Bestimmung frequenzabhängiger Materialparameter von akustischen Dämmmaterialien

Fabian Duvigneau[1], Lars Spannan[1], Elmar Woschke[1], Daniel Juhre[1]
[1] *Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 39106 Magdeburg, Deutschland*
Email: fabian.duvigneau@ovgu.de

Einleitung

Die zuverlässige Voraussage des akustischen Verhaltens komplexer Systeme ist für die moderne Industrie von sehr großem Interesse, stellt jedoch eine ebenso große Herausforderung dar. Ziel ist eine belastbare Prognose, die bereits früh im Entwicklungsprozess zur Verfügung steht (ohne die Notwendigkeit von Prototypen). Dazu können diverse Simulationsmethoden zum Einsatz kommen. Ein zentraler Punkt aller Modellierungsvarianten ist die Beschreibung der mannigfaltig eingesetzten akustischen Dämmmaterialien, die sich teilweise sehr stark in ihren Eigenschaften unterscheiden und oft starke Frequenzabhängigkeiten aufweisen. In diesem Beitrag steht die Bestimmung der frequenzabhängigen Steifigkeiten und Dämpfungen verschiedener Dämmwerkstoffe im Fokus, die anschließend beispielsweise für die numerische Modellierung von vibroakustischen Systemen auf Basis der Finite-Elemente-Methode genutzt werden können. Im Rahmen dieses Beitrags werden verschiedene Möglichkeiten für die experimentelle Materialcharakterisierung diskutiert und hinsichtlich der Ergebnisse verglichen. Die abschließende Bewertung der aus den unterschiedlichen Methoden resultierenden Materialparameter hinsichtlich ihrer Eignung als Eingangsparameter für numerische Simulationen erfolgt durch den Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Messdaten für ein einfaches vibroakustisches Testproblem, bestehend aus einer metallischen Rechteckplatte mit appliziertem Dämmmaterial.

Komplexer E-Modul

In diesem Beitrag wird das viskoelastische Materialverhalten mit Hilfe des frequenzabhängigen komplexen Elastizitätsmoduls $E(f)$ modelliert (siehe Gl. (1)). Der Realteil $E'(f)$ ist dabei an einen frequenzabhängigen Steifigkeitsparameter $c(f)$ und der Imäginärteil $\bar{E}(f)$ an einen frequenzabhängigen Dämpfungsparameter $d(f)$ geknüpft. Beide Parameter werden im Rahmen dieser Untersuchungen entweder über die klassische Resonanzmethode oder die in diesem Beitrag vorgeschlagene Methodik ermittelt, die eine monofrequente harmonische Anregung nutzt und sequentiell die Parameter $c(f)$ und $d(f)$ für beliebige (diskrete) Frequenzen bestimmt.

$$E(f) = E'(f) + i\,\bar{E}(f) = c(f)\frac{h}{A} + i\,2\pi f d(f)\frac{h}{A} \qquad (1)$$

Außerdem hängt der komplexe E-Modul $E(f)$ von der Geometrie der jeweiligen Materialprobe ab. In Gl. (1) ist f die Frequenz, h ist die Höhe der Materialprobe und A ist die Querschnittsfläche der Probe.

Resonanzmethode

Die Resonanzmethode basiert auf einer Fußpunktanregung des Untergrundes der Materialprobe, auf der eine seismische Masse positioniert ist (siehe Abbildung 1, rechts). Die Bewegung der beiden als starr angenommenen Metallplatten wird üblicherweise mit Hilfe von zwei Beschleunigungssensoren aufgezeichnet. Die Materialprobe wird als einzige Komponente des gesamten Versuchaufbaus als elastische Komponente angenommen und der Gesamtaufbau als lineares Feder-Masse-Dämpfer-System betrachtet (siehe Abbildung 1, links). Die Probe wird breitbandig mit

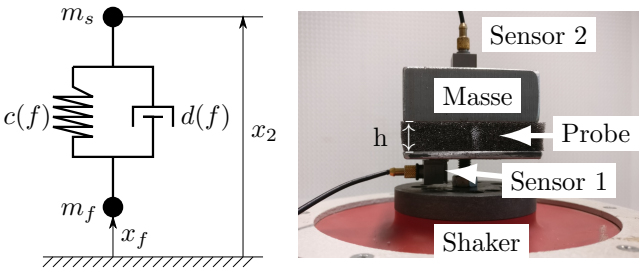

Abbildung 1: Versuchsaufbau für die Resonanzmethode: Schematischer Aufbau links und realer Aufbau rechts.

weißem Rauschen angeregt, wobei der resonante Frequenzanteil der Schwingungsantwort die größte Amplitude aufweist. Mit Hilfe der gemessenen Beschleunigungen der beiden Starrkörperplatten wird die quadratische Übertragungsfunktion V^2 bestimmt. Für diese existiert die allgemein bekannte analytische Lösung:

$$V^2(\eta, D) = \frac{1 + 4D^2\eta^2}{(1-\eta^2)^2 + 4D^2\eta^2}\,, \qquad (2)$$

$$\text{mit } D = \pi f_0 \frac{d(f_0)}{c(f_0)}\,. \qquad (3)$$

Gl. (2) ist durch die Definition des Abstimmungsverhältnisses $\eta = f/f_0$ dimensionlos (D ist die dimensionslose Dämpfung), wobei f_0 die Resonanzfrequenz des Systems repräsentiert. Diese ist abhängig von der seismischen Masse, d. h. die höchste erreichbare Frequenz ergibt sich bei einer seismischen Masse, die gegen Null strebt, welche allerdings der Annahme einer starren Platte widerspricht und außerdem zum Abheben neigen

kann. Dies erklärt die Beschränkung dieser Charakterisierungsmehtode auf den sehr tiefen Frequenzbereich, wodurch sie für akustische Fragestellungen weniger interessant ist. Der Real- und Imaginärteil des E-Moduls ergeben sich nach Gl. (4) und Gl. (5).

$$E'(f_0) = 4\pi^2 f_0^2 m_s \frac{H}{A} \tag{4}$$

$$\bar{E}(f_0, D) = 2\,D\,E' \tag{5}$$

Die benötigten Werte f_0 und D werden durch Parameteranpassung der analytischen Lösung aus Gl. (2) ermittelt (siehe Abbildung 2).

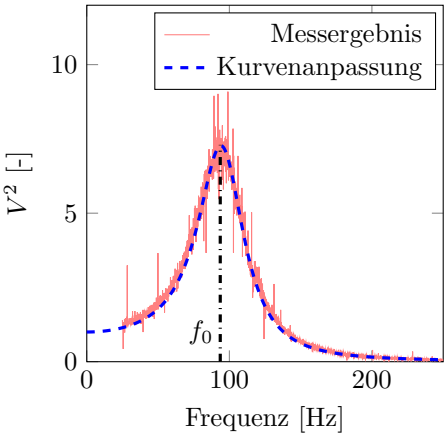

Abbildung 2: Exemplarisches Messergebnis mit angepasster analytischer Übertragungsfunktion zur Bestimmung der Steifigkeit und Dämpfung bei einer diskreten Resonanzfrequenz.

Sequentielle monofrequente harmonische Anregung

In diesem Abschnitt wird eine experimentelle Charakterisierungsmethode vorgestellt, die eine Bestimmung frequenzabhängiger Steifigkeits- und Dämpfungswerte in wesentlich höheren Frequenzen als die Resonanzmethode ermöglicht. Dazu wird anstelle der Resonanzfrequenz des zugrundeliegenden linearen Feder-Masse-Dämpfer-Systems jeweils eine beliebig gewählte Frequenz ausgewertet. Zu diesem Zweck wird eine monofrequente harmonische Anregung verwendet und die Systemantwort der erzwungenen Schwingung ausgewertet. Abbildung 3 zeigt den zugehörigen Versuchsaufbau und Abbildung 4 das viskoelastische Modell, mit dem die Materialprobe unter der Annahme eines ansonsten ideal starren Versuchsaufbaus approximiert wird. Wie in Abbildung 3 zu erkennen, wird die zur aktuellen Auslenkungsamplitude zugehörigen Kraft mit Hilfe eines unbewegten Kraftsensors gemessen. Der Prozess erfolgt weggesteuert. Die Wegamplitude wird mittels Laservibrometer erfasst. Bei typischen Dämmmaterialien weist das resultierende Weg-Kraft-Diagramm üblicherweise eine ausgeprägte Hysterese auf, wie sie ebenfalls für ein lineares Feder-Masse-Dämpfer-System erwartet wird (siehe Abbildung 5). Zur Berechnung des Steifigkeitsparameters $c(f)$ der aktuellen Anregungsfrequenz werden ausschließlich die maximale Kraft- $\breve{\breve{F}}$ und die maximale Wegamplitude $\breve{x}_f$ verwendet (siehe Gl. (6) und Abbildung 5). Für den Dämpfungsparameter $d(f)$ wird zusätzlich der Flächeninhalt der Hysterse W_D berechnet (siehe Gl. (7) und Abbildung 5).

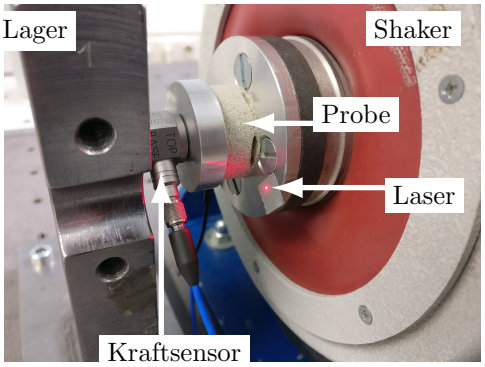

Abbildung 3: Versuchsaufbau der Messmethode, die sequentielle monofrequente harmonische Anregungen nutzt.

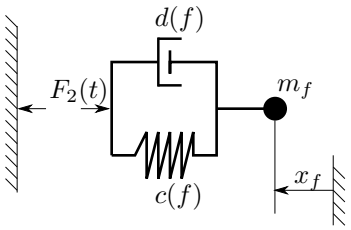

Abbildung 4: Ersatzschaltbild des Versuchsaufbaus in Abbildung 3.

$$c(f) = \frac{\breve{\breve{F}}}{\breve{x}_f} \tag{6}$$

$$d(f) = \frac{W_D}{\breve{x}_f^2 2\pi^2 f} \tag{7}$$

Schließlich ergeben sich der resultierende Real- und Imaginärteil des E-Moduls nach Gl. (8) und Gl. (9).

$$E'(f) = c(f)\,\frac{h}{A} \tag{8}$$

$$\bar{E}(f) = \frac{W_D(f)}{\breve{x}_f^2 \pi}\,\frac{h}{A} \tag{9}$$

Die maximale auswertbare Frequenz ist abhängig vom Signal-Rausch-Abstand des Wegsensors. Eine ausreichend große Wegamplitude zu gewährleisten, erfordert in höheren Frequenzen immer mehr Anregungsleistung, da die Trägheitskräfte dominieren und quadratisch mit der Frequenz anwachsen. Demzufolge ist die erreichbare Wegamplitude von der Steifigkeit des untersuchten Materials und maßgeblich von der Leistung des elektrodynamischen Schwingungserregers abhängig. Werden die Auslenkungsamplituden zu klein und der Signal-Rausch-Abstand zu schlecht, sind die Ergebnisse nicht mehr belastbar (siehe Fehlerbalken in Abbildung 7).

Charakterisierungsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der beiden Charakterisierungverfahren exemplarisch für zwei ver-

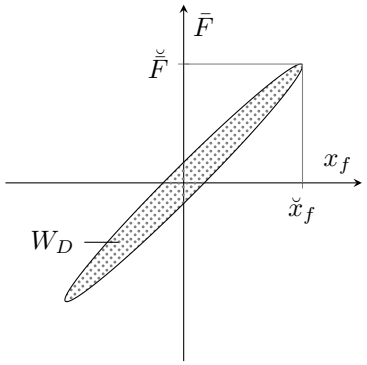

Abbildung 5: Hysterese eines idealen Feder-Masse-Dämpfer-Systems.

schiedene Dämmmaterialien (siehe Abbildung 6) verglichen. In Abbildung 7 ist der aus den Messergebnissen

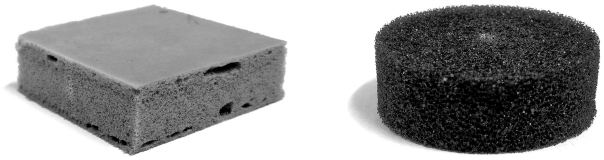

Abbildung 6: Probekörper der untersuchten Schaummaterialien: heller Schaum H links (viereckige Probe für Resonanzmethode, siehe Abbildung 1) und dunkler Schaum D rechts (runde Probe für Versuchsaufbau in Abbildung 3).

berechnete Realteil des komplexen E-Moduls dargestellt. Die Limitierung der Resonanzmethode auf den sehr tiefen Frequenzbereich ist deutlich zu erkennen. Zusätzlich zeigt sich die teilweise gravierende Diskrepanz um mehr als Faktor zwei zwischen den Ergebnissen der beiden vorgestellten Methoden, wie beispielsweise beim hellen Schaum H in Abbildung 7 (Diskussion in Abschnitt „Anwendung der identifizierten frequenzabhängigen Materialparameter“). Darüber hinaus wird die Frequenzabhängigkeit der Materialien ersichtlich, die im betrachteten Frequenzbereich bis zu Faktor drei im Vergleich zum Anfangswert bei etwa 100 Hz betragen kann. Außerdem wird klar, dass die Stärke der Frequenzabhängigkeit bei den beiden exemplarischen Materialien sehr unterschiedlich ist. Die gleichen Feststellungen lassen sich auch aus den ermittelten Kurven der Imaginärteile in Abbildung 8 ziehen. Die Begrenzung der hier vorgestellten Methodik hinsichtlich des erreichbaren Frequenzbereiches wird aus den Fehlerbalken ersichtlich. Beispielsweise ist das Erreichen einer Art Sättigungsbereiches des Realteils des hellen Schaumes H in Abbildung 7 zu hinterfragen. Die Materialdaten erscheinen nur bis 1,2 oder maximal 1,5 kHz vertrauenswürdig. Die Fehlerbalken ergeben sich aus den Abweichungen, die während der wiederholten Messung verschiedener Probekörper auftraten. In dieser Studie wurden drei Probekörper des gleichen Materials jeweils acht Mal (in acht verschiedenen Orientierungen) vermessen und anschließend Mittelwert sowie Standardabweichung bestimmt. Im Verlauf der Imaginärteile in Abbildung 8 sind zusätzlich diverse Diskontinuitäten zu erkennen, die z. B. ein Indiz für lokale Resonanzeffekte im Versuchsaufbau sein können, die im hinterlegten linearen Feder-Masse-Dämpfer Modell natürlich nicht berücksichtigt werden. Insgesamt stellen die Nachgiebigkeiten aller beteiligten Komponenten, die als starr angenommen werden, sowie die erreichbaren Maximalamplituden der aufgeprägten Verschiebung in Kombination mit der Sensorauflösung die maßgeblichen Probleme dar, die ein Erzielen von belastbaren Ergebnissen in höheren Frequenzbereichen verhindern.

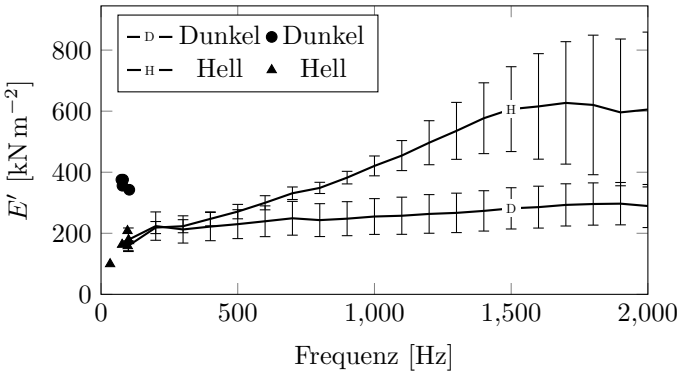

Abbildung 7: Aus den Messergebnissen des Versuchsaufbaus in Abbildung 3 bestimmter Realteil des Elastizitätsmoduls E' des hellen Schaumes H und des dunklen Schaumes D. Die Markierungen ● und ▲ repräsentieren die Ergebnisse der Resonanzmethode.

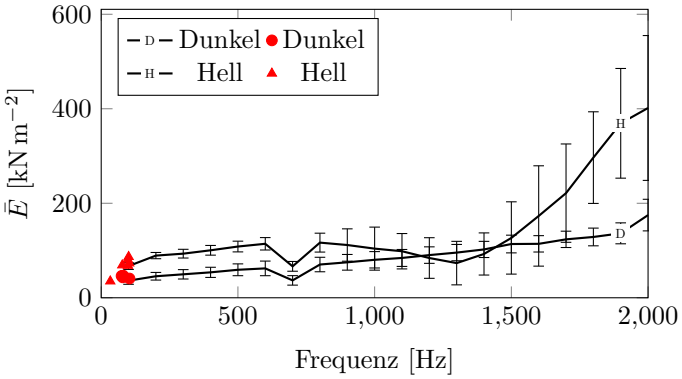

Abbildung 8: Aus den Messergebnissen des Versuchsaufbaus in Abbildung 3 bestimmter Imaginärteil des Elastizitätsmoduls $\bar{E}$ des hellen Schaumes H und des dunklen Schaumes D. Die Markierungen ● und ▲ repräsentieren die Ergebnisse der Resonanzmethode.

Einflussfaktoren

Die ausführlichen Ergebnisse der Studien zu allen wichtigen Einflussfaktoren auf die Messergebnisse sowie alternative Prüfstandsanordnungen werden von den Autoren dieses Beitrages in Kürze in einem ausführlichen Journalartikel veröffentlicht. Dieser enthält dann neben weiteren experimentellen und numerischen Studien beispielsweise die Untersuchung der folgenden Einflüsse: Schiefstellungen (verschiedene Richtungen, mehrachsig), Anregungsamplitude, Sensorposition, Sensortypen, Lagerung, Design der Prüfstandkomponenten (numerisch & experimentell), Vorkompression, Probengröße und Nachgiebigkeiten im Versuchsaufbau.

Anwendung der identifizierten frequenzabhängigen Materialparameter

In diesem Abschnitt werden die zuvor ermittelten Materialparameter in einem Simulationsmodell zur Vorhersage der Luftschalltransmission durch eine Stahlplatte mit appliziertem Dämmmaterial verwendet. Verglichen wird dabei das Einfügedämmmaß, also die Differenz der abgestrahlten Schallleistung des Versuchaufbaus mit und ohne appliziertem Dämmmaterial. Als Referenz und Zielgröße dient das Einfügedämmmaß, das in einem Standard-Transmissionsprüfstand (siehe Abbildung 9) gemessen wurde. In den Simulationsmodel-

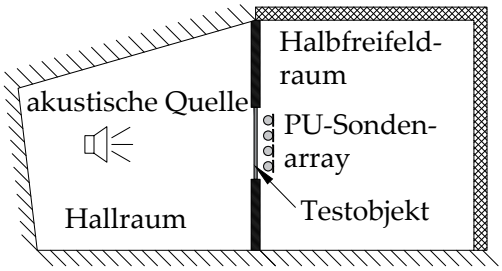

Abbildung 9: Schematische Darstellung eines Transmissionsprüfstandes.

len wird ausschließlich die Materialmodellierung variiert. Neben den Ergebnissen der beiden Charakterisierungsmethoden, die in diesem Beitrag vorgestellt wurden, wird als zusätzliche Referenz ein poroelastisches Materialmodell herangezogen. Dabei handelt es sich um ein Johnson-Champoux-Allard Modell (JCA [1]). Die dafür erforderlichen Eingangsparameter wurden von einem externen Dienstleister ermittelt. Die Berücksichtigung von Dämmmaterialien über ein poroelastisches Modell stellt neben der Resonanzmethode den aktuellen Stand der Technik dar und wird vielfach angewendet. Die Ergebnisse der drei Simulationsmodelle sowie der Messung sind in Abbildung 10 dargestellt. Es ist offensichtlich, dass keine der drei Simulationsansätze eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht. Dennoch kann konstatiert werden, dass die Nutzung von frequenzunabhängigen Materialparametern, die mit Hilfe der Resonanzmethode ausschließlich im tieffrequenten Frequenzbereich ermittelbar sind, die ungünstigste Strategie darstellt. Die Berücksichtigung frequenzabhängiger Parameter über ein poroelastisches Modell oder den komplexen E-Modul in Kombination mit der hier vorgeschlagenen Charakterisierungsmethode bewirkt eine signifikante Verbesserung der Prognosequalität. Abbildung 10 zeigt außerdem, dass die hier vorgeschlagene Methodik für das untersuchte Beispiel die besten Ergebnisse erzielt, auch wenn diese immer noch nicht zufriedenstellend sind.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden verschiedene Methoden zur Bestimmung frequenzabhängiger Materialparameter von akustischen Dämmmaterialien vorgestellt und hinsicht-

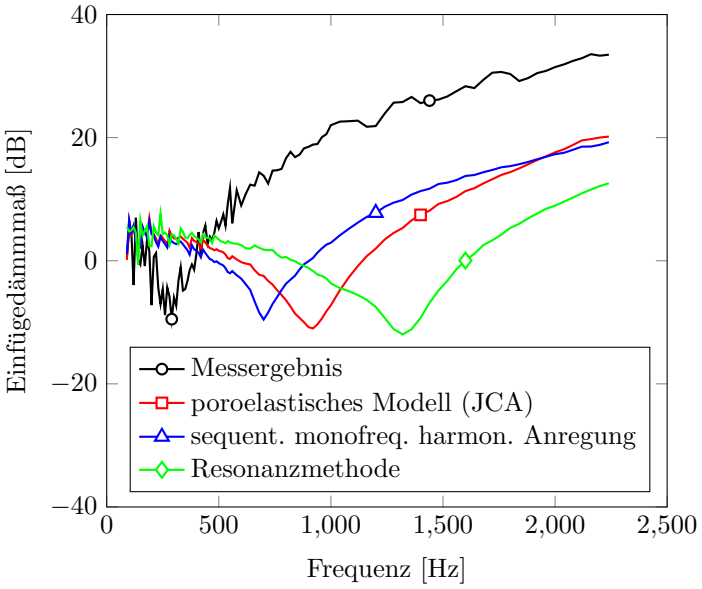

Abbildung 10: Vergleich der im Transmissionsprüfstand gemessenen Kurve des Einfügedämmmaßes mit den Ergebnissen numerischer Modelle, die sich ausschließlich im genutzen Materialmodell bzw. den verwendeten Materialparametern unterscheiden.

lich ihrer Eignung, valide Eingangsgrößen für numerische Simulationen zu liefern, verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass die Berücksichtigung frequenzabhängiger Materialparameter zwingend erforderlich ist und die hier vorgestellte Methodik für das untersuchte Beispiel sogar bessere Ergebnisse erzielt als das poroelastische Referenzmodell, das den aktuellen Stand der Technik repräsentiert. Die in diesem Beitrag vorgestellte Methodik hat den Vorteil, dass lediglich zwei separate Materialparameter zu bestimmen sind, die parallel und direkt in einem einfachem Experiment gemessen werden können. Leider ist der erfassbare Frequenzbereich beschränkt. Bisher wurden lediglich bis maximal 2 kHz belastbare Ergebnisse erzielt. Ausführliche Ergebnisse zu den durchgeführten Studien werden in Kürze von den Autoren dieses Beitrages in einem Journalartikel veröffentlicht.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des Verbundprojektes „Kompetenzzentrum eMobility (KeM)“, das mit Geldern des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und des Landes Sachsen-Anhalt gefördert wird. Darüber hinaus möchten wir Dr.-Ing. Maria Gavila Lloret für die sehr gute Zusammenarbeit sowie die Erstellung der Referenzergebnisse in Abbildung 10 danken.

Literatur

[1] Y. Champoux and J.-F. Allard, “Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media,” *Journal of Applied Physics*, vol. 70, pp. 1975–1979, 1991.