

Experimenteller Aufbau zur akustischen Charakterisierung von Polymerbauteilen

Thomas Busse, Yohko Aoki und Jens Rohlfing

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 70569 Stuttgart, E-Mail: thomas.busse@ibp.fraunhofer.de

Einleitung

Polymerwerkstoffe sind leicht, meist preiswert und komplex in 3D formbar, daher besitzt eine Vielzahl von elektrischen Kleingeräten und Werkzeugen Gehäuse aus Polymeren. Viele der heute verwendeten Polymerwerkstoffe sind auf Grund ihrer geringen Dichte und geringen inneren Dämpfung nicht akustisch optimiert. Auch die Auslegung der Gehäusegeometrie erfolgt meist nicht aus akustischer Sicht, sondern überwiegend auf Basis von Design-, Funktionalitäts-, Fertigungs- und Kostengesichtspunkten. Maßgeschneiderte vibroakustisch optimierte Polymerwerkstoffe und optimierte Konstruktionsdetails bieten ein großes Potential zur Reduzierung und gezielten Beeinflussung der Geräuschemissionen von elektrischen Geräten. Im Rahmen des Fraunhofer-Forschungsprojektes »PolymerAkustik«, unter Beteiligung der Fraunhofer-Institute IBP, ICT, IWM und IWU, wird hierzu ein umfassendes Technologieangebot erarbeitet.

Eine Herausforderung besteht in der vibroakustischen Charakterisierung kleiner Probenkörper bei hohen Frequenzen. Für diesen Zweck wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der es erlaubt mit geringem Aufwand A-B-Vergleiche durchzuführen, um qualitative Aussagen zu akustischen Eigenschaften von Polymerkomponenten abzuleiten. Mit diesem Versuchsaufbau können sowohl einfache plattenförmige Proben als auch Gehäuseschalen mit komplexeren Geometrien untersucht werden. Mittels eines Mikrofon-Arrays werden Nahfeld-Holographien der Proben durchgeführt. Hiermit können zum einen die schalldämmenden Eigenschaften geschlossener Proben qualitativ bewertet und zum andern die Schalltransmission durch Gehäuseöffnungen gezielt untersucht werden. Die Entwicklung des Versuchsaufbaus und experimentelle Untersuchungen wurden von FEM-BEM Simulationen begleitet. In diesem Beitrag wird der Versuchsaufbau vorgestellt sowie erste experimentelle und numerische Ergebnisse präsentiert.

Beschreibung des experimentellen Aufbaus

Der in Abbildung 1 dargestellte experimentelle Aufbau besteht aus einem Demonstrator-Gehäuse aus Acrylglas, auf welchem die zu untersuchenden Polymerbauteile montiert werden, einem Miniatur-Hexaeder-Lautsprecher als Schallquelle und einem Mikrofon-Array zur Bestimmung der nach außen transmittierten Schallpegel. Das Gehäuse hat Außenabmessungen von 357 mm x 270 mm x 282 mm (L x B x H) und Innenabmessungen von 297 mm x 210 mm x 252 mm (L x B x H), und somit ein Innenvolumen von ca. 0,016 m³. Die lichte innere Grundfläche und somit maximale Probenfläche entspricht dem Format A4. Die Wände und der Boden des Demonstrators sind aus 30 mm dickem Acrylglas gefertigt. Am offenen Rand des Gehäuses ist auf dem Acrylglas ein 20 mm dicker Aluminiumrahmen angebracht,

auf dem mittels Schraubverbindungen verschiedene Proben und Deckplatten als Probenhalter befestigt werden können, um unterschiedliche Formen von Proben, Bauteilen und Komponenten zu untersuchen. Mit einer 15 mm dicken Deckelplatte aus Aluminium, mit einer quadratischen Probenöffnung von 170 mm x 170 mm können kleinformatige Probenplatten akustisch charakterisiert werden. Die Proben werden dazu mit einem 10 mm dicken Aluminiumrahmen mit einer reproduzierbar einstellbaren Einspannkraft auf der Deckplatte fixiert. So soll sichergestellt werden, dass alle Probenplatten unter möglichst vergleichbaren Randbedingungen untersucht werden. Für Untersuchungen an komplexen 3D-Formen, wie Gehäuseschalen, werden Deckelplatten mit entsprechend angepassten Probenöffnungen verwendet.

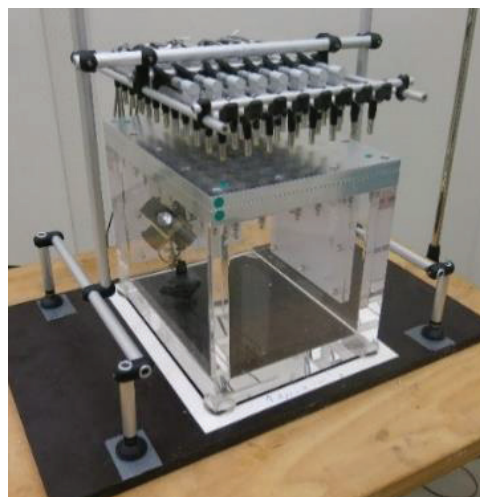


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau zur akustischen Charakterisierung von kleinformatigen Polymerbauteilen.

Als Schallquelle im Innern des Demonstrators wird ein Miniatur-Hexaeder-Lautsprecher verwendet, über den ein weißes Rauschen abspielt wird. Die Abstrahlcharakteristik des Lautsprechers wurde vorab im Freifeldraum des Fraunhofer IBP bestimmt. Diese Untersuchungen ergaben, dass der Hexaeder-Lautsprecher im adressierten Frequenzbereich bis 10 kHz als Kugelschallquelle wirkt. Mit einem Mikrofon-Array mit 88 ¼-Zoll-Mikrofonen und einem Datenerfassungssystem der Firma Brüel & Kjær® wird der durch die Proben nach außen transmittierte Schalldruck ermittelt, welcher zur akustischen Charakterisierung der Eigenschaften der Proben herangezogen werden kann. Die Mikrofone sind in acht Reihen mit jeweils elf Mikrofonen periodisch angeordnet, wobei der Abstand der Mikrofone zueinander sowohl in x- als auch y-Richtung 30 mm beträgt. Dadurch ergibt sich eine Mikrofon-Array-Abmessung von 210 mm x 300 mm. Mithilfe dieses Mikrofon-Array-Aufbaus können auch Nahfeld-Holographien durchgeführt werden. Dies ist besonders dann hilfreich, wenn Proben mit inhomogenen Flächen oder Öffnungen untersucht werden sollen.

Die Nahfeld-Holographie ist eine Methode, um Schallquellen zu lokalisieren und wird z.B. für die präzise akustische Analyse von Maschinenverkleidungen verwendet, um die frequenzabhängig dominierenden Schallemissionsorte zu lokalisieren. Dabei wird eine zweidimensionale Matrix aus Mikrofonen verwendet, die parallel zur Prüffläche aufgebaut ist. Grundlage dieses Verfahrens ist die Fourier-Akustik [1, 2]. Für eine präzise Nahfeld-Holographie ist es nötig, an jeder Mikrofonposition räumlich von anderen Mikrofonen unabhängige Schallpegel zu ermitteln. Dazu darf der Abstand der Mikrofone zur relevanten Probenfläche maximal dem Abstand der Mikrofone zueinander entsprechen. Deshalb beträgt der Abstand der Mikrofone zur untersuchten Probenoberfläche möglichst genau 30 mm. Der messbare Frequenzbereich der Nahfeld-Holographie wird durch die Wellenlänge und die Array-Geometrie bestimmt. Die kleinste messbare Wellenlänge muss mindestens die Hälfte der Mikrofonabstände zueinander betragen. Die maximale Wellenlänge darf das Doppelte der kürzesten äußeren Array-Abmessung nicht überschreiten. Somit können an dem hier vorgestellten Versuchsaufbau Nahfeld-Holographien im Frequenzbereich von 800 Hz bis 5 kHz durchgeführt werden.

Entwicklung des Demonstrators

Das Design des Demonstrators erfolgte auf der Grundlage eines kombinierten FEM-BEM-Modells in COMSOL®. Dabei wurde die Struktur des Demonstrators mit FEM, das äußere Schallfeld mit BEM simuliert. Abbildung 2 zeigt das FEM-Modell des Demonstrators, welches sich auf einem unendlich ausgedehnten, schallharten Untergrund befindet. Simuliert wird in einem Frequenzbereich von 125 Hz bis 5 kHz. Die obere Simulationsfrequenz ist durch die notwendige Anzahl an Elementen und den damit verbundenen Rechenaufwand eingeschränkt. Die Wände des Demonstrators sind mit Volumen-Elemente modelliert, da die Schalltransmission durch die Demonstrator-Wände vor allem in Frequenzbereichen um Biegemoden-Resonanzen auftritt. Die Probenplatten werden mithilfe von Schalen-Elementen modelliert. Sowohl für die Volumen-Elemente als auch für die Schalen-Elemente werden mindestens sechs Elemente pro kleinster betrachteter Wellenlänge verwendet. Der Hexaeder-Lautsprecher wird durch eine Monopolschallquelle mit einem an die akustischen Charakteristiken des Lautsprechers angepassten Schalleistungsspektrum modelliert. Die für die Simulation verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 1 angegeben.

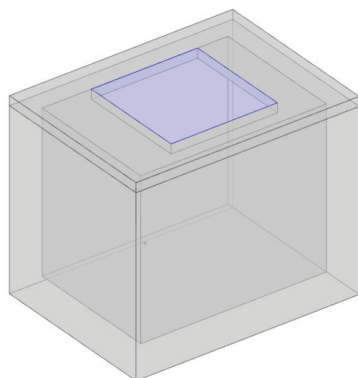


Abbildung 2: FEM-BEM-Modell des Demonstrators. Die blau schraffierte Fläche markiert die Probenplatte, die grau schraffierten Flächen die Demonstrator-Wandungen.

Tabelle 1: Parameter der verschiedenen im FEM-BEM-Modell verwendeten Materialien. Die Parameter der Polymerprobe sind exemplarisch für ein Material angegeben.

Material	Parameter	Wert	Einheit
Luft	Schallgeschwindigkeit	343	[m/s]
	Dichte	1.21	[kg/m ³]
Acrylglas	Dichte	1190	[kg/m ³]
	E-Modul	3.2	[GPa]
	Poissonzahl	0.35	[--]
	Verlustfaktor	0.01	[--]
Aluminium	Dichte	2700	[kg/m ³]
	E-Modul	70	[GPa]
	Poissonzahl	0.33	[--]
	Verlustfaktor	0.001	[--]
Polymerprobe	Dichte	1281	[kg/m ³]
	E-Modul	5.86	[GPa]
	Poissonzahl	0.35	[--]
	Verlustfaktor	0.0082	[--]
	Dicke	4	[mm]

In der Designphase des Demonstrators musste ein Kompromiss aus Handhabbarkeit und minimaler Schalltransmission durch die Nicht-Probenflächen getroffen werden. Außerdem sollte untersucht werden, ob die am Mikrofon-Array ermittelten Schalldruckspektren mit dem in das Fernfeld abgestrahlten Schall vergleichbar sind. Hierzu wurden Simulationen für eine 4 mm dicke Polymer-Probeplatte auf einem Demonstrator mit 30 mm dicken Acryl-Wänden durchgeführt. Abbildung 3 zeigt die Spektren der Schalldruckpegel gemittelt über einer halbkugelförmigen Hüllfläche im Fernfeld (grüne Linie) und über die Positionen der Array-Mikrophone im Nahfeld (rot-gestrichelt Linie). Die Ergebnisse für Nah- und Fernfeld zeigen eine relativ gute Übereinstimmung, außer im Terzband um 1250 Hz, in dem eine Abweichung von ca. 4 dB auftritt. In diesem Terzband tritt sowohl die (2,0,0) Hohlraumresonanz des Demonstrators als auch die erste Biegeeigenmode der kleineren Acryl-Wandflächen auf. Die Pegelspitze im Terzband um 800 Hz ist auf die (0,1,0) Hohlraumresonanz des Demonstrators zurückzuführen. In diesem Frequenzbereich liegt auch die erste Biegeeigenmode der größeren Acryl-Wandflächen.

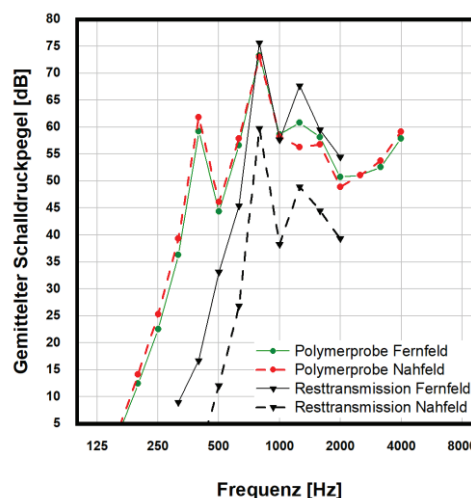


Abbildung 3: Simulierte gemittelte Schalldruckpegel im Fernfeld (dünne Linien) und im Nahfeld (gestrichelte Linien) des Demonstrators; mit einer 4 mm dicken Polymer-Probenplatte (farbig) und mit blockierter Probenöffnung (schwarz).

Die deutliche Pegelspitze um 400 Hz in den Ergebnissen mit Polymerprobe resultiert aus der ersten Biegeeigenmode der Probeplatte, die in diesem Frequenzbereich sehr effizient Schall abstrahlt. Die simulierten Schalldrücke im Nahfeld, bei blockierter Probenöffnung (schwarz-gestrichelte Linie), weist fast im gesamten betrachteten Frequenzbereich einen ausreichend großen Abstand von über 10 dB zu den simulierten Schalldruckpegeln mit Probenplatte auf. Kritische Frequenzbereiche liegen in den Terzbändern um 800 Hz und 1250 Hz, also den Frequenzbereichen, in denen sowohl Hohlraumresonanzen als auch Eigenmoden der Acryl-Wandflächen des Demonstrators auftreten. Für die Simulation der Schalldrücke bei Resttransmission im Fernfeld (schwarze Linie) dominiert in den Terzbändern um 800 Hz und 1250 Hz die Schalltransmission durch Nicht-Probenflächen. Aus den Ergebnissen der Simulationen wird geschlossen, dass für A-B-Vergleiche von Polymerproben die Auswertung der Schalldrücke am Mikrofon-Array herangezogen werden kann, dass die Auswertung im Nahfeld weniger sensibel gegenüber Schalltransmissionen durch Nicht-Probenflächen ist, als die Auswertung des ins Fernfeld abgestrahlten Schalls, und dass mit der 30 mm dicken Acryl-Wandung des Demonstrators die Resttransmission ausreichend unterdrückt wird, um typische Polymerproben zu untersuchen.

Untersuchungen an Proben

In ersten experimentellen Studien an dem oben beschriebenen Versuchsaufbau wurden 180 mm x 180 mm große Probenplatten aus verschiedenen Polymeren und mit unterschiedlichen Dicken untersucht [3]. Zur Bestimmung der Messwiederholbarkeit wurden die einzelnen Platten wiederholt ein- und ausgebaut und dabei jeweils um 90° gedreht. Bei jeder Messung wurden die Schalldruckpegel am Mikrofon-Array gemessen und über alle 88 Mikrofonpositionen gemittelt. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die ermittelten Schalldruckpegel für eine 4 mm dicke Polymer-Probeplatte. Die blaue Linie zeigt den Mittelwert aller Messungen, die Streubreite der minimalen und maximalen Messwerte ist blau schraffiert dargestellt. Abbildung 4 zeigt ebenfalls die Ergebnisse der Simulation für die entsprechende Probenplatte (rot-gestrichelte Linie). Im Frequenzbereich bis 1000 Hz zeigen die Ergebnisse aus Simulation und Messung eine gute Übereinstimmung. Im Frequenzbereich oberhalb von 1000 Hz beträgt die Abweichung 2 dB bis 7 dB. Diese Abweichungen werden auf die schwer zu simulierenden Einbaubedingungen der Probenplatten zurückgeführt. Die schwarze Linie in Abbildung 4 zeigt den gemittelten Schalldruckpegel für den Fall, dass die Probenöffnung durch mehrere Lagen Aluminium- und MDF-Platten so blockiert ist, dass die Schalltransmission durch die Probeplatte minimiert wird und die Schalltransmission durch die Nicht-Probenflächen dominiert. Im Frequenzbereich zwischen 800 Hz und 10 kHz liegen die gemessenen Schalldruckpegel für Resttransmission durch Nicht-Probenflächen mindestens 8 dB unter den gemessenen Schalldruckpegeln für die 4 mm dicke Polymer-Probeplatte. Für Proben mit entsprechend geringerer Schalldämmung hat die Schalltransmission durch die Nicht-Probenfläche daher einen vernachlässigbar geringen bzw. korrigierbaren Einfluss auf die Messergebnisse.

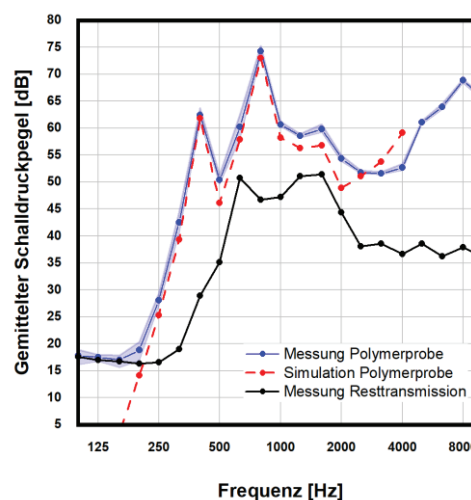


Abbildung 4: Gemessene mittlere Schalldruckpegel am Mikrofon-Array für eine 4 mm dicke Polymer-Probeplatte (blaue Linie) und Resttransmission durch die Nicht-Probenflächen (schwarze Linie). Zum Vergleich Simulationsergebnisse (Nahfeld) für die 4 mm dicke Polymer-Probeplatte (rot-gestrichelte Linie).

Die Abweichungen der einzelnen Messungen vom Mittelwert aller Messungen an einer Probenplatte sind in Abbildung 5 dargestellt. Anhand der Ergebnisse können Rückschlüsse auf die Reproduzierbarkeit der Messungen gezogen werden. Im Frequenzbereich oberhalb von 800 Hz betragen die Abweichungen weniger als 1 dB. Unterhalb von 800 Hz (rot hinterlegt) sind die Abweichungen mit teilweise über 2 dB deutlich größer. Diese Abweichungen werden durch die nach jedem Einbau leicht unterschiedlichen Einspannbedingungen der Probenplatte verursacht. Durch die Randeinspannung der Proben wird zum einen die Resonanzfrequenz der Proben beeinflusst, zum anderen hat die Einspannung Einfluss auf die Randdämpfung. Zwar werden durch die festgelegte Einbauposition und Einspannkraft die Randbedingungen von Einbau zu Einbau möglichst konstant gehalten; komplett lässt sich der negative Effekt auf die Reproduzierbarkeit der Messungen aber nicht vermeiden. Die Wiederholbarkeit einzelner Messungen an einer Probe ohne Aus- und Einbau liegt im Bereich von wenigen Zehntel dB.

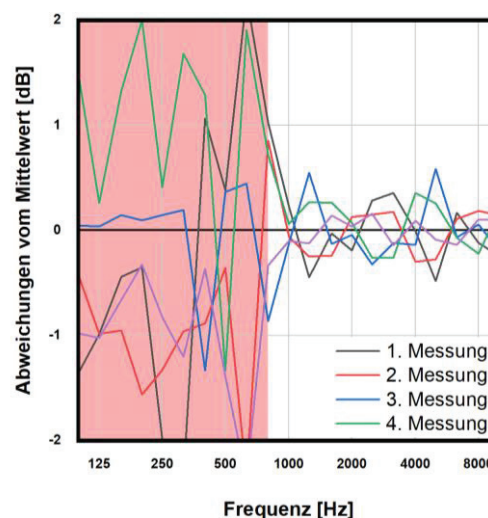


Abbildung 5: Abweichungen der gemessenen Schalldruckpegel vom Mittelwert aller Messungen nach wiederholtem Ein- und Ausbau einer Probenplatte.

Ergebnisse für eine Gehäusehalbschale

Um die Funktion des experimentellen Aufbaus in Bezug auf die Charakterisierung der Schalltransmission und der Nahfeld-Holographie zu demonstrieren, wurden Versuche an einer Gehäusehalbschale eines Exzenterschleifers durchgeführt. Für den Einbau am Demonstrator wurde eine Deckelplatte aus einer 20 mm dicken MDF-Holzplatte mit einer an die Gehäusehalbschale angepassten Prüföffnung, angefertigt. Alle Stoßstellen zwischen der Gehäusehalbschale und der Probenplatte sowie alle im Normalfall geschlossenen Gehäuseöffnungen wurden mit Terostat abgedichtet. In einer ersten indikativen Messreihe wurden die durch die Halbschale transmittierten Schalldruckpegel am Mikrofon-Array erfasst und eine Nahfeld-Holographie durchgeführt. Anschließend wurden die Lüftungsschlitze der Gehäusehalbschale nach und nach mit Textilklebeband verschlossen und die Messungen wiederholt. So wurde untersucht, welchen Einfluss die Lüftungsschlitze auf die Luftschalldämmung der Halbschale haben.

Die Ergebnisse der ermittelten Schalldruckpegel sind in Abbildung 6 dargestellt. Im Frequenzbereich von 800 Hz bis 10 kHz beträgt die Differenz der transmittierten Schalldruckpegel zwischen dem Zustand mit allen Lüftungsschlitzen offen und allen Lüftungsschlitzen verschlossen im Mittelwert 15 dB, mit einer maximalen Differenz von 18 dB im Terzband um 2500 Hz. Die Differenz zwischen teilweise abgeklebten Lüftungsschlitzen und komplett offenen Lüftungsschlitzen beträgt im Mittel ca. 5 dB. Abbildung 7 zeigt mithilfe der Nahfeld-Holographie, dass die Lüftungsschlitze die dominierenden Schallquellen bzw. Schwachstellen in der Luftschalldämmung der Gehäusehalbschale sind. Bei teilweise abgeklebten Schlitzen können durch die Nahfeld-Holographie die Schwachstellen in der Schalldämmung lokalisiert werden.

In der Praxis beinhalten die Geräte unterschiedliche Geräusch- und Körperschallquellen, wie zum Beispiel Motoren, Getriebe, Gebläse und Ähnliches. Dadurch kann der Einfluss der reinen Luftschalldämmung des Gehäuses und der einzelnen Lüftungsschlitze auf die Gesamtschallemission eines Gerätes deutlich unterschiedlich ins Gewicht fallen.

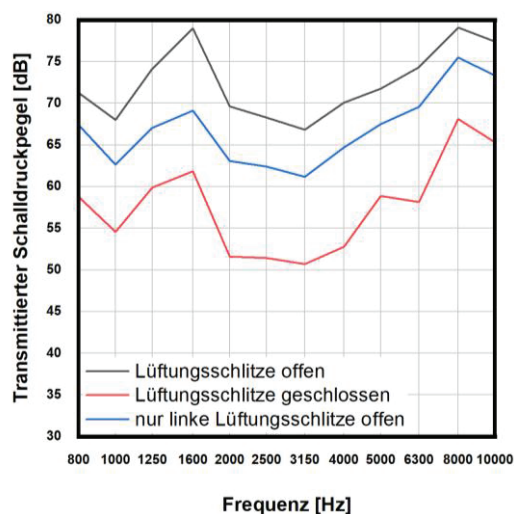


Abbildung 6: Transmittierte Schalldruckpegel durch die Halbschale eines Exzenterschleifers mit unterschiedlich abgeklebten Lüftungsschlitzen.

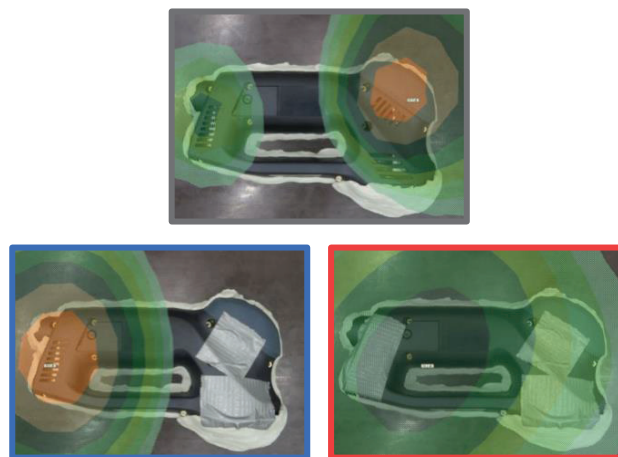


Abbildung 7: Ergebnisse der Nahfeld-Holographie für die Gehäusehalbschale eines Exzenterschleifers mit unterschiedlich abgeklebten Lüftungsschlitzen.

Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wird ein experimenteller Aufbau zur akustischen Charakterisierung von Polymerbauteilen vorgestellt. Dieser wurde im Rahmen des Fraunhofer-Forschungsprojekts »PolymerAkustik« entworfen. Die Entwicklung des Aufbaus wurde mit numerischen Simulationen begleitet. Mithilfe des experimentellen Aufbaus können akustische Untersuchungen an kleinformatigen Proben im Frequenzbereich von 800 Hz bis 10 kHz durchgeführt werden. In diesem Frequenzbereich liegt die Reproduzierbarkeit der Messungen bei Ein- und Ausbau der gleichen Probenplatte im Bereich von ± 1 dB. Zur erweiterten Analyse der Schalltransmission durch komplexere Proben mit inhomogenen Flächen oder Öffnungen, können Nahfeld-Holographien im Frequenzbereich von 800 Hz bis 5 kHz durchgeführt werden. Zum Abgleich der Messergebnisse mit Simulationen werden gekoppelte FEM-BEM-Modelle verwendet. Zurzeit liefern die Simulationen Ergebnisse für Frequenzen bis 5 kHz. Aktuelle Arbeiten fokussieren sich auf eine Verbesserung der Vergleichbarkeit zwischen Messungen und Simulationen sowie auf die Erweiterung des simulierten Frequenzbereiches zu höheren Frequenzen und die Analyse der Schalltransmission durch Probenöffnungen mit unterschiedlichen Geometrien. Zukünftig sollen kombinierte experimentelle und numerische Methoden dazu genutzt werden, die akustischen Eigenschaften von Polymerbauteilen systematisch zu charakterisieren und zu optimieren.

Literatur

- [1] Williams, E. G., Mann, J. A.: Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography. The Journal of the Acoustical Society of America 108 (2000), 4, S. 1373.
- [2] Bies, D. A., Hansen, C. H.: Engineering noise control; Theory and practice. 4th ed. Taylor & Francis, New York (2009).
- [3] Busse, T.: Evaluierung von Prüfeinrichtungen im Modellmaßstab zur akustischen Charakterisierung kleiner Materialproben bei hohen Frequenzen. Institut für Akustik und Bauphysik, Universität Stuttgart (2019).