

»Die Wahre Schallabsorption«

DI(FH) Clemens Häusler, MSc
Bauphysik Kalwoda
An der Schleuse 2/2, A-2511 Pfaffstätten
info@bauphysik.at

1.	Einleitung	1
2.	Berechnung poröser Absorber.....	1
2.1	Absorptionsgrad	2
2.2	Poröse Schicht	3
2.3	Folie (dichte Folie, Vlies, Gewebe)	4
2.4	Lochplatten.....	4
2.5	Lochplatte mit Folie	5
2.6	Zentrales Netzwerk	5
2.7	Strahlungsimpedanz	6
2.8	Praktische Umsetzung	6
2.9	Grenzen der Berechnung.....	8
3.	Vergleich Rechnung - Messung.....	9
3.1	Senkrechter Schalleinfall - Messung Impedanzrohr	9
3.2	Diffuser Schalleinfall - Messung Hallraum	13
4.	Praktische Auswirkungen	18
4.1	Bewerteter Absorptionsgrad.....	18
4.2	Nachhallzeit.....	18
4.3	Entwicklung	19
5.	Zusammenfassung	20
	Literaturverzeichnis	20

1. Einleitung

Die Nachhallzeit ist das älteste und bekannteste raumakustische Kriterium. Die Absorption ist die wichtigste - und in der Praxis meist die einzige - akustische Eingangsgröße bei der Berechnung der Nachhallzeit.

Anforderungen an die Nachhallzeit - inklusive zulässiger Toleranzen - und deren Berechnung sind akustischer Alltag. In der Praxis verwenden Planer die Absorption von im Hallraum geprüften Konstruktionen bzw. Angaben aus der Literatur, welche auf Messwerte aus dem Hallraum beruhen.

Aber wie genau sind solche Messwerte? Die Berechnung der Absorption und der Vergleich zu den Messwerten kann Aufschluss über »Die Wahre Schallabsorption« bringen.

Beim Vergleich zwischen Messung im Hallraum und Berechnung wird in beiden Fällen ein perfekt diffuses Schallfeld vorausgesetzt. Auf die Problematik unzureichender Diffusität in realen Räumen und dem zufolge abweichender Absorption in der Praxis wird nicht eingegangen.

Der nachfolgende Beitrag beschäftigt sich ausschließlich mit porösen Absorbern, der mit Abstand größten Menge an Akustikverkleidungen in der Praxis.

2. Berechnung poröser Absorber

Die Berechnung poröser Absorber inklusive Folie/Vlies und Lochplatten wird von F.P. Mechel in seiner Trilogie »Schallabsorber« Band I bis III [1, 2, 3] beschrieben. Band III (Seite 47 bis 64) beinhaltet ein allgemein gültiges Rechenschema für mehrlagige Absorber, welches in Folge erläutert wird.

In der Literatur wird oft die normierte Impedanz verwendet, d.h. die jeweilige Impedanz wird durch die Impedanz der Luft Z_0 dividiert. Grundsätzlich spielt es keine Rolle, ob die Impedanz oder die normierte Impedanz verwendet wird, nur beim Mischen der beiden Größen ist Vorsicht geboten!

2.1 Absorptionsgrad

Der Absorptionsgrad α ist das Verhältnis der absorbierten zur auftreffenden Schalleistung. Er steht in enger Beziehung zum Reflexionsfaktor r , dem Verhältnis des Schalldrucks der reflektierten zur einfallenden Schallwelle an der Oberfläche.

$$\alpha_0 = 1 - |r|^2 = 1 - \left| \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 \quad (1)$$

α_0 ... Absorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall
 Z ... Eingangsimpedanz
 ρ_0 ... Dichte der Luft, ca. 1,2 kg/m³
 c_0 ... Schallgeschwindigkeit in der Luft, ca. 343 m/s
 Z_0 ... Impedanz der Luft, ca. 413,3 kg/sm²

Bei schrägem Schalleinfall muss der Schalleinfallswinkel ϑ gemäß Gleichung 2 berücksichtigt werden.

$$\alpha_\vartheta = 1 - \left| \frac{Z - Z_0 / \cos \vartheta}{Z + Z_0 / \cos \vartheta} \right|^2 = 1 - \left| \frac{Z \cos \vartheta - Z_0}{Z \cos \vartheta + Z_0} \right|^2 \quad (2)$$

α_ϑ ... Absorptionsgrad bei schrägem Schalleinfall
 ϑ ... Schalleinfallswinkel

Es ist aber zu beachten, dass auch die Eingangsimpedanz in der Regel winkelabhängig ist. Man unterscheidet zwischen »lokal«, d.h. winkelunabhängig, und »lateral«, d.h. winkelabhängig wirksamen Absorbern. Bei »lokal« wirksamen Absorbern erfolgt die Schallausbreitung im Absorber ausschließlich senkrecht zur Oberfläche, bei »lateral« wirksamen Absorbern auch quer zur Oberfläche.

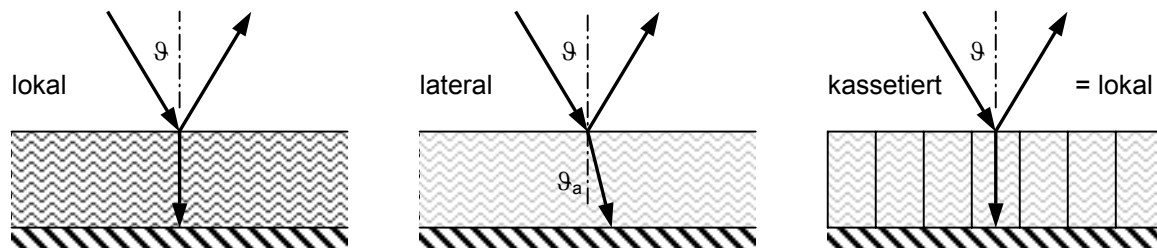


Abbildung 1: »lokal« bzw. »lateral« wirksamer Absorber

Der »lateral« wirksame Absorber ist rechnerisch wesentlich aufwändiger, bzw. kann nicht in allen Fällen berechnet werden. Durch eine Kassetierung des Absorbers kann eine »lokale« Wirkung erzwungen werden, dies kann hilfreich sein um Messung und Rechnung in Einklang zu bringen!

Entscheidend ist die Berechnung für diffusen Schalleinfall, d.h. der Schall fällt aus allen Richtungen mit gleicher Intensität ein. Dies vor allem in Hinblick auf den Vergleich zu Messwerten aus dem Hallraum, in dem die Bedingungen eines diffusen Schallfeldes möglichst gut realisiert werden. Für die numerische Berechnung kann das Integral durch eine Summe angenähert werden.

$$\alpha_d = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha_\vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot d\vartheta \quad (3)$$

$$\alpha_d \approx 2 \frac{\pi/2}{N} \sum_{\vartheta=0}^{\pi/2} \alpha_\vartheta \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \vartheta \quad (4)$$

α_d ... Absorptionsgrad bei diffusem Schalleinfall

2.2 Poröse Schicht

Im Sinne des allgemein gültigen Rechenschemas wird die Impedanz einer porösen Schicht in eine Längsimpedanz und eine Queradmittanz zerlegt:

$$Z_s = Z_a / \cos \vartheta_a \cdot \sinh(\Gamma_a t_a \cdot \cos \vartheta_a) \quad (5)$$

$$G_s = [\cosh(\Gamma_a t_a \cdot \cos \vartheta_a) - 1] / Z_s \quad (6)$$

$$\cos \vartheta_a = \sqrt{1 + (k_0 / \Gamma_a)^2 (1 - \cos^2 \vartheta)} \quad (7)$$

Z_s ...	Längsimpedanz der porösen Schicht
G_s ...	Queradmittanz der porösen Schicht
Z_a ...	Wellenwiderstand (Absorberkennwert)
Γ_a ...	Ausbreitungskonstante (Absorberkennwert)
t_a ...	Dicke des porösen Absorbers
ϑ_a ...	Ausfallswinkel im porösen Absorber
k_0 ...	Wellenzahl, $k_0 = \omega / c_0 = 2 \pi f / c_0$

Im Fall von Luft gilt $Z_a = Z_0$ und $\Gamma_a = j k_0$. Für die Berechnung der Absorberkennwerte (Z_a , Γ_a) von porösen Absorbern gibt es eine Vielzahl von Modellen, z.B.:

- Mineralwolle, Regressionskoeffizienten: [1], Seite 47
- Stein- und Glaswolle, empirische Regressionskoeffizienten [2], Seite 548
- Stein- und Glaswolle G+H, empirisch angepasstes Modell der Spaltkapillare: [2], Seite 561
- Mineralwolle, empirische Regressionskoeffizienten: [4], Seite 467
- Schaumstoff, empirische Regressionskoeffizienten: [4], Seite 468
- Mineralwolle und Schaumstoff nach EN 12354-6 [5], Anhang B
- Glasgranulatplatten, Theorie des homogenen Mediums: [2], Seite 101

Im Fall von Mineralwolle, aber auch für Aluminium bzw. Stahlwolle oder auch für textile Fasern (z.B. Polyesterwolle) und Schaumstoff werden als Eingangsdaten in die Berechnung nur die Dichte und der längenbezogene Strömungswiderstand benötigt. Diese Eingangsdaten werden durch die Absorbervariable E bzw. durch die sogenannte effektive Absorbervariable E_{eff} berücksichtigt:

$$E = \rho_0 f / \Xi \quad (8)$$

$$E_{\text{eff}} = E \cdot \left(1 - j \frac{\rho_0}{\rho_a} \cdot \frac{1}{2 \pi E} \right) \quad (9)$$

E ...	Absorbervariable
E_{eff} ...	effektive Absorbervariable
Ξ ...	längenbezogener Strömungswiderstand
ρ_0 ...	Dichte der Luft
ρ_a ...	Dichte poröser Absorber
f ...	Frequenz
j ...	komplexe Zahl

Die Absorbervariable setzt ein starres Absorberskelett voraus, d.h. der Absorber liegt fest auf (z.B. auf der Rückwand). Die effektive Absorbervariable berücksichtigt ein massegehemmtes Skelett, d.h. die Bewegung des Absorbers wird durch seine Masseträchtigkeit behindert.

Bei der Berechnung von Glasgranulatplatten (Theorie des homogenen Mediums: [2], Seite 101) wird zusätzlich zu Dichte und längenbezogenem Strömungswiderstand noch die Porosität und der Strukturfaktor benötigt. Eine sehr praktische (einfache und schnelle) Methode zur Bestimmung der Eingangsparameter ist die Messung der Absorption bei senkrechtem Schalleinfall (= Impedanzrohr) und eine anschließende Anpassung der Eingangsdaten.

2.3 Folie (dichte Folie, Vlies, Gewebe)

Die Absorption einer schlaffen, dünnen Folie (= dichte Folie, Vlies oder Gewebe) ergibt sich aus der Masse und dem Strömungswiderstand.

$$Z_f = \frac{j\omega m_f \cdot R_f}{j\omega m_f + R_f} \quad (10)$$

Z_f ... Impedanz einer schlaffen, dünnen Folie (= dichte Folie, Vlies oder Gewebe)
 ω ... Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$
 m_f ... flächenbezogene Masse
 R_f ... Strömungswiderstand

Für eine (luft-) dichte schlafe dünne Folie wird der Strömungswiderstand $R_f \gg \omega m_f$ gesetzt. Auf diese Art können dünne Folien, wie sie z.B. zum Einschweißen von Mineralwolle verwendet werden, einfach berücksichtigt werden.

Für eine luftdurchlässiges Vlies oder Gewebe muss der Strömungswiderstand bekannt sein. Eine sehr praktische (einfache und schnelle) Methode zur Bestimmung des Strömungswiderstandes ist die Messung der Absorption bei senkrechtem Schalleinfall (=Impedanzrohr) und einer anschließenden Anpassung der Eingangsparameter.

Um auch starre dünne Schichten zu berücksichtigen (= dünne Platte) muss zusätzlich die um die Biegeelastizität korrigierte Flächenträgheit berücksichtigt werden. Die Winkelabhängigkeit und insbesondere der schmalbandige Frequenzbereich (eine Berechnung in Terzschritten ist nicht fein genug!) erhöht den Rechenaufwand erheblich.

2.4 Lochplatten

Lochplatten werden grundsätzlich als starr angenommen. Im Gegensatz zu einer schlaffen, dünnen Folie ist die Dicke der Lochplatte nicht zu vernachlässigen. Im Sinne des allgemein gültigen Rechenschemas wird die Impedanz - wie auch bei den porösen Schichten - in Längsimpedanz und Queradmittanz zerlegt:

$$Z_{lp} = \frac{1}{\sigma} j \frac{Z_0}{\sin(k_0 d_{lp})} (1 - \cos(k_0 d_{lp})) \quad (11)$$

$$G_{lp} = \frac{\sigma}{1} j \frac{\sin(k_0 d_{lp})}{Z_0} \quad (12)$$

Z_{lp} ... Längsimpedanz der Lochplatte
 G_{lp} ... Queradmittanz der Lochplatte
 σ ... Lochflächenanteil der Lochplatte
 d_{lp} ... Dicke der Lochplatte

Abgesehen von der Impedanz der Lochplatte ist auch die Impedanz der mitschwingenden Luft in den Löchern zu berücksichtigen. Liegt das Lochblech unmittelbar an einer Absorberschicht - ohne dazwischen liegender Luftschicht - so müssen die Absorberkennwerte des porösen Absorbers berücksichtigt werden:

$$Z_m = \frac{1}{\sigma} \cdot \Delta l \cdot \Gamma_a Z_a \quad (13)$$

Z_m ... Impedanz der mitschwingenden Luft in den Löchern der Lochplatte
 Δl ... Mündungskorrektur
 Z_a ... Wellenwiderstand (Absorberkennwert) des anliegenden porösen Absorbers
 Γ_a ... Ausbreitungskonstante (Absorberkennwert) des anliegenden porösen Absorbers

Die Mündungskorrektur ist entsprechend der Lochgeometrie (rundes Loch, quadratische Loch, Schlitz) sowie der Lochanordnung (quadratisch, 45° versetzt, 60° versetzt) zu wählen, z.B. [3] Seite 55, [4] Seite 477 oder [6] Seite 127.

Die Impedanz einer Lochplatte ist unabhängig vom Material der Lochplatte und somit in gleicher Weise gültig für Holz, Metall oder Gipskarton. Die Reibung an den Lochrändern wird hierbei nicht berücksichtigt.

Natürlich ist es auch möglich die Absorption mikroperforierter Platten, d.h. die akustische Wirkung der viskosen Reibung an den Lochrändern, in das Rechenschema zu integrieren.

2.5 Lochplatte mit Folie

Bei der Kombination einer Lochplatte mit einer schlaffen, dünnen Folie (= dichte Folie, Vlies oder Gewebe) addiert sich die Impedanz der Folie bezogen auf den Lochanteil (Z_f/σ) zu der Impedanz der mitschwingenden Luft in den Löchern der Lochplatte (Z_m).

Einen entscheidenden Einfluss hat die Haftung der Folie auf der Lochplatte. Mit Z_f/σ wird ein perfekter Verbund zwischen Lochplatte und Folie vorausgesetzt, die Folie sitzt demnach unmittelbar im Loch. Da die Folie praktisch jedoch vor bzw. hinter der Lochplatte angeordnet wird, ist ein entsprechend größerer Lochanteil - abhängig von der Qualität der Verklebung - zu berücksichtigen.

Die Haftung der Folie hat auch eine Auswirkung auf die rechnerische Masse der Folie. Bei perfektem Verbund schwingen Folie und Platte gemeinsam, d.h. zur Masse der Folie addiert sich die Masse der Lochplatte. Dies gilt ebenso beim Verbund von Folien mit porösen Absorbieren, bei perfekter Haftung erhöht sich die rechnerische Masse der Folie.

2.6 Zentrales Netzwerk

Die Impedanzen der einzelnen Komponenten müssen entsprechend addiert werden. Aus praktischen Gründen empfiehlt sich die physikalische Anordnung von Folie – Lochblech – Folie – Absorbierschicht – Folie – Lochblech – Folie – Absorbierschicht – usw. (siehe Abbildung 2):

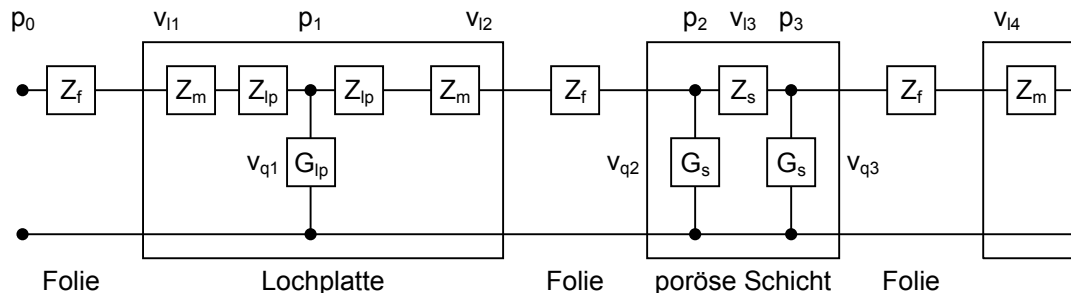


Abbildung 2: Netzwerk eines mehrlagigen Absorbers [3]

Der zentrale Teil der Rechnung besteht aus der Auswertung des Netzwerkes. In den Knoten herrschen die Schalldrücke p und an den Längsimpedanzen bzw. Queradmittanzen die Schnellen v .

$$v_{q_n} = G_n p_n \quad v_{l_n} = v_{q_n} + v_{l_{n+1}} \quad p_{n-1} = p_n + Z_n v_{l_n} \quad (14)$$

v_q ... Schnelle der Queradmittanzen
 v_l ... Schnelle der Längsimpedanz
 p ... Schalldruck am Knoten

Am schallharten Abschluss gilt $p = 1$ und $v = 0$. Durch Addition und Multiplikation, beginnend beim schallharten Abschluss, ergibt sich die Eingangsimpedanz des Netzwerkes mit $Z = p/v$. Aus der Eingangsimpedanz lässt sich dann die Absorption berechnen.

2.7 Strahlungsimpedanz

Reflexionsgesetz und Brechungsgesetz (Gleichung 2 bzw. Abbildung 1) gelten nur für seitlich unendlich ausgedehnte, ebene Absorber. Bei der Messung im Hallraum [7] beträgt die Prüffläche eines ebenen Absorbers zwischen 10 bis 12 m², in großen Hallräumen bis ca. 16 m², d.h. in der Regel Aufbauten mit 3 bis 4 m Seitenlänge. Die Abmessungen sind also keineswegs ausreichend groß gegenüber der Wellenlänge, d.h. der Kanteneffekt hat einen Einfluss auf die gemessene Absorption.

Mit Hilfe der Strahlungsimpedanz kann der Kanteneffekt auch rechnerisch berücksichtigt werden. Exakte Lösungen zur Strahlungsimpedanz gibt es leider nur wenige, z.B. zylindrische Körper, Kugeln oder Absorberstreifen, für rechteckige Absorber müssen Näherungen [1] verwendet werden.

$$Z_r \approx \frac{2j}{\pi} \frac{Z_0}{k_0 a k_0 b} \int_{x=0}^{k_0 a} \int_{y=0}^{k_0 b} (k_0 a - x)(k_0 b - y) J_0 \left(\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \vartheta \right) \frac{e^{-j \sqrt{x^2 + y^2}}}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy \quad (15)$$

Z_r ... Strahlungsimpedanz rechteckiger Absorber
 a, b ... Länge bzw. Breite des rechteckigen Absorbers
 J_0 ... Besselfunktion 0-ter Ordnung

Da die Strahlungsimpedanz nur von Länge und Breite des Absorbers abhängig ist, muss die Strahlungsimpedanz für alle notwendigen Einfallswinkel ϑ (von 0 bis 90°) im notwendigen Frequenzbereich f (100 bis 5000 Hz) nur einmal berechnet werden (z.B. mit Mathematica®). Für hohe Frequenzen kann für ein Quadrat mit der Seitenlänge A folgende Näherung verwendet werden:

$$Z_r \approx Z_0 / \sqrt{\cos^2 \vartheta - j 4 \cdot 0,956 \cdot \sin \vartheta / k_0 A + (2 \cdot 0,956 / k_0 A)^2} \quad (16)$$

A ... Seitenlänge des quadratischen Absorbers
 a, b ... Länge bzw. Breite des rechteckigen Absorbers, $A = 2 a b / (a+b)$

Um die Strahlungsimpedanz Z_r bei der Berechnung der Absorption zu berücksichtigen, muss der Ausdruck $Z_0 / \cos \vartheta$ (= Strahlungsimpedanz für seitlich unendlich ausgedehnte Absorber) durch Z_r ersetzt werden.

2.8 Praktische Umsetzung

Sehr zeitintensiv ist lediglich die Berechnung der Strahlungsimpedanz. Die Berechnung erfolgt jedoch nur einmal und das Ergebnis kann in einer Tabelle abgespeichert werden. Alle anderen Rechnungen sind (komplexe) Grundrechnungsarten und entsprechend schnell. Das Rechenschema kann demnach mit beliebiger Software programmiert werden. In Folge soll eine Umsetzung mit Microsoft® Excel® gezeigt werden.

Der Aufbau erfolgt wie unter Punkt '2.6 Zentrales Netzwerk' empfohlen: Folie – Lochblech – Folie – Absorberschicht – Folie – Lochblech – Folie – Absorberschicht – usw. Für jedes der 3 Grundelemente (Folie, Lochblech, Absorberschicht) steht ein entsprechendes Pulldown-Menü zur Verfügung, um die möglichen Untergruppen anzusteuern (siehe Abbildung 3).

Die Kombination von Lochplatte und Folie bzw. Vlies muss ermöglicht werden. Dies erfordert ein »Verkleben« der Elemente (= Addition der Massen!), sowie eine mögliche Korrektur der Lochgrößen, da sich das Vlies nicht im Loch, sondern unmittelbar davor oder dahinter befindet (siehe Abbildung 4).

Sinnvoll ist auch eine mögliche Deaktivierung der Mündungskorrektur (siehe Abbildung 4). Dies ist erforderlich, um komplexe Lochgeometrien zu berücksichtigen, z.B. eine T-Lochung (kleines, sichtbares Loch mit größerer Bohrung auf der Rückseite!).

Ebenso empfiehlt es sich eine »Kassetierung« der porösen Absorber zu berücksichtigen (siehe Abbildung 4), d.h. eine lokale Wirkung der porösen Schicht zu erzwingen. Ein Überblick über die Steuerung eines solchen vielschichtigen Netzwerks ist in Abbildung 5 ersichtlich.

15	kein Belag	<input checked="" type="checkbox"/> L	15	kein Belag	<input checked="" type="checkbox"/> L	15	kein Belag	<input checked="" type="checkbox"/> L
16	Kreis, 90° versetzt		16	Kreis, 90° versetzt		16	Kreis, 90° versetzt	
17	Vlies		17	kein Lochblech		17	Vlies	
18	kein Belag		18	Kreis, 90° versetzt		18	MW Mechel I S 47	
19	Vlies	<input checked="" type="checkbox"/> L	19	Kreis, 60° versetzt		19	MW Mechel I S 47	<input checked="" type="checkbox"/> L
20	Farbe		20	Kreis, 45° versetzt	<input checked="" type="checkbox"/> L	20	MW Mechel II S 101	
21	Folie		21	quadratische Lochung		21	MW Stein Mechel II S 548	
22	Platte		22	Schlitz, parallel		22	MW Glas Mechel II S 548	
23	Sonderbelag		23	Prägung, Kreis 90° v		23	MW Stein Mechel II S 561	
24	MW Mechel I S 47		24	Prägung, Kreis 60° v		24	MW Glas Mechel II S 561	
25	kein Belag	<input checked="" type="checkbox"/> L	25	Prägung, Kreis 45° v		25	MW Pit	
26	kein Lochblech		26	Prägung, Quadrate	<input checked="" type="checkbox"/> L	26	MW Delany / Bazley	<input checked="" type="checkbox"/> L
							MW Stein TTA S 467 Z1	
							MW Stein TTA S 467 Z2+3	
							MW Glas TTA S 467 Z4	
							MW Glas TTA S 467 Z5+6	
							S RG 33-38 St 0.38-3.2	

Abbildung 3: Pulldown-Menüs für Folie, Lochblech, Absorberschicht)

Angaben zu den dünnen Lagen (Belag)				
Material	Vlies verklebt	f_{cr} [Hz]	η [-]	
L 25 160	0,000439	0,16227	<input checked="" type="checkbox"/> Mo	<input checked="" type="checkbox"/> Mu
Royalin 6/1500	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> lokal	1000000	1	
Mineralwolle	<input type="checkbox"/> lokal	(Mechel I S.47)	h=0,95, g=1,4	
		1000000		0,00

»Verklebung« Vlies

»Kassetierung« der porösen Schicht

Mündungskorrektur deaktivieren

Korrektur Lochgröße

Abbildung 4: Steuerung der Kombination von Lochplatte und Vlies

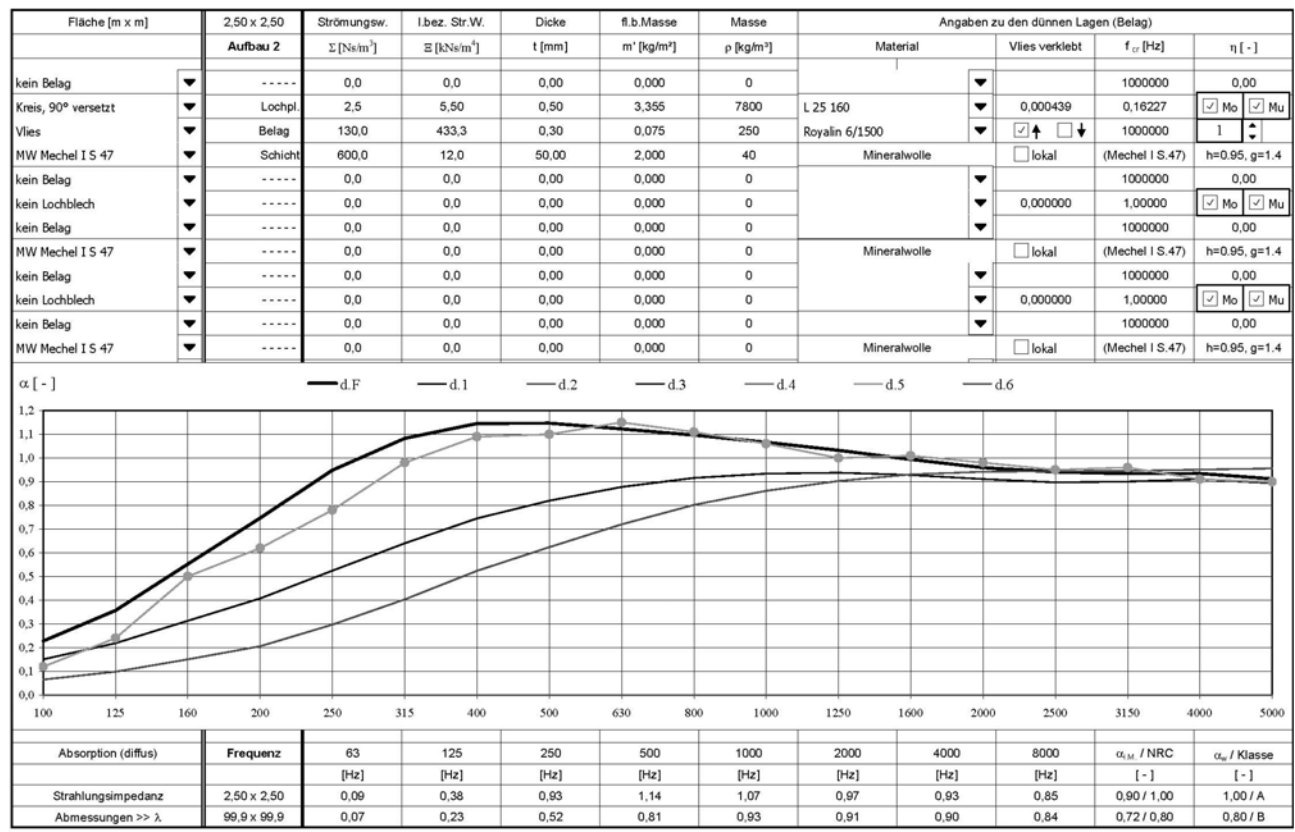


Abbildung 5: Überblick über die Steuerung eines vielschichtigen porösen Absorbers

2.9 Grenzen der Berechnung

Die Näherungsgleichung der Strahlungsimpedanz für rechteckige Absorber gilt nur für lokal wirksame Absorber, nicht aber für lateral wirksame Absorber. Poröse Absorber mit hohem längenbezogenen Strömungswiderstand (\geq ca. 10 kNs/m^4) sind hinreichend lokal wirksam, Absorber mit Luft im Hohlraum aber nicht!

Die Strahlungsimpedanz für rechteckige Absorber gilt nur für bündig in der Ebene integrierte Absorber, d.h. nur direkt vergleichbar mit im Hallraumboden versenkten Aufbauten (Hallraum mit Grube!). In der Regel werden die Prüflinge im Hallraum aber aus praktischen Gründen in einen Rahmen auf dem Hallraumboden montiert.

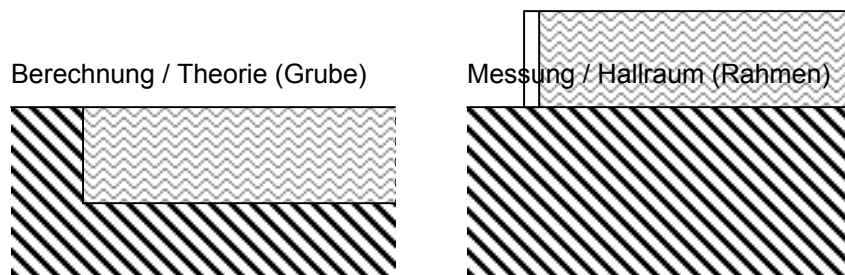


Abbildung 6: Anordnung des Absorbers bei Berechnung bzw. Messung (Hallraum)

Ein weiteres grundsätzliches Problem ist die Voraussetzung eines diffusen Schallfeldes. Bei mittleren und hohen Frequenzen im Hallraum zweifelsohne vorhanden, bei tiefen Frequenzen aber ist die notwendige modale Überlappung durch Volumen und Nachhallzeit begrenzt. Die Grenze zwischen modalem und diffusem Schallfeld kann mit der Schröderfrequenz [8] abgeschätzt werden.

$$f_{\text{Sch}} = 2000 \sqrt{T/V} \quad (17)$$

f_{Sch} ... Schröderfrequenz
 T ... Nachhallzeit in s
 V ... Raumvolumen in m^3

In den meisten Hallräumen liegt die Schröderfrequenz bei ca. 315 Hz (z.B. $V = 200 \text{ m}^3$ & $T = 5 \text{ s}$ bzw. $V = 400 \text{ m}^3$ & $T = 10 \text{ s}$). In vielen praktischen Räumen liegt die Schröderfrequenz zwar deutlich tiefer (z.B. $V = 200 \text{ m}^3$ & $T = 0,5 \text{ s} \rightarrow f_{\text{Sch}} = 100 \text{ Hz}$), dafür ist ein diffuses Schallfeld vor allem bei mittleren Frequenzen aufgrund mangelnder Streuung nicht vorhanden.

Anmerkung: Die Messung der Nachhallzeit ist immer korrekt möglich. Die »gemessene« Absorption - berechnet aus der gemessenen Nachhallzeit durch Umkehr der Sabinschen Nachhallzeitgleichung - ist nur dann korrekt, wenn das Schallfeld bei der Messung auch tatsächlich diffus war.

3. Vergleich Rechnung - Messung

Die folgenden Beispiele zeigen den Vergleich zwischen Rechnung (»r« in der Legende) und Messung (»m« in der Legende). Damit werden einerseits die Möglichkeiten bzw. die Grenzen der Berechnung und andererseits die Schwachpunkte bei der Messung im Hallraum gezeigt.

3.1 Senkrechter Schalleinfall - Messung Impedanzrohr

Die Messung bei senkrechtem Schalleinfall im Impedanzrohr dient zwei Zielen. Zum Einen, der Kontrolle der Rechnung und zum Anderen, der messtechnischen Bestimmung der akustischen Parameter.

Die Abkürzungen in den Diagrammen stehen für:

r ...	Rechenwert
m ...	Messwert
50 ...	50 mm
100 ...	100 mm
L ...	Lufthohlraum
S ...	Schaumstoff
W ...	Mineralwolle (nur bei diffusem Schalleinfall)
V ...	Vlies (nur bei diffusem Schalleinfall)
L25160 ...	2,5 mm Durchmesser, 16,0 % Lochflächenanteil
L05008 ...	0,5 mm Durchmesser, 0,8 % Lochflächenanteil
L20008 ...	2,0 mm Durchmesser, 0,8 % Lochflächenanteil

Abbildung 7 zeigt die Absorption eines porösen Absorbers. Im konkreten Fall Basotect® der Fa. BASF. Der Schaumstoff hat eine Dichte von ca. 10 kg/m³ und einen längenbezogenen Strömungswiderstand von ca. 12 kNs/m⁴. Der Schaumstoff hat eine ähnliche Absorption wie Mineralwolle, ist aber für Messungen im Labor besser geeignet (Muster kann beliebig oft gewechselt werden, kein Schmutz!).

Liegt der Schaumstoff fest an der Rückwand auf, so ergibt sich eine perfekte Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Mit dahinter liegendem Hohlraum werden die Schwingungen nur durch das massegehemmte Absorberskelett behindert, d.h. die Masseträgheit des Absorbers verändert die Absorption (Gleichung 9). Durch Variieren der flächenbezogenen Masse - beeinflusst durch den Halt an der Rohrwand - kann der Einbruch der Kurve nachvollzogen werden.

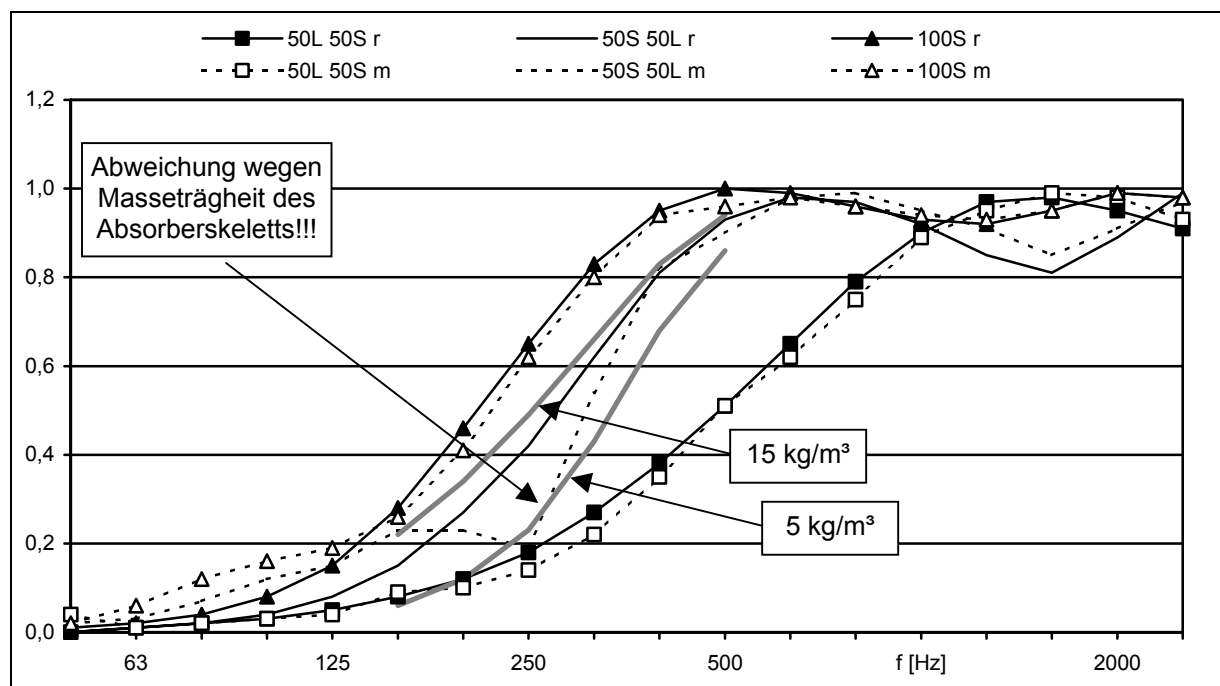


Abbildung 7: Hohlraum mit Luft (L) bzw. Schaumstoff (S)

Die nächsten beiden Abbildungen zeigen 0,5 mm dicke perforierte Metallplatten mit stark unterschiedlichem Lochbild. Abbildung 8 zeigt eine L25160, den Klassiker unter den Metalldecken, mit 2,5 mm Lochdurchmesser und 16,0 % Lochflächenanteil. Abbildung 9 zeigt eine mikroperforierte Platte (L05008) mit 0,5 mm Lochdurchmesser und ca. 0,8 % Lochflächenanteil.

Die Übereinstimmung zwischen Rechnung (r) und Messung (m) ist zum Großteil perfekt, an manchen Stellen ist die Abweichung jedoch deutlich sichtbar. Bei einer so einfachen und eindeutigen Geometrie, sowie den exakt bekannten Absorberdaten (Schaumstoff aus Abbildung 7!), sollten auch solche Abweichungen nicht auftreten. Die Erklärung folgt anhand der beiden nächsten Abbildungen.

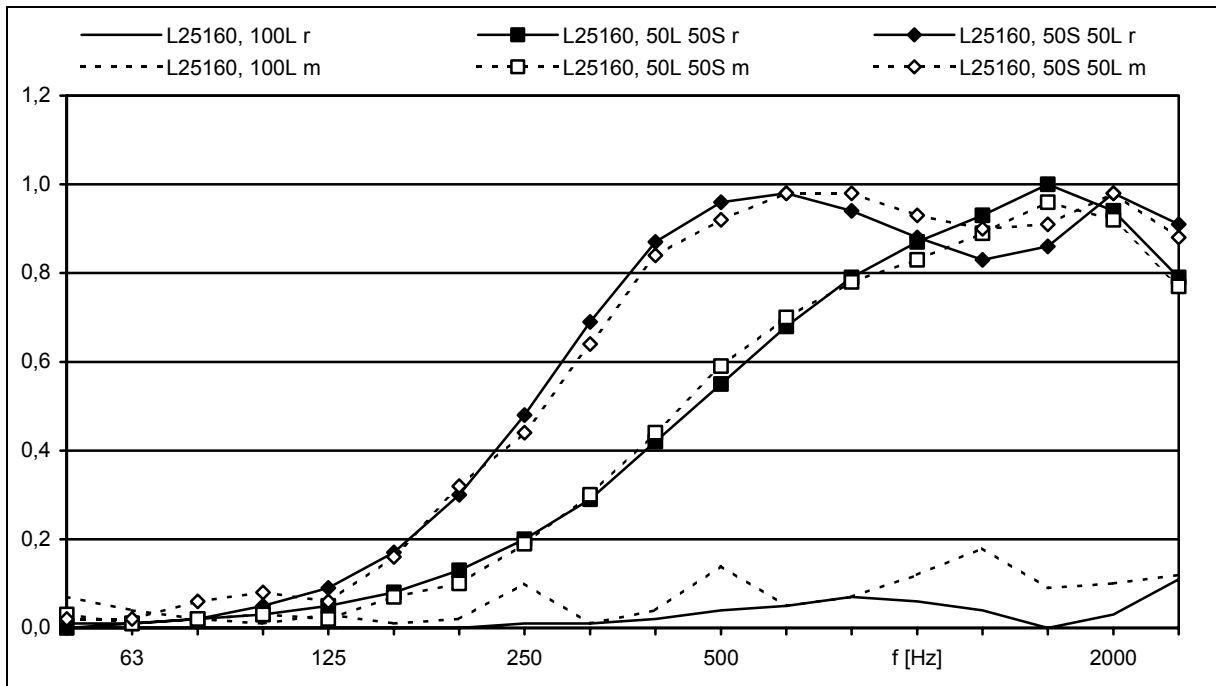


Abbildung 8: Metall Lochbild 25160 ($d=2,5\text{mm}$; 16,0% LFA), mit Schaumstoff (S) bzw. Luft (L)

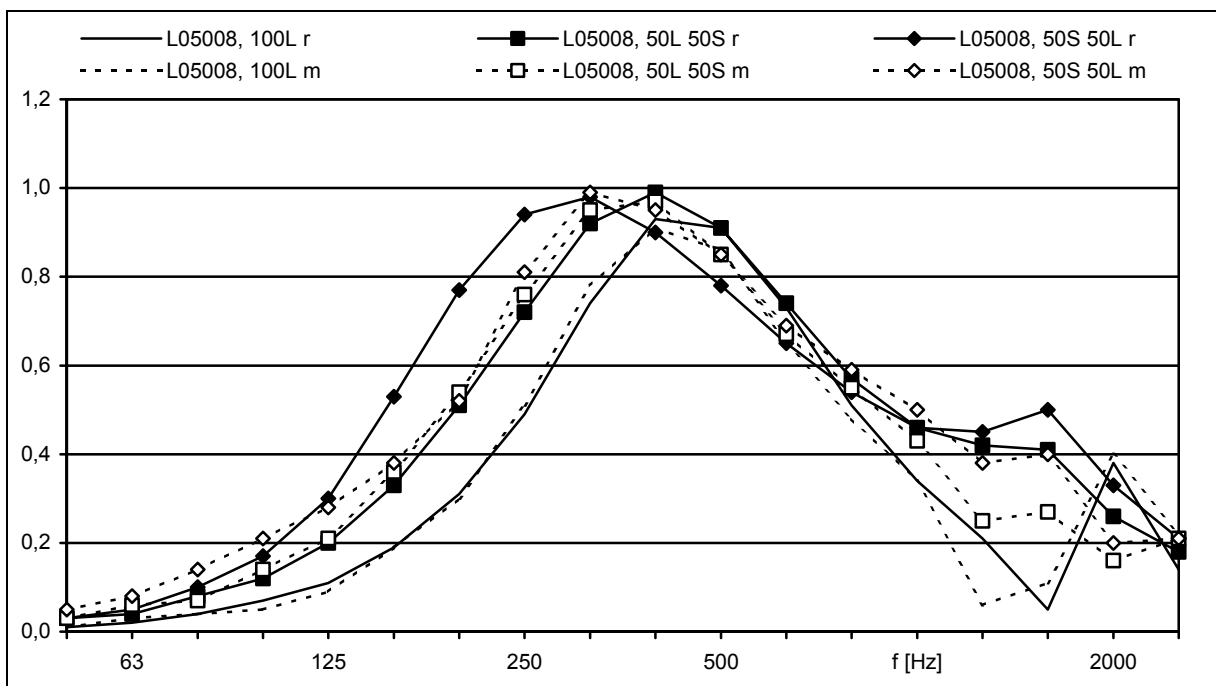


Abbildung 9: Metall Lochbild 05008 ($d=0,5\text{mm}$; 0,8% LFA), mit Schaumstoff (S) bzw. Luft (L)

Abbildung 10 zeigt abermals eine 0,5 mm dicke Metallplatte (L20008), diesmal mit 2,0 mm Lochdurchmesser und ca. 0,8 % Lochflächenanteil. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung (r) und Messung (m) ist dann gut, wenn sich hinter der Metallplatte Luft befindet. Liegt unmittelbar hinter der Lochplatte ein poröser Absorber, so reibt sich die mitschwingende Luft der Löcher am porösen Absorber (siehe Gleichung 13).

Abbildung 11 zeigt die gleichen Messwerte wie Abbildung 10, rechnerisch jedoch mit 1 mm Luftspalt zwischen Metallplatte und Schaumstoff. Die Auswirkung - und somit der Grund für die Unstimmigkeit - ist gut zu erkennen. Entgegen dem ursprünglichen rechnerisch Ansatz, kommt es offensichtlich zu keiner vollflächigen Berührung zwischen Schaumstoff und Lochplatte.

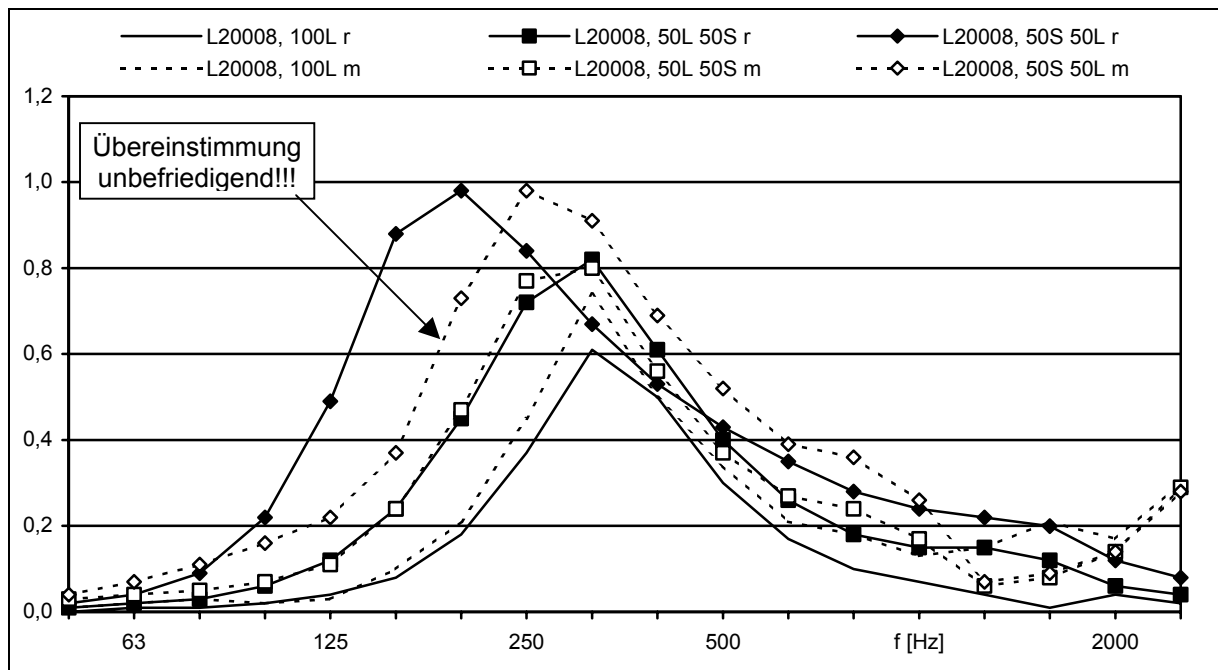


Abbildung 10: Metall Lochbild 20008 (d=2,0mm; 0,8% LFA), mit Schaumstoff (S) bzw. Luft (L)

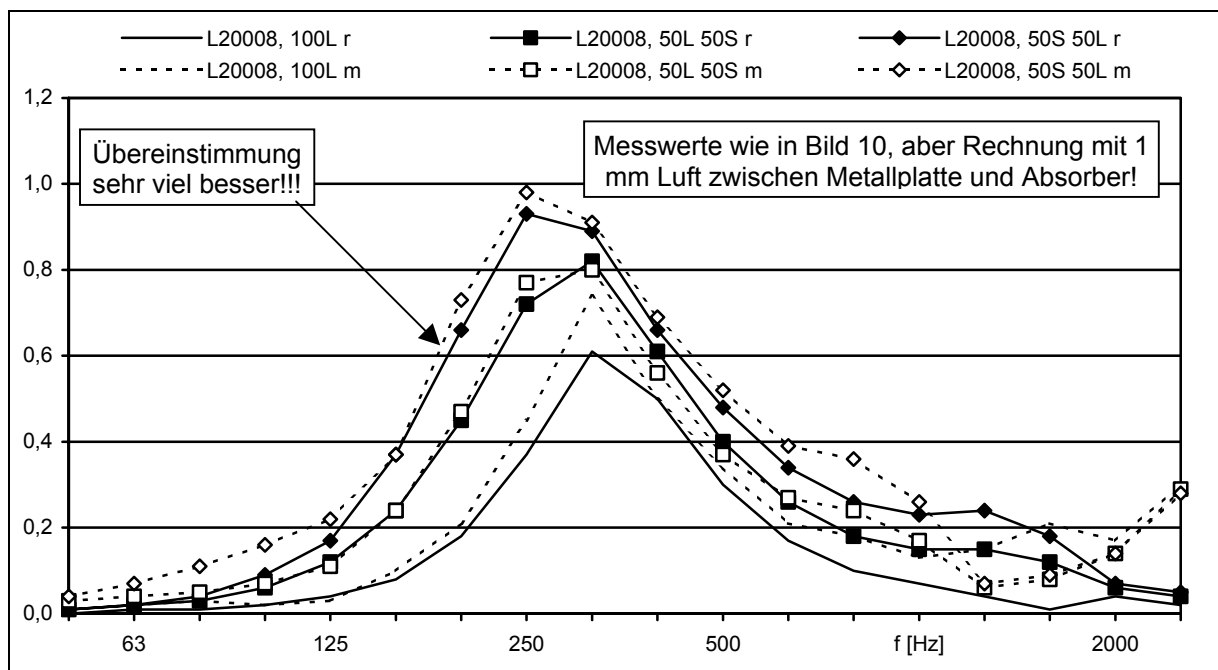


Abbildung 11 Metall Lochbild 20008 (d=2,0mm; 0,8% LFA), mit Schaumstoff (S) bzw. Luft (L)

Abbildung 12 zeigt - wie schon Abbildung 8 - eine 0,5 mm dicke perforierte Metallplatte mit dem Lochbild L25160 (2,5 mm Lochdurchmesser und 16,0 % Lochflächenanteil), diesmal jedoch mit vollflächig verklebtem Akustikvlies.

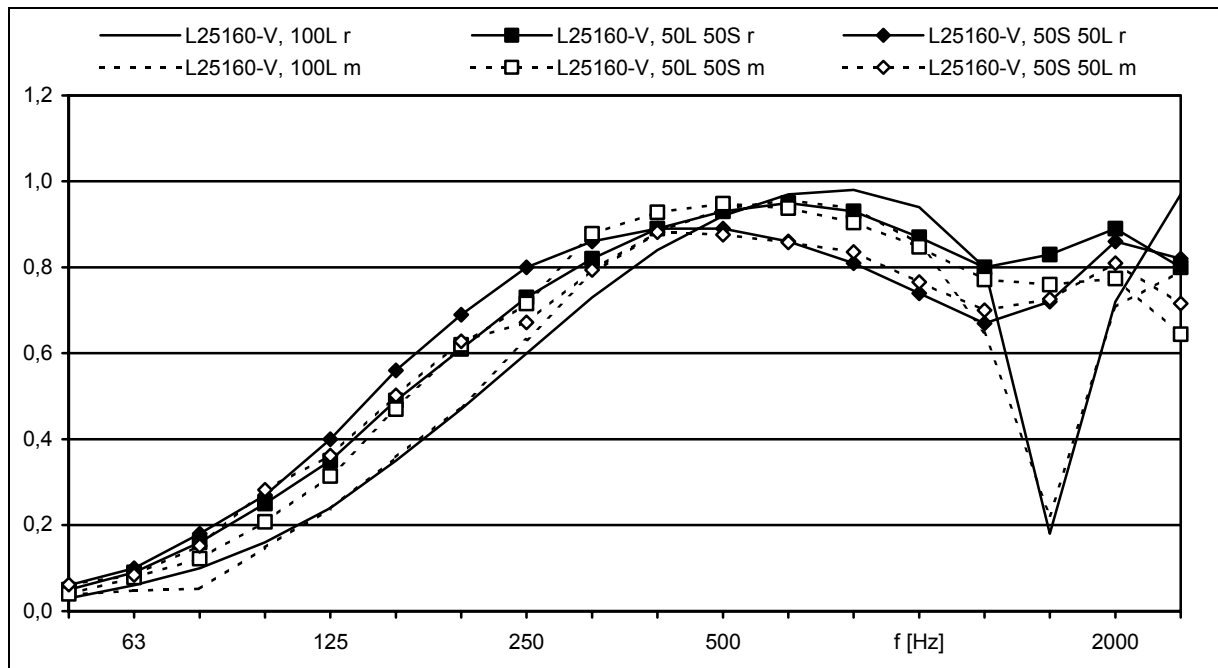


Abbildung 12: Metall Lochbild 25160 mit Vlies (d=2,5mm; 16,0% LFA), mit Schaumst. (S) bzw. Luft (L)

Abschließend zeigt Abbildung 13 den Einfluss der Hohlraumtiefe. Die geringere Übereinstimmung zwischen Rechnung (r) und Messung (m) liegt am Impedanzrohr. Für diese Messungen wurde ein rundes Kunststoffrohr mit 100 mm Durchmesser verwendet. Die unterschiedlichen Hohlraumtiefen entstehen durch unterschiedlich große Aufsätze, welche zwar praktisch, aber akustisch nicht optimal sind. Alle anderen Messungen wurden an einem quadratischen Metallrohr mit 200 x 200 mm Seitenlänge durchgeführt.

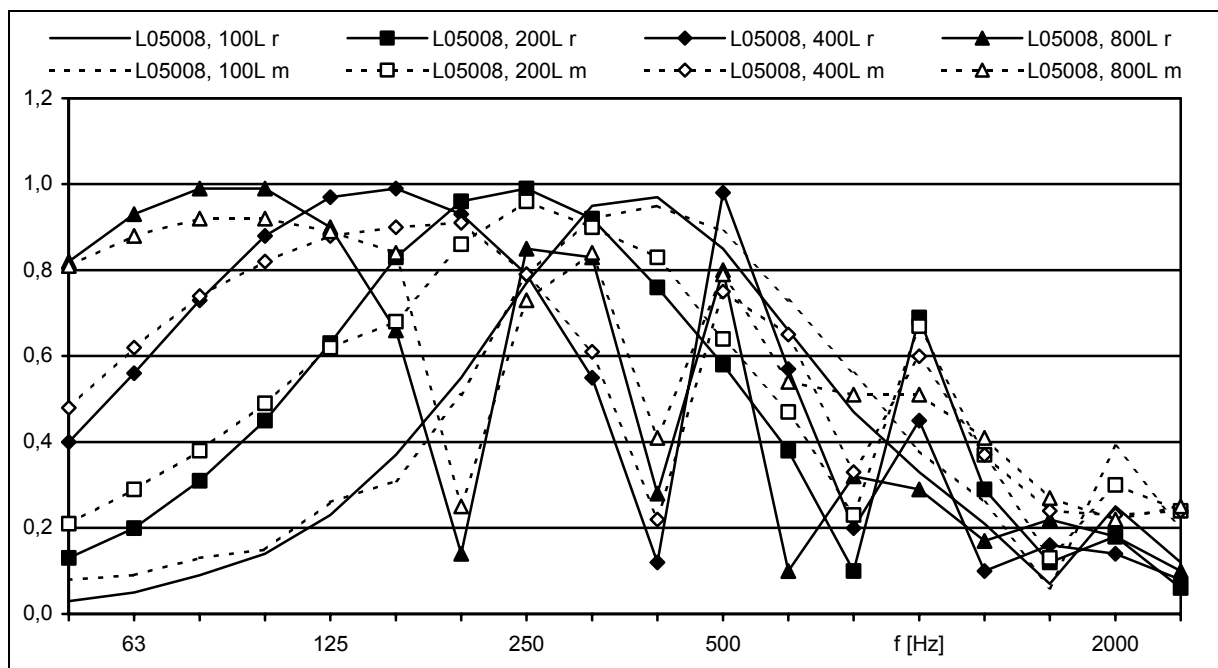


Abbildung 13: Metall Lochbild 05008 (d=0,5mm; 0,8% LFA), mit Schaumstoff (S) bzw. Luft (L)

3.2 Diffuser Schalleinfall - Messung Hallraum

Der senkrechte Schalleinfall dient der Forschung & Entwicklung. In der Praxis zeigt sich der wahre Wert der Berechnung erst beim Vergleich mit Messwerten aus dem Hallraum. Die Kürzel in den Abbildungen sind wie beim senkrechten Schalleinfall.

Abbildung 14 zeigt 40 mm Schaumstoff mit Vlies (ohne Luftholraum). Unter Berücksichtigung der Strahlungsimpedanz gibt es eine befriedigende Übereinstimmung.

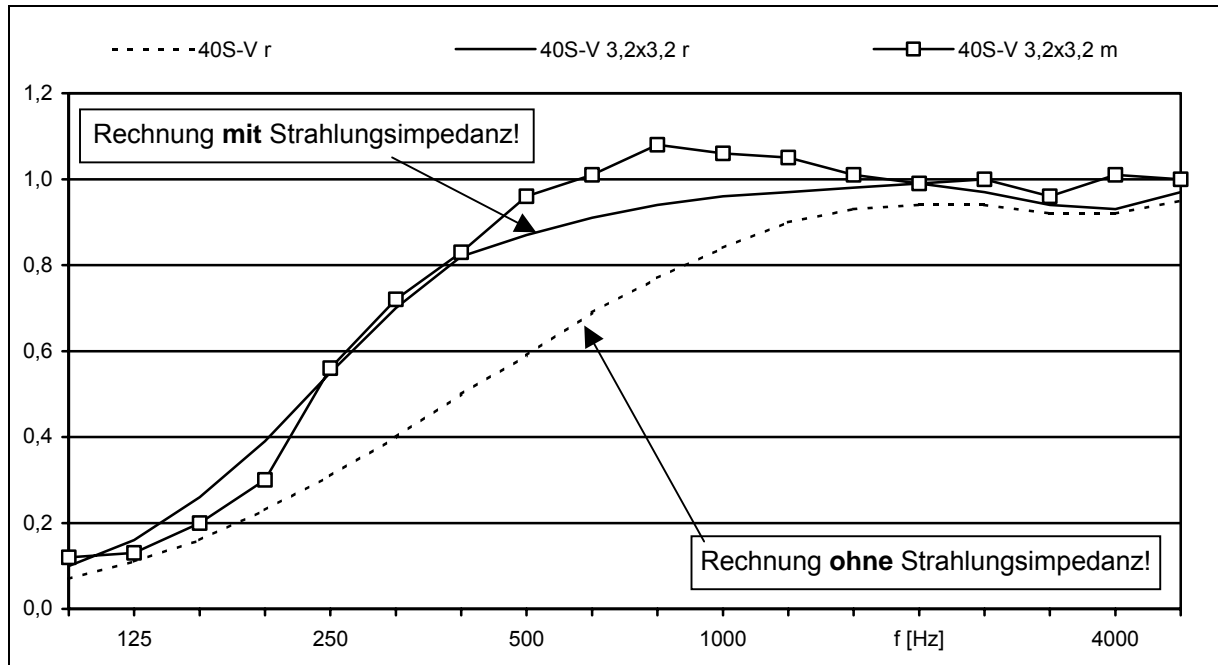


Abbildung 14: Schaumstoff (Basotect®) 40 mm mit Vlies (ohne Luftholraum)

Abbildung 15 zeigt Stoffe mit unterschiedlichem Gewicht und Strömungswiderstand ($\text{kg/m}^2 / \text{Ns/m}^3$). Kunstseide (KS), Zellstoff (ZS) aus [6] und ein Gewebe (G) aus den USA. Der hohe Aufbau und die kleine Prüffläche in den USA (ca. 2,8 x 2,2 m) bewirken den großen Einfluss der Rahmenkonstruktion.

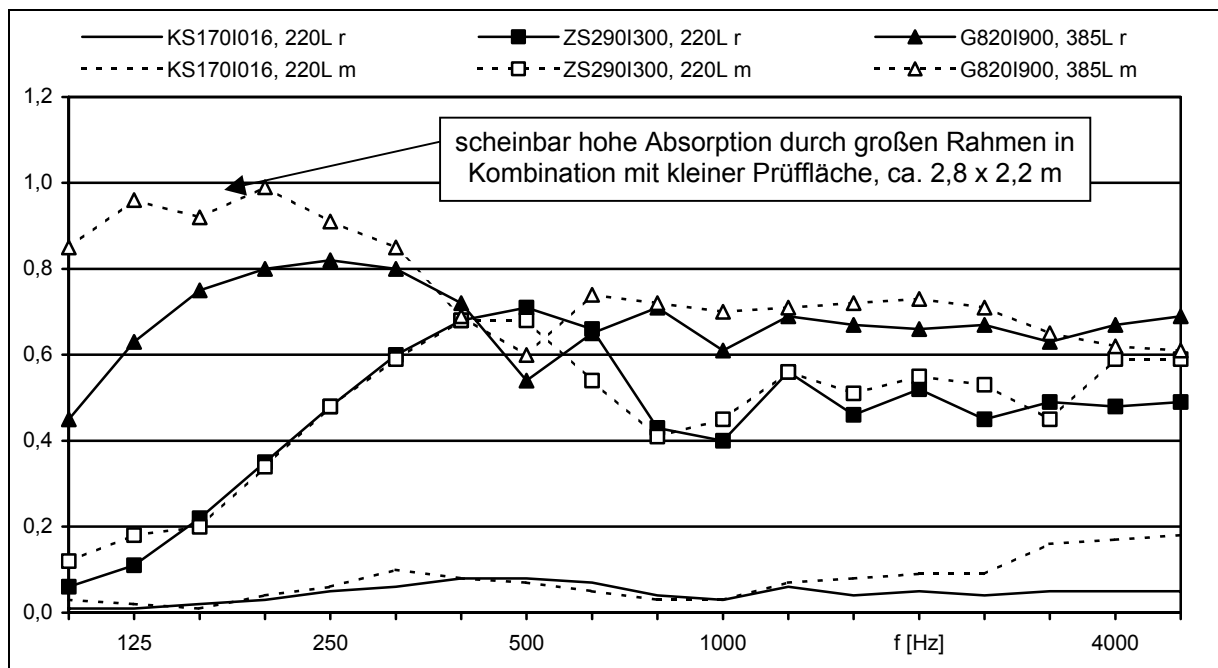


Abbildung 15: Kunstseide (KS), Zellstoff (ZS), Baumwolle [6], Gewebe (G) aus USA ($\text{kg/m}^2 / \text{Ns/m}^3$).

Abbildung 16 zeigt 7 Messungen der gleichen 0,5 mm dicken Metallplatte Lochbild L25160 mit Akustikvlies (2,5 mm Lochdurchmesser und 16,0 % Lochflächenanteil) unterschiedlicher Hersteller in verschiedenen Hallräumen, dazu der Vergleich mit der Rechnung.

Bei einer der 7 Proben war die Verklebung offensichtlich unzureichend! Die anderen Schwankungen sind für Hallraummessungen nicht unüblich, aber für einen so einfachen Aufbau bemerkenswert hoch.

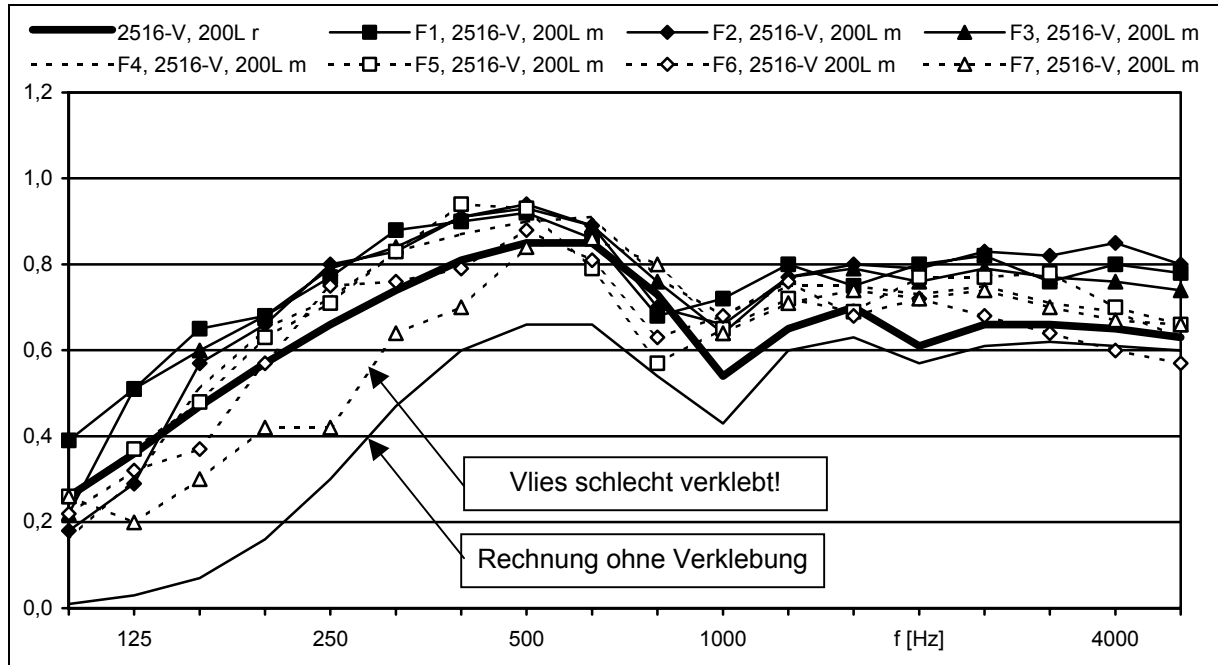


Abbildung 16:: Metall Lochbild 25160 mit Vlies (d=2,5mm; 16,0% LFA), Rechnung + 7 Messwerte

Abbildung 17 zeigt wiederum die gleiche Metallkassette 25160 mit Vlies von zwei verschiedenen Herstellern gemessen im selben Hallraum. Abgesehen vom Bereich der tiefen Frequenzen ist die Wiederholgenauigkeit bemerkenswert gut. Die Reproduzierbarkeit der Messungen ist nicht das Problem, sondern die Unterschiede von Hallraum zu Hallraum!

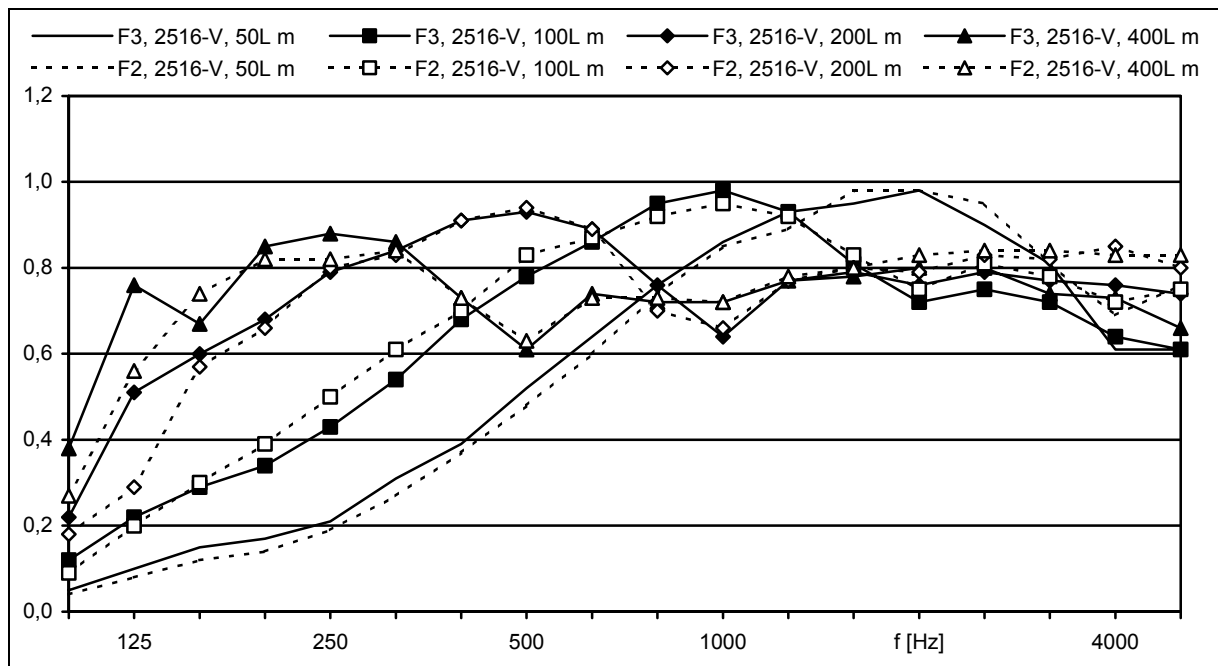


Abbildung 17: Metall Lochbild 25160 mit Vlies (d=2,5mm; 16,0% LFA), 2 Messserien - ein Hallraum

Abbildung 18 zeigt wieder eine Metallkassette 25160 mit Vlies, jetzt aber den Vergleich zwischen Rechnung und Messung im Detail. Die gemessene Absorption bei hohen Frequenzen ist grundsätzlich signifikant höher. Bei tiefen Frequenzen - jenseits der Schröderfrequenz - ist ein deutlicher Einbruch der Absorption zu erkennen, das Schallfeld ist nicht ausreichend diffus!.

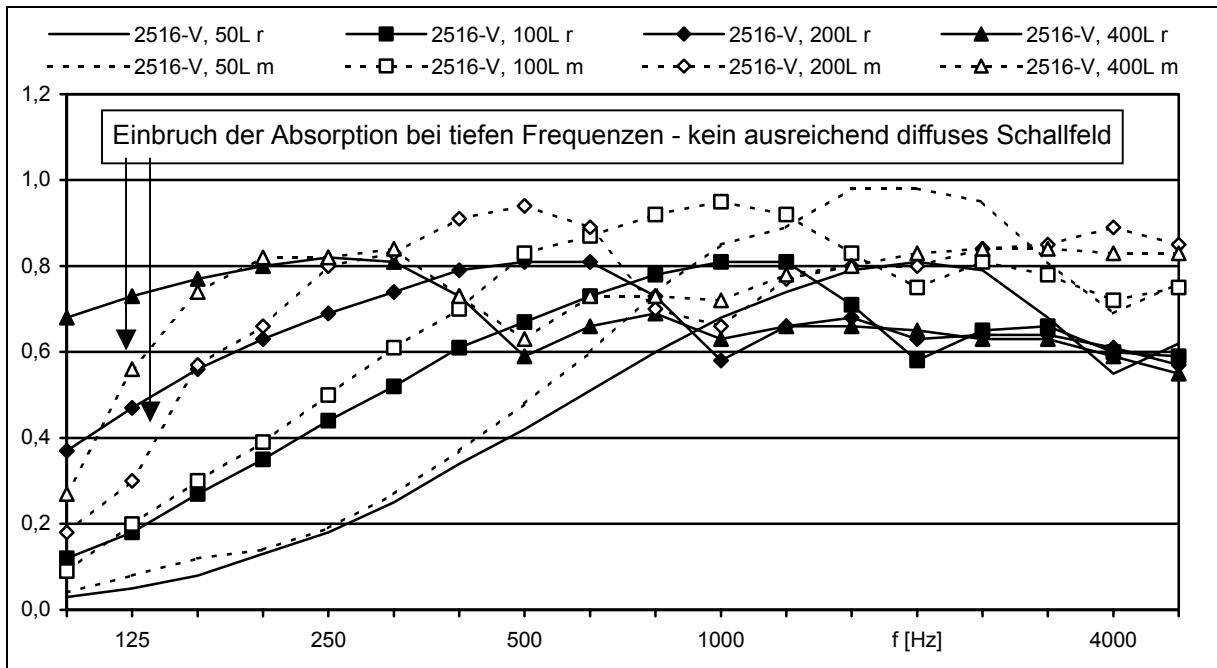


Abbildung 18: Metall Lochbild 25160 mit Vlies (d=2,5mm; 16,0% LFA), Vergleich Rechnung - Messung

Abbildung 19 zeigt noch einmal die gleiche Metallkassette 25160 mit Vlies und zusätzlich 30 mm Mineralwolle. Die Absorption wird - wie nicht anders zu erwarten - durch die Absorberauflage erhöht. Der Vergleich zwischen Rechnung und Messung zeigt aber grundsätzlich ein ähnliches Bild: Bei hohen Frequenzen ist die gemessene Absorption höher und bei tiefen Frequenzen kleiner. Bei tiefen Frequenzen - jenseits der Schröderfrequenz - ist ein deutlicher Einbruch der Absorption zu erkennen, das Schallfeld ist nicht ausreichend diffus!

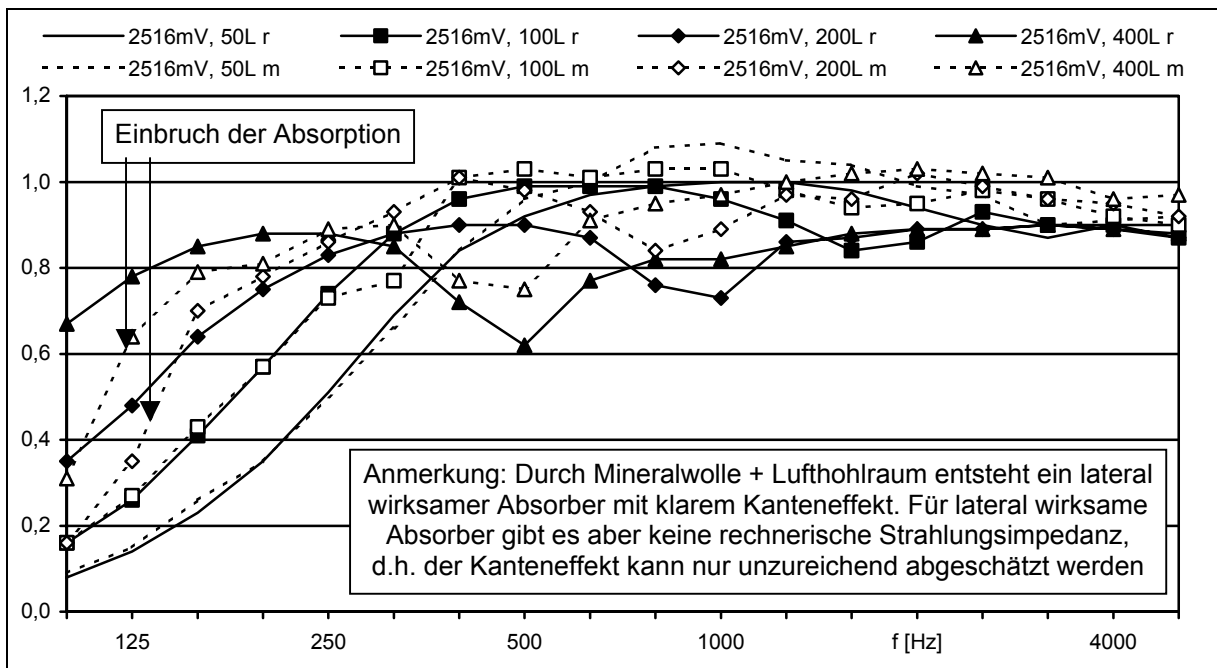


Abbildung 19: Metall Lochbild 25160 mit Vlies + 30W (d=2,5mm; 16,0% LFA), Rechnung – Messung

Abbildung 20 und 21 zeigen dieselbe mikroperforierte Platte (L05008) mit 0,5 mm Lochdurchmesser und ca. 0,8 % Lochflächenanteil. Abbildung 20 gemessen in einem Hallraum mit klassischer Rahmenkonstruktion (R), Abbildung 21 hingegen mit einer Grube (G), d.h. der Hallraumboden unter dem Aufbau kann abgesenkt werden und die Absorberfläche ist eben mit der umgebenden Fläche. Die Grube entspricht demnach also dem rechnerischen Ansatz (siehe Abbildung 6).

Die beste Übereinstimmung ergibt sich bei 100 bzw. 200 mm Gesamtaufbau. Je höher der Rahmen desto ungenauer wird die Messung im Hallraum. Bei hohen Frequenzen macht sich die Absorption des Rahmens bemerkbar (große Fläche!). Bei tiefen Frequenzen - jenseits der Schröderfrequenz ist das Schallfeld nicht ausreichend diffus!

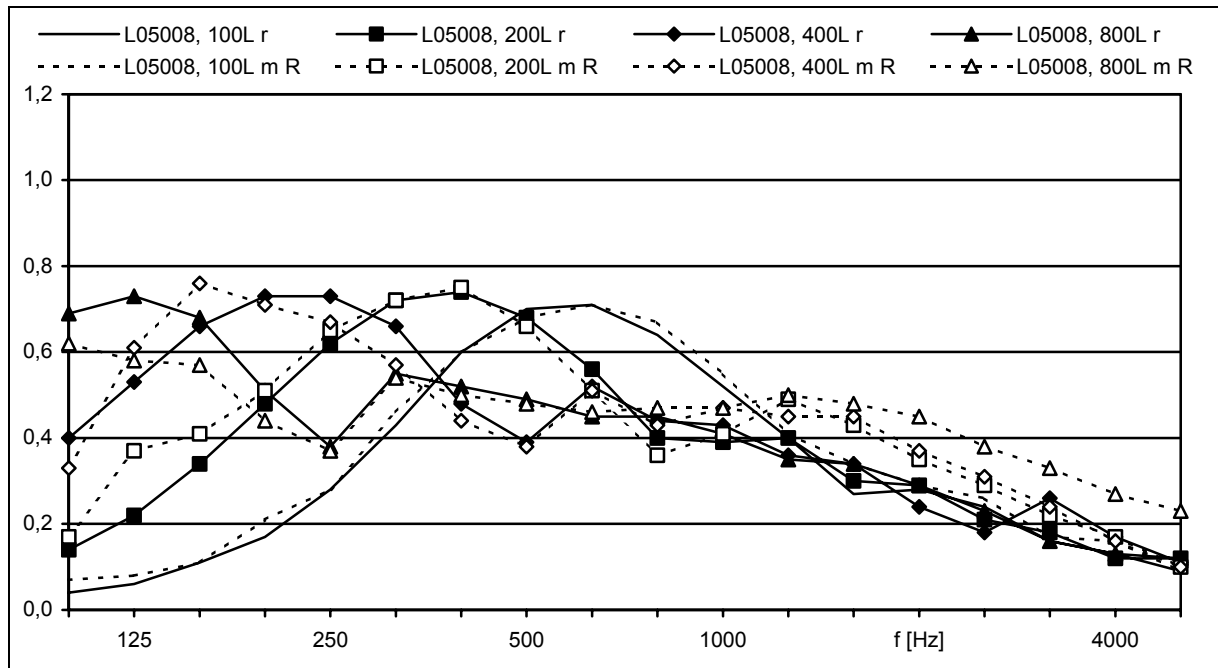


Abbildung 20: Metall Lochbild 05008 ($d=0,5\text{mm}$; 0,8% LFA), Rechnung - Messung (mit Rahmen)

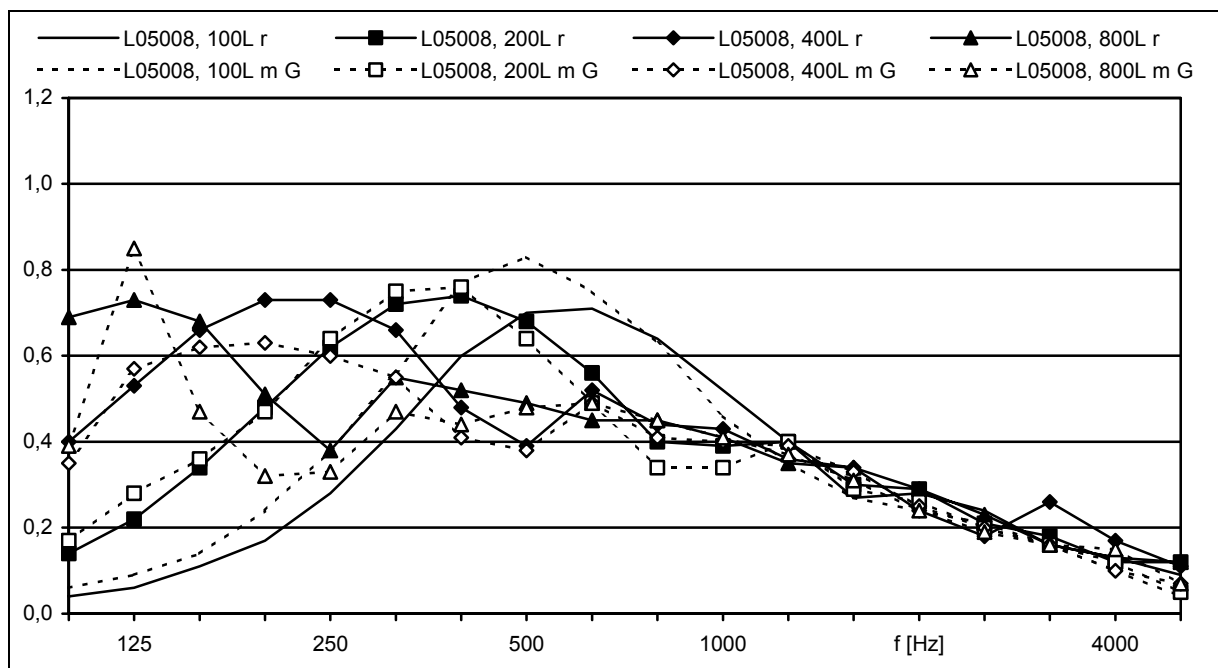


Abbildung 21: Metall Lochbild 05008 ($d=0,5\text{mm}$; 0,8% LFA), Rechnung - Messung (mit Grube)

Abbildung 22 zeigt ein letztes Mal die Metallkassette 25160 mit Vlies, jetzt aber mit 50 mm Mineralwolle ohne weiteren Lufthohlraum, d.h. ein fast perfekt lokal wirksamer Absorber. Um den Kanteneffekt zu untersuchen, wurden die Abmessungen des Aufbaus entsprechend verkleinert. Je kleiner die Fläche, d.h. je größer der Anteil der Kanten, desto stärker wird der Kanteneffekt! Wichtig ist aber auch eine hohe Grundabsorption, d.h. eine dicke Absorberschicht.

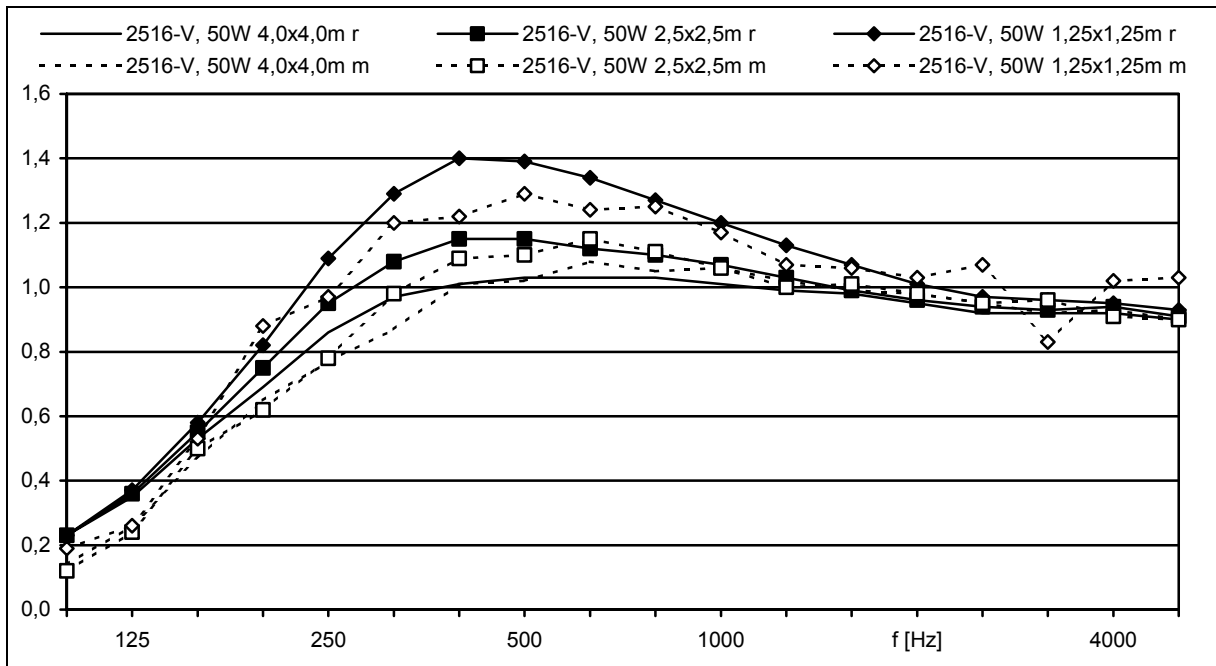


Abbildung 22: Metall Lochbild 25160 mit Vlies + 50W (d=2,5mm; 16,0% LFA), unterschiedliches a x b

Zum Abschluss eine Demonstration des Kanteneffektes anhand eine gelochten, 16 mm dicken Holzplatte mit T-Lochung (Sichtseite mit 4 mm (ca. 5% LFA) und Rückseite mit 12 mm (ca. 40% LFA) Lochdurchmesser, siehe Skizze) mit rückseitigem Vlies und 80 mm Mineralwolle (ohne weiterem Lufthohlraum). Der Abfall gegen hohe Frequenzen kann praktisch beliebig über den Lochflächenanteil gesteuert werden.

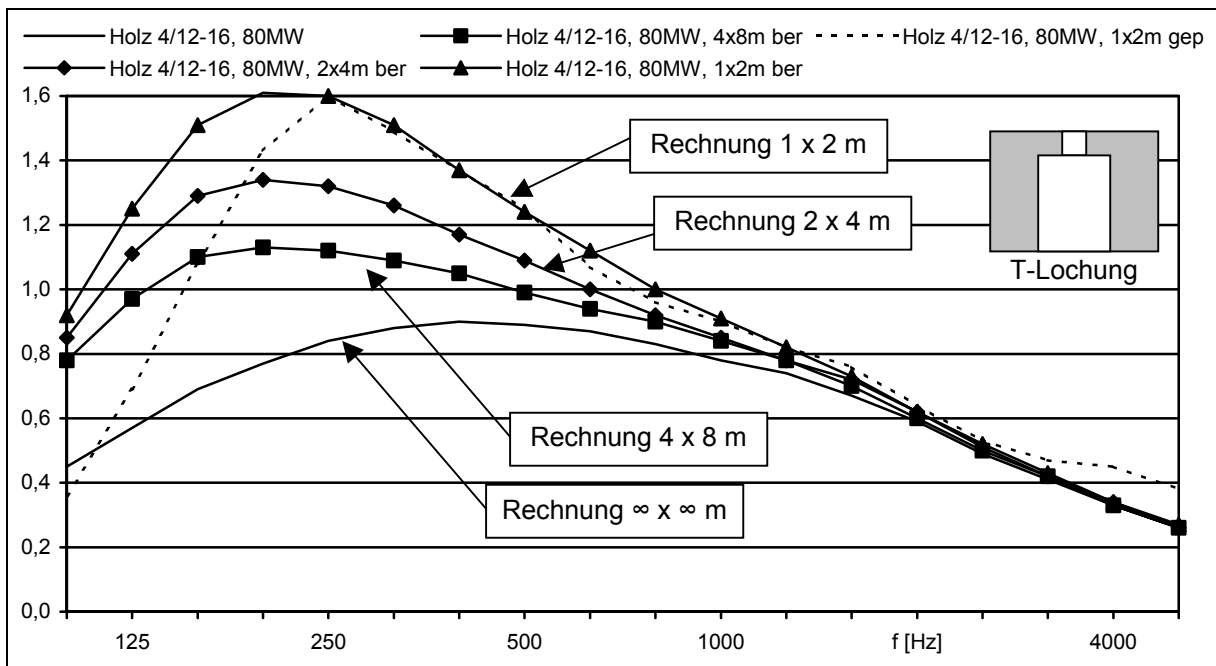


Abbildung 23: Holz 4/12-16 (d=4/12 mm), Abmessung ca. 1 x 2 m

4. Praktische Auswirkungen

Aus praktischer Sicht stellt sich die Frage, wie sich die (möglichen) Ungenauigkeiten bei der Messung im Hallraum im bauphysikalischen Alltag auswirken. Dabei muss einerseits die Auswirkung auf die Einzahlangabe (bewerteter Absorptionsgrad α_w) und andererseits der Einfluss auf die berechnete Nachhallzeit betrachtet werden. Dann bleibt noch die Auswirkung auf die praktische Entwicklung.

4.1 Bewerteter Absorptionsgrad

Im bauphysikalischen Alltag nimmt die Bedeutung des bewerteten Absorptionsgrades α_w nach EN ISO 11654 [9] immer mehr zu. Eine Einzahlangabe ist, aufgrund ihrer in der Regel unbekanntenen Unschärfe, stets fragwürdig und akustisch nur bedingt sinnvoll, aber eine Einzahlangabe ist auch im Bereich der Raumakustik - z.B. bei Ausschreibungen - praktisch sehr hilfreich.

Abbildung 24 zeigt den Einfluss anhand von 3 Beispielen. Bei der Lochplatte mit Vlies und 100 mm Lufthohlraum erhöht sich durch die Messung der α_w von 0,65 auf 0,80 und somit die Absorberklasse von C auf B (die Werte sind der Legende in der Abbildung zu entnehmen).

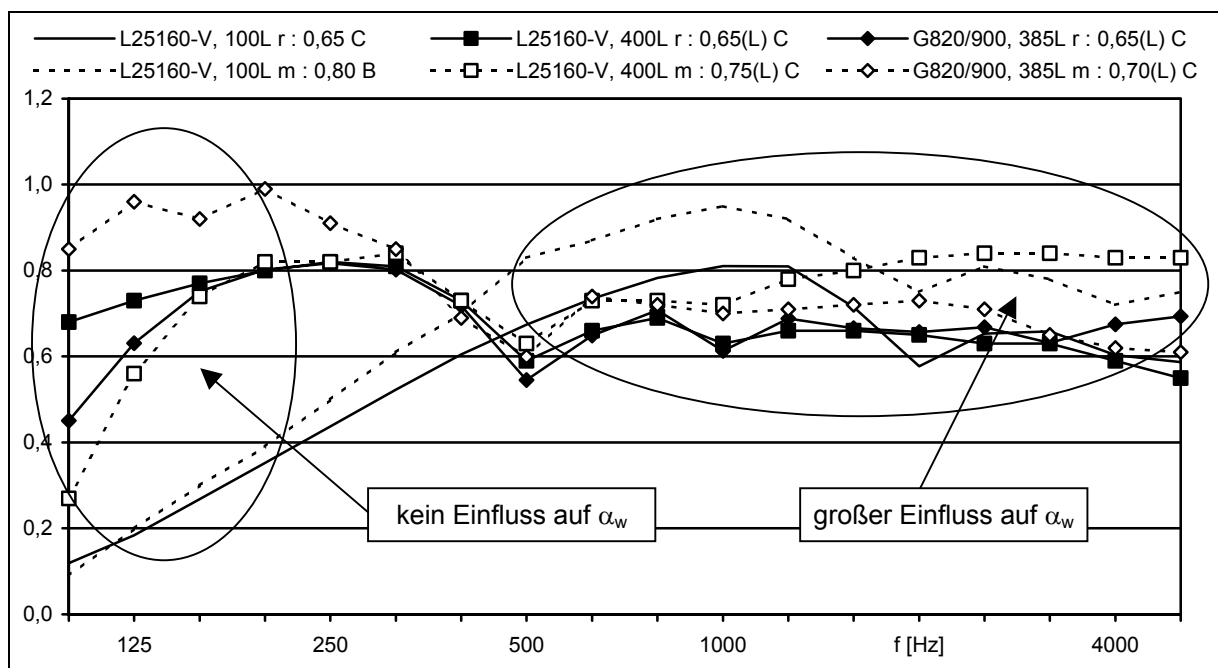


Abbildung 24: Metall Lochbild 25160 mit Vlies bzw. Gewebe: Vergleich Rechnung - Messung

Gegen die großen Ungenauigkeiten bei tiefen Frequenzen ist α_w sehr widerstandsfähig, schließlich werden die Terzbänder um 100, 125 und 160 Hz erst gar nicht berücksichtigt. Bei mittleren und hohen Frequenzen ist der Einfluss jedoch deutlich bemerkbar. Besonders stark kann sich dieser Effekt bei Lochplatten mit abfallender Absorption gegen hohe Frequenzen (Holz bzw. GK gelocht) auswirken. Eine »günstige« Prüfung im Hallraum kann einen Absorber um eine oder im Extremfall sogar um zwei Klassen »aufbessern«.

4.2 Nachhallzeit

Die Ungenauigkeit bei der Messung der Absorption kann sich auf die Nachhallzeit sehr unterschiedlich auswirken. Der Bereich der tiefen bzw. der hohen Frequenzen ist getrennt zu betrachten!

Bei hohen Frequenzen ist der Einfluss auf den planerischen Alltag in der Regel gering. Einerseits liefert die Akustikverkleidung nur einen Teil der sowieso vorhanden Absorption und andererseits ist die Ungenauigkeit bei hohen Frequenzen begrenzt. Auch ist ein Mangel an Absorption bei hohen Frequenzen eher selten. Sollte es dennoch einmal der Fall sein, dann kann bei hohen Frequenzen leicht nachgerüstet werden (Einrichtung, Vorhänge, Teppich, Stoffe, ...).

Bei tiefen Frequenzen verhält es sich praktisch umgekehrt. Einerseits liefert die Akustikverkleidung in der Regel den Großteil der Absorption und andererseits kann die Ungenauigkeit bei tiefen Frequenzen sehr groß sein. Wird erst einmal ein Mangel bei tiefen Frequenzen festgestellt, dann ist ein Nachrüsten oft schwierig oder teuer.

Abbildung 25 verdeutlicht die Problematik anhand eines typischen Klassenzimmers (10 x 7 x 3 m, Fußboden PVC, Wand Putz bzw. 20 m² Fenster, 20 Kinder, 15 Tische, Decke L25160-V bzw. G820I900). Die unterschiedliche Absorption der Decken kann Abbildung 24 entnommen werden.

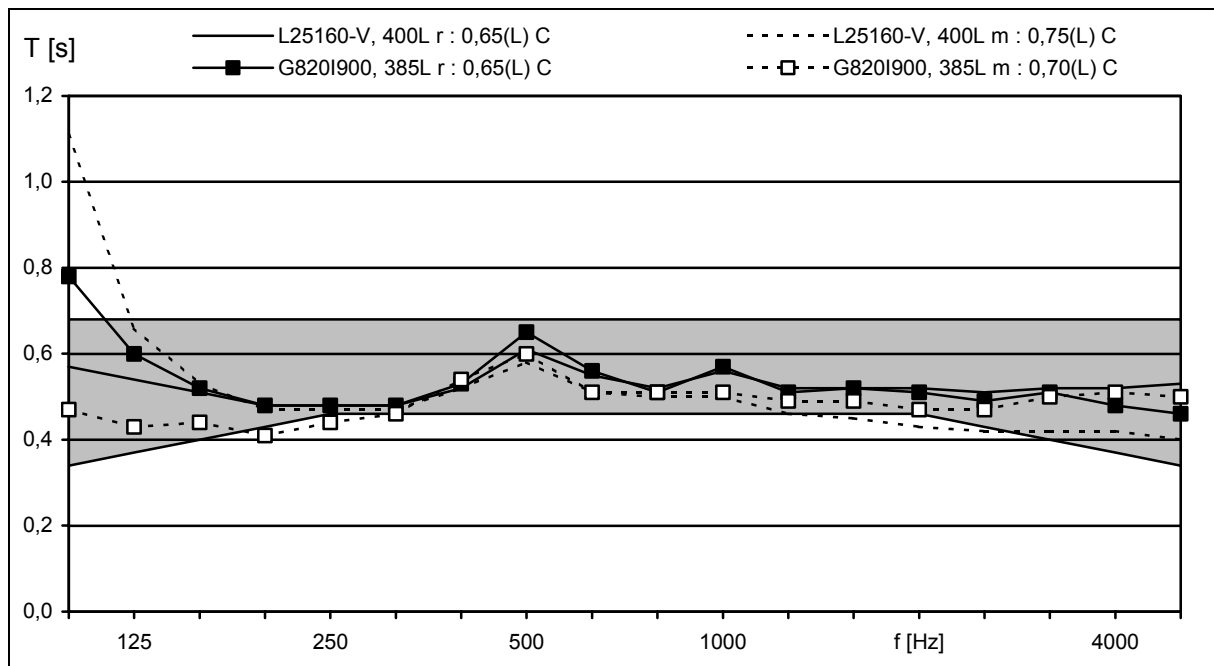


Abbildung 25: Nachhallzeit Klassenzimmer 10 x 7 x 3 m, Decke L25160-V bzw. G820I900

Akustisch sind die zwei Decken sehr ähnlich. Die rechnerische Absorption der gelochten Metalldecke mit Vlies ist bei tiefen Frequenzen etwas höher (größere Masse und größerer Strömungswiderstand!) und bei hohen Frequenzen etwas kleiner (Lochflächenanteil!). Die unterschiedlich gemessene Absorption im Hallraum hat mit der eigentlichen Absorption der Proben wenig zu tun.

Aufgrund der gemessene Absorption ergibt sich eine möglich Schwankung bei 100 Hz von ca. 0,5 s bis 1,1 s, bei 5000 Hz von ca. 0,4 bis 0,5 s. Diese »Toleranz« kann bei der Planung als durchwegs üblich betrachtet werden, aber wie kann man dem begegnen?

Bei hohen und mittleren Frequenzen kann eine Minderung der Absorption um ca. 20% (in der Praxis schon gesehen!) bzw. eine Auslegung in Richtung untere Grenze Toleranzbereich (persönliche Empfehlung!) das Problem kaschieren. Bei tiefen Frequenzen ist eine kritische Betrachtung und viel akustischer Sachverstand - oder eine »kleine« Berechnung der Absorption - unerlässlich!

4.3 Entwicklung

Die Kombination aus Impedanzrohr und Berechnung ist ein perfektes Werkzeug bei der Optimierung poröser Absorber. Die zu erwartenden Messwerte im Hallraum können präzise vorhergesagt werden.

Die Anzahl der im Hallraum sinnvoller Weise zu prüfenden Aufbauten kann entsprechend reduziert werden, und die »fehlenden« Aufbauten können auf rechnerischem Weg akustisch korrekt »interpoliert« werden.

Die Berechnung von Absorbern, ohne Messwerte vergleichbarer Aufbauten aus dem Hallraum, ist mit Vorsicht zu genießen, den es gibt akustische Effekte, die bei der Berechnung nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Hierzu zählen insbesondere die Grenzfälle der Kombination von Lochplatten und Folie bzw. Vlies. Bei sehr hohen (bzw. auch bei sehr kleinen) Strömungswiderständen sind die Rechenwerte nicht nachvollziehbar. D.h. bei Lochplatten mit sehr kleinen Löchern ist Vorsicht geboten!

5. Zusammenfassung

Nicht befriedigend sind die Messwerte im Hallraum bei tiefen Frequenzen, an dieser Stelle sollte optimiert werden. Dies betrifft einerseits die Rahmenkonstruktion an sich und andererseits die Diffusität bei tiefen Frequenzen. Insbesondere in Hinblick auf Messwert unter 100 Hz!

Ebenso sollte die Berechnung weiter optimiert werden, dies betrifft vor allem die Strahlungsimpedanz für lateral wirksame Absorber. Zum ändern sollte aber vor allem die Anwendung der Berechnung forciert werden, z.B. durch eine detailliertere Beschreibung in der EN 12354-6 [5].

Erfreulich ist in jedem Fall die gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung. Dies ermöglicht einerseits einen sinnvollen Einsatz bei Optimierung und Entwicklung und andererseits können die im Hallraum ermittelten Messwerte auf Plausibilität überprüft werden.

Literaturverzeichnis

- [1] 'Schallabsorber, Band I', Fridolin P. Mechel, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1989
- [2] 'Schallabsorber, Band II', Fridolin P. Mechel, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1995
- [3] 'Schallabsorber, Band III', Fridolin P. Mechel, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1998
- [4] 'Taschenbuch der Technischen Akustik', M. Heckl & H. A. Müller, Springer-Verlag, Berlin 1995
- [5] 'Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 6: Schallabsorption in Räumen', ÖNORM EN 12354-6:2004 06 01
- [6] 'Bau- und Raumakustik', Fasold, Sonntag, Winkler, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1987
- [7] 'Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen', ÖNORM EN ISO 354:2003 11 01
- [8] 'Active Control of Sound', P. A. Nelson, S. J. Elliott, Academic Press, London 1992
- [9] 'Akustik - Schallabsorber für die Anwendung in Gebäuden - Bewertung der Schallabsorption', ÖNORM EN ISO 11654:1997 09 01