

## Messunsicherheit im Kundtschen Rohr

Antje Grebel, Joachim Bös, Tobias Melz

TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptionen und Maschinenakustik SAM, 64289 Darmstadt  
E-Mail: grebel@sam.tu-darmstadt.de

### Einleitung

Das Kundtsche Rohr bietet die Möglichkeit, den Schallabsorptionsgrad von Schaumstoffen schnell und kostengünstig zu bestimmen. Obwohl es durchaus auch Rohre mit quadratischem Querschnitt gibt, sind Rohre mit Kreisquerschnitt verbreiteter. Kritisiert wird die Methode, den Schallabsorptionsgrad in einem Kundtschen Rohr zu messen, oft deshalb, weil sie nur Messungen bei senkrechtem Schalleinfall erlaubt, welcher in der Praxis kaum auftritt. Nichtsdestotrotz wird das Verfahren nahezu immer angewendet, um zumindest einen ersten Eindruck vom Material zu bekommen. Der Kostenvorteil durch die kleinen Materialproben im Vergleich zu Messungen im Hallraum ist immens.

Die Bezeichnung Kundtsches Rohr ist nicht konsequent in der Literatur geregelt. So lautet der Titel der Norm DIN 10534-2: „Bestimmung der Schallabsorption in Impedanzrohren“ [1], wohingegen das Prinzip der Wellentrennung, wie bei der 2-Mikrofonmethode erforderlich, beispielsweise im Buch „Technische Akustik“ [2] unter dem Kapitel „Messungen im Kundtschen Rohr“ geführt wird. In dieser Veröffentlichung wird der Begriff Kundtsches Rohr verwendet.

Die auf der Tagung präsentierten Ergebnisse wurden mit einem Rohr erzielt, bei dem der Absorptionsgrad nach der 2-Mikrofonmethode aus den Übertragungsfunktionen berechnet wird. Die Berechnungsmethode, ebenso wie das Vorgehen beim Messen selbst, ist in der gültigen Norm [1] beschrieben. Warum also dieser Beitrag? Trotz Normung treten bei den Messungen – in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern, auf die hier eingegangen werden soll – starke Abweichungen im gemessenen Absorptionsgrad auf.

### Probenvorbereitung

Das für diese Untersuchungen verwendete Kundtsche Rohr (siehe Abbildung 1) 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 SAM der TU Darmstadt [Bild: Fraunhofer LBF]

Sind Messverfahren genormt, so sollte es Anwendern möglich sein, Prüflinge zu vermessen, ohne dass es dabei zu Abweichungen zwischen Messsystemen, beispielsweise verschiedenen Rohren, oder verschiedenen Anwendern eines Messsystems kommt. Der für diese Untersuchungen verwendete Schaumstoff wird als Plattenmaterial angeliefert. Anweisungen, wie Prüflinge zu fertigen/zuzuschneiden sind, fehlen in der Norm. Industriell eingesetzt werden folgende Verfahren: Zuschnitt mit Hitzdraht, Zuschnitt mit Wasserstrahl (mit und ohne Abrasivmittel), rotierende Messer (sog. drilling tools), Zuschnitt an der Bandsäge. Ein Zuschnitt mit Laser ist teuer und wird daher in dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet. Die fertigen Rundproben werden nun in den Probenhalter des Kundtschen Rohres eingesetzt und können vermessen werden.

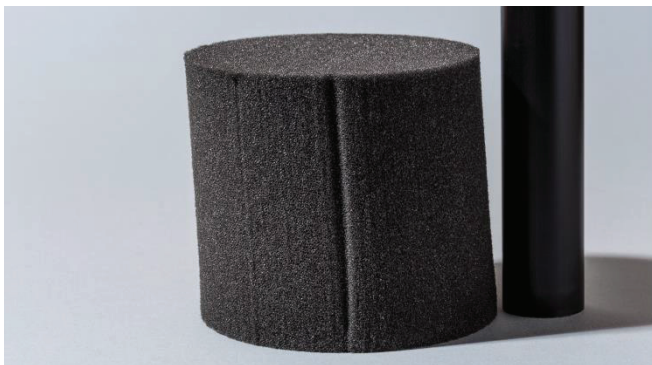
Zum Einbau der Materialproben in das Kundtsche Rohr heißt es in der DIN 10534-2: „Die Probe wird in das Rohr eingesetzt.“ und „Der Prüfling muss gut in den Halter passen. Er darf jedoch nicht übermäßig zusammengedrückt werden oder sich wölben.“ Außerdem heißt es: „Es sollten mindestens zwei Prüflinge, bei nicht einheitlichen Probekörpern auch mehrere, für Wiederholungsmessungen unter gleichen Montagebedingungen geprüft werden.“

Bisherige Reihenuntersuchungen wie beispielweise [3] zeigen, dass es durchaus Unterschiede zwischen den errechneten Absorptionsgraden bei verschiedenen Anwendern und zwischen verschiedenen Systemen gibt. Zu beachten ist aber, dass für solche Untersuchungen jeder Partner seine Prüflinge selbst zugeschnitten hat und die Messsysteme nicht identisch waren. Bei den hier vorliegenden Messungen wurde bewusst ein anderer Weg gewählt: Alle Messungen wurden an *einem* Messsystem von *einer* Person durchgeführt. Daher bietet sich hier die Möglichkeit, den Einfluss der Zuschnittsart auf den Absorptionsgrad genauer zu untersuchen. Gerade beim Zuschnitt an der Bandsäge spielt die Erfahrung der Person, die die Prüflinge fertigt, eine große Rolle. Außerdem werden verschiedene Materialdicken untersucht. Die Literatur ist zwiespalten bezüglich der Probengröße: Es wird einerseits empfohlen, Prüflinge mit leichtem Übermaß zu fertigen [4], andererseits existieren auch Veröffentlichungen, die

vorschlagen, eine Untermaßprobe zu fertigen, um Randverspannungen zu vermeiden [5]. Dieser Aspekt wurde mit aufgenommen, weshalb für das Rohr mit einem Innendurchmesser von 90 mm Proben mit einem Durchmesser von 90 mm, 89 mm sowie 91 mm gefertigt wurden. Von jedem Durchmesser wurden für jedes Zuschnittsverfahren (bei der Bandsäge zusätzlich: von drei Personen) drei Prüflinge angefertigt.

## Zuschnittsqualität

In Vorversuchen wurde der Zuschnitt der Prüflinge durch Wasserstrahl mit dem Zusatz von Abrasivmittel untersucht. 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 (siehe Abbildung 2). Beim Zuschnitt wird der Wasserstrahl tangential an die auszuschneidende 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 mit zugesetztem Abrasivmittel wird aufgrund der großen Fertigungsungenauigkeit nicht weiter verfolgt.



**Abbildung 2:** ausgeprägter Anschnitt und Nicht-Rechtwinkligkeit der Probe nach dem Zuschnitt mit Wasserstrahl mit Abrasivmittel [Bild: Fraunhofer LBF]

Ein vollkommen anderes Bild zeigt sich, wenn die Probe ohne Abrasivmittel zugeschnitten wird. Hier ist es besonders wichtig, dass das fertigende Unternehmen bereits Erfahrung im Zuschnitt von Schaumstoff oder anderen weichen, poroelastischen, oder faserigen Materialien hat. Dadurch kann eine exakte Probenfertigung realisiert werden. Abbildung 3 zeigt deutlich, wie sehr sich die Schnittflächen unterscheiden können: Links im Bild ist die Schnittfläche eines Zuschnitts mit einer langsam laufenden Bandsäge, rechts im Bild eine Schnittfläche einer mit Wasserstrahl zugeschnittene Probe abgebildet. Das Material wird beim Wasserstrahlzuschnitt deutlich glatter durchtrennt, wohingegen beim langsamen Zuschnitt ausgefranste Schnittflächen entstehen, weil das Material durch die geringe Sägeschwindigkeit mitgerissen wird. An der Bandsäge wurden die Proben mit zwei verschiedenen Sägeschwindigkeiten zugeschnitten. Außerdem wurden sowohl der freihändige Zuschnitt der Probe wie auch ein Zuschnitt mit Hilfe einer Führung realisiert. Letzteres dient dazu, Rundheitsabweichungen und teilweise Nicht-Rechtwinkligkeit der Probe, wenn der Maschinenbediener

die Probe nicht spannungsfrei an der Säge entlang führt, zu vermeiden. Die Probenhalterung besteht aus zwei kugelgelagerten Führungsscheiben, zwischen denen sich das Schaumstoffmaterial befindet und die am Sägeblatt entlanggeführt werden. Der enge Kontakt zwischen Führungsscheiben und Sägeblatt führt allerdings dazu, dass sie öfter getauscht werden müssen, um die Maßhaltigkeit zu erhalten. Der herstellerseitige Zuschnitt der Proben mit Hitzdraht zeigte eine glatte Schnittfläche. Allerdings scheinen alle Proben etwas zu klein, entsprechen aber der vom Hersteller angegebenen Zuschnittsgenauigkeit nach DIN 7715 Teil 5 P3.



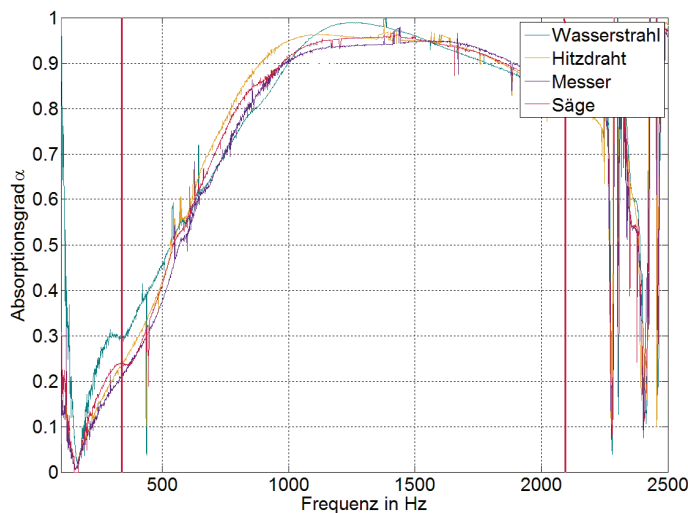
**Abbildung 3:** verschiedene Schnittflächen durch verschiedene Zuschnittsverfahren (links: Bandsäge, rechts: Wasserstrahl) [Bild: Fraunhofer LBF]

Hersteller für Kundtsche Rohre bieten teilweise ein rotierendes Messer an, ähnlich einem Steckdosenfräser, zum Einspannen in eine Standbohrmaschine, 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, so dass hier eine höhere Maßhaltigkeit gewährleistet werden kann.

## Ergebnisse der Messung

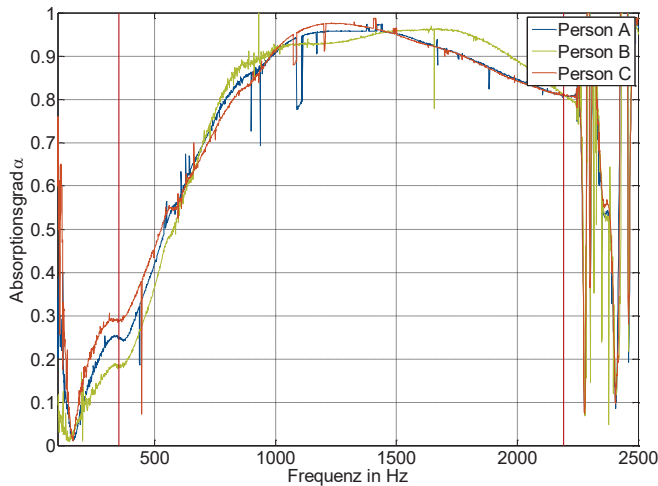
Obwohl in der DIN 10534-2 keinerlei Angaben zu Zuschnittsart und Genauigkeit des Prüflings gemacht werden, die Zuschnittsart demzufolge „egal“ sein müsste, zeigen sich deutliche Unterschiede im ermittelten Absorptionsgrad durch den Zuschnitt. Abbildung 4 zeigt, wie die vier verschiedenen Zuschnittsarten Wasserstrahl, Hitzdraht, Säge und rotierendes Messer zu verschiedenen gemessenen Absorptionsgraden führen können. Der Plot ist hier für die Materialdicke 50 mm und einen Durchmesser von 90 mm erstellt. Ein Vergleich aller Verfahren bei leichtem Übermaß oder leichtem Untermaß scheidet leider aus, weil ein rotierendes Messer mit einem anderen Innendurchmesser als 90 mm nicht verfügbar ist. Deutlich erkennbar ist, dass über den gesamten Frequenzbereich Abweichungen der ermittelten Absorptionsgradkurven zueinander existieren. Besonders auffällig sind sie im Bereich zwischen 400 Hz und 500 Hz sowie zwischen 1000 Hz und 1500 Hz. Wie auch in allen folgenden Diagrammen sind die Grenzfrequenzen des Rohres mit roten senkrechten Linien im Diagramm gekennzeichnet. Sie liegen bei 354 Hz und 2191 Hz. Der Abstand der

Mikrofone zueinander betrug 48 mm, weshalb die hierzu gehörige zusätzlich mögliche obere Grenzfrequenz des Rohres von 3187 Hz nicht betrachtet werden muss.



**Abbildung 4:** Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Art des Zuschnitts,  $d = 50$  mm,  $\varnothing = 90$  mm

Es ist anzunehmen, dass die Streuung bei den Sägeproben am größten ist, da hier der Mensch am stärksten in die Probenfertigung einbezogen ist. Daher werden in Abbildung 5 die Zuschnitte der drei Personen gezeigt. Es wurde über alle Möglichkeiten des Zuschnitts an der Säge (zwei Sägegeschwindigkeiten + Zuschnitt per Hand/mit Führung) sowie zwei Möglichkeiten des Einbaus, auf die später noch eingegangen werden soll, gemittelt.



**Abbildung 5:** Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Person, die Proben fertigt; Sägezuschnitte,  $d = 50$  mm,  $\varnothing = 90$  mm

Person A, der Werkstattmeister, verfügt über die größte Erfahrung bei der Fertigung der Prüflinge. Person B hat Erfahrung im Umgang mit der Bandsäge, da er diese für seine Nebentätigkeit im Instrumentenbau regelmäßig nutzt. Es zeigt sich aber, dass seine gefertigten Prüflinge sich beim Absorptionsgrad deutlich von den beiden anderen unterscheiden. Person C verfügt über eine Ausbildung zum Industriemechaniker. Seine Zuschnitte ähneln denen von Person A. Optisch deutlich zu erkennen ist eine kleine „Nase“ an der Probe von der Stelle des Anschnitts. Bei Person A

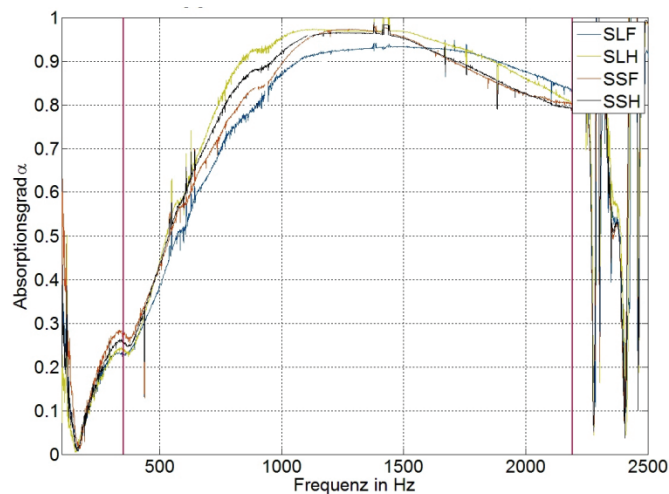
und C ist dies nur bei ganz wenigen Proben zu sehen, bei Person B häufig.



**Abbildung 6:** möglicher ausgeprägter Anschnitt mit Ausprägung einer „Nase“ beim Sägezuschnitt [Bild: Fraunhofer LBF]

Diese Nase führt zu einer Inhomogenität der Probe, auch wenn die dadurch lokal wirkende Kompression der Probe bezogen auf die Fläche sehr klein ist.

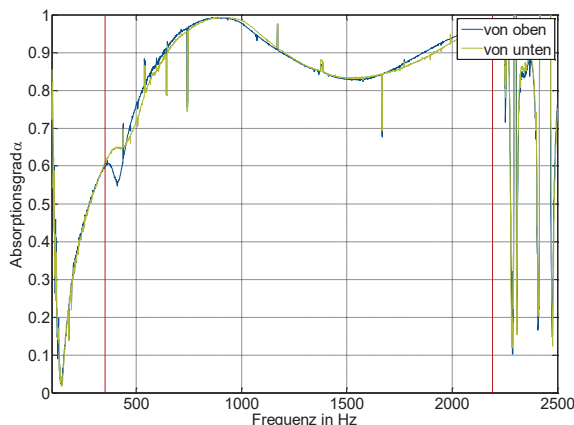
Wie bereits erwähnt, wurden die Proben an der Säge mit vier verschiedenen Verfahren zugeschnitten. Bei dünnen Materialien mit  $d = 30$  mm unterscheiden sich die Absorptionsgrade nicht. Bei dickeren Proben, wie in Abbildung 7, treten deutliche Unterschiede zwischen den Sägeverfahren auf (SLF – geringe Sägegeschwindigkeit + Führung; SLH – geringe Sägegeschwindigkeit + handgeführter Prüfling; SSF – hohe Sägegeschwindigkeit + Führung; SLH – hohe Sägegeschwindigkeit + handgeführter Prüfling). Dieser Effekt tritt unabhängig von der Erfahrung der fertigen Person auf.



**Abbildung 7:** Abhängigkeit des Absorptionsgrades vom Sägeverfahren;  $d = 50$  mm,  $\varnothing = 90$  mm

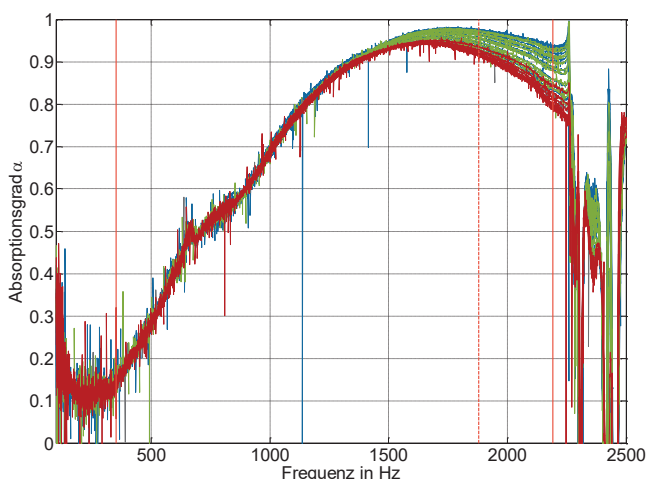
Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, eine Probe in den Probenhalter einzubauen. Möglichkeit 1: Die Dicke der Probe wird ermittelt, der bewegliche Schieber auf die Probendicke eingestellt und die Probe eingesetzt. Möglichkeit 2: Der Schieber des Probenhalters wird so weit wie möglich zurückgezogen, die Probe eingesetzt und der Schieber mit samt der Probe soweit verschoben, bis die Oberfläche der Probe auf der Messebene (definierter Abstand zum vorderen Mikrofon) liegt. Sollte sich eine Skala auf dem Schieber befinden, kann in beiden Fällen die gleiche Probendicke abgelesen werden. Und dennoch führen beide Einbauvarianten bei dicken Proben zu verschiedenen Absorptionsgraden, wie Abbildung 8 zeigt. Dieser Effekt tritt bei diesem Material nur bei den 80 mm-Proben auf. Zu einem anderen Zeitpunkt

wurde anderes Material vermessen, bei dem der Effekt schon bei dünneren Prüflingen beobachtet wurde. Zudem änderte sich dabei der Verlauf des Absorptionsgrades.



**Abbildung 8:** Abhängigkeit des Absorptionsgrades von der Einbaurichtung;  $d = 80 \text{ mm}$ ,  $\varnothing = 90 \text{ mm}$

Dieser Effekt ist unabhängig von der Person, die die Prüflinge fertigt. Es wird vermutet, dass Randverspannungen die Ursache sind. Das Material zeigt kaum Setzverhalten, der Effekt konnte auch nach 48 h der Probe im Rohr, ohne sonstige weitere Änderungen am System, gemessen werden. Der hier ausschnittsweise gezeigten Reihenuntersuchung liegen zahlreiche Voruntersuchungen zugrunde. Neben prinzipiellen Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur im Raum, dem Einfluss der Signalform und -amplitude, der Position der Mikrofone, den Grenzfrequenzen des Rohres etc., wurde untersucht, wie wiederholgenau eine Messung ist. Lässt man die Probe im Rohr eingebaut, kann der Absorptionsgrad bei erneuter Messung gut reproduziert werden. Dies trifft ebenfalls zu, wenn die Probe mit einer Markierung versehen wird und durch die Markierung wieder genauso eingebaut werden kann. Fehlt eine solche Markierung, oder wird sie missachtet, kann es sein, dass sich folgendes Bild (Abbildung 9) zeigt:



**Abbildung 9:** Abhängigkeit des Absorptionsgrades vom Drehwinkel der Probe beim Einbau;  $d = 40 \text{ mm}$ ,  $\varnothing = 90 \text{ mm}$

Der Absorptionsgrad fächert sich bei hohen Frequenzen auf. In dem Diagramm sind insgesamt 36 Messungen dargestellt. Die Probe wurde eingebaut, vermessen, ausgebaut, um  $10^\circ$

gedreht, wieder eingesetzt, vermessen, ausgebaut usw., bis eine vollständige Drehung der Probe erfolgt war. Hochfrequent könnte es sich auch um Prüflinge aus verschiedenen Materialien handeln, obwohl es stets dieselbe Probe ist, die lediglich gedreht wurde. Die Ergebnisse deuten auf eine Inhomogenität des Materials hin. Schaumstoffhersteller betonen selbst, dass ausgelieferte Plattenware nicht homogen sein muss. Dass diese Inhomogenität aber auch bei vergleichsweise kleinen Materialproben auftritt und so starke Auswirkungen auf den Absorptionsgrad hat, war überraschend. Nachfolgende Untersuchungen sollen klären, ob dieser Effekt in Rohren mit kleinerem oder größerem Durchmesser verstärkt oder abgeschwächt auftritt.

## Ausblick

Vorliegende Messungen sollen im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse weiter untersucht werden, um die Haupteinflussfaktoren auf den gemessenen Absorptionsgrad zu bestimmen. Offen ist dabei die Wahl der Zielgröße – ein Einzahlwert. Zunächst wird daher der  $\alpha_w$ -Wert verwendet. Damit geht aber leider jede Information über den Verlauf des Absorptionsgrades verloren, weshalb der optische Vergleich verschiedener Messergebnisse noch nicht ersetzt werden kann. Die bisherigen Erkenntnisse sollen und müssen noch weiter an anderen Rohren verifiziert werden. Außerdem steht die Verifizierung der Ergebnisse bei der Messung anderer Materialien aus. Schlussendlich soll durch einen Abgleich mit den bestehen Materialmodellen, wie dem JCA-Modell [6], eine Vorgehensweise für die Messungen am Kundtschen Rohr erarbeitet werden, die möglichst wenig Spielraum für Interpretationen lässt und eindeutige, valide, wiederholbare Messungen ermöglicht.

## Literatur

- [1] DIN EN 10543-2 „Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren, Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion“, **2001**
- [2] Möser, M.: Technische Akustik, 10. Auflage, Springer Vieweg, **2015**
- [3] Horoshenkov, K.V. et al.: Reproducibility experiments on measuring acoustical properties of rigid-frame porous media (round-robin tests), *The Journal of the Acoustical Society of America*, **2007**, 122(1), 345–353
- [4] Pilon D. et al.: Behavioral criterion quantifying the effects of circumferential air gaps on porous materials in the standing wave tube, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **2004**, 116(1), 344–356
- [5] Kino N. et al: Non-acoustical and acoustical properties of reticulated and partially reticulated polyurethane foams, *Applied Acoustics*, **2012**, 73(2), 95–108
- [6] Allard, J.F. et al.: Acoustical properties of partially reticulated foams with high and medium flow resistance, *The Journal of the Acoustical Society of America*, **1986**, 79(6), 1734–1740