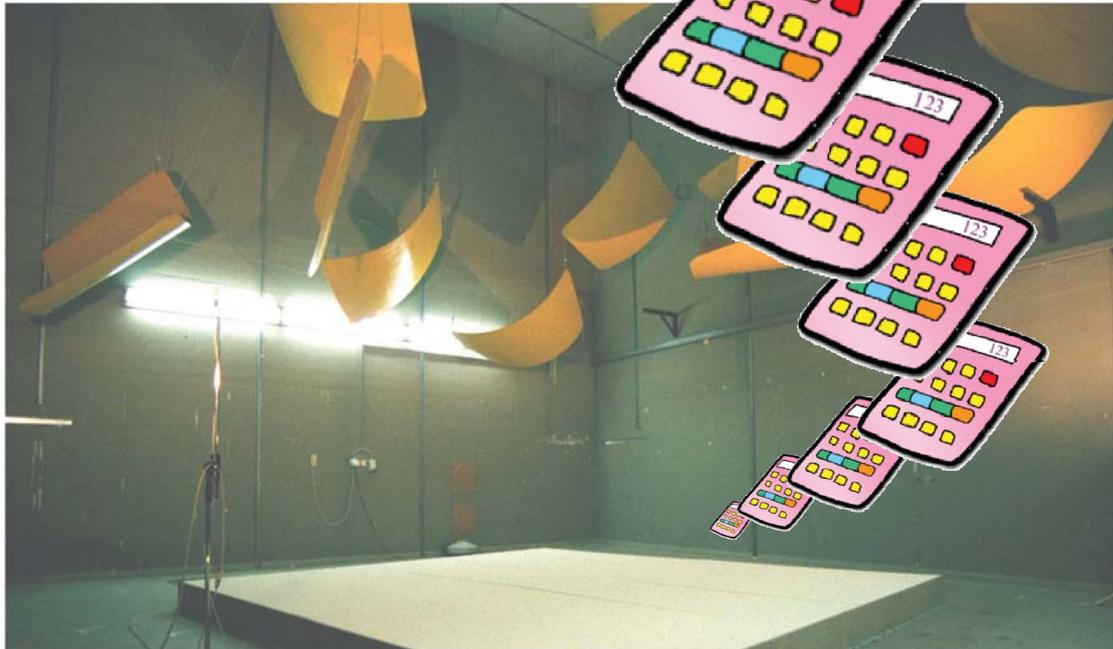


Messung versus Rechnung



Einleitung

Nachhallzeit - älteste Kenngröße der Raumakustik

$$T = 0,16 \cdot \frac{V}{A} = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum S_i \cdot \alpha_i + \sum A_{\text{Gegenstände}} + A_{\text{Luft}}}$$

Absorption ist wichtigste (meist einzige!) Eingangsgröße

Messwerte
aus dem
Hallraum

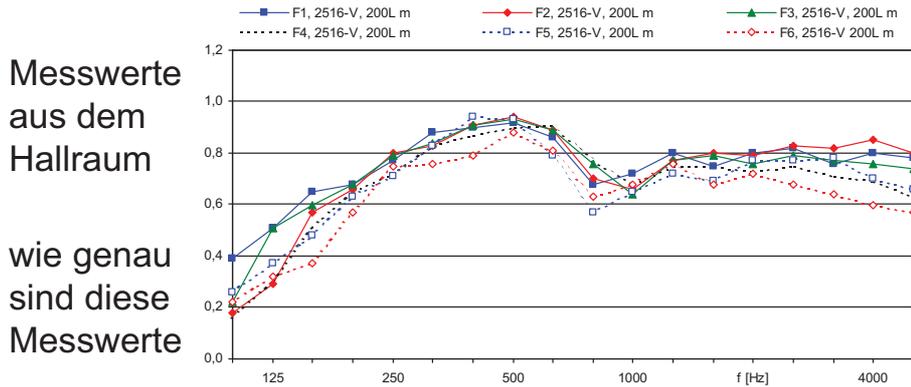


Einleitung

Nachhallzeit - älteste Kenngröße der Raumakustik

$$T = 0,16 \cdot \frac{V}{A} = 0,16 \cdot \frac{V}{\sum S_i \cdot \alpha_i + \sum A_{\text{Gegenstände}} + A_{\text{Luft}}}$$

Absorption ist wichtigste (meist einzige!) Eingangsgröße



Übersicht

F. P. Mechel Schallabsorber Band I
Äußere Schallfelder Wechselwirkungen
672 Seiten 1989

F. P. Mechel Schallabsorber Band II
Innere Schallfelder Strukturen
946 Seiten 1995

F. P. Mechel Schallabsorber Band III
Anwendungen
1248 Seiten 1998

S. Hirzel Verlag Stuttgart · Leipzig

Übersicht

Berechnung poröser Absorber

- Absorptionsgrad
- Poröse Schicht - Folie (Vlies) - Lochplatten
- Zentrales Netzwerk
- Strahlungsimpedanz (= Kanteneffekt)
- Praktische Umsetzung
- Grenzen der Berechnung

Vergleich Rechnung - Messung

- Senkrechter Schalleinfall - Messung Impedanzrohr
- Diffuser Schalleinfall - Messung Hallraum

Praktische Auswirkungen

- Bewerteter Absorptionsgrad
- Nachhallzeit
- Entwicklung

Berechnung Absorptionsgrad (I)

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

α_0 ... Absorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall

Z ... Eingangsimpedanz

ρ_0 ... Dichte der Luft, ca. 1,2 kg/m³

c_0 ... Schallgeschwindigkeit in Luft, ca. 343 m/s

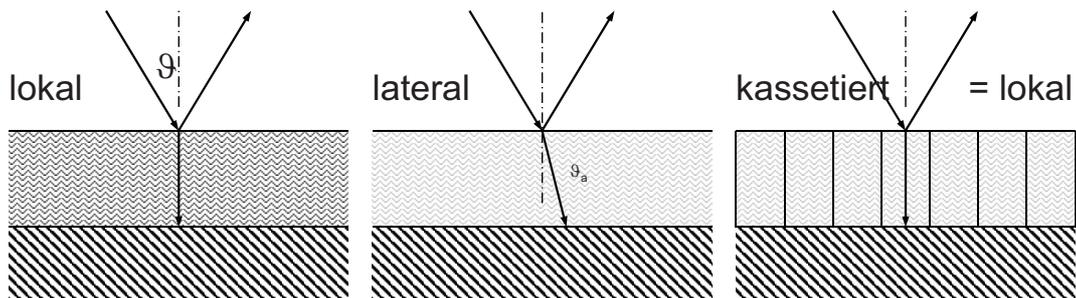
Z_0 ... Impedanz der Luft, ca. 413,3 kg/sm²

Berechnung Absorptionsgrad (II)

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

α_{ϑ} ... Absorptionsgrad bei schrägem Schalleinfall

ϑ ... Schalleinfallswinkel



Berechnung Absorptionsgrad (III)

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

α_{ϑ} ... Absorptionsgrad bei schrägem Schalleinfall

ϑ ... Schalleinfallswinkel

Strahlungsimpedanz unendlich
ausgedehnter ($a \gg \lambda$) Absorber

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

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

α_d ... Absorptionsgrad bei diffusem Schalleinfall

Berechnung poröse Schicht (I)

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

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

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

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, $k_0 = \omega / c_0 = 2 \pi f / c_0$

Berechnung poröse Schicht (II)

Berechnung Absorberkennwerte (Z_a, Γ_a)

- Mineralwolle, Regressionskoeffizienten: [1], S 47
- Stein- und Glaswolle, emp. Regressionskoeff. [2], S 548
- Stein- und Glaswolle, emp. Modell Spaltkapilare: [2], S 561
- Mineralwolle, emp. Regressionskoeffizienten: [4], S 467
- Schaumstoff, emp. Regressionskoeffizienten: [4], S 468
- Mineralwolle & Schaumstoff nach EN 12354-6 [5], Anh. B
- Glasgranulatpl., Theorie homogenen Mediums: [2], S 101

Berechnung poröse Schicht (III)

Berechnung Absorberkennwerte (Z_a, Γ_a)

- Mineralwolle, Regressionskoeffizienten: [1], S 47

$$\begin{aligned}
 E > E_x: \Gamma_a/k_0 &= a'/E^{\alpha'} + j(1+a''/E^{\alpha''}) \\
 Z_a/Z_0 &= (1+b'/E^{\beta'}) - jb''/E^{\beta''} \quad (4.16a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E \leq E_x: \Gamma_a/k_0 &= \sqrt{-1 + j \frac{\gamma}{2\pi E}} = \sqrt{-1 + j0,2233/E} \\
 Z_a/Z_0 &= -\frac{j}{\gamma h} \cdot (\Gamma_a/k_0) = -j0,7747 \cdot (\Gamma_a/k_0). \quad (4.16b)
 \end{aligned}$$

Komponente	E_x	Faktoren	Exponenten
Γ'_{an}	0,04	$a' = 0,2082$	$\alpha' = 0,6193$
Γ''_{an}	0,008	$a'' = 0,1087$	$\alpha'' = 0,6731$
Z'_{an}	0,006	$b' = 0,06082$	$\beta' = 0,7173$
Z''_{an}	0,02	$b'' = 0,1323$	$\beta'' = 0,6601$

γ ... Adiabatenexponent Luft: 1,40 (Verhältnis der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck zur spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Volumen)
 h ... Porosität Absorbers, hier 0,92 (Verhältnis Hohlräumvolumen zu Gesamtvolumen)

Berechnung poröse Schicht (IV)

Absorbervariable E

$$E = \rho_0 f / \Xi$$

- E ... Absorbervariable
 ρ_0 ... Dichte der Luft
 f ... Frequenz
 Ξ ... läng. Strömungswiderstand

Berechnung poröse Schicht (V)

Absorbervariable E

$$E = \rho_0 f / \Xi \qquad E_{\text{eff}} = E \cdot \left(1 - j \frac{\rho_0}{\rho_a} \cdot \frac{1}{2 \pi E} \right)$$

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

Berechnung poröse Schicht (VI)

Absorbervariable E

$$E = \rho_0 f / \Xi \qquad E_{\text{eff}} = E \cdot \left(1 - j \frac{\rho_0}{\rho_a} \cdot \frac{1}{2 \pi E} \right)$$

E_{eff} berücksichtigt massegehemmtes Skelett

- | | | |
|--------------------------|---|----------------------------|
| Mineral-, Polyesterwolle | → | Dichte des Absorber |
| Alu-Wolle, Schaumstoff | | läng. Strömungswiderst. |
| Glasgranulatplatten | → | Porosität & Strukturfaktor |
| Eingangsparameter | → | Messung Impedanzrohr |

Berechnung Folie bzw. Vlies

$$Z_f = \frac{j \omega m_f \cdot R_f}{j \omega m_f + R_f}$$

Z_f ... Impedanz Folie (= dichte Folie, Vlies)

ω ... Kreisfrequenz $\omega = 2 \pi f$

m_f ... flächenbezogene Masse

R_f ... Strömungswiderstand, (luft-) dichte Folie $R_f \gg \omega m_f$

Folie, Stoffe	→	flächenbezogene Masse
Vlies, Gewebe		Strömungswiderstand

Eingangsparameter	→	Messung Impedanzrohr
-------------------	---	----------------------

Berechnung Lochplatte (I)

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

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

Z_{lp} ... Längsimpedanz der Lochplatte

G_{lp} ... Queradmittanz der Lochplatte

σ ... Lochflächenanteil der Lochplatte

d_{lp} ... Dicke der Lochplatte

Berechnung Lochplatte (II)

$$Z_m = \frac{1}{\sigma} \cdot \Delta l \cdot \Gamma_a Z_a$$

Absorberkennwerte !!!

- Z_m ... Impedanz der mitschwingenden Luft in den Löchern
- Δl ... Mündungskorrektur
- Z_a ... Wellenwiderstand - anliegender poröser Absorber
- Γ_a ... Ausbreitungskonstante - anliegender poröser Absorber

Berechnung Mündungskorrektur Δl

Lochgeometrie

- rundes Loch
- quadratische Loch
- Schlitz

Lochanordnung

- quadratisch
- 45° versetzt
- 60° versetzt

Literaturstellen für Berechnung sind im Skript angegeben

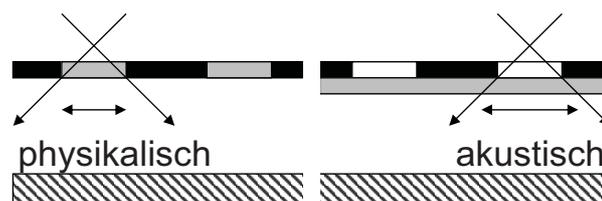
Berechnung Lochplatte mit Folie / Vlies

$$Z_f \Rightarrow \frac{1}{\sigma} Z_f$$

- Z_f ... Impedanz Folie (= dichte Folie, Vlies)
- σ ... Lochflächenanteil der Lochplatte

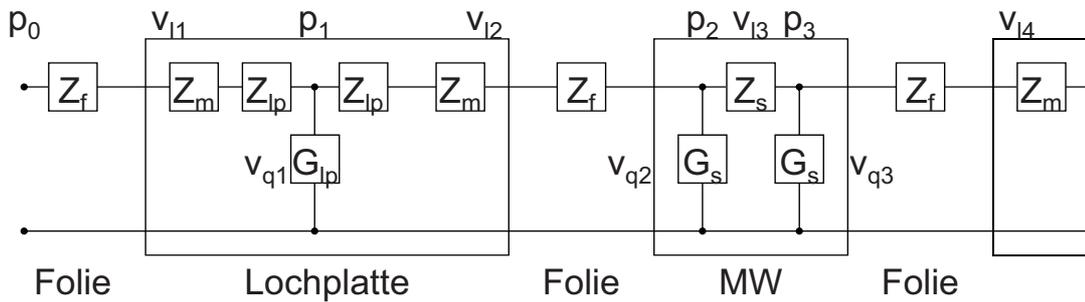
Qualität der Verklebung

- physikalisch bzw. akustischer Lochdurchmesser



- flächenbezogene Masse: Lochplatte + Folie / Vlies

Berechnung Zentrales Netzwerk



$$v_{q,n} = G_n p_n \quad v_{l,n} = v_{q,n} + v_{l,n+1} \quad p_{n-1} = p_n + Z_n v_{l,n}$$

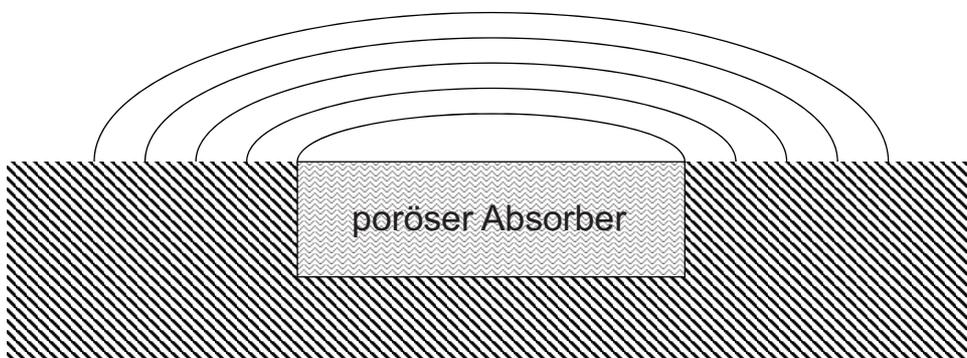
v_q, v_l, \dots Schnelle der Queradmittanz bzw. der Längsimpedanz
 $p \dots$ Schalldruck am Knoten

harter Abschluss: $p_N = 1, v_{lN} = 0$

Eingangsimpedanz: $Z = p_0 / v_{l1}$

Berechnung Strahlungsimpedanz (I)

Strahlungsimpedanz = Kanteneffekt



Exakte Lösungen: zyl. Körper, Kugeln, Absorberstreifen

Näherungslösung: rechteckige Absorber

Berechnung Strahlungsimpedanz (II)

$$Z_r \approx \frac{2j}{\pi} \frac{Z_0}{k_0 a k_0 b}$$

$$\int_{x=0}^{k_0 a} \int_{y=0}^{k_0 b} (k_0 a - x)(k_0 b - y) J_0 \left(\sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin \nu \right) \frac{e^{-j \sqrt{x^2 + y^2}}}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy$$

Z_r ... Strahlungsimpedanz rechteckiger Absorber

a, b ... Länge bzw. Breite des rechteckigen Absorbers

J_0 ... Besselfunktion 0-ter Ordnung

Strahlungsimpedanz nur von »a« & »b« abhängig:

1 x Rechnung ϑ von 0-90° und f von 100-5000 Hz

z.B. mit Mathematica® → in Tabelle abspeichern

Berechnung Strahlungsimpedanz (III)

Näherung für hohe Frequenzen

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

A ... Seitenlänge des quadratischen Absorbers

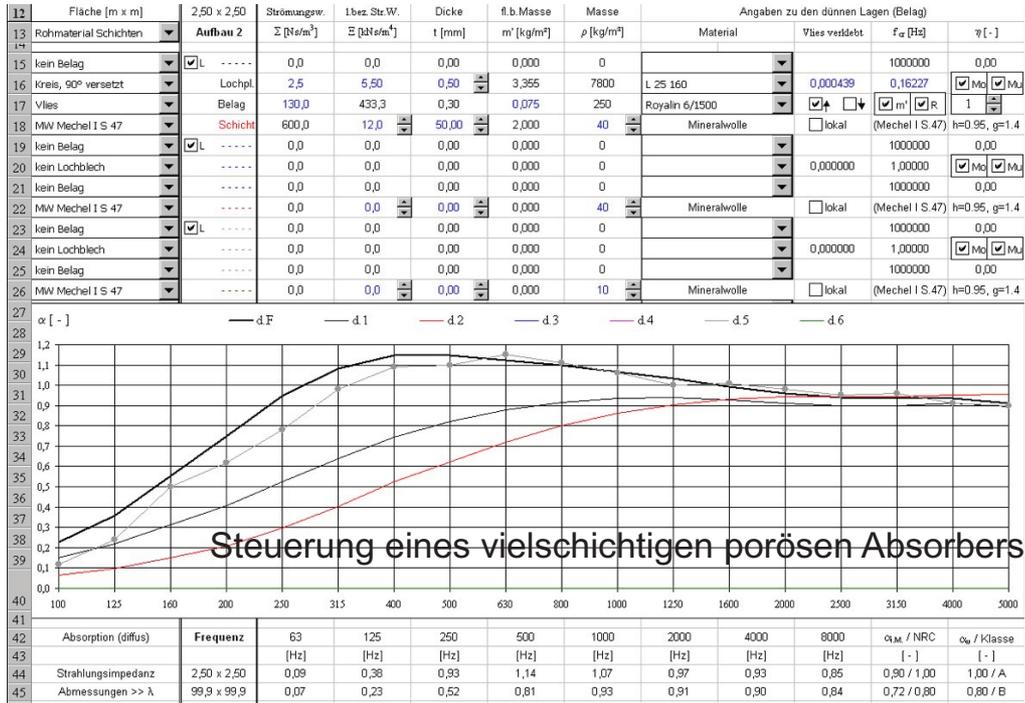
a, b ... Länge bzw. Breite des rechteckigen Absorbers

$$A = 2 a b / (a+b)$$

Strahlungsimpedanz unendlich ausgedehnte Absorber

$$Z_r = Z_0 / \cos \vartheta \rightarrow \text{Berechnung Absorption}$$

Berechnung praktische Umsetzung (I)



Berechnung praktische Umsetzung (II)

12	Fläche [m x m]	2,50 x 2,50	Strömungsw.	1.bez. Str.W.	Dicke	fl.b.
13	Rohmaterial Schichten	Aufbau 2	$\Sigma [Ns/m^3]$	$\Xi [kNs/m^4]$	t [mm]	m'
15	kein Belag	<input checked="" type="checkbox"/> L	0,0			
16	Kreis, 90° versetzt	Lochpl.	2,5			
17	Vlies	Belag	130,0			
18	MW Mechel I S 47	Schicht	600,0			
19	kein Belag	<input checked="" type="checkbox"/> L	0,0			
20	kein Lochblech		0,0			
21	kein Belag		0,0			
22	MW Mechel I S 47		0,0			
23	kein Belag	<input checked="" type="checkbox"/> L	0,0			
24	kein Lochblech		0,0			
25	kein Belag		0,0			
26	MW Mechel I S 47		0,0			

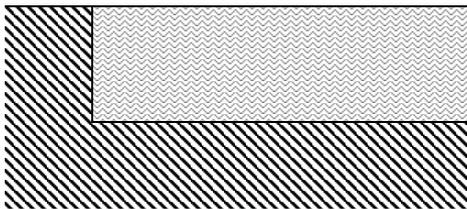
Pull-down-Menüs für Folie, Lochblech, Absorberschicht)

Berechnung Grenzen (II)

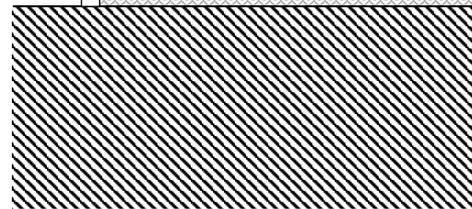
Näherung Strahlungsimpedanz → lokal wirksame Absorber

Näherung Strahlungsimpedanz → Absorber bündig in Ebene

Berechnung / Theorie (Grube)



Messung / Hallraum (Rahmen)



Berechnung Grenzen (III)

Näherung Strahlungsimpedanz → lokal wirksame Absorber

Näherung Strahlungsimpedanz → Absorber bündig in Ebene

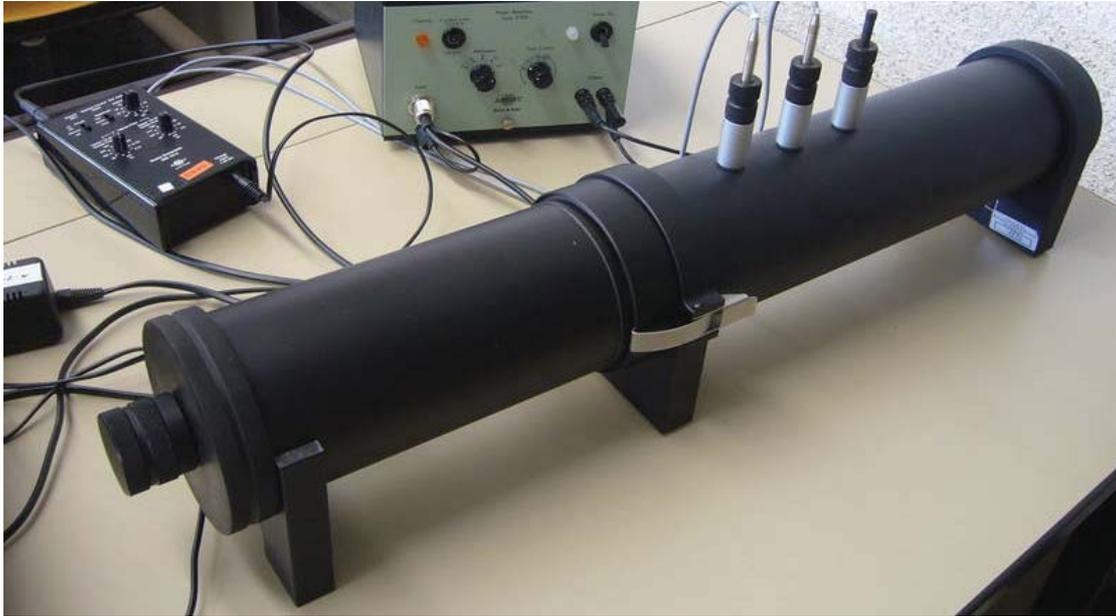
Voraussetzung diffuses Schallfeld → tiefe Frequenzen !!!

$$f_{\text{Sch}} = 2000 \sqrt{T/V}$$

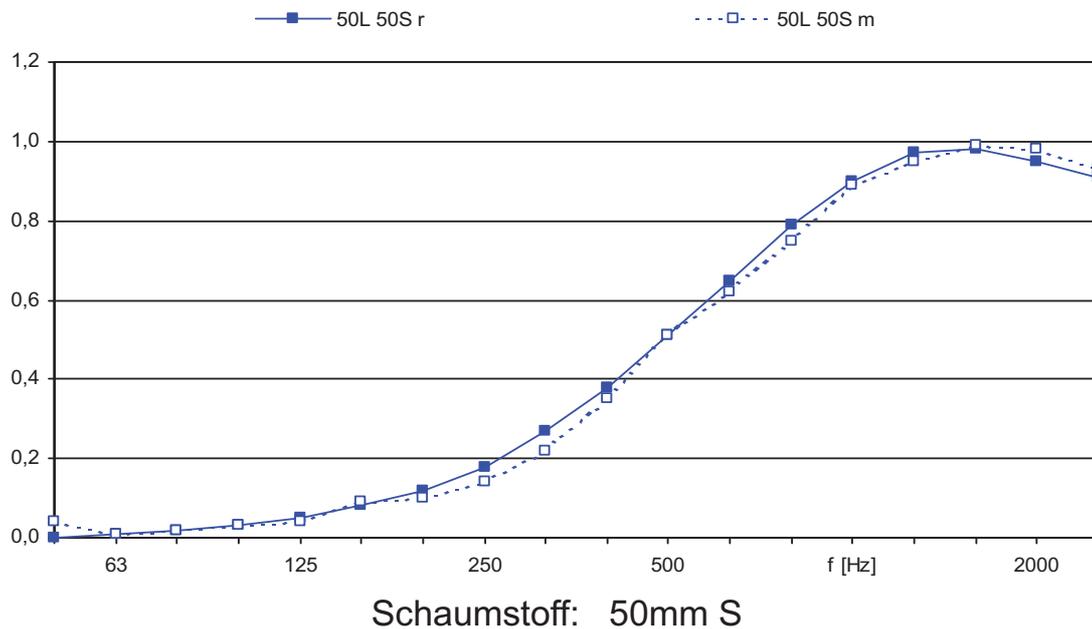
f_{Sch} ...	Schröderfrequenz	$V=200 \text{ m}^3$ & $T= 5 \text{ s}$ → 315 Hz
T ...	Nachhallzeit in s	$V=400 \text{ m}^3$ & $T= 10 \text{ s}$ → 315 Hz
V ...	Raumvolumen in m^3	$V=200 \text{ m}^3$ & $T=0.5 \text{ s}$ → 100 Hz

Grenze modales und diffuses Schallfeld (modale Überlappung)

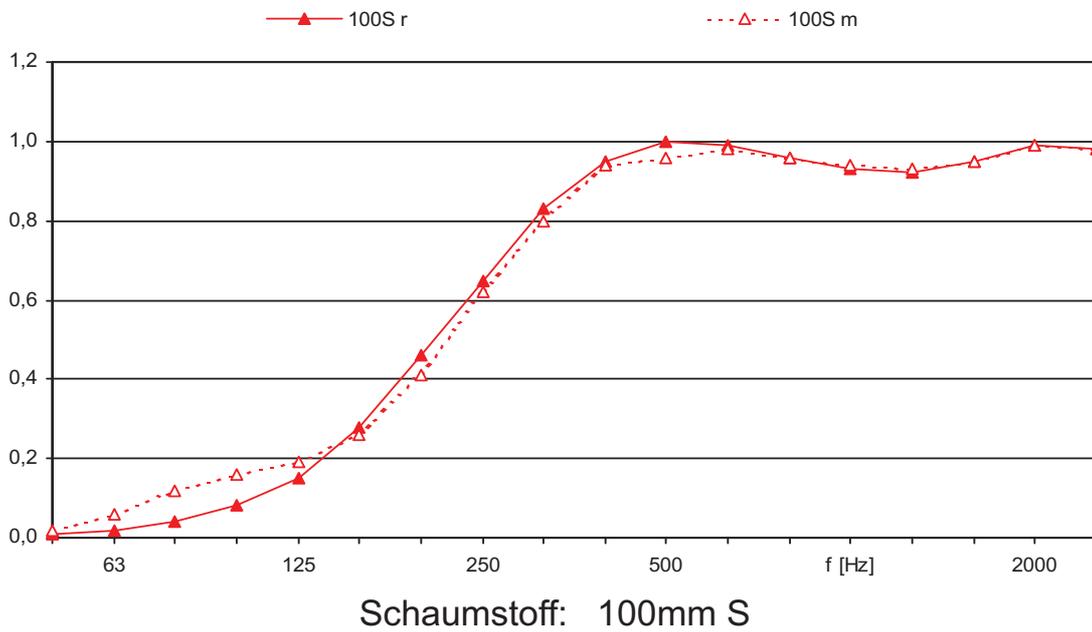
Senkrechter Schalleinfall - Impedanzrohr



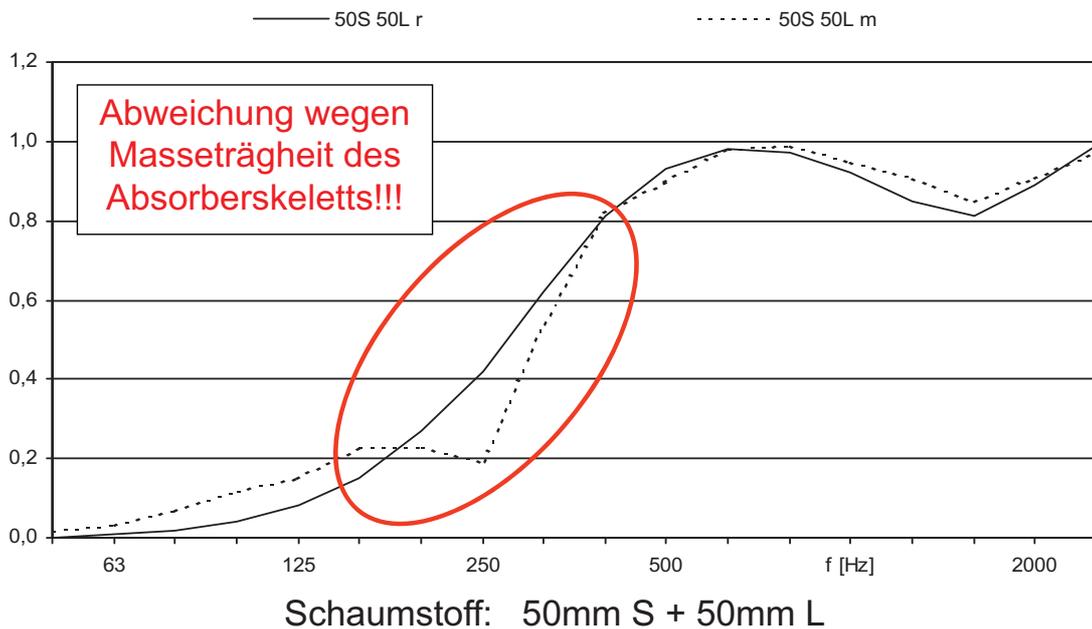
Vergleich senkrechter Schalleinfall (I a)



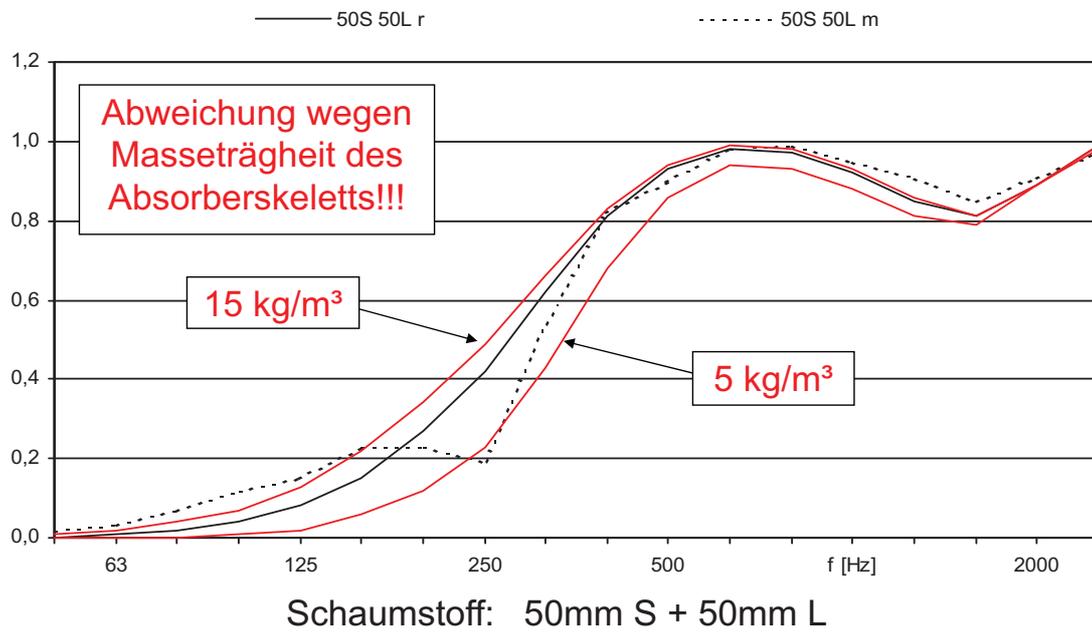
Vergleich senkrechter Schalleinfall (I b)



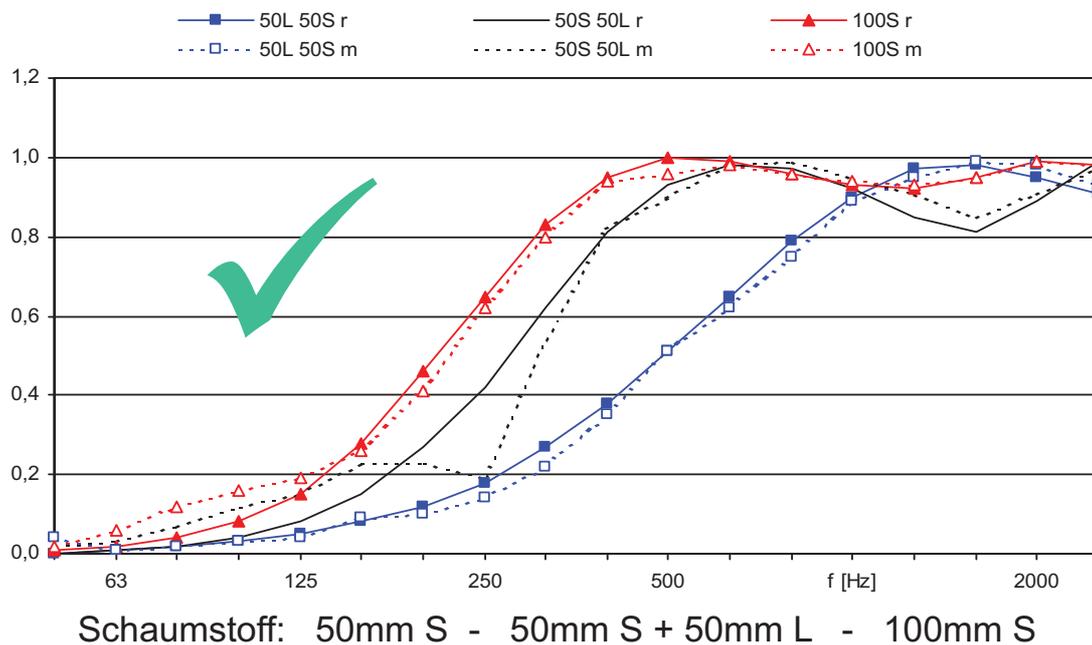
Vergleich senkrechter Schalleinfall (I c)



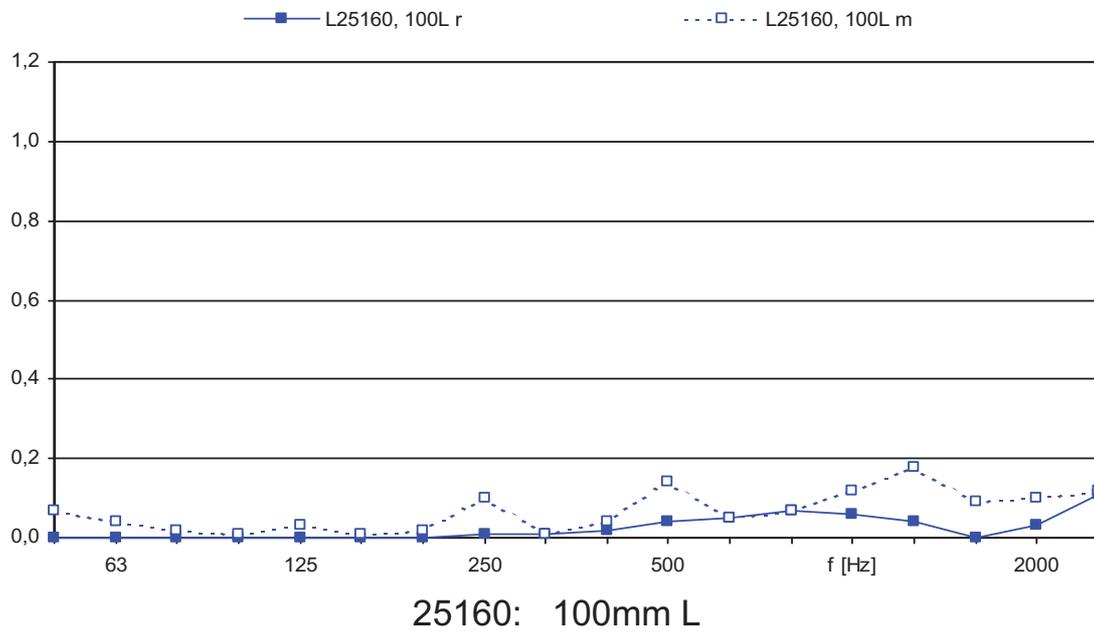
Vergleich senkrechter Schalleinfall (I c)



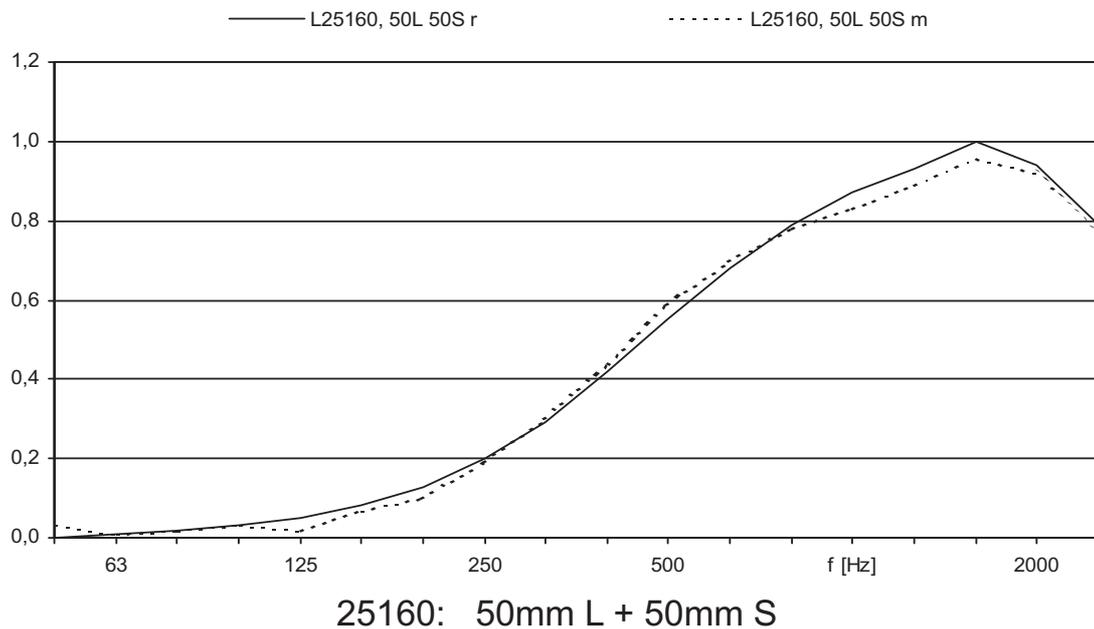
Vergleich senkrechter Schalleinfall (I a-c)



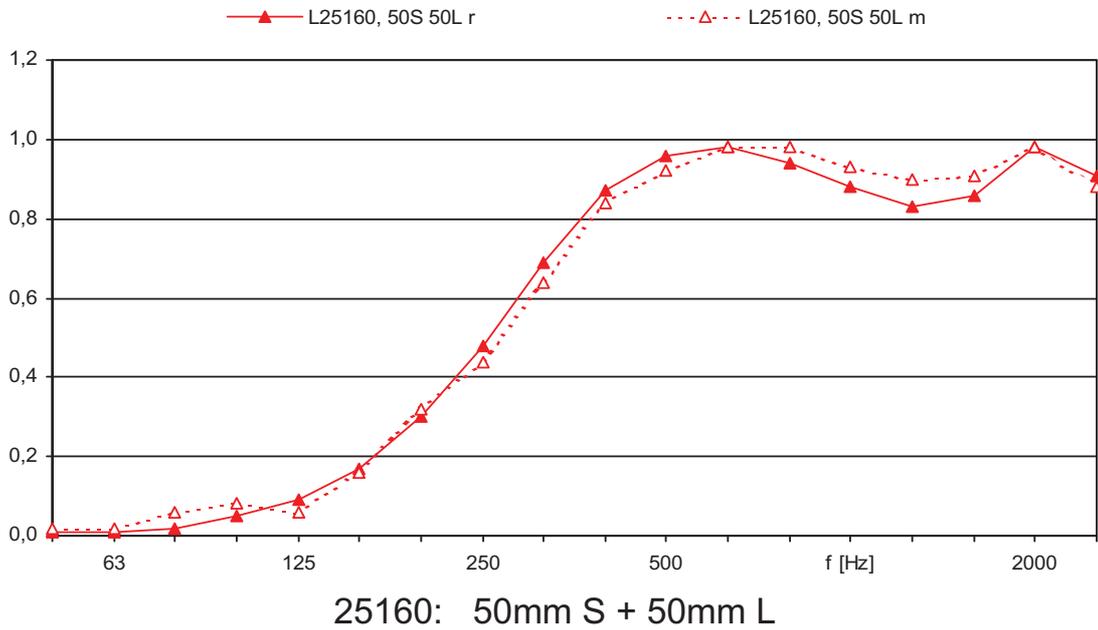
Vergleich senkrechter Schalleinfall (II a)



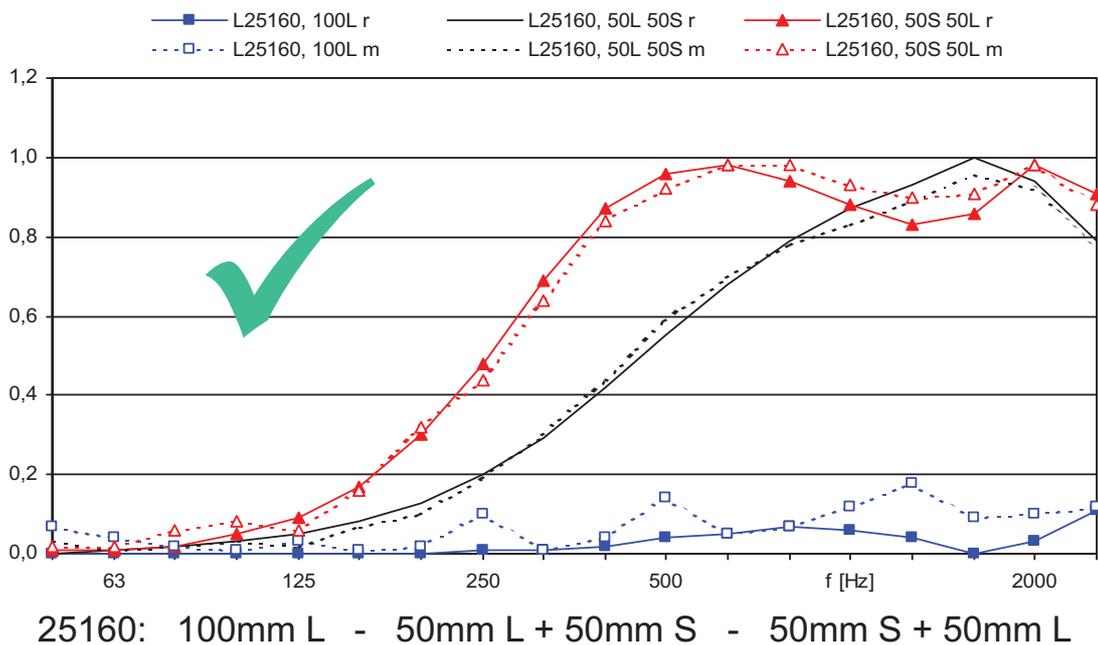
Vergleich senkrechter Schalleinfall (II b)



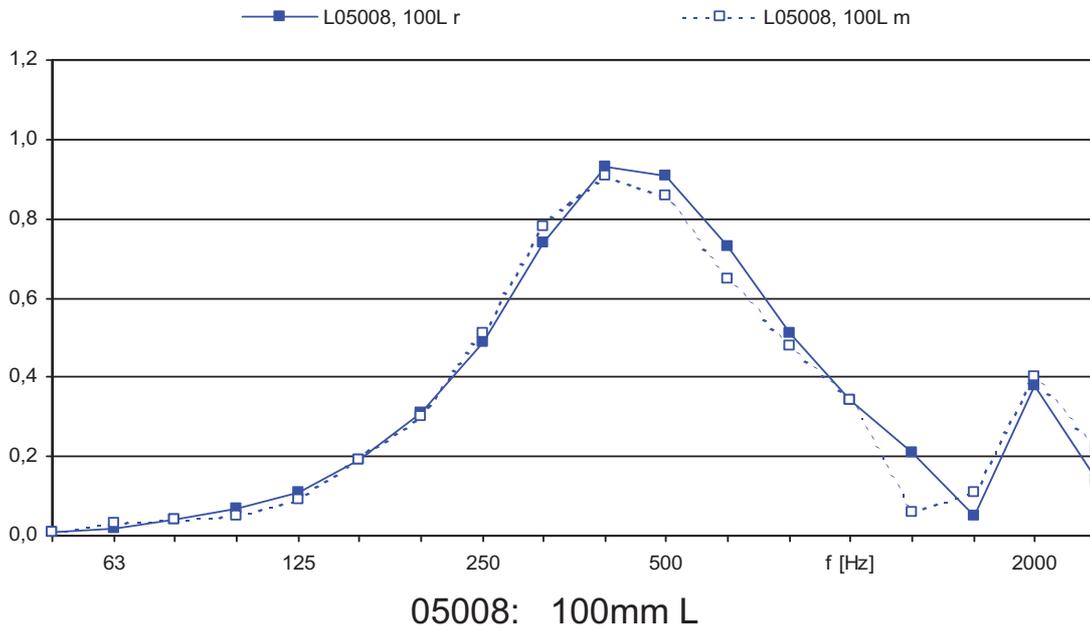
Vergleich senkrechter Schalleinfall (II c)



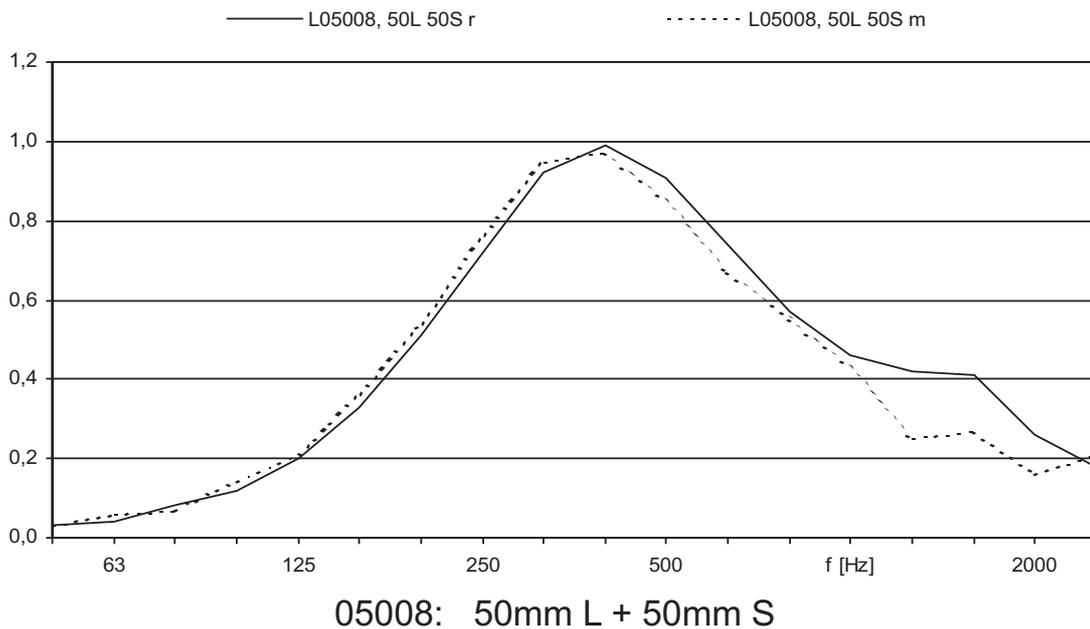
Vergleich senkrechter Schalleinfall (II a-c)



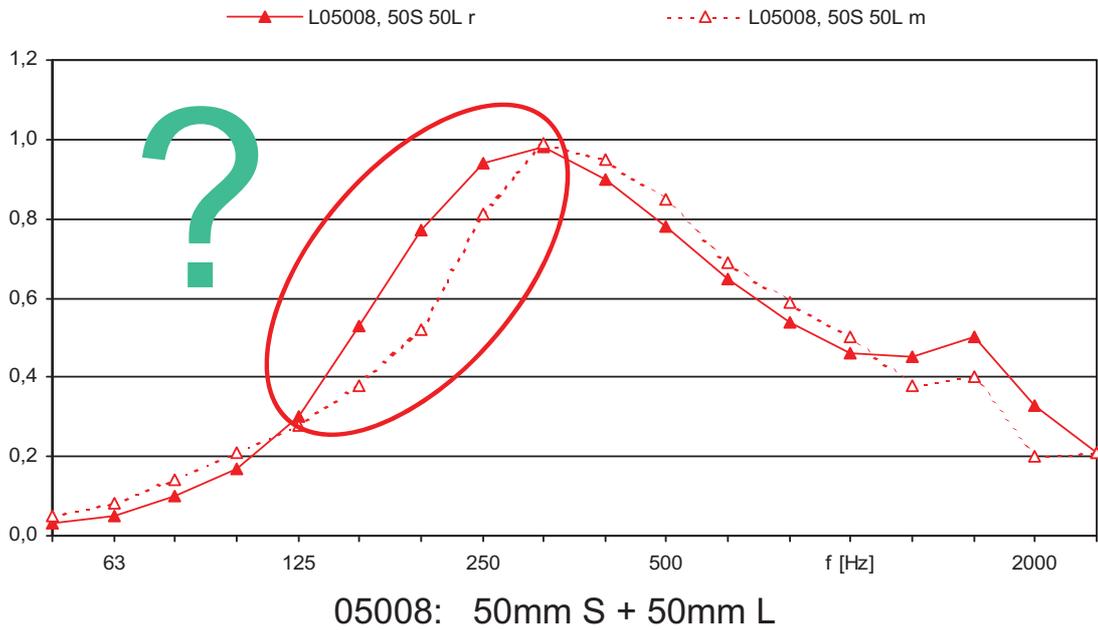
Vergleich senkrechter Schalleinfall (III a)



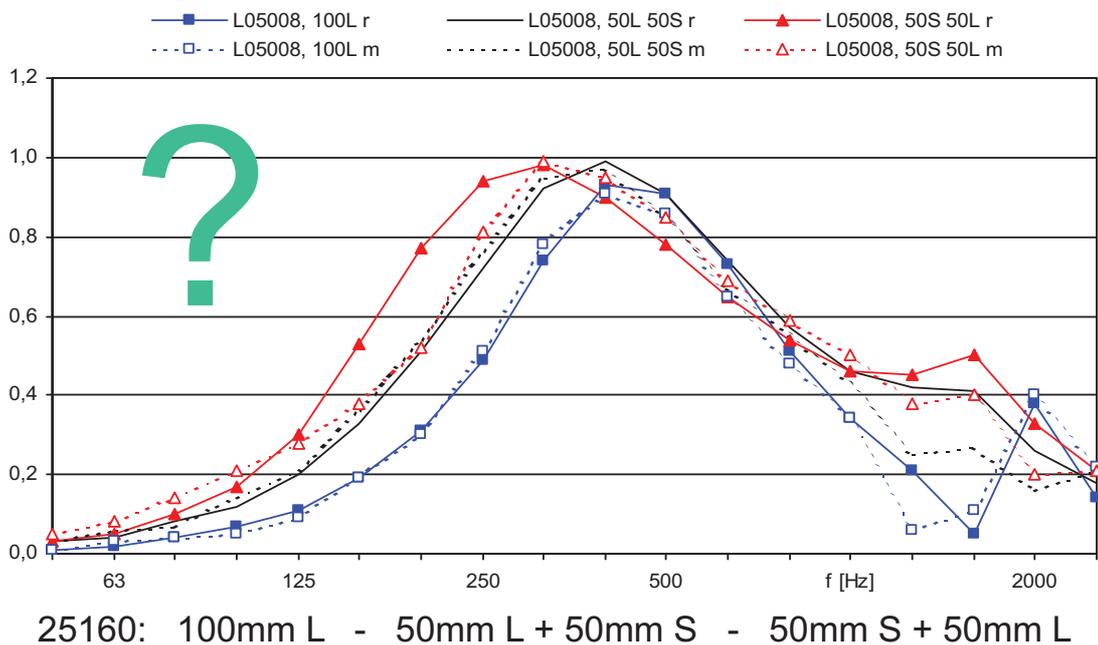
Vergleich senkrechter Schalleinfall (III b)



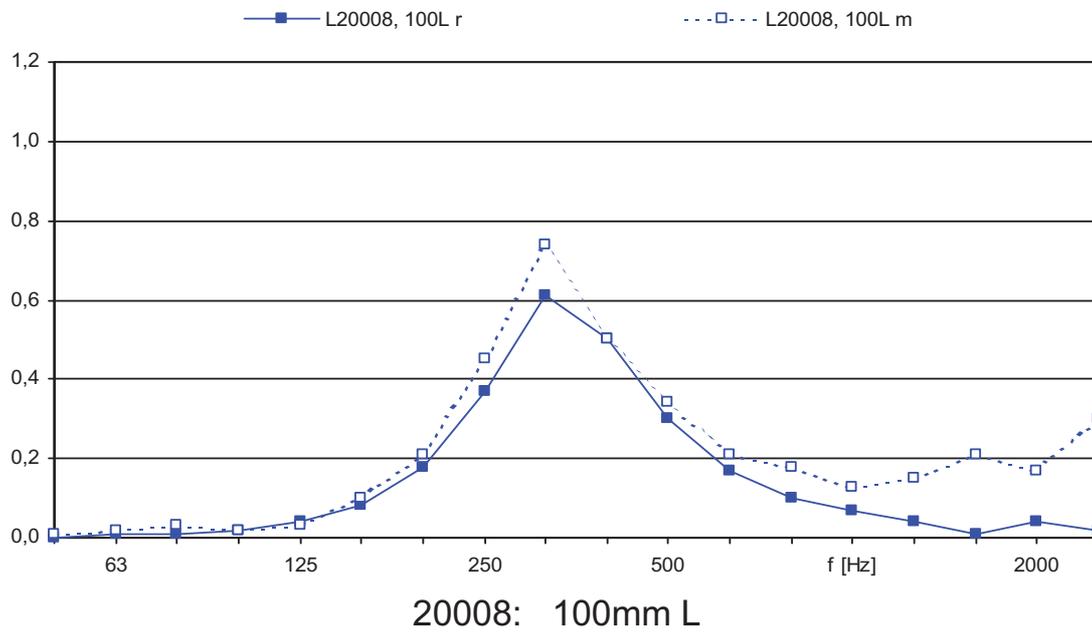
Vergleich senkrechter Schalleinfall (III c)



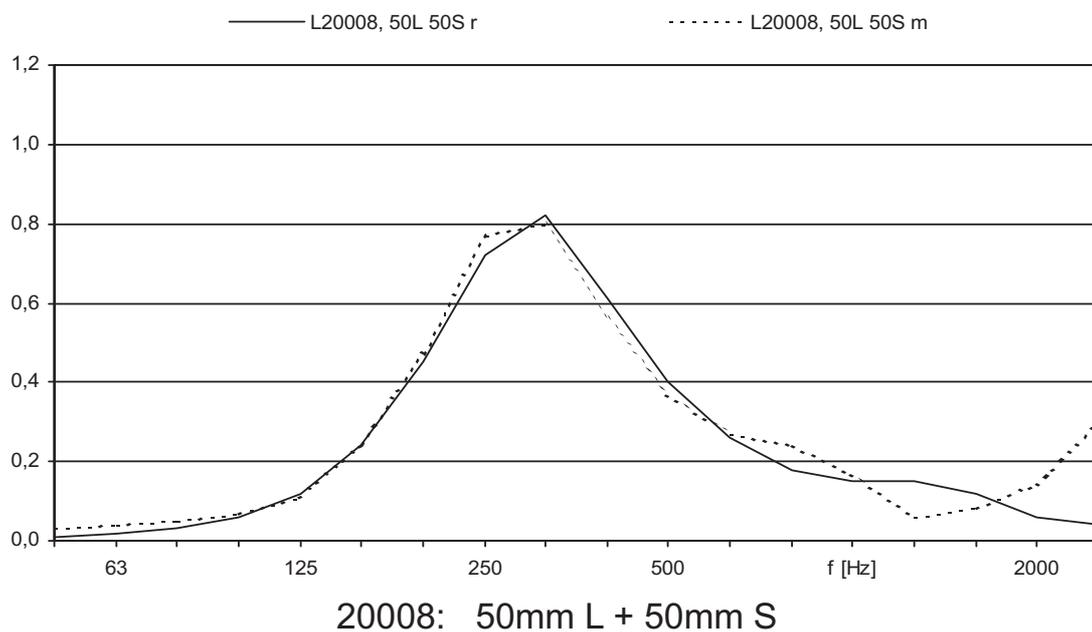
Vergleich senkrechter Schalleinfall (III a-c)



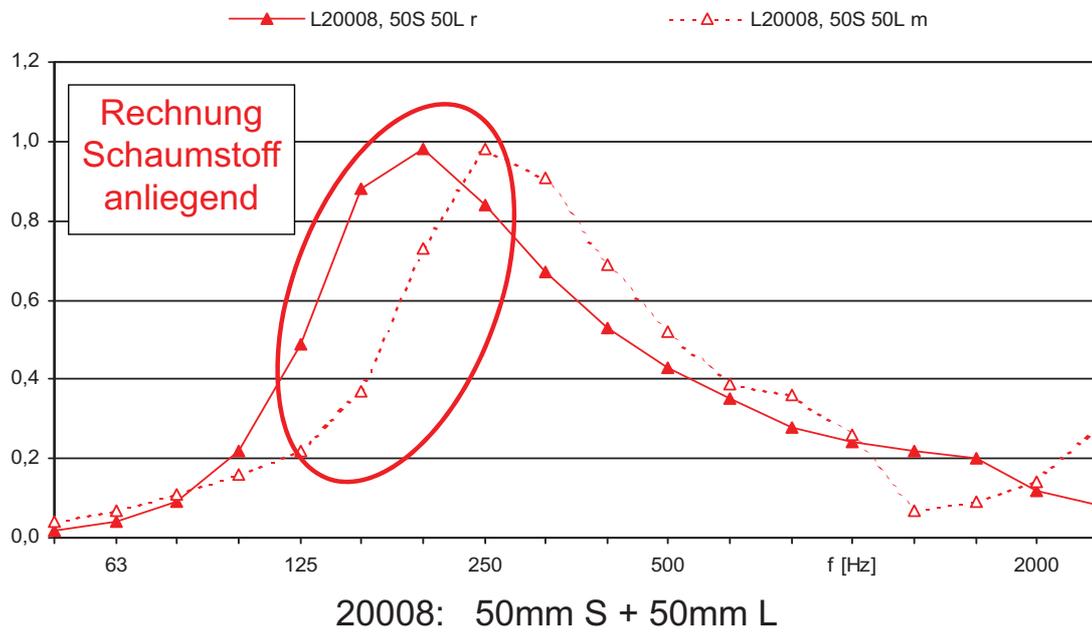
Vergleich senkrechter Schalleinfall (IV a)



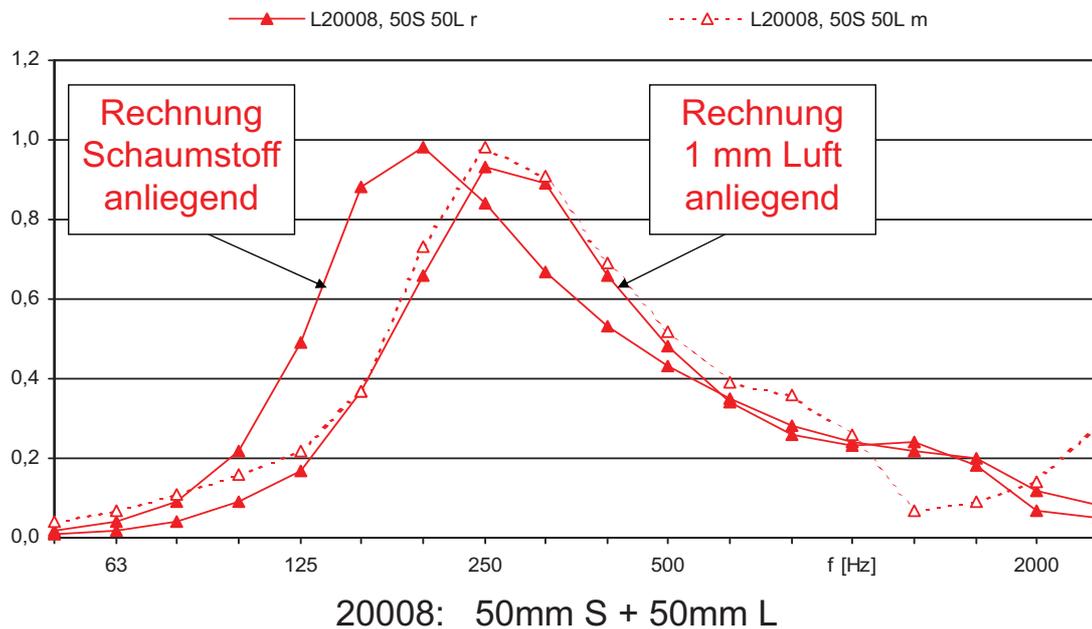
Vergleich senkrechter Schalleinfall (IV b)



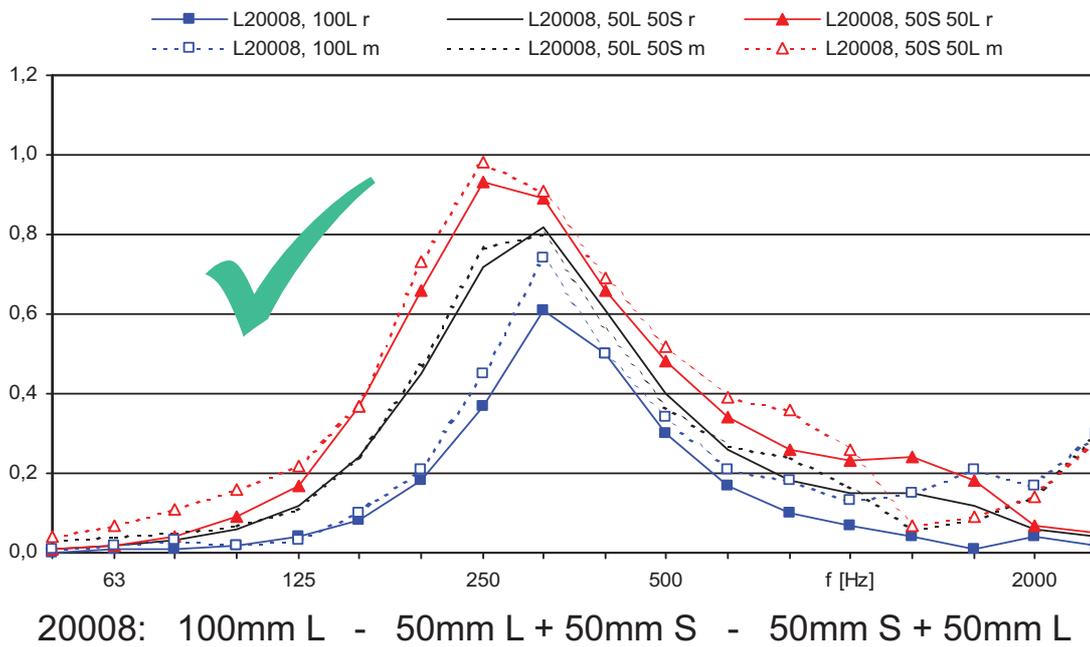
Vergleich senkrechter Schalleinfall (IV c)



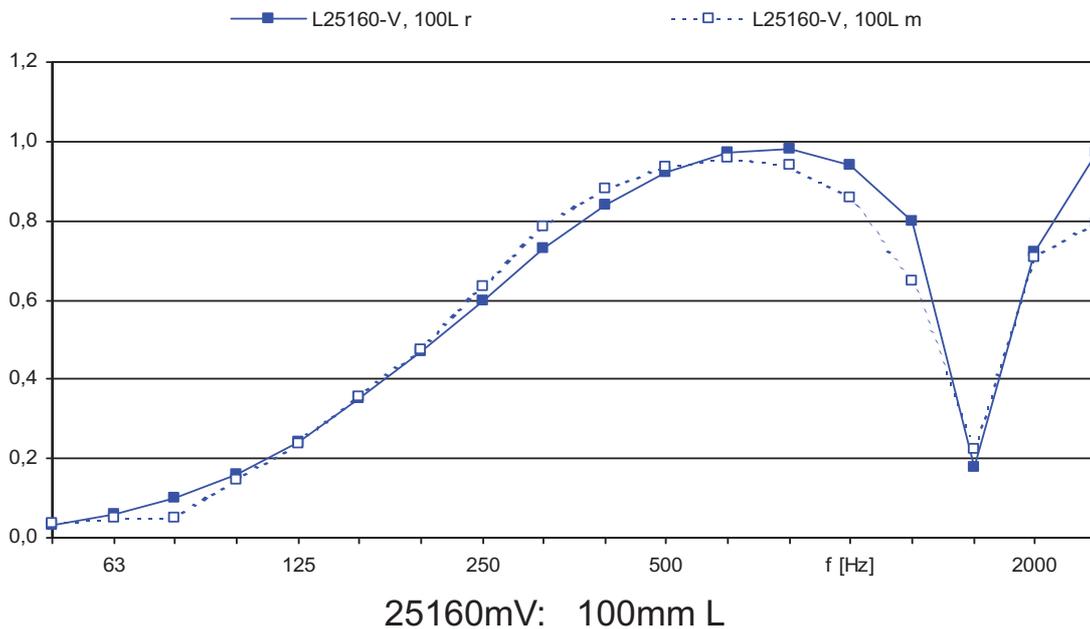
Vergleich senkrechter Schalleinfall (IV c)



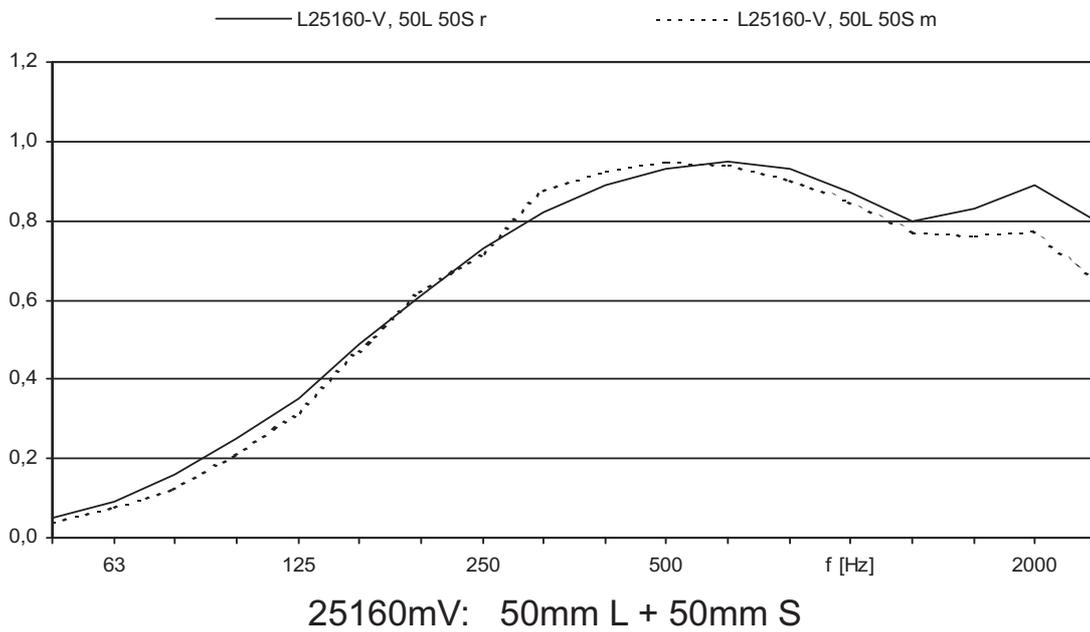
Vergleich senkrechter Schalleinfall (IV a-c)



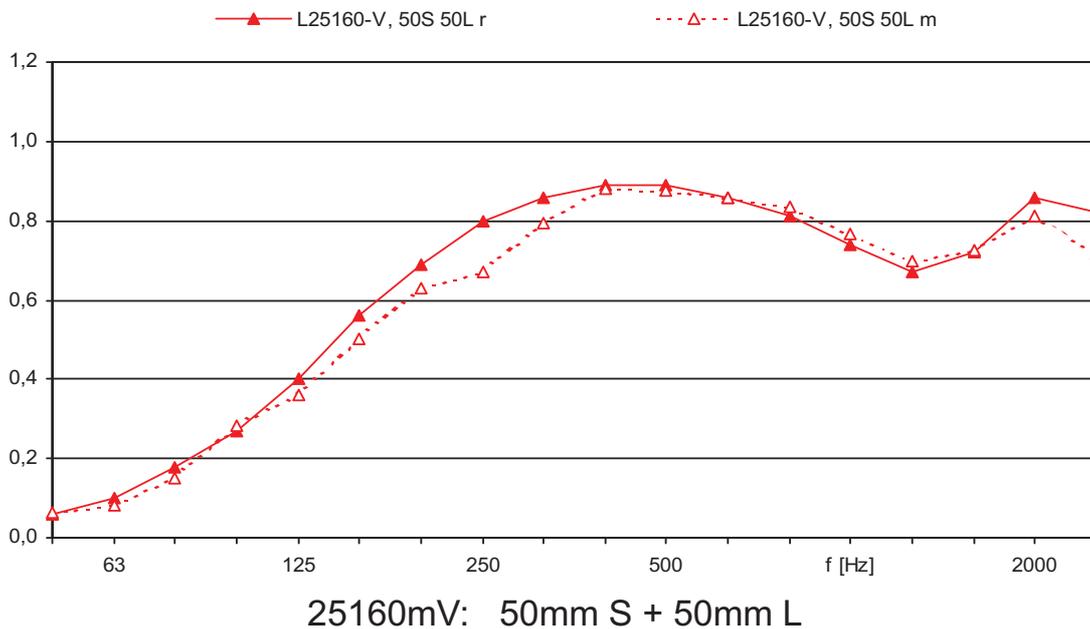
Vergleich senkrechter Schalleinfall (V a)



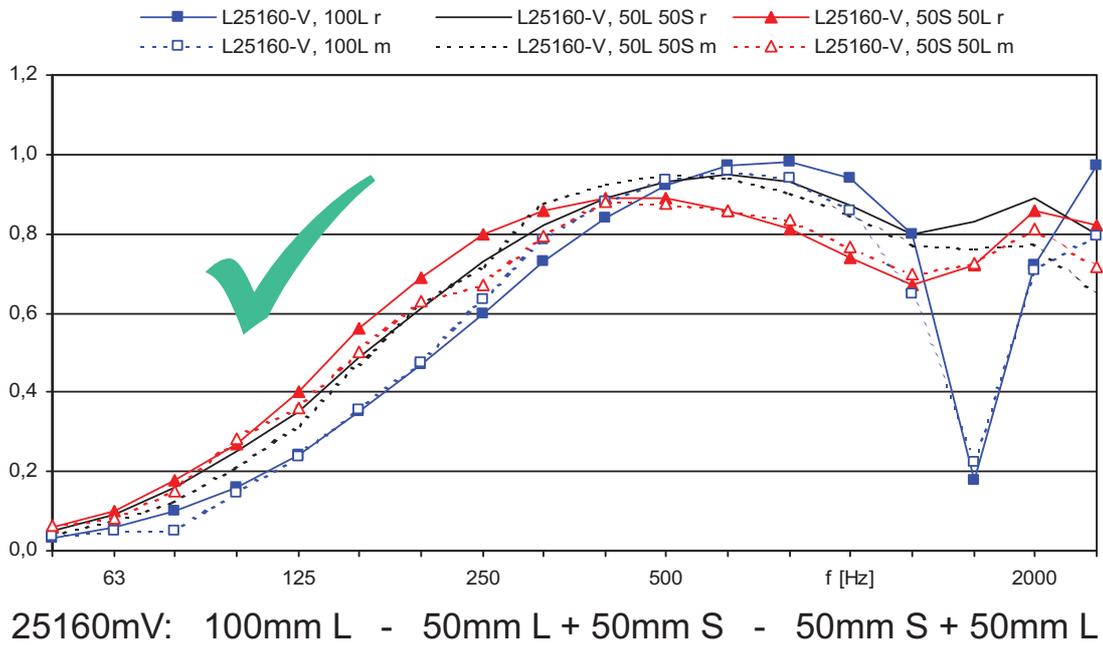
Vergleich senkrechter Schalleinfall (V b)



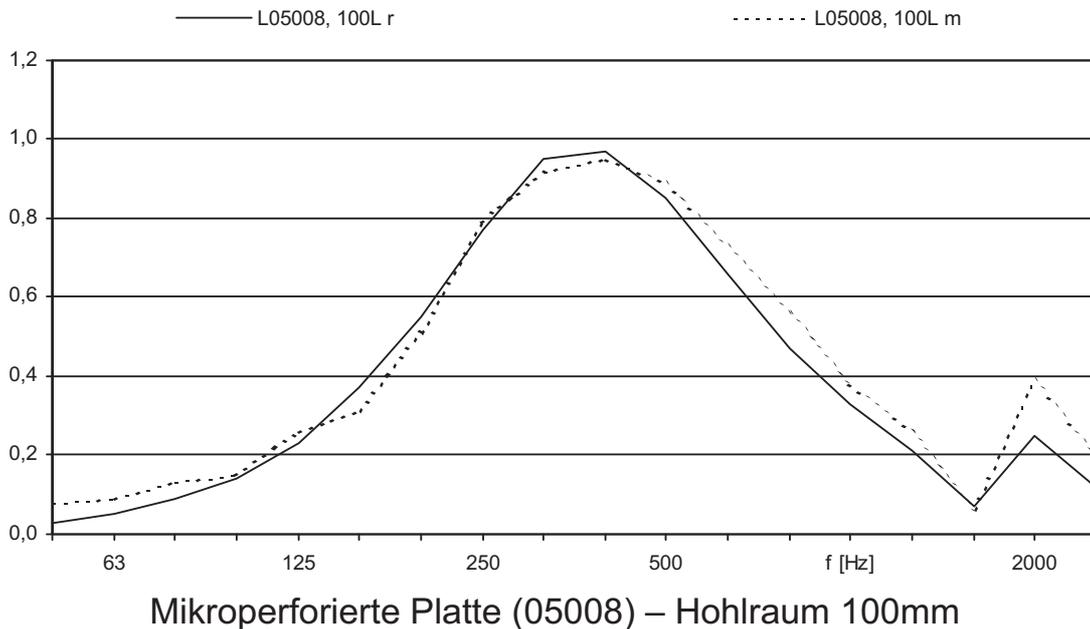
Vergleich senkrechter Schalleinfall (V c)



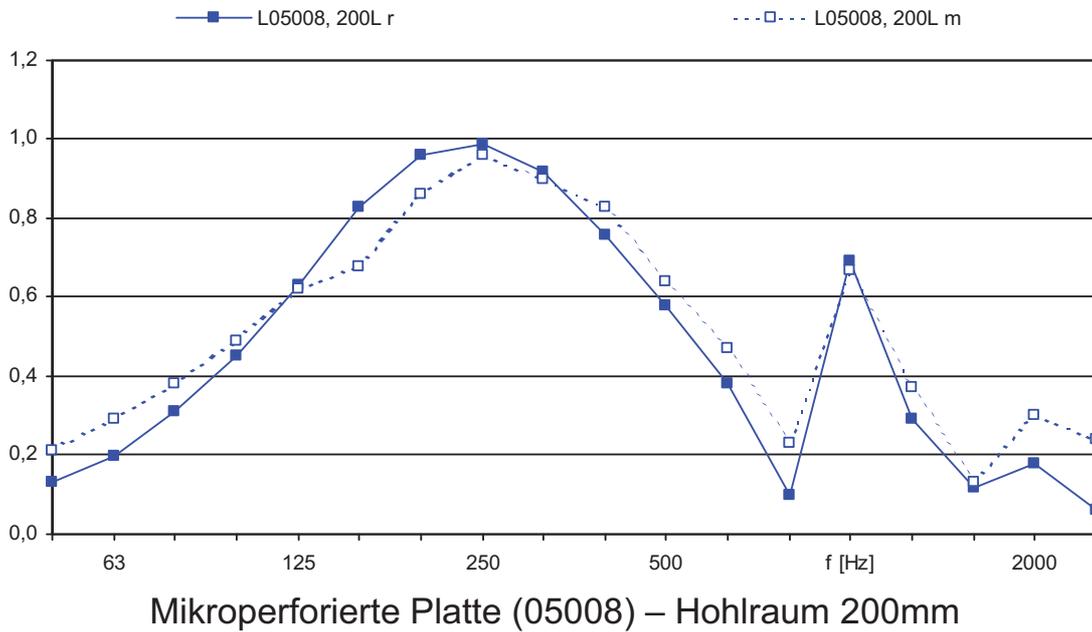
Vergleich senkrechter Schalleinfall (V a-c)



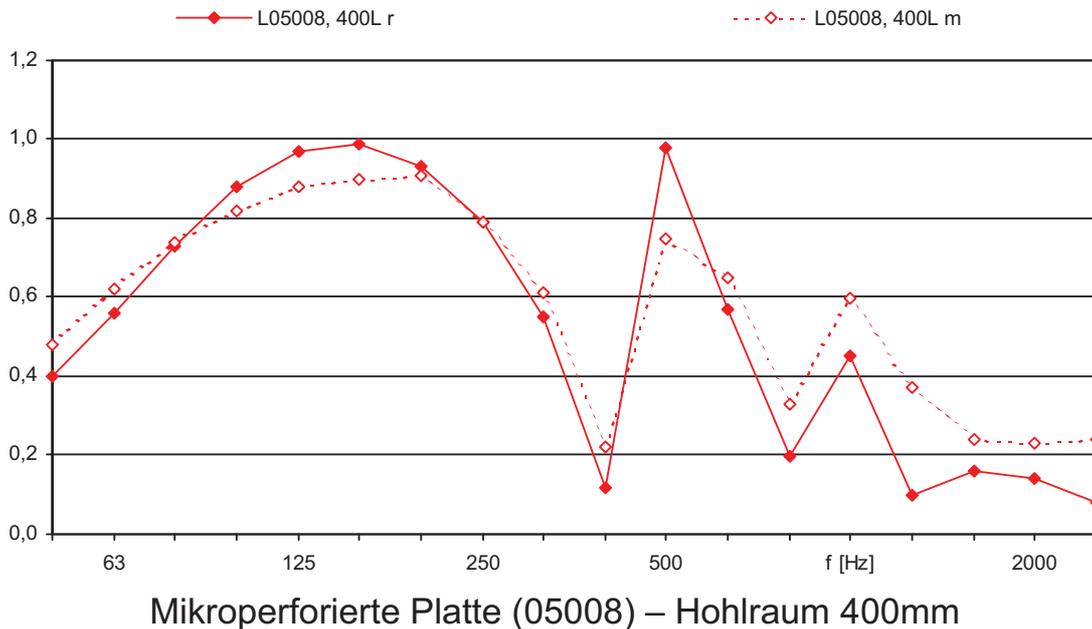
Vergleich senkrechter Schalleinfall (VI a)



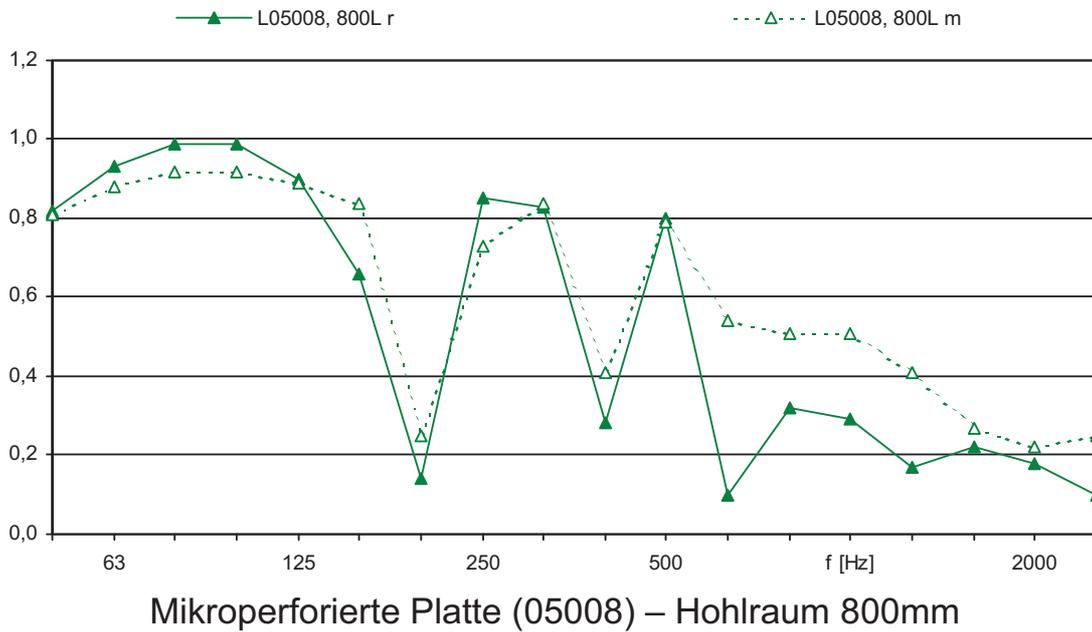
Vergleich senkrechter Schalleinfall (VI b)



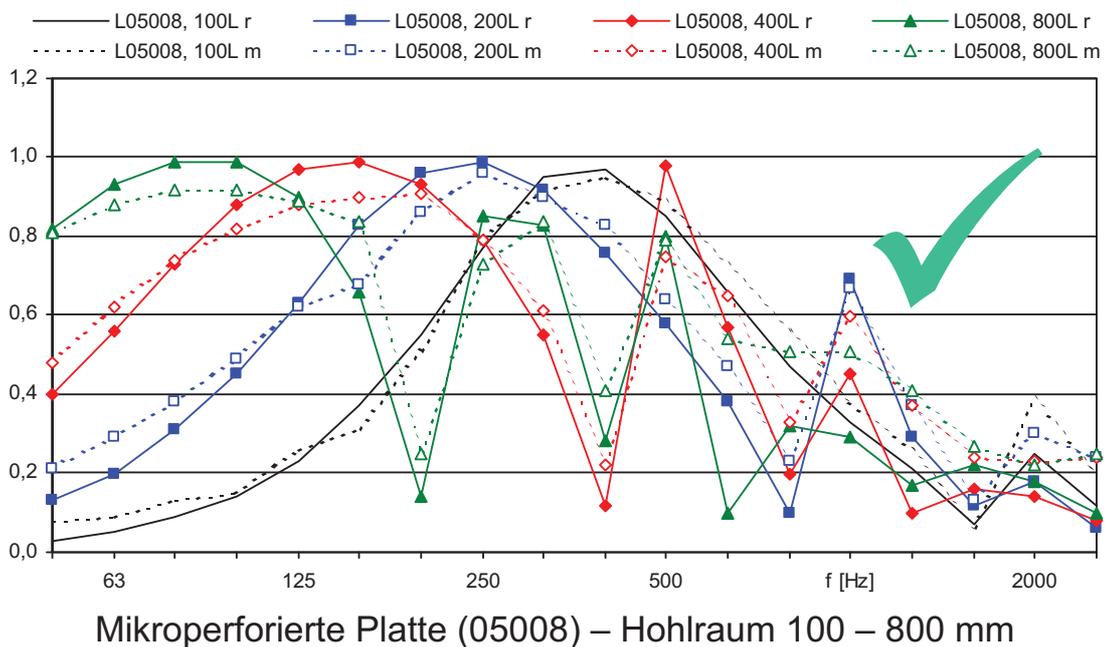
Vergleich senkrechter Schalleinfall (VI c)



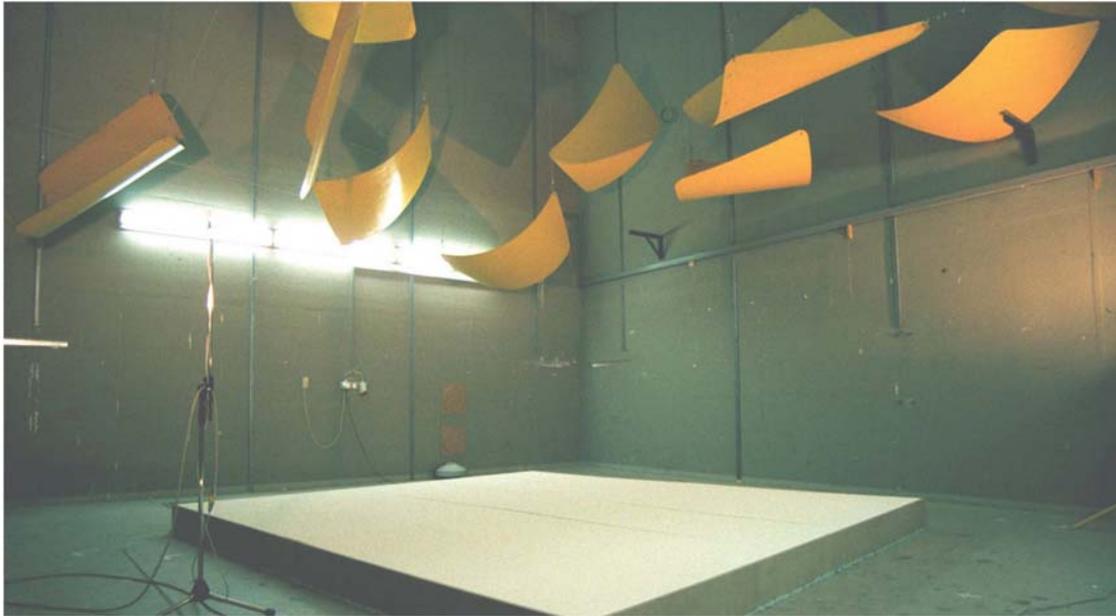
Vergleich senkrechter Schalleinfall (VI d)



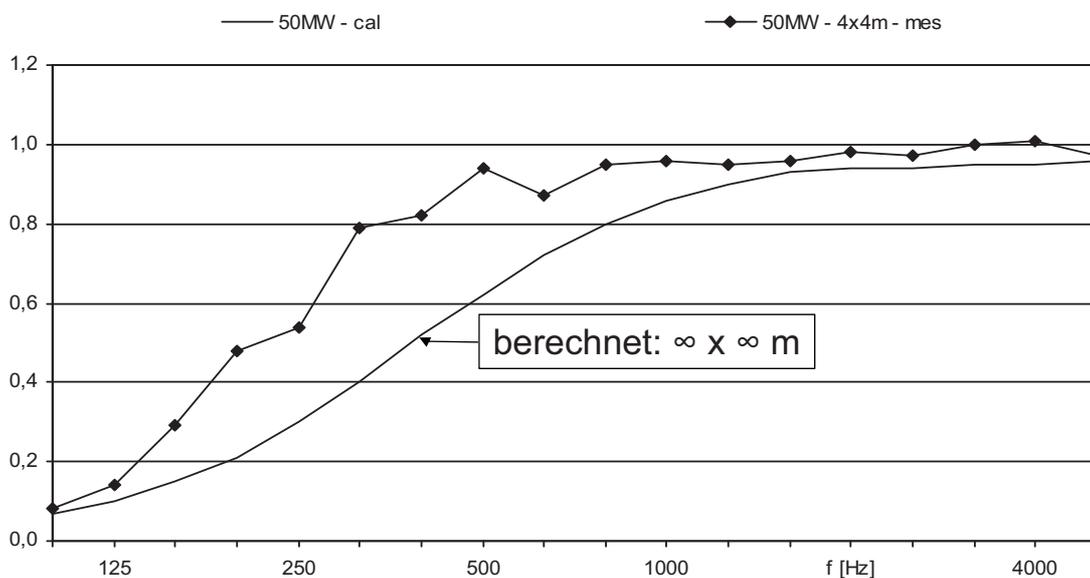
Vergleich senkrechter Schalleinfall (VI a-d)



Diffuser Schalleinfall - Hallraum

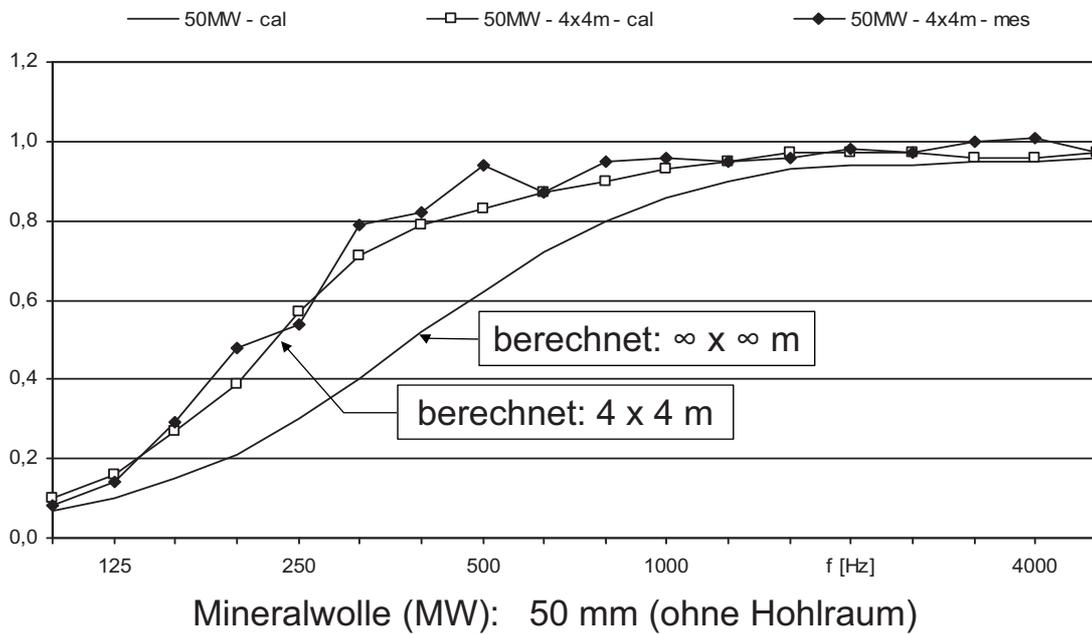


Vergleich diffuser Schalleinfall (I a)

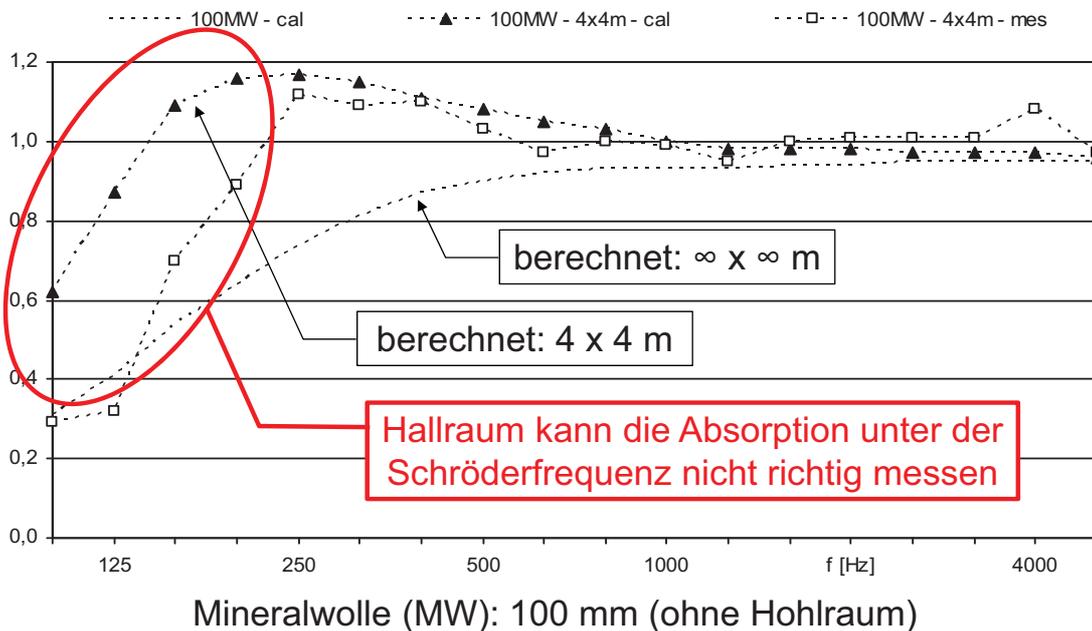


Mineralwolle (MW): 50 mm (ohne Hohlraum)

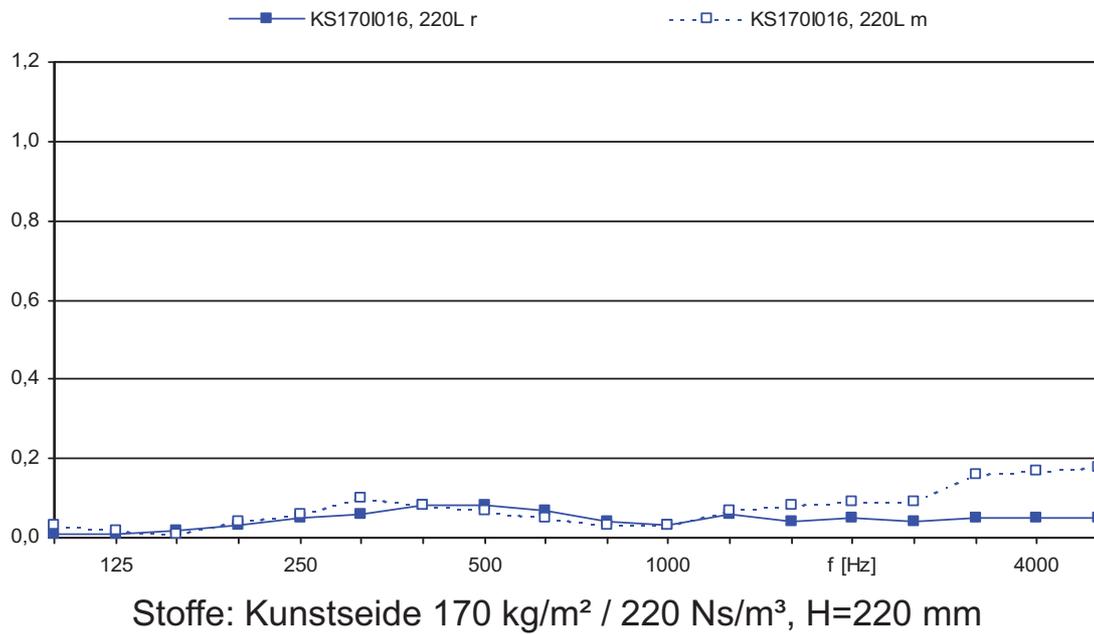
Vergleich diffuser Schalleinfall (I a)



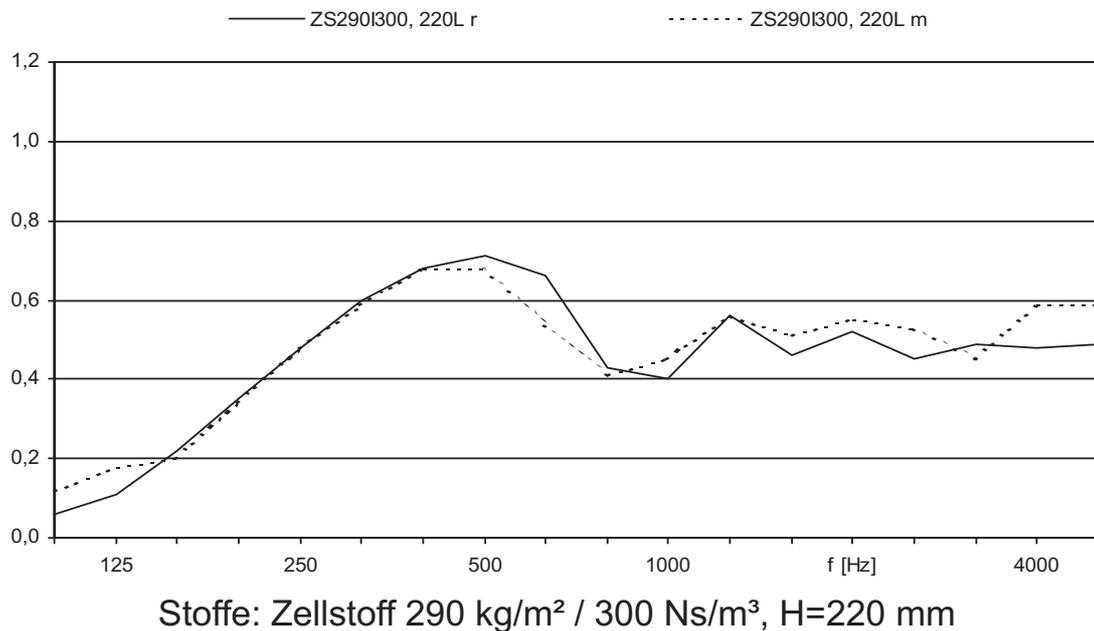
Vergleich diffuser Schalleinfall (I b)



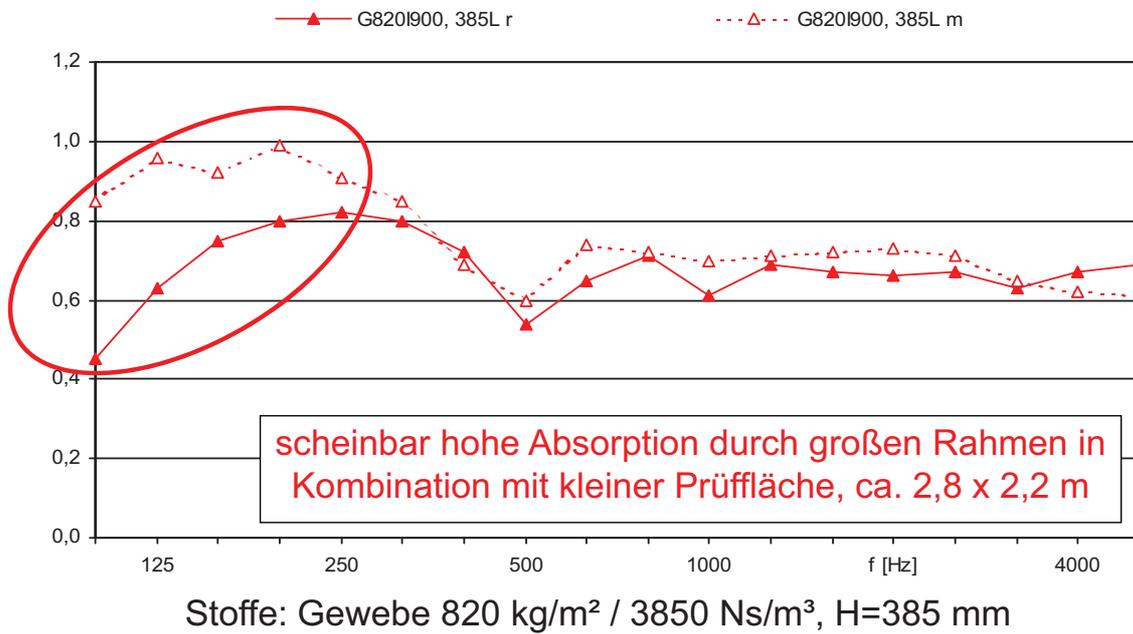
Vergleich diffuser Schalleinfall (II a)



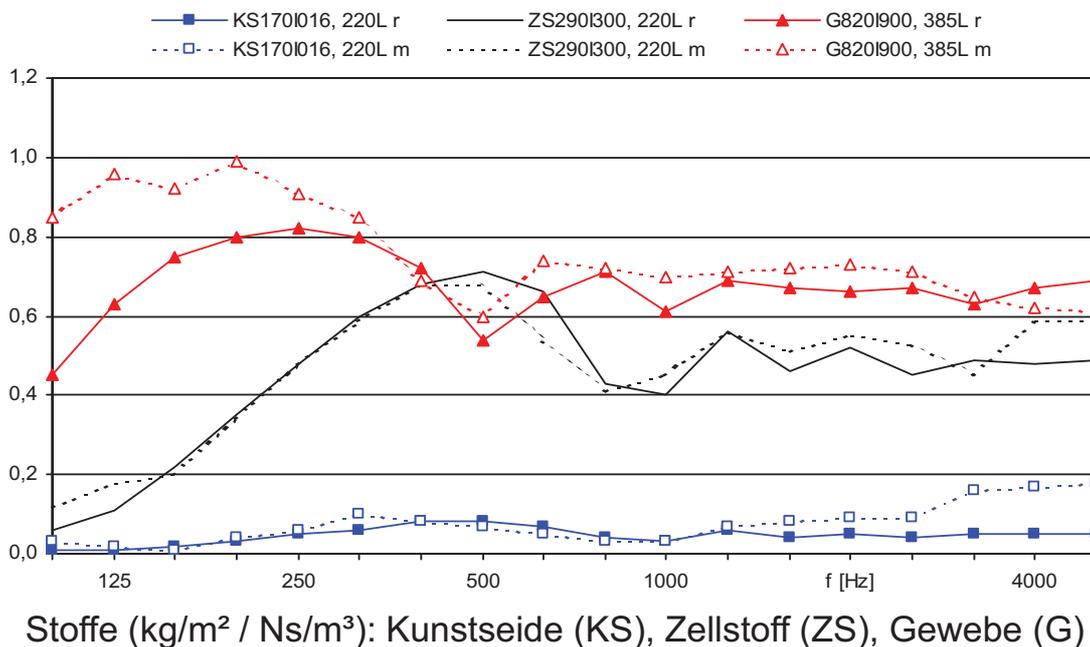
Vergleich diffuser Schalleinfall (II b)



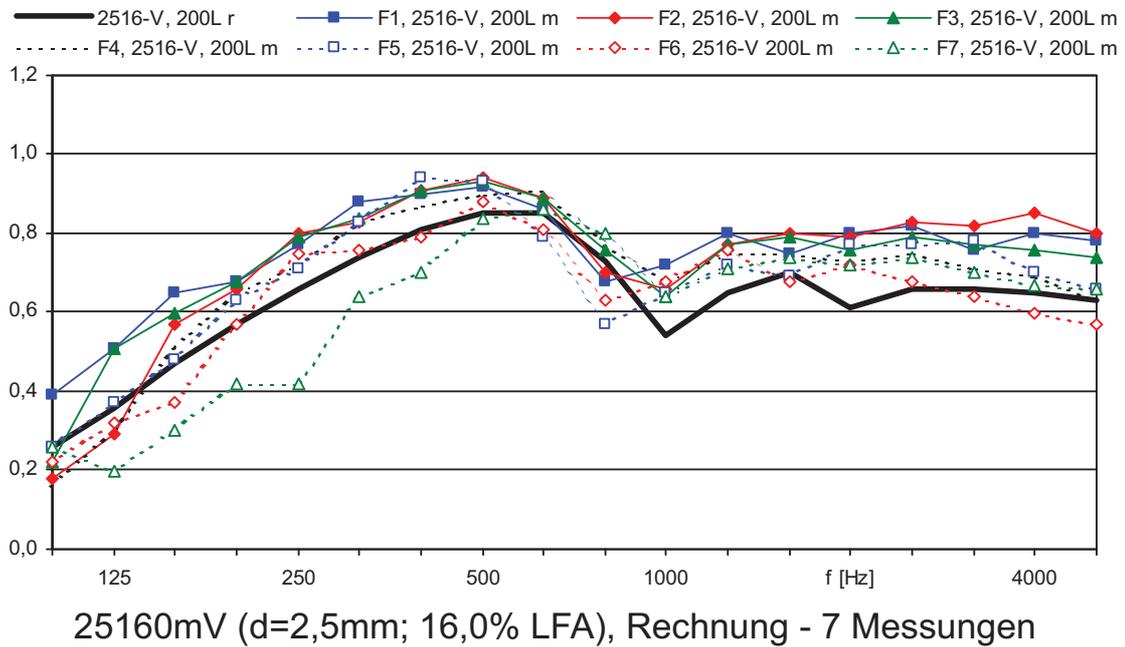
Vergleich diffuser Schalleinfall (II c)



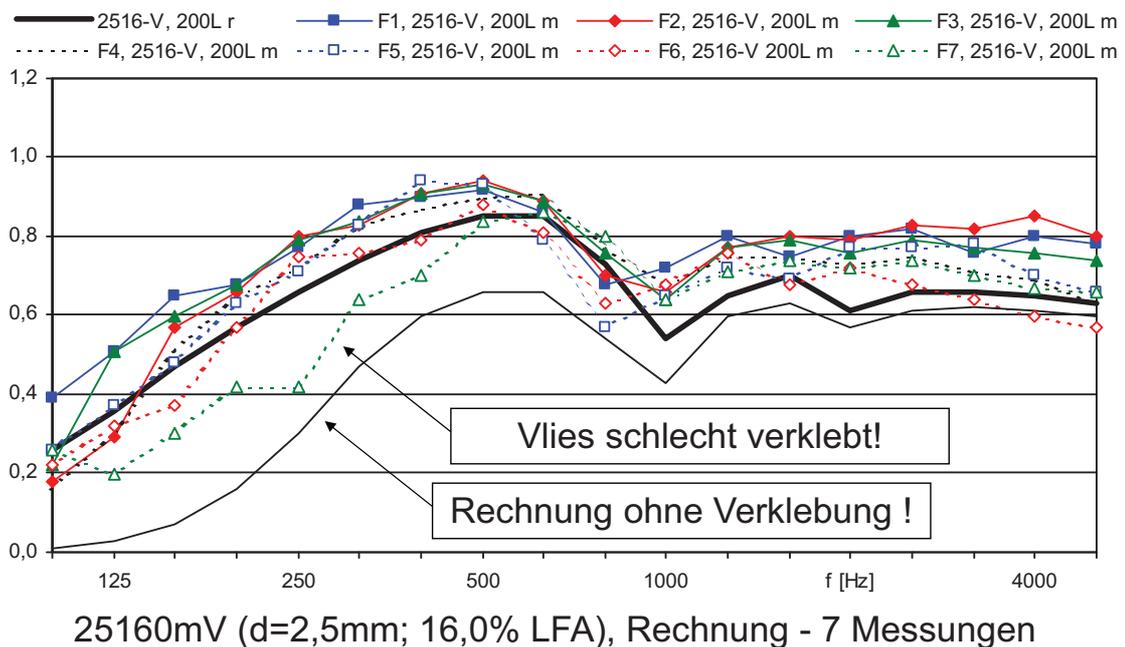
Vergleich diffuser Schalleinfall (II a-c)



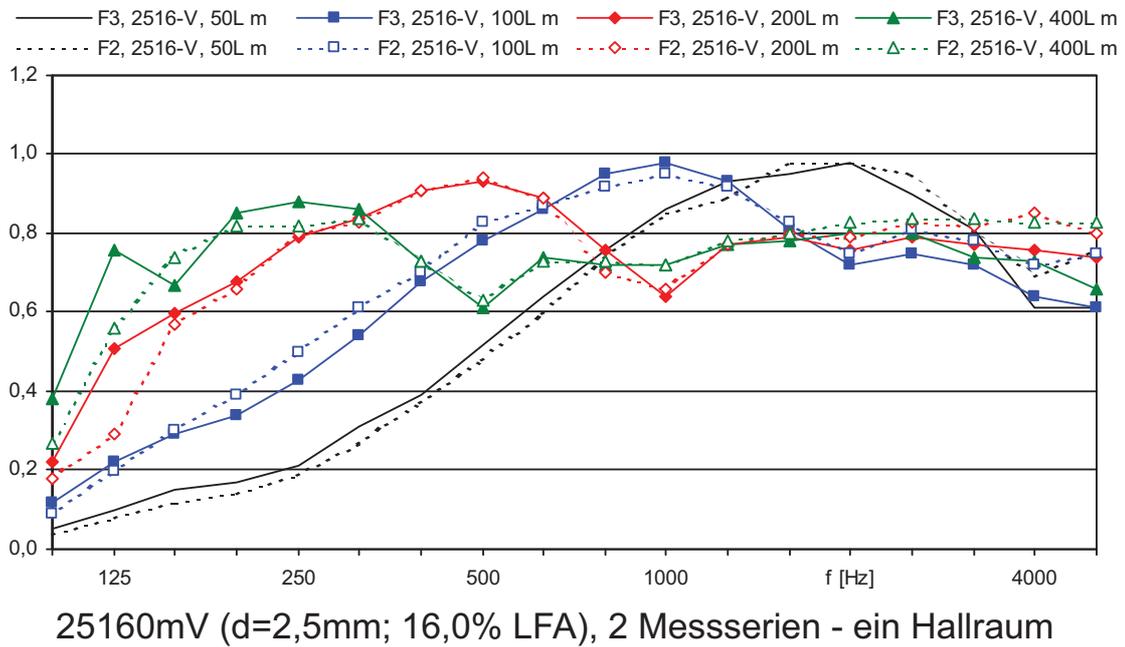
Vergleich diffuser Schalleinfall (III)



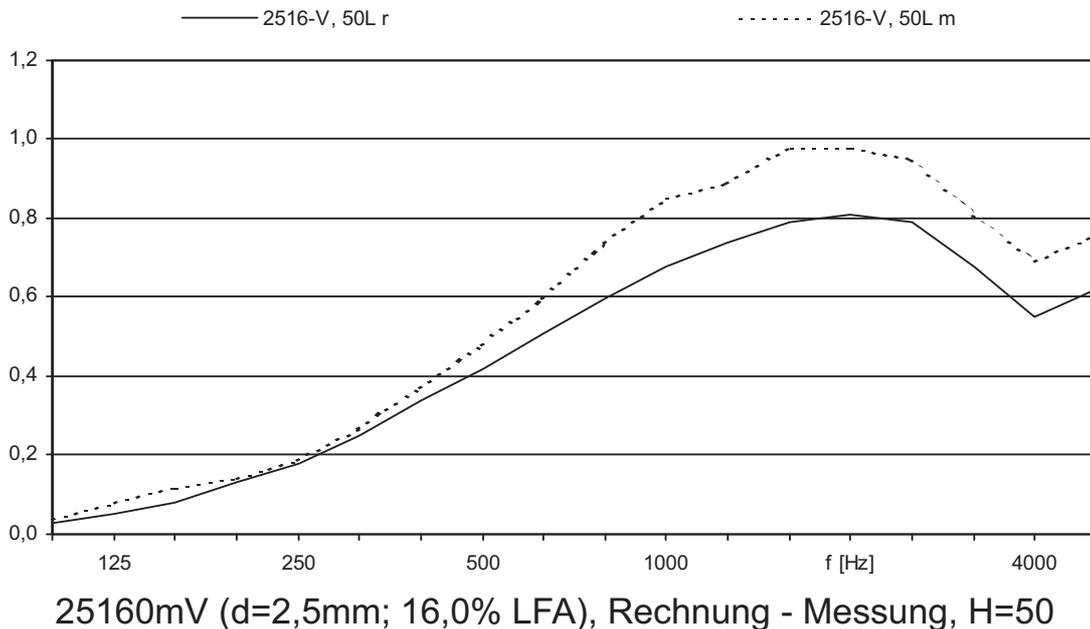
Vergleich diffuser Schalleinfall (III)



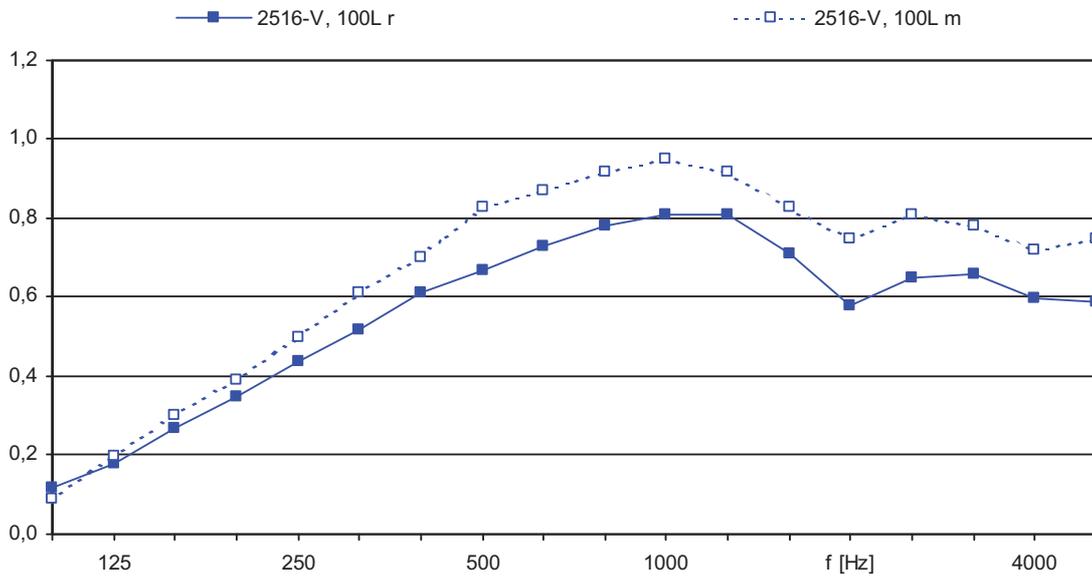
Vergleich diffuser Schalleinfall (IV)



Vergleich diffuser Schalleinfall (V a)

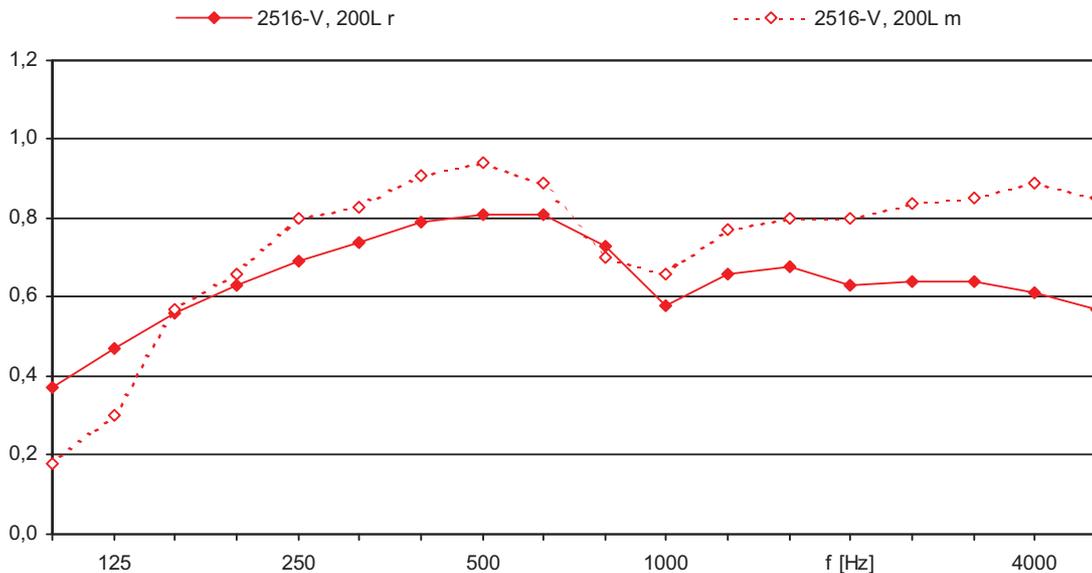


Vergleich diffuser Schalleinfall (V b)



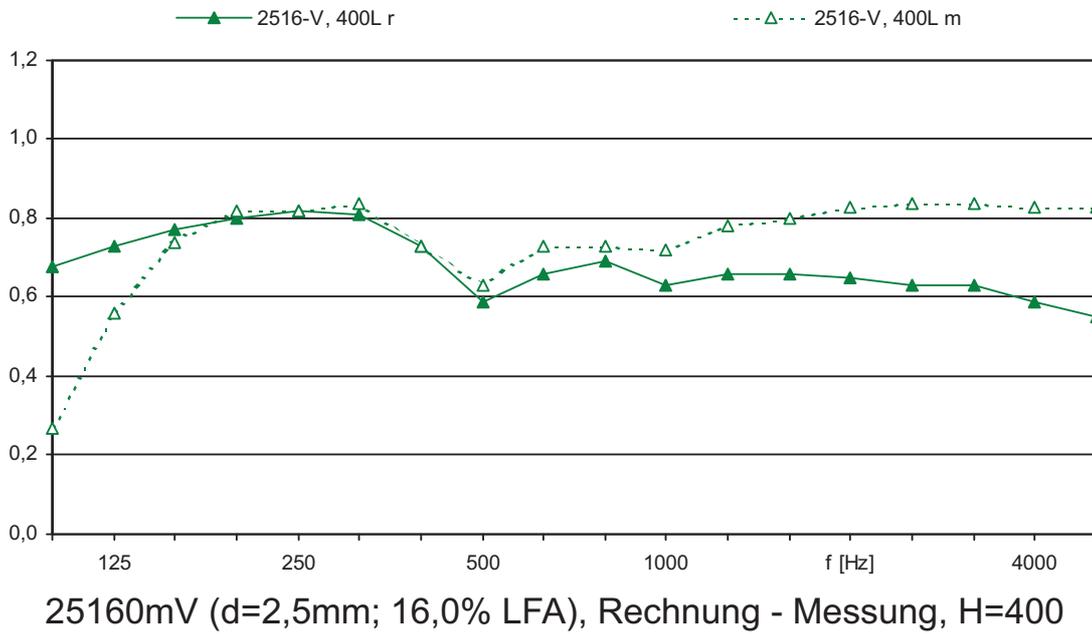
25160mV (d=2,5mm; 16,0% LFA), Rechnung - Messung, H=100

Vergleich diffuser Schalleinfall (V c)

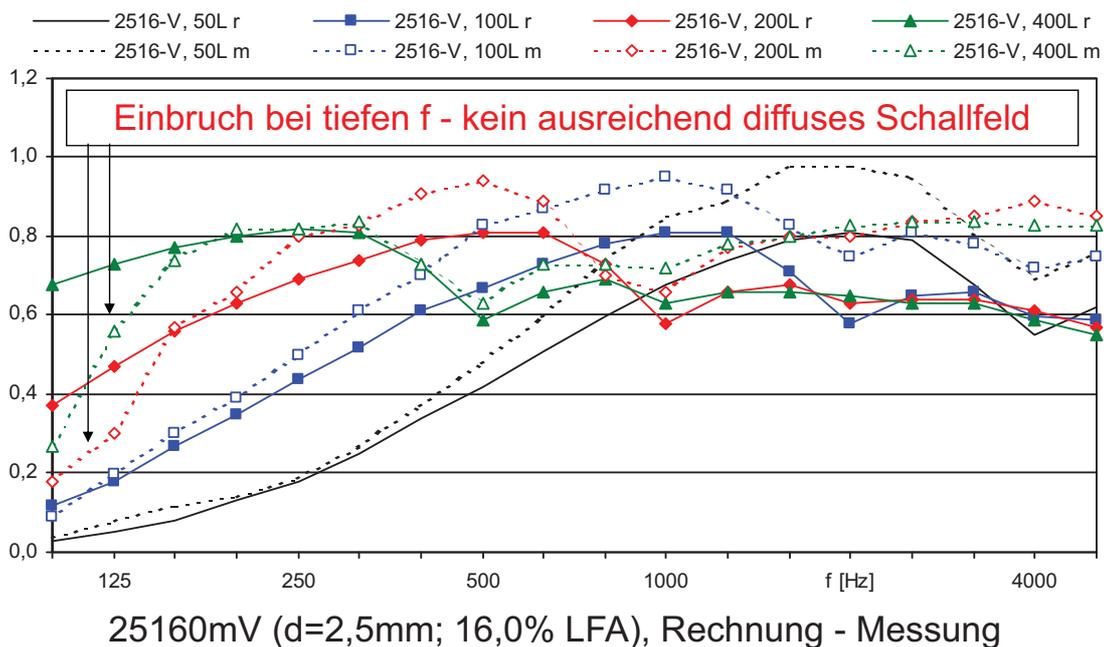


25160mV (d=2,5mm; 16,0% LFA), Rechnung - Messung, H=200

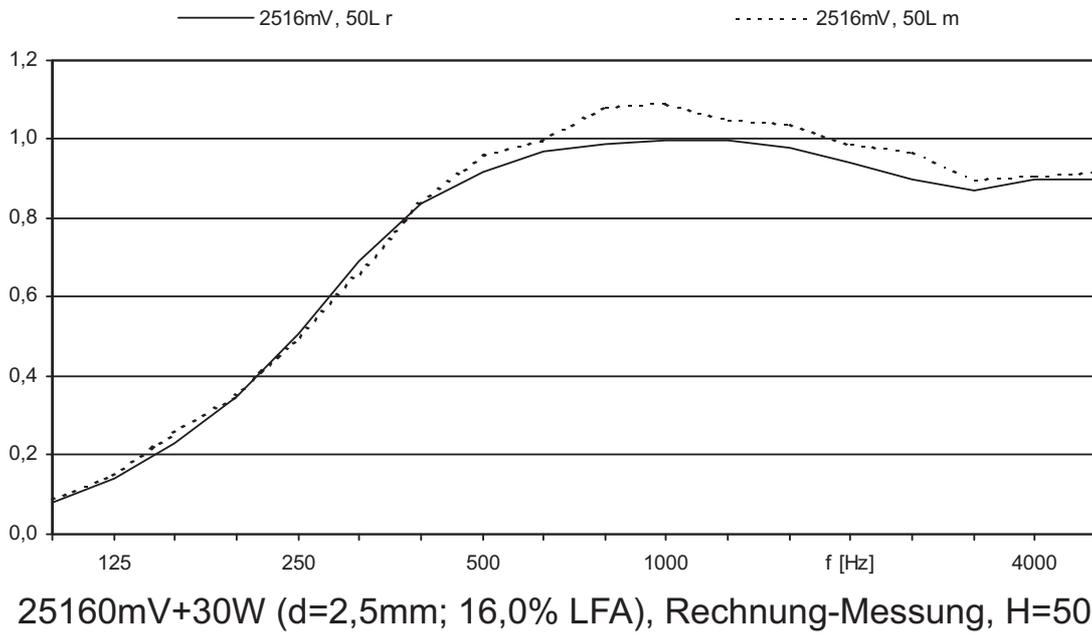
Vergleich diffuser Schalleinfall (V d)



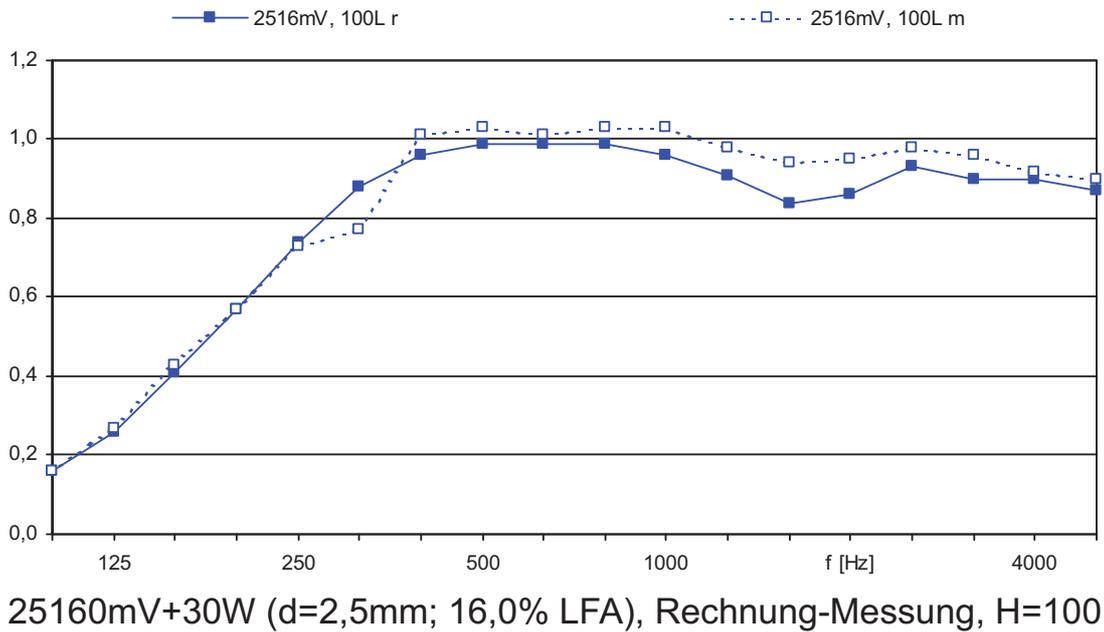
Vergleich diffuser Schalleinfall (V a-d)



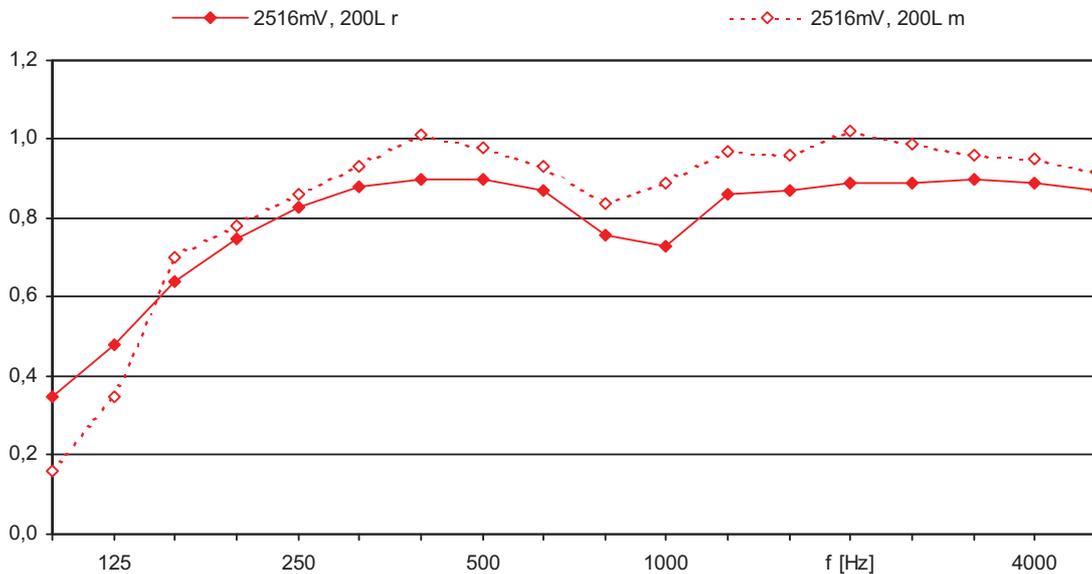
Vergleich diffuser Schalleinfall (VI a)



Vergleich diffuser Schalleinfall (VI b)

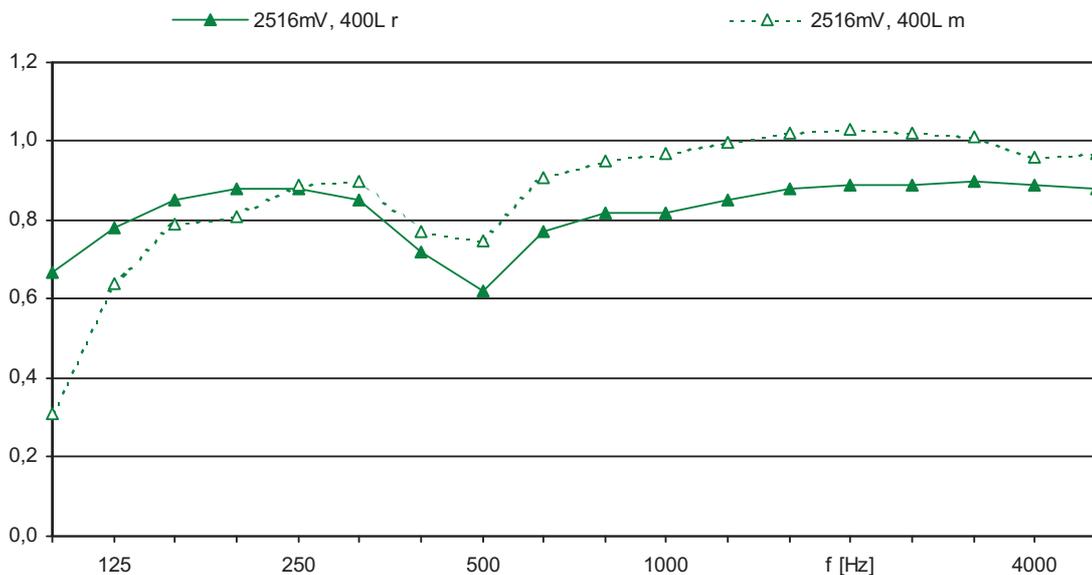


Vergleich diffuser Schalleinfall (VI c)



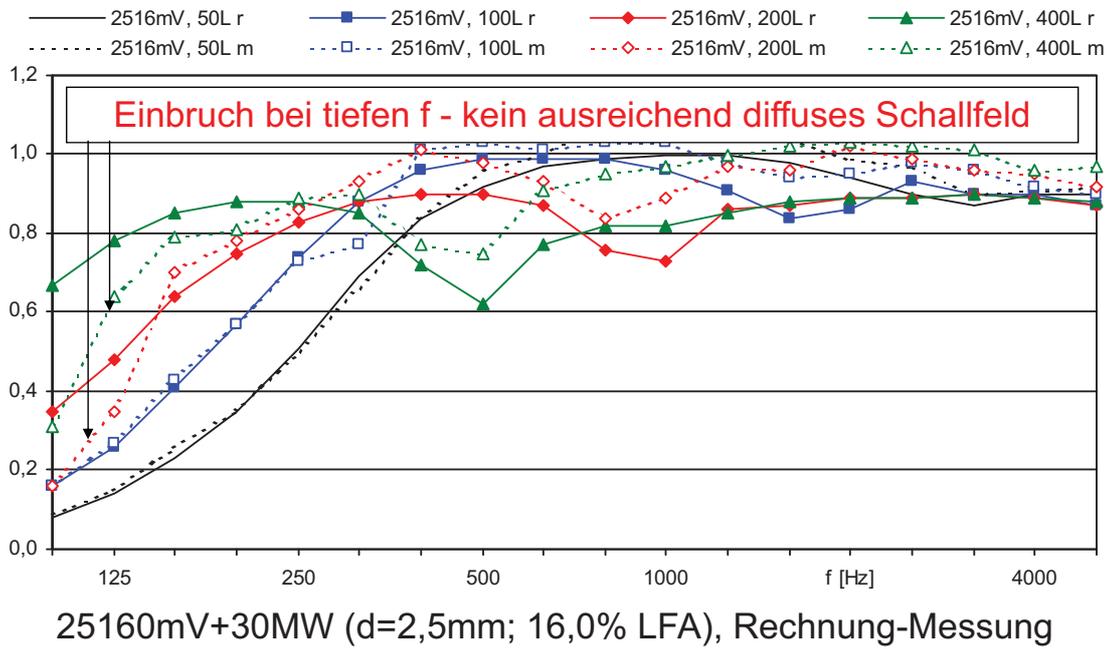
25160mV+30W (d=2,5mm; 16,0% LFA), Rechnung-Messung, H=200

Vergleich diffuser Schalleinfall (VI d)

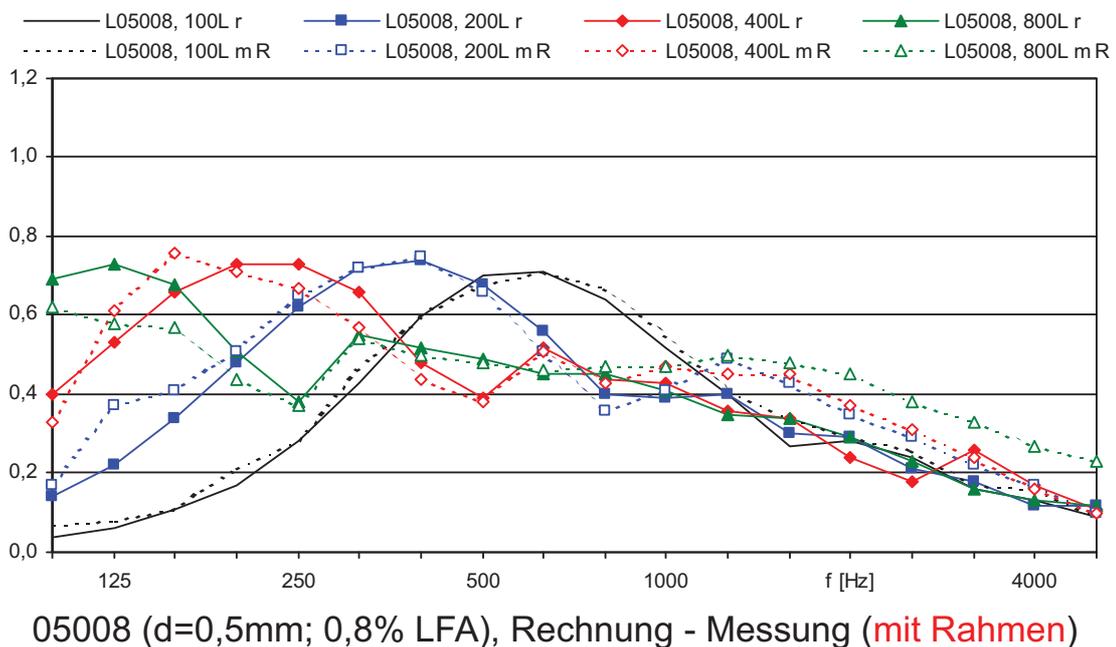


25160mV+30W (d=2,5mm; 16,0% LFA), Rechnung-Messung, H=400

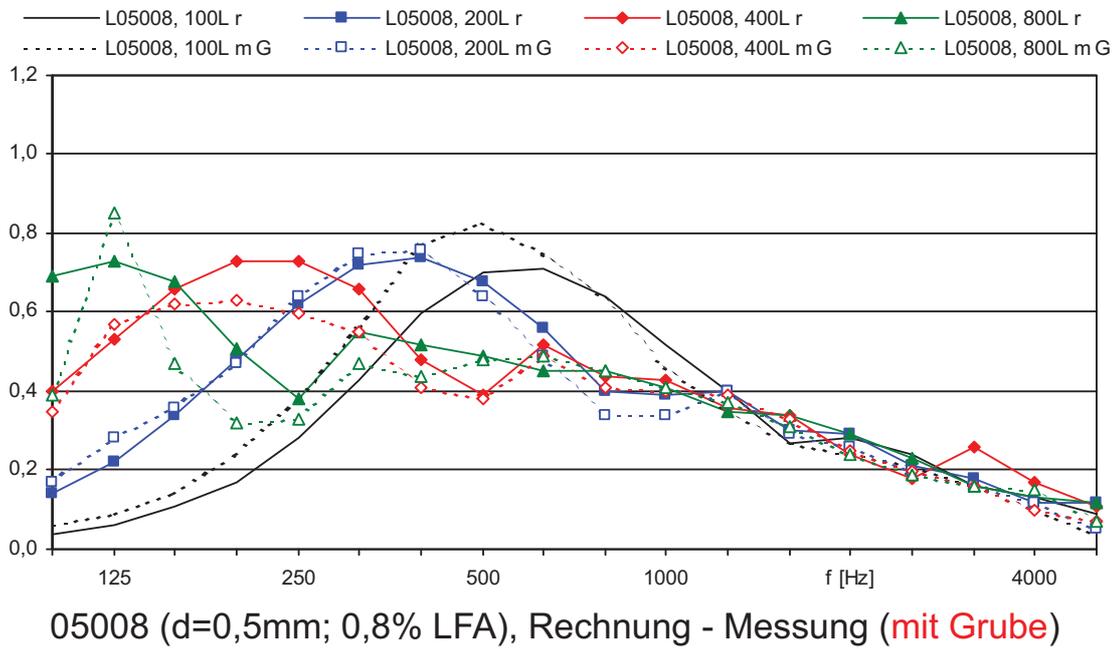
Vergleich diffuser Schalleinfall (VI a-d)



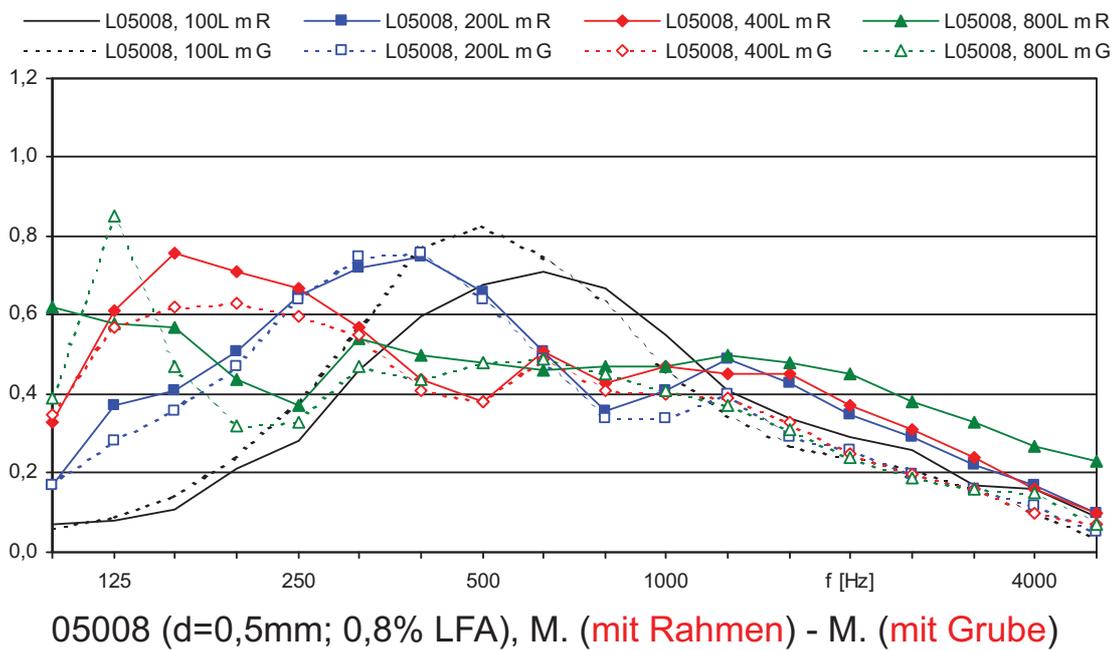
Vergleich diffuser Schalleinfall (VII)



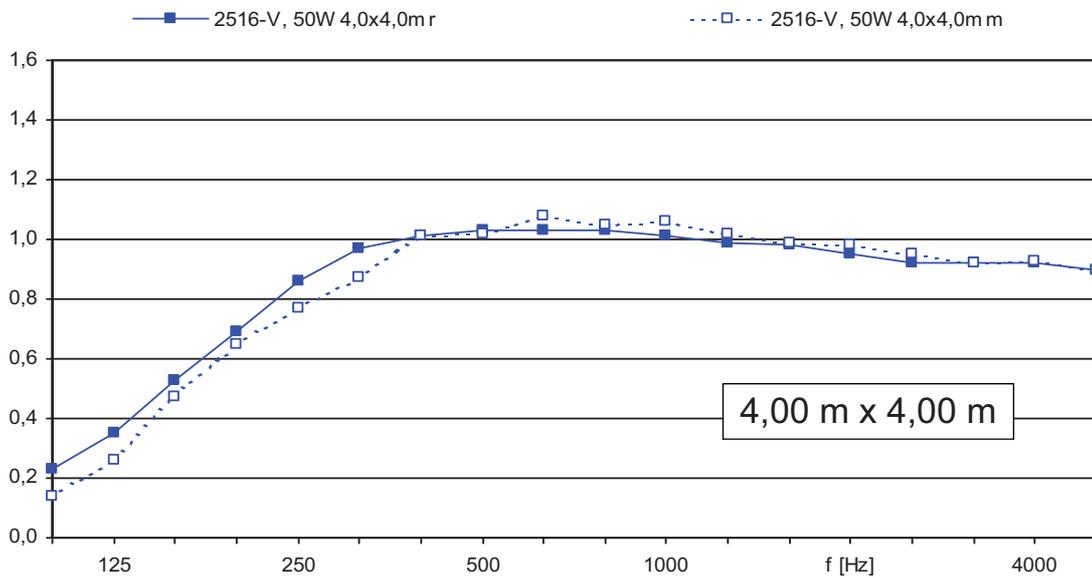
Vergleich diffuser Schalleinfall (VII)



Vergleich diffuser Schalleinfall (VI-VII)

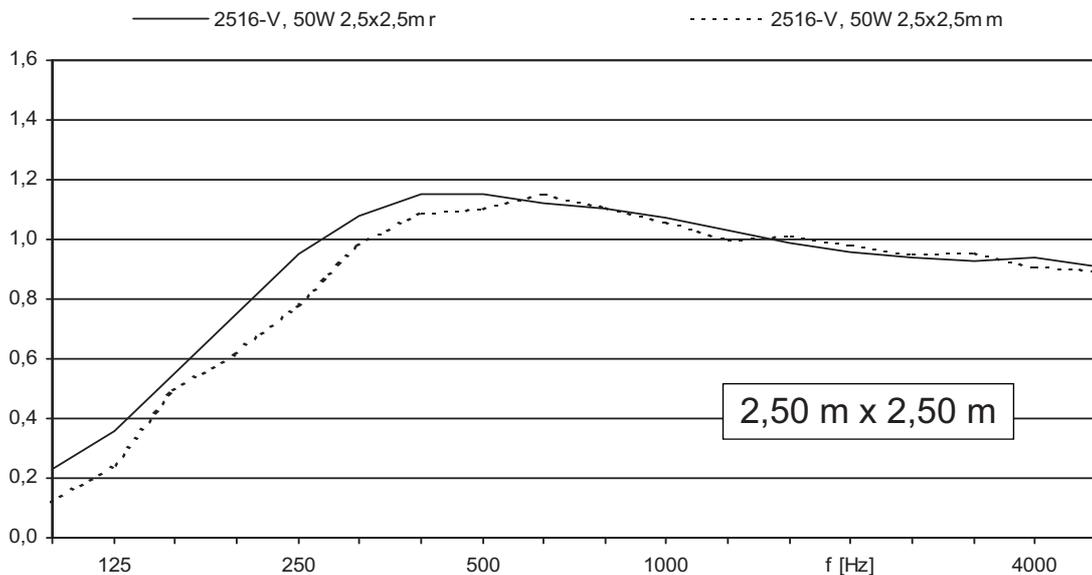


Vergleich diffuser Schalleinfall (VIII a)



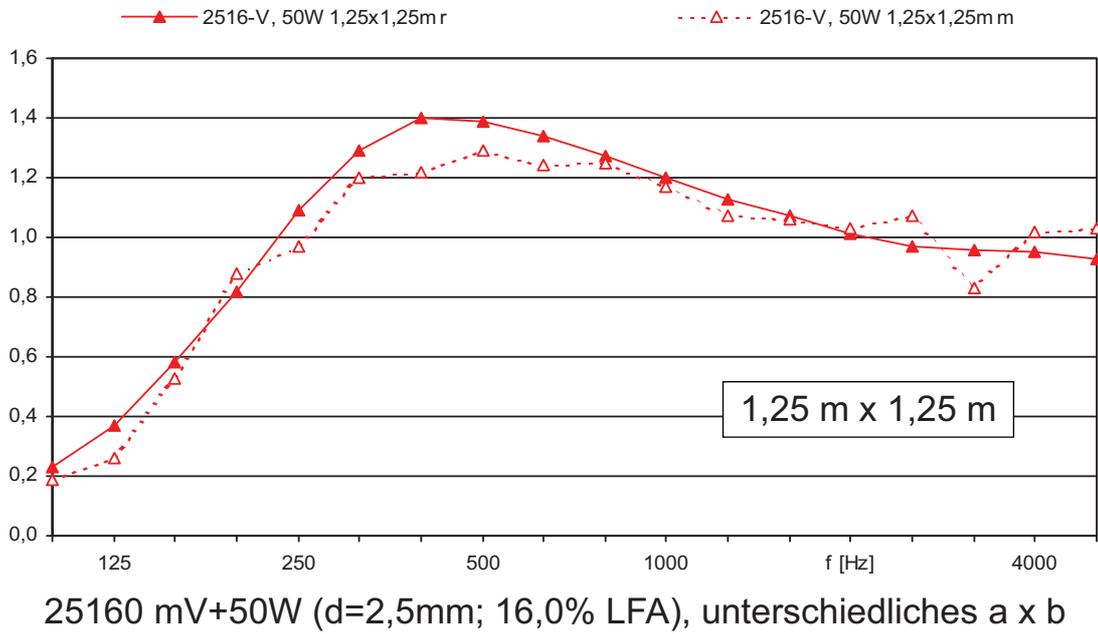
25160 mV+50W (d=2,5mm; 16,0% LFA), unterschiedliches a x b

Vergleich diffuser Schalleinfall (VIII b)

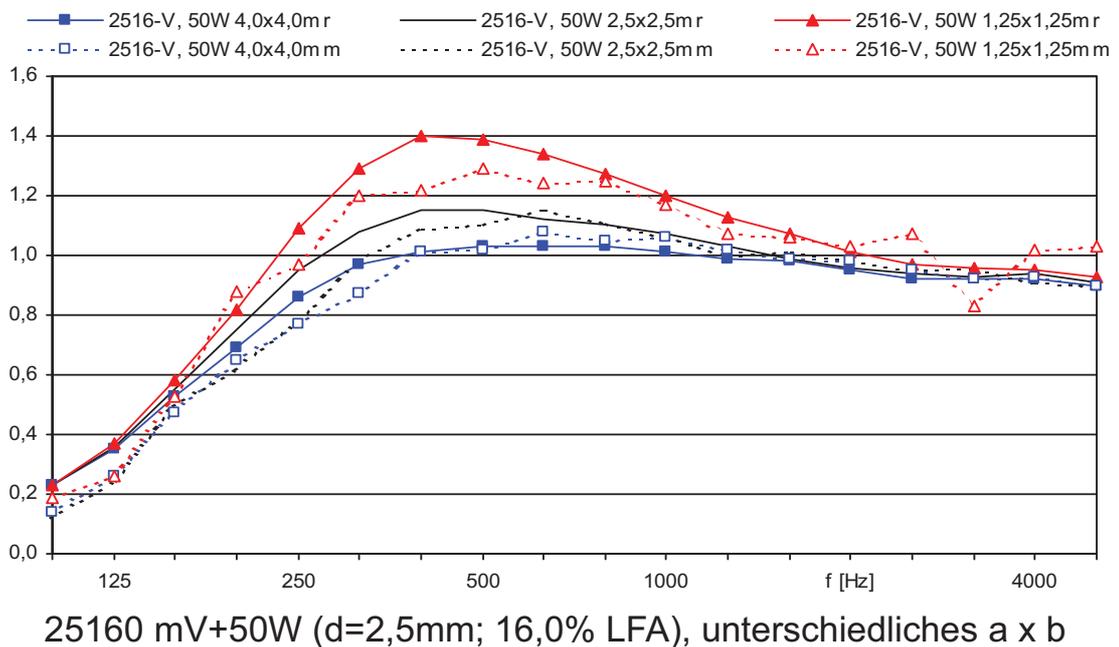


25160 mV+50W (d=2,5mm; 16,0% LFA), unterschiedliches a x b

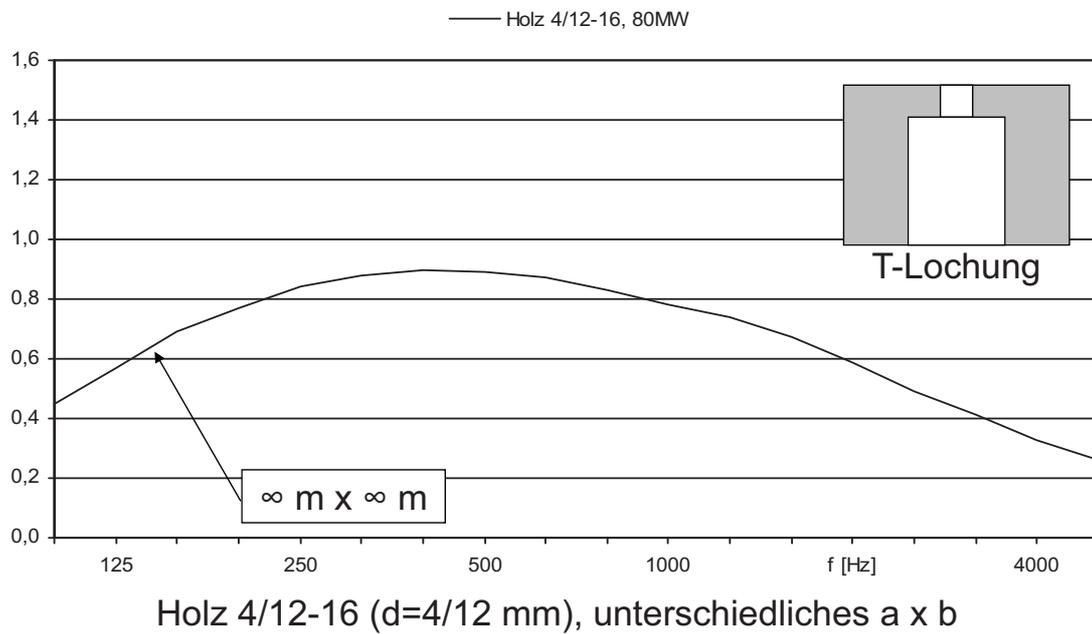
Vergleich diffuser Schalleinfall (VIII c)



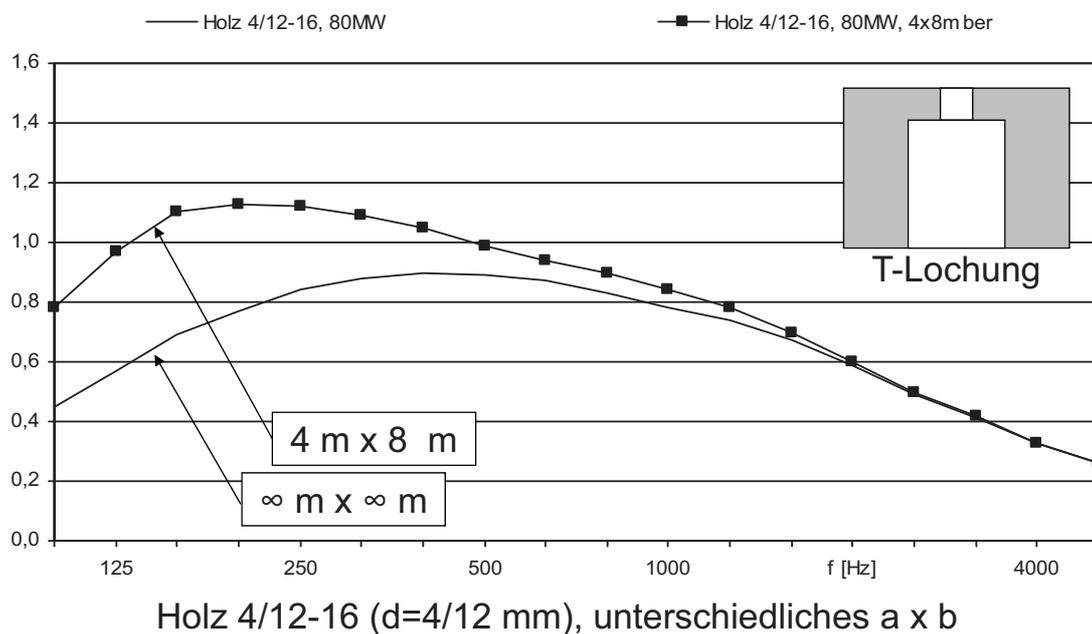
Vergleich diffuser Schalleinfall (VIII a-c)



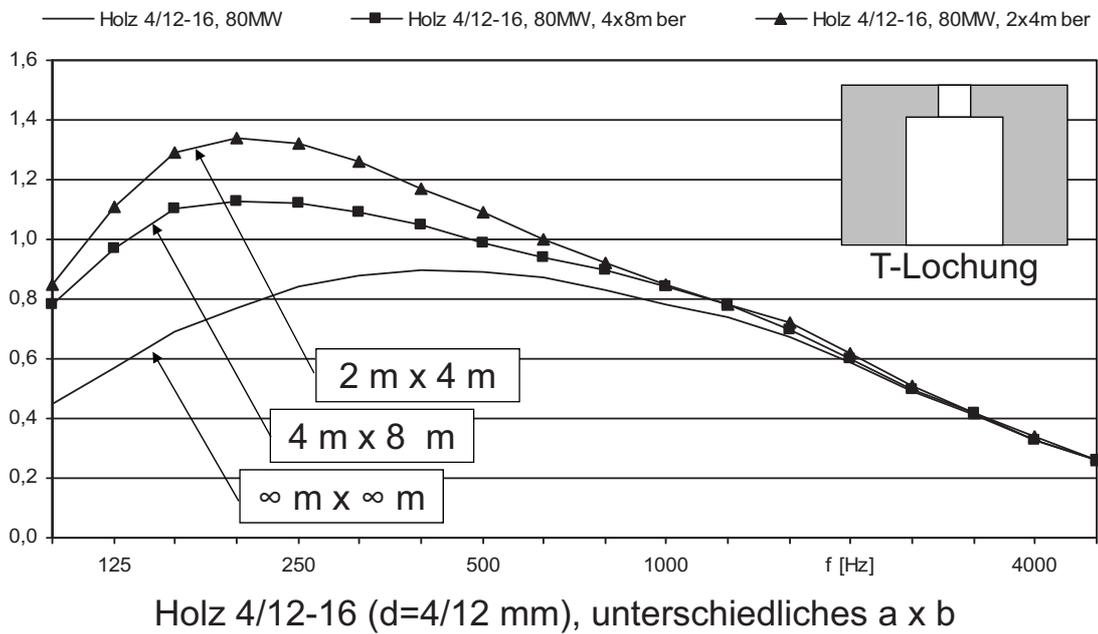
Vergleich diffuser Schalleinfall (IX a)



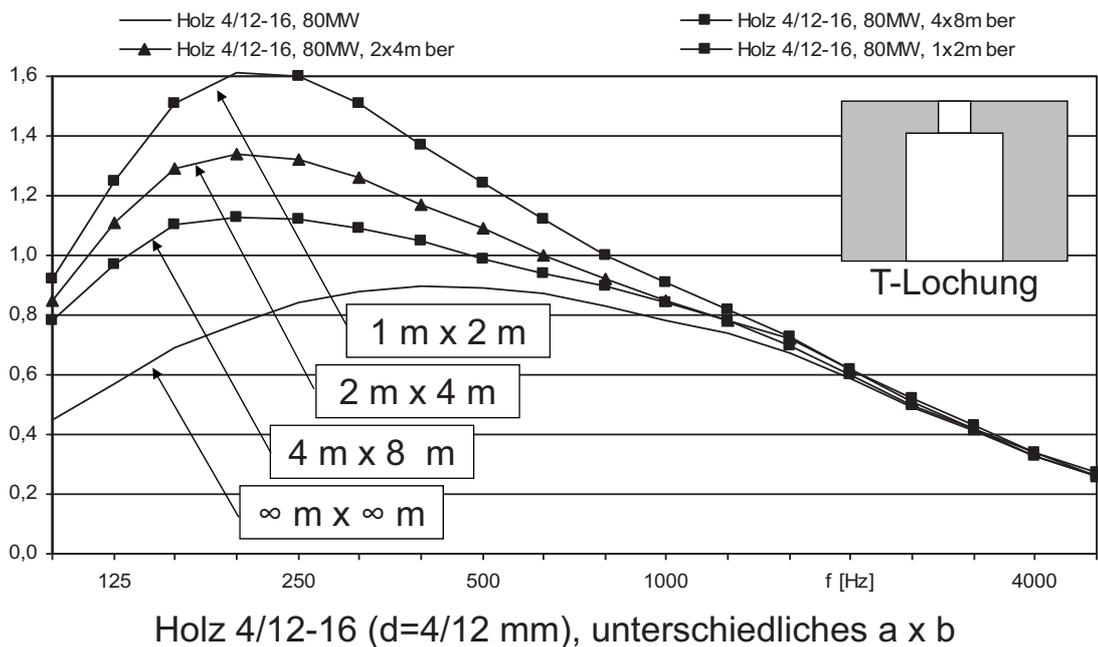
Vergleich diffuser Schalleinfall (IX b)



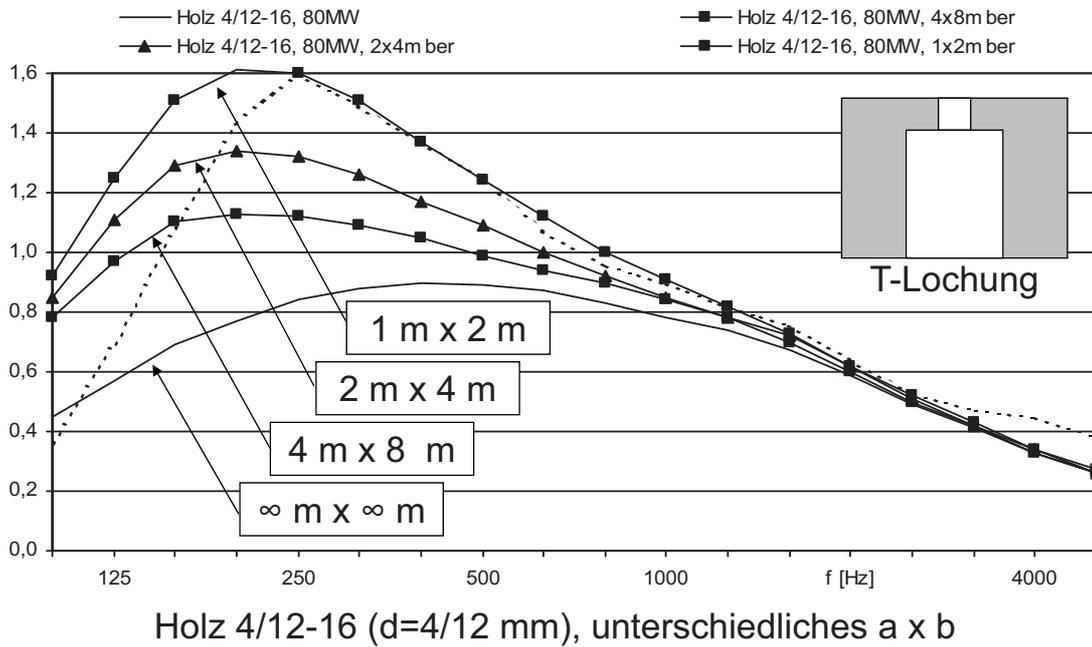
Vergleich diffuser Schalleinfall (IX c)



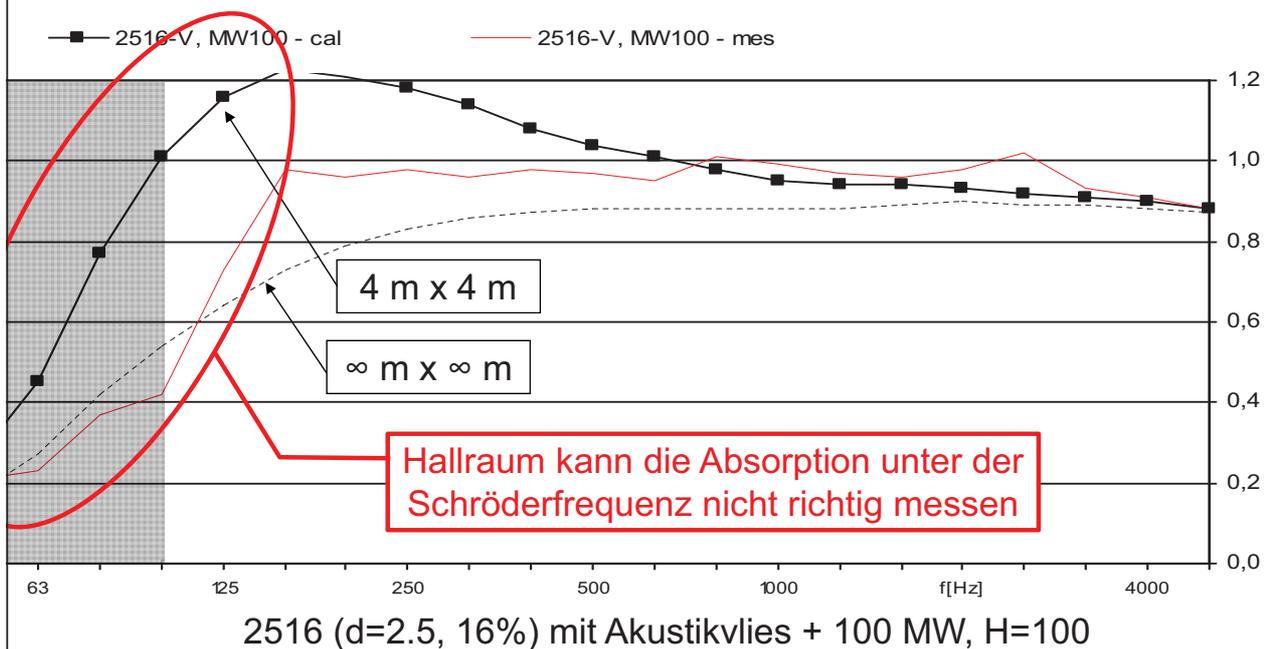
Vergleich diffuser Schalleinfall (IX d)



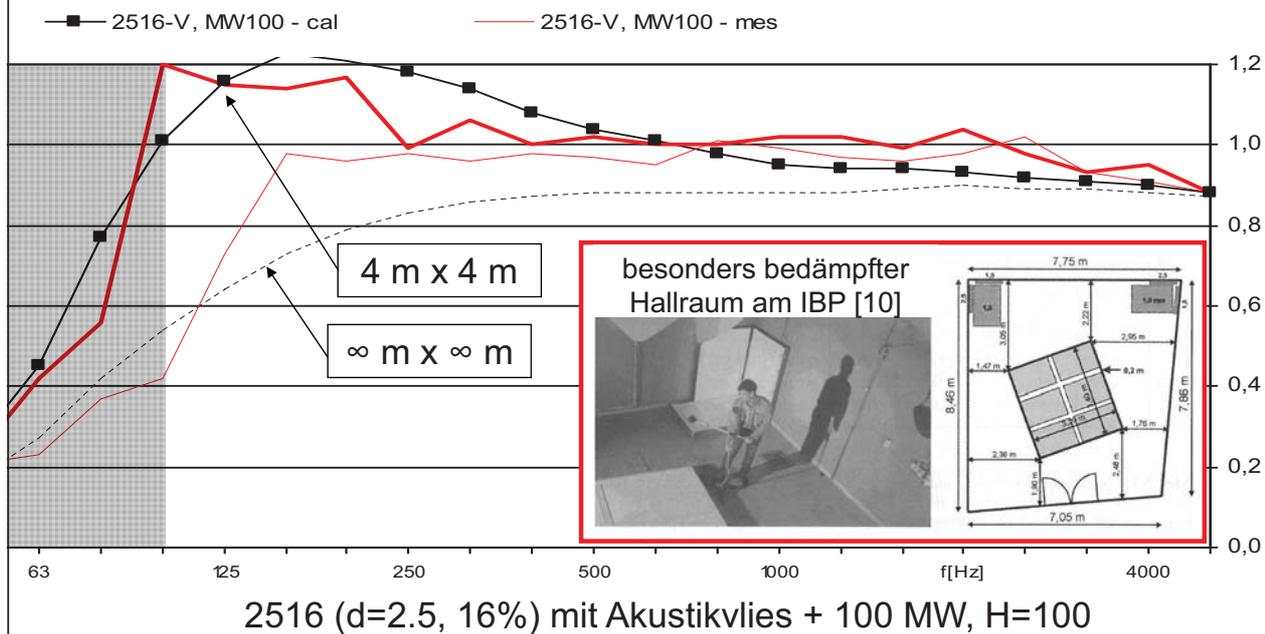
Vergleich diffuser Schalleinfall (IX a-d)



Vergleich diffuser Schalleinfall (X)



Vergleich diffuser Schalleinfall (X)



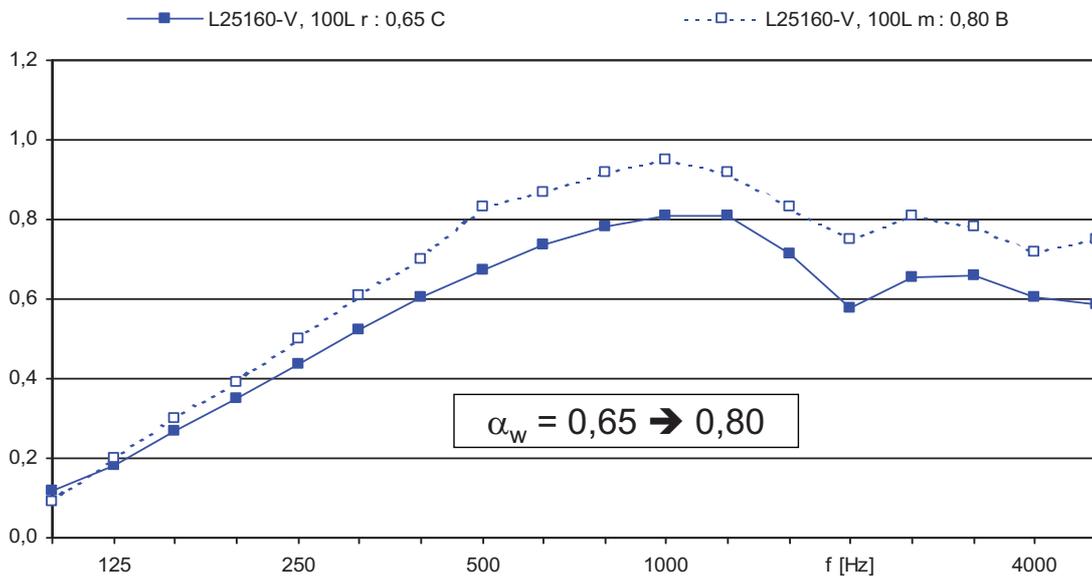
Auswirkungen, bewerteter Absorptionsgrad (I)

bewerteter Absorptionsgrad α_w nach EN ISO 11654

Klasse A	0,90 ... 1,00
B	0,80 ... 0,85
C	0,60 ... 0,75
D	0,30 ... 0,55
E	0,15 ... 0,25
F	0,00 ... 0,10

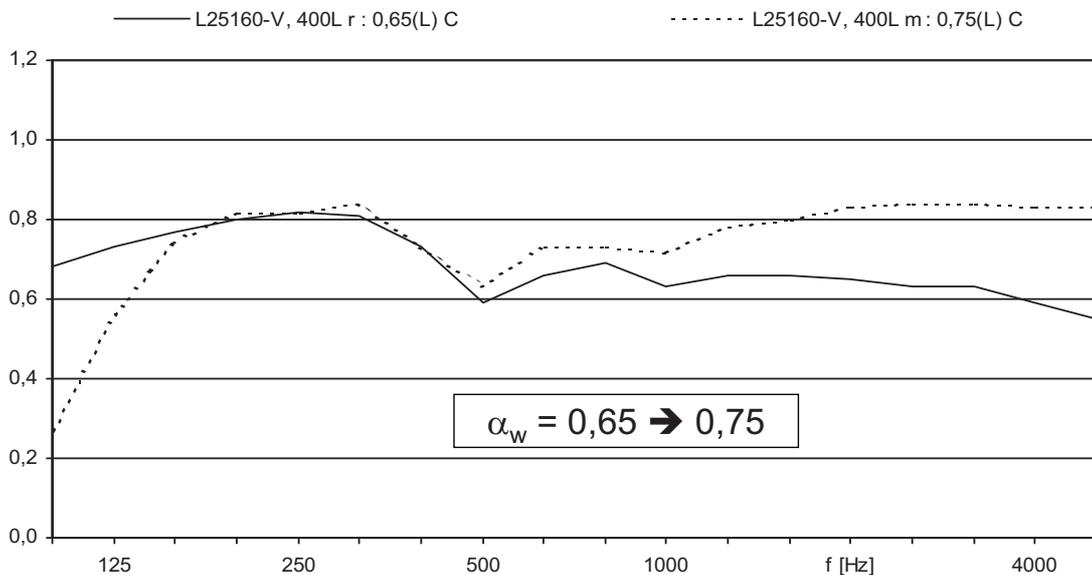
Im bauphysikalischen Alltag nimmt Bedeutung zu (Ausschreibung!)
 »günstige« Prüfung im Hallraum → 1 bis 2 Klassen »aufbessern«

Auswirkungen, bewerteter Absorptionsgrad (II)



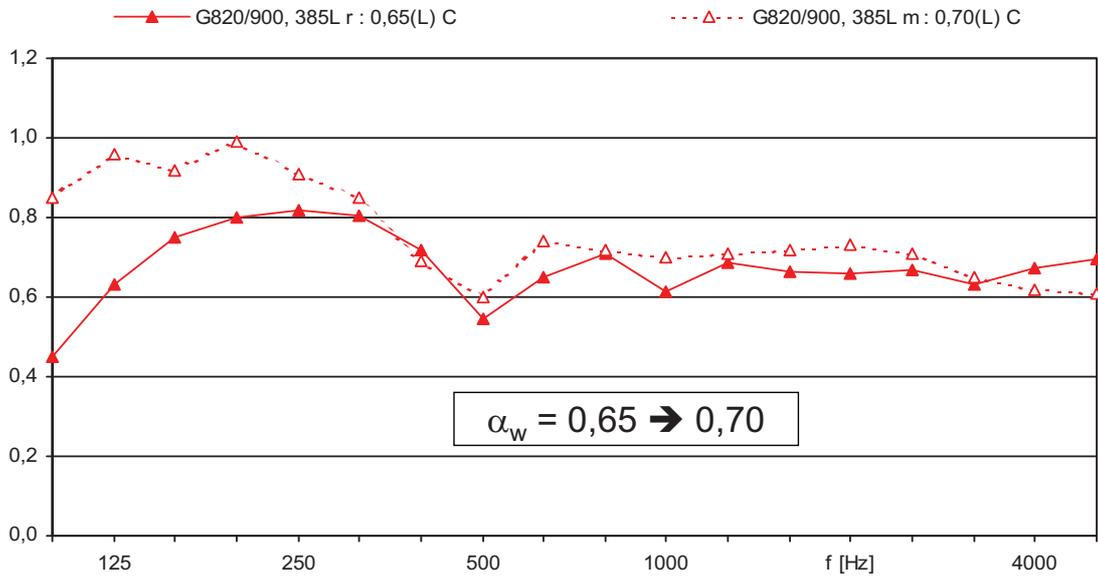
25160mV H=100: Rechnung - Messung (α_w , Klasse)

Auswirkungen, bewerteter Absorptionsgrad (II)



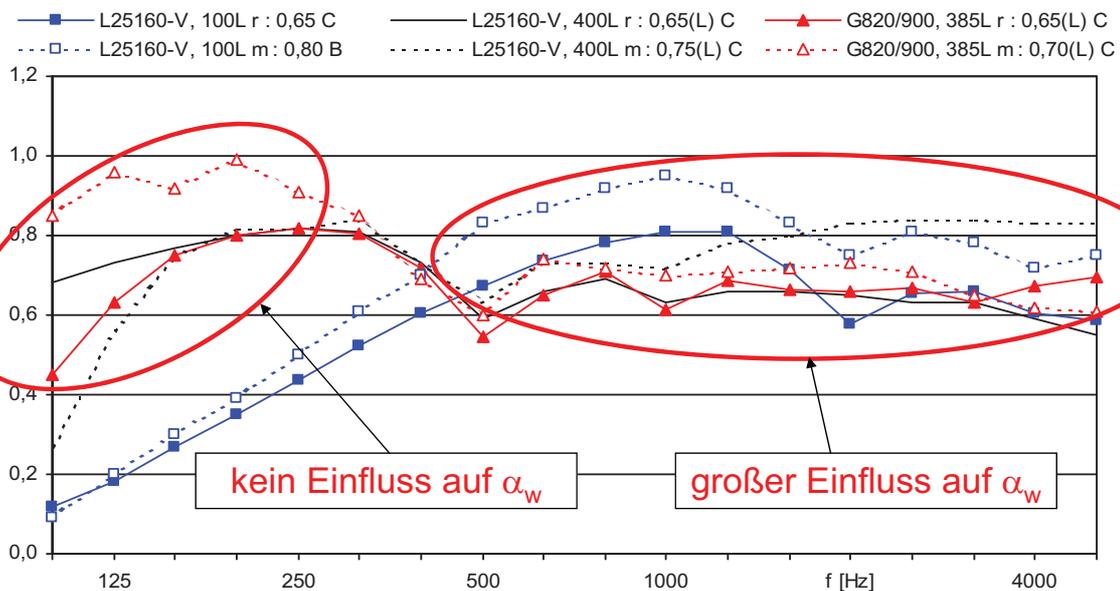
25160mV H=400: Rechnung - Messung (α_w , Klasse)

Auswirkungen, bewerteter Absorptionsgrad (II)



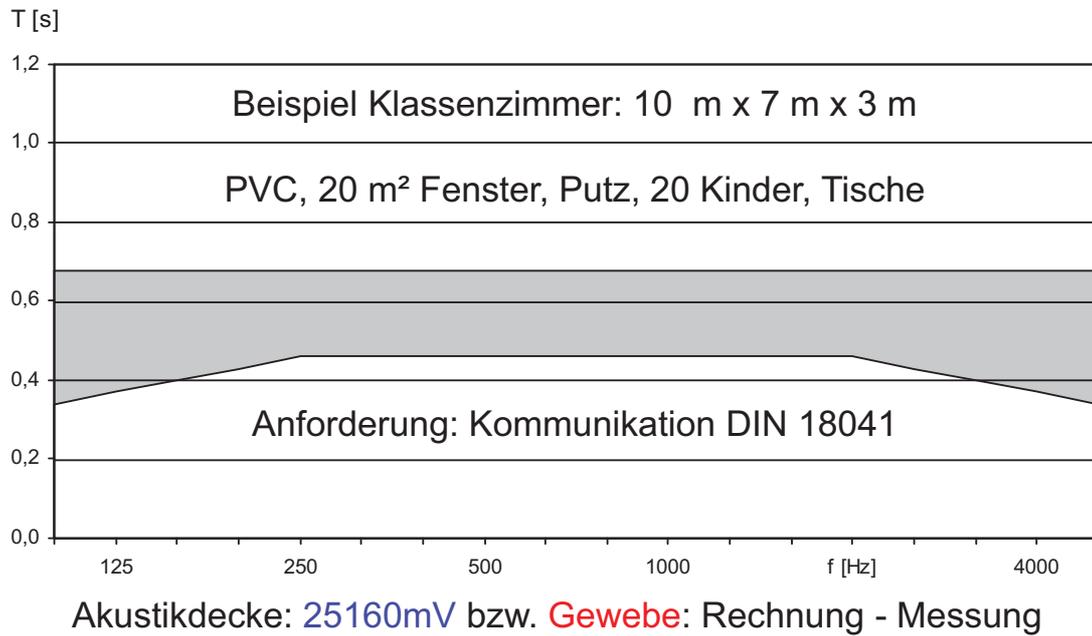
Gewebe H=385: Rechnung – Messung (α_w , Klasse)

Auswirkungen, bewerteter Absorptionsgrad (II)

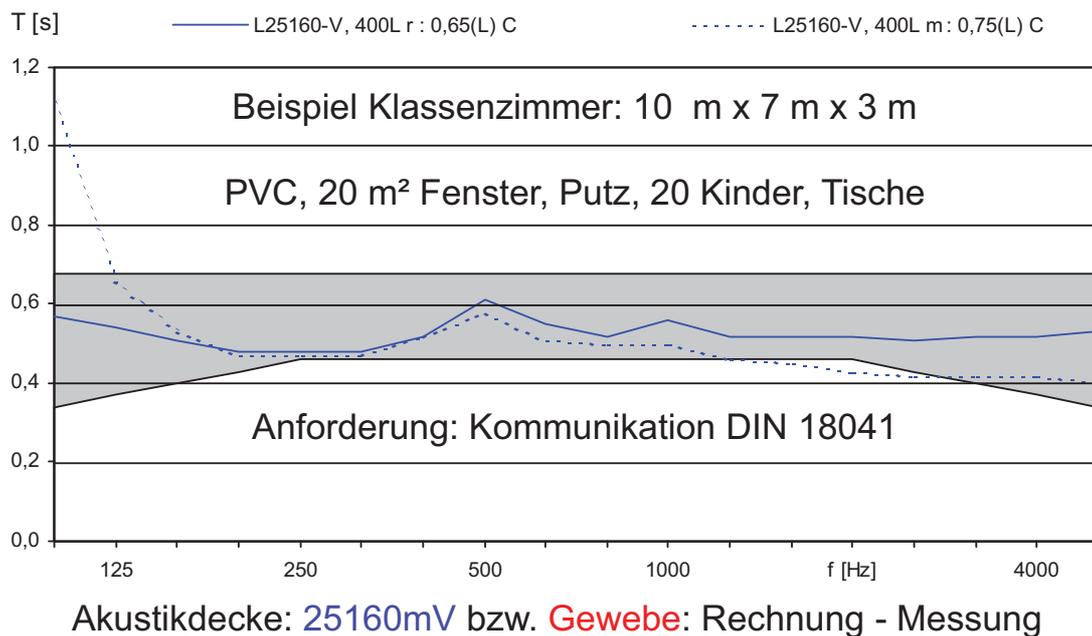


25160mV bzw. Gewebe: Rechnung – Messung (α_w , Klasse)

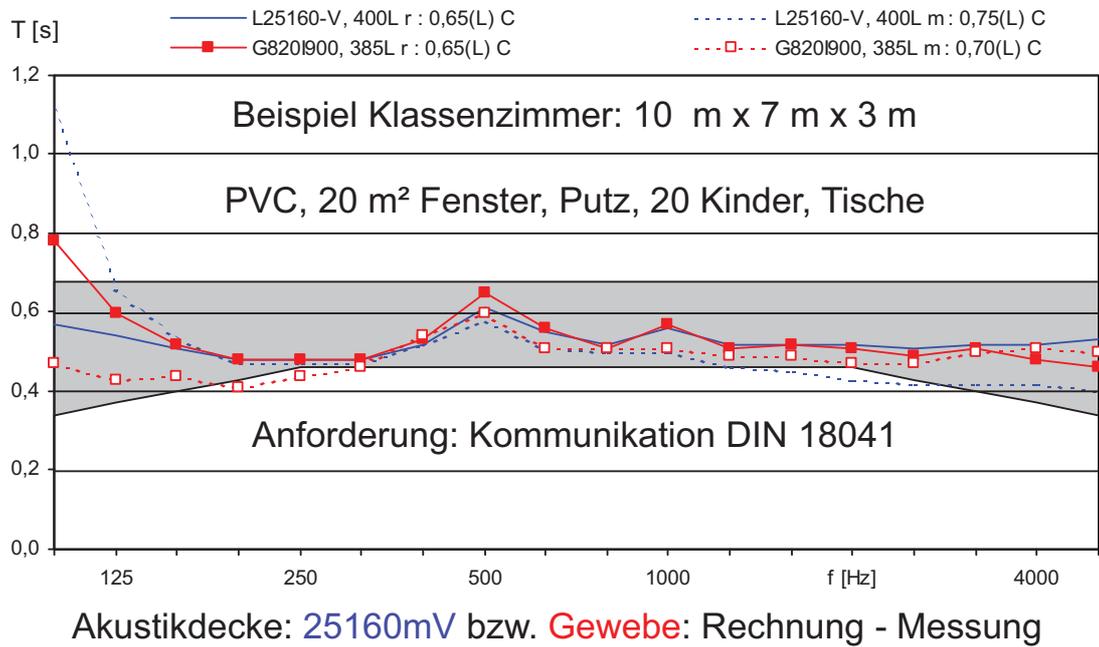
Auswirkungen, Nachhallzeit (I)



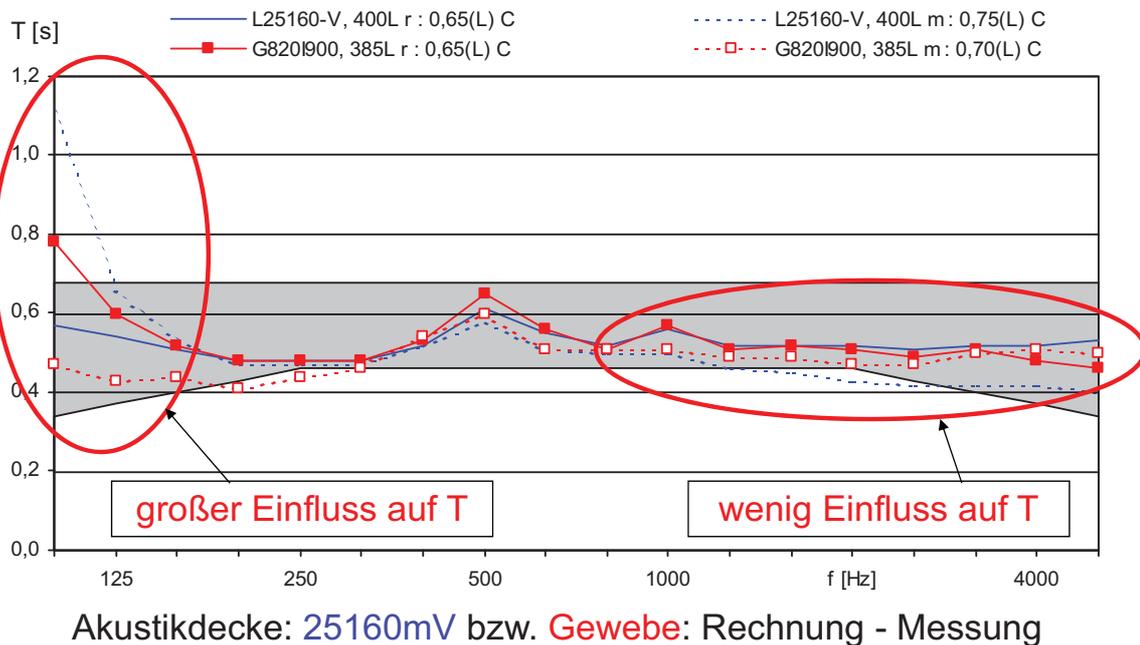
Auswirkungen, Nachhallzeit (I)



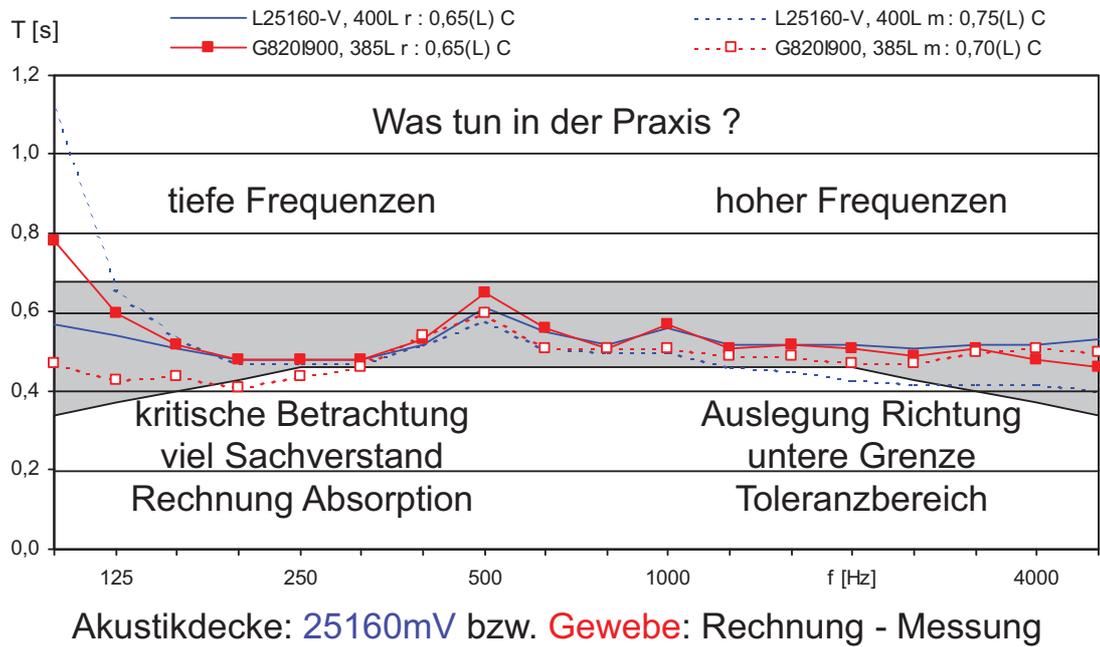
Auswirkungen, Nachhallzeit (I)



Auswirkungen, Nachhallzeit (II)



Auswirkungen, Nachhallzeit (III)



Auswirkungen, Entwicklung

- Impedanzrohr & Berechnung
 - perfekte Optimierung Absorber
- Messwerte im Hallraum
 - präzise Vorhersage
- Messungen Hallraum
 - Aufbauten können reduziert werden
- »fehlenden« Aufbauten
 - rechnerisch korrekt »interpolieren«
- Rechnung ohne Messwerte vergleichbarer Aufbauten?
 - Vorsicht!
 - Gibt Effekte, die rechnerisch nicht ausreichend berücksichtigt werden

Zusammenfassung

- Hallraum bei tiefen Frequenzen nicht befriedigend
- Rahmenkonstruktion, Diffusität tiefen Frequenzen
- Insbesondere in Hinblick auf Messwert unter 100 Hz

- Berechnung weiter optimiert werden
- Strahlungsimpedanz für lateral wirksame Absorber
- Berechnung forciert, z.B. in EN 12354-6.

- Einsatz bei Optimierung und Entwicklung
- Messwerte auf Plausibilität überprüfen
- **Gute Übereinstimmung Rechnung - Messung**

Ende Präsentation

