Charakterisierung von flächigen Schallabsorber auf Basis von natürlichen Vliesstoffstrukturen

Andrés E. Ramos Ruiz¹, Mila Klochkova-Schiefer², Tim Natzschka³, Sebastian Merchel¹, Elke Haase², Sybille Krzywinski², Ercan Altinsoy¹

Technische Universität Dresden, Professur für Akustik und Haptik
 Helmholtzstraße 18, 01062 Dresden, Deutschland, Email: andres.ramos@tu-dresden.de
 Technische Universität Dresden, Institut für Textilmaschinen und textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM)
 Professur für Montagetechnik für textile Produkte Hohe Straße 6, 01069 Dresden, Deutschland
 Norafin Industries (Germany) GmbH, 09456 Mildenau, Deutschland

Einleitung

Reduktion von Lärm und Bürosituationen werden Akustikelementen zum Einsatz gebracht. Die Heimtextilbranche hat vielfältige Akustiktextilien aus Polyester-Vliesstoffen, klassischen Filzen in Kombination mit schallharten Strukturen bzw. Melaminharzschäumen entwickelt [1]. Sie werden in Form von akustisch wirksamen Wand- und Deckenpaneelen oder als Raumteiler eingesetzt. Diese Aufbauten sind meist schwer, kostenintensiv und ggf. umweltschädlich. Dieser Beitrag untersucht, ob eine kostengünstigere und nachhaltigere Lösung mittels textiler Verbundstoffe aus Naturfasern erreicht werden kann. Flachsfasern lassen sich durch mechanische Vernadelung oder Wasserstrahlverfestigung zu Vliesstoffen verarbeiten. Die resultierenden Faserstrukturen ermöglichen eine hohe Porosität und bilden damit hocheffiziente Schallabsorbersysteme [2]. Durch die Kombination von Vliesstoffmatten mit dichten Schichten ist es möglich, Systeme mit breitbandiger Schallabsorption herzustellen. Dies basiert auf der Kombination von poröser Absorption im hochfrequenten Bereich und Plattenresonatoren im niederfrequenten Bereich. Die akustischen Dämpfungseigenschaften verschiedener Strukturen werden messtechnisch mit Hilfe eines Kundt'schen Rohres sowie im Hallraum vermessen [3, 4].

Stand der Technik

Herkömmliche Schallabsorber aus faserigen oder porösen Materialien eignen sich besonders zur Schallabsorption mittlerer und hoher Frequenzen. Das Dämpfungsprinzip beruht auf der Reibung der Luftbestandteilchen an Materialoberflächen. Dazu wird das Absorbermaterial, wie in Abbildung 1a) dargestellt, verwendet.

Eine schallharte Oberfläche (z. B. eine Wand) wird zur Schallabsorption benötigt. Die Absorberoberfläche wird meist durch eine schalldurchlässige Lochplatte begrenzt. Ein Nachteil der gegenwärtig angewandten Konstruktion besteht darin, dass niederfrequente Schallwellen nur bei großen Absorberdicken effektiv absorbiert werden. Dünnere Schallabsorber für niederfrequente Schallwellen lassen sich durch Resonatoren implementieren. Abbildung 1b) zeigt den schematischen Aufbau eines typi-

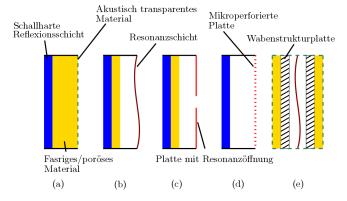


Abbildung 1: Übersicht Absorbertypen: a) Fasriger/poröser Absorber, b) Platten-/Folienresonator, c) Helmholtz-Resonator, d) Mikroperforierter Absorber und e) neuartige Schallabsorbersystem.

schen Plattenresonators. Es wird eine geschlossene Resonanzschicht vor einer Luftfeder gelagert. Die Schallenergie wird durch innere Reibung in der bewegten Platte absorbiert. Ebenfalls auf Resonanz basiert der Helmholtz-Resonator, in Abbildung 1c) dargestellt. Hier schwingt eine Luftmasse in einer Resonanzöffnung gegen die Luftfeder. Eine Erweiterung davon stellt der mikroperforierte Absorber, welcher in Abbildung 1d) skizziert ist, dar. Es kommt zur Reibung der schwingenden Luftbestandteile mit der Oberfläche des Perforats, die aus beliebigen Materialien bestehen kann. Nachteilig bei allen resonanzbasierten Absorbern ist der schmale Wirkungsbereich um die Resonanzfrequenz. Um den Wirkungsbereich zu erweitern, können die Absorptionsprinzipien kombinatorisch in einem Schallabsorbersystem integriert werden. Diese dürfen auch bei geringen Absorberdicken ihre Effizienz nicht verlieren und auf Basis nachwachsender Rohstoffe nachhaltig aufgebaut werden.

Konzept eines Schallabsorbersystems auf Basis nachwachsender Rohstoffe

Um Schallabsorber auf Basis nachwachsender Rohstoffe herzustellen, ist die Entwicklung und Umsetzung einer Produktkonzeption durch Vliesbildung und -verfestigung realisiert. Flachsfasern lassen sich durch mechanische Vernadelung (Needle-Punching Verfahren) oder Wasserstrahlverfestigung (Spunlace-Verfahren) zu Vliesstoffen mit schalldämmender Wirkung verarbeiten. Das Needle-

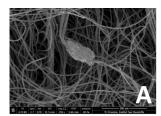
Punching Verfahren (NP) basiert auf der periodische Verfestigung des Faserflors. Abhängig von den Materialeigenschaften und Prozessparametern können verschiedene Materialdichten erreicht werden. Das Spunlace-Verfahren (SL) nutzt feine Hochdruckwasserstrahlen, um das Faserflor mechanisch zu verfestigen. Anhand dieses Verfahrens kann die Dicke des Materials geändert werden. Durch beide Verfahren können Vliesstoffe in unterschiedlichen Dichten hergestellt werden. Faserstrukturen in Vliesstoffen ohne dichte Struktur ermöglichen eine relativ hohe Luftdurchlässigkeit bei geringer Masse und bilden damit hocheffiziente Schallabsorbersysteme. Durch die Kombination von Vliesstoffmatten mit dichten Schichten (z. B. stark komprimierter Vliesstoff) ist es möglich, Feder-Masse-Systeme herzustellen. Diese sind leichter als herkömmliche Materialien. Dadurch können die auf Absorption basierenden Dämpfungseigenschaften im hochfrequenten Bereich mit den Resonatoren im niederfrequenten Bereich in einem einzigen Schallabsorbersystem mit geringer Dicke und Masse vereint werden.

Das Schallabsorbersystem besteht aus mehreren Funktionsschichten, die sich gegenseitig in ihrer jeweiligen Absorptionswirkung unterstützen, wie in der Abbildung 1e) schematisch dargestellt. Die erste Funktionsschicht (Basisvlies - BV) wirkt als klassischer poröser Absorber zur Absorption hoher Frequenzen. Dieser wurde aus 40% Flachs und 60% PLA mittels NP-Verfahren hergestellt. Die poröse Absorption des Basisvlieses kann bei mittleren und hohen Frequenzen verbessert werden, indem zwei Shichten von BV vor und hinter einer akustischen Reflexionsschicht (RF) angeordnet werden. Die RF wird aus demselben BV-Material im Thermoformprozess hergestellt. Innerhalb des Schallabsorbersystems dringen Schallwellen in das BV hinein und werden durch die RF zurück in das BV geleitet. Zusätzlich wird die RF durch geeignete Dimensionierung zu Eigenschwingungen angeregt. Dadurch können niedrige Frequenzen absorbiert werden. Vorläufige Untersuchungen zeigten, dass ein Luftraum zwischen RF und BV die Schalldämpfung innerhalb des Schallabsorbersystems verbessert. Eine Platte aus Pappe mit einem Wabenstrukturperforat wurde in den Räumen zwischen BV und RF platziert. Diese Zusatzplatte verbessert die mechanische Stabilität des gesamten Schallabsorbersystems, welches von einer akustisch transparenten Oberfläche ummantelt ist. Diese übernimmt die Rahmenfunktion. Das Rahmenmaterial (RM) wurde aus 65 % Flachs und 35 % Viskose mittels SP-Verfahren hergestellt. Der Vorteil besteht darin, dass niederfrequente Schallwellen bei geringer Bautiefe absorbiert werden können. Das Schallabsorbersystem soll maximal eine Dicke von 40 mm haben und modular aufbaubar sein.

Materialuntersuchungen

Der Absorptionsgrad des BV soll anwendungsspezifisch konfigurierbar sein. Für die Vliesstoffherstellung wurden die Fasern aus dem Faserballen aufgeschlossen und daraus Vliese mit unterschiedlicher Faserausrichtung, Vliesdicke und -flächenmasse hergestellt. Anschließend wurden diese durch NP- bzw. SL-Verfahren mit un-

terschiedlichen Prozessparametern verfestigt. Bei dem NP-Verfahren sind die Parameter Nadeldichte und Einstichtiefe und beim SL-Verfahren die Anordnung, Dichte und Größe sowie der Druck der Wasserstrahlen variiert worden. Zudem wurden weitere textile Herstellungsverfahren in die Untersuchungen einbezogen, wie die Ausrüstung mit Harzen (Herstellung von naturfaserverstärkten Kunststoffen) sowie das thermische Fixieren von wellig gelegten Vliesstoffhalbzeugen.



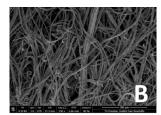


Abbildung 2: Mikroskopische Aufnahmen der Vliesstoffe. Das Basisvlies (A) enthält zufällige Materialanhäufungen. Das Rahmenvlies (B) weist eine komprimierte Struktur auf.

Die Faserfeinheit wurde für natürlich gewachsenen Flachsfasern nach dem Strangverfahren [5] ermittelt. Außerdem wurden die Höchstzugkraft (HZK)und die Höchstzugkraftdrehnung (HZKD) [6] bestimmt. Durch den Vliessstoffherstellungsprozess wird die Faserbeanspruchung während des Herstellungsprozesse führt zu deutlich kürzeren Fasern. Der Mittelwert der Faserlänge ist beim SP-Verfahren kleiner als beim NP-Verfahren sowie den unverarbeiteten Fasern. Mikroskopische Bilder (siehe Abbildung 2) zeigen strukturelle Unterschiede zwischen das NP- und SL-Verfahren sowie intrinsische Imperfektionen im Material. Um die innere Struktur des Basisvlies-Materials zu prüfen, wurden computertomographische (CT) Aufnahmen durchgeführt (siehe Abbildung 3).

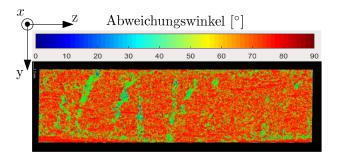
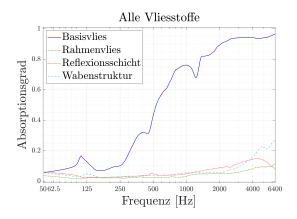


Abbildung 3: CT-Aufnahme des Basisvliesmaterials (Technische Universität Dresden, ILK). Der größte Teil der Faser ist entlang der Herstellungsrichtung (x-Richtung) des Vliesstoffes ausgerichtet.

In dieser CT-Aufnahme (vom ILK, Technische Universität Dresden durchgeführt) wird eine Schicht in der y-z-Ebene des Basisvlies-Materials dargestellt. Die Abbildung 3 zeigt den Abweichungswinkel von 0° bis 90° bezüglich der y-Achse, was der Herstellungsrichtung des Faserflors entspricht. Es kann daraus entnommen werden, dass die Faserrichtung zum größten Teil die Herstellungsrichtung entspricht. Einstichkanäle der Nadeln sind



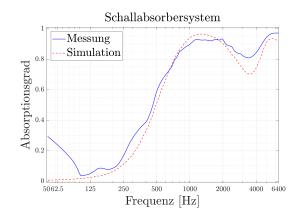


Abbildung 4: Schallabsorptionsgrade aus der Messungen im Kundt'schen Rohr. Links: einzelne Schallabsorbermaterialien. Rechts: das zusammengesetzte Schallabsorbersystem mit einer Gesamtdicke von 40 mm. Die blaue, durchgezogene Kurve stellt das Messergebnis und die rote gestrichelte Kurve das Simulationsergebnis dar.

in der Abbildung 3 grün angezeigt. Weiterhin, kann der Faservolumenanteil aus der tomographischen Aufnahme bestimmt werden, um daraus die Porosität zu berechnen. Eine Auswahl der gemessenen Textilkennwerte ist in der Tablle 1 dargestellt. Diese Größen werden zur analytischen Simulation der akustischen Eigenschaften des Schallabsorbersystems angewandt.

Tabelle 1: Gemessene textilphysikalische Größen des Basisvlies (BV), des Rahmenmaterials (RM) und der Reflexionsschicht (RF).

Größe	Material		
	BV	RM	RF
Dicke [mm]	4,17	0,64	0,99
Porosität [%]	94,07	85,30	k. A.
Flächenmasse $[g m^{-2}]$	335	139	k. A.
${\rm Luftdurchl\ddot{a}ssigkeit}[{\rm Lm^{-2}s^{-1}}]$	470	360	2303

Akustische Untersuchungen

Als raumakustische Parameter wurden der Schallabsorptionsgrad im Kundt'schen Rohr und im Hallraum sowie der Transmissionsverlust bestimmt. Bei den Untersuchungen handelt es sich um einen Schallabsorbersystem mit einer Gesamtdicke von 40 mm. Die akustischen Messungen an einzelnen Schallabsorbermaterialien wurden mit dem Kundt'schen Rohr durchgeführt (siehe Abbildung 4 links). Aus den vier Kurven kann entnommen werden, dass das BV-Material ein typisches poröses Absorptionsverhalten aufweist. Die Wabenstruktur und das RM haben eine sehr geringe Schalldämpfung mit einer Erhöhung des Schallabsorptiongrades ab 2 kHz. Die Reflexionsschicht zeigt keine Dämpfung im niedrigen Frequenzbereich (kleiner als 300 Hz) und eine marginale Erhöhung der Schallabsorption bei ca. 4,5 kHz.

Das Dämpfungsverhalten des Schallabsorbersystems ist in der Abbildung 4 rechts dargestellt. Das Messergebnis der Untersuchung im Kundt'schen Rohr ist mit der blauen, durchgezogenen Kurve dargestellt. Die Kurve zeigt ein erhöhte Schallabsorption ab 500 Hz. Analog zum Ergebnis für die einzelne Reflexionsschicht, findet hier auch keine Dämpfung im niedrigen und mittleren Fre-

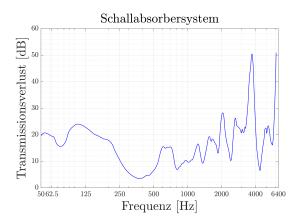


Abbildung 5: Transmissionsverlust des Schallabsorbersystems.

quenzbereich (< 500 Hz) statt, wie es zu erwarten war. Das simulierte Ergebnis ist mit der roten, gestrichelten Kurve dargestellt. Das Schallabsorptionsverhalten stimmt tendenziell mit der gemessenen Kurven überein. Die Diskrepanzen zwischen der gemessen und simulierte Kurve beruhen auf der nicht-vollständigen Modellierung der mechanisch-akustischen Rückkopplung einzelner Elemente, insbesondere die Schwingung der Reflexionsschicht. Der Transmissionsverlust nach [9] ist in der Abbildung 5 dargestellt. Die transmittierte Schallenergie wird im Bereich bis 150 Hz besonders stark gedämpft. Einzelne Frequenzbereiche höherer Dämpfung sind ab 500 Hz detektierbar. Um das Schallabsorbersystem vollständig akustisch zu charakterisieren, wurde einen Prototyp in Wandabsorberanordnung und Trennwandabsorberanordnung zur Messung im Hallraum aufgebaut.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Messungen im Hallraum nach [7] sind in der Abbildung 6 dargestellt. Der Schallabsorberprototyp wurde mit einer Absorberoberfläche von $12\,\mathrm{m}^2$ für beide Anordnungen aufgebaut. Die blaue, gestrichelte Kurve stellt die Schallabsorption für die Wandabsorberanordnung dar. Eine erhöhte Schallabsorption findet ab

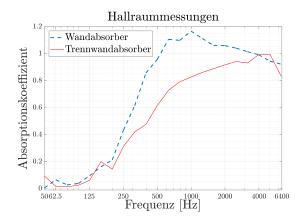


Abbildung 6: Schallabsorptionsgrad des Schallabsorbersystems als Wandabsorber (blaue gestrichelte Kurve) und als Trennwand (rote durchgezogene Kurve), beide Aufbauarten mit der Schallabsorptionsklasse A ($\alpha_w = 1$).

200 Hz statt. Im Bereich 500 Hz bis 4 kHz findet eine Schallabsorption größer 1 statt. Dieses Ergebnis ist durch den Beugungseffekt an den Kanten der Schallabsorberoberfläche zustande gekommen. Die Schallwellen dringen in das Material hinein und durch die erhöhte Schallabsorption findet eine Ummantelung der Schallwelle um die Materialoberfläche statt. Die Größe der virtuellen Schallabsorberoberflächenerweiterung ist direkt proportional zur Wellenlänge. Das Schallabsorbersystem besitzt eine bewertete Schallabsorption von $\alpha_w = 1$ und wird in der Schallabsorptionsklasse A eingestuft [8]. Die rote, durchgezogene Kurve stellt die Schallabsorption für die Trennwandanordnung dar. Die Schallabsorption ist im Mittel geringer im Vergleich zur Wandanordnung. Das Schallabsorbersystem wirkt doppeltseitig und die erhöhte Schallabsorption findet ab 1 kHz statt. Die Absorption im mittleren und tieferen Frequenzbereich (< 1 kHz) ist geringer und für Frequenzen kleiner 250 Hz findet kaum ein schallabsorbierender Effekt statt. Die zu erwartende verstärkte Schalldämpfung im niedrigeren Frequenzbereiche ist aufgrund der resonanten RF nicht vorzufinden. Dies kann durch die Aufspannung innerhalb des Schallabsorbersystems gegeben sein. Weiterhin können Materialparameter der RF (z. B. Dicke und Biegesteifigkeit) varriiert werden um das niederfrequente Dämpfungsverhalten zu optimieren. Das Schallabsorbersystem in Trennwandanordnung weist eine bewertete Schallabsorption $\alpha_w = 1$ auf und wird in der Schallabsorptionsklasse A eingestuft.

In diesem Beitrag wurde ein multifunktionales Schallabsorbersystem aus nachwachsenden Rohstoffen beschrieben. Dieses System wurde aus schallabsorbierenden und -reflektierenden Schichten aufgebaut. Das Funktionsprinzip beruht auf der Kombination von Schallschirmung und Schallabsorption. Sämtliche Materialien wurden geprüft, um daraus notwendige Parameter für die analytische Simulation zu gewinnen. Weiterhin, wurden der Schallabsorptionsgrad im Kundt'schen Rohr und im Hallraum sowie der Transmissionsverlust bestimmt. Ein Simulationswerkzeug zur Vorhersage des Schalldämpfungsverhalten wurde entwickelt. Um präzisere Simulationen durchzuführen, sollen mechanische Phänomene wie die biege-elastische Rückkopplung

innerhalb des Schallabsorbersystems im Simulationswerkzeug implementiert werden. Die Untersuchungen im Kundt'schen Rohr und im Hallraum zeigten, dass die Schalldämpfungswirkung des Schallabsorbersystems auf Basis Naturvliesstoffe mit Schallabsorptionsklasse A zu bewerten ist. Jedoch die erhofften Effekte, wie z. B. die Schalldämpfung mit einem Schallabsortionsgrad größer 0,8 im Frequenzbereich kleiner als 500 Hz, nicht gegeben. Weitere Optimierungsmaßnahmen, wie die Neuauslegung einer Reflexionsschicht und die optimierte Verbindung der Funktionslaver durch verbessertes mechanisches Vernadeln oder durch den Einsatz von Bikomponentenfasern mit anschließender Wärmebehandlung, werden geprüft. Weiterhin sind Prüfungen bezüglich der produkttechnischen Anforderungen hinsichtlich der akustischen Wirksamkeit, dem Brandverhalten und dem Gewicht sowie die Bewertung des Gebrauchsdauerverhaltens geplant.

Danksagung

Das ZIM-Vorhaben ZF4443103GM7, ZF4008321GM7 und ZF4443003GM7 wurde im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestagesgefördert. Die Autoren danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

Literatur

- [1] Ruan, J.-Q., Mosanenzadeh, S. G., Li, X., Yu, S.-Y., Ma, C., Lin, X., . . . Chen, Y.-F. Bimodal hybrid lightweight sound-absorbing material with high stiffness. Applied Physics Express, 12(3), 035002, 2019.
- [2] Watzl, A., The Spunlace Process Technology for Cotton Fibers, International Textile Bulletin, 48 (4): 18–24, 2002
- [3] Amédin, C. K., Champoux, Y., und Berry, A. Acoustical characterization of absorbing porous materials through transmission measurements in a free field. The Journal of the Acoustical Society of America, 102(4), 1997.
- [4] Smith, C. D., und Parrott, T. L. Comparison of three methods for measuring acoustic properties of bulk materials. The Journal of the Acoustical Society of America, 74(5), 1577–1582, 1983.
- America, 74(5), 1577–1582, 1983.
 [5] DIN EN ISO 2060:1995-04, Textilien-Garne von Aufmachungseinheiten-Bestimmung der Feinheit (Masse je Längeneinheit) durch Strangverfahren, 1995
- [6] DIN EN ISO 5079:2020-01, Textilien-Fasern-Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung an Spinnfasern, 2020
- [7] DIN EN ISO 354:2003, Messung der Schallabsorption in Hallräumen, 2003
- [8] DIN EN ISO 11654:1997, Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden Bewertung der Schallabsorption, 1997
- [9] ASTM E2611-17, Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.