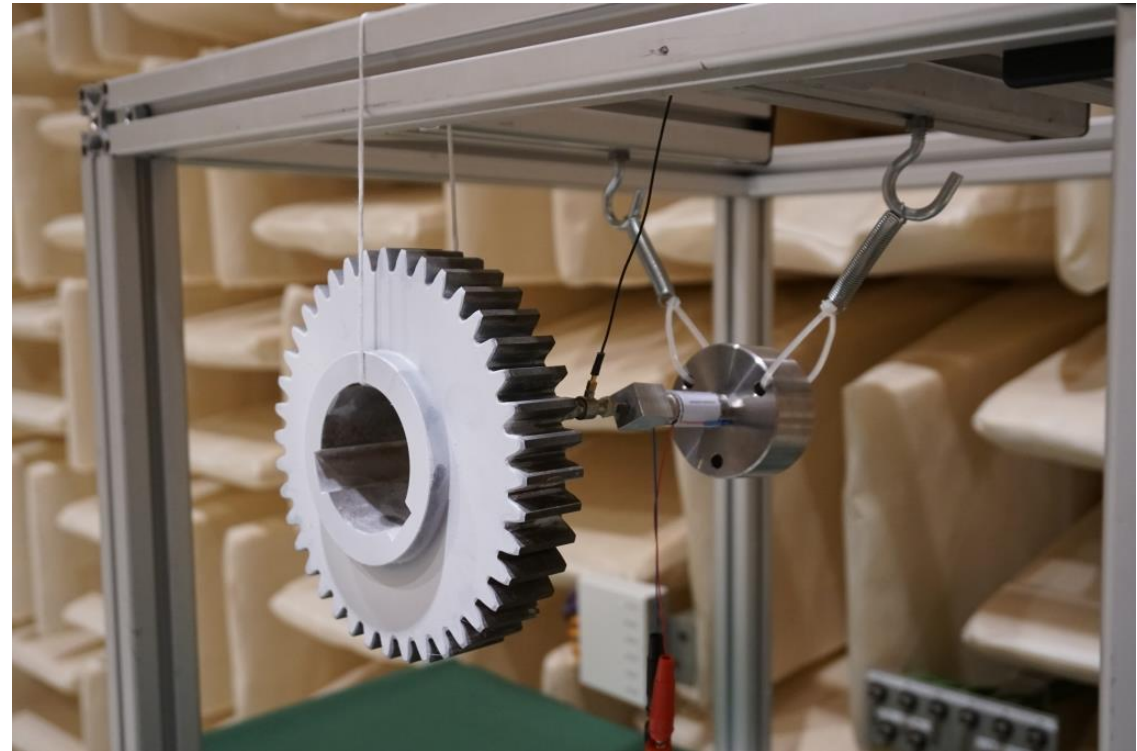
Agenda

- Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades
- Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker
- Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile
- Zusammenfassung

Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker

Versuchsaufbau

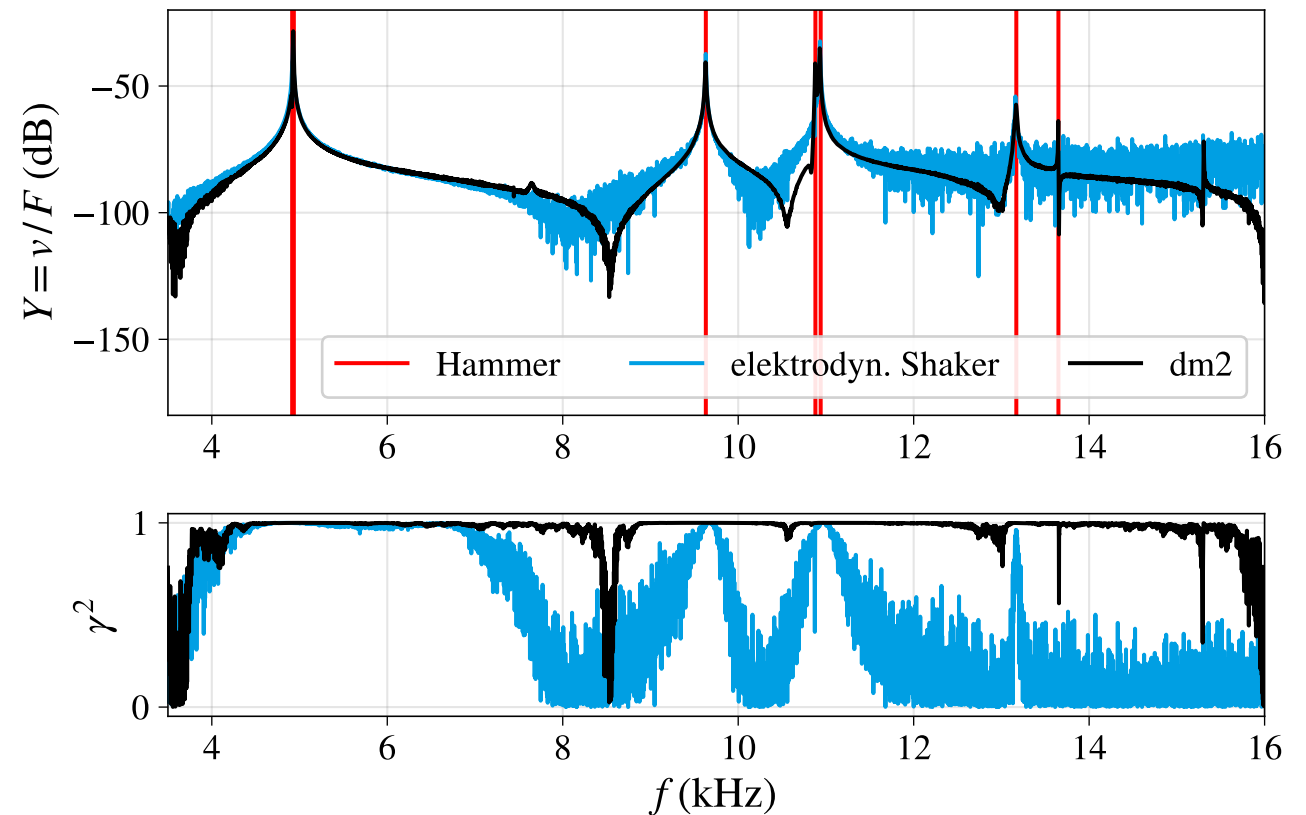
- Vergleich piezoelektrischer Shaker (*dynamic mechanics*, Typ: *dm2*) und elektrodynamischer Shaker
- direkter Ankopplung der Shaker über Kraftmesszelle (*Brüel & Kjær*, Typ: *8203*) an die Struktur
- frei/frei-Lagerung
- Antworterfassung mittels 3D SLDV
- Auswertefrequenzbereich 3,5 kHz bis 16 kHz, Anregungssignal periodic chirp (Bandbreite 20 kHz, 12 800 FFT-Linien)



Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker

Amplitudenfrequenzgänge

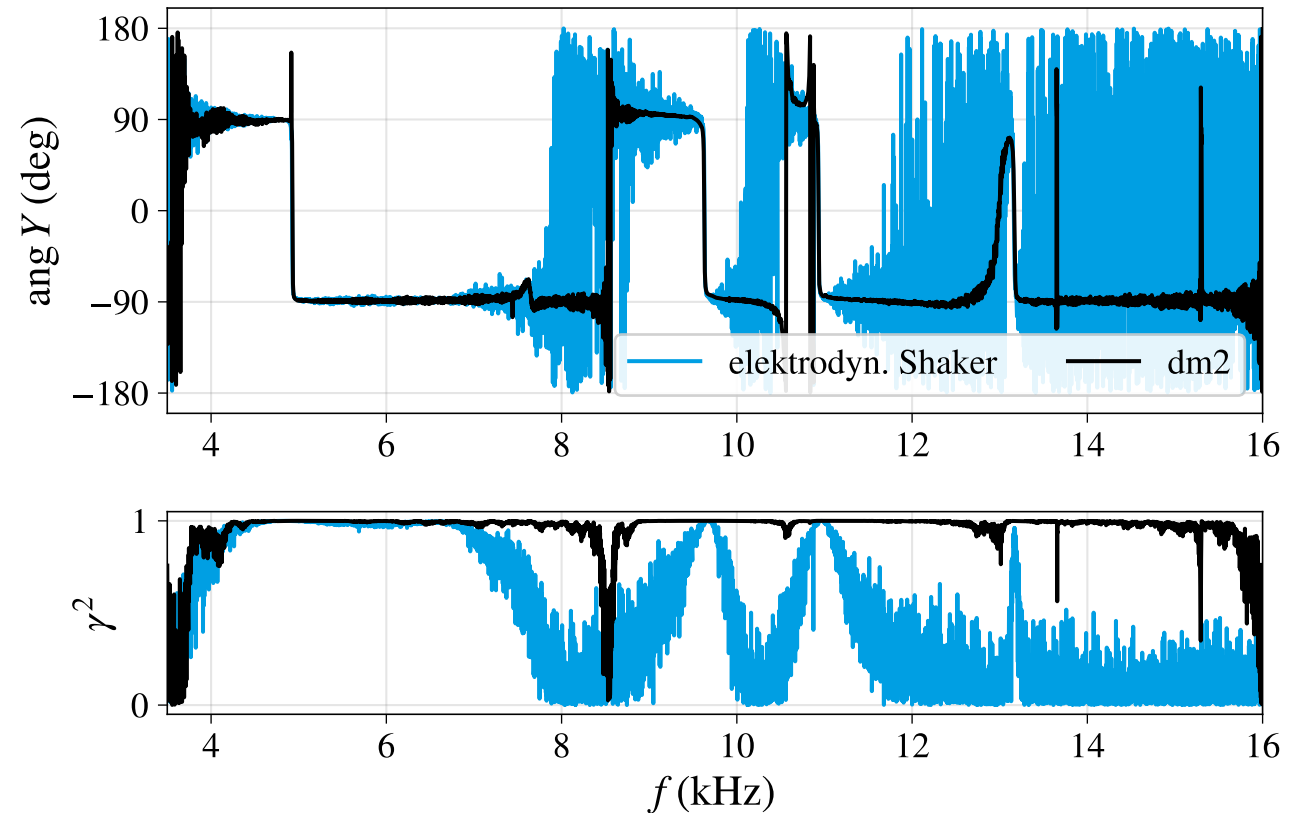
- Vergleich der Amplitudenfrequenzgänge der Transferadmittanzen (dB-Referenz $Y_0 = 1 \text{ m}/(\text{Ns})$)
- zusätzliche Markierung der mit Hammer ermittelten Eigenfrequenzen (ohne Verstimmung des Systems durch die Shaker-Ankopplung)
- zunächst gute Übereinstimmung der Frequenzgänge im Bereich der Eigenfrequenzen
- deutliche Abweichungen im Bereich hoher Impedanz (Kehrwert der Admittanz)
- erhöhter Rauschanteil mit elektrodyn. Shaker erkennbar (zu geringer Energieeintrag)



Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker

Phasenfrequenzgänge

- Vergleich der zugehörigen Phasenfrequenzgänge (signifikant höherer Rauschanteil mit elektrodyn. Shaker)
- kein „sauberer“ Frequenzgang mit elektrodyn. Shaker erfassbar
- Messung mit piezoelektrischem Shaker dm2 mit deutlich besserem Signal-Rausch-Verhältnis
- Kohärenzfunktion γ^2 verdeutlicht die Unterschiede.
 - Messergebnisse mit elektrodyn. Shaker ab ≈ 7 kHz unbrauchbar
 - piezoelektr. Shaker dm2 nahezu im kompletten Frequenzbereich anwendbar



Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile

Agenda

- Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades
- Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker
- Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile
- Zusammenfassung

Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile

Versuchsaufbau

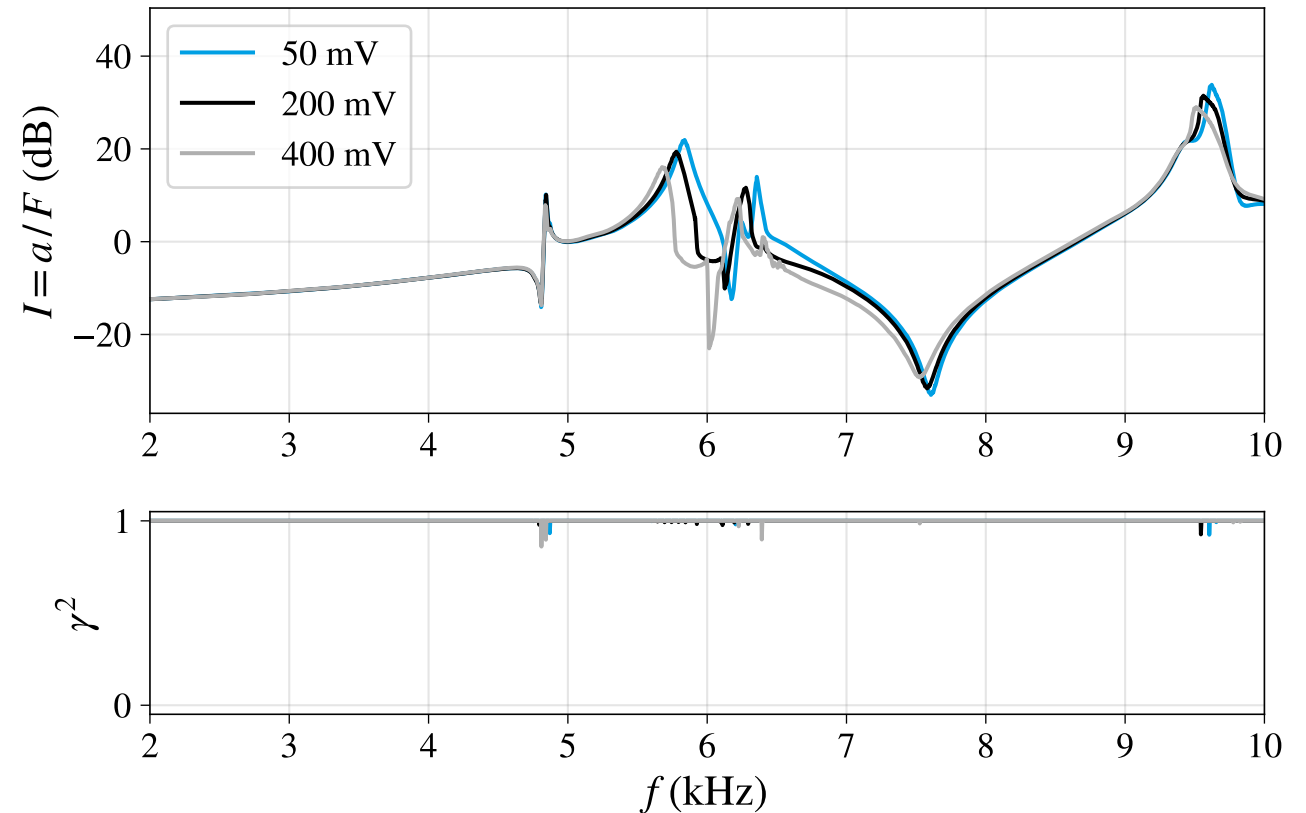
- Shaker (*dynamic mechanics*, Typ: *dm2*) mit direkter Ankopplung über Kraftmesszelle (*PCB Piezotronics, Inc.*, Typ: *208C01*) an die Struktur
- frei/frei-Randbedingung (tieffrequente Entkopplung durch die Federn)
- zusätzliche Messung mittels Impulshammer (*PCB Piezotronics, Inc.*, Typ: *086C03*, Stahlkalotte)



Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile

Auswertung der Shaker-Messungen

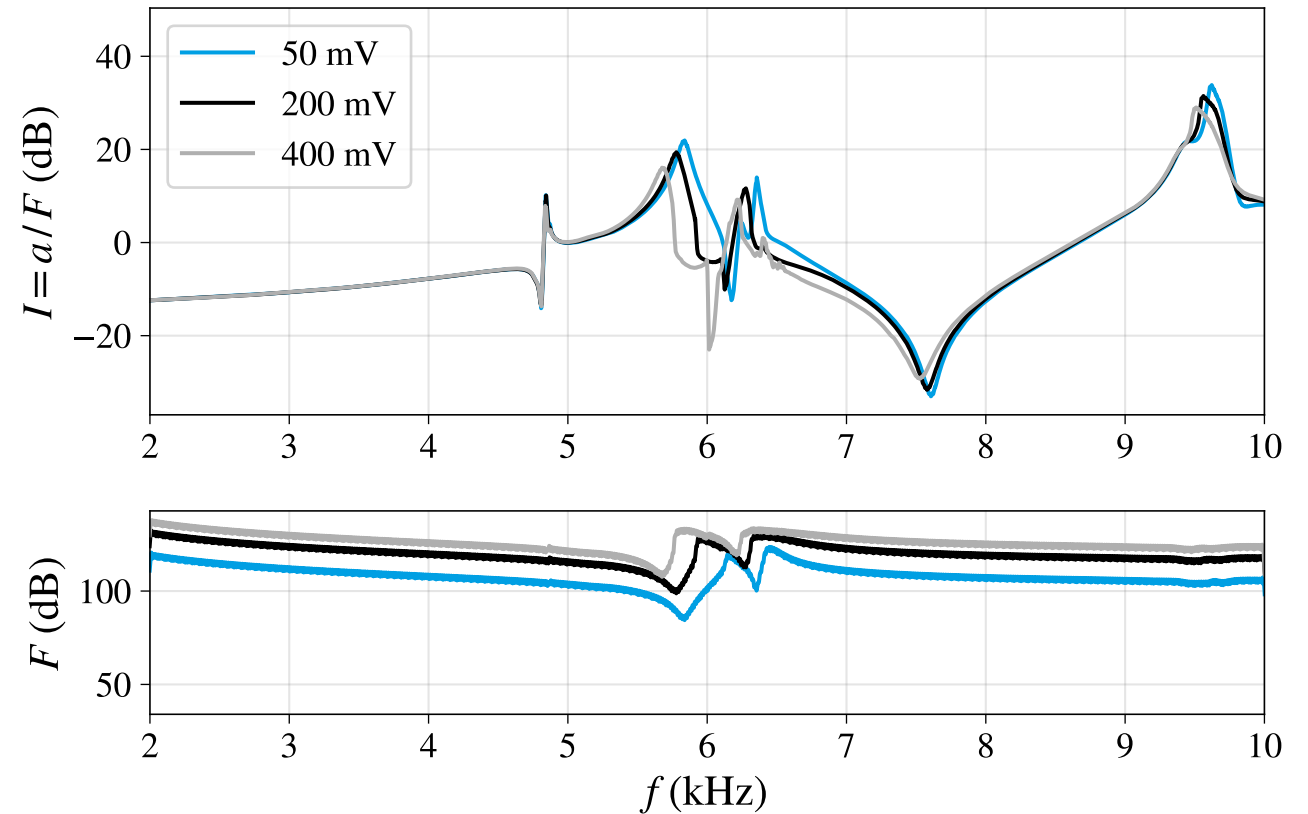
- Anregung mittels Sinus-Sweep im Bereich 2 kHz bis 10 kHz
- Messung mit unterschiedlichen Anregungsintensitäten (Amplitude des Gleitsinus am Generatormodul Ausgang)
- Transferinertanzen (dB-Referenz $I_0 = 1 \text{ m}/(\text{N s}^2)$) **abhängig von der Erregeramplitude** im Bereich um $f \approx 6 \text{ kHz}$
 - Hinweis auf **nicht-lineares Systemverhalten**
 - mögliche Ursache: Schraubverbindung im Bereich der Shaker-Ankopplung



Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile

Auswertung der Shaker-Messungen

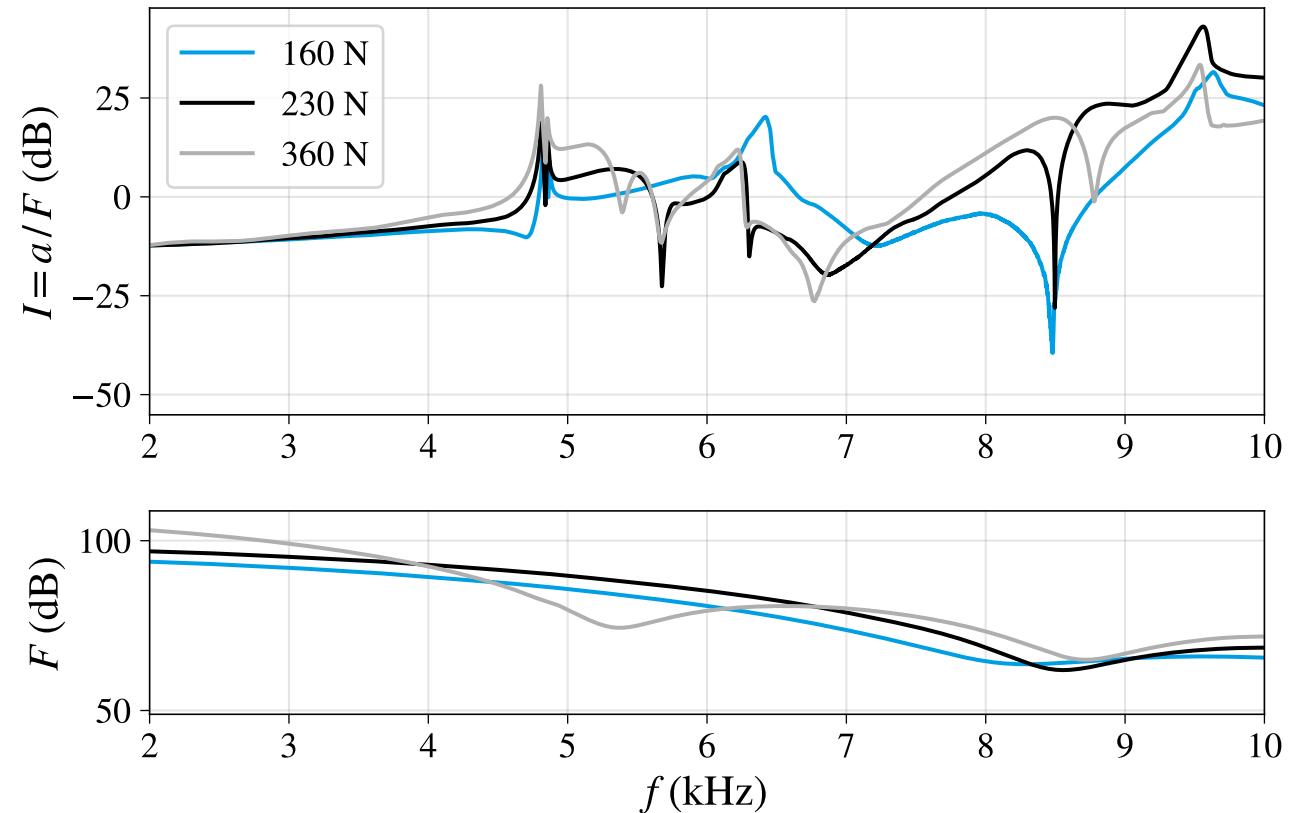
- zugehöriges Anregungsspektrum (dB-Referenz $F_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ N}$) verdeutlicht unterschiedliche Kräfte am Systemeingang
- Ist dieses nicht-lineare Verhalten im Frequenzbereich $> 6 \text{ kHz}$ ohne weiteres mit dem Hammer nachweisbar?



Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile

Auswertung der Hammer-Messungen

- Gegenüberstellung der Transferinertanzen ($\text{dB-Referenz } I_0 = 1 \text{ m}/(\text{N s}^2)$) zeigt, dass das mit dem Shaker beobachtbare nicht-lineare Verhalten **nicht eindeutig mit den Hammer-Messungen nachgewiesen werden kann**.
- **schwierige Reproduzierbarkeit gleicher Impulshöhen** (Amplitude) innerhalb einer Messung für mehrere Mittelungen
- zu geringe Anregung im höheren Frequenzbereich



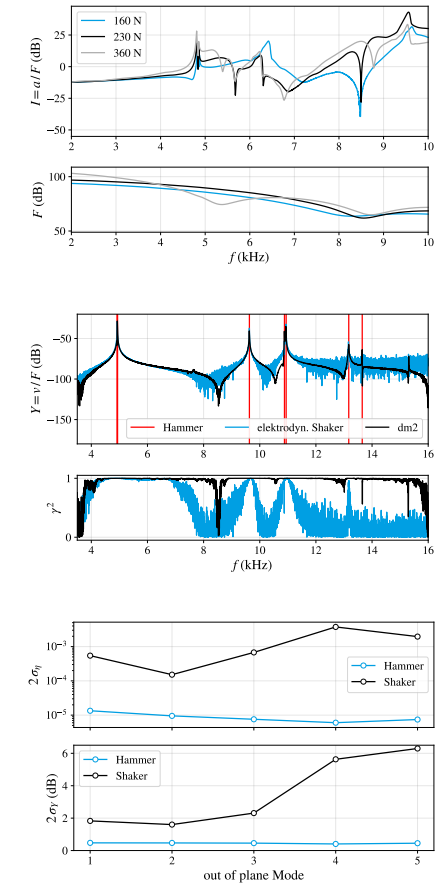
Zusammenfassung

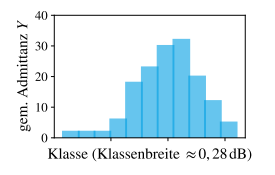
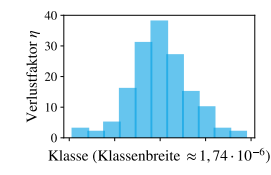
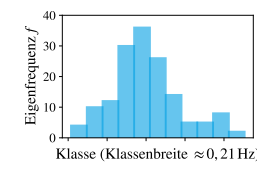
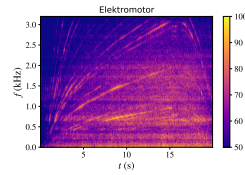
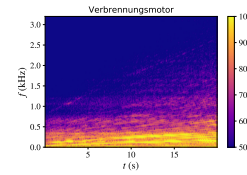
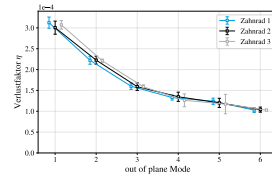
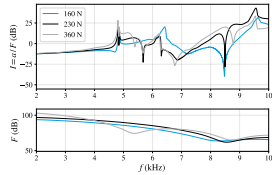
Agenda

- Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades
- Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker
- Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- Die Frage nach dem Einsatz von **Shaker oder Modalhammer** im höheren **Frequenzbereich** kann nicht pauschal beantwortet werden, sondern hängt von der zugrundeliegenden **Problemstellung** ab.
- Der Vergleich eines **elektrodynamischen** und eines **piezoelektrischen Shakers** zeigt, dass (für die betrachtete Struktur) der **piezoelektrischen Erreger** besser geeignet ist, um „saubere“ Frequenzgänge zu erfassen, was vor allem in Bezug auf eine Weiterverarbeitung der Daten (bspw. im Rahmen einer hybriden frequenzbasierten Substrukturierung) von entscheidender Bedeutung ist.
- Die vorgestellten statistischen Auswertungen der **experimentellen Modalanalyse** haben gezeigt, dass gerade im höheren Frequenzbereich auf den entsprechenden **Einfluss der Shaker-Ankopplung an die Struktur** zu achten ist, da diese zu signifikanten Systemverstimmungen führen kann.





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Eric Hensel
 Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
 Abteilung Technische Akustik
 Nöthnitzer Straße 44, 01187 Dresden, Germany
 Telefon +49 351 4772-2153
eric.hensel@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

Dr. Martin Brucke
 dynamic mechanics
 Hüblerstraße 42, 01309 Dresden, Germany
 Telefon +49 351 31392438
martin.brucke@dynamic-mechanics.com
www.dynamic-mechanics.com