Bachelorarbeit

Nr. TS/07/2020

Entwicklung und Optimierung textiler Schallabsorber für Büroräume

eingereicht bei der Fakultät Automobil- und Maschinenbau
der Westsächsischen Hochschule Zwickau
am 01.03.2021

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Bachelor

vorgelegt von: cand. B. eng. H o f m a n n , D o r o t h e e geb. am: 19.11.1984

Studiengang Textile Strukturen und Technologien
Schwerpunkt Funktionstextilien

Auftraggeber: STS Textiles GmbH & Co. KG, Grünbach

Autorenreferat

In dieser Bachelorarbeit werden poröse Schallabsorber aus Abstandsgestricken der STS Textiles GmbH & Co. KG entwickelt, die frei im Raum platziert werden können. Der Fokus liegt auf Eckenabsorbern für die Bedämpfung tiefer Frequenzen, z. B. in Büroräumen. Das Absorptionsvermögen der Prototypen wurde durch Messungen in einer Alphakabine und in einem Hallraum überprüft. Grundentscheidungen für Verkleidungs- und Füllungsoptionen wurden mittels der Methode der statistischen Versuchsplanung getroffen. Es hat sich gezeigt, dass mit säulenförmigen Absorbern verschiedener Ausprägung in tiefen, mittleren und hohen Frequenzbändern sehr hohe Absorptionsgrade (α_s=1) erreicht werden können. Das beste erreichte Ergebnis eines Prototyps liegt bei α_w=0,85, was der Schallabsorberklasse B nach DIN EN ISO 11654 entspricht.

Erklärung zur selbstständigen Anfertigung der Arbeit

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u. a. sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit oder eine ähnliche Arbeit mit in Teilen wesentlicher Inhaltsübereinstimmung noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Auerbach, am 26.2.2021

Dorothee Hofmann

Westsächsische Hochschule Zwickau
Fakultät Automobil- und Maschinenbau

Zwickau, den 07.12.2020

B A C H E L O R A U F G A B E

Nr. TS/ 07/ 2020

für Frau cand. b. eng. Dorothee Hofmann

Studiengang Textile Strukturen und Technologien
Schwerpunkt Funktionstextilien

Tag der Ausgabe:	07. Dezember 2020
Abgabetermin:	01. Februar 2021
Tag der Abgabe:	
Ausgegeben durch:	Prof. Dr.-Ing. Silke Heßberg
Betreuer der WHZ:	Prof. Dr.-Ing. Silke Heßberg Dipl.-Ing. Petra Bleisch
Betreuer des Auftraggebers:	Dipl.-Ing.(FH) Markus Tutsch, STS Textiles GmbH & Co. KG; Grünbach

Thema: **Entwicklung und Optimierung textiler Schallabsorber für Büroräume**

Aufgabenstellung:
Die Firma STS Textiles GmbH & Co. KG entwickelt und produziert mit modernster Stricktechnologie Heimtextilien sowie Technische Textilien für den Automotive-Bereich und zahlreiche andere technische Anwendungen.

Ziel der Bachelorarbeit ist es, auf Basis von Vorentwicklungen im Rahmen der vorangegangenen Praktikumsarbeit textile Schallabsorber weiterzuentwickeln und so zu optimieren, dass sie als wirksame Elemente in Büroräumen eingesetzt werden können. Die Optimierung umfasst die Geometrie der Akustikelemente, deren Füllmaterial sowie die sichtbare Oberfläche, die neben der Schallabsorption auch gestalterische Ansprüche erfüllen soll.

Die besondere Herausforderung besteht darin, die Schallabsorber so zu optimieren, dass sie die Schallabsorptionsklasse A nach DIN EN ISO 11654 erreichen. Als Absorptionsmaterial sollen ausschließlich das bei STS hergestellte Gestricke sowie sonst nicht weiterverwendbare Reste davon eingesetzt werden, so dass nachhaltig produziert wird.

Bearbeitungsschritte:
- Recherche zu aktuellen textilen Schallabsorptionsprodukten
- Auswahl und Optimierung der akustisch wirksamen Materialien (Füllung und Oberfläche)
- Test der Materialien in der Alphakabine
- Erarbeitung verschiedener Optimierungsansätze zur Geometrie der Schallabsorber auf Basis theoretischer Zusammenhänge

Seite 2 Bacheloraufgabe TS/ 07/ 2020 für Frau cand. b. eng. Dorothee Hofmann

- Aufstellung eines Versuchsplanes, Bau und Test der optimierten Absorptionselemente im Hallraum
- Auswahl und Dokumentation der wirksamsten Lösung

Für die Anfertigung der Bachelorarbeit sind die Richtlinien der Fakultät Automobil- und Maschinenbau zu beachten. Wenn sich die Notwendigkeit ergibt, kann der Umfang der Aufgabenstellung vom ausgebenden Hochschullehrer erweitert oder eingeschränkt werden. Veröffentlichungen über den Inhalt der Bachelorarbeit dürfen, sofern die Arbeit mit einem Sperrvermerk versehen wird, nur mit Zustimmung des Auftraggebers vorgenommen werden.

Prof. Dr.-Ing. Silke Heßberg

Prof. Dr.-Ing. Andrea Kobylka
Vorsitzende des Prüfungsausschusses

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen III

Verzeichnis der Tabellen VI

Verzeichnis der Formeln VII

Abkürzungen und Formelzeichen VIII

1 Einleitung 1

2 Textile Schallabsorber für Innenräume 2

2.1 Vorhänge 2
2.2 Teppiche, Teppichboden, Auslegeware 3
2.3 Tapeten, Wandbeläge und -bespannungen 4
2.4 Mobiliar 5
2.5 Schallabsorptionsmodule 6

3 Vorversuche in der Alphakabine 9

3.1 Einleitung 9
3.2 Ergebnisse der Alphakabinen-Messung 9
3.2.1 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung 9
3.2.1.1 Aufstellen der Regressionsgleichung 10
3.2.1.1.1 2^k-Versuchspläne 10
3.2.1.1.2 3^k-Versuchspläne 11
3.2.1.2 Signifikanzprüfung und Adäquatheitstest 12
3.2.1.2.1 2^k-Versuchspläne 13
3.2.1.2.2 3^k-Versuchspläne 14
3.2.2 Planung und Auswertung der Versuchspläne 15
3.2.2.1 Prismenabsorber 15
3.2.2.1.1 2^2-Versuchspläne – Berechnungen 17
3.2.2.1.2 3^2-Versuchsplan – Berechnung 23
3.2.2.1.3 Absorptionsgradsdiagramme 27
3.2.3 Säulenabsorber 30

4 Hallraummessungen 32
4.1 Probenoptimierung 32
4.1.1 Erkenntnisse aus den Messungen in der Alphakabine 32
4.1.2 Theoretische Optimierungsgrundlagen 33
4.1.3 Textiltechnische Beschreibung der Abstandsgestricke 35
4.1.3.1 Allgemeine Materialkennwerte 35
4.1.3.2 Strömungswiderstand 40
4.2 Durchführung und Auswertung der Hallraummessungen 41
4.2.1 1. Hallraummessung (18.1.2021) 41
4.2.2 2. Hallraummessung (9.2.2021) 45
4.3 Wirksamste Lösungen 49

5 Zusammenfassung und Ausblick 51

Quellenverzeichnis 52

Verzeichnis der Anlagen 56

Anlage 1 1

Anlage 2 2

Anlage 3 3

Anlage 4 14

Anlage 5 21

Anlage 6 22

Verzeichnis der Abbildungen

Bild 2-1: Akustikvorhänge zur Raumuntergliederung [12] 3
Bild 2-2: Semitransparente Schallschutzvorhänge vor Fensterfronten [9] 3
Bild 2-3: Akustikrücken SONE® von Interface® zur Verlegung unter Teppichfliesen [15, S. 14] 3
Bild 2-4: Teppichfliesen in Bürolandschaft [16] 3
Bild 2-5: 3D-Textilwandbekleidung auf Vliesstoffunterlage [19] 4
Bild 2-6: Hinterleuchtete, akustische Wandbespannung [24] 4
Bild 2-7: Schallabsorbierendes Sofa in drei Lehnenausführungen [30] 5
Bild 2-8: Schallabsorbierende Möbelserie in Säulenform mit Recycling-Dämpfungsmaterial [29] 5
Bild 2-9: Variable Sitzlandschaft mit Arbeits- und Kommunikationsecken [33] 6
Bild 2-10: Raum-in-Raum-System [34] 6
Bild 2-11: Baffeln aus Fasermaterial [37] 7
Bild 2-12: Deckensegelanordnung [38] 7
Bild 2-13: Akustisch wirksame Trennwände für Sicht- und Schallschutz [43] 8
Bild 2-14: Stoffbespannte und bedruckte Wandabsorberelemente [44] 8
Bild 2-15: Quadratische Akustiksäule in Raumecke [46] 8
Bild 3-1: Ausgabe der Regressionsfunktion im MS Excel für den Versuchsplan P1 19
Bild 3-2: Raumdarstellung der Regressionsgleichung y=0,2125-0,0375x1+0,0625x2+0,0125x1x220
Bild 3-3: Wirkungsdiagramm über die Haupteffekte für den Versuchsplan P1 21
Bild 3-4: Diagramm über die ordinale Wechselwirkung im Versuchsplan P1 21
Bild 3-5: Ausgabe der Regressionsfunktion im MS Excel für den Versuchsplan P2 22
Bild 3-6: Raumdarstellung der Regressionsgleichung y=0,3+0,125x1+0,125x2+0,1x1x2 23
Bild 3-7: Wirkungsdiagramm über die Haupteffekte für den Versuchsplan P2 23
Bild 3-8: Diagramm über die ordinale Wechselwirkung im Versuchsplan P2 23
Bild 3-9: Ausgabe der Regressionsfunktion im MS Excel für den Versuchsplan P3 25
Bild 3-10: Wirkungsdiagramm über die Haupteffekte für den Versuchsplan P3 27
Bild 3-11: Dreidimensionale Darstellung der Regressionsgleichung y=0,63+0,04167x2 27
Bild 3-12: α_s-Darstellung für Versuchsplan P1 28
Bild 3-13: α_{pi}-Darstellung für Versuchsplan P1 28
Bild 3-14: α_s-Darstellung für Versuchsplan P2 28
Bild 3-15: α_{pi}-Darstellung für Versuchsplan P2 28
Bild 3-16: α_s-Darstellung für Versuchsplan P3 29
Bild 3-17: α_{pi}-Darstellung für Versuchsplan P3 29
Bild 3-18: Vergleich von α_s für Proben aus P3 mit und ohne Bezug 30
Bild 3-19: Vergleich von α_{pi} für Proben aus P3 mit und ohne Bezug 30
Bild 3-20: Aufbau der Probe S1-1 31
Bild 3-21: Fertiggestellte Probe S1-1 31

Bild 3-22: Rollenabschnitte der Materialien D147-1080, D155-1012 und D328-1909 (von links) 31
Bild 3-23: Vergleich von α_s der Säulenabsorberproben 32
Bild 3-24: Vergleich von α_{pi} der Säulenabsorberproben 32
Bild 4-1: Material D147-1080 35
Bild 4-2: Mikroskopaufnahme Vorderseite D147-1080 bei 21,2facher Vergrößerung 35
Bild 4-3: Mikroskopaufnahme der großflächigen Henkelabbindungen mit Umschlingung der Füllfäden, Vorderseite, D147-1080, Vergrößerung 50,6fach 36
Bild 4-4: Mikroskopaufnahme Rückseite, D147-1080, Vergrößerung 50,6fach 36
Bild 4-5: Material D155-1012 36
Bild 4-6: Mikroskopaufnahme Vorderseite D155-1012 bei 20,8facher Vergrößerung 36
Bild 4-7: Mikroskopaufnahme Rückseite D155-1012 bei 21,3facher Vergrößerung 36
Bild 4-8: Material D328-1909 37
Bild 4-9: Mikroskopaufnahme Vorderseite D328-1909 bei 26,9facher Vergrößerung 37
Bild 4-10: Mikroskopaufnahme Rückseite D328-1909 bei 21,4facher Vergrößerung 37
Bild 4-11: Mikroskopaufnahme der Henkelabbindung in D328-1909 bei 53,3facher Vergrößerung 37
Bild 4-12: Material D310-1822 (Bezugsstoff) 37
Bild 4-13: Mikroskopaufnahme Vorderseite D310-1822 bei 50facher Vergrößerung 37
Bild 4-14: Mikroskopaufnahme Rückseite D310-1822 bei 30,6facher Vergrößerung 38
Bild 4-15: Mikroskopaufnahme der Henkelabbindung in D310-1822 bei 73,8facher Vergrößerung 38
Bild 4-16: Material D264-1702 38
Bild 4-17: Mikroskopaufnahme Vorderseite D264-1702 bei 21,8facher Vergrößerung 38
Bild 4-18: Mikroskopaufnahme Rückseite D264-1702 bei 21,4facher Vergrößerung 38
Bild 4-19: Versuch Nr. 1 mit 5 Rollen D147-1080 auf 2 Säulen verteilt, Hallraummitte 42
Bild 4-20: Versuch Nr. 3 mit 4 Rollen D328-1909 auf 1 Säule verteilt, Hallraummitte 42
Bild 4-21: Versuche Nr. 5 und 7, 3 übereinander gestapelte Pappprismen, mit je 1 Rolle D147-1080 bzw. D328-1909 gefüllt, Raummitte 43
Bild 4-22: Versuch Nr. 9, 5 Rollen D147-1080 auf 3 Säulen verteilt, verkleidet, Hallraummitte 43
Bild 4-23: Versuch Nr. 10, 4 Rollen D328-1909 auf 2 Säulen verteilt, verkleidet, Hallraummitte 43
Bild 4-24: Versuch Nr. 2, 5 Rollen D147-1080, 2 Säulen, Hallraumecke, nicht normgerecht 43
Bild 4-25: Versuchsauflistung der Hallraummessung vom 18.1.2021 inkl. α_w-Werte 44
Bild 4-26: α_s-Darstellung der Hallraummessung vom 18.1.2021 44
Bild 4-27: α_p-Darstellung der Hallraummessung vom 18.1.2021 44
Bild 4-28: Versuch Nr. 1 mit 4 Rollen Faltenstoff mit Bezug, erhöht, Hallraummitte 45
Bild 4-29: Versuch Nr. 3, 4 Rollen Faltenstoff, ohne Bezug, erhöht, Hallraumecke 45
Bild 4-30: Versuch Nr. 5, Faltenstoff auf quaderförmigen Pappkern gewickelt, erhöht, Raummitte 46
Bild 4-31: Versuch Nr. 6, 4 Rollen Faltenstoff, ohne Kern, erhöht, Hallraummitte 46
Bild 4-32: Versuch Nr. 9, 4 Rollen D328-1909, verkleidet, erhöht, Hallraumecke 46
Bild 4-33: Versuch Nr. 11, 2 Dreiecksprismen mit D328-1909 Faltenstoff gefüllt, ohne Deckel, einzeln, Raummitte 46
Bild 4-34: 2. Hallraumprüfung, α_s-Darstellung der Versuche 2, 3 und 7 47

Bild 4-35: 2. Hallraumprüfung, α_p-Darstellung der Versuche 2, 3 und 7 47
Bild 4-36: Versuchsauflistung der Hallraummessung vom 9.2.2021 inkl. α_w-Werte 47
Bild 4-37: α_p-Darstellung der Hallraummessung vom 9.2.2021 48
Bild 4-38: α_s-Darstellung der Hallraummessung vom 9.2.2021 48
Bild 4-39: α_s-Darstellung der wirksamsten Lösungen 49
Bild 4-40: α_p-Darstellung der wirksamsten Lösungen 49

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3-1: 2^2-Versuchsplan mit Auswertmatrix....11
Tabelle 3-2: 3^2-Versuchsplan mit Auswertmatrix....12
Tabelle 3-3: Prismenabsorber – Einstellungen zu Versuchsplan P1....16
Tabelle 3-4: Prismenabsorber – Einstellungen zu Versuchsplan P2....16
Tabelle 3-5: Prismenabsorber – Einstellungen zu Versuchsplan P3....17
Tabelle 3-6: Auswertmatrix für Versuchsplan P1....18
Tabelle 3-7: Berechnung der Standardabweichung im Zentralpunkt des Versuchsplans P3....18
Tabelle 3-8: Wertetabelle für multiples Bestimmtheitsmaß B (P1)....19
Tabelle 3-9: Auswertmatrix für Versuchsplan P2....22
Tabelle 3-10: Wertetabelle für multiples Bestimmtheitsmaß B (P2)....22
Tabelle 3-11: Auswertmatrix für Versuchsplan P3....24
Tabelle 3-12: Wertetabelle für multiples Bestimmtheitsmaß B (P3)....26
Tabelle 3-13: Temperaturabhängige Wellenlängen ausgewählter Frequenzen....27
Tabelle 4-1: Kennwerte Versuchsreihe S1....33
Tabelle 4-2: Materialkennwerte Abstandsgestricke....40
Tabelle 4-3: Strömungswiderstände Abstandsgestricke einlagig....41

Verzeichnis der Formeln

(1) äquivalente Objektfläche 5
(2) Regressionsgleichung für 2^k-Versuchsplan (lineare Regressionsgleichung) 10
(3) Koeffizient b_0 (lineare Regressionsgleichung) 10
(4) linearer Koeffizient b_m (lineare Regressionsgleichung) 10
(5) Matrixgleichung zur Koeffizientenermittlung 11
(6) Regressionsgleichung für 3^k-Versuchsplan (quadratische Regressionsgleichung) 11
(7) Koeffizient b_0 (quadratische Regressionsgleichung) 11
(8) Mittelwert (quadratische Regressionsgleichung) 11
(9) Korrekturglied e (quadratische Regressionsgleichung) 11
(10) linearer Koeffizient b_m (quadratische Regressionsgleichung) 11
(11) Wechselwirkungsglied b_{lm} (quadratische Regressionsgleichung) 12
(12) quadratisches Glied b_{mQ} (quadratische Regressionsgleichung) 12
(13) anteilige Varianz (lineare Regressionsgleichung) 13
(14) Summenquadrat (lineare Regressionsgleichung) 13
(15) Versuchsstreuung (lineare Regressionsgleichung) 13
(16) Reststreuung (lineare Regressionsgleichung) 13
(17) errechneter Wert für F-Test (lineare Regressionsgleichung) 13
(18) multiples Bestimmtheitsmaß (lineare Regressionsgleichung) 14
(19) Summenquadrat (quadratische Regressionsgleichung) 14
(20) Rest-Summenquadrat (quadratische Regressionsgleichung) 14
(21) Gesamt-Summenquadrat (quadratische Regressionsgleichung) 14
(22) Gesamt-Freiheitsgrad (quadratische Regressionsgleichung) 14
(23) Rest-Freiheitsgrad (quadratische Regressionsgleichung) 14
(24) Tabellenwertabgleich F-Test (quadratische Regressionsgleichung) 15
(25) Reststreuung (quadratische Regressionsgleichung) 15
(26) anteilige Varianz (quadratische Regressionsgleichung) 15
(27) multiple Bestimmtheitsmaß (quadratische Regressionsgleichung) 15
(28) Sabine'scher Absorptionsgrad 33
(29) Schallgeschwindigkeit in Luft 33
(30) Stoffdichte 39
(31) Porosität 39
(32) Strömungswiderstand 40
(33) Luftdurchlässigkeit 40
(34) spezifischer Strömungswiderstand 41
(35) längenbezogener Stömungswiderstand 41

Abkürzungen und Formelzeichen

Formelzeichen/ Abkürzung	Einheit	Erläuterung
α		Schallabsorptionsgrad
α_o		Schallabsorptionsgrad im Impedanzrohr
α_p		praktischer Schallabsorptionsgrad
α_{pi}		praktischer Schallabsorptionsgrad im i-ten Oktavband
α_s		Sabine'scher Schallabsorptionsgrad
α_w		bewerteter Schallabsorptionsgrad
λ	m	Wellenlänge
Ξ	Pas/m^2	längenbezogener Strömungswiderstand
ρ_f	kg/m^3	Stoffdichte
σ	Pas/m^2	längenbezogener Strömungswiderstand
σ		Perforationsgrad
σ		Porosität
ϑ	° C	Temperatur
A	m^2	äquivalente Absorptionsfläche
A_{eq}	m^2	äquivalente Absorptionsfläche
A_{obj}	m^2	äquivalente Objektfläche
b		Koeffizient in Regressionsgleichung
B		multiples Bestimmtheitsmaß
c	m/s	Schallgeschwindigkeit in Luft
CO		Baumwolle
CV		Viskose
CV		CV-Wert (Variationskoeffizient)
d	mm	Durchmesser
d	cm	Dicke
DM		Dämpfungsmaterial
e		Korrekturglied
EL		Elastan
f	Hz (1/s)	Frequenz
FG		Freiheitsgrad
l	mm	Länge
m	kg	Masse
M	kg/m^2	flächenbezogene Masse
MW		Mittelwert
p	Pa	Druck

Formelzeichen/ Abkürzung	Einheit	Erläuterung
PES		Polyester
q_v	m^3/s	Volumenstrom
R	Pas/m^3	Strömungswiderstand
R	mm/s	Luftdurchlässigkeit
rH		relative Luftfeuchtigkeit
R_s	Pas/m	spezifischer Strömungswiderstand
S	m^2	Absorberfläche
s^2		Varianz
S_A	m^2	Absorberfläche
SQ		Summenquadrat
StabW		Standardabweichung
t	°C	Temperatur
T	s	Nachhallzeit
T_1	s	Nachhallzeit im leeren Hallraum
T_2	s	Nachhallzeit mit Absorber
T_{30}	s	Nachhallzeit (Abklingen um 30 dB)
T_{60}	s	Nachhallzeit (Abklingen um 60 dB)
V	m^3	Volumen
x_1, x_2		Faktoren im Versuchsplan

1 Einleitung

Lärm ist ein „Umweltschadstoff“, der nicht nur lästig ist, sondern auch krank machen kann [1, S. 47-48]. In Arbeits- und Lernumgebungen stört er die Konzentration von Menschen und verringert deren Produktivität [vgl. 2, S. 8]. Lärm ist dabei nur die negative Bewertung des neutralen physikalischen Begriffs Schall [3]. Schallwellen werden durch technische Prozesse, beim Sprechen oder durch physikalische Vorgänge wie die Reibung verschiedener Oberflächen gegeneinander emittiert. Sie können durch Absorber jedoch wieder gedämpft – absorbiert – werden. Insbesondere in modernen großräumigen Büroräumen kann es erforderlich werden, zu hohe Schalldruckpegel durch Absorberelemente nachträglich zu bedämpfen, weil die Raumakustik in der Bauphase möglicherweise eine untergeordnete Rolle gespielt hat. In diesem Fall muss dann ein Kompromiss zwischen der Wirksamkeit des Absorbers und dem vorhandenen Platz gefunden werden, denn: Ist ein Absorber doppelt so wirksam, benötigt er mitunter den halben Platz.

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit sollen textile Schallabsorber für den Einsatz in Büroräumen entwickelt und optimiert werden. Dabei sollen vorrangig Abstandsgestricke, die vom Auftraggeber STS Textiles GmbH & Co. KG hergestellt werden, als Dämpfungsmaterial und für die optische Gestaltung zum Einsatz kommen. Hierbei können auch Produkte mit kleinen Mängeln und Reststoffe verwendet werden. Dies stellt eine Besonderheit auf dem Markt für poröse Schallabsorber dar, da der Großteil der Anbieter mit Schäumen oder Vliesstoffmatten als Dämpfungsmaterial arbeitet.

Ziel ist es, dass die entwickelten Absorber die Schallabsorberklasse A nach DIN EN ISO 11654 erreichen. Die Überprüfung des Absorptionsvermögens erfolgt in einer Alphakabine und in einem Hallraum. Optimierungen im Hinblick auf die Geometrie oder die Materialzusammensetzung erfolgen auf Grundlage vorhergehender akustischer Messungen und textiltechnischer Materialuntersuchungen.

Der Hauptteil der vorliegenden Bachelorarbeit ist in drei Teile untergliedert. In Abschnitt 2 wird der Stand der Technik im Bereich textiler Schallabsorptionslösungen für Innenräume behandelt. Abschnitt 3 umfasst die Vorversuche im kleinen Probenmaßstab in der Alphakabine, wobei mittels statistischer Versuchsplanung Einflussgrößen auf das Schallabsorptionsvermögen gefunden werden sollen. In Abschnitt 4 werden verschiedene Optimierungsansätze, deren Anwendung auf den Probenbau und die messtechnische Überprüfung im Hallraum beschrieben.

2 Textile Schallabsorber für Innenräume

Textilien werden auf vielfältige Art dazu verwendet, die Raumakustik so zu verändern, dass in Innenräumen die Nachhallzeit verringert und die Hörsamkeit verbessert werden. Textile Flächengebilde besitzen in der Regel eine raue Oberfläche und eine poröse Struktur. Dadurch kann der Schall in sie ein- und ebenfalls durchdringen. Anders als bei schallharten Flächen wie Metall, Mauerwerk und Beton wird der Schall in Abhängigkeit von Faserstoff und Konstruktion nicht oder nur in sehr begrenztem Maß reflektiert. In Textilien kann immer ein Teil der Schallenergie in Wärme umgewandelt und somit der Schallpegel reduziert werden. Es hängt jedoch von der Ausprägung des textilen Bauteils ab, wie groß die schallabsorbierende Wirkung ist und welche Frequenzen absorbiert werden.

Demzufolge besitzen alle textilen Elemente eines Raums einen messbaren Einfluss auf die Raumakustik. An klassischen Einrichtungselementen sind hierbei zu nennen: Vorhänge, Teppiche und Teppichböden, textile Wandbehänge und Polstermöbel. In öffentlich genutzten Räumen wie Büros oder Unterrichtsräumen wird jedoch aus Gründen der Hygiene und der Reinigungsmöglichkeiten der Praktikabilität, der Ästhetik sowie des Brandschutzes auf derartige Einrichtungen häufig verzichtet. Insbesondere bei moderner Architektur mit Sichtbeton, großen offenen Räumen und großen Glasflächen wird daher auf spezielle nachrüstbare Schallabsorber zurückgegriffen, die flexibel im Raum angebracht werden können.

2.1 Vorhänge

Vorhänge werden insbesondere in Theatern und Konzerträumen zur Veränderung der Raumakustik eingesetzt. Klassischerweise handelt es sich hierbei um sogenannten Bühnenmolton, einem beidseitig angerauten Gewebe aus Baumwolle und/oder Polyester mit Schwer-entflammbar-Ausrüstung und einem hohen Flächengewicht zwischen 300 g/m^2 und 340 g/m^2, der auch wegen seiner Blickdichtheit und matten Oberfläche für andere Einsatzzwecke geschätzt wird [vgl. 4]. Auch wenn Bühnenmolton in Wohn- und Büroräumen eingesetzt werden kann, haben sich verschiedene Anbieter auf die Herstellung von Akustikvorhängen spezialisiert. Diese werden häufig mehrlagig und blickdicht mit einem hohen Flächengewicht und optional auch mit einer wärmereflektierenden Schicht angeboten [vgl. 5, 6]. Es sind jedoch auch lichtdurchlässige Akustikvorhänge möglich, bei denen die schallabsorbierende Wirkung durch Mikroschlitze erreicht wird [vgl. 5, 7]. Hier wirkt dann das Prinzip des mikroperforierten Absorbers und nicht mehr das des porösen Absorbers [vgl. 8, S. 111-130].

Bei der Nutzung von Vorhängen als Schallabsorber gilt generell, dass Vorhänge mit einem hohen Flächengewicht günstiger sind als solche mit einem niedrigen [9]. Der spezifische Strömungswiderstand R_s muss dabei aber unter 2000 Pas/m liegen, damit die Schallwellen den Stoff durchdringen können [9]. Die schallabsorbierende Wirkung kann durch doppelte Hängung und Faltenlegung verbessert werden [9]. Sind die oben genannten Parameter erfüllt, gilt es zudem, einen bestimmten Abstand zur schallharten Wand in Abhängigkeit von der zu absorbierenden Frequenz einzuhalten, damit „der poröse Vorhang genau in einem Schnelle-Maximum liegt, so daß möglichst viel Schallenergie durch innere Reibung im porösen Vorhang umgewandelt wird“ [10,

S. 136]. Da der erforderliche Abstand ein Viertel der Schallwellenlänge[1] beträgt, liegt der Einsatzbereich poröser Vorhänge aufgrund des Platzbedarfs häufiger in der Absorption hoher Frequenzen [11, S. 211].

In modernen Büroumgebungen ist der Einsatz als Raumteiler zur Schaffung abgeschlossener Arbeitsbereiche (siehe Bild 2-1, S. 3) und als Licht- und Sichtschutz mit schalldämpfenden Eigenschaften (siehe Bild 2-2, S. 3) gängig.

Bild 2-1: Akustikvorhänge zur Raumuntergliederung [12]

Bild 2-2: Semitransparente Schallschutzvorhänge vor Fensterfronten [9]

2.2 Teppiche, Teppichboden, Auslegeware

Teppichwaren erfüllen raumakustische Anforderungen durch die Trittschallminderung und die Schallabsorption. Je nach Dicke und Dichte des Teppichs können Trittschallverbesserungsmaße von 20 … 40 dB erreicht werden, was bedeutet, dass Trittschallgeräusche nicht oder in nur geringem Maß entstehen und als Körperschall in benachbarte Räume übertragen werden können [13]. Zusätzlich wirken Teppiche konstruktionsbedingt als poröse Absorber. Je höher der Flor ausgeprägt ist, desto höhere Schallabsorptionsgrade erreicht ein Teppich [vgl. 14, S. 41]. Auch das Anbringen einer Filzunterlage verbessert die Absorptionseigenschaften, wodurch dann ggf. die Florhöhe reduziert werden kann [vgl. 14, S. 41]. Teppichfliesen stellen eine einfach zu montierende Variante eines Teppichbodens dar und können wahlweise mit akustisch optimierten Unterlagen erworben werden (siehe Bild 2-3, Bild 2-4, S. 3).

Bild 2-3: Akustikrücken SONE® von Interface® zur Verlegung unter Teppichfliesen [15, S. 14]

Bild 2-4: Teppichfliesen in Bürolandschaft [16]

[1] „für f = 100 Hz tritt das Absorptions-Maximum für d = 85 cm auf“ [10, S. 136].

2.3 Tapeten, Wandbeläge und -bespannungen

Es ist gängige Praxis in der Inneneinrichtung, auch Wände mit textilen Flächengebilden oder Textiltapeten zu verkleiden [vgl. 17, 18]. Die Verbindung zu raumakustischen Fragestellungen ist naheliegend. So können beispielsweise Stofftapeten mit einer Dicke von 5 bis 10 mm und einem längenbezogenen Strömungswiderstand von mehr als 10.000 Pas/m^2 im Bereich ab 1000 Hz stark absorbierend wirken [8, S. 42]. Wandverkleidungen, die auch wie Tapeten in Bahnen an die Wand geklebt werden, sind beispielsweise als mehrlagiger Verbund mit thermisch geformter Reliefstruktur erhältlich, bei dem eine Maschenware und ein Vliesstoff auf ein Dämpfungsmaterial aufkaschiert ist [19] (siehe Bild 2-5, S. 4). Durch die größere Absorberschichtdicke wird auch das Absorptionsvermögen für bestimmte Frequenzen erhöht. Eine andere Möglichkeit stellen voll- oder teilflächige Spannverkleidungen von Wänden mittels Schienensystemen dar. Diese können große Wandflächen auch in ästhetischer Sicht aufwerten. Werden im Zwischenraum von Spanngewebe und Wand darüber hinaus noch akustisch wirksame Dämpfungsmaterialien wie Faserplatten, Vliesstoffe oder Schäume angebracht, lässt sich das Absorptionsvermögen noch verstärken [vgl. 20, 21]. Für diesen Einsatz werden auch Flächengebilde angeboten, die für die Verwendung als Schallabsorber ausgelegt sind [vgl. 22].[1] Derartige Stoffe können zum Beispiel auch bedruckt und hinterleuchtet oder mit einer antibakteriellen Ausrüstung versehen werden [vgl. 23].

Bild 2-5: 3D-Textilwandbekleidung auf Vliesstoffunterlage [19]

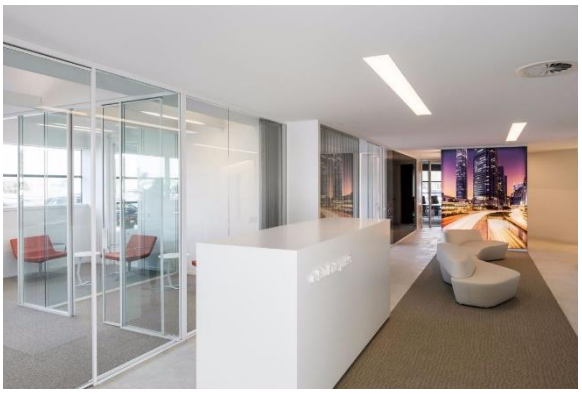


Bild 2-6: Hinterleuchtete, akustische Wandbespannung [24]

[1] Natürlich lässt sich anmerken, dass viele Gestricke und Gewebe als Akustikstoff eingesetzt werden können und dass dieses Label nur Marketingzwecken dient, jedoch muss für einen passgenauen Einsatz eines akustisch wirkenden Materials der Schallabsorptionsgrad bekannt sein, sei er auch noch so gering. Nur mit diesem Wissen können AkustikerInnen und InnenarchitektenInnen entscheiden, welcher Absorber in welchem Maß in einem bestimmten Raum zum Einsatz kommt. Da die akustischen Kennwerte nur mit relativ aufwendigen Messungen im Hallraum oder mit dem Kundt'schen Rohr ermittelt werden können, bieten Anbieter von Akustikstoffen durch die Angabe dieser Kennwerte einen Mehrwert.

2.4 Mobiliar

Nicht nur Textilien sondern auch andere Materialien wie Holz besitzen grundsätzlich eine schallabsorbierende Wirkung im Raum [vgl. 8, S. 153]. In Form von Möbeln bilden sie einen unverzichtbaren Teil der Inneneinrichtung und sollten bei der schallabsorbierend wirksamen Fläche eines Raums, der äquivalenten Absorptionsfläche, berücksichtigt werden [25, S. 57]. Für Möbelstücke wird in diesem Zusammenhang die äquivalente Absorptionsfläche eines Objekts

$$A_{obj}=\alpha*S_{obj} \quad (1)$$

S … vom Prüfobjekt überdeckte Fläche [m^2]

zur Bewertung der Schallabsorptionseigenschaften angegeben [vgl. 25, S. 12]. Polstermöbel sind hierbei vorrangig als poröse Absorber zu betrachten, bei Schränken und Regalen aus Holz kommt hingegen die Resonanz bestimmter Frequenzen zur Schallabsorption zum Tragen. Sitzmöbel wie Hocker und Sofas bieten z. B. aufgrund ihrer Bautiefe das Potential, sie als poröse Absorber zu dimensionieren. Hierfür ist es sinnvoll, die Außenwände perforiert herzustellen und das Möbelstück mit einem Dämpfungsmaterial zu füllen.

Die Hersteller von schallabsorbierenden Polstermöbeln für Büroumgebungen setzen vor allem auf hohe Rücken- und Seitenlehnen mit und ohne Dach, um Geräuscheinflüsse auf die sitzende Personen von außen zu reduzieren [vgl. 26] (siehe Bild 2-7, S. 5). Es werden z. B. Lösungen angeboten für Sessel, Sofas, modulare Sitzlandschaften, Aufbewahrungsmöbel oder Telefonboxen [vgl. 27]. Die Schallabsorption kann hierbei an der Oberfläche mittels mehrerer Schichten Dämpfungsmaterial erfolgen [vgl. 28] oder im Inneren des Möbelstücks wie in der Serie dB Pillar auf Bild 2-8 (S. 5) durch Textilabfälle aus der Möbelproduktion [vgl. 29].

Bild 2-7: Schallabsorbierendes Sofa in drei Lehnenausführungen [30]

Bild 2-8: Schallabsorbierende Möbelserie in Säulenform mit Recycling-Dämpfungsmaterial [29]

Raum-in-Raum-Systeme bieten in großen offenen Arbeitsumgebungen die Möglichkeit, abgeschlossene Inseln zu schaffen, in denen Gespräche vertraulicher und ohne störende Geräuschkulisse von außen geführt werden können (siehe Bild 2-10, S. 6) [vgl. 31]. Durch modulare Sitzmöbel wie Poufs und Hocker können in Kombination mit Trennwänden oder durch hohe Lehnen abgegrenzte Kommunikationsbereiche geschaffen werden (siehe Bild 2-9, S. 6). Akustikpolstermöbel für Büros und öffentliche Bereiche werden häufig schwer entflammbar angeboten [vgl. 32].

Bild 2-9: Variable Sitzlandschaft mit Arbeits- und Kommunikationsecken [33]

Bild 2-10: Raum-in-Raum-System [34]

2.5 Schallabsorptionsmodule

In den Abschnitten 2.1, 2.2, 2.3 und 2.4 wurden Inneneinrichtungselemente beschrieben, bei denen die Schallabsorption ein nebenrangiges Merkmal darstellt. In diesem Abschnitt sollen jedoch Produkte vorgestellt werden, die vorrangig zur Schallabsorption in Büros und öffentlichen Räumen entworfen werden.

Auf dem Markt und als Patentanmeldungen finden sich hierfür eine Vielzahl von Lösungen, die häufig einen textilen Anteil enthalten. Es variiert jedoch, ob ein textiles Flächengebilde nur aus optischen Gründen auf die Außenseite des Absorbers aufgebracht wird, oder ob die schallabsorbierende Wirkung mittels eines textilen Dämpfungsmaterials erfolgt. In Patentenansprüchen werden textile Dämpfungsmaterialien häufig nur als Fasermaterial bezeichnet.

Bei flächigen Absorberelementen lässt sich zwischen *Deckensegeln und Baffeln* zur freihängenden Anbringung unter der Decke, *Wandabsorbern* sowie *Trennwänden*, die zwischen verschiedenen Bereichen im Raum freistehend oder freihängend platziert werden, unterscheiden. Sie sind üblicherweise mit einem PUR-Schaum oder einem Faserstoff als Dämpfungsmaterial gefüllt. Zudem werden freistehende *Akustiksäulen* in zylindrischer oder Prismenform zur Platzierung oder Aufhängung in Raumecken angeboten.

Unter *Baffeln* (von engl. *baffle,* u. a. „Schallschirm“) werden im deutschen Sprachraum „ebene Platten aus schallabsorbierendem Material, die vertikal von der Decke abgehängt in Größe und Form variieren können“, verstanden [35] (siehe Bild 2-117). Da diese vorrangig im Industriebereich verwendet werden, kommen neben Faserstoffen und geschäumten Materialien auch Metalle und Kunststoffe als Dämpfungsmaterialien zum Einsatz [35]. *Deckensegel* hingegen werden mit einem gewissen Abstand parallel zur Decke angebracht (siehe Bild 2-12, S. 7). Sie finden Anwendung, wenn eine betonkernaktivierte Decke nicht vollflächig durch eine abgehängte Decke bedämpft werden kann [36, S. 3].

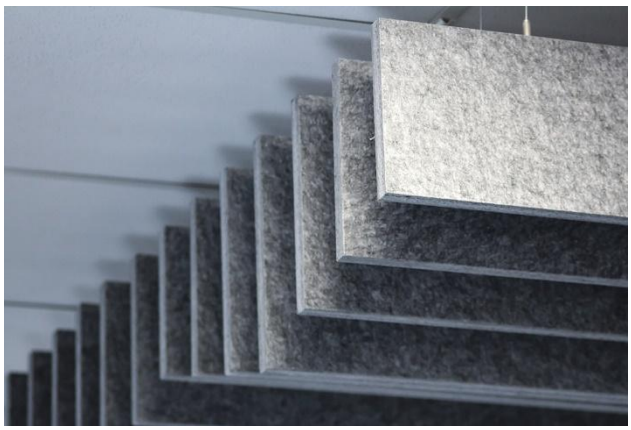


Bild 2-11: Baffeln aus Fasermaterial [37]

Bild 2-12: Deckensegelanordnung [38]

Trennwände werden als frei im Raum platzierbare poröse Absorber mit variablen Abmessungen angeboten oder können direkt am Schreibtisch befestigt werden (siehe Bild 2-13, S. 8). Als Dämpfungsmaterialien werden Vliesstoffe und Schäume eingesetzt und textile Flächengebilde wie Gewebe, Vliesstoffe und Filze, sowie Maschenwaren kommen als Außenbezug zum Einsatz. Manche Hersteller bieten hierfür Zubehör wie Ablageflächen oder Pinnwandfunktionen an, was sich jedoch negativ auf das Schallabsorptionsvermögen auswirken kann, weil ein Teil der Absorberfläche von schallharten Flächen überdeckt wird und dort eine Reflexion stattfindet. Möglicherweise ist auch der Sichtschutz dieser Elemente höher zu bewerten als die Schallschutzfunktion, da aufgrund der Schallbeugung an Kanten gilt, dass die absorbierende Wirkung dieser Trennwände mit zunehmender Höhe größer wird [39, S. 29].

Bei den *Wandabsorbern* besitzen passive (poröse) Absorber [vgl. 39, S. 7], Plattenresonatoren [vgl. 39, S. 16], Lochflächenabsorber [vgl. 39, S. 23], mikroperforierte Absorber [vgl. 39, S. 34] und Breitbandkompaktabsorber [vgl. 39, S. 51] textile Bestandteile. Bei den vier letztgenannten dienen faserige Dämpfungsmaterialien zur Unterstützung der Schallabsorption im hohen Frequenzbereich, wohingegen die Dämpfung mittlerer und niedriger Frequenzen über das Resonanzverhalten der in diesen Absorbern verbauten Holz- oder Metallplatten erfolgt. Den größten Marktanteil stellen jedoch auch hier die porösen Absorber dar [8, S. 39]. Wie bei den Akustik-Trennwänden kann als Dämpfungsmaterial entweder ein Schaum (z. B. Basotect®) oder eine Faserplatte bzw. ein Vliesstoff eingesetzt werden. Die Bandbreite an Faserstoffen reicht von Mineralfasern [vgl. 40], über Synthetikfasern wie z. B. Polyester [vgl. 41] bis zu Naturfasern wie Hanf oder Wolle [vgl. 25, S. 106]. Häufig werden Wandabsorber in einfachen geometrischen Formen (Rechtecke, Quadrate) und mit einer großen Vielfalt an Bezugsstoffen angeboten (siehe Bild 2-14, S. 8). Als „Akustikbilder“ sind diese Wandabsorberelemente auch mit einem digital bedruckten Bezugsstoff erhältlich, was große gestalterische Freiheiten bietet [vgl. 42].

Bild 2-13: Akustisch wirksame Trennwände für Sicht- und Schallschutz [43]

Bild 2-14: Stoffbespannte und bedruckte Wandabsorberelemente [44]

Säulenabsorber sind für den Einsatz in Raumecken vorgesehen, in denen der Schalldruckpegel besonders hoch [8, S. 14]. Sie werden auch als *Eckabsorber* oder *Bassfallen* bezeichnet und besitzen runde, rechteckige oder dreieckige Grundflächen. Sie dienen zur Bedämpfung niedriger Frequenzen und sollten mit etwas Abstand zur Wand in einer Ecke platziert werden, damit der in der Ecke reflektierte Schall den Absorber noch einmal durchlaufen kann. [45]. Vorteilhaft ist, dass sie ohne Installationsaufwand einfach an den gewünschten Ort gestellt werden können. Als Dämpfungsmaterial kommen hier wiederum alle porösen Materialien infrage. Da es sich um ein freistehendes Raumobjekt handelt, sollte zur Beurteilung der Absorptionsfähigkeit vom Hersteller die äquivalente Objektfläche A_{obj} (siehe Formel (1)) angegeben werden.

Bild 2-15: Quadratische Akustiksäule in Raumecke [46]

3 Vorversuche in der Alphakabine

3.1 Einleitung

Um das Absorptionsvermögen eines Schallabsorbers abschätzen zu können, sind Nachhallzeitmessungen unerlässlich [47, S. 254]. Für Erstversuche mit kleineren Proben können diese in sogenannten Alphakabinen stattfinden. Im Gegensatz zu Messungen im Hallraum, für den für genaue Messergebnisse Proben mit einer Absorberfläche S ab 2 m^2 notwendig sind, reichen hierfür Proben mit einer Absorberfläche ab 0,5 m^2 aus. Alle in Abschnitt 3 beschriebenen Messungen fanden in der Alphakabine der Westsächsischen Hochschule Zwickau in der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik statt.[3] Es wurde das Schallabsorptionsvermögen an Proben auf der Basis von Weiterentwicklungen gemessen, die auf im Praktikum entwickelten porösen Schallabsorbern mit Abstandsgestricken als Dämpfungsmaterial beruhen [vgl. 48, S. 11-16]. Die Rückschlüsse aus diesen Vorversuchen dienen zur Entscheidung, welche Varianten später im Hallraum auf das volle Frequenzspektrum getestet werden sollen.

Bei akustischen Messungen in der Alphakabine und auch im Hallraum wird die Nachhallzeit T in s ermittelt. Sie gibt an, wie lange es dauert, bis der Schalldruckpegel um 60 dB (T_{60}) bzw. um 30 dB (T_{30}) abgeklungen ist [8, 174-175]. Aus ihr wird dann für bestimmte Frequenzbänder zwischen 100 und 5000 Hz der Sabine'sche Absorptionsgrad α_s berechnet. Aus den spezifischen α_s-Werten einer Messung lässt sich der bewertete Absorptionsgrad α_w zusammenfassen, der das Absorptionsvermögen eines Absorbers in einem einzigen Zahlenwert darstellt [siehe 48, S. 7-9]. Gruppen von α_w-Werten werden gemäß [49, S. 16], in sechs Schallabsorberklassen eingeordnet. Der Vorteil des bewerteten Absorptionsgrads α_w besteht darin, dass das Gesamtverhalten eines Schallabsorbers mit nur einer Zahl beschrieben werden kann. Deswegen wird er auch in Abschnitt 3.2.2 als Vergleichsgrundlage für die Versuchsauswertung mittels statistischer Versuchsplanung verwendet.

3.2 Ergebnisse der Alphakabinen-Messung

3.2.1 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung ist ein standardisiertes Verfahren zur Ermittlung des Einflusses mehrerer Einflussgrößen (Faktoren, Parameter oder Qualitätsmerkmale) und deren Wirkungen bzw. Wechselwirkungen (Effekte) auf ein System mittels mathematischer Statistik. Unter einem System kann zum Beispiel ein zu entwickelndes Produkt oder ein technischer Prozess verstanden werden. Die zu untersuchenden Faktoren können in verschiedenen Abstufungen, den Niveaus oder Stufen, untersucht werden. Es sind mindestens zwei Niveaus (-, +) erforderlich.

„Ziel der Modellbildung ist es, zwischen Eingangs- und Zielgrößen empirisch einen funktionalen Zusammenhang, ein Regressionsmodell, in Form einer Regressionsgleichung aufzustellen“ [50, S. 132]. Die

[3] Für die Beschreibung des Messaufbaus dieser Alphakabine sei auf [48, S. 19-20], verwiesen.

Zusammenhänge zwischen einer Zielgröße und den Einflussgrößen können mit einer linearen Gleichung oder einem Polynom 2. Grades hinreichend genau beschrieben werden [50, 132]. Diese werden allgemein als 2^k- und 3^k-Versuchspläne bezeichnet. Die Ziffer in der Basis dieser Bezeichnungsform gibt die Anzahl Niveaus an, z. B. -1 und +1 für 2^k sowie -1, 0 und +1 für 3^k. Der Exponent k steht für die Anzahl der im jeweiligen Versuchsplan verwendeten Faktoren. Versuchspläne zweiter Ordnung werden verwendet, wenn das lineare Regressionsmodell die Realität nicht beschreiben kann, bzw. wenn ein Optimum in einem bereits ermittelten Grobbereich gefunden werden soll [50, S. 178].

Bei vollfaktoriellen Versuchsplänen wird jeder Faktor mit jedem Niveau kombiniert.[4] Die Kombinationsmöglichkeiten sind durch entsprechende Einstellmatrizen normiert (siehe Tabelle 3-1, S. 11, und Tabelle 3-2, S. 12). Den Erfolg und die Stabilität dieser seit circa 100 Jahren angewandten Methode machen unter anderem diese Normierungen in der Methodik und die damit verbundene Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit von Versuchsplänen aus [vgl. 51, S. 1].

In der vorliegenden Arbeit mussten für die ersten Messungen in der Alphakabine mehrere Versuchspläne erstellt werden, da nicht alle zu untersuchenden Faktoren und deren Einstellungsniveaus miteinander kombinierbar waren (siehe Abschnitt 3.2.2).

3.2.1.1 Aufstellen der Regressionsgleichung

3.2.1.1.1 2^k-Versuchspläne

Ein 2^k-Versuchsplan kann allgemein mit folgender Regressionsgleichung beschrieben werden [50, S. 136]:

$$y=b_0+ b_1x_1+b_2x_2+b_{12}x_1x_2 \qquad (2)$$

Der Koeffizient b_0 stellt den Mittelwert aller Versuchsergebnisse dar [50, S. 139]:

$$b_0= \frac{\sum_{i=1}^{2^k} y_i}{2^k} \qquad (3)$$

k…Anzahl Faktoren bzw. Einflussgrößen y_i…Messergebnisse

Die Glieder b_1x_1 und b_2x_2 stehen jeweils für die Faktoren x_1 und x_2, und das Glied $b_{12}x_1x_2$ für die Wechselwirkungen zwischen ihnen. Die Koeffizienten b_m von 2^k-Versuchsplänen werden allgemein mit

$$b_m= \frac{\sum_{i=1}^{2^k} y_i m_i}{2^k} \qquad (4)$$

m = 0; 1; 2; 12, … m_i = i-tes Feld in Spalte m der Auswertmatrix

errechnet [50, S. 141]. Um die oben genannten Koeffizienten ermitteln zu können, müssen die Werte für m_i in den Spalten 0, 1, 2, 12 des Tabellenabschnitts *Auswertmatrix* bekannt sein. Dazu wird in der Auswertmatrix für einen 2^2-Versuchsplan jede Zelle der Spalte 0 mit +1 gefüllt, die Spalten 1 und 2 entsprechen den Vorzeichen der Einstellmatrix für x_1 und x_2, und die Werte für die Wechselwirkungsspalte 12 werden aus dem Produkt der Werte aus den Spalten 1 und 2 gebildet (siehe Tabelle 3-1, S. 11) [vgl. 50, S. 141].

[4] Es gibt neben vollfaktoriellen noch teilfaktorielle Versuchspläne und diverse Spezialdesigns für besondere Anwendungszwecke. Für nähere Informationen dazu sei auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Koeffizienten sämtlicher Versuchspläne stellt die Matrizenrechnung nach der Gleichung

$$b=(X^T X)^{-1} X^T y \quad (5)$$

mit dem Spaltenvektor y und der 4x4-Auswertmatrix X dar [vgl. 52]. Am häufigsten werden für Erstellung von Versuchsplänen und die Ermittlung der Regressionsgleichung jedoch vermutlich kommerzielle Statistikprogramme wie SPSS®, Minitab® oder die freie Programmiersprache R eingesetzt. Aber auch die Datenanalysefunktion *Regression* in Microsoft Excel® kann hierfür verwendet werden.

Tabelle 3-1: 2^2-Versuchsplan mit Auswertmatrix

Versuchs-Nr.	Einstellmatrix		Symbol	Ergebnis	Auswertmatrix			
	x_1	x_2			0	1	2	12
1	-1	-1	0	y_1	+1	-1	-1	+1
2	+1	-1	1	y_2	+1	+1	-1	-1
3	-1	+1	2	y_3	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	12	y_4	+1	+1	+1	+1

Quelle: [vgl. 50, S. 140]

3.2.1.1.2 3^k-Versuchspläne

Die quadratische Regressionsgleichung lautet im allgemeinen Fall [50, S. 180]:

$$y=b_0x_0+b_1x_1+b_2x_2+b_{12}x_1x_2+b_{11}x_1^2+b_{22}x_2^2 \quad (6)$$

Der Koeffizient b_0 entspricht aufgrund der Berechnung der quadratischen Glieder (siehe Formel (12)) nicht dem Mittelwert $\bar{y}$ aller Ergebnisse, sondern [50, S. 183]

$$b_0=\bar{y}-e\sum_{m_Q=11}^{kk} b_{m_Q} \quad (7)$$

$m_Q = 11; \ldots; kk$

mit dem Mittelwert über alle Messergebnisse

$$\bar{y}=\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \quad (8)$$

n Anzahl Messwerte, 3^k

und dem Korrekturglied e, das in den Spalten der Auswertmatrix von m_i^2 für die quadratischen Glieder abgezogen wird, um den Versuchsplan orthogonal zu halten [50, S. 183][5].

$$e=\frac{\sum_{i=1}^{n}(m_i)^2}{n_{ges}} \quad (9)$$

Für die linearen Koeffizienten b_m gilt wie für die Regressionsgleichung 1. Ordnung [50, S. 182]:

$$b_m=\frac{\sum_{i=1}^{n} m_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i^2} \quad (10)$$

[5] Orthogonalität ist dann hergestellt, wenn $\sum^n m_{Qi} = 0$ mit $m_{Qi}=m_i^2-e$ [50, S. 183].

Die Wechselwirkungsglieder b_{lm} ergeben sich aus [50, S. 182]:

$$b_{lm} = \frac{\sum_{i=1}^{n} l_i m_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} l_i m_i^2} \quad (11)$$

l=1…(k-1); l<m; m=1…k

Für die Berechnung der quadratischen Glieder b_{mQ} wird folgende Formel verwendet [50, S. 183]:

$$b_{mQ} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_{Qi} y_i}{\sum_{i=1}^{n} m_{Qi}^2} \quad (12)$$

Der vollfaktorielle 3^2-Versuchsplan mit Auswertmatrix nach Liebscher ist in Tabelle 3-2 (S. 12) aufgeführt. Es sei an dieser Stelle jedoch angemerkt, dass ein anderer Autor (vgl. 52, S. 270) oder die Excel-Regressions-Funktion nicht mit dem Korrekturglied e arbeiten.

Tabelle 3-2: 3^2-Versuchsplan mit Auswertmatrix

Ver-suchs-	Einstellmatrix		Ergebnis	Auswertmatrix					
Nr.	x_1	x_2	y	I	1	2	12	$11 = x_1^2-(2/3)$	$22 = x_2^2-(2/3)$
1	-1	-1	y_1	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3
2	+1	-1	y_2	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3
3	-1	+1	y_3	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3
4	+1	+1	y_4	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3
5	-1	0	y_5	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3
6	+1	0	y_6	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3
7	0	-1	y_7	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3
8	0	+1	y_8	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3
9	0	0	y_9	+1	0	0	0	-2/3	-2/3

Quelle: [50, S. 182]

3.2.1.2 Signifikanzprüfung und Adäquatheitstest

Auch wenn sich eine vollständige Regressionsgleichung rein mathematisch bilden lässt, indem jedes Glied einen Koeffizienten ≠ 0 erhält, heißt dies nicht, dass alle Glieder tatsächlich vorhanden sind. Sie könnten auch Teil der Versuchsstreuung sein. Nach Aufstellen der Regressionsgleichung werden die Koeffizienten daher auf statistische Signifikanz getestet und das daraufhin erstellte Beschreibungsmodell auf Adäquatheit.

3.2.1.2.1 2^k-Versuchspläne

Signifikanzprüfung

Um einschätzen zu können, ob sich sehr kleine Regressionskoeffizienten „nur zufällig oder gesichert von Null" unterscheiden, stehen der F-Test und der t-Test zur Verfügung [50, S. 143].[6] Da jede Messung nur ein Mal durchgeführt wurde, findet hierfür der F-Test Anwendung, bei dem „die Varianzanteile der Koeffizienten $s^2_{AG}(b_m)$ an der Gesamtstreuung gegen die Varianz der nichterfassten Einflüsse s^2_v getestet werden" [50, S. 144].

Für einen einzelnen Koeffizienten b_m ist die anteilige Varianz [50, S. 144]

$$s^2_{AG}(b_m)=\frac{SQ(b_m)}{FG(b_m)} \tag{13}$$

mit dem Summenquadrat $SQ(b_m)$

$$SQ(b_m)=b_m^2 c 2^k=W_m^2 c 2^{k-2}, \tag{14}$$

c Anzahl der Versuchspunktrealisierungen, W Wirkung

bei dem Freiheitsgrad $FG(b_m)=1$.

Die Versuchsstreuung s^2 mit [50, S. 32]

$$s^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1} \tag{15}$$

kann von einem Versuch zu einem anderen Zeitpunkt verwendet werden, bei dem die gleichen Versuchsbedingungen vorliegen [50, S. 144].

Alternativ kann die Reststreuung s^2_v aus den Summenquadraten der Koeffizienten mit sehr kleinen Beträgen ermittelt werden, die als Versuchsstreuung verwendet werden kann [50, S. 144]. Dafür werden im Zähler Werte aufgenommen, die „eine Zehnerpotenz kleiner sind als der kleinste, vermutlich signifikante Wert", oder deren „Summe der zusammengefassten Werte" kleiner ist „als der nächstkleinere auftretende Wert" und durch die Summe aus den zugehörigen Freiheitsgraden geteilt [50, S. 145]:

$$s^2_v=\frac{SQ_{min.1}+SQ_{min.2}+\ldots}{FG_{min.1}+FG_{min.2}+\ldots} \tag{16}$$

Ist dies erfolgt, wird der F-Test durchgeführt, indem der errechnete Wert

$$F_{err}=\frac{s^2_{AG}(b_m)}{s^2_v} \tag{17}$$

mit dem Wert aus der F-Verteilungstabelle bei der gewünschten Sicherheitswahrscheinlichkeit (meist 95 %) abgeglichen wird [50, S. 145]. Ist der errechnete Wert größer als der Tabellenwert, ist der Koeffizient existent und statistisch signifikant, nichtsignifikante Koeffizienten hingegen werden aus der ursprünglichen

[6] Der t-Test wird an dieser Stelle nicht beschrieben, weil für seine Anwendung mehrere Realisierungen eines Versuchspunktes vorliegen müssen, in den in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Versuchsdurchgängen jedoch nur Einzelmessungen erfolgt sind.

Regressionsgleichung gestrichen [50, S. 145]. Dieses Vorgehen wird so lange fortgesetzt, bis der nächstgrößere Koeffizient signifikant ist.

Prüfung auf Adäquatheit

Ob das System mit der gegebenen (reduzierten) Regressionsgleichung geeignet ist, kann auf eine einfache Art mit dem multiplen Bestimmtheitsmaß B[7] ermittelt werden, wenn lediglich eine Realisierung pro Versuchspunkt vorliegt [50, S. 148-149]:

$$B=\frac{\sum_{i=1}^{2^k}(\hat{y}_i-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{2^k}(y_i-\bar{y})^2} \tag{18}$$

$\hat{y}_i$ berechneter Wert nach Regressionsgleichung für den i-ten Versuchspunkt

Ist B≥0,8 ist der Modellansatz brauchbar und die nach der Signifikanzprüfung gefundene Regressionsgleichung kann verwendet werden [50, S. 149]. Der Maximalwert des Bestimmtheitsmaßes B beträgt 1, was 100 % entspricht [50, S. 149].

Zwei weitere mögliche Adäquatheitstests sind die Überprüfung der Anpassungsabweichung und die Durchführung des t-Tests über den Zentralpunkt eines Versuchsplans [50, S. 148].

3.2.1.2.2 3^k-Versuchspläne

Signifikanzprüfung

Für quadratische Regressionsmodelle mit vielen Versuchen bietet sich die Ermittlung der Versuchsstreuung über den Zentralpunkt an, indem nur dieser statistisch besonders aussagekräftige Messpunkt mehrfach realisiert wird und nicht alle Versuchspunkte [vgl. 50, S. 186]. Sind jedoch keine Mehrfachrealisierungen vorhanden, können die signifikanten Koeffizienten auch hier wieder über den Vergleich der Restvarianz s_R^2 und der anteiligen Varianz der Koeffizienten s_{AG}^2 ermittelt werden [50, S. 189]. Dazu werden die einzelnen Summenquadrate für die Koeffizienten b, b_{lm}, und b_{mQ} (ausgenommen b_0) gebildet [50, S. 189]:

$$SQ(b)=\frac{(\sum_{i=1}^{n}y_i m_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}m_i^2} \text{ bzw. } SQ(b_{lm})=\frac{(\sum_{i=1}^{n}y_i l_i m_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}l_i m_i^2} \text{ bzw. } SQ(b_{mQ})=\frac{(\sum_{i=1}^{n}y_i m_{Qi})^2}{\sum_{i=1}^{n}m_{Qi}^2} \tag{19}$$

Das Rest-Summenquadrat ergibt sich zu [50, S. 189]

$$SQ_R=SQ_{ges}-\sum SQ(b) \tag{20}$$

mit

$$SQ_{ges}=\sum_{i=1}^{n}y_i^2-\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}y_i\right)^2 \tag{21}$$

Die Freiheitsgrade zum Abgleich in der F-Verteilungstabelle betragen [50, S. 190-191]:

$$FG_{ges}=n-1 \tag{22}$$

$$FG_R=n-K \tag{23}$$

K Anzahl der (Rest-)Glieder in der Regressionsgleichung

wobei $FG(b)=FG_1$ (Zähler) und $FG_R=FG_2$ (Nenner) in:

[7] Das multiple Bestimmtheitsmaß wird häufig auch als R^2 bezeichnet.

$$F_{tab(S=95\%;FG_1;FG_2)} * s_R^2 < s_{AG}^2(b) \quad (24)$$

mit

$$s_R^2 = \frac{SQ_R}{FG_R} \quad (25)$$

und

$$s_{AG}^2(b) = \frac{SQ(b)}{FG(b)} \quad (26)$$

Ist Formel (24) für einen einzelnen Koeffizienten erfüllt, so ist er statistisch signifikant und bleibt in der (reduzierten) Regressionsgleichung erhalten [50, S. 191].

Prüfung auf Adäquatheit

Auch hier folgt im Anschluss die Adäquatheitsprüfung des reduzierten Regressionsmodells über das multiple Bestimmtheitsmaß B [50, S. 191]:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2} \quad (27)$$

Ebenso wie für 2^k-Versuchspläne können die Überprüfung der Anpassungsabweichung und die Durchführung des t-Tests über den Zentralpunkt eines Versuchsplans als weitere Adäquatheitsprüfungen in Betracht gezogen werden [vgl. 50, S. 187].

3.2.2 Planung und Auswertung der Versuchspläne

3.2.2.1 Prismenabsorber

Die Vorentwicklung des Schallabsorbers in Form eines Dreiecksprismas aus dem Praktikum wurde weiterverfolgt. Hierfür wurden insgesamt drei Versuchspläne erstellt, die im Folgenden aufgeführt sind.

Im *Versuchsplan P1* (Tabelle 3-3, S. 16) wird überprüft, welchen Einfluss ein Bezug aus Abstandsgestrick mit Schussfäden (siehe Bild 4-12, S. 37) im Vergleich zur bezugslosen Variante und die unterschiedlichen Korpusmaterialien Pappe und Holz haben, ohne dass dabei ein Dämpfungsmaterial in die Korpusse eingebracht wird. Im Praktikum wurde als Korpusmaterial Pappelsperrholz verwendet. Die Alternative Wellpappe wurde jetzt in den Versuchsplan aufgenommen, weil diese im Unternehmen sowieso als Verpackungsmüll anfällt und somit keine Zusatzkosten für den Materialkauf entstehen. Außerdem bestand Grund zur Annahme, dass Wellpappe besser bearbeitbar ist, da für das Schneiden und Bohren weniger Kraft aufgewendet werden muss. Die gewählte Wellpappe mit 7 mm Höhe lässt sich beispielsweise manuell mit dem Cuttermesser, mit einem Laser, mit der Bohrmaschine und der CNC-Fräse bearbeiten. Im Versuchsplan P1 erhält der Faktor „Korpusmaterial“ zur Bezeichnung das Symbol „x_1“ und ihm sind die kategorialen[8] Einstellungsniveaus „Pappe: -1“ und „Holz: +1“ zugewiesen. Die beiden Dreiecksprismen sind bis auf das Material baugleich und besitzen dieselbe Anzahl Löcher pro Seitenwand (50, 50 und 72). Für den Faktor „Bezug“ mit dem Symbol „x_2“ gelten die kategorialen Niveaus „ohne: -1“ und „mit: +1“.

[8] Kategoriale Faktoren sind nicht zähl- oder messbar und besitzen immer feste Stufen [vgl. 51, S. 156]

Tabelle 3-3: Prismenabsorber – Einstellungen zu Versuchsplan P1

Faktor	Symbol	Einstellung -1	+1	Einheit
Korpusmaterial (gleiche Lochanzahl, a=b=500 mm)	x_1	Pappe	Holz	/
Bezug (Abstandsgestrick)	x_2	ohne	mit	/

Durch den *Versuchsplan P2* (Tabelle 3-4, S. 16) soll überprüft werden, ob die aufwendige Perforation der Seitenwände mit dem Perforationsgrad σ>0,3 notwendig ist, wie in [8, S. 43], konstatiert wird. Die Verwendung des gängigen Dämpfungsmaterials Mineralwolle (ursprünglich zur Dachdämmung bestimmt) soll verdeutlichen, in welchem Schallabsorptionsbereich dieses faserige Material im Vergleich zu den Gestricken der Firma STS Textiles liegt. Sollte sich hierbei zeigen, dass es sich deutlich besser auswirkt, müsste der Ansatz aus dem Versuchsplan P3 (siehe Tabelle 3-5, S. 17) überdacht werden.

Tabelle 3-4: Prismenabsorber – Einstellungen zu Versuchsplan P2

Faktor	Symbol	Einstellung -1	+1	Einheit
Korpusperforation (Löcher, Pappkorpus, a=b=500 mm)	x_1	ohne	mit	/
Füllung (Mineralwolle)	x_2	ohne	mit	/

Die Versuchspläne P1 und P2 sind zweistufige Zweifaktorenpläne (2^2-Versuchspläne). Es ergeben sich vier Kombinationsmöglichkeiten aus den jeweiligen Einstellungsniveaus -1 und +1, die in vier unabhängigen Durchgängen gemessen werden (siehe Einstellmatrix in Tabelle 3-1, S. 11).

Bei Versuchsplan P3 hingegen handelt es sich um einen 3^2-Versuchsplan, bei dem 2 Faktoren auf 3 Niveaus eingestellt werden. Es soll untersucht werden, welchen Einfluss die Absorbergröße und die Menge bzw. Masse des verwendeten Dämpfungsmaterials haben (siehe Tabelle 3-5, S. 17). Hierbei erfolgt die Einstellung des Faktors „x_1“ über die Längen der Kathete und Ankathete der rechtwinkligen Dreiecksgrundfläche von „0,4 m: -1“ über die Länge aus den Vorversuchen „0,5 m: 0“ bis zu „0,6 m: +1“. In diesem Fall handelt es sich um numerische, kontinuierlich einstellbare Faktoren, zwischen deren Ergebnissen interpoliert werden dürfte [vgl. 51, S. 156]. Wenngleich dimensionslos werden auch die Niveaus des Faktors „x_2“ (Anzahl Lagen des Dämpfungsmaterials) kontinuierlich zwischen „75: -1“, „100: 0“ und „125: +1“ eingestellt. Es passen allerdings nicht mehr als 125 Lagen in ein Prisma der Höhe h=0,5 m.

Tabelle 3-5: Prismenabsorber – Einstellungen zu Versuchsplan P3

Faktor	Symbol	Einstellung			Einheit
		-1	0	+1	
Länge Kathete/Ankathete der Grundfläche (a = b) (Pappkorpus, ohne Bezug)	x_1	0,4	0,5	0,6	m
Anzahl Lagen des Dämpfungsmaterials (D264-1012 „Vitalis“)	x_2	75	100	125	/

3.2.2.1.1 2^2-Versuchspläne – Berechnungen

Versuchsplan P1

Exemplarisch werden die Berechnungen zu Versuchsplan P1 (siehe Tabelle 3-3, S. 16) ausführlich durchgeführt, für den anderen Plan werden die Ergebnisse verkürzt dargestellt.

Die Koeffizienten b_0 und b_m ergeben sich gemäß Formel (3) und Formel (4) zu:

Koeffizient b_0: $b_0 = \frac{\sum_{i=1}^{4} y_i m_0}{4} = \frac{0,2+0,1+0,3+0,25}{4} = 0,2125$

Koeffizient b_1: $b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{4} y_i m_1}{4} = \frac{0,2*(-1)+0,1*1+0,3*(-1)+0,25*1}{4} = \frac{-0,2+0,1-0,3+0,25}{4} = -0,0375$

Koeffizient b_2: $b_2 = \frac{\sum_{i=1}^{4} y_i m_2}{4} = \frac{0,2*(-1)+0,1*(-1)+0,3*1+0,25*1}{4} = \frac{-0,2-0,1+0,3+0,25}{4} = 0,0625$

Koeffizient b_{12}: $b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{4} y_i m_{12}}{4} = \frac{0,2*1+0,1*(-1)+0,3*(-1)+0,25*1}{4} = \frac{0,2-0,1-0,3+0,25}{4} = 0,0125$

Daraus folgt die Regressionsgleichung $y=0,2125-0,0375x_1+0,0625x_2+0,0125x_1x_2$ für den Versuchsplan P1. Alternativ kann zur Ermittlung der Koeffizienten b_0 … b_i auch die Auswertmatrix (siehe Tabelle 3-6, S. 18) in Einzelschritten um die Zeilen ∑, Effekt und b_i erweitert werden [vgl. 53, S. 105]. Das Ergebnis in der Zeile ∑ wird auch hier durch Aufsummieren der Werte aus der Spalte y_i mit den Vorzeichen der jeweiligen Spalte gebildet [vgl.53, S. 105]. Mittels Division durch die Anzahl Faktoren (hier 2) ergibt sich der Zahlenwert für den Effekt bzw. die Wirkung des entsprechenden Faktors. Der Effekt wird durch die Anzahl an Faktoren geteilt und es ergibt sich der Betrag des jeweiligen Koeffizienten b_m der Regressionsgleichung.

Tabelle 3-6: Auswertmatrix für Versuchsplan P1

Versuchs-Nr.	Einstellmatrix		Symbol	Ergebnis	Auswertmatrix			
	x_1	x_2		y_i	0	1	2	12
1	-1	-1	0	0,2	+1	-1	-1	+1
2	+1	-1	1	0,1	+1	+1	-1	-1
3	-1	+1	2	0,3	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	12	0,25	+1	+1	+1	+1
$\sum (\sum_{i=1}^{4} y_i m_i)$					0,85	-0,15	0,25	0,05
Effekt ($\sum/2$)					0,425	-0,075	0,125	0,025
MW-						0,25	0,15	0,2
MW+						0,175	0,275	0,225
b_m (Effekt/2 u. MW+ - MW-)					0,2125	-0,0375	0,0625	0,0125

Signifikanzprüfung und Adäquatheitstest für den Versuchsplan P1

Die Versuchsstreuung s_v^2 kann aus Vorversuchen mit den gleichen Materialien und Versuchsbedingungen verwendet werden, bei dem die gleichen Versuchsbedingungen vorliegen [50, S. 144]. Bei der vorliegenden Versuchsreihe wurde der Zentralpunkt des 3^2-Versuchsplans P3 (Pappprisma mittel, 100 Lagen Vitalis) insgesamt vier Mal gemessen. Daraus lässt sich mit Formel (15) die Versuchsstreuung s^2 für die Zielgröße α_w ermitteln:

Tabelle 3-7: Berechnung der Standardabweichung im Zentralpunkt des Versuchsplans P3

i	x_i	$x_i-\bar{x}$	$(x_i-\bar{x})^2$
1	0,65	0	0
2	0,65	0	0
3	0,65	0	0
4	0,65	0	0
	$\bar{x}$=0,65		0

Somit ergibt sich für den Zentralpunkt des Versuchsplans P3 mit den in Tabelle 3-7 (S. 18) angegebenen Werten die Versuchsstreuung[9]

$$s^2=\frac{0}{3}=0$$

[9] Die Versuchsstreuung s^2=0 am Zentralpunkt ist natürlich auf die Nutzung des berechneten Werts α_w zurückzuführen, der eine starke Vereinfachung der tatsächlichen Einzelmesswerte der Nachhallzeit pro Frequenzband darstellt. Mit der Verwendung der Nachhallzeitenwerte ergäbe sich ein anderer Streuungswert. Allerdings sollten m. E. hier keine unterschiedlichen Datengrundlagen herangezogen werden.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass alle Koeffizienten der Regressionsgleichung $y=0{,}2125-0{,}0375x_1+0{,}0625x_2+0{,}0125x_1x_2$ statistisch signifikant sind. Ob diese Modellbeschreibung den tatsächlichen Verhältnissen in der Praxis entspricht, kann durch die Adäquatheitsprüfung über das multiple Bestimmtheitsmaß B verifiziert werden. Nach Formel (18) ergibt sich für das multiple Bestimmtheitsmaß mit den Werten aus Tabelle 3-8 (S. 19)

$$B=\frac{\sum_{i=1}^{2^k}(\hat{y}_i-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{2^k}(y_i-\bar{y})^2}=\frac{0{,}021875}{0{,}021875}=1,$$

was bedeutet, dass der Modellansatz brauchbar ist, da B>0,8 ist [vgl. 50, S. 149].

Tabelle 3-8: Wertetabelle für multiples Bestimmtheitsmaß B (P1)

Versuch Nr.	$\hat{y}_i$	y_i	$(\hat{y}_i-\bar{y})^2$	$(y_i-\bar{y})^2$	
1	0,2	0,2	0,00015625	0,00015625	
2	0,1	0,1	0,01265625	0,01265625	
3	0,3	0,3	0,00765625	0,00765625	
4	0,25	0,25	0,00140625	0,00140625	
Mittelwert:	0,2125	0,2125	0,021875	0,021875	: Summe

Die oben getroffenen Aussagen decken sich mit den Ergebnissen der Regressions-Statistik und der ANOVA (engl. *analysis of variance*, Varianzanalyse) aus der Excel-Funktion „Regression“ (siehe Bild 3-1, S. 19). Das Bestimmtheitsmaß beträgt hier ebenfalls 1 und der Standardfehler 0, was bedeutet, dass die Werte nicht streuen [54]. Die Koeffizienten entsprechen den manuell ermittelten.

AUSGABE: ZUSAMMENFASSUNG

Regressions-Statistik	
Multipler Korrelationskoe	1
Bestimmtheitsmaß	1
Adjustiertes Bestimmthe	65535
Standardfehler	0
Beobachtungen	4

ANOVA

	Freiheitsgrade (df)	*Quadratsummen (SS)*	*Mittlere Quadratsumme (MS)*	*Prüfgröße (F)*	*F krit*
Regression	3	0,021875	0,007291667	#ZAHL!	#ZAHL!
Residue	0	0	65535		
Gesamt	3	0,021875			

	Koeffizienten	*Standardfehler*	*t-Statistik*	*P-Wert*	*Untere 95%*	*Obere 95%*	*Untere 95,0%*	*Obere 95,0%*
Schnittpunkt	0,2125	0	65535	#ZAHL!	0,2125	0,2125	0,2125	0,2125
x1	-0,0375	0	65535	#ZAHL!	-0,0375	-0,0375	-0,0375	-0,0375
x2	0,0625	0	65535	#ZAHL!	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625
x1x2	0,0125	0	65535	#ZAHL!	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125

Bild 3-1: Ausgabe der Regressionsfunktion im MS Excel für den Versuchsplan P1

Grafische Darstellungen

Die grafische Darstellung der Regressionsgleichung $y=0{,}2125-0{,}0375x_1+0{,}0625x_2+0{,}0125x_1x_2$ über den Einstellungsbereich der Faktorenniveaus -1/+1 findet sich als Wirkungsflächendiagramm im Raum in Bild 3-2 (S. 20). Das Diagramm spannt eine ebene Fläche zwischen den Messwerten der Versuchsreihe P1 auf.

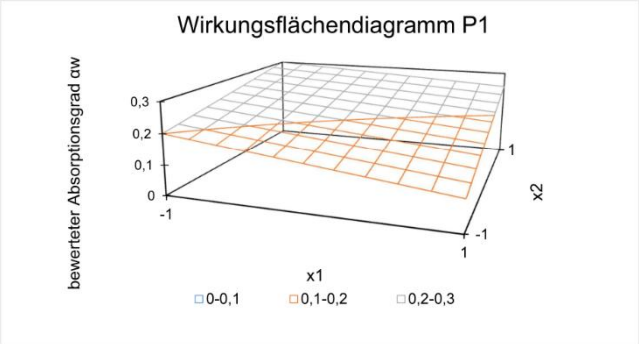


Bild 3-2: Raumdarstellung der Regressionsgleichung $y=0{,}2125-0{,}0375x_1+0{,}0625x_2+0{,}0125x_1x_2$

Basierend auf den Messergebnissen lassen sich die Haupteffekte in einem Wirkungsdiagramm mittels der Niveaumittelwerte aus den Zeilen MW- und MW+ in Tabelle 3-6 (S. 18) grafisch darstellen (siehe Bild 3-3, S. 21). Die Faktoren Korpusmaterial und Bezug werden nacheinander auf der horizontalen Achse mit ihrer Niveaukodierung dimensionslos aufgeführt, um auch bei unterschiedlichen Einheiten vergleichbar zu sein. Auf der vertikalen Achse ist das Qualitätsmerkmal in der zugehörigen Einheit angegeben. In diesem Fall ist α_w jedoch auch ein dimensionsloser Kennwert. Die Niveaumittelwerte für den jeweiligen Faktor werden mit einer Linie verbunden, deren Steigung den Effekt kennzeichnet [51, S. 14]. Die beiden Linien werden genau in der Mitte horizontal vom Gesamtmittelwert (b_0 in der Regressionsgleichung) geschnitten.

Für den Faktor x_1 (Korpusmaterial) ist Pappe die Niveaukodierung – und Holz die Niveaukodierung + zugewiesen. Da die Linie von – nach + abfällt, wird deutlich, dass das Material Pappe einen höheren bewerteten Schallabsorptionsgrad α_w besitzt als Holz. In der Regressionsgleichung wird dieser Umstand durch den Koeffizienten $b_1=-0{,}0375$ ausgedrückt. Für den Faktor x_2 (Bezug) ist „ohne Bezug“ mit – und „mit Bezug“ mit + kodiert. Die positive Steigung der Wirkungslinie für den Bezug verdeutlicht, dass die Verwendung eines Bezugs aus Abstandsgestrick das Absorptionsvermögen verbessert. Dieses Ergebnis lässt sich in diesem Fall auch durch einen Vergleich mit den Messergebnissen verifizieren, da das Pappprisma mit Bezug mit $\alpha_w=0{,}3$ den höchsten bewerteten Schallabsorptionsgrad dieses Versuchsplans im Gegensatz zum niedrigsten des Holzprismas ohne Bezug mit $\alpha_w=0{,}1$ aufweist.

Die Haupteffekte x_1 und x_2 können sich auch gegenseitig beeinflussen, so dass der Effekt eines Faktors von der Einstellung des anderen Faktors abhängt [51, S. 15] bzw. dass ein Einfluss auf das Qualitätsmerkmal deutlich wird, der nur durch „die gemeinsame und gleichzeitige Wirkung zweier Faktorstufen entstehen“ kann [55, S. 38]. Dieses Phänomen wird als *Wechselwirkung* oder *Interaktion* bezeichnet. Die Berechnung des Wechselwirkungseffekts erfolgt über die Niveaumittelwerte der Spalte 12 in der Auswertmatrix (siehe Tabelle 3-6, S. 18), deren Vorzeichen sich aus der Multiplikation der Haupteffektspalten 1 und 2 ergeben. Zur grafischen Darstellung werden die Ergebnisse y_i verwendet, indem diese für jeden Faktor wiederum mit einer Linie verbunden, sie aber in demselben Abschnitt der Abszisse angezeigt werden. Dabei lassen sich für einen Datensatz jeweils zwei Diagramme erstellen und die Wechselwirkung somit immer in Abhängigkeit eines bestimmten Haupteffekts auf der x-Achse darstellen. Je nachdem, wie diese Linien zueinander liegen, herrscht eine von drei Wechselwirkungsstrukturen vor. Bei der *ordinalen Wechselwirkung* ist der Effekt der Wechselwirkung „kleiner als jeder der beiden Haupteffekte“ [55, S. 55]. Im Diagramm hat die Steigung der beiden Linien dann dasselbe Vorzeichen und die Linien kreuzen sich in keiner der beiden möglichen Darstellungen [vgl. 55,

S. 55]. Bei der *semidisordinalen Wechselwirkung* ist der Interaktionseffekt „kleiner als einer der beiden Haupteffekte, aber größer als der zweite“ [55, S. 55]. In der grafischen Darstellung haben die beiden Linien unterschiedliche Vorzeichen und können sich in einer der beiden Diagrammvarianten kreuzen [vgl. 55, S. 55-56]. Wenn „der Effekt der Interaktion größer als jeder Haupteffekt“ ist, wird dies als *disordinale Wechselwirkung* bezeichnet [55, S. 56]. Im Diagramm kreuzen sich beide Linien immer, weil sie stets unterschiedliche Vorzeichen aufweisen [55, S. 56]. Verlaufen die Linien im Diagramm parallel, liegt keine Wechselwirkung vor [vgl. 56, S. 18].

Im Wechselwirkungsdiagramm für den Versuchsplan P1 (siehe Bild 3-4, S. 21) sind die Wechselwirkungen des Faktors x_2 (Bezug) über den Faktor x_1 (Korpusmaterial) angetragen. Beide Linien haben so wie der Haupteffekt x_1 im nebenstehenden Wirkungsdiagramm (siehe Bild 3-3, S. 21) eine negative Steigung. Es handelt sich um eine ordinale Wechselwirkung, da das Vorzeichen für die Steigung beider Linien gleich ist, sie sich aber nicht kreuzen. Dies bedeutet, dass der Effekt der Wechselwirkung kleiner ist als der Effekt jedes Haupteffekts einzeln und somit nur der Haupteffekt durch die Wechselwirkung verstärkt wird [55, S. 55]. Zusammengefasst lässt sich konstatieren, dass das Korpusmaterial Pappe einen besseres Schallabsorptionsvermögen besitzt als Holz. Durch einen Bezug aus Abstandsgestrick wird der bewertete Schallabsorptionsgrad α_w jedoch bei beiden Materialvarianten erhöht.

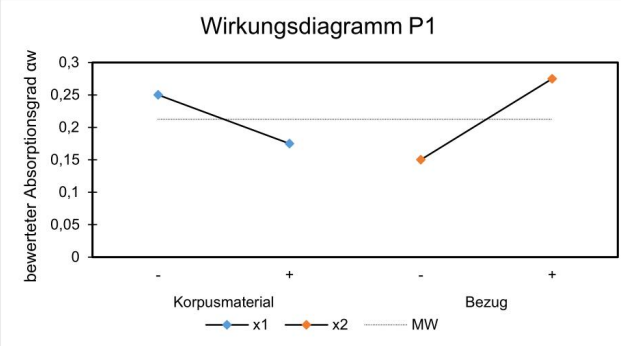


Bild 3-3: Wirkungsdiagramm über die Haupteffekte für den Versuchsplan P1

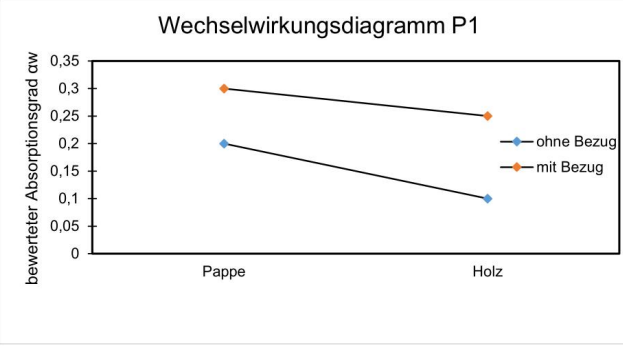


Bild 3-4: Diagramm über die ordinale Wechselwirkung im Versuchsplan P1

Versuchsplan P2

Die erforderlichen Werte zur Aufstellung der Regressionsgleichung für den Versuchsplan P2 wurden äquivalent zum detailliert beschriebenen Vorgehen für den Versuchsplan P1 ermittelt. Daher soll an dieser Stelle auf eine Herleitung verzichtet werden.

In Tabelle 3-9 (S. 22) sind die Messergebnisse y_i, die Beträge für die Effekte, die Mittelwerte mit Einstellung – und Einstellung + sowie die Beträge für die Koeffizienten b_0 … b_{12} aufgeführt. Es ergibt sich daraus die Regressionsgleichung für P2: $y=0{,}3+0{,}125x_1+0{,}125x_2+0{,}1x_1x_2$

Tabelle 3-9: Auswertmatrix für Versuchsplan P2

Versuchs-Nr.	Einstellmatrix		Symbol	Ergebnis	Auswertmatrix			
	x_1	x_2		y_i	0	1	2	12
1	-1	-1	0	0,15	+1	-1	-1	+1
2	+1	-1	1	0,2	+1	+1	-1	-1
3	-1	+1	2	0,2	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	12	0,65	+1	+1	+1	+1
$\sum (\sum_{i=1}^{4} y_i m_i)$					1,2	0,5	0,5	0,4
Effekt (∑/2)					0,6	0,25	0,25	0,2
MW-						0,175	0,175	0,2
MW+						0,425	0,425	0,4
b_m (Effekt/2 u. MW+ - MW-)					0,3	0,125	0,125	0,1

Auch das multiple Bestimmtheitsmaß beträgt wieder B=1 (siehe Tabelle 3-10, S. 22).

Tabelle 3-10: Wertetabelle für multiples Bestimmtheitsmaß B (P2)

Versuch Nr.	$\hat{y}_i$	y_i	$(\hat{y}_i-\bar{y})^2$	$(y_i-\bar{y})^2$	
1	0,15	0,15	0,0025	0,0025	
2	0,2	0,2	0	$7{,}7037*10^{-34}$	
3	0,2	0,2	0	$7{,}7037*10^{-34}$	
4	0,65	0,65	0,2025	0,2025	
Mittelwert:	0,3	0,3	0,205	0,205	: Summe

Die Berechnungen halten auch der in Excel durchgeführten Regressionsanalyse stand, bei der dieselben Koeffizienten errechnet wurden (siehe Bild 3-5, S. 22).

AUSGABE: ZUSAMMENFASSUNG

Regressions-Statistik	
Multipler Korrelationskoef	1
Bestimmtheitsmaß	1
Adjustiertes Bestimmtheit:	65535
Standardfehler	0
Beobachtungen	4

ANOVA

	Freiheitsgrade (df)	*Quadratsummen (SS)*	*Mittlere Quadratsumme (MS)*	*Prüfgröße (F)*	*F krit*
Regression	3	0,165	0,055	#ZAHL!	#ZAHL!
Residue	0	0	65535		
Gesamt	3	0,165			

	Koeffizienten	*Standardfehler*	*t-Statistik*	*P-Wert*	*Untere 95%*	*Obere 95%*	*Untere 95,0%*	*Obere 95,0%*
Schnittpunkt	0,3	0	65535	#ZAHL!	0,3	0,3	0,3	0,3
x1	0,125	0	65535	#ZAHL!	0,125	0,125	0,125	0,125
x2	0,125	0	65535	#ZAHL!	0,125	0,125	0,125	0,125
x1x2	0,1	0	65535	#ZAHL!	0,1	0,1	0,1	0,1

Bild 3-5: Ausgabe der Regressionsfunktion im MS Excel für den Versuchsplan P2

Im Wirkungsflächendiagramm wird die starke Zunahme von α_w bei der Niveaueinstellung +1/+1 für das perforierte mit Mineralwolle gefüllte Prisma deutlich (siehe Bild 3-6, S. 23).

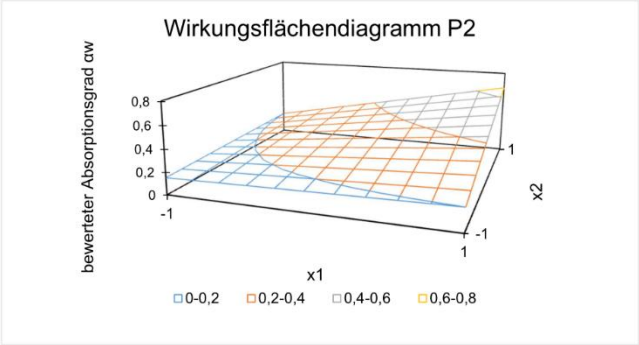


Bild 3-6: Raumdarstellung der Regressionsgleichung $y=0,3+0,125x_1+0,125x_2+0,1x_1x_2$

Aus dem Wirkungsdiagramm für P2 (siehe Bild 3-7, S. 23) lässt sich ablesen, dass die Einstellungskodierungen + beider Faktoren den bewerteten Absorptionsgrad erhöhen, also dass der Korpus perforiert und mit einem Dämpfungsmaterial gefüllt sein sollte. Beide Faktoren wirken sich einzeln aber gleich stark aus, da sie parallel verlaufen. Aufschlussreicher ist dann das Wechselwirkungsdiagramm für P2 (siehe Bild 3-8, S. 23), aus dem klar hervorgeht, dass das Füllmaterial Mineralwolle seine Wirkung nur bei einem perforierten Korpus entfalten kann. Wird die Füllung in den geschlossenen Korpus eingebracht, steigt der bewertete Absorptionsgrad nur um 0,05 Punkte, was auf die höhere Gesamtmasse der Probe zurückführbar sein kann.

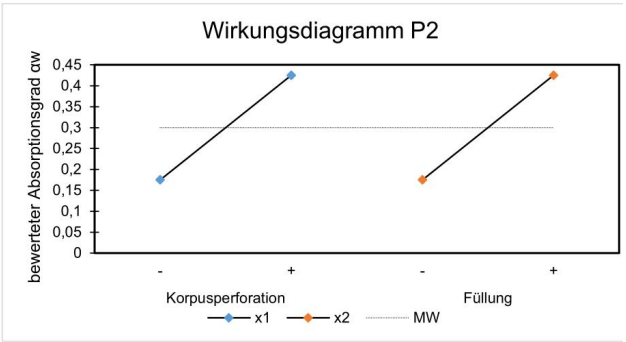


Bild 3-7: Wirkungsdiagramm über die Haupteffekte für den Versuchsplan P2

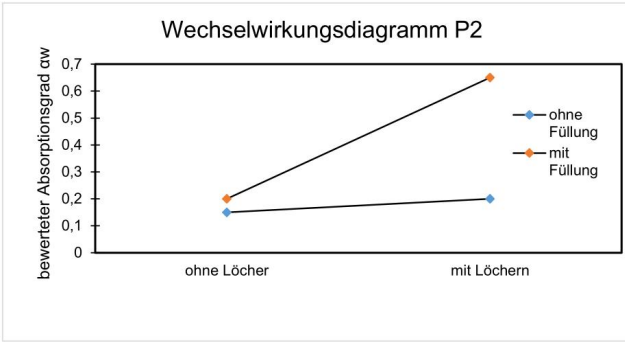


Bild 3-8: Diagramm über die ordinale Wechselwirkung im Versuchsplan P2

3.2.2.1.2 3^2-Versuchsplan – Berechnung

Auch die Berechnung der Koeffizienten einer quadratischen Regressionsgleichung entspricht im Grunde der Herangehensweise für die lineare multiple Regressionsgleichung. Wichtig ist nur, dass die Kodierungen m_i für die linearen Glieder, das Wechselwirkungsglied und die quadratischen Glieder in den entsprechenden Spalten verwendet werden.

In Tabelle 3-11 (S. 24) findet sich der Ergebnismittelwert $\bar{y}$ nach Formel (8) sowie in der letzten Zeile die Werte der Koeffizienten b_1 und b_2 nach Formel (10), b_{12} nach Formel (11) sowie b_{11} und b_{22} nach Formel (12). Als Zwischenschritt sind die Ergebnisse der Zählersumme der Formeln (10), (11) und (12) in der vorletzten Zeile vermerkt.

Das Korrekturglied e beträgt gemäß Formel (9) für einen 3^2-Versuchsplan

$$e=\frac{6}{9}=\frac{2}{3}$$

woraus sich für b_0 nach Formel (7) ergibt:

$$b_0=0{,}65-\frac{2}{3}(0+0{,}025)=0{,}6\bar{3}$$

Nach Rundung der periodischen Koeffizientenwerte ergibt sich somit folgende Regressionsgleichung:

$$y=0{,}63-0{,}0167x_1+0{,}04167x_2+0{,}0125x_1x_2+0{,}025x_2^2$$

Tabelle 3-11: Auswertmatrix für Versuchsplan P3

Versuchs-Nr.	Einstell-matrix		Ergebnis	Auswertmatrix					
	x_1	x_2	y	I	1	2	12	$11 = x_1^2-(2/3)$	$22 = x_2^2-(2/3)$
1	-1	-1	0,65	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3
2	+1	-1	0,6	+1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3
3	-1	+1	0,7	+1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3
4	+1	+1	0,7	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3
5	-1	0	0,65	+1	-1	0	0	+1/3	-2/3
6	+1	0	0,6	+1	+1	0	0	+1/3	-2/3
7	0	-1	0,6	+1	0	-1	0	-2/3	+1/3
8	0	+1	0,7	+1	0	+1	0	-2/3	+1/3
9	0	0	0,65	+1	0	0	0	-2/3	-2/3
$\bar{y}$			0,65						
$\sum (\sum_{i=1}^{n} y_i m_i)$				5,85	-0,1	0,25	0,05	0	0,05
MW-					$0,\bar{6}$	$0,61\bar{6}$			
MW0					0,65	$0,6\bar{3}$			
MW+					$0,6\bar{3}$	0,7			
b_m				$0,6\bar{3}$	$-0,01\bar{6}$	$-0,041\bar{6}$	0,0125	0	0,025

Signifikanzprüfung und Adäquatheitstest

Bevor der Signifikanztest nach Liebscher durchgeführt wird, sei ein Blick auf die ANOVA-Tabelle aus der Excel-Funktion „Regression“ vorangestellt (siehe Bild 3-9, S. 25). Für alle Koeffizienten wird darin der p-Wert ausgegeben, der „die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Annahme, dass der jeweilige Effekt wahr ist“, angibt [51, S. 75]. Entsprechend einer fünfprozentigen Irrtumswahrscheinlichkeit gilt ein Effekt als wahr, wenn der p-Wert unter 0,05 liegt [51, S. 75]. Dies trifft für den Versuchsplan P3 nur für b_0 (Schnittpunkt) und b_2 zu, alle anderen Koeffizienten sind laut p-Wert nur scheinbare Effekte und somit nicht statistisch signifikant.

AUSGABE: ZUSAMMENFASSUNG

Regressions-Statistik	
Multipler Korrelationskoef	0,964653075
Bestimmtheitsmaß	0,930555556
Adjustiertes Bestimmtheit:	0,814814815
Standardfehler	0,0186339
Beobachtungen	9

ANOVA

	Freiheitsgrade (df)	*Quadratsummen (SS)*	*Mittlere Quadratsumme (MS)*	*Prüfgröße (F)*	*F krit*
Regression	5	0,013958333	0,002791667	8,04	0,058300004
Residue	3	0,001041667	0,000347222		
Gesamt	8	0,015			

		Koeffizienten	*Standardfehler*	*t-Statistik*	*P-Wert*	*Untere 95%*	*Obere 95%*	*Untere 95,0%*	*Obere 95,0%*
Schnittpunkt		0,633333333	0,013888889	45,6	2,3218E-05	0,58913269	0,677533976	0,58913269	0,677533976
	1	-0,016666667	0,007607258	-2,19089023	0,116157528	-0,04087636	0,007543023	-0,040876356	0,007543023
	2	0,041666667	0,007607258	5,477225575	0,011966912	0,017456977	0,065876356	0,017456977	0,065876356
	12	0,0125	0,00931695	1,341640786	0,272228401	-0,01715069	0,042150693	-0,017150693	0,042150693
11 = x_1^2-(2/3)		2,45327E-18	0,013176157	1,8619E-16	1	-0,04193241	0,041932412	-0,041932412	0,041932412
22 = x_2^2-(2/3)		0,025	0,013176157	1,897366596	0,154030903	-0,01693241	0,066932412	-0,016932412	0,066932412

Bild 3-9: Ausgabe der Regressionsfunktion im MS Excel für den Versuchsplan P3

Diese Annahme soll nun mittels des unter 3.2.1.2.2 beschriebenen Vergleichs der Restvarianz mit der anteiligen Varianz der Koeffizienten überprüft werden.

Zuerst werden die Summenquadrate der Koeffizienten b_1, b_2, b_{12}, b_{11} und b_{22} gemäß Formel (19) gebildet, wie exemplarisch für b_1 ausgeführt wird:

$$SQ(b_1)=\frac{(\sum_{i=1}^{n} y_i m_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} m_i^2}=\frac{[0,65*(-1)+0,6*1+0,7*(-1)+0,7*1+0,65*(-1)+0,6*1+0,6*0+0,7*0+0,65*0]^2}{(-1)^2+1^2+(-1)^2+1^2+(-1)^2+1^2}$$

$$=\frac{(-0,1)^2}{6}=\frac{0,01}{6}=0,001\overline{6}$$

Für die weiteren Koeffizienten ergeben sich folglich:

$$SQ(b_2)=0,010416\overline{6};\qquad SQ(b_{12})=0,000625;\qquad SQ(b_{22})=0,00125$$

$$\sum SQ(b)=0,0139583\overline{3}$$

Die Freiheitsgrade betragen:

$$FG_{ges}=n-1=9-1=8;FG_R=n-K=9-5=4$$

$$SQ_{ges}=\sum_{i=1}^{n} y_i^2-\frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n} y_i)^2=3,8175-\frac{1}{9}(5,85)^2=0,015$$

$$SQ_R=SQ_{ges}-\sum SQ(b)=0,015-0,0139583\overline{3}=0,0010416\overline{6}$$

$$s_R^2=\frac{SQ_R}{FG_R}=\frac{0,0010416\overline{6}}{4}=0,000260416\overline{6}$$

$s_{AG}^2(b)$ entspricht den Beträgen der oben aufgeführten Summenquadrate, da FG(b)=1.

Nun wird für jeden Koeffizienten geprüft, ob gilt:

$$F_{tab(S=95\%;FG_1;FG_2)}*s_R^2<s_{AG}^2(b)$$

$$F_{tab(S=95\%;FG_1=1;FG_2=4)}=7,71$$

$$7,71*000260416\overline{6}=0,00200781250<s_{AG}^2$$

Da nur $s_{AG}^2(b_2) > 0,00200781250$, ist lediglich der Koeffizient b_2 signifikant vorhanden. Die reduzierte Regressionsgleichung lautet dann:

$$y=0{,}63+0{,}04167x_2$$

Um zu überprüfen, ob dieses Modell den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen kann, wird das multiple Bestimmtheitsmaß nach Formel (27) mit der reduzierten Regressionsgleichung berechnet. Die zugehörigen Einzelwerte finden sich in Tabelle 3-12 (S. 26).

$$B=\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i-\bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}=\frac{0{,}012917}{0{,}0150}=0{,}86$$

Da B > 0,8, ist das reduzierte Regressionsmodell adäquat und kann verwendet werden.

Somit sagt dieses Modell aus, dass nur der Faktor x_2 (Lagenanzahl bzw. Masse des Dämpfungsmaterials) für das Absorptionsvermögen der Probe relevant ist.

Tabelle 3-12: Wertetabelle für multiples Bestimmtheitsmaß B (P3)

Versuch Nr.	$\hat{y}_i$	y_i	$(\hat{y}_i-\bar{y})^2$	$(y_i-\bar{y})^2$	
1	0,59167	0,65	0,003403	0,0000	
2	0,59167	0,60	0,003403	0,0025	
3	0,67500	0,70	0,000625	0,0025	
4	0,67500	0,70	0,000625	0,0025	
5	0,63333	0,65	0,000278	0,0000	
6	0,63333	0,60	0,000278	0,0025	
7	0,59167	0,60	0,003403	0,0025	
8	0,67500	0,70	0,000625	0,0025	
9	0,63333	0,65	0,000278	0,0000	
Mittelwert:	0,63333	0,65	0,012917	0,0150	: Summe

Grafische Darstellung

Die Interpretation der Regressionsgleichung lässt sich auch durch die grafische Darstellung belegen. Die Linie für den Faktor x_1 (Kantenlänge der Dreiecksprismengrundfläche) mit den drei Kodierungsstufen in Bild 3-10 (S. 27) hat einen linearen Verlauf mit geringer negativer Steigung. Eine geringere Kantenlänge und somit ein geringeres Prismenvolumen wirkt sich demnach positiv auf den bewerteten Absorptionsgrad aus. Dies hängt mit der Absorberoberfläche in der Berechnungsformel des Sabine'schen Absorptionsgrads α_s zusammen (siehe Formel (28)). Für x_2 verläuft die Kurve mit unterschiedlich starker positiver Steigung zwischen – und 0 und zwischen 0 und +. Der Wechsel von 0 auf + bewirkt somit eine stärkere Zunahme des Absorptionsvermögens als der Wechsel von – auf 0. Je mehr Lagen in das Prisma eingebracht werden, desto höher wird das Absorptionsvermögen. Da die Wechselwirkung statistisch nicht signifikant ist, kann für diesen Versuchsplan auch kein Wechselwirkungsdiagramm ausgegeben werden. Im Wirkungsflächendiagramm für P3 (siehe Bild 3-11, S. 27) wird deutlich, dass die Regressionsgleichung linear ist und nur von einer Variablen abhängt, weil die ebene Fläche nur zwischen zwei Parallelen aufgespannt wird. Da die Faktoren im Versuchsplan P3 kontinuierlich einstellbar sind, kann eine Interpolation innerhalb der aufgespannten Wirkungsfläche vorgenommen werden, sofern dies sinnvoll ist. Eine Extrapolation über den dargestellten Bereich hinaus ist jedoch stets unzulässig, weil die physikalischen Wirkungen abweichen könnten.

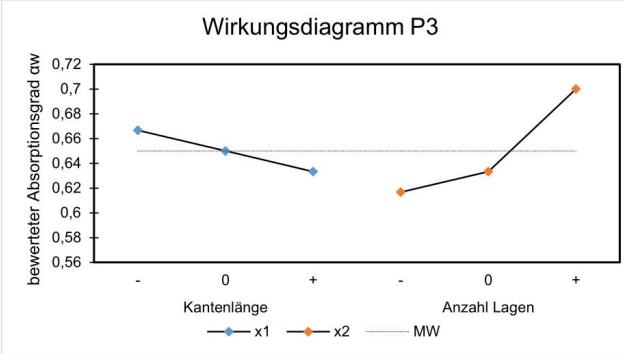


Bild 3-10: Wirkungsdiagramm über die Haupteffekte für den Versuchsplan P3

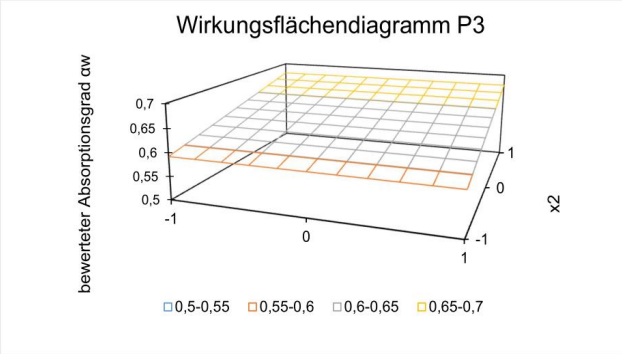


Bild 3-11: Dreidimensionale Darstellung der Regressionsgleichung $y=0{,}63+0{,}04167x_2$

3.2.2.1.3 Absorptionsgradsdiagramme

In Abschnitt 3.2.2 wurden die Berechnungen der Regressionsgleichung sowie der Haupt- und Wechselwirkungseffekte auf Grundlage des bewerteten Absorptionsgrads α_w durchgeführt. Dieser basiert auf dem Sabine'schen Absorptionsgrad α_s und dem praktischen Absorptionsgrad α_p[10], der dem Wert eines Oktavbands entspricht, welcher aus drei Terzbändern des Sabine'schen Absorptionsgrads zusammengefasst wurde [vgl. 25, S. 21]. Bei Betrachtung der zugehörigen Kurvenverläufe wird das Absorptionsverhalten des Absorbers pro Frequenzband deutlich detaillierter dargestellt. Bei den im Folgenden abgebildeten Diagrammen muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Werte im Bereich ≤ 500 Hz nicht das tatsächliche Absorptionsverhalten abbilden, da die Abmessungen der Alphakabine zu gering für die großen Wellenlängen tiefer Frequenzen sind (siehe Tabelle 3-13, S. 27). Aussagekräftige Messwerte für tiefe Frequenzen bietet nur die Messung im größeren Hallraum.

Tabelle 3-13: Temperaturabhängige Wellenlängen ausgewählter Frequenzen

f in Hz	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
λ in m (18 °C)	17,115	6,846	3,423	1,7115	0,6846	0,3423	0,17115	0,06846	0,03423
λ in m (22 °C)	17,235	6,894	3,447	1,7235	0,6894	0,3447	0,17235	0,06894	0,03447

In Bild 3-12 (S. 28) ist der Kurvenverlauf für α_s und in Bild 3-13 (S. 28) für α_{pi} der vier Messungen des Versuchsplans P1 dargestellt. Eine Kurzbeschreibung der Probenbezeichnungen P1-1 … P1-4 sowie aller weiterer Versuche findet sich in Anlage 1. In den Kurven zu α_s sind deutlich mehr Punkte im Koordinatensystem enthalten als für α_{pi}. In beiden ist die Tendenz jedoch gleich – die Kurven steigen in Richtung der höheren Frequenzen konstant an. P1-2 (Holzprisma, ohne Bezug) hat den geringsten und P1-3 (Pappprisma mittel, mit Bezug) den höchsten Schallabsorptionsgrad. Der Kurvenverlauf von P1-1 (Pappprisma mittel, ohne Bezug) und P1-4 (Holzprisma, mit Bezug) überlagert sich bei etwa 2000 Hz, wodurch sich auch der identische α_w-Wert 0,2 für beide Messungen nachvollziehen lässt.

[10] α_{pi} bezeichnet den praktischen Absorptionsgrad im i-ten Oktavband

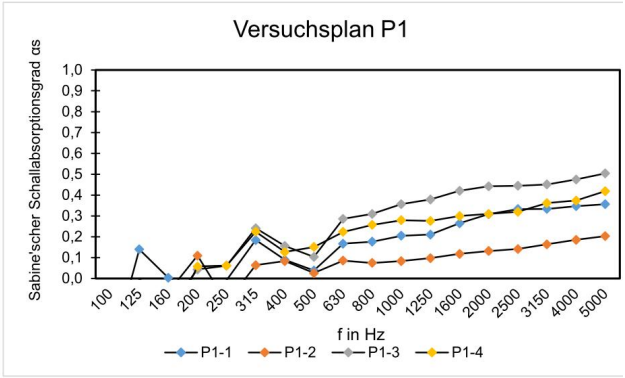


Bild 3-12: α_s-Darstellung für Versuchsplan P1

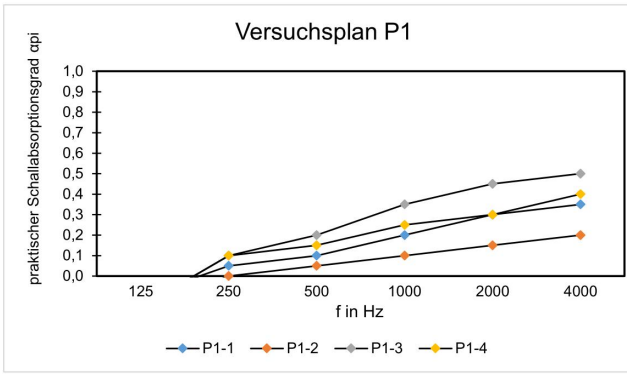


Bild 3-13: α_{pi}-Darstellung für Versuchsplan P1

In den Schaubildern für den Versuchsplan P2 (Bild 3-14, Bild 3-15, S. 28) sticht heraus, dass das Absorptionsvermögen der Proben P2-1 (Pappprisma mittel ohne Löcher, ohne Füllung), P2-3 (Pappprisma mittel ohne Löcher, mit Füllung) und P2-4 (Pappprisma mittel mit Löchern, mit Füllung) zwischen 630 Hz und 5000 Hz kontinuierlich abnimmt. In den tieferen Frequenzen deutet sich unter Vorbehalt auch ein gutes Absorptionsvermögen ab. In P2-2 (Pappprisma mittel mit Löchern, ohne Füllung) verläuft die Kurve hingegen leicht ansteigend. Möglicherweise hängt dieses Verhalten damit zusammen, dass einige Schallwellen über die Löcher auch ins Innere der Wellpappe eindringen können, das im Inneren aus drei gewellten Papierbahnen getrennt durch zwei glatte Papierbahnen besteht, und somit genügend Reibungspunkte für die kürzeren Schallwellen höherer Frequenzen vorhanden sind. Der fallende Kurvenverlauf der Probe P2-4 könnte mit der vergleichsweise hohen Porosität der Mineralwolle zusammenhängen, bei der die Wahrscheinlichkeit, dass der energiereiche Teil (Maximum und Minimum) einer längeren Schallwelle auf eine Mineralfaser trifft höher ist als der einer kürzeren Schallwelle. Bei den Kurven für P2-1 und P2-3 ist zu vermuten, dass die Resonanz bei den Proben eine Rolle spielt, welche bei den tieferen Frequenzen stärker zum Tragen kommt.

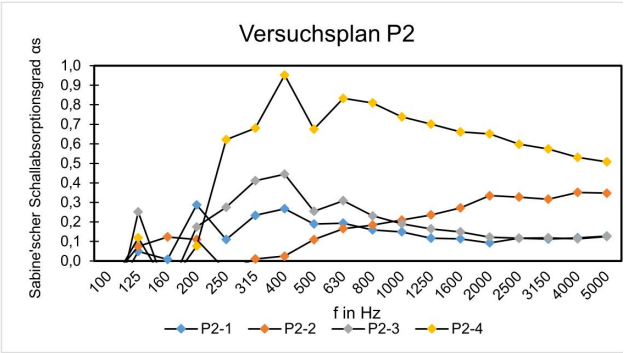


Bild 3-14: α_s-Darstellung für Versuchsplan P2

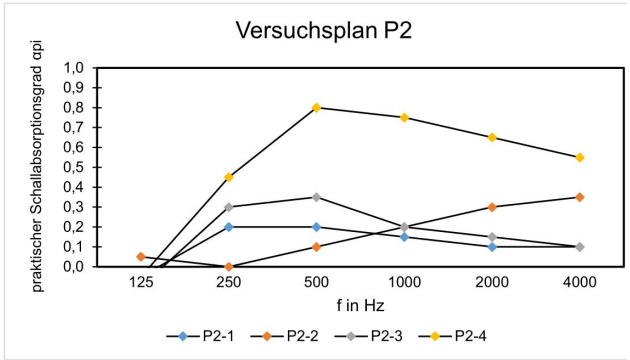


Bild 3-15: α_{pi}-Darstellung für Versuchsplan P2

Die Kurvenverläufe des gesamten Versuchsplans P3 (siehe Bild 3-16, S. 29, und Bild 3-17, S. 29) ähneln der Probe P2-4 aus dem Versuchsplan P2: Das Maximum im Bereich mit aussagekräftigen Ergebnissen liegt bei 630 bzw. 800 Hz. Den höchsten Wert erreicht dabei P3-3 (Pappprisma klein, 125 Lagen Vitalis) mit $\alpha_{sP3\text{-}3}$=0,89 und den niedrigsten P3-2 (Pappprisma groß, 75 Lagen Vitalis) mit $\alpha_{sP3\text{-}2}$=0,69. Diese Unterschiede sind klar auf die unterschiedlichen Füllmengen zurückzuführen. Auffällig ist jedoch, dass der niedrigste α_s-Wert bei

5000 Hz bei allen Proben ohne Bezug zwischen α_s=0,47…0,52 liegt, was im Mittel 0,498 ergibt. Nur die beiden Proben P3-2(2) (Pappprisma groß, 75 Lagen Vitalis, mit Bezug) und P3-5(2) (Pappprisma klein, 100 Lagen Vitalis, mit Bezug), die zu Vergleichszwecken außerhalb des Versuchsplans gemessen wurden, erreichen einen höheren Minimalwert bei 5000 Hz mit $\alpha_{sP3\text{-}2(2)}$=0,58 und $\alpha_{sP3\text{-}5(2)}$=0,66.

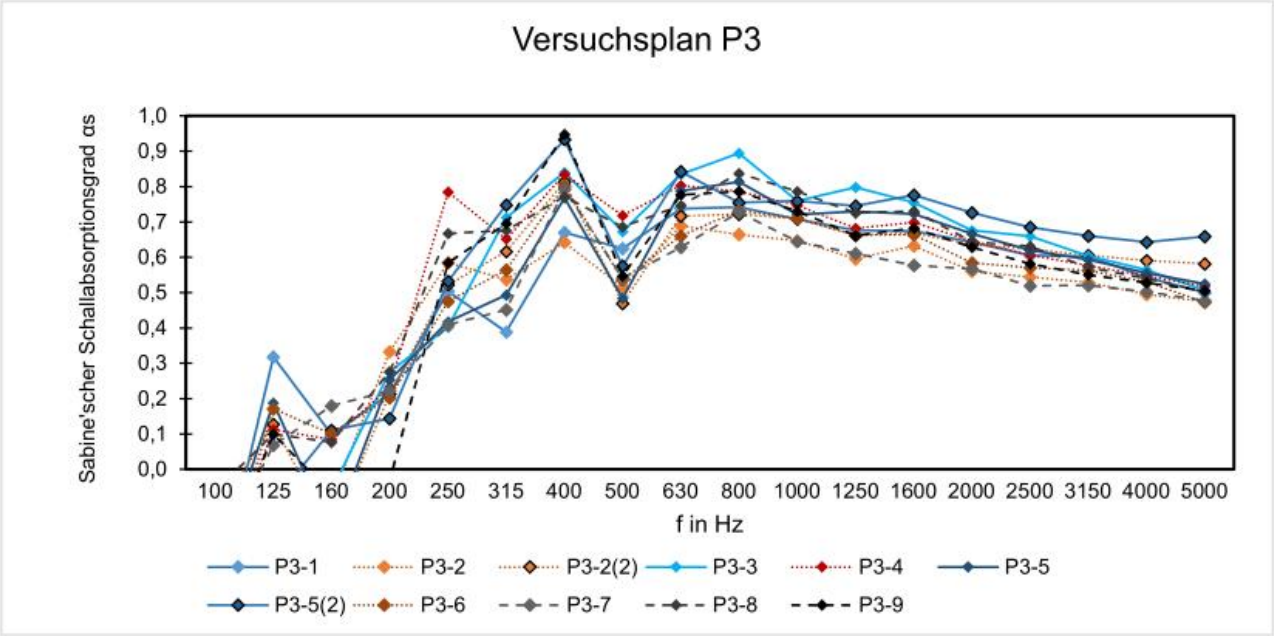


Bild 3-16: α_s-Darstellung für Versuchsplan P3

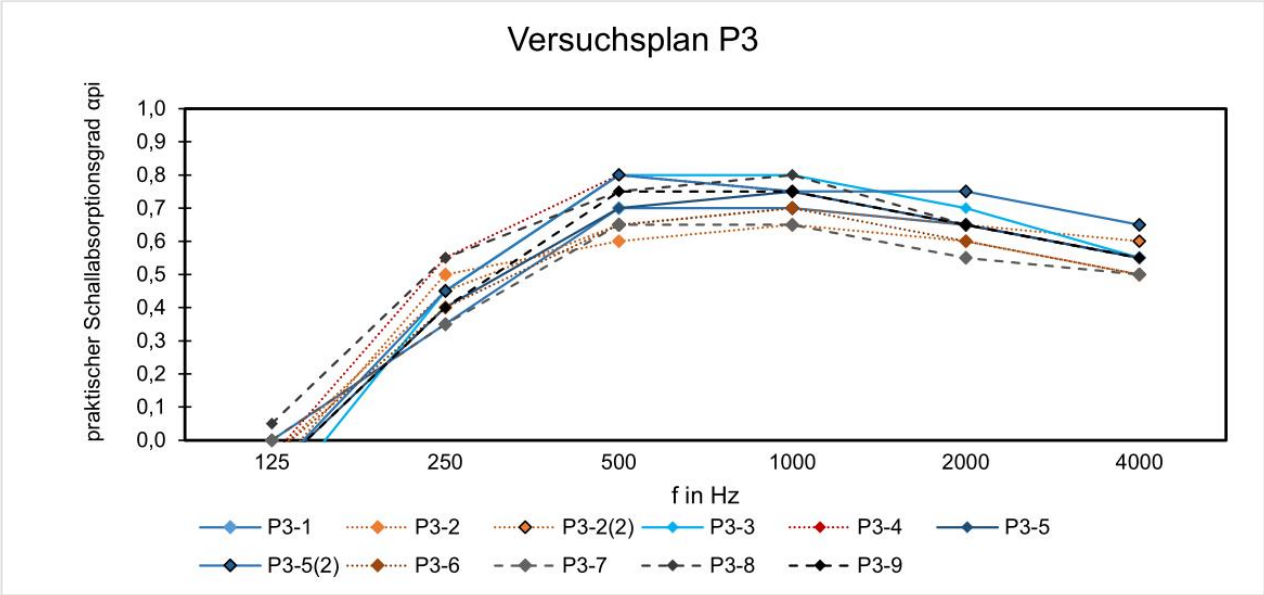


Bild 3-17: α_{pi}-Darstellung für Versuchsplan P3

Um die beiden Varianten mit und ohne Bezug des Versuchsplans P3 gegenüberzustellen, wurden die Diagramme in Bild 3-18 und Bild 3-19 (siehe S. 30) erstellt. Hierin wird deutlich, dass der Bezug das Schallabsorptionsvermögen im Maximum um 0,03 Punkte und im Minimum um 0,08 bzw. 0,09 Punkte erhöht. Diese

experimentelle Beobachtung bestätigt somit das Ergebnis der Wirkungsanalyse des Versuchsplans P1 (siehe Bild 3-3, S. 21).

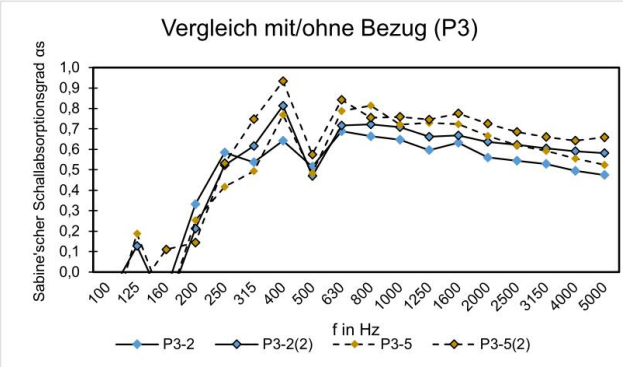


Bild 3-18: Vergleich von α_s für Proben aus P3 mit und ohne Bezug

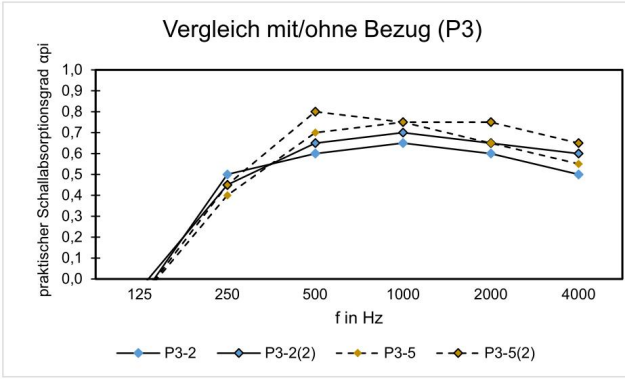


Bild 3-19: Vergleich von α_{pi} für Proben aus P3 mit und ohne Bezug

3.2.3 Säulenabsorber

Für die Vorversuche zu den Säulenabsorbern hat sich die Aufstellung eines Versuchsplans als nicht zweckdienlich erwiesen. Hier kam es primär darauf an, das Absorptionsvermögen der zur Verfügung stehenden Materialien zu ermitteln, um auf dieser Grundlage Optimierungen planen zu können. Folgende Proben mit den angegebenen Spezifikationen wurden für den Säulenabsorber gemessen (siehe Anlage 1 und Anlage 3 (Datenblätter)):

(S1-1) D155-1012, eingenähte Falten, manuell gewickelt, d=40 cm
(S1-2) D155-1012, eingenähte Falten, manuell gewickelt, d=20,9 cm
(S1-3) D155-1012, Rollenabschnitt, d=20,9 cm
(S1-4) D147-1080, Rollenabschnitt, d=26,8 cm
(S1-5) D155-1012, Rollenabschnitt, d=28,9 cm
(S1-6) D328-1909, Rollenabschnitt, d=28 cm

Die oben genannten Proben besitzen eine Höhe zwischen 45 und 47 cm. Die Durchmesserwerte entsprechen den Mittelwerten von je vier Messungen des Durchmessers im Abstand von jeweils 90°, da die Rollen nicht an jeder Stelle den gleichen Radius besaßen. Alle Messungen in der Alphakabine erfolgten ohne Bezugsstoff und ohne Fuß bzw. Deckel aus Holz. Für die Probe S1-1 wurde in 22 Stoffbahnen (Ausgangsmaße: 46,5x230 cm) des Materials D155-1012 aller 2 cm eine Falte mit 1 cm Höhe gelegt und zur Fixierung festgenäht (siehe Bild 3-20 und Bild 3-21, S. 31). Diese Bahnen wurden anschließend manuell auf eine Papphülse aufgewickelt. Für die Probe S1-2 wurden dann entsprechend viele Bahnen wieder abgewickelt, bis der Durchmesser 20,9 cm erreicht war, um eine Vergleichbarkeit zu Probe S1-3 herstellen zu können. Ziel dieser Vorbereitung war es herauszufinden, wie sich das Einbringen zusätzlicher Luftkammern auf das Absorptionsvermögen auswirkt.

Die Proben S1-4, S1-5 und S1-6 wurden von der Stoffrolle geschnitten und enthalten keine zusätzlichen Luftkammern (siehe Bild 3-22, S. 31).

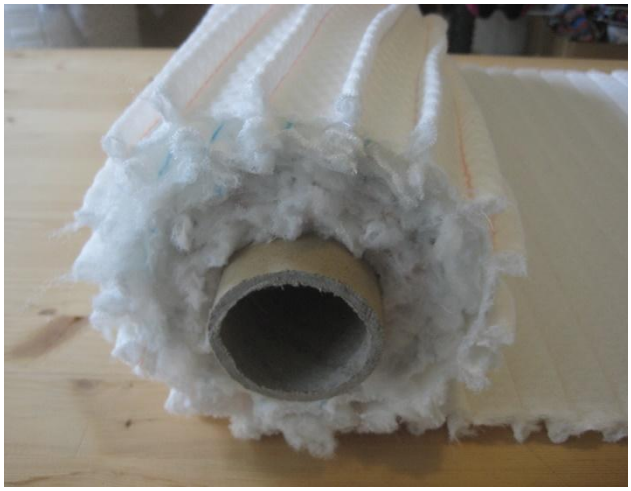


Bild 3-20: Aufbau der Probe S1-1

Bild 3-21: Fertiggestellte Probe S1-1

Bild 3-22: Rollenabschnitte der Materialien D147-1080, D155-1012 und D328-1909 (von links)

Es zeigt sich in der grafischen Darstellung der Absorptionsgrade α_s und α_{pi} der Versuchsreihe S1, dass die Faltenlegung der Probe S1-1 im Vergleich zu den anderen Proben das schlechteste Ergebnis ab 630 Hz hervorbringt (siehe Bild 3-23, Bild 3-24, S. 32). Der bewertete Absorptionsgrad α_{wS1-1}=0,8 entspricht jedoch bereits der Schallabsorberklasse B. Aufgrund der geringeren Absorberfläche schneidet die Probe S1-2, die nur einen etwa halb so großen Durchmesser besitzt wie S1-1, allerdings deutlich besser ab und erreicht die Schallabsorberklasse A mit α_{wS1-2}=0,95. Somit zeigen alle Proben der Versuchsreihe S1 ab 630 Hz durchweg ein sehr gutes rechnerisches Ergebnis, da ihr Schallabsorptionsgrad von da an über α_s=1 liegt.[11] Die im Hinblick darauf relativ niedrigen bewerteten Schallabsorptionsgrade α_{wS1-3}=0,55, α_{wS1-4}=0,7, α_{wS1-5}=0,65 und α_{wS1-6}=0,75 sind auf das lokale Minimum in der α_s-Kurve bei 500 Hz, die niedrigen Werte bei 250 Hz bzw. den steilen Anstieg zwischen 160 und 400 Hz zurückzuführen. Laut Definition muss der Wert für 250 Hz zwar für den α_w-Wert

[11] Ausgenommen der Wert von S1-5 bei 630 Hz. Dieser beträgt 0,92, was jedoch sehr hoch ist.

berücksichtigt werden, jedoch liefern Messungen in der Alphakabine erst ab 630 Hz verlässliche Werte. Hierfür ist somit eine Überprüfung im Hallraum unerlässlich.

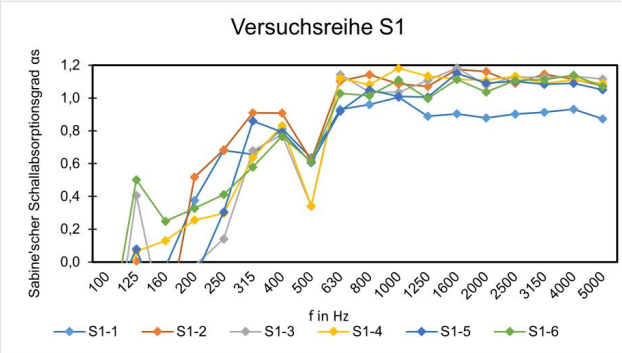


Bild 3-23: Vergleich von α_s der Säulenabsorberproben

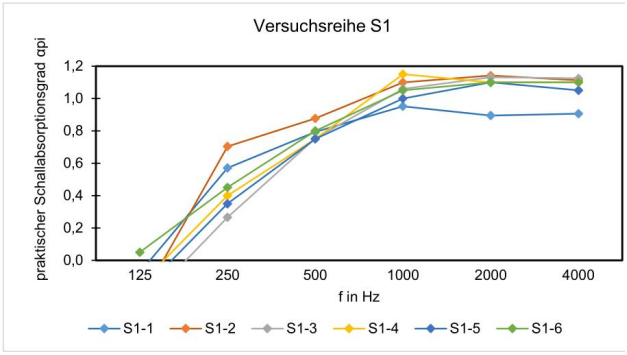


Bild 3-24: Vergleich von α_{pi} der Säulenabsorberproben

4 Hallraummessungen

4.1 Probenoptimierung

4.1.1 Erkenntnisse aus den Messungen in der Alphakabine

Aus den Messungen in der Alphakabine, die in den Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 beschrieben sind, lässt sich ableiten, welche Ansätze im größeren Maßstab erfolgversprechend sein könnten. Aus dem Versuchsplan P1 (siehe S. 16) ergibt sich, dass für die Verkleidung des Dämpfungsmaterials Pappe besser ist als Holz und dass sich ein zusätzlicher Bezug aus dem Abstandsgestrick D310-1822 noch einmal positiv auf den Schallabsorptionsgrad auswirkt. Durch den Versuchsplan P2 (siehe S. 16) wird bestätigt, dass die Verkleidung perforiert sein muss, damit der Schall bis zum Dämpfungsmaterial vordringen kann. Aus dem Versuchsplan P3 (siehe S. 17) ergibt sich, dass mehr Dämpfungsmaterial in die Proben eingebracht werden sollte, dass die Masse des Dämpfungsmaterials somit möglichst hoch sein muss. Den höchsten α_w-Wert hat in diesem Versuchsplan die Probe P3-5(2) mit $\alpha_{wP3\text{-}5(2)}$=0,75. Durch den Bezug steigt der bewertete Schallabsorptionsgrad um 0,1 Punkte an. Unter der Annahme, dass die Zunahme von α_w durch den Bezug 0,1 beträgt, könnte bei den Prismenabsorbern mit 125 Lagen Füllmaterial (Proben P3-4, P3-5, P3-8) ein α_w-Wert von etwa 0,8 erreicht werden. Eine weitere Steigerung ist jedoch unwahrscheinlich, weil das Prismenvolumen damit komplett ausgefüllt ist. Ohne den Korpus zu beschädigen, können nicht deutlich mehr Stofflagen eingebracht werden.

In der Versuchsreihe S1 (siehe S. 30) zeigten sowohl die Abschnitte der Rollenware mit ca. 28 cm Durchmesser als auch die manuell mit in Falten gelegtem Stoff bewickelte Probe S1-2 durchweg sehr gute Ergebnisse mit α_s>1 für f>500 Hz. Das beste Verhältnis aus Absorptionsvermögen und Absorberfläche weist mit α_w=0,95 dabei die Probe S1-2 mit dem geringen Durchmesser d=21 cm auf. Im direkten Vergleich mit Probe S1-3 wird die Ursache dafür deutlich, da beide Proben denselben Durchmesser und somit auch dieselbe Absorberfläche S und dasselbe Absorbervolumen besitzen und zudem aus dem gleichen Material (D155-1012) bestehen

(siehe Tabelle 4-1, S. 33). Der Unterschied zwischen beiden Proben besteht darin, dass die Probe S1-2 eine höhere Porosität aufweist, da durch die Faltenlegung und das manuelle Wickeln zahlreiche zusätzliche Luftkammern entstanden sind. Daraus resultieren die unterschiedlichen bewerteten Absorptionsgrade α_{wS1-2}=0,95 und α_{wS1-3}=0,55. Probe S1-1 wurde ebenfalls mit den in Falten gelegten Stoffbahnen manuell umwickelt, der Durchmesser ist allerdings fast doppelt so groß und die Masse sowie das Volumen mehr als dreimal so hoch wie bei Probe S1-2. Ihr bewerteter Absorptionsgrad beträgt α_{wS1-1}=0,8. Dies lässt somit die Schlussfolgerung nicht zu, dass ausschließlich eine hohe Masse und ein hohes Volumen für einen hohen Schallabsorptionsgrad erforderlich sind. Auch wenn die Absorbergröße mit der Absorberfläche S über den rechnerischen Zusammenhang $\frac{V_{Alphakabine}}{S}$ in Formel (28) für den Sabine'schen Absorptionsgrad [2, S. 213]

$$\alpha_S = \frac{55{,}3}{c}\frac{V}{S}\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right) \qquad (28)$$

c	V	S	T_2, T_1
m/s	m^3	m^2	s

mit der Schallgeschwindigkeit in Luft

$$c_{Luft} = 331 + 0{,}6 * \vartheta \qquad (29)$$

ϑ=15…30 °C

einen wichtigen Einfluss hat, kann er nicht als Erklärung herangezogen werden, da für beide Proben S1-2 und S1-3 das Verhältnis $\frac{V_{Alphakabine}}{S}$=19,16 beträgt. In Kombination mit dem in Falten gelegten Dämpfungsmaterial (DM) scheint dies jedoch für den hohen Absoptionsgrad verantwortlich zu sein. Folglich sind die Materialkennwerte relevant.

Tabelle 4-1: Kennwerte Versuchsreihe S1

Probe	Material	α_W	m_{ges} (kg)	m_{DM} (kg)	M_{DM} (kg/m²)	A_{DM} (m²)	$d_{Absorber}$ (m)	S (m²)	V_{Alpha}/S (m³/m²)	$V_{Absorber}$ (m³)
S1-1	D147-1080	0,80	6,23	6,01	0,26	23,12	0,400	0,73	8,89	0,0614
S1-2	D155-1012	0,95	2,13	1,91	0,26	7,36	0,209	0,34	19,16	0,0159
S1-3	D328-1909	0,55	2,63	2,41	0,26	9,27	0,209	0,34	19,16	0,0159
S1-4	D310-1822	0,70	4,59	4,37	0,18	24,96	0,268	0,45	14,44	0,0261
S1-5	D264-1702	0,65	5,27	5,05	0,26	19,44	0,268	0,49	13,27	0,0308
S1-6	D155-1012 (Falten)	0,75	5,85	5,63	0,32	17,59	0,280	0,48	13,54	0,0289

4.1.2 Theoretische Optimierungsgrundlagen

a) Gestricke finden neben Vliesstoffen und Geweben als poröse Absorber Anwendung und bieten neben geringen Herstellungskosten und geringer Umweltbelastung auch noch eine ansprechende Optik [57, S. 1949-1950]. Bei allen in Abschnitt 3 verwendeten textilen Flächen handelt es sich um Abstandsgestricke mit Füllfäden [vgl. 58, S. 10] (siehe Abschnitt 4.1.3, S. 35). Durch ihre größere Dicke ist ihr Schallabsorptionsvermögen höher als das einlagiger Maschenwaren [vgl. 59, S. 2657]. Jedoch reicht es nicht, pauschal die Dicke eines Flächengebildes zu erhöhen, um die akustische Wirksamkeit zu steigern.

Gleichzeitig muss auch der Strömungswiderstand zunehmen, was in einer Verringerung der Porosität mündet, da sich diese Materialkennzahlen indirekt proportional zueinander verhalten [59, S. 2665-2666]. Dies bedeutet, dass textile Flächen mit einer höheren Gesamtdichte den Schall wirkungsvoller absorbieren können [59, S. 2665].

b) Die Porosität σ, der längenbezogene Strömungswiderstand Ξ (bzw. σ) sowie der Strukturfaktor X sind die drei wichtigsten Materialkennwerte eines porösen Dämpfungsmaterials, da sie den Wellenwiderstand (Impedanz Z) des porösen Materials bestimmen [2, S. 193]. Der längenbezogene Strömungswiderstand beträgt für faserige poröse Materialen $\Xi > 10*10^3 Ns/m^4$ [2, S. 195]. Damit lassen sich für mittlere und hohe Frequenzen ab 500 Hz [vgl. 8, S. 500] wirkungsvolle Absorber mit kleinen Schichtdicken d im einstelligen Zentimeterbereich dimensionieren [2, S. 195]. Für die Dämpfung niedriger Frequenzen ist allgemein jedoch sowohl eine deutlich höhere Absorberschichtdicke als auch ein niedrigerer längenbezogener Strömungswiderstand erforderlich, der nur durch lose Fasern und nicht mehr durch ein textiles Flächengebilde erreicht werden kann [2, S. 195]. Der Optimalbereich für die Absorption liegt für das Produkt aus Strömungswiderstand und Dicke bei $800 < \Xi d < 2400$ Pas/m [60, S. 9]. Für den spezifischen Strömungswiderstand R_s liegt der Optimalbereich bei 600 bis 1200 Pas/m und sollte die Untergrenze von 200 Pas/m nicht unterschreiten, weil die Absorptionsfähigkeit des Werkstoffs dann deutlich reduziert sei [61, S. 10]

c) Um eine Reflexion der Schallwellen an der Grenzfläche zwischen Luft und Absorbermaterial zu verhindern, kann das Absorbermaterial in Form von Keilen oder Pyramiden, die für eine vollständige Absorption so lang sein müssen wie die halbe Längenwelle der tiefsten zu absorbierenden Frequenz, auf eine ebene Fläche aufgebracht werden [62, S. 234]. Diese Breitbandabsorption ist jedoch auch nur für Frequenzen über 150 Hz möglich [62, S. 234].

d) Das Wirkungsprinzip poröser Absorber besteht darin, dass der Schall seine Energie „durch Reibung der in der Welle mitbewegten Luftteilchen an dem sehr fein strukturierten faserigen oder offenporigen Material“ abgibt [60, S. 8]. Wenn der Absorber vor einer schallharten Wand bzw. Fläche angebracht ist, wird der Schall an dieser reflektiert und durchdringt die sich passiv verhaltende Absorberschicht ein zweites Mal, was den Wirkungsgrad des Absorbers erhöht, da sich die Amplitude der Schallwelle allein durch die Reflexion verringert [63, S. 48]. Schallwellen mit größeren Amplituden besitzen einen höheren Energiegehalt und werden häufig als lauter wahrgenommen als diejenigen mit kleineren Amplituden [64].

Zu a) Da eine begrenzte Auswahl an Abstandsgestricken zur Verfügung steht und es nicht Ziel dieser Arbeit ist, die Gestrickkonstruktion an sich zu optimieren, können lediglich die notwendigen Kennwerte ermittelt und auf dieser Grundlage die Materialauswahl getroffen werden.

Zu b) Es sollte ein Absorberaufbau gefunden werden, für den $800 < \Xi d < 2400$ Pas/m zutrifft.

Zu c) Diese Optimierungsvariante kommt z. B. in reflexionsarmen Messräumen durch Dämpfungsmaterialien aus Schaum zum Einsatz. Sie ist hier nicht umsetzbar, da aus einzelnen Stofflagen keine derartigen Keile geformt werden können, die gleichzeitig zusätzlich schalldurchlässig sind. Durch eine Fixierung (z. B. durch einen Klebstoff) käme es unweigerlich zur ungünstigen Veränderung des längenbezogenen Strömungswiderstandes.

Zu d) In diesem Zusammenhang ließen sich die manuell bewickelten Proben S1-2 bzw. S1-1 optimieren, indem die Oberfläche des Wickelkerns vergrößert und verändert wird. In den Vorversuchen bestand der Wickelkern aus einer 50 mm breiten Papphülse. Zu überprüfen wäre, wie sich die Verwendung von mehreren Papphülsen pro Wickel, die Geometrieänderung des Wickelkerns (quader- statt zylinderförmig) und/oder die Verbesserung der Reflexionsfähigkeit des Wickelkerns durch eine glattere Oberflächengestaltung auf das Absorptionsvermögen auswirkt.

4.1.3 Textiltechnische Beschreibung der Abstandsgestricke

4.1.3.1 Allgemeine Materialkennwerte

Bindung

Bei allen fünf Materialproben handelt es sich um rundgestrickte Abstandsgestricke in der Bindung Rechts/Rechts-Fangjacquard mit eingelegten Füllfäden [vgl. 65, S. 93]. Die Außenseiten weisen somit ausschließlich rechte Maschen auf. Die strukturierte Musterung erfolgt durch Henkel, durch die die eigentlich unverbundenen Maschenwarenschichten verbunden werden [vgl. 58, S. 10]. Diese Henkel stellen dabei die alleinige Verbindung zwischen den RL-Maschenreihen der Zylindernadeln und der RL-Maschenreihen der Rippnadeln her [65, S. 93]. Da sich der Jacquardauswählmechanismus an den Zylindernadeln befindet, werden dort die Henkel gebildet, der Mustereffekt entsteht allerdings auf der Rippnadelseite [65, S. 93]. Prinzipiell ist das Stricken mit verschiedenen Feinheiten auf Zylinder- und Rippnadeln möglich [65, S. 93]. Die Musterung erfolgt in jedem Stricksystem durch beliebige Einzelnadelauswahl [65, S. 94]. Somit ist eine große Mustervielfalt gegeben, was sich bereits anhand der fünf Materialproben zeigen lässt. Durch die Verwendung unterschiedlicher Materialien für Zylinder- und Rippnadelseite können noch weitere optische Effekte erzielt werden.

Fotografien und Mikroskopaufnahmen

Nachfolgend sind Übersichtsfotografien und Mikroskopaufnahmen mit verschiedener Vergrößerung der fünf verwendeten Abstandsgestricke eingefügt.

D147-1080

Bild 4-1: Material D147-1080

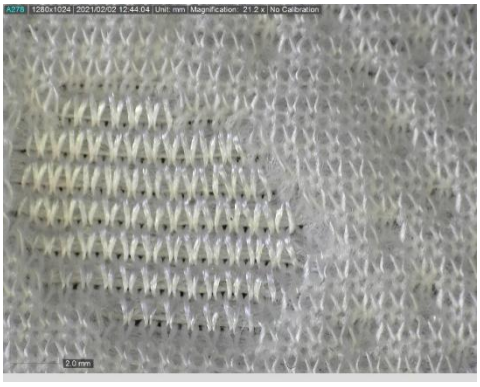


Bild 4-2: Mikroskopaufnahme Vorderseite D147-1080 bei 21,2facher Vergrößerung

Bild 4-3: Mikroskopaufnahme der großflächigen Henkelabbindungen mit Umschlingung der Füllfäden, Vorderseite, D147-1080, Vergrößerung 50,6fach

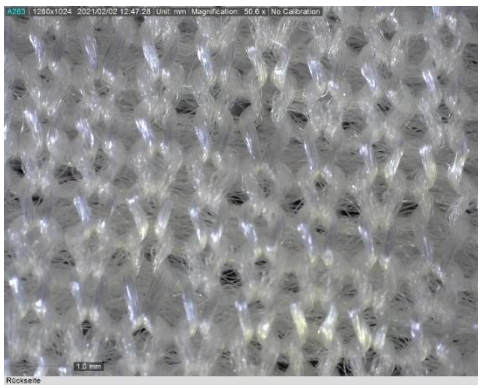


Bild 4-4: Mikroskopaufnahme Rückseite, D147-1080, Vergrößerung 50,6fach

D155-1012

Bild 4-5: Material D155-1012

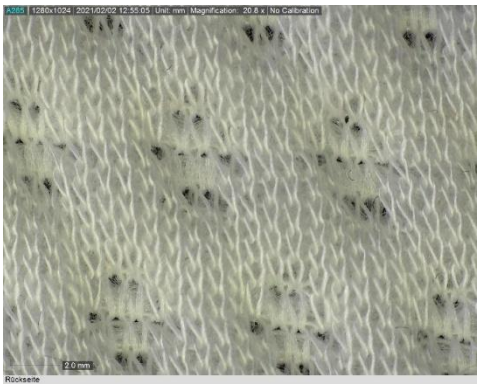


Bild 4-6: Mikroskopaufnahme Vorderseite D155-1012 bei 20,8facher Vergrößerung

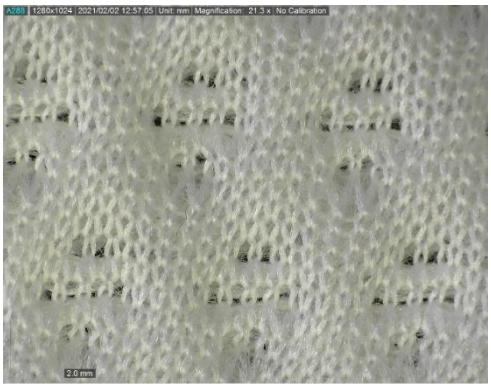


Bild 4-7: Mikroskopaufnahme Rückseite D155-1012 bei 21,3facher Vergrößerung

D328-1909

Bild 4-8: Material D328-1909

Bild 4-9: Mikroskopaufnahme Vorderseite D328-1909 bei 26,9facher Vergrößerung

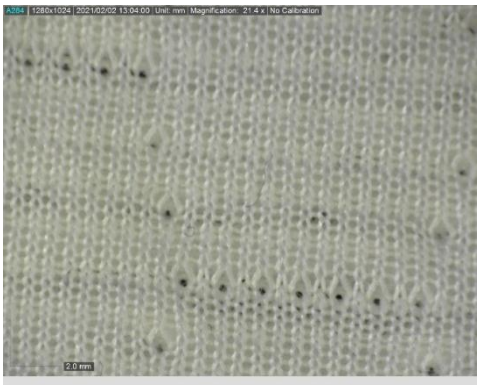


Bild 4-10: Mikroskopaufnahme Rückseite D328-1909 bei 21,4facher Vergrößerung

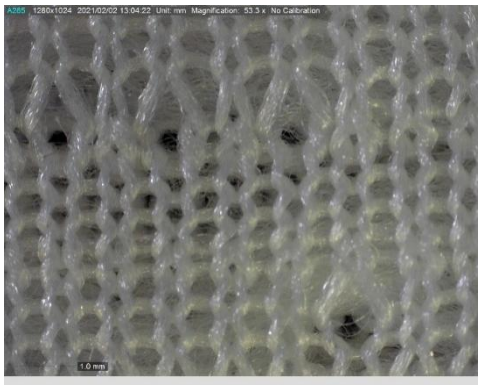


Bild 4-11: Mikroskopaufnahme der Henkelabbindung in D328-1909 bei 53,3facher Vergrößerung

D310-1822

Bild 4-12: Material D310-1822 (Bezugsstoff)

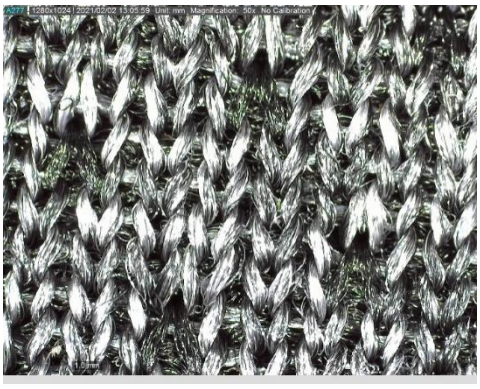


Bild 4-13: Mikroskopaufnahme Vorderseite D310-1822 bei 50facher Vergrößerung

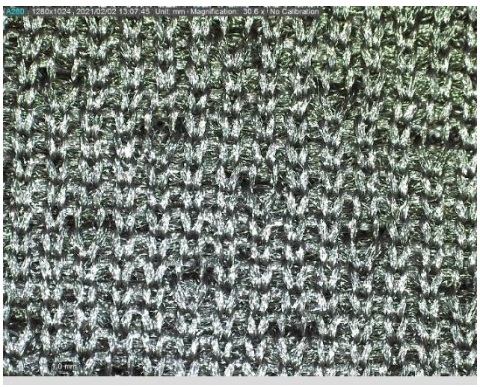


Bild 4-14: Mikroskopaufnahme Rückseite D310-1822 bei 30,6facher Vergrößerung

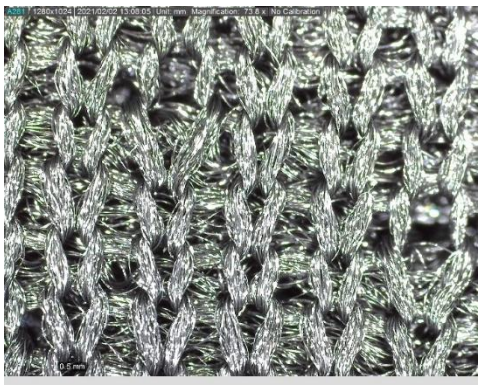


Bild 4-15: Mikroskopaufnahme der Henkelabbindung in D310-1822 bei 73,8facher Vergrößerung

D264-1702

Bild 4-16: Material D264-1702

Bild 4-17: Mikroskopaufnahme Vorderseite D264-1702 bei 21,8facher Vergrößerung

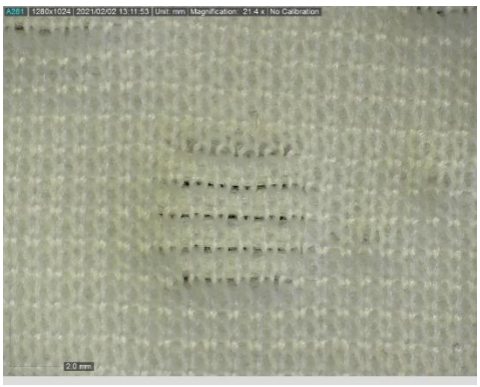


Bild 4-18: Mikroskopaufnahme Rückseite D264-1702 bei 21,4facher Vergrößerung

Faserstoffe

Zwei der bei den Versuchen verwendeten Abstandsgestricke bestehen aus nur einem Faserstoff, die anderen drei sind aus Garnen unterschiedlicher Faserstoffe hergestellt:

1 Faserstoff:

D147-1080: 100 % PES in vier verschiedenen Feinheiten und Querschnitten (PES dtex 76/1 roh, PES dtex 167/1 roh, PES dtex 150/1 trilobal 11000 hochglanz, Füllfaden: PES dtex 330/2 texturiert) (siehe Artikeldatenblatt in Anlage 3, S. 3-4)

D310-1822: 100 % PES in mindestens zwei Feinheiten und Farben (PES dtex 167/1 schwarz 8010, Melange Airlan 300 Miniglace schwarz MG007, Füllfaden: PES dtex 330/96/3 schwarz) (siehe Artikeldatenblatt in Anlage 3, S. 5-6)

Mehrere Faserstoffe:

D155-1012: 60 % PES, 40 % CV, Vorder- und Rückseite je in einem Faserstoff gestrickt (PES dtex 167/1 roh, CV Nm 40/1, Füllfaden: PES dtex 330/4 roh)
(siehe Artikeldatenblatt in Anlage 3, S. 7-8)

D328-1909: 58 %PES, 40 % CO, 2 % EL, Vorderseite in Baumwolle und Rückseite in Polyester teilweise mit Elastanfaden gestrickt (PES dtex 167/1 roh, PES/EL dtext 188/1 roh, CO Nm 50/1 gebleicht, Füllfaden: PES dtex 330/2 texturiert roh)
(siehe Artikeldatenblatt in Anlage 3, S. 9-10)

D264-1702: 73 % PES, 27 % CV, Vorderseite in Viskose und Rückseite in Polyester gestrickt (PES dtex 167/1 roh, CV Nm 40/1, PES dtex 167/1 texturiert 138 hellgrau, Füllfäden: PES dtex 330/4, PES dtex 330/3)
(siehe Artikeldatenblatt in Anlage 3, S. 11-13)

Allgemeine textile Materialkennwerte

Tabelle 4-2 auf Seite 40 enthält eine Auflistung der Materialkennwerte flächenbezogene Masse M, Dicke t, Stoffdichte ρ_f, Porosität Φ und Luftdurchlässigkeit R für alle sechs Probematerialien. Die Werte für die flächenbezogene Masse stammen für die Proben mit den Nummern 1…5 aus den Artikeldatenblättern des Herstellers (siehe Anlage 3). Für die Probe Nr. 6 wurde sie aus der Masse von fünf quadratischen Probestücken mit 100 cm^2 Fläche ermittelt. Die Dickenmessung erfolgte mit dem Dickenmessgerät DM 100 an mindestens sechs Messpunkten, aus denen der Mittelwert gebildet wurde (siehe Übersicht über Textilprüfungen in Anlage 4). Aus diesen Kennwerten lässt sich die Gesamtdichte der Gestricke nach [59, S. 2660] ermitteln:

$$\rho_f = \frac{M}{t} \tag{30}$$

Für die Porosität lassen sich rechnerisch über den Zusammenhang [59, S. 2660]

$$\phi = 100 * \left(1 - \frac{M}{t * \rho_m}\right) \tag{31}$$

ρ_m…Faserdichte, bei mehreren Faserstoffen mit Anteil multipliziert

Näherungswerte bestimmen. Für verlässliche Werte sollte jedoch eine entsprechende Messung in einem Messgerät zur Dichtebestimmung durchgeführt werden. Die Luftdurchlässigkeit R nach DIN EN ISO 9237 [66] wurde mit dem Luftdurchlässigkeits-Prüfgerät FX 3300 LabAir IV der Firma TexTest AG gemessen. Die zugehörigen Prüfprotokolle finden sich in Anlage 4, S. 15-20. Ein Zusammenhang zwischen Dichte, Porosität und Luftdurchlässigkeit lässt sich anhand der vorliegenden Werte allerdings nicht feststellen, wie durch die bedingte Formatierung in Tabelle 4-2 (S. 40) ersichtlich wird.

Tabelle 4-2: Materialkennwerte Abstandsgestricke

Nr.	Probe	M (g/m²)	t (mm)	ρ_f (kg/m³)	Φ (%)	R (mm/s)
1	D147-1080	175	1,387	126,202	90,9	3105
2	D155-1012	260	2,087	124,601	91,3	2477
3	D328-1909	320	1,848	173,129	88,0	1555
4	D310-1822	320	1,468	217,934	84,2	2085
5	D264-1702	420	4,176	100,569	92,9	1432
6	D155-1012 (Falten)	519	4,660	111,446	92,2	2033

4.1.3.2 Strömungswiderstand

Eine direkte Ermittlung des längenbezogenen Strömungswiderstands nach DIN EN 29053 [vgl. 2, S. 203] konnte nicht erfolgen, da kein entsprechendes Messgerät zur Verfügung stand. Aus den Ergebnissen der Luftdurchlässigkeitsmessung (siehe Tabelle 4-2, S. 40) und den Prüfbedingungen lassen sich jedoch verschiedene Strömungswiderstände rechnerisch ermitteln.

Nach [67, S. 5] ist der Strömungswiderstand R definiert durch

$$R=\frac{\Delta p}{q_v} \tag{32}$$

Δp Druckdifferenz über den Probekörper gegenüber dem Atmosphärendruck, in Pascal;

q_v durch den Probekörper hindurchtretender Volumenstrom, in Kubikmeter je Sekunde

Der Volumenstrom q_v lässt sich aus der Formel für die Luftdurchlässigkeit R [66, S. 3]

$$R=\frac{\bar{q}_v}{A} \tag{33}$$

errechnen. Die Prüffläche ist hierbei mit A=20 cm² und der Differenzdruck mit Δp=200 Pa für technische Flächengebilde vorgegeben [66, S. 3].

Der spezifische Strömungswiderstand R_s in Pascalsekunde je Meter ergibt sich aus dem vorher ermittelten Strömungswiderstand R [67, S. 5] mit

$$R_S = R^*A \quad (34)$$

und für den längenbezogenen Strömungswiderstand σ wird R_s durch die Dicke d des Probekörpers in Durchströmungsrichtung, in Meter, geteilt [67, S. 6]:

$$\sigma = \frac{R_S}{d} \quad (35)$$

In Tabelle 4-3, S. 41, finden sich die entsprechenden Werte für die verwendeten Stoffproben jeweils für die einlagige Versuchsanordnung bei der Luftdurchlässigkeitsmessung. Hier wird deutlich, dass der spezifische Strömungswiderstand aller Materialien unter 200 Pas/m liegt, weshalb die in Abschnitt 4.1.2 Punkt b) formulierte Anforderung an den wirksamen Absorptionsbereich von 200-3600 Pas/m nicht erfüllt ist. Unter den Proben weisen die Materialien D328-1909 mit $R_{sD328\text{-}1909}$=129 Pas/m und D264-1702 mit $R_{sD264\text{-}1702}$=140 Pas/m den höchsten spezifischen Strömungswiderstand (siehe Tabelle 4-3, S. 41) sowie die geringste Luftdurchlässigkeit $R_{D328\text{-}1909}$=1555 mm/s und $R_{D264\text{-}1702}$=1432 mm/s auf (siehe Tabelle 4-2, S. 40). Es ist davon auszugehen, dass die Strömungswiderstände dickerer (doublierter) Proben höher sind als im vorliegenden Fall.

Tabelle 4-3: Strömungswiderstände Abstandsgestricke einlagig

Nr.	Probe	Δp (Pa)	A (m^2)	d (m)	R (Pas/m^3)	R_s (Pas/m)	σ (Pas/m^2)
1	D147-1080	200	0,002	0,0014	32271	65	46544
2	D155-1012	200	0,002	0,0021	40452	81	38772
3	D328-1909	200	0,002	0,0018	64437	129	69725
4	D310-1822	200	0,002	0,0015	48058	96	65459
5	D264-1702	200	0,002	0,0042	69972	140	33510
6	D155-1012 (Falten)	200	0,002	0,0047	49287	99	21153

4.2 Durchführung und Auswertung der Hallraummessungen

Die Messungen im Hallraum fanden an zwei separaten Tagen statt (18.1.2021 und 9.2.2021). Die Ermittlung der textilen Kennwerte der Stoffe erfolgte am 2.2.2021. Somit basierten die Entscheidungen für bestimmte Probenformen beim ersten Messtermin im Chemnitzer Hallraum auf den Ergebnissen der Vorversuche in der Alphakabine. Für die zweite Messung wurden für die Weiterentwicklung der Proben die Ergebnisse aus der ersten Hallraummessung sowie aus den Textilprüfungen zugrunde gelegt.

4.2.1 1. Hallraummessung (18.1.2021)

In Tabelle 4-1, S. 33, sind die in der Alphakabine ermittelten α_w-Werte der Rollenabschnitte aus der Versuchsreihe S1 aufgeführt. Von den direkt von der Rolle geschnittenen Stücken weisen das Material D147-1080 mit $\alpha_{wD147\text{-}1080}$=0,7 und das Material D328-1909 mit $\alpha_{wD328\text{-}1909}$=0,75 darunter den höchsten Absorptionsgrad auf. Wie bereits unter Abschnitt 3.2.3 beschrieben bewegen sich die α_s-Werte dieser Materialien ab 630 Hz im Bereich um 1, nur bei 500 Hz weisen sie ein deutliches Minimum auf. Das Verhalten dieser

Dämpfungsmaterialien im Bereich niedriger Frequenzen sollte daher im Hallraum untersucht werden. Von D147-1080 standen fünf Einzelrollen und von D328-1909 nur vier zur Verfügung. Um dem Prinzip des Säulenabsorbers gerecht zu werden, wurden die einzelnen Rollen so hoch wie möglich zu Säulen gestapelt. Das Abstandsgestrick D147-1080 konnte zu zwei Säulen mit je zwei und drei Rollen und das Abstandsgestrick D328-1909 zu einer Säule aus vier Rollen gestapelt werden (siehe Bild 4-19, Bild 4-20, S. 42).

In Abschnitt 4.1.1 wurde die Einschätzung getroffen, dass eine Erhöhung des Schallabsorptionsvermögens der Prismenabsorber nur durch das Einbringen von mehr Dämpfungsmaterial erreicht werden könnte, was aber aus Platzgründen nicht realisierbar war. Daher wurden drei perforierte und mit dem Bezugsstoff D310-1822 bezogene Dreiecksprismen mit den Kantenlängen (500x500x707x500) mm mit je einer Rolle der Dämpfungsmaterialien D147-1080 und D328-1909 gefüllt, um zu prüfen, wie sich die höhere Masse des Dämpfungsmaterials (siehe Versuchsauflistung Alphakabine in Anlage 1) auswirkt (siehe Bild 4-21, S. 43). Die Entscheidung für die mittlere Dreieckprismengröße beruht auf dem Durchmesser der Rollen, der zwischen 0,27 m und 0,29 m betrug und somit genau in das Prisma passte. Alle vorgenannten vier Messungen wurden in einer Hallraumecke wiederholt, weil anzunehmen war, dass dort ein höherer Schalldruckpegel herrscht, der von derartigen Säulenabsorbern gut bedämpft werden kann. Leider wurde bei diesem Messdurchgang der im Hallraum befindliche Diffusor (brauner Kasten in Bild 4-24, S. 43) nicht verrückt, so dass sich die Proben im Schallschatten befanden. Außerdem wurde der von der DIN EN ISO 354 [49] geforderte Mindestabstand der Proben zur Wand von 0,7 m nicht eingehalten. Deswegen müssen alle für die Ecken ermittelten Absorptionsgrade aus der Betrachtung der Messergebnisse ausgeschlossen werden.

Schließlich wurden die Materialien D147-1080 und D328-1909 noch einmal mit einer Verkleidung aus einer perforierten Pappe mit mindestens 30 % Lochfläche und dem Bezugsstoff D310-1822 sowie Deckelplatten aus Holz versehen und in der Hallraummitte geprüft (siehe Bild 4-22, Bild 4-23, S. 43). Diese Verkleidung entspricht also dem Aufbau der Dreiecksprismen und sollte den Einfluss der Pappe in Kombination mit dem Bezugsstoff verdeutlichen, der in der Alphakabine bereits als positiv bestätigt worden war.

Bild 4-19: Versuch Nr. 1 mit 5 Rollen D147-1080 auf 2 Säulen verteilt, Hallraummitte

Bild 4-20: Versuch Nr. 3 mit 4 Rollen D328-1909 auf 1 Säule verteilt, Hallraummitte

Bild 4-21: Versuche Nr. 5 und 7, 3 übereinander gestapelte Pappprismen, mit je 1 Rolle D147-1080 bzw. D328-1909 gefüllt, Raummitte

Bild 4-22: Versuch Nr. 9, 5 Rollen D147-1080 auf 3 Säulen verteilt, verkleidet, Hallraummitte

Bild 4-23: Versuch Nr. 10, 4 Rollen D328-1909 auf 2 Säulen verteilt, verkleidet, Hallraummitte

Bild 4-24: Versuch Nr. 2, 5 Rollen D147-1080, 2 Säulen, Hallraumecke, nicht normgerecht

Die Probe D147-1080_Mitte_oB (5 Rollen D147-1080, 2 Säulen, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raummitte) erreicht in Versuch Nr. 1 den höchsten bewerteten Schallabsorptionsgrad aller Hallraummessungen am 18.1.2021 mit $\alpha_{wD147\text{-}1080_Mitte_oB}$=0,85 (siehe Bild 4-25, S. 44). Die Probe D328-1909_Mitte_oB in Versuch Nr. 3 (4 Rollen D328-1909, 1 Säule, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raummitte) hingegen erreicht nur $\alpha_{wD328\text{-}1909_Mitte_oB}$=0,6. An den Kurvenverläufen des Sabine'schen (siehe Bild 4-26, S. 44) und des praktischen Absorptionsgrads (siehe Bild 4-27, S. 44) wird deutlich, dass sich die Absorber im Frequenzbereich über 1000 Hz ähnlich verhalten, darunter weist die Probe D328-1909_Mitte_oB jedoch ein starkes Minimum bei 250 Hz und insgesamt niedrigere Absorptionswerte als die Probe D147-1080_Mitte_oB auf. Das Absorptionsverhalten dieser Proben wird auf interessante Weise durch das Anbringen der Verkleidung in den Versuchen Nr. 9 und Nr. 10 verändert: Die Probe D147-1080_Mitte_mB erreicht nun nur noch $\alpha_{wD147\text{-}1080_Mitte_mB}$=0,65 (Verringerung um 0,2), die Probe D328-1909_Mitte_mB allerdings den um 0,1 Punkte verbesserten Wert $\alpha_{wD328\text{-}1909_Mitte_mB}$=0,7. Die α_s-Kurve für die Probe D328-1909_Mitte_mB verläuft bis 800 Hz zwar über der Kurve für die Variante ohne Verkleidung und Bezug, über 800 Hz liegt sie aber generell darunter, erreicht bei

1600 Hz den Höchstwert $\alpha_{s1600Hz}$=0,89 und fällt dann im Verlauf sehr schnell stark ab (siehe Bild 4-26, S. 44). Die Pappprismen erreichen in keiner Variante zufriedenstellende Ergebnisse, da der höchste erreichte α_w-Wert nur $\alpha_{wD147\text{-}1080_Prisma_Mitte}$=0,55 beträgt. Dies mag daran liegen, dass zwei Ecken des Prismas nicht mit einem Dämpfungsmaterial ausgefüllt waren.

Versuchsauflistung Hallraum (18.1.2021)

Versuchs-nummer	Probenbezeichnung	Beschreibung Probe	Datum	Temp. (°C)	rH (%)	S (m2)	αw	Absorber-klasse
0	Hallraum_leer		18.01.2021	13,9	46			
1	D147-1080_Mitte_oB	5 Rollen D147-1080, 2 Säulen, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raummitte	18.01.2021	14,3	46	2,07	0,85	B
2	D147-1080_Ecke_oB	5 Rollen D147-1080, 2 Säulen, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raumecke	18.01.2021	14,5	46	2,07	0,65	C
3	D328-1909_Mitte_oB	4 Rollen D328-1909, 1 Säule, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raummitte	18.01.2021	14,7	46	1,72	0,6	C
4	D328-1909_Ecke_oB	4 Rollen D328-1909, 1 Säule, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raumecke	18.01.2021	14,9	46	1,72	0,7	C
5	D147-1080_Prisma_Mitte	3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D147-1080 gefüllt, in Raummitte	18.01.2021	15,2	46	2,68	0,55	D
6	D147-1080_Prisma_Ecke	3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D147-1080 gefüllt, in Raumecke	18.01.2021	15,5	46	2,68	0,5	D
7	D328-1909_Prisma_Mitte	3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D328-1909 gefüllt, in Raummitte	18.01.2021	15,8	46	2,68	0,5	D
8	D328-1909_Prisma_Ecke	3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D328-1909 gefüllt, in Raumecke	18.01.2021	15,7	46	2,68	0,5	D
9	D147-1080_Mitte_mB	5 Rollen D147-1080, 3 Säulen, mit Verkleidung und Holzdeckel, in Raummitte	18.01.2021	16,1	46	2,60	0,65	C
10	D328-1909_Mitte_mB	4 Rollen D328-1909, 2 Säulen, mit Verkleidung und Holzdeckel, in Raummitte	18.01.2021	16,4	46	2,01	0,7	C

Bild 4-25: Versuchsauflistung der Hallraummessung vom 18.1.2021 inkl. α_w-Werte

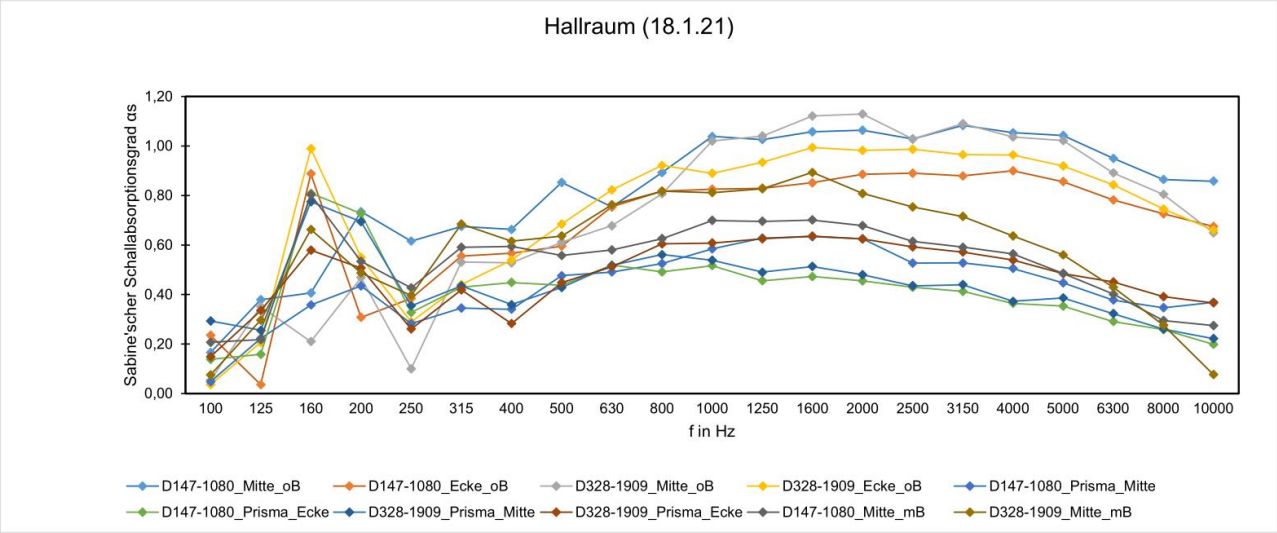


Bild 4-26: α_s-Darstellung der Hallraummessung vom 18.1.2021

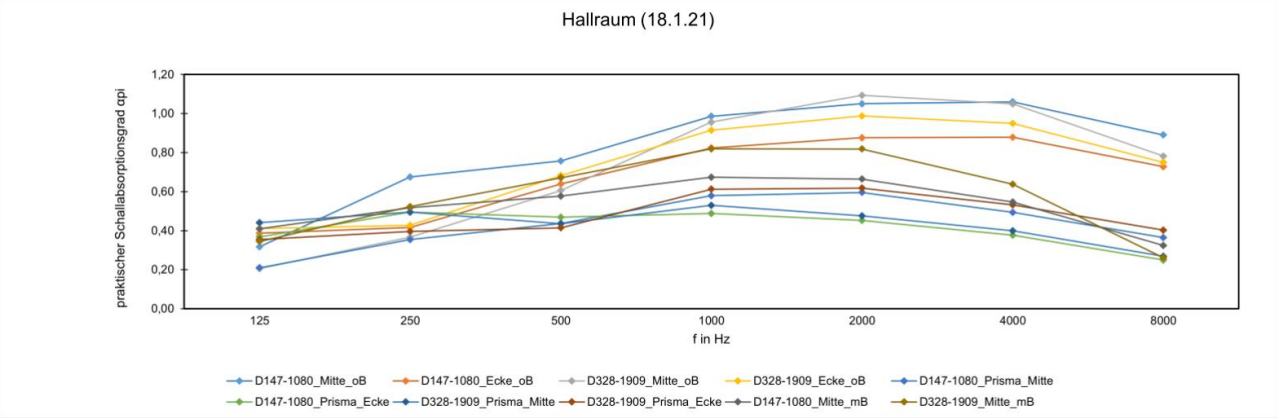


Bild 4-27: α_p-Darstellung der Hallraummessung vom 18.1.2021

4.2.2 2. Hallraummessung (9.2.2021)

Bei der 2. Hallraummessung (siehe Bild 4-36, S. 47) am 9.2.2021 lag der Schwerpunkt auf der Prüfung des Absorptionsvermögens der Faltenstoffvariante des Abstandsgestricks D155-1012 (Probe S1-2 in der Alphakabinenmessung, siehe Tabelle 4-1, S. 33), da diese in den Vorversuchen den sehr hohen Absorptionsgrad $\alpha_{wS1\text{-}2}$=0,95 erreicht hatte. Es wurden vier Einzelproben aus je fünf Stoffbahnen (46,5 x 230 cm vor dem Nähen der Falten) gewickelt. Der Wickelkern bestand in den Versuchen 1 bis 4 aus einer Papphülse mit 5 cm Durchmesser (siehe Bild 4-28, Bild 4-29, S. 45) und in Versuch 5 aus einem quaderförmigen Pappkern, der mit Klebeband umwickelt war, mit den Maßen 47,5 x 14 x 4,9 cm (siehe Bild 4-30, S. 46). Bei den Versuchen 6 und 7 wurden die Stoffbahnen ohne Wickelkern zu einer Rolle gewickelt (siehe Bild 4-31, S. 46). Für die Versuche 8 bis 10 wurden die Erkenntnisse aus der Textilprüfung vom 2.2.2021 berücksichtigt (siehe Tabelle 4-2, S. 40). Es konnte gezeigt werden, dass von den vorhandenen Rollen nur das Material D328-1909 eine geringere Luftdurchlässigkeit ($R_{D328\text{-}1909}$=1555 mm/s) und somit gleichzeitig einen höheren spezifischen Strömungswiderstand ($R_{sD328\text{-}1909}$=129 Pas/m, siehe Tabelle 4-3, S. 41) als der Bezugsstoff besitzt ($R_{D310\text{-}1822}$=2085 mm/s, $R_{sD310\text{-}1822}$=96 Pas/m). Damit der Schall möglichst vollständig zum eigentlichen Dämpfungsmaterial vordringen kann, sollte diese Voraussetzung jedoch erfüllt sein. Für den Faltenstoff trifft dies mit $R_{D155\text{-}1012Falten}$=2033 mm/s und $R_{sD155\text{-}1012Falten}$=99 Pas/m auch zu, da durch die Faltenlegung eine um 1,3 % höhere Porosität im Stoff entstanden ist (siehe Tabelle 4-2, S. 40, Tabelle 4-3, S. 41). Vier Rollen D328-1909 wurden in den Versuchen 8 und 9 mit einer Verkleidung aus perforierter Pappe und einem Bezug aus D310-1822 versehen (siehe Bild 4-32, S. 46); in Versuch 10 wurden die Rollen ohne diese Verkleidung geprüft. Schließlich erfolgte in Versuch Nr. 11 eine weitere Messung von zwei separat positionierten Dreiecksprismen, die mit je einer Rolle D328-1909 und zwei Rollen Faltenstoff ohne Wickelkern gefüllt waren (siehe Bild 4-33, S. 46).

Bild 4-28: Versuch Nr. 1 mit 4 Rollen Faltenstoff mit Bezug, erhöht, Hallraummitte

Bild 4-29: Versuch Nr. 3, 4 Rollen Faltenstoff, ohne Bezug, erhöht, Hallraumecke

Bild 4-30: Versuch Nr. 5, Faltenstoff auf quaderförmigen Pappkern gewickelt, erhöht, Raummitte

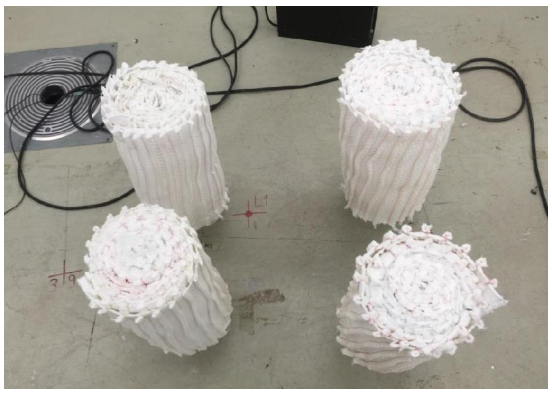


Bild 4-31: Versuch Nr. 6, 4 Rollen Faltenstoff, ohne Kern, erhöht, Hallraummitte

Bild 4-32: Versuch Nr. 9, 4 Rollen D328-1909, verkleidet, erhöht, Hallraumecke

Bild 4-33: Versuch Nr. 11, 2 Dreiecksprismen mit D328-1909 Faltenstoff gefüllt, ohne Deckel, einzeln, Raummitte

Mit einer separaten und erhöhten Positionierung der Proben wurde das Ziel verfolgt, die Absorberfläche S zu vergrößern, indem sowohl die Unter- als auch die Oberseite der Rollenabschnitte für den Schall zugänglich wird. Dies resultierte aber leider nicht in hohen bewerteten Absorptionsgraden, da die erreichten Höchstwerte in Versuch 1 und Versuch 10 nur α_w=0,5 betragen (siehe Bild 4-36, S. 47). An dieser Stelle zeigen sich aber deutlich die Schwächen der Einzahlangabe des α_w-Wertes, da er das hohe Absorptionsvermögen einiger der hier getesteten Proben im Bereich tiefer Frequenzen nicht abbildet. Aus den α_s- und α_p-Diagrammen in Bild 4-37 (S. 48) und Bild 4-38 (S. 48) ist ablesbar, dass einige Absorber im tieffrequenten Bereich sehr hohe Absorptionsgrade aufweisen. Bei allen Proben fällt das Absorptionsvermögen oberhalb von 2000 Hz jedoch stark ab, sie sind somit für die Dämpfung hoher Frequenzen nicht gut geeignet. Da in den α_w-Wert allerdings der Absorptionsgrad bei 4000 Hz eingeht, wird die Bezugskurve sehr weit nach unten verschoben, obwohl der größte Teil der Absorptionskurve weit darüber liegt (siehe z. B. das Messprotokoll zu Probe D155_einzeln_oBezug_Ecke in Anlage 6, S. 34). Mit den Ergebnissen dieses Versuchsdurchgangs wird sich jedoch

dem Ziel angenähert, Eckabsorber für die Absorption möglichst tiefer Frequenzen zu entwickeln, da in den Versuchen 3 (D155_einzeln_oBezug_Ecke), 7 (D155_ohne Kern_Ecke) und 2 (D155_einzeln_mBezug_Ecke) bis 1000 Hz ein besseres Absorptionsvermögen in den Ecken vorliegt als in der Raummitte. Das Ergebnis aus den Vorversuchen in der Alphakabine hat sich in dem Sinne bestätigt, als dass der Faltenstoff mit einem geringen Durchmesser von ca. 20 cm bei den Hallraummessungen am 9.2.2021 das beste Messergebnis zeigt, sofern der α_w-Wert unberücksichtigt bleibt. Interessant ist es an dieser Stelle, zu überprüfen, ob sich das Absorptionsverhalten zu den hohen Frequenzen hin verändert, wenn mehrere Einzelproben übereinander zu Säulen gestapelt werden. Dies ist aus Zeitgründen im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch leider nicht möglich.

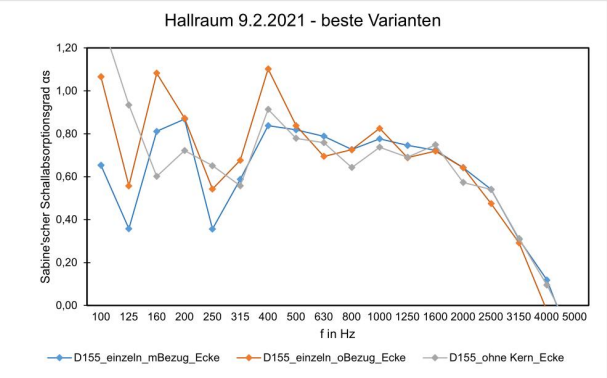


Bild 4-34: 2. Hallraumprüfung, α_s-Darstellung der Versuche 2, 3 und 7

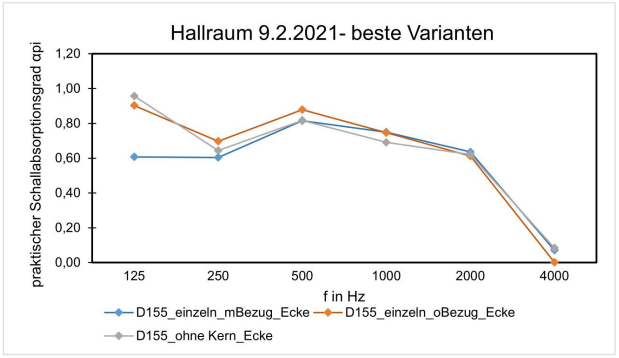


Bild 4-35: 2. Hallraumprüfung, α_p-Darstellung der Versuche 2, 3 und 7

Versuchsauflistung Hallraum (9.2.2021)

Versuchs-nummer	Probenbezeichnung	Beschreibung Probe	Datum	Temp. (°C)	rH (%)	S (m2)	αw	Absorber-klasse
0	Hallraum_leer	**Hallraum leer**	09.02.2021	23,5	20			
1	D155_einzeln_mBezug_Mitte	**4 Rollen Faltenstoff (D155-1012), mit Bezug, einzeln, erhöht, Raummitte**	09.02.2021	23,7	20	1,27	0,5	D
2	D155_einzeln_mBezug_Ecke	**4 Rollen Faltenstoff (D155-1012), mit Bezug, einzeln, erhöht, Raumecke**	09.02.2021	24,0	20	1,27	0,25	E
3	D155_einzeln_oBezug_Ecke	**4 Rollen Faltenstoff (D155-1012), ohne Bezug, einzeln, erhöht, Raumecke**	09.02.2021	24,7	20	1,25	0,2	E
4	D155_einzeln_oBezug_Mitte	**4 Rollen Faltenstoff (D155-1012), ohne Bezug, einzeln, erhöht, Raummitte**	09.02.2021	24,7	20	1,25	0,25	E
5	D155_einzeln_Pappenkern_Mitte	**4x Faltenstoff (D155-1012) auf Rechteckappkern, ohne Bezug, einzeln, erhöht, Raummitte**	09.02.2021	24,8	20	1,53	0,35	D
6	D155_ohne Kern_Mitte	**4x Faltenstoff (D155-1012) ohne Kern, ohne Bezug, einzeln, erhöht, Raummitte**	09.02.2021	24,9	20	1,29	0,3	D
7	D155_ohne Kern_Ecke	**4x Faltenstoff (D155-1012) ohne Kern, ohne Bezug, einzeln, erhöht, Raumecke**	09.02.2021	25,1	20	1,29	0,25	E
8	D328_einzeln_mVerkl_Mitte	**4 Rollen D328-1909, mit Verkleidung, einzeln, erhöht, Raummitte**	09.02.2021	25,2	20	2,49	0,45	D
9	D328_einzeln_mVerkl_Ecke	**4 Rollen D328-1909, mit Verkleidung, einzeln, erhöht, Raumecke**	09.02.2021	25,3	20	2,49	0,45	D
10	D328_einzeln_Ecke	**4 Rollen D328-1909, ohne Verkleidung, einzeln, erhöht, Raumecke**	09.02.2021	25,4	20	2,27	0,5	D
11	2_Prismen_einzeln_ohne Deckel_Mitte	**2 Dreiecksprismen mit D328-1909 (d=0,29 m) + 2x D155-1012 Falten ohne Hülse (d= 0,19 m) gefüllt, ohne Deckel, einzeln, Raummitte**	09.02.2021	25,4	20	1,93	0,3	D

Bild 4-36: Versuchsauflistung der Hallraummessung vom 9.2.2021 inkl. α_w-Werte

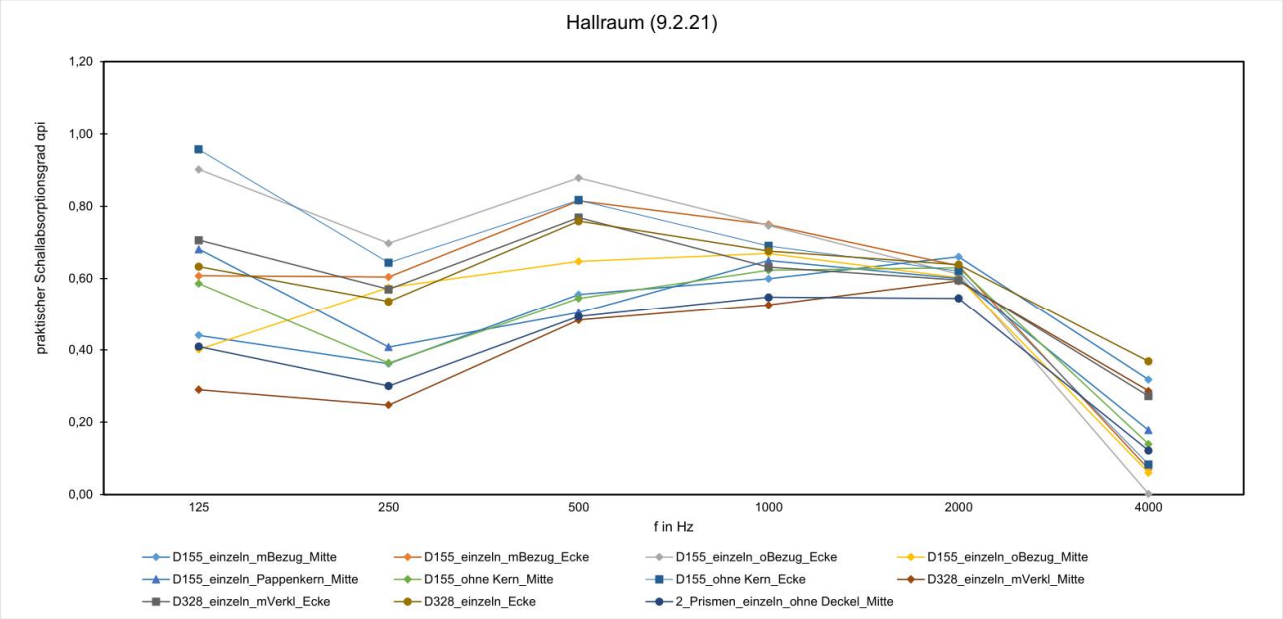


Bild 4-37: α_p-Darstellung der Hallraummessung vom 9.2.2021

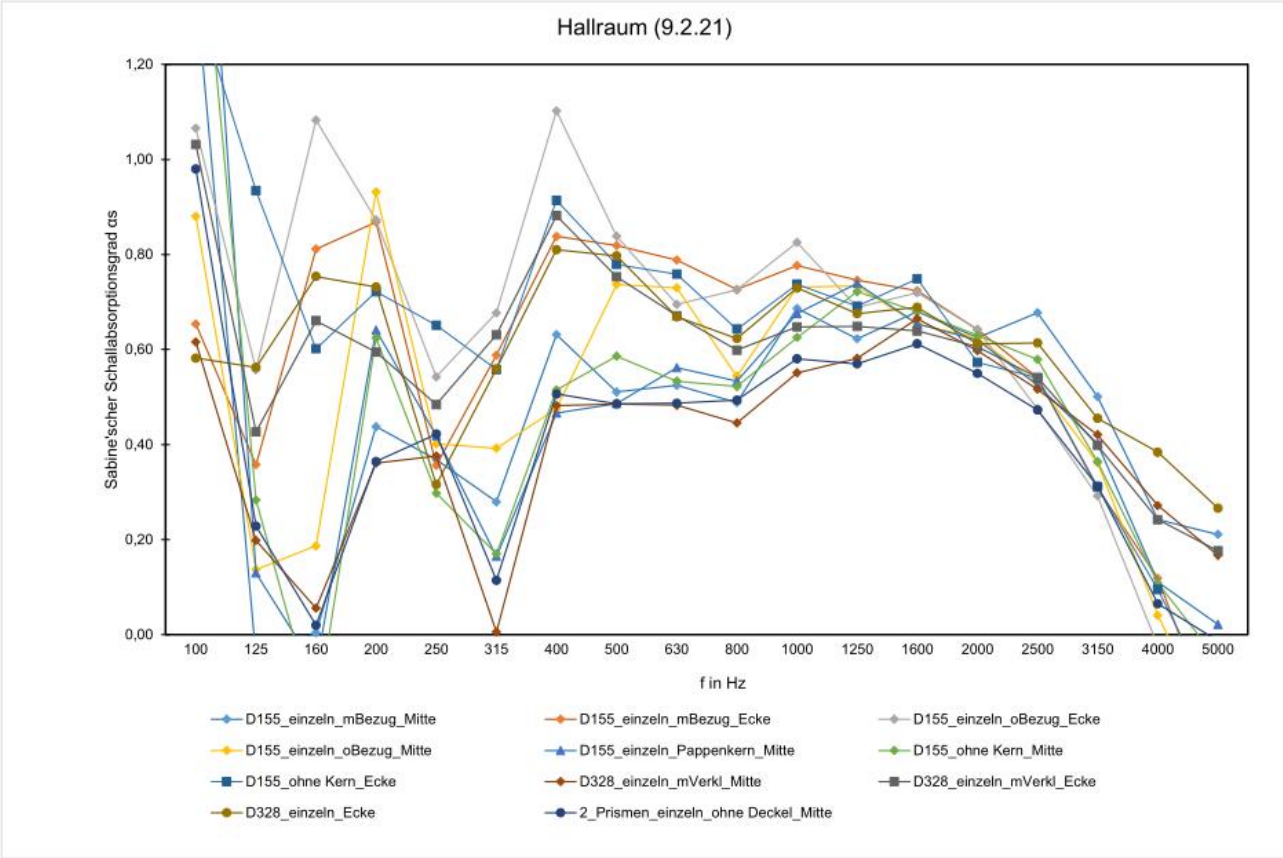


Bild 4-38: α_s-Darstellung der Hallraummessung vom 9.2.2021

4.3 Wirksamste Lösungen

In den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 wurden die geprüften Probenvarianten vorgestellt, deren Bewertungen mit dem α_w-Wert verglichen und die Kurvenverläufe des Sabine'schen und des praktischen Absorptionsgrads diskutiert. In Abschnitt 4.2.2 wurde betont, dass die dort vorgestellten Absorbervarianten zwar einen sehr niedrigen bewerteten Absorptionsgrad besitzen, im Bereich der tiefen Frequenzen aber mitunter gute Dämpfungseigenschaften aufweisen. Es wäre somit also zu kurz gegriffen, die Probe D147-1080_Mitte_oB, die mit $\alpha_{wD147\text{-}1080_Mitte_oB}$=0,85 den höchsten bewerteten Absorptionsgrad besitzt, zur wirksamsten Lösung zu erklären, ohne andere Aspekte zu berücksichtigen.

Die Ermittlung der wirksamsten Lösung sollte nicht ausschließlich auf dem bewerteten Absorptionsgrad beruhen, da durch ihn gutes Absorptionsverhalten in bestimmten Frequenzbändern nicht abgebildet wird, wenn das Absorptionsvermögen nicht gleichmäßig verteilt ist. Daher wurden die einzelnen αs-Werte pro Terzband aufsummiert: zur Gesamtsumme über alle Terzbänder, zur Teilsumme über die tiefen Frequenzen (Terzbänder 100 bis einschließlich 400 Hz), zur Teilsumme über die mittleren Frequenzen (Terzbänder 500 bis einschließlich 2000 Hz) und zur Teilsumme über die mittleren und hohen Frequenzen (Terzbänder 500 bis einschließlich 5000 Hz) (siehe Anlage 5). Die höchste Gesamtsumme erreicht Probe D147-1080_Mitte_oB mit 14,53.[12] Auch bei den Teilsummen 500-200 Hz, > 2000 Hz und >500 Hz liegt die Probe D147-1080_Mitte_oB an erster Stelle, lediglich im Bereich der Frequenzbänder unter 500 Hz weist Probe D155_einzeln_oBezug_Ecke die höchste Wertesumme auf. Das Absorptionsverhalten dieser beiden Proben ist in Bild 4-39 und Bild 4-40 (S. 49) zusammengefasst.

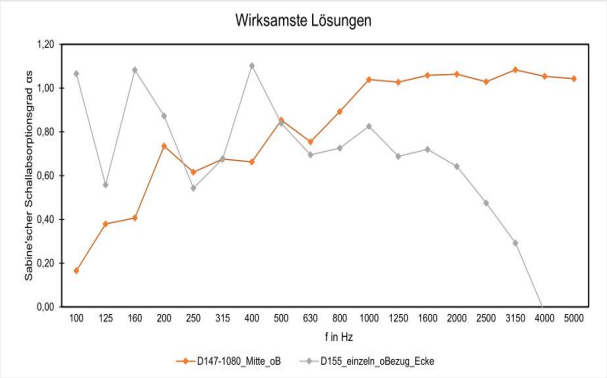


Bild 4-39: α_s-Darstellung der wirksamsten Lösungen

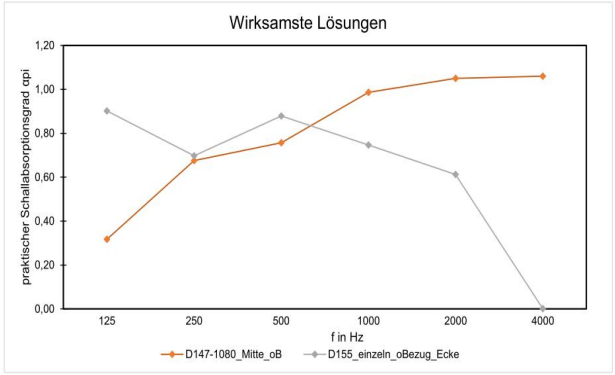


Bild 4-40: α_p-Darstellung der wirksamsten Lösungen

Somit wird die Probe D147-1080_Mitte_oB durch den bewerteten Absorptionsgrad $\alpha_{wD147\text{-}1080_Mitte_oB}$=0,85 relativ zutreffend beschrieben, da das Absorptionsvermögen von 100 Hz bis 1000 Hz verhältnismäßig gleichmäßig ansteigt und dabei nur zwei geringe lokale Minima bei 200 und 500 Hz aufweist, die keine frequenzbedingte Einschränkung darstellen. Über 1000 Hz dämpft diese Probe Schall zu 100 %. Der Kurvenverlauf ist hierbei typisch für poröse Absorber, die in den Höhen wirksamer dämpfen als im Bassbereich. Die

[12] Die Proben, die am 18.1.2021 im Hallraum in den Ecken positioniert wurden, werden bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da deren Schallabsorptionswerte nicht normgerecht ermittelt wurden.

Versuchsanordnung für diese Probe bestand aus fünf Rollen à 46,5 cm Höhe und 27 cm Durchmesser, die zu zwei Säulen zu je zwei und drei Rollen gestapelt und im Abstand von ca. 40 cm nebeneinander platziert wurden (siehe Bild 4-19, S. 42). Der Aufbau aus mehreren Rollen ist allerdings nicht erforderlich; die Stoffrolle könnte auch auf die erforderliche größere Länge gekürzt werden, um ein aufwendiges Verbinden der Einzelrollen zu vermeiden. Die Probe war nicht mit einer Verkleidung oder einem Bezug versehen, obwohl dies aus optischen Gründen wünschenswert wäre. Hierfür müsste jedoch ein Gestrick gefunden werden, das einen geringeren Strömungswiderstand (bzw. eine höhere Luftdurchlässigkeit) als das Dämpfungsmaterial besitzt. Der Absorber kann in der Mitte des zu bedämpfenden Raumes platziert werden, wobei hier nicht die exakte geometrische Mitte gemeint ist, sondern eine Fläche in der Mitte des Raumes. Außerdem kann der Absorber in eine Raumecke mit Abstand (ca. 50 – 70 cm) zur Außenwand gestellt werden. Ob sich die Absorptionswirkung in der Raumecke noch erhöht, müsste jedoch noch einmal durch gültige Messungen verifiziert werden. Der bewertete Absorptionsgrad $\alpha_{wD147\text{-}1080_Mitte_oB}$=0,85 entspricht nach DIN EN ISO 11654 der Schallabsorberklasse B. Die Aufgabe, einen Schallabsorber mit Schallabsorberklasse A zu entwickeln, wurde somit nicht erfüllt.

Zur Ergänzung sollte jedoch auch die Probe D155_einzeln_oBezug_Ecke als eine der wirksamsten Varianten angeführt werden. Hier gilt jedoch die Einschränkung, dass sie mit 50-70 cm Abstand zur Außenwand in der Ecke platziert werden muss, um als Tiefenabsorber zu fungieren. Da die entsprechende α_s-Kurve bei 125 Hz und 250 Hz jedoch zwei ausgeprägte Minima aufweist, muss bei der Platzierung in der tatsächlichen Nutzungsumgebung bedacht werden, dass bestimmte Frequenzspektren schlechter bedämpft werden als z. B. der Bereich um 100, 160 und 400 Hz. Die Versuchsanordnung für diese Probe bestand aus vier Rollen à 44 cm Höhe und 19 cm Durchmesser, deren Dämpfungsmaterial aus dem Stoff D155-1012 mit eingenähten Falten bestand und um eine Papphülse von 5 cm Durchmesser aufgewickelt war. Auch hier war keine Verkleidung oder Bezugsstoff angebracht. In der Messung mit Bezugsstoff D310-1822 fiel die Absorption bis 1000 Hz geringer aus, da der Bezugsstoff wiederum einen zu hohen Strömungswiderstand für D155-1012 besitzt. Für eine weitere Optimierung müsste getestet werden, wie sich ein Bezugsstoff mit geringerem Strömungswiderstand oder das Einnähen von Falten in ein anderes Abstandsgestrick mit höherem Strömungswiderstand (z. B. D328-1822) auswirkt. Mit $\alpha_{wD155\text{-}1012}$=0,2 fällt diese Absorberanordnung gemäß DIN EN ISO 11654 zwar in die zweitschlechteste Schallabsorberklasse E, eine gezielte Anwendung zur Bedämpfung tiefer Frequenzen ist jedoch durchaus zielführend.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden textile Schallabsorber aus Abstandsgestricken für den Einsatz in Büroumgebungen weiterentwickelt. Beim Bau der Absorber kamen überwiegend Materialien zum Einsatz, die in dem Strickereiunternehmen STS Textiles GmbH & Co. KG produziert werden oder dort als Verpackungsabfall anfallen. Für den Einsatz als Dämpfungsmaterialien lassen sich auch Produkte mit kleinen Mängeln oder Produktionsabfälle verwenden, wodurch diese dennoch sinnvoll genutzt werden können. Um Erkenntnisse zum Absorptionsverhalten der Materialien und Absorberkonstruktionen in Form des frequenzabhängigen Sabine'schen Absorptionsgrads α_s und dem daraus abgeleiteten bewerteten Schallabsorptionsgrad α_w sowie der Schallabsorberklasse nach DIN EN ISO 11654 zu erhalten, wurden akustische Messungen in einer Alphakabine und in einem Hallraum in Anlehnung an die DIN EN ISO 354 durchgeführt. Der Fokus lag auf der Entwicklung von frei im Raum platzierbaren Eckenabsorbern, die vorzugsweise tiefere Frequenzen bedämpfen sollen. Dabei kamen auch Methoden der statistischen Versuchsplanung zum Einsatz.

Als am wirksamsten aus der Reihe der untersuchten Proben hat sich das Material D147-1080 erwiesen, das als Rollenware mit 27 cm Durchmesser in Form von zwei Säulen mit je 1 m und 1,5 m Höhe in der Hallraummitte platziert wurde. Mit dieser Anordnung wurde die Schallabsorberklasse B mit α_w=0,85 erreicht. Damit wurde das Ziel, die Schallabsorberklasse A zu erzielen, jedoch um 0,05 Punkte verfehlt. Dieser Absorber verhält sich wie ein typischer poröser Absorber mit schwächerem Absorptionsvermögen in den tiefen Frequenzen und starkem in den mittleren und hohen Frequenzbereichen. Es konnten jedoch auch Anordnungen gefunden werden, die im tiefen Frequenzbereich bessere Absorptionsgrade hervorbringen als im mittleren und hohen. Hier ist zum Beispiel die Verwendung des in Falten gelegten Gestricks D155-1012 zu nennen, mit dem eine 20 cm breite und 44 cm hohe Rolle gewickelt und in vier Ausfertigungen einzeln mit etwas Abstand auf dem Hallraumboden platziert wurde. Mit dieser Anordnung konnten bei 100 Hz, 160 Hz und 400 Hz Absorptionsgrade über 1 gemessen werden.

Ein vollkommen zufriedenstellendes Produkt konnte im Verlauf der Bearbeitung jedoch nicht abschließend gefunden werden. Insbesondere die ästhetische Gestaltung ist noch offen, da durch die Materialkennwerte wie Luftdurchlässigkeit und Strömungswiderstand der zur Verfügung stehenden Gestricke das Dämpfungs- und Bezugsmaterial nicht beliebig kombiniert werden kann. Diese Abhängigkeiten haben sich leider erst zu einem zu späten Zeitpunkt im Bearbeitungsverlauf herausgestellt, um dies noch stärker berücksichtigen zu können. Bei einer Weiterbearbeitung des Themas sollten zuerst die Materialkennwerte ermittelt werden und der Probenbau dann darauf abgestimmt werden. Günstig wäre es zudem ebenfalls gewesen, noch mehr Varianten im Hallraum zu prüfen, um das Absorberverhalten besser einschätzen zu können. Mit diesen zusätzlichen Daten sollten sich akustisch hochwirksame und zudem optisch ansprechende Säulenabsorber entwickeln lassen. Denkbar sind auch einfache Sitzmöbel wie Hocker aus Pappe, die mit einem schalldämpfenden Kern eine doppelte Funktion erfüllen.

Quellenverzeichnis

Literatur

[1] Umweltbundesamt, *Schwerpunkte 2013: Jahrepublikation des Umweltbundesamts.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4405.pdf (Zugriff am: 23. Februar 2021).

[2] W. Schirmer, *Technischer Lärmschutz: Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen; mit 40 Tabellen,* 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. [Online]. Verfügbar unter: http://dx.doi.org/10.1007/3-540-33017-8

[3] Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, *Lärmfibel.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.staedtebauliche-laermfibel.de/?p=6&p2=2.3 (Zugriff am: 26. Februar 2021).

[4] Sabelstein UG, *Bühnenmolton Ratgeber – nur ein Stoff für Bühnen?* [Online]. Verfügbar unter: https://www.sabelstein.com/de/magazin/ratgeber/buehnenmolton/ (Zugriff am: 10. November 2020).

[5] Gerriets Acoustics, *Akustikvorhänge für eine optimale Raumakustik | Gerriets Acoustics.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.gerriets-acoustics.com/de/akustikvorhang/ (Zugriff am: 10. November 2020).

[6] Création Baumann AG, *Akustik verbessern mit den Akustikvorhängen von Création Baumann - Création Baumann.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.creationbaumann.com/de/Akustik-verbessern-mit-den-Akustikvorhaengen-von-Creation-Baumann-18650.html (Zugriff am: 10. November 2020).

[7] M. Wehrli, *WeavePerf®.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.akustik-innovation.com/werkstoffe/weaveperf.html (Zugriff am: 10. November 2020).

[8] H. V. Fuchs, *Raum-Akustik und Lärm-Minderung: Konzepte mit innovativen Schallabsorbern und -dämpfern,* 4. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53163-1

[9] A. Meier und K. Müller, *Schallreflektierende und schallabsorbierende Stoffe für akustische Anwendungen.* [Online]. Verfügbar unter: http://pub.dega-akustik.de/DAGA_2010/data/articles/000499.pdf (Zugriff am: 6. November 2020).

[10] B. Kollmeier, *Skript zur Vorlesung über physikalische, technische und medizinische Akustik.* [Online]. Verfügbar unter: http://medi.uni-oldenburg.de/download/docs/lehre/kollm_phystechmed_akustik/ (Zugriff am: 25. Februar 2021).

[11] M. Möser, *Technische Akustik,* 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10607500

[12] akustikform GmbH, *Akustikvorhang.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.akustikform.ch/produkte/akustikvorhang (Zugriff am: 10. November 2020).

[13] BauNetz, *Schall minimieren | Boden | Bauphysik | Baunetz_Wissen.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.baunetzwissen.de/boden/fachwissen/bauphysik/schall-minimieren-151654 (Zugriff am: 10. November 2020).

[14] *Hörsamkeit in Räumen: Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*, DIN 18041, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2016.

[15] Interface, *Akustik am Arbeitsplatz: Vom Boden bis zur Decke.* [Online]. Verfügbar unter: https://interfaceinc.scene7.com/is/content/InterfaceInc/ec_eu-acousticbrochure-depdf (Zugriff am: 28. Januar 2021).

[16] Interface, *Ad Alliance, Düsseldorf.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.interface.com/EU/de-DE/campaign/case-studies/ad-alliance-de_DE (Zugriff am: 28. Januar 2021).

[17] O. Schulze, *Wettbewerb: Wandbespann- und Möbel-Stoffe.* [Online]. Verfügbar unter: https://digi.ub.uni-heidelberg.de/diglit/dkd1908_1909/0283 (Zugriff am: 29. Januar 2021).

[18] Architonic AG, *Architonic | Erweiterte Suche: schallabsorbierend + Material Textil.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.architonic.com/de/advanced-search?term=&man=&creator=&usage=&group=3249420%2C3249459&year=&country=&type=product&und=3239817%2C3221602%2C3210017%2Call (Zugriff am: 29. Januar 2021).

[19] Arte Wandbekleidung, *Intrigue.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.arte-international.com/de/collections/intrigue/caisson/10650 (Zugriff am: 28. Januar 2021).

[20] Plameco-Beckmann, *Wandbespannung.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.plameco-beckmann.de/spanndecken-sortiment/wandbespannung/ (Zugriff am: 28. Januar 2021).

[21] Bel Acoustics, *Akustische Wandbespannung.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.bela-coustics.be/de/produkte/akustische-wandbespannung (Zugriff am: 28. Januar 2021).

[22] Clipso, *SO ACOUSTIC: Die Lösung, die die Akustik Ihrer Wände und Decken verbessert!* [Online]. Verfügbar unter: https://www.clipso.com/uploads/documentations/DE/CLIPSO_SO_ACOUSTIC_DE.pdf (Zugriff am: 29. Januar 2021).

[23] Clipso, *CLIPSO | Ihr französischer Hersteller von Spannwänden und -decken.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.clipso.com/de/startseite.html (Zugriff am: 29. Januar 2021).

[24] Clipso, *Akustische Baffel / CLIPSO Hersteller von Spannwänden und -decken.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.clipso.com/de/losungen/so-acoustic-de/akustische-baffel.html (Zugriff am: 29. Januar 2021).

[25] F. Brielmaier, *Grundlagen der Raumakustik für Architekten und Raumgestalter: Vortrag im Blaha BüroIdeenZentrum, 22. Februar 2018.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.akustikbuch.at/assets/akustik_buch_blaha_pr%C3%A4sentation_brielmaier_2018-02-22.pdf (Zugriff am: 25. Februar 2021).

[26] Architonic AG, *SOUND ABSORBING FURNITURE - High quality designer SOUND ABSORBING FURNITURE | Architonic* (Zugriff am: 1. Februar 2021).

[27] Glimakra, *Products - Glimakra.* [Online]. Verfügbar unter: https://glimakra.com/en/products/all/furniture (Zugriff am: 1. Februar 2021).

[28] Glimakra, *Sabine.* [Online]. Verfügbar unter: https://glimakra.com/en/product/sabine-acoustic-storage-partitioning/ (Zugriff am: 1. Februar 2021).

[29] Abstracta AB, *dB Pillar - Abstracta.* [Online]. Verfügbar unter: https://abstracta.se/product/db-pillar/ (Zugriff am: 1. Februar 2021).

[30] Softrend International, *August H1.* [Online]. Verfügbar unter: https://softrend.ee/int/products/august-h1/ (Zugriff am: 1. Februar 2021).

[31] Preform DE, *Raum-in-Raum Akustiklösungen für moderne Büros | PREFORM.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.preform.de/raum-in-raum-mittelzone/ (Zugriff am: 1. Februar 2021).

[32] A. Hoffmann, *Akustik Sofa V7 - Bezug + Polster B1 schwer entflammbar (LO-ASV7).* [Online]. Verfügbar unter: https://www.lehrmittel-xxl.de/shop/Akustik-Sofa-V7-Bezug-Polster-B1-schwer-entflammbar-LO-ASV7_p21666.html (Zugriff am: 3. Februar 2021).

[33] *LoOok Industries | OneTwenty.* [Online]. Verfügbar unter: http://www.loookindustries.com/en/products/item/1-default/19-onetwenty (Zugriff am: 1. Februar 2021).

[34] Workstations, *Roof Collaborative Booth - Modern Office Furniture - Workstations.* [Online]. Verfügbar unter: https://workstations.com.au/product/office-furniture-roof-collaborative-booth-motion-office/ (Zugriff am: 1. Februar 2021).

[35] BauNetz, *Baffeln | Bauphysik | Glossar | Baunetz_Wissen.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.baunetzwissen.de/glossar/b/baffeln-4438763 (Zugriff am: 3. Februar 2021).

[36] Saint-Gobain Ecophon GmbH, *Wissenswert: Raumakustisches Design mit Deckensegeln.* [Online]. Verfügbar unter: https://static1.squarespace.com/static/56ba2d3737013b3ea923659c/t/56ed6de07da24fd1150abb07/1458400746486/Wissenswert_Raumakustisches_Design_mit_Deckensegeln.pdf (Zugriff am: 3. Februar 2021).

[37] AkustikKompetenz by Planex, *Akustikbaffel - Schallabsorber an der Decke von AkustikKompetenz.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.akustik-kompetenz.de/products/akustikbaffel/ (Zugriff am: 3. Februar 2021).

[38] EASY Noise Control, *Akustik Deckensegel | Hochwertige und günstige Schallabsorber.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.easy-noisecontrol.de/produkt/easy-deckensegel/ (Zugriff am: 3. Februar 2021).

[39] H. V. Fuchs, *Schallabsorber und Schalldämpfer: Innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen,* 3. Aufl. Berlin: Springer, 2010.

[40] J. Gille, „Heimische Ruhe – Teil 1“, *MI Fachverband Mineralwolleindustrie e.V.*, 14. Dez. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.der-daemmstoff.de/heimische-ruhe-teil-1-absorber-mineralwolle/. Zugriff am: 4. Februar 2021.

[41] Snowsound USA, *Mitesco.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.snowsoundusa.com/pdf/specguide/Mitesco_Desk_Spec_Guide_2020_V2.pdf.

[42] SCHALLSAUGER®, *Akustikbilder.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.schallsauger.de/akustikbilder/bildauswahl/ (Zugriff am: 4. Februar 2021).

[43] Sedus Stoll AG, *se:wall.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.sedus.com/de/produkte/raumelemente-screens-akustik/sewall#c26968 (Zugriff am: 3. Februar 2021).

[44] PALMBERG Büroeinrichtungen + Service GmbH, *Wand und Deckenabsorber.* [Online]. Verfügbar unter: https://palmberg.de/de/wand-und-deckenabsorber (Zugriff am: 4. Februar 2021).

[45] GIK Acoustics, *Wie Bassfallen funktionieren.* [Online]. Verfügbar unter: https://gikacoustics.de/wie-bassfallen-funktionieren/ (Zugriff am: 4. Februar 2021).

[46] Büroforum, *Terio Plus Akustiksäule Palmberg | PALMBERG TPASL0420.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.bueroforum.net/terio-plus-akustiksaeule-palmberg.html (Zugriff am: 4. Februar 2021).

[47] H. V. Fuchs und M. Möser, „Schallabsorber“ in *Taschenbuch der technischen Akustik: Mit 119 Tabellen*, G. Müller und M. Möser, Hg., 3 Aufl. Berlin: Springer, 2004, S. 247–304.

[48] D. Hofmann, „Praktikumsarbeit: Entwicklung eines textilen Schallabsorbers“, 2020.

[49] *Messung der Schallabsorption in Hallräumen*, DIN EN ISO 354, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2003. [Online]. Verfügbar unter: https://www.owa.de/wp-content/uploads/2018/12/DS_9558.pdf

[50] U. Liebscher, *Anlegen und Auswerten von technischen Versuchen: Eine Einführung*. Wien: Manz-Verl. Schulbuch, 1999.

[51] K. Siebertz, D. van Bebber und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE),* 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: http://www.springer.com/

[52] M. Schneider, *Datenanalyse für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure,* 1. Aufl., 2020.

[53] W. Kleppmann, *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren,* 10. Aufl., 2020.

[54] Janedu UG, *Standardfehler des Mittelwertes.* [Online]. Verfügbar unter: https://welt-der-bwl.de/Standardfehler (Zugriff am: 12. Januar 2021).

[55] B. Rasch, *Quantitative Methoden: Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler,* 4. Aufl. Berlin: Springer, 2014. [Online]. Verfügbar unter: http://www.lehrbuch-psychologie.de/

[56] G. D. Rey, „Mehrfaktorielle Varianzanalyse“, TU Chemnitz. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tu-chemnitz.de/phil/imf/psyler/lehre/V_EidS/06%20Mehrfaktorielle%20Varianzanalyse.pdf. Zugriff am: 7. Januar 2021.

[57] Y. Liu und H. Hu, „Sound Absorption Behavior of Knitted Spacer Fabrics“, *Textile Research Journal*, Jg. 80, Nr. 18, S. 1949–1957, 2010, doi: 10.1177/0040517510373639.

[58] I. Wünsch, *Lexikon Wirkerei und Strickerei*. Frankfurt am Main: Dt. Fachverl., 2008.

[59] T. Dias, R. Monaragala und E. Lay, „Analysis of thick spacer fabrics to reduce automobile interior noise“ (en), *Meas. Sci. Technol.*, Jg. 18, Nr. 7, S. 2657–2666, 2007, doi: 10.1088/0957-0233/18/7/026.

[60] G. Müller und M. Möser, *Schallabsorber*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=4931453

[61] J. Borger, *Formelsammlung Technische Akustik.* [Online]. Verfügbar unter: https://docplayer.org/74102423-Formelsammlung-formelsammlung-formelsammlung-formelsammlung-formelsammlung-formelsammlung.html (Zugriff am: 15. Februar 2021).

[62] R. Lerch, G. M. Sessler und D. Wolf, *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin: Springer, 2009.

[63] Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., *Akustische Wellen und Felder: DEGA-Empfehlung 101.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.dega-akustik.de/fileadmin/dega-akustik.de/publikationen/DEGA_Empfehlung_101.pdf (Zugriff am: 27. Januar 2021).

[64] Fachstelle Lärmschutz, *Lärmorama - Akustik: Was ist Schall?* [Online]. Verfügbar unter: http://www.laermorama.ch/m1_akustik/schall_w.html#frequenz (Zugriff am: 27. Januar 2021).

[65] K.-P. Weber und M. O. Weber, *Wirkerei und Strickerei: Technologische und bindungstechnische Grundlagen,* 5. Aufl. Frankfurt am Main: Dt. Fachverl., 2008.

[66] *Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von textilen Flächengebilden*, DIN EN ISO 9237, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Dez. 1995.

[67] *Akustik - Bestimmung des Strömungswiderstandes: Teil 1: Verfahren mit statischer Luftströmung*, DIN EN ISO 9053-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Mrz. 2019.

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1	Versuchsauflistung Alphakabine, Randomisierung der Versuche	1 Seite
Anlage 2	Versuchsauflistung Hallraummessungen	1 Seite
Anlage 3	Artikeldatenblätter Abstandsgestricke - D147-1080 - D310-1822 - D155-1012 - D328-1909 - D264-1702	11 Seiten
Anlage 4	Textilprüfungen - Dickenmessung - Masse D155-1015 Falten - Stoffdichte - Porosität Messprotokolle Luftdurchlässigkeit - D147-1080 - D310-1822 - D155-1012 - D328-1909 - D264-1702 - D155-1012 Falten	7 Seiten
Anlage 5	α_s- und α_p-Tabelle Hallraummessungen	1 Seite
Anlage 6	Messprotokolle Hallraum	21 Seiten

Anlage 1

Versuchsauflistung Alphakabine (12., 13., 16.11.2020

Versuchsauflistung

Versuchs-nummer (gesamt)	Proben-bezeichnung	Beschreibung Probe	Mehrfach-Messung	Datum	Masse (kg)	Temp. (°C)	rH (%)	Absorber-fläche (m2) (gerundet)	αw	Absorberklasse
0		Alphakabine leer		16.11.2020	0					
1	P1-1	Pappprisma mittel, ohne Bezug		16.11.2020	1,22	20,7	48	0,96	0,2	E
2	P1-2	Holzprisma, ohne Bezug		16.11.2020	2,982	21,6	47	0,97	0,1	nicht klassifiziert
3	P1-3	Pappprisma mittel, mit Bezug (D310-1822)		16.11.2020	1,52	21,1	48	0,96	0,3	D
4	P1-4	Holzprisma, mit Bezug (D310-1822)		16.11.2020	3,28	20,7	48	0,97	0,25	E
5	P2-1	Pappprisma mittel ohne Löcher, ohne Füllung		13.11.2020	1,646	21,5	/	0,96	0,15	E
6	P2-2	Pappprisma mittel mit Löchern, ohne Füllung		13.11.2020	1,224	21,5	/	0,96	0,2	E
7	P2-3	Pappprisma mittel ohne Löcher, mit Füllung		12.11.2020	3,04	21,1	48	0,96	0,2	E
8	P2-4	Pappprisma mittel mit Löchern, mit Füllung		12.11.2020	2,612	21	49	0,96	0,65	C
9	P3-1	Pappprisma klein, 75 Lagen D264-1012 Vitalis		12.11.2020	3,164	21	47	0,77	0,65	C
10	P3-2	Pappprisma groß, 75 Lagen D264-1012 Vitalis		12.11.2020	6,955	21,1	48	1,2	0,6	C
11	P3-2(2)	Pappprisma groß, 75 Lagen D264-1012 Vitalis, mit Bezug		12.11.2020	7,355	21,2	48	1,2	0,65	C
12	P3-3	Pappprisma klein, 125 Lagen D264-1012 Vitalis		12.11.2020	4,73	21	48	0,77	0,7	C
13	P3-4	Pappprisma groß, 125 Lagen D264-1012 Vitalis		13.11.2020	10,625	21,5	/	1,2	0,7	C
14	P3-5	Pappprisma klein, 100 Lagen D264-1012 Vitalis		12.11.2020	3,93	22,9	45	0,77	0,65	C
15	P3-5(2)	Pappprisma klein, 100 Lagen D264-1012 Vitalis, mit Bezug		12.11.2020	4,174	22	46	0,77	0,75	C
16	P3-6	Pappprisma groß, 100 Lagen D264-1012 Vitalis		13.11.2020	8,8	21,5	/	1,2	0,6	C
17	P3-7	Pappprisma mittel, 75 Lagen D264-1012 Vitalis		12.11.2020	4,69	21,1	48	0,96	0,6	C
18	P3-8	Pappprisma mittel, 125 Lagen D264-1012 Vitalis		16.11.2020	6,96	21,2	48	0,96	0,7	C
19	P3-9(1)	Pappprisma mittel, 100 Lagen D264-1012 Vitalis	Zentralpunkt	13.11.2020	5,82	21,5	/	0,96	0,65	C
20	P3-9(2)	Pappprisma mittel, 100 Lagen D264-1012 Vitalis	Zentralpunkt	13.11.2020	5,82	21,5	/	0,96	0,65	C
21	P3-9(3)	Pappprisma mittel, 100 Lagen D264-1012 Vitalis	Zentralpunkt	13.11.2020	5,82	21,5	/	0,96	0,65	C
22	P3-9(4)	Pappprisma mittel, 100 Lagen D264-1012 Vitalis	Zentralpunkt	13.11.2020	5,82	21,5	/	0,96	0,65	C
23	S1-1	D155-1012, Falten, manuell gewickelt, d = 40 cm		13.11.2020	6,23	21,5	/	0,73	0,8	B
24	S1-2	D155-1012, Falten, manuell gewickelt, d = 20,9 cm		13.11.2020	2,134	21,5	/	0,34	0,95	A
25	S1-3	D155-1012, Rollenabschnitt, d = 20,9 cm		12.11.2020	2,63	23,1	43	0,34	0,55	D
26	S1-4	D147-1080, Rollenabschnitt, d = 26,8 cm		12.11.2020	4,588	23	44	0,45	0,7	C
27	S1-5	D155-1012, Rollenabschnitt, d = 28,9 cm		12.11.2020	5,274	21,1	47	0,49	0,65	C
28	S1-6	D328-1909, Rollenabschnitt, d = 28 cm		13.11.2020	5,848	21,5	/	0,48	0,75	C

Mittelwert: 21,478571 (für 13.11. verwendet, da dort kein Messgerät dabei)

Randomisierung der Versuche in der Alphakabine

Randomisierung der Versuche

Versuchs-Nr.	Proben-bezeichnung	Beschreibung Probe	Zufallszahl	Doppelt
3	P1-3	Pappprisma mittel, mit Bezug (D310-1822)	0,134665933	
1	P1-1	Pappprisma mittel, ohne Bezug	0,731567311	
4	P1-4	Holzprisma, mit Bezug (D310-1822)	0,165346729	
2	P1-2	Holzprisma, ohne Bezug	0,079929141	
		ab hier alle ohne Bezug:		
16	P3-8	Pappprisma mittel, 125 Lagen D264-1012 Vitalis	0,926984267	
13	P3-5	Pappprisma klein, 100 Lagen D264-1012 Vitalis	0,218819787	
24	S1-4	D147-1080, Rollenabschnitt, d = 26,8 cm	0,780983075	
23	S1-3	D155-1012, Rollenabschnitt, d = 20,9 cm	0,625768172	
9	P3-1	Pappprisma klein, 75 Lagen D264-1012 Vitalis	0,509312289	
25	S1-5	D155-1012, Rollenabschnitt, d = 28,9 cm	0,31265551	
10	P3-2	Pappprisma groß, 75 Lagen D264-1012 Vitalis	0,859029155	
15	P3-7	Pappprisma mittel, 75 Lagen D264-1012 Vitalis	0,190284023	
11	P3-3	Pappprisma klein, 125 Lagen D264-1012 Vitalis	0,08365829	
8	P2-4	Pappprisma mittel mit Löchern, mit Füllung	0,457824301	
12	P3-4	Pappprisma groß, 125 Lagen D264-1012 Vitalis	0,925318676	
6	P2-2	Pappprisma mittel mit Löchern, ohne Füllung	0,575329086	
26	S1-6	D328-1909, Rollenabschnitt, d = 28 cm	0,238271048	
21	S1-1	D155-1012, Falten, manuell gewickelt, d = 40 cm	0,29261115	
14	P3-6	Pappprisma groß, 100 Lagen D264-1012 Vitalis	0,509273447	
7	P2-3	Pappprisma mittel ohne Löcher, mit Füllung	0,813076854	
22	S1-2	D155-1012, Falten, manuell gewickelt, d = 20,9 cm	0,872884824	
5	P2-1	Pappprisma mittel ohne Löcher, ohne Füllung	0,473340358	
17	P3-9(1)	Pappprisma mittel, 100 Lagen D264-1012 Vitalis		Zentralpunkt
18	P3-9(2)	Pappprisma mittel, 100 Lagen D264-1012 Vitalis		Zentralpunkt
19	P3-9(3)	Pappprisma mittel, 100 Lagen D264-1012 Vitalis		Zentralpunkt
20	P3-9(4)	Pappprisma mittel, 100 Lagen D264-1012 Vitalis		Zentralpunkt

Anlage 2

Versuchsauflistung Hallraummessungen (18.1., 9.2.2021)

Versuchsauflistung Hallraum (18.1.2021)

Versuchs-nummer	Probenbezeichnung	Beschreibung Probe	Datum	Temp. (°C)	rH (%)	S (m2)	αw	Absorber-klasse
0	Hallraum_leer		18.01.2021	13,9	46			
1	D147-1080_Mitte_oB	5 Rollen D147-1080, 2 Säulen, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raummitte	18.01.2021	14,3	46	2,07	0,85	B
2	D147-1080_Ecke_oB	5 Rollen D147-1080, 2 Säulen, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raumecke	18.01.2021	14,5	46	2,07	0,65	C
3	D328-1909_Mitte_oB	4 Rollen D328-1909, 1 Säule, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raummitte	18.01.2021	14,7	46	1,72	0,6	C
4	D328-1909_Ecke_oB	4 Rollen D328-1909, 1 Säule, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raumecke	18.01.2021	14,9	46	1,72	0,7	C
5	D147-1080_Prisma_Mitte	3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D147-1080 gefüllt, in Raummitte	18.01.2021	15,2	46	2,68	0,55	D
6	D147-1080_Prisma_Ecke	3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D147-1080 gefüllt, in Raumecke	18.01.2021	15,5	46	2,68	0,5	D
7	D328-1909_Prisma_Mitte	3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D328-1909 gefüllt, in Raummitte	18.01.2021	15,8	46	2,68	0,5	D
8	D328-1909_Prisma_Ecke	3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D328-1909 gefüllt, in Raumecke	18.01.2021	15,7	46	2,68	0,5	D
9	D147-1080_Mitte_mB	5 Rollen D147-1080, 3 Säulen, mit Verkleidung und Holzdeckel, in Raummitte	18.01.2021	16,1	46	2,60	0,65	C
10	D328-1909_Mitte_mB	4 Rollen D328-1909, 2 Säulen, mit Verkleidung und Holzdeckel, in Raummitte	18.01.2021	16,4	46	2,01	0,7	C

Versuchsauflistung Hallraum (9.2.2021)

Versuchs-nummer	Probenbezeichnung	Beschreibung Probe	Datum	Temp. (°C)	rH (%)	S (m2)	αw	Absorber-klasse
0	Hallraum_leer	Hallraum leer	09.02.2021	23,5	20			
1	D155_einzeln_mBezug_Mitte	4 Rollen Faltenstoff (D155-1012), mit Bezug, einzeln, erhöht, Raummitte	09.02.2021	23,7	20	1,27	0,5	D
2	D155_einzeln_mBezug_Ecke	4 Rollen Faltenstoff (D155-1012), mit Bezug, einzeln, erhöht, Raumecke	09.02.2021	24,0	20	1,27	0,25	E
3	D155_einzeln_oBezug_Ecke	4 Rollen Faltenstoff (D155-1012), ohne Bezug, einzeln, erhöht, Raumecke	09.02.2021	24,7	20	1,25	0,2	E
4	D155_einzeln_oBezug_Mitte	4 Rollen Faltenstoff (D155-1012), ohne Bezug, einzeln, erhöht, Raummitte	09.02.2021	24,7	20	1,25	0,25	E
5	D155_einzeln_Pappenkern_Mitte	4x Faltenstoff (D155-1012) auf Rechteckappkern, ohne Bezug, einzeln, erhöht, Raummitte	09.02.2021	24,8	20	1,53	0,35	D
6	D155_ohne Kern_Mitte	4x Faltenstoff (D155-1012) ohne Kern, ohne Bezug, einzeln, erhöht, Raummitte	09.02.2021	24,9	20	1,29	0,3	D
7	D155_ohne Kern_Ecke	4x Faltenstoff (D155-1012) ohne Kern, ohne Bezug, einzeln, erhöht, Raumecke	09.02.2021	25,1	20	1,29	0,25	E
8	D328_einzeln_mVerkl_Mitte	4 Rollen D328-1909, mit Verkleidung, einzeln, erhöht, Raummitte	09.02.2021	25,2	20	2,49	0,45	D
9	D328_einzeln_mVerkl_Ecke	4 Rollen D328-1909, mit Verkleidung, einzeln, erhöht, Raumecke	09.02.2021	25,3	20	2,49	0,45	D
10	D328_einzeln_Ecke	4 Rollen D328-1909, ohne Verkleidung, einzeln, erhöht, Raumecke	09.02.2021	25,4	20	2,27	0,5	D
11	2_Prismen_einzeln_ohne Deckel_Mitte	2 Dreiecksprismen mit D328-1909 (d=0,29 m) + 2x D155-1012 Falten ohne Hülse (d= 0,19 m) gefüllt, ohne Deckel, einzeln, Raummitte	09.02.2021	25,4	20	1,93	0,3	D

Anlage 3

D8-3-03 R01	**Artikeldatenblatt**	**STS**

Datum: 25.01.2018		**Variante: 1080**	
Art: D147	**Farbe: 11000**	**Breite: 240**	**Veredlung: trocken spannen**
Roh-Gewicht: 165 g/m²		**Fertig-Gewicht: 175** g/m²	
TKG-Schlüssel: 100% PES			

Gatter	System	Patronen-farbe	ArtNr	Garn	Einlauf-werte
A	1	Farbe 2 Blau + Rot(Kante)	151	PES dtex 76/1 roh	105
B	2	weiß	001	PES dtex 167/1 roh	107
A	3	Farbe 1 grün	115	PES dtex 150/1 Trilobal 11000 hochglanz	115
B	4	weiß	001	PES dtex 167/1 roh	109
	5				
	6				
	7				
	8				
C	Füllfd.		117	PES dtex 330/2 text.	39,58
C	Füllfd.		-	-	-

SFE Ringfarbe	System1	System2	System3	System4	Abzug
Ripphöhe 1,1					

Umdrehungen/min:	Soll:		Ist:	
Stricktechnik **UCC 572**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	7	--	7	--
Kul – Zylinder	6/1	8/1	6/1	8/1
Fadeneinlauf				

Stricktechnik **UCC 594**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	0,3	--	0,3	--
Kul – Zylinder	9	4	9	4
Abzug				

Bemerkungen:

Papierkopien dieses Dokumentes sind vor Benutzung stets vom Anwender auf Gültigkeit zu überprüfen

D8-3-03 R01	**Artikeldatenblatt**	**STS**

Design:

Bemerkungen / Zuordnung für Mechaniker:

Oberfläche glatt -> 001 - PES dtex 167/1 roh (Sys. 2+4)
Muster und Grundbindung in grün -> 115 - PES dtex 150/1 Trilobal 11000 hochglanz (Sys. 3)
Kante in rot -> 151 - PES dtex 76/1 roh (Sys. 1)

Papierkopien dieses Dokumentes sind vor Benutzung stets vom Anwender auf Gültigkeit zu überprüfen

D8-3-03 R01	**Artikeldatenblatt**	**STS**

Datum: 29.08.2018		**Variante: 1822**	
Art: D310	**Farbe: 43**	**Breite: 235**	**Veredlung:** waschen
Roh-Gewicht: 300 g/m²		**Fertig-Gewicht:** 320 g/m²	
TKG-Schlüssel: 100% PES			

Gatter	System	Patronen-farbe	ArtNr	Garn	Einlauf-werte
A	1	Farbe 2 Blau + Rot(Kante)	108	PES dtex 167/1 schwarz 8010	66,5
B	2	weiß	235	Melange Airlan 300 Miniglace schwarz MG007	68
A	3	Farbe 1 grün	108	PES dtex 167/1 schwarz 8010	75
B	4	weiß	235	Melange Airlan 300 Miniglace schwarz MG007	69
	5				
	6				
	7				
	8				
C	Füllfd.		236	PES dtex 330/96/3 schwarz	25,5
C	Füllfd.		-	-	-

SFE Ringfarbe	System1	System2	System3	System4	Abzug
Ripphöhe 1,1	schwarz	schwarz	schwarz	schwarz	mittel

Umdrehungen/min:	Soll:	Ist: 13		
Stricktechnik **UCC 572**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	8	--	8	--
Kul – Zylinder	6	8	6	8
Fadeneinlauf				

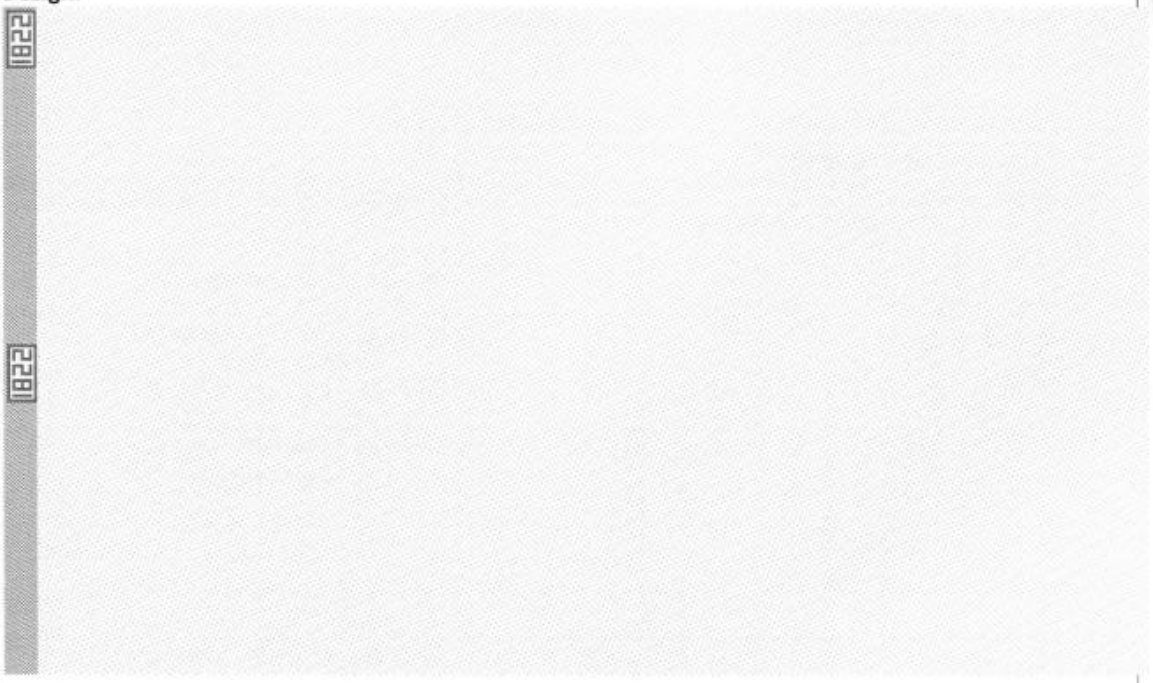
Stricktechnik **UCC 594**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	0,4	--	0,4	--
Kul – Zylinder	9	3,5	9	3,5
Abzug				

Bemerkungen:
Dieser Artikel läuft nur für Kunden FROHLI. Veredlung wurde in KW 30 von foulardieren auf waschen umgestellt in Absprache mit MT. TV Schneider teilte uns mit, dass der Stoff Ölflecken enthält und daher gewaschen werden müsste. 26.07.2019 AB

Papierkopien dieses Dokumentes sind vor Benutzung stets vom Anwender auf Gültigkeit zu überprüfen

D8-3-03 R01	**Artikeldatenblatt**	**STS**

Design:



Bemerkungen / Zuordnung für Mechaniker:

Oberfläche glatt → 235 - Airlan 300 Miniglance schwarz MG007 (Sys 2+4)
Abbindungen in grün → 108 - PES dtex 167/1 schwarz 8010 (Sys 3)
Kante in rot → 108 - PES dtex 167/1 schwarz 8010 (Sys 1)

Papierkopien dieses Dokumentes sind vor Benutzung stets vom Anwender auf Gültigkeit zu überprüfen

D8-3-03 R01	**Artikeldatenblatt**	**STS**

Datum: 15.08.2018		**Variante: 1012**	
Art: D155	**Farbe: 0**	**Breite: 240**	**Veredlung: Dämpfen**
Roh-Gewicht: 230 g/m²		**Fertig-Gewicht:** 260 g/m²	
TKG-Schlüssel: 60% PES, 40% CV			

Gatter	System	Patronen-farbe	ArtNr	Garn	Einlauf-werte
A	1	Farbe 2 Blau + Rot(Kante)	001	PES dtex 167/1 roh	133
B	2	weiß	004	CV Nm 40/1	144
A	3	Farbe 1 grün	001	PES dtex 167/1 roh	177
B	4	weiß	004	CV Nm 40/1	139
	5				
	6				
	7				
	8				
C	Füllfd.		003	PES dtex 330/4 roh	43,8
C	Füllfd.		-	-	-

SFE Ringfarbe	System1	System2	System3	System4	Abzug
Ripphöhe 1,1					30

Umdrehungen/min:	Soll:	Ist: 14,5		
Stricktechnik **UCC 572**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	8	--	8	--
Kul – Zylinder	6/1	8/2	6/1	8/2
Fadeneinlauf				

Stricktechnik **UCC 594**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	0,9	--	0,9	--
Kul – Zylinder	9	4,5	9	4,5
Abzug				

Stricktechnik **MA 112**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	0,3	--	0,3	--
Kul – Zylinder	9	4,5	9	4,5
Abzug 50/30				

Papierkopien dieses Dokumentes sind vor Benutzung stets vom Anwender auf Gültigkeit zu überprüfen

D8-3-03 R01	**Artikeldatenblatt**	**STS**

Stricktechnik **MA 108**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	0,3	--	0,3	--
Kul – Zylinder	9	4,5	9	4,5
Abzug 50/30				

Design:

Bemerkungen / Zuordnung für Mechaniker:

Oberfläche glatt -> 004 - CV Nm 40/1 (Sys. 2+4)
Grundbindung grün -> 001 - PES dtex 167/1 roh (Sys 3)
Kante in rot -> 001 - PES dtex 167/1 roh (Sys. 1)

Papierkopien dieses Dokumentes sind vor Benutzung stets vom Anwender auf Gültigkeit zu überprüfen

D8-3-03 R01	**Artikeldatenblatt**	**STS**

Datum: 14.02.2019		**Variante: 1909**	
Art: D328	**Farbe: 1**	**Breite: 210**	**Veredlung: waschen**
Roh-Gewicht: 280 g/m²		**Fertig-Gewicht:** 320 g/m²	
TKG-Schlüssel: 58% PES, 40% CO, 2% EL			

Gatter	System	Patronen-farbe	ArtNr	Garn	Einlauf-werte
A	1	Farbe 2 Blau + Rot(Kante)	001 124	PES dtex 167/1 roh PES/EL 188/1 dtex roh	101
B	2	weiß	140	CO Nm 50/1 gebleicht	108
A	3	Farbe 1 grün	001	PES dtex 167/1 roh	107
B	4	weiß	140	CO Nm 50/1 gebleicht	102
	5				
	6			**PES/EL 188/1 dtex auf Sys. 5,13,21,29,37,45,53,61,69,77,85,93,101,109**	
	7				
	8				
C	Füllfd.		117	PES dtex 330/2 text. roh	39,72
C	Füllfd.		-	-	-

SFE Ringfarbe	System1	System2	System3	System4	Abzug
Ripphöhe 1,1					50/21

Umdrehungen/min:	Soll:		Ist: 12,5	
Stricktechnik **UCC 572**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	6	--	6	--
Kul – Zylinder	6	2	6	2
Fadeneinlauf				

Umdrehungen/min:	Soll:		Ist:	
Stricktechnik **UCC 594**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	0,25	--	0,25	--
Kul – Zylinder	9	2	9	2
Abzug				
Stricktechnik **UCC 594**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	0,55	--	0,55	--
Kul – Zylinder	9	2	9	2
Abzug 28	MA 101			

Papierkopien dieses Dokumentes sind vor Benutzung stets vom Anwender auf Gültigkeit zu überprüfen

D8-3-03 R01	**Artikeldatenblatt**	**STS**

Bemerkungen:
Darf nur gewaschen werden!!! Optimale Optik des Artikels nur durch waschen erreichbar!
Auf Krumpfwert max. 5% achten!!! 5.9.2019 AB

Design:

Bemerkungen / Zuordung für Mechaniker:

Oberfläche glatt -> 140 – CO Nm 50/1 gebleicht (Sys. 2+4)
Abbindungen in grün -> 001 - PES dtex 167/1 roh (Sys. 3)
Kante in rot -> 001 - PES dtex 167/1 roh + 124 - PES/EL 188/1 dtex roh im Wechsel (Sys.1)

PES/EL 188/1 dtex auf Sys. 5,13,21,29,37,45,53,61,69,77,85,93,101,109

Von roher auf gebleichte Baumwolle geändert, da beim Bleichen (TVE) der Krumpfwert von 5% nur mit faltigem Warenausfall erreicht wurde! 14.02.2019 AB in Absprache mit HPS und MT

STS_D7_02 R01	**Dokument Artikeldatenblatt**	**STS**

Datum: 08.05.2018		**Variante: 1702 Vitalis**	
Art: D264	**Farbe: 138**	**Breite: 230**	**Veredlung: trocken spannen bei TV Schneider**
Roh-Gewicht: 360 g/m²		**Fertig-Gewicht:** 420 g/m²	
TKG-Schlüssel: 73% PES, 27% CV			

Gatter	System	Patronen-farbe	ArtNr	Garn	Einlauf-werte
A	1	Farbe 2 Blau + Rot(Kante)	001	PES dtex 167/1 roh	96
B	2	weiß	004	CV Nm 40/1	103,8
A	3	Farbe 1 grün	108	PES dtex 167/1 text. 138 hellgrau	144,8
B	4	weiß	004	CV Nm 40/1	105,3
	5				
	6				
	7			**doppelter Füllschuss**	
	8				
C	Füllfd		003	PES dtex 330/4	36,3
C	Füllfd		112	PES dtex 330/3	37,4

SFE Ringfarbe	System1	System2	System3	System4	Abzug
Ripphöhe 1,1	Schwarz	Schwarz	Schwarz	Schwarz	12,1

Umdrehungen/min: Soll: Ist: 12,5

Stricktechnik **UCC 572**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	6	--	6	--
Kul – Zylinder	6	6	6	6
Fadeneinlauf				

Stricktechnik **UCC 594**	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	0,5	--	0,5	--
Kul – Zylinder	9	3,5	9	3,5
Abzug				

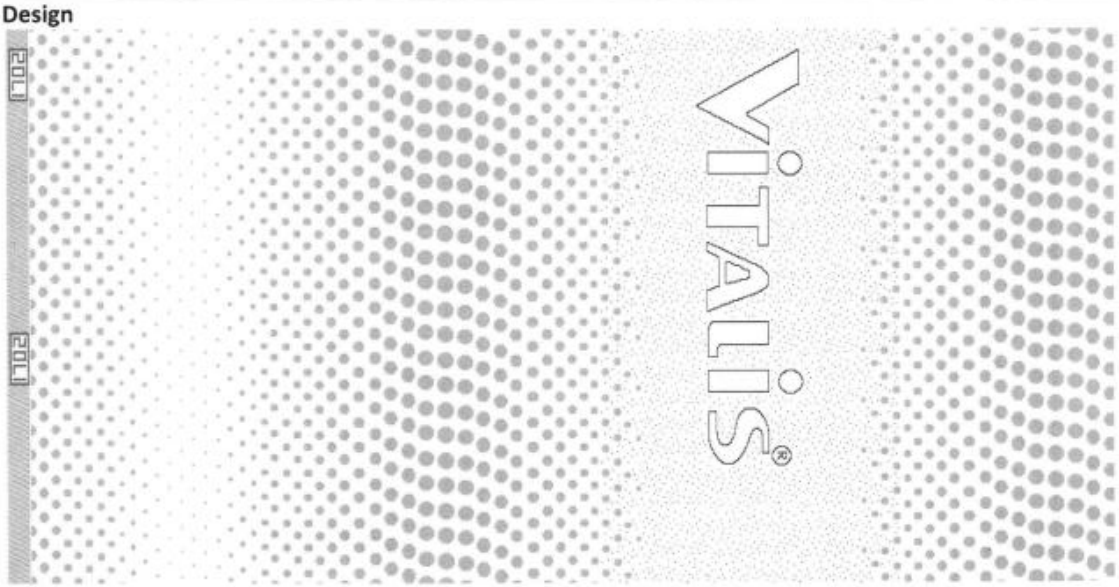
Kulierungen zum Teil von MA zu MA unterschiedlich -> bitte beachte auch Seite 3

Bemerkungen:
Bitte Logoabmaße in der Rohware beachten! (Siehe Rückseite)
Please note the logosize! (back side)

Papierkopien dieses Dokumentes sind vor Benutzung stets vom Anwender auf Gültigkeit zu überprüfen

STS_D7_02 R01	**Dokument** **Artikeldatenblatt**	**STS**

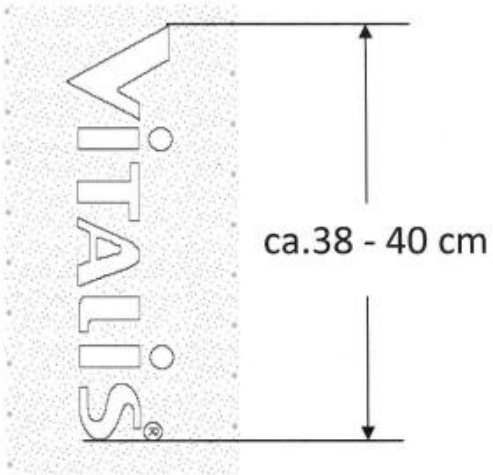
Design



Bemerkungen / Zuordnung für Mechaniker:

Oberfläche glatt -> 004 - CV Nm 40/1 (Sys. 2+4)
Kreise in grün -> 108 - PES dtex 167/1 text. 138 hellgrau (Sys. 3)
Schriftzug & Grundbindung in blau + Kante in rot -> 001 - PES dtex 167/1 roh (Sys. 1)

Bitte Logoabmaße in der Rohware beachten!



Papierkopien dieses Dokumentes sind vor Benutzung stets vom Anwender auf Gültigkeit zu überprüfen

STS_D7_02 R01	Dokument **Artikeldatenblatt**	STS

UCC 594 MA 106	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	0,1	--	0,1	--
Kul – Zylinder	9	2,5	9	2,5
Abzug				
UCC 594 MA 104	1	2	3	4
Ripp	Alle	R	Alle	R
Zylinder	Jaquard	Jaquard	Jaquard	Jaquard
Kul – Ripp	0,3	--	0,3	--
Kul – Zylinder	9	2,5	9	2,5
Abzug				

Papierkopien dieses Dokumentes sind vor Benutzung stets vom Anwender auf Gültigkeit zu überprüfen

Anlage 4

Dickenmessung

Nr.	Probe	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	t_4 (mm)	t_5 (mm)	t_6 (mm)	t_7 (mm)	t_8 (mm)	MW	StabW	CV
1	D147-1080	1,31	1,44	1,35	1,39	1,37	1,46			1,387	0,051	0,037
2	D155-1012	2,11	1,94	1,99	2,02	2,18	2,28			2,087	0,117	0,056
3	D328-1909	1,89	1,85	1,86	1,84	1,92	1,73			1,848	0,059	0,032
4	D310-1822	1,5	1,48	1,48	1,48	1,47	1,4			1,468	0,032	0,022
5	D264-1702	3,9	3,95	3,99	3,99	4,06	5,15	4,16	4,21	4,176	0,381	0,091
6	D155-1012 (Falten)	4,48	4,49	4,6	4,74	4,81	4,89	4,61		4,660	0,146	0,031

Masse (100 cm^2)

Nr.	Probe	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	m_4 (g)	m_5 (g)	MW	StabW	CV
6	D155-1012 (Falten)	5,166	5,411	5,016	5,381	4,993	5,193	0,176	0,034

Stoffdichte ρ_f

Nr.	Probe	M (g/m^2)	t (m)	ρ_f (g/m^3)	ρ_f (kg/m^3)	ρ_f (g/cm^3)
1	D147-1080	175	0,00139	126201,92	126,20192	0,1262019
2	D155-1012	260	0,00209	124600,64	124,60064	0,1246006
3	D328-1909	320	0,00185	173128,94	173,12894	0,1731289
4	D310-1822	320	0,00147	217934,17	217,93417	0,2179342
5	D264-1702	420	0,00418	100568,69	100,56869	0,1005687
6	D155-1012 (Falten)	519	0,00466	111446,35	111,44635	0,1114464

Porosität Φ

Nr.	Probe	M (g/m^2)	t (mm)	t (m)	Faser-stoff	Dichte (g/cm^3)	Anteil
1	D147-1080	175	1,387	0,001387	PES	1380000	1,00
2	D155-1012	260	2,087	0,002087	PES	1380000	0,60
3	D328-1909	320	1,848	0,001848	PES	1380000	0,58
4	D310-1822	320	1,468	0,001468	PES	1380000	1,00
5	D264-1702	420	4,176	0,004176	PES	1380000	0,73
6	D155-1012 (Falten)	519	4,660	0,004660	PES	1380000	0,60

Faserstoff	Dichte (g/cm^3)	Anteil	Faser-stoff	Dichte (g/cm^3)	Anteil	Φ
						90,85
CV	1510000	0,40				91,30
CO	1540000	0,40	EL	1300000	0,02	88,00
						84,21
CV	1510000	0,27				92,89
CV	1510000	0,40				92,22

TEXTEST INSTRUMENTS

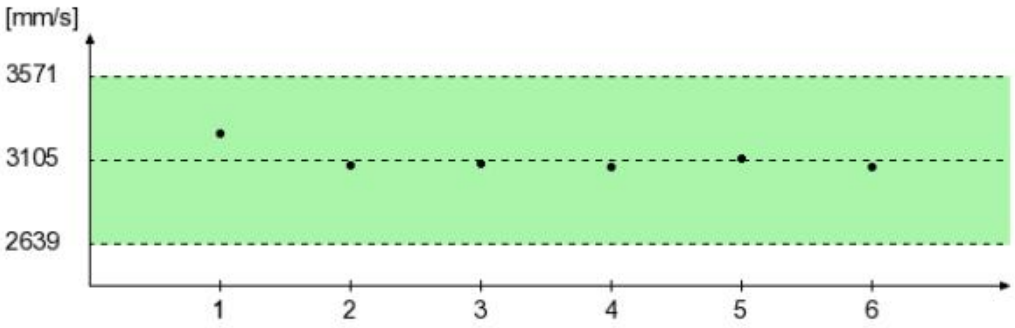
Static Air Permeability

Basic data	
Style:	**D147-1080**
Reference:	**A**
Date:	**02.02.2021**
Time:	**10:30:31**
Instrument:	**FX 3300 LabAir IV**
Serial Number:	**973**

Settings	
Test pressure:	200 Pa
Test area:	20 cm^2
Nom / Min / Max:	-1.00 / -1.00 / -1.00 mm/s

Statistical analysis	
Average:	3105 mm/s
Minimum:	3060 mm/s
Maximum:	3250 mm/s
CV:	2.16 %
Cpk:	0.0000

Test results



1	▲	3250 mm/s	2	▲	3070 mm/s
3	▲	3080 mm/s	4	▲	3060 mm/s
5	▲	3110 mm/s	6	▲	3060 mm/s

TEXTEST INSTRUMENTS

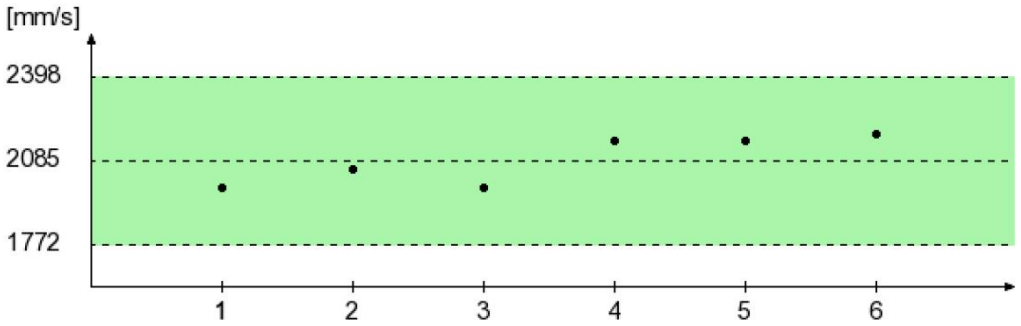
Static Air Permeability

Basic data	
Style:	**D310-1822**
Reference:	**A**
Date:	**02.02.2021**
Time:	**10:39:20**
Instrument:	**FX 3300 LabAir IV**
Serial Number:	**973**

Settings	
Test pressure:	200 Pa
Test area:	20 cm^2
Nom / Min / Max:	-1.00 / -1.00 / -1.00 mm/s

Statistical analysis	
Average:	2085 mm/s
Minimum:	1980 mm/s
Maximum:	2180 mm/s
CV:	4.09 %
Cpk:	0.0000

Test results



1	▲	1980 mm/s	2	▲	2050 mm/s
3	▲	1980 mm/s	4	▲	2160 mm/s
5	▲	2160 mm/s	6	▲	2180 mm/s

TEXTEST INSTRUMENTS

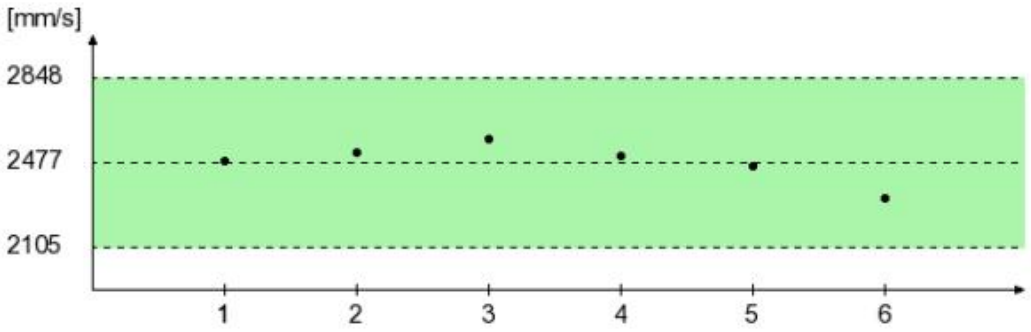
Static Air Permeability

Basic data	
Style:	**D155-1012**
Reference:	**A**
Date:	**02.02.2021**
Time:	**10:33:13**
Instrument:	**FX 3300 LabAir IV**
Serial Number:	**973**

Settings	
Test pressure:	200 Pa
Test area:	20 cm^2
Nom / Min / Max:	-1.00 / -1.00 / -1.00 mm/s

Statistical analysis	
Average:	2477 mm/s
Minimum:	2320 mm/s
Maximum:	2580 mm/s
CV:	3.21 %
Cpk:	0.0000

Test results



1	▲	2480 mm/s	2	▲	2520 mm/s
3	▲	2580 mm/s	4	▲	2500 mm/s
5	▲	2460 mm/s	6	▲	2320 mm/s

TEXTEST INSTRUMENTS

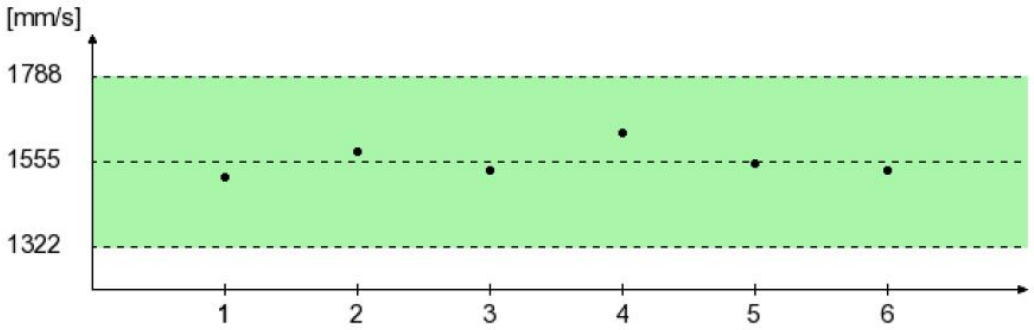
Static Air Permeability

Basic data	
Style:	**D328-1909**
Reference:	**A**
Date:	**02.02.2021**
Time:	**10:36:09**
Instrument:	**FX 3300 LabAir IV**
Serial Number:	**973**

Settings	
Test pressure:	200 Pa
Test area:	20 cm^2
Nom / Min / Max:	-1.00 / -1.00 / -1.00 mm/s

Statistical analysis	
Average:	1555 mm/s
Minimum:	1510 mm/s
Maximum:	1630 mm/s
CV:	2.57 %
Cpk:	0.0000

Test results



1	▲	1510 mm/s	2	▲	1580 mm/s
3	▲	1530 mm/s	4	▲	1630 mm/s
5	▲	1550 mm/s	6	▲	1530 mm/s

TEXTEST INSTRUMENTS

Static Air Permeability

Basic data

Style:	**D264-1702**
Reference:	**A**
Date:	**02.02.2021**
Time:	**11:08:05**
Instrument:	**FX 3300 LabAir IV**
Serial Number:	**973**

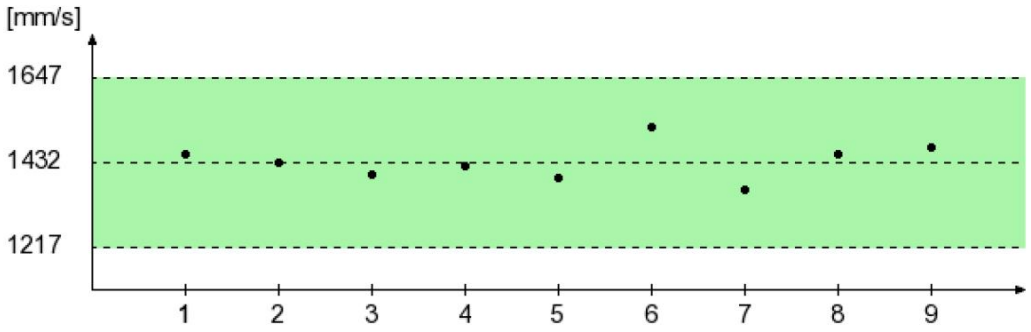
Settings

Test pressure:	200 Pa
Test area:	20 cm^2
Nom / Min / Max:	-1.00 / -1.00 / -1.00 mm/s

Statistical analysis

Average:	1432 mm/s
Minimum:	1360 mm/s
Maximum:	1520 mm/s
CV:	3.12 %
Cpk:	0.0000

Test results



1	▲	1450 mm/s	2	▲	1430 mm/s
3	▲	1400 mm/s	4	▲	1420 mm/s
5	▲	1390 mm/s	6	▲	1520 mm/s
7	▲	1360 mm/s	8	▲	1450 mm/s
9	▲	1470 mm/s			

TEXTEST INSTRUMENTS

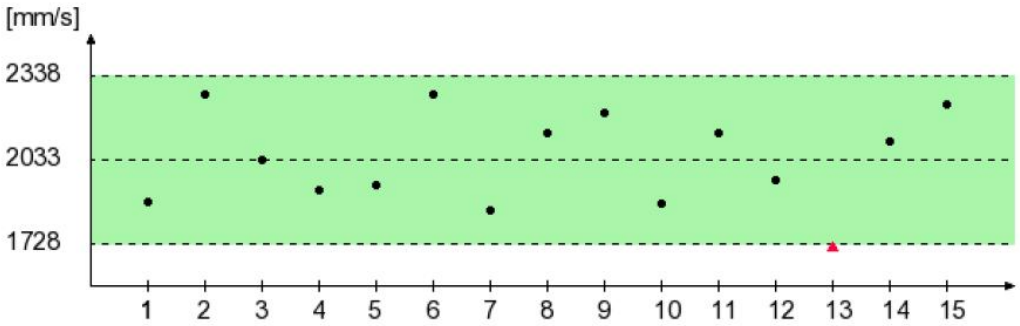
Static Air Permeability

Basic data	
Style:	**D155-1012 Falten**
Reference:	
Date:	**02.02.2021**
Time:	**11:34:18**
Instrument:	**FX 3300 LabAir IV**
Serial Number:	**973**

Settings	
Test pressure:	200 Pa
Test area:	20 cm^2
Nom / Min / Max:	-1.00 / -1.00 / -1.00 mm/s

Statistical analysis	
Average:	2033 mm/s
Minimum:	1720 mm/s
Maximum:	2270 mm/s
CV:	8.14 %
Cpk:	0.0000

Test results



1	▲	1880 mm/s	2	▲	2270 mm/s
3	▲	2030 mm/s	4	▲	1920 mm/s
5	▲	1940 mm/s	6	▲	2270 mm/s
7	▲	1850 mm/s	8	▲	2130 mm/s
9	▲	2200 mm/s	10	▲	1870 mm/s
11	▲	2130 mm/s	12	▲	1960 mm/s
13	▲	1720 mm/s	14	▲	2100 mm/s
15	▲	2230 mm/s			

Anlage 5

α_s- und α_p-Tabelle Hallraummessungen (bedingte Formatierung)

Hallraum 9.2.2021

f in Hz	Sabine'scher Schallabsorptionsgrad αs										
	D155_einzeln_ mBezug_Mitte	D155_einzeln_ mBezug_Ecke	D155_einzeln_ oBezug_Ecke	D155_einzeln_ oBezug_Mitte	D155_einzeln_ Pappenkern_Mitte	D155_ohne Kern_Mitte	D155_ohne Kern_Ecke	D328_einzeln_ mVerkl_Mitte	D328_einzeln_ mVerkl_Ecke	D328_einzeln_ Ecke	2_Prismen_einzeln_ohne Deckel_Mitte
100	1,37	0,65	1,07	0,88	1,99	1,65	1,34	0,62	1,03	0,58	0,98
125	-0,05	0,36	0,56	0,14	0,13	0,28	0,93	0,20	0,43	0,56	0,23
160	0,00	0,81	1,08	0,19	-0,07	-0,17	0,60	0,06	0,66	0,75	0,02
200	0,44	0,87	0,87	0,93	0,64	0,62	0,72	0,36	0,59	0,73	0,36
250	0,37	0,36	0,54	0,40	0,42	0,30	0,65	0,38	0,48	0,32	0,42
315	0,28	0,59	0,68	0,39	0,16	0,17	0,56	0,01	0,63	0,56	0,11
400	0,63	0,84	1,10	0,48	0,47	0,51	0,91	0,48	0,88	0,81	0,51
500	0,51	0,82	0,84	0,74	0,49	0,59	0,78	0,49	0,75	0,80	0,49
630	0,52	0,79	0,69	0,73	0,56	0,53	0,76	0,48	0,67	0,67	0,49
800	0,49	0,73	0,73	0,54	0,53	0,52	0,64	0,45	0,60	0,62	0,49
1000	0,69	0,78	0,83	0,73	0,68	0,63	0,74	0,55	0,65	0,73	0,58
1250	0,62	0,75	0,69	0,73	0,74	0,72	0,69	0,58	0,65	0,68	0,57
1600	0,68	0,72	0,72	0,65	0,65	0,68	0,75	0,66	0,64	0,69	0,61
2000	0,62	0,64	0,64	0,63	0,62	0,63	0,57	0,60	0,61	0,61	0,55
2500	0,68	0,54	0,47	0,53	0,52	0,58	0,54	0,52	0,54	0,61	0,47
3150	0,50	0,31	0,29	0,36	0,40	0,36	0,31	0,42	0,40	0,46	0,31
4000	0,24	0,12	-0,02	0,04	0,11	0,11	0,09	0,27	0,24	0,38	0,06
5000	0,21	-0,22	-0,26	-0,22	0,02	-0,05	-0,16	0,17	0,18	0,27	-0,01
Gesamtsumme	8,81	10,45	11,51	8,87	9,06	8,66	11,44	7,28	10,63	10,83	7,25
Summe < 400 Hz	3,04	4,47	5,90	3,40	3,73	3,36	5,72	2,09	4,71	4,31	2,64
Summe (500...2000) Hz	4,14	5,22	5,13	4,75	4,27	4,30	4,93	3,81	4,56	4,79	3,78
Summe > 2000 Hz	1,63	0,75	0,48	0,71	1,06	1,00	0,79	1,38	1,36	1,72	0,84
Summe > 500 Hz	5,77	5,97	5,61	5,46	5,33	5,30	5,72	5,18	5,92	6,51	4,62
αw	0,5	0,25	0,2	0,25	0,35	0,3	0,25	0,45	0,45	0,5	0,3

beste Werte im Tiefenbereich

Hallraum 18.1.2021

Sabine'scher Schallabsorptionsgrad αs									f in Hz
D147-1080_Mitte_oB	*D147-1080_Ecke_oB*	D328-1909_Mitte_oB	*D328-1909_Ecke_oB*	D147-1080_Prisma_Mitte	*D147-1080_Prisma_Ecke*	D328-1909_Prisma_Mitte	*D328-1909_Prisma_Ecke*	D147-1080_Mitte_mB	D328-1909_Mitte_mB	
0,17	*0,24*	0,05	*0,04*	0,05	*0,14*	0,29	*0,15*	0,21	0,08	100
0,38	*0,04*	0,35	*0,21*	0,22	*0,16*	0,26	*0,34*	0,22	0,30	125
0,41	*0,89*	0,21	*0,99*	0,36	*0,81*	0,77	*0,58*	0,80	0,66	160
0,73	*0,31*	0,47	*0,55*	0,44	*0,73*	0,69	*0,51*	0,53	0,49	200
0,62	*0,38*	0,10	*0,29*	0,28	*0,33*	0,35	*0,26*	0,43	0,40	250
0,68	*0,56*	0,53	*0,44*	0,35	*0,43*	0,44	*0,42*	0,59	0,68	315
0,66	*0,57*	0,53	*0,54*	0,34	*0,45*	0,36	*0,28*	0,59	0,62	400
0,85	*0,60*	0,61	*0,68*	0,48	*0,44*	0,43	*0,45*	0,56	0,64	500
0,75	*0,75*	0,68	*0,82*	0,49	*0,52*	0,52	*0,51*	0,58	0,76	630
0,89	*0,82*	0,81	*0,92*	0,53	*0,49*	0,56	*0,60*	0,63	0,82	800
1,04	*0,83*	1,02	*0,89*	0,58	*0,52*	0,54	*0,61*	0,70	0,81	1000
1,03	*0,83*	1,04	*0,93*	0,63	*0,46*	0,49	*0,63*	0,70	0,83	1250
1,06	*0,85*	1,12	*0,99*	0,63	*0,47*	0,51	*0,64*	0,70	0,89	1600
1,06	*0,89*	1,13	*0,98*	0,63	*0,46*	0,48	*0,62*	0,68	0,81	2000
1,03	*0,89*	1,03	*0,99*	0,53	*0,43*	0,44	*0,59*	0,61	0,75	2500
1,08	*0,88*	1,09	*0,97*	0,53	*0,41*	0,44	*0,57*	0,59	0,71	3150
1,05	*0,90*	1,04	*0,96*	0,51	*0,36*	0,37	*0,54*	0,56	0,64	4000
1,04	*0,86*	1,02	*0,92*	0,45	*0,35*	0,39	*0,48*	0,49	0,56	5000
14,53	*12,06*	12,83	*13,12*	8,00	*7,95*	8,33	*8,78*	10,17	11,44	**Gesamtsumme**
3,64	*2,97*	2,24	*3,05*	2,03	*3,04*	3,17	*2,53*	3,37	3,22	Summe < 400 Hz
6,69	*5,56*	6,41	*6,23*	3,96	*3,35*	3,53	*4,06*	4,54	5,56	Summe (500...2000) Hz
4,21	*3,53*	4,18	*3,84*	2,01	*1,56*	1,63	*2,19*	2,26	2,67	Summe > 2000 Hz
10,89	*9,09*	10,59	*10,06*	5,97	*4,91*	5,16	*6,25*	6,79	8,22	Summe > 500 Hz
0,85	0,65	0,6	0,7	0,55	0,5	0,5	0,5	0,65	0,7	**αw**

1. 2. *kursiv* Werte nicht verlässlich, da in Schallschatten und zu nah an Außenwand

Hallraum 9.2.2021

f in Hz	praktischer Schallabsorptionsgrad αpi										
	D155_einzeln_ mBezug_Mitte	D155_einzeln_ mBezug_Ecke	D155_einzeln_ oBezug_Ecke	D155_einzeln_ oBezug_Mitte	D155_einzeln_ Pappenkern_Mitte	D155_ohne Kern_Mitte	D155_ohne Kern_Ecke	D328_einzeln_ mVerkl_Mitte	D328_einzeln_ mVerkl_Ecke	D328_einzeln_ Ecke	2_Prismen_einzeln_ohne Deckel_Mitte
125	0,44	0,61	0,90	0,40	0,68	0,59	0,96	0,29	0,71	0,63	0,41
250	0,36	0,60	0,70	0,58	0,41	0,36	0,64	0,25	0,57	0,54	0,30
500	0,56	0,82	0,88	0,65	0,50	0,54	0,82	0,48	0,77	0,76	0,49
1000	0,60	0,75	0,75	0,67	0,65	0,62	0,69	0,53	0,63	0,68	0,55
2000	0,66	0,64	0,61	0,60	0,60	0,63	0,62	0,59	0,60	0,64	0,54
4000	0,32	0,07	0,00	0,06	0,18	0,14	0,08	0,29	0,27	0,37	0,12
αw	0,5	0,25	0,2	0,25	0,35	0,3	0,25	0,45	0,45	0,5	0,3

Hallraum 18.1.2021

f in Hz	praktischer Schallabsorptionsgrad αpi									
	D147-1080_Mitte_oB	*D147-1080_Ecke_oB*	D328-1909_Mitte_oB	*D328-1909_Ecke_oB*	D147-1080_Prisma_Mitte	*D147-1080_Prisma_Ecke*	D328-1909_Prisma_Mitte	*D328-1909_Prisma_Ecke*	D147-1080_Mitte_mB	D328-1909_Mitte_mB
125	0,32	*0,39*	0,21	*0,41*	0,21	*0,37*	0,44	*0,35*	0,41	0,34
250	0,68	*0,42*	0,37	*0,43*	0,35	*0,49*	0,49	*0,40*	0,52	0,52
500	0,76	*0,64*	0,61	*0,68*	0,44	*0,47*	0,44	*0,41*	0,58	0,67
1000	0,99	*0,82*	0,96	*0,92*	0,58	*0,49*	0,53	*0,61*	0,67	0,82
2000	1,05	*0,88*	1,09	*0,99*	0,60	*0,45*	0,48	*0,62*	0,66	0,82
4000	1,06	*0,88*	1,05	*0,95*	0,49	*0,38*	0,40	*0,53*	0,55	0,64
αw	0,85	0,65	0,6	0,7	0,55	0,5	0,5	0,5	0,65	0,7

kursiv Werte nicht verlässlich, da in Schallschatten und zu nah an Außenwand

Anlage 6

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D147-1080_Mitte_oB
5 Rollen D147-1080, 2 Säulen, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 2,07 m²

Hallraum:
Volumen V: 61,9 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

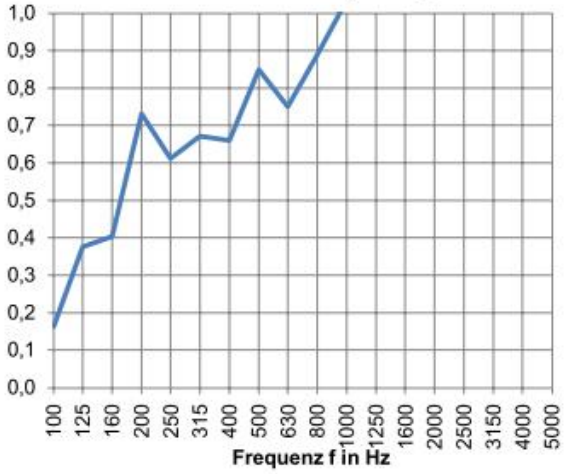
Prüfung:
Datum: 18.01.2021
Temperatur t_1: 13,9 °C
Temperatur t_2: 14,3 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 46 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 46 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,85 Absorber: **Klasse B**

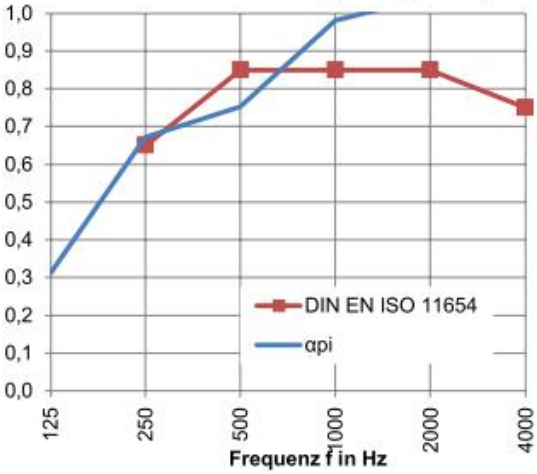
Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 10,5 dB Gruppe: **A3** hoch absorbierend

	Messergebnisse				
f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_S	α_{pi}	α_w
100	2,56	2,36	0,16		
125	1,90	1,66	0,38	0,31	
160	2,52	2,08	0,40		
200	2,65	1,90	0,73		
250	2,24	1,75	0,61	0,67	
315	2,27	1,73	0,67		
400	2,21	1,70	0,66		
500	2,53	1,76	0,85	0,75	**0,85**
630	2,59	1,85	0,75		
800	2,60	1,76	0,89		
1000	2,70	1,71	1,03	0,98	
1250	2,79	1,76	1,02		
1600	2,62	1,67	1,05		
2000	2,39	1,57	1,06	1,04	
2500	2,17	1,49	1,02		
3150	1,97	1,37	1,08		
4000	1,67	1,23	1,05	1,05	
5000	1,36	1,05	1,04		

SABINEscher Absorptionsgrad αS



Praktischer Absorptionsgrad αpi



Technische Universität Chemnitz, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung - Reichenhainer Str. 31-33, 09126 Chemnitz - www.strukturleichtbau.net

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D147-1080_Ecke_oB
5 Rollen D147-1080, 2 Säulen, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raumecke
Oberfläche Prüfobjekt: 2,07 m²

Hallraum:
Volumen V: 61,9 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

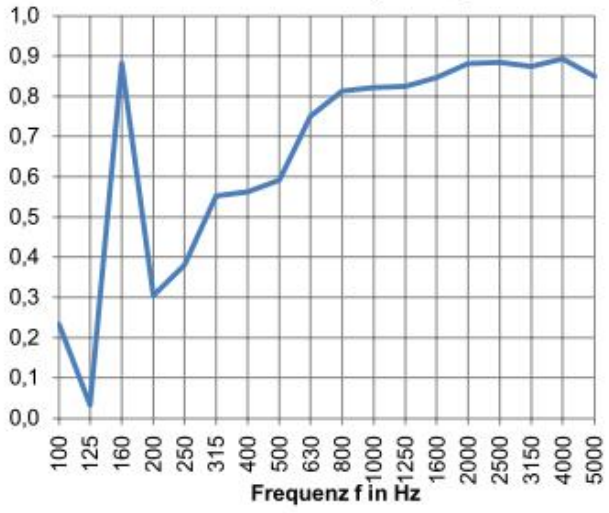
Prüfung:
Datum: 18.01.2021
Temperatur t_1: 13,9 °C
Temperatur t_2: 14,5 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 46 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 46 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,65 Absorber: **Klasse C**

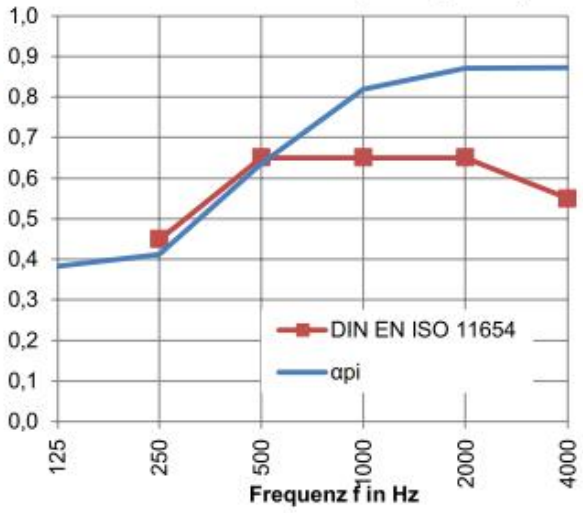
Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 6,1 dB Gruppe: **A2** absorbierend

Messergebnisse					
f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_S	α_{pi}	α_w
100	2,56	2,28	0,23		
125	1,90	1,88	0,03	0,38	
160	2,52	1,73	0,88		
200	2,65	2,27	0,31		
250	2,24	1,91	0,38	0,41	
315	2,27	1,80	0,55		
400	2,21	1,76	0,56		
500	2,53	1,94	0,59	0,63	**0,65**
630	2,59	1,85	0,75		
800	2,60	1,81	0,81		
1000	2,70	1,85	0,82	0,82	
1250	2,79	1,89	0,82		
1600	2,62	1,80	0,85		
2000	2,39	1,67	0,88	0,87	
2500	2,17	1,56	0,88		
3150	1,97	1,45	0,87		
4000	1,67	1,28	0,89	0,87	
5000	1,36	1,10	0,85		

SABINEscher Absorptionsgrad αS



Praktischer Absorptionsgrad αpi



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D328-1909_Mitte_oB
4 Rollen D328-1909, 1 Säule, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 1,7153 m²

Hallraum:
Volumen V: 61,9 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
Datum: 18.01.2021
Temperatur t_1: 13,9 °C
Temperatur t_2: 14,7 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 46 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 46 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

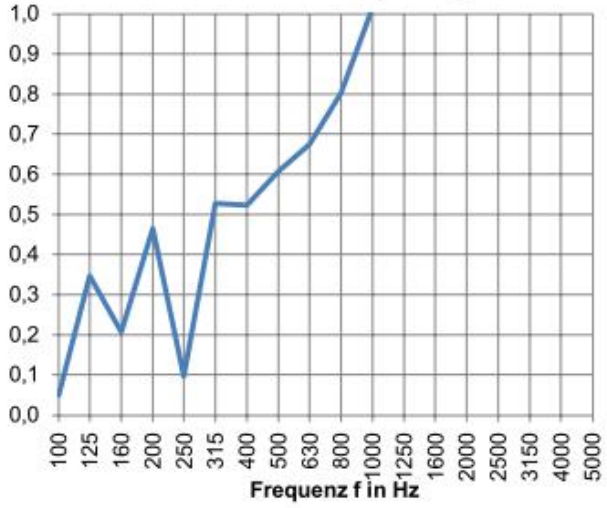
Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,60 Absorber: **Klasse C**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 8,2 dB Gruppe: **A3** hoch absorbierend

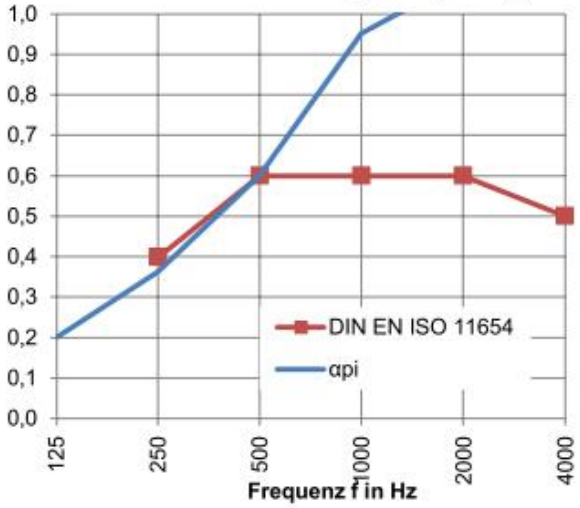
Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,56	2,50	0,05		
125	1,90	1,71	0,35	0,20	
160	2,52	2,31	0,21		
200	2,65	2,19	0,46		
250	2,24	2,16	0,10	0,36	
315	2,27	1,88	0,53		
400	2,21	1,84	0,52		
500	2,53	2,01	0,61	0,60	**0,60**
630	2,59	2,00	0,67		
800	2,60	1,92	0,80		
1000	2,70	1,84	1,02	0,95	
1250	2,79	1,87	1,04		
1600	2,62	1,75	1,12		
2000	2,39	1,64	1,12	1,09	
2500	2,17	1,58	1,02		
3150	1,97	1,44	1,08		
4000	1,67	1,29	1,03	1,04	
5000	1,36	1,10	1,01		

SABINEscher Absorptionsgrad αS



Praktischer Absorptionsgrad αpi



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D328-1909_Ecke_oB
4 Rollen D328-1909, 1 Säule, keine Verkleidung, keine Deckel; in Raumecke
Oberfläche Prüfobjekt: 1,7153 m²

Hallraum:
Volumen V: 61,9 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
Datum: 18.01.2021
Temperatur t_1: 13,9 °C
Temperatur t_2: 14,9 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 46 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 46 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

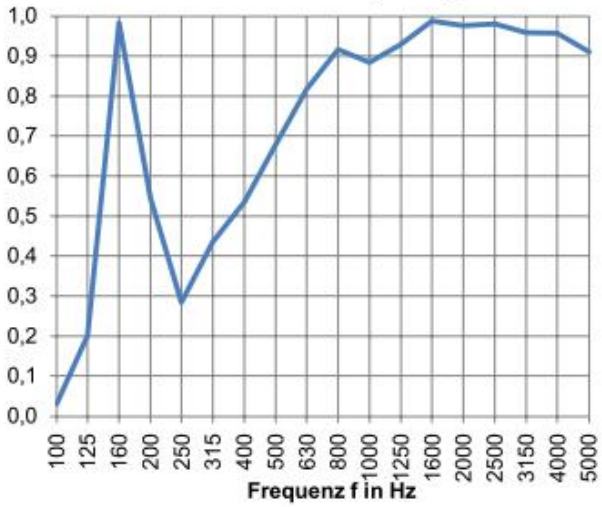
Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,65 Absorber: **Klasse C**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 7,6 dB Gruppe: **A2** absorbierend

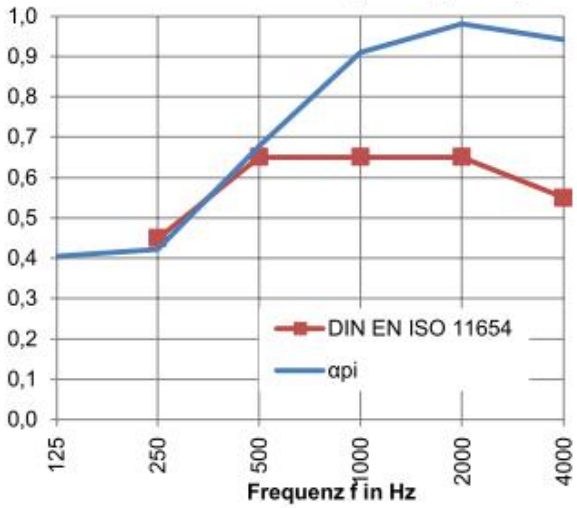
Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,56	2,52	0,03		
125	1,90	1,78	0,20	0,41	
160	2,52	1,77	0,98		
200	2,65	2,13	0,55		
250	2,24	2,02	0,28	0,42	
315	2,27	1,94	0,44		
400	2,21	1,83	0,53		
500	2,53	1,96	0,68	0,68	**0,65**
630	2,59	1,90	0,82		
800	2,60	1,85	0,92		
1000	2,70	1,91	0,88	0,91	
1250	2,79	1,93	0,93		
1600	2,62	1,82	0,99		
2000	2,39	1,71	0,98	0,98	
2500	2,17	1,59	0,98		
3150	1,97	1,49	0,96		
4000	1,67	1,31	0,96	0,94	
5000	1,36	1,12	0,91		

SABINEscher Absorptionsgrad αS



Praktischer Absorptionsgrad αpi



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D147-1080_Prisma_Mitte
3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D147-1080 gefüllt, in Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 2,6767 m²

Hallraum:
- Volumen V: 61,9 m³
- Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
- Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
- Datum: 18.01.2021
- Temperatur t_1: 13,9 °C
- Temperatur t_2: 15,2 °C
- Luftfeuchte φ_1 in %: 46 %
- Luftfeuchte φ_2 in %: 46 %
- Lautsprecherpositionen: 2
- Mikrofonpositionen: 6 je LSP
- Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
- Akustisches Signal: weißes Rauschen

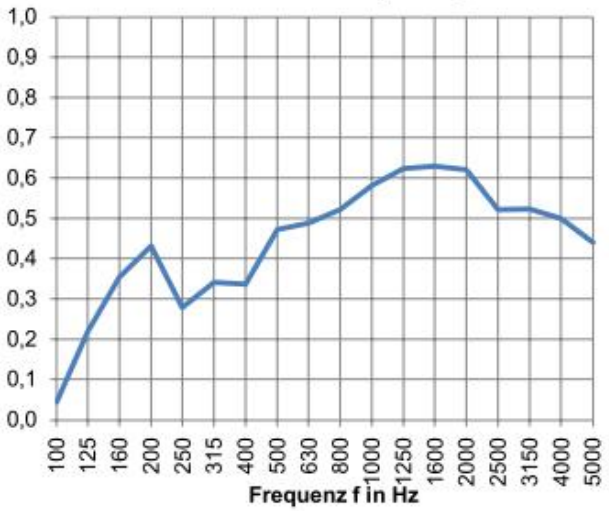
Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,50 Absorber: **Klasse D**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 3,2 dB Gruppe: **A1** nicht absorbierend

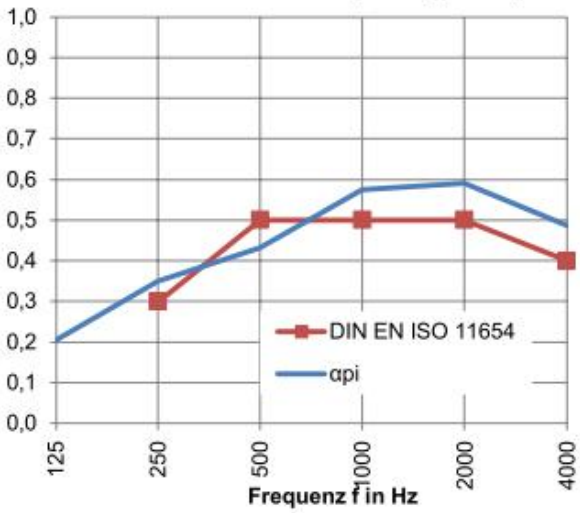
Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,56	2,48	0,04		
125	1,90	1,71	0,22	0,21	
160	2,52	2,03	0,35		
200	2,65	2,03	0,43		
250	2,24	1,92	0,28	0,35	
315	2,27	1,88	0,34		
400	2,21	1,84	0,34		
500	2,53	1,92	0,47	0,43	**0,50**
630	2,59	1,94	0,49		
800	2,60	1,91	0,52		
1000	2,70	1,90	0,58	0,58	
1250	2,79	1,90	0,62		
1600	2,62	1,82	0,63		
2000	2,39	1,71	0,62	0,59	
2500	2,17	1,67	0,52		
3150	1,97	1,54	0,52		
4000	1,67	1,36	0,50	0,49	
5000	1,36	1,17	0,44		

SABINEscher Absorptionsgrad αS



Praktischer Absorptionsgrad αpi



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D147-1080_Prisma_Ecke
3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D147-1080 gefüllt, in Raumecke
Oberfläche Prüfobjekt: 2,6767 m²

Hallraum:
- Volumen V: 61,9 m³
- Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
- Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
- Datum: 18.01.2021
- Temperatur t_1: 13,9 °C
- Temperatur t_2: 15,5 °C
- Luftfeuchte φ_1 in %: 46 %
- Luftfeuchte φ_2 in %: 46 %
- Lautsprecherpositionen: 2
- Mikrofonpositionen: 6 je LSP
- Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
- Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,45 Absorber: **Klasse D**

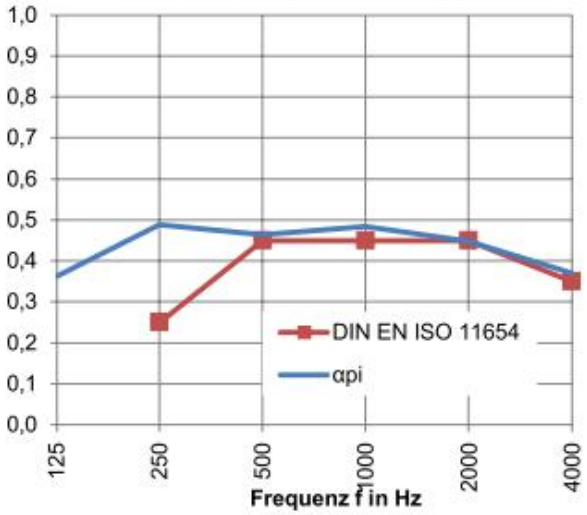
Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 2,7 dB Gruppe: **A1** nicht absorbierend

Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,56	2,34	0,13		
125	1,90	1,76	0,15	0,36	
160	2,52	1,63	0,80		
200	2,65	1,75	0,72		
250	2,24	1,88	0,32	0,49	
315	2,27	1,80	0,42		
400	2,21	1,75	0,44		
500	2,53	1,96	0,43	0,46	**0,45**
630	2,59	1,91	0,51		
800	2,60	1,94	0,49		
1000	2,70	1,97	0,51	0,48	
1250	2,79	2,08	0,45		
1600	2,62	1,97	0,47		
2000	2,39	1,85	0,45	0,45	
2500	2,17	1,74	0,42		
3150	1,97	1,62	0,41		
4000	1,67	1,44	0,36	0,37	
5000	1,36	1,21	0,35		

SABINEscher Absorptionsgrad αS

Praktischer Absorptionsgrad αpi



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D328-1909_Prisma_Mitte
3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D328-1909 gefüllt, in Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 2,6767 m²

Hallraum:
Volumen V: 61,9 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

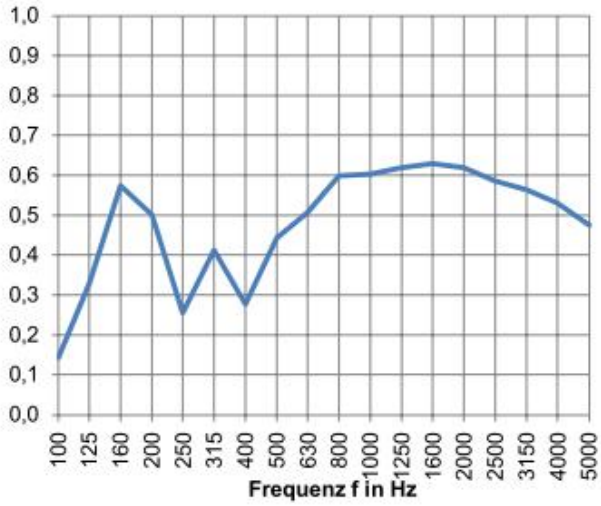
Prüfung:
Datum: 18.01.2021
Temperatur t_1: 13,9 °C
Temperatur t_2: 15,8 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 46 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 46 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,50 Absorber: **Klasse D**

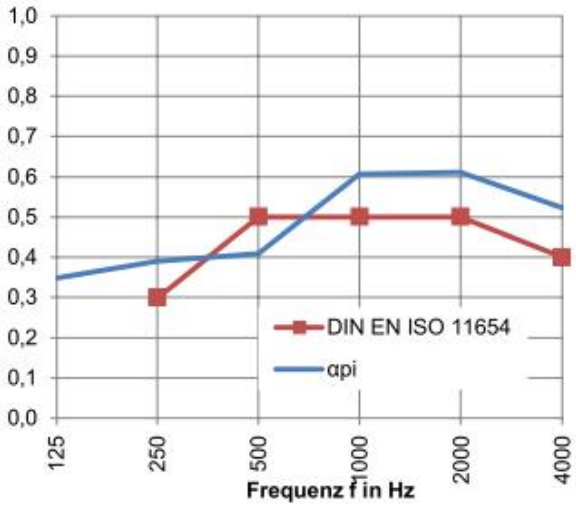
Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 3,4 dB Gruppe: **A1** nicht absorbierend

Messergebnisse					
f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_S	α_{pi}	α_w
100	2,56	2,32	0,14		
125	1,90	1,63	0,33	0,35	
160	2,52	1,82	0,57		
200	2,65	1,95	0,50		
250	2,24	1,94	0,25	0,39	
315	2,27	1,81	0,41		
400	2,21	1,89	0,28		
500	2,53	1,95	0,44	0,41	**0,50**
630	2,59	1,92	0,51		
800	2,60	1,83	0,60		
1000	2,70	1,88	0,60	0,61	
1250	2,79	1,91	0,62		
1600	2,62	1,82	0,63		
2000	2,39	1,71	0,62	0,61	
2500	2,17	1,62	0,59		
3150	1,97	1,52	0,56		
4000	1,67	1,35	0,53	0,52	
5000	1,36	1,16	0,47		

SABINEscher Absorptionsgrad αS



Praktischer Absorptionsgrad αpi



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D328-1909_Prisma_Ecke
3 Pappprismen übereinander, mit je 1 Rolle D328-1909 gefüllt, in Raumecke
Oberfläche Prüfobjekt: 2,6767 m²

Hallraum:
Volumen V: 61,9 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
Datum: 18.01.2021
Temperatur t_1: 13,9 °C
Temperatur t_2: 15,7 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 46 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 46 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

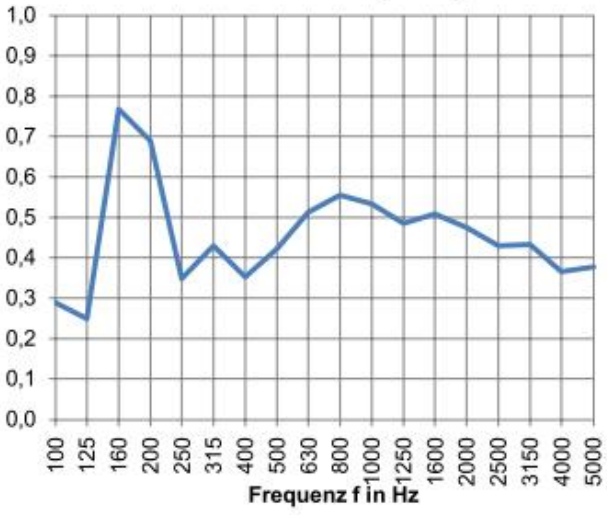
Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,45 Absorber: **Klasse D**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 2,9 dB Gruppe: **A1** nicht absorbierend

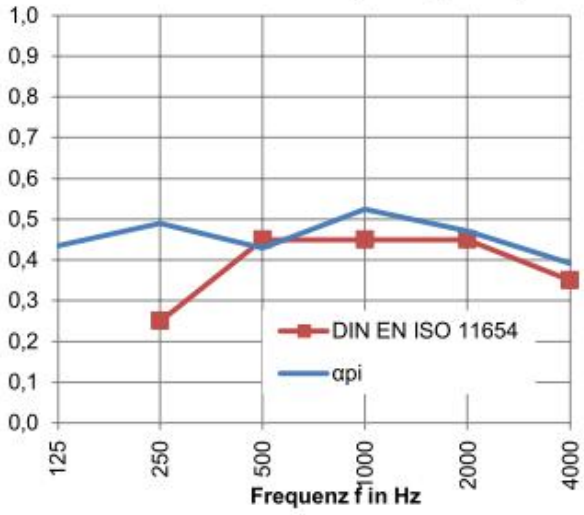
Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,56	2,13	0,29		
125	1,90	1,69	0,25	0,44	
160	2,52	1,66	0,77		
200	2,65	1,78	0,69		
250	2,24	1,85	0,35	0,49	
315	2,27	1,80	0,43		
400	2,21	1,82	0,35		
500	2,53	1,97	0,42	0,43	**0,45**
630	2,59	1,91	0,51		
800	2,60	1,87	0,56		
1000	2,70	1,95	0,53	0,52	
1250	2,79	2,05	0,49		
1600	2,62	1,93	0,51		
2000	2,39	1,83	0,47	0,47	
2500	2,17	1,74	0,43		
3150	1,97	1,60	0,43		
4000	1,67	1,43	0,36	0,39	
5000	1,36	1,19	0,38		

SABINEscher Absorptionsgrad αS



Praktischer Absorptionsgrad αpi



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D147-1080_Mitte_mB
5 Rollen D147-1080, 3 Säulen, mit Verkleidung und Holzdeckel, in Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 2,5981 m²

Hallraum:
Volumen V: 61,9 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
Datum: 18.01.2021
Temperatur t_1: 13,9 °C
Temperatur t_2: 16,1 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 46 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 46 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

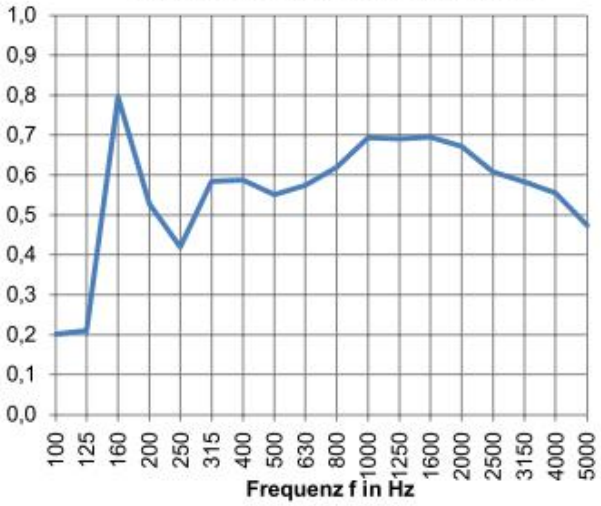
Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,65 Absorber: **Klasse C**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 4,2 dB Gruppe: **A2** absorbierend

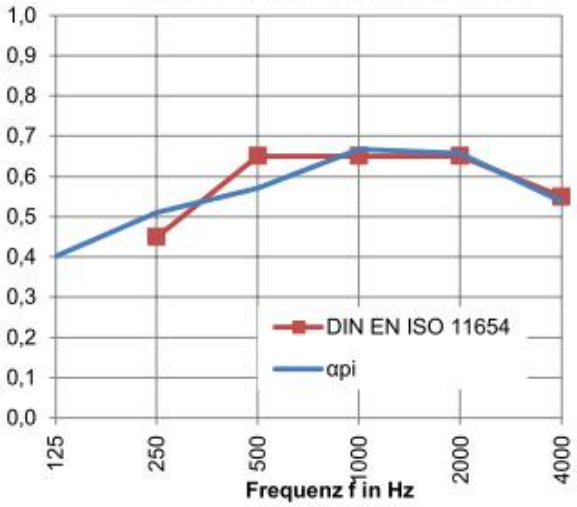
Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,56	2,25	0,20		
125	1,90	1,72	0,21	0,40	
160	2,52	1,66	0,80		
200	2,65	1,94	0,53		
250	2,24	1,80	0,42	0,51	
315	2,27	1,69	0,58		
400	2,21	1,65	0,59		
500	2,53	1,86	0,55	0,57	**0,65**
630	2,59	1,87	0,57		
800	2,60	1,83	0,62		
1000	2,70	1,81	0,69	0,67	
1250	2,79	1,86	0,69		
1600	2,62	1,78	0,69		
2000	2,39	1,68	0,67	0,66	
2500	2,17	1,62	0,61		
3150	1,97	1,51	0,58		
4000	1,67	1,34	0,55	0,54	
5000	1,36	1,16	0,47		

SABINEscher Absorptionsgrad αS



Praktischer Absorptionsgrad αpi



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D328-1909_Mitte_mB
4 Rollen D328-1909, 2 Säulen, mit Verkleidung und Holzdeckel, in Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 2,0069 m²

Hallraum:
Volumen V: 61,9 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
Datum: 18.01.2021
Temperatur t_1: 13,9 °C
Temperatur t_2: 16,4 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 46 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 46 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

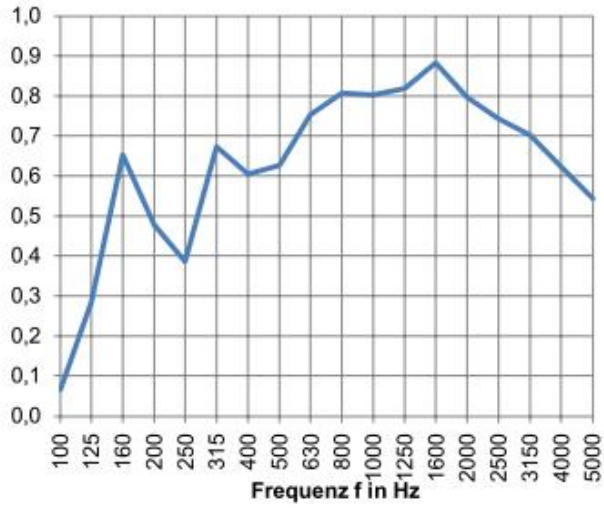
Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,70 Absorber: **Klasse C**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 5,7 dB Gruppe: **A2** absorbierend

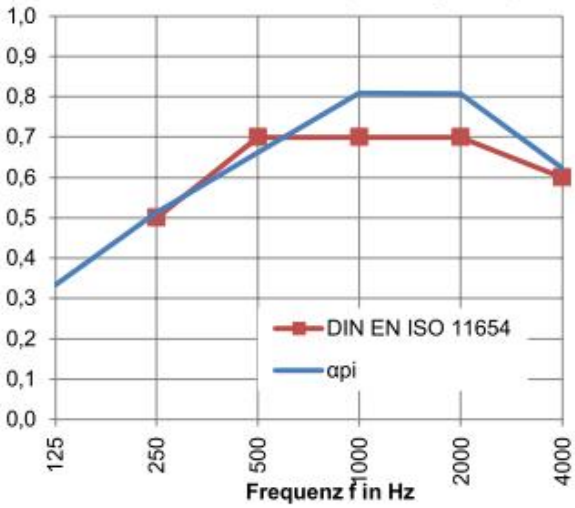
Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,56	2,46	0,07		
125	1,90	1,71	0,28	0,33	
160	2,52	1,89	0,65		
200	2,65	2,11	0,48		
250	2,24	1,90	0,39	0,51	
315	2,27	1,73	0,67		
400	2,21	1,74	0,60		
500	2,53	1,92	0,63	0,66	**0,70**
630	2,59	1,86	0,75		
800	2,60	1,83	0,81		
1000	2,70	1,88	0,80	0,81	
1250	2,79	1,91	0,82		
1600	2,62	1,79	0,88		
2000	2,39	1,73	0,80	0,81	
2500	2,17	1,64	0,74		
3150	1,97	1,54	0,70		
4000	1,67	1,38	0,62	0,62	
5000	1,36	1,18	0,54		

SABINEscher Absorptionsgrad αS



Praktischer Absorptionsgrad αpi



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D155_einzeln_mBezug_Mitte
4 Rollen Faltenstoff, mit Bezug, einzeln erhöht, Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 1,2665 m²

Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

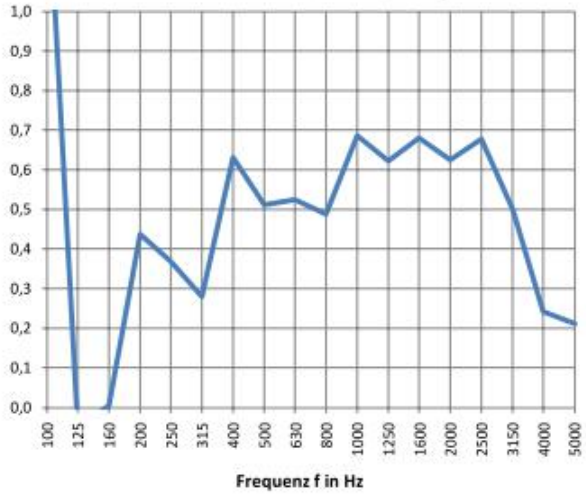
Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 23,7 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 20 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,50 Absorber: **Klasse D**

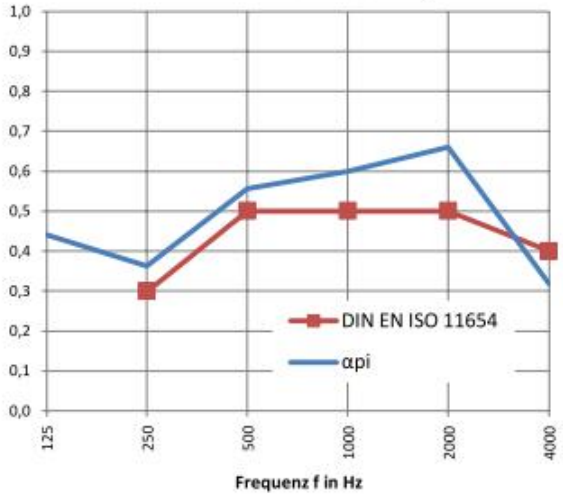
Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 3,5 dB Gruppe: **A1** nicht absorbierend

Messergebnisse					
f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,63	1,80	1,37		
125	2,12	2,14	-0,05	0,44	
160	2,31	2,31	0,00		
200	2,67	2,32	0,44		
250	2,15	1,95	0,37	0,36	
315	2,18	2,02	0,28		
400	2,37	1,99	0,63		
500	2,47	2,12	0,51	0,56	**0,50**
630	2,48	2,13	0,52		
800	2,32	2,02	0,49		
1000	2,42	1,99	0,69	0,60	
1250	2,49	2,07	0,62		
1600	2,27	1,90	0,68		
2000	1,98	1,71	0,62	0,66	
2500	1,75	1,52	0,68		
3150	1,48	1,35	0,50		
4000	1,19	1,15	0,24	0,32	
5000	0,94	0,92	0,21		

SABINEscher Absorptionsgrad α_s



Praktischer Absorptionsgrad α_{pi}



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D155_einzeln_mBezug_Ecke
4 Rollen Faltenstoff, mit Bezug, einzeln erhöht, Raumecke
Oberfläche Prüfobjekt: 1,2665 m²

Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 24 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 20 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

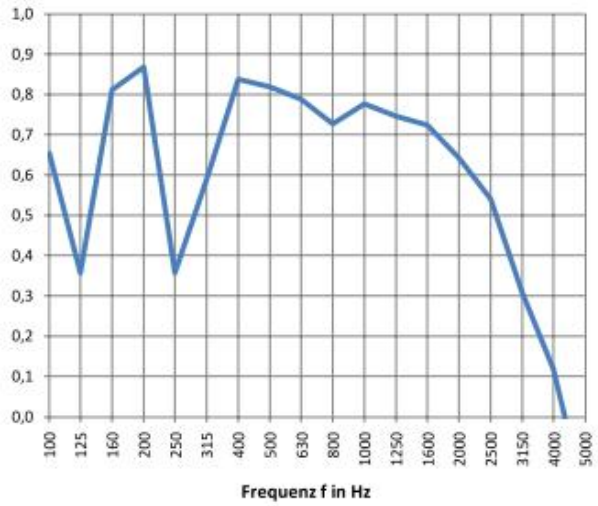
Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,25 Absorber: **Klasse E**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 4,9 dB Gruppe: **A2** absorbierend

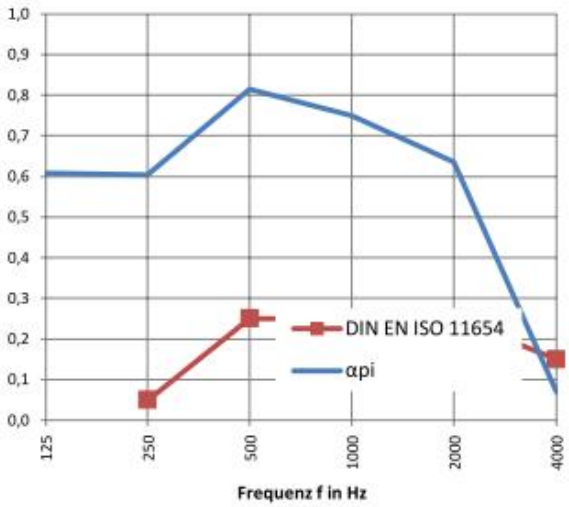
Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,63	2,16	0,65		
125	2,12	1,93	0,36	0,61	
160	2,31	1,87	0,81		
200	2,67	2,06	0,87		
250	2,15	1,96	0,36	0,60	
315	2,18	1,87	0,59		
400	2,37	1,89	0,84		
500	2,47	1,96	0,82	0,82	**0,25**
630	2,48	1,98	0,79		
800	2,32	1,90	0,73		
1000	2,42	1,95	0,78	0,75	
1250	2,49	2,01	0,75		
1600	2,27	1,88	0,72		
2000	1,98	1,70	0,64	0,64	
2500	1,75	1,56	0,54		
3150	1,48	1,40	0,31		
4000	1,19	1,17	0,12	0,07	
5000	0,94	0,97	-0,22		

SABINEscher Absorptionsgrad α_s



Praktischer Absorptionsgrad α_{pi}



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D155_einzeln_oBezug_Ecke
4 Rollen Faltenstoff, ohne Bezug, einzeln erhöht, Raumecke
Oberfläche Prüfobjekt: 1,2462 m²

Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 24,7 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 20 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

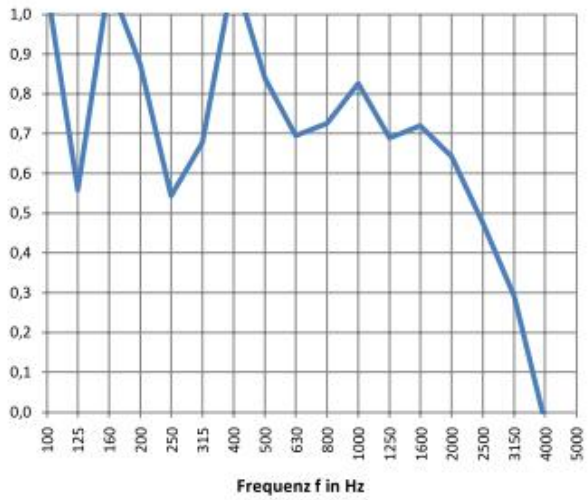
Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,20 Absorber: **Klasse E**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 5,2 dB Gruppe: **A2** absorbierend

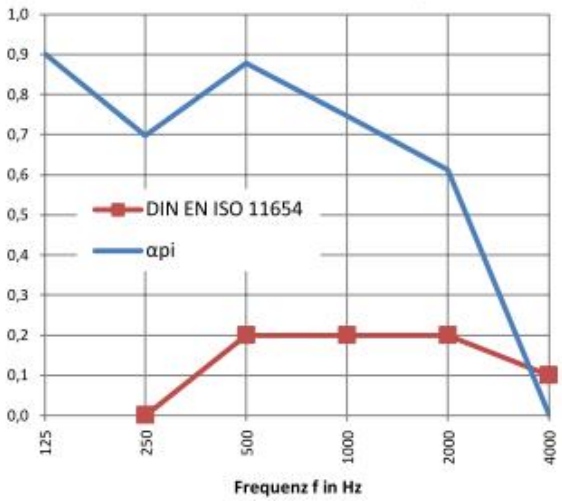
Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,63	1,94	1,07		
125	2,12	1,84	0,56	0,90	
160	2,31	1,76	1,08		
200	2,67	2,06	0,87		
250	2,15	1,87	0,54	0,70	
315	2,18	1,84	0,68		
400	2,37	1,78	1,10		
500	2,47	1,95	0,84	0,88	**0,20**
630	2,48	2,04	0,69		
800	2,32	1,91	0,73		
1000	2,42	1,93	0,83	0,75	
1250	2,49	2,04	0,69		
1600	2,27	1,88	0,72		
2000	1,98	1,70	0,64	0,61	
2500	1,75	1,58	0,47		
3150	1,48	1,40	0,29		
4000	1,19	1,19	-0,02	0,00	
5000	0,94	0,97	-0,26		

SABINEscher Absorptionsgrad α_s



Praktischer Absorptionsgrad α_{pi}



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D155_einzeln_oBezug_Mitte
4 Rollen Faltenstoff, ohne Bezug, einzeln erhöht, Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 1,2462 m²

Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 24,7 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 20 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

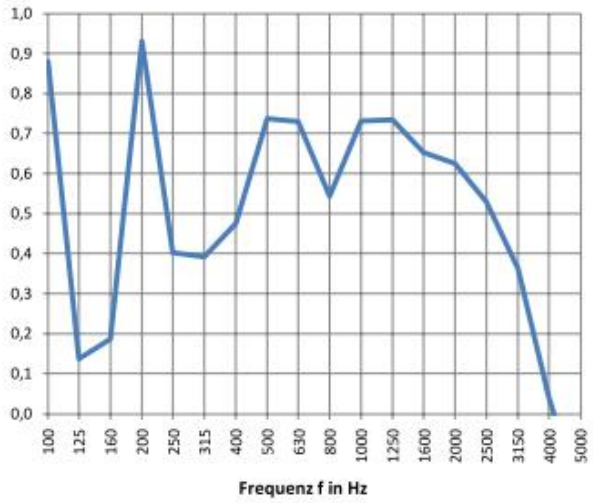
Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,25 Absorber: **Klasse E**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 4,0 dB Gruppe: **A1** nicht absorbierend

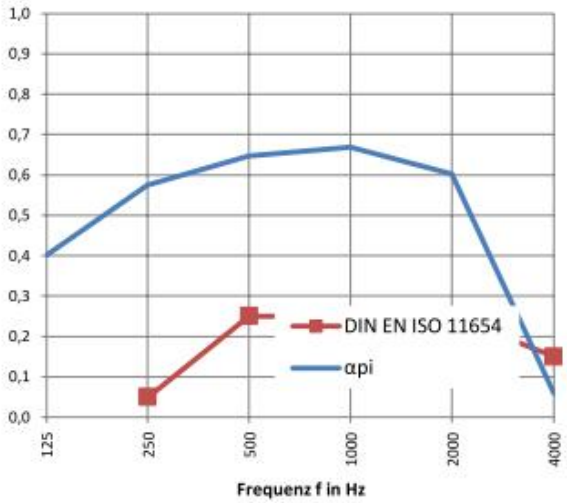
Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,63	2,03	0,88		
125	2,12	2,04	0,14	0,40	
160	2,31	2,19	0,19		
200	2,67	2,03	0,93		
250	2,15	1,94	0,40	0,58	
315	2,18	1,96	0,39		
400	2,37	2,07	0,48		
500	2,47	2,00	0,74	0,65	**0,25**
630	2,48	2,02	0,73		
800	2,32	2,00	0,54		
1000	2,42	1,97	0,73	0,67	
1250	2,49	2,02	0,73		
1600	2,27	1,91	0,65		
2000	1,98	1,71	0,63	0,60	
2500	1,75	1,56	0,53		
3150	1,48	1,38	0,36		
4000	1,19	1,18	0,04	0,06	
5000	0,94	0,97	-0,22		

SABINEscher Absorptionsgrad α_s



Praktischer Absorptionsgrad α_{pi}



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D155_einzeln_Pappenkern_Mitte
4x Faltenstoff auf Rechteckappkern, ohne Bezug, einzeln erhöht Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 1,5344 m²

Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

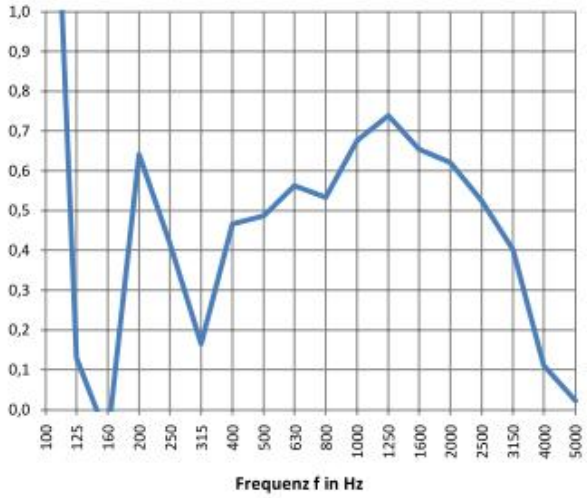
Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 24,8 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 20 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,35 Absorber: **Klasse D**

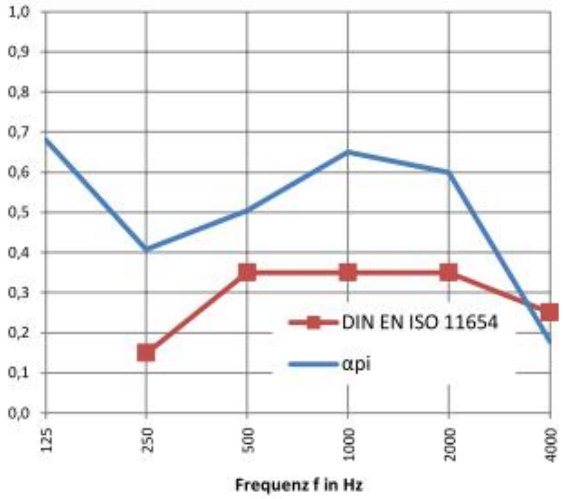
Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 3,5 dB Gruppe: **A1** nicht absorbierend

Messergebnisse					
f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_S	α_{pi}	α_w
100	2,63	1,45	1,99		
125	2,12	2,03	0,13	0,68	
160	2,31	2,37	-0,07		
200	2,67	2,11	0,64		
250	2,15	1,88	0,42	0,41	
315	2,18	2,06	0,16		
400	2,37	2,02	0,47		
500	2,47	2,08	0,49	0,50	**0,35**
630	2,48	2,04	0,56		
800	2,32	1,94	0,53		
1000	2,42	1,92	0,68	0,65	
1250	2,49	1,93	0,74		
1600	2,27	1,84	0,65		
2000	1,98	1,66	0,62	0,60	
2500	1,75	1,53	0,52		
3150	1,48	1,35	0,40		
4000	1,19	1,16	0,11	0,18	
5000	0,94	0,94	0,02		

SABINEscher Absorptionsgrad α_S



Praktischer Absorptionsgrad α_{pi}



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D155_einzeln_ohne Kern_Mitte
4x Faltenstoff ohne Kern, ohne Bezug, Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 1,287 m²

Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 24,9 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 20 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

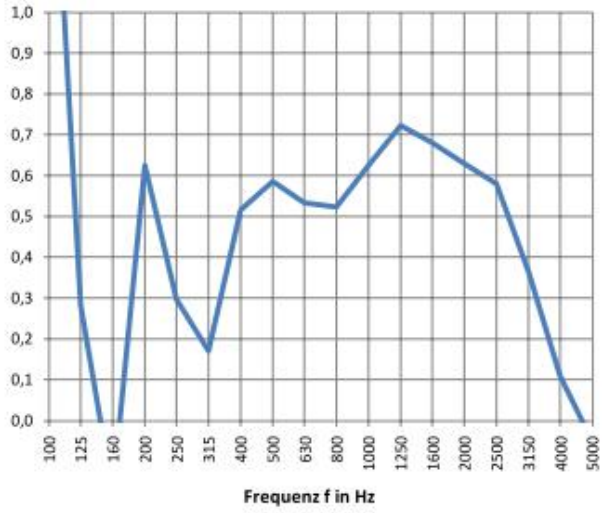
Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,30 Absorber: **Klasse D**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 3,5 dB Gruppe: **A1** nicht absorbierend

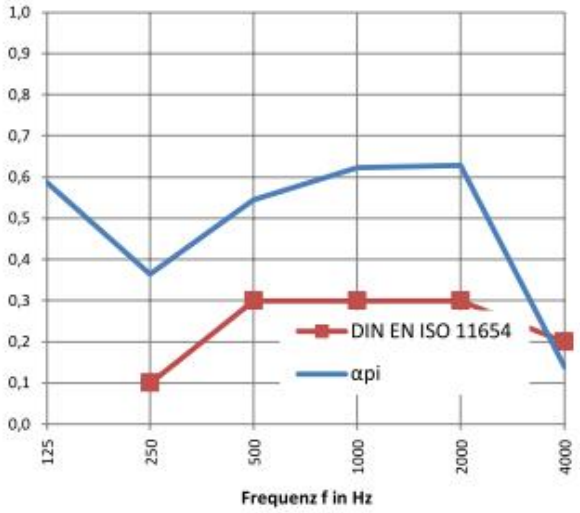
Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,63	1,68	1,65		
125	2,12	1,96	0,28	0,59	
160	2,31	2,44	-0,17		
200	2,67	2,19	0,62		
250	2,15	1,98	0,30	0,36	
315	2,18	2,08	0,17		
400	2,37	2,04	0,51		
500	2,47	2,07	0,59	0,54	**0,30**
630	2,48	2,11	0,53		
800	2,32	2,00	0,52		
1000	2,42	2,02	0,63	0,62	
1250	2,49	2,01	0,72		
1600	2,27	1,89	0,68		
2000	1,98	1,70	0,63	0,63	
2500	1,75	1,54	0,58		
3150	1,48	1,38	0,36		
4000	1,19	1,17	0,11	0,14	
5000	0,94	0,95	-0,05		

SABINEscher Absorptionsgrad α_s



Praktischer Absorptionsgrad α_{pi}



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D155_einzeln_ohne Kern_Ecke
4x Faltenstoff ohne Kern, ohne Bezug, Raumecke
Oberfläche Prüfobjekt: 1,287 m²

Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 25,1 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 20 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,25 Absorber: **Klasse E**

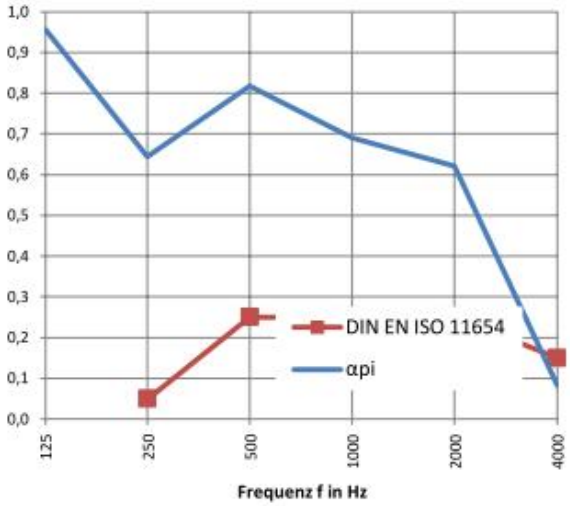
Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 4,8 dB Gruppe: **A2** absorbierend

Messergebnisse

f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,63	1,80	1,34		
125	2,12	1,68	0,93	0,96	
160	2,31	1,95	0,60		
200	2,67	2,13	0,72		
250	2,15	1,81	0,65	0,64	
315	2,18	1,88	0,56		
400	2,37	1,85	0,91		
500	2,47	1,97	0,78	0,82	**0,25**
630	2,48	1,99	0,76		
800	2,32	1,94	0,64		
1000	2,42	1,96	0,74	0,69	
1250	2,49	2,03	0,69		
1600	2,27	1,86	0,75		
2000	1,98	1,72	0,57	0,62	
2500	1,75	1,55	0,54		
3150	1,48	1,39	0,31		
4000	1,19	1,17	0,09	0,08	
5000	0,94	0,96	-0,16		

SABINEscher Absorptionsgrad α_s

Praktischer Absorptionsgrad α_{pi}



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D328_einzeln_mVerkl_Mitte
4 Rollen D328, mit Verkleidung, einzeln erhöht, Raummitte
Oberfläche Prüfobjekt: 2,4875 m²

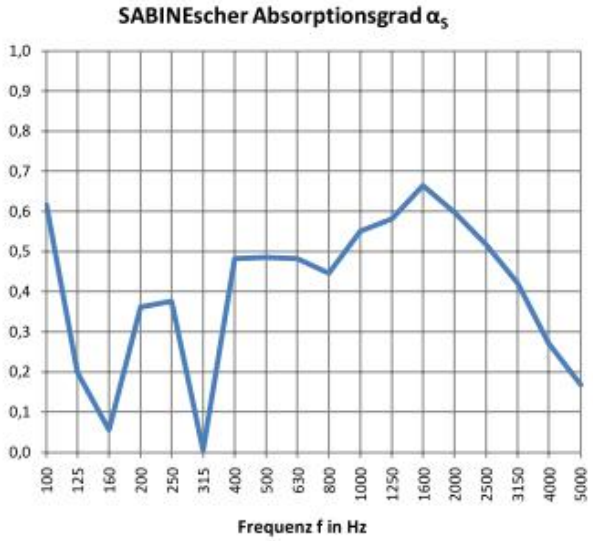
Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

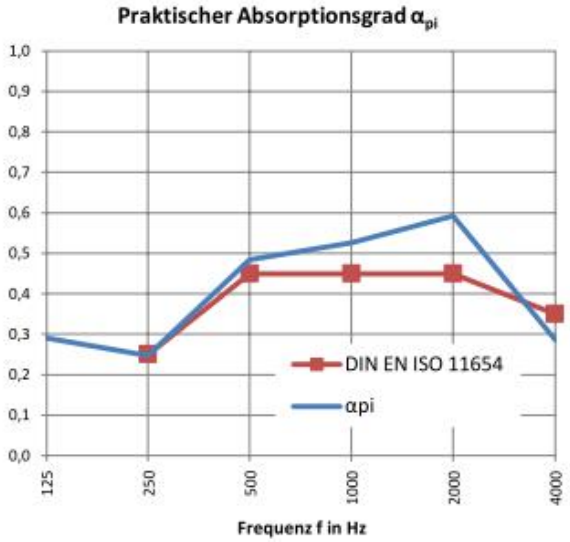
Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 25,2 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 20 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,45 Absorber: **Klasse D**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 2,9 dB Gruppe: **A1** nicht absorbierend

Messergebnisse					
f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,63	1,87	0,62		
125	2,12	1,91	0,20	0,29	
160	2,31	2,24	0,06		
200	2,67	2,14	0,36		
250	2,15	1,78	0,38	0,25	
315	2,18	2,17	0,01		
400	2,37	1,84	0,48		
500	2,47	1,89	0,49	0,48	**0,45**
630	2,48	1,90	0,48		
800	2,32	1,83	0,45		
1000	2,42	1,81	0,55	0,53	
1250	2,49	1,82	0,58		
1600	2,27	1,64	0,66		
2000	1,98	1,52	0,60	0,59	
2500	1,75	1,42	0,52		
3150	1,48	1,28	0,42		
4000	1,19	1,10	0,27	0,29	
5000	0,94	0,91	0,17		





TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D328_einzeln_mVerkl_Ecke
4 Rollen D328, mit Verkleidung, einzeln erhöht, Raumecke
Oberfläche Prüfobjekt: 2,4875 m²

Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

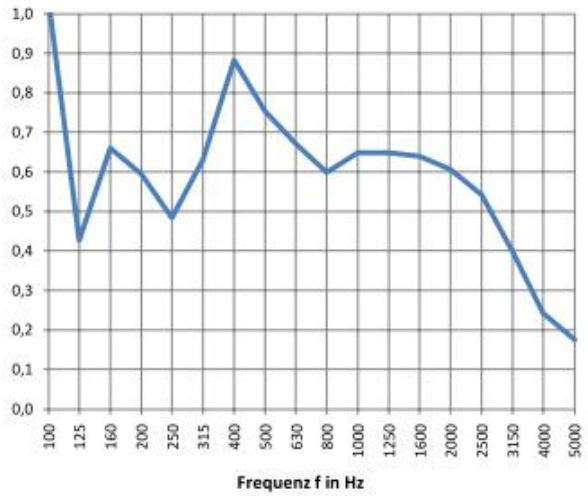
Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 25,2 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 20 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,45 Absorber: **Klasse D**

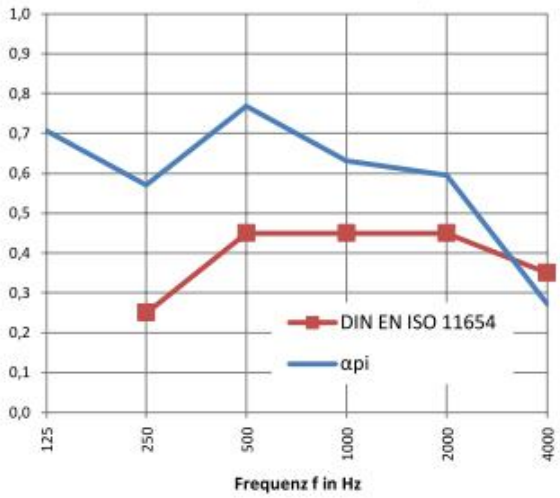
Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 4,2 dB Gruppe: **A2** absorbierend

Messergebnisse					
f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_S	α_{pi}	α_w
100	2,63	1,56	1,03		
125	2,12	1,72	0,43	0,71	
160	2,31	1,67	0,66		
200	2,67	1,90	0,59		
250	2,15	1,70	0,48	0,57	
315	2,18	1,62	0,63		
400	2,37	1,55	0,88		
500	2,47	1,68	0,75	0,77	**0,45**
630	2,48	1,75	0,67		
800	2,32	1,71	0,60		
1000	2,42	1,73	0,65	0,63	
1250	2,49	1,76	0,65		
1600	2,27	1,66	0,64		
2000	1,98	1,52	0,61	0,60	
2500	1,75	1,41	0,54		
3150	1,48	1,29	0,40		
4000	1,19	1,11	0,24	0,27	
5000	0,94	0,90	0,18		

SABINEscher Absorptionsgrad α_s



Praktischer Absorptionsgrad α_{pi}



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D328_einzeln_Ecke
4 Rollen D328, ohne Verkleidung, einzeln erhöht, Raumecke
Oberfläche Prüfobjekt: 2,2698 m²

Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

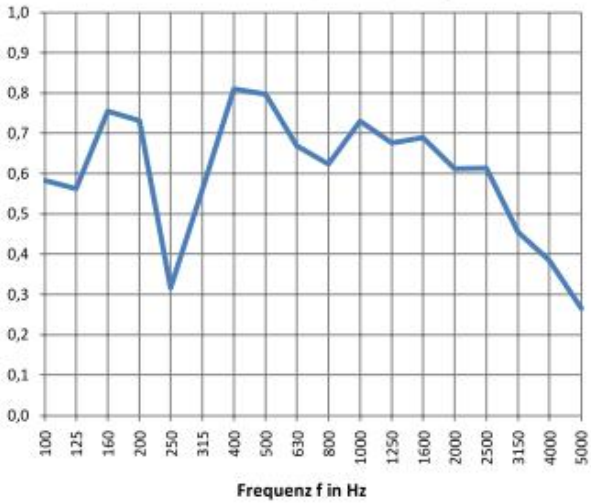
Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 19 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 44 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,50 Absorber: **Klasse D**

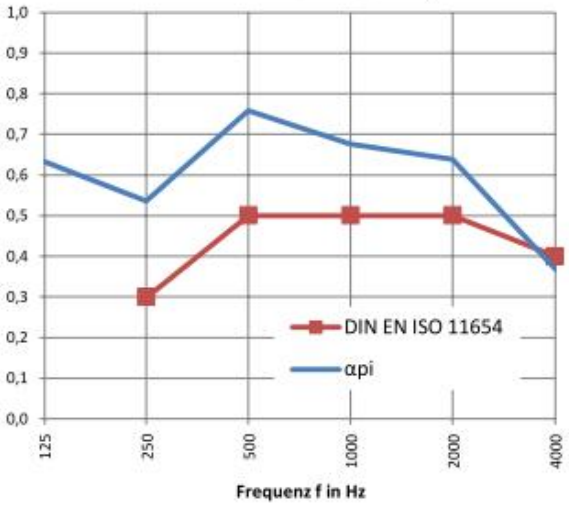
Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 4,6 dB Gruppe: **A2** absorbierend

Messergebnisse					
f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,63	1,96	0,58		
125	2,12	1,68	0,56	0,63	
160	2,31	1,67	0,75		
200	2,67	1,86	0,73		
250	2,15	1,88	0,32	0,54	
315	2,18	1,72	0,56		
400	2,37	1,66	0,81		
500	2,47	1,71	0,80	0,76	**0,50**
630	2,48	1,81	0,67		
800	2,32	1,75	0,62		
1000	2,42	1,74	0,73	0,68	
1250	2,49	1,81	0,68		
1600	2,27	1,69	0,69		
2000	1,98	1,56	0,61	0,64	
2500	1,75	1,41	0,61		
3150	1,48	1,29	0,46		
4000	1,19	1,09	0,38	0,37	
5000	0,94	0,90	0,27		

SABINEscher Absorptionsgrad α_s



Praktischer Absorptionsgrad α_{pi}



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ
Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung

Messung der Schallabsorption im Hallraum nach DIN EN ISO 354:2003

Auftraggeber: Dorothee Hofmann
WHZ

Prüfobjekt: D328_2 Prismen_einzeln_Mitte
2 Dreiecksprismen mit D328 groß + 2x D155 Falten ohne Hülse gefüllt, ohne Deckel, einzeln, Ra
Oberfläche Prüfobjekt: 1,9335 m²

Hallraum:
Volumen V: 62,4 m³
Grundfläche S_{GF}: 22,5 m²
Gesamtoberfläche S_{OF}: 100,4 m²

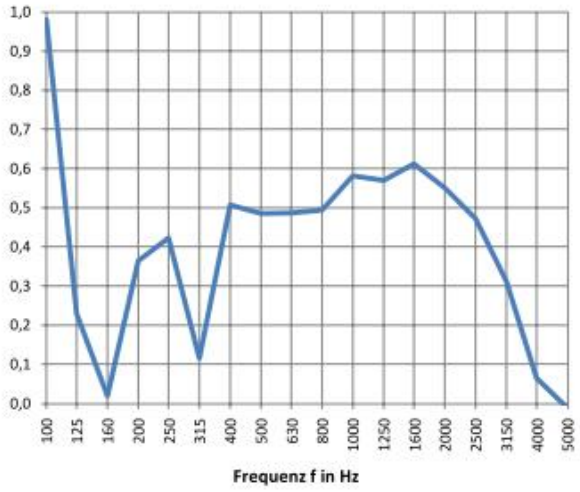
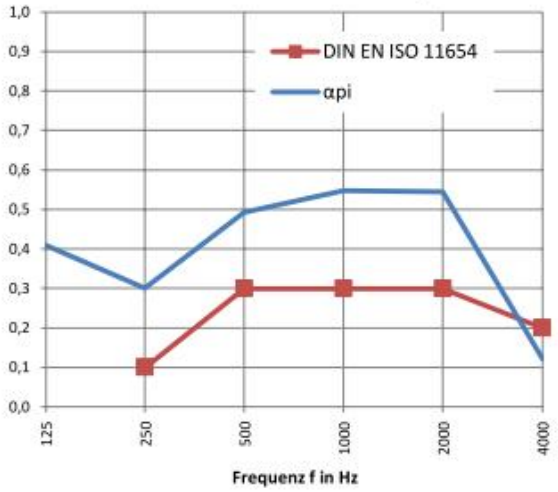
Prüfung:
Datum: 01.01.2222
Temperatur t_1: 23,5 °C
Temperatur t_2: 25,4 °C
Luftfeuchte φ_1 in %: 20 %
Luftfeuchte φ_2 in %: 20 %
Lautsprecherpositionen: 2
Mikrofonpositionen: 6 je LSP
Anzahl der Mittelungen: 3 je MP
Akustisches Signal: weißes Rauschen

Bewertung nach DIN EN ISO 11654:
α_w: 0,30 Absorber: **Klasse D**

Bewertung nach DIN EN 1793-1/-3:
DL_a: 2,9 dB Gruppe: **A1** nicht absorbierend

Messergebnisse					
f in Hz	T_1 in s	T_2 in s	α_s	α_{pi}	α_w
100	2,63	1,75	0,98		
125	2,12	1,93	0,23	0,41	
160	2,31	2,29	0,02		
200	2,67	2,24	0,36		
250	2,15	1,82	0,42	0,30	
315	2,18	2,07	0,11		
400	2,37	1,92	0,51		
500	2,47	1,99	0,49	0,49	**0,30**
630	2,48	2,00	0,49		
800	2,32	1,89	0,49		
1000	2,42	1,89	0,58	0,55	
1250	2,49	1,94	0,57		
1600	2,27	1,78	0,61		
2000	1,98	1,63	0,55	0,54	
2500	1,75	1,50	0,47		
3150	1,48	1,35	0,31		
4000	1,19	1,17	0,06	0,12	
5000	0,94	0,94	-0,01		

SABINEscher Absorptionsgrad α_s



Praktischer Absorptionsgrad α_{pi}