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

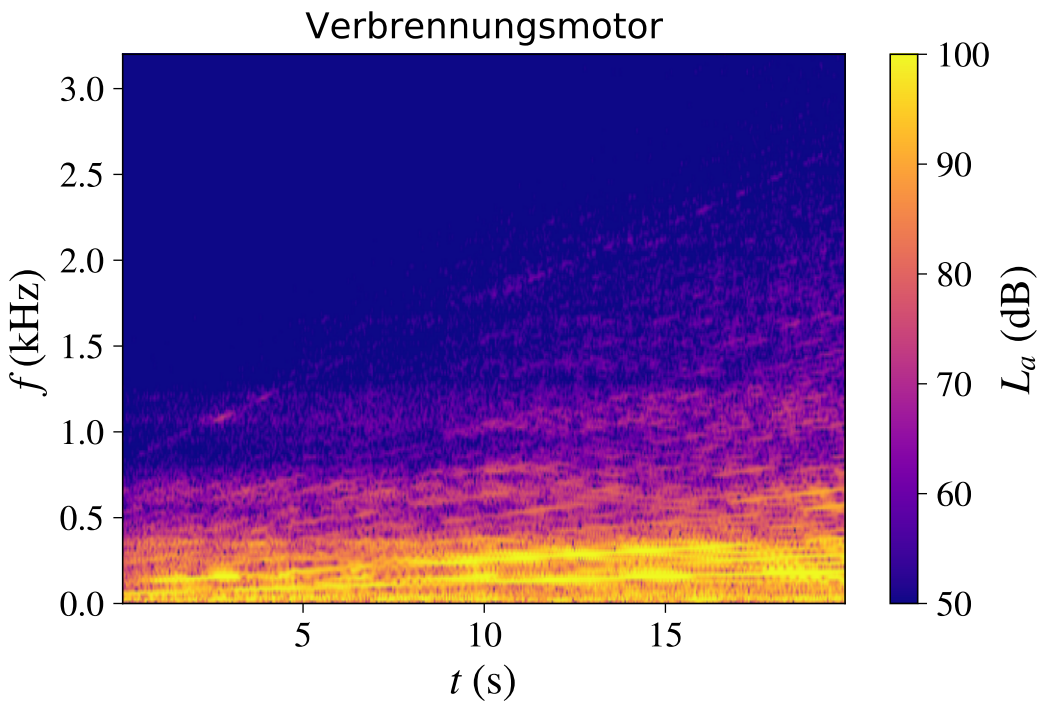
Warum rücken höhere Frequenzanteile immer mehr in den Fokus?

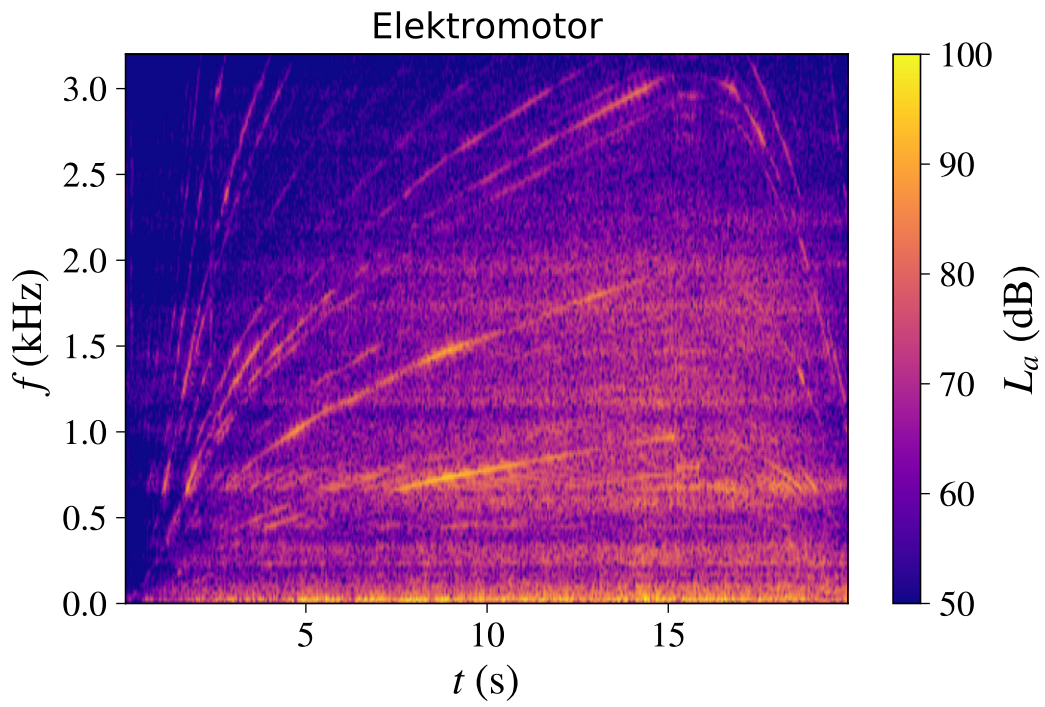
- Was versteht man unter „höheren Frequenzen“?
  - keine einheitliche Definition $\rightarrow$ im Folgenden: $f > 3\,\mathrm{kHz}$
- Ein aktuelles (und populäres) Beispiel ist die Elektrifizierung von Fahrzeugantrieben.
  - Wegfall des Verbrennungsmotors führt zum Wegfall von sogenannten Maskierungseffekten.
  - 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





DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

Problemstellung und Motivation

Agenda

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

DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

Agenda

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

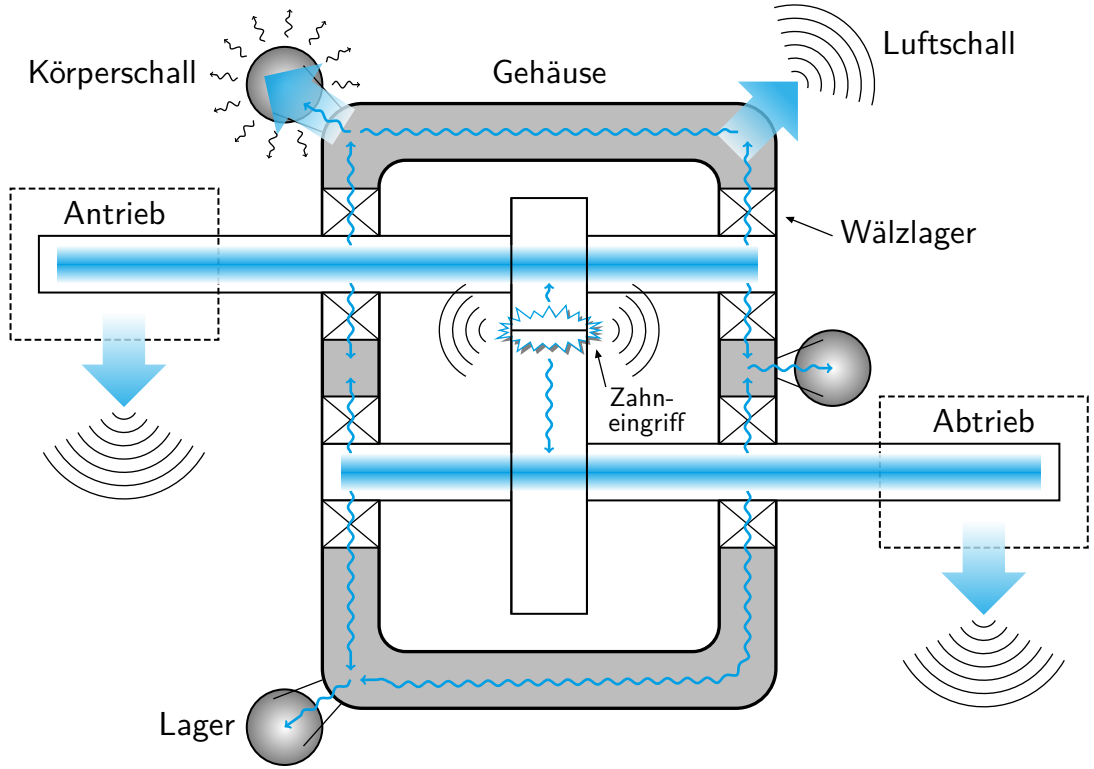
DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

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

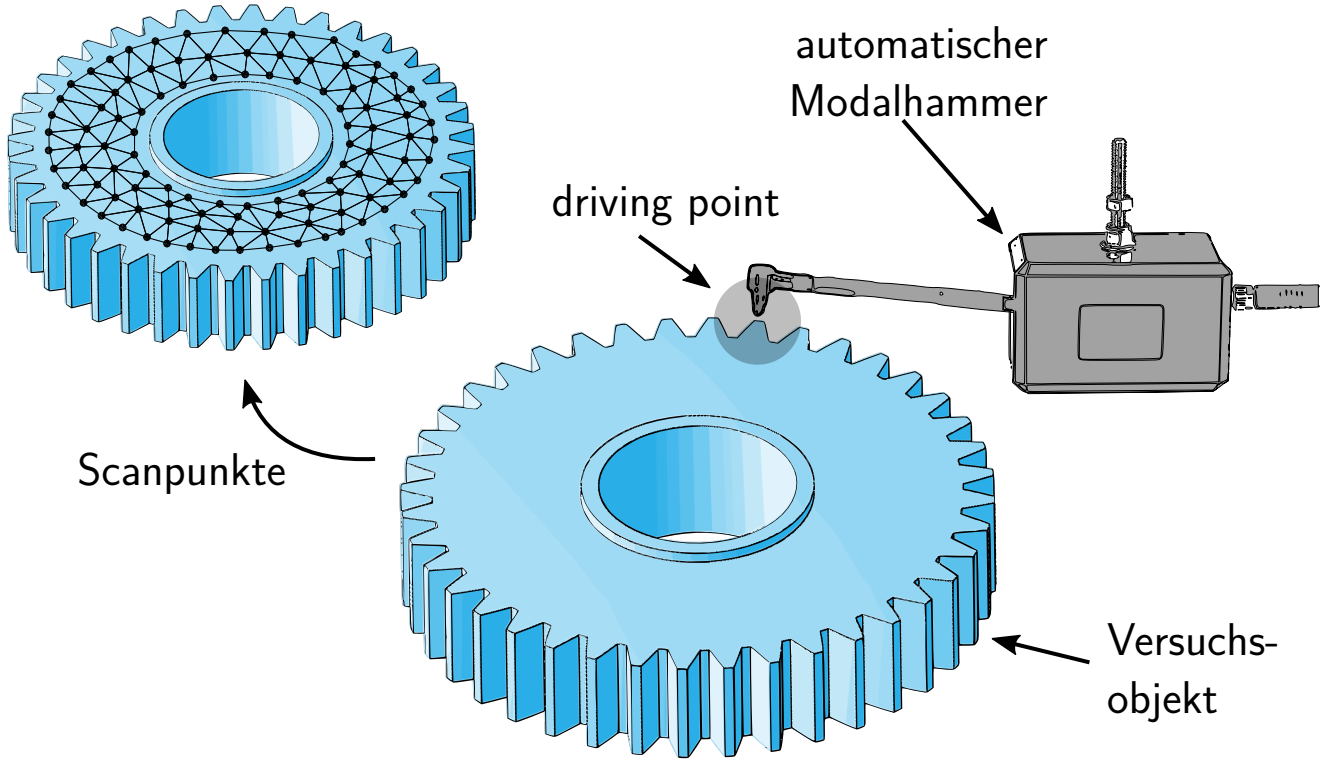
Kurzübersicht zur Experimentellen Modalanalyse

- 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

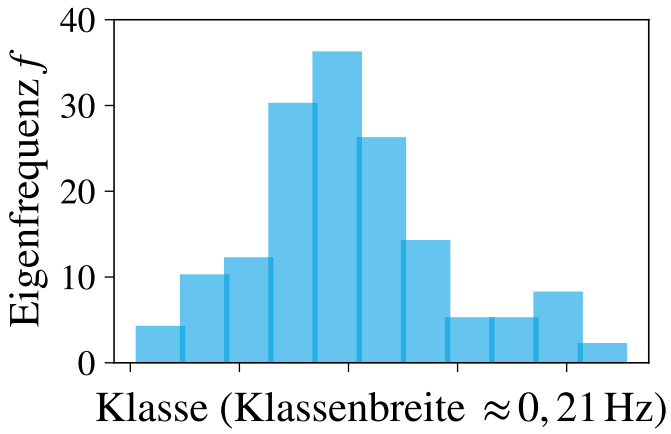
- frei/frei-Lagerung auf akustischem Dämmmaterial (CARUSO-ISO-BOND®)
- Anregung mittels automatisiertem Impulshammer (*MAUL-THEET GmbH*, Typ: *vImpact-60*)
- Antworterfassung mittels 3D Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer (SLDV, *Polytec GmbH*, Typ: *PSV-400-3D*)
- Ergebnis der Messung: Transferadmittanzen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

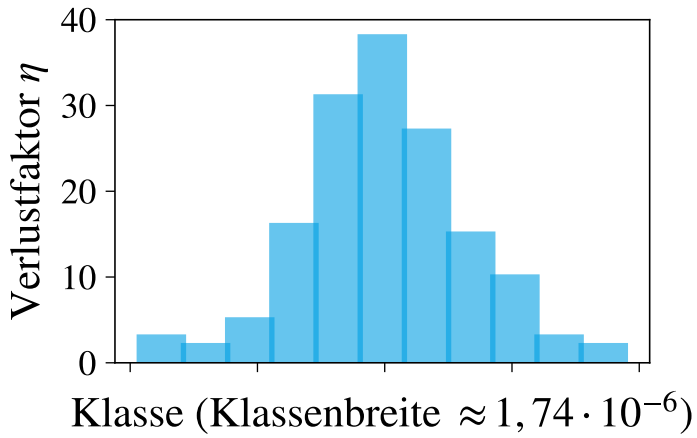


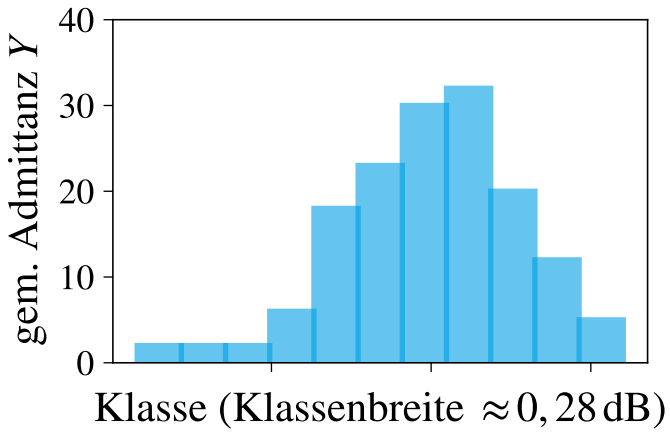
Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

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 Versuchsstandes
  - statistische Betrachtung der ermittelten Modalparameter







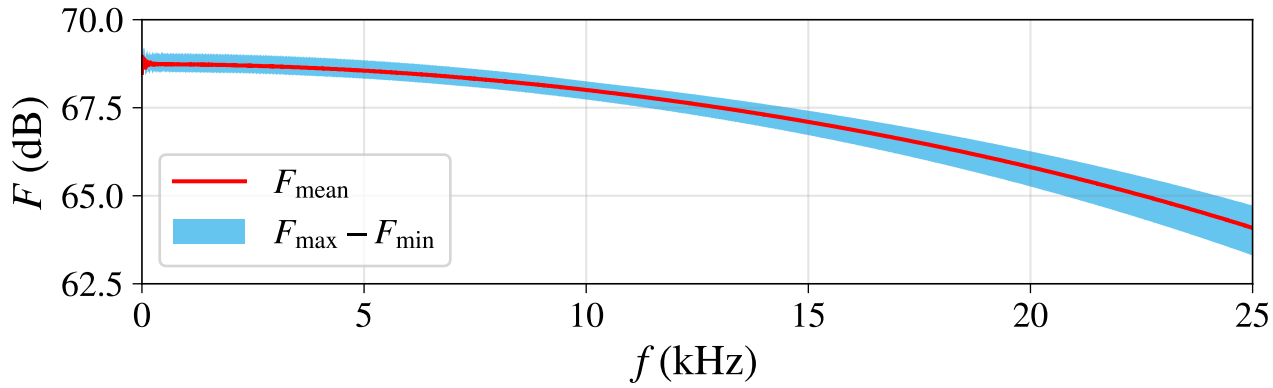
DYNAMIC MECHANICS

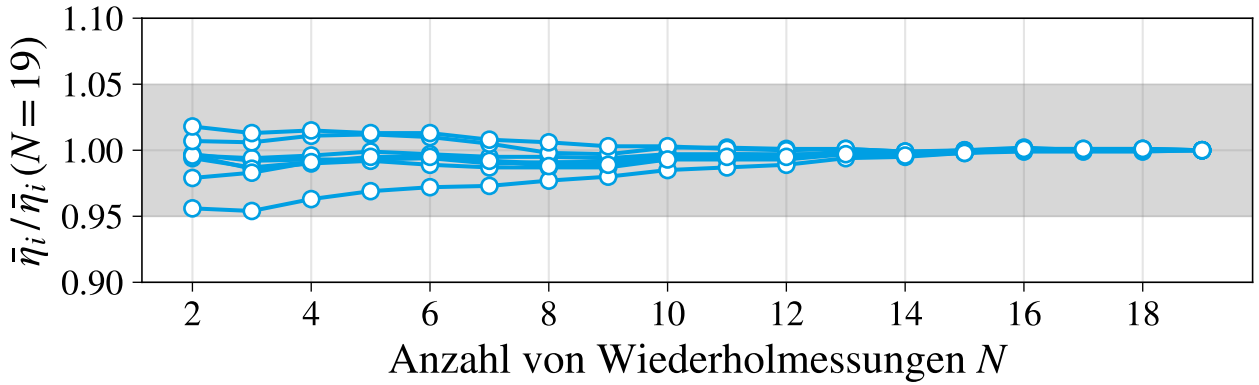
Fraunhofer IWU

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)





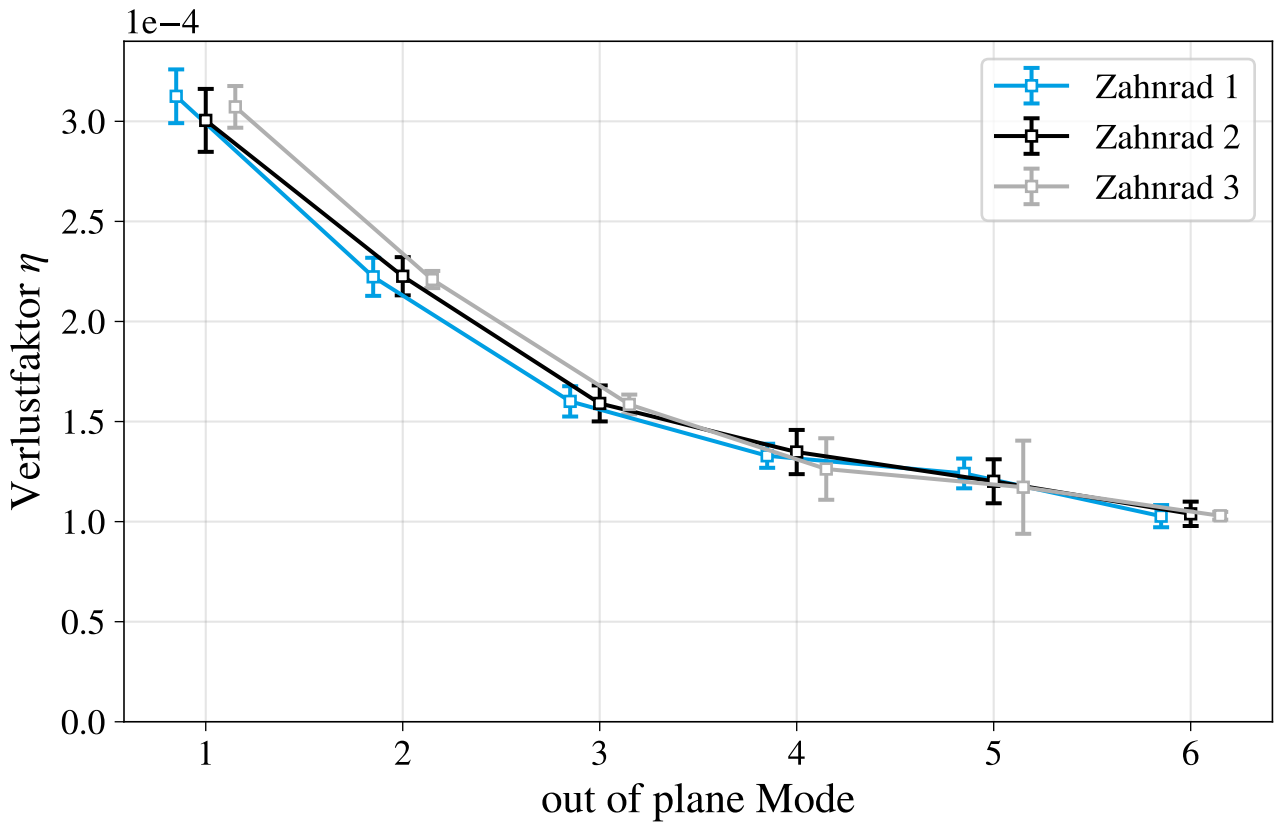
DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

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.



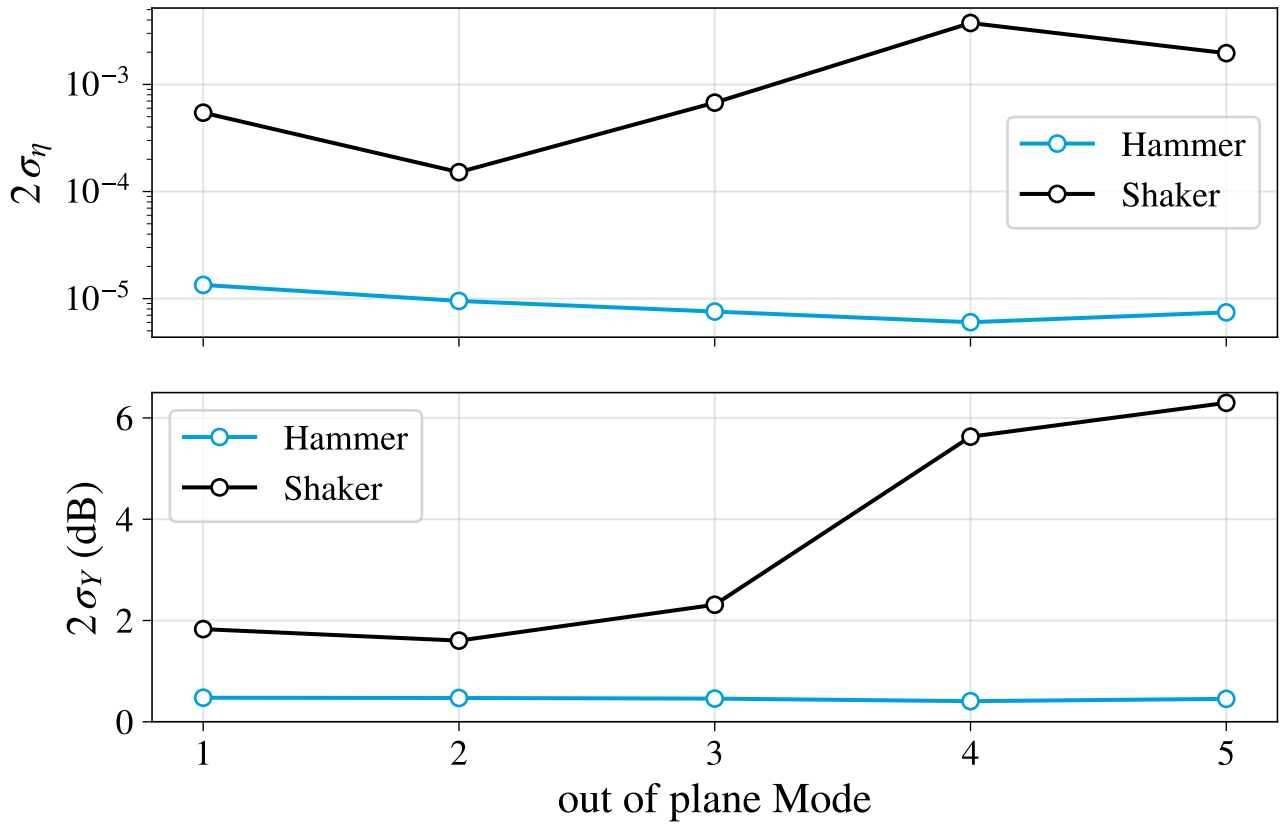
DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

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



DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades

Eine Frage die man sich stellen muss...

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

DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

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

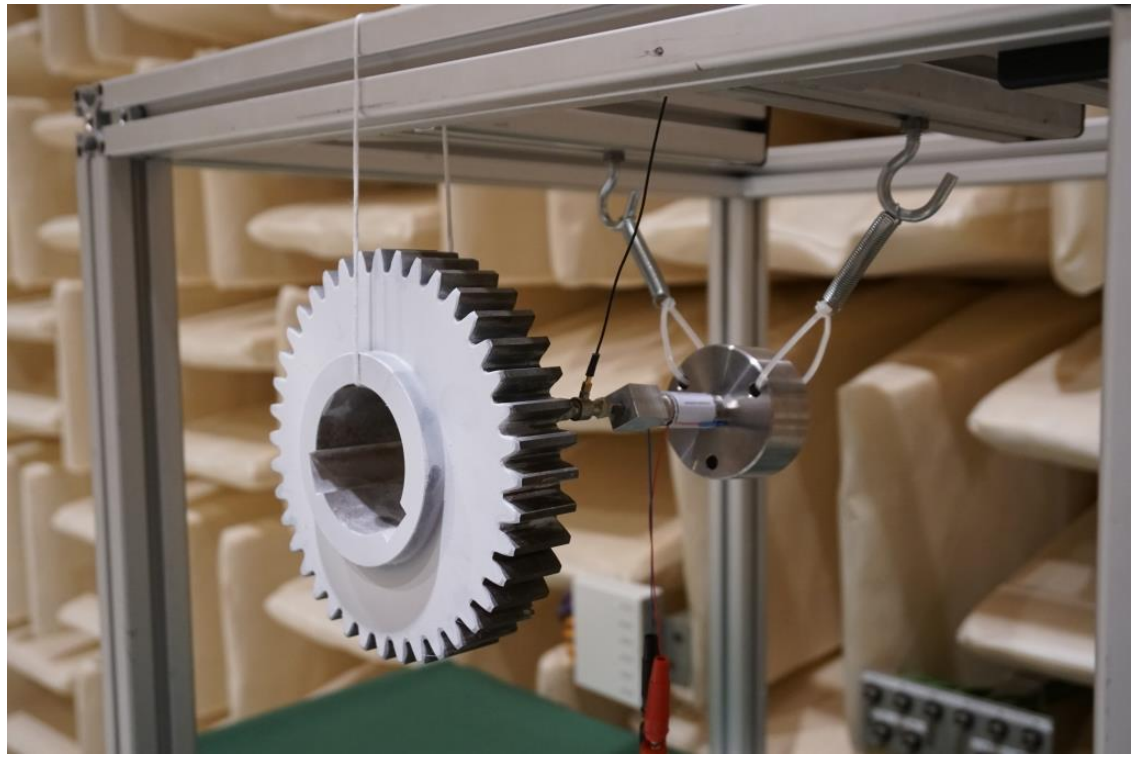
DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

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)



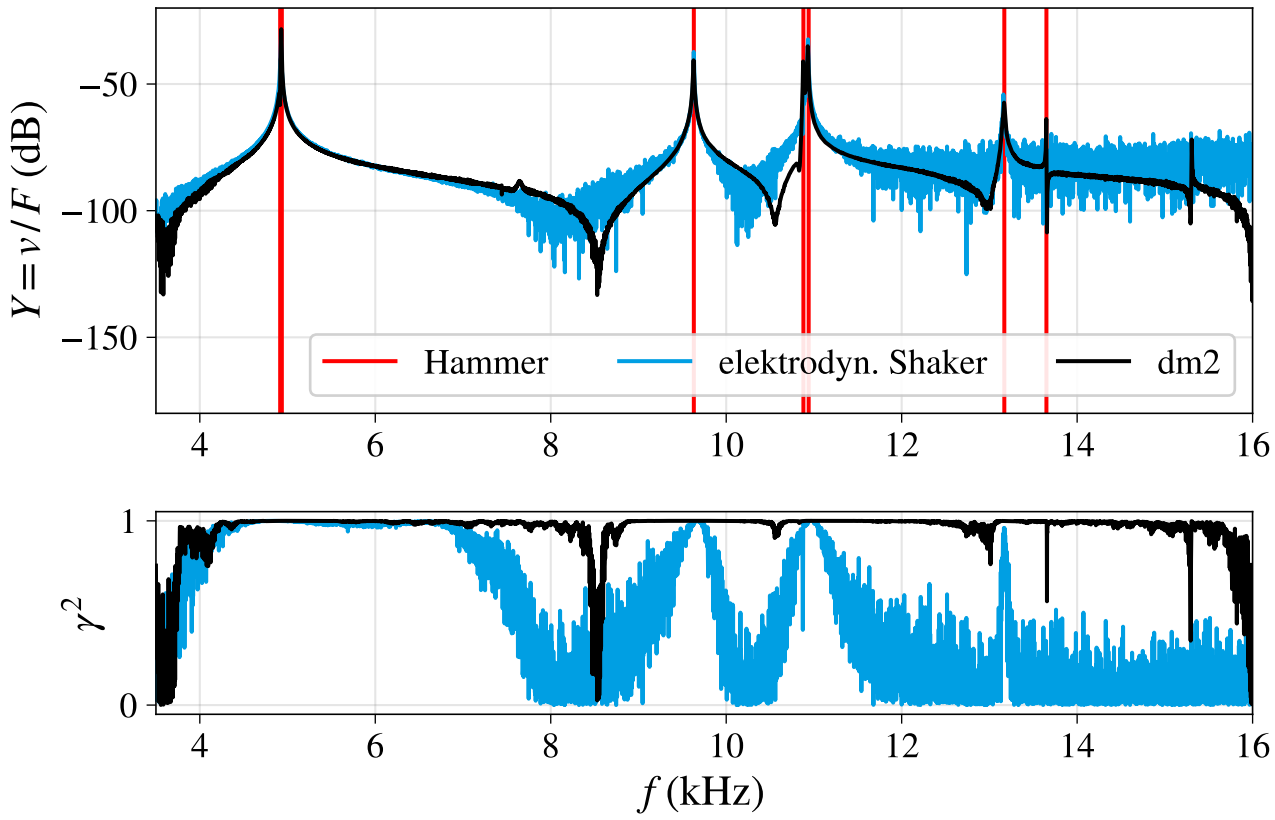
DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker

Amplitudenfrequenzgänge

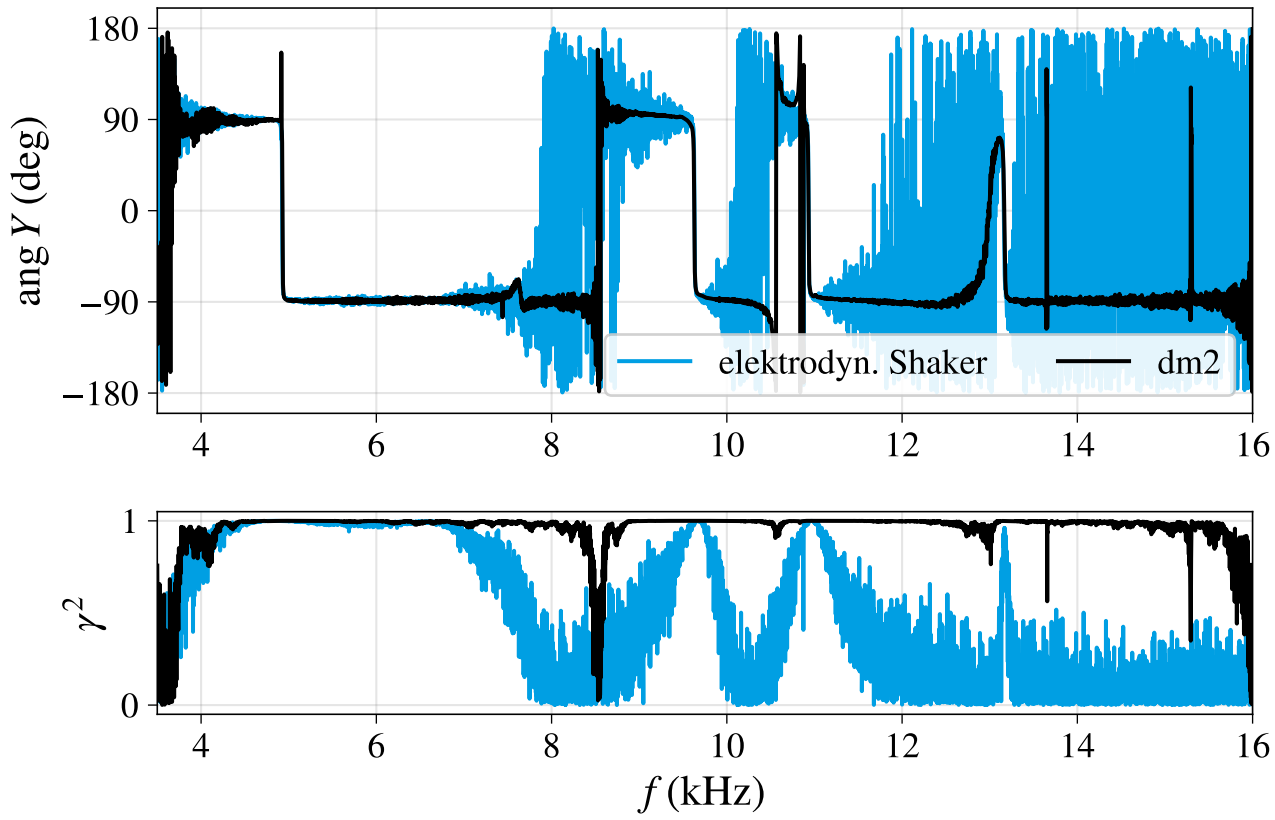
- Vergleich der Amplitudenfrequenzgänge der Transferadmittanzen (dB-Referenz $Y_0 = 1\,\mathrm{m}/(\mathrm{N\,s})$)
- zusätzliche Markierung der mit Hammer ermittelten Eigenfrequenzen (ohne Verstimmung des Systems durch die Shaker-Ankopplung)
- zunächst gute Übereinstimmung der Frequenzgänge im Bereich 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 $\approx 7\,\mathrm{kHz}$ 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

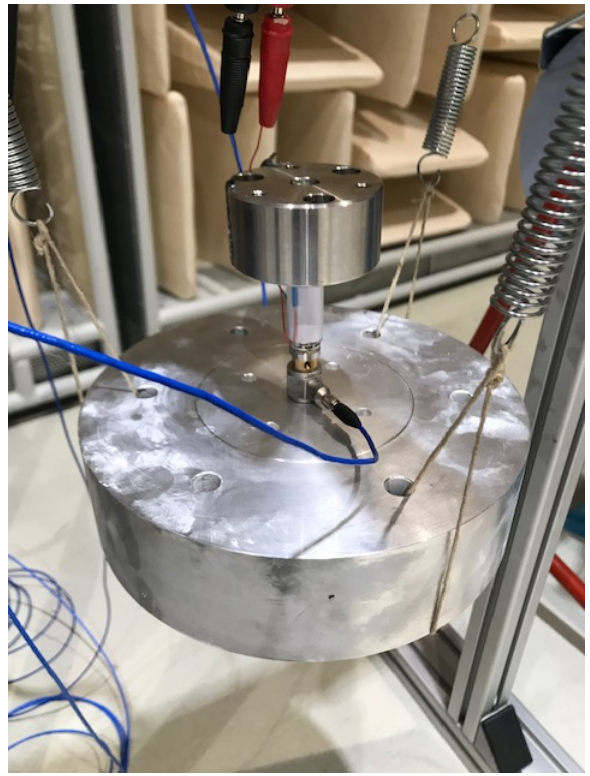
DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

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)



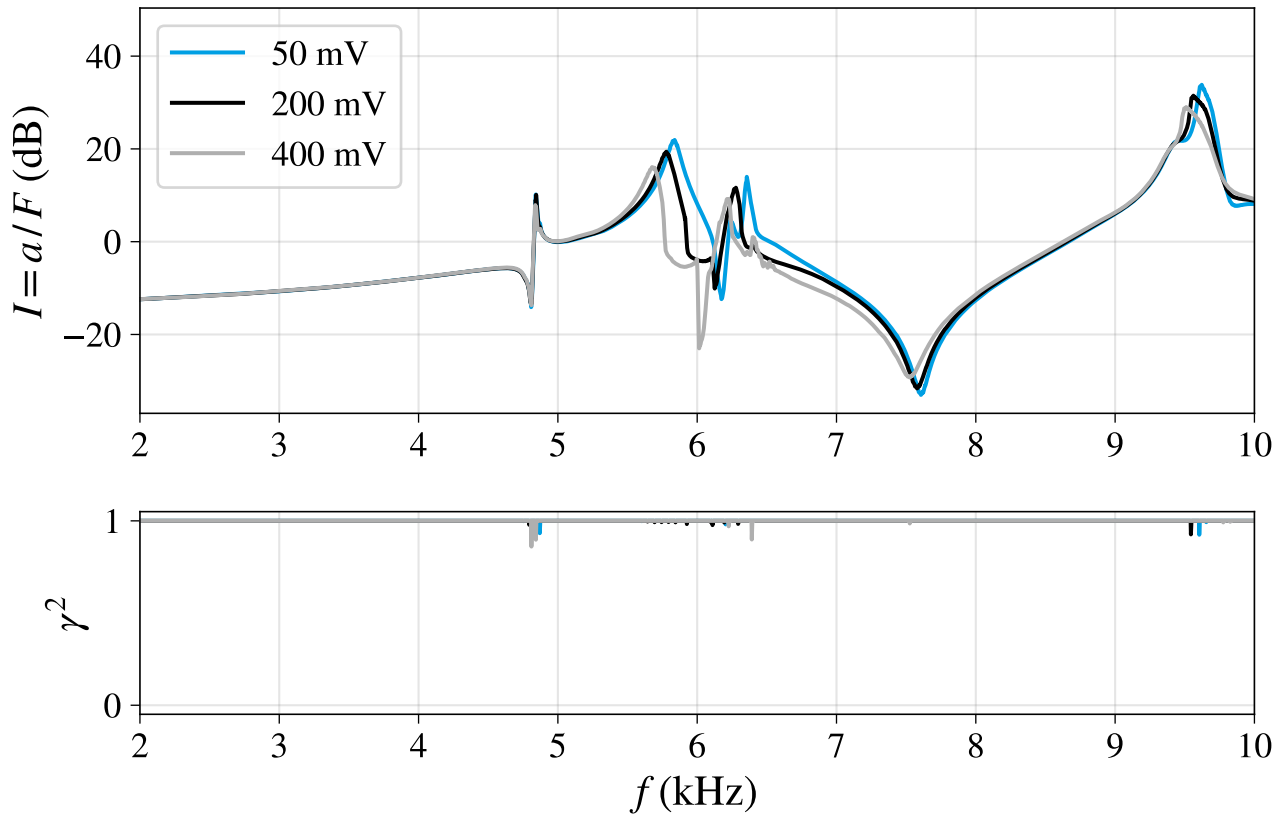
DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

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 Generatormodulausgang)
- Transferinertanzen (dB-Referenz $I_0 = 1\,\mathrm{m}/(\mathrm{N\,s}^2)$) abhängig von der Erregeramplitude im Bereich um $f \approx 6\,\mathrm{kHz}$
  - Hinweis auf nicht-lineares Systemverhalten
  - mögliche Ursache: Schraubverbindung im Bereich der Shaker-Ankopplung



DYNAMIC MECHANICS

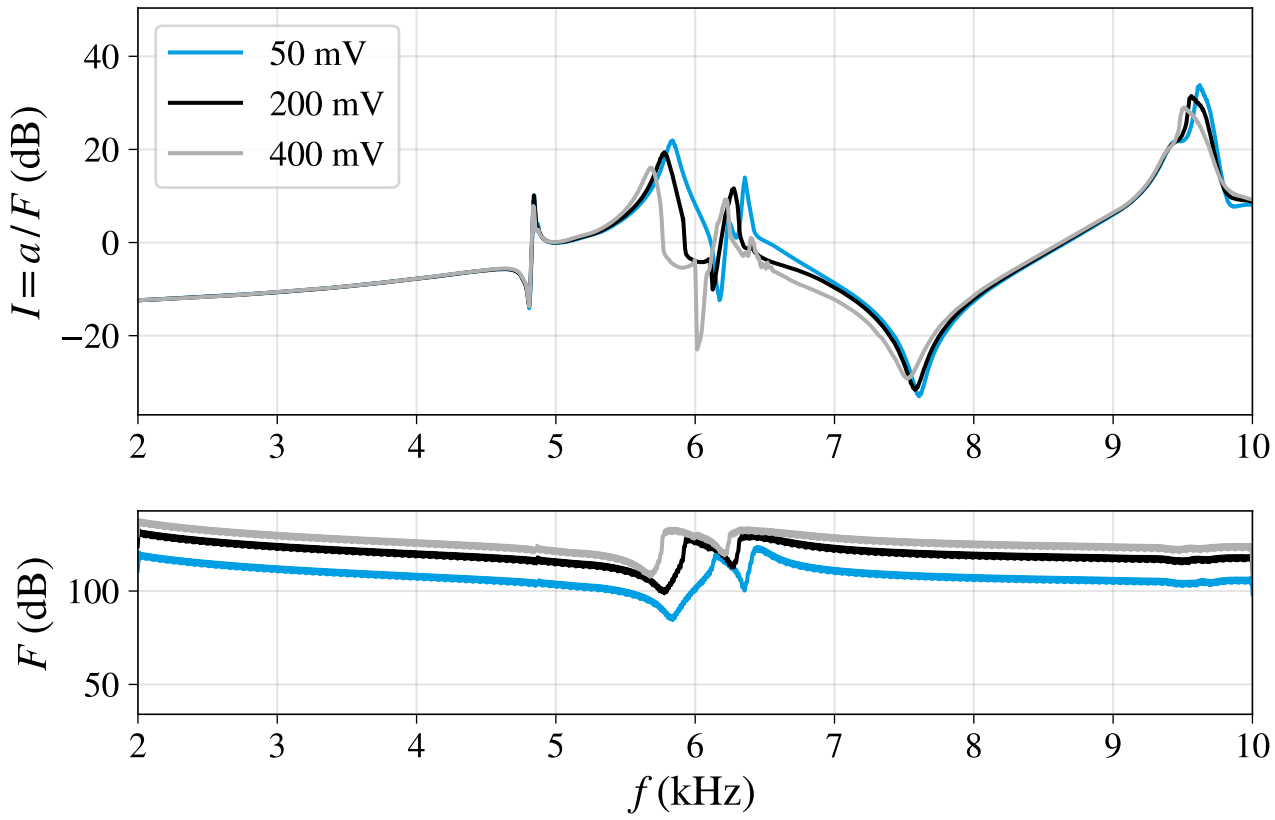
Fraunhofer IWU

Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile

Auswertung der Shaker-Messungen

- zugehöriges Anregungsspektrum (dB-Referenz $F_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ N) verdeutlicht unterschiedliche Kräfte am Systemeingang

- Ist dieses nicht-lineare Verhalten im Frequenzbereich > 6 kHz ohne weiteres mit dem Hammer nachweisbar?



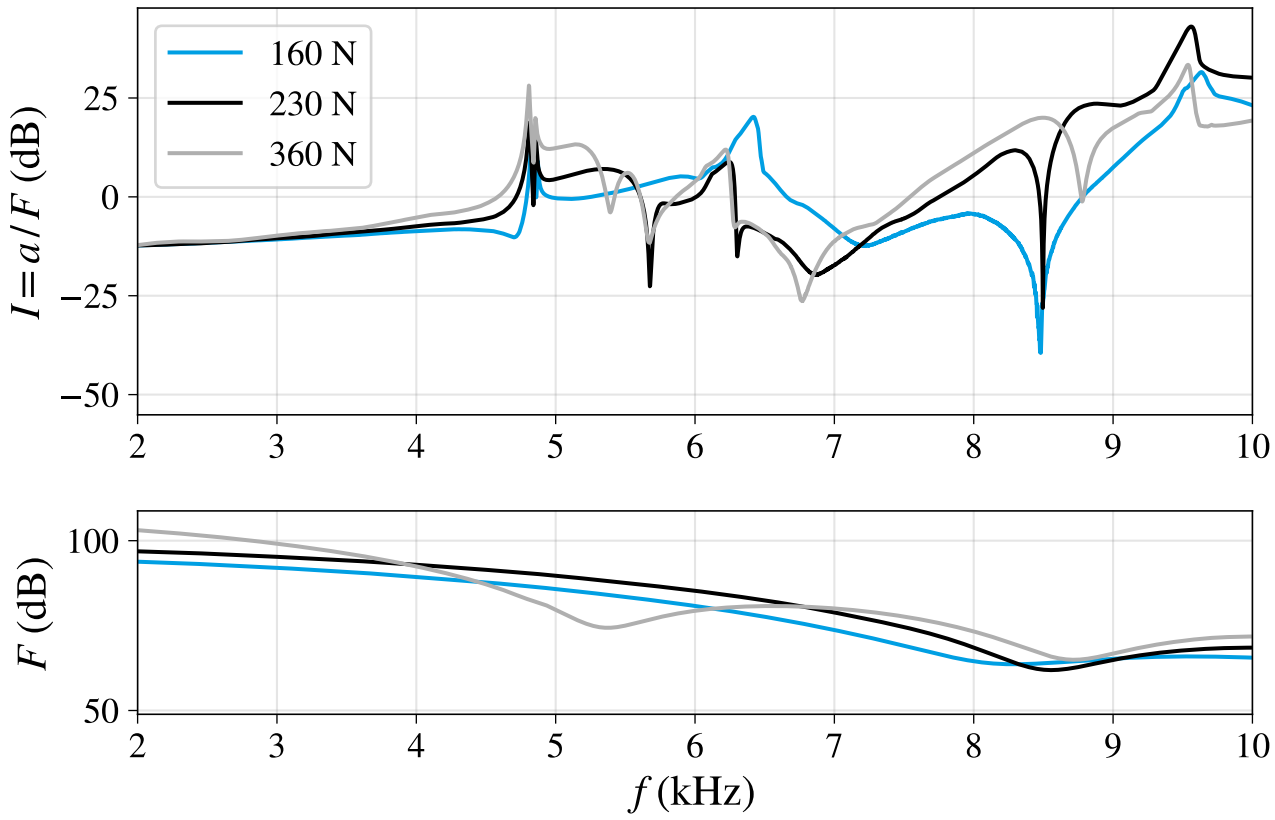
DYNAMIC MECHANICS

Fraunhofer IWU

Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile

Auswertung der Hammer-Messungen

- Gegenüberstellung der Transferinertanzen (dB-Referenz $I_0 = 1\,\mathrm{m}/(\mathrm{N\,s}^2)$) 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

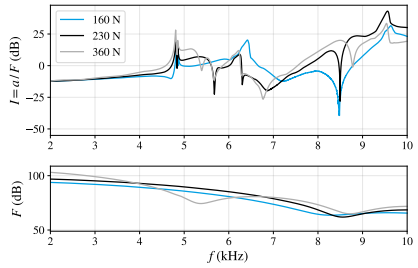


Zusammenfassung
Agenda

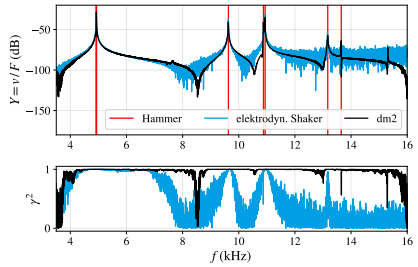
- Experimentelle Modalanalyse am Beispiel eines Getriebezahnrades
- Vergleich der Frequenzgänge zweier Shaker
- Frequenzganganalyse am Beispiel einer Aufnahme für Prüfstandsteile
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

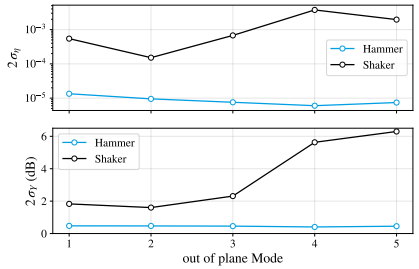
- Die Frage nach dem Einsatz von Shaker oder Modalhammer im höheren Frequenzbereich kann nicht pauschal beantwortet werden, sondern hängt von der zugrundeliegenden Problemstellung ab.

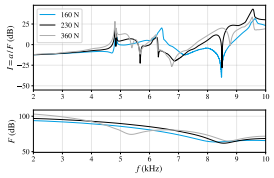


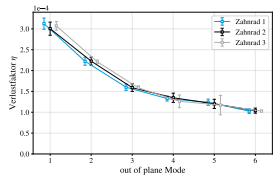
- Der Vergleich eines elektrodynamischen und eines piezoelektrischen Shakers zeigt, dass (für die betrachtete Struktur) der piezoelektrischen Erreger besser geeignet ist, um „saubere“ Frequenzgänge zu erfassen, was vor allem in Bezug auf eine Weiterverarbeitung der Daten (bspw. im Rahmen einer hybriden frequenzbasierten Substrukturierung) von entscheidender Bedeutung ist.

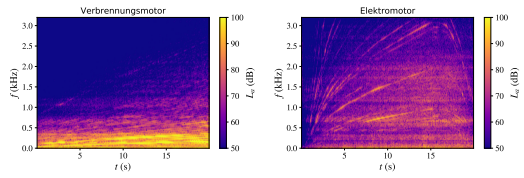


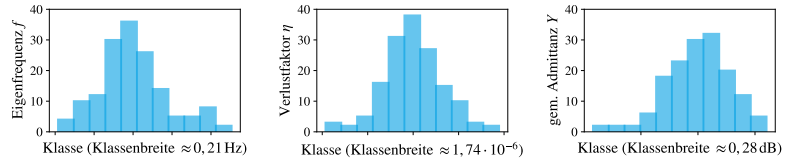
- Die vorgestellten statistischen Auswertungen der experimentellen Modalanalyse haben gezeigt, dass gerade im höheren Frequenzbereich auf den entsprechenden Einfluss der Shaker-Ankopplung an die Struktur zu achten ist, da diese zu signifikanten Systemverstimmungen führen kann.











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