

Horst Drotleff, Roman Wack

Marktgerechte Akustikputzsysteme mit hoher thermischer Effizienz

F 2878

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9143-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Marktgerechte Akustikputzsysteme mit hoher thermischer Effizienz

Abschlussbericht

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert.
(Aktenzeichen: SF - 10.08.18.7-11.15 /

II 3-F20-10-1-007)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor.

Der Bericht umfasst

41 Seiten Text

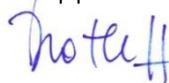
6 Tabellen

61 Abbildungen

Roman Wack

Stuttgart, 23. Juli 2013

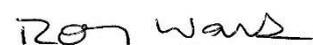
Gruppenleiter



Dipl.-Ing (FH) M.Sc.

H. Drotleff

Bearbeiter



Dipl.-Ing (FH)

R. Wack

Inhalt

1	AP 1: Definition des Lastenhefts	4
1.1	Akustische Anforderungen	4
1.2	Wärmetechnische Anforderungen	6
2	AP 2: Theoretische Modellierung der Schallabsorption und –transmission	7
2.1	Modellierung von Putzschichten	7
2.2	Beschreibung Gesamtaufbauten	8
3	AP 3: Parametervariation	9
3.1	Systemtyp 1	9
3.2	Systemtyp 2 und 3	12
4	AP 4: Entwicklung von Putzsystemen	15
4.1	Akustische Messungen	15
4.1.1	Messverfahren	16
4.1.2	Trägerplatten	17
4.1.3	Messergebnisse	20
4.2	Messung der Eingangsparameter	23
4.2.1	Gleichströmungswiderstand	23
4.2.2	Offene Volumenporosität	24
4.3	Rechnerische Beschreibung	24
5	AP 5: Experimentelle Bestimmung der Mikrogeometrie	26
5.1	Segmentierung	26
5.2	Ermittlung von Korngrößen	30
5.3	Synthese der Porenmorphologie	33
5.4	Berechnung akustischer Eingangsdaten	34
6	AP 6: Iterative akustische und thermische Untersuchungen an Funktionsmustern im Labor	36
6.1	Akustische Untersuchungen	36
6.1.1	Systemtyp 1	36
6.1.2	Typ 2 und 3	38
6.2	Thermische Untersuchungen	39
6.2.1	Vergleich mit Anforderungen	39
6.2.2	Einfluss der Schichtdicke	43
6.2.3	Einfluss der Wärmeleitfähigkeit	45

7	Empfehlung zur Wahl des Putzsystems	46
8	Zusammenfassung	49
9	Literatur	50
10	Anhang	52

Der Bericht gliedert sich in die Arbeitspakete des Zuwendungsantrags [1]. Abschließend werden Empfehlungen zur Wahl bzw. zum Aufbau von Putzsystemen für die jeweiligen Deckenkonstruktionen angegeben.

1 AP 1: Definition des Lastenhefts

Im Folgenden sind für die drei Systemtypen Anforderungen angegeben, mit denen die akustische und thermische Leistungsfähigkeit sowie die bautechnischen Eigenschaften festgelegt sind. Die bauphysikalischen Anforderungen sind im Hinblick auf die angestrebte Raumnutzungen gestellt:

- Räume in Büro- und Verwaltungsbauten (Einzel- und Mehrpersonenbüros, Besprechungs- und Konferenzräume)
- Schulen und Kindergärten
- Hotels, Tagungszentren und Räume der Gastronomie.

Die angestrebten Nutzungen sind also vielfältig und die Bauweisen und Größen der Räume sehr unterschiedlich. Daher sind die Anforderungen möglichst bauteilbezogen gestellt.

1.1 Akustische Anforderungen

Bei den akustisch anspruchsvollen Räumen können zwei grundsätzliche Nutzungen unterschieden werden: das Mehrpersonenbüro und kommunikationsintensiv genutzte Räume, wie z.B. Schulungs- und Konferenzräume. Raumakustisch müssen sie unterschiedlich behandelt werden.

Kommunikationsintensiv genutzte Räume:

Für diese bestehen nach [2] Anforderungen an die Nachhallzeit. Es werden Sollwerte für die mittlere Nachhallzeit in Abhängigkeit vom Raumvolumen angegeben. Zusätzlich ist ein Toleranzbereich über der Frequenz festgelegt, der zwischen 100 Hz und 5 kHz als Anforderung zu verstehen ist (Bild 1). Demnach ist eine sehr gleichmäßige Raumbedämpfung in diesem Frequenzbereich erforderlich.

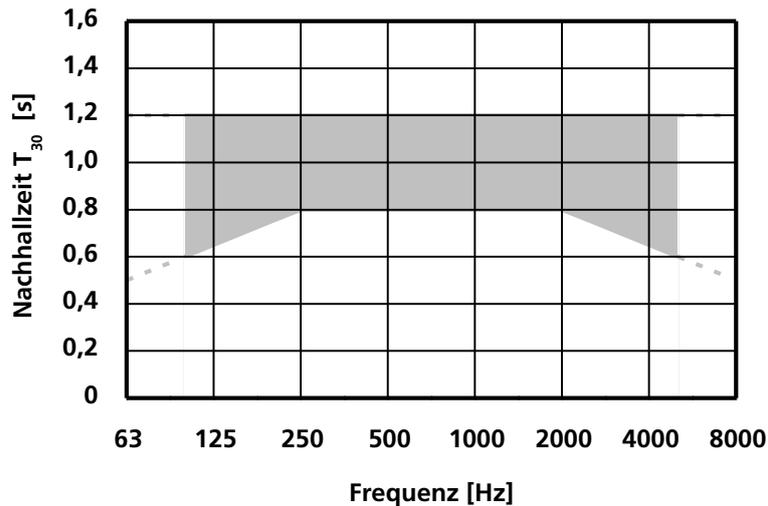


Bild 1:
Toleranzbereich der Nachhallzeiten für Räume mit Sprachnutzung nach [2].

Mehrpersonenbüros:

Hierfür gibt [2] Empfehlungen für die einzubringende Menge an Schallabsorbieren. Dabei wird lediglich der bewertete Schallabsorptionsgrad nach [3] betrachtet. In [4] ist ein Verhältnis aus äquivalenter Absorptionsfläche A zu Raumvolumen V von $A/V = 0,3$ bis $0,35 \text{ m}^2/\text{m}^3$ angegeben. Dieses soll im Bereich von 250 Hz bis 2 kHz eingehalten werden.

Anforderungen für Systemtyp 1, Bauteilaktivierte Decke mit Absorberrtreifen

Die Anforderungen sind so gestellt, dass mit der Decke eine Grundbedämpfung sichergestellt ist. Insbesondere bei Mehrpersonenbüros ist es entscheidend, dass die Decke absorbierend gestaltet wird, da nur so eine effiziente Schallschirmung durch Stellwände erreicht werden kann. Diese Grundbedämpfung muss nutzungsabhängig mit weiteren absorbierenden Bauteilen ergänzt werden. Die angestrebten Absorptionsgrade sind in Bild 2 über der Frequenz dargestellt. Diese sollen von den Bauteilen bei Messungen im Hallraum erreicht werden.

Anforderungen für Systemtyp 2 und 3, Unterdecken

Die hier vorgeschlagenen Anforderungen an die Schallabsorptionsgrade sind so gestellt, dass die erforderliche Raumbedämpfung durch die Unterdecken allein erfolgen kann. Sowohl für Mehrpersonenbüros als auch für kommunikationsintensiv genutzte Räume sind keine zusätzlichen Absorber erforderlich. Eine akustische Konditionierung mit einer gleichmäßiger verteilten Absorption ist jedoch vorzuziehen.

Die Mindestwerte des Absorptionsgrades bei einer Hallraum-Messung sind ebenfalls in Bild 2 gezeigt. Die Anforderungen gelten für Abhänggehöhen ab

200 mm.

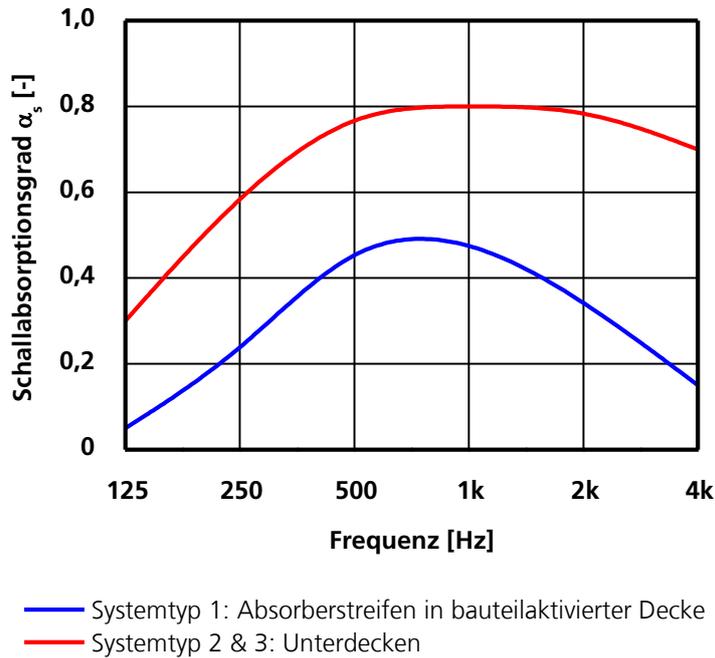


Bild 2:
Angestrebte Schallabsorptionsgrade bei diffusem Schalleinfall für die drei Systemtypen.

1.2 Wärmetechnische Anforderungen

Auch hier erfolgt die Festlegung der Anforderungen bauteilbezogen. Bei periodischen Aufbauten wie Systemtyp 1 ist eine Anforderung an Wärmeleitfähigkeit des Putzes allein nicht ausreichend. Statt dessen wird ein Wirkungsgrad vorgeschlagen. Hierzu wird die Recke rechnerisch mit einer FE-Software modelliert. Für die Randbedingungen Kühlrohr-Temperatur und die Wärmestromdichte der an die Decke angrenzenden Luft werden Tagesgänge vorgegeben. Das Verfahren ist detailliert in Abschnitt 6.2.1 beschrieben.

Aus solchen Berechnungen lässt sich für die zu entwickelnden Putzsysteme ein thermischer Wirkungsgrad definieren, indem die Kühlleistung der verputzten Decke zur unverputzten ins Verhältnis gesetzt wird. Für Systemtyp 1 und 2 wird angestrebt, dass sich die Kühlleistung um maximal 10 Prozent verschlechtert.

2 AP 2: Theoretische Modellierung der Schallabsorption und –transmission

Das Ziel ist, die verlustbehaftete Schallausbreitung in einer Putzschicht zu modellieren. Damit wird der Schallabsorptions- und –transmissionsgrad von verputzten Bauteilen rechnerisch vorhersagbar.

2.1 Modellierung von Putzschichten

Für die Modellierung wurden zwei Absorberprinzipien herangezogen: Mikroperforation und poröse Absorber. Letztlich hat sich die Modellierung über gängige Modelle für poröse Absorber als ausreichend herausgestellt. Im Folgenden sind die beiden Modelle kurz dargestellt:

Die Schallausbreitung in porösen Materialien lässt sich mit einer Ausbreitungskonstanten und einer charakteristischen Impedanz beschreiben. Zur Modellierung wurde einerseits die Theorie des homogenen Mediums [5] herangezogen. Dort ergibt sich die Ausbreitungskonstante Γ_a zu

$$\Gamma_a = jk_0 \sqrt{\chi \left(1 - j \frac{\sigma_V \Xi}{\omega \rho_0 \chi} \right) \left(1 + \frac{\kappa - 1}{1 + j\omega\tau} \right)} \quad (1)$$

und die charakteristische Impedanz Z_a zu

$$Z_a = \frac{Z_0}{\sigma_V} \sqrt{\chi \left(1 - j \frac{\sigma_V \Xi}{\omega \rho_0 \chi} \right) \left(1 + \frac{\kappa - 1}{1 + j\omega\tau} \right)} \quad (2)$$

Darin sind k_0 die Wellenzahl in Luft, ρ_0 die Dichte der Luft, Z_0 die Schallkennimpedanz von Luft, ω die Kreisfrequenz und κ der Adiabatenexponent. Die materialspezifischen Eingangsdaten sind:

- Ξ : längenbezogener Strömungswiderstand
- σ_V : offene Volumenporosität
- χ : Strukturfaktor

τ ist eine Relaxationskonstante, die durchgehend mit $2 \cdot 10^{-4}$ angesetzt ist. Die Massehemmung durch das Absorberskelett wird gemäß [5] berücksichtigt, indem der Strömungswiderstand durch einen effektiven Strömungswiderstand Ξ_{eff} ersetzt wird, in den das Raumgewicht ρ_A des Absorbers eingeht:

$$\Xi_{eff} = \frac{j\omega\rho_A\Xi}{j\omega\rho_A + \Xi} \quad (3)$$

Zahlenwerte für die untersuchten Putze und Vergleiche zwischen Messung und Rechnung sind in Abschnitt 4.2 zu finden.

Darüber hinaus wurde eine Modellierung mit dem Johnson-Allard-Modell angestrebt [6],[7]. Das Modell hat fünf Eingangsparameter, deren messtechnische Bestimmung zum Teil schwieriger ist:

- \mathcal{E} : längenbezogener Strömungswiderstand
- σ_v : offene Volumenporosität
- α_∞ : Tortuosität
- Λ : charakteristische viskose Länge
- Λ' : charakteristische thermische Länge

Allerdings liefert die Analyse der Computertomographien bzw. der synthetisierten Geometrien im Programm GeoDict direkt Werte für diese Parameter. Das Modell beschreibt die viskosen Verluste über

$$\alpha = \alpha_\infty \left(1 - \frac{\eta j \sigma_v}{\rho_0 \alpha_\infty k_0 \omega} \sqrt{1 + \frac{4 k_0^2 \alpha_\infty^2 j \omega \rho_0}{\Lambda^2 \sigma_v^2 \eta}} \right) \quad (4)$$

Darin sind η die dynamische Viskosität der Luft, und k_0 die viskose Permeabilität (Viskosität durch Strömungswiderstand). Die kalorischen Verluste werden über

$$\beta = \kappa - (\kappa - 1) \left(1 - \frac{\eta j \sigma_v}{\rho k'_0 \text{Pr} \omega} \sqrt{1 + \frac{4 k_0'^2 \rho_0 j \omega \text{Pr}}{\Lambda^2 \sigma_v^2 \eta}} \right)^{-1} \quad (5)$$

ausgedrückt, mit $k_0' = \phi \Lambda'^2/8$, dem Adiabatenexponenten κ und der Prandtl-Zahl Pr. Die Ausbreitungskonstante und die charakteristische Impedanz ergeben sich dann zu

$$\Gamma_a = -j \frac{\omega}{c} \sqrt{\alpha \beta} \quad Z_a = \frac{\rho_0 c}{\sigma_v} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (6)$$

2.2 Beschreibung Gesamtaufbauten

Für den Systemtyp 1 wird eine analytische Rechnung verwendet. Diese ist eine Erweiterung zu dem Verfahren, das in einem vorigen BBR-Projekt [8] entstanden ist. Zusätzlich wird jetzt eine abdeckende Putzschicht als poröser Absorber berücksichtigt, wobei die Moden in der Putzschicht mit den Kammermoden in den Absorberstreifen gekoppelt werden.

Die Systemtypen 2 und 3 werden als geschichtete Aufbauten poröser Absorber und einer Luftschicht vor schallhartem Abschluss beschrieben. Für diesen Aufbau lässt sich der Schallabsorptionsgrad mit einem in [5] angegebenen Rekursionsverfahren berechnen. Dazu muss für jede Schicht die Schichtdicke, die Ausbreitungskonstante Γ_a und die charakteristische Impedanz Z_a bekannt sein. Für die Putzschichten können die Ergebnisse aus 2.1 verwendet werden. Für die Deckenplatten lagen sie teilweise bereits vor, für das auch bei den Messungen verwendete StoSilent-Panel wurde nochmals ermittelt (Abschnitt 4.1.2).

3 AP 3: Parametervariation

Mit den in Abschnitt 2 angegebenen Berechnungsverfahren wurde eine rechnerische Parametervariation für die jeweiligen Systemtypen durchgeführt. Das Ziel war, sinnvolle Wertebereiche für die akustischen Größen des Putzes im Zusammenspiel mit den Aufbauten (Abmessungen und andere Absorbermaterialien) zu ermitteln. Es wurde jeweils der Absorptionsgrad bei diffusem Schalleinfall berechnet.

3.1 Systemtyp 1

Bei Typ 1 wurde eine in der Praxis bewährte Streifengeometrie betrachtet: Streifenbreite 50 mm, Periodenlänge 250 mm, Streifentiefe 50 mm. Als Absorbermaterial wird der offenzellige Glasschaum Reapor angenommen. Der Aufbau ist in Bild 3 skizziert.

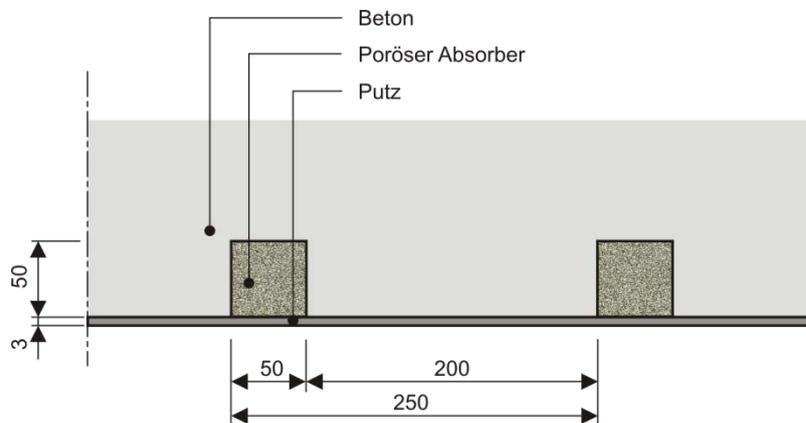


Bild 3:
Aufbau der bauteilaktivierten Decke zur Parametervariation zum Systemtyp 1.

Es ergeben sich folgende drei Hauptaussagen:

1. *Optimal ist ein Putz, der mit dem Streifenmaterial vergleichbare akustischen Eigenschaften aufweist.*

In Bild 4 ist der Deckenaufbau ohne Putz und einem 3 mm dicken Putz mit den Eigenschaften von Reapor gezeigt. Im Bereich des Absorptionsmaximums hat der Putz kaum Auswirkungen, zu höheren Frequenzen erhöhen sich die Absorptionsgrade leicht. Ein akustisch transparenter Putz ist demnach nicht erforderlich.

2. *Entscheidend ist der Gesamtströmungswiderstand der Putzschicht. Ein schichtweiser Aufbau mit unterschiedlichen Strömungswiderständen hat keinen Vorteil.*

In Bild 5 sind beispielhaft die berechneten Absorptionsspektren für zwei zweilagige Putze mit gleichem Gesamtströmungswiderstand (345 Pa s/m^2)

gezeigt. In einem Fall ist die strömungsdichtere Schicht raumseitig angeordnet, im anderen direkt auf der Decke. Daneben wurden auch dreilagige Putze mit sukzessive steigenden oder fallenden Strömungswiderständen untersucht. Die resultierenden Spektren sind auch hier praktisch deckungsgleich. Für den Aufbau der Putzschichten besteht demnach ein großer Spielraum. Bestimmte Anordnungen oder Gradienten des Strömungswiderstandes bieten bei den geringen Schichtstärken jedoch keinen Vorteil.

3. *Eine offene Volumenporosität über 40 Prozent hat keine nennenswerten Vorteile.*

Bei unterschiedlichen Strömungswiderständen wurde die offene Volumenporosität variiert. Bild 6 zeigt die Verhältnisse für einen Strömungswiderstand von 360 Pa s/m. Ab 40 Prozent Porosität verbessern sich die Spektren nicht mehr nennenswert. Der längenbezogenen Strömungswiderstand liegt hier mit 120 kPa s/m² in der Größenordnung der derzeit untersuchten Putze. Selbst bei sehr viel niedrigeren Werten (40 kPa s/m²) sind die Verhältnisse vergleichbar.

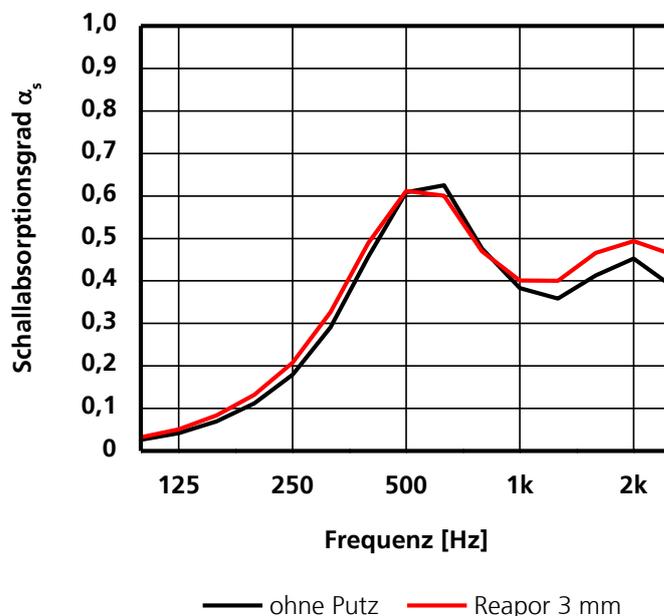


Bild 4:

Berechneter Schallabsorptionsgrad bei diffusem Schalleinfall einer Decke mit Reapor-Streifen (Streifenbreite 50 mm, Periodenlänge 250 mm, Streifentiefe 50 mm) mit und ohne vollflächige Schicht aus 3 mm Reapor.

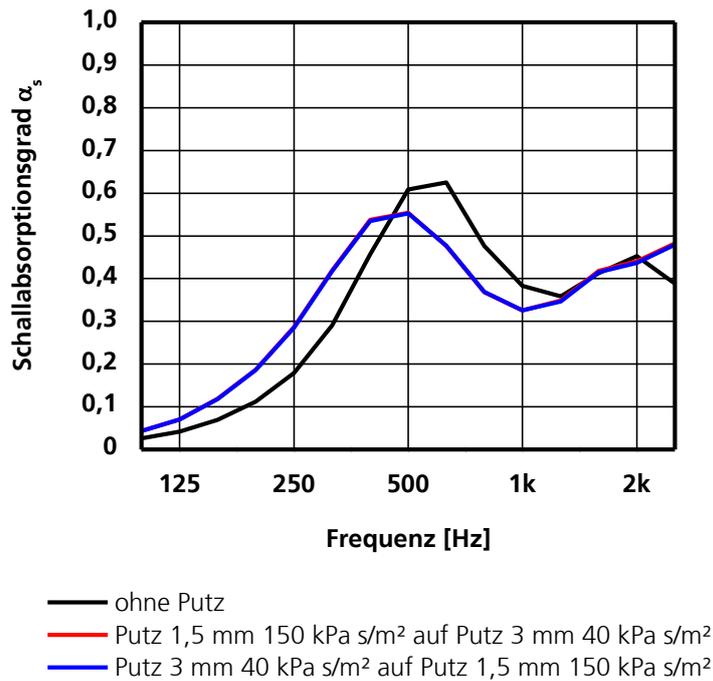


Bild 5:
Berechnete Schallabsorptionsgrade bei diffusem Schalleinfall einer Decke mit Reapor-Streifen (Streifenbreite 50 mm, Periodenlänge 250 mm, Streiftiefe 50 mm) mit unterschiedlich aufgebauten 4,5 mm dicken zweilagigem Putz mit einem Gesamtströmungswiderstand von 345 Pa s/m.

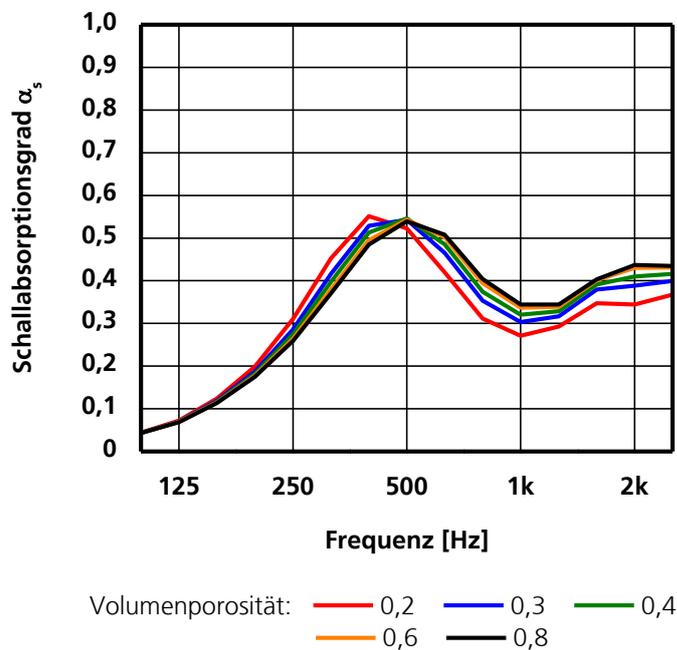


Bild 6:
Berechnete Schallabsorptionsgrade bei diffusem Schalleinfall einer Decke mit Reapor-Streifen (Streifenbreite 50 mm, Periodenlänge 250 mm, Streiftiefe

50 mm) mit 3 mm dicker Putzschicht. Variiert ist die offene Volumenporosität des Putzes mit einem Strömungswiderstand von 360 Pa s/m.

3.2 Systemtyp 2 und 3

Untersucht wurden Aufbauten mit zwei Deckenplatten, um den Einfluss unterschiedlicher Porositäten der Trägermaterialien zu berücksichtigen: ein gesinterter Glasschaum (Reapor) mit ca. 80 Prozent offener Volumenporosität und eine epoxidgebundene Blähglasplatte (StoSilent Panel) mit ca. 35-40 Prozent. Eine weitere Berechnung für eine hochporöse Mineralfaser-Deckenplatte ist geplant. Dazu soll eine sog. Softplatte mit einer Porosität über 95 Prozent betrachtet werden.

Berücksichtigt wurden zwei Aufbauten mit einer Gesamtdicke von 200 bzw. 400 mm (E200 und E400). Der Putz ist durchgehend mit 3 mm angesetzt. Der prinzipielle Aufbau ist in Bild 7 skizziert.

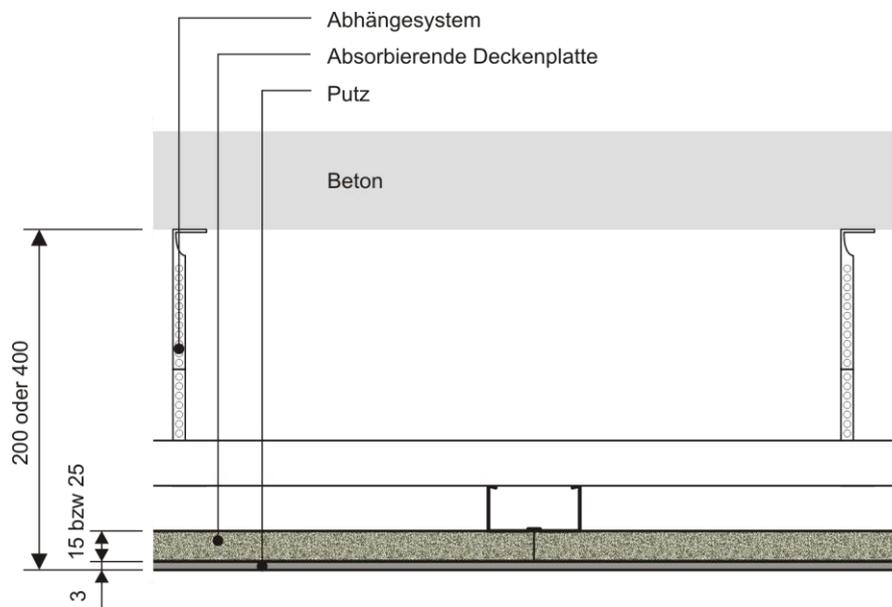


Bild 7:
Aufbau der Unterdecke zur Parametervariation zum Systemtyp 2 und 3.

Der Putz wurde wie folgt variiert: Strömungswiderstand von 100 bis 1300 Pa s/m in Stufen von 200 Pa s/m und offene Volumenporosität von 20, 30, 40, 60 und 80 Prozent. Für die untersuchten Deckenplatten ergeben sich folgende Aussagen, die sich bei Platten mit einer Porosität über 95 Prozent jedoch noch relativieren können:

1. Eine offene Volumenporosität über 40 Prozent hat auch bei den Unterdecken keine nennenswerten Vorteile.
Entsprechende Vergleiche sind in Bild 8 für Reapor und Bild 9 für Sto-Silent Panel eingetragen.

2. Bei tieferen Frequenzen ist ein deutliches Verbesserungspotential durch den Putz gegeben. Entscheidend ist der Gesamtströmungswiderstand der Putzschicht.

Es existiert ein weiterer Bereich gut angepasster Strömungswiderstände (Bild 10 Reapor, Bild 11 StoSilent Panel).

3. Eine optimale Abstimmung des Putzes muss die jeweilige Abhängöhe berücksichtigen.

4. Der Einbruch oberhalb des ersten Absorptionsmaximums kann durch den Putz nicht beseitigt werden.

Bei der gezeigten Aufbaudicke von 200 mm tritt er bei 800 Hz (Reapor) bzw. 1 kHz (StoSilent Panel) auf. Er ist bedingt durch die Anordnung der nicht hochporösen Deckenplatten vor Luft und ist mit Putzschichten, die als poröse Absorber wirken, nicht zu verbessern.

Für die Unterdecken lässt sich kein einheitliches Entwicklungsziel angeben, da die Abhängöhe einen entscheidenden Einfluss auf das Absorptionsspektrum insbesondere im tieffrequenten Bereich hat.

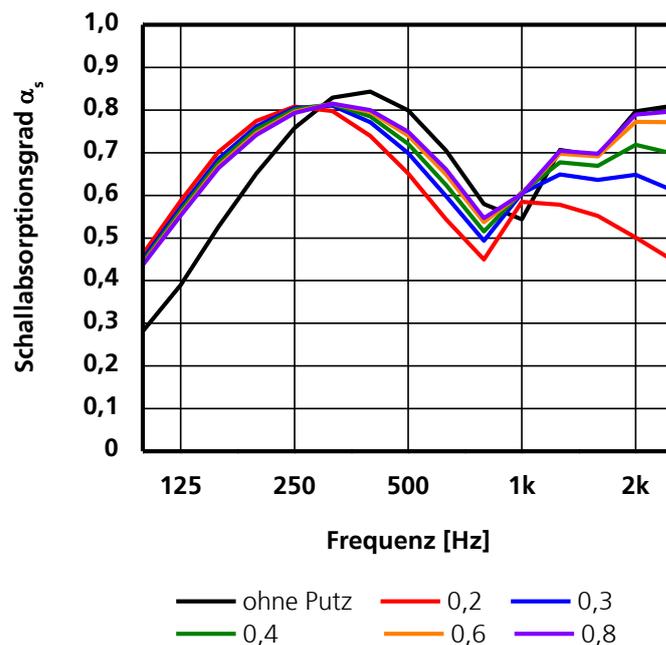


Bild 8:

Berechnete Schallabsorptionsgrade bei diffusem Schalleinfall einer Unterdecke aus Reapor (Plattendicke 25 mm Abhänghöhe 172) mit 3 mm dicker Putzschicht. Variiert ist die offene Volumenporosität des Putzes mit einem Strömungswiderstand von 500 Pa s/m.

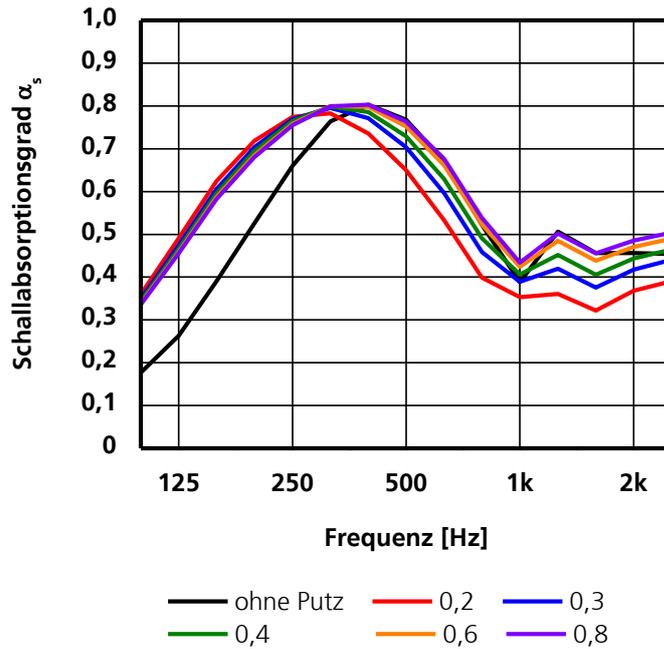


Bild 9:
Berechnete Schallabsorptionsgrade bei diffusem Schalleinfall einer Unterdecke aus StoSilent Panel (Plattendicke 15 mm Abhängöhe 182) mit 3 mm dicker Putzschicht. Variiert ist die offene Volumenporosität des Putzes mit einem Strömungswiderstand von 500 Pa s/m.

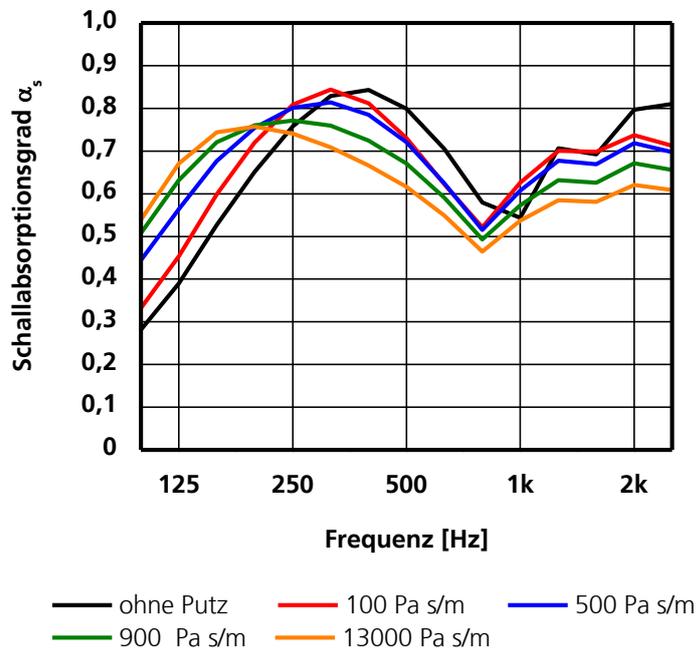


Bild 10:
Berechnete Schallabsorptionsgrade bei diffusem Schalleinfall einer Unterdecke aus Reapor (Plattendicke 25 mm Abhängöhe 172) mit 3 mm dicker Putz-

schicht. Variiert ist der Strömungswiderstand des Putzes mit einer offenen Volumenporosität von 0,4.

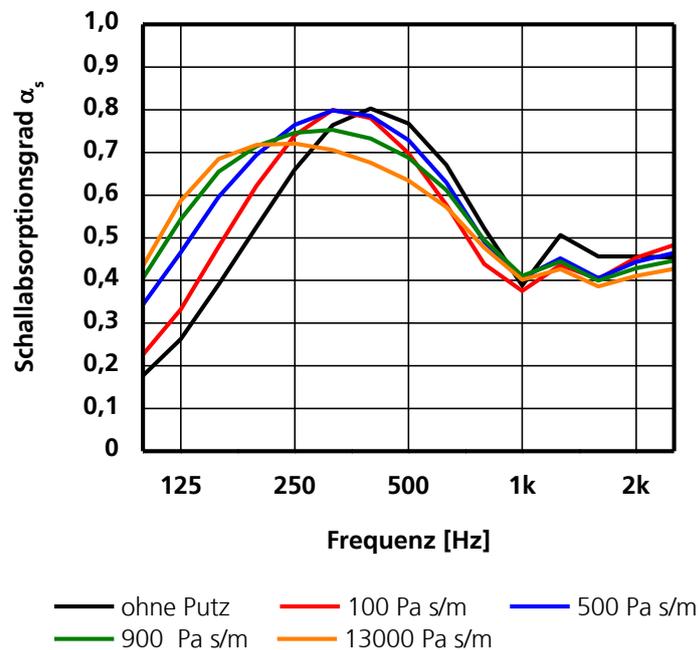


Bild 11:
Berechnete Schallabsorptionsgrade bei diffusem Schalleinfall einer Unterdecke aus StoSilent Panel (Plattendicke 15 mm Abhängöhe 182) mit 3 mm dicker Putzschicht. Variiert ist der Strömungswiderstand des Putzes mit einer offenen Volumenporosität von 0,4.

4 AP 4: Entwicklung von Putzsystemen

Das Ziel dieses Arbeitspakets sind Systeme mit einstellbaren Strömungswiderständen und Porositäten sowie Ansätze zur Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit.

4.1 Akustische Messungen

Vom Industriepartner Sto AG wurden vier Probenserien zur Verfügung gestellt, für die jeweils drei unterschiedlich aufgebaute Putze (B, F und W) bei zwei Applikationsverfahren (H und M) und drei Trägerplatten verwendet wurden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die bislang untersuchten Proben.

Messserie	Formulierung	Applikation	Schichtdicke [mm] circa	Trägerplatte
1	B	H und M	1,5	StoSilent 15 mm
	F	H und M	1,5	StoSilent 15 mm
	W	H und M	1,5	StoSilent 15 mm
2	B	H	1,5	StoSilent 15 mm
	F	H	1,5	StoSilent 15 mm
	W	H	1,5	StoSilent 15 mm
	B auf B	H	1,5 und 3	StoSilent 25 mm
	F auf B	H	1,5 und 3	StoSilent 25 mm
	W auf B	H	1,5 und 3	StoSilent 25 mm
3	B	H	1,5 und 5	Flumrock 50 mm
	F	H	1,5 und 5	Flumrock 50 mm
	Wa	H	1,5 und 5	Flumrock 50 mm
	Wb	H	1,5 und 5	Flumrock 50 mm
4.1	B	H	5	Flumrock 50 mm
	F	H	5	Flumrock 50 mm
	Wa	H	5	Flumrock 50 mm
	Wb	H	5	Flumrock 50 mm
4.2/4.3	B	H	5 und 15	Auf Folie appliziert
	F	H	5 und 15	Auf Folie appliziert
	Wa	H	5 und 15	Auf Folie appliziert
	Wb	H	5 und 15	Auf Folie appliziert

Tabelle 1:
Übersicht der Proben für die Messungen im Kundt'schen Rohr.

4.1.1 Messverfahren

Gemessen wurde in Anlehnung an [9] in einem Kundt'schen Rohr mit quadratischem Durchmesser von 200 mm Kantenlänge. Dieses liefert als Messergebnisse den Schallabsorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall sowie die Wandimpedanz.

Mit Ausnahme dickeren Proben mit Mineralfaserplatte wurde mit unterschiedlichen rückseitigen Luftschichten vor schallhartem Abschluss gemessen. Hierzu mussten die Proben umlaufend abgedichtet werden. Beispiele für solche Einbauten zeigen Bild 12 für Proben auf StoSilent Panel und Mineralfaserplatte und Bild 13 für reine Putzschichten ohne Trägerplatte. Bei den Proben auf StoSilent Panel wurden Wandabstände von 50 und 100 mm gewählt, bei den reinen Putzschichten 25, 50, 100 und 150 mm.

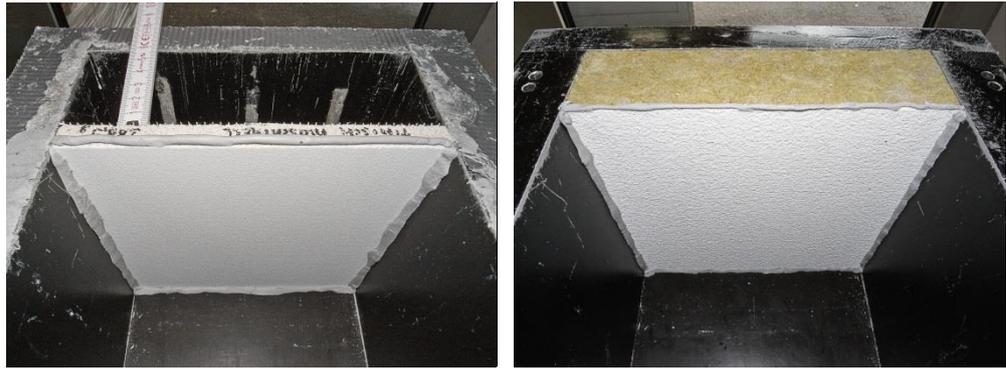


Bild 12:
Beispielhafte Einbauten der Putzschichten auf Trägerplatten mit umlaufender Abdichtung mit dauerelastischer Dichtungsmasse. StoSilent Panel vor Luftschicht (links) und Flumrock ohne Wandabstand (rechts).



Bild 13:
Beispielhafter Einbau der Putzschichten ohne Trägerplatten vor Luft. Umlaufende Abdichtung mit dauerelastischer Dichtungsmasse.

4.1.2 Trägerplatten

Die geeignete Wahl einer Trägerplatte, auf die der Putz appliziert wird, hat sich als kritisch herausgestellt. Begonnen wurde mit StoSilent Panel, da somit realistische Bedingungen für das Aufbringen und Abtrocknen des Putzes gegeben sind. Die Probengröße ist mit 200 x 200 mm² jedoch offenbar zu klein, um repräsentative Ausschnitte des Trägermaterials sicher zu stellen. Materialunterschiede, die bei großformatigen Platten beispielweise in Unterdeckensystemen ohne Belang sind, ergeben bei den Kundt'schen Rohr-Proben zu große Unterschiede im Absorptionsgrad. Ein Extremfall für 15 mm dickes StoSilent Panel ist in Bild 14 gezeigt. Hier lassen sich die Unterschiede zwischen den einzelnen Putzen nicht mehr untersuchen.

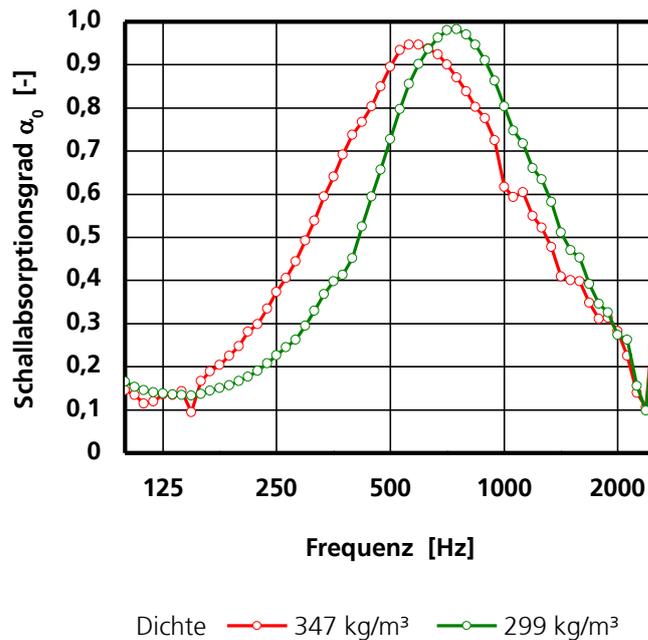


Bild 14:
Gemessene Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von Proben aus 15 mm dickem StoSilent Panel mit unterschiedlichen Dichten bei 50 mm Luftabstand.

In der Probenserie 2 wurde auf StoSilent Panel mit 25 mm Dicke übergangen, da hier homogenere Platten erwartet wurden. Die Probengröße ist jedoch auch hier zu klein, um ausreichend gleichmäßige Absorptionsgrade sicher zu stellen.

Für die untersuchten Platten wurde eine dichteabhängige Anpassung der akustischen Eingangsparameter erstellt. Dabei gingen 11 Platten mit 15 mm Dicke und 2 Platten mit 25 mm Dicke ein. Die Werte für die maßgeblichen Eingangsgrößen können in Abhängigkeit der Plattendichte ρ_A geschrieben werden:

$$\begin{aligned} \text{Strömungswiderstand:} \quad \Xi(\rho_A) &= 0,0409 e^{0,0204 \rho_A} \\ \text{Offene Volumenporosität:} \quad \sigma_v(\rho_A) &= -0,0009 \rho_A + 0,5169 \end{aligned}$$

Hiermit ist zwar eine gute rechnerische Nachbildung aller untersuchten unverputzten Platten möglich. Bei den verputzten Proben kann die Dichte der Trägerplatte jedoch nicht ermittelt werden, sodass hier die Eingangsdaten für die mittlere Plattendichte verwendet werden müssen.

Die Platten zeigen vor Luftabstand im Rohr eine resonanzartige Spitze im Absorptionsspektrum, die von einer Plattenschwingung herrührt und damit von der speziellen Probengröße abhängt. Mit einem rückseitig aufgeklebten Aussteifungskreuz aus Stahlblechstreifen wurde versucht, diese zu eliminieren (Bild 15). Bei den unverputzten Platten konnte so die Plattenschwingung unterbunden werden, wie in Bild 16 zu sehen ist. Bei den verputzten Proben war

dies jedoch nicht mehr vollständig möglich, wie die Beispiele in Abschnitt 4.1.3 zeigen.

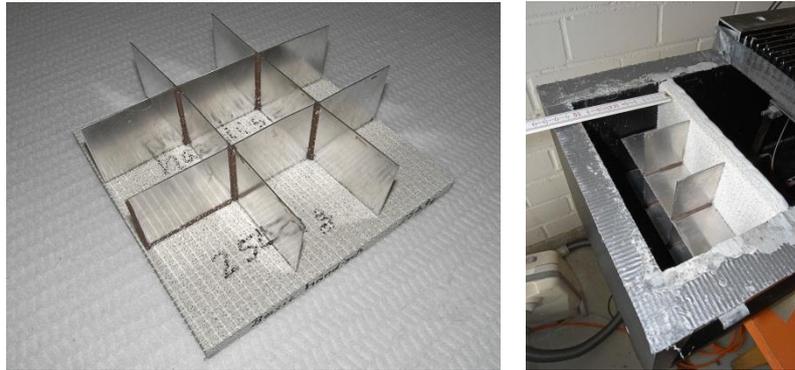


Bild 15:
Einbau von StoSilent Panel mit rückseitig aufgeklebtem Aussteifungskreuz.

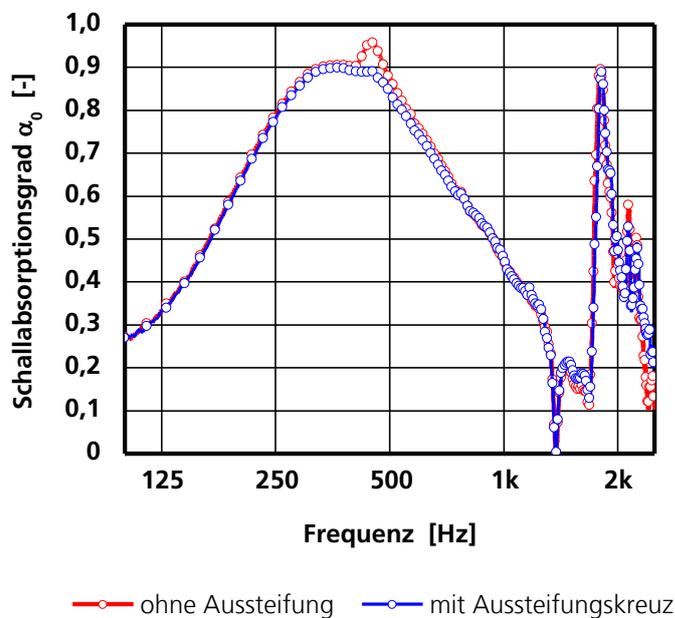


Bild 16:
Gemessene Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall einer Probe aus 15 mm dickem StoSilent Panel mit und ohne rückseitiges Aussteifungskreuz bei 100 mm Luftabstand

In den Messserien 3 und 4.1 wurden Mineralfaserplatten (Flumrock) mit 50 mm Dicke als Träger verwendet. Das Material ohne Putz zeigte unterschiedliches Absorptionsverhalten bei unterschiedlichen Einbaubedingungen, wie Bild 17 entnommen werden kann. Daher wird davon ausgegangen, dass das Absorberskelett in nennenswertem Umfang durch Luftschall zu Schwingung angeregt wird. Erst die Modellierung als elastischer poröser Absorber nach [5] zeigt eine hinreichende Übereinstimmung mit der Messung. Hierbei wird nicht nur die Massehemmung, sondern auch die Dämpfung durch das elastische Skelett

über einen Kompressionsmodul und Verlustfaktor berücksichtigt. Eine fest mit der Platte verbundene Putzschicht zeigt jedoch eine deutlich andere Anregung des Mineralfaser-Skeletts durch Luftschall als bei der Platte ohne Putz. Insofern ist auch die Mineralfaserplatte als Trägerplatte für die Untersuchungen nicht optimal.

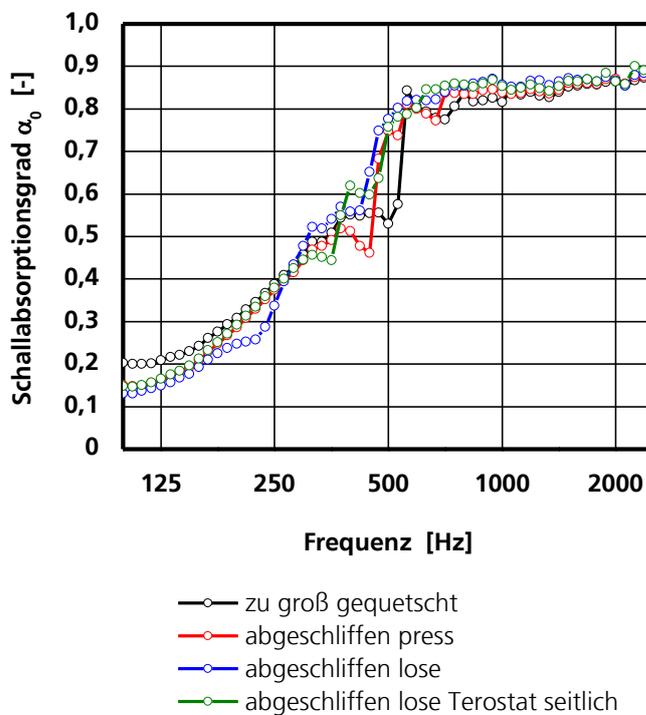


Bild 17:

Gemessene Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall der Mineralfaser-Trägerplatte ohne Putz bei unterschiedlichen Einbaubedingungen.

Der beste Messaufbau wurde ohne Trägerplatte realisiert. Dabei wurden die dickeren Putzschichten der Messserie 3 und 4 von der Mineralfaserplatte getrennt. Allerdings wird dabei die Verbindungsschicht von Putz zu Platte nicht berücksichtigt. In Messserie 4 wurden außerdem Putze untersucht, die ohne Trägerplatte direkt auf eine Folie appliziert wurden.

4.1.3 Messergebnisse

Im Folgenden sind einige ausgewählte Messergebnisse der ersten Probenserien dargestellt. Der Einfluss der drei unterschiedlichen Formulierungen ist am Beispiel der Applikation H bei 100 mm Wandabstand in Bild 18 gezeigt. Der Einfluss der Applikation kann an dem Vergleich der Proben BH und BM in Bild 19 abgelesen werden. Die Applikation M ergab durchgehend etwas niedrigere Werte. Die schmalbandigen Spitzen um 630 Hz resultieren aus Plattenschwingungen der Proben. Diese sind auch abhängig von den Abmessungen der Platte und somit Artefakte, die sich aus den Probengrößen ergeben.

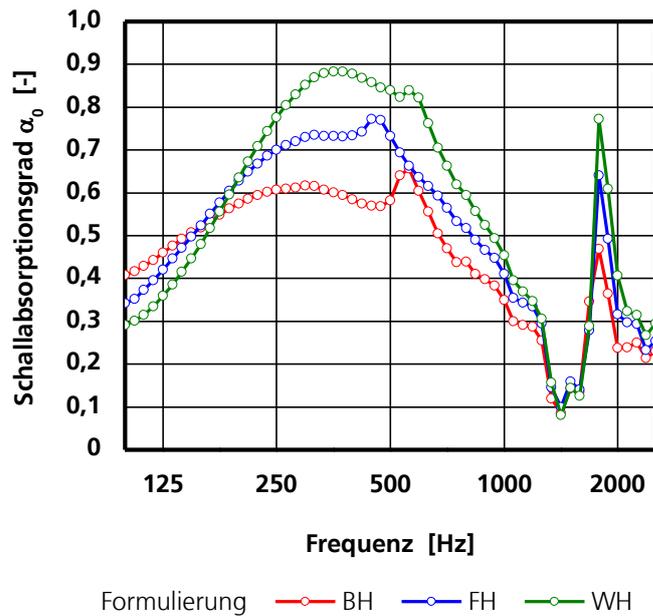


Bild 18:
Gemessene Schallabsorptionsgrade im Kundt'schen Rohr der Putzproben BH, FH und WH vor 100 mm Luftschicht.

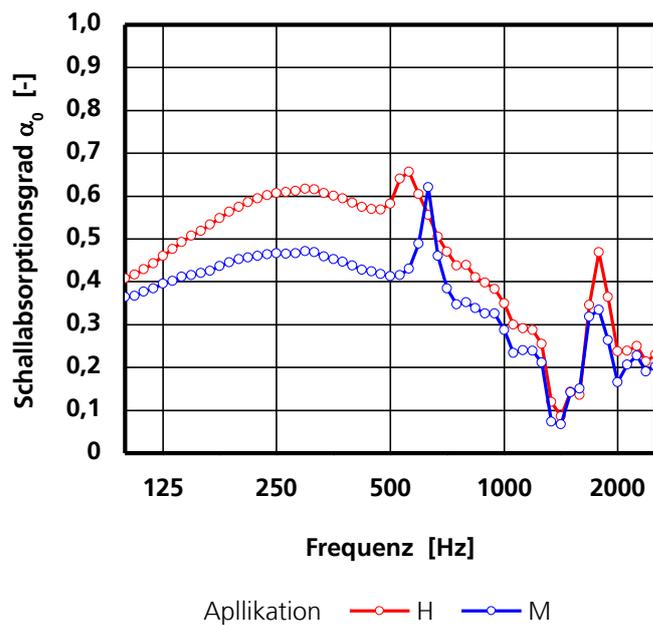


Bild 19:
Gemessene Schallabsorptionsgrade im Kundt'schen Rohr der Putzproben B vor 100 mm Luftschicht bei unterschiedlicher Applikation H und F.

Die Putze der Serie 3 und 4.1 wurden ohne Luftabstand auf dem Mineralfasertträger (Flumrock) gemessen. Es wird von einer starken Anregung des Mineralfaserskeletts durch die Putzschicht ausgegangen. Für eine zweite Messung wurden die Putze mit 6 mm Nassschichtdicke daher von der Mineralfaser getrennt.

Dabei wurde auch die Verbindungsschicht zwischen Putz und Mineralfaser entfernt. Gemessen wurde vor vier unterschiedlichen Luftschichten bei einem Einbau gemäß Bild 13. Beispielhaft für den Einfluss des Wandabstands sind die Spektren des Putzes A3.4 BH in Bild 20 eingetragen. Es ergaben sich typische Spektren dünner poröser Absorber vor Luftschichten ohne Resonanzeffekte, die lediglich von der speziellen Probengröße herrühren. Die Variationsbreite der unterschiedlichen Putze kann für 50 mm Wandabstand Bild 21 entnommen werden. Die Ergebnisse der restlichen Messungen können den Diagrammen A1 bis A11 im Anhang entnommen werden.

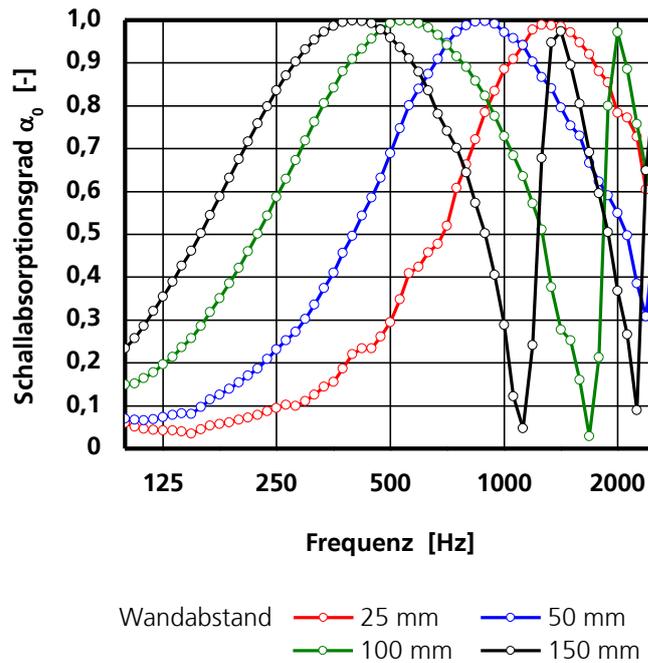


Bild 20:
Gemessene Schallabsorptionsgrade im Kundt'schen Rohr der Putzprobe A3.4 BH ohne Trägerplatte vor unterschiedlichen Luftschichten.

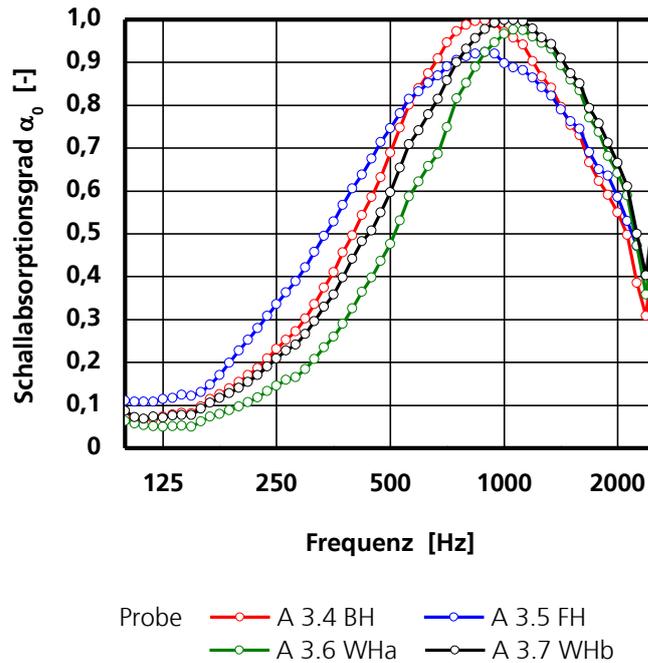


Bild 21:
Gemessene Schallabsorptionsgrade im Kundt'schen Rohr der Putzproben A3.4 bis A3.7 ohne Trägerplatte vor 50 mm Luftschicht.

4.2 Messung der Eingangsparameter

4.2.1 Gleichströmungswiderstand

Der Gleichströmungswiderstand der Putze der Messserien 3 und 4 wurde mit dem Verfahren nach [10] gemessen. Hierzu wurden aus den Proben für das Kundt'sche Rohr kreisrunde Proben mit 100 mm Durchmesser geschnitten (Bild 22). Die Übergangsschicht von Putz zu Mineralfaserplatte war weitestgehend entfernt. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse als spezifische und längenbezogene Strömungswiderstände angegeben.

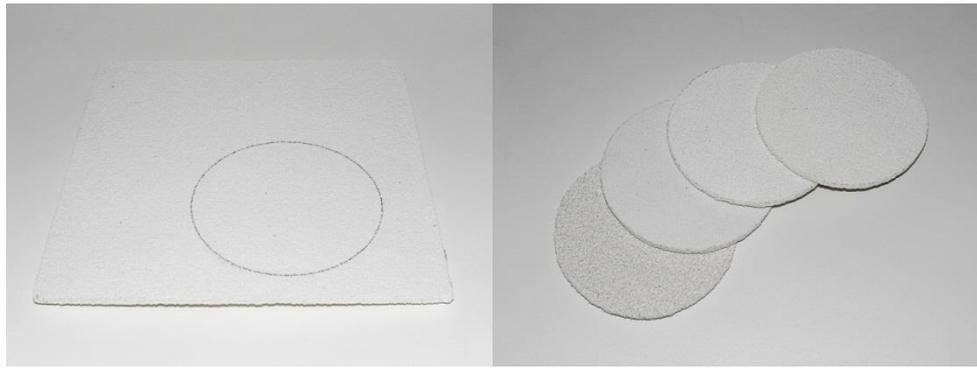


Bild 22:
Proben für die Messung des Gleichströmungswiderstandes.

Probe	Probendicke [mm]	Spezifischer Strömungswiderstand R_s [kPa s/m]	Längenbezogener Strömungswiderstand Ξ [kPa s/m ²]
A3.4 BH	5,1	426	83,5
A3.5 FH	5,7	768	134,7
A3.6 WHa	4,7	284	60,4
A3.7 WHb	4,2	446	106,2
A4.1.1 BH	6,1	583	95,6
A4.1.2 FH	6,3	891	141,4
A4.1.3 WHa	5,0	504	100,8
A4.1.4 WHb	5,0	743	148,6
A4.2.1 BH	4,6	147	32,3
A4.2.2 FH	4,9	413	84,3
A4.2.3 WHa	4,1	396	97,6
A4.2.4 WHb	4,2	503	119,8

Tabelle 2:
Gemessene Strömungswiderstände der Putze der Messerien 3 und 4.

4.2.2 Offene Volumenporosität

Es ist geplant, die offene Volumenporosität der Probenserie 4 mittels Quecksilber-Porosimetrie oder Gasadsorption zu messen.

4.3 Rechnerische Beschreibung

Für das Modell des homogenen Strömungsabsorbers (Abschnitt 2.1) wurden Eingangsdaten für den Strukturfaktor und die Volumenporosität jeweils so angepasst, dass für den jeweiligen Putz die vier gemessenen Absorptionsspektren möglichst gut nachgebildet werden. Für den längenbezogenen Strömungswiderstand, die Absorberdichte und die Schichtdicke wurden Messwerte eingesetzt. Die verwendeten Eingangsdaten können Tabelle 3 entnommen werden.

Probe Putz	A3.4 BH	A4.1.1 BH	A4.2.1 BH	A3.5 FH	A4.1.2 FH	A4.2.2 FH
Absorberdichte [kg/m ³]	740	779	639	1250	1255	1204
Volumenporosität [--]	0,54	0,52	0,60	0,35	0,35	0,37
Strömungswiderstand [kPa s/m ²]	83,5	95,6	32,3	134,7	141,4	83,4
Strukturfaktor [--]	5,8	6,8	4,8	3,5	3,5	3,7
Putzdicke [m]	0,0051	0,0061	0,00455	0,0057	0,0063	0,0049

Probe Putz	A3.6 WHa	A4.1.3 WHa	A4.2.3 WHa	A3.7 WHb	A4.1.4 WHb	A4.2.4 WHb
Absorberdichte [kg/m ³]	960	1070	1090	1110	1130	1080
Volumenporosität [--]	0,44	0,38	0,36	0,35	0,34	0,37
Strömungswiderstand [kPa s/m ²]	60,4	100,8	97,6	106,2	148,6	119,8
Strukturfaktor [--]	3,3	3,4	3,4	3,0	3,3	3,5
Putzdicke [m]	0,0047	0,005	0,00405	0,0042	0,005	0,0042

Tabelle 3:

Eingangsdaten der Putze für das Modell des homogenen Strömungsabsorbers mit Massehemmung.

Der Vergleich zwischen den gemessenen und gerechneten Spektren ist in Bild 23 exemplarisch für Putz A3.4 BH gezeigt. Entsprechende Darstellungen für die anderen Putze der Tabelle 3 sind in Bild A1 bis A11 im Anhang gezeigt. Die Übereinstimmung ist durchweg sehr gut, d.h. die Modellierung ist brauchbar für die jeweilige Putzschicht, für die die Eingangsdaten gefittet wurden. Damit ist die Voraussetzung für rechnerische Beschreibung der Systemtypen gegeben. Einschränkend muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Verbindungsschicht zwischen Putz und Trägerplatte hier nicht modelliert ist.

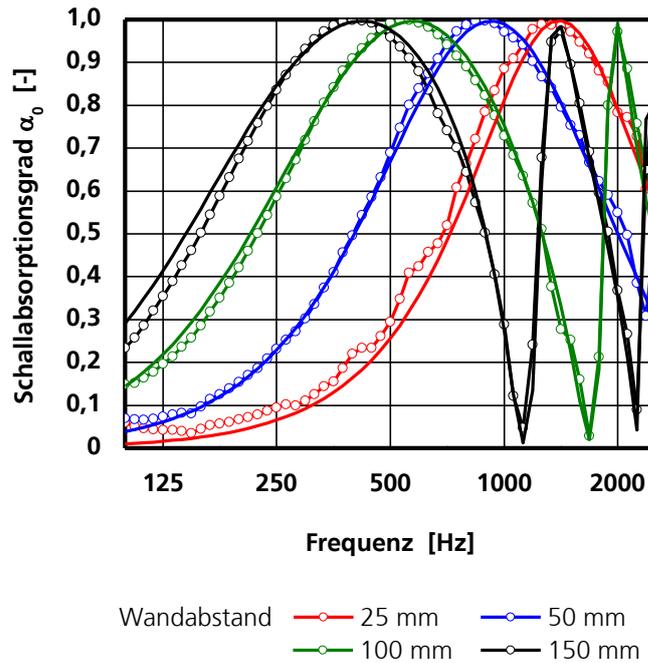


Bild 23:
Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A3.4 BH vor unterschiedlichen Luftschichten.

5 AP 5: Experimentelle Bestimmung der Mikrogeometrie

5.1 Segmentierung

Von Proben der Serie 1, 3 und 4 wurden Mikrotomografien hergestellt. Die Analyse der Tomografien erfolgte mit dem Programm MAVI. Als größte Schwierigkeit hat sich dabei die Binarisierung herausgestellt, d.h. die Umwandlung des ursprünglichen 16 bit-Graustufenbilds in ein Schwarz-Weiß-Bild. Es muss eine Grauwert-Schwelle festgelegt werden, bei der Material- und Hintergrundvoxel getrennt werden.

Aus den Proben der Serie 1 wurden Würfel von ca. 4 mm Kantenlänge geschnitten, die sowohl die Putzschicht als auch einen Teil der Trägerplatte beinhalten. Der Bereich der Trägerplatte ist dabei ca. 2,5 mm dick der Putz 1,5 mm. Die Tomografien wurden mit einer Auflösung von 3,9 μm erzeugt. Ein Beispiel für die resultierenden Aufnahmen gibt der Schnitt in Bild 24.

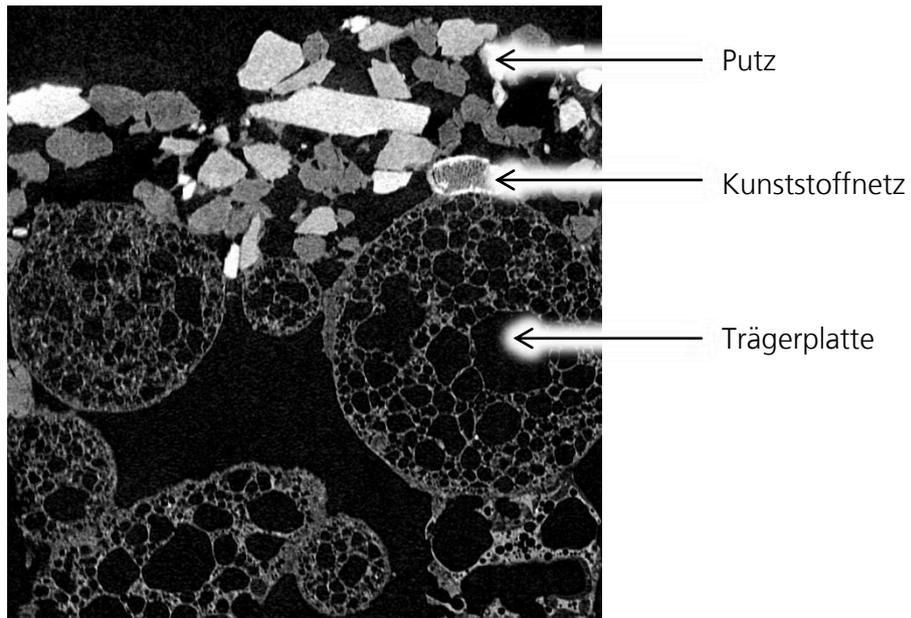


Bild 24:
Computertomografische Aufnahme einer Putzschicht auf einer Trägerplatte aus StoSilent Panel.

Die Aufnahmen waren verhältnismäßig stark verrauscht und mussten zunächst einer Rauschreduktion unterzogen werden. Die Binarisierung jeder Aufnahme erfolgte dann so, dass sich für Bereiche mit StoSilent Panel jeweils die abgeschätzte Gesamtporosität ergibt. Die Bereiche mit Putz wurden dann in derselben Weise binarisiert. Die Bearbeitungsschritte für die Probe BH sind in Bild 25 gezeigt.

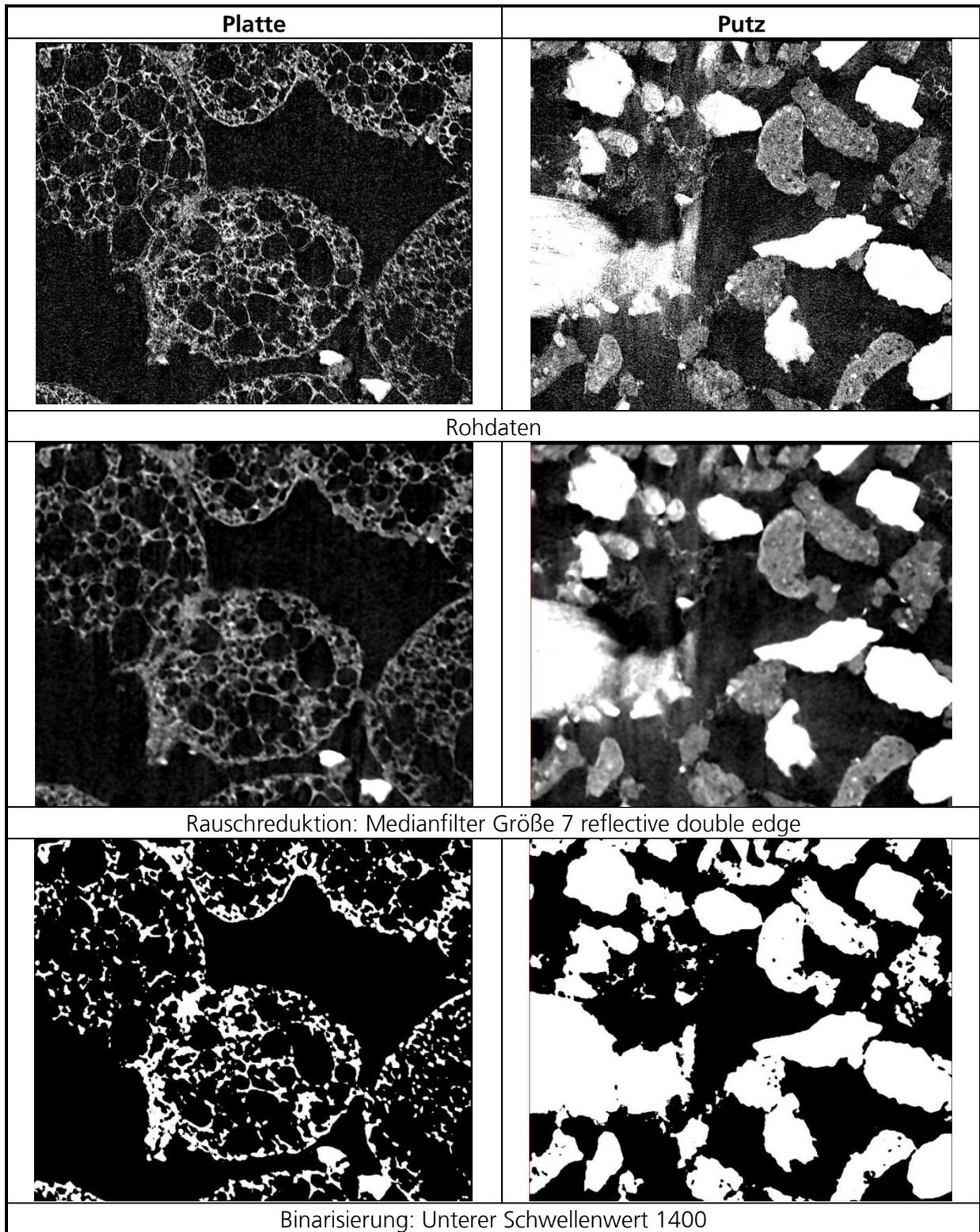


Bild 25:
 Bearbeitung der Computertomografien in dem Programm MAVI am Beispiel
 des Putzes BH. Linke Spalte Trägerplatte, rechte Spalte Putz.

Das Programm erlaubt die Ermittlung von zusammenhängenden Bereichen des Porenvolumens. Für jeden dieser Bereiche kann entschieden werden, ob er offen an eine Schnittebene angrenzt. Entsprechend wurden zwei parallele Schallein- und Austrittsebenen festgelegt. Als offenes Porenvolumen wurden alle Bereiche berücksichtigt, die an beide Ebenen offen angrenzen.

Voraussetzung für das Verfahren ist eine ausreichend hohe Auflösung der Tomografie (räumliche Abtastfrequenz) sowie eine korrekte Binarisierung, sodass eine intakte Abbildung aller Porenwände erzielt wird. Bei den vorliegenden Tomografien war dies für die Trägerplatte nicht erfüllt, wie in Bild 25 zu entnehmen ist. Bei den entsprechend bearbeiteten Putzen ergab sich ein im Wesentlichen zusammenhängendes offenes Porenvolumen praktisch ohne Anteile geschlossener Poren wie in Bild 26 für den Putz FM dargestellt.

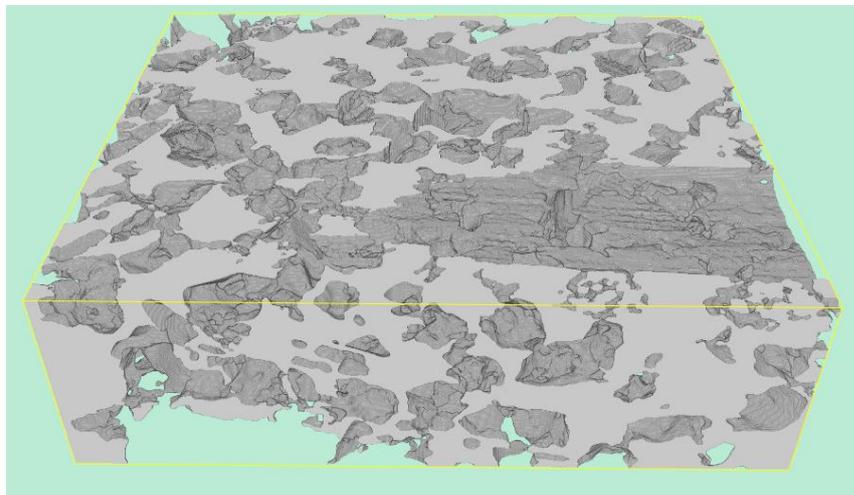


Bild 26:
3D-Ansicht des offenzelligen Porenvolumens des Putzes FM.

Die Putze der Serie 3 und 4 wurden ohne Träger tomografiert. Es wurden Würfel mit ca. 4 mm Kantenlänge bei einer Auflösung von $4\mu\text{m}$ untersucht. Beispiele sind in den Schnittbildern Bild 27 gezeigt.

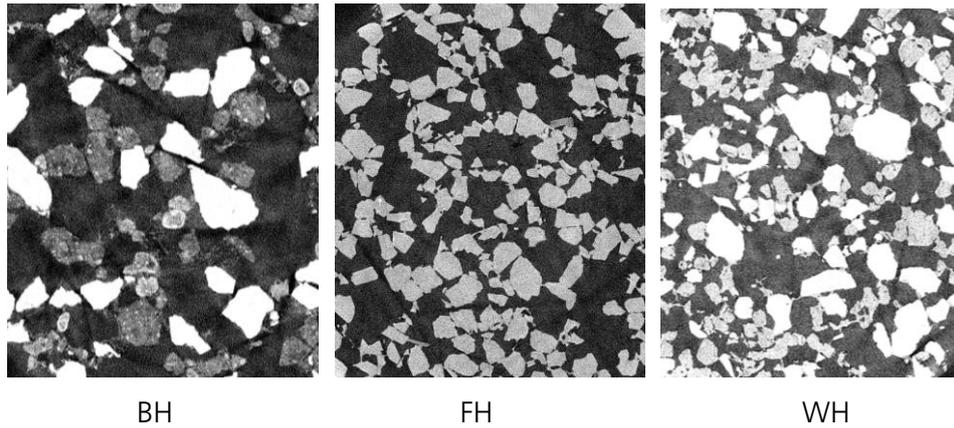


Bild 27:
Computertomografische Aufnahmen von Putzschicht ohne Trägerplatte.

Die Segmentierung erfolgte hier jeweils so, dass sich weder im Porenvolumen frei schwebende Teile ergeben (Bild 28 links) noch Poren in den Material entstehen (Bild 28 rechts). In dem gezeigten Beispiel ergeben sich durch die unterschiedliche Segmentierung Unterschiede in der Porosität von 0,49 links, 0,51 Mitte und 0,54 rechts.

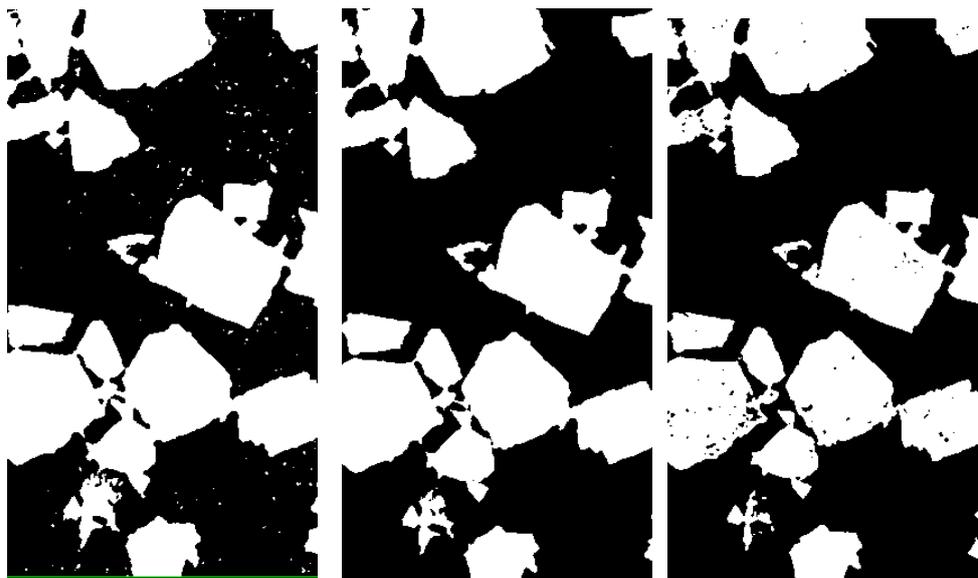


Bild 28:
Segmentierungen einer Tomografie des Putzes A3.5 FH mit drei unterschiedlichen Schwellenwerten.

5.2 Ermittlung von Korngrößen

Das Programm MAVI bietet eine Partikelseparation bzw. Zellenseparation. Aus dem zusammenhängenden Putzmaterial können damit Partikel separiert werden und anschließend statistisch analysiert werden. Bild 29 zeigt ein Beispiel für

eine Separation im Schnitt. Zur Analyse müssen die im Randbereich geschnittenen Partikel entfernt werden. Die verbleibenden Partikel sind entsprechend ihrer Größe und den Abmessungen des tomografierten Ausschnitts zu wichten. Bild 30 zeigt einen so vorbereiteten Ausschnitt in einer 3D-Ansicht im Vergleich zur Ausgangsgeometrie. Auf dieselbe Weise kann das zusammenhängende offenzellige Porenvolumen in einzelne Zellen separiert werden.

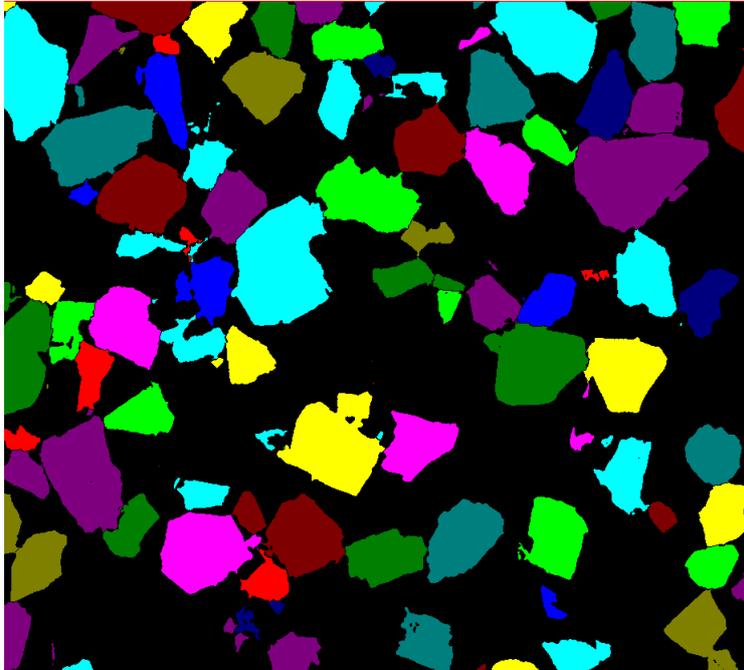


Bild 29:
Schnittbild der Partikelseparation der Computertomografien in dem Programm MAVI am Beispiel des Putzes A3.5 FH.

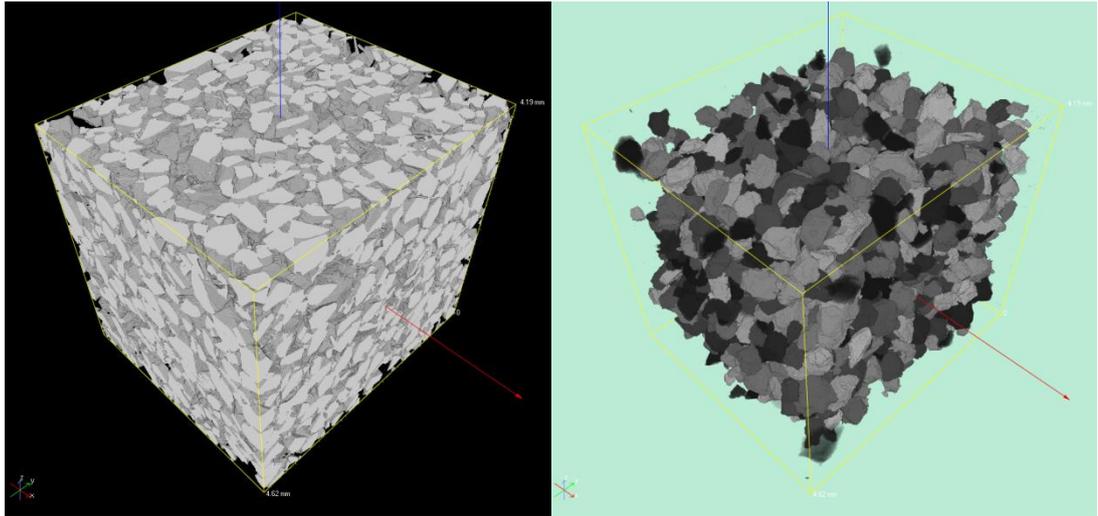


Bild 30:
3D-Ansicht des Putzes A3.5 FH im Ausgangszustand (links) und nach der Partikelseparation der Computertomografien und Entfernen aller in den Randbereichen angeschnittenen Partikel im Programm MAVI (rechts).

Die separierten Partikel können anschließend auf dem Voxelraster vermessen und statistisch ausgewertet werden. Damit können Verteilungen von Abmessungen, räumlicher Orientierungen oder Volumina gewonnen werden (Bild 31).

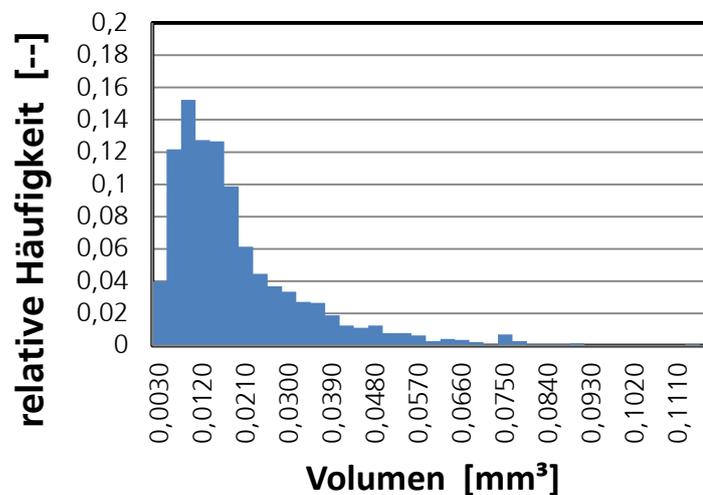


Bild 31:
Verteilung der Partikelvolumina nach Partikelseparation am Beispiel des Putzes A3.5 FH.

Die Auswertung der Partikelabmessungen liefert Verteilungen der Achsendurchmesser umschreibender Ellipsoide (Tabelle 4). Es wird eine Log-Normal-Verteilung angenommen. Für Putz A3.5 FH sind die entsprechenden Werte in Tabelle 4 eingetragen.

	Mittelwert [μm]	Standardabweichung [μm]
1. Achse	470	130
2. Achse	286	82
3. Achse	210	62

Tabelle 4:

Durchmesser der Achsen der umschreibenden Ellipsoide der separierten Partikel am Beispiel A3.5 FH.

5.3 Synthese der Porenmorphologie

Anhand der ermittelten Verteilungen der Partikelabmessungen wurden Geometriemodelle synthetisiert. Hierzu wurden zunächst zufällig verteilte und orientierte Ellipsoide in einem Volumen generiert. Dabei wurde eine Durchdringung von nur wenigen Voxeln zugelassen und die in der Tomografie ermittelte Volumenporosität angestrebt. Die Modellierung mittels einfache Ellipsoide hat sich als noch nicht ausreichend herausgestellt. Zur weiteren „Aufrauhung“ wurden daher die Ellipsoide jeweils durch unregelmäßige Vielflächner mit 20 Punkten ersetzt. Die Punkte sind wiederum zufällig auf einem Ellipsoid verteilt. Die entstandene Geometrie ist in Bild 32 mit der tomografierten Ausgangsgeometrie verglichen.

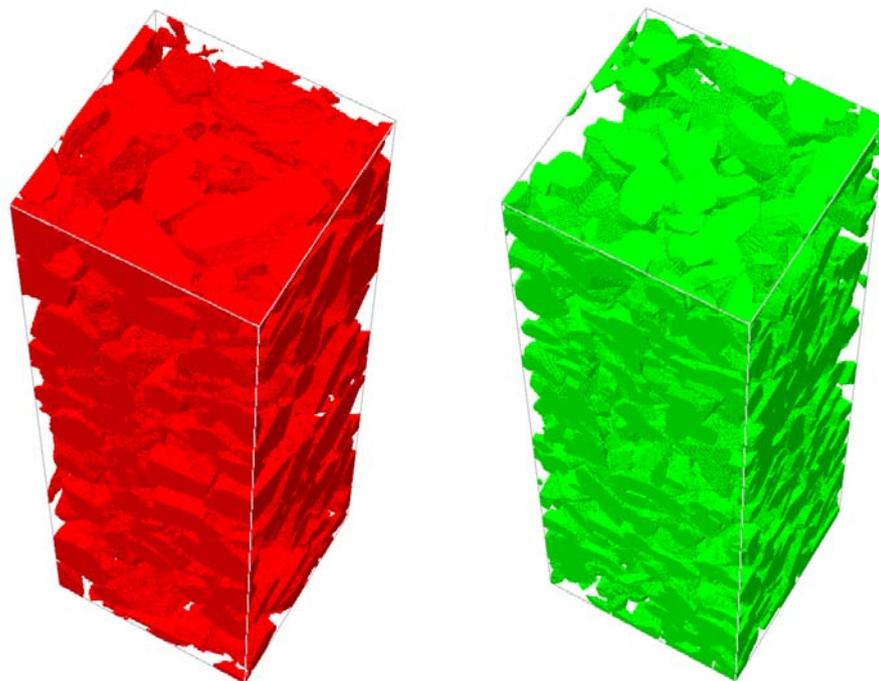


Bild 32:

Vergleich der tomografierten (links) und synthetisierten (rechts) Skelettmorphologie am Beispiel des Putzes A3.5 FH.

5.4 Berechnung akustischer Eingangsdaten

Mit dem Programm GeoDict lassen sich Diffusion und Strömung im offenzelligen Porenvolumen der tomografierten bzw. synthetisierten Geometriemodelle berechnen. Das Programm bestimmt daraus anschließend die Eingangsdaten für das in Abschnitt 2.1 beschriebene Johnson-Allard-Modell. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse für den Putz A3.5 FH angegeben.

Probe		Tomografie	Synthese
Volumenporosität	[—]	0,52	0,53
Tortuosität	[—]	1,9	1,6
Strömungswiderstand	[kPa s/m ²]	87,1	86,0
Viskose charakteristische Länge	[m]	$5,69 \cdot 10^{-5}$	$6,50 \cdot 10^{-5}$
Thermische charakteristische Länge	[m]	$9,42 \cdot 10^{-5}$	$8,22 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 5:

Aus der Porengeometrie berechnete Eingangsdaten für das Johnson-Allard-Modell des Putzes A3.5 FH.

Aus den Unterschieden lässt sich die Güte der Synthese beurteilen. Hierzu wurden mit den Eingangsdaten Absorptionsspektren berechnet. In Bild 33 sind beispielhaft Ergebnisse für einen 5,7 mm dicken Putz vor einer 50 dicken Luftschicht gezeigt. Zum Vergleich ist die entsprechende Messung eingetragen.

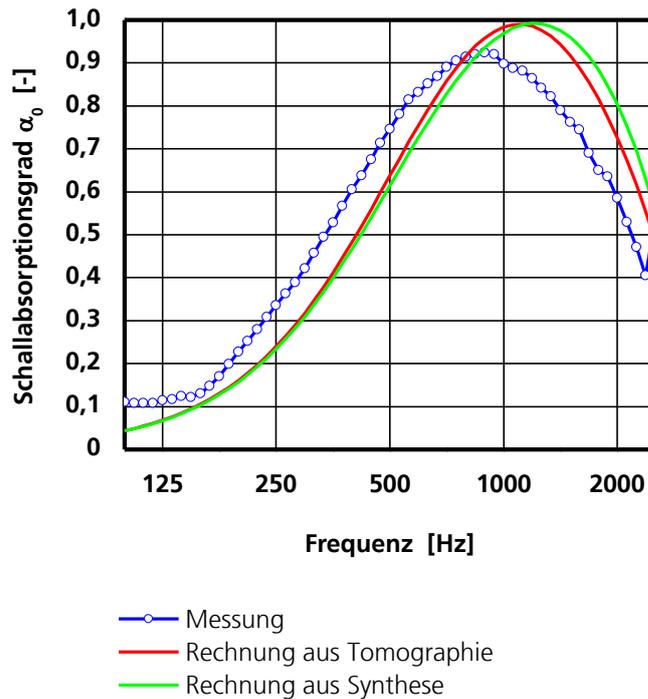


Bild 33:
Vergleich der Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall von Putz A.3.5 FH bei 50 mm Luftabstand.

Die Unterschiede zwischen den beiden berechneten Spektren in Bild 33 sind gering. Die Synthese als parametrisiertes Geometriemodell ist für Entwicklungszwecke ausreichend. Damit ist es grundsätzlich möglich, eine Optimierung der Putzgeometrie über eine Parametervariation durchzuführen.

Die Übereinstimmung der berechneten Absorptionsgrade mit den Messwerten ist jedoch nicht zufriedenstellend. Verantwortlich ist die unerwartet hohe Porosität der tomografierten Proben. Diese liegen bei allen untersuchten Proben vom Typ FH mit ca. 50 Prozent deutlich über den indirekt ermittelten Werten von ca. 35 Prozent (rechnerische Anpassung an Absorptionsgrad-Messungen, siehe Tabelle 3).

Hierfür sind zwei Ursachen denkbar: Zum einen könnten die Ausschnitte der Tomografien mit 4 mm Kantenlänge nicht repräsentativ sein. Zum anderen kann eine falsche Segmentierung zu einem zu geringen Materialanteil führen. Wie in Abschnitt 5.1 gezeigt, führt eine Segmentierung, mit der sich eine Porosität von 35 Prozent ergibt, zu einem hohen Anteil von frei im Porenvolumen schwebenden Partikeln. Mit der vorliegenden Tomografie-Qualität ist eine solche Segmentierung also nicht sinnvoll möglich.

6 AP 6: Iterative akustische und thermische Untersuchungen an Funktionsmustern im Labor

6.1 Akustische Untersuchungen

Im Folgenden sind akustische Untersuchungen zu den Systemtypen dargestellt. Hierzu wurden kleinformatische Proben im Kundt'schen Rohr gemessen und die Ergebnisse rechnerisch nachvollzogen.

6.1.1 Systemtyp 1

Für den Typ 1 wurde ein Streifenaufbau mit quadratischer Ansichtsfläche von 200 mm Kantenlänge erstellt. Bild 34 zeigt die Konstruktion aus Holzwerkstoffen für die schallharten Flächen und einem 67 mm breiten und 50 mm dicken Glasschaumstreifen. Die Periodenlänge des Aufbaus ist 200 mm. Auf diese Konstruktion wurden anschließend die abgelösten Putzschichten aufgelegt.



Bild 34:

Probe aus Holzwerkstoff (Multiplex) mit lackierten Schnittflächen und Absorberstreifen aus offenzelligem Glasschaum ohne Putz (links) und mit lose aufgelegter Putzschicht (rechts).

In Bild 35 ist exemplarisch der Vergleich zwischen Messung und Rechnung für den Putz A3.4 BH eingetragen. Der Verlauf des Spektrums wird gut nachgebildet. Bei allen Putzen unterschätzt die Rechnung die Messung über dem gesamten Frequenzbereich leicht.

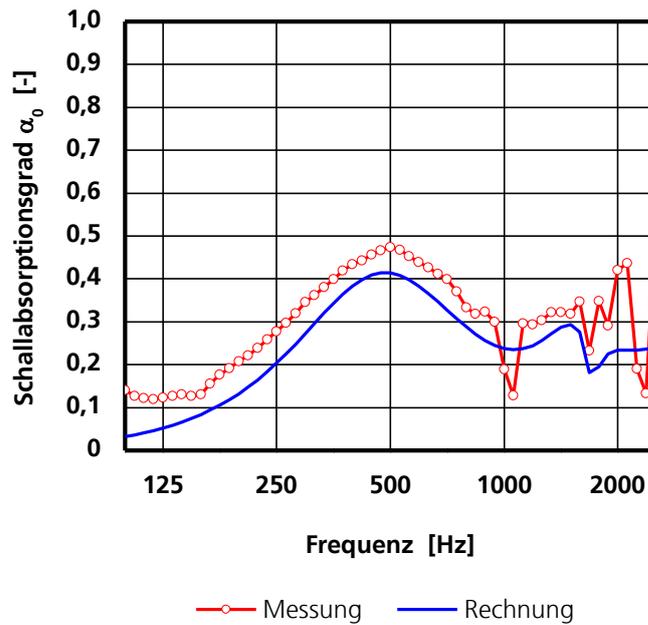


Bild 35:

Gemessene und berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall des Putzes A3.4 BH auf einem Streifenbau gemäß Bild 34 (Glasschaumstreifen Breite 67 mm, Höhe 50 mm, Periode 200 mm).

Die erweiterte Berechnung für Streifenbauten ermöglicht inzwischen die Modellierung mehrlagiger Putzschichten. Damit können realistische Putzaufbauten berechnet werden. In einem ersten Test wurde hierzu ein zweilagiger Aufbau aus einer 25 mm dicken Glasschaumplatte und einer raumseitigen Putzschicht realisiert. Er ist in Bild 36 auf dem Streifenbau gezeigt. In Bild 37 sind die Rechenergebnisse mit der Messung wieder für Putz A3.4 BH verglichen. Auch hier ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit einer leichten Unterschätzung der Messwerte.



Bild 36:
 Probe aus Holzwerkstoff (Multiplex) und Absorberstreifen aus offenzelligem Glasschaum mit lose aufgelegter Glasschaum-Platte und Putzschicht.

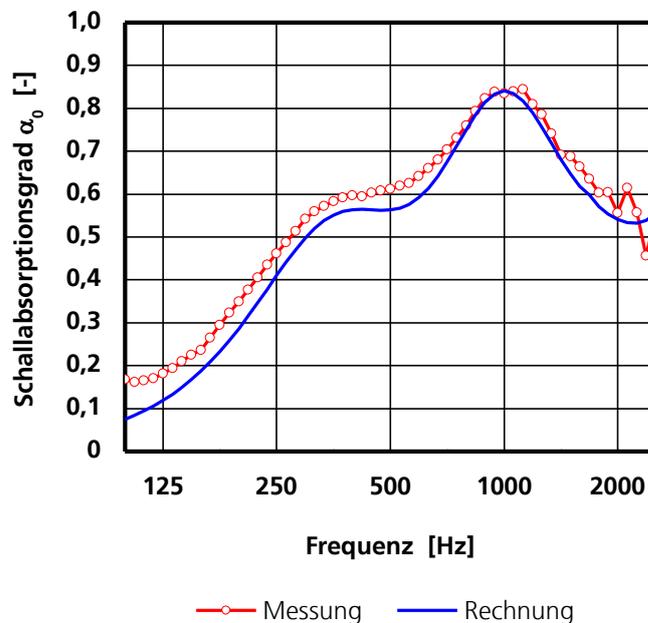


Bild 37:
 Gemessene und berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall des Putzes A3.4 BH auf einer vollflächigen Glasschaumplatte auf einem Streifenaufbau gemäß Bild 36 (Glasschaumstreifen Breite 67 mm, Höhe 50 mm, Periode 200 mm).

6.1.2 Typ 2 und 3

Die Unterdeckensysteme lassen sich akustisch als Schichtung von porösen Absorbieren vor Luft modellieren. Um das Zusammenspiel zwischen den abgelösten Putzen und porösen Trägerplatten zu untersuchen, wurden die Putze auf Platten aus StoSilent Panel, Reapor und BASWaphon aufgelegt. Exemplarisch sind

in Bild 38 Rechnung und Messung eines solchen Aufbaus verglichen. Dabei handelt es sich um den Putz A3.5 FH vor 50 mm StoSilent Panel. Dieses ist aus zwei aufeinander gestellten 25 mm dicken Platten aufgebaut.

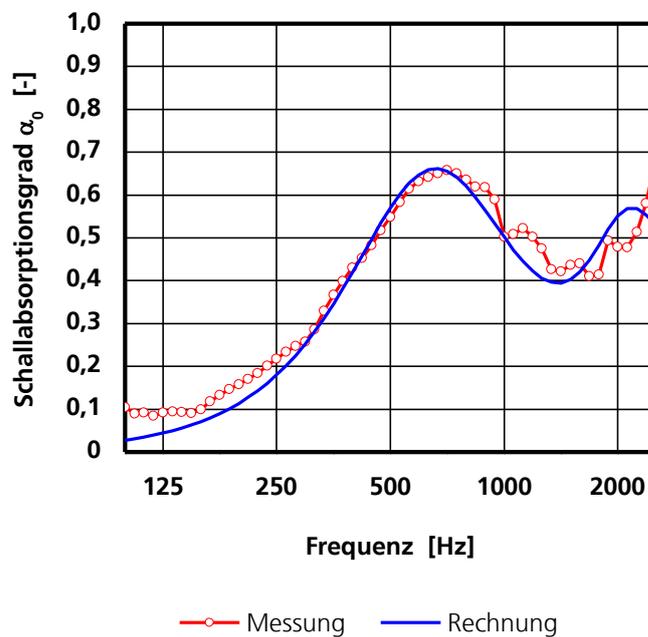


Bild 38:

Gemessene und berechnete Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall des Putzes A3.5 FH auf zwei vollflächigen Platte aus StoSilent Panel mit jeweils 25 mm Dicke.

Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung ist bei allen untersuchten Schichtungen gut. Das Beispiel in Bild 38 ist insofern interessant, als hier drei Platten mit Porositäten unter 50 Prozent gestapelt wurden und man an den Kontaktflächen eine Ebene mit erhöhtem Strömungswiderstand erwarten muss. Dagegen konnten die Messungen der Putze auf dem ursprünglichen Putzträger Flumrock noch nicht zufriedenstellend modelliert werden. Hier wird eine zusätzliche Körperschallanregung des Mineralfaserskeletts durch die Putzplatte vermutet, die das Strömungsabsorber-Modell nicht berücksichtigt.

6.2 Thermische Untersuchungen

6.2.1 Vergleich mit Anforderungen

Die Beeinträchtigung der thermischen Funktion durch die zusätzliche Putzschicht wurde durch Berechnungen mit dem Finite-Elemente-Programm COMSOL untersucht. Hierzu wurden Deckenausschnitte als 2D-Modelle erstellt. Ein Beispiel ist in Bild 39 gezeigt.

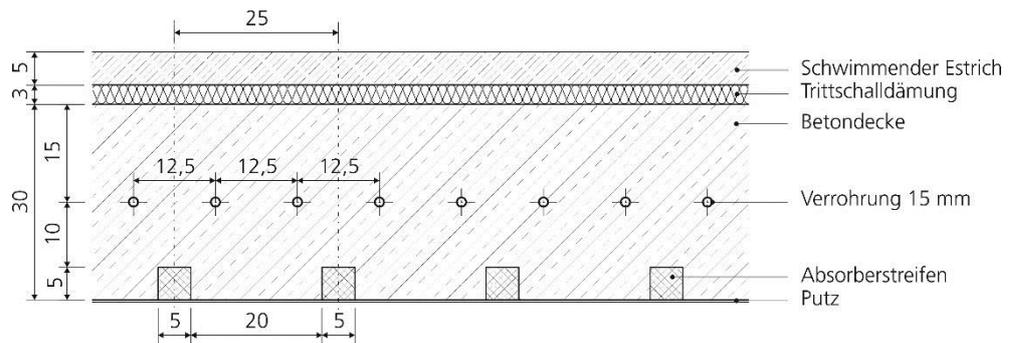


Bild 39:
Geometriemodell eines Deckenausschnitts des Systemtyps 1 mit Putzschicht.

Es wurde folgenden Randbedingungen angesetzt: Deckenoberseite mit adiabatischem Abschluss, Deckenunterseite mit einer Wärmelast in Form eines Wärmestroms sowie einer Temperatur an den Oberflächen der Kühlrohre. Die sinusförmigen Tagesgänge des Wärmestroms und der Kühlrohrtemperatur können Bild 40 entnommen werden.

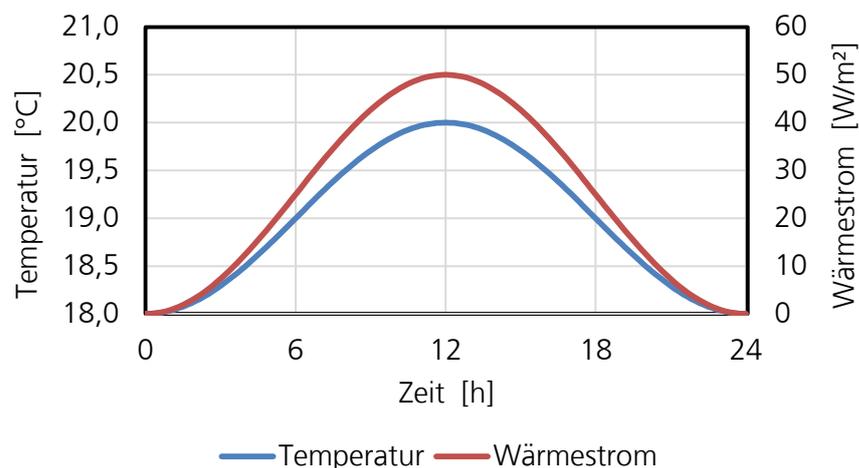


Bild 40:
Tagesgänge der angesetzten Randbedingungen der Temperatur der Kühlrohre und des Wärmestroms an der Deckenunterseite.

Wie in [8] wurde aus der mittlere Oberflächentemperatur der Deckenunterseite ein Wirkungsgrad berechnet und mit dem unverputzten Bauteil verglichen. Hierzu wurden die Bauteiltemperaturen für die unverputzte und verputzte Decken über einen Zeitraum von sieben Tagen in 10 Minuten-Schritten berechnet. Die ersten 48 Stunden wurden für die Mittelwertbildung nicht berücksichtigt, da sie noch Einschwingvorgänge aufweisen. Aus den verbleibenden 120 Stunden wurde zunächst ein Tagesgang gemittelt. Anschließend wurden die Oberflächentemperaturen der verputzten Decke zeitschrittweise mit denen der unverputzten Decke ins Verhältnis gesetzt. Diese Verhältnisse wurden abschließend zu einem Wirkungsgrad bzw. einer prozentualen Verschlechterung gemittelt.

Bei der Wärmeleitfähigkeit der Putze und Absorberstreifen wurde eine Temperaturabhängigkeit berücksichtigt, da sich die Temperaturen in diesen Bauteilen deutlich von der üblichen Mitteltemperatur von 10°C unterscheiden. Für die Putze wurden aus vorliegenden Messungen für FH und BH bei 10, 20, 30 und 40°C Mitteltemperatur die linearen Regressionen in Tabelle 6 gewonnen. Für das Absorberstreifen-Material Reapor wurde eine entsprechende Regression aus Messungen bei ca. 11, 20 und 29°C berechnet. Für die restlichen Materialien wurden konstante Werte bei 10°C Mitteltemperatur angesetzt.

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]			
	Regression	Mitteltemperatur		
		10 °C	20 °C	30 °C
Reapor	$\lambda(\vartheta) = 0,0013 \cdot \vartheta + 0,0753$	0,088	0,101	0,114
Putz BH	$\lambda(\vartheta) = 0,0022 \cdot \vartheta + 0,1305$	0,153	0,175	0,197
Putz FH	$\lambda(\vartheta) = 0,0075 \cdot \vartheta + 0,4148$	0,490	0,565	0,640

Tabelle 6:
Wärmeleitfähigkeiten λ der Putze und Absorberstreifen in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur ϑ in Grad Celsius.

Für die Putzschichten wurde außerdem eine Dickenabhängigkeit berücksichtigt. Messwerte im Plattengerät erfolgen an Schichtdicken von mindestens 20 mm. Aus [11] wurde die Dickenabhängigkeit einer porösen transparenten Schicht übernommen. Die bei 20 mm Schichtdicke gewonnenen Werte in Tabelle 6 werden entsprechend Bild 41 reduziert.

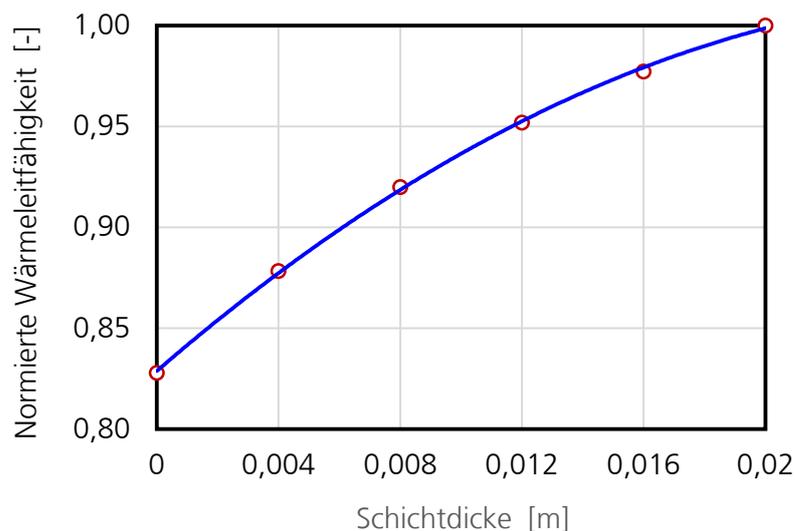


Bild 41:
Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit mit von der Schichtdicke als auf den Messwert bei 20 mm Schichtdicke normierte Wärmeleitfähigkeit.

Zunächst wurden Wirkungsgrade für den Systemtyp 1 mit Putzen BH und FH in 5 mm Dicke berechnet. Beispiele für Temperaturverteilungen sind in Bild 42 gezeigt. Die resultierenden Tagesgänge der Oberflächentemperatur sind in Bild 44 mit denen der unverputzten Streifendecke sowie einer unverputzten Betondecke ohne Streifen verglichen.

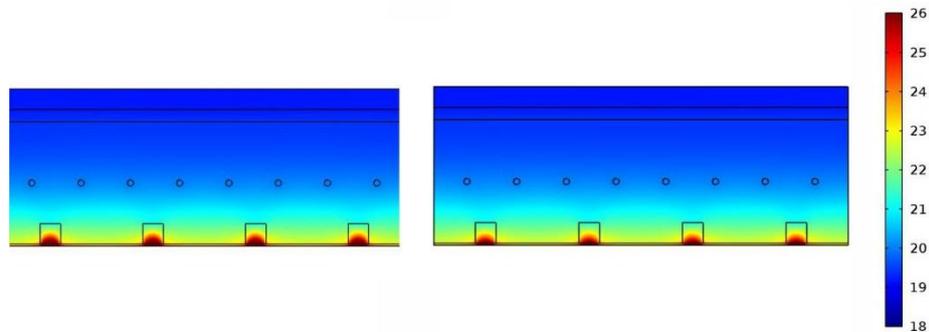


Bild 42:
Verteilungen der simulierten Bauteiltemperatur in Grad Celsius nach 156 Stunden (12 Uhr mittags). Putz BH (links) und FH (rechts) mit 5 mm Dicke.

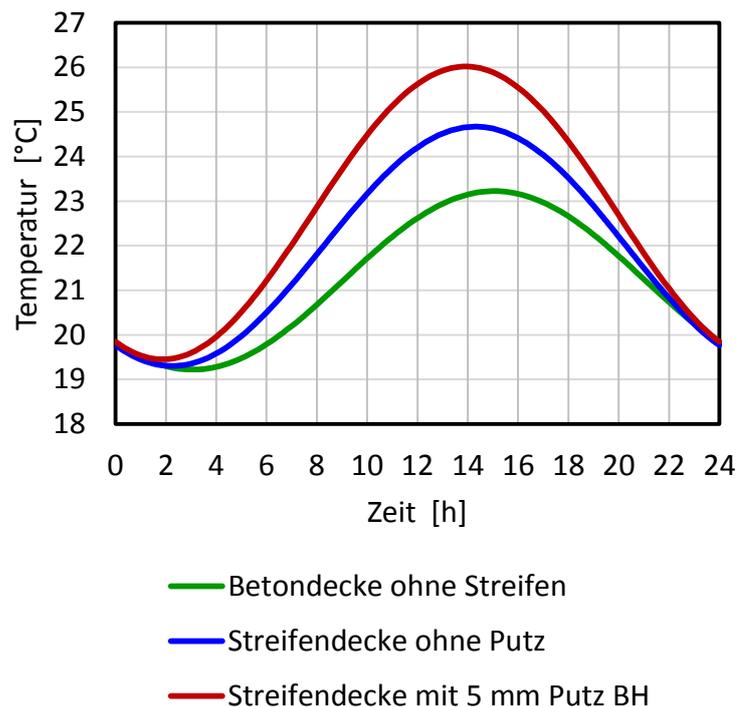


Bild 43:
Tagesgang der mittleren Oberflächentemperatur mit Putz BH mit 5 mm Dicke im Vergleich zur unverputzten Streifendecke und zur Betondecke ohne Streifen.

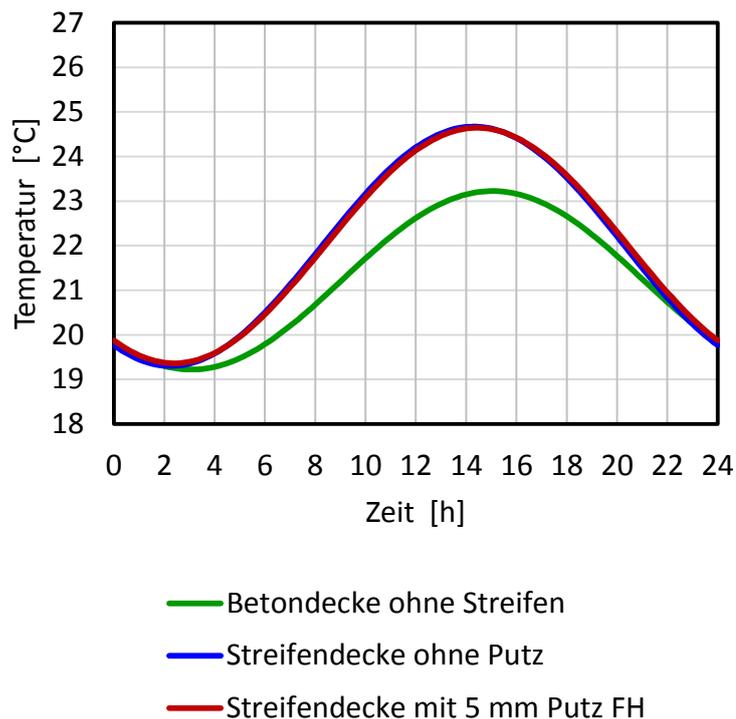


Bild 44:

Tagesgang der mittleren Oberflächentemperatur mit Putz FH mit 5 mm Dicke im Vergleich zur unverputzten Streifendecke und zur Betondecke ohne Streifen.

Die Wirkungsgrade betragen für BH 96,7 Prozent (3,3 Prozent Verschlechterung gegenüber der unverputzten Streifendecke) und für FH 99,9 Prozent (0,1 Prozent Verschlechterung). Mit allen untersuchten Putzen ist die Anforderung aus Abschnitt 1.2 bei üblichen Schichtdicken erfüllt.

6.2.2 Einfluss der Schichtdicke

Die folgenden Rechnungen sollten klären, ob sich gravierende Vor- oder Nachteile aus der Wahl der Schichtdicke ergeben. Dazu wurde der Aufbau mit Putz FH aus Abschnitt 396.2.1 variiert, der bei 5 mm Schichtdicke praktisch keine Veränderung des Wirkungsgrades aufweist.

Um den Einfluss der Schichtdicke separat zu untersuchen, wurde die angesetzte Wärmeleitfähigkeit bei 10°C Mitteltemperatur und 20 mm Schichtdicke entsprechend variiert, d.h. bei einer Verdopplung der Schichtdicke wurde diese Wärmeleitfähigkeit halbiert. In der Simulation wurden dann die Korrekturen für abweichende Temperaturen gemäß Tabelle 6 und abweichende Schichtdicken gemäß Bild 41 berücksichtigt. Für die Putzschichten der untersuchten Varianten ergeben sich also grob konstante Wärmedurchlasskoeffizienten (Quotient aus Wärmeleitfähigkeit und Schichtdicke).

Das Ergebnis für vier Schichtdicken ist Bild 45 als prozentuale Verschlechterung zur unverputzten Streifendecke eingetragen. Neben der Randbedingung für den Wärmestrom wie in Bild 40 angegeben (hier als 50 W/m² bezeichnet), ist zusätzlich ein vergleichbarer sinusförmiger Tagesgang mit einem Maximalwert von 30 W/m² angesetzt worden.

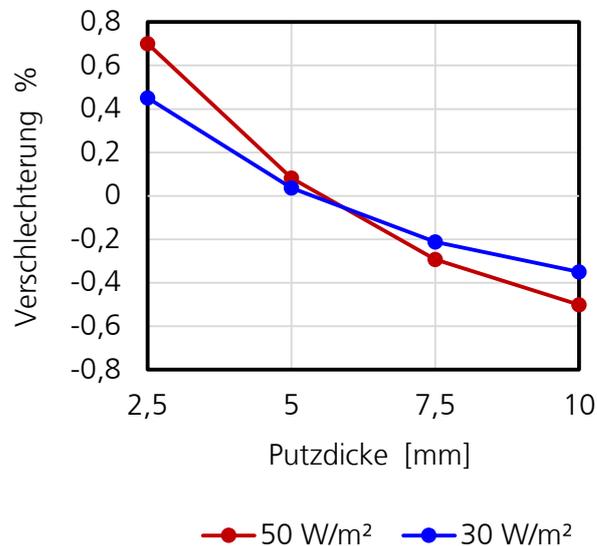


Bild 45:

Prozentuale Verschlechterung zur unverputzten Streifendecke von Putzen mit unterschiedlichen Schichtdicken und annähernd gleichen Wärmedurchlasskoeffizienten.

Bild 45 zeigt, dass die Schichtdicke selbst einen Einfluss auf den Wirkungsgrad hat. Dickere Schichten führen bei gleichen Wärmedurchlasskoeffizienten zu gleichmäßigeren und im Mittel niedrigeren Oberflächentemperaturen. Aus den Temperaturverteilungen in Bild 46 ist der ausgleichende Effekt im Bereich der Absorberstreifen sichtbar. Bei üblichen Putzdicken beträgt die Änderung des Wirkungsgrads jedoch unter einem Prozent, sodass praktisch kein Optimierungspotential über die Schichtdicke besteht.

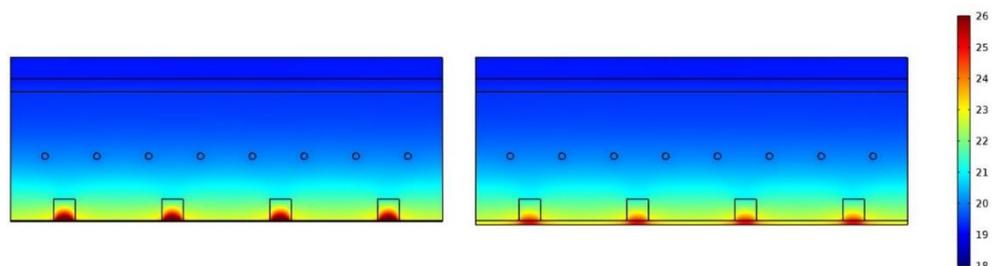


Bild 46:

Verteilungen der simulierten Bauteiltemperatur in Grad Celsius nach 156 Stunden (12 Uhr mittags). Putz FH mit halbiertes Wärmeleitfähigkeit und 2,5 mm

Schichtdicke (links) sowie mit verdoppelter Wärmeleitfähigkeit und 10 mm Schichtdicke (rechts).

6.2.3 Einfluss der Wärmeleitfähigkeit

Im Folgenden ist der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Putzmaterials dargestellt. Hierzu wurde die Variante mit 5 mm dicken Putz FH variiert. Die Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C Mitteltemperatur und bei 20 mm Schichtdicke ist mit den in Bild 47 gezeigten Vielfachen variiert. Auch hier wurden dann die Korrekturen für abweichende Temperaturen gemäß Tabelle 6 und abweichende Schichtdicken gemäß Bild 41 berücksichtigt. Die Wärmekapazität und Rohdichte sind konstant gehalten. Bild 41 zeigt die prozentuale Verschlechterung im Vergleich zur unverputzten Streifendecke.

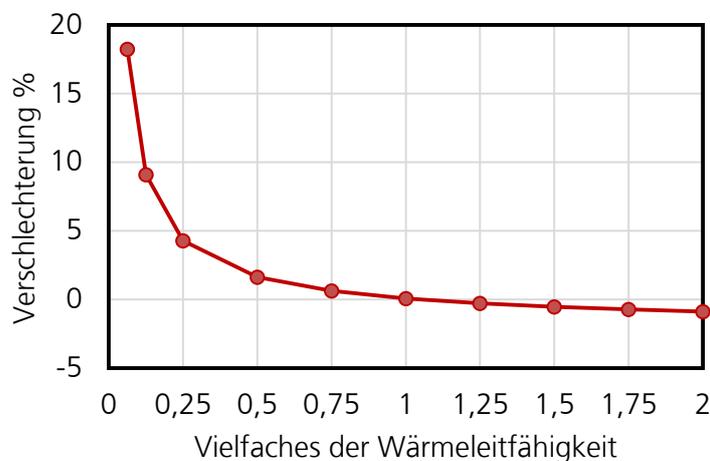


Bild 47:

Prozentuale Verschlechterung zur unverputzten Streifendecke von Putzen mit 5 mm Dicke und Wärmeleitfähigkeiten als Vielfache des Wertes von Putz FH.

Bild 47 zeigt, dass höhere Wärmeleitfähigkeiten als die von Putz FH mit $0,49 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ bei 5 mm Schichtdicke zu einer Verbesserung des Wirkungsgrades führen. Diese liegt jedoch bei einer Verdopplung der Wärmeleitfähigkeit noch unter einem Prozent.

Bei sehr geringen Leitfähigkeiten verschlechtert sich der Wirkungsgrad dagegen deutlich. Die Abhängigkeit ist nicht linear. Bei Putz BH mit $0,153 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, also etwa der 0,31 fachen Wärmeleitfähigkeit von Putz FH, ergibt sich eine Verschlechterung von 3,3 Prozent. Selbst wenn das Absorberstreifen-Material Repor mit $0,088 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, also dem 0,18-fachen von Putz FH, als Putzmaterial angesetzt wird, verschlechtert sich der Wirkungsgrad nicht um mehr als 10 Prozent. Unter den hier angesetzten Randbedingungen und mit einer Schichtdicke von 5 mm ist erst bei kleineren Werten als $0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ mit einer Verschlechterung von über 10 Prozent zu rechnen. Bis zu diesem Wert sind die Anforderungen aus Abschnitt 1.2 demnach hier eingehalten.

7 Empfehlung zur Wahl des Putzsystems

Aus thermischer Sicht ist, wie in Abschnitt 6.2 dargestellt, der Wärmedurchlasskoeffizient ausschlaggebend. Dieser wird immer durch die Wärmeleitfähigkeit des porösen Putzes begrenzt werden. Auch bei Systemtyp 1 gibt es daher kaum eine Möglichkeit, den Wirkungsgrad durch Erhöhung der Schichtdicke zu verbessern. Die Putzschicht sollte daher auf die minimale bautechnisch erforderliche Dicke eingestellt werden und die Wärmeleitfähigkeit sollte möglichst gering sein. Da porosierte Zuschläge akustisch keine Vorteile gezeigt haben, wird empfohlen, die Putze nur aus massivem Granulat aufzubauen.

Aus akustischer Sicht ist anzustreben, die offene Volumenporosität bei etwa 40 Prozent einzustellen. Höhere Werte haben keinen praktischen Vorteil. Außerdem ist der spezifische Strömungswiderstand der Schicht optimal anzupassen. Für die verwendete Schichtdicke ergibt sich daraus ein optimaler längenbezogener Strömungswiderstand des Putzmaterials. Für den Systemtyp 1 ist dieser identisch mit dem des Absorberstreifen-Materials. Für Systemtyp 2 und 3 variiert er in einem weiten Bereich, je nach Abhängöhe der Decke und des Plattenmaterials. Er lässt sich für die jeweiligen Aufbauten wie in Abschnitt 3.2 berechnen.

Massive Granulate vorausgesetzt, lässt sich der Strömungswiderstand über einen weiten Bereich über die Korngrößen der Zuschläge einstellen. Die erforderlichen Granulatdurchmesser lassen sich wie folgt abschätzen:

In erster Näherung werden die Zuschlagspartikel als Kugeln mit einem konstanten mittleren Durchmesser angenommen. In [12] ist ein Ausdruck für den Strömungswiderstand Ξ einer zufällig verteilten Schüttung aus Kugeln gleichen Durchmessers d angegeben:

$$\Xi = \frac{36\eta\kappa_K}{d^2} \frac{(1 - \sigma_V)^2}{\sigma_V^3}$$

mit σ_V : offene Volumenporosität
 η : dynamische Viskosität von Luft
 κ_K : empirischer Parameter;
für Kugeln gleichen Durchmessers zwischen 4,5 und 5,2.

Damit wurde für Putz FH die mittlere Korngröße abgeschätzt. Dazu wurde der Mittelwert der gemessenen Strömungswiderstände (120 kPa s/m²) verwendet. Die Porosität ist aus den drei Anpassungen an die Messungen im Kundt'schen Rohr (0,36 vgl. Tabelle 3) gemittelt. Damit ergibt sich ein mittlerer Durchmesser von ca. 0,5 mm (vgl. Bild 48). Das verwendete Granulat hat nach Augenschein etwa diese Abmessungen.

In Bild 48 ist der Bereich der resultierenden längenbezogenen Strömungswiderstände für die Porosität von 0,36 und für $4,5 \leq \kappa_K \leq 5,2$ als graue Fläche über

dem Durchmesser aufgetragen. Bild 48 zeigt, dass sich auch mit ausschließlich massiven Granulaten ein sehr weiter Bereich von Strömungswiderständen erzeugen lässt.

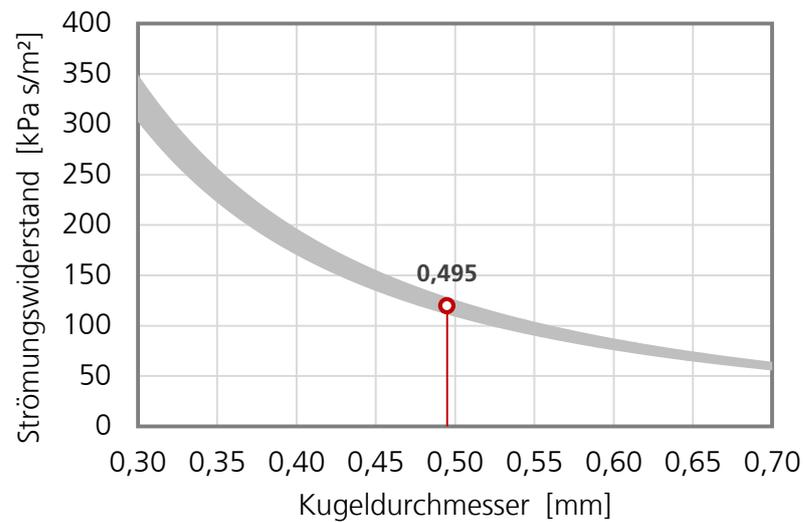


Bild 48:

Längenbezogene Strömungswiderstände einer Kugelschüttung in Abhängigkeit vom Kugeldurchmesser. Rot markiert ist die Näherung für Putz FH.

Die Näherungsformel wurde mit einer GeoDict-Rechnung nachvollzogen. Für eine zufällig verteilte Kugelschüttung mit 36 Prozent Porosität und 0,495 mm Kugeldurchmesser (Bild 49) wurde ein Strömungswiderstand von 112 kPa s/m^2 berechnet. Der Wert liegt innerhalb des Bereichs der Formel. Auch dies ist ein Indiz dafür, dass die Abweichungen der GeoDict-Rechnungen zu den an die Messungen gefitteten Werte in Abschnitt 5.4 von den unzureichenden Geometriedaten aus den Tomografien herrühren.

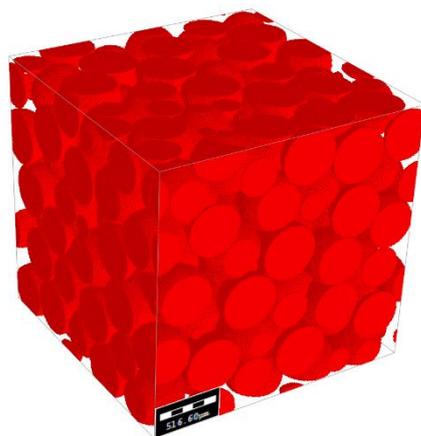


Bild 49:

Geometriemodell in GeoDict der Näherung für Putz FH als der Kugelschüttung mit Durchmessern von 0,495 mm und einer Porosität von 36 Prozent.

Empfehlung für Systemtyp 1:

Es wird davon ausgegangen, dass eine Porosität von über 40 Prozent mit massiven Zuschlägen kaum zu erreichen ist. Damit lässt sich aus Bild 48 ableiten, dass ein Strömungswiderstand im Bereich des Absorberstreifen-Materials zu großen Korndurchmessern führen wird, wenn der Putz aus ausschließlich massiven Zuschlägen aufgebaut wird. Um den Putz an Reapor-Streifen anzugleichen (ca. 30 kPa s/m² bei 1 kHz) wären Korndurchmesser von ca. 1 mm erforderlich.

Es wird daher empfohlen, die Putzdicke auf das bautechnische Minimum zu begrenzen und die Korngrößen nur soweit zu erhöhen, wie es Verarbeitung, Festigkeiten u.ä. erlauben. Dadurch sollte die thermische Leistungsfähigkeit etwa im Bereich des untersuchten Putzes FH sein. Das Schallabsorptionsvermögen liegt dann zwischen dem untersuchten Putz FH und dem idealen Fall mit einem Putzmaterial, das identisch mit den Absorberstreifen ist. Der Bereich ist in Bild 50 als Absorptionsgrad bei diffusem Schalleinfall gezeigt.

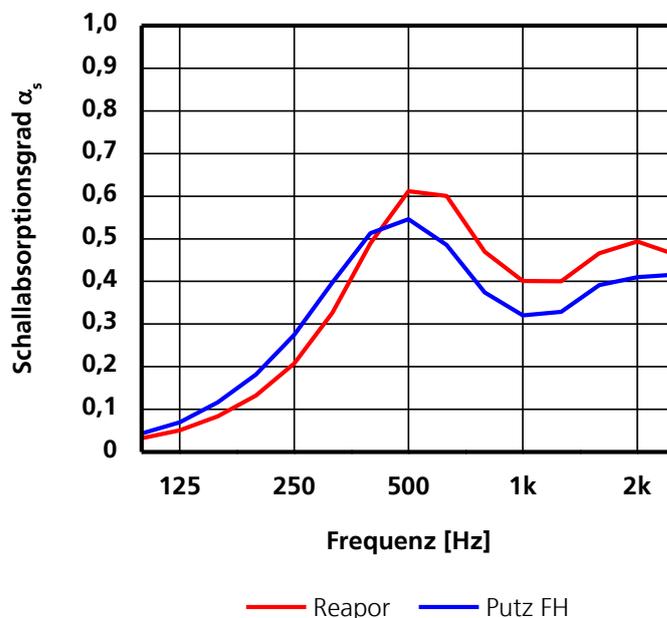


Bild 50:

Berechnete Schallabsorptionsgrade bei diffusem Schalleinfall einer Streifendecke mit 3 mm dicker Putzschicht aus Reapor und aus Putz FH.

Empfehlung für Systemtyp 2 und 3:

Die optimalen Strömungswiderstände für diese Systemtypen liegen deutlich höher als bei Systemtyp 1. Sie können daher mit massiven Zuschlägen allein erzielt werden, deren Durchmesser deutlich unter einem Millimeter liegen. Für den thermisch aktivierten Systemtyp 2 wird daher die ausschließliche Verwendung

massiver Zuschläge empfohlen. Für Systemtyp 3 können auch porösierte Zuschläge zum Einsatz kommen. Ein akustischer Vorteil kann aus dieser Untersuchung jedoch nicht abgeleitet werden.

8 Zusammenfassung

Der Einfluss von Putzschichten auf das Schallabsorptionsvermögen und den thermischen Wirkungsgrad von Deckensystemen wurde untersucht. Dazu wurden drei Systemtypen betrachtet, thermoaktive Betondecke mit Absorberstreifen (1), abgehängte Kühldecke (2) und nicht aktivierte Akustik-Unterdecke. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für die Nutzungen „kommunikationsintensiv“ und „Mehrpersonenbüro“ wurden für die jeweiligen Systemtypen zu erreichende Absorptionsspektren festgelegt. Für die thermische Leistungsfähigkeit der Typen 1 und 2 wurde eine maximale Verschlechterung des Wirkungsgrads von 10 Prozent der verputzten Systeme im Vergleich zu den unverputzten festgelegt.
- Die dickschichtigen Putze konnten mit dem Modell des homogenen Strömungsabsorbers mit guter Übereinstimmung zu den Messungen theoretisch beschrieben werden. Für den Systemtyp 1 ist die erforderliche Erweiterung des Rechenmodells auf abdeckende Putzlagen erarbeitet und als Programm implementiert worden.
- Aus einer rechnerischen Parametervariation ergab sich, dass offene Volumenporositäten über 40 Prozent bei allen Systemtypen die Absorptionsspektren nicht mehr nennenswert verbessern. Außerdem wurden optimale Strömungswiderstände für die jeweiligen Aufbauten ermittelt.
- Ein großer Teil der messtechnischen Untersuchungen diente der Auswahl einer geeigneten Trägerplatte für die Putze. Als eine praktikable Methode hat sich die Untersuchung der reinen Putzschichten nach Ablösen von einer Mineralfaserplatte erwiesen. Vier Probenserien mit einer größeren Bandbreite an Putzformulierungen, Applikationsverfahren und Schichtdicken wurden gemessen.
- Von drei Probenserien wurden mikrotomografische Aufnahmen erstellt und analysiert. Für einen Teil der Putze wurde die Porengeometrie durch parametrisierte Modelle synthetisiert. Mit diesen Geometriemodellen wurden die akustischen Verhältnisse anschließend simuliert. Die Simulationmethode hat sich als grundsätzlich brauchbar erwiesen. Die Bestimmung der Geometriedaten über Mikrotomografien hat sich jedoch insbesondere bei Putzsystemen mit mehreren unterschiedlichen Zuschlagstoffen als nicht praktikabel erwiesen.

- Es wurden Untersuchungen an Funktionsmuster der Systemtypen durchgeführt. Dabei zeigen Messungen im Kundt'schen Rohr und entsprechende Berechnungen eine gute Übereinstimmung.
- Der Verschlechterung des thermisches Wirkungsgrads im Vergleich zu unverputzten Aufbauten wurde mit Finite Elemente-Berechnungen untersucht. Bei üblichen Schichtdicken erreichen alle untersuchten Systeme die angestrebten Anforderungen.
- Abschließend konnten Empfehlungen zur Wahl oder zum Aufbau des Putzsystems hinsichtlich Schichtdicke sowie Abmessungen und Porosierung der Zuschläge für die jeweiligen Deckentypen erarbeitet werden.

9 Literatur

- [1] Zuwendungsantrag für Forschungsprojekte im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“: Marktgerechte Akustikputzsysteme mit hoher thermischer Effizienz. Eingereicht von der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. April 2010
- [2] DIN 18041: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen. Mai 2004
- [3] DIN EN ISO 11654: Akustik – Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden. Juli 1997
- [4] VDI 2569: Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro. Januar 1990
- [5] Mechel, F. P.: Schallabsorber, Bd.2, Innere Schallfelder, Strukturen. Stuttgart, Hirzel, 1995
- [6] Johnson, D. L.; Koplik, J.; Dashen, R.: Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. J. Fluid Mechanics, 176 (1987), 379-402
- [7] Allard, J. F.; Atalla, N.: Propagation of Sound in Porous Media. Modeling Sound Absorbing Materials. Wiley, 2009
- [8] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: Abschlussbericht: Integrale Akustiksysteme für thermisch aktive Betonbauteile - Akustik in Betondecken. Durchgeführt im Auftrag des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung im Rahmen der Forschungsinitiative „ZukunftBau“, Z 6 – 10.08.18.7- 07.35/ II 2 – F20-07-41. Juni 2009.
- [9] DIN EN ISO 10534-2: Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren. Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion. Oktober 2001

- [10] DIN EN 29 053: Akustik - Materialien für akustische Anwendungen. Bestimmung des Strömungswiderstandes. Mai 1993
- [11] Zeitler, M.: Allgemein gültiges Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe und Stoffschichten. Dissertation, Universität Essen, 2000
- [12] Teuber, S.: Schallausbreitung in porösen Absorbern. Messung und Modellierung akustischer Größen von Modellsubstanzen für Sand. Dissertation Universität Oldenburg, 1994

10 Anhang

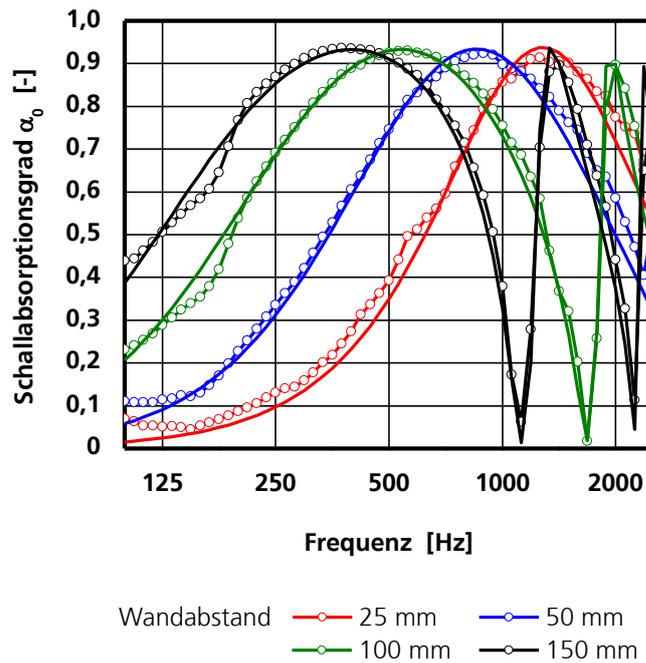


Bild A1:
 Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A3.5 FH vor unterschiedlichen Luftschichten.

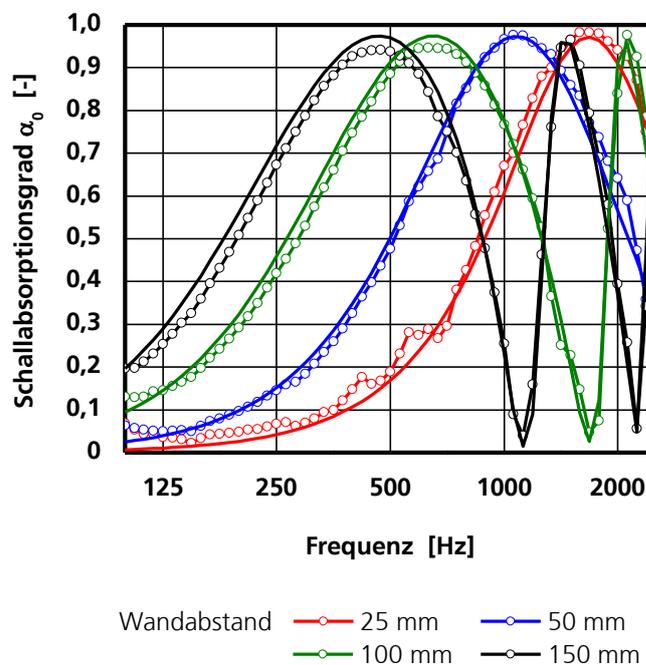


Bild A2:
 Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien)

Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A3.6 WHa vor unterschiedlichen Luftschichten.

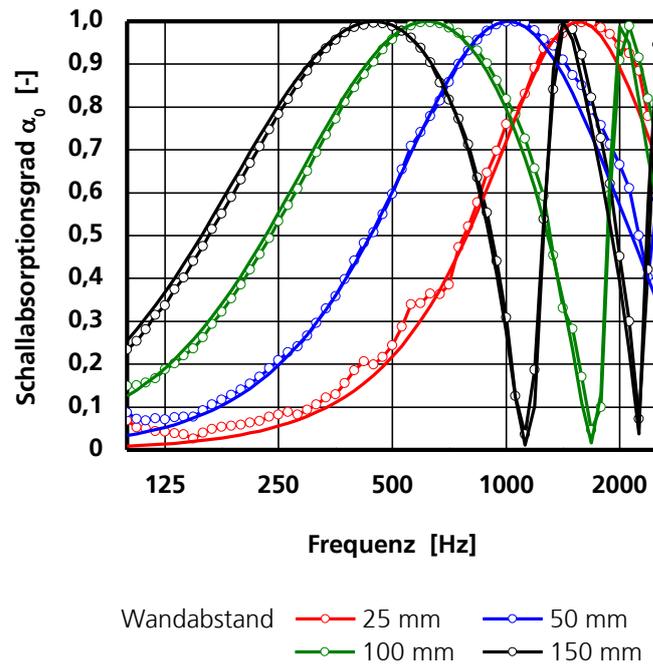


Bild A3:
Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A3.7 WHb vor unterschiedlichen Luftschichten.

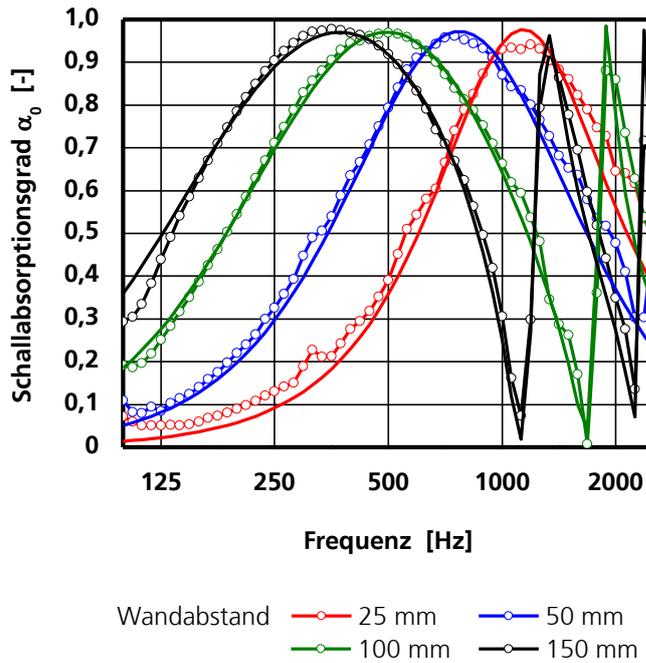


Bild A4:
Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A4.1.1 BH vor unterschiedlichen Luftschichten.

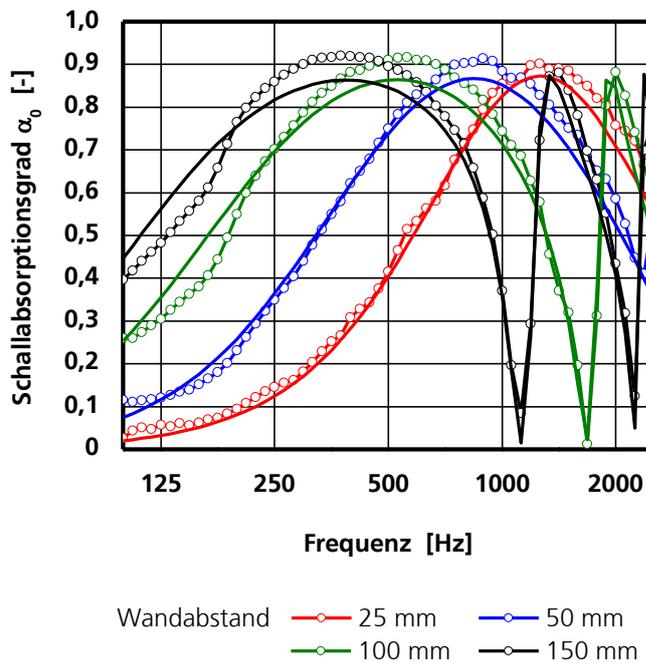


Bild A5:
Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A4.1.2 FH vor unterschiedlichen Luftschichten.

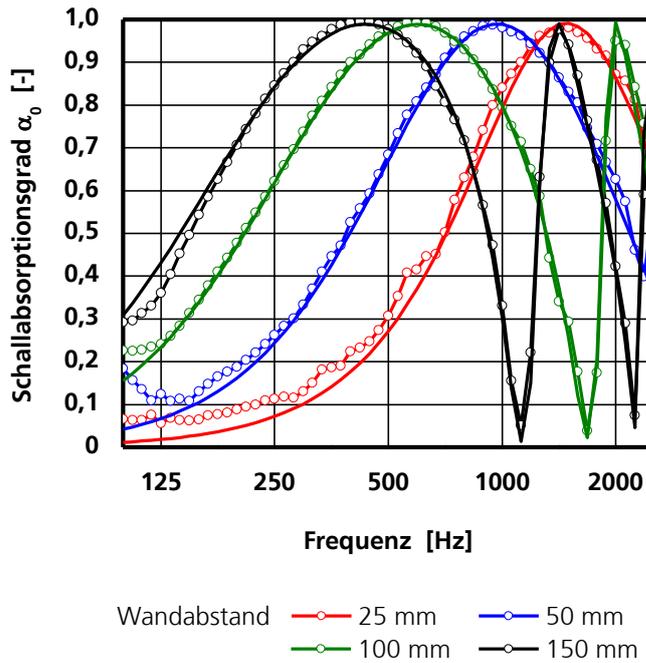


Bild A6:
Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A4.1.3 WHa vor unterschiedlichen Luftschichten.

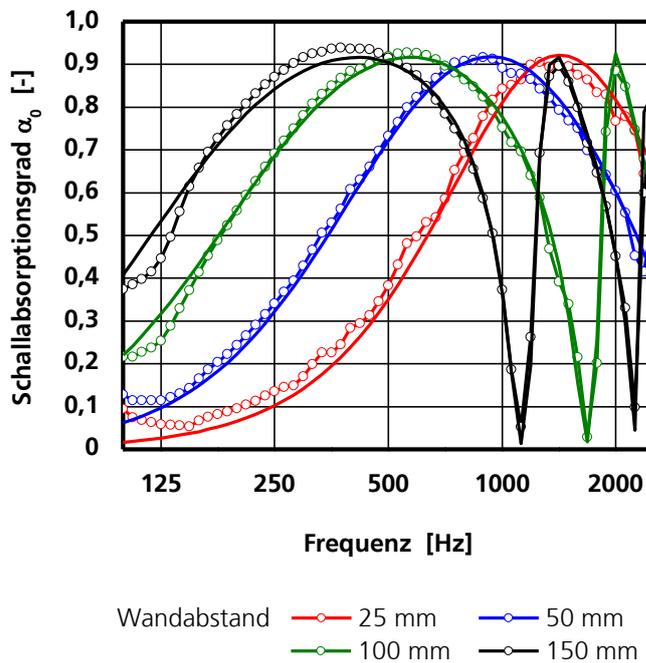


Bild A7:
Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A4.1.4 WHb vor unterschiedlichen Luftschichten.

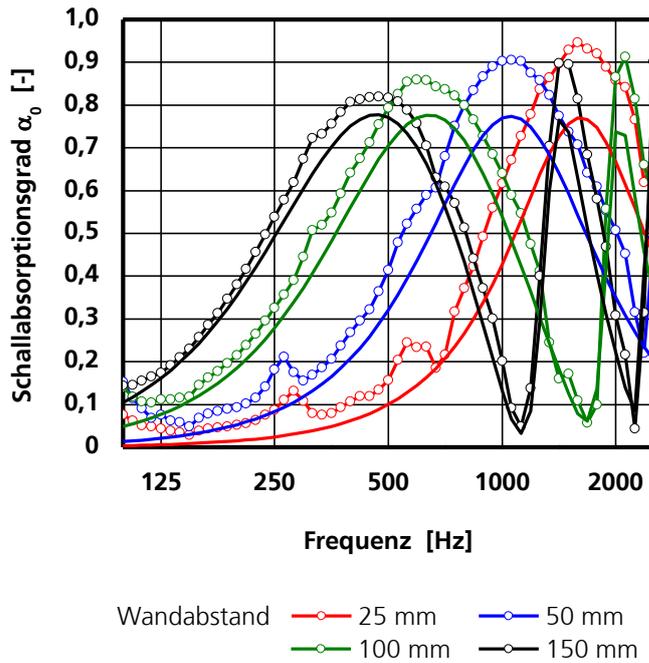


Bild A8:
Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A4.2.1 BH vor unterschiedlichen Luftschichten.

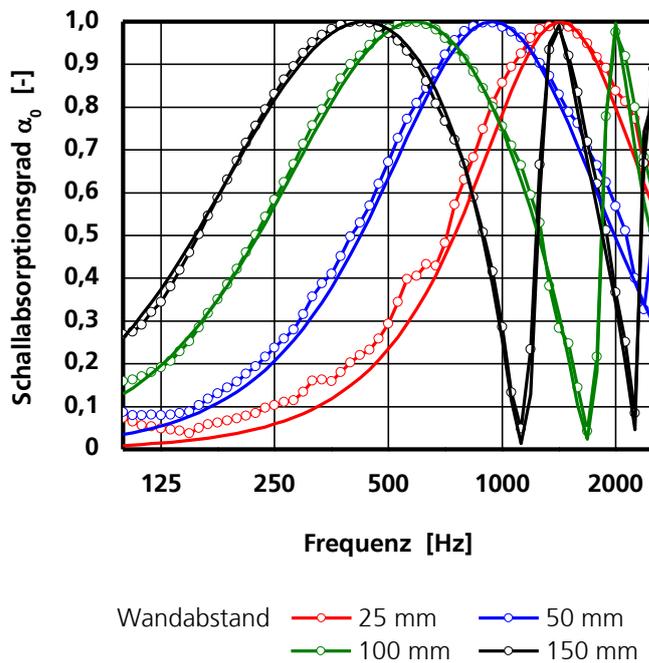


Bild A9:
Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A4.2.2 FH vor unterschiedlichen Luftschichten.

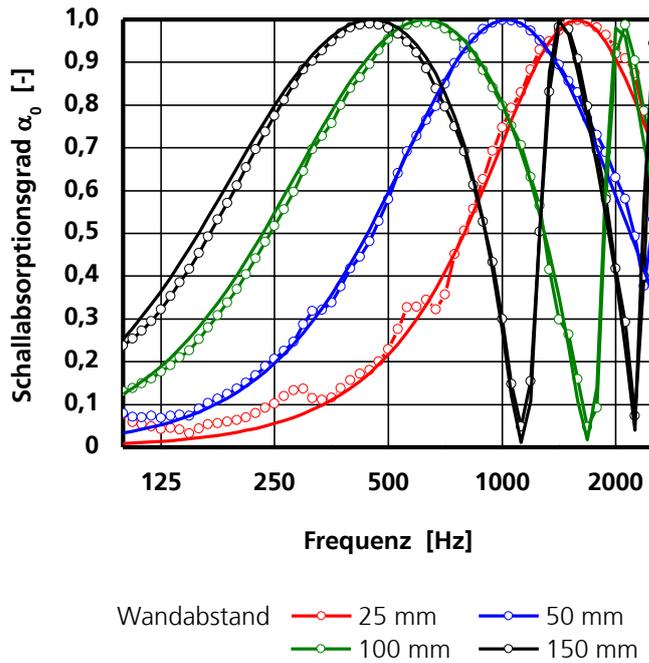


Bild A10:
Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A4.2.3 WHa vor unterschiedlichen Luftschichten.

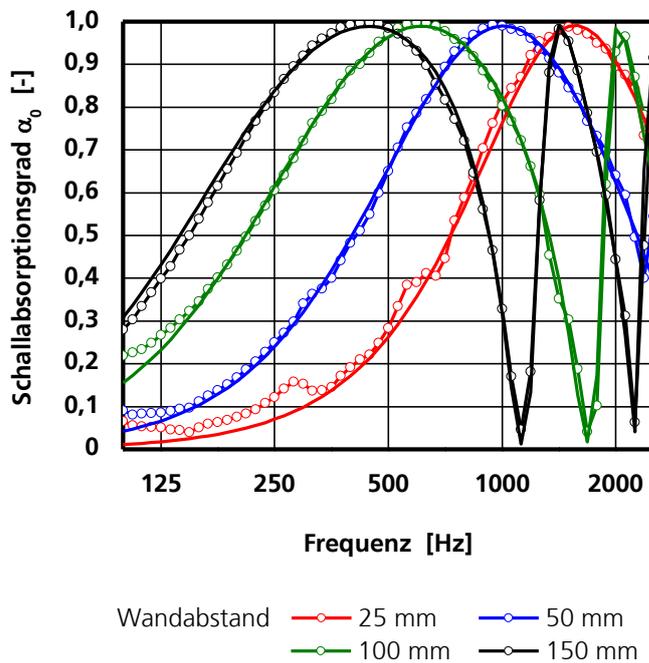


Bild A11:
Vergleich der gemessenen (Punkte) und berechneten (durchgezogene Linien) Schallabsorptionsgrade der Putzprobe A4.2.4 WHb vor unterschiedlichen Luftschichten.