



Technische Universität Berlin
Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme
Institut für Strömungsmechanik und
Technische Akustik
Fachgebiet Signale und Systeme
Prof. Dr.-Ing. Michael Möser

Bachelorarbeit

Erstellen eines Versuchsaufbaus zur Bestimmung
von Transmissionsgraden poröser Materialien mit
einem Impedanzrohr

Autor: Sven Deter

Studiengang: Physikalische Ingenieurwissenschaft

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Möser

Betreuerin: M.Sc. Katja Stampka

Abgabedatum: 18.10.2013

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Datum: 18.10.2013

.....

(Unterschrift)

II Inhaltsverzeichnis

II Inhaltsverzeichnis	III
II Abbildungsverzeichnis	V
III Tabellenverzeichnis	VII
IV Variablenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Reflexion und Impedanz	3
2.2 Verlustfaktor	6
2.2.1 Absorption	7
2.2.2 Transmission	9
2.3 Stehende Wellen	11
2.4 Impedanzrohr	14
2.5 Messverfahren	16
2.5.1 Mini-Max-Verfahren	16
2.5.2 Wellentrennung	18
3 ASTM E2611-09	21
3.1 Messaufbau und -durchführung	22
3.2 Herleitung der Transmissionsberechnung	26
3.2.1 Berechnung der Transfermatrix	26
3.2.2 Berechnung der akustischen Kenngrößen	31
4 Drei-Mikrofonmethode	35
4.1 Theorie	36
5 Aufbau der Impedanzrohrerweiterung	38
5.1 Abmessungen	38
5.2 Weitere Geräte	46
6 Messungen	47
6.1 Prüfobjekte	47
6.2 Messaufbau für Impedanzrohrmessung	49
6.3 Vormessungen	50
6.3.1 Bestimmung der Korrekturfunktionen H_c	50
6.3.2 Messung des Reflexionsfaktors r_E der Rohrabschlüsse	51
6.3.3 Vergleichsmessung mit dem Kundt'schen Rohr	52
6.4 Bestimmung der Transmission und Schalldämmung	56
6.4.1 Messung im Fensterprüfstand	56
6.4.2 Messung mit erweitertem Impedanzrohr	62
6.4.3 Vergleich der Ergebnisse	64

7 Fehlerbetrachtung	66
8 Resume	67
9 Quellenverzeichnis	68
Anhang	I
A Matlab-Code	I
A.1 vierMikrofonmethode.m	I
B Prüfzeugnis des Schalldämm-Maßes im Fensterprüfstand	XIII
C Weitere Messergebnisse	XV

II Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Zerlegung einer einfallenden Welle	2
Abb. 2	Ausbreitung einer Welle im Rohr	3
Abb. 3	Ausbreitung einer Welle im Rohr mit veränderten Koordinaten	4
Abb. 4	Reflexion an einer Grenzfläche	5
Abb. 5	Struktur eines porösen Materials	8
Abb. 6	Beispielverlauf von Absorptionsgraden	9
Abb. 7	Bestimmung der Luftschalldämmung im Fensterprüfstand	10
Abb. 8	Druckverlauf von stehenden Wellen mit verschiedenen Amplituden . .	12
Abb. 9	Schnelleverlauf von stehenden Wellen mit verschiedenen Amplituden .	12
Abb. 10	Aufbau eines Impedanzrohres	14
Abb. 11	Druck- und Schnelleverlauf der ersten Moden im Rohr	15
Abb. 12	Durchführung des Mini-Max-Verfahren	17
Abb. 13	Aufbau zum Wellentrennungsverfahren	18
Abb. 14	Bestimmung der Transmission mit 4-Mikrofonmethode	21
Abb. 15	Mikrofonkalibrierung	25
Abb. 16	Wellenanteile im erweitertem Impedanzrohr	27
Abb. 17	Aufbau des Impedanzrohres für die Drei-Mikrofonmethode	35
Abb. 18	Aufbau des vorhandenen Impedanzrohres	38
Abb. 19	Skizze des Impedanzrohraufbaus	40
Abb. 20	Reale Umsetzung des Impedanzrohres	41
Abb. 21	Aufbau des Impedanzrohres (Teile)	42
Abb. 22	Aufbau des Impedanzrohres (Gesamt)	43
Abb. 23	Skizze des Halterungeinbaus	43
Abb. 24	Probenhalterung	44
Abb. 25	Eingebaute Probenhalterung	44
Abb. 26	Skizze zum Rohrabschluss	45
Abb. 27	Schallharter Rohrabschluss (Ansicht Metallplatte)	46
Abb. 28	Schallharter Rohrabschluss (Ansicht Spanplatte)	46
Abb. 29	Prüfobjekt 1 (unten) und Prüfobjekt 2 (oben)	47
Abb. 30	Prüfobjekt 3	48
Abb. 31	Prüfobjekt 4	48
Abb. 32	Messaufbau des Impedanzrohres	49
Abb. 33	Korrekturfunktionen H^c für den kleinen Mikrofonabstand	51
Abb. 34	Gemessener frequenzabhängiger Reflexionsfaktor r_E	52
Abb. 35	Reflexionsfaktor und Verlustgrad vom Prüfobjekt 1	53
Abb. 36	Reflexionsfaktor und Verlustgrad vom Prüfobjekt 2	54
Abb. 37	Reflexionsfaktor und Verlustgrad vom Prüfobjekt 3	55
Abb. 38	Reflexionsfaktor und Verlustgrad vom Prüfobjekt 4	55
Abb. 39	Prüffläche im Fensterprüfstand	56
Abb. 40	Prüfobjekt im Fensterprüfstand	57
Abb. 41	Lautsprecher im Senderaum	58
Abb. 42	Mikrofon mit Drehgalgen	59
Abb. 43	Nachhallmessung im Empfangsraum	60
Abb. 44	Abtastung der Fügstellen zwischen den Schaumstoffmatten	61
Abb. 45	Abtastung der Anschlussstellen zwischen Schaumstoffmatte und Wand	61

Abb. 46	Frequenzverlauf des Schalldämm-Maßes vom Schaumstoff	62
Abb. 47	Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung von Prüfobjekt 3 . . .	63
Abb. 48	Vergleich zwischen Durchgangsdämpfung und Schalldämm-Maß	64
Abb. 49	Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung von Prüfobjekt 1 . . .	XV
Abb. 50	Wellenzahl und Impedanz von Prüfobjekt 1	XV
Abb. 51	Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung von Prüfobjekt 2 . . .	XVI
Abb. 52	Wellenzahl und Impedanz von Prüfobjekt 2	XVI
Abb. 53	Wellenzahl und Impedanz von Prüfobjekt 4	XVII
Abb. 54	Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung von Prüfobjekt 4 . .	XVII
Abb. 55	Wellenzahl und Impedanz von Prüfobjekt 4	XVIII

III Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Übersicht über verschiedene Mikrofonkonfigurationen aus [forTesting03, S. 8]	24
--------	---	----

IV Variablenverzeichnis

a	Rohrradius
c	Schallgeschwindigkeit
d	Innerer Rohrdurchmesser
e	Eulerzahl
f	Frequenz
f_u	Obere Grenzfrequenz
f_l	Untere Grenzfrequenz
h	Rohrdurchmesser
j	Imaginäre Einheit
k	Wellenzahl
Z	Wellenwiderstand
p	Schalldruck
r	Reflexionsfaktor
t	Transmissionsfaktor
TL	Transmission Loss (Durchgangsdämpfung)
s	Abstand der Mikrofone
l	Abstand Mikrophon - Prüfoberfläche
t	Zeit
v	Schallschnelle
λ	Wellenlänge
ρ	Dichte
ω	Kreisfrequenz
x	Ortsvariable in Rohrrichtung
E	Energie
R	Reflexionsgrad
α	Absorptionsgrad
τ	Transmissionsgrad
ϕ	Phasenverschiebung
Ξ	Längenspezifischer Strömungswiderstand
σ	Porosität
κ	Strukturfaktor

1 Einleitung

Vor allem in der Bauakustik spielt die Schalldämmung von Bauteilen eine sehr große Rolle. Für die Untersuchung von akustischen Kenngrößen gibt es unterschiedlichste Verfahren. In der Praxis beschäftigen sich jedoch nicht viele Untersuchungsmethoden mit den Transmissionseigenschaften von Materialien.

In dieser Arbeit wird der Transmissionsgrad von porösen Materialien untersucht, diese eignen sich besonders gut für verschiedene akustischen Untersuchungen, da deren akustische Charakteristiken weder von der Masse noch von den Randbedingungen bei den verschiedenen Verfahren abhängig sind.

Zu Beginn dieser Untersuchung werden die theoretischen Grundlagen über die akustischen Kenngrößen erläutert. Danach werden die verschiedenen Verfahren für die Messung von diesen akustischen Eigenschaften erklärt. Die wichtigsten Verfahren, für diese Arbeit, sind die Untersuchung mittels Kundt'schem Rohr und Fensterprüfstand. Jedoch lässt sich aus diesen Methoden der Transmissionsgrad nur schwierig ermitteln. Daher wird eine neuere Methode betrachtet. Diese Methode ist in einem amerikanischen Standard der *American Society for Testing and Materials International* festgelegt.

Der Standard E26111-09 beschäftigt sich mit einer Erweiterung eines Kundt'schen Rohres. Dieses Rohr wird mit einem weiterem Rohrabschnitt erweitert und bedient sich einer Vier-Mikrofon-Methode zur Messung der akustischen Materialeigenschaften von porösen Prüfobjekten. Zur Zeit existiert jedoch keine einheitliche, europäische Normung, die sich mit diesem Standard beschäftigt. Daher werden zusätzlich, zu der Umsetzung des Standards und der Messung der akustischen Materialeigenschaften, noch Vergleichsmessungen durchgeführt, um so die Güte und Vergleichbarkeit des Verfahrens nach dem Standard zu überprüfen. Die Vergleichsverfahren sind die Untersuchung mit dem Kundt'schen und dem Fensterprüfstand.

Zusätzlich wird eine weiteres Verfahren vorgestellt, die Drei-Mikrofon-Methode. Diese Methode basiert auf dem Verfahren des Standards E2611-09.

2 Theoretische Grundlagen

In den ersten Kapiteln werden die theoretischen Grundlagen der akustischen Eigenschaften von porösen Materialien erläutert, da diese für die Untersuchung mit dem Impedanzrohr von grundlegender Bedeutung sind. Zusätzlich werden noch der Aufbau und das Funktionsprinzip des Impedanzrohres erklärt.

Zu Beginn steht die Überlegung, wie sich verhält die Energie E einer fortschreitenden Schallwelle, wenn sie auf ein poröses Material trifft. Ein Teil der Energie wird reflektiert, ein Teil wird von dem Material absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die restliche Energie, die nicht reflektiert oder absorbiert wurde, wird vom Material transmittiert. Die Größe der einzelnen Energieanteile ist von mehreren Faktoren abhängig, ausschlaggebend ist unter anderem die Impedanz.

$$E_{\text{einfallende Welle}} = E_{\text{Reflexion}} + E_{\text{Absorption}} + E_{\text{Transmission}} \quad (1)$$

Der Zusammenhang stammt aus dem „Technische Akustik“ Buch von Prof. Möser [M.Möser09]. Der Zusammenhang der Energieanteile ist in Abbildung 1 dargestellt.

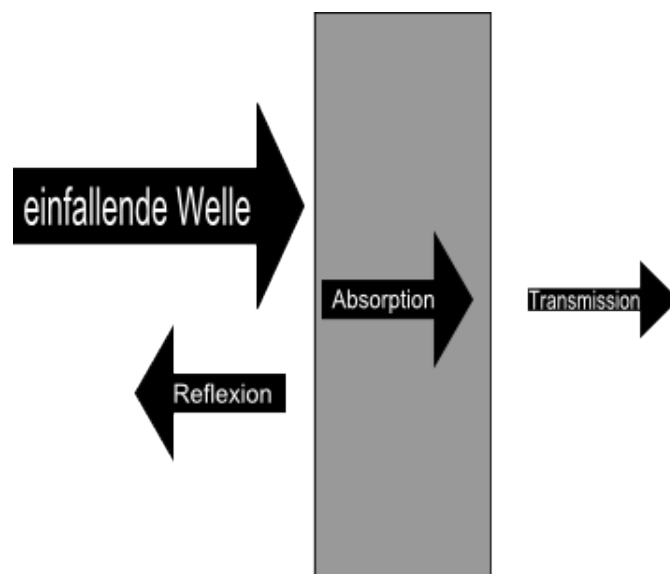


Abbildung 1: Zerlegung einer einfallenden Welle

2.1 Reflexion und Impedanz

Trifft eine Welle, die sich in positive Richtung ausbreitet, auf eine Grenzfläche, wie z.B. poröses Material, findet eine Reflexion, die mit einem Reflexionsfaktor r verbunden ist, statt. Die Herleitung ist an das Laborskript zur „Technischen Akustik“ angeknüpft. [S.Greuel06, S. 8] Die Betrachtungen der Impedanz sind aus dem „Technische Akustik“ Buch von Prof. Möser entnommen. [M.Möser09, S. 196ff]

Eine positiv, fortschreitende Welle definiert sich durch

$$p_+ = \hat{p}_+ \cdot e^{j(\omega t - kx)} . \quad (2)$$

Die Variable \hat{p} stellt dabei die Amplitude dar. Die Variable ω ist die Kreisfrequenz und k die Wellenzahl. Die negativ fortschreitende ergibt sich zu

$$p_- = \hat{p}_- \cdot e^{j(\omega t + kx)} . \quad (3)$$

Die beiden Wellenanteile sind in Abbildung 2 in einem Rohr dargestellt.

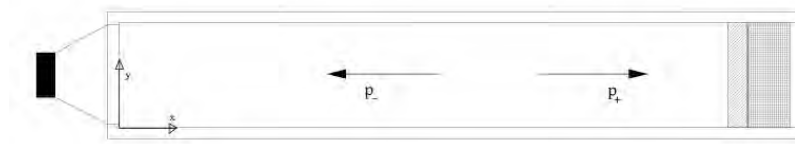


Abbildung 2: Ausbreitung einer Welle im Rohr [S.Greuel06, S. 8]

Der Reflexionsfaktor r ist definiert als das Verhältnis der komplexen Amplituden, von einfallender zu reflektierter Welle. Die Angabe des Reflexionsfaktors bezieht sich nur auf die Oberfläche des Materials.

$$r = \frac{p_- e^{jkx}}{p_+ e^{-jkx}} = R e^{j\phi_r} . \quad (4)$$

Dabei setzt sich der komplexe Reflexionsfaktor r aus dem Reflexionsgrad R und einer Phasenverschiebung ϕ zusammen. Anhand 2 lässt sich die Entstehung der Phasenverschiebung erklären. Die einfallende Welle trifft auf die Oberfläche des eingebauten Materials auf und bewegt sich durch dieses hindurch. An der Rückseite des Materials wird die Schallwelle reflektiert und bewegt sich dadurch in negativer Richtung nochmal durch das Material hindurch. Der dadurch verursachte Laufzeitunterschied zwischen einfallender und reflektierter Welle verursacht eine Phasenverschiebung.

Die Stärke der Reflexion hängt eng mit der Impedanz eines Materials zusammen. Die Impedanz ist ein Maß für den akustischen Widerstand, den eine Struktur der Schallausbreitung entgegensetzt. Sie ist als das Verhältnis aus Druck und Schnelle definiert,

$$Z = \frac{p}{v} . \quad (5)$$

Für die Herleitung des Zusammenhangs zwischen Impedanz und Reflexionsfaktor wird die Koordinatenausrichtung aus Abbildung 2 verschoben, das neue Koordinatensystem ist in Abbildung 3 zu sehen. Der Koordinatenursprung befindet sich nun auf der Strukturoberfläche.

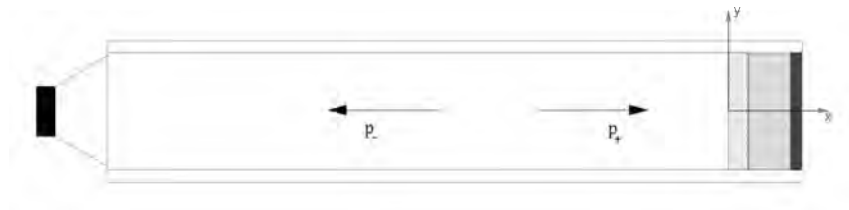


Abbildung 3: Ausbreitung einer Welle im Rohr mit verändertem Koordinatensystem [S.Greuel06, S. 8]

Dadurch ergeben sich für den Druck- und Schnelleverlauf vor der Struktur ($x < 0$)

$$p = p_0 (e^{-jkx+l} + r e^{jkx}) . \quad (6)$$

Für die Berechnung des Schnelleverlaufes kommt das akustische Trägheitsgesetz zur Anwendung,

$$u = \frac{j}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_0}{\rho c} (e^{-jkx} - r e^{jkx}) . \quad (7)$$

Werden nun der Druck- und Schnelleverlauf in Gleichung (5) eingesetzt, ergibt sich für die Impedanz

$$\frac{Z}{\rho c} = \frac{1+r}{1-r} . \quad (8)$$

Dieser Zusammenhang kann noch umformuliert werden, um die Abhängigkeit des Reflexionsfaktors von der Impedanz besser zu zeigen.

$$r = \frac{Z - \rho c}{Z + \rho c} = \frac{\frac{Z}{\rho c} - 1}{\frac{Z}{\rho c} + 1} . \quad (9)$$

Da, vor allem im Impedanzrohr, die Schallausbreitung größtenteils in Luft stattfindet, ist die Luftimpedanz von Interesse. Unter Normalbedingungen, bei einer Temperatur von $T = 20^\circ C$ und einem Luftdruck von $p = 1024 \text{ hPa}$, betragen die Dichte $\rho = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und

die Schallgeschwindigkeit $c = 340 \frac{m}{s}$, wodurch sich eine Impedanz von $Z_{Luft} = 408 \frac{kg}{m^2s}$ ergibt.

Typische Werte für den Reflexionsfaktor sind $r = -1$ für schallweiche Wände, an denen die auftreffenden Schallwellen vollständig, mit einem Phasensprung von 180° reflektiert werden, aufgrund der niedrigen Impedanz der Grenzfläche. Bei $r = 1$, für schallharte Wände, kommt es ebenfalls zu einer vollständigen Reflexion, jedoch ohne Phasensprung. Mit einem Reflexionsfaktor von $r = 0$ kommt es zu einer Anpassung der Impedanz des Ausbreitungsmediums mit der Impedanz der Grenzfläche, dass heißt die Impedanzen sind gleich und es findet somit keine Reflexion statt. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Abbildung stammt aus Vorlesungsunterlagen von Herrn Zabel. [H.Zabel09, S. 16]

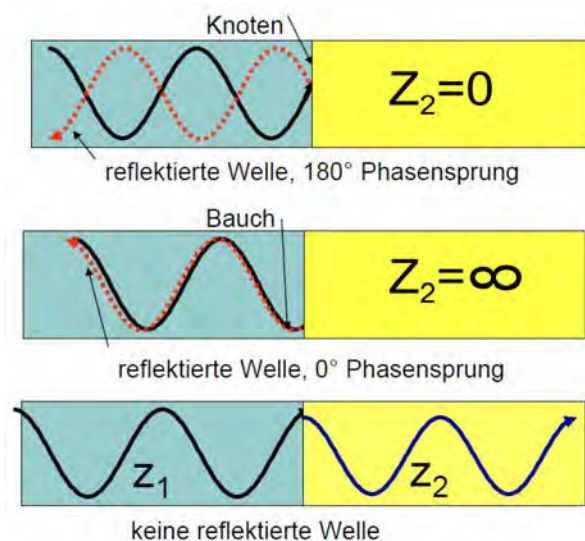


Abbildung 4: Reflexion an einer Grenzfläche [H.Zabel09, S. 16]

2.2 Verlustfaktor

Meist wird zur Beschreibung von Materialien nicht der Reflexionsfaktor, sondern der Verlustfaktor angegeben. Die Herleitungen des Verlustfaktors sind dem von Prof. Möser veröffentlichten Buch „Technische Akustik“ [M.Möser09, S.192ff] entnommen.

Der Verlustfaktor β beschreibt das Verhältnis der durch das Material hindurchfließenden Energie zur auftreffenden Energie

$$\beta = \frac{E_{\beta}}{E_{+}} . \quad (10)$$

Im Allgemeinen setzt sich der Verlustfaktor aus Absorptionsgrad α und dem Transmissionsgrad τ zusammen,

$$\beta = \alpha + \tau . \quad (11)$$

Oftmals kann bei Messungen nicht genau aufgeschlüsselt werden, welchen Anteil die einzelnen Verluste aufweisen, daher werden meistens Vereinfachungen getroffen. Näheres in Kapitel 2.2.1 und Kapitel 2.2.2.

Aus der Beziehung zwischen reflektierter und hindurchfließender Energie lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Verlustfaktor und Reflexionsfaktor formulieren. Aus der Energieerhaltung ergibt sich

$$E_{+} = E_{\beta} + E_{-} , \quad (12)$$

dabei stellt E_{-} die reflektierte Wellenenergie dar. Unter der Annahme, dass es sich bei der Wellenausbreitung um ebene Wellen handelt, ist

$$E_{-} = |r|^2 E_{+} . \quad (13)$$

Wird diese Annahme in Gleichung (12) eingesetzt, ergibt sich

$$E_{+} = \beta E_{+} + |r|^2 E_{+} , \quad (14)$$

oder anders formuliert

$$\beta = 1 - |r|^2 . \quad (15)$$

Die Herleitung des gezeigten Zusammenhanges ist aus [M.Möser09, S. 192f] entnommen.

Es existiert außer dem Zusammenhang von Reflexionsfaktor und Impedanz auch ein Zusammenhang zwischen Verlustfaktor und Impedanz. Dazu wird Gleichung (9) in Gleichung

(15) eingesetzt, wodurch sich für den Verlustfaktor

$$\beta = \frac{4 \operatorname{Re} \left\{ \frac{Z}{\rho c} \right\}}{\left(\operatorname{Re} \left\{ \frac{Z}{\rho c} \right\} + 1 \right)^2 + \left(\operatorname{Im} \left\{ \frac{Z}{\rho c} \right\} \right)^2} \quad (16)$$

ergibt. Dieser Zusammenhang ist auch unter dem „Anpassungsgesetz“ bekannt. Es ist ersichtlich, dass für den Anpassungsfall $Z = \rho c$ der Verlustfaktor maximal, $\beta = 1$, wird. Außerdem lässt sich erkennen, dass der Imaginärteil der Impedanz den Verlustfaktor verringert und damit die Absorption verschlechtert.

2.2.1 Absorption

Die Absorption ist ein Teil des allgemeinen Verlustes, dabei wird ein Teil der einfallenden Energie in Wärme umgewandelt. Dabei spielen die Reibung und Wärmeleitung des Materials eine große Rolle. Der Absorptionsgrad α beschreibt die Absorptionsfähigkeit des Materials und ist als Verhältnis zwischen absorbierte und einfallender Schallenergie definiert

$$\alpha = \frac{E_{\alpha}}{E_{+}} . \quad (17)$$

Die hergeleiteten Zusammenhänge für den Verlustfaktor gelten äquivalent für die Absorption, wenn die Vernachlässigung der Transmission als Annahme getroffen wird. Dies wird vor allem bei Materialien mit schallharten Abschlüssen angenommen, dabei ist also $\beta = \alpha$. Die Betrachtungen der Absorbereigenschaften sind aus dem „Technische Akustik“ Buch von Prof. Möser [M.Möser09, Kapitel 6.4] entnommen.

Oftmals sind für Untersuchungen die Absorptionseigenschaften von komplexen Wandaufbauten von Interesse. Dafür müssen jedoch weitere Kennzahlen der Materialien eingeführt werden.

Der längenspezifische Strömungswiderstand Ξ beschreibt den Widerstand, den ein poröses Absorbermaterial der Durchströmung der Schallwellen entgegensetzt. Der Widerstand entsteht durch den faserigen Aufbau des Materials, wodurch die Luftteilchen bei der Durchströmung gestört werden. Die Bewegungsenergie der Luftteilchen wird in den Kanälen durch die Reibung zwischen den Teilchen und den Absorberfasern in Wärme umgewandelt. Der Strömungswiderstand Ξ ist definiert als der Widerstand des Materials r_s pro Dicke des Materials d ,

$$\Xi = \frac{r_s}{d} \quad \left[\frac{Ns}{m^4} = 10^{-3} \frac{Rayl}{cm} \right] . \quad (18)$$

Der technisch, wichtigste Bereich liegt bei

$$5 \frac{\text{Rayl}}{\text{cm}} < \Xi < 100 \frac{\text{Rayl}}{\text{cm}}.$$

Die Porosität σ ist als ein Verhältnis des Volumens der luftführenden Kanäle zu dem Gesamtvolumen des porösen Materials definiert.

$$\sigma = \frac{\text{Volumen der Luftkanäle}}{\text{Gesamtvolumen}}$$

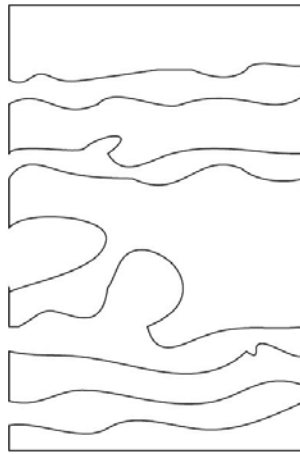


Abbildung 5: Strukturaufbau eines porösen Materials [M.Möser09, S.202]

Als Abschluss ist noch der Strukturfaktor κ zu nennen. Dieser gibt die Durchführung von den Kanälen an, dass heißt aufgrund der faserigen Struktur kommt es zu Kanälen, die nicht durchgängig durch das Absorbermaterial führen, sondern zwischendurch enden können oder in andere Kanäle münden. Dies ist in Abbildung 5 dargestellt.

Durch diese Betrachtungen des porösen Materials ändert sich die zweidimensionale Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k^2 p = 0 \quad (19)$$

zu

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k^2 \left(\kappa - j \frac{\Xi \sigma}{\omega \rho} \right) p = 0, \quad (20)$$

wobei jedoch die Wellenausbreitung in y-Richtung vernachlässigt wird. Als Lösungen der Wellengleichung ergeben sich für das poröse Material

$$p = p_0 e^{\pm j k_a x} \quad (21)$$

mit der Wellenzahl

$$k_a = k\sqrt{\kappa} \sqrt{1 - j \frac{\Xi\sigma}{\omega\rho\kappa}} . \quad (22)$$

In Abbildung 6 werden noch Beispiele für Frequenzverläufe der Absorptionsgrade von porösen Material gezeigt. Vor allem in tiefen Frequenzen verhalten sich poröse Materialien sehr schallhart und absorbieren kaum wenig Energie. Das Absorptionsverhalten verbessert sich bei höheren Frequenzen.

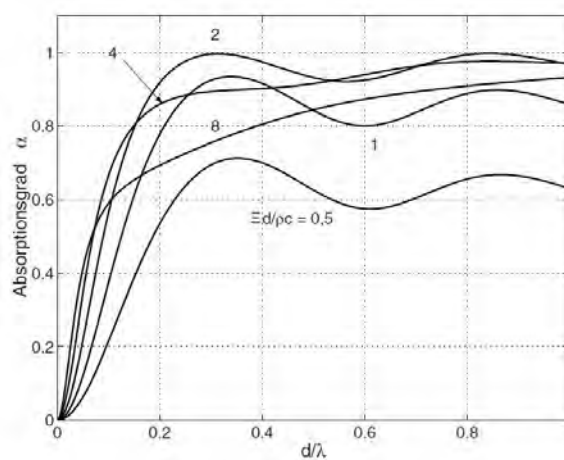


Abbildung 6: Beispielverlauf von Absorptionsgraden [M.Möser09, S.212]

2.2.2 Transmission

Als letzte, und für diese Arbeit wichtigste, charakteristische Größe bei der Wellenausbreitung an Grenzflächen, ist die Transmission zu nennen. Die Transmission wird in Anlehnung an das „Technische Akustik“ Buch von Prof. Möser [M.Möser09, S.192 u. S.255ff] betrachtet.

Der Transmissionsgrad ist äquivalent zum Absorptionsgrad definiert, als Verhältnis aus transmittierter Schallenergie zu eintreffender Schallenergie

$$\tau = \frac{E_{\tau}}{E_{+}} . \quad (23)$$

Wie in Kapitel 2.2 erklärt, setzt sich der Verlust aus Absorption und Transmission zusammen. Die Annahme des schallharten Abschlusses kann äquivalent auf, aus Kapitel 2.2.1,

eine neue Annahme angewendet werden, damit nur die Transmission betrachtet wird. Bei dünnen, leichten Abschlüssen ohne absorbierende Schicht kann $\beta = \tau$ angenommen werden, da der auftreffende Schall quasi als einzigen Verlust die Transmission hat.

Können für den Verlustfaktor jedoch keine Annahmen getroffen, können oftmals die einzelnen Anteile von Absorption und Transmission nicht genau bestimmt werden. Daher wurden mit der Zeit Verfahren entwickelt, mit denen die einzelnen Anteile untersucht werden können. Für die Absorptionsuntersuchung kann zum Beispiel das Impedanzrohr (siehe Kapitel 2.4) verwendet werden. Dieses ist nicht für die Bestimmung der Transmission geeignet, daher wird für die Transmission ein anderes Verfahren genutzt. Ein Verfahren ist zum Beispiel die Untersuchung von Materialproben im Fensterprüfstand, dessen Aufbau in Abbildung 7 dargestellt ist.

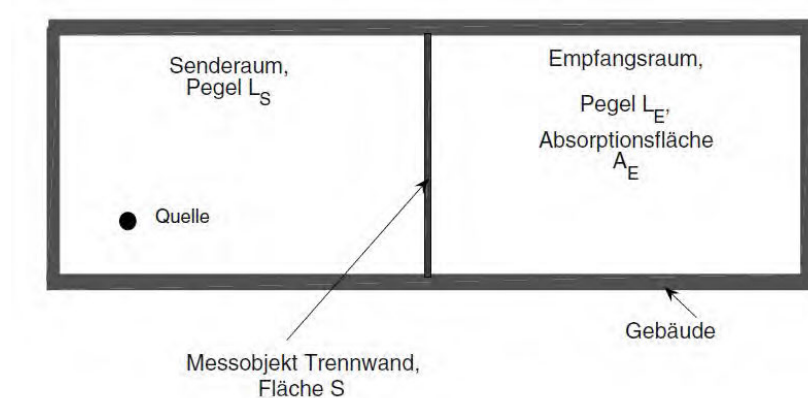


Abbildung 7: Bestimmung der Luftschalldämmung mittels Transmissionsgrad im Fensterprüfstand [M.Möser09, S. 255]

Dabei wird eine Materialprobe zwischen zwei Räumen montiert und beschallt. Die Beschallung findet im Senderraum statt. Während der Beschallung wird im Empfangsraum der transmittierte Schall der Materialprobe gemessen. Aus dem Transmissionsgrad kann das sogenannte Schalldämm-Maß bestimmt werden,

$$R = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) . \quad (24)$$

Anhand des Schalldämm-Maßes können vergleichbare Aussagen über die Dämmeigenschaften der Materialien getroffen werden. Jedoch sind dabei keine Messergebnisse eingeschlossen, die mit senkrechtem Schalleinfall gewonnen wurden. Diese müssen auf diffuse Schallfelder umgerechnet werden, damit beschäftigte sich Herr Meier in seiner Dissertation zu Verlustfaktoren im Prüfstand [A.Meier06].

2.3 Stehende Wellen

Was passiert, wenn reflektierte Wellen an weiteren Wänden wiederholt reflektiert werden? Mit dieser Frage wird sich mithilfe von Informationen aus dem Buch von Prof. Möser [M.Möser09, S. 38ff] beschäftigt.

Es kann zur Entstehung von sogenannten stehenden Wellen kommen. Stehende Wellen setzen sich dabei aus einem Wellenanteil einer positiv fortschreitenden Welle und einer reflektierten, negativ fortschreitenden Welle zusammen. Dabei wird die komplexe Druck- und Schnelleamplitude der reflektierten Welle um den Reflexionsgrad R reduziert und um die Phasenverschiebung ϕ phasenverschoben. Der Schnelleverlauf ergibt sich durch das akustische Trägheitsgesetz.

$$p(x) = \hat{p}(e^{-jkx} + re^{jkx}) \quad (25)$$

$$u(x) = \frac{\hat{p}}{\rho_0 c}(e^{-jkx} - re^{jkx}) . \quad (26)$$

Für die weitere Betrachtung gilt die Annahme, dass die Reflexionsflächen schallhart sind, wodurch eine Aussage für die Schnelle am Reflexionspunkt formuliert werden kann. Die Luftteilchen können die Reflexionsfläche nicht durchstoßen, dass heißt die Schnelle ist an dieser Stelle Null.

$$u(x = 0) = 0 \quad (27)$$

für

$$r = 1 . \quad (28)$$

Wird diese Annahme in die Gleichungen (25) und (26) eingesetzt, ergeben sich für den Druck und die Schnelle folgende Orts- und Zeitverläufe

$$p(x) = 2p_0 \cos(kx) \cos(\omega t) \quad (29)$$

$$u(x) = \frac{2p_0}{\rho_0 c} \sin(kx) \sin(\omega t) . \quad (30)$$

Werden diese Verläufe für feste Zeiten exemplarisch gezeichnet, ergibt sich das für die stehenden Wellen charakteristische Bild. In Abbildung 8 sind Druckverläufe mit unterschiedlicher Amplitude \hat{p} aufgezeigt. In Abbildung 9 sind dagegen verschiedene Schnelleverläufe der stehenden Wellen gezeigt.

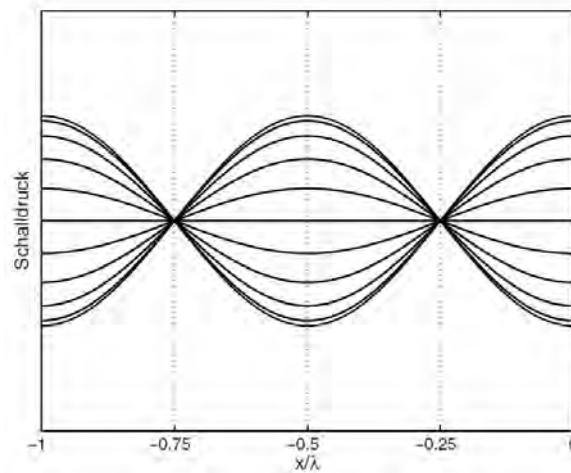


Abbildung 8: Druckverlauf von stehenden Wellen mit verschiedenen Amplituden
[M.Möser09, S. 40]

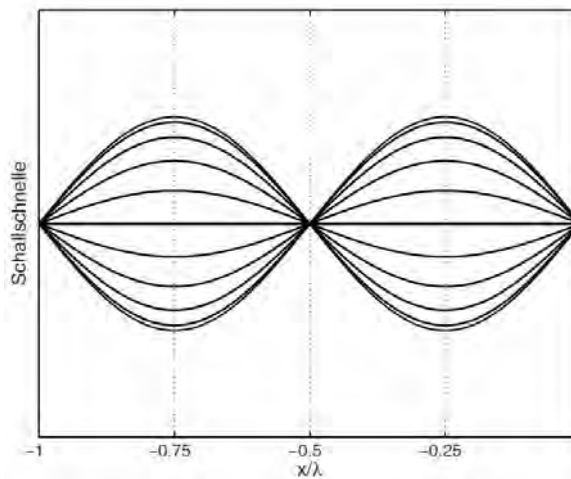


Abbildung 9: Schnelleverlauf von stehenden Wellen mit verschiedenen Amplituden
[M.Möser09, S. 40]

Aus den beiden gezeigten Abbildungen ist ersichtlich, warum dieses Wellenverhalten als stehende Welle bezeichnet wird. Die Ortsfunktionen der Druck- und Schnelleverläufe werden zeitlich nicht verschoben, sondern es kommt zu zeitlichen Amplitudenänderungen. Außerdem bilden Druck und Schnelle ein um 90° phasenverschobenes Verhältnis, verursacht durch die Kosinus- und Sinus-Terme.

Mit dem Akustik Buch von Prof. Möser [M.Möser09, S. 56ff] wird zum Abschluss noch der Energietransport bei stehenden Wellen betrachtet. Mit der Annahme, dass die Reflexion an den begrenzenden Wänden mit dem Reflexionsfaktor $r = 1$ stattfindet und es keine Luftdämpfung gibt, lässt sich eine einfache Aussage über den Energietransport treffen. Der Verlustanteil der Energie ist gleich Null, die stehende Welle kann also theoretisch,

zeitlich unendlich lange zwischen den begrenzenden Wänden hin und her laufen.

Dieser Sachverhalt kann auch mittels der Definition der Leistung nachvollzogen werden. Die Leistung einer Welle definiert sich als

$$P = I \cdot S , \quad (31)$$

wobei S die durchflossene Fläche und I die Intensität darstellt. Die Intensität definiert sich dabei durch

$$I = pu . \quad (32)$$

Werden der Druck nach Gleichung (29) und die Schnelle nach Gleichung (30) in die Intensität eingesetzt, ergibt sich

$$I(x, t) = \frac{p_0^2}{\rho_0 c} \sin 2kx \sin 2\omega t . \quad (33)$$

Wie aus den Ortsverläufen von Druck und Schnelle ersichtlich ist, ist die Intensität in jedem Druck- und Schnelleknoten zu jeder Zeit gleich Null, dass heißt es wird keine Leistung transportiert. Anhand der Energieerhaltung kann daraus geschlossen werden, dass auch an jedem anderen Ort zwischen den Knoten zeitlich keine Leistung transportiert wird.

2.4 Impedanzrohr

Für die Untersuchung der Reflexion und Absorption wird unter anderem das Impedanzrohr, auch bekannt unter dem Namen Kundt'sches Rohr, verwendet. Das Impedanzrohr ist ein Rohr, welches definierte Eigenschaften besitzt, um die akustischen Eigenschaften der Materialprobe bestimmen zu können. Die Grundlagen stammen aus dem Buch von Prof. Möser [M.Möser09, S. 182ff].

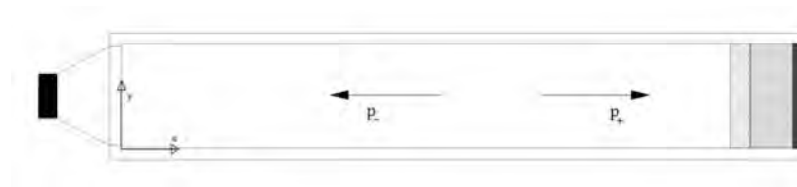


Abbildung 10: Aufbau eines Impedanzrohres [S.Greuel06, S. 8]

Das Impedanzrohr, welches in Abbildung 10 dargestellt ist, ist ein langes Rohr, welches eine schallharte Berandung besitzt. Am Anfang des Rohres befindet sich ein Lautsprecher, mit dem die eingeschlossene Luft im Rohr, meistens mit akustischem Rauschen, angeregt wird. Das Ende des Rohres schließt eine Materialprobe mit einem schallharten Abschluss ab. Aufgrund der schallharten Berandung kommt es innerhalb des Rohres vor allem zur Schallausbreitung in Rohrlängsrichtung.

Wird der Druckverlauf im 2-dimensionalen Rohr betrachtet, ergibt sich der Ansatz

$$p = \hat{p}e^{-jk_x x}(e^{-jk_y y} + r_y e^{jk_y y}) \quad (34)$$

Die x-Richtung definiert dabei die Längsausbreitung und die y-Richtung die Querverteilung im Rohr. Wird die schallharte Berandung als Randbedingung betrachtet, $\frac{\partial p}{\partial y}|_{y=0} = \frac{\partial p}{\partial y}|_{y=h} = 0$, ergibt sich ein Reflexionsfaktor in Rohrquerrichtung von $r_y = 1$. Werden die Randbedingungen und der Reflexionsfaktor in Gleichung (34) eingesetzt, ergibt sich die sogenannte Eigenwertgleichung mit den Lösungen für die Querwellenzahl

$$k_y = \frac{n\pi}{h}; \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Zu jedem Eigenwert existiert eine bestimmte Druckverteilung, die sogenannte „Mode“ oder auch „Eigenfunktion“. Die Moden beschreiben den Zustand des Druckes im Rohrquerschnitt. Die Betrachtung der Druckmoden lässt auch auf die Betrachtung der Schnelleverläufe anwenden, analog zum Trägheitsgesetz. Die Verläufe der ersten Druck- und Schnelleverläufe sind in Abbildung 11 dargestellt.

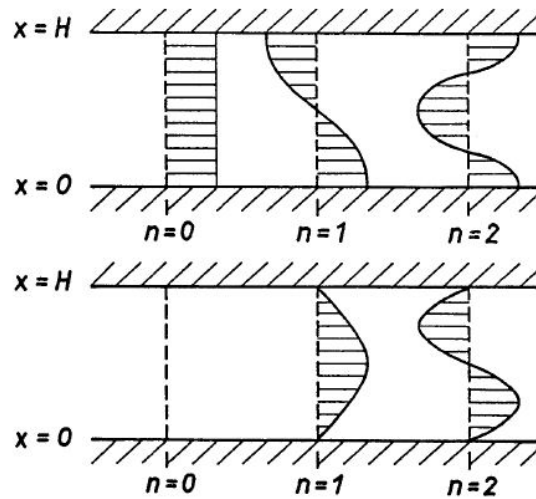


Abbildung 11: Druckverlauf (oben) und Schnelleverlauf (unten) der ersten Moden im Rohr [S.Greuel06, S. 12]

Durch Überlagerung der Moden ergibt sich der gesamte Druckverlauf im Rohr zu

$$p = \sum_{n=0}^{\infty} \hat{p}_n \cos\left(\frac{n\pi y}{h}\right) e^{-jk_x x} . \quad (35)$$

Jede Mode breitet sich jedoch nun mit einer bestimmten Wellenzahl aus. Für die Bestimmung dieser wird die zweidimensionale Wellengleichung betrachtet.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + k^2 p = 0 . \quad (36)$$

Wird der gesamte Druckverlauf aus Gleichung (35) in die Wellengleichung eingesetzt, ergibt sich für die Wellenzahl der Rohrlängsausbreitung

$$k_x^2 = k^2 - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 . \quad (37)$$

Für die Wellenzahl ergeben sich daraus zwei Lösungen,

$$k_x = \begin{cases} \sqrt{k^2 - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2}, & |k| > \frac{n\pi}{h}, \\ -j\sqrt{\left(\frac{n\pi}{h}\right)^2 - k^2}, & |k| < \frac{n\pi}{h} \end{cases} . \quad (38)$$

Ist die Wellenzahl reell, breitet sich die dazugehörige Welle im Rohr aus. Ist die Wellenzahl jedoch komplex, entsteht ein exponentiell abklingendes Nahfeld und es findet keine

weitreichende Schallausbreitung statt. Die n-te Mode ist ab einer Grenzfrequenz f_n

$$f_n = n \frac{c}{2h} \quad (39)$$

ausbreitungsfähig. Daher wird diese Frequenz auch als cut-on Frequenz bekannt. Für die Untersuchung mit dem Impedanzrohr wird die erste cut-on Frequenz als obere Grenzfrequenz gewählt, da sich unterhalb dieser Frequenz nur ebene Wellen ausbreiten. Für die Messung des Reflexionsfaktors und des Absorptionsgrades wird also nur ein senkrechter Schalleinfall betrachtet.

2.5 Messverfahren

Zur Messung mit dem Impedanzrohr gibt es zwei verschiedene Methoden. Zum einen das Mini-Max-Verfahren, bei dem der Druckverlauf im Rohr mit einer Messsonde untersucht wird. Anhand dieser Untersuchung können Druckmaxima und -minima ermittelt werden, mit deren Hilfe die Reflexion und Absorption untersucht werden kann. Ein anderes Verfahren ist das Wellentrennungsverfahren. Bei diesem Verfahren wird das Schallfeld im Impedanz mit zwei Mikrofonen gemessen. Aus den zwei Druckverläufen an den Mikrofonen können ebenso der Reflexionsfaktor und der Absorptionsgrad ermittelt werden.

2.5.1 Mini-Max-Verfahren

Eine Methode zur Untersuchung der akustischen Eigenschaften mit dem Impedanzrohr ist das Mini-Max-Verfahren, auch unter Stehwellenverhältnis bekannt. Dieses Verfahren ist in der DIN EN ISO 10534-1 genormt und basiert auf der Untersuchung mit einem Sondenmikrofon. Da sich diese Arbeit vor allem mit einem anderen Messverfahren, der Wellentrennung, siehe Kapitel 2.5.2 beschäftigt, soll das Mini-Max-Verfahren für die Vollständigkeit der theoretischen Grundlagen vorgestellt werden.

Die theoretischen Grundlagen stammen aus dem „Technische Akustik“ Buch von Prof. Möser [M.Möser09, S. 191f].

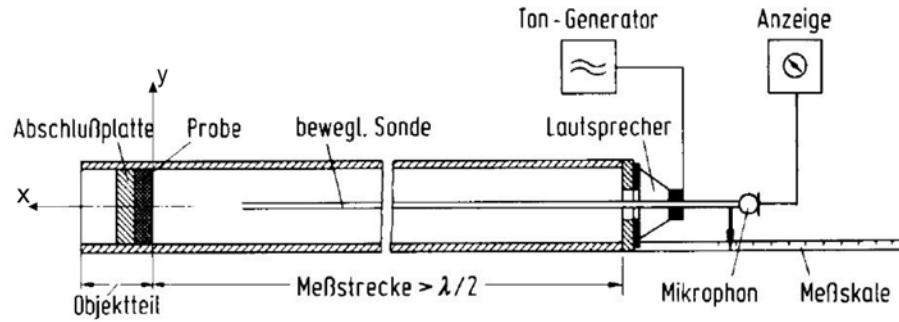


Abbildung 12: Durchführung des Mini-Max-Verfahren aus [M.Möser09, S. 190]

Der Aufbau des Impedanzrohres zur Untersuchung mit dem Mini-Max-Verfahren ist in Abbildung 12 dargestellt. Für dieses Verfahren wird das Impedanz aus Kapitel 2.4 mit einer Messsonde erweitert. Zusätzlich wird noch eine Messskala angebracht. Auf dieser Skala kann die Position der Sonde im Impedanzrohr abgelesen werden. Mittels eines Signalgenerators wird ein Signal erzeugt. Zwischen der Lautsprechermembran und dem Abschluss des Impedanzrohres bilden sich stehende Wellen aus. Mithilfe der beweglichen Messsonde kann die Lage der Druckminima und -maxima ermittelt werden. Für die Berechnung des Reflexionsgrades wird zu Beginn der Ortsverlauf des quadrierten Effektivwertes betrachtet. Als Grundlage dient der allgemeine Druckverlauf aus Gleichung (25),

$$\tilde{p}^2 = \frac{1}{2}|p|^2 = \frac{1}{2}pp^* = \frac{1}{2}\tilde{p}^2 (e^{-jkx} + Re^{j(kx+\phi)}) (e^{jkx} + Re^{-j(kx+\phi)}) \quad (40)$$

$$= \frac{1}{2}p_0^2 [1 + R^2 + 2R\cos(2kx + \phi)] \quad (41)$$

Wird der ortsabhängige Term betrachtet, liegen die Maxima bzw. Minima bei $\cos(2kx + \phi) = 1$ bzw. $\cos(2kx + \phi) = -1$. Daraus ergeben sich die Druckmaxima zu

$$\tilde{p}_{max}^2 = \frac{1}{2}p_0^2(1 + R^2 + 2R) = \frac{1}{2}p_0^2(1 + R)^2; \quad 2kx + \phi = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots \quad (42)$$

und für die Druckminima gilt

$$\tilde{p}_{min}^2 = \frac{1}{2}p_0^2(1 + R^2 - 2R) = \frac{1}{2}p_0^2(1 - R)^2; \quad 2kx + \phi = 0, \pm \pi, \pm 3\pi, \dots \quad (43)$$

Daraus kann ein Stehwellenverhältnis μ gebildet werden

$$\mu = \frac{\tilde{p}_{min}}{\tilde{p}_{max}} = \frac{1 - R}{1 + R} \quad (44)$$

oder umgestellt nach dem Reflexionsgrad

$$R = \frac{1 - \mu}{1 + \mu} . \quad (45)$$

Für die Phasenverschiebung ϕ des Reflexionsfaktors wird die Lage des ersten Minimums vor dem Prüfling genutzt. Also ist $n = 1$ und die Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Daraus ergibt sich die Phase

$$\phi = \pi \left(\frac{4}{\lambda} |x_{min}| \pm 1 \right) . \quad (46)$$

Der Nachteil des Mini-Max-Verfahrens ist jedoch, dass die Untersuchung des Reflexionsfaktors und des Absorptionsgrades nur für eine feste Frequenz durchgeführt werden kann und nicht für ein Spektrum von Frequenzen. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Lageuntersuchung der Minima und Maxima manuell geschieht, wodurch es zu erheblichen Ungenauigkeiten kommen kann.

2.5.2 Wellentrennung

Bei der Wellentrennung werden ähnlich wie bei dem Mini-Max-Verfahren die Amplituden der Wellenausbreitung betrachtet. Der Unterschied ist jedoch, dass zwei Mikrofone im Abstand s an zwei verschiedenen Orten in die Wand des Impedanzrohres eingelassen sind, mit denen die Druckverläufe an der Rohrwand untersucht werden. Der grundlegende Aufbau zur Messung mit Wellentrennungsverfahren ist in Abbildung 13 gezeigt. Die Grundlagen der Wellentrennung sind aus der DIN-Norm „DIN EN ISO 10534-2“ [fürNormung10] entnommen.

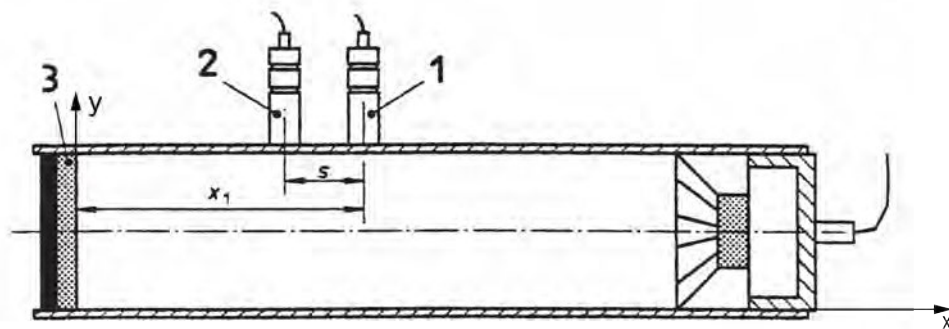


Abbildung 13: Aufbau zum Wellentrennungsverfahren [fürNormung10, S. 7]

Mit den zwei Drücken $p_1(x = x_1)$ und $p_2(x = x_1 - s)$ kann der Quotient $\frac{p_2}{p_1}$ ermittelt

werden. Dieser Quotient wird in diesem Zusammenhang auch Übertragungs- funktion genannt, worauf die Untersuchungen in dieser Arbeit beruhen. Die Druckverläufe an den beiden Mikrofonpositionen sind

$$p_1 = e^{jkx_1} + re^{-jkx_1} \quad (47)$$

$$p_2 = e^{jk(x_1-s)} + re^{-jk(x_1-s)} . \quad (48)$$

Daraus ergibt sich die bereits erwähnte Übertragungsfunktion

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{jk(x_1-s)} + re^{-jk(x_1-s)}}{e^{jkx_1} + re^{-jkx_1}} . \quad (49)$$

Wird die Übertragungsfunktion nach dem Reflexionsfaktor umgestellt, ergibt sich

$$r = \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{jks} - H_{12}} e^{2jkx_1} . \quad (50)$$

Dieser Ausdruck für den Reflexionsfaktor lässt sich noch vereinfachen. Dazu wird die Übertragungsfunktion H_{12} in die hinlaufende Welle H_+ und die rücklaufende Welle H_- separiert,

$$H_+ = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = \frac{e^{jk(x_1-s)}}{e^{jkx_1}} = e^{-jks} , \quad (51)$$

$$H_- = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = \frac{re^{-jk(x_1-s)}}{re^{-jkx_1}} = e^{jks} . \quad (52)$$

Werden diese beiden Vereinfachungen in die Gleichung (50) eingesetzt, ergibt sich

$$r = \frac{H_{12} - H_+}{H_- - H_{12}} e^{2jkx_1} . \quad (53)$$

In Gleichung (53) ist die Übertragungsfunktion H_{12} nur noch von den eindeutig festgelegten H_+ und H_- abhängig, da diese eindeutig mit der Frequenz und dem Mikrofonabstand festgelegt werden können. Der Absorptionsgrad kann nach

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (54)$$

berechnet werden, da durch den schallharten Abschluss der Verlustgrad β nur durch den Absorptionsgrad α bestimmt wird . Es kann auch die Impedanz nach Gleichung (8) berechnet werden.

Wie bereits in Kapitel 2.5.1 erwähnt, können beim Mini-Max-Verfahren nur einzelne Frequenzen untersucht werden. Im Gegensatz dazu kann bei der Wellentrennung mit breit-

bandigem Rauschen angeregt werden und somit können die akustischen Eigenschaften über mehrere Frequenzen untersucht werden. Jedoch kann es bei der Wellentrennung zu Fehlern bei der Berechnung der Übertragungsfunktion kommen, aufgrund von unterschiedlichen Phasengängen der verwendeten Mikrofone. Um diesen Fehler korrigieren zu können, wird die Messung mit dem Impedanzrohr wiederholt, jedoch werden dabei die Mikrofonpositionen vertauscht. Damit werden die Übertragungsfunktionen H_{12}^I , für die Standardkonfiguration, und H_{12}^{II} , für die vertauschten Mikrofonpositionen, gemessen. Es ist auf den genauen Einbau der Mikrofone zu achten, da es bei Ungenauigkeiten zu weiteren Fehlern in der Berechnung kommen kann. Die korrigierte Übertragungsfunktion ergibt sich dann durch

$$H_{12} = \sqrt{H_{12}^I H_{12}^{II}} = |H_{12}| e^{j\phi} . \quad (55)$$

3 ASTM E2611-09

Für die Transmissionsgradbestimmung kann ein Impedanzrohr erweitert werden, so dass auch die Transmission eines Prüfobjektes untersucht werden kann. Dieses Vorgehen wird unter anderem in dem Standard E2611-09 der *American Society for Testing and Materials International* behandelt und erläutert.

Für die Betrachtungen der Erweiterung des Impedanzrohres wird der Standard E2611-09 [forTesting03] als Grundlage verwendet.

Der Standard dient der Untersuchung des Transmissionsgrades und des Schalldämm-Maßes mithilfe der Methode der Übertragungsfunktion (vgl. die DIN-Norm „DIN EN ISO 10534-2“ [fürNormung10]). Der Messaufbau zur Messung mit dem erweiterten Impedanzrohr ist in Abbildung 14 dargestellt.

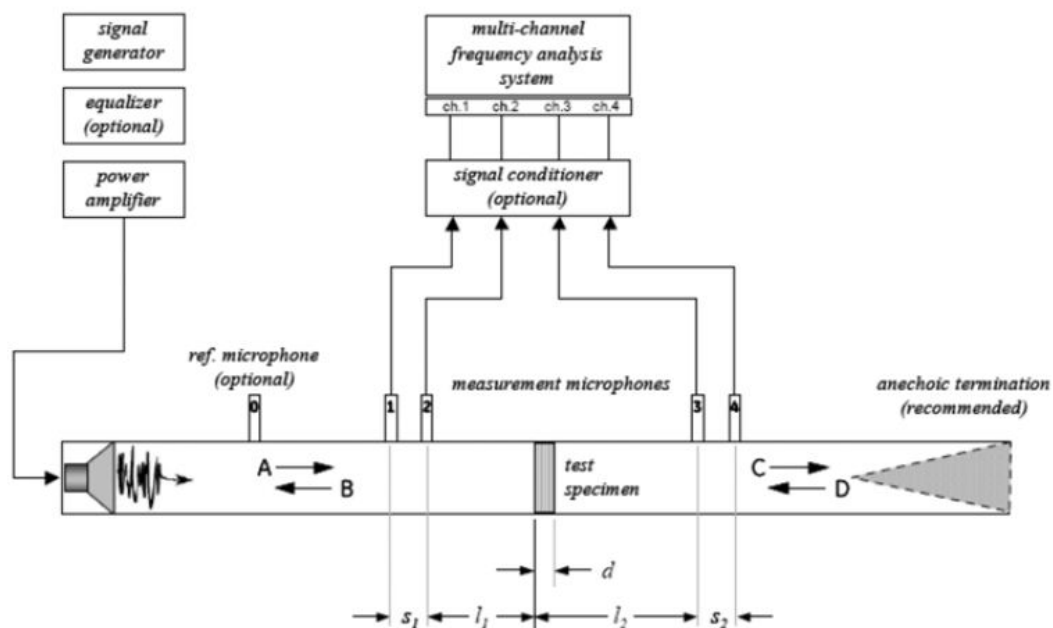


Abbildung 14: Bestimmung der Transmission [forTesting03, S. 6]

Um die Transmission messen zu können, werden zusätzlich zu den vorhandenen zwei Mikrofonen vor dem Prüfobjekt noch zwei weitere Mikrofone hinter dem Prüfobjekt eingebaut. Mit dem Lautsprecher am Anfang des Rohres werden Wellen, die bis zur cut-on Frequenz eben sind, im Rohr erzeugt. Die vier Mikrofone messen an der Rohrbe-

randung die Druckamplituden. Mithilfe der Drücke können auch die Schnellen ermittelt werden (siehe Gleichung (7)), mit denen dann die Übertragungsfunktion berechnet werden kann. Anhand der Übertragungsfunktionen können der Transmissionsfaktor und die Durchgangsdämpfung berechnet werden. Zusätzlich können auch die anderen akustischen Kenngrößen, wie Absorptiongrad, Reflexionsfaktor, die Impedanz und die Wellenzahl des Prüfobjektes ermittelt werden (siehe Kapitel 3.2).

3.1 Messaufbau und -durchführung

An ein Impedanzrohr, mit Lautsprecher, Mikrofonen und Prüfobjekt, bereits bekannt aus Kapitel 2.5.2, wird eine Rohrerweiterung montiert. Die beiden Rohrteile werden durch eine Halterung des Prüfobjektes miteinander verbunden. In beiden Rohrabschnitten sind jeweils zwei Mikrofone in einem bestimmten Abstand zum Prüfobjekt montiert. Das Rohr wird mit einem veränderbarem Rohrabschluss abgeschlossen. Der grundsätzliche Aufbau ist in Abbildung 14 gezeigt.

Die beiden Rohrabschnitte bestehen aus einem im Durchmesser gleichbleibenden, massivem Material, damit die Berandung als schallhart angenommen werden kann. Der Frequenzbereich in dem das Rohr genutzt werden kann, ist nach oben und unten begrenzt. Die obere Grenzfrequenz ist äquivalent zur cut-on Frequenz, aus Gleichung (39), durch die Querabmessung des Rohres d und der Schallgeschwindigkeit c bestimmt. Nach Gleichung (2) aus dem Standard berechnet sich die obere Grenzfrequenz nach

$$f_u < \frac{0,586c}{d} . \quad (56)$$

Eine andere Bedingung für die obere Grenzfrequenz lässt sich auch durch die Mikrofonabstände definieren. Der Mikrofonabstand s wird nach Gleichung (3) des Standards durch

$$s << \frac{c}{2f_u} , \quad (57)$$

berechnet, jedoch wird ein maximaler Abstand von 80% des berechneten Mikrofonabstandes empfohlen. Außer für die Frequenzen, den Durchmesser und die Mikrofonabstände werden im Standard noch weitere Angaben zu den Abmaßen des Impedanzrohres empfohlen.

Alle vier Mikrofone sollten die gleich großen Mikrofonmembranen aufweisen, diese sollten im Vergleich zum Mikrofonabstand klein sein und außerdem kleiner als ein Fünftel der kleinsten nutzbaren Wellenlänge, damit die Druckamplituden auch noch bei kurzen Wel-

lenlängen gemessen können. Der Abstand der Mikrofone zu den beidseitigen Oberfläche des Prüfobjektes wird durch die Charakteristik der beiden Oberflächen in beide Richtungen bestimmt. Bei glatten Oberflächen reicht bereits die Hälfte des Rohrdurchmessers aus, um Ergebnisse zu erhalten, die keine Einflüsse von möglichen, höheren Moden aufweisen, die sich im Nahfeld der Prüfoberfläche bilden können. Bei nicht homogenen Oberflächen wird ein Abstand von mindestens einem Rohrdurchmesser empfohlen. Je rauer die Prüfoberfläche ist, desto größer sollte auch der Abstand des nächsten Mikrophones werden.

Bei der Montage der Mikrofone ist auf eine sehr hohe Genauigkeit zu achten, da es sonst zu Messfehlern kommen kann. Für die Montage des Prüfobjektes muss gewährleistet werden, dass sich jede Materialprobe an der gleichen Stelle im Rohr befindet und gleich eingespannt ist, da es sonst zu Messungenauigkeiten beim Transmissionsfaktor führen kann. Das Material sollte sich passgenau im Probenhalter befestigt sein. Sollte das Material jedoch nicht genau mit der Rohrwand abschließen, sondern einen Spalt aufweisen, muss dieser mit einer flexiblen Dichtung abgedichtet werden, da es sonst aufgrund der Undichtigkeiten zu erhöhter Transmission kommt und die Messwerte dadurch verfälscht werden.

Zusätzlich zu den Abmessungen des Rohres und der Mikrofone werden im Standard die Eigenschaften des Rohrabschlusses empfohlen. Für die eine Variante des Abschlusses wird ein schallabsorbierender Rohrabschluss, in Keil- oder Pyramidenform, empfohlen. Der Keil sollte mindestens eine Länge von 30 cm haben und das Rohr komplett abdichten. Außerdem muss der Abschluss leicht montierbar sein, da die Messung zweimal mit unterschiedlichen Abschlüssen durchgeführt wird. Eine genaue Vorgabe für den zweiten Rohrabschluss gibt es nicht, der Abschluss sollte nur einen anderen Reflexionsfaktor als der schallabsorbierende Abschluss aufweisen.

Wurde bei der Montage auf hohe Genauigkeit geachtet, können mit den vier Mikrofonen die einzelnen Übertragungsfunktionen gemessen werden. Dazu wird zuerst ein Referenzsignal festgelegt, dies kann das Lautsprecher-signal sein oder auch eines der Mikrofon-signale. In der Regel wird das erste, Lautsprecher nächste, Mikrofon genutzt. Mithilfe eines FFT-Analyzer können daraus die benötigten Übertragungsfunktionen berechnet werden. Es gibt mehrere Varianten der Messreihenfolge. Die schnellste Variante ist dabei, mit den vier Mikrofonen gleichzeitig die Druckverläufe aufzuzeichnen und diese zu analysieren. Es gibt jedoch auch die Variante nur zwei Mikrofone zu nutzen und diese nacheinander an die interessierenden Orte zu montieren und die Übertragungsfunktionen einzeln zu erfassen. Dabei ist darauf zu achten, dass die nicht genutzten Öffnungen verschlossen sind, damit die Umgebungsgeräusche keinen Einfluss auf die Messung haben. Die verschiedenen Varianten sind zur Übersicht in Tabelle 1 aufgezeigt. Die Mikrofonpositionen sind äquivalent

zu den Positionen in Abbildung 14.

Anzahl Kanäle	Anzahl Mikrofone	Referenzsignal	zumessende Übertragungsfunktionen	Korrekturfunktionen
2	1	Lautsprecher	$H_{1s}, H_{2s}, H_{3s}, H_{4s}$	-
2	2	Mikrofon 1 in Position 0	$H_{10}, H_{20}, H_{30}, H_{40}$	-
2	2	Mikrofon 1 in Position 1	$H_{11}, H_{21}, H_{31}, H_{41}$	-
4	4	Mikrofon 1 in Position 1	$H_{11}, H_{21}, H_{31}, H_{41}$	$H_{21}^c, H_{31}^c, H_{41}^c$
5	4	Lautsprecher	$H_{1s}, H_{2s}, H_{3s}, H_{4s}$	$H_{1s}^c, H_{2s}^c, H_{3s}^c, H_{4s}^c$
5	5	Mikrofon 5 in Position 0	$H_{10}, H_{20}, H_{30}, H_{40}$	$H_{10}^c, H_{20}^c, H_{30}^c, H_{40}^c$

Tabelle 1: Übersicht über verschiedene Mikrofonkonfigurationen aus [forTesting03, S. 8]

Die alternativen Varianten sind jedoch zeitaufwendig und auch fehleranfälliger, durch die wiederholte Änderung der Messorte. Daher wird die vier Kanal Methode bevorzugt, jedoch nur wenn ein 4-Kanal-Analyzer zur Verfügung steht.

Aufgrund von unterschiedlichen Phasengängen der Mikrofone und kleinen Unterschieden in den Amplituden- und Phasenverläufen der komplexen Druckverläufe kann es bei der Berechnung der Transmission zu kleinen Ungenauigkeiten kommen. Für die Korrektur der Übertragungsfunktion gibt es, äquivalent zur DIN-Norm „DIN EN ISO 10534-2“ [fürNormung10, S. 1], eine Korrekturanpassung. Dazu wird die Messung in der Standardkonfiguration, und danach wird die Messung der Übertragungsfunktion nochmals, jedoch mit vertauschter Mikrofonpositionierung, durchgeführt. Die Konfigurationen sind grundsätzlich in Abbildung 15 dargestellt.

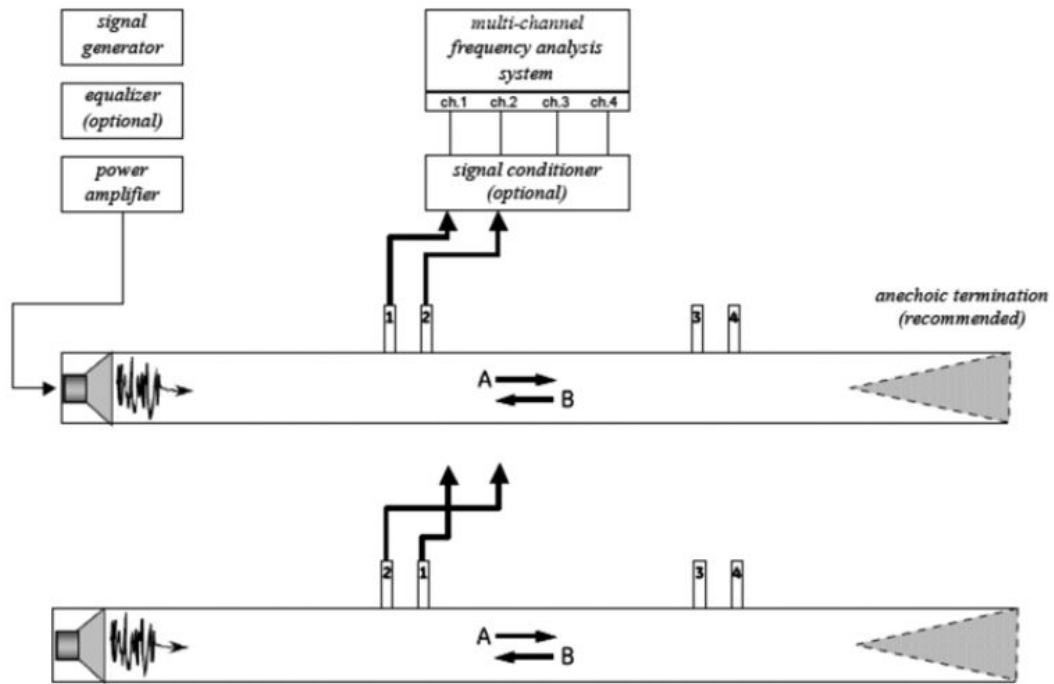


Abbildung 15: Mikrophonkalibrierung aus [forTesting03, S. 7]

Beide Messungen werden ohne Prüfobjekt und mit dem gleichem Rohrabschluss vollzogen. Dabei wird im Standard der absorbierende Abschluss empfohlen. Außerdem sollten während der Kalibrierung die nicht genutzten Mikrofonöffnungen verschlossen sein, damit keine Umgebungsgeräusche die Ergebnisse verfälschen. Als ersten Schritt werden für die Kalibrierung die komplexen Übertragungsfunktionen in Standardkonfiguration H^I gemessen und ausgewertet, sodass sich

$$H_{n,ref}^I = |H^I|e^{j\varphi^I} = H_r^I + jH_i^I \quad (58)$$

ergibt. Der Anteil H_r stellt den Realteil der Übertragungsfunktion dar. Der Anteil H_i ist der imaginäre Teil der Übertragungsfunktion. Danach werden im zweiten Schritt die Mikrofonpositionen für die einzelnen Mikrofone vertauscht und es ergeben sich die komplexen Übertragungsfunktionen H^{II}

$$H_{n,ref}^{II} = |H^{II}|e^{j\varphi^{II}} = H_r^{II} + jH_i^{II} . \quad (59)$$

Als nächsten Schritt wird die Korrekturfunktion berechnet, es muss jedoch darauf geachtet

werden, dass das Referenzsignal bei allen Übertragungsfunktionen dieselbe ist,

$$H_{n,ref}^c = \sqrt{H^I \cdot H^{II}} = |H^c| e^{j\varphi^c} . \quad (60)$$

Als letzten Schritt der Korrektur wird jede gemessene Übertragungsfunktion durch die Korrekturfunktion dividiert

$$H_{n,ref} = \frac{\overline{H}_{n,ref}}{H^c} , \quad (61)$$

dabei ist \overline{H} die nicht korrigierte Übertragungsfunktion.

3.2 Herleitung der Transmissionsberechnung

Für die Berechnungen der akustischen Kenngrößen, werden in diesem und im nächsten Kapitel zahlreiche Zusammenhänge zwischen den einzelnen Wellenanteilen in den beiden Rohrteilen hergeleitet. Daraus können mithilfe einer Transfermatrix T die Kenngrößen berechnet werden. Die Berechnungsvorschriften stammen aus dem Standard E2611-09 [forTesting03]. Die Herleitungen sind teilweise an die theoretischen Herleitungen der Dissertation von W.Truppe, F.Kappler [W.Truppe04] angeknüpft.

3.2.1 Berechnung der Transfermatrix

Für die Berechnung des Transmissionsgrades werden zu Beginn die Wellenanteile in den beiden Rohrabschnitten betrachtet. Die Wellenanteile sind in Abbildung 16 aufgezeigt. Im vorderen Rohrabschnitt setzt sich der Druckverlauf der Schallwelle p_1 aus der zum Prüfobjekt hinlaufenden Welle p_{11} und der rücklaufenden Welle p_{12} zusammen. Im hinteren Rohrabschnitt gibt es ebenfalls eine hinlaufende, in x- Richtung ab $x > d$, Welle p_{21} und eine rücklaufende Welle p_{22} . Diese bilden zusammen den Druckverlauf der Schallwelle im hinteren Rohrabschnitt p_2 .

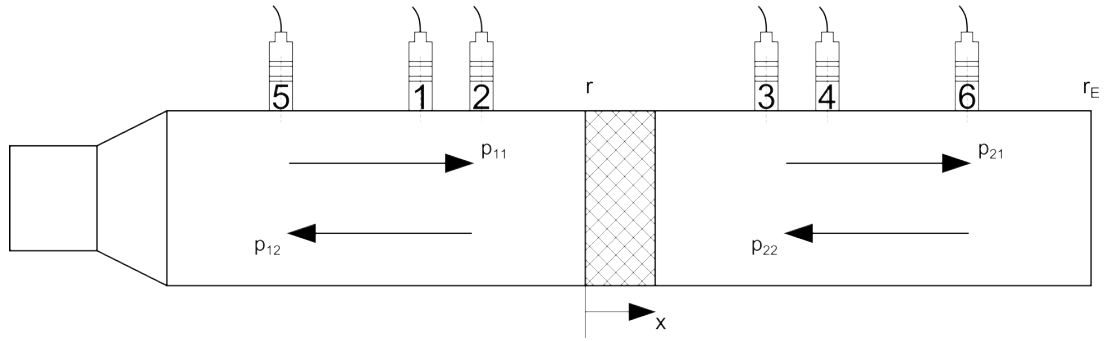


Abbildung 16: Wellenanteile im erweitertem Impedanzrohr

Die Bestimmung der Wellenanteile wird nach dem Standard E2611-09 über die Übertragungsfunktionen vorgenommen. Der Druckverlauf am Mikrofon 1 ergibt sich aus

$$p_{x_1} = p_{11} + p_{12} = \hat{p}_{11}e^{-jkx_1} + \hat{p}_{12}e^{jkx_1} . \quad (62)$$

Für die Lage der Mikrofone werden ab hier die Koordinaten aus Abbildung 14 genutzt. Daraus ergeben sich die Lagen der Mikrofone zu

$$x_1 = -(l_1 + s_1) \quad (63)$$

$$x_2 = -l_1 \quad (64)$$

$$x_3 = l_2 \quad (65)$$

$$x_4 = l_2 + s_2 \quad (66)$$

Damit ergibt sich p_{x_1} nun zu

$$p_{x_1} = \hat{p}_{11}e^{jk(l_1+s_1)} + \hat{p}_{12}e^{-jk(l_1+s_1)} . \quad (67)$$

Für den Druckverlauf am Mikrofon 2 p_{x_2} ergibt sich

$$p_{x_2} = \hat{p}_{11}e^{jkl_1} + \hat{p}_{12}e^{-jkl_1} . \quad (68)$$

Um nun die Druckamplitude der hinlaufenden Welle \hat{p}_{11} berechnen zu können, wird Gleichung (68) nach \hat{p}_{12} umgestellt,

$$\hat{p}_{12} = p_{x_2}e^{jkl_1} - \hat{p}_{11}e^{2jkl_1} . \quad (69)$$

Dies wird in Gleichung (67) eingesetzt. Daraus wird p_{x_1} zu

$$p_{x_1} = \hat{p}_{11} (e^{jk(l_1+s_1)} - e^{jk(l_1-s_1)}) + p_{x_2}e^{-jks_1} . \quad (70)$$

Diese Gleichung wird nach \hat{p}_{11} umgestellt. Als nächstes wird der Term e^{jkl_1} im Nenner ausgeklammert und auf den Zähler angewendet. Daraus kann die Druckamplitude der hinlaufenden Welle \hat{p}_{11} nun aus den Druckverläufen an den Mikrofonpositionen bestimmt werden und auch weiter durch die Übertragungsfunktionen,

$$\hat{p}_{11} = \frac{p_{x_1} e^{-jkl_1} - p_{x_2} e^{-jk(l_1+s_1)}}{e^{jks_1} - e^{-jks_1}} = j \frac{H_{11} e^{-jkl_1} - H_{12} e^{-jk(l_1+s_1)}}{2 \sin(-ks_1)} . \quad (71)$$

Für die Berechnung der Druckamplitude der rücklaufenden Welle \hat{p}_{12} wird die Gleichung (71) in Gleichung (69) eingesetzt, wodurch sich dann

$$\hat{p}_{12} = \frac{p_{x_2} e^{jk(l_1+s_1)} - p_{x_1} e^{jkl_1}}{e^{jks_1} - e^{-jks_1}} = j \frac{H_{12} e^{jk(l_1+s_1)} - H_{11} e^{jkl_1}}{2 \sin(-ks_1)} \quad (72)$$

ergibt. Mit den berechneten Druckamplituden ergibt sich für den Druckverlauf p_1 bei $x = 0$, an der Oberfläche des Prüfobjektes,

$$p_1(x_0) = \hat{p}_{11} + \hat{p}_{12} \quad (73)$$

$$= j \frac{H_{11} e^{-jkl_1} - H_{12} e^{-jk(l_1+s_1)}}{2 \sin(-ks_1)} + j \frac{H_{12} e^{jk(l_1+s_1)} - H_{11} e^{jkl_1}}{2 \sin(-ks_1)} . \quad (74)$$

Für die vollständige Beschreibung des Schallfeldes im vorderen Rohrteil wird noch zusätzlich die Schnelle betrachtet. Diese kann nach dem akustischen Trägheitsgesetz, Gleichung (7) berechnet werden

$$u_1(x=0) = \frac{\hat{p}_{11} - \hat{p}_{12}}{\rho c} \quad (75)$$

$$= j \frac{H_{11} e^{-jkl_1} - H_{12} e^{-jk(l_1+s_1)}}{2 \rho c \sin(-ks_1)} - j \frac{H_{12} e^{jk(l_1+s_1)} - H_{11} e^{jkl_1}}{2 \rho c \sin(-ks_1)} . \quad (76)$$

Dieses Vorgehen kann analog für den hinteren Rohrteil durchgeführt werden. Die Druckverläufe an den Mikrofonen 3 und 4 stellen sich durch

$$p_{x_3} = \hat{p}_{21} e^{-jkl_2} + \hat{p}_{22} e^{jkl_2} \quad (77)$$

$$p_{x_4} = \hat{p}_{21} e^{-jk(l_2+s_2)} + \hat{p}_{22} e^{jk(l_2+s_2)} \quad (78)$$

dar. Gleichung (78) wird nach \hat{p}_{22} umgestellt,

$$\hat{p}_{22} = p_{x_4} e^{-jk(l_2+s_2)} - \hat{p}_{21} e^{-2jk(l_2+s_2)} . \quad (79)$$

Dies wird in Gleichung (77) eingesetzt und nach \hat{p}_{21} umgestellt,

$$\hat{p}_{21} = \frac{p_{x_3} e^{jk(l_2+s_2)} - p_{x_4} e^{jkl_2}}{e^{jks_2} - e^{-jks_2}} = j \frac{H_{13} e^{jk(l_2+s_2)} - H_{14} e^{jkl_2}}{2 \sin(-ks_2)} . \quad (80)$$

Die Druckamplitude kann nun in Gleichung (79) eingesetzt werden, um daraus die Druckamplitude \hat{p}_{22} bestimmen zu können,

$$\hat{p}_{22} = \frac{p_{x_4} e^{-jkl_2} - p_{x_3} e^{-jk(l_2+s_2)}}{e^{jks_2} - e^{-jks_2}} = j \frac{H_{14} e^{-jkl_2} - H_{13} e^{-jk(l_2+s_2)}}{2 \sin(-ks_2)} . \quad (81)$$

Mit den beiden Druckamplituden des hinteren Rohrteils kann nun auch der Druckverlauf bei $x = d$ angegeben werden.

$$p_2(x = d) = \hat{p}_{21} e^{-jkd} + \hat{p}_{22} e^{jkd} \quad (82)$$

$$= j \frac{H_{13} e^{jk(l_2+s_2)} - H_{14} e^{jkl_2}}{2 \sin(-ks_2)} e^{-jkd} + j \frac{H_{14} e^{-jkl_2} - H_{13} e^{-jk(l_2+s_2)}}{2 \sin(-ks_2)} e^{jkd} \quad (83)$$

Auch hier wird wieder der Schnelleverlauf betrachtet,

$$u_2(x = d) = \frac{\hat{p}_{21} e^{-jkd} - \hat{p}_{22} e^{jkd}}{\rho c} \quad (84)$$

$$= j \frac{H_{13} e^{jk(l_2+s_2)} - H_{14} e^{jkl_2}}{2 \rho c \sin(-ks_2)} e^{-jkd} - j \frac{H_{14} e^{-jkl_2} - H_{13} e^{-jk(l_2+s_2)}}{2 \rho c \sin(-ks_2)} e^{jkd} \quad (85)$$

Mit diesen berechneten Druck- und Schnelleverläufen kann ein Gleichungssystem aufgestellt. Dazu wird das Prinzip des, aus der Elektrotechnik bekannten, elektrischen Vierpols genutzt. Dabei dient der vordere Rohrabschnitt als Eingang, also sind p_1 und u_1 die beiden Eingangssignale. Der hintere Rohrabschnitt dient folglich als Ausgangssignal, also stellen p_2 und u_2 die beiden Ausgangssignale dar. Mit der Betrachtung des Vierpols ergibt sich mit den vier Anschlüssen das Gleichungssystem, bei dem der Eingang mit dem Ausgang über eine Transfermatrix verknüpft wird. Diese Transfermatrix T enthält Aussagen, über die Verknüpfungen von Druck und Schnelle zwischen den beiden Rohrteilen. Aus den Einträgen der Transfermatrix können die akustischen Kenngrößen des porösen Materials berechnet werden. Das Gleichungssystem mit den Drücken und Schnellen vor und hinter dem Prüfobjekt und der Transfermatrix ergibt sich zu

$$\begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_a \\ p_a \end{bmatrix}_{x=d} . \quad (86)$$

Der Index „a“ steht in diesen Gleichungen für die erste Variante des Rohrabschlusses. Da

es jedoch in dem Gleichungssystem vier Unbekannte gibt, die Einträge der Transfermatrix, jedoch nur zwei Gleichungen aufweisen, werden zwei weitere Gleichungen benötigt. Dazu wird ein zweiter Rohrabschluss in die Untersuchung mit einbezogen, welcher im zweiten Gleichungssystem mit dem Index „b“ bezeichnet wird.

$$\begin{bmatrix} p_b \\ u_b \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_b \\ p_b \end{bmatrix}_{x=d} . \quad (87)$$

In den nächsten Schritten werden die einzelnen Einträge der Transfermatrix hergeleitet. Aus dem Gleichungssystem (86) lassen sich die beiden Gleichungen aufstellen,

$$I \quad p_a(x=0) = T_{11}p_a(x=d) + T_{12}p_a(x=d) \quad (88)$$

$$II \quad u_a(x=0) = T_{21}p_a(x=d) + T_{22}p_a(x=d) \quad (89)$$

Aus dem zweiten Gleichungssystem (87) ergeben sich

$$III \quad p_b(x=0) = T_{11}p_b(x=d) + T_{12}p_b(x=d) \quad (90)$$

$$IV \quad u_b(x=0) = T_{21}p_b(x=d) + T_{22}p_b(x=d) \quad (91)$$

Für die weitere Betrachtung wird die x-Koordinate mit in den Index geschrieben, d.h. $p_a(x=0) = p_{0a}$. Wird Gleichung (90) nach T_{12} umgestellt, ergibt sich

$$T_{12} = \frac{p_{0b} - T_{11}p_{db}}{u_{db}} . \quad (92)$$

Dies wird in Gleichung (88) eingesetzt und nach T_{11} umgestellt. Wird dies wiederum in T_{12} eingesetzt, ergeben sich die beiden Einträge der Transfermatrix

$$T_{11} = \frac{p_{0a}u_{db} - p_{0b}u_{da}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} \quad (93)$$

$$T_{12} = \frac{p_{0b}p_{da} - p_{0a}u_{db}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} . \quad (94)$$

Für die Berechnung der anderen beiden Einträge wird Gleichung(91) nach T_{22} umgestellt, ergibt sich

$$T_{22} = \frac{u_{0b} - T_{21}p_{db}}{u_{db}} . \quad (95)$$

Diese Gleichung wird in Gleichung (89) eingesetzt und nach T_{21} umgestellt. Dies kann auch wieder in T_{22} eingesetzt werden. Daraus ergeben sich diese beiden Einträge der

Transfermatrix zu

$$T_{21} = \frac{u_{0a}u_{db} - u_{0b}u_{da}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} \quad (96)$$

$$T_{22} = \frac{p_{da}p_{0b} - p_{db}u_{0a}}{p_{da}u_{db} - p_{db}u_{da}} . \quad (97)$$

3.2.2 Berechnung der akustischen Kenngrößen

Mithilfe der Transfermatrix T aus Kapitel 3.2.1 lassen sich die akustischen Kenngrößen bestimmen. Zuerst wird der Transmissionsfaktor betrachtet. Danach wird die Berechnung des Reflexionsfaktors hergeleitet.

Für diese Betrachtung werden nicht nur die reinen Druckamplituden der Wellenanteile genutzt, vgl. Kapitel 3.2.1, sondern es werden zusätzlich die Faktoren der Transmission und Reflexion betrachtet.

Die hinlaufende Welle p_{11} definiert sich nun durch

$$p_{11} = \hat{p}e^{-jkx} . \quad (98)$$

Die hinlaufende Welle, im zweiten Rohrabschnitt, p_{21} ist der mit t_s transmittierte Wellenanteil von p_{11} ,

$$p_{21} = t_s p_{11} = t_s \hat{p}e^{-jkx} . \quad (99)$$

Die Welle im hinteren Rohrabschnitt wird am Rohrabschluss mit einem Reflexionsfaktor von r_E reflektiert und ergibt somit p_{22} ,

$$p_{22} = r_E p_{21} = r_E t_s \hat{p}e^{jkx} . \quad (100)$$

Der fehlende Wellenanteil p_{12} setzt sich aus dem reflektierten Anteil von p_{11} am Prüfobjekt und dem transmittierten Anteil von p_{22} zusammen. Dabei wird angenommen, dass der Transmissionsfaktor des Prüfobjektes in beide Ausbreitungsrichtungen gleich groß ist.

$$p_{12} = r p_{11} + t_s p_{22} = r \hat{p}e^{jkx} + r_E t_s^2 \hat{p}e^{jkx} = (r + r_E t_s^2) \hat{p}e^{jkx} . \quad (101)$$

Mit den vier Wellenanteilen ergeben sich für den Druckverlauf im vorderem Rohrabschnitt

$$p_1 = p_{11} + p_{12} = \hat{p} \left(e^{-jkx} + (r + r_E t_s^2) e^{jkx} \right) , \quad (102)$$

und für den Druckverlauf im hinterem Rohrabschnitt

$$p_2 = p_{21} + p_{22} = \hat{p} (t_s e^{-jkx} + r_E t_s e^{jkx}) . \quad (103)$$

Für die vollständige Wellenbeschreibung wird noch die Schnelle in den beiden Rohrabschnitten betrachtet. Dazu wird das akustische Trägheitsgesetz, Gleichung (7) genutzt, daraus ergeben sich dann

$$u_1 = \frac{j}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\hat{p}}{\rho c} (e^{-jkx} - (r + r_E t_s^2) e^{jkx}) , \quad (104)$$

$$u_2 = \frac{\hat{p}}{\rho c} (t_s e^{-jkx} - r_E t_s e^{jkx}) . \quad (105)$$

Nun wird für die weitere Betrachtung der elektrische Vierpol genutzt. Dadurch ergibt sich dann das Gleichungssysteme (86). Für die Berechnung des Transmissionsgrades werden die Gleichungen (102) bis (105) in das Gleichungssystem eingesetzt. Daraus ergeben sich die beiden Gleichungen,

$$\hat{p} (e^{-jkx} + (r + r_E t_s^2) e^{jkx}) |_{x=0} = T_{11} \hat{p} (t_s e^{-jkx} + r_E t_s e^{jkx}) \quad (106)$$

$$+ T_{12} \frac{\hat{p}}{\rho c} (t_s e^{-jkx} - r_E t_s e^{jkx}) |_{x=d} \quad (107)$$

$$\frac{\hat{p}}{\rho c} (e^{-jkx} - (r + r_E t_s^2) e^{jkx}) |_{x=0} = T_{21} \hat{p} (t_s e^{-jkx} + r_E t_s e^{jkx}) \quad (108)$$

$$+ T_{22} \frac{\hat{p}}{\rho c} (t_s e^{-jkx} - r_E t_s e^{jkx}) |_{x=d} \quad (109)$$

betrachtet. Um diese beiden Gleichungen miteinander zu verknüpfen, wird $\frac{(106)+\rho c(108)}{\hat{p}}$ berechnet. Werden zusätzlich die Koordinaten $x_1 = 0$ und $x_2 = d$ eingesetzt und die entstehende Gleichung nach dem Transmissionsfaktor umgestellt, ergibt sich

$$t_s = \frac{2}{T_{11} (e^{-jkd} + r_E e^{jkd}) + \frac{T_{12}}{\rho c} (e^{-jkd} - r_E e^{jkd}) + \dots} \quad (110)$$

$$\frac{\dots + \rho c T_{21} (e^{-jkd} + r_E e^{jkd}) + T_{22} (e^{-jkd} - r_E e^{jkd})}{\dots} . \quad (111)$$

Für die Berechnung des Reflexionsfaktors wird eine andere Betrachtungsweise der Wellenanteile angewendet. Diese Betrachtung wurde in den Ansätzen aus der Dissertation von A.Meier [A.Meier06] genutzt. Der Druckverlauf im vorderen Rohrteil setzt sich aus der hinlaufenden Welle \hat{p}_{11} und der reflektierten Welle $\hat{p}_{12} = r\hat{p}_{11}$ zusammen. Damit ergibt sich der Schalldruckverlauf zu

$$p_1(x=0) = \hat{p}_{11} (1 + r) \quad (112)$$

und nach dem akustischen Trägheitsgesetz, Gleichung (7) ist die Schnelle dann

$$u_1(x=0) = \frac{\hat{p}_{11}}{\rho c} (1 - r) . \quad (113)$$

Für den hinteren Rohrteil ist der Druckverlauf

$$p_2(x=d) = \hat{p}_{21}e^{-jkd} + \hat{p}_{22}e^{jkd} . \quad (114)$$

Wird die reflektierte Welle ebenfalls mit einem Reflexionsfaktor betrachtet, wird hier wieder der Reflexionsfaktor des Rohrabschlusses eingeführt. Daraus ergibt sich

$$p_2(x=d) = \hat{p}_{21}e^{-jkd} (1 + r_E) u_2(x=d) = \frac{\hat{p}_{21}}{\rho c} e^{-jkd} (1 - r_E) . \quad (115)$$

Wird nun wieder das Gleichungssystem (86) betrachtet, ergeben sich zwei Gleichungen

$$1 + r = T_{11} \frac{\hat{p}_{21}}{\hat{p}_{11}} e^{-jkd} (1 + r_E) + \frac{T_{12}}{\rho c} \frac{\hat{p}_{21}}{\hat{p}_{11}} e^{-jkd} (1 - r_E) \quad (116)$$

$$\frac{1 - r}{\rho c} = T_{21} \frac{\hat{p}_{21}}{\hat{p}_{11}} e^{-jkd} (1 + r_E) + \frac{T_{22}}{\rho c} \frac{\hat{p}_{21}}{\hat{p}_{11}} e^{-jkd} (1 - r_E) . \quad (117)$$

Diese beiden Gleichungen werden miteinander addiert und nach dem Quotienten $\frac{\hat{p}_{21}}{\hat{p}_{11}}$ umgestellt. Dieser wird dann in die Gleichung (116) eingesetzt und nach r umgestellt. Daraus ergibt sich nun der Reflexionsfaktor r , in Abhängigkeit des Reflexionsfaktors des Rohrabschlusses, zu

$$r = \frac{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho c} - T_{21}\rho c - T_{22} + r_E \left(T_{11} - \frac{T_{12}}{\rho c} - T_{21}\rho c + T_{22} \right)}{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho c} + T_{21}\rho c + T_{22} + r_E \left(T_{11} - \frac{T_{12}}{\rho c} + T_{21}\rho c - T_{22} \right)} \quad (118)$$

Der Reflexionsfaktor r_E des Rohrabschlusses ergibt sich mithilfe der Übertragungsfunktion H_{34} zwischen Mikrofon 3 und 4. r_E ergibt sich analog zu Gleichung (50) und zwar mit dem Wellentrenungsverfahren aus Kapitel 2.5.2 auf den hinteren Rohrteil der Rohrerweiterung bezogen,

$$r_E = \frac{H_{34} - e^{-jks_2}}{e^{jks_2} - H_{34}} e^{2jkl_2} . \quad (119)$$

Nach dem Standard E2611-09 [forTesting03] werden die akustischen Kenngrößen nur für einen bestimmten Rohrabschluss berechnet. Der Transmissionsgrad wird dabei nur für

den empfohlenen reflexionsarmen Abschluss berechnet,

$$t = \frac{2e^{jkd}}{T_{11} + \frac{T_{12}}{\rho c} + \rho c T_{21} + T_{22}} . \quad (120)$$

Diese Gleichung ist mit der Gleichung (111) vergleichbar, wenn $r_E = 0$ angenommen wird. Daraus resultiert dann auch die Durchgangsdämpfung TL nach

$$TL = 10 \log \frac{1}{|t|} . \quad (121)$$

Zusätzlich werden der Reflexionsfaktor und der Absorptionsgrad im Standard angegeben. Der Reflexionsfaktor ergibt sich für einen schallharten Abschluss zu,

$$r = \frac{T_{11} - \rho c T_{21}}{T_{11} + \rho c T_{21}} \quad (122)$$

Im Standard ist ebenfalls der Absorptionsgrad für einen schallharten Abschluss angegeben,

$$\alpha = 1 - |r|^2 . \quad (123)$$

Jedoch ist zu beachten, dass trotz schallhartem Abschluss die Energie nicht nur absorbiert wird, sondern auch bei der Rohrerweiterung transmittiert wird. Also gilt eigentlich nicht Gleichung (123), sondern anstatt der Absorptionsgrad wird der Verlustfaktor betrachtet, aus Kapitel 2.2 und die Berechnungsvorschrift müsste

$$\beta = 1 - |r|^2 \quad (124)$$

lauten. Aus dem Verlustfaktor und dem Transmissionsfaktor kann eine Aussage über den Absorptiongrad fomuliert werden.

Die Wellenzahl im Prüfobjekt ergibt sich zu

$$k = \frac{1}{d} \arccos T_{11} , \quad (125)$$

und die Impedanz des Prüfobjektes ergibt sich aus

$$Z = \sqrt{\frac{T_{12}}{T_{21}}} . \quad (126)$$

4 Drei-Mikrofonmethode

Die Drei-Mikrofonmethode ist eine zusätzliche Methode zur Bestimmung des Transmissionsgrades mithilfe einer Erweiterung des Impedanzrohres. Diese Erweiterung wurde von den Verfassern Salissou, Panneton und Dotres im Artikel *Complement to standard method for measuring normal incidence sound transmission loss with three microphones* der Acoustical Society of America [Y.Salissou02] veröffentlicht. Die Grundlage für die Betrachtung stellt der Standard ASTM 2611-09 aus Kapitel 3 dar.

Der hauptsächliche Unterschied zwischen dem Standard und dieser Methode ist die Verwendung des Impedanzrohres aus Kapitel 2.4, jedoch mit einem variablen Hohlraum zwischen dem Prüfobjekt und dem schallharten Abschluss. Den schallharten Abschluss stellt ein beweglicher Kolben dar. In diesen Kolben wird das dritte Mikrofon eingebaut, wie in Abbildung 17 zusehen ist. Äquivalent zur Standarduntersuchung werden zwei verschiedene Untersuchungsvarianten genutzt. Diese drücken sich in der Drei-Mikrofonmethode durch zwei unterschiedlich große Hohlräume aus.

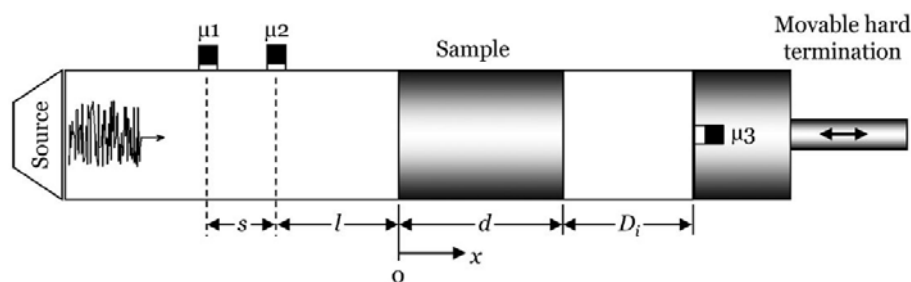


Abbildung 17: Aufbau des Impedanzrohres für die Drei-Mikrofonmethode [Y.Salissou02, S. 2]

Diese Untersuchungsmethode des Transmissionsgrades wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, da für die Berechnung der Transferfunktion T die Impedanz des Prüfobjektes in beiden Untersuchungsvarianten bekannt sein muss. Außerdem wurde diese Methode nicht für die Untersuchung gewählt, da die Hohlraumdicken von Hand eingestellt werden müssen und deshalb der menschliche Aspekt einen erheblichen Anteil in der Untersuchung bekommt, wodurch es zu unerwünschten Fehlern kommen kann.

Zur Vollständigkeit wird in Kapitel 4.1 die Theorie kurz erklärt, damit der Unterschied zum Standard deutlich wird.

4.1 Theorie

Der Lautsprecher erzeugt eine ebene Welle, wodurch sich für den Druck und die Schnelle, vor dem Prüfobjekt ($x \leq 0$), folgende Verläufe ergeben:

$$p_i(x) = e^{-jkx} + r_i e^{jkx} \quad (127)$$

$$u_i(x) = \frac{e^{-jkx} - r_i e^{jkx}}{Z_S} . \quad (128)$$

Zwischen dem Prüfobjekt und dem schallharten Abschluss bilden sich stehende Wellen aus, wodurch sich in diesem Teil des Rohres ($x \geq d$) der Druck und die Schnelle zu

$$p_i(x) = 2A_i e^{-jkL_i} \cos(k(x - L_i)) \quad (129)$$

$$u_i(x) = -j2 \frac{A_i}{Z_S} e^{-jkL_i} \sin(k(x - L_i)) \quad (130)$$

ergeben. Dabei steht der Index i für die beiden verschiedenen Varianten der Hohlraumdicken zwischen Prüfobjekt und schallhartem Abschluss. L_i definiert sich aus der Summe der Dicken von dem Prüfobjekt d und dem Hohlraum D_i , $L_i = d + D_i$. Z_S ist die komplexe Impedanz bei der jeweiligen Untersuchungsvariante. $2A_i$ stellt die Amplitude der stehenden Welle in dem Hohlraum zwischen Prüfobjekt und schallhartem Kolben dar. Für den Reflexionsfaktor ergibt sich, durch die Messung mit den Mikrofonen 1 und 2,

$$r_i = \frac{H_{12}(D_i) e^{jks} - 1}{1 - H_{12}(D_i) e^{-jks}} e^{2jkl} . \quad (131)$$

Zur Berechnung der Übertragungsfunktion H_{13} wird die stehende Welle im Hohlraum betrachtet.

$$2A_i e^{-jkL_i} = H_{13}(D_i) (e^{jk(l+s)} + r_i e^{-jk(l+s)}) \quad (132)$$

Mit den gezeigten Druck- und Schnelleverläufen und den Gleichungen (131) und (132) lässt sich der Druck und die Schnelle an den beiden Oberflächen des Prüfobjektes betrachten,

bei $x = 0$ und $x = d$.

$$p_i(0) = -2je^{jkl} \frac{H_{12}(D_i) \sin(k(l+s)) - \sin(kl)}{H_{12}(D_i)e^{-jks} - 1}, \quad (133)$$

$$u_i(0) = \frac{2e^{jkl}}{Z_S} \frac{H_{12}(D_i) \cos(k(l+s)) - \cos(kl)}{H_{12}(D_i)e^{-jks} - 1}, \quad (134)$$

$$p_i(d) = -2je^{jkl} \frac{H_{13}(D_i) \sin(ks) \cos(kD_i)}{H_{12}(D_i)e^{-jks} - 1}, \quad (135)$$

$$u_i(d) = \frac{2e^{jkl}}{Z_S} \frac{H_{13}(D_i) \sin(ks) \sin(kD_i)}{H_{12}(D_i)e^{-jks} - 1}. \quad (136)$$

Mit diesen Gleichungen wird die Transferfunktion T aus Kapitel 3.2.1 berechnet. Mit den Einträgen der Matrix lässt sich ebenfalls nicht nur der Transmissionsfaktor, sondern auch die anderen akustischen Kenngrößen.

5 Aufbau der Impedanzrohrerweiterung

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Impedanzrohres erläutert. Dieser Aufbau war im Bezug auf den vorderen Teil des Rohres bereits vorhanden und deshalb nicht mehr veränderbar. Dieses Impedanzrohr wurde im Rahmen der Projektarbeit von S.Greuel, S.Jekosch und L.Wruck im Wintersemester 2012/13 [S.Greuel13] konstruiert. Diese Daten werden teilweise in die Konstruktion der Rohrerweiterung übernommen und zusätzlich mit den Vorgaben aus dem Standard [forTesting03] erweitert.

5.1 Abmessungen

Der erste Teil des Rohres ist wie bereits erwähnt gefertigt und kann nicht mehr verändert werden.

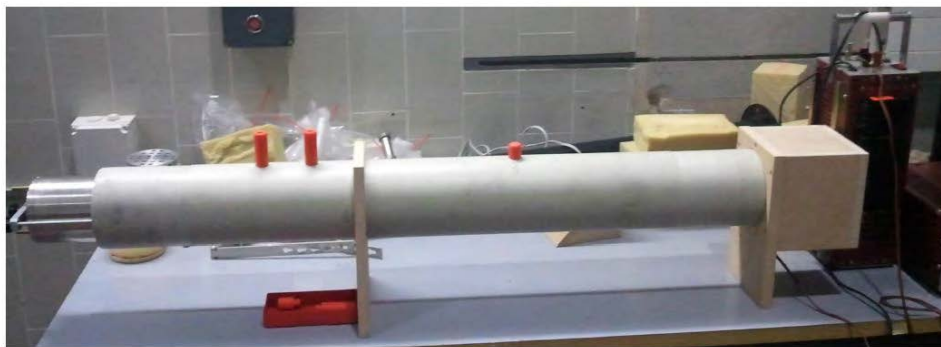


Abbildung 18: Aufbau des vorhandenen Impedanzrohres [S.Greuel13, S. 20]

Der Durchmesser des Rohres beträgt $d_{Rohr} = 0,1\,m$. Die Rohrlänge ist $l = 1\,m$ und die Wanddicke ist $d_{Wand} = 12\,mm$. Für die Untersuchung mit einem Impedanzrohr wird nicht nur in der DIN 10543-2 [fürNormung10] sondern auch im Standard [forTesting03, S. 3] eine schallharte Wand empfohlen, damit die Transmission durch die Wand vernachlässigbar im Vergleich zur Transmission durch das Prüfobjekt ist. Daher wurde der erste Teil des Rohres aus PVC, mit glatter Oberfläche, gefertigt. Der neue hintere Rohrteil besteht ebenfalls aus PVC und den gleichen Querabmessungen, um eine gleichmäßige Schallausbreitung gewährleisten zu können. Jedoch ist zu beachten, dass das verwendete Rohr genormt ist, es besteht jedoch nach der Norm keine exakte Bestimmung des Innendurchmessers, der aber für die Betrachtung der ausbreitungsfähigen Moden wichtig ist. Daher gibt es für die Grenzfrequenzen eine Toleranz, die mit betrachtet werden muss.

Darauf wird in den folgenden Erklärungen der Abmessungen mit eingegangen. Weiterhin wird die Rohrwand als schwer und dick angesehen, damit kann angenommen werden, dass die verursachten Schwingungen im Rohr nicht zu Resonanzen im Arbeitsfrequenzbereich führen. Die Länge ergibt sich durch die nachfolgenden Erklärungen der Mikrofon- und Prüfobjektanmessungen.

Der Arbeitsfrequenzbereich des gesamten Impedanzrohres ist ebenfalls, durch die vorhandenen Abmessungen des Rohres und der Mikrofonpositionen, festgelegt. Der Arbeitsbereich definiert sich durch eine untere und obere Grenzfrequenz

$$f_l < f < f_u . \quad (137)$$

Die obere Grenzfrequenz f_u definiert sich durch den Rohrdurchmesser, mit dem Durchmesser d und der Schallgeschwindigkeit c ,

$$f_u < \frac{0,58 \cdot c}{d} = \frac{0,58 \cdot 340 \frac{m}{s}}{0,1 \pm 0,002 m} \approx 1972 \pm 40 Hz . \quad (138)$$

Mithilfe der oberen Grenzfrequenz wird gewährleistet, dass sich im Rohr keine höheren Moden ausbreiten, siehe Cut-on Frequenz in Kapitel 2.4. Vergleicht man die Gleichung (138), die aus dem Projektbericht und der DIN-Norm stammt, mit der Gleichung (56), ist ein Unterschied in der Konstanten erkennbar, wodurch sich ein Unterschied in der Frequenz ergibt. Da die Gleichung der DIN-Norm jedoch bereits mit Sicherheiten behaftet ist, wird diese für die Untersuchung genutzt. Zusätzlich zu diesem Zusammenhang existiert auch ein Zusammenhang zwischen oberer Grenzfrequenz und Mikrofonabstand. Im Projekt wurde bereits ein Mikrofonabstand von $s_1 = 7,65 cm$ festgelegt. Daraus ergibt sich eine obere Grenzfrequenz

$$f_u < \frac{0,4 \cdot c}{s} = 1777,8 Hz . \quad (139)$$

Nach dieser Bedingung ist die obere Grenzfrequenz also auf $1777 Hz$ festgelegt. Darüber kann es zur Ausbreitung von höheren Moden kommen, siehe Kapitel 2.4. Damit die Bedingungen auch in dem zweiten Rohrteil erfüllt werden, beträgt der Mikrofonabstand s_2 ebenfalls $s_2 = 7,65 cm$. Für die untere Grenzfrequenz ist weder in der DIN-Norm noch in dem Standard eine exakte Beziehung angegeben, jedoch wird in der DIN-Norm eine allgemeine Richtlinie genannt. Die untere Grenzfrequenz hängt vom Mikrofonabstand und der Messunsicherheit der Messgeräte ab. Es wird empfohlen, dass „der Mikrofonabstand 5 % der Wellenlänge der interessierenden entsprechenden niedrigen Frequenz beträgt“ [fürNormung10, S. 6]. Bei dem gewählten Mikrofonabstand s_1 würde die untere

Grenzfrequenz der Messung bei

$$f_l = \frac{0,05 \cdot c}{s_1} = \frac{0,05 \cdot 340 \frac{m}{s}}{0,0765 m} \approx 222 Hz, \quad (140)$$

liegen, jedoch soll auch der Frequenzbereich zwischen $50 Hz$ und $222 Hz$ untersucht werden, da vor allem in diesem Bereich die Absorption und Transmission der porösen Materialien von großem Interesse sind, da gerade in diesem Bereich ein Problem darstellt. Um diesen Frequenzbereich abdecken zu können, wurde im Projekt ein drittes Mikrofon eingebaut, mit einem Mikrofonabstand zu Mikrofon 2 von $s_3 = 40 cm$. Mit diesem Abstand wird nach Gleichung (140) nun auch ein Frequenzbereich von $42,5 Hz$ bis $222 Hz$ abgedeckt. Um diesen Frequenzbereich auch in der Rohrerweiterung betrachten zu können, wird auch dort ein weiteres Mikrofon eingebaut mit einem Abstand von $s_4 = 40 cm$. Die Abmessungen der Mikrofonabstände sind schematisch in Abbildung 19 dargestellt. In Abbildung 20 sind dagegen die Abstände der Mikrofone in der praktischen Umsetzung gezeigt.

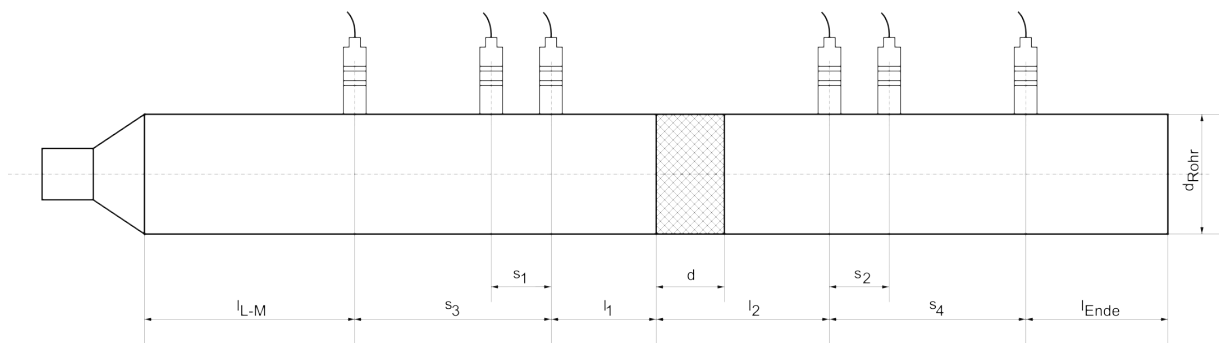


Abbildung 19: Skizze des Impedanzrohraufbaus

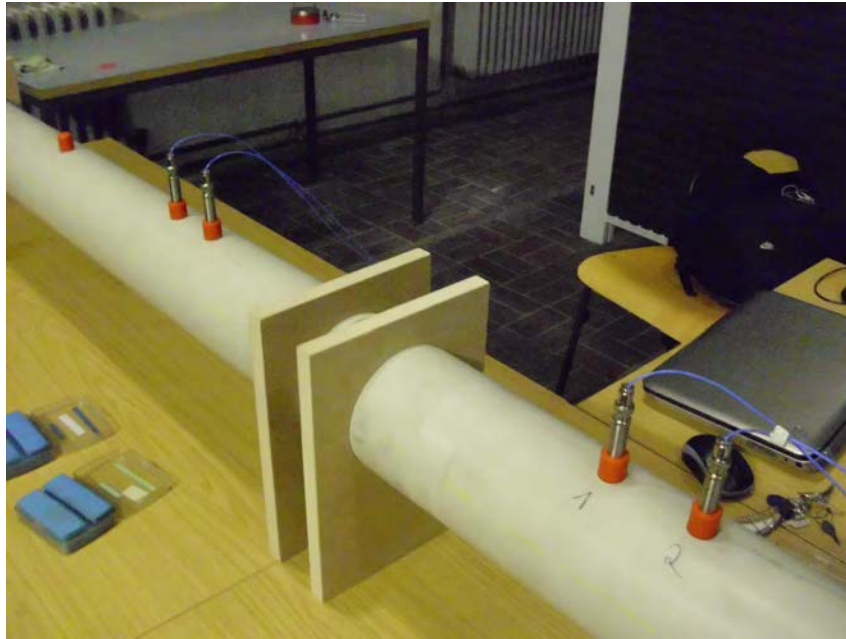


Abbildung 20: Reale Umsetzung des Impedanzrohres

Der Lautsprecher spielt ebenfalls eine wichtige Rolle für die Positionierung der Mikrofone. Der Lautsprecher erzeugt nicht nur die gewünschten ebenen Wellen, sondern auch höhere Moden. Unterhalb der oberen Grenzfrequenz, siehe Gleichung (138), klingen die höheren Moden im Nahfeld ab. Als Abstand zwischen dem Lautsprecher und dem ersten Mikrofon wird mindestens der dreifache Rohrdurchmesser empfohlen. Daher wurde im Projekt ein Abstand von $l_{L-M} = 40 \text{ cm}$ gewählt, um noch einen Sicherheitsabstand mit einzufügen.

Wichtig ist auch der Abstand zwischen Prüfobjekt und dem nächsten Mikrofon. Der Abstand ist, nach dem Standard [forTesting03, S. 5], abhängig von der Oberfläche des Prüfobjektes. Treffen Schallwellen auf eine nicht ebene Oberfläche, kann es bei Reflexionen, aber auch Transmission, zur Ausbreitung von höheren Moden von der Oberfläche kommen. Damit die Ausbreitung der höheren Moden die Ergebnisse des Transmission und Reflexion nicht verfälschen, wird das von dem Prüfobjekt beidseitig nächste Mikrofon mit einem gewissen Abstand zur Oberfläche positioniert. Durch diesen Abstand soll das abklingende Nahfeld dieser höheren Moden berücksichtigt werden. Da mit dem Rohr mehrere verschiedene Messobjekte untersucht werden sollen, wird für den Abstand zwischen Oberfläche und dem nächsten Mikrofon der maximale Mindestabstand gewählt. Für stark asymmetrische Oberflächen wird, laut Standard, ein Mindestabstand von dem Doppelten des Rohrdurchmessers empfohlen. Daher wurde im Projekt ein Abstand von $l_1 = 20 \text{ cm}$ gewählt. Dieser Abstand findet sich auf der Rückseite des Prüfobjektes wieder. Jedoch soll das Rohr, wie bereits erwähnt, für mehrere verschiedene Prüfobjekte, damit für verschiedene Prüfdicken benutzt werden können. Die Rohrerweiterung ist ausgelegt

für Prüfbobjektdicken von bis zu $d \leq 14 \text{ cm}$. Für die maximale Dicke der Prüfbobjekte ist der Abstand zum nächsten Mikrofon auf $l = 20 \text{ cm}$ festgelegt. Bei dünneren Prüfkörpern erhöht sich dieser Abstand logischerweise, daher ist die Empfehlung des Standards für die unterschiedlichen Dicken erfüllt. Für die spätere Berechnung ist damit der Abstand l_2 auf $l_2 = 34 \text{ cm}$ festgelegt. Der Mindestabstand von 20 cm findet sich nochmal am Rohrende wieder, da die gleichen Bedingungen am Rohrabschluss herrschen. Das Rohrende ist insgesamt $l_{\text{Ende}} = 50 \text{ cm}$ lang, falls noch Änderungen am Rohrabschluss durchgeführt werden müssen.

In den beiden Abbildungen 21 und 22 ist das vollständige Impedanzrohr zu sehen, einmal in Einzelteilen und zum anderen vollständig montiert.

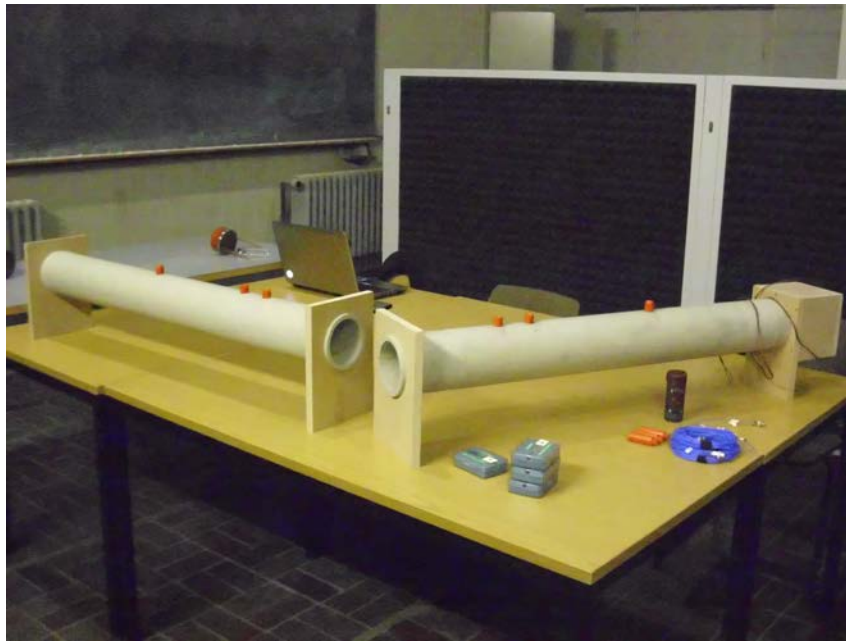


Abbildung 21: Aufbau des Impedanzrohres (Teile)

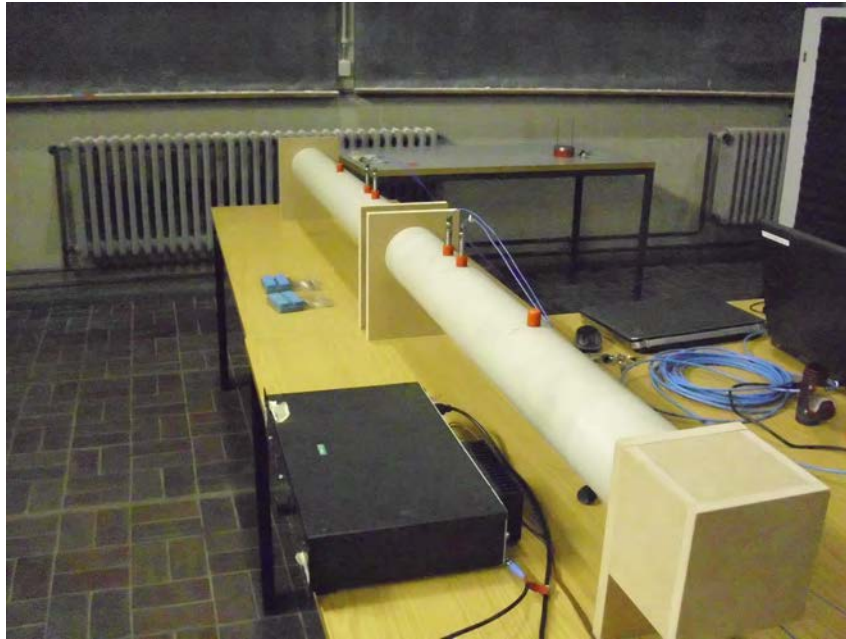


Abbildung 22: Aufbau des Impedanzrohres (Gesamt)

Als weiteres wichtiges Bauelement ist die Halterung der Prüfobjekte zu nennen, die in Abbildung 24 zusehen ist. Die Halterung der Erweiterung ist das gleiche Rohrstück, dass in der Projektarbeit zum Impedanzrohr [S.Greuel13], als Rohrabschluss diente. Die Abmessungen sind daher bereits vorgegeben. Der Innendurchmesser ist 10 cm , die Länge 14 cm und die Wandstärke 2 mm . Diese Halterung wird nun als Verbindungselement zwischen den beiden Rohrteilen genutzt, dargestellt in Abbildung 23 und 25.

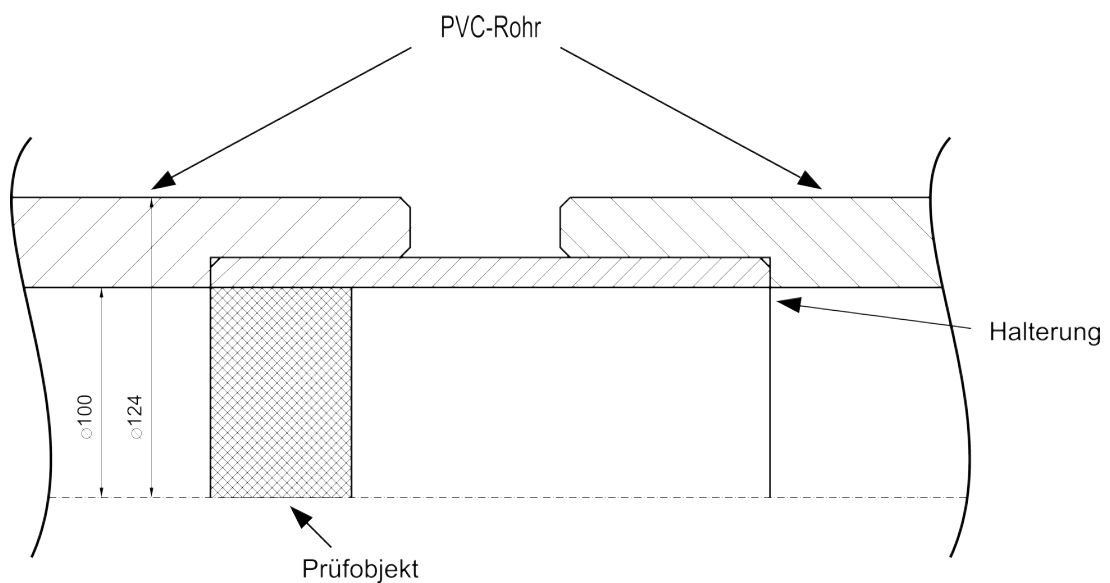


Abbildung 23: Skizze des Halterungeinbaus



Abbildung 24: Probenhalterung

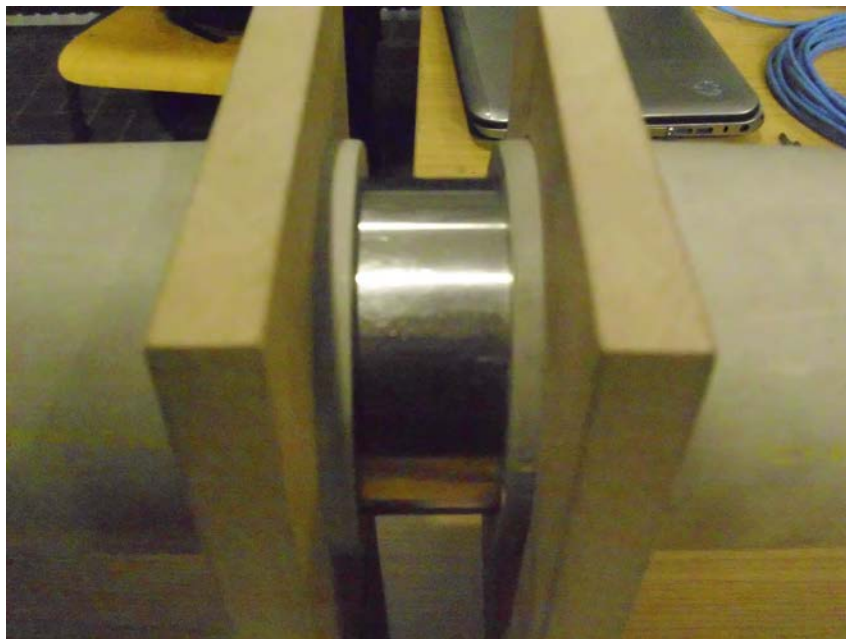


Abbildung 25: Eingebaute Probenhalterung

Im Projekt wurde bereits in das Ende des ersten Teiles des Rohres eine 5 cm lange umlaufende Kerbung in die Innenseite gefräst. Diese Fräsung wurde gefertigt, damit die Probenhalterung in das Ende des ersten Rohres hinein geschoben werden kann, um so einen gleichmäßigen Rohrdurchmesser gewährleisten zu können. Diese Fräsung wird ebenfalls in den Rohranfang des zweiten Rohres positioniert, um die Halterung in das zweite Rohr

hinein zu schieben. Aus fertigungstechnischen Gründen kann die Fräsung nur 5 cm tief sein. Durch die festgelegten Abmessungen der Fräsungen und der Halterung entsteht zwischen den beiden Rohrabschnitten ein Spalt von 4 cm . Die Prüfobjekte werden vor dem endgültigen Zusammenschieben in die Halterung geschoben, so dass die Oberfläche mit der Halterung abschließt. So kann eine eindeutige Lage der Prüfoberfläche im Rohr beschrieben werden. Um einen stufenlosen Übergang zwischen den Rohren und dem Probenhalter festlegen zu können, werden die Rohre und der Halter bis zum Anschlag zusammen geschoben.

Für einen schallharten Abschluss dient eine Konstruktion aus Metall und Spanmaterial, die in das Rohrende hinein geschoben wird.

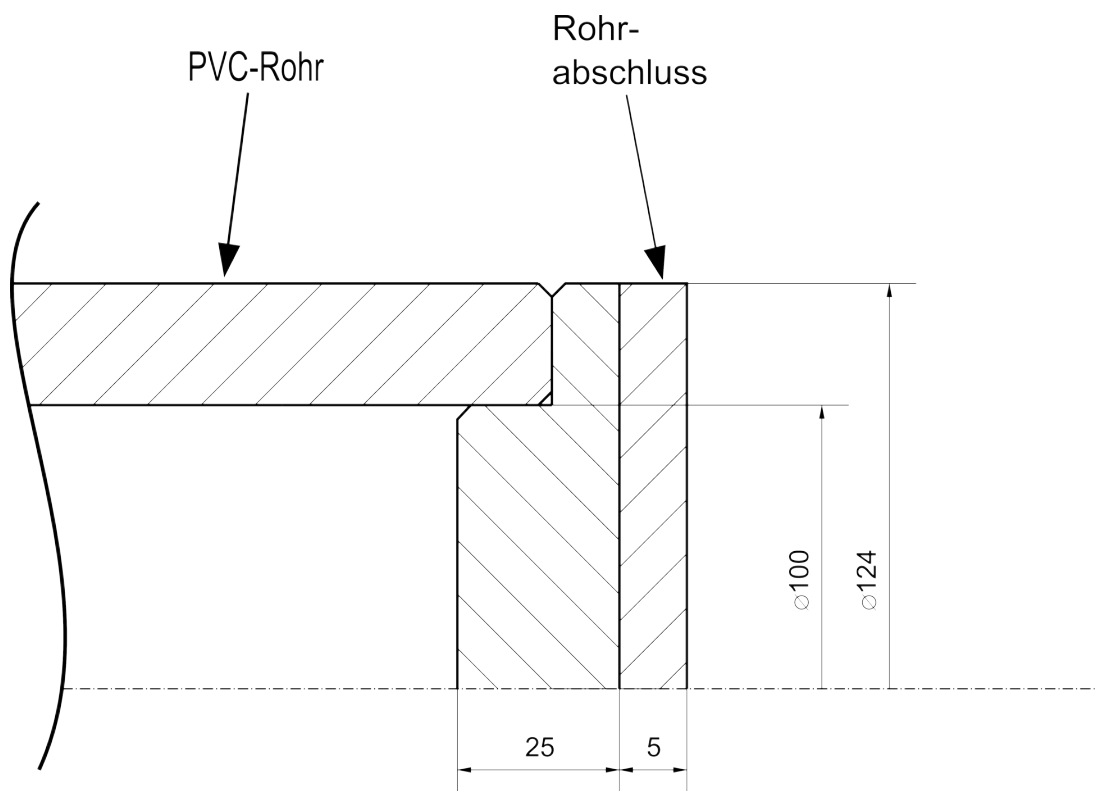


Abbildung 26: Skizze zum Rohrabschluss

Die inneren Abmessungen sind äquivalent zu den Maßen des Prüfobjekthalters. Das Einschubelement ist 1 cm tief. Damit der Abschluss annähernd als schallhart angenommen werden kann, besteht der Abschluss insgesamt aus einer $2,5\text{ cm}$ Spannplatte und einer $0,5\text{ cm}$ dicken Metallplatte. Dies ist in den Abbildungen 26 und 27 zu sehen.



Abbildung 27: Schallharter Rohrabschluss
(Ansicht Metallplatte)



Abbildung 28: Schallharter Rohrabschluss
(Ansicht Spanplatte)

Für die Untersuchung mit einem schallweichen Abschluss, wird das Rohr nicht verschlossen, sondern bleibt geöffnet.

5.2 Weitere Geräte

Außer dem Impedanzrohr wurden natürlich noch weitere Geräte und Kabel verwendet. Zum einen ist der Lautsprecher zu nennen, mit dem das Rauschsignal in das Impedanzrohr eingestrahlt wird. Der Lautsprecher ist Teil des bereits vorhandenen Impedanzrohres und konnte daher auch nicht mehr verändert werden. Der Lautsprecher besteht aus einem Monacor Lautsprecherchassis mit einer 4“ Membran, der mit dem Rohr verschraubt ist. Der Lautsprecher ist nach den Voraussetzungen der DIN 10543 mit einem schalldämmenden Kasten eingehaust, um so Schallübertragungen über die Verbindung zum Rohr abzuschwächen. Der Lautsprecher ist mittels einem LDS PA25E Lautsprecherverstärker mit dem Signalgenerator verbunden. Als Signalgenerator dient der Analysator OROS 38, mit 32 Kanälen. Dieser dient auch gleichzeitig als Aufnahmegerät für die, von den Mikrofonen, gemessenen Daten. Die Daten werden von vier $\frac{1}{4}$ “ Freifeldmikrofonen als Schalldruckpegel gemessen. Vor der Messung werden die Mikrofone mit einem akustischen Kalibrator auf 94,6 dB bei 1000 Hz kalibriert. Die Daten werden an einen Laptop übermittelt und mit der Analysesoftware „NVGate 8.0“ ausgewertet. Mit Hilfe von „NVGate“ werden die FFT und die Übertragungsfunktion berechnet. Diese werden dann mittels eines MATLAB-Programmes für die Berechnung der akustischen Kenngrößen genutzt, siehe Anlage A.

6 Messungen

In diesem Kapitel werden die Prüfobjekte vorgestellt. Diese Prüfobjekte werden mit verschiedenen Messverfahren untersucht, um Aussagen über die Güte der Messungen mit der Impedanzrohrerweiterung treffen zu können. Dazu werden im Voraus die Korrekturfunktionen der Mikrofonpaarungen und der Reflexionsfaktor der Rohrabschlüsse gemessen. Zur Validierung der Ergebnisse der Impedanzrohrerweiterung werden Messungen im Kundt'schen Rohr und im Fensterprüfstand durchgeführt.

6.1 Prüfobjekte

Die Messreihen wurden für vier verschiedene Prüfobjekte durchgeführt. Die Prüfobjekte haben alle einen Durchmesser von 10 cm.

Das erste Prüfobjekt ist ein 3 cm dickes Absorbermaterial mit einer sehr faserigen Struktur, dargestellt als unteres Prüfobjekt in Abbildung 29. Der zweite Prüfling ist ein 3 cm dickes Absorbermaterial aus einer Art Schaumstoffmaterial mit einer starken porösen Struktur, in Abbildung 29 als oberes Prüfobjekt zusehen.



Abbildung 29: Prüfobjekt 1 (unten) und Prüfobjekt 2 (oben)

Der dritte Prüfling, der in Abbildung 30 gezeigt ist, ist ein 10 cm dickes Schaumstoffma-

terial. Dieser Prüfling entstammt der Schaumstoffplatte, die bei der Vergleichsmessung genutzt wird, siehe Kapitel 6.4.1.



Abbildung 30: Prüfling 3

Abschließend wurde noch ein 3 cm dickes Kalksandsteinstück als vierter Prüfling untersucht. Dieses Prüfling, zusehen in Abbildung 31, ist aus reinem Interesse an den Ergebnissen untersucht worden. Im Vergleich mit den anderen Prüflingen weist dieses Prüfling eine sehr porige Struktur auf.



Abbildung 31: Prüfling 4

In den nachfolgenden Betrachtungen werden nur für die Diskussion des Messverfahrens notwendige Messergebnisse dargestellt. In Anhang C sind die Messdaten der vier Prüfobjekte veranschaulicht.

6.2 Messaufbau für Impedanzrohrmessung

Für die Messungen wird das Impedanzrohr zusammengebaut. Dazu wird das Kundt'sche Rohr mit der entwickelten Erweiterung des Impedanzrohres mittel der Probenhalterung verbunden. Der Rohrabschluss wird montiert.

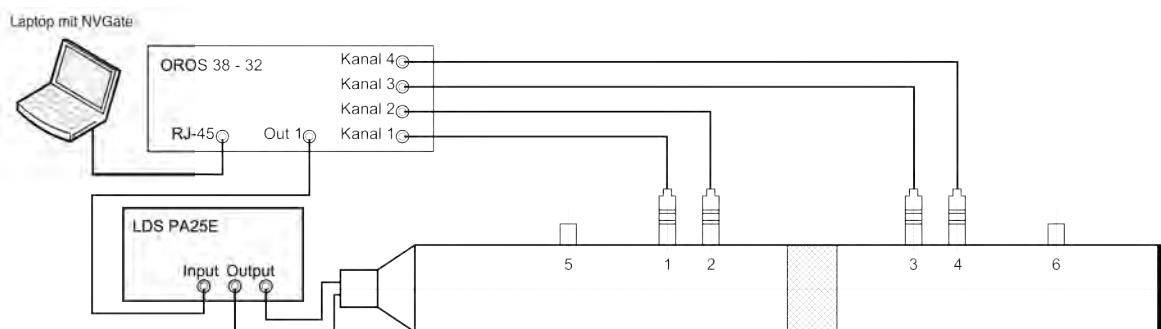


Abbildung 32: Messaufbau des Impedanzrohres

Der gesamte Messaufbau ist in Abbildung 32 dargestellt. Vor der Messung ist vor allem die richtige Lautstärke einzustellen, so dass die Lautstärkepegel am besten im Dynamikbereich der Mikrofone liegen. Die vier Mikrofone werden in die gefertigten Mikrofonhalterungen gesteckt. Es ist darauf zu achten, dass die Mikrofonmembran mit der Rohrwand abschließt.

Mit jeder Messreihe werden alle benötigten Übertragungsfunktionen berechnet und gespeichert. Jede Messreihe enthält die Übertragungsfunktionen H_{12} , H_{13} , H_{14} und H_{34} . Zusätzlich werden während der Messung die Kohärenzen der Mikrofonpaare betrachtet, um die Güte der Messdaten beurteilen zu können. Gibt es keine großen Kohärenzabweichungen zwischen den Mikrofonen, können die Messergebnisse in aller Regel für die Auswertung genutzt werden.

Die Messungen werden nach der Two-Load-Methode durchgeführt. Das heißt zuerst werden die Messung mit dem schallharten Rohrabschluss durchgeführt. Als nächste Messung wird das Prüfobjekt mit dem zweiten Abschluss untersucht, in diesem Fall ein offenes

Rohrende. Dabei ist es im Grunde egal, welchen Rohrabschluss man als zweite Variante nutzt, denn für die Berechnung der Einträge der Transfermatrix ist nur ein Abschluss notwendig, der einen anderen Reflexionsfaktor besitzt wie der des ersten Abschlusses. Dies kann nun beliebig oft mit anderen Prüfobjekten wiederholt werden.

6.3 Vormessungen

Bevor Messungen und Berechnungen durchgeführt werden können, müssen die Korrekturfunktionen H_c der Mikrofonpaarungen und die Reflexionsfaktoren r_E der Rohrabschlüsse gemessen werden. Zur Untersuchung der Güte der Messungen mit dem erweiterten Impedanzrohr wird der Reflexionsfaktor und der Verlustgrad des ersten Prüfobjektes, siehe Abbildung 29, mit einem Kundt'schen Rohr untersucht und anschließend wird die Messung mit dem Impedanzrohr wiederholt.

6.3.1 Bestimmung der Korrekturfunktionen H_c

Die Messung der Korrekturfunktion ist bereits in Kapitel 3.1 erklärt. Die Messungen werden, wie bereits erwähnt, ohne Prüfobjekt und mit dem selbem Rohrabschluss durchgeführt. Zuerst werden die Übertragungsfunktionen in Standardkonfiguration gemessen. Danach werden in den darauf folgenden Messungen jeweils ein Mikrofonpaar vertauscht. Beim Vertauschen ist darauf zu achten, dass das Referenzsignal immer das Gleiche bleibt und dass die Mikrofonmembranen an den richtigen Positionen angebracht sind. Die Korrekturfunktionen berechnen sich dann nach Gleichung (60). Für die Korrekturfunktionen H_{12}^c , H_{13}^c und H_{14}^c ergeben sich dann die in Abbildung 33 dargestellten Frequenzverläufe.

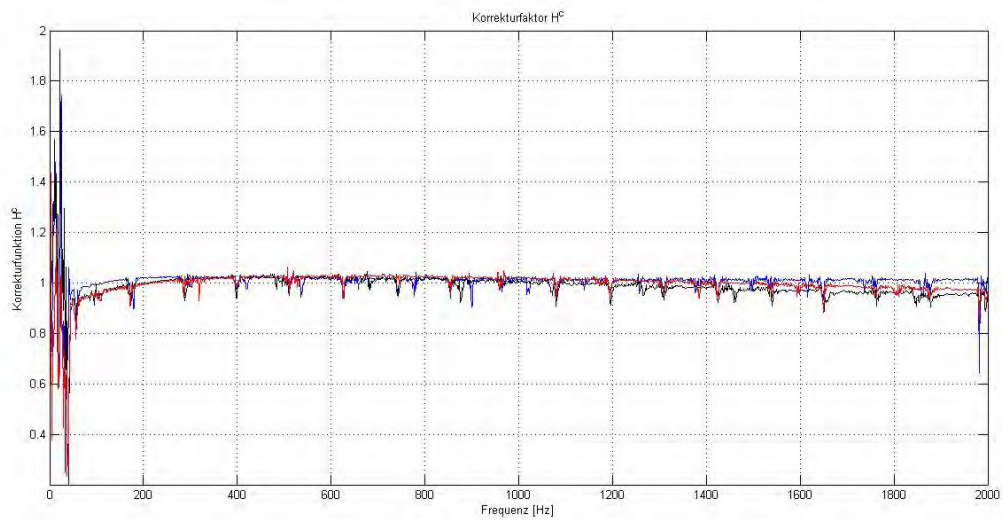


Abbildung 33: Korrekturfunktionen H_{12}^c (blau), H_{13}^c (schwarz) und H_{14}^c (rot) für den kleinen Mikrofonabstand

Die Korrekturfunktionen sind in einem breitem Frequenzbereich annähernd bei Eins, dass heißt die Mikrofonpaarungen weisen nur wenig Ungenauigkeiten zwischen den Mikrofonsignalen auf.

6.3.2 Messung des Reflexionsfaktors r_E der Rohrabschlüsse

Für die Berechnungen der akustischen Kenngrößen aus Kapitel 3.2.2 wird der Reflexionsfaktor r_E der Rohrabschlüsse benötigt. Dazu wird die Übertragungsfunktion H_{34} gemessen. Mithilfe dieser Übertragungsfunktion kann nach Gleichung (119) der Reflexionsfaktor gemessen werden. Diese Messung wird für den schallharten Rohrabschluss und für das offene Rohrende durchgeführt. Dafür ergeben sich die, in Abbildung 34, frequenzabhängigen Verläufe der Reflexionsfaktoren.

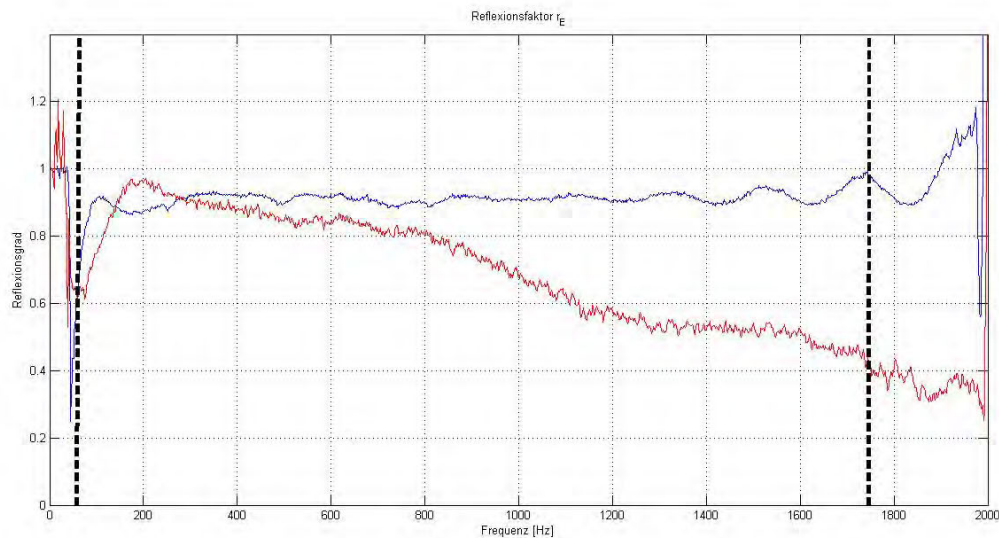


Abbildung 34: Gemessener frequenzabhängiger Reflexionsfaktor r_E , für schallharten Abschluss (blau) und für das offene Rohrende (rot)

In dem MATLAB-Programm ist in den Berechnungen der akustischen Kenngrößen nur ein über die Frequenz konstanter Reflexionsfaktor angedacht. Daher wird für den schallharten Abschluss ein $r_E = 0.9$ gewählt, da der frequenzabhängige Verlauf sich bei diesem Wert einpendelt. Für das offene Rohrende kann kein konstanter Reflexionsfaktor genutzt werden, da der Verlauf des Reflexionsfaktors sich mit zunehmender Frequenz verringert.

6.3.3 Vergleichsmessung mit dem Kundt'schen Rohr

Für einen ersten Vergleich zwischen den verschiedenen Messverfahren, wird der Reflexionsfaktor und der Verlustgrad des ersten Prüfobjektes mit dem Kundt'schen Rohr untersucht. Dafür wird nur der vordere Rohrteil verwendet. Als schallharten Rohrabschluss wird der für das Labor der Kundt'schen Rohr Messung [S.Greuel06] verwendet.

Nach der Messung im Kundt'schen Rohr wird das erste Prüfobjekt mit dem erweiterten Impedanzrohr untersucht. Für den Reflexionsfaktor und den Verlustgrad ergeben sich die in Abbildung 35 dargestellten Verläufe. Dabei stellt die rote Linie die Ergebnisse aus dem Kundt'schen Rohr dar und die blaue Linie die Ergebnisse aus der Messung mit dem erweiterten Impedanzrohr.

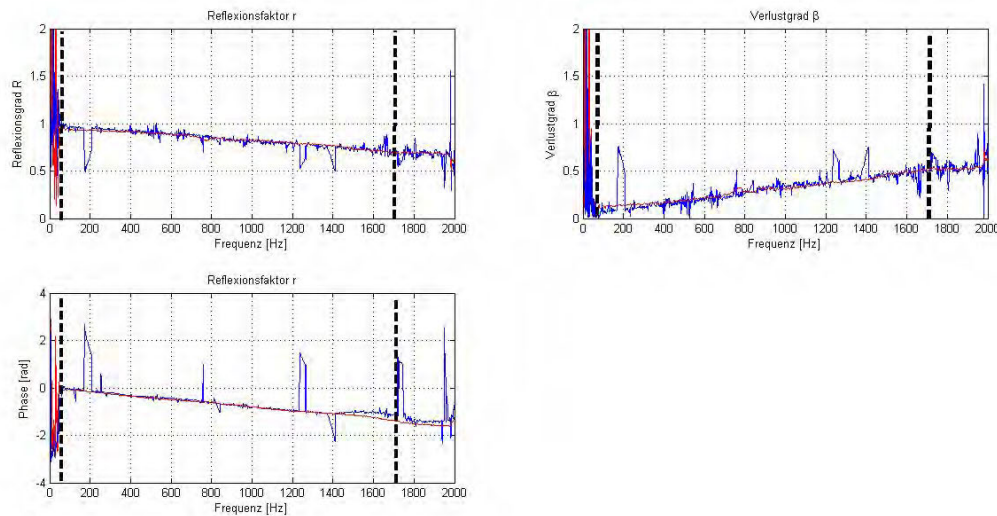


Abbildung 35: Reflexionsfaktor und Verlustgrad vom Prüfobjekt 1 (Kundt'sches Rohr (rot) und erweitertes Impedanzrohr (blau))

Vergleicht man die Messergebnisse für Reflexionsfaktor und Verlustgrad, lässt sich ein annähernd gleicher Verlauf betrachten. Die Übereinstimmungen lassen auf eine hohe Güte der Messergebnisse im Impedanzrohr schließen.

Jedoch doch sind in der Messung mit dem Impedanzrohr einige Sprünge im Frequenzverlauf zu beobachten. Diese Sprünge weisen auf Störfrequenzen hin. Vor allem in den tiefen Frequenzen kommen diese Sprünge vor, außerdem noch bei der Frequenz $f = 200 \text{ Hz}$, $f \approx 800 \text{ Hz}$ und in den Frequenzen zwischen 1200 Hz und 1400 Hz . Ab 1700 Hz kommt es zu weiteren zahlreichen Unstetigkeiten, welche durch die Ausbreitung von höheren Moden verursacht werden. Die erste Unstetigkeit bei 800 Hz lässt sich mithilfe der Untersuchung des Projektes von Greuel, Jekosch und Wruck [S.Greuel13] erklären, denn bei dieser Frequenz gibt es auch in deren Untersuchung mit dem Kundt'schen Rohr Unstetigkeiten. Daher kann davon ausgegangen werden, dass diese Unstetigkeit von der Geometrie des vorderen Rohrteiles ausgeht, da eventuell eine Resonanzfrequenz im Rohr auftritt. Der Grund für die Unstetigkeiten bei den tiefen Frequenzen, und vor allem bei $f = 200 \text{ Hz}$, könnte an der Halterung des Rohres liegen, so dass es bei tiefen Frequenzen zu ungewollten Körperschallanregungen kommt und so die Messergebnisse verfälscht werden. Darauf wiesen mehrere Testmessungen hin, bei den die Halterungen in Rohrlängsrichtung verschoben wurden und die Messergebnisse unterschiedliche Verläufe in den tiefen Frequenzen aufwiesen. Bei den Frequenzen zwischen 1200 Hz und 1400 Hz kommt es eventuell zur Resonanz im hinteren Rohrteil.

Zusätzlich zur Messung mit dem Kundt'schen Rohr sollen an dieser Stelle noch die Unter-

suchung der anderen Prüfobjekte im Bezug auf Unterschiede in den Frequenzverläufen des Reflexionsfaktors und dem Verlustgrad eingegangen werden. Für das zweite Prüfobjekt ergeben sich die Reflexion und Absorption zu den in Abbildung 36 gezeigten Verläufen.

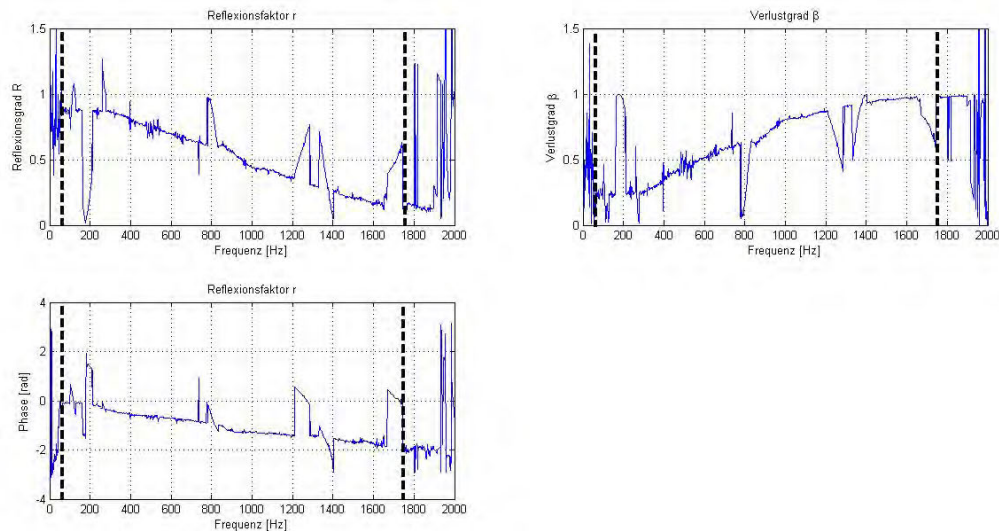


Abbildung 36: Reflexionsfaktor und Verlustgrad vom Prüfobjekt 2

Es lässt sich erkennen, dass aufgrund der anderen Struktur, im Vergleich zum Prüfobjekt 1, der Reflexionsfaktor in den hohen Frequenzen geringer ist, wodurch auch der Verlustgrad höhere Werte erreicht. Wird zusätzlich noch der Schaumstoff, Prüfobjekt 3, betrachtet, wird der charakteristische Verlauf eines idealen Absorbers, siehe Abbildung 6, in Abbildung 37 deutlich.

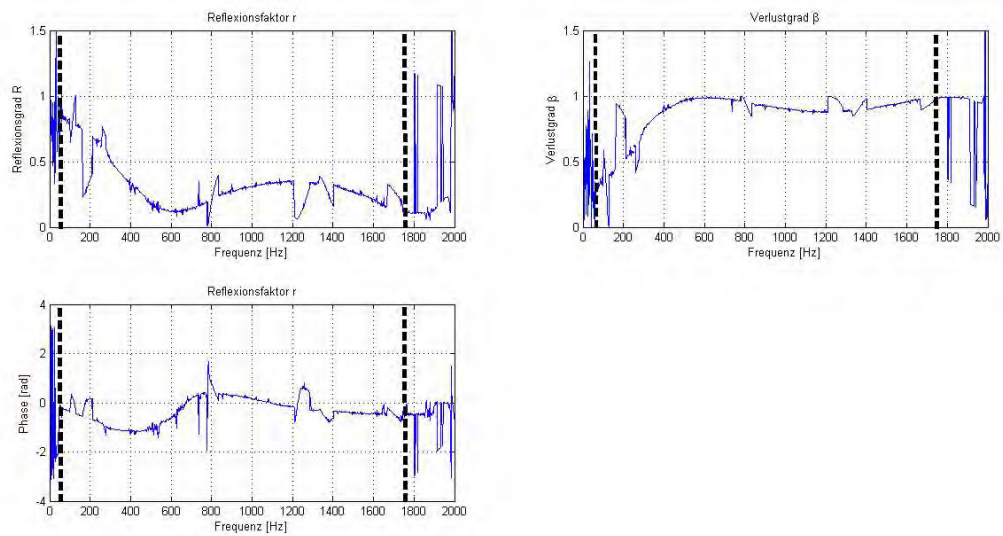


Abbildung 37: Reflexionsfaktor und Verlustgrad vom Prüfobjekt 3

Aus reinem Interesse wird noch das vierte Prüfobjekt betrachtet. Die Ergebnisse der Reflexion und des Verlustes sind in 38 dargestellt.

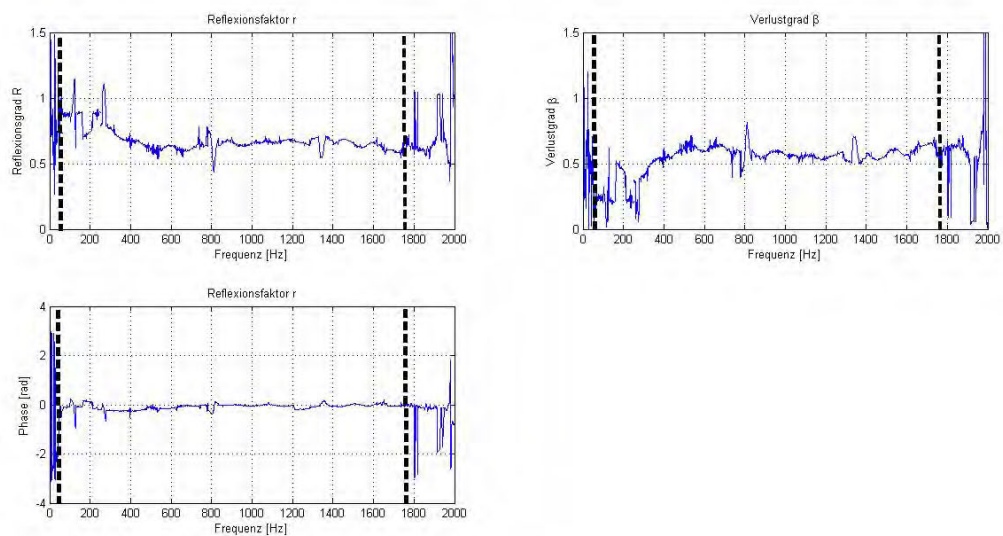


Abbildung 38: Reflexionsfaktor und Verlustgrad vom Prüfobjekt 4

Der Kalksandstein verhält sich nach den Ergebnissen, relativ zu den anderen Prüfobjekten, ziemlich schallhart und absorbierend.

6.4 Bestimmung der Transmission und Schalldämmung

Für den Vergleich des Transmissionfaktors wird eine Messung im Fensterprüfstand durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit den Messergebnissen aus dem Impedanzrohr verglichen. Beide Messungen werden mit dem Prüfobjekt 3 durchgeführt. Da die Untersuchungsfläche des Prüfobjektes im Fensterprüfstand erheblich größer als im Impedanzrohr ist, werden für die Fensterprüffläche große Schaumstoffmatten genutzt. Für die Messung im Impedanzrohr wird eine der Schaumstoffmatten, auf die Durchmessergröße des Probenhalters des Impedanzrohres, zersägt.

6.4.1 Messung im Fensterprüfstand

Die Vergleichsmessung fand im Fensterprüfstand der Prüfhalle des Institutes für Technische Akustik an der TU Berlin statt. Für die Messung wird die DIN-Norm „DIN EN ISO 140-4“ [fürNormung12] genutzt. Die Ergebnisse werden nach der „DIN EN ISO 717-1“ [fürNormung06] ausgewertet. Für die Untersuchung wurde als Prüfobjekt ein Schaumstoff mit der Dicke von 10 cm gewählt.

Der Fensterprüfstand besteht aus einem Senderraum, $V_S = 74,7 \text{ m}^3$, und einem Empfangsraum, $V_E = 53,1 \text{ m}^3$. Die beiden Räume sind durch eine Wand miteinander verbunden, in welcher sich ein Ausschnitt mit einer Fläche von $S = 1,88 \text{ m}^2$ befindet.



Abbildung 39: Prüffläche im Fensterprüfstand

In die Fensteröffnung, gezeigt in Abbildung 39, werden die Schaumstoffmatten montiert. Dabei konnte keine einzelne Matte genutzt werden, aufgrund des Fehlens einer ausreichend großen Schaumstoffmatte in der benötigten Dicke, mit den Maßen $1,37\text{ m} \times 1,60\text{ m}$. Daher wurden drei Teilstücke zurecht geschnitten, diese werden in Abbildung 40 montiert gezeigt.



Abbildung 40: Prüfobjekt im Fensterprüfstand

Dabei wurde darauf geachtet, dass die Stoßstellen der Schaumstoffplatten glatt aufeinander liegen und keine Zwischenräume entstehen. Dazu wurden die Platten so zu geschnitten, dass die gesamte Oberfläche bündig mit den Berandungen der Wandöffnung abschließt. Zusätzlich wurden die Seiten mit Holzlatten fixiert und die Anschlussstellen, zwischen Schaumstoff und Wand, mit dauerelastischer Dichtungsmasse abgedichtet, um so die Schallübertragung über eventuelle Undichtigkeiten zu mindern.

In Sachen Messaufbau wurden die Vorgaben aus der DIN-Norm DIN EN ISO 140-4 [fürNormung12] erfüllt. Dazu wird im Senderaum ein Lautsprecher, siehe Abbildung 41, aufgestellt.



Abbildung 41: Lautsprecher im Senderaum

Der Lautsprecher, ein Dodekaeder, Typ DO12 der Firma AVM, sendet ein rosa Rauschen aus, das Signal kommt von einem Norsonic 840 Schallpegelmesser, der als Signalgenerator dient. Der Schall wird im Senderaum an den Wänden zahlreich reflektiert, wodurch ein diffuses Schallfeld entsteht. Mit einem Drehgalgen wird ein $\frac{1}{4}$ " Mikrofon, vom Typ 1220, der Firma Norsonic mit dem dazugehörigen Mikrofonverstärker, vom Typ 1201, der Firma Norsonic im Senderaum geschwenkt, um so einen, über 15 s, gemittelten Schalldruck zu messen. Der Drehgalgen und das Mikrofon sind in Abbildung 42 gezeigt.



Abbildung 42: Mikrofon mit Drehgalgen

Nach der Messung im Senderaum wird der Schalldruck im Empfangsraum der mit dem gleichem Mikrofon gemessen. Die Messung der Sende- und Empfangspegel werden für drei verschiedene Lautsprecherpositionen im Senderaum durchgeführt. Die gemessenen Schalldrücke werden separat für Sende- und Empfangsraum gemittelt, wodurch die beiden Pegel L_1 , für den Senderaum, und L_2 für den Empfangsraum gebildet werden. Diese Differenz ist noch nicht aussagekräftig genug, da die Geometrie der Räume und die Prüfoberfläche nicht mit einbezogen sind. Deshalb wird in der DIN EN ISO 140-4 ein Korrekturterm für die Geometrien betrachtet. Nach der Norm berechnet sich das Schalldämm-Maß, unter der Annahme, das Nebenwege vernachlässigbar sind, nach

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A_2} . \quad (141)$$

Dabei stellt S die Fläche des Prüfobjektes dar, was in dieser Messung $S = 1,88 \text{ m}^2$ ist. Die Größe A_2 ist die äquivalente Absorptionsfläche des Empfangsraumes. Diese berechnet sich aus

$$A_2 = \frac{0,163 V_2}{T_2} , \quad (142)$$

dem Volumen des Empfangsraumes V_2 und der gemittelten Nachhallzeit T_2 . Das Volumen des Empfangsraumes beträgt $V_2 = 53,1 \text{ m}^3$. Die Nachhallzeit gibt an, wieviel Zeit ein diffuses Schallfeld braucht, um 60 dB abzufallen, wenn das Signal abgeschaltet wird. Durch diese Zeit lassen sich Aussagen über die Absorptionseigenschaften des Raumes formulieren. Die Nachhallzeit muss mehrmals im Empfangsraum gemessen werden, da die Mikrofon-

position fest im Raum ist und im Empfangsraum örtlich verschiedene Schalldruckpegel herrschen. Die Positionierung des Mikrofons und des Lautsprechers ist in Abbildung 43 zusehen.



Abbildung 43: Nachhallmessung im Empfangsraum

Durch den Aufbau der Prüffläche, drei Einzelteile, kann die Transmission, aufgrund von Undichtigkeiten, ungewollt erhöht werden. Um dies auszuschließen wurden alle Fugen manuell mit dem Mikrofon abgefahren, zusehen in Abbildung 45 und 44.



Abbildung 44: Abtastung der Fugestellen zwischen den Schaumstoffmatten



Abbildung 45: Abtastung der Anschlussstellen zwischen Schaumstoffmatte und Wand

Diese Messung ergab jedoch keine nennenswerten Undichtigkeiten. Wenn an den Rändern nur minimale Undichtigkeit entstanden sind, dann nur an wenigen Metalllösen, die zur Befestigung des Rahmenmaterials genutzt wurden. Da jedoch augenscheinlich der Hauptweg der Schallausbreitung direkt durch den Schaumstoff ging, können die einzelnen Undichtigkeiten vernachlässigt werden.

Werden alle Messungen für die Berechnung des Schalldämm-Maßes, nach Gleichung 141, für den untersuchten Schaumstoff betrachtet, ergibt sich, der in Abbildung 46 gezeigte Frequenzverlauf.

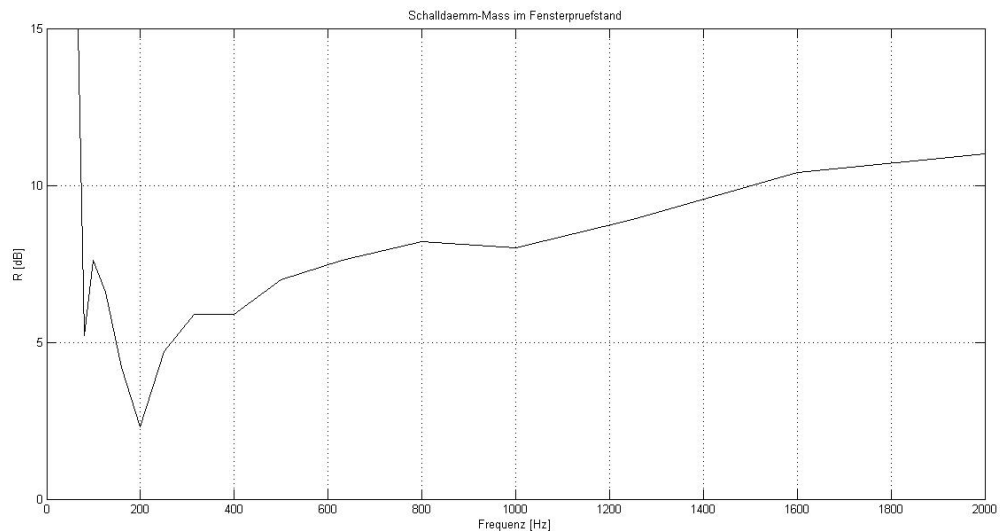


Abbildung 46: Frequenzverlauf des Schalldämm- Maßes vom Schaumstoff

Die vollständige Auswertung nach der DIN-Norm „DIN EN ISO 717-1“ ist als Prüfbericht in Anhang B zu finden.

6.4.2 Messung mit erweitertem Impedanzrohr

Das Impedanzrohr wurde mit dem Gedanken entwickelt, dass sich der Transmissionsfaktor von porösen Materialien auch ohne Messung im Fensterprüfstand messen lässt. Daher soll der Vergleich der beiden Methoden betrachtet werden.

Für die Messung wird der Schaumstoff aus der Fensterprüfstandmessung im Impedanzrohr untersucht. Dazu wird der in Kapitel 6.2 bereits beschriebene Messaufbau genutzt.

Wird die Untersuchung für den schallharten Rohrabschluss und das offene Rohrende durchgeführt ergeben sich für den Transmissionsfaktor und die Durchgangsdämpfung die in Abbildung 47 gezeigten Ergebnisse.

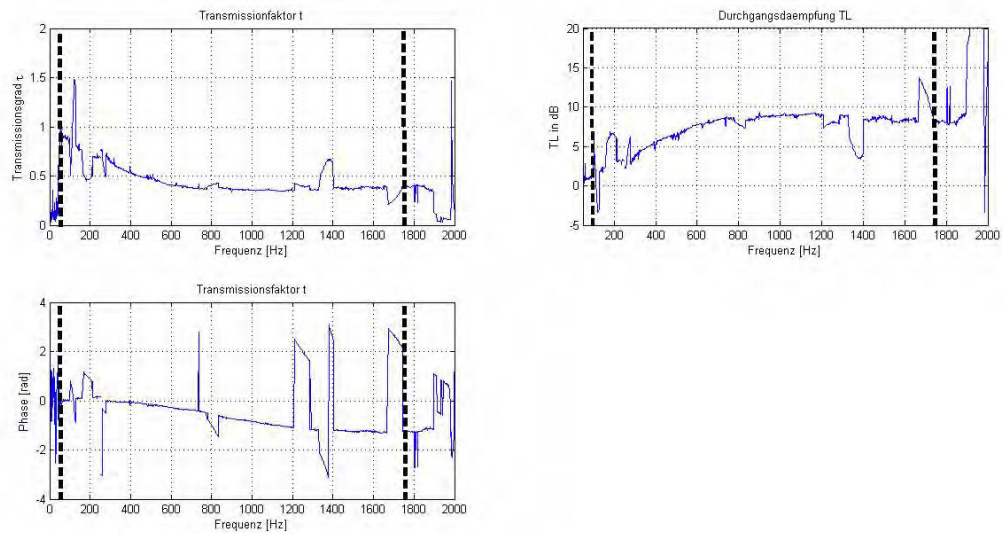


Abbildung 47: Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung von Prüfobjekt 3

Mit den Ergebnissen lassen sich erste Aussagen über die Schalldämmung des Schaumstoffes treffen. In tiefen Frequenzen wird viel Energie durch den Schaumstoff transmittiert. Mit steigender Frequenz steigt die Dämmung stark an, bis sie ab etwa 800 Hz einen gleichbleibenden Transmissionsgrad aufweist.

6.4.3 Vergleich der Ergebnisse

In der Abbildung 48 sind die Ergebnisse der Durchgangsdämpfung (links) und des Schalldämm-Maßes (rechts) des Schaumstoff dargestellt.

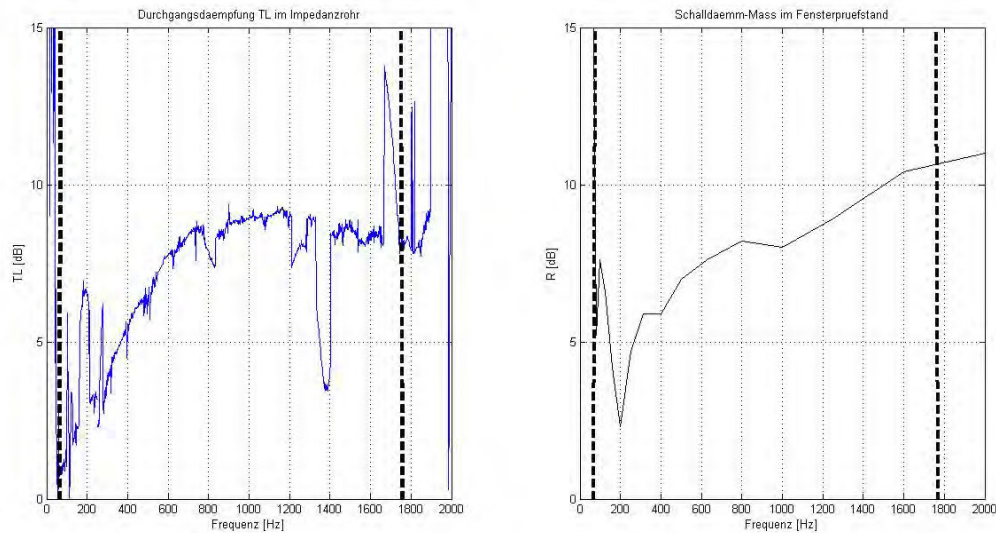


Abbildung 48: Vergleich zwischen der Durchgangsdämpfung (links) und des Schalldämm-Maßes (rechts)

Der Vergleich dieser beiden Messreihen wird durchgeführt, das sich sowohl die Durchgangsdämpfung als auch das Schalldämm-Maß nach der gleichen Formel berechnen lassen und zwar aus

$$R = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) = TL . \quad (143)$$

Beim Vergleich sind im Frequenzbereich zwischen $f = 200 \text{ Hz}$ und $f = 1000 \text{ Hz}$ Übereinstimmung zu erkennen. In den hohen Frequenzen gibt es Unterschiede im Verlauf, das Schalldämm-Maß nimmt mit steigender Frequenz immer weiter zu, wohingegen die Durchgangsdämpfung einen leichten Abfall bei hohen Frequenzen aufweist. In den tiefen Frequenzen fällt die Durchgangsdämpfung auf fast Null ab und das Schalldämm-Maß steigt noch einmal mit kleiner werdenden Frequenzen. Dies jedoch kritisch zu hinterfragen. Diese hohen Werte können aufgrund von Problemen mit sehr tiefen Frequenzen im Fensterprüfstand, aufgrund von der möglichen Ausbildung von stehenden Wellen und damit verbundenen Messfehlern, erklärt werden.

In aller Regel können Messergebnisse aus dem Impedanzrohr nicht ohne Umrechnung auf Ergebnisse aus dem Fensterprüfstand genutzt werden. Aufgrund von unterschiedlichem

Schalleinfall. Im Impedanzrohr findet die Untersuchung unter senkrechtem Schalleinfall statt, im Fensterprüfstand wird ein diffuser Schalleinfall betrachtet. Dieser Betrachtungsunterschied ist jedoch bei Schaumstoffplatten kaum einflussgebend, da die Platte im Fensterprüfstand zu nicht signifikanten Schwingungen angeregt wird. Daher wurde auch Schaumstoff für die Untersuchung gewählt, da die Impedanz des Schaumstoffes nicht von deren Masse und Randbedingungen abhängig ist.

Aufgrund der Ergebnisse muss für die Vergleichbarkeit diskutiert werden, auf welchem Frequenzbereich man die Betrachtung legt. Im mittleren Frequenzbereich liefern beide Messverfahren ähnliche Werte. In höheren Frequenzen beurteilt das Schalldämm-Maß die Dämmungseigenschaften des Materials besser.

7 Fehlerbetrachtung

Innerhalb der Auswertung der Ergebnisse sind bereits die Unstetigkeitsstellen in den Messdaten aufgefallen. Diese haben mehrere Gründe als Ursache. Zum Einen kann es an der Geometrie des Rohres liegen. Wie bereits im Kundt'schen Rohr aus dem Projekt von Greuel, Jekosch und Wruck [S.Greuel13] bekannt, gibt es im ersten Rohrteil eine Resonanzfrequenz. Der zweite Rohrteil hat aufgrund der gleichen Geometrie ebenfalls eine Resonanzfrequenz. Außerdem ist die Geometrie des gesamten Rohres nicht durchgängig gleich. Der Innendurchmesser weist eine Toleranz auf, wodurch die Wellenausbreitung beeinflusst werden kann. Dann gibt es an den Stellen, an denen die Probenhalterung auf die Rohrwand trifft, Sprungstellen, durch die Kanten des Probenhalters. Es kommt also dort zu Beugung und auch Reflexion. Dann gibt es noch die Bohrlöcher für die Mikrofonhalterungen, die nicht exakt mit der Rohrinne abschließen. Zum Anderen hat die Halterung des Rohres ein Einfluss auf die Resonanzen. Durch Verschiebung der Standfüße ließen sich die Unstetigkeiten verringern, jedoch nicht verschieben. Ein anderer Fehlergrund kann der Rohrabschluss sein. Durch die Berechnung von r_E kann der Reflexionsfaktor ermittelt werden, jedoch kann dieser in der Auswertung nicht richtig eingebracht werden, aufgrund der Frequenzabhängigkeit. Das Prinzip des Probenhalters kann ebenfalls Grund für Fehler sein, denn schließlich ist dieser aus starrem Metall, wodurch sich Körperschallwellen zwischen den Rohrteilen bewegen können. Dann muss noch beachtet werden, dass die Rohrwand nicht als vollständig schallhart betrachtet werden kann. Sondern es wird auch ein Teil der Energie durch die Rohrwand an die Umwelt transmittiert. Dann kann auch noch die Positionierung der Mikrofone einen Fehler verursachen. Da sich die Anforderungen des Standards nicht immer mit den bereits vorhandenen Geometrien vereinbar war.

8 Resumee

In dieser Arbeit wurde mithilfe des Standards E2611-09 ein Kundt'sches Rohr erweitert, um zusätzlich zum Reflexionsfaktor und Absorptionsgrad den Transmissionsgrad bestimmen zu können. Das Messverfahren beruht auf einer Vier-Mikrofon-Methode. Zusätzlich wurde noch eine Alternativvariante vorgestellt. Mithilfe des Standards wurde eine Rohrerweiterung entworfen, die gebaut wurde und an das bestehende Kundt'sche Rohr angepasst wurde. Mit dem Rohr wurden vier Prüfobjekte auf Reflexion, Verlust und Transmission untersucht. Zur Validierung der Messwerte wurden zwei Vergleichsmessungen durchgeführt. Zum Einen die Messung der Reflexion und Absorption mit dem Kundt'schen Rohr und zum Anderen die Untersuchung der Transmission und Schallämmung mit dem Fensterprüfstand.

Die Untersuchungen der akustischen Kenngrößen mit dem Impedanzrohr ergaben im Großen und Ganzen schlüssige Ergebnisse. Jedoch gibt es innerhalb der Messergebnisse Stellen die Unstetigkeiten aufweisen. Dies liegt unter Anderem an der gewählten Geometrie des Rohres und den Berechnungsverfahren für die akustischen Kenngrößen.

In der Art in der sich die Messergebnisse mit diesem Rohr und der Berechnung darstellen, sind die Ergebnisse nur eingeschränkt verwendbar. Da in der Industrie größtenteils klare Aussagen über das Verhalten von porösen Materialien getroffen werden müssen, sollten in einer Weiterbetrachtung dieser Arbeit die Unstetigkeiten abgeschwächt oder sogar vermieden werden. Dazu könnte z.B der in dem Standard empfohlene reflexionsarme Abschluss entwickelt und benutzt werden und der Reflexionsfaktor des Rohrabschlusses kann frequenzabhängig in die Berechnungen mit eingebracht werden.

9 Quellenverzeichnis

- [A.Meier06] A.Meier. *Dissertation: „Die Bedeutung des Verlustfaktors bei der Bestimmung der Schalldämmung im Prüfstand“*. Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2000-06. URL http://sylvester.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2000/23/00_23.pdf [1.10.201315:00].
- [forTesting03] American Society for Testing and Materials International. *„Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of Acoustical Materials Based on the Transfer Matrix Method“*. Beuth Verlag, 2009-03.
- [fürAkustik03] Deutsche Gesellschaft für Akustik. *DEGA-Empfehlung 101 - „Akustische Wellen und Felder“*, 2006-03. URL <http://www.dega-akustik.de/publikationen/online-publikationen/dega-empfehlung-101> [4.6.201315:15].
- [fürNormung10] Deutsches Institut für Normung. *DIN EN ISO 10534-2: „Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren; Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion“*. Beuth Verlag, 2001-10.
- [fürNormung06] Deutsches Institut für Normung. *DIN EN ISO 717-1: „Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung“*. Beuth Verlag, 2013-06.
- [fürNormung12] Deutsches Institut für Normung. *DIN EN ISO 140-4: „Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen - Teil 4: Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden“*. Beuth Verlag, 1998-12.
- [H.Zabel09] H.Zabel. *Vorlesungsskript zur Lehrveranstaltung „Seminar zu ausgewählten Themen der Festkörperphysik“ : „23.Lektion: Wellen“*. Ruhr-Universität Bochum, 2009. URL http://www.ep4.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/skripte/ws10-11/medipol/23_lek_wellen.pdf [4.6.201314:30].
- [L.Ackermann11] L.Ackermann. *Dissertation: „Simulation der Schalltransmission durch Wände“*. Mechanik-Zentrum der Technischen Universität

- Braunschweig, 2001-11. URL http://rzbl68.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00001331/Document.pdf [4.6.201315:00].
- [M.Möser09] M.Möser. *„Technische Akustik“, 8.Auflage.* Springer- Verlag Berlin, 2009.
- [R.Brunnader10] R.Brunnader. *Diplomarbeit: „Aufbau und Programmierung der 2p-Messmethode im Impedanzrohr für die Messung akustischer Materialparameter“.* Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung der Technischen Universität Graz, 2002-10. URL http://zeo.spsc.tugraz.at/sites/default/files/DA_Brunnader_Impedanzrohr.pdf [17.5.201312:00].
- [S.Greuel13] L.Wruck S.Greuel, S.Jekosch. *Projektbericht zur „Anwendung der DIN 10534-2 auf ein rundes Impedanzrohr“.* TU Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, 2013.
- [S.Greuel06] L.Wruck S.Greuel, S.Jekosch. *Laborskript zur Lehrveranstaltung „Technische Akustik“ : „Messung des Absorptionsgrades im Hallraum und Impedanzrohr“.* TU Berlin, Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, 2013-06.
- [W.Truppe04] F.Kappler W.Truppe. *Diplomarbeit: „Messsystem für akustische Zweitore“.* Institut für Breitbandkommunikation der Technischen Universität Graz, 2008-04. URL http://www.spsc.tugraz.at/sites/default/files/DA_Kappler_Truppe_Impedanzrohr_4_Mik_Methode.pdf [1.10.201314:00].
- [Y.Salissou02] O.Doutres Y.Salissou, R.Panneton. *„Complement to standard method for measuring normal incidence sound transmission loss with three microphones“.* Acoustical Society of America, 2012-02. URL http://asad1.org/jasa/resource/1/jasman/v131/i3/pEL216_s1?bypassSS0=1 [6.6.201315:00].

Anhang

A Matlab-Code

A.1 vierMikrofonmethode.m

```
1 % clear all
2 % close all
3
4 %{
5
6 Dieses Programm beschaeftigt sich mit der Berechnung der akustischen
7 Kenngroessen, vor allem der Transmission von por"osen Materialien.
8 Dazu wird ein Impedanzrohr mit zwei Mikrofonen um ein weiteres Rohr mit
9 zwei weiteren Mikrofonen erweitert. Mittels der Mikrofone werden die
10 erforderlichen "Ubertragungsfunktionen nach dem ASTM Standard E2611-09
11 gemessen. Mit diesen wird die Transmissionsmatrix T berechnet. Aus ...
    dieser
12 werden die akustischen Kenngroessen berechnet.
13
14 Im Rohr befinden sich 6 Bohrloecher, mit denen die verschiedenen ...
    Mikrofon-
15 positionen gew"ahlt werden. F"ur die Vier-Mikrofon-Methode werden die
16 Uebertragungsfunktionen bei zwei verschiedenen Rohrabchl"ussen ...
    gemessen.
17
18 %}
19
20 %{
21
22 Matlab-Code von Sven Deter im Zusammenhang mit der Bachelorarbeit
23 "Erstellen eines Versuchsaufbaus zur Bestimmung von Transmissionsgraden
24 por"oser Materialien mit einem Impedanzrohr" an der Technischen ...
    Universitaet
25 Berlin. (Abgabe: 18.10.2013)
26
27 %}
28
29 %% Datenreihen einlesen und andere ver"anderbare Variablen
30
31 %%
```

```
32 Abkürzung der Konstellationen der Messreihen
33     – ohne Prüfobjekt    : op
34     – mit Prüfobjekt     : mp
35     – 1.Rohrabschluss   : a
36     – 2.Rohrabschluss   : b
37     – Referenzmikrofon   : _1 bzw. _5
38     – Konfiguration      : _I oder _II
39 %}
40
41 %Messung mit Mikrofonpositionen 1, 2, 3, 4
42 %Messreihen zur Korrektur
43 load('transmission_1.mat', 'FFT1_H1_10_9_Y_ReIm' );
44 H_12_op_a_I = FFT1_H1_10_9_Y_ReIm;
45 load('transmission_1.mat', 'FFT1_H1_11_9_Y_ReIm' );
46 H_13_op_a_I = FFT1_H1_11_9_Y_ReIm;
47 load('transmission_1.mat', 'FFT1_H1_12_9_Y_ReIm' );
48 H_14_op_a_I = FFT1_H1_12_9_Y_ReIm;
49 load('transmission_2.mat', 'FFT1_H1_10_9_Y_ReIm' );
50 H_12_op_a_II = FFT1_H1_10_9_Y_ReIm;
51 load('transmission_3.mat', 'FFT1_H1_11_9_Y_ReIm' );
52 H_13_op_a_II = FFT1_H1_11_9_Y_ReIm;
53 load('transmission_4.mat', 'FFT1_H1_12_9_Y_ReIm' );
54 H_14_op_a_II = FFT1_H1_12_9_Y_ReIm;
55
56 %Messreihen zur Transmission
57 load('transmission_9.mat', 'FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 1
58 % load('transmission_11.mat', 'FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 2
59 % load('transmission_15.mat', 'FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 3
60 % load('transmission_35.mat', 'FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 4
61 H_12_mp_a_I = FFT1_H1_10_9_Y_ReIm;
62 load('transmission_9.mat', 'FFT1_H1_11_9_Y_ReIm');
63 H_13_mp_a_I = FFT1_H1_11_9_Y_ReIm;
64 load('transmission_9.mat', 'FFT1_H1_12_9_Y_ReIm');
65 H_14_mp_a_I = FFT1_H1_12_9_Y_ReIm;
66 load('transmission_10.mat', 'FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 1
67 % load('transmission_12.mat', 'FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 2
68 % load('transmission_16.mat', 'FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 3
69 % load('transmission_36.mat', 'FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 4
70 H_12_mp_b_I = FFT1_H1_10_9_Y_ReIm;
71 load('transmission_10.mat', 'FFT1_H1_11_9_Y_ReIm');
72 H_13_mp_b_I = FFT1_H1_11_9_Y_ReIm;
73 load('transmission_10.mat', 'FFT1_H1_12_9_Y_ReIm');
74 H_14_mp_b_I = FFT1_H1_12_9_Y_ReIm;
75
76 %Messung mit Mikrofonpositionen 5, 2, 3, 6
```

```
77 %Messreihen zur Korrektur
78 load('transmission_17.mat','FFT1_H1_10_9_Y_ReIm');
79 H_52_op_a_I = FFT1_H1_10_9_Y_ReIm;
80 load('transmission_17.mat','FFT1_H1_11_9_Y_ReIm');
81 H_53_op_a_I = FFT1_H1_11_9_Y_ReIm;
82 load('transmission_17.mat','FFT1_H1_12_9_Y_ReIm');
83 H_56_op_a_I = FFT1_H1_12_9_Y_ReIm;
84 load('transmission_18.mat','FFT1_H1_10_9_Y_ReIm');
85 H_52_op_a_II = FFT1_H1_10_9_Y_ReIm;
86 load('transmission_19.mat','FFT1_H1_11_9_Y_ReIm');
87 H_53_op_a_II = FFT1_H1_11_9_Y_ReIm;
88 load('transmission_20.mat','FFT1_H1_12_9_Y_ReIm');
89 H_56_op_a_II = FFT1_H1_12_9_Y_ReIm;
90
91 %Messreihen zur Transmission
92 load('transmission_25.mat','FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 1
93 % load('transmission_27.mat','FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 2
94 % load('transmission_31.mat','FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 3
95 % load('transmission_39.mat','FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 4
96 H_52_mp_a_I = FFT1_H1_10_9_Y_ReIm;
97 load('transmission_25.mat','FFT1_H1_11_9_Y_ReIm');
98 H_53_mp_a_I = FFT1_H1_11_9_Y_ReIm;
99 load('transmission_25.mat','FFT1_H1_12_9_Y_ReIm');
100 H_56_mp_a_I = FFT1_H1_12_9_Y_ReIm;
101 load('transmission_26.mat','FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 1
102 % load('transmission_28.mat','FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 2
103 % load('transmission_32.mat','FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 3
104 % load('transmission_40.mat','FFT1_H1_10_9_Y_ReIm'); %Absorber 4
105 H_52_mp_b_I = FFT1_H1_10_9_Y_ReIm;
106 load('transmission_26.mat','FFT1_H1_11_9_Y_ReIm');
107 H_53_mp_b_I = FFT1_H1_11_9_Y_ReIm;
108 load('transmission_26.mat','FFT1_H1_12_9_Y_ReIm');
109 H_56_mp_b_I = FFT1_H1_12_9_Y_ReIm;
110
111
112 % Frequenzvektor
113 load('transmission_1.mat','FFT1_H1_10_9_X_Val');
114 f = FFT1_H1_10_9_X_Val;
115
116 Trennfrequenz=250; %[Hz]
117
118 d = 0.03; %Dicke in m
119
120 r_E = 0.9; %Abschluss
121
```



```

122 load('transmission_9.mat','FFT1_H1_12_11_Y_ReIm');
123 H_34_a = FFT1_H1_12_11_Y_ReIm;
124
125 load('transmission_10.mat','FFT1_H1_12_11_Y_ReIm');
126 H_34_b = FFT1_H1_12_11_Y_ReIm;
127
128 %% Korrekturfunktion H_c der Mikrofonpaare
129
130 % kleiner Mikrofonabstand
131 H_11_a = ones(1,length(f));
132 H_11_b = ones(1,length(f));
133
134 % Korrekturfunktion berechnen
135 H_c_12 = sqrt(abs(H_12_op_a_I).* abs(H_12_op_a_II)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_12_op_a_I)+angle(H_12_op_a_II))./2);
136 H_c_13 = sqrt(abs(H_13_op_a_I).* abs(H_13_op_a_II)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_13_op_a_I)+angle(H_13_op_a_II))./2);
137 H_c_14 = sqrt(abs(H_14_op_a_I).* abs(H_14_op_a_II)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_14_op_a_I)+angle(H_14_op_a_II))./2);
138
139 % figure(6)
140 % plot(f,abs(H_c_12))
141 % hold on
142 % plot(f,abs(H_c_13),'k')
143 % plot(f,abs(H_c_14),'r')
144 % grid on
145 % xlabel('Frequenz [Hz]')
146 % ylabel('Korrekturfunktion H^c')
147 % title('Korrekturfaktor H^c')
148
149 % gemessene Daten korrigieren
150 H_12_a = (abs(H_12_mp_a_I)./ abs(H_c_12)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_12_mp_a_I)-angle(H_c_12)));
151 H_13_a = (abs(H_13_mp_a_I)./ abs(H_c_13)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_13_mp_a_I)-angle(H_c_13)));
152 H_14_a = (abs(H_14_mp_a_I)./ abs(H_c_14)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_14_mp_a_I)-angle(H_c_14)));
153 H_12_b = (abs(H_12_mp_b_I)./ abs(H_c_12)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_12_mp_b_I)-angle(H_c_12)));
154 H_13_b = (abs(H_13_mp_b_I)./ abs(H_c_13)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_13_mp_b_I)-angle(H_c_13)));
155 H_14_b = (abs(H_14_mp_b_I)./ abs(H_c_14)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_14_mp_b_I)-angle(H_c_14)));
156
157 % grosser Mikrofonabstand

```

```
158 H_55_a = ones(1,length(f));
159 H_55_b = ones(1,length(f));
160
161 % Korrekturfunktion berechnen
162 H_c_52 = sqrt(abs(H_52_op_a_I).* abs(H_52_op_a_II)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_52_op_a_I)+angle(H_52_op_a_II))./2);
163 H_c_53 = sqrt(abs(H_53_op_a_I).* abs(H_53_op_a_II)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_53_op_a_I)+angle(H_53_op_a_II))./2);
164 H_c_56 = sqrt(abs(H_56_op_a_I).* abs(H_56_op_a_II)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_56_op_a_I)+angle(H_56_op_a_II))./2);
165
166 % gemessene Daten korrigieren
167 H_52_a = (abs(H_52_mp_a_I)./ abs(H_c_52)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_52_mp_a_I)-angle(H_c_52)));
168 H_53_a = (abs(H_53_mp_a_I)./ abs(H_c_53)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_53_mp_a_I)-angle(H_c_53)));
169 H_56_a = (abs(H_56_mp_a_I)./ abs(H_c_56)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_56_mp_a_I)-angle(H_c_56)));
170 H_52_b = (abs(H_52_mp_b_I)./ abs(H_c_52)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_52_mp_b_I)-angle(H_c_52)));
171 H_53_b = (abs(H_53_mp_b_I)./ abs(H_c_53)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_53_mp_b_I)-angle(H_c_53)));
172 H_56_b = (abs(H_56_mp_b_I)./ abs(H_c_56)) .* ...
    exp(1j*(angle(H_56_mp_b_I)-angle(H_c_56)));
173
174 %% Berechnung von T
175
176 %Variablen des Impedanzrohres
177 l_1_1 = 0.2;
178 l_2_1 = 0.34;
179 s_1_1 = 0.0765;
180 s_2_1 = 0.0765;
181
182 l_1_5 = 0.2;
183 l_2_5 = 0.34;
184 s_1_5 = 0.4;
185 s_2_5 = 0.4;
186
187 rho = 1.2;
188 c = 340;
189
190 k = (2*pi*f) ./ c;
191
192 % Wellenanteile f"ur a und b
```

```

193 A_1_a = 1i * (((H_11_a .* exp(-k .* (1i * l_1_1))) - (H_12_a .* ...
      exp(-k .* (1i*(l_1_1 + s_1_1))))) ./ (2*sin(-k .* s_1_1)));
194 A_5_a = 1i * (((H_55_a .* exp(-k .* (1i * l_1_5))) - (H_52_a .* ...
      exp(-k .* (1i*(l_1_5 + s_1_5))))) ./ (2*sin(-k .* s_1_5)));
195
196 B_1_a = 1i * (((H_12_a .* exp(k .* (1i *(l_1_1+s_1_1))))) - (H_11_a .* ...
      .* exp(k .* (1i*l_1_1))))) ./ (2*sin(-k .* s_1_1)));
197 B_5_a = 1i * (((H_52_a .* exp(k .* (1i *(l_1_5+s_1_5))))) - (H_55_a .* ...
      .* exp(k .* (1i*l_1_5))))) ./ (2*sin(-k .* s_1_5)));
198
199 C_1_a = 1i * (((H_13_a .* exp(k .* (1i *(l_2_1+s_2_1))))) - (H_14_a .* ...
      .* exp(k .* (1i*l_2_1))))) ./ (2*sin(-k .* s_2_1)));
200 C_5_a = 1i * (((H_53_a .* exp(k .* (1i *(l_2_5+s_2_5))))) - (H_56_a .* ...
      .* exp(k .* (1i*l_2_5))))) ./ (2*sin(-k .* s_2_5)));
201
202 D_1_a = 1i * (((H_14_a .* exp(-k .* (1i * l_2_1))) - (H_13_a .* ...
      exp(-k .* (1i*(l_2_1 + s_2_1))))) ./ (2*sin(-k .* s_2_1)));
203 D_5_a = 1i * (((H_56_a .* exp(-k .* (1i * l_2_5))) - (H_53_a .* ...
      exp(-k .* (1i*(l_2_5 + s_2_5))))) ./ (2*sin(-k .* s_2_5)));
204
205
206 A_1_b = 1i * (((H_11_b .* exp(-k .* (1i * l_1_1))) - (H_12_b .* ...
      exp(-k .* (1i*(l_1_1 + s_1_1))))) ./ (2*sin(-k .* s_1_1)));
207 A_5_b = 1i * (((H_55_b .* exp(-k .* (1i * l_1_5))) - (H_52_b .* ...
      exp(-k .* (1i*(l_1_5 + s_1_5))))) ./ (2*sin(-k .* s_1_5)));
208
209 B_1_b = 1i * (((H_12_b .* exp(k .* (1i *(l_1_1+s_1_1))))) - (H_11_b .* ...
      .* exp(k .* (1i*l_1_1))))) ./ (2*sin(-k .* s_1_1)));
210 B_5_b = 1i * (((H_52_b .* exp(k .* (1i *(l_1_5+s_1_5))))) - (H_55_b .* ...
      .* exp(k .* (1i*l_1_5))))) ./ (2*sin(-k .* s_1_5)));
211
212 C_1_b = 1i * (((H_13_b .* exp(k .* (1i *(l_2_1+s_2_1))))) - (H_14_b .* ...
      .* exp(k .* (1i*l_2_1))))) ./ (2*sin(-k .* s_2_1)));
213 C_5_b = 1i * (((H_53_b .* exp(k .* (1i *(l_2_5+s_2_5))))) - (H_56_b .* ...
      .* exp(k .* (1i*l_2_5))))) ./ (2*sin(-k .* s_2_5)));
214
215 D_1_b = 1i * (((H_14_b .* exp(-k .* (1i * l_2_1))) - (H_13_b .* ...
      exp(-k .* (1i*(l_2_1 + s_2_1))))) ./ (2*sin(-k .* s_2_1)));
216 D_5_b = 1i * (((H_56_b .* exp(-k .* (1i * l_2_5))) - (H_53_b .* ...
      exp(-k .* (1i*(l_2_5 + s_2_5))))) ./ (2*sin(-k .* s_2_5)));
217
218
219 % Druck und Schnelle f"ur a und b in x=0 und x=d
220 p_0_1_a = A_1_a + B_1_a;
221 u_0_1_a = (A_1_a - B_1_a) ./ (rho * c);

```

```

222 p_0_1_b = A_1_b + B_1_b;
223 u_0_1_b = (A_1_b - B_1_b) ./ (rho * c);
224
225 p_d_1_a = (C_1_a .* exp(-k .* (1i*d))) + (D_1_a .* exp(k .* (1i*d)));
226 u_d_1_a = ((C_1_a .* exp(-k .* (1i*d))) - (D_1_a .* exp(k .* ...
    (1i*d)))) ./ (rho * c);
227 p_d_1_b = (C_1_b .* exp(-k .* (1i*d))) + (D_1_b .* exp(k .* (1i*d)));
228 u_d_1_b = ((C_1_b .* exp(-k .* (1i*d))) - (D_1_b .* exp(k .* ...
    (1i*d)))) ./ (rho * c);
229
230 p_0_5_a = A_5_a + B_5_a;
231 u_0_5_a = (A_5_a - B_5_a) ./ (rho * c);
232 p_0_5_b = A_5_b + B_5_b;
233 u_0_5_b = (A_5_b - B_5_b) ./ (rho * c);
234
235 p_d_5_a = (C_5_a .* exp(-k .* (1i*d))) + (D_5_a .* exp(k .* (1i*d)));
236 u_d_5_a = ((C_5_a .* exp(-k .* (1i*d))) - (D_5_a .* exp(k .* ...
    (1i*d)))) ./ (rho * c);
237 p_d_5_b = (C_5_b .* exp(-k .* (1i*d))) + (D_5_b .* exp(k .* (1i*d)));
238 u_d_5_b = ((C_5_b .* exp(-k .* (1i*d))) - (D_5_b .* exp(k .* ...
    (1i*d)))) ./ (rho * c);
239
240 %T_1 und T_5
241 T_1_1_1 = ((p_0_1_a .* u_d_1_b) - (p_0_1_b .* u_d_1_a)) ./ ((p_d_1_a ...
    .* u_d_1_b) - (p_d_1_b .* u_d_1_a));
242 T_1_1_2 = ((p_0_1_b .* p_d_1_a) - (p_0_1_a .* p_d_1_b)) ./ ((p_d_1_a ...
    .* u_d_1_b) - (p_d_1_b .* u_d_1_a));
243 T_1_2_1 = ((u_0_1_a .* u_d_1_b) - (u_0_1_b .* u_d_1_a)) ./ ((p_d_1_a ...
    .* u_d_1_b) - (p_d_1_b .* u_d_1_a));
244 T_1_2_2 = ((p_d_1_a .* u_0_1_b) - (p_d_1_b .* u_0_1_a)) ./ ((p_d_1_a ...
    .* u_d_1_b) - (p_d_1_b .* u_d_1_a));
245
246 T_5_1_1 = ((p_0_5_a .* u_d_5_b) - (p_0_5_b .* u_d_5_a)) ./ ((p_d_5_a ...
    .* u_d_5_b) - (p_d_5_b .* u_d_5_a));
247 T_5_1_2 = ((p_0_5_b .* p_d_5_a) - (p_0_5_a .* p_d_5_b)) ./ ((p_d_5_a ...
    .* u_d_5_b) - (p_d_5_b .* u_d_5_a));
248 T_5_2_1 = ((u_0_5_a .* u_d_5_b) - (u_0_5_b .* u_d_5_a)) ./ ((p_d_5_a ...
    .* u_d_5_b) - (p_d_5_b .* u_d_5_a));
249 T_5_2_2 = ((p_d_5_a .* u_0_5_b) - (p_d_5_b .* u_0_5_a)) ./ ((p_d_5_a ...
    .* u_d_5_b) - (p_d_5_b .* u_d_5_a));
250
251
252 %% Berechnung des Transmissionsgrades
253
254 % aus Standard, jedoch nur f"ur r_E = 0

```

```

255 % t_1_1 = (2 * exp(k .* (1i*d))) ./ (T_1_1_1 + (T_1_1_2 ./ (rho * ...
      c)) + (T_1_2_1 .* (rho * c)) + T_1_2_2) ;
256 % t_5_1 = (2 * exp(k .* (1i*d))) ./ (T_5_1_1 + (T_5_1_2 ./ (rho * ...
      c)) + (T_5_2_1 .* (rho * c)) + T_5_2_2) ;

257
258 % r_E = 0,9 %harter Abschluss
259 % r_E = 0,9 - 0,2 %weicher Abschluss

260
261 % eigene Herleitung
262 t_1 = 2 ./ (T_1_1_1 .* (exp(-k .* (1i*d)) + r_E .* exp(k .* (1i*d))) ...
      + ((T_1_1_2 .* (exp(-k .* (1i*d)) - r_E .* exp(k .* (1i*d)))) ./ ...
      (rho * c)) + ((T_1_2_1 .* (rho * c)) .* (exp(-k .* (1i*d)) + r_E ...
      .* exp(k .* (1i*d)))) + (T_1_2_2 .* (exp(-k .* (1i*d)) - r_E .* ...
      exp(k .* (1i*d)))));
263 t_5 = 2 ./ (T_5_1_1 .* (exp(-k .* (1i*d)) + r_E .* exp(k .* (1i*d))) ...
      + ((T_5_1_2 .* (exp(-k .* (1i*d)) - r_E .* exp(k .* (1i*d)))) ./ ...
      (rho * c)) + ((T_5_2_1 .* (rho * c)) .* (exp(-k .* (1i*d)) + r_E ...
      .* exp(k .* (1i*d)))) + (T_5_2_2 .* (exp(-k .* (1i*d)) - r_E .* ...
      exp(k .* (1i*d)))));

264
265 TL_1 = 20* log10(abs( 1 ./ t_1));
266 TL_5 = 20* log10(abs( 1 ./ t_5));

267
268 %% Berechnung der Reflexion , Absorption , Impedanz des Pr"ufobjektes

269
270 %laut Standard
271 % r_1 = (T_1_1_1 - (T_1_2_1 .* (rho * c))) ./ (T_1_1_1 + (T_1_2_1 .* ...
      (rho * c)));
272 % r_5 = (T_5_1_1 - (T_5_2_1 .* (rho * c))) ./ (T_5_1_1 + (T_5_2_1 .* ...
      (rho * c)));

273
274 %Herleitung
275 %r_E = 1;
276 r_1 = (T_1_1_1 + (T_1_1_2 ./ (rho * c)) - (T_1_2_1 .* (rho * c)) - ...
      T_1_2_2 + (r_E .* (T_1_1_1 - (T_1_1_2 ./ (rho * c)) - (T_1_2_1 .* ...
      (rho * c)) + T_1_2_2))) ./ (T_1_1_1 + (T_1_1_2 ./ (rho * c)) + ...
      (T_1_2_1 .* (rho * c)) + T_1_2_2 + (r_E .* (T_1_1_1 - (T_1_1_2 ./ ...
      (rho * c)) + (T_1_2_1 .* (rho * c)) - T_1_2_2)));
277 r_5 = (T_5_1_1 + (T_5_1_2 ./ (rho * c)) - (T_5_2_1 .* (rho * c)) - ...
      T_5_2_2 + (r_E .* (T_5_1_1 - (T_5_1_2 ./ (rho * c)) - (T_5_2_1 .* ...
      (rho * c)) + T_5_2_2))) ./ (T_5_1_1 + (T_5_1_2 ./ (rho * c)) + ...
      (T_5_2_1 .* (rho * c)) + T_5_2_2 + (r_E .* (T_5_1_1 - (T_5_1_2 ./ ...
      (rho * c)) + (T_5_2_1 .* (rho * c)) - T_5_2_2)));

278
279 alpha_1 = 1 - (abs(r_1)).^2;

```

```
280 alpha_5 = 1 - (abs(r_5)).^2;
281
282 %%
283 k_strich_1 = 1/d * acos(T_1_1_1);
284 k_strich_5 = 1/d * acos(T_5_1_1);
285
286 % laut Standard
287 z_1 = sqrt(T_1_1_2 ./ T_1_2_1);
288 z_5 = sqrt(T_5_1_2 ./ T_5_2_1);
289
290 %% Plotten
291
292 figure(1)
293 subplot(2,2,1)
294 plot(f(f>Trennfrequenz), abs(t_1(1,f>Trennfrequenz)));
295 hold on;
296 plot(f(f≤Trennfrequenz), abs(t_5(1,f≤Trennfrequenz)));
297 xlabel('Frequenz [Hz]');
298 ylabel('Transmissionsgrad \tau');
299 title('Transmissionfaktor t');
300 grid on
301 xlim([0 2000])
302 ylim([0 2])
303 subplot(2,2,3)
304 plot(f(f>Trennfrequenz), angle(t_1(1,f>Trennfrequenz)));
305 hold on;
306 plot(f(f≤Trennfrequenz), angle(t_5(1,f≤Trennfrequenz)));
307 xlim([0 2000])
308 xlabel('Frequenz [Hz]');
309 ylabel('Phase [rad]');
310 title('Transmissionsfaktor t')
311 grid on
312
313 figure(1)
314 subplot(2,2,2)
315 plot(f(f>Trennfrequenz), TL_1(1,f>Trennfrequenz));
316 hold on;
317 plot(f(f≤Trennfrequenz), TL_5(1,f≤Trennfrequenz));
318 ylim([-5 20])
319 xlim([50 2000])
320 xlabel('Frequenz [Hz]');
321 ylabel('TL in dB');
322 title('Durchgangsdaempfung TL');
323 grid on
324
```

```
325 figure(2)
326 subplot(2,2,1)
327 plot(f(f>Trennfrequenz), abs(r_1(1,f>Trennfrequenz)));
328 hold on;
329 plot(f(f≤Trennfrequenz), abs(r_5(1,f≤Trennfrequenz)));
330 xlabel('Frequenz [Hz]');
331 ylabel('Reflexionsgrad R');
332 title('Reflexionsfaktor r');
333 grid on
334 xlim([0 2000])
335 ylim([0 1.5])
336 subplot(2,2,3)
337 plot(f(f>Trennfrequenz), angle(r_1(1,f>Trennfrequenz)));
338 hold on;
339 plot(f(f≤Trennfrequenz), angle(r_5(1,f≤Trennfrequenz)));
340 xlim([0 2000])
341 ylim([-4 4])
342 xlabel('Frequenz [Hz]');
343 ylabel('Phase [rad]');
344 title('Reflexionsfaktor r')
345 grid on
346
347 figure(2)
348 subplot(2,2,2)
349 plot(f(f>Trennfrequenz), abs(alpha_1(1,f>Trennfrequenz)));
350 hold on;
351 plot(f(f≤Trennfrequenz), abs(alpha_5(1,f≤Trennfrequenz)));
352 xlabel('Frequenz [Hz]');
353 ylabel('Verlustgrad \beta');
354 title('Verlustgrad \beta');
355 grid on
356 xlim([0 2000])
357 ylim([0 1.5])
358
359 figure(3)
360 subplot(2,2,1)
361 plot(f(f>Trennfrequenz), abs(k_strich_1(1,f>Trennfrequenz)));
362 hold on;
363 plot(f(f≤Trennfrequenz), abs(k_strich_5(1,f≤Trennfrequenz)));
364 xlabel('Frequenz [Hz]');
365 ylabel('k [1/m]');
366 title('Wellenzahl im Pruefobjekt');
367 grid on
368 xlim([0 2000])
369 ylim([0 100])
```

```
370 subplot(2,2,3)
371 plot(f(f>Trennfrequenz), angle(k_strich_1(1,f>Trennfrequenz)));
372 hold on;
373 plot(f(f≤Trennfrequenz), angle(k_strich_5(1,f≤Trennfrequenz)));
374 xlim([0 2000])
375 xlabel('Frequenz [Hz]');
376 ylabel('Phase [rad]');
377 title('Wellenzahl im Prufobjekt')
378 grid on
379
380 figure(3)
381 subplot(2,2,2)
382 plot(f(f>Trennfrequenz), abs(z_1(1,f>Trennfrequenz)));
383 hold on;
384 plot(f(f≤Trennfrequenz), abs(z_5(1,f≤Trennfrequenz)));
385 xlabel('Frequenz [Hz]');
386 ylabel('Z [Ns / m^3]');
387 title('Impedanz des Pruefobjektes');
388 grid on
389 xlim([0 2000])
390 ylim([0 2000])
391 subplot(2,2,4)
392 plot(f(f>Trennfrequenz), angle(z_1(1,f>Trennfrequenz)));
393 hold on;
394 plot(f(f≤Trennfrequenz), angle(z_5(1,f≤Trennfrequenz)));
395 xlim([0 2000])
396 xlabel('Frequenz [Hz]');
397 ylabel('Phase [rad]');
398 title('Impedanz des Pruefobjektes')
399 grid on
400
401 %% Vergleich TL und R
402 R1 = TL_1 ;
403 R5 = TL_5;
404
405 figure(4)
406 subplot(1,2,1)
407 plot(f(f>Trennfrequenz), abs(R1(1,f>Trennfrequenz)));
408 hold on;
409 plot(f(f≤Trennfrequenz), abs(R5(1,f≤Trennfrequenz)));
410 xlim([0 2000])
411 ylim([0 15])
412 title('Durchgangsdaempfung TL im Impedanzrohr')
413 xlabel('Frequenz [Hz]')
414 ylabel('TL [dB]')
```



```
415 grid on
416
417 terz      = [50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 ...
               1250 1600 2000];
418 R_fenster = [20.3 17.2 5.2 7.6 6.6 4.2 2.3 4.7 5.9 5.9 7.0 7.6 8.2 ...
               8.0 8.9 10.4 11.0];
419
420 figure(4)
421 subplot(1,2,2)
422 plot(terz, R_fenster, 'k')
423 ylim([0 15])
424 xlim([0 2000])
425 title('Schalldaemm-Mass im Fensterpruefstand')
426 xlabel('Frequenz [Hz]')
427 ylabel('R [dB]')
428 grid on
429
430 %% Berechnen von r_E
431 r_E_h = ((H_34_a - exp(-k .* (1i * s_2_1))) ./ (exp(k .* (1i * ...
               s_2_1)) - H_34_a)) .* exp(k .* (1i * 2 * l_2_1));
432 r_E_w = ((H_34_b - exp(-k .* (1i * s_2_1))) ./ (exp(k .* (1i * ...
               s_2_1)) - H_34_b)) .* exp(k .* (1i * 2 * l_2_1));
433
434 figure(5)
435 plot(f, abs(r_E_h))
436 hold on
437 plot(f, abs(r_E_w), 'r')
438 grid on
439 xlim([0 2000])
440 ylim([0 1.4])
441 title('Reflexionsfaktor r_E')
442 ylabel('Reflexionsgrad')
443 xlabel('Frequenz [Hz]')
```

B Prüfzeugnis des Schalldämm-Maßes im Fensterprüfstand

Bau-Schalldämm-Maß nach DIN EN ISO 140 - 4 Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden

Auftraggeber: Sven Deter

Prüfdatum: 9. Oktober 2013

Messort: Fensterprüfstand des Institutes für Technische Akustik der TU Berlin

Senderraum: Senderraum Fensterprüfstand

Empfangsraum: Empfangsraum Fensterprüfstand

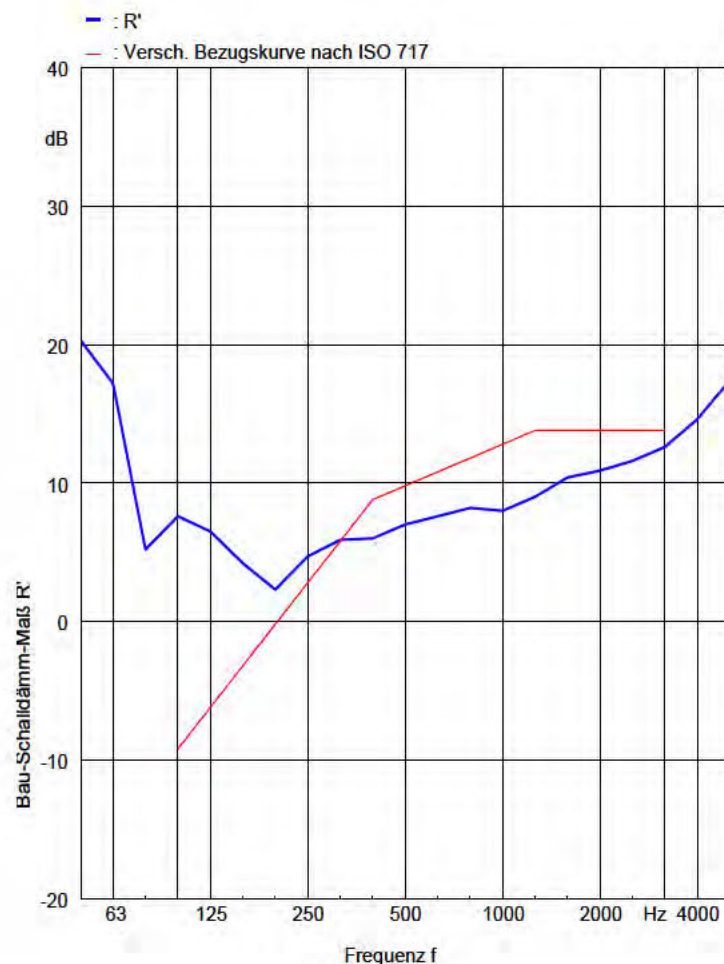
Aufbau des Prüfkörpers:

10 cm Schaumstoff

Senderraumvolumen: 74,7 m³Prüffläche: 1,88 m²Empfangsraumvolumen: 53,1 m³

Zustand Empfangsraum: leer

Frequenz [Hz]	R' [dB]
50	20,3
63	17,2
80	5,2
100	7,6
125	6,6
160	4,2
200	2,3
250	4,7
315	5,9
400	5,9
500	7,0
630	7,6
800	8,2
1000	8,0
1250	8,9
1600	10,4
2000	11,0
2500	11,7
3150	12,6
4000	14,5
5000	17,5



Bewertung nach DIN EN ISO 717-1

R'_w = 9 dB

Die Ermittlung basiert auf Gebäudemessungen, die in Terzbändern gewonnen wurden.

ALB Akustik-Labor Berlin GbR

Holbeinstraße 17, 12203 Berlin, Tel. (030) 84 37 14-0

VMPA-Schallschutzprüfstelle Nr. VMPA-SPG-103-97-B

S. Deter

C Weitere Messergebnisse

Messdaten für Prüfobjekt 1:

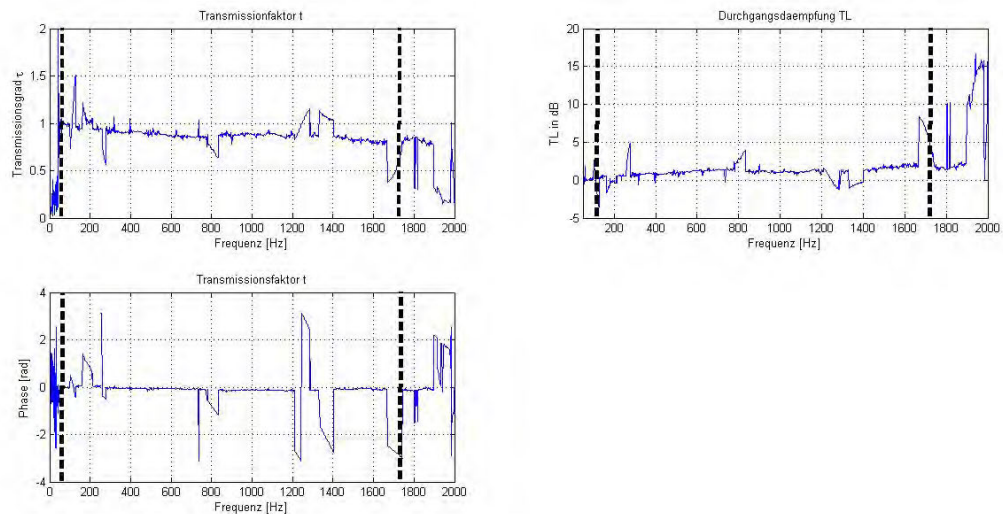


Abbildung 49: Transmissionsfaktor und Durchgangsdaempfung von Prüfobjekt 1

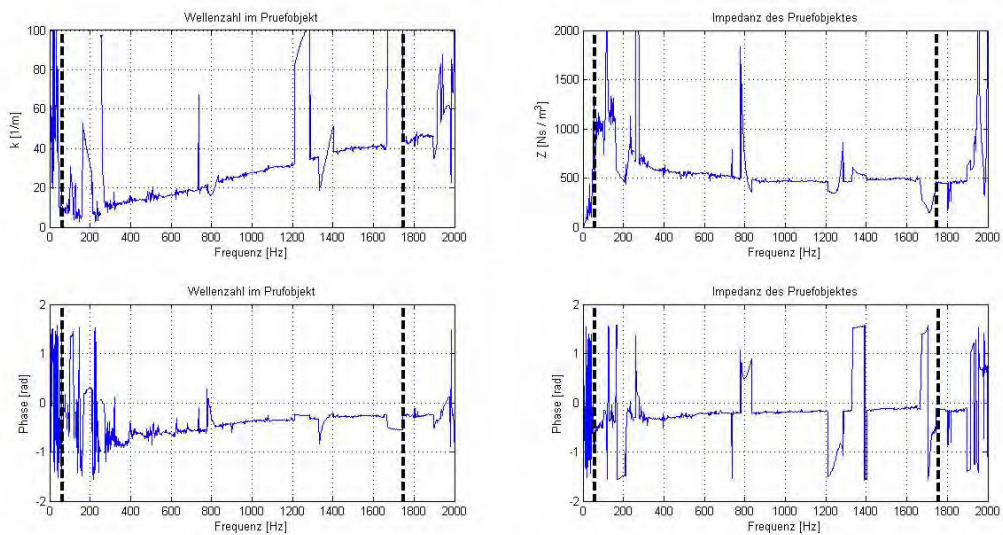


Abbildung 50: Wellenzahl und Impedanz von Prüfobjekt 1

Messdaten für Prüfobjekt 2:

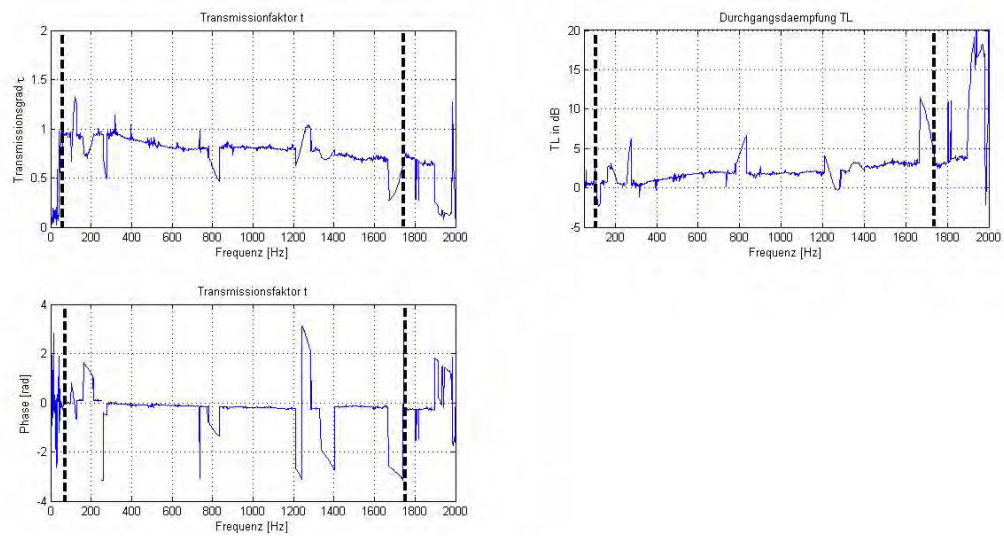


Abbildung 51: Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung von Prüfobjekt 2

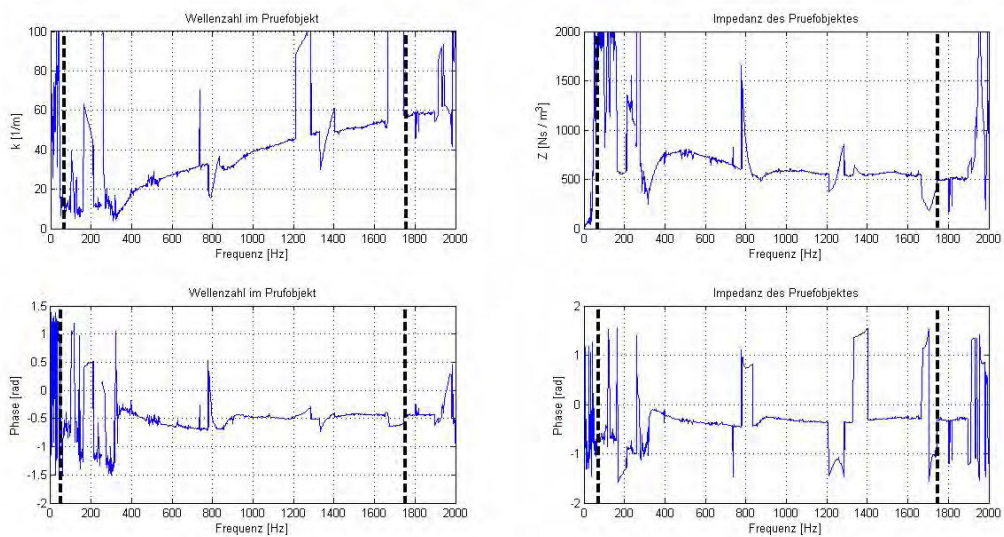


Abbildung 52: Wellenzahl und Impedanz von Prüfobjekt 2

Messdaten für Prüfobjekt 3

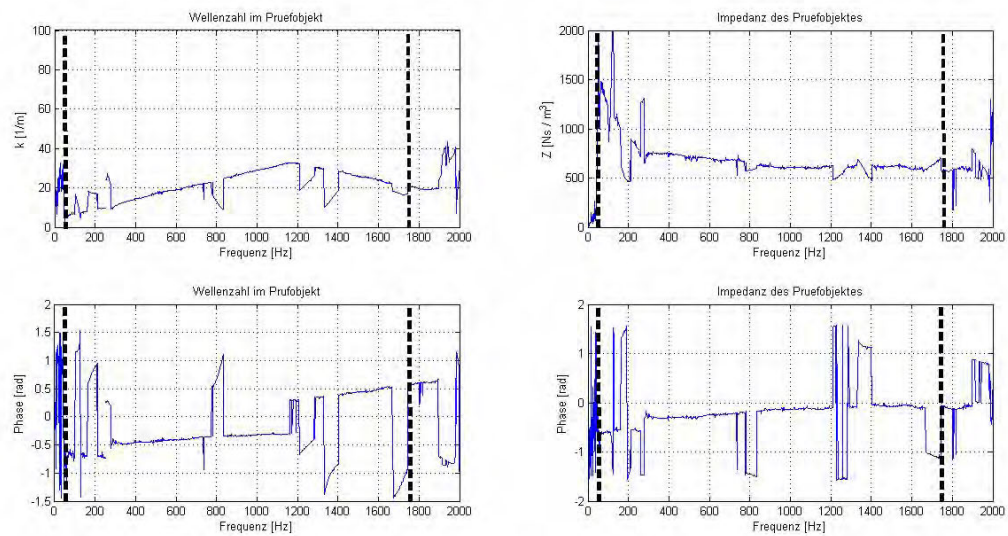


Abbildung 53: Wellenzahl und Impedanz von Prüfobjekt 4

Messdaten für Prüfobjekt 4:

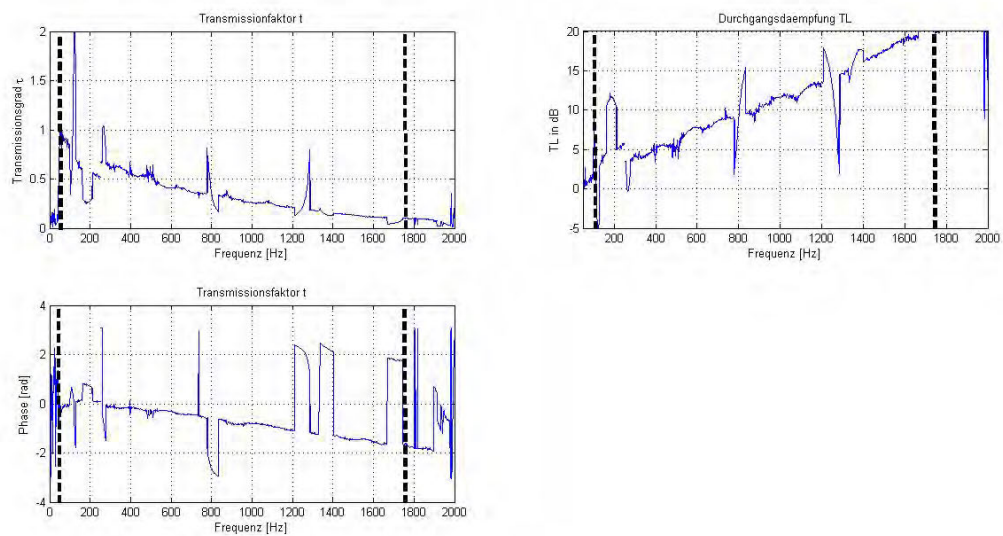


Abbildung 54: Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung von Prüfobjekt 4

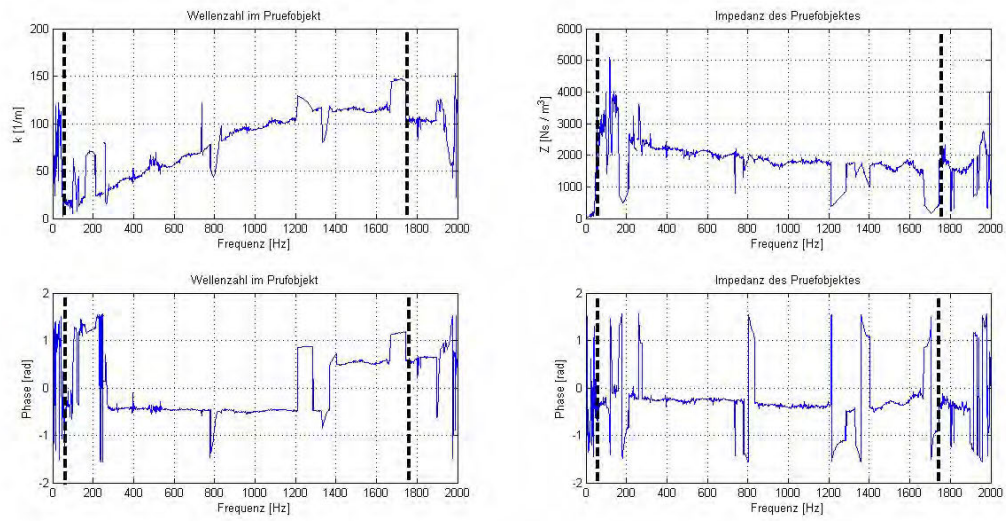


Abbildung 55: Wellenzahl und Impedanz von Prüfojekt 4