

Schaumstoffe im Kundtschen Rohr – Modelle und Einflussparameter

Antje Grebel¹, Joachim Bös¹, Tobias Melz¹

¹ TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, 64289 Darmstadt

E-Mail: grebel@szm.tu-darmstadt.de

Einleitung

Im Kundtschen Rohr kann der Absorptionsgrad von Schaumstoffen und anderen Materialien nach DIN 10354 mit der 2-Mikrofon-Methode gemessen werden. Trotz Normung treten bei den Messungen – in Abhängigkeit von der Montageart der Materialprobe im Kundtschen Rohr – starke Abweichungen im gemessenen Absorptionsgrad auf. Zur Modellierung von Schaumstoffen stehen zahlreiche empirische, analytische und phänomenologische Modelle zur Verfügung. Die Modelle greifen auf verschiedene Materialparameter zurück, die teilweise messtechnisch ermittelt werden müssen. Die Eingangsparameter für die Modellierung werden in Zukunft bestimmt, damit die Modelle mit den Messungen abgeglichen und damit auftretende messtechnisch festgestellte Phänomene erklärt werden können. Außerdem werden verschiedene Zuschnittmöglichkeiten von Proben für das Kundtsche Rohr vorgestellt und deren Einfluss auf den Absorptionsgrad gezeigt.

Bestimmung des Absorptionsgrades nach DIN 10534-2

Ein Kundtsches Rohr ist ein von der Umgebung schwingungsentkoppelt aufgestelltes Messrohr zur Bestimmung des akustischen Absorptionsgrades einer Materialprobe. Dabei ist die Querschnittform des Rohres frei wählbar. Die Anregung der an einem Rohrende vor einem schallharten Abschluss eingebrachten Probe erfolgt der Probe gegenüber mit einem Lautsprecher, welcher im Rohr ein akustisches Feld erzeugt. Bei einer breitbandigen/ rauschartigen Anregung der Probe werden zwei Mikrofone in die Rohrwand eingesetzt und aus der gemessenen Übertragungsfunktion der Absorptionsgrad berechnet. Der Absorptionskoeffizient α eines porösen Absorbers ist vom Schalleinfallswinkel abhängig. Im Kundtschen Rohr wird der Absorptionskoeffizient unter senkrechtem Schalleinfall gemessen.

Das für diese Untersuchungen verwendete Kundtsche Rohr besteht aus zwei Rohrabschnitten, welche über ein Verschlusssystem miteinander verbunden werden. Die Teilung des Kundtschen Rohres ist notwendig, um den Prüfkörper in die Messstrecke einsetzen zu können. Durch einen Schieber, mit dem der schallharte Rohrabschluss bewegt werden kann, ist es möglich, verschieden dicke Proben bei gleichbleibendem Abstand der Probenoberfläche zum Mikrofon zu vermessen. Der Schieber ermöglicht es außerdem, einen Wandabstand hinter der Probe zu simulieren. Der Teil des Kundtschen Rohres, in den der Prüfkörper eingesetzt wird, wird auch als Probenhalter bezeichnet. Er besitzt einen schallharten Abschluss. Der andere Teil wird als Messstrecke bezeichnet. Dort sind

Bohrungen für die Mikrofonaufnahme vorgesehen sowie ein Lautsprecher montiert.

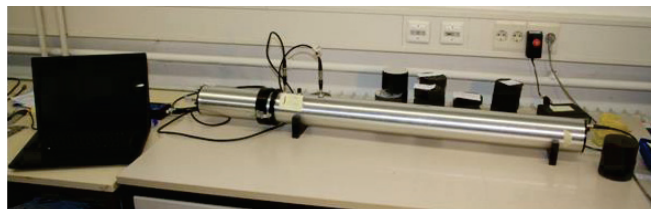


Abbildung 1: Kundtsches Rohr am Fachgebiet SzM der TU Darmstadt

Der gemessene Schalldruck an den Mikrofonen setzt sich aus der hinlaufenden und der rücklaufenden Welle zusammen. Nach der mathematischen Wellentrennung kann die Übertragungsfunktion zwischen den Schalldrücken an den beiden Mikrofonen berechnet werden.

Zum Einbau der Materialproben in das Kundtsche Rohr heißt es in der DIN 10534-2: „Die Probe wird in das Rohr eingesetzt.“ und „Der Prüfling muss gut in den Halter passen. Er darf jedoch nicht übermäßig zusammengedrückt werden oder sich wölben.“

Bei Versuchen [2,3] hat sich gezeigt, dass besonders Abweichungen im Durchmesser und bei der Art des Einbaus des Prüfkörpers in den Probenhalter des Kundtschen Rohres zu großen Streuungen und Abweichungen im gemessenen Absorptionsgrad führen. Der Effekt von Luftspalten um eine Probe ist in der Literatur beschrieben [2,3,5]. Forschungsergebnisse zu (leicht) komprimierten Proben, wie sie ja laut DIN 10534-2 erlaubt wären, gibt es bislang nicht. Durch fertigungsbedingte Maßabweichungen bei der Probenherstellung kommt es allerdings leicht zu Abweichungen in der Maßhaltigkeit der Probe.

Daher werden nicht nur verschiedene Zuschnittverfahren für die Rundprobe erläutert, sondern parallel in der Literatur verfügbare Materialmodelle in MATLAB implementiert, um aus den Messungen nicht erklärbare Streuungen im gemessenen Absorptionsgrad mathematisch erklären zu können.

Materialmodelle

Als poröse Materialien bestehen Schaumstoffe aus einer Skelettstruktur und den eingeschlossenen Porenräumen. Bei Anregung des Materials durch eine Schallwelle wird im System Energie dissipiert.

Bei der Modellierung stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Die Theorie des homogenen Mediums ist die älteste Theorie zur Beschreibung von porösen Schallabsorbentien.

Biot [4] formulierte ein analytisches Materialmodell zur Beschreibung eines poroelastischen Materials. Darin wird sowohl die kinetische Energie in der Fluid- als auch die in der elastischen Festkörperphase berücksichtigt. Die drei entstehenden Wellenformen, zwei Dichtewellen und eine Schubwelle, werden gleichzeitig erfasst. Mechanisch lässt sich ein gekoppeltes Gleichungssystem mit vier Freiheitsgraden (den drei Festkörperverschiebungen und dem Porenfluiddruck) mit Hilfe der Gleichgewichtsbedingungen aufstellen.

Für Schaumstoffe werden oft auch empirische und phänomenologische Modelle genutzt, in denen das Material als äquivalentes Fluid betrachtet wird und nicht mehr zwischen der Fluid- und der Festkörperphase unterschieden wird. Dabei wird die äquivalente Schallgeschwindigkeit c_{eq} im porösen Material durch eine effektive Dichte ρ_e und einen effektiven Kompressionsmodul K_e beschrieben, die beide frequenzabhängig sind. Folglich bildet dieser Ansatz eine einzige Dichtewelle im äquivalenten Fluid ab.

$$c_{eq} = \sqrt{\frac{K_e}{\rho_e}}$$

Ein Material kann als homogen betrachtet werden, wenn die Strukturgrößen wesentlich kleiner sind als die Schallwellen und die elastischen Wellenlängen.

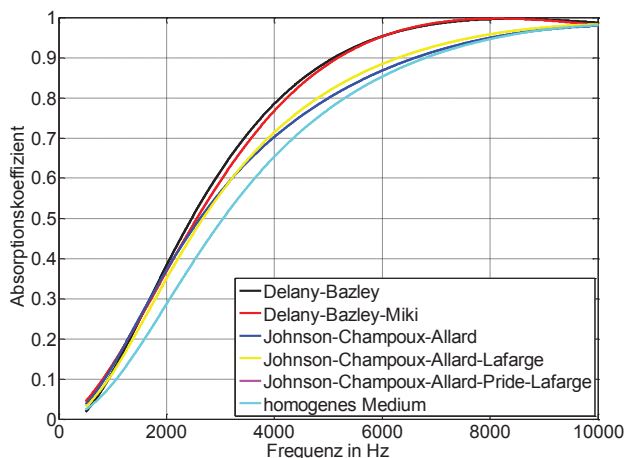


Abbildung 2: Verlauf des Absorptionsgrades über der Frequenz für verschiedene Materialmodelle

Delany und Bazley [4] haben aufgrund von Experimenten an Faserstoffen mit einer Porosität nahe 1,00 ein Potenzgesetz entwickelt. Dieses schafft eine Darstellung der charakteristischen Impedanz Z_c und der komplexen Wellenzahl k in Abhängigkeit von der Strömungsresistenz σ . Das Modell ist nur im Bereich $0,01 < f/\sigma < 1,00$ gültig. Die Materialeigenschaften Luftdichte ρ_0 und Luftschallgeschwindigkeit c_0 werden als bekannt und konstant vorausgesetzt. Miki [4] entwickelt das empirische Modell von Delany und Bazley weiter und kommt durch eine verbesserte Regressionsanalyse zu etwas anderen Konstanten. Das phänomenologische Johnson-Champoux-

Allard-Modell [4] basiert auf der Arbeit von Johnson, Koplik & Dashen. Dabei wird mit dem viskos-trägen-dissipativen Verhalten von porösen Materialien die komplexe Dichte $\tilde{\rho}(\omega)$ beschrieben. Eingangsparameter sind die Porosität ϕ , die Strömungsresistenz σ , das obere Frequenzlimit der Tortuosität α_∞ und die charakteristische viskose Länge Λ . Der komplexe dynamische Kompressionsmodul $\tilde{K}(\omega)$ wird mit Hilfe des thermisch-dissipativen Effekts beschrieben. Lafarge [4] verbessert das Modell hinsichtlich des thermischen Verhaltens bei tiefen Frequenzen. Das Johnson-Champoux-Allard-Pride-Lafarge-Modell ist um die thermisch-statische Durchlässigkeit k'_0 und die thermisch-statische Tortuosität α'_0 im Kompressionsmodul erweitert worden. Zur Bestimmung der dynamischen Dichte wird die statisch-viskose Tortuosität α_0 ergänzt [4]. Abbildung 2 zeigt die Absorptionsgrade der implementierten Materialmodelle.

Einfluss des Zuschnitts auf den gemessenen Schallabsorptionsgrad

Die Proben für das Kundtsche Rohr können auf verschiedene Arten zugeschnitten werden. Die Genauigkeit des Zuschnitts der Rundproben beeinflusst den gemessenen Absorptionsgrad. Abweichungen können die Qualität der Schnittkante, die Rundheit, die Geradheit, die Rechtwinkligkeit und die Zylinderform betreffen. Bisher wurden daher folgende Zuschnittmöglichkeiten untersucht:

- Abrasivwasserstrahlschneiden
- Zuschnitt an einer Bandsäge mit $U = 102 \text{ 1/min}$ freihändig
- Zuschnitt an einer Bandsäge mit $U = 1500 \text{ 1/min}$ freihändig
- Zuschnitt an einer Bandsäge mit $U = 102 \text{ 1/min}$ mit Probenführung
- Zuschnitt an einer Bandsäge mit $U = 1500 \text{ 1/min}$ mit Probenführung
- Hitzdrahtzuschnitt, CNC-gesteuert, herstellerseitig
- Zuschnitt mit rotierendem Messer

Der Zuschnitt mit dem Abrasivwasserstrahl zeigte in den Versuchen trotz CNC-Steuerung sowohl große Abweichungen in der Rundheit als auch eine Neigung zu einer ausgeprägten Nicht-Rechtwinkligkeit der Probe. Beim Zuschnitt wird der Wasserstrahl tangential an die auszuscheidende Kontur herangeführt und danach auch wieder davon weggeführt. Das führt dazu, dass der Wasserstrahl zweimal die gleiche Stelle passiert, an der folglich mehr Material abgetragen wird. Die Probe erhält eine Kerbe. Der Zuschnitt mit Wasserstrahl wird aufgrund der großen Fertigungsungenauigkeit nicht weiter verfolgt. Die stark ausgeprägte Nicht-Rechtwinkligkeit der Probe führt zu einer Verspannung der Probe im Rohr und führt daher nicht zu vergleichbaren und realistischen Ergebnissen im gemessenen Absorptionsgrad.

Der freihändige Zuschnitt der Probe führt, unabhängig von der Schnittgeschwindigkeit, zu Rundheitsabweichungen und

teilweise zu einer Nicht-Rechtwinkligkeit der Probe, wenn der Maschinenbediener die Probe nicht spannungsfrei an der Säge entlang führt. Beim langsamen Zuschnitt kann es außerdem zu ausgefranzten Schnittkanten kommen, weil das Material durch die geringe Sägegeschwindigkeit mitgerissen wird.

Um die Rundheitsabweichungen zu minimieren, wurde eine Probenhalterung konzipiert, bei der das Material zwischen zwei Führungsscheiben gelegt wird. Somit wird das Material nicht mehr vom Maschinenführer beim Probenzuschnitt verzogen und die Proben werden maßhaltig zugeschnitten. Der enge Kontakt zwischen Führungsscheiben und Sägeblatt führt allerdings dazu, dass sie öfter getauscht werden müssen, um die Maßhaltigkeit zu erhalten.

Vom Hersteller des hier untersuchten Schaumstoffes wurde die Möglichkeit angeboten, Rundproben noch im Werk mit einem Hitzdraht CNC-gesteuert zuzuschneiden zu lassen. Weitere Details zum Zuschnittverfahren sind leider nicht bekannt. Die Proben haben eine hohe Maßhaltigkeit, trotz einer angegebenen Zuschnittgenauigkeit nach DIN 7715 Teil 5 P3.

Hersteller für Kundtsche Rohre bieten teilweise ein rotierendes Messer, ähnlich einem Steckdosenfräser, zum Einspannen in eine Standbohrmaschine an, mithilfe dessen die Materialprobe aus dem Plattenmaterial zugeschnitten werden kann. Bei weichen Schaumstoffen kann das dazu führen, dass das Material zwar im oberen Bereich der Probe maßhaltig ist, im unteren Bereich allerdings ballig wird, also einen größeren Durchmesser aufweist. Dies liegt an der Kompression der Probe während des Zuschnitts. Messer mit einer geringen Wandstärke verdrängen weniger Material, sodass hier eine höhere Maßhaltigkeit gewährleistet werden kann.

Mit allen oben aufgeführten Herstellungsverfahren wurden von verschiedenen Materialstärken eines Materials jeweils drei Proben für die Durchmesser 89 mm, 90 mm und 91 mm für ein Messrohr mit einem Durchmesser von 90 mm angefertigt. Die Messungen des Absorptionsgrades einer einzigen Materialprobe sind wiederholbar und zeigen gleiche Ergebnisse (Abb. 3). Die Standardabweichung ist sehr klein. Drei Materialproben desselben Durchmessers, zugeschnitten von der gleichen Person, zeigen ähnliche Ergebnisse, die Streuung ist jedoch größer (Abb. 4). Dies ist entweder mit Schwankungen in der Produktion des Schaumstoffes oder mit der Fertigungsgenauigkeit zu erklären. Zukünftige Untersuchungen sollen zeigen, ob es einen „Lerneffekt“ beim Zuschnitt gegeben hat. Die hohe Standardabweichung kann auch auf die geringe Schnittgeschwindigkeit zurückzuführen sein. Die Streuung wird kleiner, wenn die Materialprobe mit einer Führung und einer hohen Schnittgeschwindigkeit ausgeschnitten wird (Abb. 5). Dies deutet auf einen eindeutigen Fertigungseinfluss hin. Bei den Proben, hergestellt mit einem einer Lochsäge nachempfundenen rotierenden Messer, führen die großen Abweichungen in der Zylinderform der Probe zu einer erhöhten Sensitivität bzgl. des Faktors „Einsetzen der Probe ins Messrohr“, wie bereits in [2,3] beschrieben. Beide Montagemöglichkeiten der Schaumstoffproben wurden im

Rahmen dieser Arbeit untersucht, sollen hier aber nicht weiter erläutert werden.

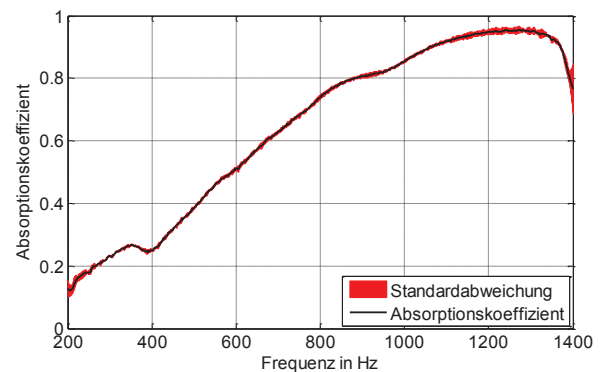


Abbildung 3: Wiederholbarkeit der Messungen, Materialstärke 50 mm, Durchmesser 90 mm, drei Messungen an derselben Materialprobe

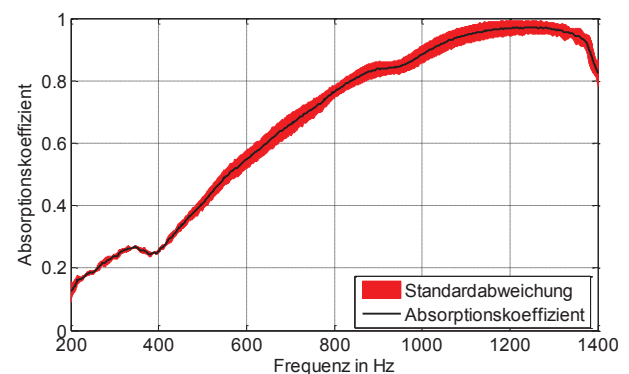


Abbildung 4: Mittelwert und Standardabweichung von drei Zuschnittproben, Säge 102 U/min, handgeführt, Materialstärke 50 mm, Durchmesser 90 mm

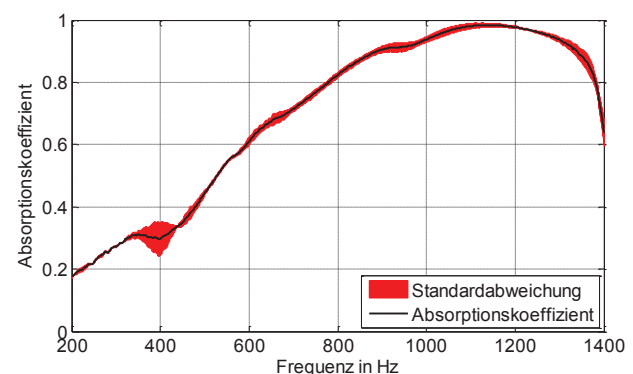


Abbildung 5: Mittelwert und Standardabweichung von drei Zuschnittproben, Säge 1500 U/min, Zuschnitt mit Führung, Materialstärke 50 mm, Durchmesser 90 mm

Ausblick

Vorliegende Messungen sollen im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse näher untersucht werden, um die Haupteinflussfaktoren auf den gemessenen Absorptionsgrad zu bestimmen. Für die Materialmodelle sollen die fehlenden Materialparameter für den untersuchten Schaumstoff bestimmt und in den Modellen hinterlegt werden. Ziel ist

es, die Unsicherheit bei der Messung des Absorptionsgrades zu erklären und zu minimieren.

Literatur

- [1] DIN EN 10543-2 „Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren, Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion“, 2001
- [2] Grebel, A.; Hanselka, H.; Bös, J.: Observations on absorption measurements in impedance tubes, Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013, Meran
- [3] Grebel, A.; Ochs, S.; Bös, J.; Melz, T.: Planung und Durchführung einer Sensitivitätsanalyse am Kundtschen Rohr., DAGA 2014, Oldenburg
- [4] Acoustical Porous Material Recipes, Homepage
URL: <http://apmr.matelys.com/>
- [5] Cummings, A.: Impedance tube measurements on porous media: The effects of air-gaps around the sample, Journal of Sound and Vibration, 151 (1991), S. 63–75