

# Experimentelle Modalanalyse an Zahnrädern

Messungen mit breitbandiger  
piezoelektrischer Kraftanregung



Im vorliegenden Beitrag werden unterschiedliche Krafterreger zur Ermittlung von Übertragungsadmittanzen mechanischer Systeme am Beispiel eines Zahnrades verglichen. Zielsetzung ist es, die akustischen Eigenschaften technischer Strukturen, wie z. B. der Antriebstrang eines Elektrofahrzeuges im höherfrequenten Bereich, zu analysieren und zu bewerten. Es konnte gezeigt werden, dass mit breitbandiger piezoelektrischer Kraftanregung deutlich konsistentere Messergebnisse insbesondere bei hohen Frequenzen erzielt werden können.

#### **STAND DER TECHNIK**

Mit zunehmender Verbreitung elektrischer Antriebe in Fahrzeugen ergeben sich neue Anforderungen an die akustischen Eigenschaften des gesamten Antriebsstranges. Der klassische Verbrennungsmotor erzeugt einen relativ hohen Geräuschpegel, der bestimmte Störgeräusche, wie z. B. das „Getriebeheulen“, überdeckt. Dieser sogenannte Maskierungseffekt des Verbrennungsmotors entfällt bei elektrischen Antrieben, wodurch Anteile im höheren Frequenzbereich in den Vordergrund rücken. Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ist folglich die Verringerung dieser akustischen Eigenschaften.

Beim Fraunhofer IWU wird das Übertragungsverhalten der Komponenten des Antriebsstranges durch sog. Netzwerkmodelle beschrieben [1]. Eine Grundlage dieser Herangehensweise ist die Beschreibung

der Einzelkomponenten, z. B. eines Zahnrades, durch frequenzabhängige Übertragungsfunktionen. Dies geschieht durch harmonische Kraftanregung der Komponenten und Messung der Strukturantwort mittels 3D-Scanning-Laservibrometrie.

Insbesondere bei großen Strukturen stellt die Kraftanregung im interessierenden Frequenzbereich (bis 20 kHz) eine Herausforderung an die existierende Erregertechnik dar. Als Stand der Technik werden elektrodynamische Shaker oder Impulshämmer verwendet. Gerade bei höheren Frequenzen (> 5 kHz) reichen die eingeleiteten Kräfte oft nicht aus, um konsistente Messergebnisse (Betrag und Phase) zu erhalten. In diesem Artikel werden ein Verfahren zur breitbandigen Kraftanregung unter Verwendung eines piezoelektrischen Modalerregers (dm2) und ein Vergleich mit einem konventionellen Erreger (Brüel&Kjær 4810) beschrieben. ▶

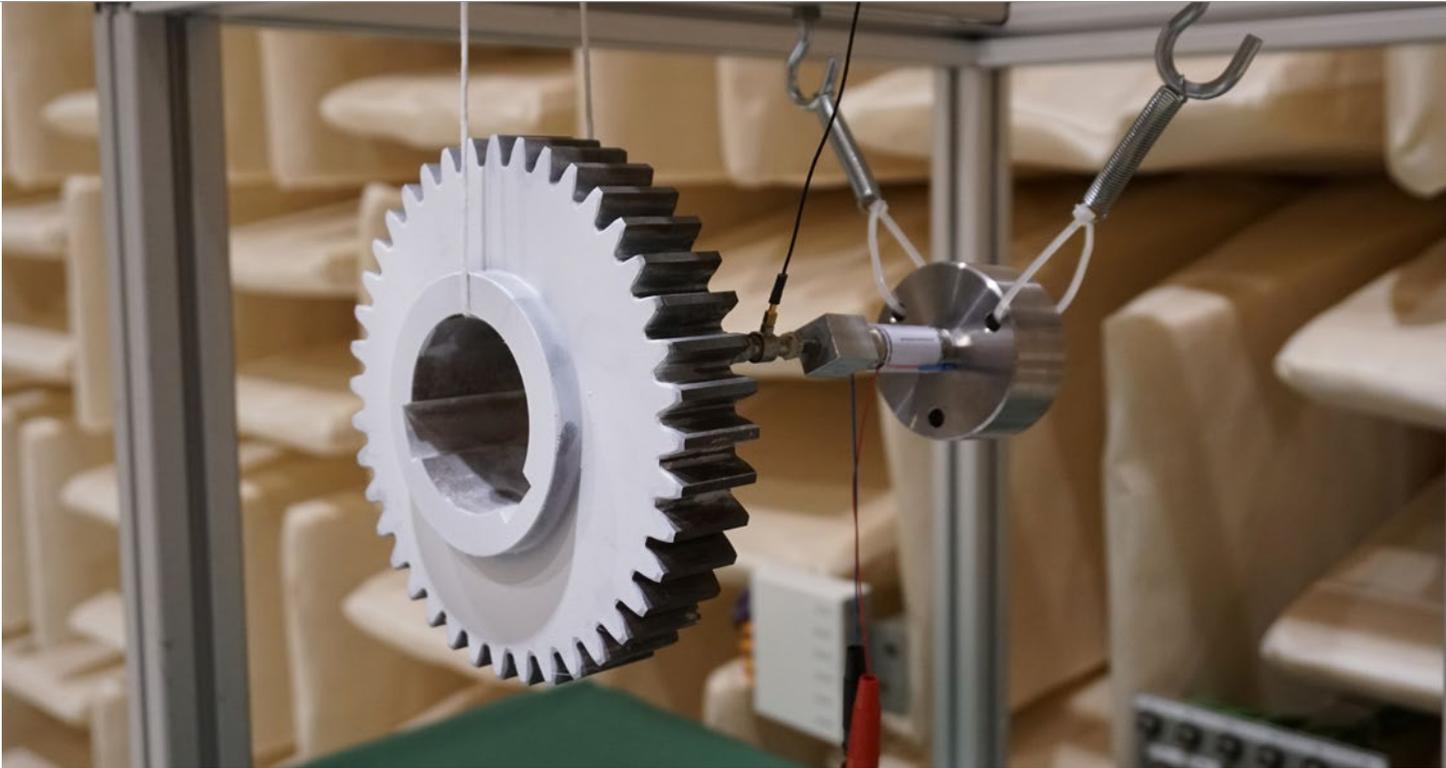


Abbildung 1: Messaufbau.

## MESSAUFBAU

Der Vergleich der beiden Shaker erfolgte unter frei/frei-Randbedingungen, wobei der entsprechende Erreger mittels Federn und das Messobjekt unter Verwendung elastischer Entkoppelelemente in einem Rahmengestell aufgehängt wurden. Die Kopplung zwischen Shaker und Versuchsobjekt wurde starr über eine Kraftmesszelle (Brüel&Kjær, Typ 8203) realisiert. Abbildung 1 zeigt den beschriebenen Versuchsaufbau mit dem Piezoshaker dm2.

Die Erfassung der Systemantwort erfolgte unter Verwendung eines PSV-3D Polytec Scanning Vibrometers. Als Anregungssignal wurde

ein periodic chirp genutzt, wobei der Anregungs- und Auswertfrequenzbereich auf 3,5 bis 16 kHz festgelegt wurde (Bandbreite 20 kHz, 12800 FFT-Linien).

## ERGEBNISSE

Abbildung 2 zeigt den Vergleich der Übertragungsadmittanzen der der Krafteinleitungsstelle (vgl. Abbildung 1) gegenüberliegenden Einzelmesspunkte. Die Eigenfrequenzen (rot markiert) wurden in einer vorangestellten experimentellen Modalanalyse unter Verwendung eines automatisierten Impulshammers ermittelt. Weiterhin sind im unteren Diagramm aus Abbildung 2 die zugehörigen Kohärenzverläufe dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass unter Verwendung des Shakers B&K 4810 oberhalb von ca. 7 kHz nicht genug Energie in das System eingetragen werden kann, um einen ausreichenden Signal-Rausch-Abstand zu erhalten, was die entsprechende Kohärenz sowie die deutlich erkennbaren Rauschteile im Verlauf der Übertragungsadmittanz ab 7 kHz verdeutlichen. Beim Einsatz des dm2 zeigt sich, dass dieser zur Erfassung der Systemantworten im höheren Frequenzbereich geeignet ist. Aufgrund des signifikant höheren Energieeintrages ist eine saubere Erfassung der Übertragungsfunktionen möglich, was zusätzlich der in Abbildung 3 dargestellte Vergleich der Phasenfrequenzgänge verdeutlicht.

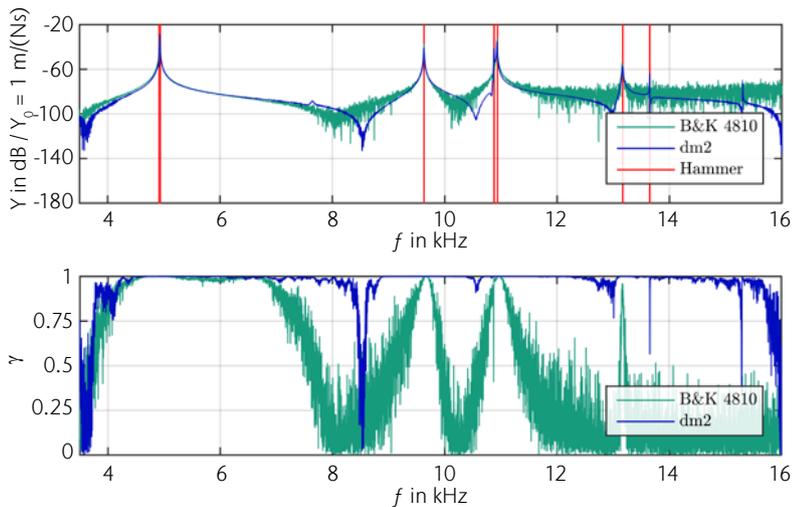


Abbildung 2: Vergleich der Ergebnisse eines ausgewählten Scanpunktes.  
Oben: Übertragungsadmittanz. Unten: zugehöriger Kohärenzverlauf.

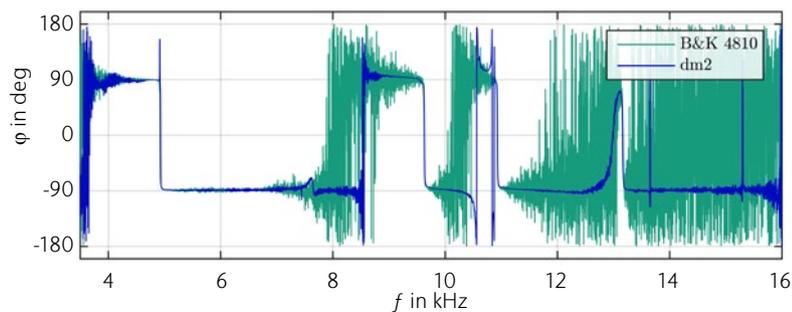


Abbildung 3: Vergleich der Phasenfrequenzgänge der betrachteten Scanpunkte.

## AUSBLICK

Im vorliegenden Beitrag wurden unterschiedliche Krafterreger zur Erfassung von Übertragungsadmittanzen an Zahnrädern verglichen. Zielsetzung war es, eine geeignete Anregungsmethode im höheren Frequenzbereich zu finden, um bspw. die Beschreibung der akustischen Eigenschaften technischer Strukturen auf Basis von messtechnisch erfassten Übertragungsfunktionen zu ermöglichen. Es konnte gezeigt werden, dass

mit breitbandiger piezoelektrischer Krafterregung deutliche konsistentere Messergebnisse insbesondere bei hohen Frequenzen erzielt werden können.

Weiterführende Arbeiten werden Untersuchungen zur Ankopplung des Krafterregers sowie die Erweiterung des Frequenzbereiches hin zu tieferen Frequenzen beinhalten. Weiterhin steht die Erfassung von rotatorischen Freiheitsgraden im höheren Frequenzbereich im Fokus zukünftiger Arbeiten. ■

## Kontakt

Dr. Martin Brucke  
Dynamic Mechanics, Deutschland  
martin.brucke@dynamic-mechanics.com

www.dynamic-mechanics.com

Eric Hensel  
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden

Abteilung Technische Akustik

eric.hensel@iwu.fraunhofer.de

## Referenzen

[1] Bräunig, J. et al.: Options for the vibro-acoustic structure investigation of a wheel body of a tooth system.

In: ant journal,  
Antriebstechnik 53 (2 2014), S. 3-9.