

Messung von richtungsabhängigen Materialkennwerten in Transmissionsrohren

Daniel Sgriess¹, Volker Wittstock²

¹ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, E-Mail: daniel.sgriess@ptb.de

² Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, E-Mail: volker.wittstock@ptb.de

Einleitung

In der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wurden im Jahr 2018 zwei Transmissionsrohre gefertigt [4]. Diese Transmissionsrohre wurden im Rahmen eines von der „Fachagentur nachwachsende Rohstoffe“ aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags geförderten Verbundprojektes konstruiert. Ziel des Projektes ist es, die Anwendbarkeit von nachwachsenden Rohstoffen zu untersuchen und zu verbessern.

Die Transmissionsrohre sind nach der ASTM E 2611-09 [2] und der ISO 10534-2 [1] anwendbar. Beide Rohre sind mit einem quadratischen Querschnitt konstruiert, um die Richtungsabhängigkeit von Proben in insgesamt 24 Ausrichtungen untersuchen zu können. Insgesamt wird der Frequenzbereich von 50 Hz bis 7,5 kHz abgedeckt.

Messprinzip

ASTM E 2611-09

Die ASTM E 2611-09 erlaubt es, die komplexe Wellenzahl und die komplexe Impedanz, sowie den Absorptionsgrad und den Transmission Loss zu messen. Die Messung findet in einem Transmissionsrohr mit vier Mikrofonpositionen statt, wie es in Abbildung 1 zu sehen ist. Jeweils zwei der Mikrofonpositionen befinden sich auf einer Seite der Probe. Das Transmissionsrohr ist in unserem Fall mit Hilfe eines absorbierenden Keils reflexionsarm abgeschlossen.

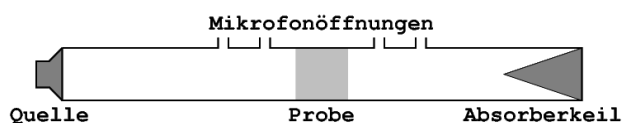


Abbildung 1: Seitenansicht des Messaufbaus nach der ASTM E 2611-09

ISO 10534-2

Mit der ISO 10534-2 kann der Absorptionsgrad und die Impedanz einer Probe vor einer harten Wand bestimmt werden. Im Gegensatz zur ASTM E 2611-09 werden hier nur zwei Mikrofonpositionen benötigt. Der Messaufbau ähnelt dem Messaufbau aus Abbildung 1 mit dem Unterschied, dass sich direkt hinter der Probe ein harter Abschluss befindet und somit alles Folgende wegfällt.

Konstruktion der Rohre

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die beiden konstruierten Transmissionsrohre. Beide Transmissionsrohre sind modular aufgebaut und bestehen aus insgesamt drei Teilen. Im Mittelstück befindet sich die Probe und oben können verschiedene Abschlüsse eingebaut werden.



Abbildung 2: Foto des kleinen Transmissionsrohrs inklusive einiger würfelförmiger Proben mit 2 cm Kantenlänge

In Abbildung 2 sieht man das kleinere der beiden Transmissionsrohre. Es ist 43 cm lang. In ihm werden Proben mit einer Kantenlänge von 2 cm gemessen und es deckt den Frequenzbereich zwischen 400 Hz und 7,5 kHz ab. Um die Übertragungsfunktionen messen zu können, werden Viertel-Zoll-Mikrofone benutzt. Die Quelle befindet sich am unteren Ende des Transmissionsrohrs in einem roten Zylinder, der möglichst schwingungsentkoppelt vom Rest des Transmissionsrohrs befestigt ist.

Abbildung 3 zeigt das größere Transmissionsrohr, welches insgesamt ungefähr 132 cm lang ist. Es ist für Proben mit 10 cm Kantenlänge und den Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 1,5 kHz gedacht. Im Gegensatz zum kleineren



Transmissionsrohr wird hier mit Halb-Zoll-Mikrofonen gemessen.

Abbildung 3: Foto des großen Transmissionsrohrs, links: oberer Teil; Mitte: Probenhalter und 10 cm Würfelprobe; rechts: unterer Teil

Leermessung

Bei diesen Messungen wurde in den Probenhalter der Transmissionsrohre keine Probe eingebaut, sodass nur die darin enthaltene Luft charakterisiert wird.

Bei den Messungen entsprechend der ASTM E 2611-09 bedeutet das also, dass sich im Mittelstück des Rohrs nur Luft befindet. Es werden messtechnisch die komplexe Wellenzahl und die komplexe Impedanz bestimmt und mit den zu erwartenden Werten für diese Größen verglichen. In Abbildung 4 sind die Werte für die komplexe Impedanz dargestellt. Der erwartete Imaginärteil ist aufgrund der logarithmischen Darstellung nicht eingezeichnet, da er im

Idealfall exakt Null ist. Außerdem sind die Imaginärteile nur betragsmäßig dargestellt, um auch negative Werte darstellen zu können.

Der gemessene Realteil der Impedanz stimmt für beide Rohre sehr gut mit dem erwarteten Wert von $410 \frac{Ns}{m^3}$ überein. Der gemessene Imaginärteil ist erwartungsgemäß nicht exakt null. Er ist aber deutlich kleiner als der gemessene Realteil, sodass er im Verhältnis der Null sehr nahekommt.

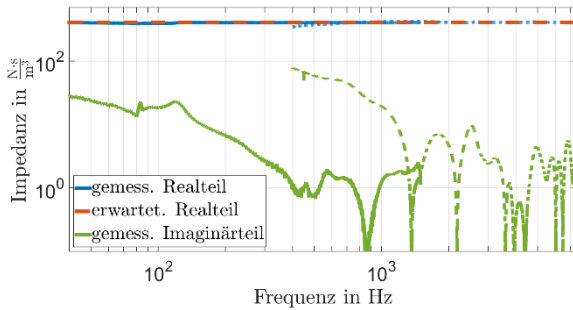


Abbildung 4: Komplexe Impedanz einer Luftprobe im kleinen und großen Rohr nach der ASTM E 2611-09 (durchgezogen: großes Rohr, gestrichelt: kleines Rohr)

Abbildung 5 zeigt die komplexe Wellenzahl. Auch hier ist der erwartete Imaginärteil im Idealfall wieder exakt Null und die Imaginärteile sind nur betragsmäßig dargestellt.

Der erwartete Realteil berechnet sich entsprechend Gleichung (1) und stimmt mit den gemessenen Realteilen der beiden Transmissionsrohre sehr gut überein.

$$k = \frac{2\pi f}{c} \quad \left[\frac{1}{m}\right] \quad (1)$$

Die gemessenen Imaginärteile sind auch hier nicht exakt Null. Sie geben die Verluste an, die innerhalb der beiden Transmissionsrohre entstehen. Dabei hat das kleinere der beiden Transmissionsrohre bei derselben Frequenz stärkere Verluste.

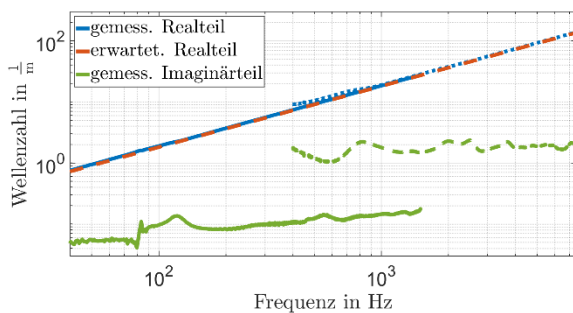


Abbildung 5: Komplexe Wellenzahl einer Luftprobe im kleinen und großen Rohr nach der ASTM E 2611-09 (durchgezogen: großes Rohr, gestrichelt: kleines Rohr)

Des Weiteren wurde in beiden Transmissionsrohren der Absorptionsgrad nach ASTM E 2611-09 und ISO 10534-2 bestimmt. Da Luft als Probe verwendet wurde, gibt der Absorptionsgrad die Leerrohrabsorption an.

In Abbildung 6 sind die gemessenen Absorptionsgrade dargestellt. Einerseits ist der Absorptionsgrad im kleinen

Transmissionsrohr deutlich höher als im großen Transmissionsrohr. Dies ist analog zur Wellenzahl.

Andererseits ist der Absorptionsgrad bei der Messung nach der ASTM E 2611-09 größer als bei der Messung nach der ISO 10534-2. Vermutlich liegt dies daran, dass bei der ASTM E 2611-09 über eine deutlich längere Strecke gemessen wird, als bei der ISO 10534-2.

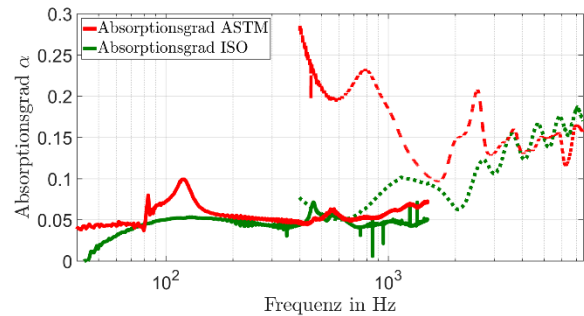


Abbildung 6: Absorptionsgrad einer Luftprobe im kleinen und großen Rohr nach der ISO 10534-2 und der ASTM E 2611-09 (durchgezogen: großes Rohr, gestrichelt: kleines Rohr)

Zusätzlich wurde rechnerisch und messtechnisch mit der ISO 10543-2 die Impedanz einer Luftschicht vor einem harten Abschluss bestimmt. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse dargestellt. Der theoretische Realteil ist Null, da von einer Verlustlosigkeit ausgegangen wurde.

Die beiden Imaginärteile liegen fast exakt übereinander. Die leichten Abweichungen zwischen beiden Kurven entstehen durch die Ungenauigkeiten bei den mechanischen Abmessungen in der theoretischen Berechnung.

Der gemessene Realteil repräsentiert die im Transmissionsrohr auftretenden Verluste.

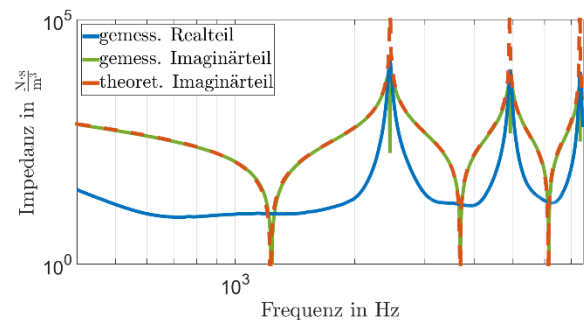


Abbildung 7: Impedanz einer Luftprobe im kleinen Rohr nach der ISO 10534-2

Eine ähnliche Messung wurde im großen Transmissionsrohr durchgeführt und hat inhaltlich gleiche Ergebnisse geliefert.

Untersuchung der Richtungsabhängigkeit von verschiedenen Proben

Es wurde in einer weiteren Messung die Richtungsabhängigkeit von Proben untersucht. Dafür wurde einerseits eine Schaumstoffprobe und andererseits eine Polyestervliesprobe untersucht. Bei der Schaumstoffprobe wurde von keiner Richtungsabhängigkeit ausgegangen, während bei der Polyestervliesprobe eine Richtungsabhängigkeit erwartet wurde.

In Abbildung 8 ist der Transmission Loss von Schaumstoffproben dargestellt. Für beide Transmissionsrohre ergeben sich jeweils sehr ähnliche Graphen, die fast übereinander liegen. Die vorhandenen Abweichungen innerhalb der jeweiligen Kurvenscharen kommen vermutlich durch eine leichte Richtungsabhängigkeit des Materials durch die Produktion zustande.

Die Abweichungen der Kurvenscharen zwischen den beiden Transmissionsrohren ergeben sich durch die beiden unterschiedlichen Probendicken: Im großen Transmissionsrohr wurde mit Würfeln mit 10 cm Kantenlänge und im kleinen Transmissionsrohr mit 2 cm Kantenlänge gemessen.

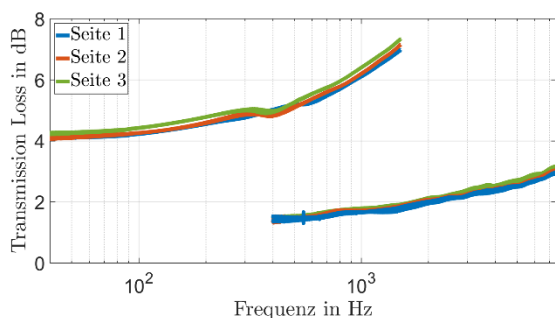


Abbildung 8: Transmission Loss einer Schaumstoffprobe im kleinen und großen Rohr nach der ASTM E 2611-09

Abbildung 9 zeigt den Transmission Loss von Polyestervliesproben. Im Vergleich zum Schaumstoff ist hier vor allem bei den Messungen im großen Transmissionsrohr eine gewisse Richtungsabhängigkeit zu erkennen. Seite 1 dämmt im Vergleich zu Seite 2 und 3 um gut 2 dB stärker. Auch im kleinen Transmissionsrohr ist Seite 1 am stärksten dämmend, wobei hier die Tendenz nicht so stark ausgeprägt ist. Die Einbrüche, die bei den Messungen im großen Transmissionsrohr zu sehen sind, entstehen vermutlich durch Biegeschwingungen der Probe.

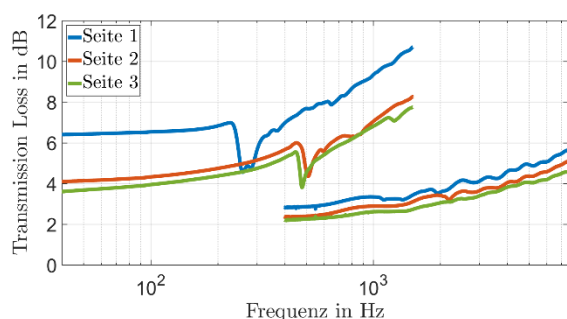


Abbildung 9: Transmission Loss einer Polyestervlies-Probe im kleinen und großen Rohr nach der ASTM E 2611-09

Messung von Schüttungen

Da auch Schüttungen als Dämmstoffe interessant sein können, wurde außerdem untersucht, ob diese in den Transmissionsrohren gemessen werden können. Die Schüttungen wurden am Probenort in der Mitte des Transmissionsrohrs durch eine Gaze gehalten. Im großen

Transmissionsrohr wurden Proben mit einer Dicke von 2 cm und 10 cm gemessen, im kleinen Transmissionsrohr nur Proben mit einer Dicke von 2 cm.

In Abbildung 10 ist die komplexe Impedanz von Strohproben dargestellt. Der Realteil ist bei beiden Probendicken im großen Rohr sehr ähnlich. Auch der Übergang zwischen beiden Transmissionsrohren erfolgt sprunghaft.

Der Imaginärteil ist bei den beiden 2 cm dicken Proben sehr ähnlich. Bei der 10 cm dicken Probe gibt es aber deutliche Abweichungen.

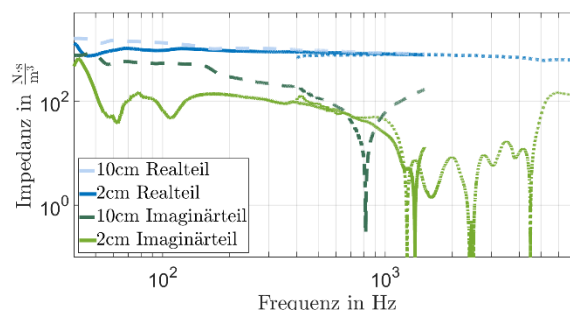


Abbildung 10: Impedanz einer Strohprobe im kleinen und großen Rohr nach der ASTM E 2611-09 (durchgezogen/gestrichelt: großes Rohr, gepunktet: kleines Rohr)

Abbildung 11 zeigt die komplexe Wellenzahl für die Strohproben. Auch hier sind die Realteile wieder gut übereinander liegend und es gibt einen sprunghaften Übergang zwischen großem und kleinem Transmissionsrohr.

Der Imaginärteil für beide Probendicken im großen Transmissionsrohr liegt übereinander. Zusätzlich gibt es einen Schnittpunkt zwischen den Kurven aus dem großen Transmissionsrohr und der Kurve des kleinen Transmissionsrohrs bei 1,5 kHz, sodass man dort den Übergang zwischen den beiden Kurven realisieren könnte.

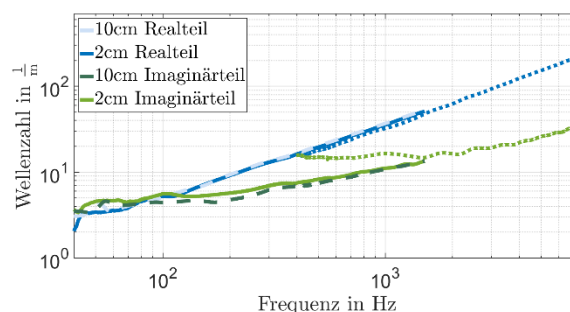


Abbildung 11: Wellenzahl einer Strohprobe im kleinen und großen Rohr nach der ASTM E 2611-09 (durchgezogen/gestrichelt: großes Rohr, gepunktet: kleines Rohr)

Einfluss der Einspannung

Wie schon bei den Polyestervliesproben zu sehen, gibt es bei gewissen Frequenzen einen starken Einbruch im Transmission Loss (und den meisten anderen Größen). Dieser Effekt tritt z.B. auch bei Mineralwollplatten auf. Diese wurden im Nachfolgenden gemessen und untersucht.

In Abbildung 12 ist der Transmission Loss für verschiedene Anzahlen von Mineralwollplatten dargestellt. Jede Platte hat eine Dicke von ca. 1,5 cm. Es wurde bei diesen Messungen eine verschiedene Anzahl an Mineralwollplatten übereinandergestapelt. Ein Würfel, der aus sieben Platten besteht, wurde außerdem in drei verschiedenen Richtungen gemessen.

Bei Beschallung entlang der Faser (Seite 2 und 3) gibt es keine Einbrüche beim Transmission Loss. Bei Beschallung senkrecht zur Faser (Seite 1) bricht in einem Bereich zwischen 200 Hz und 500 Hz der Transmission Loss sehr stark ein. Die exakte Frequenz ist dabei abhängig von der Dicke der Proben und wie stark die Probe an den Transmissionsrohrändern festgehalten wird. Dabei gilt aber, dass die Resonanz umso höher liegt, je dicker die Probe ist.

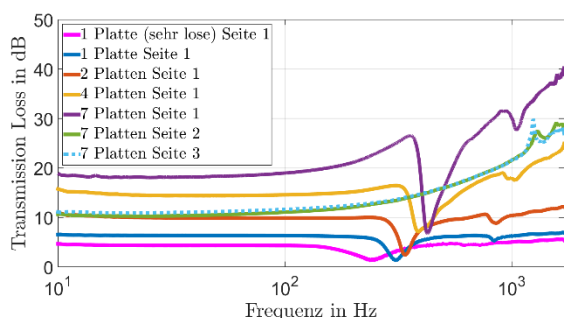


Abbildung 12: Transmission Loss von Mineralwollplatten im großen Rohr nach der ASTM E 2611-09

Durch weitere Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich der Einbruch aus Biegeschwingungen der Probe ergeben.

Da diese Einbrüche bei Messungen des gleichen Materials im kleinen Transmissionsrohr nicht beobachtet wurden, wurde ein segmentierter Probenhalter angefertigt.

Er ist in Abbildung 13 dargestellt und besteht aus einem 4x4 Gitter, welches die Probe im großen Transmissionsrohr in 16 kleinere Proben mit einer Kantenlänge von 2,5 cm unterteilt.

Diese Zerlegung verschiebt die Biegeschwingung in einen Frequenzbereich außerhalb des Messbereiches, sodass das Material unabhängig von den Abmessungen charakterisiert werden kann.

In Abbildung 14 sind die Ergebnisse der Messungen mit dem Gitter dargestellt. Es gibt keinen Einbruch mehr und der Einfluss des Gitters selbst ist vernachlässigbar.



Abbildung 13: Segmentierter Probenhalter für das große Transmissionsrohr

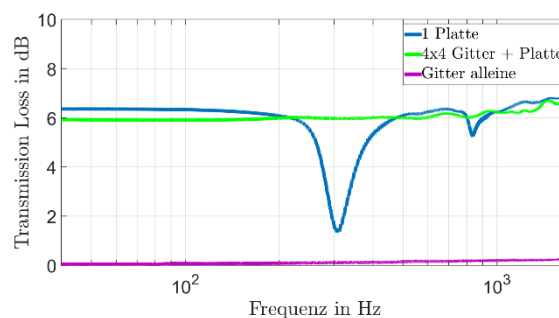


Abbildung 14: Transmission Loss einer Mineralwollplatte im großen Rohr mit und ohne Gitter, sowie das Gitter allein nach der ASTM E 2611-09

Zusammenfassung

An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wurden zwei neue Transmissionsrohre in Betrieb genommen. Sie decken insgesamt den Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 7,5 kHz ab. Die Transmissionsrohre sind entsprechend der ISO 10534-2 und der ASTM E 2611-09 benutzbar.

Es wurde in mehreren Testmessungen gezeigt, dass die Transmissionsrohre sehr gut die zu erwartenden Werte liefern. Außerdem gibt es zwischen den beiden Transmissionsrohren einen Überlappungsbereich bei dem in vielen Fällen die Kurven nahtlos ineinander übergehen.

Die Richtungsabhängigkeit von Proben wurde untersucht und ist bei entsprechenden Proben deutlich sichtbar.

Erste Messungen mit Schüttungen wurden durchgeführt. Es wurde auch hier gezeigt, dass die Ergebnisse zwischen beiden Transmissionsrohren sehr gut zueinander passen und dementsprechend die Schüttungen zuverlässig gemessen werden können.

Die Ursache für die Einbrüche von faserhaltigen Proben wurde untersucht und mit Hilfe eines segmentierten Probenhalters entsprechend gelöst.

Zusammenfassend wurden beide Transmissionsrohre in Betrieb genommen und sind nun bereit für weitere Messungen im Rahmen des Projekts.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 10534-2:2001-10: Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren – Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktionen.
- [2] ASTM E 2611-09: Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method.
- [3] Kimura, M., Kunio, J., Schuhmacher, A., Ryu, Y.: A new high-frequency impedance tube for measuring sound absorption coefficient and sound transmission loss. Inter-noise (2014)
- [4] Sgrieß, D.: Aufbau und Inbetriebnahme eines Messrohrs zur Bestimmung der Materialeigenschaften poröser Materialien [Bachelorarbeit], Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel, 2018