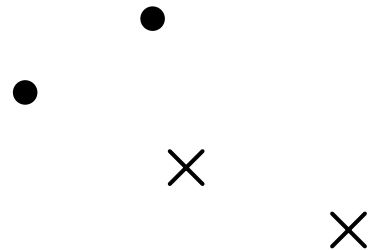

Project Acoustic 1

Herr | Frau

**Oliver Gehler
Sina Buchholz
Florian Anger
Daniel Eisenschmidt**

**Studie zur Optimierung von
Vliesstoffen für die
Raumakustik**

Mittweida, 2019



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
1. Einleitung.....	1
2. Theorie	2
2.1 Anforderungen in der Raumakustik.....	2
2.2 Poröse Absorber	2
2.3 Strömungswiderstand und Schallabsorptionsgrad	4
2.4 Schallabsorptionsklassen.....	5
3. Methodik	8
3.1 Bestimmung der Schallabsorptionsgrade.....	8
3.1.1 Vorüberlegung	8
3.1.2 Versuchsaufbau.....	10
3.1.3 Versuchsdurchführung	11
3.2 Bestimmung der Strömungswiderstände	11
3.2.1 Vorüberlegungen	11
3.2.2 Versuchsaufbau.....	13
3.2.3 Versuchsdurchführung	14
3.3 Simulationen	16
3.3.1 Vorüberlegungen	16
3.3.2 Durchführung.....	17
4. Ergebnisse.....	19
4.1 Schallabsorptionsgrade.....	19
4.2 Strömungswiderstände	20
4.3 Simulationen und Simulationsbestätigung	22
5. Diskussion	25
5.1 Schallabsorptionsgrade.....	25
5.2 Strömungswiderstände	26
5.3 Simulationen und Simulationsbestätigungen	27
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	29
Literaturverzeichnis	30
Anhänge	31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schallschnelleverlauf (v)	3
Abbildung 2: Schallabsorptionsgrad α eines porösen Absorbers in Abhängigkeit der Frequenz [3]. ...	3
Abbildung 3: Arbeitsbilanz an einer Wand [4].	4
Abbildung 4: Bezugskurve zur Bestimmung des bewerteten Schallabsorptionsgrades α_w [5].	6
Abbildung 5: Schallabsorberklassen [5].	7
Abbildung 6: Probenhalter mit 3 cm Durchmesser (links) und zugeschnittene Probe (rechts).	9
Abbildung 7: Versuchsaufbau Kundt'sches Rohr.	10
Abbildung 8: Aufbau Kundt'sches Rohr [6].	10
Abbildung 9: Strömungswiderstandsmessgerät in senkrechter Stellung.	12
Abbildung 10: Einbringung einer Stoffprobe in das untere Rohrende.	12
Abbildung 11: Schematischer Versuchsaufbau des genutzten Strömungswiderstandsmessgerätes (links) [8] und Korrekturmessung mit abgedichtetem Rohr (rechts).	13
Abbildung 12: Regression einer Geraden durch die fünf Messpunkte zur Ermittlung der Strömungsresistenz.	15
Abbildung 13: Referenzmessung des Stoffes 5569/1 durch die Firma AED (Quelle: Datenblatt AED).	15
Abbildung 14: Darstellung des Aufbaus einer Simulationsdatei, exemplarisch für den Vliesstoff Zetaloft 5569/1. Blauer Graph - Ausgangsdicke, roter Graph - erhöhte Dicke, gelber Graph - Stoffkombination aus Zetaloft 5570 und 5569/1 (Ausgangsdicken), lila Graph - Stoffkombination aus Zetaloft 5570 und 5569/1 (erhöhte Dicke).	18
Abbildung 15: Messkurven Schallabsorptionsgrad.	19
Abbildung 16: Bewerteter Schallabsorptionsgrad.	19
Abbildung 17: Verlauf der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade von Zetaloft 5559, Ausgangsdicke.	23
Abbildung 18: Verlauf der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade von Zetaloft 5559, erhöhte Dicke.	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendung der Formindikatoren in Abhängigkeit der Frequenzen.	6
Tabelle 2: Messungen zu Zetaloft 5569/1 mittels Strömungswiderstandsmessgerät. Die Messwerte 1 bis 10 stellen die Fallzeiten des Kolbens von Lichtschranke 1 zu 2 dar.	14
Tabelle 3: Aus den Messwerten errechnete Strömungsresistenzen bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten.	14
Tabelle 4: Vergleich der Messergebnisse der Hochschule Mittweida mit denen der Firma AED.	21
Tabelle 5: Übersicht der aus drei Messwerten ermittelten Strömungsresistenzen und der zugehörigen Stoffdicken für einen Anpassungsparameter zwischen 2 und 4 für $Z_0 = 413 \text{ Ns/m}^3$	21
Tabelle 6: Frequenzabhängige Schallabsorptionsgrade und prozentuale Abweichungen von Zetaloft 5569/1 Ausgangsdicken.	23
Tabelle 7: Frequenzabhängige Schallabsorptionsgrade und prozentuale Abweichungen von Zetaloft 5569/1, erhöhte Dicke.	23

1. Einleitung

Die Firma Tenowo, unter anderem mit Sitz in Mittweida, zählt zu einem der führenden Unternehmen der Vliesstoffbranche im Bereich technischer Anwendung, insbesondere in der Automobilbranche. Die Firma plant nunmehr eine potentielle Erweiterung der Einsatzzwecke ihrer Vliesstoffe um den Bereich Raumakustik. In diesem Zusammenhang war die prinzipielle Eignung der firmeneigenen Vliesstoffe als poröses Absorbermaterial zu untersuchen.

Im Rahmen der Veranstaltung Project Acoustics wurden Studenten des Studiengangs Media and Acoustical Engineering der Hochschule Mittweida mit der Durchführung einer Machbarkeitsstudie von der Firma Tenowo beauftragt. Im Verlauf des Sommersemesters 2019 wurde das Thema auf wissenschaftlicher Basis bearbeitet. Im Mittelpunkt stand unter anderem die Ermittlung von schallabsorbierenden Eigenschaften einer ausgewählten Charge an Vliesstoffen der genannten Firma. Hierzu zählten der Schallabsorptionsgrad sowie die Strömungsresistenz. Es galt die Ergebnisse zu bewerten und gegebenenfalls Anpassungsvorschläge der Vliesstoffe hinsichtlich einer Verbesserung der schalltechnischen Eigenschaften zu vermitteln.

Die im Verlauf dieser Machbarkeitsstudie durchgeführten Untersuchungen, Überlegungen und die erarbeiteten Ergebnisse wurden schließlich innerhalb dieses hier vorliegenden Berichts niedergeschrieben.

Wird notwendig

1. Einleitung

- Einleitung
- Zielstellung, z.B. $\alpha \rightarrow 1$ für 200-1000 Hz

2. Zusammenfassung / Ausblick

- Was wurde vor der Zielstellung erreicht?

2. Theorie

2.1 Anforderungen in der Raumakustik

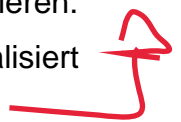
Für das Verstehen von Sprache und Musik hat die raumakustische Qualität einen entscheidenden Einfluss. Mit dem eingeführten Begriff der Hörsamkeit wird diese Qualität der Raumakustik beschrieben, wobei eine gute Hörsamkeit ein gutes Verständnis von sprachlicher oder musikalischer Darbietung bedeutet. Verantwortlich für eine gute oder schlechte Hörsamkeit ist in erster Linie die vorhandene Halligkeit eines Raumes, welche sich über die Dauer des Nachhalls charakterisiert. Je nach Anwendungsbedarf ist darüber hinaus von Bedeutung, ob Schallenergie nur über kurze oder über mittlere bis lange Strecken von Sender zu Empfänger gelangen soll.

Schall
satz

Raumakustische Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung zur Sicherung der Hörsamkeit sind unter anderem in der *DIN 18041 - Hörsamkeit in Räumen* niedergeschrieben [1]. In dieser Norm werden eben jene zwei Anwendungen betrachtet, in denen die Hörsamkeit über kurze Entfernungen und über größere Distanzen gesichert werden soll. Erstere sind Räume der Gruppe A, bei der eine für die Nutzung angepasste Nachhallzeit und Schalllenkung erfolgen. In diese Kategorie fallen zum Beispiel Seminarräume, Hörsäle oder Tagungsräume. Zweitere sind Räume der Gruppe B, bei der die Hörsamkeit durch angepasste Schallabsorption und Störgeräuschminderung erreicht wird (z.B. Speiseräume, Kantinen, Büros). Insbesondere für Räume der Gruppe B ergeben sich Maßnahmen zur Geräuschabsorption und -minderung durch die Verwendung geeigneter Absorberarten sowie -materialien. Für die Raumakustik ist das Frequenzspektrum von circa 100 Hz bis 4 kHz von Interesse. Eine Anforderung in der Raumakustik besteht also darin, eine gute Hörsamkeit in genau diesem Frequenzbereich zu optimieren und zu garantieren. Dies kann durch den Einsatz geeigneter und angepasster (Poröser) Absorber realisiert werden.

A

selbst



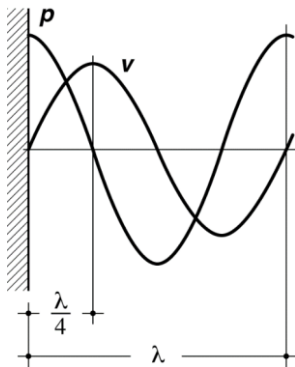
2.2 Poröse Absorber

Als „poröse Absorber“ lassen sich poröse oder faserartige Stoffe bezeichnen, welche die Schwingungen der Luftteilchen in ihrer Schnelle durch Reibung bremsen. Dabei wird die kinetische Energie der Luftteilchen in Wärmeenergie umgewandelt, die zu einer Minderung der Schallenergie führt. Materialien wie Textilien, Vliese und Schaumstoff, aber auch spezielle Akustikvliese eignen sich als poröse Absorber.

A

2. Theorie

Trifft eine Schallwelle auf eine schallharte Wand, wird sie vollständig reflektiert. Die einfallende und reflektierte Welle überlagern sich und es kann sich eine Stehwelle, oder Mode, ausbilden. Direkt vor einer unbeweglichen Wand kann sich die Luft ebenso wenig bewegen, weswegen dort die Schallschnelle gleich null ist. Eine hohe Schallschnelle ist aber erforderlich, um hohe Reibungsverluste und damit eine gute Absorption hervorzurufen. [2].



Wozu

2.3 Strömungswiderstand und Schallabsorptionsgrad

Der Strömungswiderstand zählt zu den Absorberparametern und reicht sich dabei neben Strukturfaktor und Porosität ein. Er kennzeichnet den Widerstand, der einer Schallwelle beim Eindringen in ein poröses Material entgegenwirkt. Dabei ist die Luft im Absorber in einzelnen Kanälen zusammengefasst. Je größer der Kanaldurchmesser, desto leichter kann die Luft hindurchströmen. Somit ergibt sich ein geringerer Wert für den Strömungswiderstand. Bei engen Kanälen ist das Gesamtverhalten genau umgekehrt. Um ein bestimmtes Bauteil akustisch zu beschreiben, wird der spezifische Strömungswiderstand genutzt. Dieser berechnet sich aus dem Verhältnis der Druckdifferenz vor und hinter der zu bearbeitenden Probe und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft in dieser.

↑ Spez. Widerst.

$$R_s = \frac{\Delta p}{v} \quad [R_s] = \frac{Ns}{m^3} \quad (F.1)$$

Der spezifische Strömungswiderstand verhält sich proportional zur Materialstärke. Um eine reine Materialkenngröße zu erhalten, wurde der längenbezogene Strömungswiderstand (auch als Strömungsresistanz bezeichnet) eingeführt. Hier wird die Dicke des durchströmten Materials mit einbezogen.

$$E = \frac{R_s}{d} \quad [E] = \frac{Ns}{m^4} \quad (F.2)$$

Der Schallabsorptionsgrad zählt zu den Absorbereigenschaften. Grundlegend beschreibt er das Verhältnis von absorbiertener zu einfallender Schallenergie. Hierbei ist zu beachten, dass in der Raumakustik dissipierte und transmittierte Energie die Absorption bilden. Im praktischen Sinne heißt das, dass die Schallleistung, welche beispielsweise durch ein trennendes Bauelement hindurch transmittiert, der Schallabsorption ebenfalls zugerechnet wird (Vgl. Abbildung. 3).

Schalll. Satz.

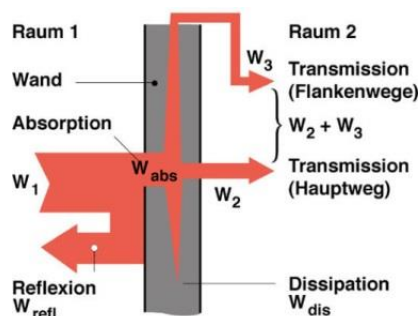


Abbildung 3: Arbeitsbilanz an einer Wand [4].

2. Theorie

Aus den bisherigen Überlegungen ergibt sich nun folgender Zusammenhang aus Absorptionsgrad α und Reflexionsgrad ρ :

$$\alpha = 1 - \rho \quad (\text{F.3})$$

Der Schallabsorptionsgrad kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Wenn $\alpha = 0$, ist keine Absorption vorhanden und die gesamte Schallenergie wird reflektiert. Wenn $\alpha = 1$, wird die gesamte Energie im Material absorbiert. Ein hoher Wert für α ist in der Realität nicht zwangsläufig mit einer optimal angepassten Absorberwirkung gleichzusetzen. Zur Beurteilung der tatsächlichen Wirkung wird zusätzlich das Anpassungsverhältnis ε genutzt. Dabei lässt sich ε über folgende Formel berechnen.

$$\varepsilon = \frac{E \cdot d}{Z_0} \quad (\text{F.4})$$

Für die Anwendung in der Raumakustik wird ein Wert des Anpassungsparameters ε zwischen 2 und 4 angestrebt. Denn nur in diesem Bereich ist gewährleistet, dass ausreichend Energie in das poröse Material eindringen und dort auch entsprechend gut in thermische Energie umgewandelt werden kann. Liegt der Anpassungsparameter unter diesem Bereich, findet keine ausreichende Energieumwandlung der Schallenergie im Inneren statt. Überschreitet er den favorisierten Bereich, ist der Stoff nicht offenporig genug, um Schallwellen eindringen zu lassen.

2.4 Schallabsorptionsklassen

Der Schallabsorptionsgrad ist eine wichtige raumakustische Größe poröser Absorber. Er wird im Kundt'schen Rohr bestimmt bzw. im Modell simuliert. Die Ergebnisse für die Schallabsorptionsgrade werden bei diesen beiden Verfahren in Terzbändern angegeben. Aus diesen Terzbändern lässt sich jedoch keine klare Angabe machen, wie gut ein Absorber für die Anwendung in der Raumakustik geeignet ist. Um eine eindeutige Aussage darüber tätigen zu können, wurde in der DIN 11654 „Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden - Bewertung der Schallabsorption“ ein Verfahren zur Umwandlung der frequenzabhängigen Werte des Schallabsorptionsgrades in eine frequenzunabhängige Einzahlangabe festgelegt [5]. Diese Einzahlangabe kann zur Klassifikation der Absorber in Schallabsorberklassen genutzt werden, was vorwiegend bei der Anwendung bei breitbandigen Geräuschen, wie sie in der Raumakustik auftreten, sinnvoll ist.

2. Theorie

Um den bewerteten Schallabsorptionsgrad α_w zu erhalten, werden die gemessenen Terzbänder durch arithmetische Mittelung auf die zweite Dezimalstelle und Rundung in Schritten von 0,05 auf Oktavbänder umgerechnet, den frequenzabhängigen praktischen Schallabsorptionsgrad α_{pi} . Über diese Oktavbänder wird eine Bezugskurve (Vgl. Abbildung 4) gelegt und in Schritten von 0,05 so verschoben, dass die Summe der ungünstigen Abweichungen, welche der Summe der Werte entspricht, bei denen die Messwerte die Bezugswerte unterschreiten, maximal 0,1 beträgt.

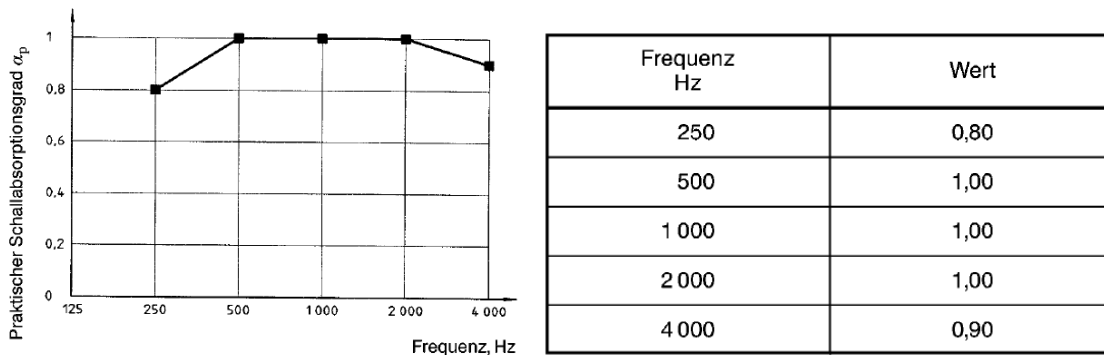


Abbildung 4: Bezugskurve zur Bestimmung des bewerteten Schallabsorptionsgrades α_w [5].

Der Wert, der bei der verschobenen Bezugskurve bei 500 Hz abgelesen werden kann, entspricht dem Wert des bewerteten Schallabsorptionsgrades α_w . Für den Fall, dass einzelne Werte der Messkurve die Bezugskurve um 0,25 oder mehr überschreiten, wurden Formindikatoren festgelegt. Diese weisen den Anwender darauf hin, die vollständige Bezugskurve und nicht nur den Einzahlwert zu betrachten, wenn eine Absorption nur in bestimmten Frequenzbändern und nicht breitbandig gewünscht ist. Diese werden ergänzend zum bewerteten Schallabsorptionsgrad in Klammern angegeben. In der folgenden Tabelle 1 sind die zu verwendenden Formindikatoren in Abhängigkeit der Frequenzen, bei denen die Überschreitungen auftreten können, dargelegt.

Tabelle 1: Verwendung der Formindikatoren in Abhängigkeit der Frequenzen.

f in Hz	Formindikator
250	L
500; 1000	M
2000; 4000	H

2. Theorie

Die Klassifizierung der Schallabsorber findet anhand der Einzahlangabe α_w statt. Die Absorber werden nach den Klassen A - E klassifiziert, wobei A der höchsten und E der niedrigsten Schallabsorberklasse entspricht. Die Klassen sind wie in der folgenden Tabelle (Vgl. Abbildung 5) festgelegt.

Schallabsorberklasse	α_w -Werte
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,25; 0,20; 0,15
Nicht klassifiziert	0,10; 0,05; 0,00

Abbildung 5: Schallabsorberklassen [5].

3. Methodik

3.1 Bestimmung der Schallabsorptionsgrade

3.1.1 Vorüberlegung

Für die Beurteilung der Schallabsorber spielt das Wissen über die Höhe des Schallabsorptionsgrades der entsprechenden Absorber eine wichtige Rolle. Die DIN 10534 „Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren“ schreibt in ihren Teilen 1 und 2 unterschiedliche mögliche Verfahren zur Ermittlung dieser Größen vor. Für dieses Projekt wurde das in der DIN 10534-2 beschriebene Verfahren mit Impedanzrohr (Kundt'sches Rohr) und mit Übertragungsfunktion benutzt [6]. Mittels zweier Mikrofone für das Zwei-Mikrofon-Verfahren und eines digitalen Frequenzanalyse-Systems kann dabei der Schallabsorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall bestimmt werden. Dieses Frequenzanalyse-System misst den Schalldruck an den zwei Mikrofonorten und berechnet die Übertragungsfunktion H_{12} zwischen ihnen. Daraus lässt sich der Reflexionsfaktor r mittels

$$\underline{r} = |\underline{r}|e^{j\phi_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (F.5)$$

ermitteln. Dabei ist r_r der Realteil, r_i der Imaginärteil, ϕ_r der Phasenwinkel des Reflexionsfaktors bei senkrechtem Einfall, x_1 der Abstand zwischen Prüfling und dem am weitesten entfernten Mikrofon, k_0 die Dämpfungskonstante, H_I die Übertragungsfunktion der einfallenden und H_R die Übertragungsfunktion der reflektierten Welle. Aus dem Reflexionsfaktor lässt sich der Schallabsorptionsgrad bei senkrechtem Einfall berechnen mit der Formel

$$\alpha = 1 - |\underline{r}|^2 = 1 - r_r^2 + r_i^2 \quad (F.6).$$

Es standen zwei unterschiedliche Rohre mit Durchmessern von 3 cm und 10 cm zur Verfügung. Beide Rohre bilden unterschiedliche Frequenzbereiche ab, wobei mit dem größeren Rohr Messungen im Bereich bis ca. 2 kHz und für das kleinere Rohr Messungen im Bereich 200 Hz - 6,5 kHz möglich sind. Der für die Raumakustik relevante Frequenzbereich liegt bei ca. 100 Hz - 4 kHz, weshalb das Rohr mit 3 cm Durchmesser für die Messungen der Schallabsorber benutzt wurde (Vgl. Abbildung 6). Die untere Arbeitsfrequenz ist begrenzt durch die Messunsicherheit bei der

3. Methodik

Signalverarbeitung und den Abstand der Mikrofone. Die obere Arbeitsfrequenz ist festgelegt durch die Gleichung

$$\underline{f_u * d} < \underline{0,58 * c_0} \quad (F.7),$$

wobei d dem Durchmesser des Rohres in Meter, c_0 der Schallgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde und f_u der oberen Frequenz in Hertz entspricht. Diese Frequenz wird so gewählt, dass sich keine Wellenmoden im Rohr entwickeln und ausbreiten können. Der Mikrofonabstand s sollte 5% der Wellenlänge der unteren Arbeitsfrequenz betragen und muss für die obere Frequenz gemäß folgender Gleichung gewählt werden:

$$\underline{f_u * s} < \underline{0,45 * c_0} \quad (F.8)$$

~~Für die Messungen mussten die Proben so zugeschnitten werden, dass sie gut abdichtend, aber ohne zusammengedrückt zu werden, in das Rohr passen.~~ Aus diesem Grund wurden die Absorber in einem etwa 1-2 Millimeter größeren Durchmesser zugeschnitten. Ein Großteil der Proben wurde im Laserzentrum der Hochschule Mittweida angefertigt, sodass gleichmäßig runde Zuschnitte für die Messungen verwendet werden konnten (Vgl. Abbildung 6). Alle Absorber, die nicht ohne größere Verluste mit einem Laser bearbeitbar waren, wurden mit einer Stoffschere zugeschnitten. Dies betraf die Stoffe Zetaloft 5561, 5562, 5564, 5565, 5566 und 5567. Pro Vliesstoff wurden zwei bis drei Proben angefertigt, um mehrere Messungen durchführen zu können, ohne etwaige Messfehler durch unsaubere Schnitte an einer Probe zu wiederholen, wie in der DIN 11645 vorgeschrieben. Da bei diesem Projekt der Fokus darauf lag, breitbandige Schallabsorber für die Raumakustik zu ermitteln, konnte auf Messungen mit Wandabstand verzichtet werden.



Abbildung 6: Probenhalter mit 3 cm Durchmesser (links) und zugeschnittene Probe (rechts).

3.1.2 Versuchsaufbau

Für die Messung im Kundt'schen Rohr wird an der einen Öffnung ein Probenhalter angebracht und an der anderen Seite eine Schallquelle. Die beiden Mikrofone sind entlang der Rohrwand in einem definierten Abstand befestigt. Der Prüflingshalter sollte gut abdichtend an das Rohr anzubringen sein und verfügt über eine Vorrichtung, um einen Wandabstand zwischen Rohrende und Prüfling einstellen zu können, wie in *Wohn* Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 7: Versuchsaufbau Kundt'sches Rohr.

Das Quellsignal (weißes Rauschen) wird durch einen Signalgenerator der Firma NTI erzeugt. Nach einer Verstärkung wird das Signal an den Lautsprecher am Ende des Rohres gegeben (Vgl. Abbildung 8). Die Signalverarbeitungseinrichtung von der Firma Brüel & Kjær besteht zusätzlich aus einem Zwei-Kanal-System für schnelle Fourier-Analysen. Der gesamte Aufbau ist mittels IEEE 488 Interface mit einem PC verbunden, um den Versuch zu starten und die Ergebnisse abzuspeichern.

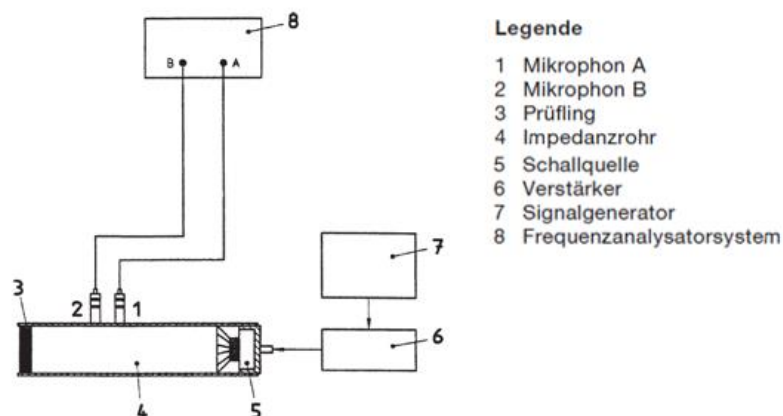


Abbildung 8: Schematische Darstellung vom Aufbau des Kundt'sches Rohres [6].

3.1.3 Versuchsdurchführung

Vor dem Start der eigentlichen Messreihen müssen im Kundt'schen Rohr Probemessungen durchgeführt werden, um Fehlerquellen auszuschließen und sicherzustellen, dass alle Anforderungen erfüllt werden. Vor und nach jeder Prüfung sollten dafür die Temperatur, der Luftdruck und der Signal-Rausch-Abstand gemessen werden. Bei dieser Messung muss das Rauschquellenschallspektrum mindestens 10 dB über dem Hintergrundgeräusch liegen. Außerdem muss die Kalibrierung der Mikrofonamplitude getestet und die Korrektur der Rohrdämpfung nach DIN 10645 A.2 ausgeführt werden. Zusätzlich muss, das Kundt'sche Rohr vor den Messungen kalibriert werden. Dafür wurde das in der DIN 10645 - 7.5.2. „Vorher bestimmter Kalibrierfaktor“ beschriebene Verfahren benutzt. Die dabei vollzogene Korrektur ist für alle nachfolgenden Messungen gültig. Bei diesem Verfahren wird ein Kalibrierprüfling in das Impedanzrohr eingesetzt und erst mit den Mikrofonen in Originalposition und danach mit den Mikrofonen in vertauschter Reihenfolge gemessen. Aus den dabei errechneten Übertragungsfunktionen wird der Kalibrierfaktor bestimmt. Mit Beendigung der Kalibrierung sind die Mikrofone wieder in ihre Originalpositionen zu tauschen. Die Überprüfung der richtigen Kalibrierung lässt sich zwischendurch testen, indem der Kalibrierprüfling im Rohr gemessen und die Messkurve mit einer Vergleichskurve verglichen werden.

Für jeden Schallabsorber wurden Messreihen mit je zwei bis drei Messungen bei unterschiedlich platzierten Proben durchgeführt. Dadurch wurde, wie bereits in den Vorüberlegungen erwähnt, sichergestellt, dass keine Messfehler durch eventuelle unsauber geschnittene Prüflinge wiederholt wurden. Nach Durchführung der Messung wurde der frequenzabhängige Schallabsorptionsgrad in Terzbändern vom Frequenzanalyse-System bereitgestellt. Die Auswertung der Messreihen erfolgte anschließend in Microsoft Excel.

3.2 Bestimmung der Strömungswiderstände

3.2.1 Vorüberlegungen

Der Bestimmung des Strömungswiderstandes liegt folgender Zusammenhang, beschrieben in der Norm DIN EN 29053 [7], zu Grunde. In einem senkrecht stehenden oder mithilfe von Scharnieren und Stützen geneigten Rohr fällt ein Kolben bekannter Masse nach unten. Gebremst wird die so entstehende Luftströmung durch eine am

3. Methodik

unteren Ende passend eingesetzte Stoffprobe. In diesem Versuchsaufbau hängt der Strömungswiderstand R_s bei bekannter Kolbenmasse m , den Querschnittsflächen A des Rohres und S der Probe sowie dem zurückgelegten Weg des Kolbens l nur von der dafür benötigten Zeit t ab.



Abbildung 9: Strömungswiderstandsmessgerät in senkrechter Stellung.



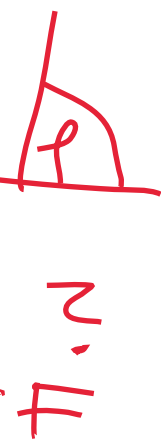
Abbildung 10: Einbringung einer Stoffprobe in das untere Rohrende.

Weiterhin bringt dieses Vorgehen folgende Probleme mit sich. Sobald der Strömungswiderstand gering und die Fallgeschwindigkeit des Kolbens sehr hoch sind, erhöht sich der Einfluss der Reibung zwischen Kolben und Rohrwand. Umgekehrt ist bei geringer Fallgeschwindigkeit und hohem Strömungswiderstand die Nebenströmung durch den Spalt zwischen Kolben und Rohr zu berücksichtigen. Diese Effekte sind auch bei nahezu perfekter Passung nicht vollständig zu eliminieren.

$$R_s = C * \frac{m * g * S}{l * A^2} * t * \cos\varphi \quad (\text{F.9})$$

φ beschreibt hier den Neigungswinkel des Rohres, falls es nicht senkrecht steht. Die oben genannten Reibungs- oder Nebenströmungseffekte werden im Korrekturfaktor C berücksichtigt, der sich wie folgt berechnet:

$$C = \frac{1 - \frac{t_0}{t}}{1 - \frac{t}{t_\infty}} \quad (\text{F.10})$$



3. Methodik

Dabei beschreiben t_0 die Zeit für den freien Fall des Kolbens ohne Absorberprobe, t_∞ die Zeit bei einem luftdichten Rohr, also bei einem nur durch Nebenströmung verursachten Abfall und t die Zeit des Abfalls beim Einsetzen der Stoffprobe. Da der Strömungswiderstand spezifisch für eine Stoffdicke ist, ist er wenig vergleichbar mit anderen Werten. Somit wird hier oft auf die Größe des längenbezogener Strömungswiderstand ε (Strömungresistenz) zurückgegriffen.

$$\tau = \frac{R_s}{d} \quad \cdot \text{bereits def.} \quad (\text{F.11})$$

Ww

In der Norm DIN EN 29053 wird ein für diesen Versuch geeignetes Messgerät beschrieben. Für die Strömungswiderstandsmessungen vor Ort stand ein solches nicht zur Verfügung. Deswegen wurde auf ein von ehemaligen Studenten der Hochschule Mittweida hergestelltes Strömungswiderstandsmessgerät zurückgegriffen, welches nicht der Norm entspricht. Um Fehler oder Differenzen in den Messergebnissen erkennen zu können, wurde ebenfalls eine Stichprobe der Vliesstoffe an die Firma AED (Acoustic Engineering Dresden) zur Durchführung einer der Norm entsprechenden Messung übergeben [9].

Quelle

3.2.2 Versuchsaufbau

Ww

Die Fallzeit des Kolbens wurde in unserem Versuchsaufbau mittels zweier Lichtschranken bestimmt. Diese sind im Abstand von 0,6 m an das Rohr angebracht. Daraus lässt sich die Fallgeschwindigkeit bestimmen. Um eine geeignete Funktion in Abhängigkeit verschiedener Fallgeschwindigkeiten zu erzeugen, wurde der Kolben zum einen mit Zusatzgewicht von 0,2 kg bzw. 0,4 kg beladen. Zum anderen wurde das Strömungswiderstandsmessgerät mit unbeladenem Kolben erst um $18,4^\circ$, dann um $26,2^\circ$ geneigt, um geringere Fallgeschwindigkeiten zu erzeugen.

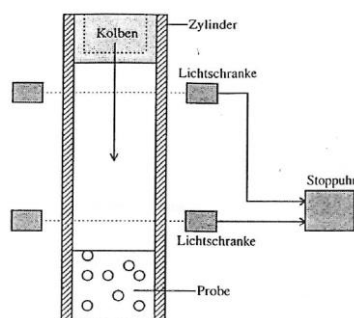


Abbildung 11: Schematischer Versuchsaufbau des genutzten Strömungswiderstandsmessgerätes (links) [8] und Korrekturmessung mit abgedichtetem Rohr (rechts).

3.2.3 Versuchsdurchführung

Zu Beginn wurden die für den Korrekturfaktor erforderlichen Werte t_0 und t_∞ in den jeweiligen Winkelstellungen und mit Zusatzmassen gemessen. Um stochastische Fehler zu vermeiden, wurden mindestens zehn Messwerte aufgenommen (Vgl. Anhang 1). Es wurden Messreihen eines jeden einzelnen Stoffes für unterschiedliche Fallgeschwindigkeiten und Winkelstellungen ermittelt (Vgl. Tabelle 2). Auch hier war je nach Stoff mindestens eine zehnfache Durchführung notwendig, um nicht repräsentative Ergebnisse erkennen und im Gesamtergebnis vermeiden zu können. Alle Stoffe wurden in der von Tenowo gelieferten Probendicke gemessen. Nach Einbringung der Proben wurde von unten ein Drahtgitter befestigt, ~~welches~~ den Stoff stabil im Rohr halten konnte. *Wdh* *das*

Tabelle 2: Messungen zu Zetaloft 5569/1 mittels Strömungswiderstandsmessgerät. Die Messwerte 1 bis 10 stellen die Fallzeiten des Kolbens von Lichtschranke 1 zu 2 dar. ✓

Neigungswinkel [°]	0			18,4	26,2
Probendicke [m]	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
zusätzl. Gewicht [kg]	0	0,2	0,4	0	0
Probendurchmesser [m]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Messwert 1	0,94	0,71	0,59	1,17	1,29
Messwert 2	0,94	0,71	0,59	1,15	1,29
Messwert 3	0,96	0,72	0,59	1,19	1,31
Messwert 4	1,01	0,70	0,59	1,17	1,29
Messwert 5	0,99	0,70	0,57	1,17	1,30
Messwert 6	0,96	0,70	0,58	1,17	1,29
Messwert 7	0,97	0,70	0,59	1,18	1,29
Messwert 8	0,99	0,69	0,58	1,17	1,30
Messwert 9	0,98	0,71	0,59	1,17	1,29
Messwert 10	1,00	0,69	0,58	1,17	1,29

Mittels der gemessenen Fallzeiten des Kolbens im Rohr konnten zuerst die Fallgeschwindigkeiten und unter Berücksichtigung der Korrekturwerte die Strömungsresistenzen (oder längenbezogene Strömungswiderstände) in Abhängigkeit verschiedener Fallgeschwindigkeiten berechnet werden (Vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Aus den Messwerten errechnete Strömungsresistenzen bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten.

v [m/s]	Ξ [Ns/m ⁴]
0,46	17592
0,51	16705
0,62	14249
0,85	13802
1,03	14358

3. Methodik

Auf Grundlage dieser fünf Messwerte konnte eine lineare Regression in Microsoft Excel durchgeführt werden (Vgl. Abbildung 12). Über einer Regressionsgeraden wurde nun der Einzahlwert der Resistanz bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $v = 0,005$ m/s bestimmt. Damit ergab sich beispielsweise für den Stoff 5569/1 die Resistanz $E = 19115 \text{ N}_s/\text{m}^4$.

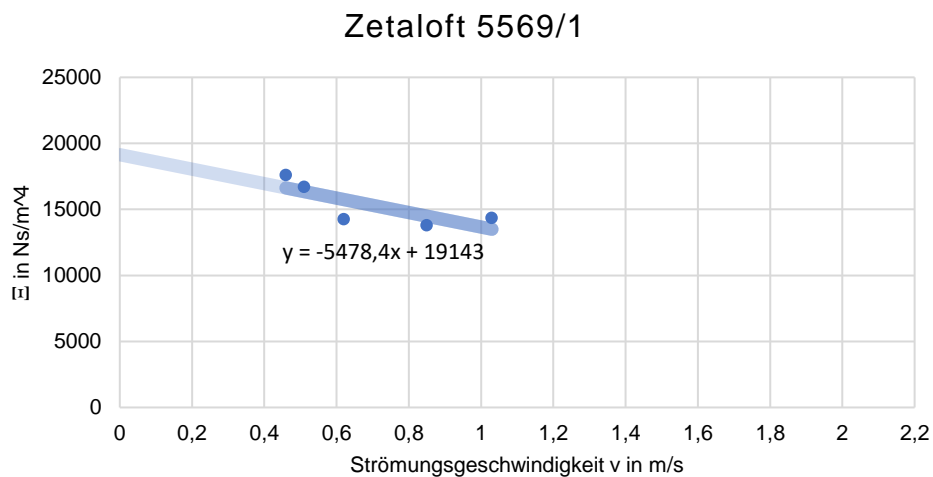


Abbildung 12: Regression einer Geraden durch die fünf Messpunkte zur Ermittlung der Strömungsresistenz.

Die Referenzmessung der Stichprobe erfolgte nach der Norm DIN EN 29053 bei der Akustik Forschung Dresden. Dort wurde mit dem Strömungswiderstandsmessgerät AED 300 - AcoustiFlow® und der Software AED 311, 1.0.0.5® gemessen. Die Akustik Forschung führte das Luftgleichstrom-Verfahren fünffach bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten durch. Außerdem erfolgte eine Extrapolation auf eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 mm/s. Als Ergebnisse lagen bei der AED also direkt die Strömungsresistenzen vor (Vgl. Abbildung 13).

Nr.	Name	r in Pa s/m ²
1	5569-LF-1	15568,6
2	5569-LF-1	15504,9
3	5569-LF-3	15592,6
4	5569-LF-4	15218,0
5	5569-LF-5	15540,2

Abbildung 13: Referenzmessung des Stoffes 5569/1 durch die Firma AED (Quelle: Datenblatt AED).

Verflich, Einody!

3.3 Simulationen

3.3.1 Vorüberlegungen

Ziel der Computersimulationen war es verschiedene Absorber-Modifikationen der Vliesstoffe durch möglichst geringen zeitlichen und materiellen Aufwand hinsichtlich Verbesserungen der schallabsorbierenden Eigenschaften (insbesondere der Breitbandigkeit) zu untersuchen. Voraussetzung ist hierfür der Abgleich und gegebenenfalls die Anpassung von Simulationsmodellen der Vliesstoffe mit den Ergebnissen aus den Schallabsorptionsmessungen im Kundt'schen Rohr (Ausgangsmessungen). Im Rahmen von Vorüberlegungen wurden folgende Punkte zum weiteren Vorgehen festgelegt:

- Findung einer geeigneten Software zur Absorbersimulation
- Festlegung eines geeigneten Modells/einer Modellvorstellung, auf welcher Grundlage das Rechenmodell arbeitet (z.B. Delany/Bazley)
- Simulation der Vliesstoffe in Ausgangsform und Abgleich der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen aus Messungen im Kundt'schen Rohr. Bei gravierenden Abweichungen der Kurvenverläufe (Absorptionsgrad über Frequenz) sollte eine Anpassung der Simulation erfolgen
- Festlegung, welche Parameter (z.B. geometrische Materialeigenschaften) hinsichtlich einer Optimierung sinnvoll variiert werden sollen. Erneute Simulationen mit den geänderten Parametern.
- Abgleich der Simulationen mit geänderten Parametern, mit Messungen im Kundt'schen Rohr.

Hinsichtlich Punkt Eins der Vorüberlegung stand eine passende Software (AED 3001®) der Firma Acoustic Engineering Dresden zur Verfügung, welche für die Auslegung poröser Absorber entwickelt wurde. Das Programm bietet hierfür die Auswahl verschiedener schalltechnischer Rechenmodelle, welche als Grundlage der Simulationen dienen (Punkt Zwei der Vorüberlegung). Für die in dieser Arbeit untersuchten Vliesstoffe sollten die Modelle *Delany/Bazley* und *Air* verwendet werden. Das Modell nach *Delany/Bazley* beruht hierbei auf der Grundlage, dass die Absorberparameter Porosität und Strukturfaktor eines Materials annähernd oder gleich 1 sind. Die Porosität eines Stoffes ist hierbei 1, wenn das zugängliche Luftvolumen dem Gesamtvolumen des Absorbermaterials entspricht. In der Realität wird dieser Wert nicht genau den Wert 1 erreichen, sondern sich lediglich annähern. Dies ist zum Beispiel bei Mineralwolle der Fall. Für die hier untersuchten Vliesstoffe wurde die Porosität aus Informationen beigelegter Datenblätter der Firma TENOWO mit

3. Methodik

annähernd 1 bestimmt, was die Verwendung des Modells *Delany/Bazley* begründet. Das Modell *Air* sollte für die Simulation von Lufträumen, beispielsweise für Absorber mit Wandabstand, genutzt werden.

Für Simulationen werden weitere Eingangsdaten benötigt. Hierzu zählen Parameter der Umgebung wie Lufttemperatur sowie Parameter der Probe (spezifischer Strömungswiderstand und Dicke des Absorbers). Die Absorberdicken können hierbei aus den Datenblättern der Vliesstoffe und die Strömungswiderstände auf Grundlage der durchgeführten Messungen (Vgl. Kapitel 3.2) herangezogen werden.

Bezüglich Punkt Vier der Vorüberlegung waren die Möglichkeiten der Parametereinstellung limitiert. So waren beispielsweise keine Veränderungen an den materialspezifischen Eigenschaften der Vliesstoffe, wie Dichte, Material (-zusammensetzung) möglich. Da sich der Schallabsorptionsgrad aber über die Dicke eines Absorbers einstellen lässt, sollten Simulationen mit verschiedenen Vliesstoffdicken durchgeführt werden. Hierbei wurde eine Bezugsdicke von 10 cm als maximale Absorberdicke festgelegt. Diese Dicke begründet sich mit den üblichen Absorberdicken (Poröse Absorber) in der Raumakustik, welche in den meisten Fällen aus Platz- und Kostengründen nicht über 0,1 m liegen sollen. Weiterhin waren Simulationen von Vliesstoffkombinationen und Untersuchungen mit Wandabstand geplant.

Abgeleitet aus Punkt 4 sollten letztlich Simulationen mit zufriedenstellenden Ergebnissen durch erneute praktische Messungen im Kundt'schen Rohr bestätigt werden

3.3.2 Durchführung

Für jede Vliesstoffproben-Simulation wurde innerhalb der Software AED 3001 eine neue Datei angelegt. Innerhalb des Arbeitsbereiches wurde nun für jede geplante Einzelsimulation ein separates *Sample* erstellt. Jedes *Sample* gliedert sich in *Layer* auf, in welche die zugrundeliegenden Eigenschaften, wie Rechenmodell, Lufttemperatur und Materialparameter definiert werden können.

Für die Vliesstoffe Zetaloft 5565, Zetaloft PM23 und Zetaloft 5569/1 wurden nun folgende vier Zustände simuliert: der Ausgangszustand (1), die erhöhte Dicke von 0,1 m (2), eine Vliesstoff-Kombination aus zwei Stoffen in Ausgangsdicken (3) sowie eine

3. Methodik

Vliesstoff-Kombination aus zwei Vliesstoffen, wobei der primär untersuchte Stoff in erhöhter Dicke definiert wurde (4). Für die Probe Zetaloft 5569/1 soll die folgende Abbildung 14 den Aufbau einer Simulationsdatei und die Ergebnisse der fünf Simulationen visualisieren. Für alle weiteren Vliesstoffe erfolgten aus zeitlichen und zielorientierten Gründen ausschließlich Simulationen der Ausgangsdicken (1) sowie der erhöhten Dicken (2).

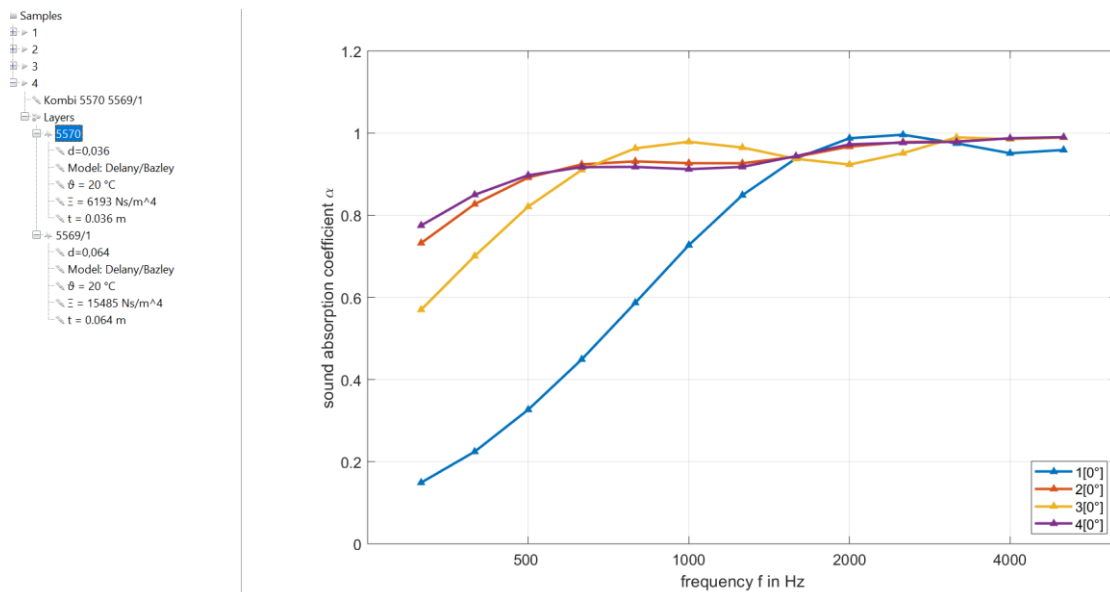


Abbildung 14: Darstellung des Aufbaus einer Simulationsdatei, exemplarisch für den Vliesstoff Zetaloft 5569/1. Blauer Graph - Ausgangsdicke, roter Graph - erhöhte Dicke, gelber Graph - Stoffkombination aus Zetaloft 5570 und 5569/1 (Ausgangsdicken), lila Graph - Stoffkombination aus Zetaloft 5570 und 5569/1 (erhöhte Dicke).

4. Ergebnisse

4.1 Schallabsorptionsgrade

Für die Auswertung der Messergebnisse des Schallabsorptionsgrades wurden die Ergebnisse der zwei bis drei Messreihen gemittelt und aus diesen Werten wie in Abschnitt 2.4 die Schallabsorberklassen bestimmt. Dafür wurden in Excel-Tabellen die Berechnungsvorschriften umgesetzt. In den Abbildungen 15 und 16 sind die Ergebnisse für den Vliesstoff Zetaloft 5569/1 abgebildet, sowohl die Messreihen in Terzen, als auch die gemittelte Oktavkurve mit der verschobenen Bezugskurve.

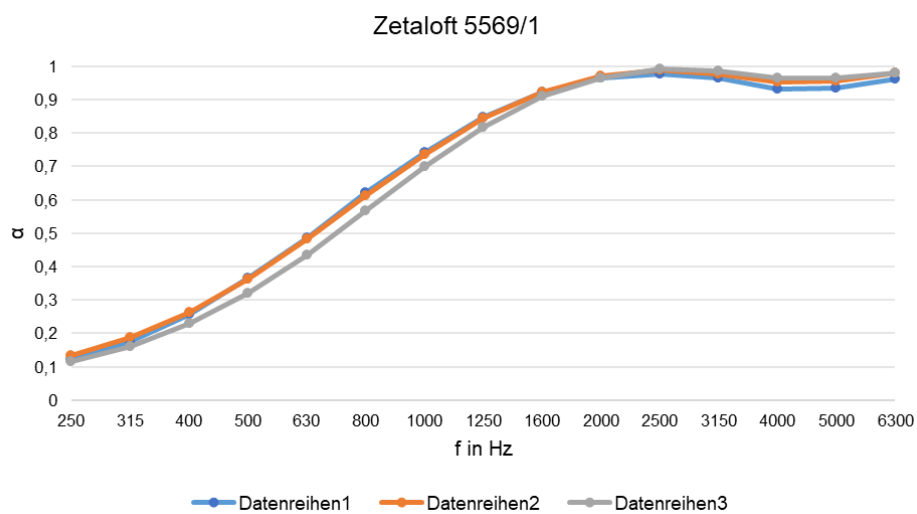


Abbildung 15: Messkurven Schallabsorptionsgrad.

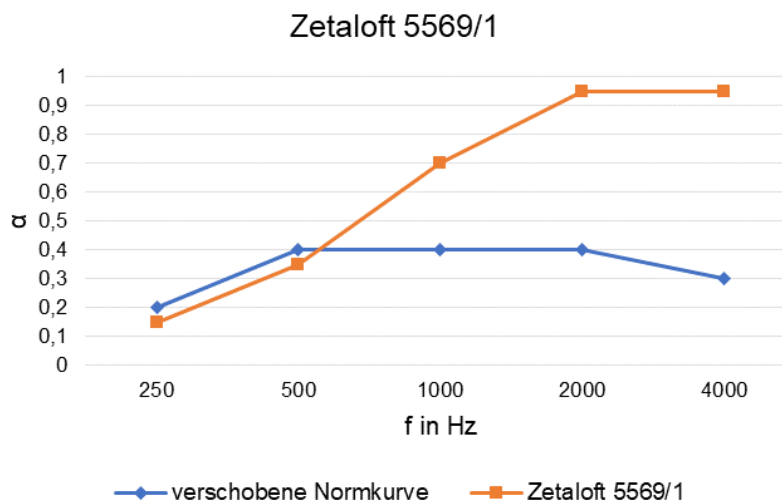


Abbildung 16: Bewerteter Schallabsorptionsgrad.

Die Ergebnisse der drei Messreihen dieses Vliesstoffes fielen nahezu identisch aus. Dies ist auch bei allen anderen Stoffen außer den Zetaloft 5558, 5561, 5565 und 5570

4. Ergebnisse

der Fall. Die Abweichungen treten bei den genannten Schallabsorbern hauptsächlich in den höheren Frequenzbereichen ab 1,6 kHz auf (Vgl. Anhang 2).

Für den hier dargestellten Schallabsorber Zetaloft 5569/1 ergab sich als Wert für den Schallabsorptionsgrad 0,40 (MH). Er lässt sich daher der Schallabsorberklasse D zuordnen. Neben dem Zetaloft 5569/1 gehörten auch die Stoffe Zetaloft 5559, 5569 und 5570 dieser Klasse an. Alle anderen Vliesstoffe ließen sich der Klasse E zuordnen. Die Ergebnisse der bewerteten Schallabsorptionsgrade sowie der Absorberklassen aller Schallabsorber sind in den erstellten Datenblättern der Vliesstoffe dargestellt (Vgl. Anhang 3).

In den Tiefen weist dieser Absorber wesentlich geringere Schallabsorptionsgrade auf als in den hohen Frequenzbereichen. Die verschobene Normkurve liegt deshalb so, dass in den Mitten und Höhen die Messwerte die Normkurve um 0,25 oder mehr überschreiten. Die dafür hier angefügten Formindikatoren fanden auch bei einigen der anderen Schallabsorber Verwendung. Den höchsten Wert für den bewerteten Schallabsorptionsgrad wiesen mit 0,40 die Vliesstoffe Zetaloft 5569 und 5569/1 auf, die niedrigsten Werte waren mit 0,15 bei Zetaloft 5561 und 5562 vertreten.

A

4.2 Strömungswiderstände

Die an der Hochschule Mittweida ermittelten längenbezogenen Strömungswiderstände wurden mit denen von der Firma AED verglichen. Aufgrund dessen, dass AED mit einem genormten Verfahren arbeiten konnte, sind die Differenzen zwischen den Messungen zum Vergleich als Abweichungen auf die von der Firma stammenden Werte bezogen (Vgl. Tabelle 4). Die teils sehr hohen Abweichungen lassen einen systematischen Fehler in der Messvorrichtung der Hochschule vermuten. Um die eigens gemessenen Einzahlwerte denen von AED anzunähern, wurden einzelne Messwerte aus der Messreihe eliminiert. Es wurde festgestellt, dass die geringsten Abweichungen ohne Berücksichtigung der Messwerte in Schräglage erzielt werden konnten. Folglich wurden in allen Messreihen die Messwerte für die beiden geringsten Strömungsgeschwindigkeiten eliminiert und daraus die jeweiligen Dicken für die Anpassungsparameterwerte 2 und 4 unter Zuhilfenahme der Formel (F.4) bestimmt (Vgl. Tabelle 5). Die ermittelten Ergebnisse zu den jeweiligen Stoffen sind zudem in den Datenblättern im Anhang x zu finden.

4. Ergebnisse

Tabelle 4: Vergleich der Messergebnisse der Hochschule Mittweida mit denen der Firma AED.

Stoff	≡ HS Mittweida [Ns/m ⁴]	≡ AED [Ns/m ⁴]	Abweichung (Bezug auf AED)
5558	3835		
5559	6458		
5569	16765		
5569/1	19116	15485	0,23 <i>23% ?</i>
5570	5741	6193	0,07
C	5096	2136	1,39
D	5752		
E	11846		
H	9943		
L	7946		
M	9062	3746	1,42
PM23	13552	13531	0,00
5561	4349	2738	0,59
5562	6333		
5564	5350		
5565	5959	4540	0,31
5566	6245		
5567	6553		

Tabelle 5: Übersicht der aus drei Messwerten ermittelten Strömungsresistenzen und der zugehörigen Stoffdicken für einen Anpassungsparameter zwischen 2 und 4 für $Z_0 = 413 \text{ Ns/m}^3$.

Stoff	≡ HS Mittweida [Ns/m ⁴]	≡ AED [Ns/m ⁴]	Dicke [m]	d für $\epsilon = 2$	d für $\epsilon = 4$
5561	474	2736	0,017	0,30	0,60
5565	4912	4540	0,02	0,18	0,36
5569/1	13998	15485	0,035	0,05	0,11
5570	4345	6193	0,036	0,13	0,27
C	3533	2136	0,02	0,39	0,77
M	1228	3746	0,02	0,22	0,44
PM 23	10277	13531	0,02	0,06	0,12
5569	10330	-	0,034	0,08	0,16
5559	4040	-	0,035	0,20	0,41
5562	3530	-	0,015	0,23	0,47
5564	1928	-	0,027	0,43	0,86
5566	5491	-	0,02	0,15	0,30
5567	4898	-	0,02	0,17	0,34
D	2281	-	0,02	0,36	0,72
E	5670	-	0,012	0,15	0,29
H	3817	-	0,02	0,22	0,43
L	1926	-	0,02	0,43	0,86
5558	2711	-	0,03	0,30	0,61

4. Ergebnisse

4.3 Simulationen und Simulationsbestätigung

Zum Vergleich der Simulationsergebnisse der Vliesstoffe mit den Ergebnissen der Messungen im Kundt'schen Rohr, wurden die jeweiligen Daten exportiert und in Microsoft Excel tabellarisch sowie grafisch gegenübergestellt.

Wird
not.
Wird

Ausgewertet wurde im Frequenzbereich von 250 Hz bis 6,3 kHz, was mit der unteren Grenzfrequenz von 250 Hz des Kundt'schen Rohrs zusammenhängt. Damit liegt der betrachtete Bereich zwar in den tiefen Frequenzen oberhalb der 100 Hz-Grenze und die höchsten Frequenzen außerhalb der 4 kHz-Grenze (Frequenzbereich der Raumakustik), jedoch ist das Spektrum somit auf das des Kundt'schen Rohres für eine vollständige Gegenüberstellung angepasst.

Ausgangsdicken:

Die Gegenüberstellung der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade aus praktischer Messung und Simulation der Ausgangsdicken zeigte bei folgenden Vliesstoffen eine Abweichung von höchstens 15 % je Terz: Zetaloft 5559, Zetaloft 5564, Zetaloft C und Zetaloft D.

Bei den Vliesstoffen Zetaloft 5569, Zetaloft 5569/1 und Zetaloft PM23 wurde eine Abweichung größer 15 Prozent für den tieffrequenten Bereich bis 800 Hz festgestellt. Bei allen anderen Vliesstoffen ergaben sich stochastisch in allen Frequenzbereichen Abweichungen größer 15 Prozent.

Erhöhte Dicken

Bezüglich der erhöhten Dicken ergab die Gegenüberstellung der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade aus praktischer Messung und Simulation bei folgenden Vliesstoffen eine Abweichung von höchstens 15 % je Terz: Zetaloft 5559, Zetaloft 5569, Zetaloft 5569/1, Zetaloft C, Zetaloft D, Zetaloft M und Zetaloft PM23.

Bei allen anderen Vliesstoffen, mit Ausnahme von Zetaloft 5561 und 5562, wurde eine Abweichung größer 15 Prozent für den tieffrequenten Bereich bis 800 Hz festgestellt. Bei den Vliesstoffen Zetaloft 5561 und 5562 ergaben sich stochastisch in allen Frequenzbereichen Abweichungen größer 15 Prozent.

4. Ergebnisse

In den folgenden Tabellen 6 und 7 sind die frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade bezüglich der Ausgangsdicken sowie der erhöhten Dicken zusammen mit der prozentualen Abweichung beispielhaft für Zetaloft 5569/1 aufgeführt sowie die Grafenverläufe in Abbildung 17 und Abbildung 18 dargestellt.

Tabelle 6: Frequenzabhängige Schallabsorptionsgrade und prozentuale Abweichungen von Zetaloft 5569/1 Ausgangsdicken.

f [Hz]	Simulation α	Kund. Rohr α	$\Delta\alpha$ [%]	f [Hz]	Simulation α	Kund. Rohr α	$\Delta\alpha$ [%]
250	0,101	0,124	-22,5	1600	0,938	0,919	2,0
315	0,149	0,175	-17,7	2000	0,987	0,968	2,0
400	0,224	0,251	-11,9	2500	0,996	0,986	1,0
500	0,327	0,350	-7,0	3125	0,975	0,976	-0,1
630	0,449	0,468	-4,3	4000	0,951	0,950	0,1
800	0,587	0,600	-2,2	5000	0,959	0,952	0,8
1000	0,727	0,725	0,2	6300	0,985	0,975	1,0
1250	0,849	0,836	1,5				

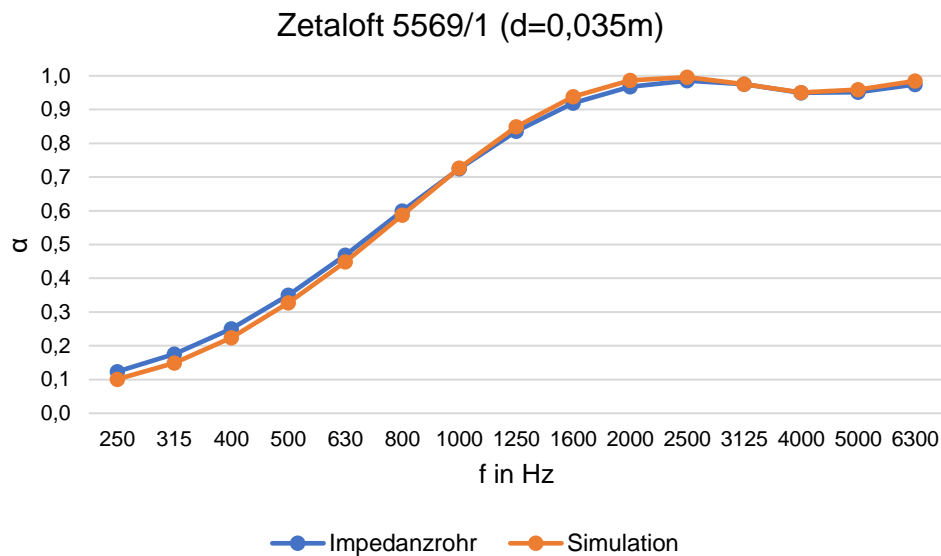


Abbildung 17: Verlauf der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade von Zetaloft 5559, Ausgangsdicke.

Tabelle 7: Frequenzabhängige Schallabsorptionsgrade und prozentuale Abweichungen von Zetaloft 5569/1, erhöhte Dicke.

f [Hz]	Simulation α	Kund. Rohr α	$\Delta\alpha$ [%]	f [Hz]	Simulation α	Kund. Rohr α	$\Delta\alpha$ [%]
250	0,715	0,660	7,8	1600	0,954	0,903	5,4
315	0,790	0,707	10,5	2000	0,969	0,933	3,7
400	0,852	0,743	12,8	2500	0,974	0,951	2,4
500	0,889	0,770	13,4	3125	0,982	0,962	2,1
630	0,902	0,792	12,3	4000	0,986	0,968	1,8
800	0,905	0,813	10,2	5000	0,990	0,978	1,3
1000	0,911	0,843	7,5	6300	0,992	0,984	0,8
1250	0,928	0,874	5,8				

4. Ergebnisse

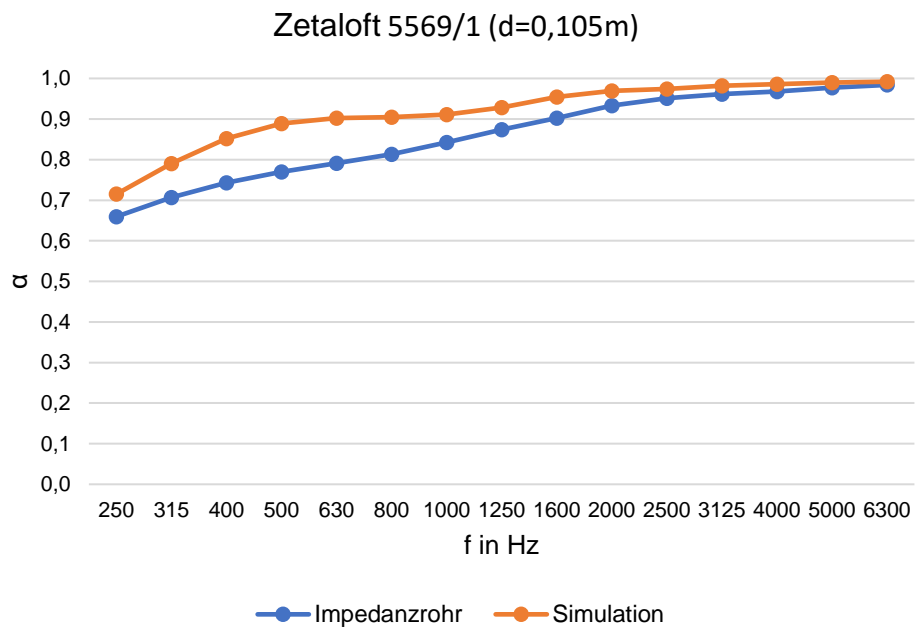


Abbildung 18: Verlauf der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade von Zetaloft 5559, erhöhte Dicke.

5. Diskussion

5.1 Schallabsorptionsgrade

Die Abweichungen der drei Messreihen bei den in den Ergebnissen genannten Stoffen können durch unterschiedliche Strukturen der Absorberoberfläche bei den Vliesstoffen Zetaloft 5558 und 5570 an den gegenüberliegenden Enden entstanden sein. Zudem könnte eine schlechte Passung in das Rohr durch ungenaue Schnitte vor allem bei den watteartigen Stoffen Zetaloft 5561 und 5565 für diese Ungenauigkeiten verantwortlich sein. Dies könnte ebenso dazu geführt haben, dass diese Stoffe das Rohr nicht richtig abdichteten und somit zu geringe Schallabsorptionsgrade gemessen wurden, insbesondere bei den Schallabsorbern, die mit der Stoffschere auf die passende Größe zugeschnitten wurden. Weitere Ursachen für Fehler könnten gewesen sein, dass Teile des Kundt'schen Rohres nicht perfekt aneinander passten, sowie die in der Norm DIN 10534 in Anhang E beschriebenen Fehlerquellen. Zudem wird bei der Messung im Kundt'schen Rohr lediglich der senkrechte Schalleinfall betrachtet, weshalb die Ergebnisse nicht exakt auf die schlussendliche Verwendung der Absorber im Raum übertragen werden können.

Wie bereits in den Ergebnissen erwähnt, sind die vorliegenden Vliesstoffe keiner hohen Schallabsorberklasse zuzuordnen. Es wurden allerdings viele Formfaktoren für die Mitten und Höhen verwendet. Die Schallabsorber können dementsprechend trotzdem gut eingesetzt werden, wenn lediglich eine gute Absorption in diesen entsprechenden Bereichen gewünscht ist. Um eine breitbandige Wirkung zu erzielen, müssen die Dicken der Schallabsorber stark erhöht werden, sodass der Wert der Strömungsresistenz in den Bereich des Anpassungsparameters zwischen $2 \leq \varepsilon \leq 4$ rutscht. Bei den bisherigen Absorbern lag dieser Wert bei fast allen Vliesstoffen weit darunter. Eine andere Möglichkeit wäre, die Absorber in einem gewissen Wandabstand anzubringen und somit in bestimmten tiefen Frequenzen eine gute Schallabsorption zu ermöglichen. Dies würde jedoch „Auslöschungen“ des Absorptionsgrades in anderen Frequenzen zur Folge haben, was wiederum nicht einem breitbandigen Schallabsorber für die Raumakustik entspricht. Eine dritte Variante wäre es, die Struktur der Vliesstoffe so zu verändern, dass höhere Werte für die Strömungsresistenzen entstehen. Dies ist jedoch in dem Projekt aus zeitlichen und materialtechnischen Gründen nicht möglich. Daher wird in der folgenden Bearbeitung

A

Af

des Projekts auf die erste Methode, die Erhöhung der Dicken der Schallabsorber, zurückgegriffen.

5.2 Strömungswiderstände

Im Allgemeinen weisen die Stoffe, die durch die AED mittels genormten Verfahrens gemessen worden, im Mittel einen deutlich geringeren Strömungswiderstand auf als in den Versuchen an der Hochschule Mittweida.

Eine Ursache für Ungenauigkeiten in den Messwerten bei hohen Fallgeschwindigkeiten des Kolbens könnte sein, dass dieser beim Erreichen der ersten Lichtschranke noch nicht seine Maximalgeschwindigkeit erreicht hat. Dies würde bedeuten, die errechnete maximale Strömungsgeschwindigkeit wäre zu gering und die längenbezogenen Strömungswiderstände wären zu hoch.

Zudem könnte die menschliche Ungenauigkeit beim Loslassen des Kolbens eine Rolle spielen. Trotz vorheriger Untersuchungen zu unterschiedlichen Messergebnissen beim verschiedenen Halten der Befestigungsschnur und einer Festlegung eines exakten Punktes zum Loslassen, sodass diese vor jedem Loslassen gleichmäßig gespannt wird, bleiben diese Toleranzen nicht aus.

Des Weiteren ist insbesondere bei den weniger dichten und selbst zugeschnittenen Stoffen eine Passung im unteren Rohrende fehlerfrei nicht möglich. Bei einer zu großen Stoffprobe werden Teile derer ein wenig zusammengedrückt, etwas zu klein ausgefallene Stoffproben bewirken minimale Luftschlitze an den Rändern. Es wurde versucht, diesen Effekt mittels Zuschnitten im Laserzentrum zu minimieren, jedoch mussten dort kleinste Formveränderungen des jeweiligen Stoffes an den Rändern hingenommen werden. Eine zusammengepresste Stelle einer Probe bewirkt einen zu hohen, ein Luftschlitz einen zu geringen Strömungswiderstand. Diesen Effekten könnte durch den Einbau mehrerer Proben eines Stoffes im Rohr und einer damit verbundenen größeren Stoffdicke entgegengewirkt werden. Da in diesem Versuch ein Teil der Proben zur Referenzmessung eingereicht wurde, war dies im vorgeschriebenen zeitlichen Rahmen nicht für alle Stoffe möglich.

Für eine genauere Regression wäre es weiterhin von Vorteil gewesen, mehr als Strömungsgeschwindigkeiten zu deren Bestimmung heranzuziehen. Aufgrund dessen, dass die Bestimmung der Strömungsresistanzen nur ein Teil des eigentlichen

Projektes war, musste aus Zeitgründen auf fünf stark voneinander verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten zugegriffen werden. Für eine Fortsetzung dieses Projektes wäre es aber stark von Vorteil, den Kolben mit weiteren zusätzlichen Massen zu beladen, um mehrere verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten zu erhalten. Damit würden systematische Fehler, die beispielsweise bei einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit auftreten, weniger ins Gewicht fallen.

5.3 Simulationen und Simulationsbestätigungen

Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Simulationen und der Messungen im Impedanzrohr können durch die Eingabe fehlerhafter Strömungsresistenzen in die Simulationssoftware bedingt sein. Wie bereits im Ergebnisteil Strömungswiderstände erläutert, ergaben sich hier Abweichungen zwischen den an der HS Mittweida und in der Firma AED ermittelten Werte. Somit ließe sich annehmen, dass die Einbindung der von der Firma AED ermittelten Strömungswiderstände in die Simulationen zu übereinstimmenden Ergebnissen der zugehörigen Vliesstoffe führt. Doch besonders bei den Stoffen 5561, 5565 und 5570 ergaben sich bei den Simulationen der Ausgangsdicken ebenfalls Abweichungen größer 15 Prozent über das gesamte Frequenzspektrum hinweg verteilt. Seitens der Firma AED wurde mitgeteilt, dass bei allen Proben Probleme mit der Abdichtung im Strömungswiderstandsmessgerät auftraten. Hier könnten also selbst bei den normkonformen Messungen Messfehler aufgetreten sein.

Für alle Proben kann gesagt werden, dass die Abweichungen der frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrade zwischen Impedanzrohr und Simulationen bei den erhöhten Dicken von 10 cm geringer ausfielen als bei den Ausgangsdicken. Dies ist besonders im mittleren bis hohen Frequenzbereich der Fall. Tieffrequent blieben Abweichungen in der Regel bestehen. Eine Erklärung für dieses Phänomen ist folgende: Allgemein und unabhängig vom Strömungswiderstand werden höhere Frequenzen besser absorbiert als tiefe. Mit Erhöhung der Absorberdicke steigt die Fähigkeit auch mittlere und tiefere Frequenzen besser zu absorbieren. Gleichzeitig wird die Absorption der hohen Frequenzen in eine Sättigung übergehen, wenn der maximale Absorptionsgrad von 1 erreicht wird. Im Umkehrschluss kann die Überlegung aufgestellt werden, dass der Einfluss eines fehlerhaften Strömungswiderstandes auf das Simulationsergebnis für hohe Frequenzen bei steigender Absorberdicke an Bedeutung verliert. Denn selbst

5. Diskussion

bei einem niedrigeren Strömungswiderstand führt die erhöhte Absorberdicke bereits zu einer sehr guten Absorption von hohen Frequenzen im Bereich von $\alpha = 1$.

Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass bei den Messungen im Impedanzrohr Messfehler auftraten, welche einer mäßig guten Abdichtung insbesondere bei den sehr watteartigen Vliesstoffen mit dem Rohr zuzuschreiben sind. Dieser Sachverhalt kann ebenfalls zu den aufgetretenen Abweichungen der Schallabsorptionsgrade beitragen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend ist zu sagen, dass durch die ausgeführten Messungen und Untersuchungen, alle von der Firma Tenowo zur Verfügung gestellten Vliesstoffe, entsprechend ihrer Verwendbarkeit als poröse Absorber in der Raumakustik eingeordnet und charakterisiert werden konnten. Diese Ergebnisse wurden in Datenblättern zusammengefasst und dienen dem Unternehmen somit als Grundlage für weitere Forschungen. Für das weitere Vorgehen ist es sinnvoll, die Strömungswiderstände aller Stoffe nochmals mit einem normgerechten Verfahren, wie es beispielsweise die Firma AED verwendet, nachzuprüfen, um somit durch genauere Ergebnisse die Unterteilung der ausgewählten Proben in Schallabsorberklassen nochmals zu überprüfen um unter Umständen dort Verbesserungen einiger Stoffe erhalten zu können. Des Weiteren wäre eine Prüfung der Anwendbarkeit der Stoffe über den Bereich der porösen Absorber hinaus eine relevante Maßnahme, um weitere Anwendungsbereiche für die Absorbermaterialien, wie beispielsweise Lochflächenresonatoren, zu generieren. Ein nächster Schritt stellt außerdem die Ideenfindung zur sinnvollen Anwendung der bereits als Klasse A deklarierten Absorber in der Raumakustik dar. Beispiele hierfür wären Stellwände oder Deckenplatten. Hochschulintern ist ebenfalls eine Weiterentwicklung und Modifizierung des selbstgebauten Messgeräts zur Bestimmung des Strömungswiderstands ein nützlicher Schritt für nachfolgende Studenten, um somit selbst Forschung an der Hochschule betreiben zu können, ohne auf externe Partner angewiesen zu sein.

} SS

F

/

Literaturverzeichnis

- [1] Norm DIN 18041. Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung
- [2] <https://www.hunecke.de/de/wissen/absorber/poroese-absorber.html>; 29.08.19
- [3] <https://www.baunetzwissen.de/akustik/fachwissen/schallabsorption/poroese-schallabsorber-147715>, 12.08.19
- [4] <https://www.baunetzwissen.de/glossar/r/reflexion-1133271/gallery-1/1>, 16.08.19
- [5] Norm DIN 11654. Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden – Bewertung der Schallabsorption
- [6] Norm DIN 10534 Teil 2. Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren. Verfahren mit Übertragungsfunktion
- [7] Norm DIN EN 29053 Bestimmung des Strömungswiderstandes (ISO 9053)
- [8] Wiedermann, Lorenz: Meßvorrichtung zur Ermittlung des Gleichströmungswiderstandes von Absorbermaterialien. KÖTTER Beratende Ingenieure Dresden GmbH, 1996
- [9] Messprotokolle der Firma AED zur Bestimmung der Strömungswiderstände in Anlehnung an die DIN EN 29053 (ISO 9053)

Anhänge

Anhang 1

a) Messwerte der Korrekturmessung für Winkelstellungen bei offenem und abgedichtetem Rohr.

	offen			geschlossen		
	0°	18,4°	26,2°	0°	18,4°	26,2°
1	0,29	0,32	0,34	31,4	36,53	41,77
2	0,29	0,33	0,35	31,13	36,19	40,53
3	0,29	0,33	0,37	31,53	35,81	38,52
4	0,29	0,33	0,35	31,74	35,63	41,33
5	0,29	0,33	0,35	31,67	35,13	40,45
6	0,29	0,33	0,35	31,14	34,32	39,79
7	0,29	0,31	0,35	31,17	37,3	39,77
8	0,29	0,33	0,37	31,89	37,74	39,61
9	0,28	0,33	0,36	31,8	38,3	40,38
10	0,28	0,33	0,36	32,34	37,36	41,49
11	0,28	0,33	0,35			
12	0,3		0,35			
13	0,3		0,35			
14	0,29		0,34			
15	0,29		0,36			
16	0,29		0,35			
17	0,29		0,35			
18	0,29		0,36			
19	0,29		0,36			
20	0,29		0,35			
Ø	0,290	0,327	0,354	31,581	36,431	40,364
s	0,0050	0,0062	0,0079	0,37	1,19	0,94

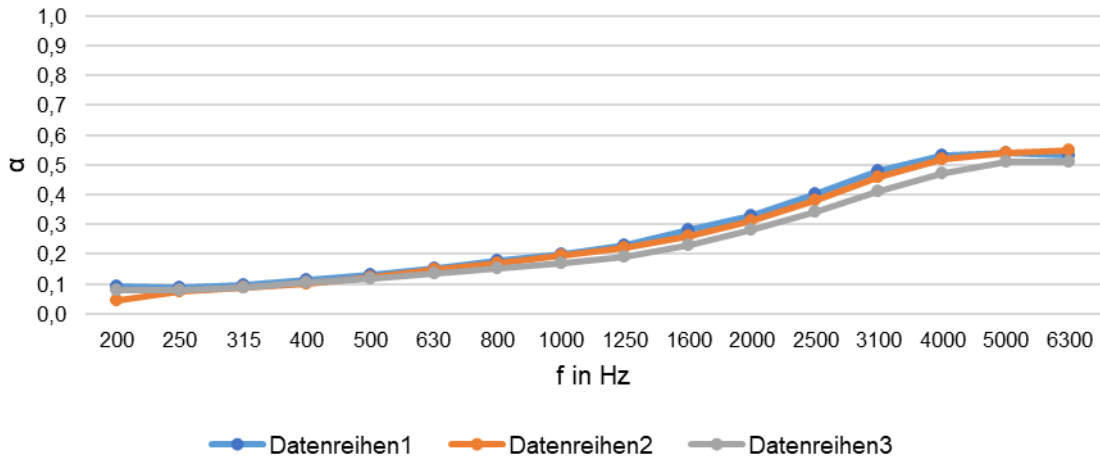
b) Messwerte der Korrekturmessung für verschiedene Zusatzmassen

Korrekturmessung mit Zusatzgewicht bei 0°				
	offen		geschlossen	
	200g	400g	200g	400g
0,28		0,27	31,05	16,34
0,28		0,27	29,52	15,86
0,29		0,27	30,26	15,23
0,27		0,27	30,17	14,63
0,28		0,27	29,7	15,11
0,29		0,27	30,02	15,59
0,28		0,27	29,68	15,04
0,28		0,27	29,31	14,81
0,28		0,27	30,27	15,82
0,29		0,27	29,66	14,79
Ø	0,282	0,27	29,964	15,322
s	0,006	0	0,476848	0,529392104

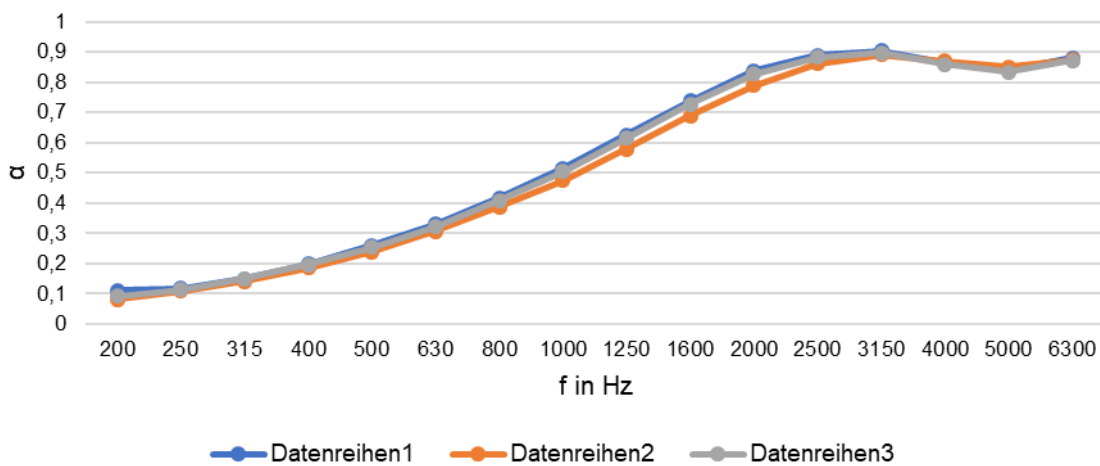
Anhang 2

Messwerte der Schallabsorptionsgrade im Kundt'schen Rohr bei Originaldicke

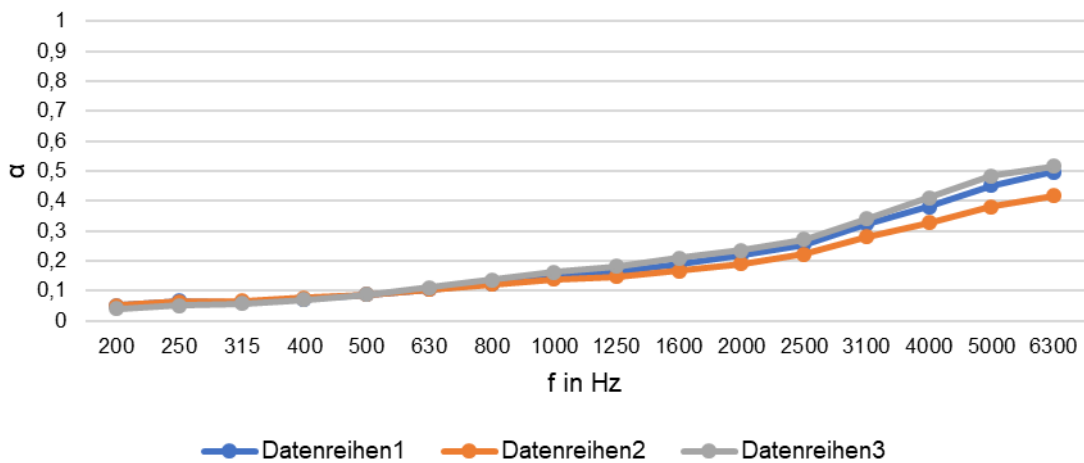
Zetaloft 5558



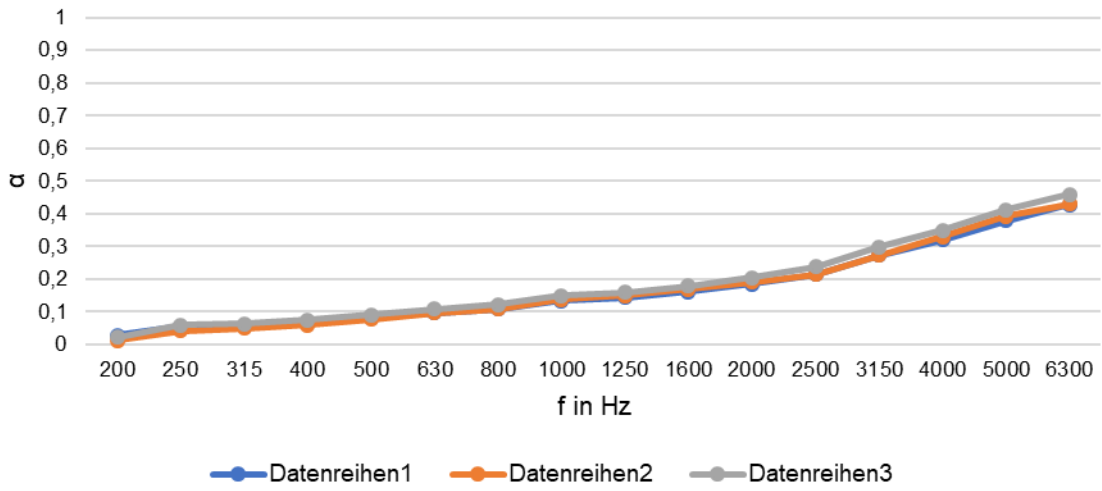
Zetaloft 5559



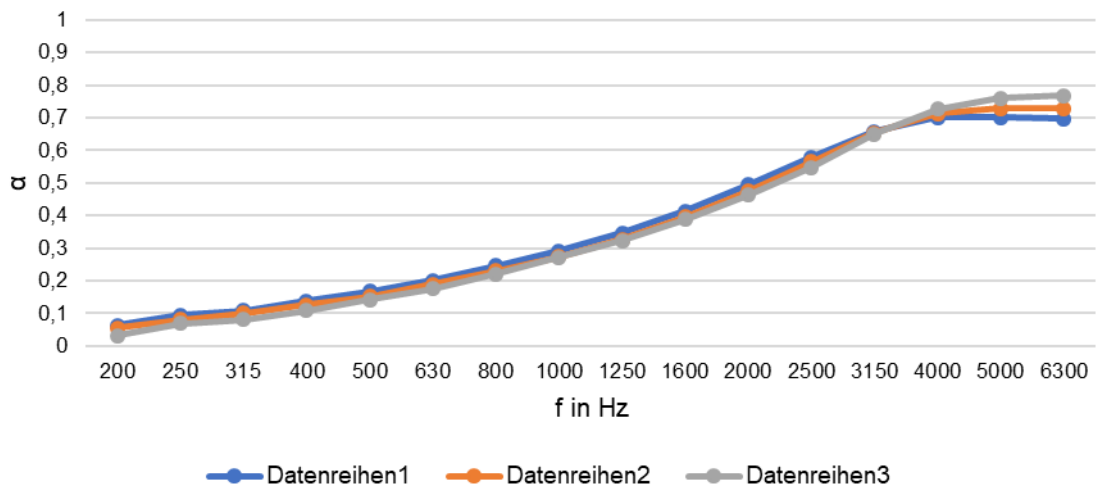
Zetaloft 5561



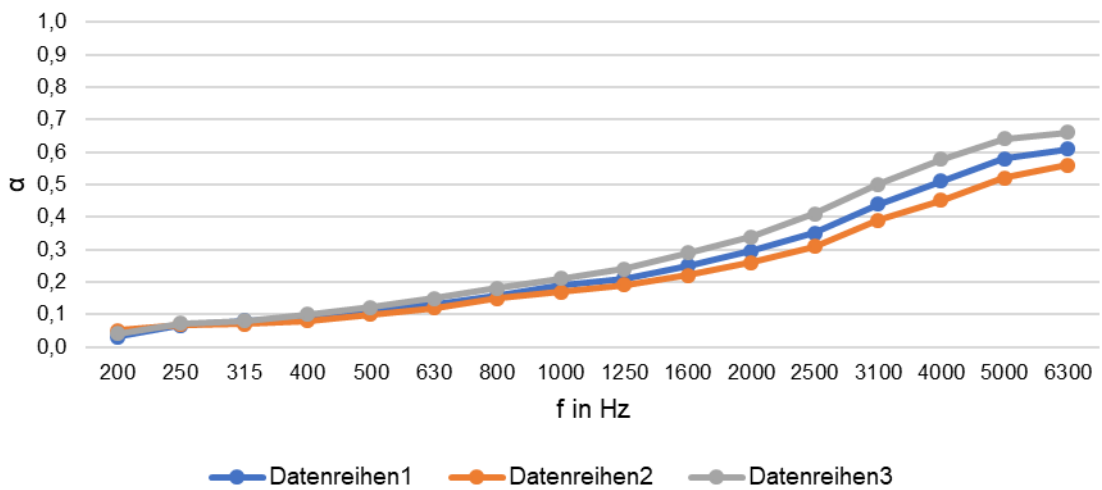
Zetaloft 5562



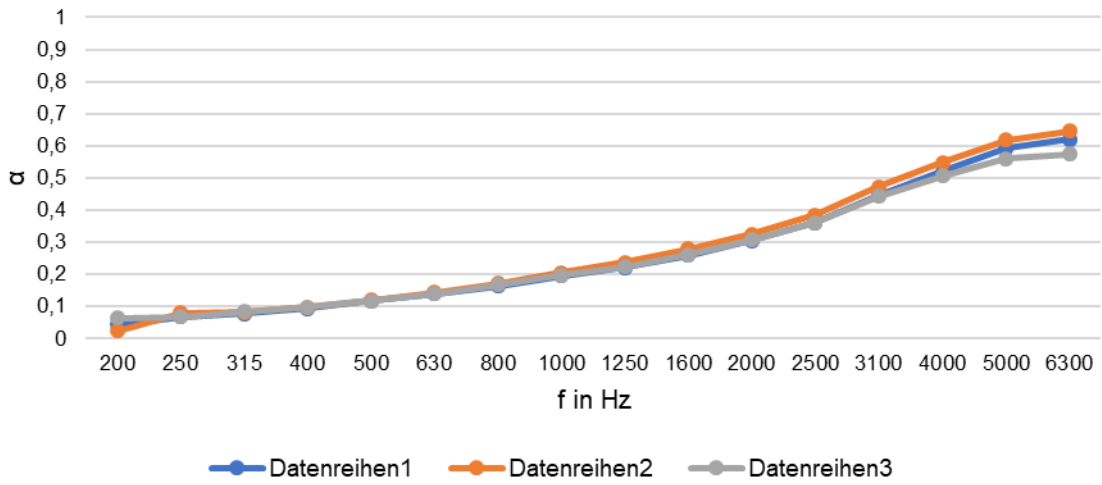
Zetaloft 5564



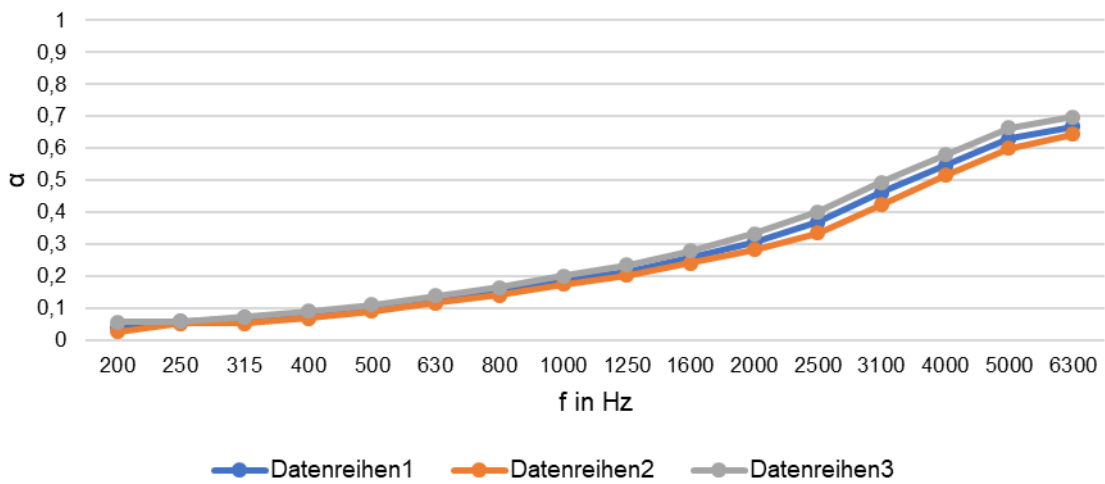
Zetaloft 5565



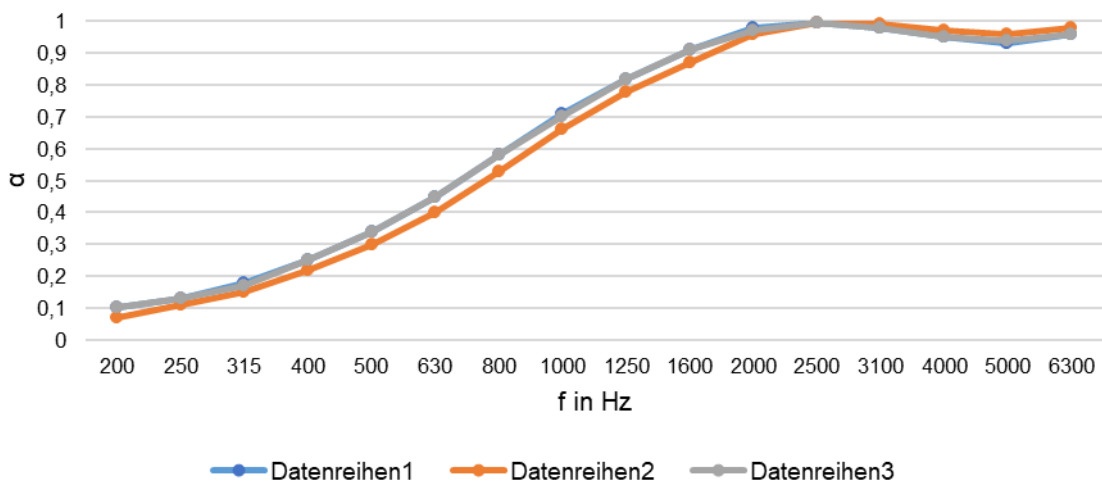
Zetaloft 5566

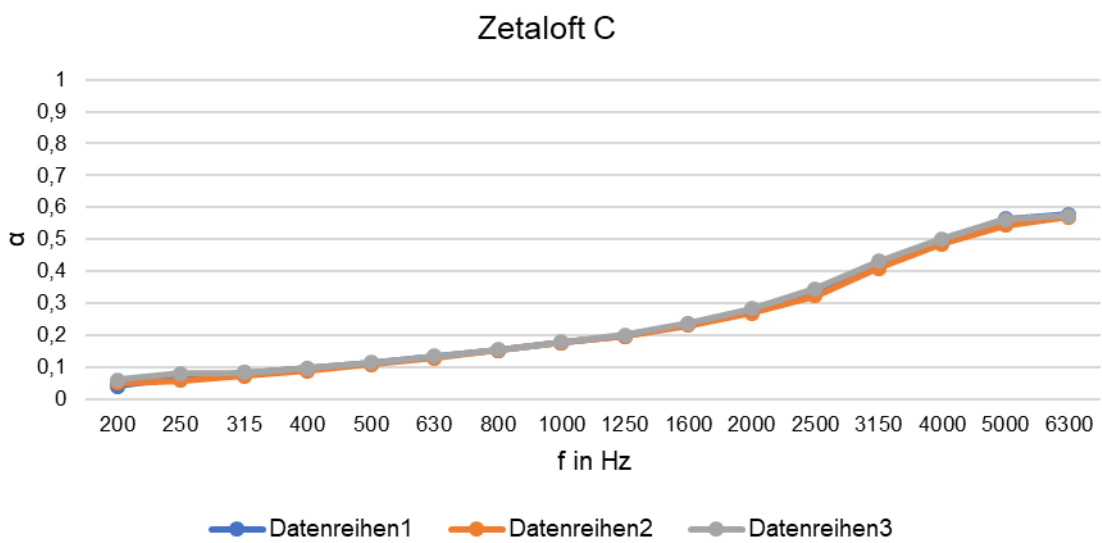
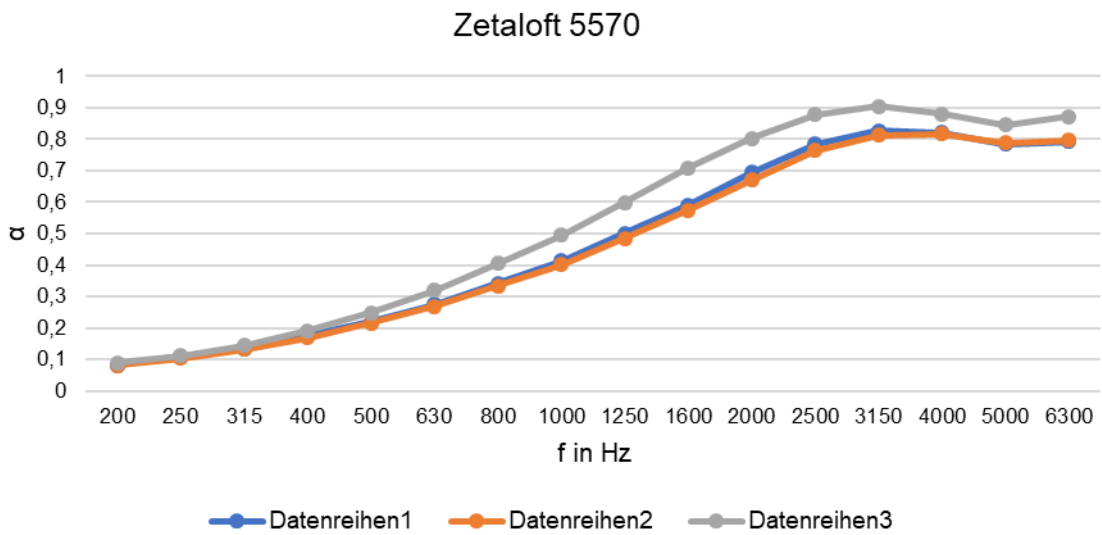
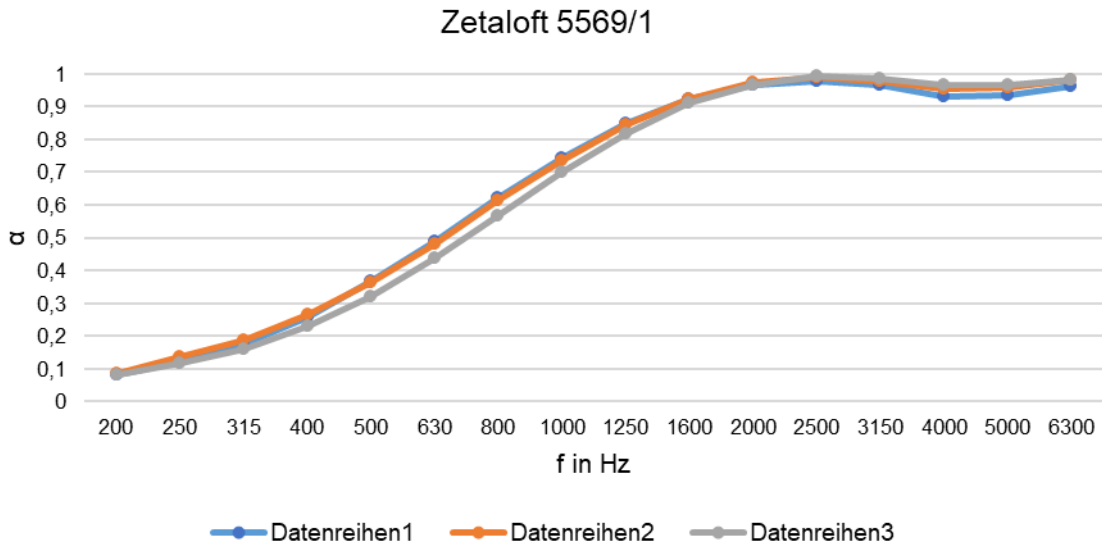


Zetaloft 5567

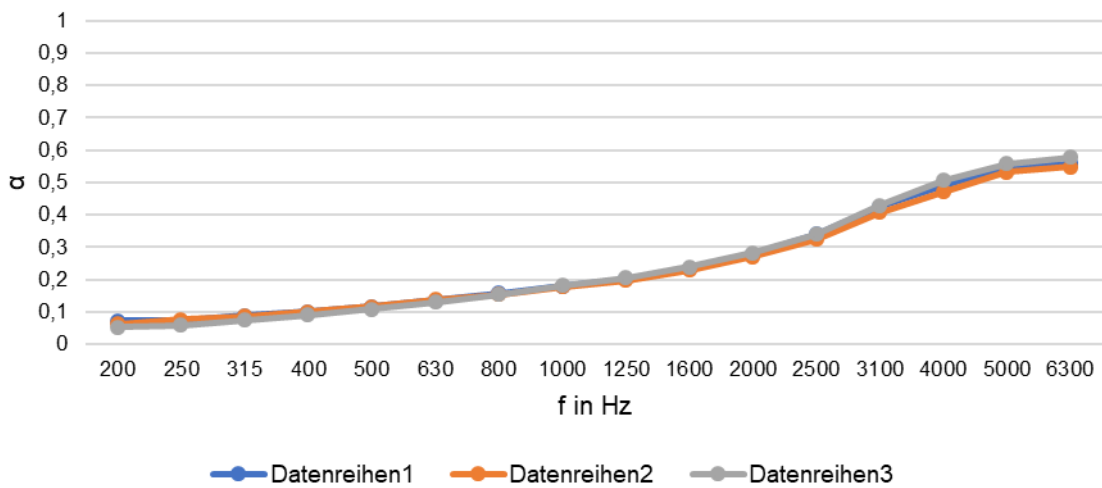


Zetaloft 5569

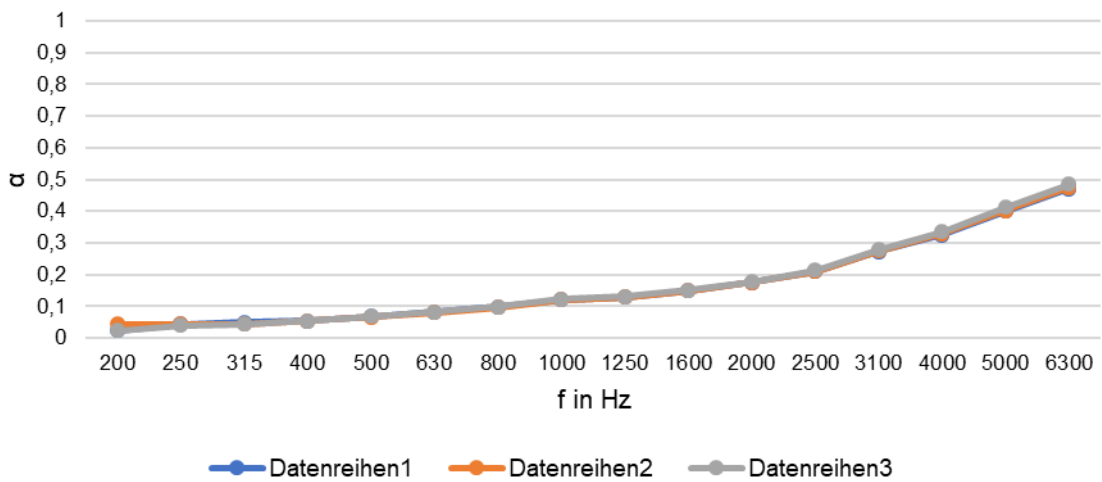




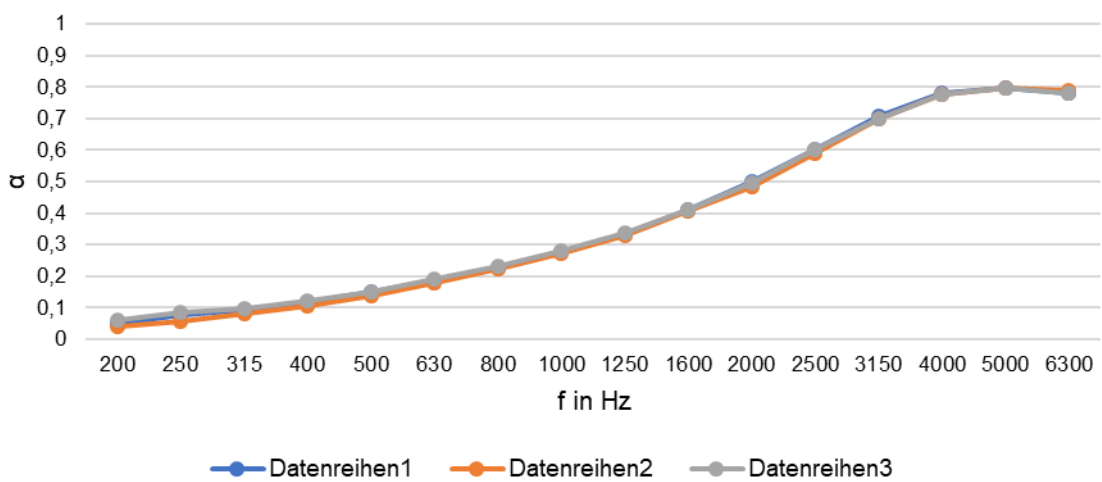
Zetaloft D



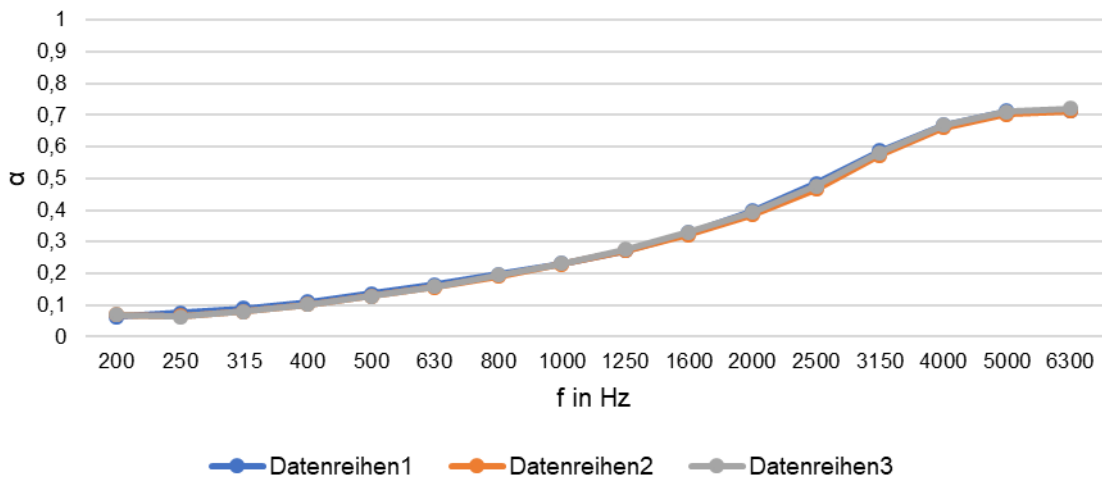
Zetaloft E



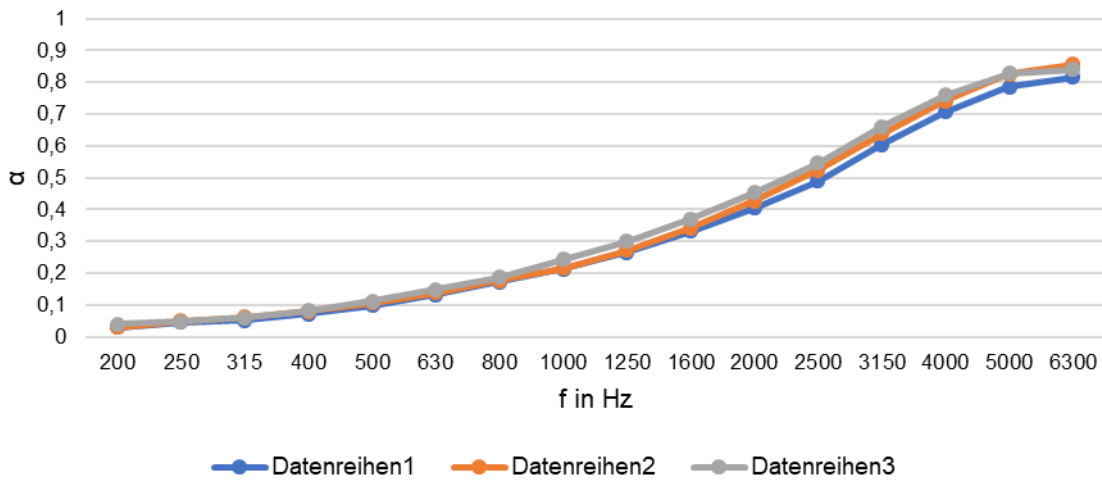
Zetaloft H



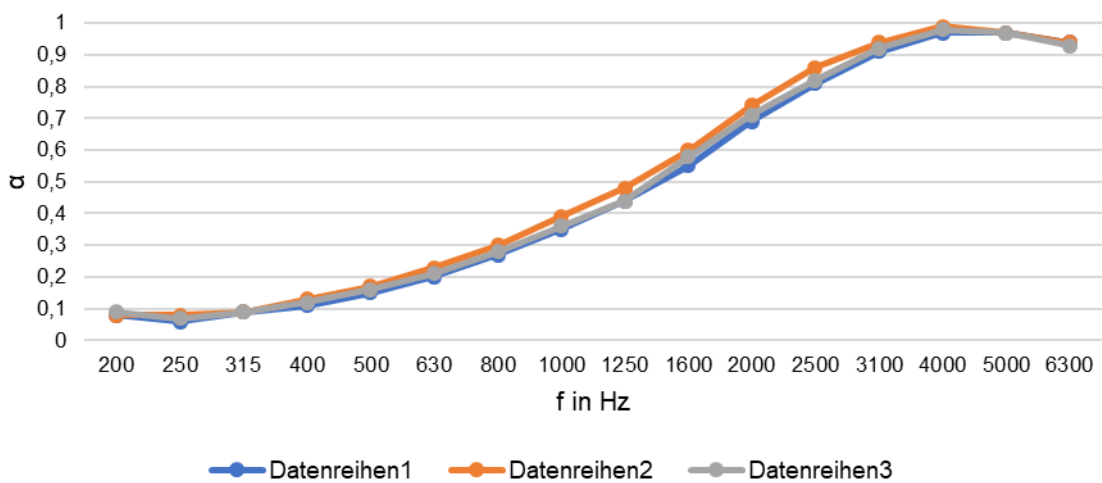
Zetaloft L



Zetaloft M



Zetaloft PM23



Anhang 3

Messwerte der Schallabsorptionsgrade im Kundt'schen Rohr bei optimierten Dicken

Siehe „Akustische_Datenblaetter.pdf“

Selbstständigkeitserklärung

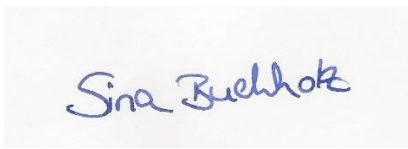
Hiermit erkläre ich, dass wir die vorliegende Arbeit mit dem Titel

Studie zur Optimierung von Vliesstoffen für die Raumakustik

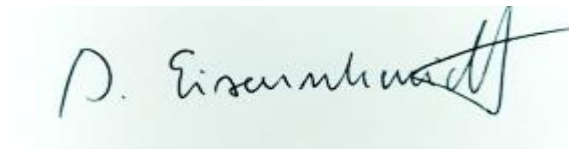
selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und die den verwendeten Quellen und Hilfsmitteln wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht haben.

Mittweida, den 30.08.19

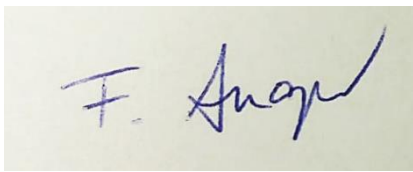
Ort, Datum



Sina Buchholz



Daniel Eisenschmidt



Florian Anger



Oliver Gehler