

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

**Entwicklung von Naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK) aus Bastfasern und Polylactid (PLA) mit verbesserter Schalldämpfung durch Baumwolle;
Teilvorhaben 2: Messtechnische und numerische Charakterisierung**

Zuwendungsempfänger:

Novicos GmbH

Förderkennzeichen:

2220NR256B

Laufzeit:

01.10.2021 bis 30.09.2023

Datum der Veröffentlichung:

16.09.2024

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht	1
1.	Aufgabenstellung	1
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens	2
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse	3
a)	Arbeitspakete und Meilensteine	3
b)	Zusammenfassung	4
II.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse.....	5
1.	Erzielte Ergebnisse	5
	Arbeitspaket 1: Festlegung der Anforderungen, Materialauswahl und Herstellung von textilen Flächen für Prüfkörper und Demonstrator.....	5
	Arbeitspaket 4.1: Ermittlung eines geeigneten Materialmodells und Bestimmung der notwendigen Materialparameter	5
	Arbeitspaket 4.2: Entwicklung von Optimierungsverfahren zur Verbesserung der akustischen Materialeigenschaften	8
	Arbeitspaket 5.1: Messtechnische Untersuchung des Materials	9
	Arbeitspaket 5.2: Numerische Charakterisierung des Materials	36
	Arbeitspaket 5.3: Numerische Charakterisierung des Funktionsmusters	42
	Arbeitspaket 6: Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse	46
2.	Verwertung.....	46
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	46
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	46
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	46
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	46
3.	Erkenntnisse von Dritten	47
4.	Veröffentlichungen	47
	Literaturverzeichnis	48

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK), aus einer Verstärkungsfaser (Naturfasern) und Matrixfaser (thermoplastische Fasern) werden aus Vliesstoffen durch einen Thermoformingprozess hergestellt, indem die Matrixfaser aufgeschmolzen und das Material versteift wird. Das Forschungsvorhaben AirCOmp zielte auf die Entwicklung von Naturfaserverstärkten Kunststoffen, im folgenden auch Composites genannt, mit erhöhter Schalldämpfung für Anwendungen z. B. im Automobilbereich als Türinnenraumverkleidung oder der Architektur für Trennwände. Die Verbunde wurden aus der Binfaser Polyactid (PLA) und Bastfasern (Flachs) sowie Baumwolle (CO) hergestellt. Der Biokunststoff PLA wird aus natürlichen Rohstoffen hergestellt und ist industriell kompostierbar. Somit können die im Projekt entwickelten Produkte aus den Naturfasern und Polyactid ohne vorherige Trennung kompostiert werden.

Durch die Zugabe von Baumwolle (u.a. Kurzfasern oder Linters) wurde eine Verbesserung der akustischen Wirkung (Dämpfung) angestrebt, da die Lufteinschlüsse (Poren) durch die Feinheit der Baumwolle im Vergleich zu anderen Naturfasern in der Anzahl vergrößert und im Volumen verringert werden. [1] Gleichzeitig sollten die mechanischen Eigenschaften wie die Festigkeit und Biegesteifigkeit erhalten bleiben.

Nach gemeinsamer Materialauswahl als Basis der herzustellenden Composites sowie der Vergleichsmaterialien mit dem Projektpartner FIBRE, war das Ziel von FIBRE die Entwicklung und Optimierung des Konsolidierungsprozesses von Composites. Das Teilprojekt von Novicos zielte auf die Untersuchung der akustischen Eigenschaften, die Entwicklung von Berechnungsmethoden zur numerischen Beschreibung dieser Materialien und eine darauf aufbauende Optimierung der Kennwerte. Hierfür war ein Austausch der Proben und mehrerer Materialparameter, wie der Strömungswiderstand und mechanische Messwerte, zwischen den Projektpartnern notwendig. Mithilfe der Optimierungsergebnisse sollte abschließend ein Demonstrator Bauteil entwickelt werden, das beim assoziierten Partner Polyvlies hergestellt werden kann.

Die sehr guten akustischen Eigenschaften von naturfaserverstärkten Kunststoffen, die sie für den Einsatz als Schalldämmmaterial interessant machen, sind noch nicht weit erforscht. Die numerische Betrachtung der akustischen Eigenschaften soll auf der Basis des Biot-Modells [2] aufgebaut werden. Entscheidende Material-Parameter sind hierbei etwa der Strömungswiderstand, die Gewundenheit oder die Größe der einzelnen Poren. Diese können teilweise gemessen werden und müssen teilweise numerisch, z.B. über inverse Charakterisierungen, ermittelt werden.

Im Bereich der Optimierung lässt sich allgemein in globale und lokale Probleme unterteilen, bei denen Kriterien f in Abhängigkeit von Parameterkombinationen $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ entweder minimiert oder maximiert werden sollen. Wird exemplarisch ein einzelnes Kriterium f in Abhängigkeit von zwei unabhängigen Parametern x_1 und x_2 betrachtet, kann der Verlauf dieser zweidimensionalen Funktion als Gütegebirge mit lokalen und globalen Minima und Maxima veranschaulicht werden. Falls nur eine einzelne Zielfunktion f optimiert werden soll, entsprechen die optimalen Parameterkombinationen je nach Aufgabenstellung gerade dem Minimum oder Maximum dieser Funktion [3] [4]. Die Parameter der Optimierung entsprechen unter anderem den Materialparametern der NFK. Globale Optimierungsalgorithmen können grundsätzlich in deterministische und probabilistische Ansätze unterteilt werden. Falls die Abhängigkeiten eines Optimierungsproblems unbekannt sind, diese eine zu hohe Komplexität aufweisen oder die Dimensionalität des Problemraums sehr groß ist, kann ein deterministischer Ansatz zu einer vollständigen Suche führen. Eine Lösung ist dann aber meist schon bei verhältnismäßig einfachen Problemen numerisch sehr aufwändig oder sogar unmöglich, da die Rechenzeit polynomial mit der Größe des Problemraums ansteigt. In diesen Fällen eignen sich insbesondere probabilistische Ansätze, die dem Monte-Carlo-Prinzip (MC) folgen [5]. MC-Methoden basieren allgemein auf sehr häufig durchgeführten Zufallsexperimenten, deren Ergebnisse mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie numerisch gelöst werden. Die einzelnen Suchschritte probabilistischer Algorithmen werden durch heuristische Funktionen [6] bestimmt, welche z. B. durch Auswertung der bisher berechneten Zielfunktionswerte entweder festlegen, welches Element x als nächstes verwendet wird, oder wie ein neues Element gebildet werden soll. Zu den bekanntesten Vertretern probabilistisch, heuristischer Algorithmen gehört die Klasse der Evolutionären Algorithmen (EA) [7]. Diese Verfahren führen die Elemente einer Lösungsmenge (genannt Population) durch iterative Anwendung von Reproduktions- und Selektionsoperatoren, welche das Verhalten der biologischen Evolution imitieren, sukzessive an die Optima heran [8] [9] [10]. Evolutionäre Algorithmen sollen die Basis der zu entwickelnden Optimierungsroutine bilden.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

AP 1: Festlegung der Anforderungen, Materialauswahl und Herstellung von textilen Flächen für Prüfkörper und Demonstrator

Zunächst wurde im Projektverbund ein Anforderungsprofil der zu entwickelnde Halbzeuge erstellt, bei dem die Eigenschaften der auf dem Markt verfügbaren Produkte (beispielsweise Türinnenverkleidungen bei Automobilen) als Vorbild dienen. Somit sollten die verarbeitungsspezifischen Parameter (Dicke, Dichte etc.) und die Endigenschaften (mechanisch, akustisch etc.) ermittelt werden.

Die zu erwartende akustische Verbesserung wurde bei einem Baumwollanteil von 20% auf 25% geschätzt. Dieser Kennwert diente als Vorbild für die Versuchsdurchführung. Als Benchmark sollte ein aktuelles Standardmaterial aus synthetischem Vlies verwendet werden.

AP4.1: Ermittlung eines geeigneten Materialmodells und Bestimmung der notwendigen Materialparameter

Die Aufgabe des AP 4 bestand darin, ein möglichst gut geeignetes Modell zur numerischen Beschreibung der relevanten physikalischen Eigenschaften der naturfaserverstärkten Kunststoffe zu erarbeiten und numerisch umzusetzen. Die Materialmodelle wurden mit den Diskretisierungsmethoden der klassischen FEM umgesetzt. Für die Nutzung der NFK sind sowohl die mechanischen als auch die akustischen Eigenschaften von Bedeutung. Beide Eigenschaften sollten vom Modell berücksichtigt werden und auch die Kopplung beider erlauben.

AP4.2: Entwicklung von Optimierungsverfahren zur Verbesserung der akustischen Materialeigenschaften

Das übergeordnete Ziel bestand darin, effiziente numerische Werkzeuge zur Berechnung der Akustik einzusetzen und so eine ausreichend effiziente Optimierung zu ermöglichen. Es wurden die Optimierungsparameter mit ihren zulässigen Min/Max-Grenzen und die möglichen Zielgrößen definiert. Wichtig ist hier auch die zielführende Abstimmung der zu optimierenden akustischen Eigenschaften beim Projektpartner mit den Arbeiten bei Novicos zur Optimierung. Für die Optimierung wurde ein Parameterraum definiert, der sicherstellt, dass die ermittelten Varianten für die verschiedenen Komponenten die wesentlichen umsetzungsrelevanten und marktgerechten Randbedingungen erfüllen. Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen wurden die numerischen Berechnungsmodelle aufgebaut und entsprechend parametrisiert, so dass die Optimierung der Materialien vorgenommen werden konnte.

AP5.1: Messtechnische Untersuchung des Materials und des Funktionsmusters

In diesem Arbeitspaket wurden die Funktionsmuster tests durchgeführt. Die erhaltenen Messdaten wurden ausgewertet und in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern analysiert. Novicos nutzte diese Analysen zum späteren Abgleich mit den numerischen Ergebnissen.

AP5.2: Numerische Charakterisierung des Materials

Ausgehend von den zusammengetragenen Anforderungen, Randbedingungen sowie Daten und Parametern wurden neue Konzepte für die Aufbauten von NFK erarbeitet. Novicos begleitete die geplanten Analysen der akustischen Wirkpotenziale neuer Materialkombinationen.

AP5.3: Numerische Charakterisierung des Funktionsmusters

Aus den gewonnenen Daten der Vorstudien und Konzeptentwürfe für ein Funktionsmuster wurden Potenziale für eine gewünschte Optimierung wichtiger Eigenschaften herausgearbeitet. Außerdem sollten zum Abgleich und zur Validierung die durchgeführten Messungen eingesetzt werden.

Das FEM-Programm zur Untersuchung des NFK-Funktionsmusters wurde verwendet, um die im Laufe des Vorhabens erarbeiteten Konzepte zu bewerten. Notwendige Verbesserungen des Simulationsprogramms aufgrund der neuartigen Materialien wurden durchgeführt. Hauptaufgabe war die numerische Vorhersage und Auswertung der akustischen Eigenschaften des erarbeiteten Funktionsmusters. Hierbei wurde die Modellierung und Simulation von Novicos und die Analyse der erzielten Ergebnisse mit allen Partnern durchgeführt. Daraus sollten sich Ansätze zur Verbesserung des Funktionsmusters aus naturfaserverstärkten Kunststoffen ergeben, die eventuell zur Weiterentwicklung auf der Materialebene durch FIBRE oder auf der Konstruktionsebene durch den Partner Polyvlies übernommen werden können. Abschließend wurde eine Simulation für das im Rahmen von AirComp hergestellte Funktionsmuster durchgeführt.

AP6: Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse

Nach Ermittlung der optimalen Mischungsverhältnisse, Herstellungsparameter etc. wurden die generierten Ergebnisse für den späteren Anwender zusammengefasst. Zusammen mit dem assoziierten Partner Polyvlies wurden die Ergebnisse der Analysen begutachtet und bewertet. Eine anwendungsrelevante Auswahl an Mischungsverhältnissen wurde dem technischen und wirtschaftlichen Nutzen gegenübergestellt und bewertet.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Ermittlung der Anforderungen	01.10.2021 bis 30.07.2022	Anforderungen und Versuchsplan im Konsortium entwickelt
AP 4.1 Entwicklung eines geeigneten Materialmodells	01.01.2022 bis 30.09.2022	Materialmodell zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften naturfaserverstärkter Kunststoffe entwickelt
AP 4.2 Entwicklung von Optimierungsverfahren	01.07.2022 bis 30.01.2023	Optimierungsverfahren auf Basis der Modelle aus AP 4.1 entwickelt
AP 5.1 Messtechnische Untersuchung des Materials	01.02.2022 bis 30.07.2022	Messung und Analyse der von FIBRE hergestellten Materialien
AP 5.2 Numerische Charakterisierung des Materials	01.05.2022 bis 30.09.2022	Numerische Charakterisierung der Materialien mithilfe der Modelle aus AP 4.1
AP 5.3 Numerische Charakterisierung des Funktionsmusters	01.11.2022 bis 31.03.2023	Numerische Bewertung des Funktionsmusters Mithilfe eines Modells einer Fahrzeugtür erfolgte numerische Charakterisierung des Funktionsmusters
AP 6 Dokumentation	01.05.2023 bis 30.09.2023	Bewertung der Ergebnisse durchgeführt

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 Abschluss der Projektplanung	01/2022	Projektplan und Versuchsplan sind ausgearbeitet
M 4 Abschluss Versuchsreihen	06/2023	Akustische Analyse aller Prüfkörper durchgeführt

b) Zusammenfassung

Durch die im Versuchsplan hergestellten Proben konnte ein breites Spektrum an NFK akustisch untersucht werden. Grundsätzlich erhöht ein hoher Anteil an Naturfasern die Flexibilität eines Materials. Dies bestätigt die Zugfestigkeit, die sich mit zunehmendem PLA-Anteil erhöht. Die Biegefähigkeit hängt insbesondere von der Art der Naturfaser ab und ist bei erhöhtem Baumwollanteil gegenüber Flachs verringert. Je flexibler das Material ist, desto höher ist die erzielte Absorption. Diese Tendenz konnte mit Baumwoll-Fasern und einem Gemisch aus Baumwolle und Flachs sehr gut gezeigt werden. Die Materialien mit ausschließlich Flachs-Fasern zeigten diese Tendenz nicht so deutlich. Dies könnte an der hohen Steifigkeit bei bereits niedrigen PLA-Anteilen liegen.

Im Vergleich der einzelnen Fasern bei konstantem PLA-Anteil waren weniger deutliche Unterschiede zu erkennen. Bei geringem PLA-Anteil von 25% zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Flachs und Baumwolle. Dieser kann mit der hohen Steifigkeit von Flachs, einer höheren Dicke des Materials mit Baumwolle und einem erhöhten Strömungswiderstand von Baumwolle erklärt werden. Bei einer Erhöhung des PLA-Anteils auf 50% sind große Inhomogenität in den Materialien aufgetreten. Die Ergebnisse für die Absorption zeigen eine sehr hohe Streuung. Dadurch lassen sich kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Fasern erkennen. Der Strömungswiderstand erhöht sich. Hier zeigt sich, dass ab einer gewissen Höhe des Strömungswiderstandes die Absorption wieder geringer ausfällt. Bei einem PLA-Anteil von 75% sind die Oberflächen der Materialien sehr gleichmäßig, fast folienartig. Die Inhomogenitäten sind deutlich verringert. Die Strömungswiderstände sind noch höher und führen zu sehr geringen Absorptionen, unabhängig von der verwendeten Naturfaser.

Es wurde ein geeignetes Materialmodell entwickelt, mit dem die Materialien numerisch untersucht wurden. Dabei wurde bei konstantem PLA-Anteil die Absorption in Abhängigkeit des Baumwollanteils und der Anzahl der Lagen berechnet. Für 25% PLA-Anteil ist der Absorptionsgrad bei 0% Baumwolle am geringsten. Mit steigendem Baumwollanteil wird eine verbesserte Absorption bei niedrigeren Frequenzen erreicht. Eine erhöhte Anzahl an Lagen führt ebenfalls zu einer verbesserten Absorption bei niedrigen Frequenzen, unabhängig vom Material. Dabei ist das Maximum der Absorption für dickere Proben ebenfalls bei niedrigeren Frequenzen und mitunter geringer als für dünnere Proben. Auffällig ist die Probe mit 75% Flachs, die bei mehr Lagen einen deutlich höheren maximalen Absorptionsgrad hat als alle anderen Konfigurationen. Dies gilt allerdings nur für die höheren Frequenzen über 2000 Hz. Im unteren Frequenzbereich bis 2000 Hz führt ein hoher Baumwollanteil weiterhin zu verbesserter Absorption.

Das gleiche Vorgehen wurde mit einem Anteil von 50% PLA wiederholt. Diese Materialien sind dünner und die Absorptionsgrade sind entsprechend niedriger. Das Material mit 50% Baumwollanteil zeigt im gesamten Frequenzbereich und für alle Dicken die höchste Absorption.

Im Konsortium wurden die Ergebnisse diskutiert. Daraus hat sich für den optimierten Demonstrator eine Materialzusammensetzung von 50% PLA, 25% Baumwolle und 25% Flachs ergeben. Zwar werden bei einem Anteil von 75% Naturfasern bessere akustische Ergebnisse erwartet, diese würden aber höhere Kosten bedeuten und sich nicht gut mit dem aktuellen Industriestandard von 50% Naturfasern vergleichen lassen. Außerdem wurde das gemischt Material aus Flachs und Baumwolle gewählt, da Flachs ebenfalls weniger Kosten in der Herstellung bedeutet und die Steifigkeiten des gemischten Materials vergleichbar sind zu Materialien aus reinem Flachs.

Dieser Demonstrator wurde von FIBRE und Polyvlies hergestellt. Zusätzlich wurde eine Referenzprobe aus 50% PP (Industriestandard), 25% Baumwolle und 25% Flachs hergestellt. Beide Proben wurden vermessen und numerisch analysiert.

Für eine Dicke von 2,3 mm für beide Materialien zeigt das Demonstrator-Material im gesamten Frequenzbereich eine bessere Absorption als die Referenz. Hier kann eine Verbesserung bis zu 0,14 im Absorptionskoeffizient erreicht werden. Im Vergleich des Schalldämmmaßes am Beispiel einer Autotür Verkleidung (wie der Demonstrator) zeigt sich eine Verbesserung von 8,5 dB auf 13 dB. Dies ist eine deutliche Verbesserung und kann als Erfolg für den Biokunststoff gewertet werden. Die Zielsetzung einer Verbesserung von 20% konnte somit erreicht werden.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Festlegung der Anforderungen, Materialauswahl und Herstellung von textilen Flächen für Prüfkörper und Demonstrator

Im Rahmen von Arbeitspaket 1 wurde im Konsortium ein Versuchsplan mit den herzustellenden Materialien entwickelt. Dabei sollten Anteile an PLA, Flachs, Kurs- und Langstapelfasern variiert werden. Alle Proben sind in Abbildung 1 aufgelistet. Für jedes Material wurden vom Projektpartner FIBRE mindestens 3 Proben in der Größe 30 x 30 cm hergestellt und Novicos zur akustischen Analyse (AP 5.1) zur Verfügung gestellt.

#	Vliesstoffe					Composites
	Mischungsverhältnis				Flächengewicht [g/m ²]	Laminataufbau
	PLA	Flachs	Kurz- stapel	Lang- stapel		Anzahl und # der Lagen
1	25	75		0	200	1111
2	25	37,5		37,5	200	2222
3	25			75	200	3333
4	50	50			200	4444
5	50	25	25		200	5555
6	50	25		25	200	6666
7	50		50		200	7777
8	50			50	200	8888
9	75	25			200	9999
10	75	12,5		12,5	200	10 10 10 10
11	75			25	200	11 11 11 11
12						8668
13						6886
14						44444444
15						66666666
16						88888888

Abbildung 1: Versuchsplan

Arbeitspaket 4.1: Ermittlung eines geeigneten Materialmodells und Bestimmung der notwendigen Materialparameter

Die numerische Beschreibung von Materialien mit akustischer Wirkung ist Gegenstand vieler Veröffentlichungen (z.B. [11] [12]). Die Schwierigkeiten hierbei liegen neben der Größe des zu betrachtenden Systems in der korrekten Darstellung der Anregungen und den Materialmodellen für die verschiedenen eingesetzten Werkstoffe. Erste Ansätze für die numerische Modellierung von z.B. Glaswolle wurden in den 1950er Jahren entwickelt [13]. Diese Ansätze wurden Anfang der 1990er Jahre stark weiterentwickelt [14] [15]. Heutzutage ist das Feld für die numerische Modellierung von Glaswolle vor allem durch die Arbeiten von Allard und Atalla sehr gut erschlossen [16].

Im Gegensatz dazu sind die technischen Anwendungsbereiche von naturfaserverstärkten Kunststoffen, auf deren Basis ein neuartiges Konzept entwickelt werden soll, noch begrenzt. Die Materialien sind hochporöse, feste Materialien, die sich durch den geringen Anteil von Feststoff (Verstärkungs- und Matrixfasern) am Gesamtvolumen auszeichnen. Durch diese Eigenschaft eignen sie sich sehr gut als thermische Isolatoren und akustische Dämmmaterialien. Das mechanische Verhalten (Festigkeit und Elastizität) beschränkte jedoch lange die technische Nutzbarkeit.

Die sehr guten akustischen Eigenschaften von naturfaserverstärkten Kunststoffen, die sie für den Einsatz als Schalldämmmaterial interessant machen, werden erst seit kurzem genauer untersucht. Die numerische Betrachtung der akustischen Eigenschaften sollte mit dem Biot-Modell gut darstellbar sein [2]. Sie liefert eine homogene Beschreibung eines heterogenen Problems. Dabei beschreibt sie ein poröses Material als Wechselwirkung von einer festen Struktur mit einem gesättigten Fluid wie z.B. Luft (vgl. Abbildung 2).

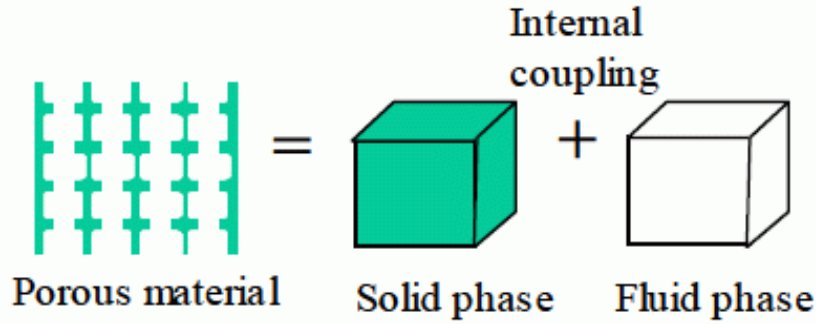


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Biot-Modells eines porösen Materials

Sogenannte geschlossene Poren, die vollständig von der Struktur umschlossen sind, werden durch lokal veränderte Materialeigenschaften der Struktur beschrieben. Offene Poren beschreiben die Fluid-Struktur-Kopplung, die durch Prozesse wie Dissipation beeinflusst wird. Eine Weiterentwicklung dieser gekoppelten Betrachtung ist in [17] dargelegt. Die zu lösenden Gleichungen sind durch die Strukturverschiebungen u^s und den akustischen Drücken im Fluid p beschrieben:

$$\operatorname{div} \hat{\sigma}^s(\mathbf{u}^s) + \tilde{\rho} \omega^2 \mathbf{u}^s + \tilde{\gamma} \nabla p = 0$$

$$\Delta p + \frac{\tilde{\rho}_f}{\tilde{R}} \omega^2 p - \frac{\tilde{\rho}_f}{\phi^2} \tilde{\gamma} \omega^2 \operatorname{div} \mathbf{u}^s = 0 \quad (1)$$

Hierbei ist $\hat{\sigma}^s$ der Spannungstensor, $\tilde{\rho}$ die effektive Dichte, ω die Kreisfrequenz, $\tilde{\gamma}$ ein Kopplungsterm zwischen fester und flüssiger Phase, $\tilde{\rho}_f$ die Dichte des Fluids, \tilde{R} das effektive Kompressionsmodul und ϕ die Porosität. Dieses Materialmodell enthält die sogenannten Biot-Parameter, die die Schallausbreitung beeinflussen. Aus (1) ist eine Abhängigkeit von der Porosität und den mechanischen Eigenschaften wie dem Kompressionsmodul und den Dichten direkt ersichtlich. Weitere Biot-Parameter sind die Porenabmessungen thermische und viskose Länge Λ und Λ' , der Luftströmungswiderstand σ und die Gewundenheit α .

Diese Parameter sind, abgesehen vom Luftströmungswiderstand, schwer zu messen. Daher werden vielfach semi-phänomenologische Modelle wie das Johnson-Champoux-Allard Modell [14, 15] verwendet, das aus diesen Parametern die effektive Dichte und ein effektives Kompressionsmodul wie folgt ermittelt:

$$\tilde{\rho}(\omega) = \rho_0 \left[\alpha + \frac{\sigma \phi}{j \omega \rho_0} \sqrt{1 + j \frac{4 \alpha^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma^2 \Lambda^2 \phi^2}} \right]$$

$$\tilde{R}(\omega) = \frac{R}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 - j \frac{8 \eta}{\Lambda'^2 \rho_0 \omega \operatorname{Pr}} \sqrt{1 + j \frac{\Lambda'^2 \rho_0 \omega \operatorname{Pr}}{16 \eta}} \right]^{-1}} \quad (2)$$

mit ρ_0 der Dichte des Festkörpers, η der dynamischen Viskosität, γ der spezifischen Wärmekapazität und Pr der Prandtl Zahl.

Dieses Modell wurde für die numerische Beschreibung naturfaserverstärkter Kunststoffe validiert. Die zu validierende Größe ist der Absorptionsgrad, der mithilfe von Impedanzrohrmessungen ermittelt wurde (Versuchsaufbau erläutert im Abschnitt zu AP 5.1).

Dazu wurden Messungen von Materialparametern wie dem Strömungswiderstand beim Projektpartner FIBRE durchgeführt. Die Porosität ϕ kann mit folgender Formel abgeschätzt werden:

$$\rho_{\text{Festkörper}} = \phi * \rho_{\text{Luft}} + (1 - \phi) * \rho_{\text{Fasern}}. \quad (3)$$

Dabei setzt sich ρ_{Fasern} zusammen aus den Dichten von PLA, Flachs und Baumwolle und den entsprechenden Mischungsverhältnissen. Die Parameter Gewundenheit, viskose und thermische Länge können nicht gemessen werden und wurden daher mithilfe einer inversen Charakterisierung ermittelt.

Für die inverse Charakterisierung wurde das Johnson-Champoux-Allard Modell (2) verwendet, das die Oberflächenimpedanz einer porösen Probe in einem schallharten Impedanzrohr mit schallhartem Abschluss beschreibt. Dabei ergibt sich die Oberflächenimpedanz \tilde{Z}_s aus einer effektiven Dichte $\tilde{\rho}$ und einem effektivem Kompressionsmodul \tilde{K} , die von den Biot-Parametern (Strömungswiderstand σ , Porosität ϕ , Gewundenheit α_∞ , thermische Länge Λ' und viskose Länge Λ) abhängen:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_s &= -j \frac{\bar{Z}_c}{\Phi Z_0} \cot(\tilde{k} * L) \\ \bar{Z}_c &= \sqrt{(\tilde{\rho} * \tilde{K})} \\ \tilde{k} &= \omega \sqrt{\frac{\tilde{\rho}}{\tilde{K}}}\end{aligned}\quad (4)$$

Dabei ist Z_0 die charakteristische Impedanz, ω die Kreisfrequenz und L die Dicke der Probe.

Aus der Impedanz kann der Reflektionsfaktor r und der Absorptionsgrad α wie folgt bestimmt werden:

$$r = \frac{1 + \bar{Z}_s}{1 - \bar{Z}_s}, \quad \alpha = 1 - |r|^2. \quad (5)$$

Der berechnete Absorptionsgrad α_B kann mit dem gemessenen α_M verglichen werden. Dazu wird eine Kostenfunktion aufgestellt:

$$R(\vec{x}) = \frac{1}{2} * \sum_i |\alpha_{B,i}(\vec{x}) - \alpha_{M,i}|^2 \quad (6)$$

wobei \vec{x} den Vektor an Biot-Parametern beschreibt und i die Summe über mehrere Frequenzpunkte darstellt. Die Minimierung der Kostenfunktion wird mithilfe von Optimierungsalgorithmen durchgeführt (s. AP 4.2). Das ermittelte Minimum ergibt die gesuchten Biot-Parameter zu einer Probe. Dies wurde zunächst beispielhaft für eine Probe durchgeführt. Daraus ergaben sich folgende Biot-Parameter:

Tabelle 1: Biot Parameter von Material 1 zur Validierung

Material	Dicke [mm]	Strömungs-widerstand [N s/m ⁴]	Porosität [-]	Gewundenheit [-]	Viskose Länge [μm]	Thermische Länge [μm]
1	1,4	1,9	0,58	1.0	1.0	89

Zur Validierung wurden Simulationsmodelle aufgebaut, die die Impedanzrohrmessung nachbilden. Aufgebaut wurde ein Finite-Elemente-Modell (FEM), bei dem das Rohr selber und die Probe mit diskreten Elementen dargestellt werden. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 3 dargestellt.

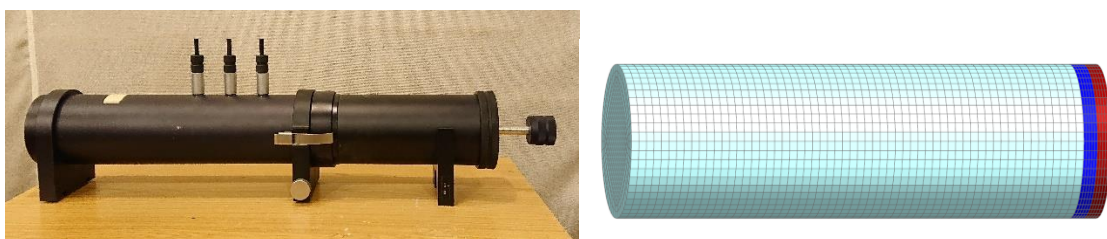


Abbildung 3: Impedanzrohr Messung (links) und Simulationsmodell (rechts)

Die ermittelten Biot-Parameter wurden in das Simulationsmodell eingesetzt. Daraus ergibt sich der in Abbildung 4 dargestellte Absorptionsgrad. Zu erkennen ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulationsmodell und Messung. Damit kann die Methode der inversen Charakterisierung der Biot-Parameter und das Simulationsmodell als validiert angenommen werden.

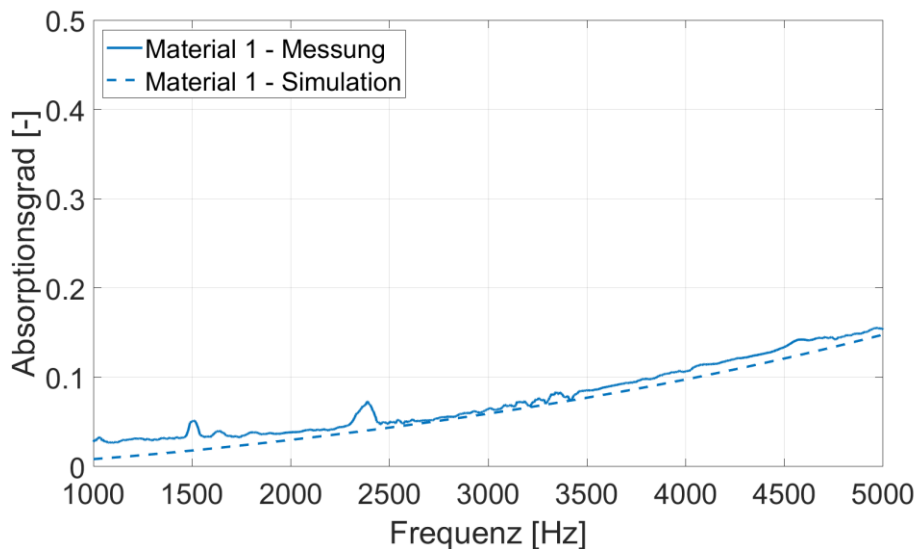


Abbildung 4: Absorptionsgrad von Material 1 gemessen und simuliert

Arbeitspaket 4.2: Entwicklung von Optimierungsverfahren zur Verbesserung der akustischen Materialeigenschaften

Da die Herstellung der naturfaserverstärkten Kunststoffe sehr zeitaufwendig ist, sollte die Materialoptimierung mithilfe einer simulationsgestützten Optimierung erfolgen. Das Feld der Optimierung bietet dabei viele Möglichkeiten. Je nach Anwendungsfall bieten sich verschiedene Optionen an.

Optimierungsprobleme lassen sich allgemein in globale und lokale Probleme unterteilen, bei denen Kriterien f in Abhängigkeit von Parameterkombinationen $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ entweder minimiert oder maximiert werden sollen. Wird exemplarisch ein einzelnes Kriterium f in Abhängigkeit von zwei unabhängigen Parametern x_1 und x_2 betrachtet, kann der Verlauf dieser zweidimensionalen Funktion als Gütegebirge mit lokalen und globalen Minima und Maxima veranschaulicht werden. Falls nur eine einzelne Zielfunktion f optimiert werden soll, entsprechen die optimalen Parameterkombinationen je nach Aufgabenstellung gerade dem Minimum oder Maximum dieser Funktion [3] [4]. Die Parameter der Optimierung entsprechen den gesuchten Modellierungsparametern der NFK.

Globale Optimierungsalgorithmen können grundsätzlich in deterministische und probabilistische Ansätze unterteilt werden. Deterministische Algorithmen werden üblicherweise dann verwendet, wenn eine deutliche, bekannte Abhängigkeit zwischen den einzelnen Parametern x_i und den resultierenden Lösungen der vielfachen Zielfunktionen besteht. Auf Grund der genauen Kenntnis des zugrundeliegenden Problems ist in diesem Fall eine effiziente Suche z. B. mit den deterministischen Ansätzen möglich [18]. Falls die Abhängigkeiten eines Optimierungsproblems unbekannt sind, diese eine zu hohe Komplexität aufweisen oder die Dimensionalität des Problemraums sehr groß ist, kann ein deterministischer Ansatz zu einer vollständigen Suche führen. Eine Lösung ist dann aber meist schon bei verhältnismäßig einfachen Problemen numerisch sehr aufwändig oder sogar unmöglich, da die Rechenzeit polynomial mit der Größe des Problemraums ansteigt. In diesen Fällen eignen sich insbesondere probabilistische Ansätze, die dem Monte-Carlo-Prinzip (MC) folgen [5]. MC-Methoden basieren allgemein auf sehr häufig durchgeführten Zufallsexperimenten, deren Ergebnisse mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie numerisch gelöst werden. Die einzelnen Suchschritte probabilistischer Algorithmen werden durch heuristische Funktionen [6] bestimmt, welche z. B. durch Auswertung der bisher berechneten Zielfunktionswerte entweder festlegen, welches Element x als nächstes verwendet wird, oder wie ein neues Element gebildet werden soll. Zu den bekanntesten Vertretern probabilistisch, heuristischer Algorithmen gehört die Klasse der Evolutionären Algorithmen (EA) [7]. Diese Verfahren führen die Elemente einer Lösungsmenge (genannt Population) durch iterative Anwendung von Reproduktions- und Selektionsoperatoren, welche das Verhalten der biologischen Evolution imitieren, sukzessive an die Optima heran [8] [9] [10]. Für dieses Projekt wurde die Partikelschwarmoptimierung verwendet.

Zu Beginn einer Optimierung muss die Zielgröße festgelegt werden. In diesem Fall soll der Absorptionsgrad verwendet werden, da dieser mit den Formeln, die in AP 4.1 erläutert wurden, analytisch mit minimalem Zeitaufwand abgeschätzt werden kann. Dabei kann eine gewünschte Zielkurve verwendet werden. Diese kann im Vergleich zu einer gemessenen Probe z.B. eine erhöhte Absorption im gesamten Frequenzbereich oder aber eine größere Erhöhung der Absorption lediglich im unteren Frequenzbereich aufweisen.

Außerdem müssen die Parameter definiert werden, die variiert werden können. In diesem Fall bieten sich die oben genannten Biot-Parameter an. Für jeden Parameter muss vorgegeben werden in welchem Größenbereich er variiert werden kann. Hierbei sollte z.B. darauf geachtet werden, dass keine Porengrößen rechnerisch betrachtet werden, die mit dem verwendeten Herstellungsverfahren gar nicht erreicht werden können.

Mit der definierten Zielfunktion und den vorgegebenen Bereichen der zu variiierenden Parameter kann erneut eine Kostenfunktion aufgestellt werden, die zu minimieren ist. Daraus ergibt sich eine mehrdimensionale Antwortfläche, die verschiedene lokale und im Idealfall nur ein globales Minimum aufweist.

Um das globale Minimum zu ermitteln, wird die Partikelschwarmoptimierung [19] verwendet. Diese stellt explizit eine globale Minimierungsmethode dar, bei der nicht versehentlich lokale Minima gefunden werden. Dabei wird zu Beginn eine definierte Anzahl an Auswertepunkten, den Partikeln, gleichmäßig auf der Antwortfläche verteilt und jedem Partikel eine zufällige Geschwindigkeit zugewiesen. Für alle Partikel wird die Funktion der Antwortfläche an ihrer jeweiligen Stelle ausgewertet. Die nächste Position jedes Partikels wird abhängig von seiner Richtung, seiner eigenen besten Position und der Position des besten Teilchens ermittelt. So nähern sich alle Partikel schrittweise aneinander an. Das Minimum ist gefunden, wenn alle Partikel nur noch einen Abstand voneinander innerhalb einer vorgegebenen Toleranz aufweisen. Hinzugefügt wurde die Eigenschaft der Nachbarschaft. Die global beste Position ist hierbei nicht auf den gesamten Schwarm, sondern nur auf die beste Position einer definierten Anzahl an nächsten Nachbarn eines Partikels bezogen. So können sich auf einer Fläche mit mehreren Minima die Partikel in mehrere Gruppen aufteilen. Damit wird verhindert, dass bei mehreren Minima die gesamte Gruppe zu früh in einem lokalen Minimum endet. Ein Beispiel auf einer zweidimensionalen Antwortfläche ist in Abbildung 5 dargestellt.

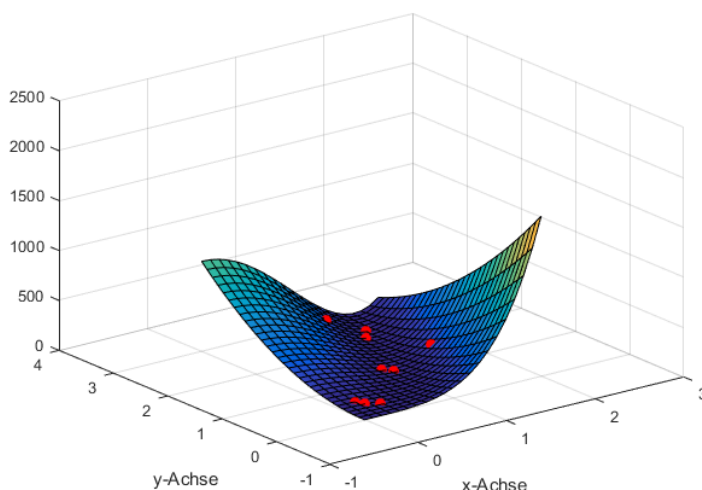


Abbildung 5: Partikelschwarmoptimierung schematisch auf einer zweidimensionalen Antwortfläche.

Das Ergebnis einer solchen Optimierung bildet einen neuen Satz an Biot-Parametern, die mit den Parametern des gemessenen Materials verglichen werden können. Dabei kann ein Verständnis dafür entwickelt werden, welche Parameter entscheidend für die Akustik sind und welche sich nicht ändern.

Arbeitspaket 5.1: Messtechnische Untersuchung des Materials

Für die akustische Charakterisierung der Materialien wurden Absorptionsmessungen mit einem Impedanzrohr durchgeführt. Dabei wurde die Absorption nach der Methode der Übertragungsfunktion (angelehnt an DIN EN ISO 10543-2:2001-10) ermittelt. Dabei wird über einen Lautsprecher weißes Rauschen im Bereich von 500 – 6000 Hz angeregt. Die akustische Welle wird teilweise an der Probe reflektiert. Hinter der Probe befindet sich eine schallharte Wand. Zwei Mikrofone messen den Schalldruck, so dass das im Rohr entstehende Schallfeld durch die Überlagerung von einlaufender und reflektierter Welle zerlegt werden kann. Hieraus kann der Absorptionskoeffizient berechnet werden. Zur Überprüfung des Messaufbaus diente ein Kalibrierschaum, für den der Hersteller eine Absorptionskurve angibt.

Charakterisierung des Messaufbaus

Erste Testmessungen zeigten, dass naturfaserverstärkte Kunststoffe hohe Streuungen bei den Messergebnissen hervorrufen können. Bevor die Proben des Projektes untersucht wurden, wurde daher zunächst der Messaufbau charakterisiert. Dabei wurde im ersten Schritt eine Kalibrierprobe verwendet, von der die Ergebnisse bekannt sind. So kann der Aufbau überprüft werden und Unterschiede auf das generelle

Setup zurückgeführt werden. Im zweiten Schritt wurde eine Probe aus dem Projekt AirCOmp untersucht. Dabei wurden verschiedenste Wiederholungen durchgeführt und die Abweichungen betrachtet. Unterschiede, die hierbei auftauchen und im ersten Schritt nicht erkennbar sind, können auf die Probe zurückgeführt werden.

Mit dem vorhandenen Impedanzrohr (Type 4206 Brüel & Kjaer) kann der Frequenzbereich 100 – 6300 Hz gemessen werden. Da die Wellenlänge sich mit der Frequenz verändert, sind für verschiedene Frequenzbereiche verschiedene Rohrdurchmesser notwendig. Für den unteren Frequenzbereich bis 1600 Hz wird ein Rohrdurchmesser von 100 mm verwendet, für den hohen Frequenzbereich ab 500 Hz ein Durchmesser von 29 mm. Für die Kalibrierprobe werden beide Rohrdurchmesser betrachtet. In Abbildung 6 ist der Aufbau dargestellt.

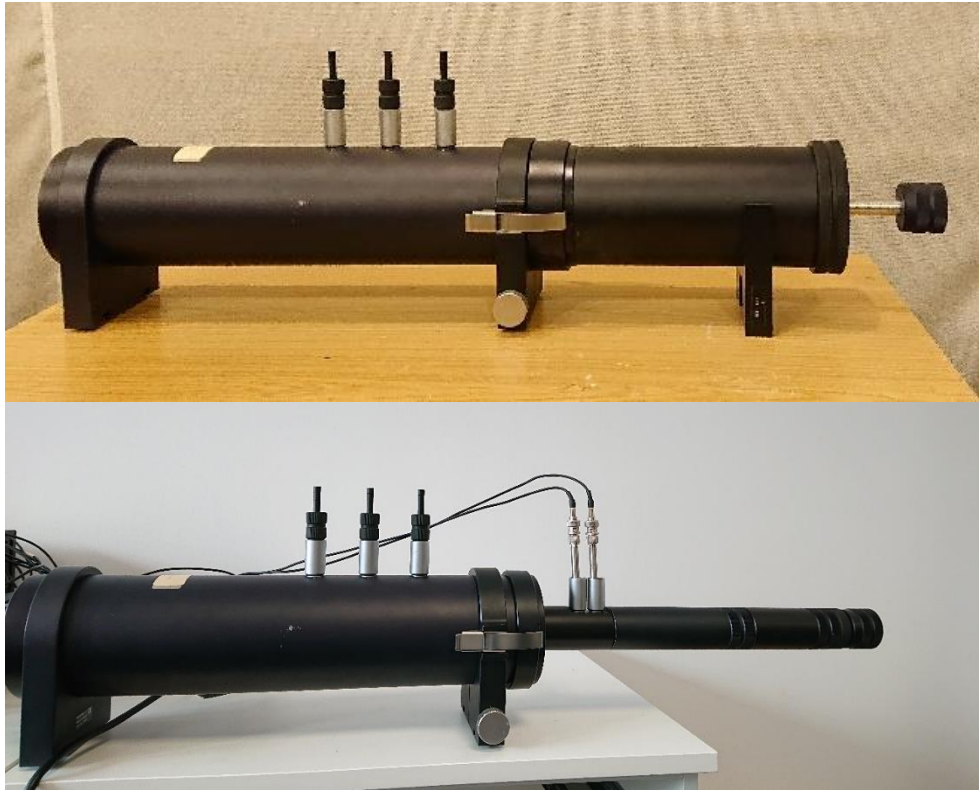


Abbildung 6: Impedanzrohr Messung 100 – 1600 Hz (oben) und 500 – 6300 Hz (unten)

1. Kalibrierprobe

Die Kalibrierprobe ist ein einfacher Schaumstoff. Sie ist exakt auf den Rohrdurchmesser zugeschnitten und schließt vollständig mit der Wand des Impedanzrohres ab. Ein Foto ist in Abbildung 7 dargestellt und ein Abgleich mit den vom Hersteller des Impedanzrohr angegebenen Absorptionskoeffizienten in Abbildung 8. Der Messaufbau kann anhand des Abgleiches mit der Referenzkurve als validiert angesehen werden.

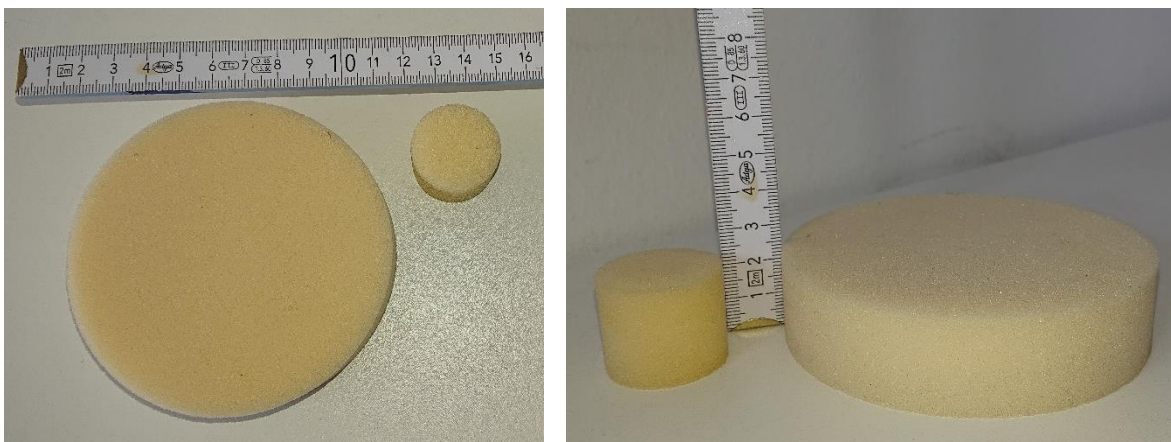


Abbildung 7: Kalibrierprobe für beide Rohrdurchmesser

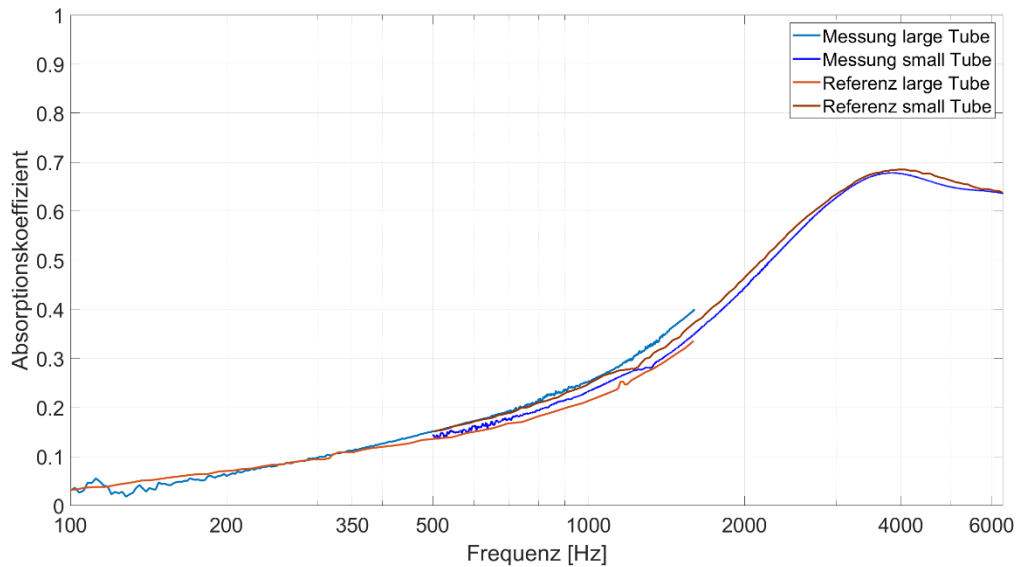


Abbildung 8: Validierung des Messsetups mit der Kalibrierprobe

Überprüft wurde anschließend der Einfluss der Mikrofone und des Einbaus der Probe auf das Messergebnis. Dazu wurden zunächst bei konstant eingesetzter Probe mehrfach die Mikrofone neu eingesetzt und die Messung wiederholt und anschließend bei einer Mikrofonposition die Probe mehrfach neu eingesetzt.

Die Ergebnisse für die neu eingesetzten Mikrofone sind in Abbildung 9 dargestellt, die für die neu eingesetzte Probe in Abbildung 10.

Diese Tests zeigen, dass bei wiederholten Messungen immer die gleichen Ergebnisse erzeugt werden. Im unteren Frequenzbereich beider Messrohre rauschen die Messergebnisse leicht, was auf niedrige Absorptionswerte zurückzuführen sein kann. Lediglich im hohen Frequenzbereich ab 5500 Hz divergieren die einzelnen Messungen um ca. 7 %.

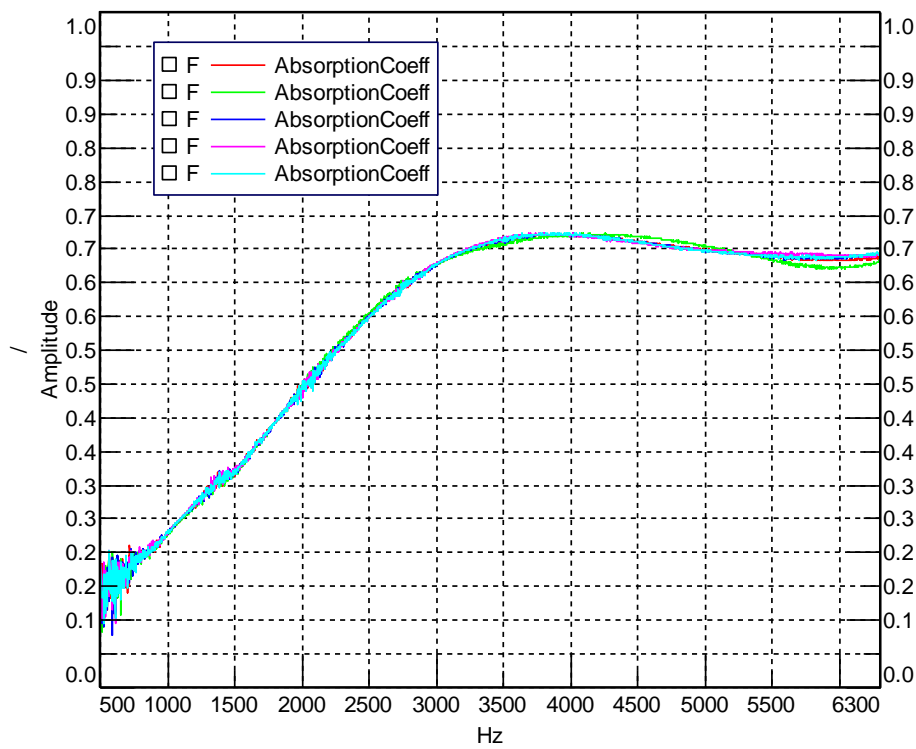
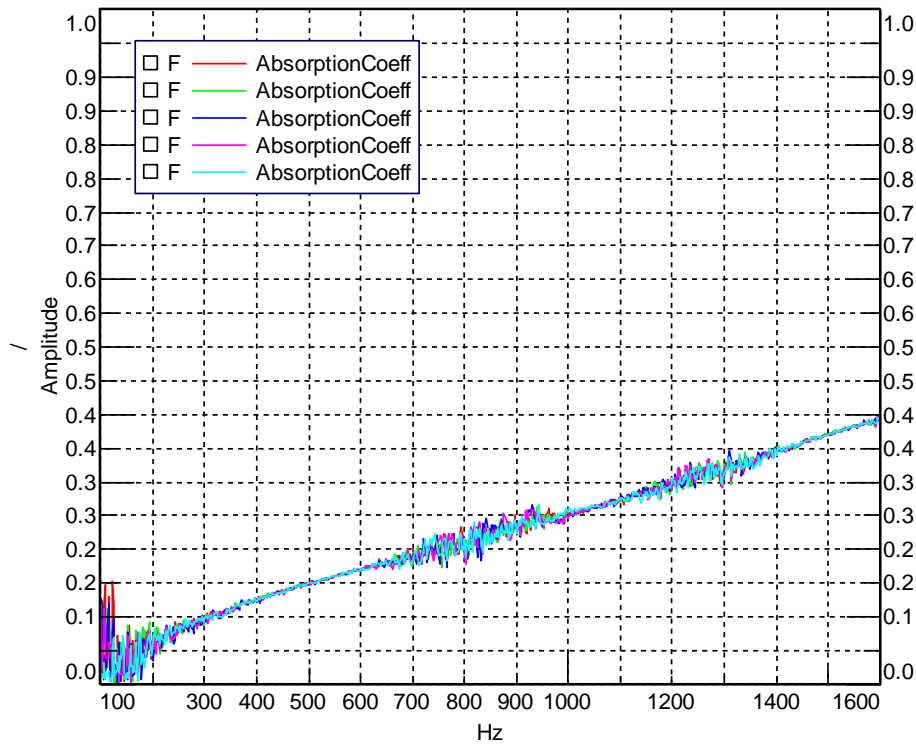


Abbildung 9: Absorptionskoeffizient der Kalibrierprobe bei mehrmaligen einsetzen der Mikrofone.
 Oben: Unterer Frequenzbereich, unten: Oberer Frequenzbereich.

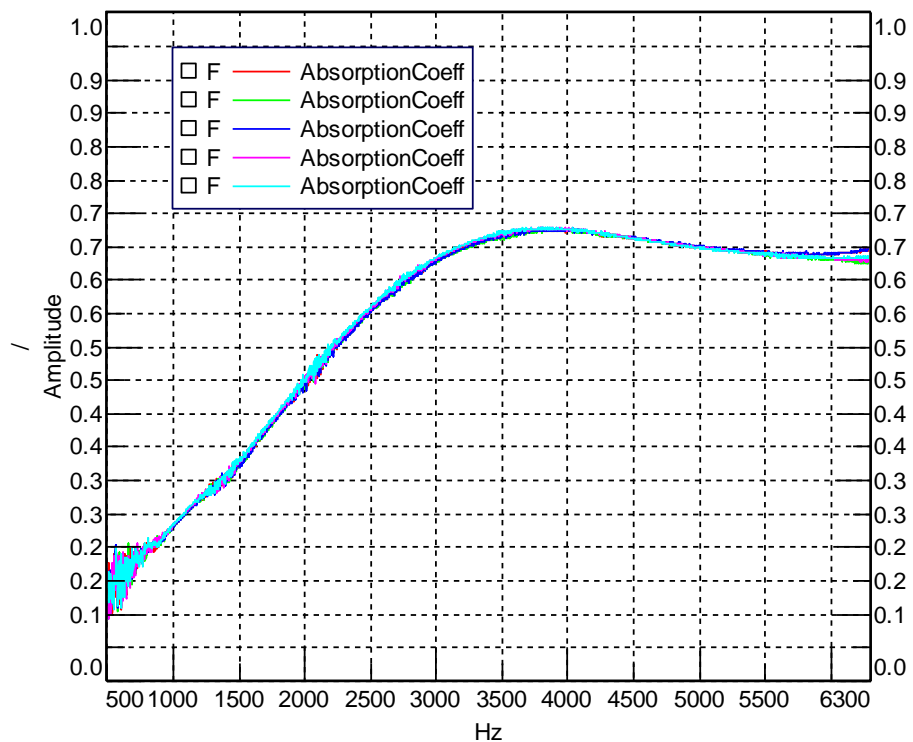
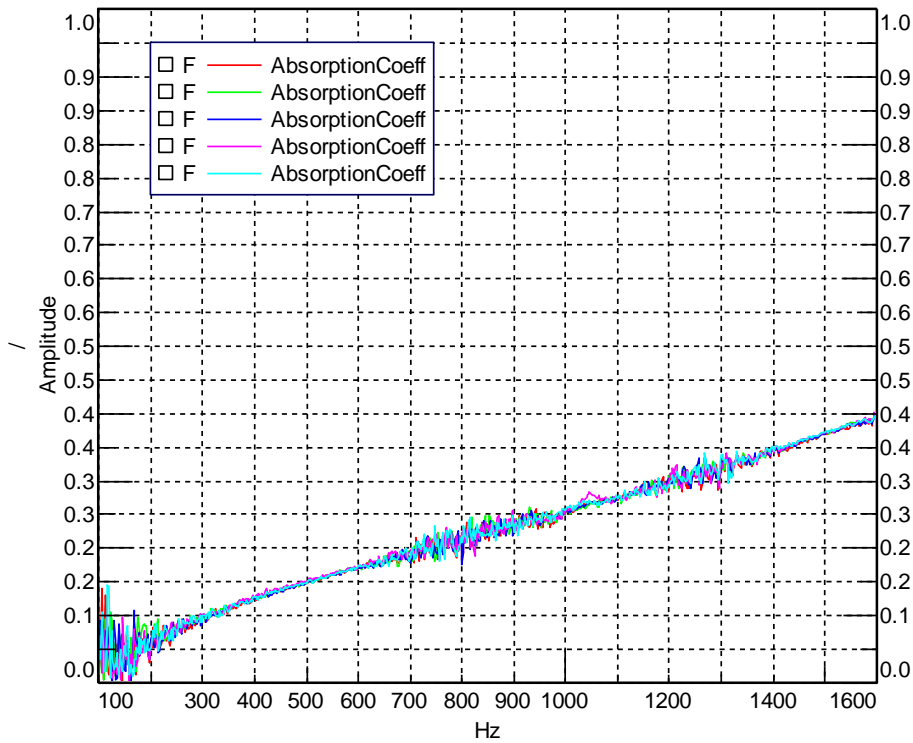


Abbildung 10: Absorptionskoeffizient der Kalibrierprobe bei mehrmaligen einsetzen der Probe.
 Oben: Unterer Frequenzbereich, unten: Oberer Frequenzbereich.

2. Naturfaserverstärkter Kunststoff

Für die Probe aus naturfaserverstärktem Kunststoff wurde das Material 6 (25% Flachs, 25% Langstapelfasern) ausgewählt (Probe: 6_2 Unten). Die auffälligsten Unterschiede zum zuvor untersuchten Schaumstoff sind die hohe Steifigkeit und die geringe Dicke des Materials.

Steife Proben werden für eine Impedanzrohrmessung mit leichtem Untermaß zugeschnitten, damit sie im Einbau nicht komprimiert werden. Eine Komprimierung verändert die akustischen Eigenschaften eines Materials und ist daher bei der Messung zu verhindern. Die Steifigkeit der Materialien erschwerte das gleichmäßige Ausschneiden der Proben. Sie sind fast alle nicht perfekt rund und werden an einzelnen Stellen eventuell doch komprimiert. Daher wurde die Probe zunächst immer in der gleichen Orientierung eingesetzt.

Da der Absorptionskoeffizient um 500 Hz noch sehr gering ist ($\sim 0,04$) wurden die Messungen ausschließlich für den höheren Frequenzbereich (Impedanzrohr mit kleinerem Durchmesser) durchgeführt. Zunächst wurden die gleichen Tests durchgeführt wie für den Kalibrierschaum. Das erneute Einsetzen der Mikrofone ist in Abbildung 11 dargestellt und das erneute Einsetzen der Probe in Abbildung 12. Aufgrund der deutlich geringeren Absorptionskoeffizienten wird die y-Achse nur in einem Bereich von 0 – 0,3 dargestellt.

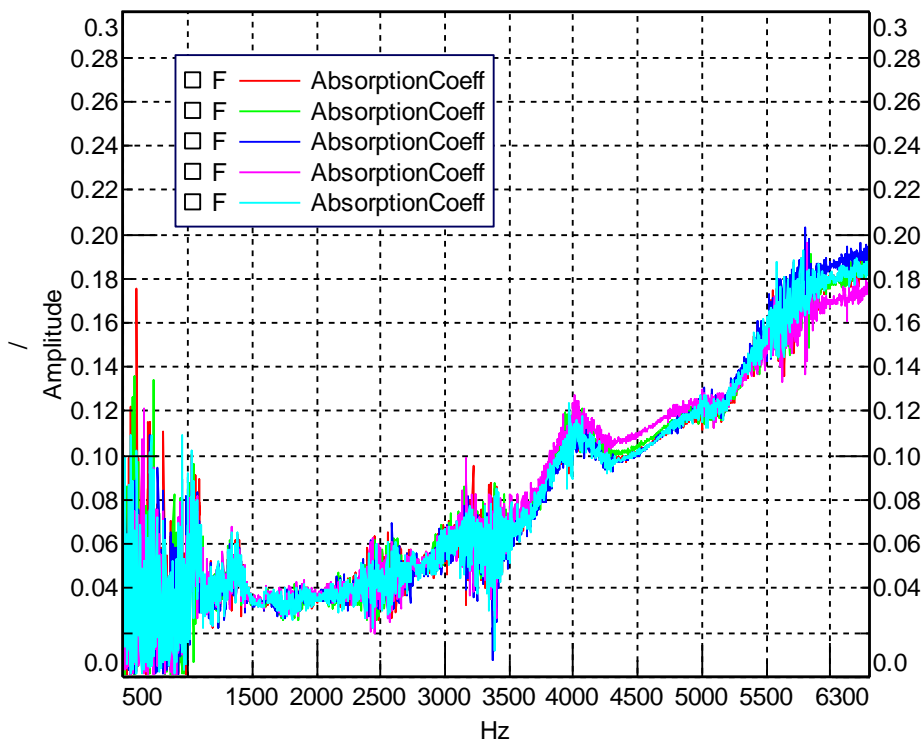


Abbildung 11: Absorptionskoeffizient der AirComp-Probe bei mehrmaligen einsetzen der Mikrofone.

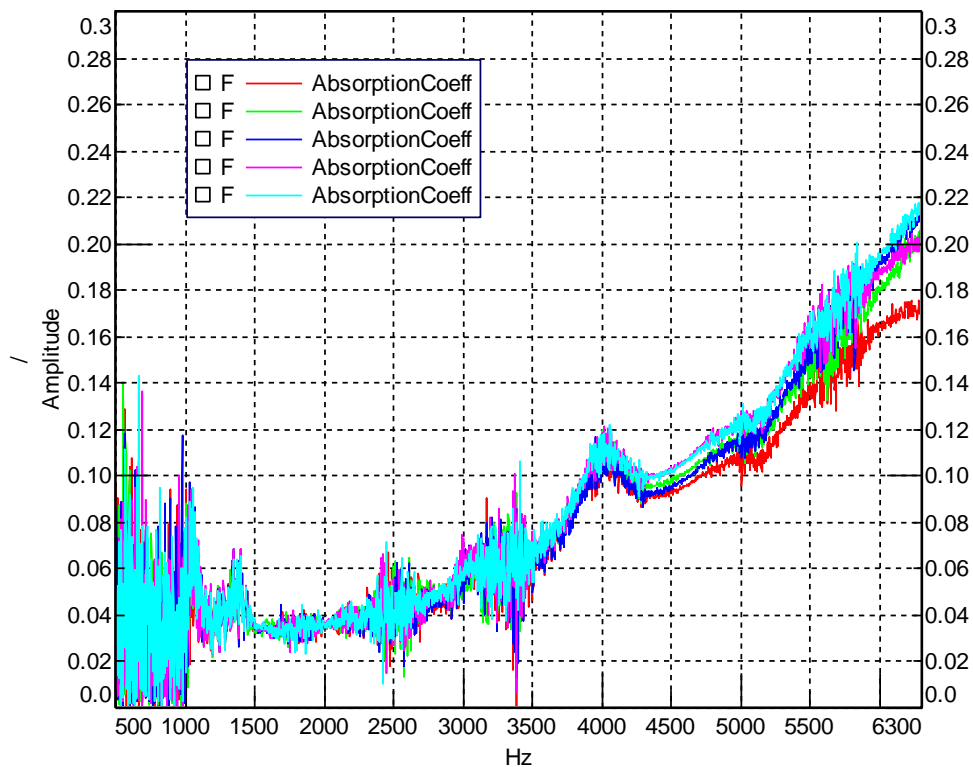


Abbildung 12: Absorptionskoeffizient der AirComp-Probe bei mehrmaligen einsetzen der Probe.

Wie auch schon beim Schaumstoff ist im unteren Frequenzbereich ein Rauschen des Signals zu erkennen. Der Wertebereich, in dem das Rauschen liegt, ist mit 0,1 vergleichbar mit dem des Schaumstoffes. Allerdings ist es hier bis 1000 Hz sichtbar. Von 1000 – 4000 Hz zeigen alle Messungen eine gute Wiederholbarkeit. Oberhalb von 4000 Hz variieren die Ergebnisse beim erneuten Einsetzen der Mikrofone um bis zu 10 % und

beim erneuten Einsetzen der Probe bis zu 25%. Die absolute Streuung von max. 0,05 ist sehr gering, die relative Abweichung hingegen sollte beachtet werden.

Für eine wiederholbare Impedanzrohr Messung ist es wichtig, dass die Probe glatt an der schallharten Rückwand anliegt und an der vorderen Seite bündig mit dem Rohr abschließt. Da die naturfaserverstärkten Kunststoffe sehr dünn sind, führen kleine Abweichungen bei der Positionierung der Probe möglicherweise zu größeren Messabweichungen. Um dies zu überprüfen, wurde die Probe bewusst 1 mm näher zu den Mikrofonen und 1 mm weiter weg von den Mikrofonen positioniert. Die Platzierung ist in Abbildung 13 gezeigt und die Ergebnisse sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.



Abbildung 13: Platzierung der Probe im Impedanzrohr. Links: 1 mm zurück, Mitte: richtige Position, Rechts: 1 mm vor.

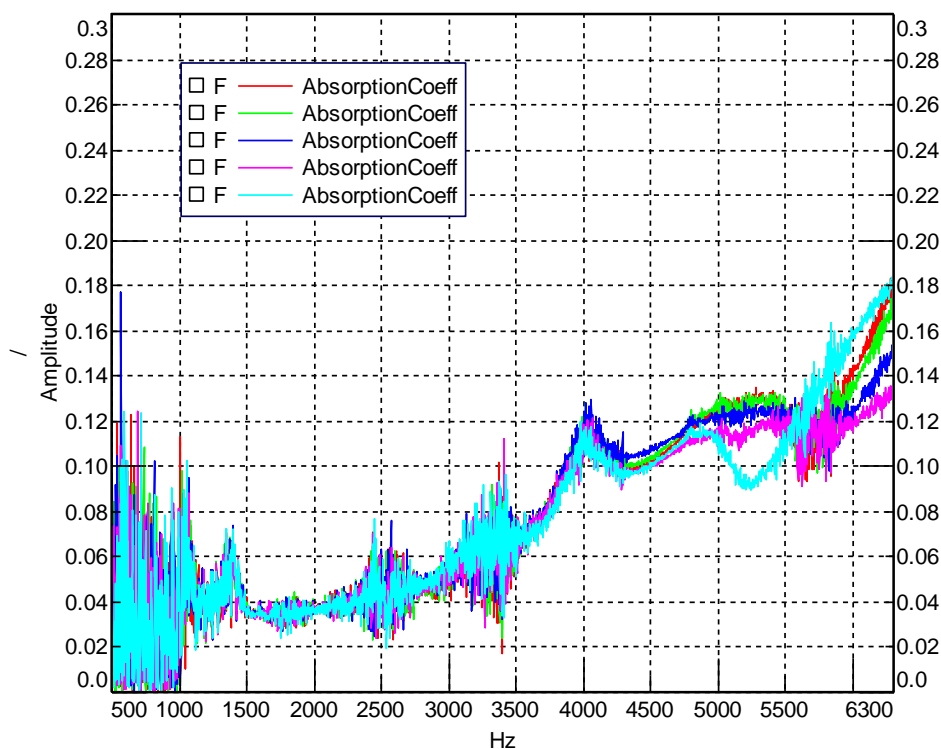


Abbildung 14: Absorptionskoeffizient der AirComp-Probe bei mehrmaligen einsetzen der Probe 1 mm näher am Mikrofon.

Auch bei diesen Untersuchungen zeigt sich eine gute Übereinstimmung bis 4000 Hz, auch im Vergleich zu den Tests mit der korrekten Positionierung. Oberhalb von 4000 Hz erhöht sich die Streuung der Ergebnisse zu den vorherigen Untersuchungen. Insbesondere ändert sich teilweise auch die Charakteristik der Kurve. Es ist daher für die Impedanzrohrmessung von naturfaserverstärkten Kunststoffen sehr wichtig, dass diese bündig mit dem Rohr abschließen.

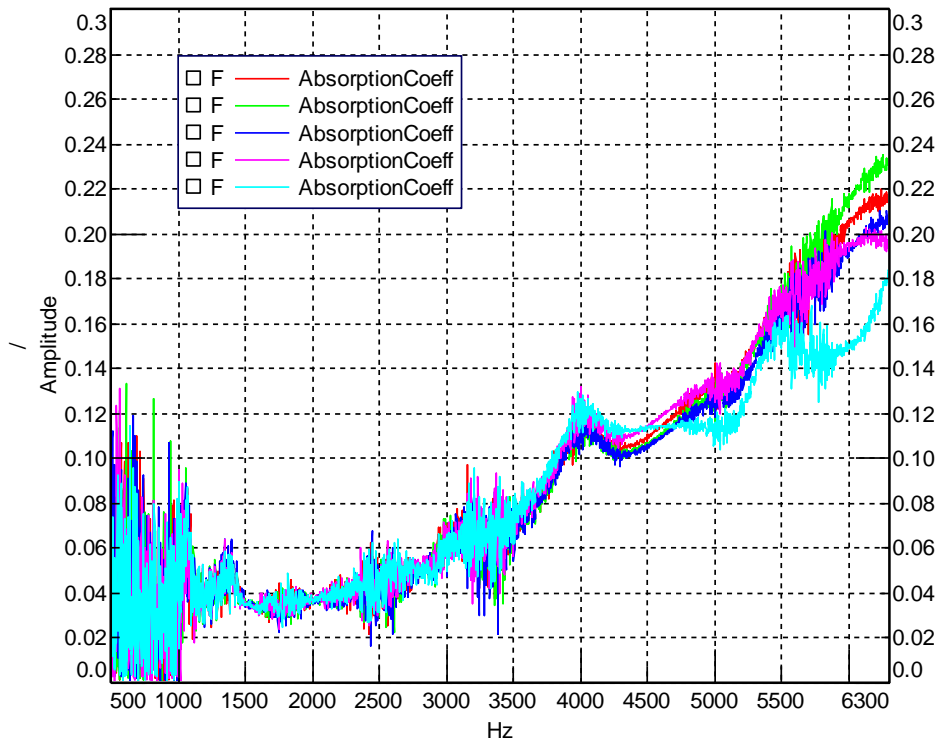


Abbildung 15: Absorptionskoeffizient der AirComp-Probe bei mehrmaligem Einsetzen der Probe 1 mm weiter weg vom Mikrofon.

Abschließend wurde die Probe in 90° Schritten rotiert eingesetzt, um Abweichungen durch die nicht sauber ausgeschnittenen Ränder der Probe zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 dargestellt. 0° stellt dabei die Position dar, die in den vorherigen Messungen verwendet wurde. Es zeigt sich hier erneut, dass oberhalb von 4000 Hz Abweichungen auftreten. Während 180° ein ähnliches Ergebnis wie 0° erzielt, zeigen 90° und 270° Abweichungen um 10%. Insgesamt ist die maximale Absorption bei 6300 Hz deutlich geringer als bei den vorherigen Messungen.

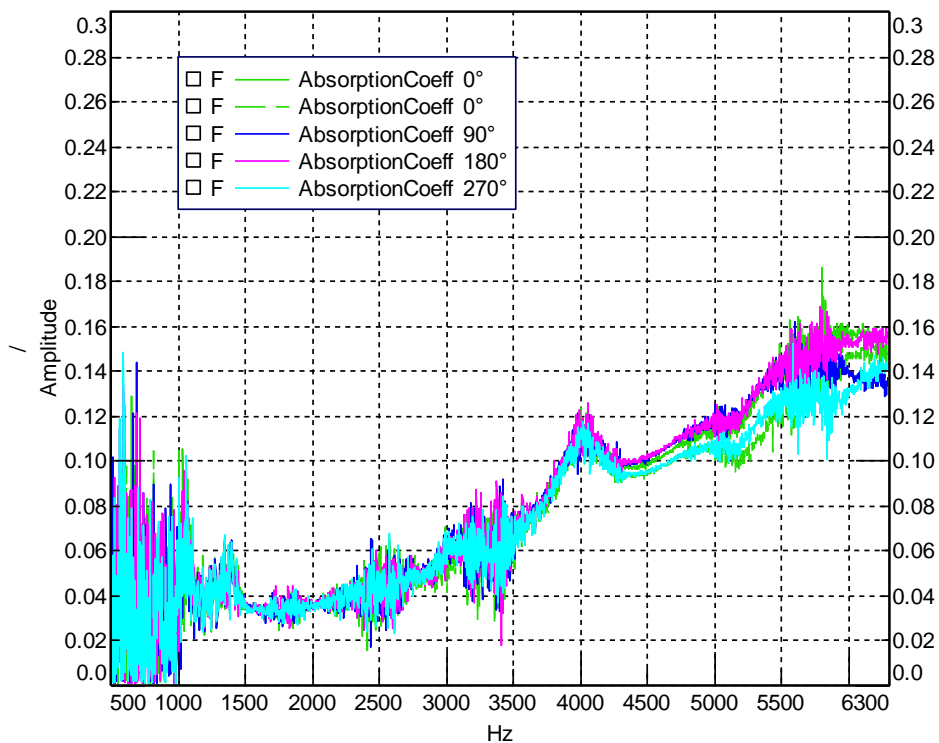


Abbildung 16: Absorptionskoeffizient der AirComp-Probe bei Rotation der Probe.

AirCOmp Proben

Nach der Charakterisierung des Versuchsaufbaus zur Impedanzrohrmessung mit naturfaserverstärkten Kunststoffen wurden zunächst alle Materialien, deren Lagen alle gleich aufgebaut sind (vgl. Abbildung 1 Material 1 bis 11 ohne 5 und 9), vermessen. Dabei wurden alle zuvor diskutierten Punkte zur wiederholbaren Messung berücksichtigt. Die Materialien 5 und 9 lagen zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht vor.

Verarbeitung der Messdaten

Zuvor wurde diskutiert, dass die Messergebnisse sehr sensitiv gegenüber der Positionierung der Probe sind. Daher wurde jede Probe mindestens drei Mal vermessen. Dabei wurde die Probe jeweils aus- und wieder eingebaut. Für jedes Material wurden mindestens zwei Proben untersucht, die jeweils aus einer anderen Matte ausgeschnitten wurden. Außerdem wurde die Vorder- und Rückseite jeder Probe vermessen. Die Messungen einer jeden Probe und Seite wurden gemittelt. Damit ergeben sich für jedes Material mindestens vier gemittelte Kurven (je zwei Matten und zwei Seiten). Für die Materialien 4 und 6 wurden aus zwei Matten jeweils 2 Proben untersucht, um die Streuung innerhalb einer Matte bewerten zu können.

Beispielhaft ist die Mittelung über mehrere Messungen an Material 1₁, was die erste Matte von Material 1 bezeichnet, in Abbildung 17 dargestellt. Für die Rückseite zeigen alle drei Messungen einen nahezu identischen Verlauf. Für jede Messung wurde die quadratische Abweichung vom Mittel aller Messungen bestimmt. Diese ist hier auch quantitativ mit 4% sehr gering. Die Vorderseite hingegen zeigt mit Abweichungen bis zu 13% eine größere Schwankungsbreite. Daher wurde in diesem Fall eine vierte Messung derselben Probe durchgeführt. Hier ist bereits die inhomogene Eigenschaft von Stoffen mit Naturfasern zu erkennen. Durch das Herstellungsverfahren wie es in diesem Projekt angewendet wird (siehe Bericht des Projektpartners FIBRE) entstehen unterschiedliche Vorder- und Rückseiten der Probe. Allein hierdurch können Unterschiede in den akustischen Eigenschaften von Proben des gleichen Materials begründet sein. Des Weiteren ist die Naturfaser nicht überall gleichmäßig verteilt. So ergeben sich Unterschiede innerhalb einer 30x30 cm großen Matte z.B. vom Rand zur Mitte oder von einer Matte zur nächsten.

Bei Impedanzrohrmessungen ist es entscheidend, dass die Probe genau die Größe des Rohres hat. Die hier diskutierten Proben sind sehr steif und daher schwierig exakt rund zuzuschneiden. Abweichungen können daher auch auftreten, wenn eine Probe beim Einbau im Rohr komprimiert wird.

In Abbildung 17 ist in Rot jeweils die Mittelung aller Messungen einer Probe dargestellt. Im Folgenden sollen die Proben untereinander verglichen werden, daher wird lediglich die gemittelte Kurve einer jeden Probe dargestellt. Die Abweichungen der verschiedenen Proben sind in Tabelle 2 aufgelistet.

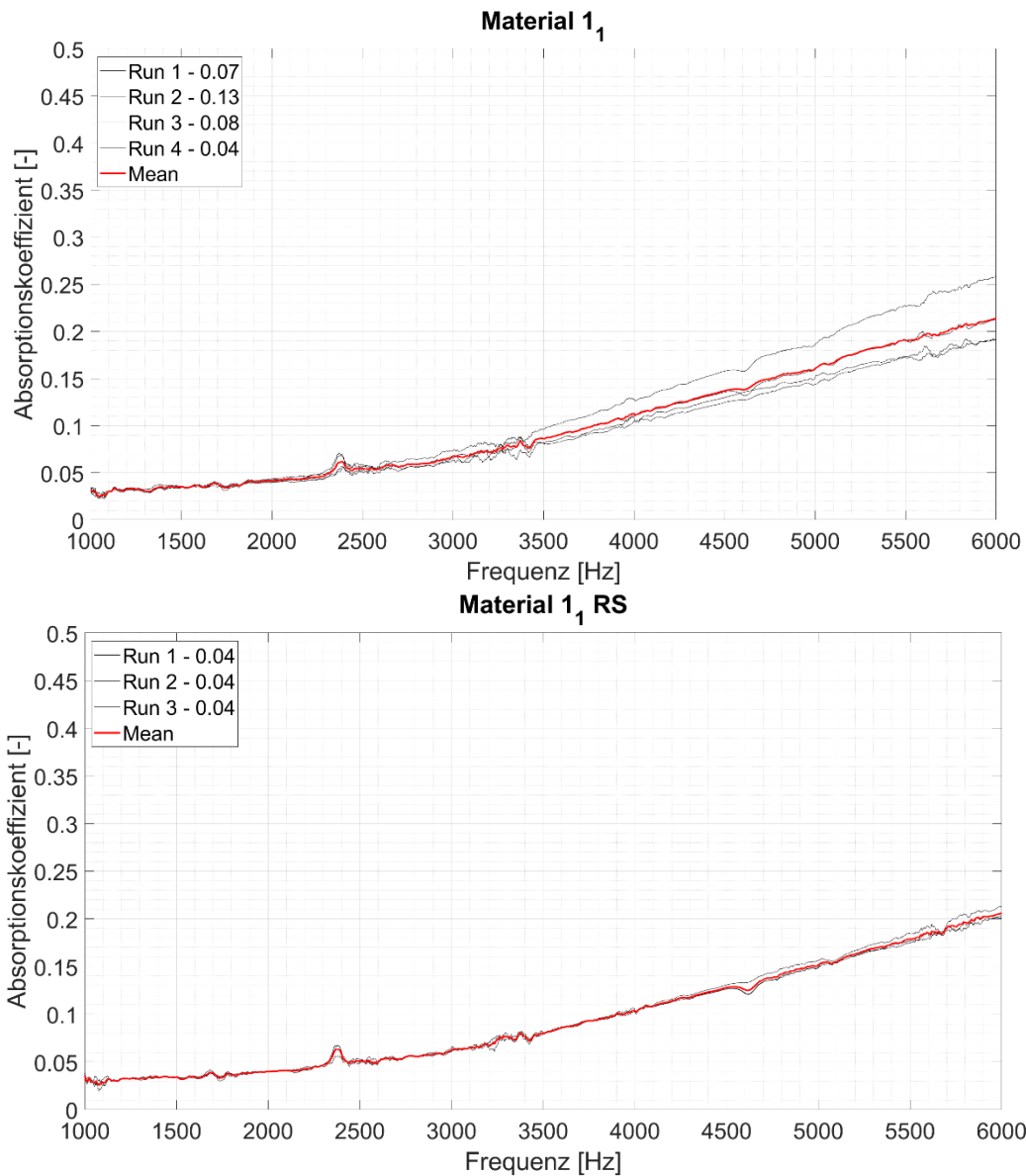


Abbildung 17: Alle Messungen des Absorptionsgrades und der resultierende Mittelwert von Probe 1₁.
Oben: Vorderseite, unten: Rückseite.

Beim Vergleich der Proben untereinander sind zwei Aspekte zu betrachten. Zum einen kann der Fokus auf den Anteil des Bindestoffes Polylactid (PLA) gelegt werden. Zum anderen kann der Fokus auf den verwendeten Naturfaserstoff, entweder Flachs, Kurz- oder Langstapelbaumwolle gelegt werden.

Zunächst wird der erste Fall diskutiert, um einen Überblick des Einflusses von Naturfasern auf die akustischen Materialeigenschaften zu bekommen.

Messbare Faktoren, die entscheidenden Einfluss auf die absorbierenden Eigenschaften eines Materials haben, sind die Steifigkeit und der Strömungswiderstand. Vom Projektpartner FIBRE wurde die Zugfestigkeit und der Strömungswiderstand gemessen. Die Ergebnisse werden zur Interpretation der akustischen Ergebnisse herangezogen und sind in

Tabelle 3 und Tabelle 4 am Ende des Abschnitts aufgelistet.

1. Anteil PLA

Im Folgenden werden Proben mit gleicher Naturfaser verglichen und der Einfluss vom Verhältnis der jeweiligen Fasern zu PLA dargestellt.

Baumwolle

Die Materialien 3, 8 und 11 bestehen lediglich aus PLA und Langstapelbaumwolle. Der Absorptionskoeffizient dieser Proben ist in Abbildung 18 dargestellt. Es ist jeweils eine Probe aus zwei Matten abgebildet. Zunächst wird nur die Vorderseite betrachtet.

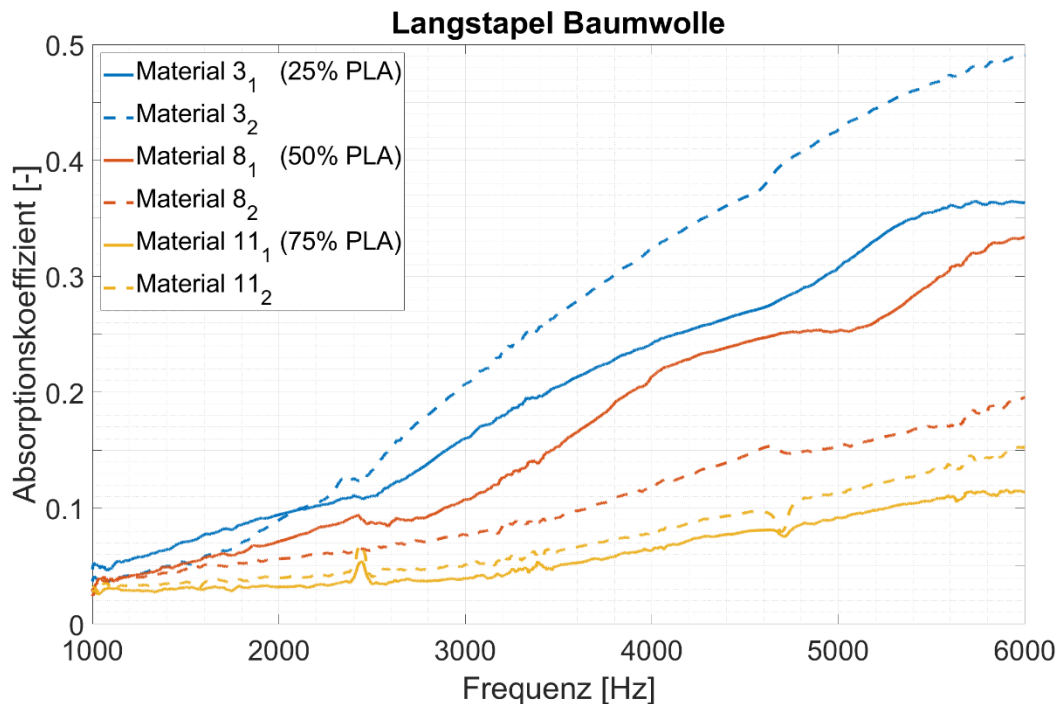


Abbildung 18: Akustischer Einfluss des Mischungsverhältnisses von PLA und Langstapelbaumwolle

Material 3 besteht zu lediglich 25% aus PLA und zeigt damit im Vergleich zu Material 8 aus 50% PLA und Material 11 aus 75% PLA eine höhere Absorption. Die Naturfasern erzeugen im Gegensatz zu reinem PLA ein poröseres Material. Solche Poren dämpfen Schallwellen, die in das Material eindringen wollen, sehr effektiv und haben einen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften des Materials.

Je höher der Baumwoll-Anteil, desto flexibler ist das Material. Material 3 kann noch sehr gut verbogen werden, während Material 11 deutlich steifer ist. Dies spiegelt sich auch in den gemessenen Zugfestigkeiten wider. Material 3 hat lediglich eine Zugfestigkeit von 11,2 MPa, Material 8 von 20,7 MPa und Material 11 von 30 MPa. Weiterhin führt der erhöhte Baumwoll-Anteil zu einer deutlich dickeren Probe. Die Matten von Material 3 sind ca. 1,6 mm dick wohingegen die von Material 11 nur 0,9 mm dick sind. Sowohl die Flexibilität und damit ein verringertes E-Modul als auch die Dicke der Probe führen zu der erhöhten Absorption von Material 3.

Es zeigt sich allerdings auch, dass solche inhomogenen Materialien eine hohe Streuung bei den akustischen Eigenschaften aufweisen können. So unterscheiden sich die Ergebnisse von Material 3 und 8, wenn jeweils zwei Matten miteinander verglichen werden, bei hohen Frequenzen (6000 Hz) um bis zu 25%.

Trotz der Streuungen ist eindeutig zu erkennen, dass ein erhöhter Anteil an langstapeligen Baumwollfasern und damit auch eine erhöhte Anzahl Poren (s. CT Aufnahmen FIBRE), zu einer verminderten Reflexion des Schalls an der Materialoberfläche und somit einer erhöhten Absorption führt.

Baumwolle und Flachs

Die Materialien 2, 6 und 10 bestehen aus PLA und zu jeweils gleichen Anteilen aus langstapeliger Baumwolle und Flachs. Der Absorptionskoeffizient dieser Proben ist in Abbildung 19 dargestellt.

Wie bereits für reine Baumwolle ist auch hier zu erkennen, dass ein erhöhter Anteil an Naturfasern zu einer höheren Absorption führt. Bei den hier gezeigten Proben ist der Unterschied zwischen 25% und 50% PLA deutlich größer als zwischen 50% und 75% PLA. Vergleicht man die gemessenen Zugfestigkeiten der Materialien zeigt sich, dass Material 2 mit 8,4 MPa eine drei Mal niedrigere Festigkeit aufweist als Material 6 mit 24,1 MPa. Der Unterschied zwischen Material 6 und 10 (27,4 MPa) ist hingegen deutlich geringer. Wie auch die Proben, die nur aus Baumwolle bestehen, werden die Matten mit zunehmendem PLA-Anteil dünner. Dieser Zusammenhang ist aber fast linear mit dem PLA-Anteil und kann nicht die geringen Unterschiede in der Absorption zwischen Material 6 und 10 erklären.

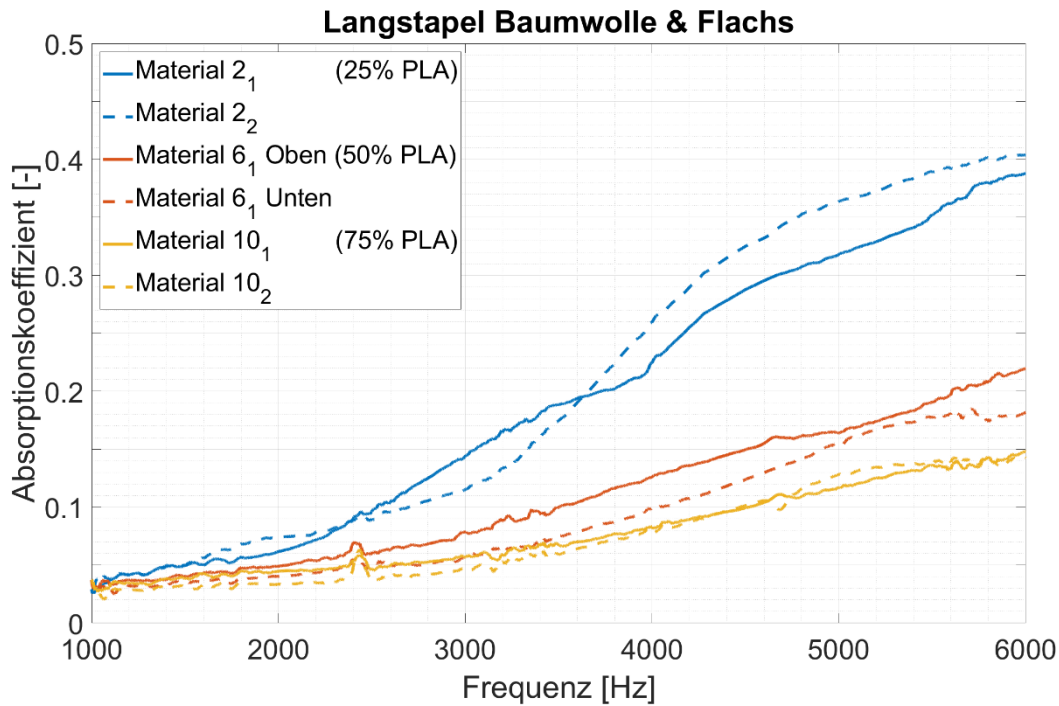


Abbildung 19: Akustischer Einfluss des Mischungsverhältnisses von PLA und mit gleichen Anteilen langstapeliger Baumwolle und Flachs

Flachs

Die Materialien 1 und 4 bestehen aus PLA und Flachs. Der Absorptionskoeffizient dieser Proben ist in Abbildung 20 dargestellt.

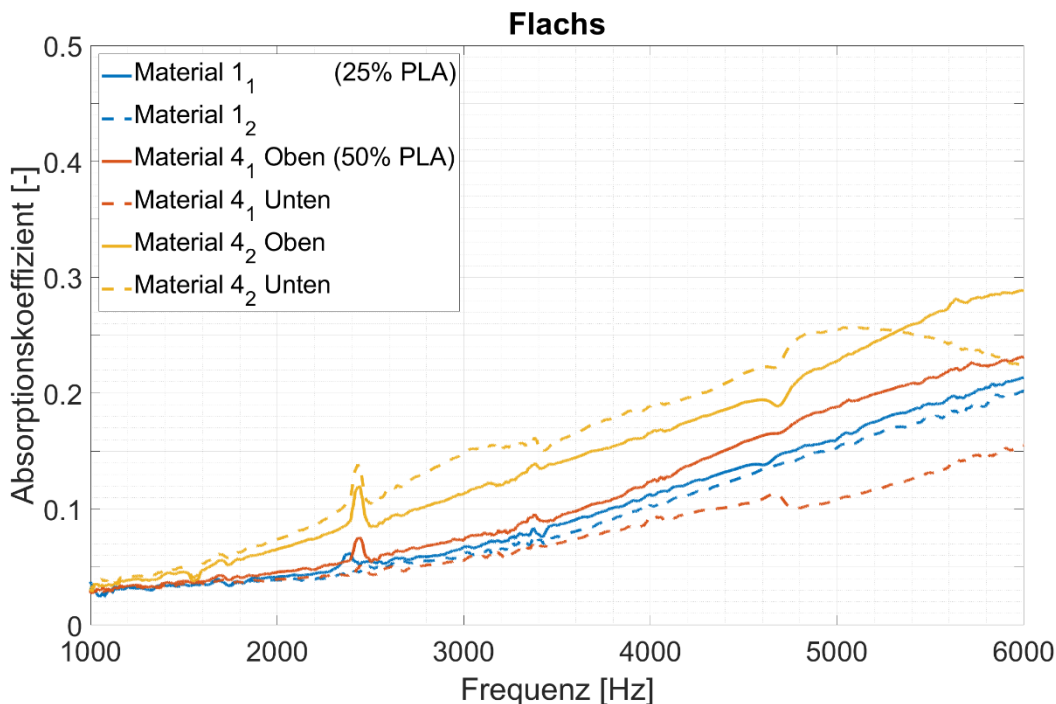


Abbildung 20: Akustischer Einfluss des Mischungsverhältnisses von PLA und Flachs

Im Gegensatz zu reiner Baumwolle oder Baumwolle mit Flachs, ist hier keine eindeutige Tendenz in Abhängigkeit des PLA-Anteils zu erkennen. Für Material 4 wurden aus jeder Matte zwei Proben ausgeschnitten. Beide Ergebnisse sind hier dargestellt. Die Absorption von Matte 1 (4_1) ist vergleichbar mit der von Material 1, die von Matte 2 (4_2) ist höher. Hier ist eine Betrachtung des Strömungswiderstandes sinnvoll. Auch dieser wurde pro Probe mindestens drei Mal gemessen. Vergleicht man die Ergebnisse von zwei Proben aus Material 4_2 , so zeigen sich mittlere Abweichungen von fast 75%. Einzelne Absorptionsmessungen zeigen ebenfalls Abweichungen bis zu 25% vom Mittel. Dies deutet daraufhin, dass

die Matte 4_2 sehr inhomogen ist und daher hohe Streuungen in den Ergebnissen aufweist. Die Streuungen innerhalb von Matte 4_1 sind mit 20-55% bei den Strömungswiderständen geringer. Hier ist die Tendenz, die sich durch den PLA-Anteil ergibt, ähnlich wie für die beiden zuvor diskutierten Füllstoffen. Auch die Dicken der Matten mit 1,3 mm für Material 1 und 1,1 mm für Material 3 sind sehr ähnlich.

2. Füllstoff/Naturfaser

Im vorherigen Kapitel hat sich gezeigt, dass der PLA-Anteil einen sehr entscheidenden Einfluss auf die akustischen Eigenschaften hat. Im Folgenden wird der Einfluss der verschiedenen Naturfasern bei konstantem PLA-Anteil diskutiert.

25% PLA

Die Materialien 1, 2 und 3 bestehen aus 25% PLA und verschiedenen Naturfaseranteilen. Die verwendeten Matten sind in Abbildung 21 - Abbildung 23 dargestellt. Zu erkennen ist jeweils die Stelle, an der die Proben ausgeschnitten wurden. Die Proben mit ca. 30 mm Durchmesser wurden für die akustischen Messungen verwendet, die größeren mit 100 mm Durchmesser zur Messung des Strömungswiderstandes.



Abbildung 21: Material 1 (25% PLA, 75% Flachs)



Abbildung 22: Material 2 (25% PLA, 37,5% langstapeliger Baumwolle, 37,5% Flachs)

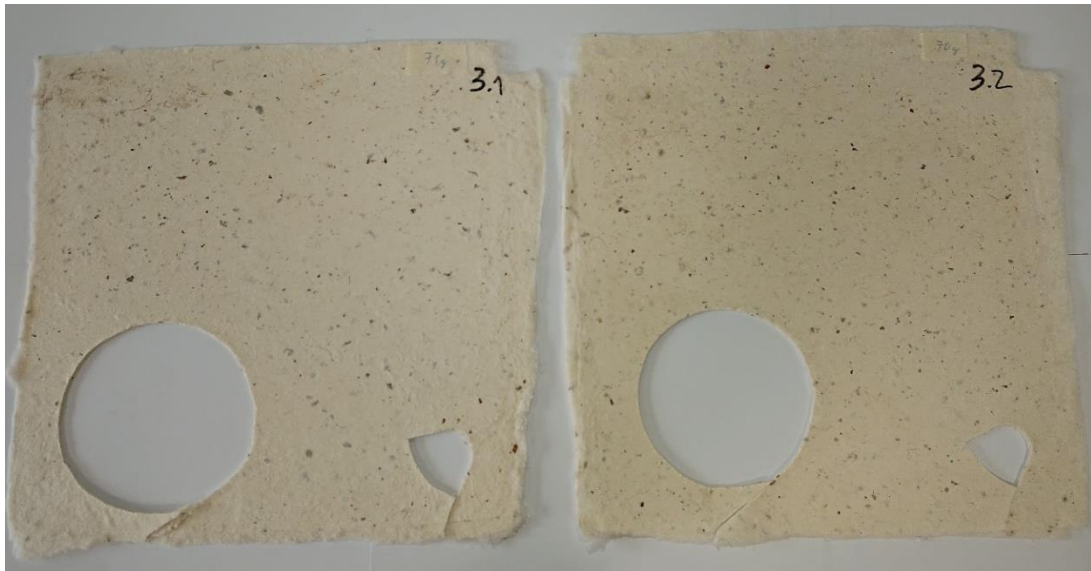


Abbildung 23: Material 3 (25% PLA, 75% langstapeliger Baumwolle)

Die Ergebnisse der akustischen Messungen sind in Abbildung 24 - Abbildung 26 dargestellt. Als „RS“ wird in allen folgenden Abbildungen die Rückseite einer Probe bezeichnet.

Material 1, das nur Flachs enthält, hat eine sehr faserige Oberfläche. Diese Art der Fasern scheint trotz der grundsätzlichen Inhomogenität eines solchen Materials sehr gleichmäßig verteilt zu sein. Die Absorptionsgrade aller vier Proben sind nahezu identisch (s. Abbildung 24). Auch die einzelnen Messungen des Absorptionsgrades weichen nur geringfügig (max. 14%) von dem hier dargestellten Mittelwert ab. Das spiegelt sich auch in den Messungen des Strömungswiderstandes wider. Dieser ist mit $1,5 - 1,9 \text{ MPa s/m}^2$ vergleichsweise gering und zeigt auf Vorder- und Rückseite einer Matte nur 3% Abweichung. Zwischen den beiden Matten besteht ein Unterschied von 16%, der ein Indiz für die leicht abweichende Absorption sein könnte.

Insgesamt ist die Absorption mit max. 0,2 bei 6000 Hz sehr gering.

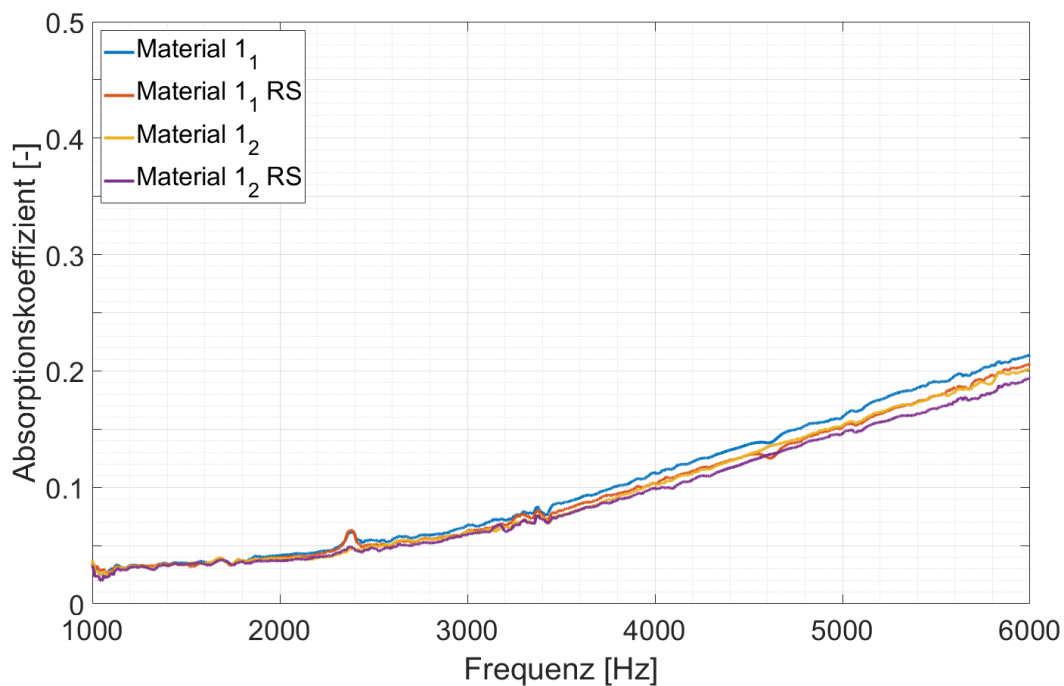


Abbildung 24: Absorptionskoeffizient Material 1

Material 2 enthält Fasern aus langstapeliger Baumwolle und Flachs und erhält dadurch eine glattere Oberfläche als Material 1. Schon optisch ist hier allerdings zu erkennen, dass die Fasern nicht alle gleichmäßig verteilt sind. Es zeigt sich auch in den Absorptionsergebnissen eine höhere Streuung der vier dargestellten Proben im Vergleich zu Material 1 (s. Abbildung 25). Hierbei ist insbesondere der Unterschied zwischen

Vorder- und Rückseite von 2_2 zu erkennen. Die einzelnen Absorptionsmessungen, die den hier dargestellten Mittelwert bilden, zeigen nur für die Vorderseite von 2_2 höhere Abweichungen von bis zu 19%, die anderen sind sehr gut wiederholbar mit maximalen Abweichungen von 4-7%. Dies deutet daraufhin, dass die Probe selbst Inhomogenitäten aufweist. Bei Betrachtung des Strömungswiderstandes zeigt sich, zwischen den beiden Matten auch ein Unterschied von bis zu 26% herrscht. Da der Strömungswiderstand für die akustischen Eigenschaften sehr entscheidend ist, ist davon auszugehen, dass die Probe aufgrund dieser Unterschiede auch akustische Unterschiede aufweist.

Der Absorptionsgrad ist ab 2000 Hz höher als der von Material 1 mit reinen Flachfasern. Bei 6000 Hz erreicht er Werte von 0,35-0,4. Beide Materialien sind mit ungefähr 1,3 mm ähnlich dick, Material 2 ist allerdings flexibler und hat eine Zugfestigkeit von nur 8 MPa, wohingegen Material 1 11 MPa aufweist. Der Strömungswiderstand von 2 ist mit 6-8 MPa s/m² höher als der von Material 1. Damit unterscheiden sich die Materialien in der Flexibilität und im Strömungswiderstand. Beides kann die veränderten akustischen Eigenschaften erklären.

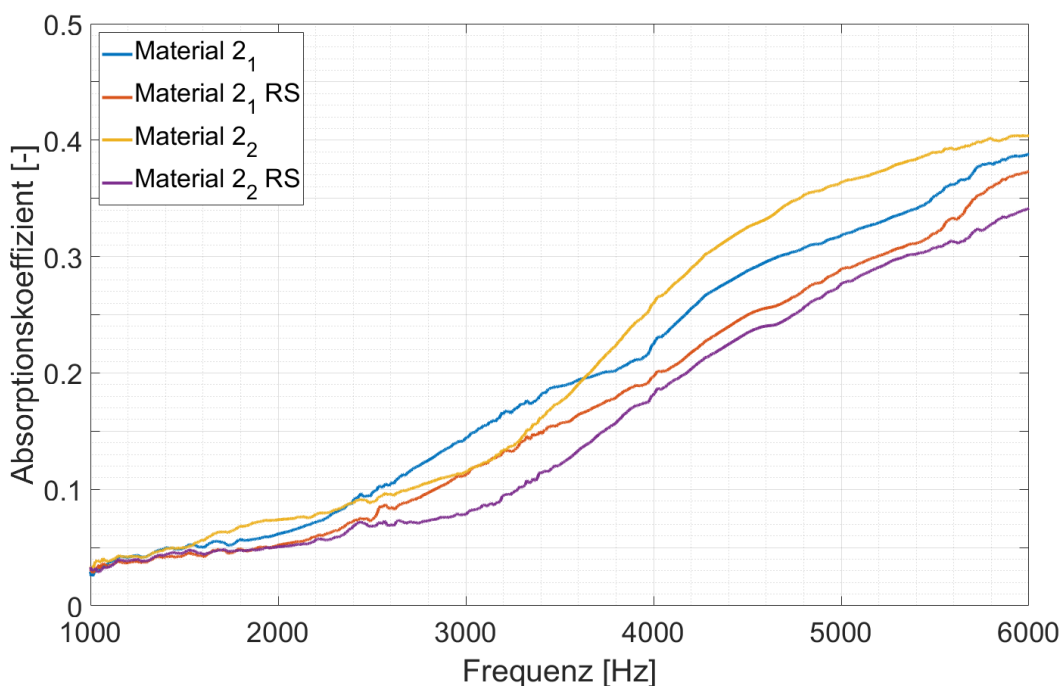


Abbildung 25: Absorptionskoeffizient Material 2

Material 3, das lediglich aus Baumwollfasern besteht, zeigt noch größere Unterschiede in den akustischen Eigenschaften beim Vergleich der vier Proben (s. Abbildung 26). Dabei zeigt insbesondere Material 3₁ deutliche Unterschiede zwischen Vorder- und Rückseite, 3₂ hingegen hat für beide Seiten einen charakteristisch gleichen Verlauf der Absorption. Dabei zeigen die einzelnen Messungen nur max. 6% Abweichung vom dargestellten Mittelwert. Auch die Messungen vom Strömungswiderstand zeigen eine ähnlich gute Wiederholbarkeit. Im Mittel unterscheiden sich Vorder- und Rückseite von 3₁ nur um 5%. Die Unterschiede der akustischen Eigenschaften können hier also nicht mit Unregelmäßigkeiten im Strömungswiderstand erklärt werden.

Im Vergleich der Materialien 1, 2 und 3 erzielt Material 3 die höchsten Absorptionswerte von bis zu 0,5. Auch ist die Steigung bei niedrigeren Frequenzen etwas höher als für Material 2. Aufgrund der hohen Streuung der Ergebnisse sind diese Tendenzen allerdings mit Vorsicht zu betrachten. Die Festigkeit ist mit 11 MPa identisch zu der von Material 1 und kann somit die deutlichen Unterschiede in der Absorption nicht erklären. Allerdings sind die Baumwollfasern deutlich biegsamer als die Flachfasern. Die Biegefestigkeit beträgt nur 4 MPa für Material 3, aber 11 MPa für Material 1. Die Dicke von Material 3 mit 1,6 mm ist etwas dicker als die anderen beiden Materialien, was vorteilhaft für die Akustik ist. Der Strömungswiderstand mit Werten von 4-6 MPa s/m² ist höher als der von Material 1 und könnte ein Indiz für eine höhere Absorption sein. Material 2 hingegen hat den höchsten Strömungswiderstand von 6-8 MPa s/m², erzielt aber nicht die höchsten Absorptionswerte.

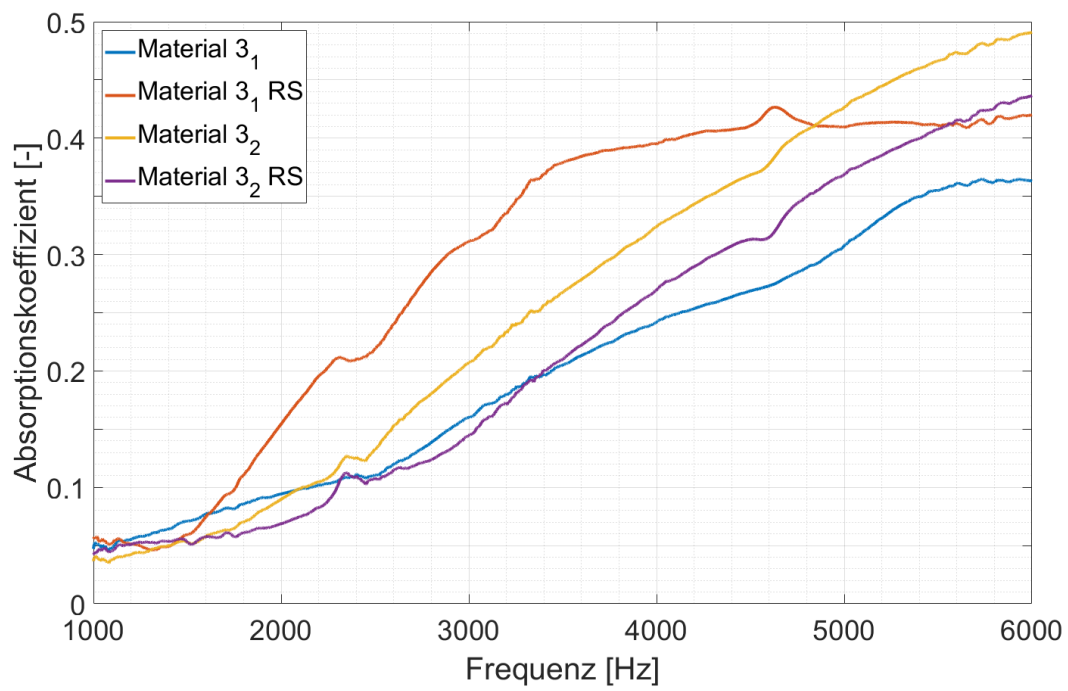


Abbildung 26: Absorptionskoeffizient Material 3

50% PLA

Die Materialien 4, 6, 7 und 8 bestehen aus 50% PLA. Die verwendeten Matten sind in Abbildung 27 - Abbildung 30 dargestellt.



Abbildung 27: Material 4 (50% PLA, 50% Flachs)



Abbildung 28: Material 6 (50% PLA, 25% Flachs, 25% langstapelige Baumwolle)

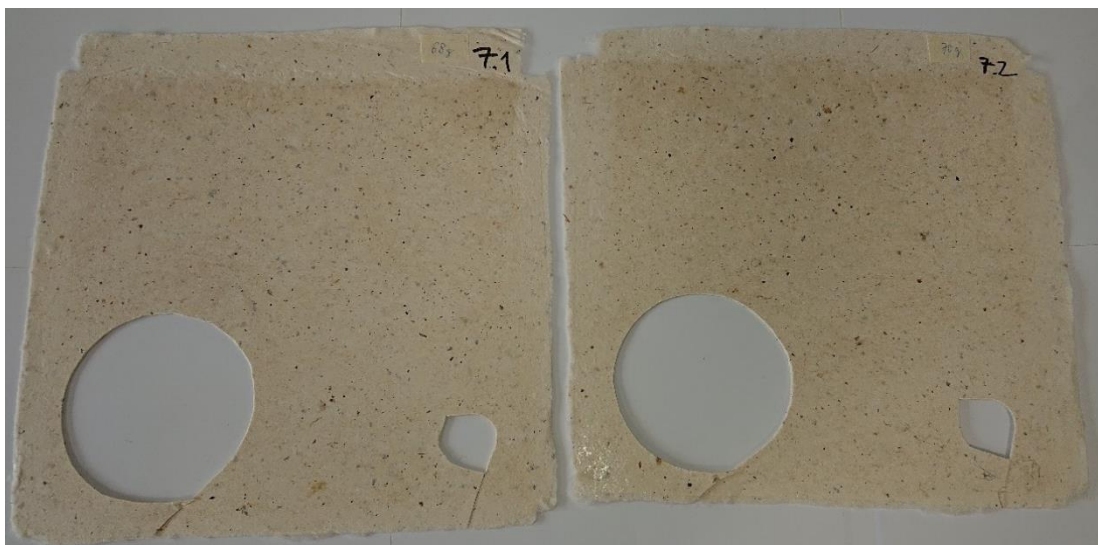


Abbildung 29: Material 7 (50% PLA, 50% kurzstapelige Baumwolle)

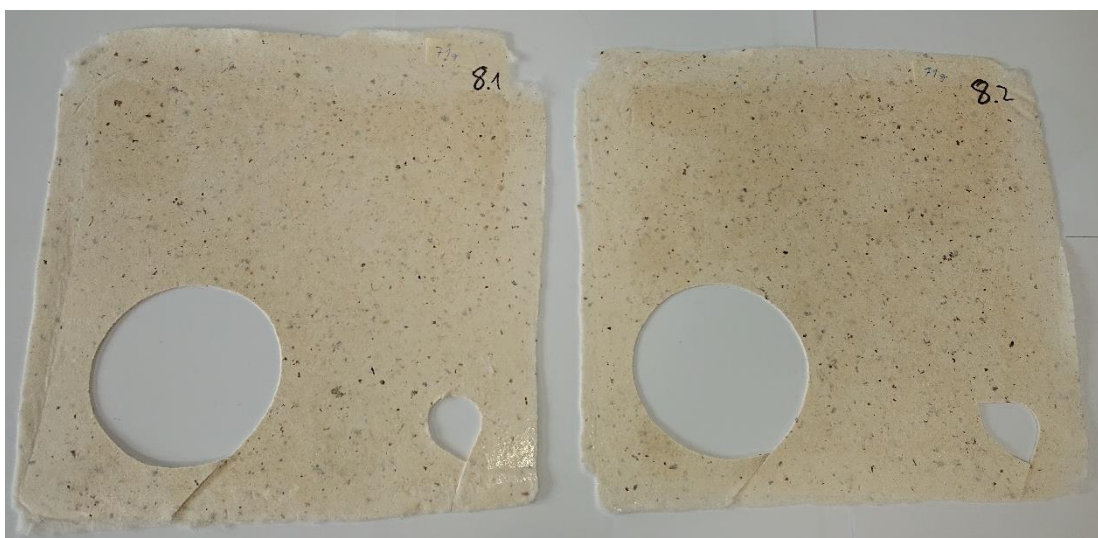


Abbildung 30: Material 8 (50% PLA, 50% langstapelige Baumwolle)

Die Ergebnisse der Absorptionsmessung sind in Abbildung 31 - Abbildung 36 dargestellt.

Aus Material 4 wurden wie bereits zuvor erwähnt aus beiden ausgewählten Matten jeweils zwei Proben ausgeschnitten. Auf Abbildung 27 ist zu erkennen, dass für 4_1 die Proben am Rand entnommen wurden und aus 4_2 in der Mitte. Die am Rand entnommenen Proben zeigen bis 4500 Hz eine sehr geringe Streuung in der Absorption (s. Abbildung 31). Auch die Abweichungen der einzelnen Messungen zum Mittelwert betragen max. 9%. Der Strömungswiderstand wurde auch mit 2 Proben (von 100 mm Durchmesser) vermessen. Dabei zeigt

die Probe, die unmittelbar neben den Proben für die akustischen Messungen ausgeschnitten wurde, geringere Abweichungen von Vorder- und Rückseite. Hier scheint eine Inhomogenität in der Matte von einer zur anderen Seite gegeben zu sein.

Die in der Mitte der Matte entnommenen Proben aus 4_2 zeigen bereits bei niedrigeren Frequenzen eine höhere Streuung untereinander als die aus 4_1 (s. Abbildung 32). Vergleicht man den Strömungswiderstand von 4_1 und 4_2 , zeigen sich insbesondere im Vergleich der Vorderseiten Unterschiede um die 73%. Diese hohen Differenzen zeigen, dass die beiden Proben sehr inhomogen sind und können damit eine Erklärung für die Abweichungen in der Absorption sein. Tendenziell ist die Absorption der Proben von 4_2 etwas höher als von 4_1 , aber durch die hohe Streuung in der gleichen Größenordnung.

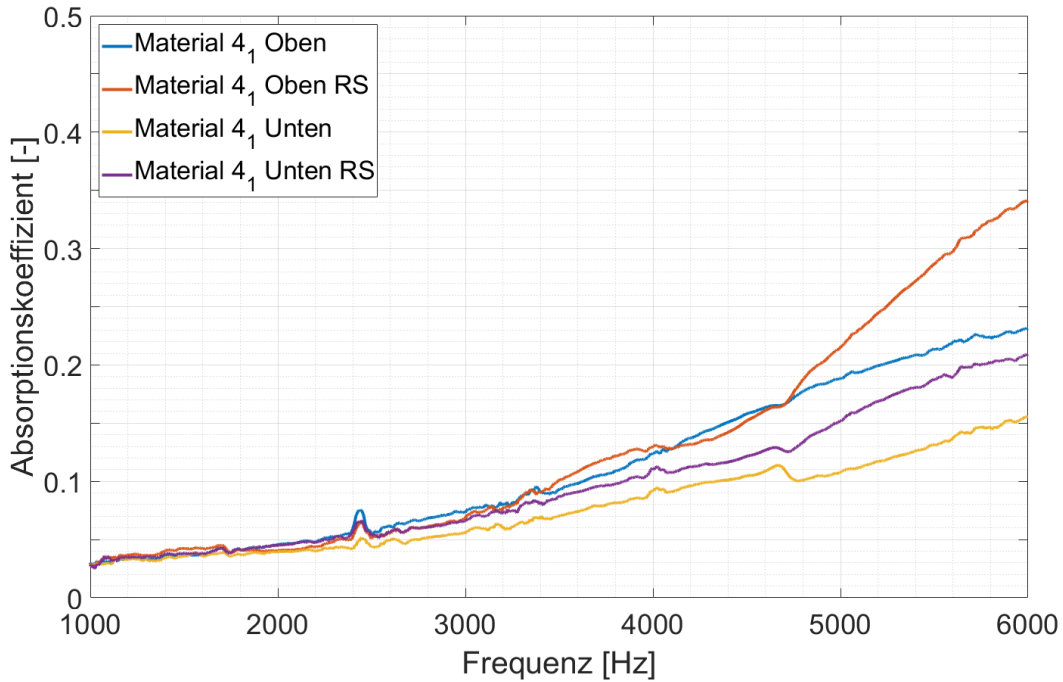


Abbildung 31: Absorptionskoeffizient Material 4_1

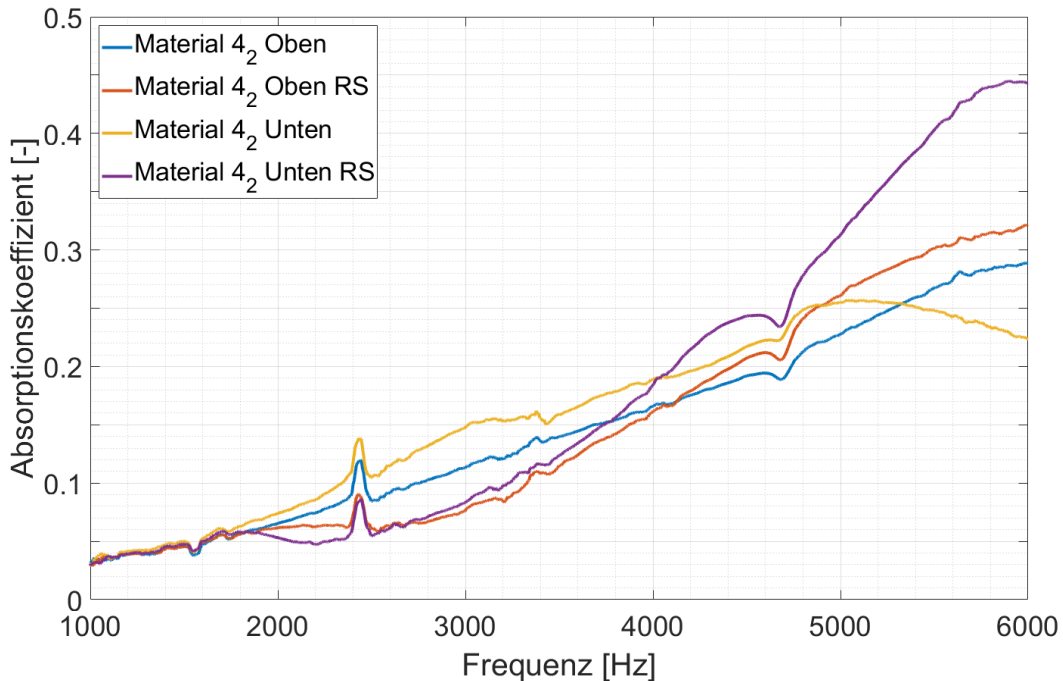


Abbildung 32: Absorptionskoeffizient Material 4_2

Auch aus Material 6 wurden jeweils zwei Proben ausgeschnitten. Aus 6_1 wurden sie in der Mitte entnommen, aus 6_2 am Rand (s. Abbildung 28). Hier zeigt sich die gleiche Tendenz wie bei Material 4, dass die Proben vom Rand eine deutlich geringere Streuung aufweisen als die aus der Mitte (s. Abbildung 33 und Abbildung

34). Für 6_2 ist der Strömungswiderstand mit Werten um die 10 MPa s/m² mehr als doppelt so hoch wie die 4,5 MPa s/m² von 6_1 . Dies könnte eine Ursache für die verringerte Absorption von 6_2 gegenüber 6_1 und auch gegenüber Material 4 sein. Die Dicke der beiden Materialien von 1,1 mm sowie die Zugfestigkeit von 24 MPa unterscheiden sich nicht und können somit keine Erklärung für akustische Unterschiede sein.

Die Tendenz, die sich hieraus ableitet, dass ein niedriger Strömungswiderstand zu einer höheren Absorption führt, hat sich auch für die Materialien mit 25 % PLA angedeutet. Ein hoher Strömungswiderstand bedeutet, dass der Schall innerhalb des Materials gedämpft werden kann. Allerdings muss der Schall dazu in das Material eindringen. Ein hoher Strömungswiderstand führt an der Oberfläche zu einem hohen Impedanzsprung, sodass ein Großteil des Schalls reflektiert wird und gar nicht erst ins Material eindringt.

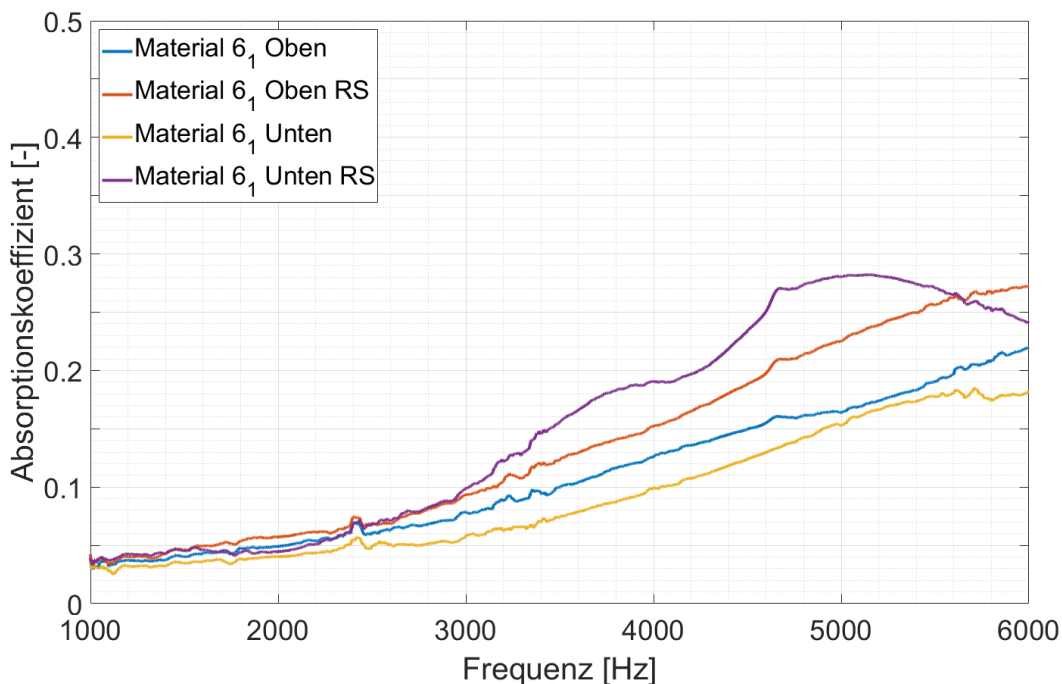


Abbildung 33: Absorptionskoeffizient Material 6_1

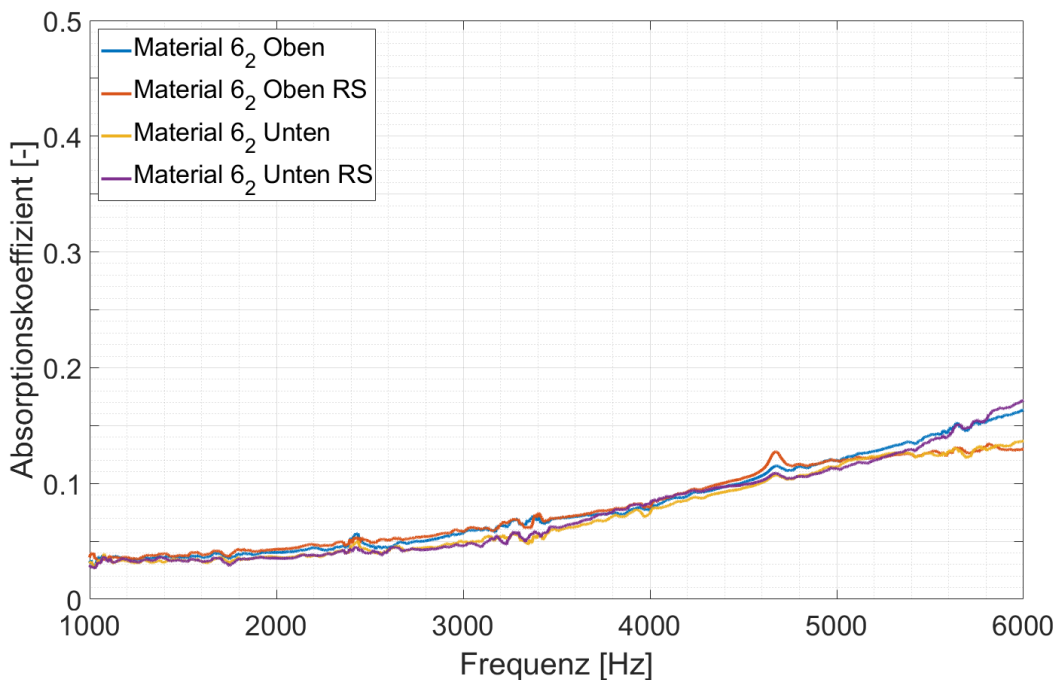


Abbildung 34: Absorptionskoeffizient Material 6_2

Material 7 besteht lediglich aus kurzstapeliger Baumwolle und ist damit das einzige Material mit dieser Faser. Die Oberfläche ist sehr glatt und optisch kaum von Material 8 aus langstapeliger Baumwolle zu unterscheiden. Die Absorption für die Vorder- und Rückseite einer Matte ist sehr ähnlich, obwohl sich die Matten leicht unterscheiden. Aufgrund der glatten Oberflächen sind die Unterschiede zwischen Vorder- und Rückseite

gering, da sie im Gegensatz zu Proben mit hohem Flachsanteil, bei denen die lokale Verteilung der Fasern sehr unterschiedlich sein kann, strukturell sehr ähnlich sind. Beide Proben von Material 7 sind mit 1,2 mm gleich dick und weisen einen vergleichbaren Strömungswiderstand von ca. 9 MPa s /m² auf. Mit einer Zugfestigkeit von 17,7 MPa ist das Material flexibler als 4 und 6. Das Baumwolle biegsamer ist als Flachs war auch bei niedrigeren PLA-Anteilen zu erkennen. Die Absorptionswerte sind vergleichbar mit denen von Material 4 und 6, eine Tendenz zu einer Faser ist nicht zu erkennen.

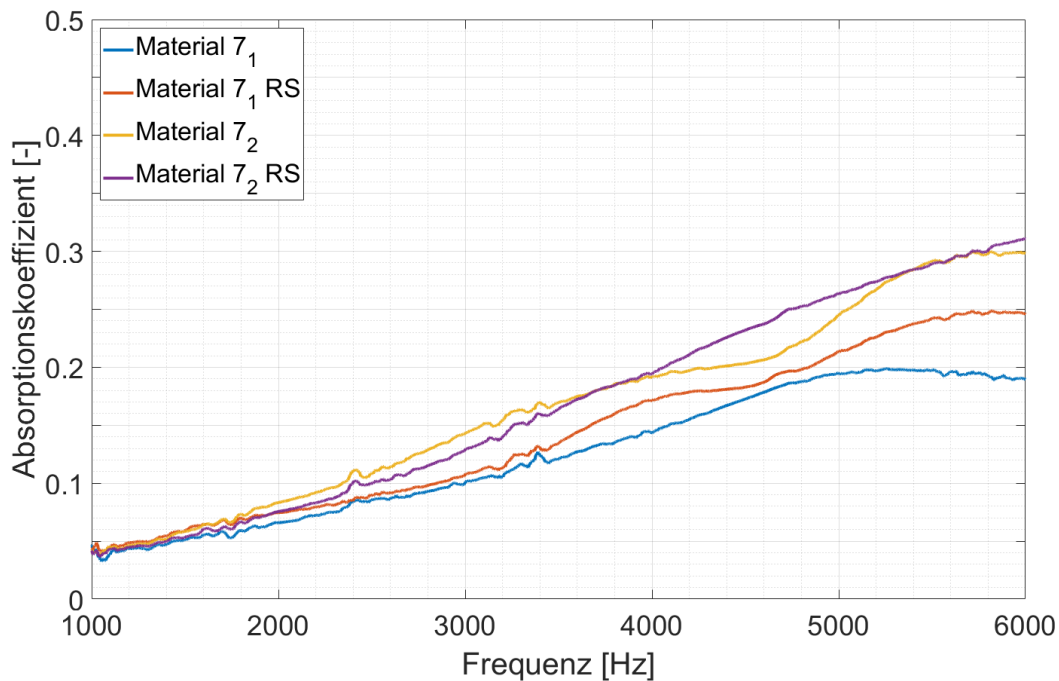


Abbildung 35: Absorptionskoeffizient Material 7

Material 8 zeigt eine ähnliche Streuung wie Material 7. Vorder- und Rückseite einer Matte sind sehr ähnlich, die zwei Matten unterscheiden sich jedoch deutlich. Matte 8₁ ist mit 1,2 mm etwa 0,1 mm dicker als 8₂ und könnte eine etwas höhere Absorption erklären. Die Strömungswiderstände schwanken bei beiden Matten insbesondere zwischen Vorder- und Rückseite (die akustisch kaum Unterschiede zeigen), liegen insgesamt aber im gleichen Bereich. Die Absorption liegt im Rahmen der Streuung ebenfalls im gleichen Bereich wie für Material 7.

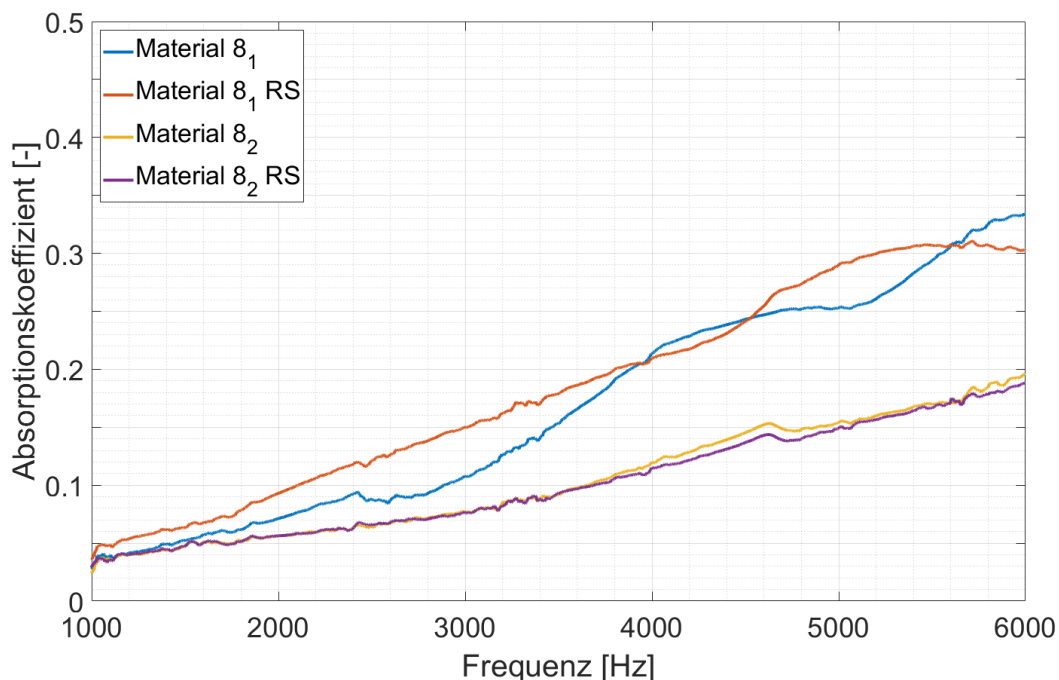


Abbildung 36: Absorptionskoeffizient Material 8

75% PLA

Die Materialien 10 und 11 bestehen zu 75% aus PLA. Die verwendeten Matten sind in Abbildung 37 und Abbildung 38 dargestellt.

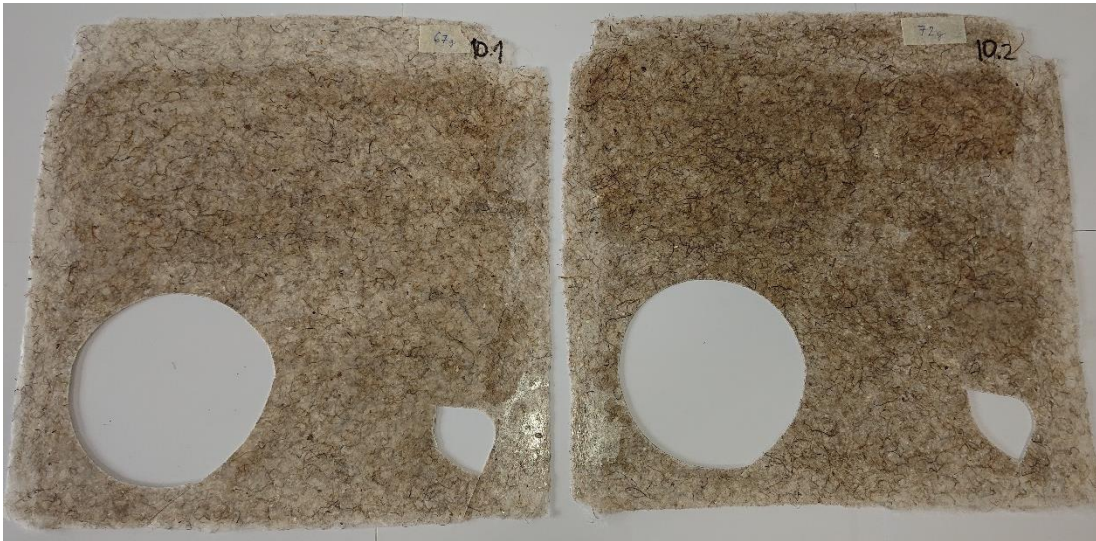


Abbildung 37: Material 10 (75% PLA, 12,5% Flachs, 12,5% langstapeliger Baumwolle)

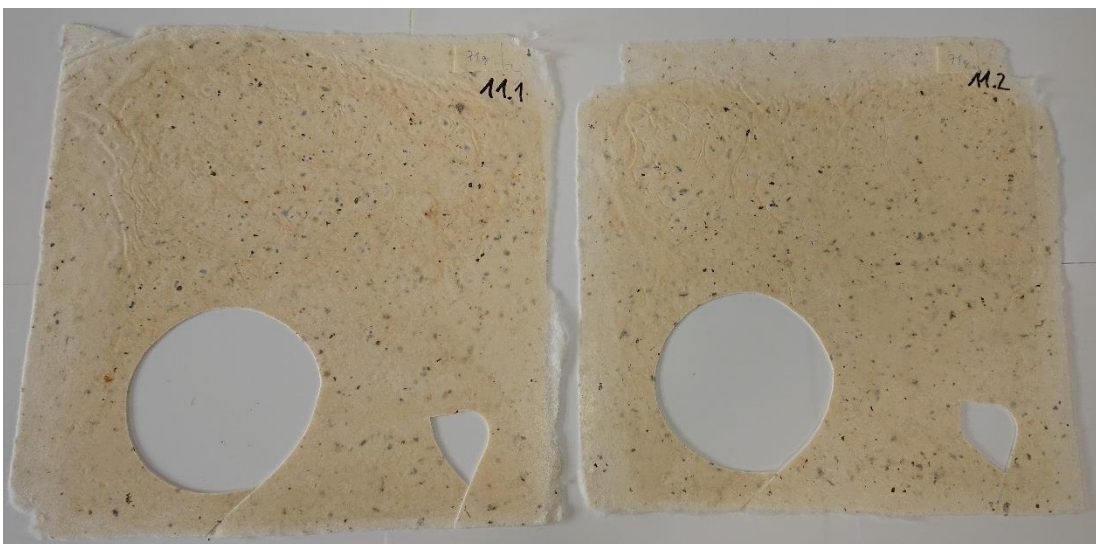


Abbildung 38: Material 10 (75% PLA, 25% langstapeliger Baumwolle)

Die Ergebnisse der akustischen Messungen sind in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellt.

Beide Materialien weisen eine sehr geringe Streuung der Absorption über die jeweils vier Proben auf. Lediglich die Rückseite von 10₂ zeigt größere Abweichungen. Mit verringertem Anteil an Naturfasern werden die Inhomogenitäten im Material verringert und damit die Wiederholbarkeit einer Probe verbessert.

Leichte Abweichungen im Strömungswiderstand von Matte 1 zu 2 von Material 11 können auch in den geringen Unterschieden der Absorption gesehen werden.

Der Strömungswiderstand beider Materialien ist mit 10-12 MPa s/m² sehr hoch. Dieser ergibt sich durch die folienartige Oberfläche, die kaum Lufteinschlüsse im Material zulässt.

Dadurch ergibt sich die niedrige Absorption beider Materialien von max. 0,15. Diese ist bei 75% PLA maßgeblich durch diesen hohen Anteil und weniger durch die Naturfasern bestimmt.

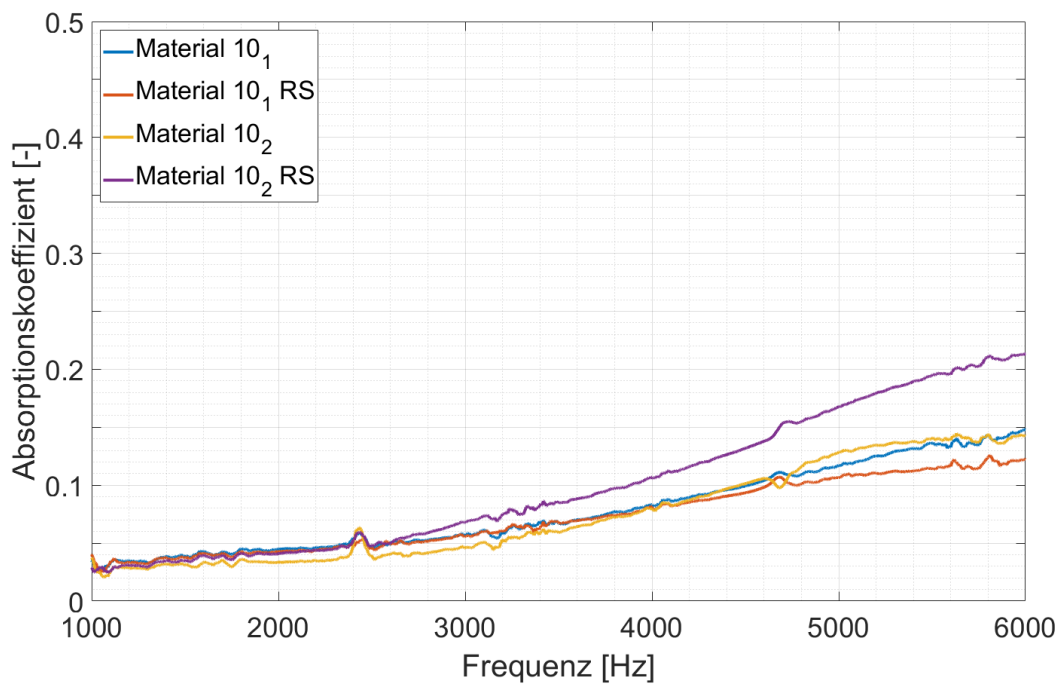


Abbildung 39: Absorptionskoeffizient Material 10

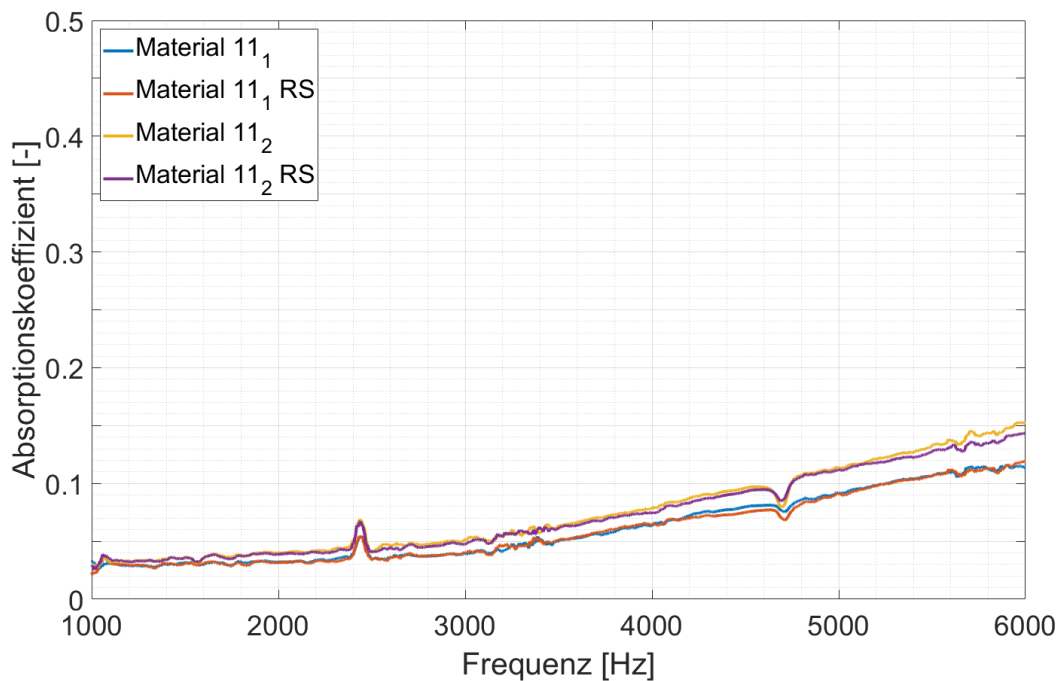


Abbildung 40: Absorptionskoeffizient Material 11

Die Proben 5 und 9 wurden im späteren Verlauf des Projektes vom Projektpartner FIBRE hergestellt. Der Vollständigkeit halber werden sie hier noch aufgeführt. Es ergeben sich daraus keine weiteren Erkenntnisse. Die Messergebnisse für Material 5 sind in Abbildung 41 dargestellt. Es besteht aus 50% PLA und 50% Kurzstapelfasern. Damit ist es Material 6 mit 50% Langstapelfasern sehr ähnlich. Vergleicht man Probe 5₁ mit 6₁, die ungefähr die gleiche Masse aufweisen, ergeben sich vergleichbare Absorptionskoeffizienten.

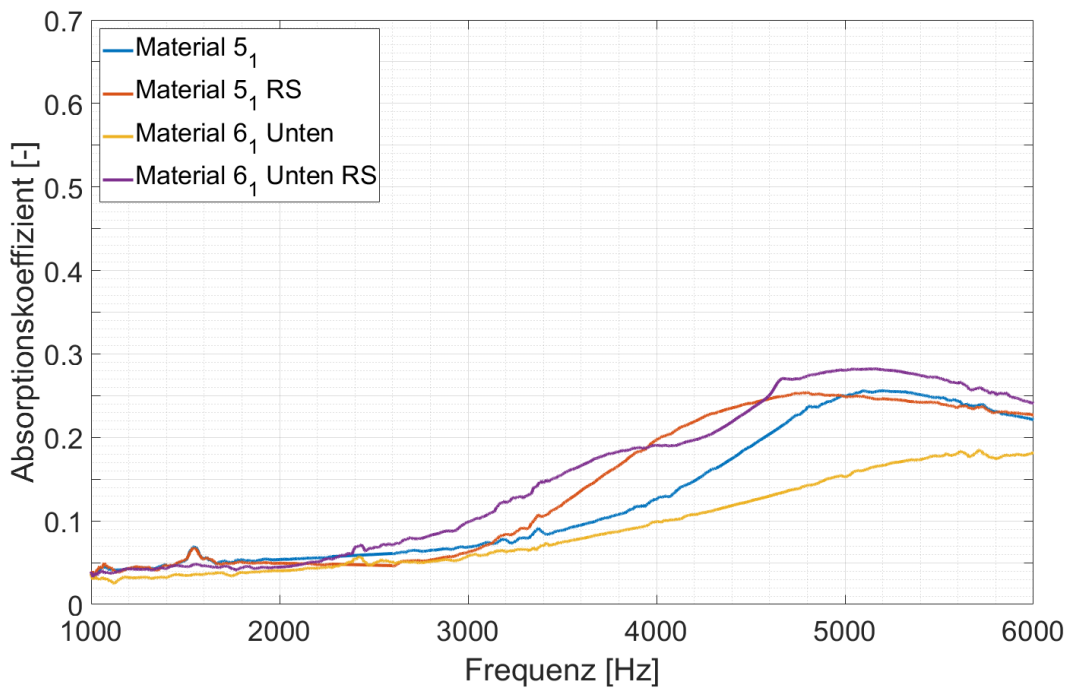


Abbildung 41: Absorptionskoeffizient Material 5 und 6

Die Messergebnisse für Material 9 sind in Abbildung 42 dargestellt. Es wird verglichen mit Material 10 und 11, die alle drei einen PLA-Anteil von 75 % enthalten. Der Absorptionsgrad ist für alle drei Materialien ähnlich, da der PLA-Anteil den entscheidenden Einfluss auf die akustischen Eigenschaften hat.

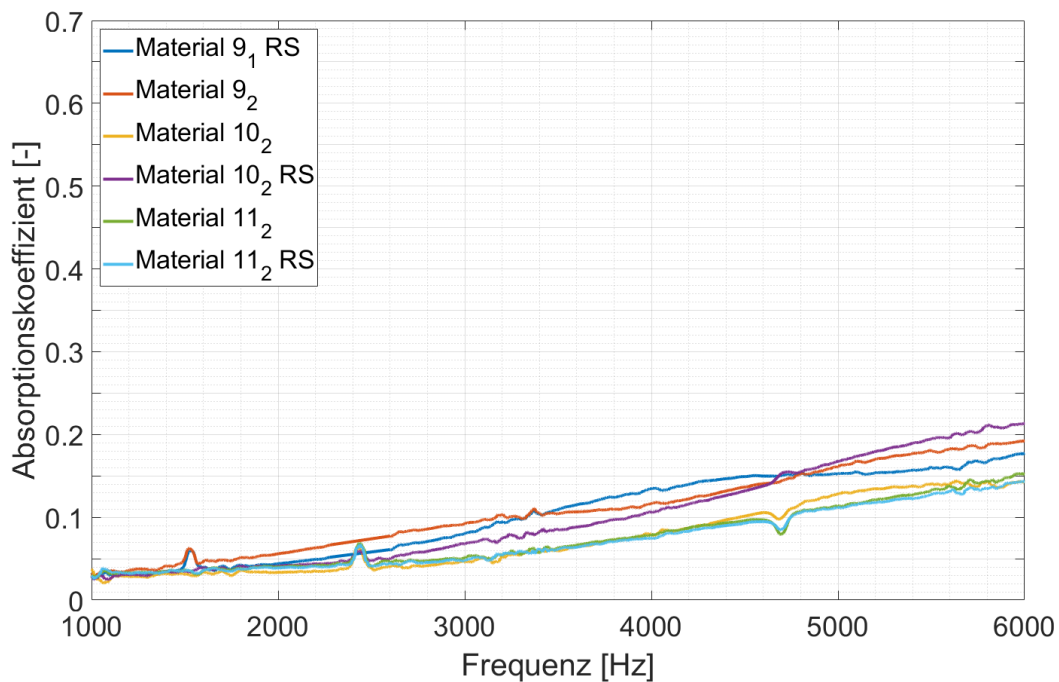


Abbildung 42: Absorptionskoeffizient Material 9, 10 und 11

Des Weiteren wurden Proben mit 4 Lagen aus verschiedenen Vliesen hergestellt. Materialien 12 und 13 bestehen aus den Vliesen der Materialien 6 und 8 mit dem Lagenaufbau 8668 (Material 12) und 6886 (Material 13). Die Absorptionskoeffizienten der beiden Materialien sind in Abbildung 43 und Abbildung 44 dargestellt. Berücksichtigt man die Streuungen der einzelnen Messungen der Materialien 6 und 8 ergeben sich für Material 12 und 13 vergleichbare Absorptionskoeffizienten. Lediglich die Unterschiede zwischen Vorder- und Rückseite sind deutlicher. Tendenzen der einzelnen Naturfasern sind aufgrund der Streuungen innerhalb eines Materials nicht zu erkennen.

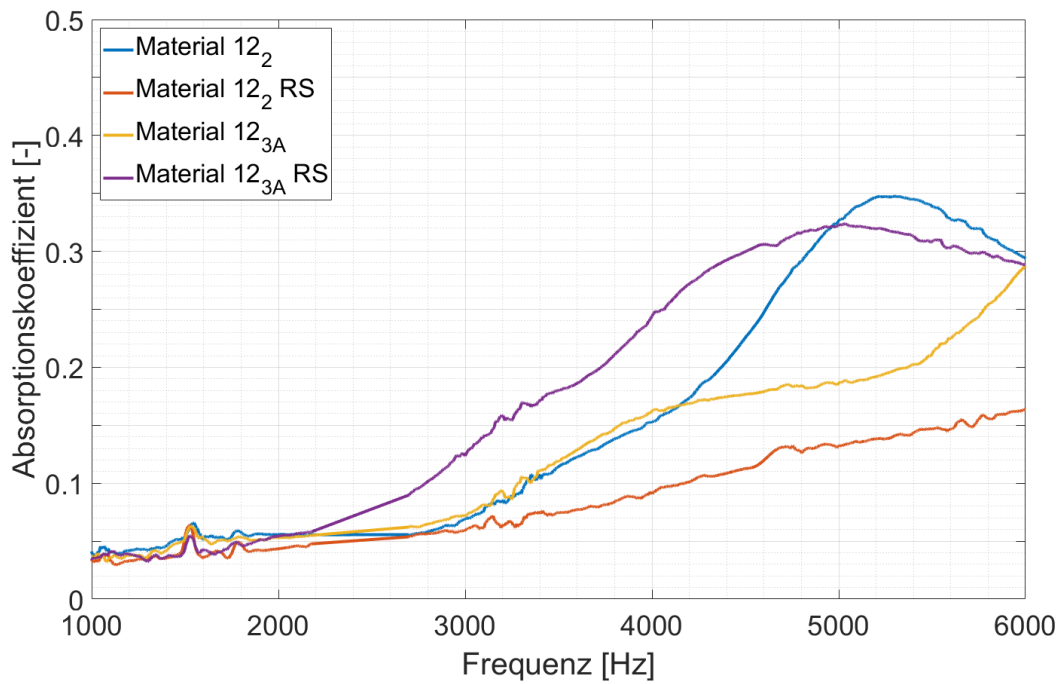


Abbildung 43: Absorptionskoeffizient Material 12

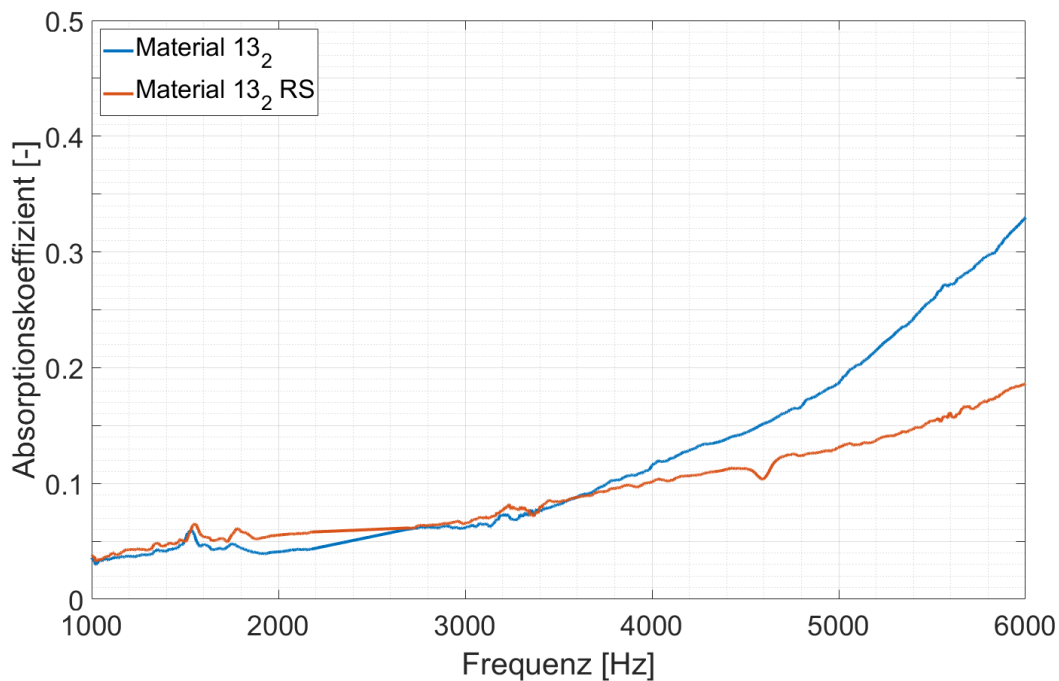


Abbildung 44: Absorptionskoeffizient Material 13

Abschließend wurde der Einfluss der Probendicke untersucht. Dazu wurden die Materialien 4, 6 und 8 in doppelter Dicke, also mit 8 anstatt 4 Lagen, hergestellt. Die Absorptionskoeffizienten der Materialien 14 – 16 sind in Abbildung 45 - Abbildung 47 im Vergleich zu den 4-lagigen Materialien dargestellt.

Alle drei Materialien zeigen, dass das Maximum des Absorptionskoeffizienten sich bei erhöhter Probendicke zu niedrigeren Frequenzen verschiebt. Das Maximum ist dabei niedriger als bei den dünneren Proben. Nach dem Maximum ist ein Abfall des Absorptionskoeffizienten zu sehen. Dieser wird auch bei den dünneren Proben auftreten, allerdings erst bei höheren Frequenzen als den hier gemessen.

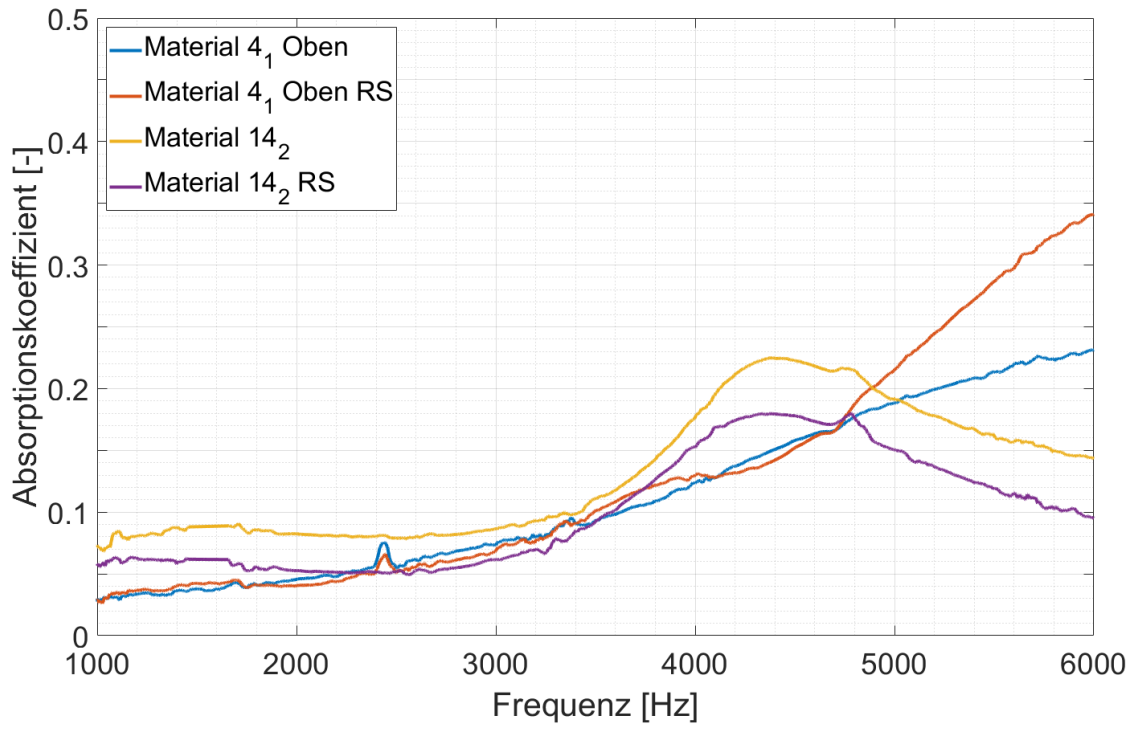


Abbildung 45: Absorptionskoeffizient Material 4 (4-lagig) und 14 (8-lagig)

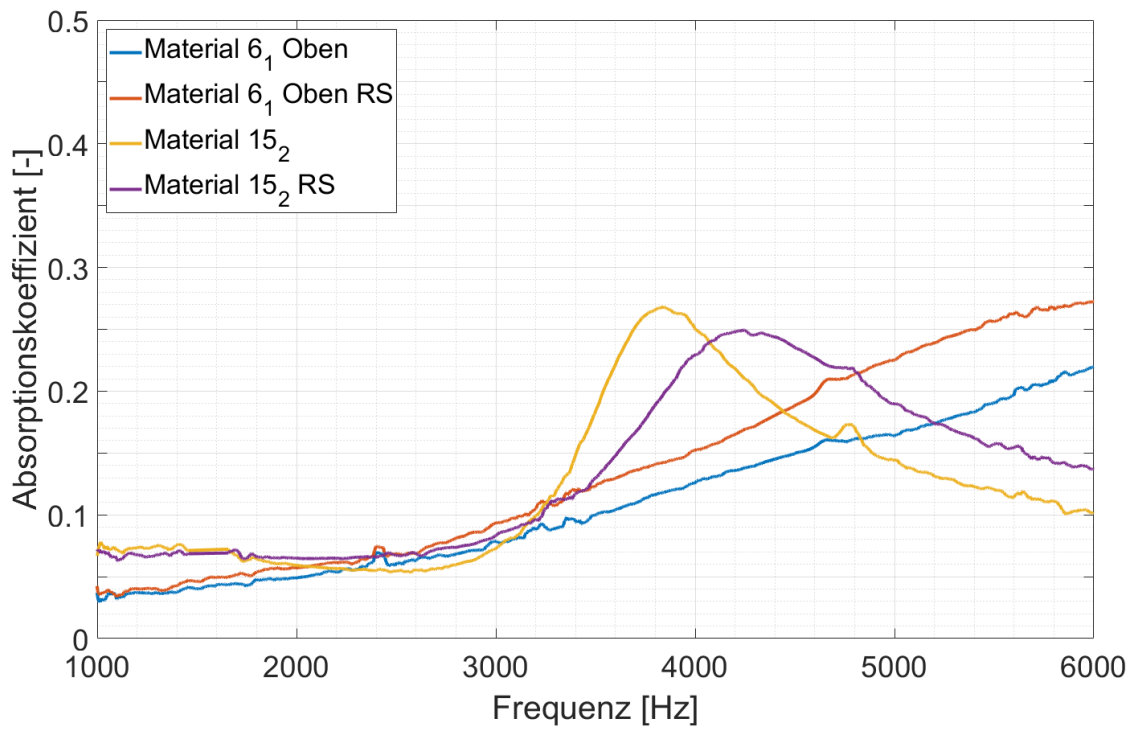


Abbildung 46: Absorptionskoeffizient Material 6 (4-lagig) und 15 (8-lagig)

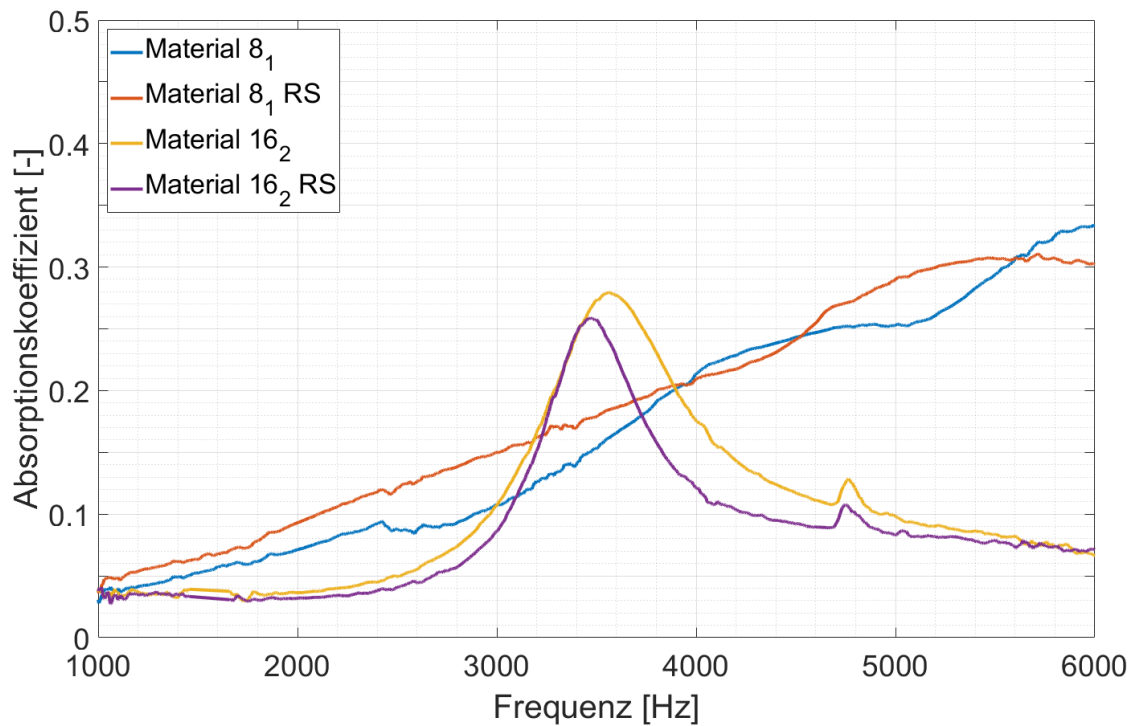


Abbildung 47: Absorptionskoeffizient Material 8 (4-lagig) und 16 (8-lagig)

Fazit Akustische Messungen

Untersucht wurde der Einfluss vom PLA-Anteil sowie verschiedener Naturfasern auf die akustischen Eigenschaften von naturfaserverstärkten Kunststoffen. Als entscheidende Größe wurde die Absorption verwendet.

Grundsätzlich erhöht ein hoher Anteil an Naturfasern die Flexibilität eines Materials. Dies bestätigt die Zugfestigkeit, die sich mit zunehmendem PLA-Anteil erhöht. Die Biegefähigkeit hängt insbesondere von der Art der Naturfaser ab und ist bei erhöhtem Baumwollanteil gegenüber Flachs verringert. Je flexibler das Material ist, desto höher ist die erzielte Absorption. Diese Tendenz konnte mit Baumwollfasern und einem Gemisch aus Baumwolle und Flachs sehr gut gezeigt werden. Die Materialien mit ausschließlich Flachsfasern zeigten diese Tendenz nicht so deutlich. Dies könnte an der hohen Steifigkeit bei bereits niedrigen PLA-Anteilen liegen.

Im Vergleich der einzelnen Fasern bei konstantem PLA-Anteil waren weniger deutliche Unterschiede zu erkennen. Bei geringem PLA-Anteil von 25% zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Flachs und Baumwolle. Dieser kann mit der hohen Steifigkeit von Flachs, einer höheren Dicke des Materials mit Baumwolle und einem erhöhten Strömungswiderstand von Baumwolle erklärt werden.

Bei einer Erhöhung des PLA-Anteils auf 50% sind große Inhomogenität in den Materialien aufgetreten. Die Ergebnisse für die Absorption zeigen eine sehr hohe Streuung. Dadurch lassen sich kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Fasern erkennen. Der Strömungswiderstand erhöht sich. Hier zeigt sich, dass ab einer gewissen Höhe des Strömungswiderstandes die Absorption wieder geringer ausfällt.

Bei einem PLA-Anteil von 75% sind die Oberflächen der Materialien sehr gleichmäßig, fast folienartig. Die Inhomogenitäten sind deutlich verringert. Die Strömungswiderstände sind noch höher und führen zu sehr geringen Absorptionen, unabhängig von der verwendeten Naturfaser.

Tabelle 2: Abweichungen der einzelnen Absorptionsmessungen

Probe	Vorderseite			Rückseite		
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
1.1	0,04	0,14	0,09	0,04	0,04	0,04
1.2	0,06	0,07	0,06	0,06	0,10	0,07
2.1	0,05	0,07	0,06	0,04	0,05	0,05
2.2	0,08	0,19	0,12	0,06	0,06	0,07
3.1	0,05	0,06	0,05	0,03	0,04	0,04
3.2	0,05	0,06	0,06	0,04	0,06	0,05
4.1 Oben	0,04	0,05	0,05	0,06	0,08	0,05
4.1 Unten	0,05	0,06	0,05	0,04	0,09	0,04
4.2 Oben	0,07	0,25	0,12	0,06	0,07	0,06
4.2 Unten	0,07	0,14	0,10	0,04	0,09	0,07
6.1 Oben	0,08	0,16	0,12	0,05	0,08	0,06
6.1 Unten	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06	0,07
6.2 Oben	0,05	0,09	0,07	0,07	0,09	0,07
6.2 Unten	0,08	0,08	0,08	0,11	0,19	0,14
7.1	0,05	0,06	0,06	0,08	0,39	0,15
7.2	0,04	0,05	0,05	0,07	0,24	0,11
8.1	0,05	0,15	0,10	0,07	0,21	0,12
8.2	0,05	0,06	0,06	0,04	0,05	0,05
10.1	0,05	0,07	0,06	0,04	0,05	0,05
10.2	0,05	0,07	0,06	0,08	0,21	0,13
11.1	0,07	0,08	0,07	0,05	0,05	0,05
11.2	0,05	0,06	0,06	0,04	0,05	0,04

Tabelle 3: Zugfestigkeit (gemessen vom Projektpartner FIBRE)

Material	Zugfestigkeit [MPa]	Biegefestigkeit [MPa]
1	11,3	11,1
2	8,4	16,4
3	11,2	3,6
4	24,2	32,7
6	24,1	28,4
7	17,7	20,5
8	20,7	36,5
10	27,4	50,9
11	29,9	45,9

Tabelle 4: Strömungswiderstand (gemessen vom Projektpartner FIBRE) und Abweichungen

Probe	Strömungswiderstand [MPa s/m ²]		Abweichungen Vorder- und Rückseite	Abweichungen von Matte zu Matte	
	Vorderseite	Rückseite		Vorderseite	Rückseite
1.1 L	1,56	1,60	0,03	0,16	0,14
1.2	1,85	1,87	0,01		
2.1	5,90	6,42	0,09	0,26	0,07
2.2	7,96	6,02	0,24		
3.1	4,50	4,29	0,05	0,10	0,29
3.2	4,99	6,05	0,21		
4.1 R	2,76	6,73	1,44	0,44	0,25
4.1 L	4,91	5,38	0,10		
4.2 L	6,24	3,47	0,44	0,73	0,19
4.2 R	3,60	4,27	0,19		
6.1 L	4,41	4,55	0,03	0,18	0,02
6.1 R	3,74	4,65	0,24		
6.2	9,82	12,01	0,22	2,33	0,01
7.1	9,24	13,17	0,43	0,00	0,44
7.2	9,27	9,16	0,01		
8.1	7,37	9,54	0,29	0,13	0,28
8.2	8,44	7,43	0,12		
10.1	11,68	9,37	0,20	0,16	0,03
10.2	10,04	9,64	0,04		
11.1	12,05	11,96	0,01	0,16	0,07
11.2	10,36	11,16	0,08		

Arbeitspaket 5.2: Numerische Charakterisierung des Materials

Mithilfe der in AP 4.1 und 4.2 entwickelten und validierten Methoden wurden die Materialien numerisch untersucht. Beispielhaft werden hier die Ergebnisse der Materialien 1, 2 und 3, die alle aus 25% PLA und 75% Naturfaser bestehen, dargestellt. Material 1 enthält als Naturfaser lediglich Flachs, Material 3 nur Baumwolle und Material 2 ist eine Mischung. Dabei wurden drei Proben ausgewählt, die die gleiche Masse aufweisen, um Unterschiede durch Masseffekte auszuschließen. In Abbildung 48 ist der gemessene und simulierte Absorptionsgrad aller drei Materialien dargestellt. Es zeigt sich, dass der Absorptionsgrad von Flachs sehr gering ist, der von Baumwolle deutlich erhöht und das gemischte Material zwischen den anderen beiden liegt.

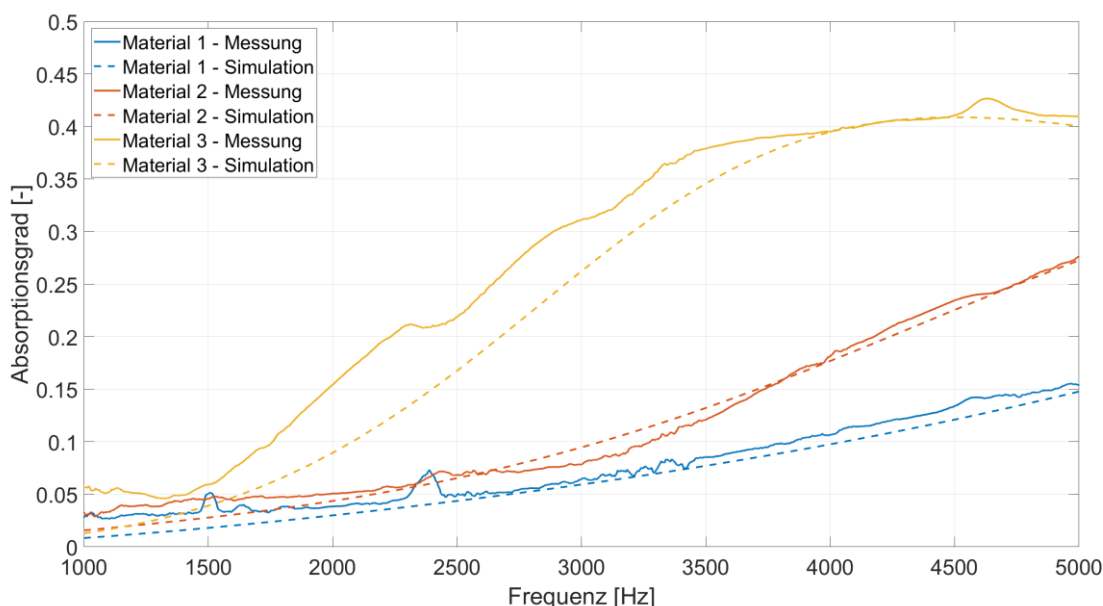


Abbildung 48: Gemessener und simulierter Absorptionsgrad der Materialien 1, 2 und 3

Für die Simulation wurden die Biot-Parameter über die inverse Charakterisierung (4) - (6) ermittelt. Der Strömungswiderstand wurde vom Projektpartner FIBRE gemessen, sodass nur Porosität, Gewundenheit, thermische und viskose Länge ermittelt wurden. Der Ausgangswert der Porosität ergibt sich aus (3) und wurde um diesen Wert 10% variiert. Per Definition kann die Gewundenheit nicht kleiner als 1 sein und ist typischerweise nicht größer als 4 [20]. Die Grenzwerte für die thermische und viskose Länge wurden identisch gewählt und mithilfe von Rasterelektronenmikroskop (REM) Aufnahmen (Abbildung 49) in der Größenordnung von μm festgelegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Biot Parameter für Materialien 1, 2 und 3

Material	Dicke [mm]	Strömungswiderstand [MN s/m ⁴]	Porosität [-]	Gewundenheit [-]	Viskose Länge [μm]	Thermische Länge [μm]
1	1,4	1,9	0,58	1.0	1.0	89
2	1,5	6,1	0,61	1.3	0.7	146
3	1,75	4,5	0,71	2.0	0.9	29

Poren, die durch Flachfasern erzeugt werden, sind deutlich größer als die, die durch Baumwolle erzeugt werden. Das ist zu erkennen an der thermischen Länge, die bei Material 3 deutlich geringer ist als bei Material 1. Da die Baumwollprobe bei gleicher Masse eine größere Dicke aufweist, ist ihre Porosität höher als die von Material 1. Mit einer höheren Porosität und kleineren Poren ergibt sich ein höherer Strömungswiderstand und eine höhere Gewundenheit, wobei der Strömungswiderstand für das gemischt Material 2 am höchsten ist. Die viskose Länge ist in allen Fällen kleiner als die thermische Länge und deutet damit auf zylinderförmige Poren hin.

Die Parameter bestätigen die Vermutungen des Einflusses von Baumwolle. Die Tendenz von Baumwolle zu einer erhöhten Anzahl an Poren mit kleinerem Durchmesser lässt sich auch in den REM-Aufnahmen vom Projektpartner FIBRE (Abbildung 49) erkennen. In Blau sind jeweils verschiedene Poren markiert und in Rot die unterschiedlichen Fasern. Hier ist zu erkennen, dass die Flachfasern einen größeren Durchmesser haben.

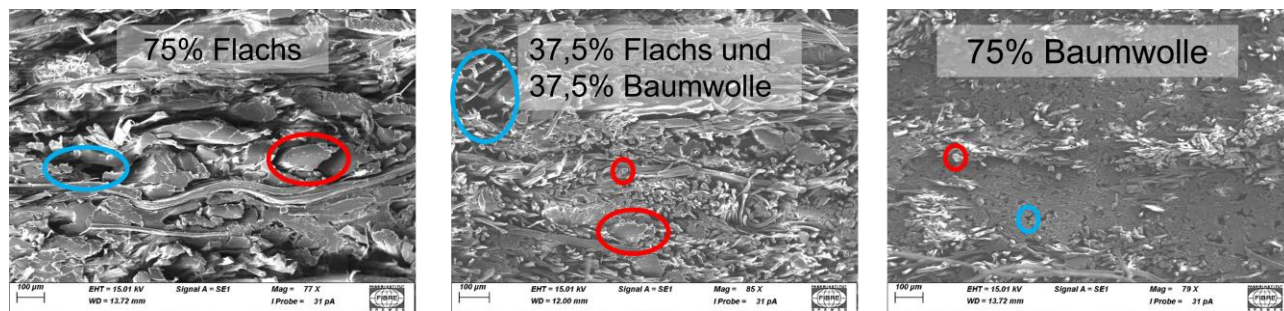


Abbildung 49: REM-Aufnahmen der untersuchten Materialien 1, 2 und 3 mit einer Auflösung von $100\ \mu\text{m}$. (Aufgenommen vom Projektpartner FIBRE). Beispielhaft sind in Blau Poren und in Rot Fasern markiert.

Im Anwendungsfall ist in der Regel das Schalldämmmaß entscheidender als der Absorptionsgrad. Dieses kann ebenfalls mit einem Impedanzrohr berechnet werden. Dabei ist die Probe nicht wie bei der Absorptionsmessung vor einer schallharten Wand positioniert, sondern mittig im Rohr und der Rohrabschluss ist schallweich. Mithilfe von Mikrofonen vor und hinter der Probe werden die einlaufende, reflektierte und transmittierte Welle berechnet, aus denen wiederum das Schalldämmmaß ermittelt wird. Ein solcher Aufbau wurde als Simulationsmodell aufgebaut. Dieser ist in Abbildung 50 dargestellt.



Abbildung 50: Simulationsmodell Schalldämmmaß im Impedanzrohr

Das resultierende Schalldämmmaß der Materialien 1 bis 3 ist in Abbildung 51 dargestellt. Es zeigt sich, dass Material 1 (mit nur Flachsfasern) ein deutlich geringeres Schalldämmmaß von maximal 14 dB im Gegensatz zu den anderen beiden Materialien mit einem maximalen Schalldämmmaß von über 18 dB aufweist. Nur geringe Unterschiede sind zu erkennen zwischen Material 3 mit nur Baumwolle und der gemischten Faser in Material 2. Hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Absorption und Schalldämmmaß und die Stärke von numerischen Simulationen, mit denen verschiedene Eigenschaften eines Materials im Verhältnis schnell ermittelt werden können. Es zeigt sich ein großes Potential von Baumwollfasern, auch wenn diese nur zum Teil den Flachs ersetzen.

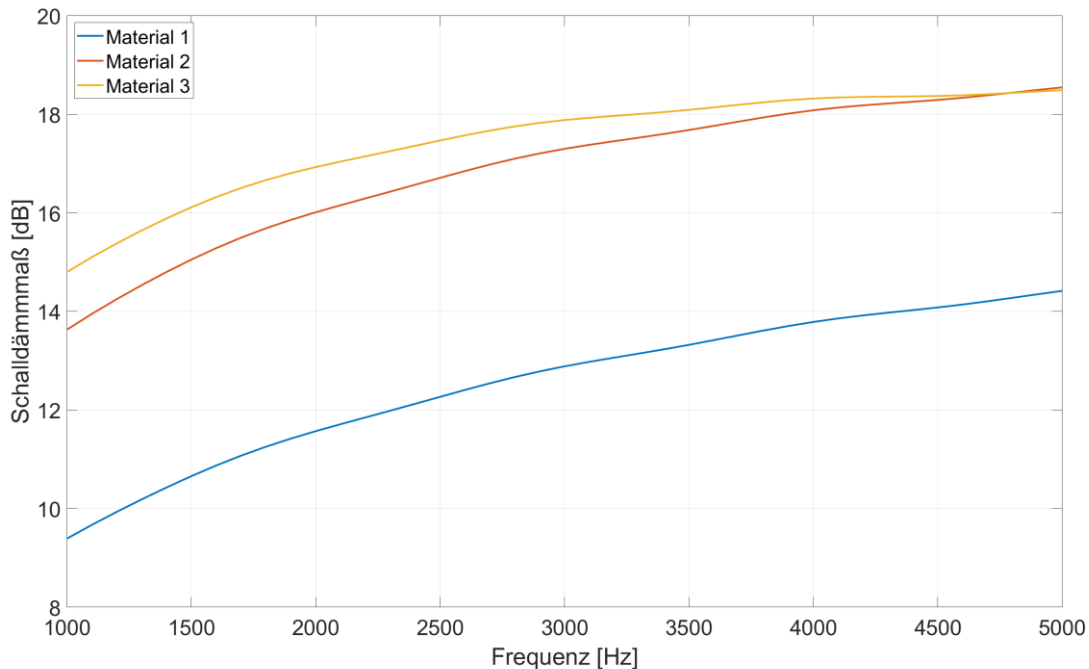


Abbildung 51: Schalldämmmaß im Impedanzrohr der Materialien 1, 2 und 3 im Vergleich

Aufgrund der aufwendigen Probenherstellung konnten nur gewisse Materialkonstellationen hergestellt werden. Mit numerischen Methoden wurden daher noch weitere Zusammensetzungen untersucht. Zielgröße war dabei weiterhin der Absorptionsgrad.

Mögliche Parameter sind der Anteil an PLA, Baumwolle und Flachs. Der PLA-Anteil wurde bei den Untersuchungen konstant gehalten. Zunächst wurde ein Anteil von 25% PLA untersucht. Dafür wurde aus den Materialien 1,2 und 3 mit 75% Flachs, je 37,5% Flachs und Baumwolle und 75% Baumwolle je eine Probe ausgewählt, die das angestrebte Flächengewicht hat. Bei einer Probe mit einem Durchmesser von 29 mm sind das $0,55 \pm 0,01$ g. Unterschiedliche Masse ist daher kein Einflussfaktor für Unterschiede in den Absorptionseigenschaften. Hier wurden noch einmal andere Proben verwendet als in der ersten Untersuchung, da in den Messungen hohe Streuungen innerhalb eines Materials gesehen wurden.

Zunächst wurden auf gleiche Weise wie zuvor die Biot-Parameter ermittelt. Der Absorptionsgrad der drei ausgewählten Proben ist in Abbildung 52 dargestellt. Ein Unterschied der drei Proben ist die Dicke. Je höher der Baumwollanteil, desto dicker ist das Material. Die Spanne der drei Proben ist von 1,4 mm bis 1,6 mm, wobei der höchste Absorptionsgrad für die reine Baumwollprobe erzielt wird.

Die resultierenden Parameter sind in Tabelle 6 dargestellt. Der Strömungswiderstand der reinen Flachsprobe ist mit $1,9 \text{ MNs/m}^4$ deutlich geringer als der der reinen Baumwollprobe mit $3,9 \text{ MNs/m}^4$. Noch höher ist der Strömungswiderstand der gemischten Probe mit $5,3 \text{ MNs/m}^4$. Die kleineren Poren bei Baumwollfasern erklären den erhöhten Strömungswiderstand gegenüber Flachs. Der noch höhere Strömungswiderstand der gemischten Probe kann durch lokale Unterschiede in den Materialien hervorgerufen werden. Die Gewundenheit steigt mit erhöhtem Baumwollanteil an, was auch der Erwartung entspricht. Die viskose Länge zeigt nahezu keine Unterschiede auf. Die thermische Länge, als Maß für den Porendurchmesser, zeigt größere Poren für die reine Flachsprobe und vergleichbare Werte für die gemischte und die Baumwollprobe. Die Porosität steigt mit zunehmendem Baumwollanteil an, was auch an der erhöhten Dicke der Probe zu erkennen ist.

Diese Parameter wurden für bekannte Anteile von Baumwolle und Flachs ermittelt. Der Anteil an Baumwolle wurde anschließend als variabler Parameter betrachtet. Da der PLA-Anteil konstant ist, ergibt sich der Flachsanteil. Die ermittelten Biot-Parameter wurden über den variablen Parameter Baumwolle interpoliert. Sie

sind unabhängig von der Dicke. Das Ergebnis ist in Abbildung 53 dargestellt. Mithilfe der Interpolation kann der Absorptionsgrad für beliebige Baumwollanteile (bis max. 75%) dargestellt werden. Dies ist im linken Bild von Abbildung 54 dargestellt. Der Absorptionsgrad bei 0% Baumwolle ist am geringsten. Mit steigendem Baumwollanteil wird eine verbesserte Absorption bei niedrigeren Frequenzen erreicht. Als weiterer Parameter wurde die Probendicke hinzugefügt, da spätere Funktionsmuster mitunter dicker als 1,5 mm sein werden. Aufgrund des Lagenaufbaus ist keine variable Dicke möglich. Hier wurden lediglich ganzzahlige Schichten berücksichtigt. In Abbildung 54 (Mitte und Rechts) sind die berechneten Absorptionsgrade für 6 und 8 Schichten dargestellt. Aufgrund der erhöhten Dicke wird eine verbesserte Absorption (unabhängig vom Material) bei niedrigen Frequenzen erreicht. Das Maximum der Absorption wird ebenfalls bei niedrigeren Frequenzen erreicht und ist mitunter geringer als für dünnere Proben. Auffällig ist die Probe mit 75% Flachs, die bei 8 Schichten einen deutlich höheren maximalen Absorptionsgrad hat als alle anderen Konfigurationen. Dies gilt allerdings nur für die höheren Frequenzen über 2000 Hz. Im unteren Frequenzbereich bis 2000 Hz führt ein hoher Baumwollanteil weiterhin zu einer verbesserten Absorption.

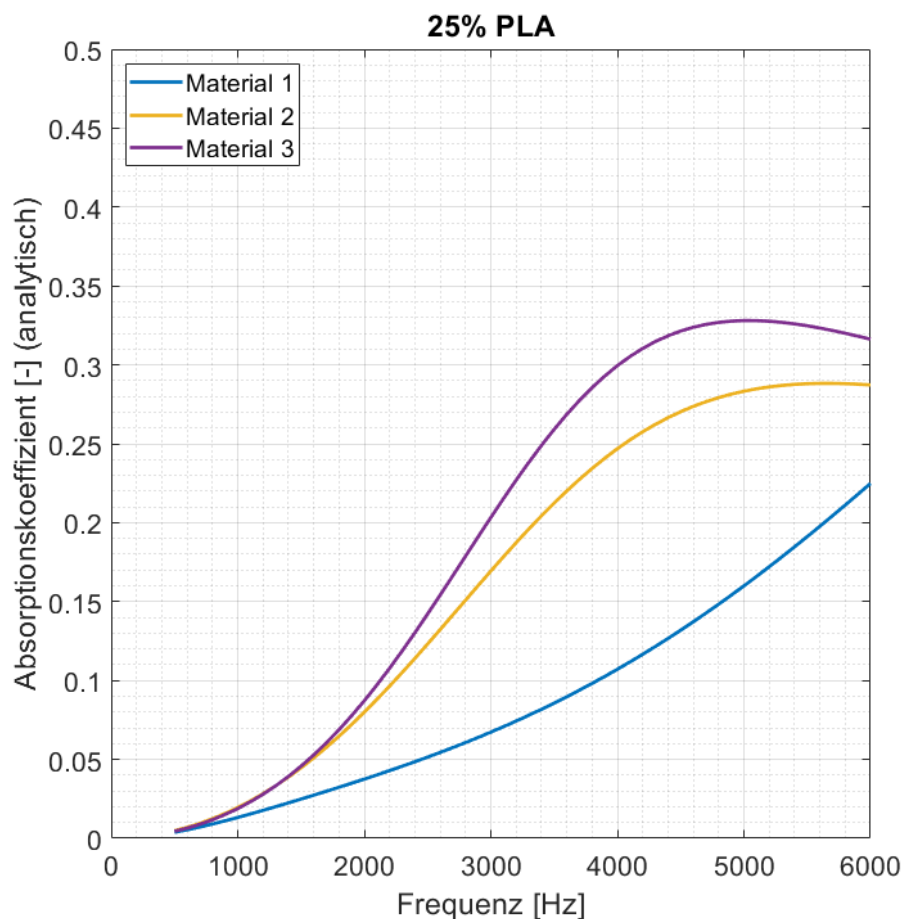


Abbildung 52: Absorptionsgrad von Material 1, 2 und 3 mit jeweils 25% PLA

Tabelle 6: Biot Parameter der Materialien mit 25% PLA-Anteil

Material	Dicke [mm]	Strömungswiderstand [MN s/m ⁴]	Porosität [-]	Gewundenheit [-]	Viskose Länge [µm]	Thermische Länge [µm]
1	1,4	1,9	0,64	1	0,9	108
2	1,55	5,3	0,67	2	0,8	10
3	1,6	3,9	0,72	3	1,2	12

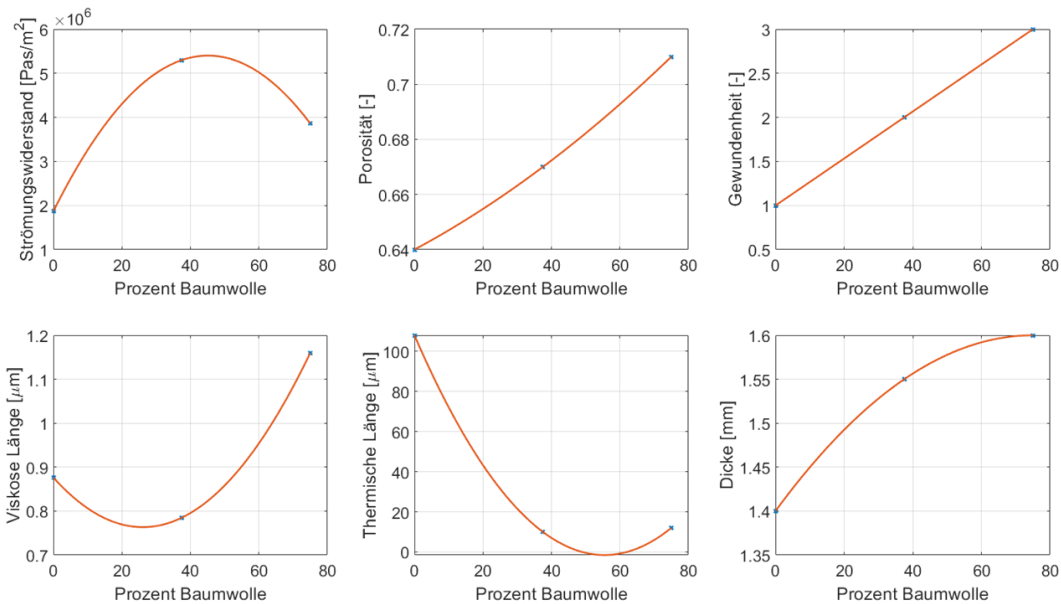


Abbildung 53: Interpolation der akustischen Materialparameter der Materialien mit 25% PLA-Anteil. Variabler Parameter: Anteil Baumwolle.

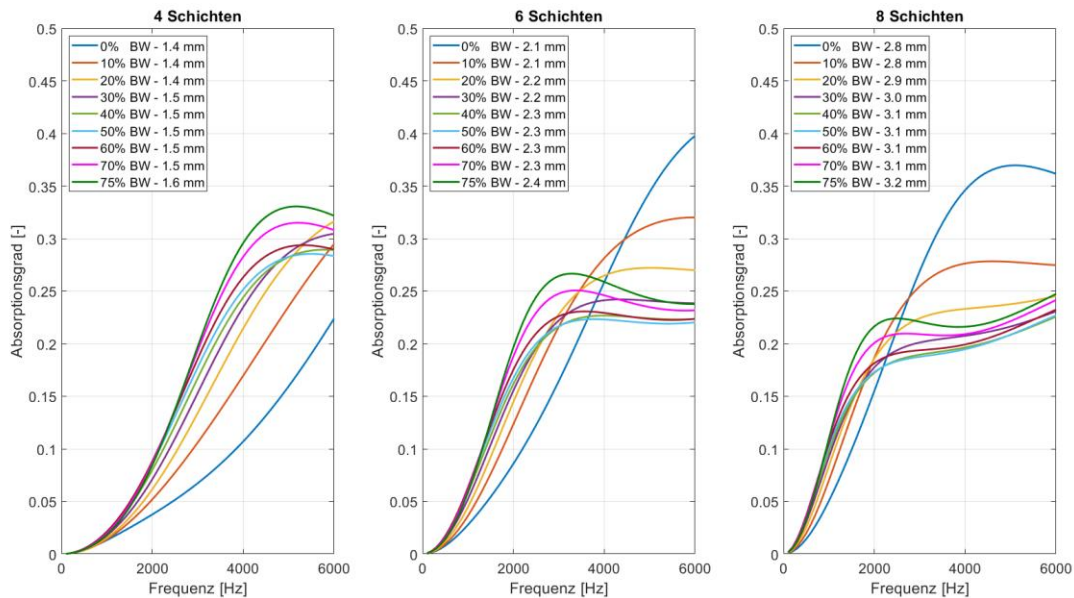


Abbildung 54: Absorptionsgrad für 25% PLA-Anteil in Anhängigkeit des Baumwollanteils und der Schichtanzahl

Das gleiche Vorgehen wurde mit drei Materialien, die einen Anteil von 50% PLA haben, wiederholt. Proben mit 75% PLA wurden nicht untersucht, da der Absorptionsgrad sehr gering ist und in den Messungen kaum bis keine Unterschiede in den verschiedenen Naturfasern gesehen wurde. Der PLA-Anteil ist bei diesen Proben entscheidend für die akustischen Eigenschaften.

Der Absorptionsgrad der Materialien 4, 6 und 8 ist in Abbildung 55 dargestellt. Diese Materialien sind alle dünner als die zuvor untersuchten mit 25% PLA-Anteil. Die Absorptionsgrade sind entsprechend niedriger. Das Material 8 mit 50% Baumwollanteil zeigt im gesamten Frequenzbereich die höchste Absorption. Das gemischte und reine Flachsmaterial zeigen ähnliche Absorptionseigenschaften mit leicht anderer Steigung. Die ermittelten Biot Parameter sind in Tabelle 7 dargestellt. Hier zeigen sich ähnliche Tendenzen wie für 25% PLA. Porosität und Gewundenheit nehmen mit steigendem PLA-Anteil zu. Viskose und thermische Länge sind ebenfalls in der gleichen Größenordnung. Der Strömungswiderstand steigt hier mit dem PLA-Anteil kontinuierlich an. Die Unterschiede zu 25% PLA, wobei das gemischt Material den höchsten Strömungswiderstand aufweist, ist mit lokalen Inhomogenitäten erklärbar.

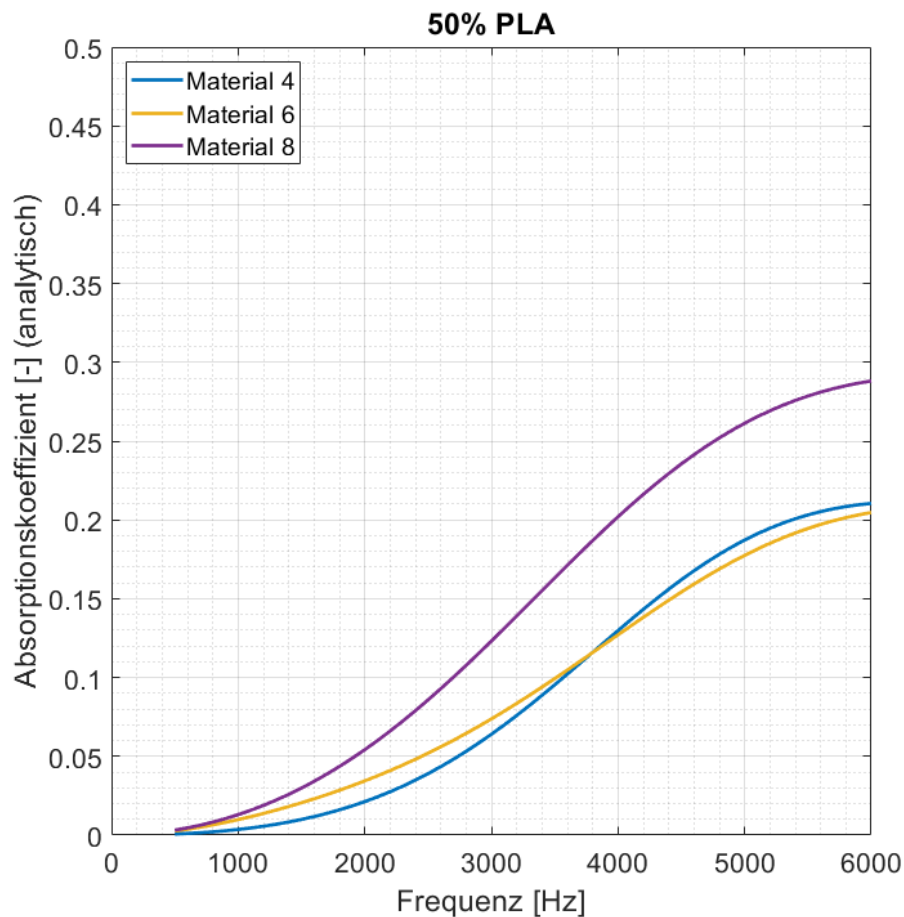


Abbildung 55: Absorptionsgrad von Material 4, 6 und 8 mit jeweils 50% PLA

Tabelle 7: Biot Parameter der Materialien mit 50% PLA-Anteil

Material	Dicke [mm]	Strömungs-widerstand [MN s/m ⁴]	Porosität [-]	Gewunden-heit [-]	Viskose Länge [µm]	Thermische Länge [µm]
4	1	2,5	0,46	1,8	0,40	41
6	1,1	4,8	0,50	1,9	0,44	108
8	1,35	5,9	0,64	3,0	1,20	10

Auch für 50% PLA-Anteil wurde der Absorptionskoeffizient in Abhängigkeit des Baumwollanteils (bis 50%) und die Abhängigkeit der Anzahl der Lagen berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 56 dargestellt. Die höchste Absorption wird, im Gegensatz zu 25% PLA, unabhängig von der Dicke und der Frequenz für den höchsten Baumwollanteil erzielt. Wie zuvor zeigt sich ein verringertes Absorptionsmaximum bei niedrigeren Frequenzen und steigender Probendicke.

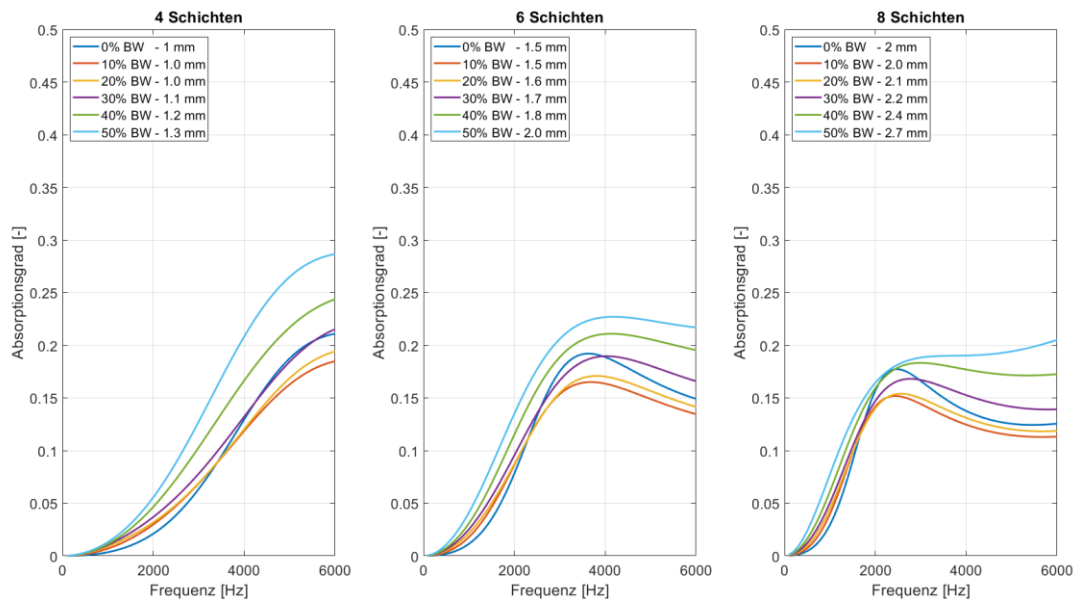


Abbildung 56: Absorptionsgrad für 50% PLA-Anteil in Anhängigkeit des Baumwollanteils und der Anzahl der Schichten

Im Konsortium wurden die Ergebnisse diskutiert. Daraus hat sich für den optimierten Demonstrator eine Materialzusammensetzung von 50% PLA, 25% Baumwolle und 25% Flachs ergeben. Zwar werden bei einem Anteil von 75% Naturfasern bessere akustische Ergebnisse erwartet, diese würden aber höhere Kosten bedeuten und sich nicht gut mit dem aktuellen Industriestandard von 50% Naturfasern vergleichen lassen. Außerdem wurde das gemischt Material aus Flachs und Baumwolle gewählt, da Flachs ebenfalls weniger Kosten in der Herstellung bedeutet und die Steifigkeiten des gemischten Materials vergleichbar sind zu Materialien aus reinem Flachs.

Arbeitspaket 5.3: Numerische Charakterisierung des Funktionsmusters

Für den abschließenden Demonstrator wurde beim Projektpartner FIBRE ein Vliesstoff mit dem im Konsortium abgestimmten Materialien (50% PLA, 25% Baumwolle und 25% Flachs) hergestellt. Diese Vliese wurden bei Polyvlies konsolidiert. Daraus wurden mehrere plane Matten wie zuvor und ein Türverkleidungsteil hergestellt. Die Matten wurden wie zuvor im Impedanzrohr vermessen, das Bauteil wurde numerisch untersucht. Der Demonstrator ist in Abbildung 57 abgebildet. Eine einzelne Matte und eine beispielhafte Probe sind in Abbildung 58 dargestellt.



Abbildung 57: Demonstrator

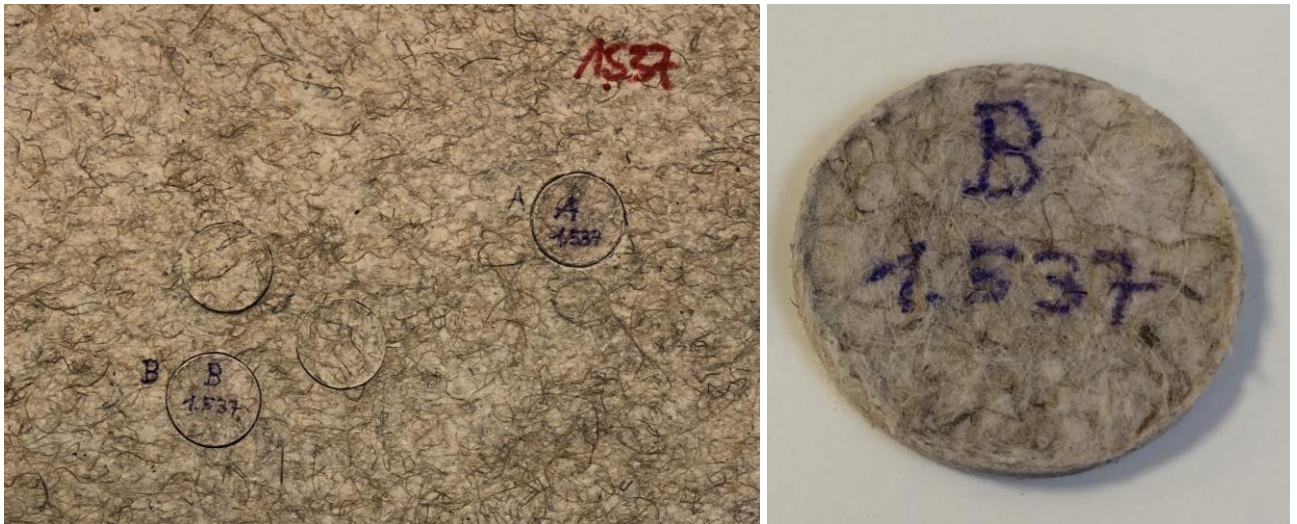


Abbildung 58: Material für den Demonstrator aus 50% PLA, 25% Baumwolle und 25% Flachs

Um einen Vergleich zum aktuellen Industriestandard zu ermöglichen, wurden von Polyvlies Vliesstoffe mit 50% Polypropylen (PP), 25% Baumwolle und 25% Flachs hergestellt. Diese wurden beim FIBRE konsolidiert. Eine beispielhafte Probe ist in Abbildung 59 dargestellt. Diese Proben wurden ebenfalls im Impedanzrohr vermessen. Mithilfe der Absorptionmessungen wurden die Biot-Parameter für beide Materialien ermittelt. Diese sind in Tabelle 8 aufgelistet.



Abbildung 59: Referenzmaterial aus 50% PP, 25% Baumwolle und 25% Flachs

Der Strömungswiderstand beider Materialien unterscheidet sich leicht mit 1 zu 1,4 MNs/m⁴. Die Porosität ist beim Demonstrator mit 55% etwas niedriger als bei der Referenz. Die Gewundenheit ist vergleichbar. Leichte Unterschiede sind in der thermischen und viskosen Länge zu erkennen, die Größenordnung ist aber die gleiche. Da diese insbesondere durch die Naturfasern bestimmt werden, ist dies auch zu erwarten. Unterschiede in der Porosität und im Strömungswiderstand kommen durch die andere Dichte von PP gegenüber PLA, sowie die Interaktion der Bindefaser mit den Naturfasern.

Tabelle 8: Biot-Parameter des Demonstrators und des Referenzmaterials

Material	Dicke [mm]	Strömungswiderstand [MN s/m ⁴]	Porosität [-]	Gewundenheit [-]	Viskose Länge [μm]	Thermische Länge [μm]
Referenz	4,25	1,0	0,59	4	10	149
Demonstrator	2,3	1,4	0,55	4	3,7	119

Mithilfe der ermittelten Parameter wurde der Absorptionskoeffizient analytisch berechnet. Dieser ist in Abbildung 60 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Referenz als 16-lagiges Material hergestellt wurde und der Demonstrator nur 8-lagig, da Anwendungen wie Türverkleidungen Materialien in der Größenordnung 2,5 mm verwenden. Die dargestellt analytischen Kurven entsprechen nahezu den gemessenen Kurven. Die Referenz zeigt eine höhere Absorption, was insbesondere an der größeren Dicke von 4,25 mm gegenüber 2,3 mm liegt. Daher wurde die Absorption jeweils für die andere Dicke berechnet. Diese Vergleiche sind in Abbildung 61 dargestellt. Im Vergleich der beiden Materialien bei 4,3 mm erkennt man insbesondere beim Demonstrator wieder den Effekt, dass die Absorption zu niedrigeren Frequenzen höher wird. Allerdings ist der maximale Absorptionskoeffizient geringer. Für Frequenzen bis 3000 Hz erzielt der Demonstrator eine verbesserte Absorption. Obwohl die akustischen Eigenschaften im unteren Frequenzbereich unter Erhaltung der Steifigkeit im Allgemeinen nur schwer zu verbessern sind, konnte der Absorptionsgrad erhöht werden. Für die 2,3 mm dicken Materialien ist das Demonstrator Material sogar im gesamten Frequenzbereich besser als die Referenz. Hier kann eine Verbesserung bis zu 0,14 im Absorptionskoeffizient erreicht werden.

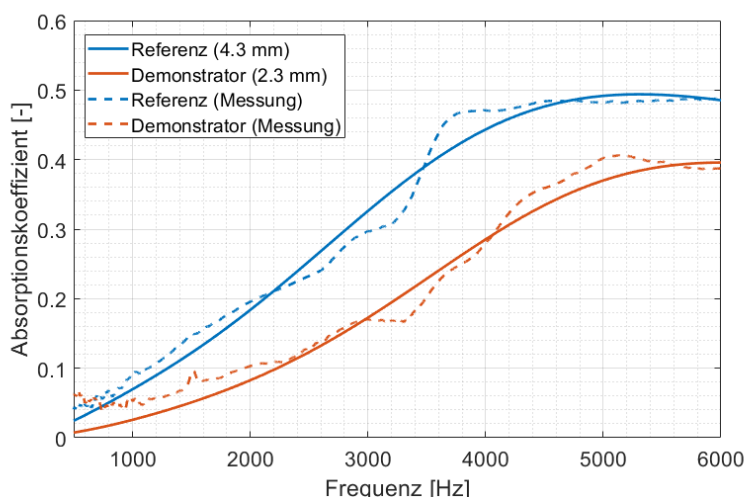


Abbildung 60: Absorptionskoeffizient (analytisch und gemessen) des Demonstrators und der Referenz

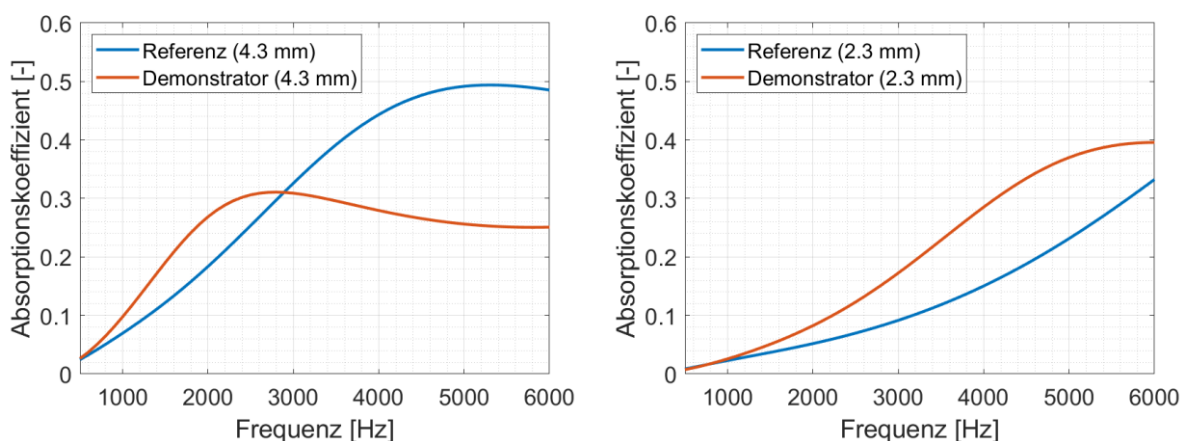


Abbildung 61: Absorptionskoeffizient (analytisch) des Demonstrators und der Referenz in verschiedenen Dicken

Abschließend wurden Demonstrator- und Referenzmaterial in der Größenordnung des Funktionsmusters numerisch untersucht. Dafür wurde ein generisches Modell einer Autotürverkleidung gewählt, da die Geometrie des Demonstrators nicht vorlag. Die Türverkleidung hat eine ungefähre Größe von 400 x 700 mm und ist in Abbildung 62 dargestellt. Im Vergleich zum Simulationsmodell des Impedanzrohres entstehen zwei große Unterschiede. Zum einen ist die geometrische Abmessung des Bauteils deutlich größer als die einer Impedanzrohrprobe. Dadurch erhöht sich die Anzahl der Freiheitsgrade des Modells und die Rechenzeit steigt an. Daher wurde ein für diese Größenordnung effizientes Modell entwickelt, das ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Elementgröße, die die Genauigkeit des Ergebnisses definiert, und Rechenzeit erzielt. Zum anderen ist die Anregung im Impedanzrohr lediglich in Normalenrichtung der Materialprobe. In der Realität ist dies nicht gegeben. Daher wird in diesem Modell ein Diffusfeld simuliert, mit dem die Türverkleidung aus allen Raumrichtungen angeregt wird.

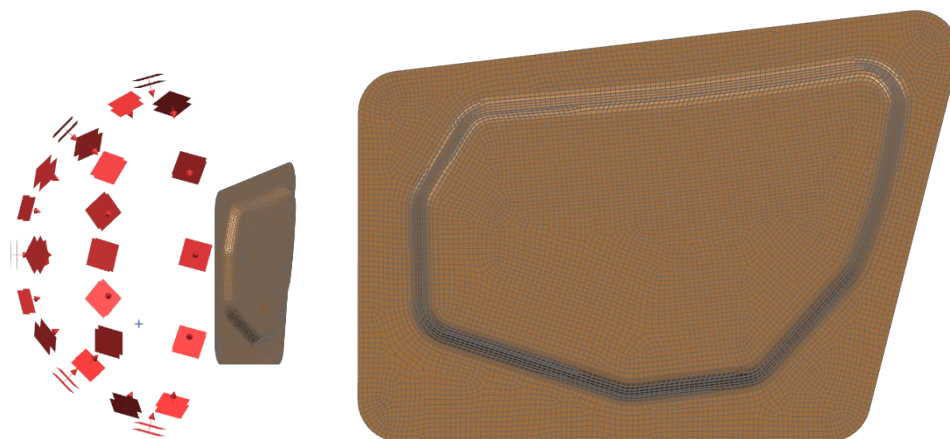


Abbildung 62: Simulationsmodell eines beispielhaften Funktionsmusters

Die zu ermittelnde akustische Zielgröße ist das Schalldämmmaß, das am besten die akustischen Eigenschaften im Anwendungsfall abbildet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 63 dargestellt. Es zeigt sich, dass das Schalldämmmaß bei Diffusfeld-Anregung wie erwartet etwas geringer ausfällt als bei normalen Schalleinfall. Mit bis zu 13 dB gegenüber 8,5 dB kann mit dem Demonstratormaterial eine deutliche Verbesserung nicht nur in der Absorption, sondern auch im Schalldämmmaß erzielt werden. Die Zielsetzung einer Verbesserung von 20% konnte somit erreicht werden.

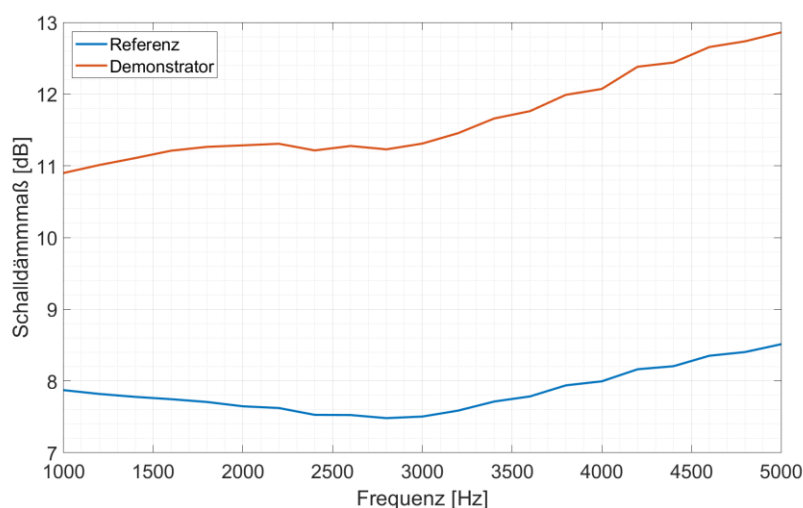


Abbildung 63: Schalldämmmaß des Demonstrators und der Referenz

Arbeitspaket 6: Dokumentation und Bewertung der Ergebnisse

Es wurde gezeigt, dass die naturfaserverstärkten Kunststoffe, insbesondere mit Baumwolle, ein hohes Potential für akustische Anwendungen, bei denen die Absorption oder das Schalldämmmaß möglichst hoch sein soll, besitzen. Ein positiver Effekt von NFK mit PLA-Matrixfasern ist die vollständige Kompostierbarkeit. Für die industrielle Anwendung von NFK gilt es insbesondere die Kosten im Blick zu behalten, da PLA höhere Herstellungskosten als PP aufweist. Ebenso sind Baumwollfasern teurer als Flachsfasern. Hier kann allerdings auf Linters ausgewichen werden, die deutlich günstiger in der Herstellung sind. Ob sich die teureren Produkte lohnen, ist daher eine Frage des Anwendungsfalles. Die genaue Zusammensetzung der NFK für ein bestimmtes Anwendungsszenario kann mithilfe der entwickelten Simulationsmethodik hinsichtlich Materialeigenschaften und Kosten optimiert werden.

Werden besonders steife Materialien benötigt, so sollte der Baumwoll- und Flachanteil möglichst geringgehalten werden. Auch wenn gute Steifigkeiten erreicht wurden, nimmt diese mit steigendem Naturfaseranteil ab. Ist ein besonders günstiges Material gefragt, sollten Flachsfasern verwendet werden. Sie erreichen solide Absorptionswerte ohne teure Herstellungskosten.

Für Anwendungen, in denen eine gute Akustik gefordert wird, sind Materialien mit Baumwolle oder zumindest Baumwollanteilen eine sinnvolle Investition. Sie bietet eine akustische Verbesserung, bei der keine zusätzliche Masse oder zusätzlicher Bauraum benötigt wird. Beides würde bei konventionellen Materialien ebenfalls zu höheren Herstellungskosten führen. Hier ist also eine Betrachtung des komplexen Produktes und nicht allein des absorbierenden Materials sinnvoll, um die Kosten zu relativieren. Die optimale NFK-Materialzusammensetzung für komplexe Bauteile kann mithilfe der entwickelten Materialmodellierung im Kontext einer Multiskalenoptimierung (Steifigkeit, akustische Eigenschaften, Kosten, etc.) numerisch bestimmt werden.

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Es wurden keine Erfindungen oder Schutzrechte angemeldet oder erteilt.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Teilergebnisse des Projekts konnten im Rahmen von Dienstleitungen bereits erfolgreich in der Automobil- und Luftfahrtindustrie wirtschaftlich verwertet werden. Dabei hat sich insbesondere die Verwendung des entwickelten Vorgehens zur Charakterisierung der akustischen Materialparameter durch die Kombination von Messdaten, Simulation und Optimierung als sehr effektiv erwiesen, um die akustischen Eigenschaften von Bauteilen zu verbessern. Dementsprechend konnte bereits kurzfristig das Bestandskundengeschäft ausgebaut werden. Dies hat Novicos dazu veranlasst einen weiteren Mitarbeiter zur Durchführung solcher Projekte einzustellen. Die erzielten Projektergebnisse erweitern bereits jetzt das Dienstleistungsportfolio von Novicos. Die erzielte Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation weist eine verbesserte Prognosequalität der akustischen und vibroakustischen Eigenschaften von Bauteilen auf. Insbesondere die Anwendung der verschiedenen Materialmodelle und die Eruiierung deren Anwendungsbereiche sowie die Wahl geeigneter Optimierungsverfahren führt gegenüber dem Wettbewerb zu einem Know-How-Vorsprung, der sich mittelfristig in dem Auftragseingang am Industriestandort Deutschland positiv widerspiegeln sollte. Sofern das wirtschaftliche Umfeld stabil und das Interesse verschiedener Industriebereiche erhalten bleibt, soll nach weiterer Nutzung der Projektergebnisse innerhalb des nächsten Jahres damit begonnen werden die Erkenntnisse über das akustische Verhalten mehrlagiger NFK in einem Softwaretool zu kommerzialisieren. Bei der Implementierung kann Novicos auf eine langjährige Expertise im Bereich der Softwareentwicklung zurückgreifen. Die Inhouse-Entwicklung bietet den großen Vorteil, dass auch auf individuelle Kundenwünsche effizient und flexibel eingegangen werden kann.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Durch das Projekt hat Novicos wichtige Erfahrungen sammeln können. Dabei konnte Novicos seine Expertise und Erfahrungen aus anderen Industriebereichen effizient in die Bearbeitung der Aufgaben einfließen lassen. Bereits kurzfristig wurde die im Rahmen dieses Projektes optimierte inverse Charakterisierung zur Bestimmung der akustischen Materialparameter in Dienstleistungsprojekten aus dem Automobilbereich und der Luftfahrt erfolgreich in andere Industriezweige überführt. Des Weiteren wurden die Projektergebnisse in mehreren Workshops firmenintern aufbereitet und zur Schulung der Mitarbeitenden verwendet. Hier ist kurz- und mittelfristig eine weitere Verwertung der erzielten Ergebnisse im Rahmen von aktuellen und zukünftigen Dienstleistungs- und Forschungsprojekten zu erwarten. Dabei wird davon ausgegangen, dass insbesondere die im Rahmen des Projektes entwickelten Simulationstechniken bereits kurzfristig firmenintern eine Weiterverwendung finden. Durch die Vorstellung der Ergebnisse auf Fachkonferenzen und -journals konnte der Bekanntheitsgrad von Novicos erweitert werden. Zusätzlich wurde das Fachpublikum bzgl. der

akustischen Eigenschaften und Möglichkeiten, die NFK bieten, sensibilisiert. Ein erster akademischer Austausch hat bereits stattgefunden und soll kurz- bis mittelfristig fortgeführt werden. Nach ersten Interessensbekundungen aus der Industrie ist eine Übertragung des entwickelten Vorgehens zur Charakterisierung und Vorhersage der Materialeigenschaften auf weitere Anwendungsbereiche mittel- bis langfristig zu erwarten.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die entwickelte Charakterisierung und Modellierung von Naturfaserwerkstoffen führt bereits jetzt zu einer guten Schallprognosequalität von Bauteilen und trägt zur Generierung eines detaillierten Verständnisses deren Wirkweise bei. Das entwickelte Vorgehen eignet sich darüber hinaus zur Integration in eine multidisziplinäre Optimierungsumgebung. Je schneller die Toolchain durchlaufen werden kann, desto mehr Varianten können bewertet werden. Vor diesem Hintergrund stellt die Reduktion der Rechenzeit durch die Kombination der entwickelten Technik mit Verfahren der künstlichen Intelligenz (KI) ein interessantes und vielversprechendes Forschungsgebiet dar. Aus den Projektergebnissen sowie den fachlichen Diskussionen mit den Projektpartnern FIBRE und Polyvlies sind Ideen einer möglichen Zusammenarbeit erwachsen, die nach dem Projektende genauer eruiert werden. Dabei geht es um einen Mehrwert für den Kunden von Polyvlies durch die Angabe der akustischen Eigenschaften einen Mehrwert zu bieten und zum anderen um Produktverbesserungen. In diesem Kontext werden mögliche Themen für anknüpfende Forschungsvorhaben diskutiert. Abschließende Ergebnisse dieses Austauschs sind mittelfristig zu erwarten. Die Ergebnisse des Projekts wurden darüber hinaus einem breiten Fachpublikum präsentiert und haben speziell aufgrund der Kombination aus Nachhaltigkeit und verbesserten akustischen Eigenschaften zu großem Interesse geführt. Infolgedessen wurden neue Kontakte geknüpft und erste Gespräche mit potenziellen Interessenten geführt. Die Gespräche werden fortgeführt, um einen Anforderungskatalog für neue Materialien zu erstellen aus dem ebenfalls weiterführende Forschungsthemen abgeleitet werden können.

3. Erkenntnisse von Dritten

Es sind im Laufe des Projektes keine spezifischen Erkenntnisse von Dritten bekannt geworden, die für den Verlauf des Projektes relevant gewesen wären.

4. Veröffentlichungen

- Boris Dilba, Franziska Stehle, Christiane Gillner, Sören Keuchel, Olgierd Zaleski, Axel Herrmann: „Akustische Eigenschaften naturfaserverstärkter Kunststoffe“. DAGA 2023, Hamburg
- Franziska Stehle, Christiane Gillner, Boris Dilba, Axel S. Herrmann: “Acoustic and airflow resistance characteristics of fibre reinforced composites made of polylactic acid (PLA) and the natural fibres flax and cotton”. ICNF 2023, Funchal
- Franziska Stehle, Christiane Gillner, Boris Dilba, Sören Keuchel, Axel S. Herrmann: „Analysis of airflow resistivity and acoustic absorption of fibre-reinforced plastic composites made of polylactid acid and natural fibres”. (Eingereicht bei Vlákna a textil (Fibres and Textiles))

Literaturverzeichnis

- [1] Z. Hui und X. Fan, „Sound Absorption Properties of Hemp Fibrous Assembly Absorbers,“ *FIBRE 65*, Bd. 7, pp. 191-196, 2009.
- [2] M. A. Biot, „General Theory of Three-Dimensional Consolidation,“ *Journal of Applied Physics*, Bd. 12, pp. 155-164, 1941.
- [3] K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, Wiley, Chichester: Wiley-Interscience series in systems and optimization, 2004.
- [4] R. Horst, P. Pardalos und N. van Thoai, „Introduction to global optimization,“ *Nonconvex optimization and its applications volume 48*, Nr. Kluwer Academic Publishers, Dordrech, 2000.
- [5] R. Motwani und P. Raghavan, *Randomized algorithms*, Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [6] Z. Michalewicz und D. Fogel, *How to Solve It: Modern Heuristics*, Berlin: Springer, 2004.
- [7] J. Livonius, H. Blume und T. Noll, *Design of a Pareto-optimization environment and its application to motion estimation*, 2008.
- [8] C. Ahn, „Advances in Evolutionary Algorithms – Theory, Design and Practice,“ in *Studies in Computational Intelligence no. 18*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [9] H. Mühlenbein und D. Schlierkamp-Voosen, „Analysis of selection, mutation and recombination in genetic algorithms,“ in *Evolution and Biocomputation, Lecture Notes in Computer Science*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 1995, pp. 142-168.
- [10] Y. Nix, „Implementierung einer adaptiven Suchstrategie zur Pareto-Optimierung,“ Bachelor of Science. RWTH Aachen, 2008.
- [11] K. Ozcan und S. Nemlioglu, „In-cabin noise levels during commercial aircraft flights,“ *Canadian Acoustics - Acoustique Canadienne 34*, 2006.
- [12] A. Peiffer, „Full frequency vibro-acoustic simulation in the aeronautics industry,“ 2016.
- [13] M. Biot, „Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range,“ *The Journal of the Acoustical Society of America 28*, Bd. 2, pp. 168-178, 1956.
- [14] Y. Champoux und J. Allard, „Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media,“ *Journal of Applied Physics 70*, Bd. 4, pp. 1975-1979, 1991.
- [15] D. Johnson, J. Koplik und R. Dashen, „Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media,“ *Journal of Fluid Mechanics 176*, Bd. 1, p. 379, 1987.
- [16] J. Allard und N. Atalla, *Propagation of Sound in Porous Media – Modelling Sound Absorbing Materials 2e.*, John Wiley & Sons Ltd, Hoboken, 2009.
- [17] N. Atalla, R. Panneton und P. Deberque, „A mixed displacement-pressure formulaiton for poroelastic materials,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 104, pp. 1444-1452, 1998.
- [18] A. Schumacher, *Optimierung mechanischer Strukturen – Grundlagen und industrielle Anwendungen*, Berlin: Springer, 2013.
- [19] J. Kennedy und R. C. Eberhart, „Particle swarm optimization,“ *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, Bd. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [20] Y. a. P. R. Atalla, „Inverse acoustical characterization of open cell porous media using impedance tube measurements,“ *Canadian Acoustics*, Bd. 33, pp. 11-24, 2005.
- [21] L. Forest, V. Gibiat und T. Woignier, „Biot's theory of acoustic propagation in porous media applied to aerogels and alcogels,“ *Journal of Non-Crystalline Solids 225*, pp. 287-292, 1998.
- [22] Y. Champoux und J.-F. Allard, „Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media,“ *Journal of Applied Physics*, Bd. 70, pp. 1975-1979, 1991.
- [23] D. L. Johnson, J. Koplik und R. Dashen, „Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media,“ *Fluid Mech.*, Bd. 176, p. 379, 1987.

