

Daniel Jerusel

Messtechnische, analytische und numerische Bestimmung  
der Schalldämm – Eigenschaften von ein- und mehrschaligen Bauteilen

eingereicht als

DIPLOMARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

---

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Mathematik – Physik - Informatik

Chemnitz, 2009

Erstprüfer: Prof. Dr. Hübelt

Zweitprüfer: Dr. -Ing. Baradiy

Abgabedatum: 30.11.2009

Verteidigt: 05.02.2010

## **Bibliographische Beschreibung:**

Jerusel, Daniel

Messtechnische, analytische und numerische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften von ein- und mehrschaligen Bauteilen. – 2009. – 61 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Mathematik, Physik, Informatik, Diplomarbeit, 2009

## **Referat:**

In der vorliegenden Arbeit wurden messtechnisch, analytisch und numerisch die Schalldämmeigenschaften trennender Bauteile bestimmt. Es wurden verschiedene analytische und numerische Verfahren zur Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften aufgeführt und die Ergebnisse mit den durchgeführten Messungen verglichen. Die möglichst exakte Ermittlung der Schalldämm – Eigenschaften von trennenden Bauteilen ist besonders bei Objekten mit hohen Lärmbelastungen von großer Bedeutung, um einen ausreichenden Schutz dem Lärm ausgesetzter Personen zu gewährleisten.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Überschrift</b>	<b>Seite</b>
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Anlagenverzeichnis	V
Kurzzeichenverzeichnis	VI
Verzeichnis der Abkürzungen	X
<b>1. Einleitung / Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2. Verwendete Datenverarbeitungsprogramme und Messtechnik</b>	<b>3</b>
2.1 Messtechnik	3
2.2 Software	4
<b>3. Theoretische Grundlagen</b>	<b>8</b>
3.1 Schallausbreitung	8
3.1.1 Schallausbreitung in Flüssigkeiten und Gasen	8
3.1.2 Schallausbreitung in Plattenförmigen Bauteilen	8
3.2 Schalldämmung	9
3.2.1 Schalldämmung einschaliger Bauteile	11
3.2.2 Schalldämmung mehrschaliger Bauteile	12
3.2.3 Einflussfaktoren auf die Schalldämmung	16
3.3 Messtechnische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften	17
3.4 Analytische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften	21

Inhalt	II	
3.4.1	Berechnung nach Beiblatt 1 zu DIN 4109 Nov. 1989 „Schallschutz im Hochbau“	21
3.4.2	Berechnung nach DIN EN 12354 – 1 Einzahlangaben	23
3.4.3	Berechnung nach DIN EN 12354 – 1 (Frequenzabhängig)	27
3.4.4	Berechnung der Schalldämm – Eigenschaften nach Heckl	31
3.4.5	Berechnung der Schalldämm – Eigenschaften dreischaliger Bauteile nach Sharp	35
3.5	Numerische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften	36
3.5.1	Numerische Simulation mit dem Programm Raynoise 3.1	37
3.5.2	Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften mittels Finite – Elemente – Methode	38
3.5.2.1	Simulationsmodelle	39
3.5.2.2	Schallausbreitung in Flüssigkeiten und Gasen	41
3.5.2.3	Schallreflexionen und Randbedingungen	41
3.5.2.4	Kopplung der Bauteilstruktur mit dem Fluid	42
3.5.2.5	Bestimmungen der Schalldämm – Eigenschaften	43
<b>4.</b>	<b>Ermittelte Schalldämm – Eigenschaften</b>	<b>45</b>
4.1	Vergleich der messtechnisch ermittelten Schalldämm – Maße	46
4.2	Vergleich der analytisch und numerisch ermittelten Schalldämm – Maße	47
4.2.1	Vergleich der Einzahlangaben nach Beiblatt 1 der DIN 4109 und DIN EN 12354 - 1	47
4.2.2	Vergleich der Schalldämm – Maße in Frequenzbändern	51
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung / Ausblick</b>	<b>60</b>

Anlagen

Literaturverzeichnis

Selbstständigkeitserklärung



**Abbildungsverzeichnis**

---

Abbildung 1.1	Physikalische Analogie zu einer einschaligen Wand	1
Abbildung 1.2	Physikalische Analogie zu einer zweischaligen Wand	1
Abbildung 1.3	Physikalische Analogie zu einer dreischaligen Wand	2
Abbildung 2.1	Richtcharakteristik der Schallquelle OMNIPOWER	3
Abbildung 2.2	Richtcharakteristik der Schallquelle OMNIPOWER	4
Abbildung 2.3	Methoden der Simulationserstellung mit dem Programm Raynoise 3.1	5
Abbildung 3.1.1	Longitudinalwellen, Dichtewellen	8
Abbildung 3.1.2	Wellenformen der Schallausbreitung	9
Abbildung 3.2.1	Schalldurchgang durch ein Hindernis	9
Abbildung 3.2.2	Luftschallübertragungswege zwischen benachbarten Räumen	10
Abbildung 3.2.3	Frequenzbereiche der Akustik	11
Abbildung 3.2.4	Frequenzbereiche der Schalldämmung einschaliger Bauteile	12
Abbildung 3.2.5	Ersatzschaltbild zum Massengesetz	12
Abbildung 3.2.6	Koinzidenzfrequenzen $f_c$ verschiedener Materialien in Abhängigkeit der Plattendicke $t$	13
Abbildung 3.2.7	Prinzipieller Verlauf des Schalldämm – Maßes $R$ zweischaliger Bauteile in Abhängigkeit von der Frequenz $f$	14
Abbildung 3.2.8	Schalldämmung von zwei- und dreischaligen Bauteilen	15
Abbildung 3.3.1	Messaufbau der Luftschalldämmung eines trennenden Bauteils	18
Abbildung 3.2.2	Nachhallzeitbestimmung	19
Abbildung 3.3.3	Bezugskurve zur Ermittlung des bewerteten Schalldämm – Maß	20
Abbildung 3.5.1	Darstellung des zweidimensionalen Simulationsmodells	39
Abbildung 3.5.2	Darstellung des dreidimensionalen Simulationsmodells	40
Abbildung 4.1.1	Messtechnisch ermittelte Schalldämm – Maße als Einzahlangaben	46

Abbildung 4.1.2	Messtechnisch ermittelte Schalldämm – Maße in Frequenzbändern	46
Abbildung 4.1.3	Messtechnisch ermittelte Schalldämm – Maße in Frequenzbändern	47
Abbildung 4.2.1.1	Vergleich der analytisch ermittelten Einzahlangaben	48
Abbildung 4.2.1.2	Vergleich der ermittelten Einzahlangaben	49
Abbildung 4.2.2.1	Schalldämm – Eigenschaften Bauteil A	51
Abbildung 4.2.2.2	Vergleich numerisch ermittelter Schalldämm – Eigenschaften mit Mess- ergebnissen von Bauteil A	51
Abbildung 4.2.2.3	Schalldämm – Eigenschaften Bauteil B	52
Abbildung 4.2.2.4	Vergleich numerisch ermittelte Schalldämm – Eigenschaften mit Mess- ergebnissen von Bauteil B	53
Abbildung 4.2.2.5	Schalldämm – Eigenschaften Bauteil C	54
Abbildung 4.2.2.6	Schalldämm – Eigenschaften Bauteil D	55
Abbildung 4.2.2.7	Vergleich numerisch ermittelte Schalldämm – Eigenschaften mit Mess- Ergebnissen von Bauteil D	55
Abbildung 4.2.2.8	Analytisch bestimmte Schalldämm – Eigenschaften Bauteil E	57
Abbildung 4.2.2.9	Schalldämm – Eigenschaften Bauteil F	58
Abbildung 4.2.2.10	Schalldämm – Eigenschaften Bauteil G	59
Abbildung 4.2.2.11	Numerisch bestimmte Schalldämm – Eigenschaften Bauteil G und Bauteil G1	60

## **Tabellenverzeichnis**

---

Tabelle 4.2.1	Abweichung der numerisch und analytisch ermittelten Schalldämm – Maße zu den messtechnisch ermittelten Werten	50
---------------	--	----

## **Anlagenverzeichnis**

---

Anlage 1: Messergebnisse

Anlage 2: Ausführliche analytische Bestimmung der Schalldämmeigenschaften nach [1], [2], [4], [6], [7], [22]

Anlage 3: Materialdaten

Anlage 4: Ergebnisse der Simulation mittels Ray – Tracing Methode

Anlage 5: Ergebnisse der Simulation mittels FEM (3 D)

Anlage 6: Ergebnisse der Simulation mittels FEM (2 D)

Anlage 7: Grafische Auswertung der numerisch und messtechnisch ermittelten Anstiege

## Kurzzeichenverzeichnis

### Lateinische Buchstaben

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$A$	[m <sup>2</sup> ]	äquivalente Absorptionsfläche
$A_F$	[m <sup>2</sup> ]	Öffnungsfläche
$a_K$	[m]	Körperschall – Absorptionsgrad am Rand $k$
$a_n$	[m / s]	Normale Beschleunigung
$B$	[-]	Schallabstrahlendes Gebiet
$c$	[m / s]	Schallgeschwindigkeit
$c_L$	[m / s]	Longitudinalwellengeschwindigkeit
$c_0$	343 [m / s]	Schallgeschwindigkeit Luft
$d$	[-]	räumliche Dimension
$d_s, d_L, d_i$	[m]	Schalenabstand
$d, d_w$	[m]	Schichtdicke
$E_{kin}$	[Joule]	kinetische Energie
$E_{pot}$	[Joule]	potentielle Energie
$F$	[N]	Last
$f$	[Hz]	Frequenz
$f_{\lambda n}$	[Hz]	Einbruchfrequenz
$f_l$	[Hz]	Durchgangsfrequenz
$f_c$	[Hz]	Grenzfrequenz bzw. Koinzidenzfrequenz
$f_R$	[Hz]	Resonanzfrequenz
$f_{ref}$	[1000 Hz]	Bezugsfrequenz
$f_{\alpha, \beta}$	[Hz]	Resonanzfrequenz nach Sharp [22]
$I$	[W / m <sup>2</sup> ]	Intensität

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$K_{13}, K_{12}$	[dB]	Stoßstellendämm – Maß
$K_{Ff}$	[dB]	Stoßstellendämm – Maß Übertragungsmaß Ff
$K_{ij}$	[dB]	Stoßstellendämm - Maß
$K_{L,1}$	[dB]	Korrekturwert für flankierende Bauteile
$K_{L,2}$	[dB]	Korrekturwert für flankierende biegeeweiche Bauteile
$K_{TL}$	[47,3 dB]	Konstante
$k_0$	[-]	Wellenzahl
$l_f$	[m]	Kopplungslänge der Verbindungsstelle
$l_0$	[1 m]	Bezugskopplungslänge
$L_1$	[dB]	Schalldruckpegel Senderraum
$L_2$	[dB]	Schalldruckpegel Empfangsraum
$l_1, l_2$	[m]	Randlängen des rechteckigen Bauteils
$m', m''$	[kg / m <sup>2</sup> ]	flächenbezogene Masse
$m'_0$	[1 kg / m <sup>2</sup> ]	flächenbezogene Bezugsmasse
$m'_1, m'_2$	[kg / m <sup>2</sup> ]	flächenbezogene Masse der Schale 1 , 2
$m'_{L,mittel}$	[kg / m <sup>2</sup> ]	mittlere flächenbezogene Masse
$M$	[kg / m <sup>2</sup> ]	flächenbezogene Masse nach DIN 12354
$n_a$	[-]	Einheitsvektor in Fluides Gebiet
$n_s$	[-]	Einheitsvektor in massives Gebiet
$P$	[W]	Schalleistung
$P_1$	[W]	Schalleistung Senderraum
$P_2$	[W]	Schalleistung Empfangsraum
$P_3$	[W]	Schalleistung Flankenübertragung

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$p_a$	[J]	Auftreffende Schallenergie
$p_e$	[J]	Absorbierte Schallenergie
$r$	[m]	Kugelradius
$R$	[dB]	Schalldämm – Maß
$R'$	[dB]	Bau – Schalldämm – Maß
$\Delta R$	[dB]	Verbesserung der Schalldämmung
$R_{Res} / R_{w,R}$	[dB]	resultierendes Schalldämm – Maß
$R_{ij,w}$	[dB]	bewertetes Schalldämm – Maß Übertragungsweg ij
$R_g$	[J / (kg K)]	stoffspezifische Gaskonstante
$R_{s,w}$	[dB]	bew. Schalldämm – Maß trennenden Bauteils
$R'_w$	[dB]	Bauschalldämm - Maß
$R'_{w,R}$	[dB]	bewertetes Schalldämm – Maß
$R_1, R_2$	[dB]	Schalldämm – Maße der Wandschalen
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Trennfläche zw. Empfangs- und Senderaum
$S_s$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche des trennenden Bauteils
$s'$	[MN / m <sup>3</sup> ]	dynamische Steifigkeit des Zwischenraums
$T$	[s]	Nachhallzeit
$t$	[m]	Schichtdicke der Platte
$t_1, t_2$	[s]	Zeitintervall
$T_0$	[K]	Temperatur des Gases im Gleichgewicht
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen
$v$	[m / s]	Schallschnelle
$W$	[Joule]	Arbeit

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$z$	[Ns / m <sup>3</sup> ]	Schallkennimpedanz
$Z_T$	[Ns / m <sup>3</sup> ]	Trennimpedanz

### Griechische Buchstaben

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha$	[-]	Schallabsorptionsgrad
$\delta$	[°]	Schalleinfallswinkel
$\eta_{int}$	[-]	Inner Verlustfaktor
$\eta_{tot}, \eta$	[-]	Gesamtverlustfaktor
$\eta_{tot,lab}$	[-]	Gesamtverlustfaktor Prüfstandbedingungen
$\kappa$	[ms <sup>2</sup> / kg]	Adiabatexponent
$\lambda$	[m]	Wellenlänge
$\mu$	[-]	Poisson - Zahl (Querdehnungszahl)
$\rho_0, \rho, \rho_w$	[kg / m <sup>3</sup> ]	Rohdichte
$\sigma$	[-]	Abstrahlgrad für freie BiegeWellen
$\sigma'$	[-]	Abstrahlgrad für erzwungene Übertragungen
$\tau$	[-]	Schalltransmissionsgrad
$\tau'$	[-]	Transmissionsgrad mit Flankenübertragung
$\Phi$	[-]	Potential
$\varphi_c$	[408 Ns/m <sup>3</sup> ]	Kennimpedanz Luft

**Abkürzungsverzeichnis**

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
ANSI	American National Standards Institute
Btl.	Bauteil
Bbl.	Beiblatt
CAD	Computergestütztes Konstruieren
ca	cirka.
CIC - Kalibrierung	Charge Injection Calibration
DIN	Deutsche Institut für Normung e. V.
EN	Europäischen Normen
FEM	Finite Elemente Methode
GK	Gipskarton
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
ISO	Internationale Organisation für Normung
KS	Kalksandstein
Miwo	Mineralwolle
MW	Mauerwerk
o. g.	oben genannten
PDGL	Partielle Differentialgleichungen
u. a.	unter anderem
VS	Vorsatzschale
z. B.	zum Beispiel



## 1. Einleitung / Motivation

---

Die Auswirkungen von Schall auf den menschlichen Organismus sind abhängig von der Dosis der einwirkenden Schalldruckpegel. So liegen die körperlichen Reaktionen auf Geräusche unter 85 dB(A) bei vorübergehender Einwirkung im Bereich der menschlichen Anpassungsfähigkeit. Gesundheitlich beeinträchtigend sind Dauerbelastungen ab ca. 65 dB(A). Bei Schalldruckpegeln ab ca. 40 dB(A) können sich die Schlafstadien ändern. Es leidet das psychische Befinden und das soziale Verhalten sowie die Schlafqualität, welche bereits ab ca. 25 dB(A) als gestört empfunden wird. Mit steigenden Pegeln nehmen die negativen Wirkungen unerwünschter Geräusche zu, wobei Menschen das gleiche Geräusch subjektiv unterschiedlich empfinden können. Verschiedene Schallübertragungen innerhalb eines Gebäudes können zu Konflikten führen, wenn die Nutzungseinheiten unterschiedlich schutzbedürftig sind oder ein Bauwerk nicht nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik erstellt worden ist. Anforderungen an die Schalldämmeigenschaften von Bauteilen stellt unter anderem die DIN 4109 [5]. Das Leben in einer lärmbelasteten Umwelt erfordert einen leisen Platz zum Arbeiten, Wohnen und Schlafen. Daher ist die korrekte Ermittlung der Schalldämm – Eigenschaften von Bauteilkonstruktionen von hoher Bedeutung. Im Nachfolgenden werden praktische Beispiele für die Verwendung von verschiedenschaligen Bauteilen genannt.

- Einschalige Wand: Wohnungstrennwand, Bürotrennwand, Außenwand



Abbildung 1.1: Physikalische Analogie zu einer einschaligen Wand (Feder - Masse – System, im tieffrequenten Bereich)

- Einschalige massive Wand mit biegeweicher Vorsatzschale: Trennwand schutzbedürftiger Räume zu lauten bzw. besonders lauten Räumen wie nach Tabelle 5 der DIN 4109 [5] u. a. Haustechnische Anlagen, Gewerbebetriebe oder Küchenräume.

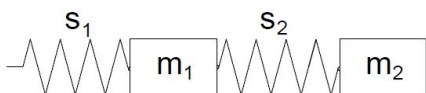


Abbildung 1.2: Physikalische Analogie zu einer zweischaligen Wand (Feder - Masse - System)

- Zweischalige massive Wand: Haustrennwand, Trennwände schutzbedürftiger Räume zu Aufzugschächten, Trennwände zwischen sehr lauten Räumen (z. B. Trennwände zwischen Testzellen für Triebwerke)
- Dreischalige massive Wand: Trennwände zwischen schutzbedürftigen Räumen und sehr lauten Räumen (z. B. Testzellen für Triebwerke)



Abbildung 1.3: Physikalische Analogie zu einer dreischaligen Wand (Feder - Masse - System)

Um geeignete Lösungen für akustische Probleme im Bereich der Bauakustik zu finden sind verschiedene Herangehensweisen möglich. Zum einen ein messtechnischer Nachweis, wobei die bauakustischen Eigenschaften nach DIN EN ISO 140-4 [8] ermittelt werden. Des Weiteren ist für ein- bis zweischalige Konstruktionen ein rechnerischer Nachweis nach den geltenden Normen (DIN 4109 [5], sowie EN 12354 -1 [7]) oder nach verschiedenen Literaturquellen wie u. a. „Schallschutz und Raumakustik in der Praxis“ von Fasold [2] oder dem „Taschenbuch der Technischen Akustik“ von Möser [4] möglich. Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der Schalldämmeigenschaften bietet, neben der rechnerischen und messtechnischen Bestimmung, die numerische Simulation. Eine Einführung in das Thema der numerischen Simulation mittels Finiter Elemente Methode bietet „Maschinenakustik“ von Kollmann [3].

Im Bereich der mehrschaligen Konstruktionen mit mehr als 2 Schalen wurden nach umfangreicher Recherche nur eine Literaturquelle [22] zur Berechnung des Schalldämm – Verhaltens von dreischaligen Bauteilen gefunden. Daher soll diese Arbeit insbesondere in diesem Bereich die messtechnisch, analytisch und simulativ ermittelten Werte vergleichen, um das schalltechnische Verhalten dieser Konstruktionen bestimmen zu können.

Zusammengefasst wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Berechnung für die Prognose der Schalldämmung von ein- und mehrschaligen Bauteilen betrachtet.

Bezugnehmend auf verschiedene Literaturquellen bestimmt diese Arbeit die Schalldämmung in Frequenzbändern von ein- und mehrschaligen massiven Bauteilen auf Basis der rechnerischen, numerischen und messtechnischen Analyse. Die Auswertung erfolgt auf Grundlage der Konstruktion und der verwendeten Werkstoffe an verschiedenen praxisbezogenen Beispielen. Es werden die notwendigen Grundlagen erläutert, die Versuchsobjekte und Rechenverfahren beschrieben und ausgewertet.

## 2. Verwendete Datenverarbeitungsprogramme und Messtechnik

### 2.1 Messtechnik

Nachfolgend werden die für die messtechnische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften verwendeten Messgeräte beschrieben.

#### Schallpegelmesser 2260

Der Schallpegelmesser Investigator Typ 2260 D mit BZ 7210 (mit Terzfilter) von Brüel & Kjaer Dänemark ist vom Landesamt für Mess- und Eichwesen Berlin bis Ende 2010 geeicht. Die Messung erfolgt mittels Kondensatormikrofon Nr. 4189 2097378 von Brüel & Kjaer Dänemark. Der Investigator ist ein handgehaltener Schallanalysator der Klasse 1 (IEC und ANSI). Er ermöglicht die Echtzeitanalyse in Terzbändern im Frequenzbereich von 6,3 Hz bis 20 kHz. Die Abspeicherraten sind bis maximal 100 ms möglich. Das Gerät besitzt eine Automatische CIC- Kalibrierung (Charge Injection Calibration). Einsatzbereiche des Schallpegelmessers sind außer im Bauakustik- und Raumakustikbereich auch Schallleistungsbestimmung und Schallintensitätsmessungen, Lärmüberwachung und Schwingungsmessungen.

#### Schallquelle OmniPower

Die Schallquelle Omnipower 4296 von Brüel & Kjaer Dänemark ist eine Hochleistungsschallquelle mit Kugelcharakteristik, bestehend aus 12 Lautsprechern in einer Dodekaeder-Anordnung. Beim Abstrahlen von Schall wird eine pulsierende Kugel simuliert. Die zwölf Lautsprecher sind durch ein Netzwerk so miteinander verbunden, dass ein gleichphasiger Betrieb sowie eine dem Leistungsverstärker angepasste Impedanz gesichert sind. Die Richtcharakteristik ist in der nachfolgenden Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 in verschiedenen Frequenzbereichen dargestellt.

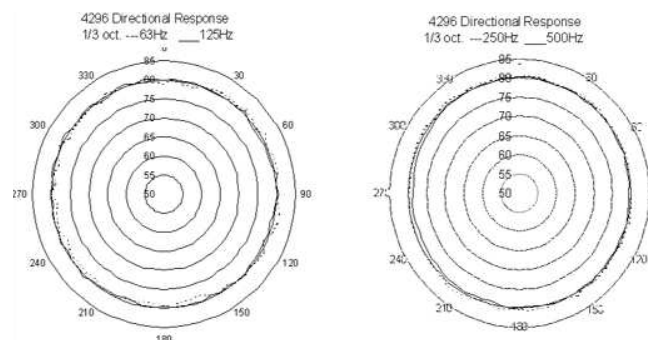


Abbildung 2.1: Richtcharakteristik der Schallquelle OMNIPOWER [19]

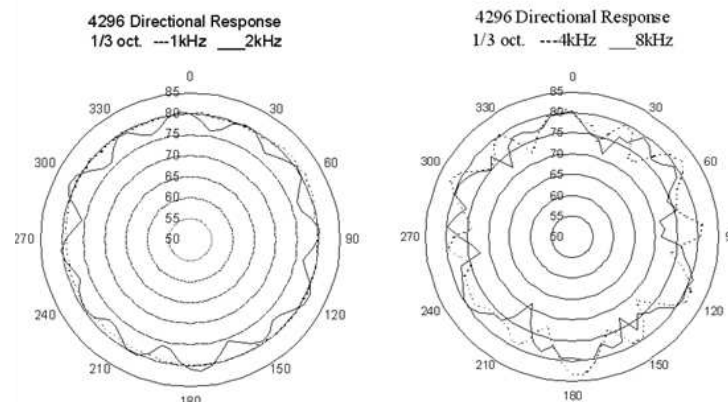


Abbildung 2.2: Richtcharakteristik der Schallquelle OMNIPOWER [19]

### Leistungsverstärker 2716 (Brüel & Kjaer Dänemark)

Der Leistungsverstärker Typ 2716 hat eine Gesamtausgangsleistung von 300 W und verwendet eine passive Kühlung.

### Kalibrator 4231 (Brüel & Kjaer Dänemark)

Der Schallkalibrator erfüllt nach DIN EN 60942 die Messgenauigkeitsklasse 1. Der Kalibrierdruck entspricht  $94 \pm 0,2$  dB. Die Kalibrierfrequenz beträgt 1000 Hz.

## 2.2 Software

---

Im folgenden Abschnitt werden die für die numerische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften sowie für die Auswertung der Messergebnisse verwendeten Programme beschrieben.

### Qualifier Typ 7830

Qualifier Typ 7830 ist ein Programm, das die gemessenen Daten vom Schallpegelmesser Investigator 2260 übernimmt und zum Speichern, Betrachten, Modifizieren, Exportieren, Dokumentieren und Auswerten der Messungen dient. Die Software ist für Messungen im Bereich der Bauakustik (Luftschalldämmung, Trittschalldämmung) und Raumakustik geeignet. Die bauakustischen Messungen, für die Ermittlung der Luft- und Trittschalldämmung trennender Bauteile, werden nach DIN EN ISO 140 - 4 [8] und DIN EN ISO 717 - 1 [9] ausgewertet. Die Messungen der Nachhallvorgänge lassen sich als 3D - Multispektren darstellen.

### Raynoise 3.1

LMS RAYNOISE 3.1 ist ein akustisches Design und Analysesystem. Es basiert auf der Ray Tracing Methode (Strahlverfolgungsmethode) welche die Schallpegelverteilung von verschiedenen Quellen an jeder Position in einem dreidimensionalen Raum simulieren kann. Es simuliert komplexe Interaktionen wie zum Beispiel multiple Reflexionen von verschiedenen Oberflächen. Die Ergebnisse können auf verschiedene Arten wie unter anderem als 1/3 Oktaven Spektrum, in Echogrammen, Lärmkartierungen und Darstellungen der Sprachverständlichkeit dargestellt werden. Des Weiteren können die Ergebnisse mittels Auralisation hörbar gemacht werden.

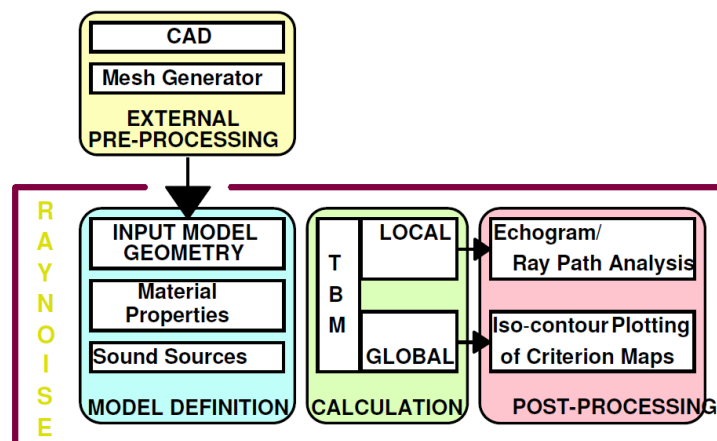


Abbildung 2.2: Methode der Simulationserstellung mit dem Programm Raynoise 3.1 [14]

### COMSOL Multiphysics 3.4

COMSOL Multiphysics ist eine Umgebung zur Modellierung und Lösung von physikalischen Aufgaben auf Grundlage von partiellen Differentialgleichungen (PDGL). Es können mit dem Programm auch Modelle aus verschiedenen Physikbereichen zu Multiphysikmodellen mit gekoppelten physikalischen Eigenschaften erweitert werden. Es enthält mehrere verschiedene Modi zum Beschreiben der PDGL. Zum einen den Physikmodus, in welchem nicht die grundlegenden Gleichungen sondern nur die relevanten physikalischen Größen definiert werden. Zum anderen bestehen drei Möglichkeiten zum Beschreiben der PDGL über die folgenden PDGL Modi:

- Koeffizientenform, für lineare oder annähernd lineare Modelle geeignet
- Allgemeine Form, für nichtlineare Modelle geeignet
- Schwache Form, für Modelle mit PDGL an Kanten, Punkten und Rändern oder Modellen welche Zeit- und Raumbewertungen enthalten.

Mittels der Anwendungen können unter anderem folgende Analysen durchgeführt werden:

- Eigenfrequenz- und Modalanalyse
- Stationäre und Zeitabhängige Analyse
- Lineare und Nichtlineare Analyse

Das Lösen der PDGL erfolgt mittels der Finiten – Elemente – Methode (FEM), auf welche im Abschnitt „3.5.2 Bestimmung der Schalldämm - Eigenschaften mittels Finite - Elemente - Methode“ näher eingegangen wird. Das Programm führt die FEM zusammen mit adaptiver Netzgenerierung und Fehlerkontrolle unter der Verwendung von verschiedenen numerischen Lösern durch. Die Software besteht aus einem Modularen Aufbau. Neben dem Grundmodul sind folgende Module erhältlich:

- „AC/DC“ Modul
- „Acoustics“ Modul
- „Chemical Engineering“ Modul
- „Earth Science“ Modul
- „Heat Transfer“

- „MEMS“ Modul
- „RF“ Modul
- „Structural Mechanics“ Modul

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde das „Acoustics“ Modul zur numerischen Simulation verwendet.

Folgende Anwendungsmodi stehen im „Acoustics“ Modul zur Verfügung:

- zweidimensional (2 D)
- zweidimensional – achsensymmetrisch (2 D – AS)
- dreidimensional (3 D)

### **3. Theoretische Grundlagen**

Die Schalldämmeigenschaften von trennenden Bauteilen können nach verschiedenen Normen und Rechenverfahren bestimmt werden. Die Grundlagen zur Schallausbreitung und Schalldämmung, messtechnischen, analytischen sowie numerischen Ermittlung werden in diesem Kapitel beschrieben.

#### **3.1 Schallausbreitung**

Die Ausbreitung der Schallwellen bezüglich der Schalldämmung von Bauteilen differenziert sich in eine Ausbreitung in festen Körpern und eine Ausbreitung in Flüssigkeiten und Gasen.

##### **3.1.1 Schallausbreitung in Flüssigkeiten und Gasen**

Die Wellenausbreitung erfolgt in flüssigen und gasförmigen Fluiden in Longitudinalwellen.

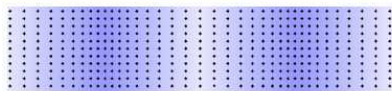


Abbildung 3.1.1 Longitudinalwellen, Dichtewellen [18]

In einem idealen Gas wird die Schallgeschwindigkeit wie folgt ermittelt:

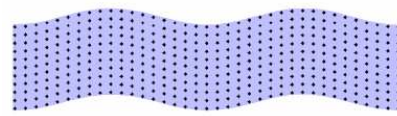
$$c = \sqrt{\kappa R_g T_0} \quad (3.1)$$

Wobei  $\kappa$  der Adiabatenexponent,  $R_g$  die Gaskonstante und  $T_0$  die absolute Temperatur des Gases im Gleichgewicht sind.

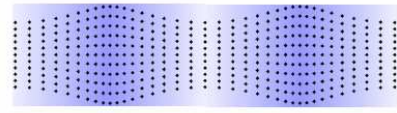
##### **3.1.2 Schallausbreitung in Plattenförmigen Bauteilen**

Die Wellenausbreitung in festen Körpern erfolgt in unterschiedlichen Wellenformen wie z. B. Biege-Wellen, Dehnwellen, oder Transversalwellen. In Plattenförmigen Bauteilen breiten sich die Wellen in Biege-Wellen, quasi - Longitudinalwellen und Schubwellen aus. Die Biege-Wellen stellt die wichtigste Wellenform bei Betrachtung der Schallabstrahlung dar.

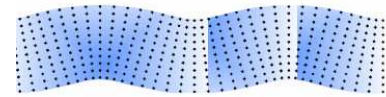




Transversalwellen (Schubwellen)



quasi – Longitudinale Wellen (Dehnwellen)



Biege-Wellen

Abbildungen 3.1.2: Wellenformen der Schallausbreitung [18]

### 3.2 Schalldämmung

Wird durch ein Bauteil Luftschall übertragen, durchdringt ein Teil der auftreffenden Schallenergie das Bauteil, ein anderer Teil wird als Körperschall in andere Bauteile übertragen. Außerdem wird die Schallenergie teilweise durch Dissipation in Wärme umgewandelt und zum Teil reflektiert.

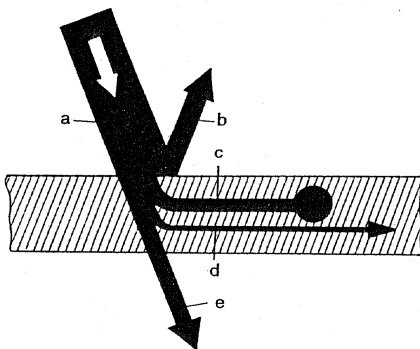


Abbildung 3.2.1 „Schalldurchgang durch ein Hindernis“ [1]

Wobei: a) der auftreffende Schall, b) der reflektierte Schall, c) der Verlust durch Dissipation,  
d) der Verlust durch Körperschallübertragung und e) der abgestrahlte Schall ist.

Dadurch wird weniger Schallenergie abgestrahlt als auffällt. Diese Schalldämmung wird über das logarithmierte Verhältnis der Schalleistungen berechnet.

$$R = 10 \lg \frac{P_1}{P_2} = 10 \lg \frac{1}{\tau} \text{ dB} \quad (3.2)$$

Das Verhältnis zwischen abgestrahlter Schalleistung und auftreffender Schalleistung ist der Transmissionsgrad  $\tau$ .

Das Absorptionsvermögen wird über den Schallabsorptionsgrad  $\alpha$  angegeben und wird über das Verhältnis aus der vom Material absorbierten zur auftreffenden Schallenergie bestimmt.

Definiert wird der Schallabsorptionsgrad wie folgt:

$$\alpha = \frac{(\tilde{p}_a)^2}{(\tilde{p}_e)^2} \quad (3.3)$$

In nachfolgendem Bild sind die Übertragungswege zwischen benachbarten Räumen dargestellt, wobei D bzw. d der Direktschall und F bzw. f der Flankenschall ist. Die Großbuchstaben stehen dabei für die Anregung, die Kleinbuchstaben für die Abstrahlung.

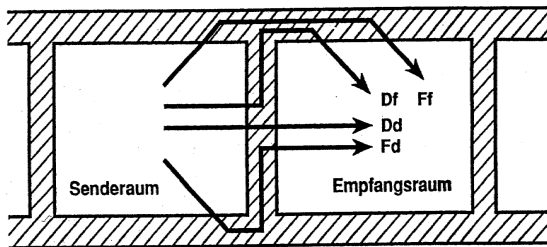


Abbildung 3.2.2 Luftschallübertragungswege zwischen benachbarten Räumen [2]

Aufgrund der zusätzlichen Übertragung durch Nebenwege erhöht sich die Gesamtschalleistung. Das daraus resultierende Bau - Schalldämm- Maß  $R'$  ist wie folgt definiert.

$$R' = 10 \lg \frac{P_1}{P_2 + P_3} = 10 \lg \frac{1}{\tau'} \text{ dB} \quad (3.4)$$

Der Transmissionsgrad  $\tau'$  wird unter Einbezug der flankierenden Bauteile wie folgt bestimmt.

$$\tau' = \frac{P_2 + P_3}{P_1} \quad (3.5)$$

Der in der Bauakustik verwendete Frequenzbereich liegt zwischen 100 und 3150 Hz für Terzband Mittenfrequenzen. Bei Problemen der Luftschalldämmung im Bereich von sehr hohen bzw. sehr tiefen Frequenzen wird der Frequenzbereich auf 50 bis 5000 Hz erweitert.

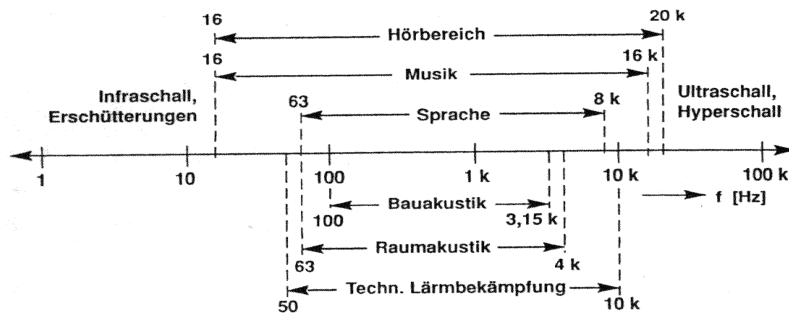


Abbildung 3.2.3 Frequenzbereiche der Akustik [2]

Das Schalldämm – Maß dient allgemein zur Charakterisierung von Bauteileigenschaften. Die Anforderungen an die Schalldämm - Eigenschaften von Innen - und Außenbauteilen stellt die zurzeit gültige DIN 4109: 1989 und deren Beiblätter [5], [6]. Die Berechnung nach DIN 4109 [5] erfolgt nach Beiblatt 1 [6] als Einzahlangabe. Der Einfluss der flankierenden Bauteile wird dabei berücksichtigt. Das Schalldämm – Maß kann auch nach DIN EN 12354 – 1 [7] als Einzahlangabe und frequenzabhängig berechnet werden. Die DIN EN 12354 – 1 betrachtet dabei detailliert die Flankenübertragungswege und bezieht mehr Materialeigenschaften ein, als die DIN 4109 - 1989. Die DIN 4109 [6] wird zurzeit novelliert, wobei sich die Berechnung der Schalldämm – Maße an der DIN EN 12354 - 1 [7] orientiert. Die Anforderungen werden grundlegend geändert und auf Schallpegeldifferenzen bezogen. Des Weiteren kann das Schalldämm – Maß u. a. nach den Quellen [1], [2], [4] und [22] bestimmt werden. Akustisch betrachtet wird die Luftschalldämmung unterschieden in ein- und mehrschalige Bauteile.

### 3.2.1 Schalldämmung einschaliger Bauteile

Die Schalldämmung einschaliger, homogener, dichter, unendlich ausgedehnter Platten wird nach [1] in drei Gebiete unterteilt., welche in nachfolgender Abbildung 3.2.4 dargestellt sind.

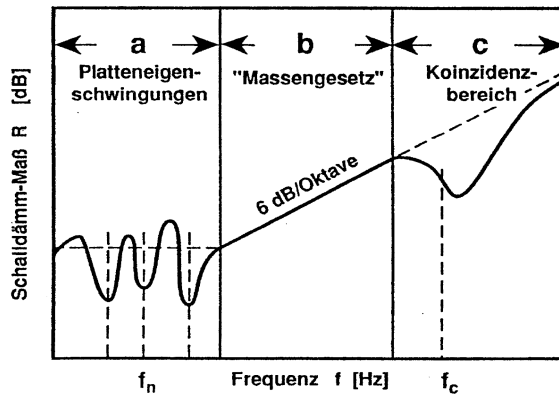


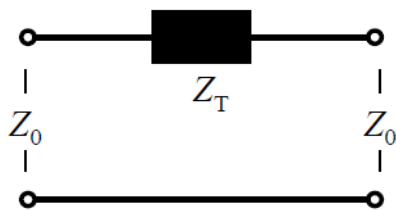
Abbildung 3.2.4 Frequenzbereiche der Schalldämmung einschaliger Bauteile [1]

Für die Schalldämmung kann nach dem Bergerschen Massengesetz für den Schalleinfall ebener Wellen folgende Näherungsgleichung für den Bereich unterhalb der Grenzfrequenz angegeben werden.

$$R = 10 \lg \left[ 1 + \left( \frac{\pi f m'}{\rho_0 c_0} \right)^2 \cos \delta \right] \text{ dB} \quad (3.6)$$

Die Näherungsgleichung verdeutlicht die Auswirkung des Schalleinfallwinkels. Bei senkrecht einfallendem Schall ergibt sich mit  $\delta = 0^\circ$  ein  $\cos \delta = 1$ . Bei streifendem Schalleinfall verringert sich die Schalldämmung des Bauteils bis  $\delta = 90^\circ$  ein  $\cos \delta = 0$ . Der in der Praxis am häufigsten vorkommende diffuse Schalleinfall kann nach [1] über einen Schalleinfallswinkel von  $\delta = 45^\circ$  vereinfacht berechnet werden.

Das Massengesetz kann als Ersatzschaltbild dargestellt werden, wobei die Ein- und Ausgangsgrößen wie Schalldruck und Schallschnelle durch Impedanzen verknüpft sind.

Abbildung 3.2.5 Ersatzschaltbild zum Massengesetz bei einem Schalleinfallswinkel  $\delta$  und der Trennimpedanz  $Z_T$  [20]

$$\text{Dabei ist: } Z_0 = \rho_0 c_0 \quad (3.7)$$

$$Z_T = j \omega m' \cos \delta \quad (3.8)$$

Bei einer Frequenzerhöhung um eine Oktave oder der Verdopplung der flächenbezogenen Masse erhöht sich die Schalldämmung um 6 dB.

Die Koinzidenzfrequenz ist die niedrigste Frequenz, bei der Koinzidenz (streifender Schalleinfall) auftreten kann und bewirkt einen Einbruch der Schalldämmung. Dabei entspricht die Wellenlänge des Luftschalls der Biegewellenlänge des Bauteils. Somit kompensieren sich die entgegengesetzten Phasen der Massenträgheit und der dynamischen Steifigkeit. Daher sind für hohe Schalldämmungen einschaliger Wände, Bauteile mit einer Koinzidenzfrequenz unter bzw. über dem bauakustisch betrachteten Frequenzbereich geeignet. In nachfolgender Grafik sind Koinzidenzfrequenzen verschiedener Bauteile dargestellt.

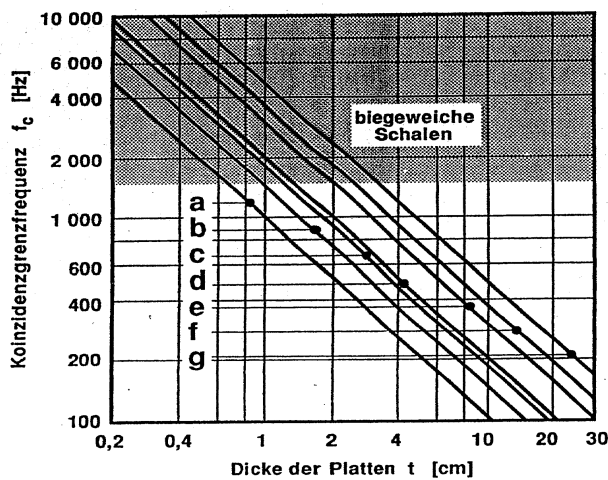


Abbildung 3.2.6 Koinzidenzfrequenzen  $f_c$  verschiedener Materialien in Abhängigkeit der Plattendicke  $t$  [1]

Dabei ist: a) Glas, b) Schwerbeton, c) Sperrholz, d) Vollziegel, e) Gips, Gipskarton, f) Hartfaser, g) Leichtbeton

Im Bereich oberhalb der Grenzfrequenz steigt die Schalldämmung mit 9 dB je Frequenzverdoppelung an. Die Schalldämmung verdoppelt sich um 6 dB je Verdoppelung der flächenbezogenen Masse. Bei einer Verdoppelung des Verlustfaktors erhöht sich die Schalldämmung um 3 dB.

### 3.2.2 Schalldämmung mehrschaliger Bauteile

Aufgrund des Einflusses der Größe der flächenbezogenen Masse auf die Schalldämmung resultieren hohe Wanddicken bei hohen Schalldämm – Maßen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der zweischaligen Ausführung.

Zwischen den Einzelschalen befindet sich eine Luftschicht, welche vollständig mit schallabsorbierenden Materialien ausgefüllt ist. Der eingebrachte Dämmstoff darf dabei die Kopplung der Wände nicht zusätz-

lich versteifen. Eine ideale zweischalige Ausführung besitzt keine Verbindung der Einzelschalen und somit nur eine direkte Schallübertragung über die mit absorbierenden Materialien ausgekleidete Luftschicht. Praktisch ist dies sehr schwer zu verwirklichen, was aufgrund von z. B. Befestigungen der Wandschalen zur Verringerung der Schalldämmeigenschaften führt. Ohne die schallabsorbierende Auffüllung des Wandzwischenraums entstehen Dämmungseinbrüche durch die Ausbildung stehender Wellen in der Luftschicht. Diese treten immer dann auf, wenn der Abstand der Wandschalen  $d'$  folgende Größe erreicht.

$$d' = n \frac{\lambda}{2} \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (3.9)$$

Die Einbruchfrequenz ermittelt sich wie folgt:

$$f_{\lambda n} = n \frac{170}{d'} \quad \text{mit } f_{\lambda n} \text{ [Hz], } d' \text{ [m], } n = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (3.10)$$

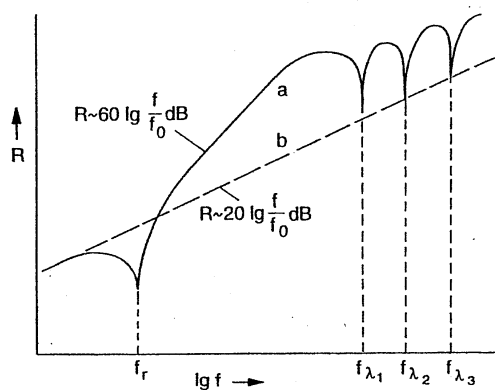


Abbildung 3.2.7 Prinzipieller Verlauf des Schalldämm – Maßes  $R$  zweischaliger Bauteile in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  [1]

Der Verlauf der Schalldämmung für zweischalige Bauteile weist mehrere Einbrüche auf. Die Schalldämmung oberhalb der unteren Resonanzfrequenz verläuft höher als nach dem Massengesetz ermittelt.

Im tiefen Frequenzbereich der Resonanzfrequenz ist der Einbruch der Schalldämmung mit der Resonanz der Wandbauteile mit dem eingeschossenen, als Feder wirkenden Dämmstoff (bzw. Luft) zu begründen.

Im mittleren Frequenzbereich steigt die Schalldämmung steiler an als bei einschaligen Wänden. Die Verbesserung der Schalldämmung  $\Delta R$  beträgt für den senkrechten Schalleinfall:

$$\Delta R = 40 \lg \frac{f}{f_R} \quad (3.11)$$

Im hohen Frequenzbereich können Einbrüche in der Schalldämmung durch ausfüllen des Zwischenraums mit schallabsorbierenden Material vermieden werden.

Im Bereich der Resonanzfrequenz ist die Schalldämmung des zweischaligen Bauteils geringer als bei einem vergleichbaren einschaligen Bauteil. Daher sollte die Resonanzfrequenz unterhalb des interessierenden Frequenzbereichs liegen. Dies kann über die Dimensionierung des Abstandes der Schalen, der dynamischen Steifigkeit der Dämmschicht oder der flächenbezogenen Masse der massiven Schalen erfolgen.

Die Schalldämm - Eigenschaften von zwei- und dreischaligen Bauteilkonstruktionen sind in nachfolgender Abbildung 3.2.8 in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt:

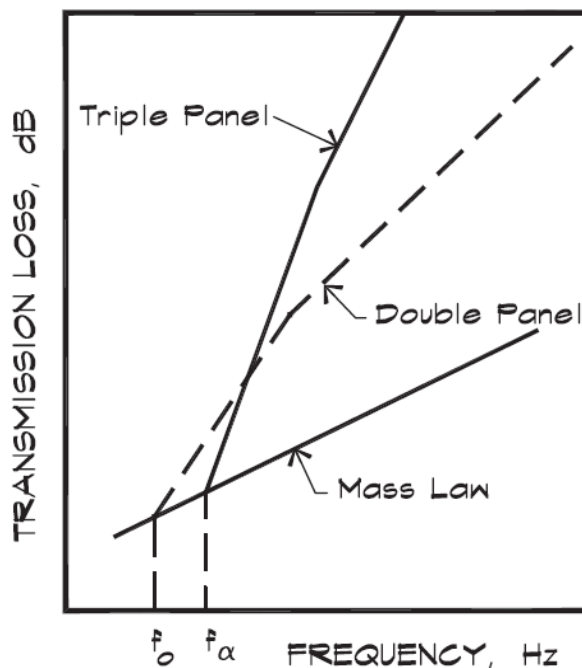


Abbildung 3.2.8 Schalldämmung von zwei- und dreischaligen Bauteilen [22]

Im Bereich unter der Masse – Luft – Masse Resonanz verhält sich die dreischalige Konstruktion entsprechend dem Massengesetz (3.6). Im Bereich zwischen der Durchgangsfrequenz  $f_i$  und der höheren Resonanzfrequenz  $f_\beta$  beträgt der Anstieg 30 dB je Oktave. Im Vergleich dazu steigt in diesem Bereich die Schalldämmung einer zweischaligen Konstruktion um 18 dB je Oktave an. Die Schalldämmung erhöht sich in diesem Frequenzbereich um 18 dB je Massenverdopplung.

### **3.2.3 Einflussfaktoren auf die Schalldämmung**

---

Je nach der Genauigkeit des Ermittlungsverfahrens variieren die Einflussfaktoren für die Schalldämmung. So wird in der DIN 4109 [5] die Schalldämmung hauptsächlich auf Grundlage der flächenbezogenen Massen des trennenden Bauteils und der flankierenden Bauteile bestimmt. Die Rechenverfahren nach DIN 12354 – 1 [7] und anderen Literaturquellen beziehen u. a. zusätzlich weitere Materialeigenschaften und den Einfluss der Raumgeometrien mit ein.

#### Materialeigenschaften

Das Schalldämm – Maß des trennenden Bauteils ist u. a. abhängig von der Schichtdicke, der Anzahl der Schichten, der Rohdichte, dem Verlustfaktor sowie dem Elastizitätsmodul. Der homogene Aufbau der Bauteile ist relevant. Aufgrund von Inhomogenitäten können Abweichungen zum homogenen Schalldämm – Verhalten der Bauteile resultieren. Die Materialeigenschaften der flankierenden Bauteile haben zusätzlich Einfluss auf die resultierende Schalldämmung. Auch die Reflexionseigenschaften und das Absorptionsvermögen haben auf die Schalldämmung Einfluss. Die Schalleitung der angrenzenden Bauteile kann zu einer Verringerung der Schalldämmeigenschaften führen. Um dies zu vermeiden sind u. a. mehrfache Umwandlungen von Luftschall in Körperschall notwendig. Die Dezimierung der Schallbrücken erfolgt dabei durch die bei den Impedanzsprüngen auftretenden Reflexionen.

#### Schallanregung

Die Schalldämmung von Bauteilen ist abhängig von der Art der Anregung. Je nachdem ob Körperschallwellen oder Luftschallwellen das Bauteil anregen, weisen Bauteile unterschiedliche Schalldämm – Eigenschaften auf. Der Trittschall ist eine Form von Körperschall und wird mittels eines Norm – Hammerwerks gemessen, in welchem eine definierte Körperschallanregung erfolgt. Für das Schalldämmverhalten von Trennwänden ist die Trittschalldämmung nicht relevant und wird daher nicht weiter betrachtet. In Bezug auf das Massengesetz (3.6) wurde bereits die Abhängigkeit des Schalleinfallwinkels betrachtet. Daher ist auch die Position der Schallquelle im Senderraum relevant. Bei einem senkrechten Schalleinfall ergibt sich eine höhere Schalldämmung. Für ein diffuses Schallfeld muss eine räumliche- und eine Richtungsdiffusität vorliegen. Eine räumliche Diffusität liegt vor, wenn an jedem Ort des Raumes die Schallenergie gleich ist. Die Richtungsdiffusität wird erreicht, wenn sich die Schallenergie in alle Richtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit ausbreitet. Der Einfallswinkel ist dabei auf die Raumbegrenzung zufällig verteilt. Die Schallabstrahlung, des bei den Messungen verwendeten Lautsprechers, ist im Abschnitt 2, Abbildung 2.1 dargestellt. Bei der Berechnung und Messung des Schalldämm – Maßes wird von einem



diffusen Schallfeld ausgegangen, was zu Abweichungen zwischen den Mess- und Rechenergebnissen führen kann.

### Raumgeometrie

Die Einflussfaktoren der Raumgeometrie sind unter anderem die Abmessungen der Wände und die Volumina der Absorptionsfläche der Räume. Die Größe des Sende- und des Empfangsraums sind in Bezug auf deren Eigenfrequenzen und der strukturellen Eigenfrequenz von Bedeutung, da es zu einer Verschlechterung der Schalldämm – Werte kommt wenn die Eigenfrequenz des Raumes mit der Eigenfrequenz der Wand zusammenfällt. Die Art der Stoßstellenübertragungswege der flankierenden Bauteile hat einen erheblichen Einfluss. Eine Entkoppelung eines flankierenden Bauteils kann das Dämmverhalten des trennenden Bauteils verbessern. Die DIN 4109 [6] bewertet die flankierenden Bauteile über den Korrekturwert  $K_{L,1}$  für die mittlere flächenbezogene Masse und  $K_{L,2}$  (bei Trennwänden mit biegeweicher Vorsatzschale) über die Anzahl flankierender biegeweicher Bauteile. Die DIN 12354 – 1 [7] rechnet mit dem Stoßstellendämm – Maß  $K_{ij}$  für die Stöße starrer Keuzstoß und Starrer T Stoß. Diese Bauteileigenschaften basieren auf den Messungen von Schnellepegeldifferenzen an den Stoßstellen, den Verbindungslängen der Bauteile, an der Stoßstelle und den Dämpfungseigenschaften.

Bei trennenden Bauteilen, welche aus unterschiedlichen Einzelbauteilen bestehen, wird das resultierende Schalldämm – Maß  $R_{res}$  ermittelt.

$$R_{res} = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n A_i 10^{\frac{R_i}{10}} + \sum_{j=1}^m A_F 10^{\frac{R_F}{10}}}{\sum_{i=1}^n A_i + \sum_{j=1}^m A_F} \text{ dB} \quad (3.12)$$

Dabei ist  $A_F$  die Öffnungsfläche und  $m, n$  die Anzahl der Teilflächen bzw. Öffnungen.

### 3.3 Messtechnische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften

Für die Messtechnische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften wurden für den jeweiligen Wandaufbau jeweils 2 Messungen mit unterschiedlichen Materialien durchgeführt. Die Messungen der Bauteile wurden im eingebauten Zustand und daher mit Flankenschallübertragung durchgeführt. Die bauakustischen Messungen der Luftschalldämmung der trennenden Bauteile wurden nach [8] DIN EN

ISO 140 - 4 „Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Teil 4: Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden“ (Ausgabe Dezember 1998) und DIN EN ISO 717 - 1 „Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Teil 1: Luftschalldämmung“ (Ausgabe November 2006) [9] durchgeführt.

### Bestimmung der Luftschalldämmung

Zur Bestimmung der Luftschalldämmung  $R$  von trennenden Bauteilen wird auf der Sendeseite ein Lautsprecher (Schallquelle Omnipower, siehe Abschnitt 2.1) aufgestellt, welcher ein konstantes Rauschen abstrahlt. Daraufhin wird der Schalldruckpegel im Empfangs- und Senderaum gemessen. In nachfolgender Grafik ist der schematische Messaufbau dargestellt.

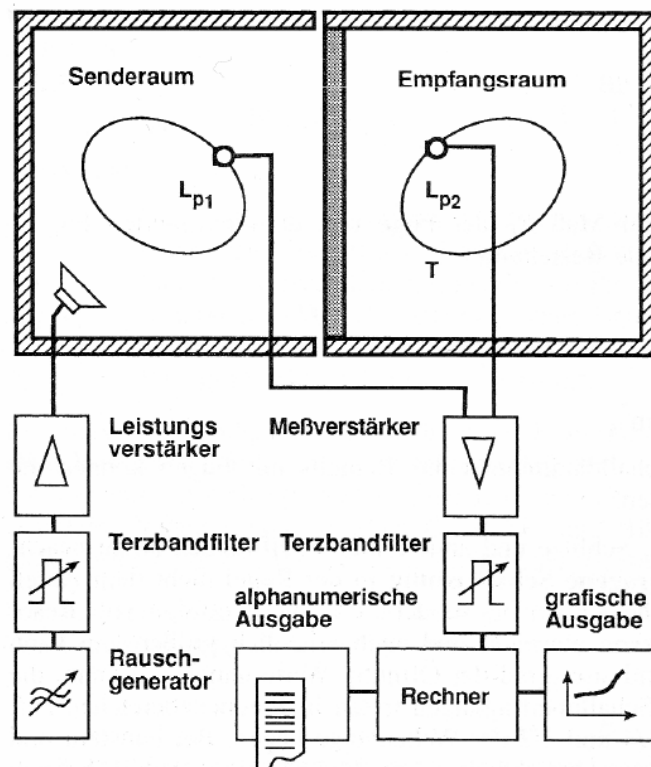


Abbildung 3.3.1 Messaufbau der Luftschalldämmung eines trennenden Bauteils [2]

Die Luftschalldämmung zwischen dem Empfangs- und Senderaum wird aus der Differenz der Schalldruckpegel sowie einem Korrekturwert, bestehend aus dem Quotienten der Trennfläche mit der Absorptionsfläche im Empfangsraum, frequenzabhängig berechnet.

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \text{ dB} \quad (3.13)$$

Dabei sind:

$R$	Luftschalldämmung [dB]
$L_1$	Schalldruckpegel im Senderraum [dB]
$L_2$	Schalldruckpegel im Empfangsraum [dB]
$S$	Größe der Trennfläche [m <sup>2</sup> ]
$A$	Äquivalente Absorptionsfläche [m <sup>2</sup> ]

Die äquivalente Absorptionsfläche wird über die Nachhallzeit ermittelt (3.14).

Dazu wird im Empfangsraum ein Lautsprecher (Schallquelle Omnipower, siehe Abschnitt 2.1) aufgestellt, welcher ein konstantes Rauschen abstrahlt. Sobald der Schallpegel bezogen auf die Zeit einen stationären Wert erreicht hat, wird die Schallquelle abgeschaltet. Die Abklingrate des Schallpegels ist abhängig von der Art, der Lage und der Menge des im Empfangsraum befindlichen absorbierenden Materials. Die Definition der Nachhallzeit ist die Zeit in der der Schalldruckpegel um 60 dB abfällt. Die Nachhallzeit kann aber auch über einen 20 dB bzw. 30 dB Pegelabfall gemessen und auf einen 60 dB Pegelabfall hochgerechnet werden. Bei den im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführten Messungen wurde über einen 30 dB Pegelabfall gemessen.

In nachfolgender Grafik ist der Pegelabfall bei der Messung der Nachhallzeit im Empfangsraum dargestellt.

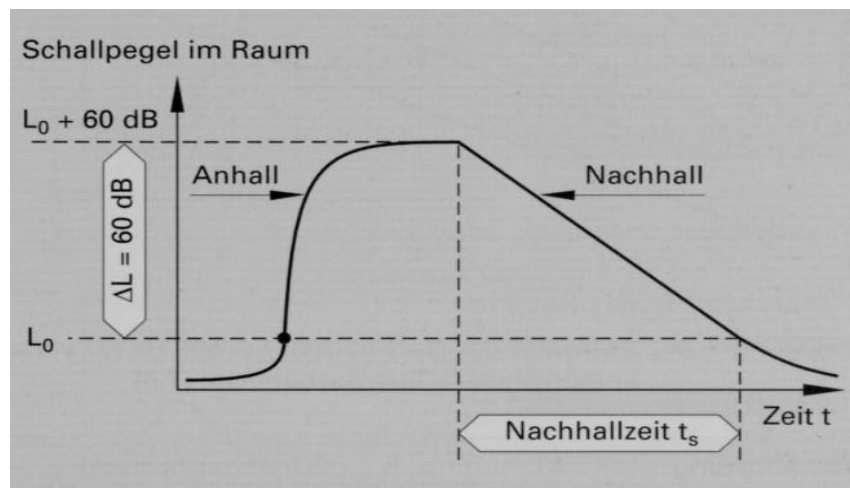


Abbildung 3.3.2 Nachhallzeitbestimmung [2]

Die Messung der Nachhallzeit  $T$  erfolgt frequenzabhängig, da der Absorptionsgrad des im Raum befindlichen absorbierenden Materials auch frequenzabhängig ist. Nach der Sabine'schen Formel wird die äquivalente Absorptionsfläche ermittelt.

$$A = 0,163 \frac{V}{T} \text{ m}^2 \quad (3.14)$$

Dabei ist:

$V$  Raumvolumen [ $\text{m}^3$ ]

$T$  Nachhallzeit [s]

Die Absorptionsfläche  $A$  ist die Summe aller absorbierenden Flächen im Raum, wobei die Absorption einer Fläche das Produkt aus der Fläche und des Absorptionsgrades ist.

### Bestimmung der Luftschalldämmung in Einzahlangaben

Die Einzahlwerte für die Luftschalldämmung  $R_W$  werden nach DIN EN ISO 717 – 1 [9] aus den nach DIN EN ISO 140 [8] gemessenen und nach Gleichung 4.1 ermittelten frequenzabhängigen Werten der Luftschalldämmung im Frequenzbereich 100 bis 3150 Hz (erweiterter Bereich 50 bis 5000 Hz) bestimmt. Dazu wird eine festgelegte Bezugskurve in 1 dB Schritten gegenüber der Messkurve verschoben, bis die Summe der Unterschreitungen durch die Schalldämmkurve so groß wie möglich, aber  $< 32$  dB ist. Das bewertete Schalldämm-Maß ist dabei der Wert der verschobenen Bezugskurve bei der Frequenz 500 Hz.

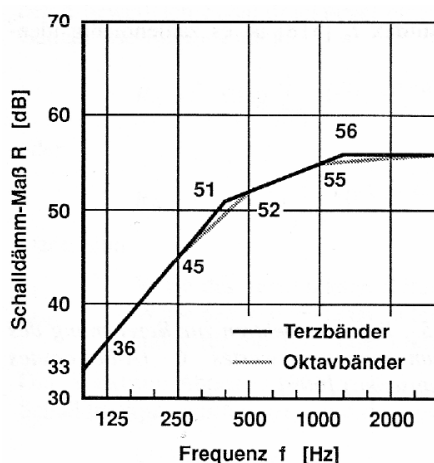


Abbildung 3.3.3 Bezugskurve zur Ermittlung des bewerteten Schalldämm – Maß [2]

Die gemessenen Schallpegel im Empfangs – bzw. Senderraum, die Nachhallzeiten sowie der Einzahlangaben der Luftschalldämmung  $R_W$  aller gemessenen Bauteile sind in Anlage 1 aufgeführt.

### **3.4 Analytische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften**

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die analytische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften mittels Beiblatt 1 DIN 4109 [6], DIN EN 12343 – 1 : 2000 [7] sowie nach Heckl [4] eingegangen. Die Schalldämm – Eigenschaften für dreischalige Konstruktionen werden nach Sharp [22] ermittelt.

#### **3.4.1 Berechnung nach Beiblatt 1 zu DIN 4109 Nov. 1989 „Schallschutz im Hochbau“**

Das bewertete Schalldämm – Maß  $R_{w,R}$  wird nach dem Beiblatt 1 der DIN 4109 [6] aus der flächenbezogenen Masse  $m'$  des betrachteten Bauteils bestimmt. Die flächenbezogene Masse wird nach [6] Abschnitt 2.2.2 aus der Dicke der Wand und deren Rohdichte ermittelt. Gegebenenfalls wird ein Zuschlag für ein- bzw. beidseitigen Putz nach [6] Abschnitt 2.2.2.1 und Abschnitt 2.2.2.2 addiert. Die genaue Ermittlung der Schalldämm – Maße sowie der Materialeigenschaften der flankierenden Bauteile ist in Anlage 2 ersichtlich.

##### **3.4.1.1 Berechnung des einschaligen homogenen Wandaufbaus**

Der Rechenwert für die Rohdichte der Wand wird nach [6] Tabelle 3: „Wandrohdichten einschaliger biegesteifer Wände aus Steinen und Platten“ bestimmt. Die flächenbezogene Masse wird wie folgt ermittelt.

$$m' = \rho_{\text{Bauteil}}^1 \cdot d_{\text{Bauteil}} + m'_{\text{Putz innen}} + m'_{\text{Putz außen}} \quad (3.15)$$

Nach Tabelle 1 des Beiblatt 1 der DIN 4109 ergibt sich damit das bewertete Schalldämm – Maß.

Der Einfluss der flankierenden Bauteile wird über die Ermittlung der Korrekturwerte  $K_{L,1}$  nach [6] Tabelle 13: „Korrekturwerte  $K_{L,1}$  für das bewertete Schalldämm – Maß  $R'_{w,R}$  von biegesteifen Wänden und Decken als trennende Bauteile nach den Tabellen 1, 5, 8 und 12 bei flankierenden Bauteilen mit der mittleren flächenbezogenen Masse  $m'_{L,Mittel}$ “ und  $K_{L,2}$  nach Tabelle 15: „Korrekturwerte  $K_{L,2}$  für das bewertete Schalldämm – Maß  $R'_{w,R}$  trennender Bauteile mit biegeweicher Vorsatzschale, schwimmenden Estrich / Holzfußboden oder aus biegeweichen Schalen“ ermittelt.

---

<sup>1</sup> Abminderung nach Beiblatt 1 zu DIN 4109 Tabelle 3, Zeile 3, Spalte 2

Das resultierende Schalldämm – Maß  $R'_{w,R}$  wird mit den Korrekturfaktoren addiert und ergibt das bewertete Schalldämm - Maß.

$$R'_{w,R} = R_{w,R} + K_{L,1} + K_{L,2} \text{ dB} \quad (3.16)$$

#### **3.4.1.2 Berechnung des einschaligen homogenen Wandaufbaus zuzüglich einer Vorsatzschale**

Das bewertete Schalldämm – Maß  $R'_{w,R}$  wird analog wie Abschnitt 3.4.1.1 aus der flächenbezogenen Masse  $m'$  des betrachteten Bauteils bestimmt.

Die flächenbezogene Masse wird nach [6] Abschnitt 2.2.2 aus der Dicke der Wand und deren Rohdichte ermittelt. Gegebenenfalls wird ein Zuschlag für ein- bzw. beidseitigen Putz nach Abschnitt 2.2.2.1 und 2.2.2.2 addiert. Die flächenbezogene Masse wird nach (3.15) ermittelt.

Das bewertete Schalldämm – Maß  $R'_{w,R}$  ermittelt sich aus der Rohdichte der Wand nach Tabelle 8: „Bewertetes Schalldämm – Maß  $R'_{w,R}$  von einschaligen, biegesteifen Wänden mit einer biegeweichen Vorsatzschale nach Tabelle 7“, wenn der Wandaufbau den Ausführungen der Tabelle 7 des Beiblatt 1 der DIN 4109 entspricht.

Der Einfluss der flankierenden Bauteile wird über die Ermittlung der Korrekturwerte  $K_{L,1}$  nach Tabelle 13 und  $K_{L,2}$  nach Tabelle 15 ermittelt.

Das resultierende Schalldämm – Maß  $R_{w,R}$  wird nach (3.16) mit den Korrekturfaktoren addiert und ergibt das bewertete Schalldämm - Maß.

#### **3.4.1.3 Berechnung des zweischaligen homogenen Wandaufbaus**

Das bewertete Schalldämm – Maß  $R_{w,R}$  wird analog den vorangegangenen Abschnitten 3.4.1.1 und 3.4.1.2 aus der flächenbezogenen Masse  $m'$  des betrachteten Bauteils bestimmt.

Das bewertete Schalldämm – Maß der Wand wird nach Tabelle 6 des Beiblatt 1 der DIN 4109: „Bewertetes Schalldämm – Maß  $R'_{w,R}$  von zweischaligem, in Normalmörtel gemauertem Mauerwerk mit durchgehender Gebäudetrennfuge“ bestimmt.

Der Einfluss der flankierenden Bauteile wird für zweischalige Wände über die Ermittlung der Korrekturwerte  $K_{L,1}$  nach Tabelle 14: „Korrekturwerte  $K_{L,1}$  für das bewertete Schalldämm – Maß  $R'_{w,R}$  von zweischaligen Wänden aus biegeweichen Schalen nach den Tabellen 9 und 10 mit der mittleren flächenbezogenen Masse  $m'_{L,Mittel}$ “ und  $K_{L,2}$  nach Tabelle 15 ermittelt.

Das resultierende Schalldämm – Maß  $R_{w,R}$  wird nach (3.16) mit den Korrekturfaktoren addiert und ergibt das bewertete Schalldämm - Maß.

Unter Einbezug des Abschnittes 2.3.2 des Beiblatt 1 der DIN 4109 [6], welcher einen Aufschlag für zweischalige Ausführungen mit durchgehender Trennfuge beinhaltet, wird das bewertete Schalldämm – Maß um 12 dB erhöht.

### **3.4.2 Berechnung nach DIN EN 12354 – 1 (Einzahlangaben)**

---

Die DIN EN 12354 – 1 : 2000 [7] legt das Berechnungsverfahren für das Bauschalldämm – Maß  $R'_w$  sowie das bewertete Schalldämm – Maß  $R_{Dd,w}$  für einschalige homogene Bauteile und einschalige Bauteile mit biegeweicher Vorsatzschale fest. Die genaue Ermittlung der Schalldämm – Maße nach [7] sowie der Materialeigenschaften der flankierenden Bauteile ist in Anlage 2 ersichtlich.

Für das für die Berechnung genutzte vereinfachte Modell wird das Bauschalldämm – Maß wie folgt ermittelt (Gleichung 26, [7]):

$$R'_w = -10 \lg \left[ 10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_{F=1}^n 10^{-R_{Fd,w}/10} \right] \text{ dB} \quad (3.17)$$

Dabei sind:

$R_{Dd,w}$	das bewertete Schalldämm – Maß der die Direktübertragung [dB]
$R_{Ff,w}$	das bewertete Flankendämm – Maß für den Übertragungsweg Ff [dB]
$R_{Df,w}$	das bewertete Flankendämm – Maß für den Übertragungsweg Df [dB]
$R_{Fd,w}$	das bewertete Flankendämm – Maß für den Übertragungsweg Fd [dB]
$n$	die Anzahl der flankierenden Bauteile

Das bewertete Schalldämm – Maß wird nach der Gleichung 27 der DIN 12354 – 1 [7] ermittelt:

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \text{ dB} \quad (3.18)$$

Dabei sind:

$R_{s,w}$	das bewertete Schalldämm – Maß des trennenden Bauteils [dB]
$\Delta R_{Dd,w}$	die bewertete Verbesserung des Gesamt – Schalldämm – Maßes durch zusätzliche Vorsatzschalen

Für die betrachteten sowie flankierenden Bauteile wird nach Gleichung B 5 der DIN 12354 – 1 [7] für Bauteile mit  $m' > 150 \text{ kg / m}^2$  das bewertetes Schalldämm – Maß wie folgt ermittelt:

$$R_w = 37,5 \lg \left( \frac{m'}{m'_0} \right) - 42 \text{ dB} \quad (3.19)$$

Dabei sind:

$m'$	die flächenbezogene Masse
$m'_0$	die flächenbezogene Bezugsmasse (1kg / m <sup>2</sup> )



Das bewertete Luftschallverbesserungsmaß für Vorsatzkonstruktionen wird nach [7] Tabelle D 3 und der nach Gleichung D.1 (3.20) bestimmten Resonanzfrequenz ermittelt.

$$f_R = 160 \cdot \sqrt{s' \left( \frac{1}{m'_1} \right) + \left( \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ Hz} \quad (3.20)$$

### Berechnung des Stoßstellendämm – Maß für Stoßstellen:

Die Abhängigkeit der flächenbezogenen Masse  $M$  der mit den Stoßstellen verbundenen Bauteile wird nach [7] Gleichung E.2 ermittelt.

$$M = \lg \left( \frac{m_{li}}{m_i} \right) \quad (3.21)$$

Das Stoßstellendämm – Maß wird nach [7] Gleichungen E 3 bis E 9 ermittelt. Die Übertragungswege sind der Darstellung der Raumgeometrien in Anlage 2 zu entnehmen.

Starrer Kreuzstoß:

$$K_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7M^2 \quad \text{dB; 0 dB / Oktave} \quad (3.22)$$

$$K_{12} = 8,7 + 5,7M^2 (= K_{23}) \quad \text{dB; 0 dB / Oktave} \quad (3.23)$$

Starrer T Stoß:

$$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7M^2 \quad \text{dB; 0 dB / Oktave} \quad (3.24)$$

$$K_{12} = 5,7 + 5,7M^2 (= K_{23}) \quad \text{dB; 0 dB / Oktave} \quad (3.25)$$

### Berechnung der Flankendämm - Maße

Die Flankendämm – Maße werden nach den Gleichungen 28 a [7] ermittelt.

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \text{ dB} \quad (3.26)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \text{ dB} \quad (3.27)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \text{ dB} \quad (3.28)$$

Dabei sind:

$R_{F,w}$	das bewertete Schalldämm – Maß des flankierenden Bauteils F im Senderaum [dB]
$R_{f,w}$	das bewertete Schalldämm – Maß des flankierenden Bauteils f im Senderaum [dB]
$\Delta R_{Ff,w}$	das gesamte bewertete Luftschallverbesserungsmaß durch eine zusätzliche Vorsatzschale am trennenden Bauteil auf der Sendeseite und / oder am flankierenden Bauteils auf der Empfangsseite [dB]
$\Delta R_{Df,w}$	das gesamte bewertete Luftschallverbesserungsmaß durch eine zusätzliche Vorsatzschale am trennenden Bauteil auf der Sendeseite und / oder am flankierenden Bauteils auf der Empfangsseite [dB]
$K_{Ff}$	das Stoßstellendämm – Maß für den Übertragungsweg Ff [dB]
$K_{Fd}$	das Stoßstellendämm – Maß für den Übertragungsweg Fd [dB]
$K_{Df}$	das Stoßstellendämm – Maß für den Übertragungsweg Df [dB]
$S_s$	die Fläche des trennenden Bauteils [m <sup>2</sup> ]
$l_f$	die gemeinsame Kopplungslänge der Verbindungsstelle zwischen dem trennenden Bauteil und den flankierenden Bauteilen F und f [m]
$l_0$	die Bezugskopplungslänge; $l_0 = 1 \text{ m}$

Das Bauschalldämm – Maß wird nach dem vereinfachten Model nach (3.17) ermittelt.

### 3.4.3 Berechnung nach DIN EN 12354 – 1 (Frequenzabhängig)

Die DIN EN 12354 – 1 : 2000 [7] legt das Berechnungsverfahren für die Berechnung des Schalldämm – Maßes in Frequenzbändern in den Anhängen B und C jeweils für Prüfstandbedingungen (ohne Einfluss flankierender Bauteile) und Baubedingungen fest. Die Ermittlung ist nur für monolithische Baukonstruktionen gültig. Die genaue Ermittlung der Schalldämm – Maße in Frequenzbändern ist in Anlage 2 ersichtlich.

Das Schalldämm – Maß in Frequenzbändern wird nach [7], Gleichung (3.2) ermittelt.

Die Berechnung des Transmissionsgrades wird abhängig von der Grenzfrequenz ermittelt.

$$f > f_c \quad \tau = \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi f_c \sigma^2}{2f \eta_{tot}} \quad (3.29)$$

$$f \approx f_c \quad \tau = \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi \sigma^2}{2\eta_{tot}} \quad (3.30)$$

$$f < f_c \quad \tau = \left( \frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left( 2\sigma_f + \frac{(l_1 + l_2)^2}{l_1^2 + l_2^2} \sqrt{\frac{f_c \sigma^2}{f \eta_{tot}}} \right) \quad (3.31)$$

Der Abstrahlgrad für erzwungene Übertragungen bestimmt sich wie folgt:

$$\sigma_f = 0,5 \left[ \ln(k_0 \sqrt{l_1 l_2}) - \Lambda \right] \quad (3.32)$$

$$\text{Wobei } k_0 = \frac{2\pi f}{c_0} \quad (3.33)$$

$$\Lambda = -0,964 - \left( 0,5 + \frac{l_2}{\pi l_1} \right) \ln \frac{l_2}{l_1} + \frac{5l_2}{2\pi l_1} - \frac{1}{4\pi l_1 l_2 k_0^2} \quad (3.34)$$

Der Abstrahlgrad für freie Wellen bestimmt sich in Abhängigkeit von  $f_c$  und  $f_{11}$  wie folgt:

$$f_c = \frac{c_0^2}{(1,8c_L t)} \quad (3.35)$$

$$f_{11} = \frac{c_0^2}{4f_c} \left( \frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} \right) \quad (3.36)$$

Im Bereich  $f_{11} \leq \frac{f_c}{2}$  wird der Abstrahlgrad für die nachfolgenden Bereiche wie angegeben bestimmt.

$$\begin{aligned} f \geq f_c & \quad \sigma = \sigma_1 \\ f < f_c & \quad \sigma = \frac{2(l_1 + l_2)}{l_1 l_2} \frac{c_0}{f_c} \delta_1 + \delta_2 \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\text{wobei} \quad \delta_1 = \left( \frac{(1 - \lambda^2) \ln \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} + 2\lambda}{4\pi^2 (1 - \lambda^2)^{1,5}} \right) \quad (3.38)$$

$$\text{Die Wellenlänge } \lambda \text{ ist dabei } \lambda = \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad (3.39)$$

Im Bereich  $f > f_c$  ist  $\delta_2 = 0$ .

$$\text{Ansonsten ist } \delta_2 = \frac{8c_0^2(1 - 2\lambda^2)}{f_c^2 \pi^4 l_1 l_2 \lambda \sqrt{1 - \lambda^2}} \quad (3.40)$$

Wenn  $f < f_{11} < \frac{f_c}{2}$  und  $\sigma > \sigma_2$  ist  $\sigma = \sigma_2$ .

Im Bereich  $f_{11} > \frac{f_c}{2}$  wird der Abstrahlgrad für die nachfolgenden Bereiche wie angegeben bestimmt.

Wenn  $f < f_c$  und  $\sigma_2 < \sigma_3$  ist  $\sigma = \sigma_2$

Wenn  $f > f_c$  und  $\sigma_1 < \sigma_3$  ist  $\sigma = \sigma_1$

Ansonsten ist  $\sigma = \sigma_3$

Wobei 
$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}} \quad (3.41)$$

$$\sigma_2 = 4l_1l_2 \left( \frac{f}{c_0} \right)^2 \quad (3.42)$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{2\pi f (l_1 + l_2)}{16c_0}} \quad (3.43)$$

Das Schalldämm – Maß in Frequenzbändern ist dabei von folgenden Größen abhängig:

$\tau$	Transmissionsgrad
$\eta_{tot}$	dem Gesamtverlustfaktor
$\eta_{tot,lab}$	dem Gesamtverlustfaktor unter Prüfstandbedingungen
$\sigma$	dem Abstrahlgrad für freie BiegeWellen
$\sigma_f$	dem Abstrahlgrad für erzwungene Übertragung
$l_1, l_2$	den Längen der Ränder des rechteckigen Bauteils
$k_0$	Wellenzahl
$c_L$	Longitudinalwellengeschwindigkeit im Material [m/s]
$f_c$	Koinzidenzfrequenz [Hz]
$f_{ref}$	Bezugsfrequenz [1000 Hz]
$S$	Fläche des Bauteils [m <sup>2</sup> ]
$a_k$	Körperschall – Absorptionsgrad am Rand k [m <sup>2</sup> ]
$K_{ij}$	Stoßstellendämm – Maß

### 3.4.3.1 Berechnung des einschaligen homogenen Wandaufbaus nach DIN EN 12354 – 1 [7]

#### **Prüfstandbedingungen:**

Die Prüfstandbedingungen berücksichtigen keine Schallübertragung über flankierende Bauteile. Die Prüfstandbedingungen wurden mittels des Gesamtverlustfaktors  $\eta_{tot,lab}$  ermittelt.

$$\eta_{tot,lab} \approx \eta_{int} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad (3.44)$$

Diese Gleichung (3.46) ist nur für Bauteile mit einer flächenbezogenen Masse  $m' < 800 \frac{kg}{m^2}$  gültig.

#### **Baubedingungen:**

Die Baubedingungen werden mittels des Gesamtverlustfaktors bestimmt, welcher sich wie folgt ermittelt:

$$\eta_{tot} = \eta_{int} + \frac{2\rho_0 c_0 \sigma}{2\pi f m'} + \frac{c_0}{\pi^2 S \sqrt{f f_c}} \sum_{k=1}^4 l_k a_k \quad (3.45)$$

Die Schallübertragung über flankierende Bauteile wird mittels des Körperschall – Absorptionsgrades berücksichtigt. Der Körperschall – Absorptionsgrad an einer Randfläche des betrachteten Bauteils bestimmt sich wie folgt:

$$a_k = \sum_{j=1}^3 \sqrt{\frac{f_{c,j}}{f_{ref}}} 10^{-K_j/10} \quad (3.46)$$

Dabei ist  $0,05 \leq a_k < 0,5$

### 3.4.3.2 Berechnung des mehrschaligen homogenen Wandaufbaus nach DIN EN 12354 – 1 [7]

Da nach [7] nicht auf die frequenzabhängige Mehrschaligkeit eingegangen wird, werden die Labor- bzw. Bauschalldämm - Maße der einzelnen Schalen nach [7] ermittelt. Das resultierende Schalldämm – Maß der zweischaligen Konstruktion wird nach dem Taschenbuch der Technischen Akustik [4] in Abhängigkeit der Resonanzfrequenz ermittelt.

$$\text{Bereich: } f > f_R \text{ und } f < \frac{c}{4d}$$

$$R = R_1 + R_2 + 20 \lg \frac{4\pi f \cdot d}{c} \text{ dB} \quad (3.47)$$

$$\text{Bereich } f > \frac{c}{4d} \text{ Hz}$$

$$R = R_1 + R_2 + 6 \text{ dB} \quad (3.48)$$

### 3.4.4 Berechnung der Schalldämm – Eigenschaften nach Heckl [4]

In nachfolgendem Kapitel werden die frequenzabhängigen Schalldämm – Maße der Bauteile nach Heckl [4] ermittelt. Der Einfluss der Körperschallbrücken / flankierenden Bauteile wurde dabei nicht berücksichtigt. Nach Heckl [4] können ein- und zweischalige Konstruktionen berechnet werden.

Das frequenzabhängige Schalldämm – Maß der Bauteile bzw. der massiven Bauteilschichten errechnet sich nach Heckl (Gleichung 8.9, [4]) für den betrachteten Frequenzbereich oberhalb der Koinzidenzfrequenz wie folgt:

$$R = \left( 20 \lg \frac{\pi f m''}{\rho c} + 10 \lg \frac{2\eta f}{\pi f_c} \right) \text{ dB} \quad (3.49)$$

Diese Gleichung (3.49) wurde über die Integration der Schalleinfallswinkel von Gleichung (3.6) nach Heckl [4] hergeleitet. Unterhalb der Koinzidenzfrequenz ist die Berechnung des Schalldämm – Maßes zum Großteil von der flächenbezogenen Masse  $m''$  abhängig und wird nach Heckl [4] wie folgt bestimmt.

$$R = \left( 20 \lg \frac{\pi f m''}{\rho c} - 3 \right) \text{dB} \quad (3.50)$$

Die Schalldämmung ist dabei von nachfolgenden Größen abhängig

$m''$	die flächenbezogene Masse [ $\text{kg} / \text{m}^2$ ]
$\rho$	Dichte des Materials [ $\text{kg} / \text{m}^3$ ]
$c$	Schallgeschwindigkeit in Luft [ $\text{m} / \text{s}$ ]
$\eta$	Gesamtverlustfaktor [-]
$f$	Frequenz [Hz]
$f_c$	Koinzidenzfrequenz [Hz]
$d_w$	Schichtdicke der Bauteile [m]
$d_L$	Schalenabstand [m]
$E$	Elastizitätsmodul [ $\text{N} / \text{m}^2$ ]
$\mu$	Querkontraktionszahl (Poisson Zahl) [-]

Die Ermittlung der Schalldämmung der zweischaligen Wandaufbauten erfolgte nach [4] und wurde in Abhängigkeit der Resonanzfrequenz nach den Gleichungen (3.47) und (3.48) ermittelt

Die Koinzidenzfrequenz ermittelt sich dabei nach [1] wie folgt:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi d_w \sin^2 \vartheta} \sqrt{\frac{12\rho_w(1-\mu^2)}{E}} \text{ Hz} \quad (3.51)$$



### Ermittlung der Resonanzfrequenz für einschalige Bauteile mit Vorsatzschale

Bei Bauteilen mit Luft als Zwischenschicht und einer schallabsorbierenden Füllung wird die Resonanzfrequenz nach [2], Gleichung (3.20) ermittelt:

Die dynamische Steifigkeit des Luftzwischenraumes mit der Näherung (3.56) bestimmt wird.

$$s' \approx \frac{10}{d_L} \text{ MN / m}^3 \quad (3.52)$$

Somit ergibt sich folgende Gleichung:

$$f_R \approx 500 \sqrt{\frac{1}{d_L} \cdot \left( \frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ Hz} \quad (3.53)$$

Nach dem Taschenbuch der Technischen Akustik [4] wird die Resonanzfrequenz wie folgt ermittelt.

$$f_R \approx 190 \sqrt{\left( \frac{0,11}{d_L \cdot m'} \right)} \text{ Hz} \quad (3.54)$$

$$f_R \approx \frac{65}{\sqrt{d_L \cdot m'}} \text{ Hz}$$

Dabei sind:

$$m' = \frac{m'_1 \cdot m'_2}{(m'_1 + m'_2)} \text{ kg/ m}^2 \quad (3.55)$$

### Ermittlung der Resonanzfrequenz für zweischalige Bauteile

Bei zweischaligen Wänden, bei denen die Wandschalen vollflächig mit der im Wandzwischenraum befindlichen Dämmschicht verbunden sind wird die Resonanzfrequenz wie folgt ermittelt nach [2], Gleichung (3.20) ermittelt.

Nach dem Taschenbuch der Akustik [4] kann bei vollflächig über eine Zwischenschicht verbundenen Wandschalen die Resonanzfrequenz über folgende Gleichung bestimmt werden.

$$f_R \approx 190 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \text{ Hz} \quad (3.56)$$

mit (3.55) ergibt sich somit:

$$f_R \approx 190 \sqrt{s' \left( \frac{m_1' + m_2'}{m_1' \cdot m_2'} \right)} \text{ Hz}$$

$$f_R \approx 190 \sqrt{s' \left( \frac{m_1'}{m_1' \cdot m_2'} + \frac{m_2'}{m_1' \cdot m_2'} \right)} \text{ Hz}$$

$$f_R \approx 190 \sqrt{s' \left( \frac{1}{m_2'} + \frac{1}{m_1'} \right)} \text{ Hz}$$

Somit unterscheiden sich (3.20) und (3.56) nur durch den Faktor 190 bzw. 160.

Die Resonanzfrequenz ist dabei von folgenden Größen abhängig:

$m_1'$  flächenbezogene Masse der Wandschale 1 [kg / m<sup>2</sup>]

$m_2'$  flächenbezogene Masse der Wandschale 2 [kg / m<sup>2</sup>]

$s'$  dynamische Steifigkeit der Dämmschicht [MN / m<sup>3</sup>]

$d_L$  Dicke des Luftzwischenraumes [cm]

### 3.4.5 Berechnung der Schalldämm – Eigenschaften dreischaliger Bauteile nach Sharp [22]

Die analytische Ermittlung der Schalldämm – Eigenschaften von dreischaligen Bauteilen werden wie die Schalldämm – Eigenschaften zweischaliger Bauteile ohne mechanische Verbindungen berechnet. Als physikalisches Analogon dient ein Masse – Feder – Masse – Feder – Masse System (Abbildung 1.3) mit zwei Freiheitsgraden. Aufgrund der drei Massen der Wandschalen hat das System dementsprechend nach Sharp [22] zwei Resonanzfrequenzen  $f_{\alpha,\beta}$ .

$$f_{\alpha,\beta} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{3,6\rho_0 c_0^2} \sqrt{a \pm \sqrt{a^2 - b}} \text{ Hz} \quad (f_\beta > f_\alpha) \quad (3.57)$$

Dabei sind:

$$a = \frac{1}{2m_2} \left( \frac{m_1 + m_2}{m_1 d_1} + \frac{m_2 + m_3}{m_3 d_2} \right) \quad (3.58)$$

$$b = \frac{M}{m_1 m_2 m_3 d_1 d_2} \quad (3.59)$$

Die Resonanzfrequenzen sind dabei von folgenden Größen abhängig:

$m_i$  flächenbezogene Masse der Wandschale [kg / m<sup>2</sup>]

$d_i$  Dicke des Luftzwischenraumes [cm]

$M$  Summe der flächenbezogenen Massen  $m_i$

Die Schalldämm – Eigenschaften der dreischaligen Konstruktion kann näherungsweise nach Sharp [22] in drei Frequenzbereichen bestimmt werden.

$$R \cong 20 \log(Mf) - K_{TL} \text{ dB} \quad f < f_\alpha \quad (3.60)$$

$$R \cong R_1 + R_2 + R_3 + 20 \log(2kd_1) + 20 \log(2kd_2) \text{ dB} \quad f_\beta < f < f_l \quad (3.61)$$

$$R \cong R_1 + R_2 + R_3 + 12 \text{ dB} \quad f_l > f \quad (3.62)$$

Die Schalldämm – Eigenschaften der dreischaligen Konstruktion sind dabei von folgenden Größen abhängig:

$K_{TL}$	47,3 dB (Konstante)	
$k$	Wellenzahl	
$R_i$	Schalldämm – Maß der einzelnen Wandschalen	
$f_i$	Durchgangsfrequenz mit $f_i = \frac{c_0}{2\pi d}$	(3.63)

### **3.5 Numerische Bestimmung der Schalldämm - Eigenschaften**

Bei der numerischen Ermittlung der Schalldämmeigenschaften von Wänden müssen die Transmissionsvorgänge zwischen den verschiedenen Medien betrachtet werden. Für die numerische Simulation der verschiedenen Gebiete und deren Kopplung werden 2 geeignete Simulationsverfahren ausgewählt und behandelt. Zum einen wird die Simulation mit dem Programm Raynoise 3.1 durchgeführt. Das Programm basiert auf der Ray Tracing (Strahl Verfolgung) Methode. Dabei werden eine definierte Anzahl von Schallstrahlen von einer Schallquelle in verschiedene Richtungen ausgestrahlt. Die Anzahl der Reflexionen ist dabei regulierbar. Die Genauigkeit steigt dabei mit der Anzahl an Reflexionen, erhöht aber auch den Rechenaufwand. Die Absorption der Umfassungsflächen sowie die Transmission aller trennenden Bauteile wird dabei in der Simulation, welche auf der Grundlage der Geometrischen Akustik beruht, berücksichtigt. Die Simulation mittels Ray Tracing eignet sich besonders bei hohen Frequenzen und der damit verbundenen geringen Wellenlänge. Bei Verfahren basierend auf der Finiten Elemente Methode (FEM) steigt der Diskretisierungsaufwand bei hochfrequenten Schallausbreitungsvorgängen aufgrund der notwendigen Anzahl von Elementen je Wellenlänge. Die Simulation nach der FEM wird mit dem Programm Comsol Multiphysics durchgeführt.

### 3.5.1 Numerische Simulation mit dem Programm Raynoise 3.1

---

Die Transmission von Schall zwischen Materialien wird in Raynoise mittels Transmissionsquellen realisiert. Diese Quellen werden im Mittelpunkt einer Polygonalen Oberfläche positioniert und strahlen halbkugelförmig auf die Oberfläche ab. Die Leistung einer Transmissionsquelle ist abhängig vom Anregungsniveau und dem Transmissionsverlust der Materialien. Das Anregungsniveau ist abgeleitet vom berechneten Schalldruckpegel (dB) und der direkten Energie (dB) eines nahe des Bauteils befindlichen Punktes. Dabei wird der Transmissionsquelle nach [14] wie folgt definiert.

$$P = I \cdot S \cdot \tau \text{ dB} \quad (3.64)$$

Die Intensität  $I$  auf der Anregungsseite (Senderaum) ermittelt sich für nicht Freifeldbedingungen wie folgt:

$$I = \tilde{p} \cdot \tilde{v} \quad (3.65)$$

Wobei die Schnelle  $v$  über die Impedanz ermittelt wird.

$$z_0 = \frac{\tilde{p}}{\tilde{v}} \quad (3.66)$$

$$\text{mit } z_0 = \rho_0 c_0 \quad (3.67)$$

$$I = \frac{\tilde{p}^2}{\rho_0 c_0} \quad (3.68)$$

Dabei ist:

- $P$  die Schalleistung [W]
- $S$  die Fläche des transmittierenden Elements [m<sup>2</sup>]
- $\tau$  der Transmissionskoeffizient
- $I$  die Intensität [W / m<sup>2</sup>]
- $v$  die Schnelle [m / s]
- $z$  die Schallkennimpedanz [Ns / m<sup>3</sup>]

Dabei wird der Schalldruck eines Punktes berechnet und der Grad an Diffusion bemessen. Bei der Simulation der Transmission in geschlossenen Räumen mit Reflexionen wird nach dem Grad der Diffusion gerechnet, bei Freifeldbedingungen wird mit ebenen Wellen ohne Diffusion gerechnet.

Die Resonanz, welche aufgrund der Mehrschaligkeit entsteht, kann bei diesem Simulationsverfahren nicht betrachtet werden. Daher kann nur der Bereich zwischen der untersten Resonanzfrequenz und der untersten Einbruchsfrequenz erfolgen (siehe Abschnitt 3.2.2; Schalldämmung mehrschaliger Bauteile).

### **3.5.2 Bestimmung der Schalldämm - Eigenschaften mittels Finite - Elemente - Methode**

---

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der numerischen Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften mittels Finiter Elemente Methode. Dabei wird die Schallausbreitung in einem Gebiet ohne Einschränkungen der Größe durch Differentialgleichungen und Randbedingungen beschrieben. Es wird eine näherungsweise Lösung durch Funktionswerte gegeben, welche an den Knoten berechnet werden. Die Knoten bilden das Netz, mit dem das betrachtete Gebiet versehen wird und somit in Teilgebiete, die Finiten Elemente, aufgeteilt wird. Die Anzahl der Knoten kann dabei je nach Anzahl der gewünschten Funktionswerte variiert werden. Die gesuchte Funktion wird durch Interpolation angenähert. Nach [16] werden bei der FEM durch numerische Integration

- Differentialgleichungen und Randbedingungen in Gleichungen umgewandelt, die bestimmte Integralgleichungen aufweisen
- Integrale durch Summen über Funktionswerte in den Netzpunkten angenähert
- Die Funktionswerte an den Knoten als Lösung eines Gleichungssystems erhalten

Um eine verwendbare Näherungslösung zu erhalten dürfen die simulierten Elemente nicht zu groß gegenüber der Wellenlänge sein.

### 3.5.2.1 Simulationsmodelle

Es werden Simulationen mit 2 verschiedenen Modellen durchgeführt. Modell 1 ist eine zweidimensionale Simulation des zu untersuchenden Bauteils (ein- und mehrschaliges Bauteil aus Beton bzw. Kalksandsteinmauerwerk) ohne Einbezug der Flankenübertragung sowie ohne Reflexionen im Raum. Das 2. Modell ist eine dreidimensionale Simulation der untersuchten Bauteile mit Einbezug der Reflexionen der Raumbegrenzungsflächen. Es wurden 2 verschiedene Simulationsmodelle gewählt, da der Rechenaufwand und damit verbunden auch der Zeitaufwand bei der 3D Simulation sehr hoch ist. Es wurde daher ein vereinfachtes Modell in 2D erstellt um den Rechenaufwand zu verringern.

Die 2D Simulation wurde nur bei einzelnen Beispielen durchgeführt und wird mit der 3D Lösung sowie den analytisch und messtechnisch ermittelten Werten in Abschnitt 4 verglichen.

Im nachfolgenden sind die Modelle grafisch dargestellt:

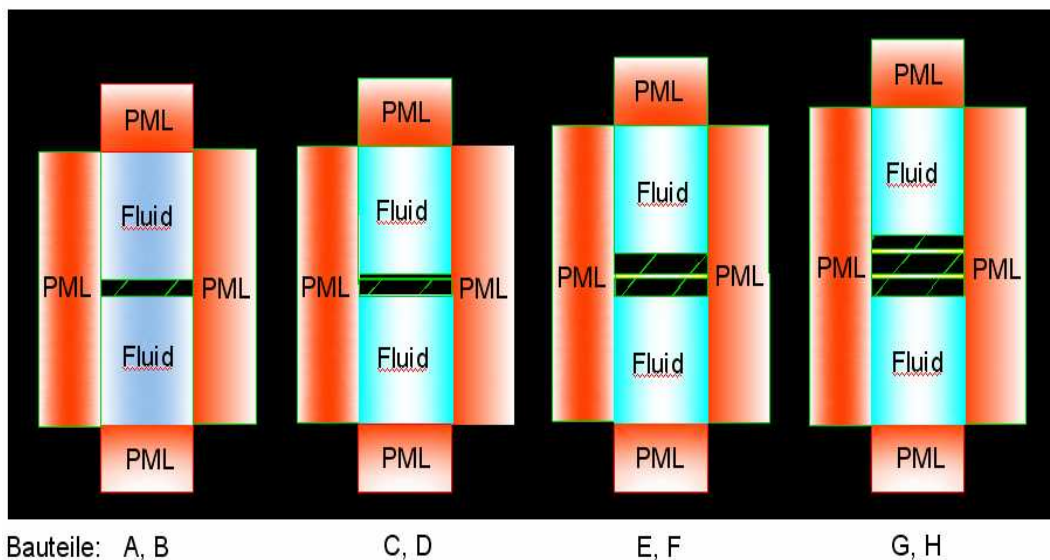


Abbildung 3.5.1 Darstellung des zweidimensionalen Simulationsmodells

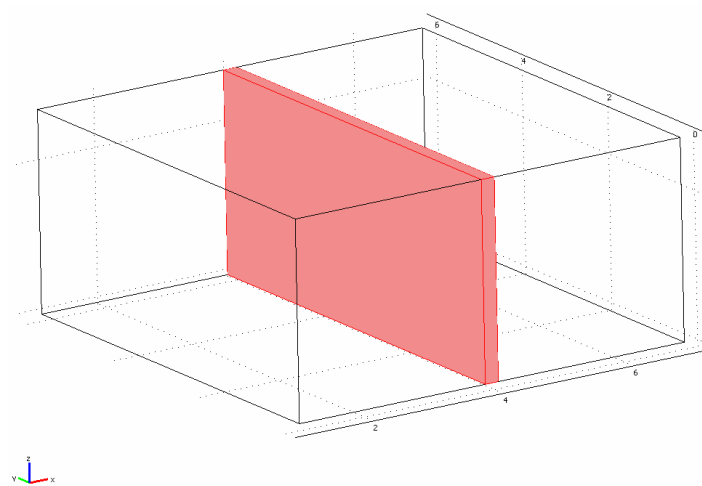


Abbildung 3.5.2 Darstellung des dreidimensionalen Simulationsmodells

Für die Simulationsbedingungen werden allgemein folgende Annahmen getroffen:

- Die Schichten der simulierten Bauteile werden als homogen betrachtet.
- Die Schichtdicken der betrachteten Aufbauten klein im Vergleich zu den Abmessungen des Gesamtsystems.
- Es erfolgen keine thermischen Zustandsänderungen
- Die schallführenden Medien befinden sich im Ruhezustand
- Eine Schallübertragung über flankierende Bauteile wurde nicht betrachtet



### 3.5.2.2 Schallausbreitung in Flüssigkeiten und Gasen

---

Im Fluid breitet sich der Schall nach der Wellengleichung aus.

$$Q = \frac{1}{\rho_0 c_s^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - q) \right) \quad (3.69)$$

Die Schallausbreitung erfolgt zeitharmonisch.  $p(x, t) = p(x)e^{i\omega t}$  (3.70)

Damit ist  $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$

Daher vereinfacht sich nach [13] Gleichung (3.69) zu:

$$Q = \nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - q) \right) - \frac{p\omega^2}{\rho_0 c_s^2} \quad (3.71)$$

### 3.5.2.3 Schallreflexionen und Randbedingungen

---

Die allgemeinen Bedingungen der FEM Simulationen wurden bereits unter dem Abschnitt 3.5.2.1 erläutert. Weitere Randbedingungen sind wie folgt:

Modell 1 (2D)

- Die seitlichen Grenzflächen sind Perfectly Matched Layer (PML) ohne Reflexionen. PML werden zur Simulation von offenen Randbedingungen genutzt. PML reflektieren keine Schallwellen zu Nicht – PML. Sie absorbieren einfallende Schallwellen ohne Anteile zu reflektieren.
- Nur an der trennenden Struktur treten Reflexionen auf.
- Nach [1] ergibt sich als Vereinfachung für den diffusen Schalleinfall der Schalleinfallswinkel  $\delta = 45^\circ$ .

## Modell 2 (3D)

- Die Grenzflächen des Modells 2 sind die massiven Begrenzungen der betrachteten Sende und Empfangsräume
- Es treten an allen massiven Strukturen Reflexionen auf.
- Nach [1] ergibt sich als Vereinfachung für den diffusen Schalleinfall der Schalleinfallswinkel  $\delta = 45^\circ$ .

### 3.5.2.4 Kopplung der Bauteilstruktur mit dem Fluid

---

Für die Grenzflächen zwischen dem Fluid und der massiven Struktur wird nach [13] die anliegende Last wie folgt definiert.

$$F = n_s p \quad (3.72)$$

Wobei  $n_s$  den normalen Einheitsvektor in das massive Gebiet darstellt.

Für den Übergang zum Fluid wird die normale Beschleunigung  $a_n$  genutzt, wobei  $n_A$  den Einheitsvektor in das fluide Gebiet darstellt.

$$a_n = -n_a \cdot \left( -\frac{1}{\rho_0} \right) \nabla p \quad (3.73)$$

In Abhängigkeit des Aufbaus des simulierten Bauteils werden für die Simulationen unterschiedlich viele Gebiete und Anwendungsmodi verwendet. Bauteil B (Trennwand aus Stahlbeton) besteht z. B. aus den Gebieten Fluid, Struktur und Fluid. Bauteil G (3 Schalige Trennwand) besteht aus 7 Gebieten. Die Schichten aus Dämmung (z. B. Mineralwolle) sind Gebiete des Fluids mit einem Strömungswiderstand  $R_f$ .

### 3.5.2.5 Bestimmung der Schalldämmeigenschaften

Die Schalldämmeigenschaften können numerisch für ein- und mehrschalige Bauteile differenziert ermittelt werden.

#### Einschaliger Bauteilaufbau

Die Schalldämmung kann über die Trennimpedanz  $Z_T$  der Wände wie folgt nach [1] ermittelt werden:

$$\underline{Z}_T = \frac{p_1 - p_2}{v} \quad (3.74)$$

Die Schallschnelle  $v$  der trennenden Bauteile wird wie folgt bestimmt:

$$v = \frac{a}{w} \quad (3.75)$$

Ausgehend von (3.6) ergibt sich das Schalldämm – Maß  $R$  zu:

$$R = 20 \lg \left| 1 + \frac{Z_T}{2 \varphi c} \cos \delta \right| \quad (3.76)$$

Dabei sind:

$\varphi c$ : Kennimpedanz der Luft [408 N · s/m<sup>3</sup>]

$\delta$ : Schalleinfallswinkel 45°

Der Schalleinfallswinkel von 45° ergibt sich nach [1] als Vereinfachung für den diffusen Schalleinfall.

Folgende Größen werden durch Integrations- Variablen in Gebieten bestimmt:

$a$  Schallbeschleunigung

Folgende Größen werden durch Integrations- Variablen auf Rändern bestimmt:

$p_1$  Schalldruck Anregungsseite

$p_2$  Schalldruck abgewandte Wandseite

**Ein- und mehrschaliger Bauteilaufbau**

Nach (3.72) kann die Schallleistung auf der Empfangs- bzw. Sendeseite des Bauteils über die reaktiven Intensitäten ermittelt werden. Daher entsteht für das Einsetzen von (3.71) in (3.2) folgender Ausdruck:

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 S \tau}{I_1 S \tau} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.77)$$

In (3.2) eingesetzt kann das Schalldämm – Maß ermittelt werden.

$$R = 10 \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = 10 \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \text{ dB} \quad (3.78)$$

Folgende Größen werden durch Integrations- Variablen auf Rändern bestimmt:

$I_1$       Intensität Anregungsseite

$I_2$       Intensität abgewandte Wandseite

Dabei wurden nur die reaktiven Intensitäten ermittelt. Die Intensitäten in y und z Richtung fließen daher nicht in die bestimmten Intensitäten ein.

Mittels des Ausdrucks (3.78) bzw. für einschalige Bauteile (3.76) kann das frequenzabhängige Schalldämm – Maß ermittelt werden.

#### **4      Ermittelte Schalldämm - Eigenschaften**

---

In nachfolgendem Kapitel werden die analytisch, messtechnisch und numerisch ermittelten Schalldämm – Maße verglichen. Der Einfluss der Körperschallbrücken / flankierenden Bauteile wird dabei entsprechend der Berechnungsverfahren einbezogen. Abschließend werden Gründe für Abweichungen erläutert.

Die betrachteten Bauteile sind wie folgt aufgebaut::

Bauteil A: 24 cm Kalksandsteinmauerwerk der Rohdichte  $1800 \text{ kg / m}^3$

Bauteil B: 20 cm Stahlbeton der Rohdichte  $2400 \text{ kg / m}^3$

Bauteil C: 24 cm Kalksandsteinmauerwerk der Rohdichte  $1800 \text{ kg / m}^3$  zuzüglich einer biegeweichen Vorsatzschale (VS) bestehend aus 2 cm Luftschicht, 6 cm Mineralwolle und einer abschließenden Gipskartonplatte

Bauteil D: 24 cm Stahlbeton der Rohdichte  $2400 \text{ kg / m}^3$  zuzüglich einer (VS) bestehend aus 2 cm Luftschicht, 6 cm Mineralwolle und einer abschließenden Gipskartonplatte

Bauteil E: 20 cm Kalksandsteinmauerwerk der Rohdichte  $1800 \text{ kg / m}^3$ , 5 cm Dämmung, 25 cm Kalksandsteinmauerwerk der Rohdichte  $1800 \text{ kg / m}^3$

Bauteil F: 20 cm Stahlbeton der Rohdichte  $2400 \text{ kg / m}^3$ , 5 cm Trittschalldämmung, 20 cm Stahlbeton der Rohdichte  $2400 \text{ kg / m}^3$

Bauteil G: 30 cm Stahlbeton ( $\rho = 2400 \text{ kg / m}^3$ ), 2 cm + 3 cm Trittschalldämmung, 25 cm Stahlbeton ( $\rho = 2400 \text{ kg / m}^3$ ), 2 cm + 3 cm Trittschalldämmung, 20 cm Stahlbeton ( $\rho = 2400 \text{ kg / m}^3$ )

Bauteil G 1: 37,5 cm Stahlbeton ( $\rho = 2400 \text{ kg / m}^3$ ), 2 cm + 3 cm Trittschalldämmung, 37,5 cm Stahlbeton ( $\rho = 2400 \text{ kg / m}^3$ )

#### 4.1 Vergleich der messtechnisch ermittelten Schalldämm – Maße

In nachfolgenden Grafiken sind die messtechnisch ermittelten Schalldämm – Maße als Einzahlangaben sowie in Frequenzbändern dargestellt.

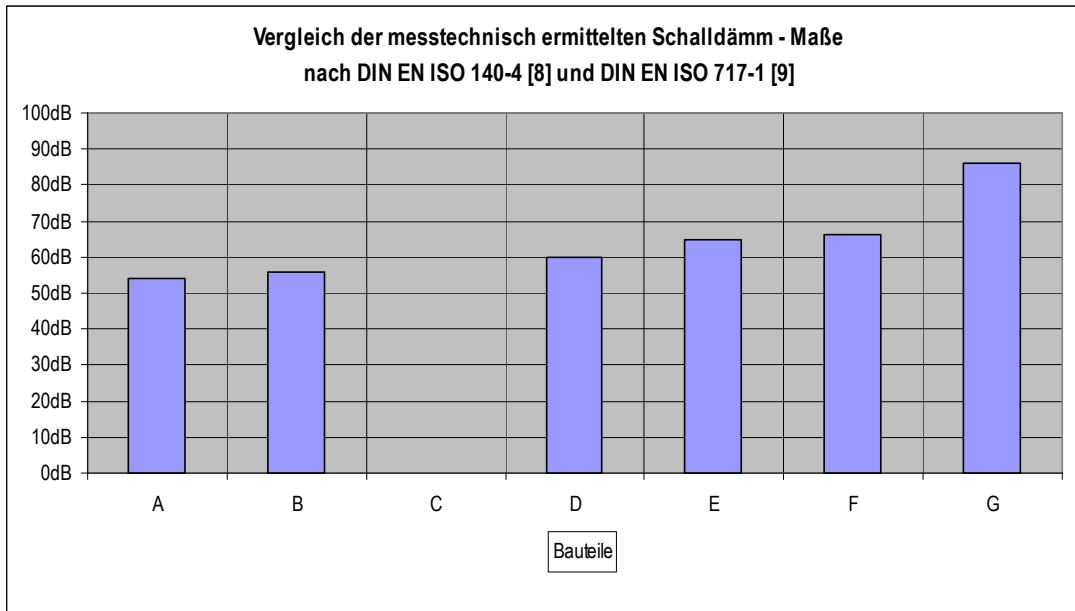


Abbildung 4.1.1: Messtechnisch ermittelte Schalldämm – Maße als Einzahlangaben

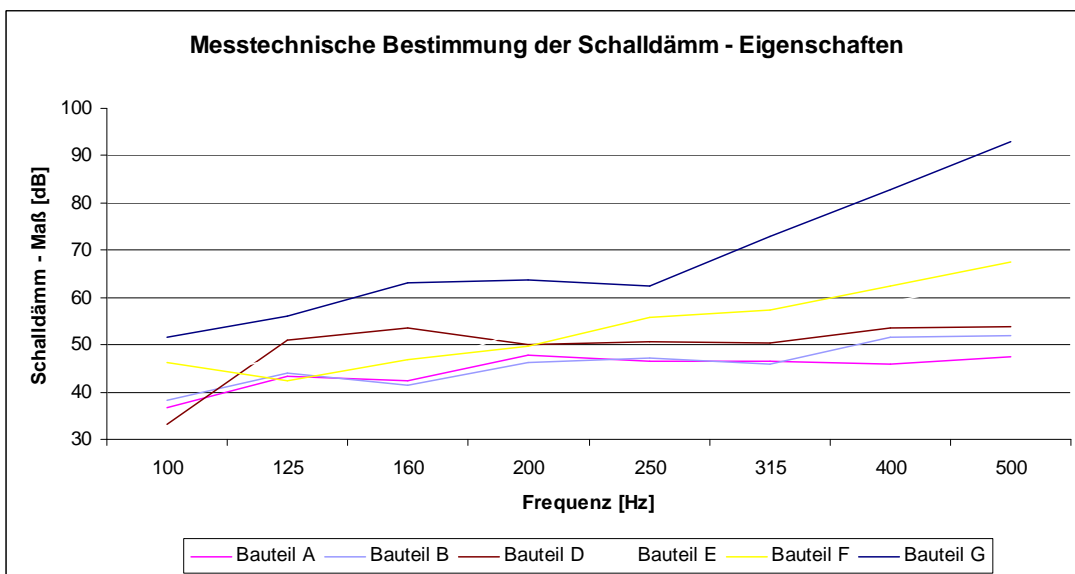


Abbildung 4.1.2 Messtechnisch ermittelte Schalldämm – Maße in Frequenzbändern (100 – 500 Hz)

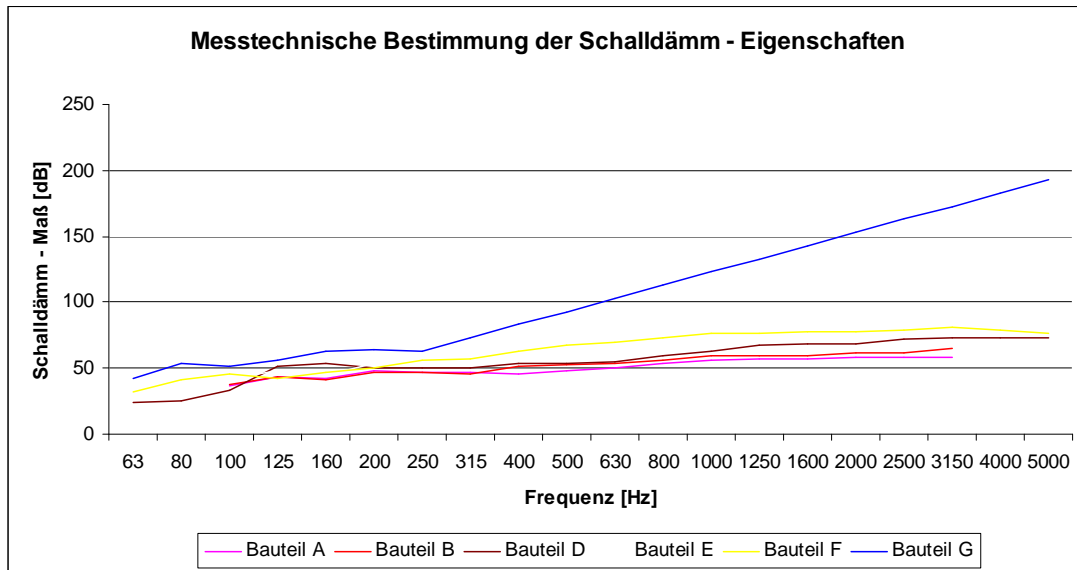


Abbildung 4.1.3 Messtechnisch ermittelte Schalldämm – Maße in Frequenzbändern (63 – 5000 Hz)

Für das Bauteil C wurden aufgrund keines geeigneten Messobjektes keine Messungen durchgeführt.

Die gemessenen Anstiege der Schalldämm – Eigenschaften wurden in Anlage 7 grafisch ausgewertet und entsprechen den theoretischen Vorgaben. Die Kalksandsteinbauteile weisen im Vergleich zu den Betonbauteilen geringere Schalldämm – Eigenschaften auf. Dies ist auf die Materialeigenschaften, wie unter anderem die geringere Rohdichte von Kalksandstein, zurückzuführen.

## **4.2 Vergleich der analytisch und numerisch ermittelten Schalldämm – Maße mit den Messergebnissen**

Die analytisch, numerisch und messtechnisch ermittelten Werte werden in diesem Kapitel verglichen und ausgewertet. Die genaue Ermittlung ist der Anlage 2 zu entnehmen.

### **4.2.1 Vergleich der Einzulangaben nach Beiblatt 1 der DIN 4109 [6] und DIN EN 12354 - 1 [7]**

In nachfolgender Abbildung sind die ermittelten Einzulangaben jeweils mit und ohne Einbezug der Flankenübertragung dargestellt.

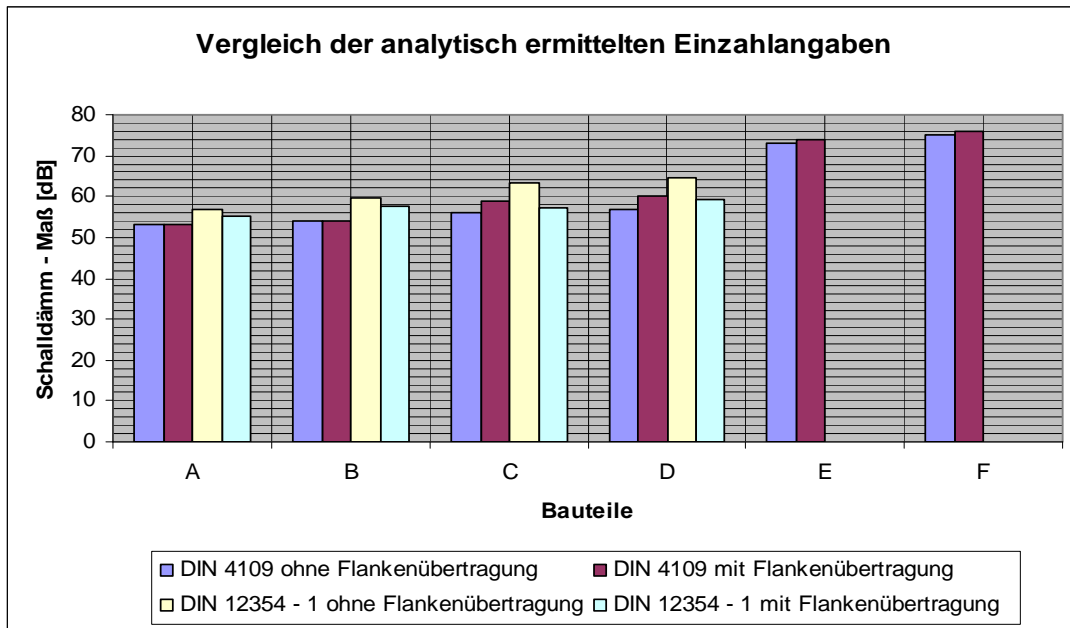


Abbildung 4.2.1.1 Vergleich der analytisch ermittelten Einzahlangaben

Da nach DIN EN 12354- 1 [7] nur einschalige Wandaufbauten sowie Wandaufbauten mit biegeweicher VS ermittelt werden können sind nur die Werte der Bauteile A bis D vergleichbar. Die ermittelten Werte ohne Einfluss von Flankenübertragung weichen stark voneinander ab (Differenz bis zu 7,5 dB). Dies ist mit der differenzierten Ermittlung der flächenbezogenen Masse zu begründen. Nach Beiblatt 1 der DIN 4109 [6] Tabelle 3 werden die Wandrohdichten abgemindert, was eine geringere flächenbezogene Masse und damit geringere Schalldämmeigenschaften zur Folge hat. Nach DIN 12354 - 1: 2000 [7] wird die Ermittlung der bewerteten Schalldämmwerte wie folgt beschrieben: „Diese Angaben können als angemessen sichere Abschätzung verwendet werden, wenn keine gemessenen Werte verfügbar sind.“ Vergleicht man die Schalldämm – Maße mit flankierenden Bauteilen ist die Abweichung deutlich geringer. Auch dies ist mit der unterschiedlichen Rechenmethodik zu begründen. Nach [6] Tabelle 13, 14 und 15 erfolgen positive Korrekturwerte bei mehrschaligen Bauteilen mit flankierenden Bauteilen mit  $m' > 350 \text{ kg / m}^2$  bzw. Wänden mit biegeweichen Vorsatzschalen und  $m' > 350 \text{ kg / m}^2$ . Des Weiteren werden bei den genannten Aufbauten positive Korrekturwerte für biegeweiche flankierende Bauteile vergeben. Bei einschaligen Wänden erfolgt keine Korrektur bei  $m' > 250 \text{ kg / m}^2$  oder bei biegeweichen flankierenden Bauteilen. Somit ergeben sich bei der Betrachtung nach [6] mit Flankenübertragung bei den betrachteten Beispielen z. T. höhere Schalldämm – Maße als ohne Flankenübertragung. Bei der Betrachtung nach [7] gehen die flankierenden Bauteile in Abhängigkeit von den Stoßstellen negativ in die Ermittlung der Schalldämmung ein. Somit verringert sich die Abweichung.



In nachfolgender Grafik sind alle analytisch, messtechnisch sowie numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften als Einzahlangaben dargestellt. Die ermittelten Schalldämm – Eigenschaften in Frequenzbändern (siehe Abschnitt 4.2.2) wurden nach DIN EN ISO 717-1 [9] bewertet.

### Vergleich aller ermittelten Schalldämm – Maße in Einzahlangaben

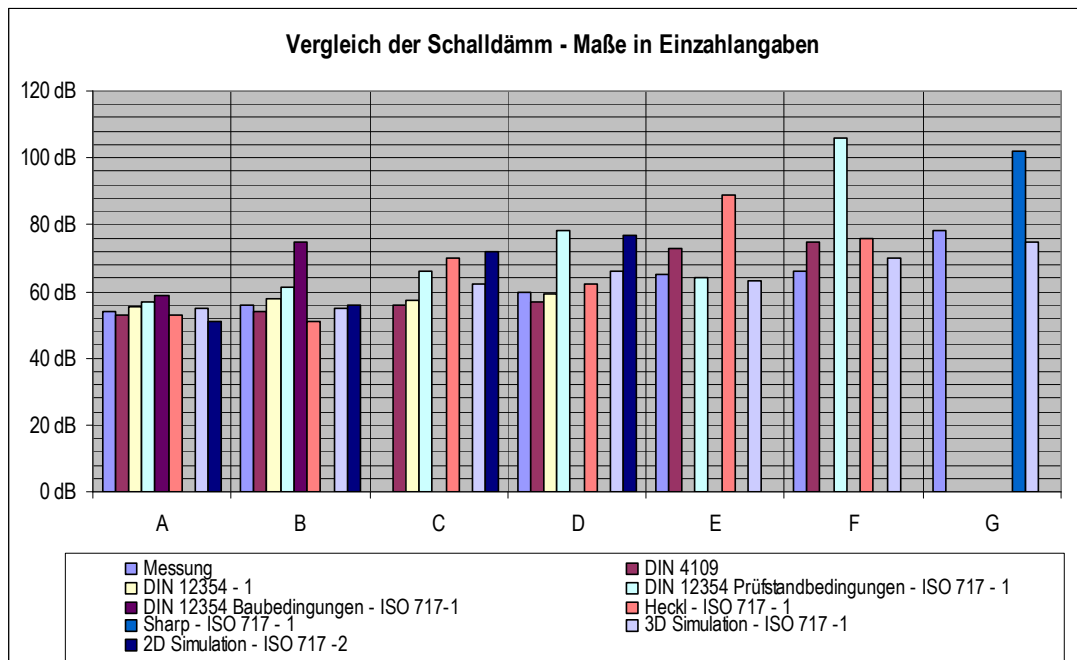


Abbildung 4.2.1.2 Vergleich der ermittelten Einzahlangaben

Bei einem Vergleich der ermittelten Einzahlangaben ergeben sich bezogen auf die Ergebnisse der durchgeführten Messungen folgende Abweichungen zu den analytischen bzw. numerisch ermittelten Werten:

**Tabelle 4.2.1 Abweichung der numerisch und analytisch ermittelten Schalldämm – Maße zu den messtechnisch ermittelten Werten**

Bauteile	Abweichung zu den messtechnisch ermittelten Schalldämm – Maß R [dB]							
	DIN 4109 [6]	DIN 12354 [7]	DIN 12354 (Prüfstand) [7]	DIN 12354 (Baubed.) [7]	Heckl [4]	Sharp [22]	numerische Simulation (3D)	numerische Simulation (2D)
A	1	1,2	3	5	1	-	1	3
B	2	1,6	5	19	5	-	1	0
D	3	0,9	18	-	2	-	6 <sup>1</sup>	17
E	8	-	1	-	24	-	2	-
F	9	-	40	-	10	-	4	-
G	-	-	-	-	-	24	3	-

Die geringsten Abweichungen zu den gemessenen Werten liefert die numerische Simulation wobei bei der Simulation des Bauteils D (und C) die Ständerkonstruktion der Vorsatzschale nicht berücksichtigt wurde und daher geringere Schalldämm – Eigenschaften zu erwarten sind. Daher ist für die Bauteile C und D das FEM Modell zu ungenau und weicht von den Messergebnissen ab. Die DIN EN 12354 – 1 [7] liefert für die Vorsatzschalenkonstruktionen der gewählten Beispiele die exaktesten Näherungslösungen.

Eine genaue Auswertung der Abweichungen zu den Messergebnissen ist dem Kapitel 4.2.2 „Vergleich der Schalldämm – Maße in Frequenzbändern“ sowie dem Abschnitt 5 „Zusammenfassung, Ausblick“ zu entnehmen.

<sup>1</sup> Es wurden keine Ständerkonstruktionen der Vorsatzschale berücksichtigt.

### 4.2.2 Vergleich der Schalldämm – Maße in Frequenzbändern

In nachfolgenden Grafiken sind die analytisch, messtechnisch sowie numerisch ermittelten Schalldämm – Maße in Frequenzbändern der Bauteile dargestellt.

#### Bauteil A

In der nachfolgenden Abbildung 4.2.2.1 und Abbildung 4.2.2.2 sind die messtechnisch, numerisch nach FEM sowie analytisch nach Heckl [4] und DIN EN 12354 - 1 [7] ermittelten Schalldämmeigenschaften für das Bauteil A dargestellt.

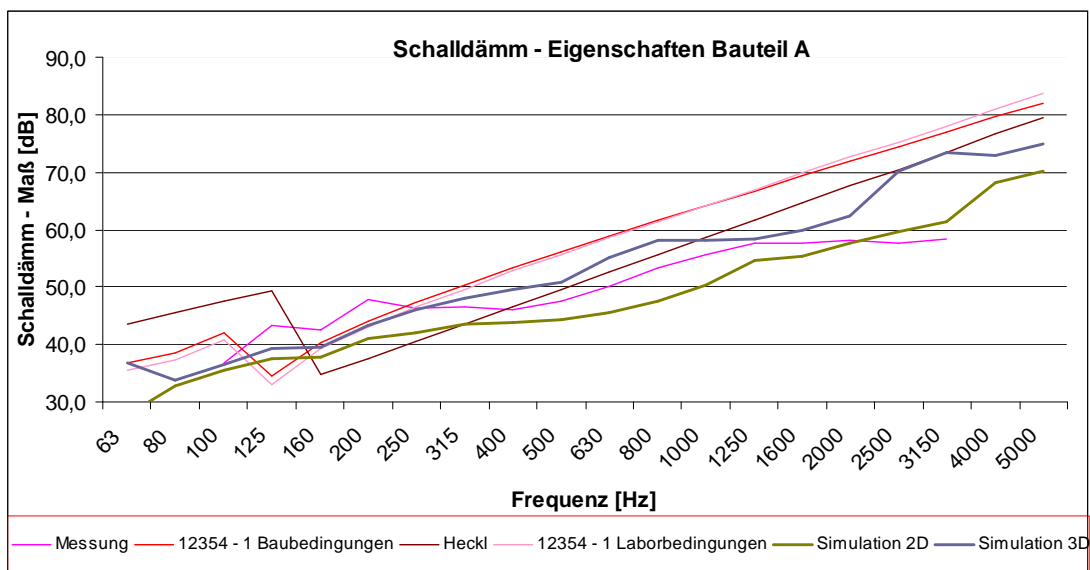


Abbildung 4.2.2.1 Schalldämm – Eigenschaften Bauteil A

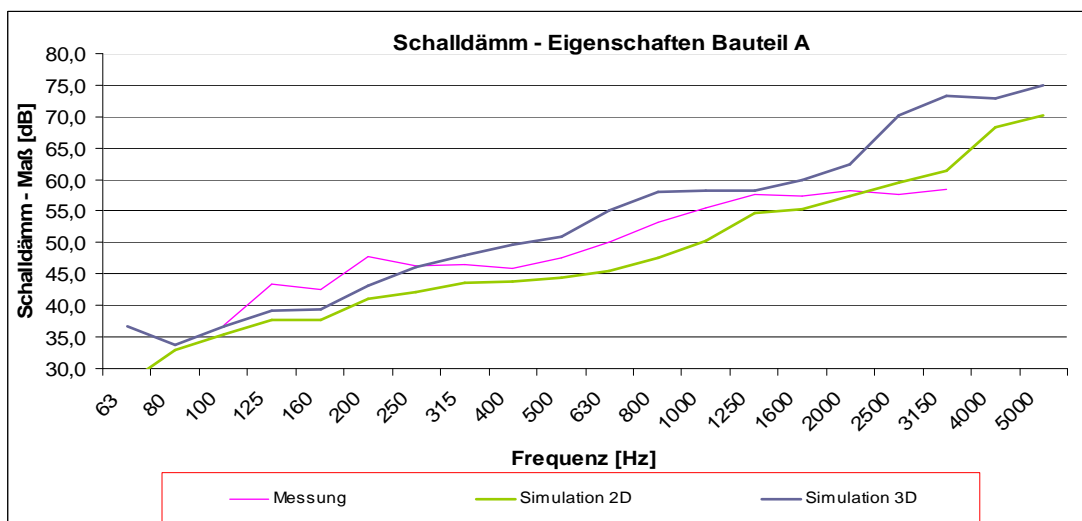


Abbildung 4.2.2.2: Vergleich der numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften mit den Messergebnissen

### Auswertung der Ergebnisse des Bauteils A:

Die analytisch ermittelten Werte für die einschalige Wand aus 24 cm KS MW ( $\rho = 1800 \text{ kg / m}^3$ ) weichen von den gemessenen Werten ab. Im Bereich von  $500 \text{ Hz} < f < 1250 \text{ Hz}$  unterscheiden sich die ermittelten Schalldämm – Maße nach DIN 12354 (Baubedingungen) um ca. 9 dB und die nach Heckl ermittelten Werte um ca. 3 dB von der Messung. In höheren Frequenzbändern steigt die Abweichung.

Die geringsten Abweichungen der analytischen Betrachtung im Bezug auf die Messung wurden nach Heckl erzielt.

Die numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften stimmen mit den Messergebnissen annähernd überein. Wie in Abbildung 4.2.2.2 dargestellt liefert die numerische Simulation die genauesten Ergebnisse. Der Anstieg der Schalldämm – Eigenschaften entspricht nach dem Massengesetz ca. 6 dB für die numerische und messtechnische Ermittlung.

### Bauteil B

In der nachfolgenden Abbildung 4.2.2.3 sowie Abbildung 4.2.2.4 sind die messtechnisch, numerisch nach FEM sowie analytisch nach Heckl [4] und DIN EN 12354 - 1 [7] ermittelten Schalldämmeigenschaften für das Bauteil B dargestellt.

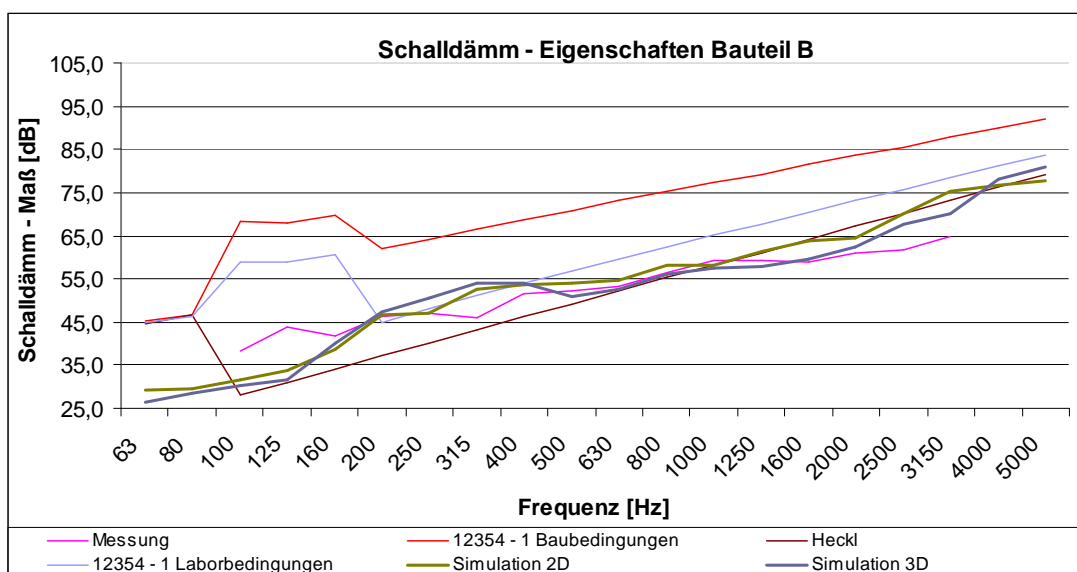


Abbildung 4.2.2.3: Schalldämm – Eigenschaften Bauteil B

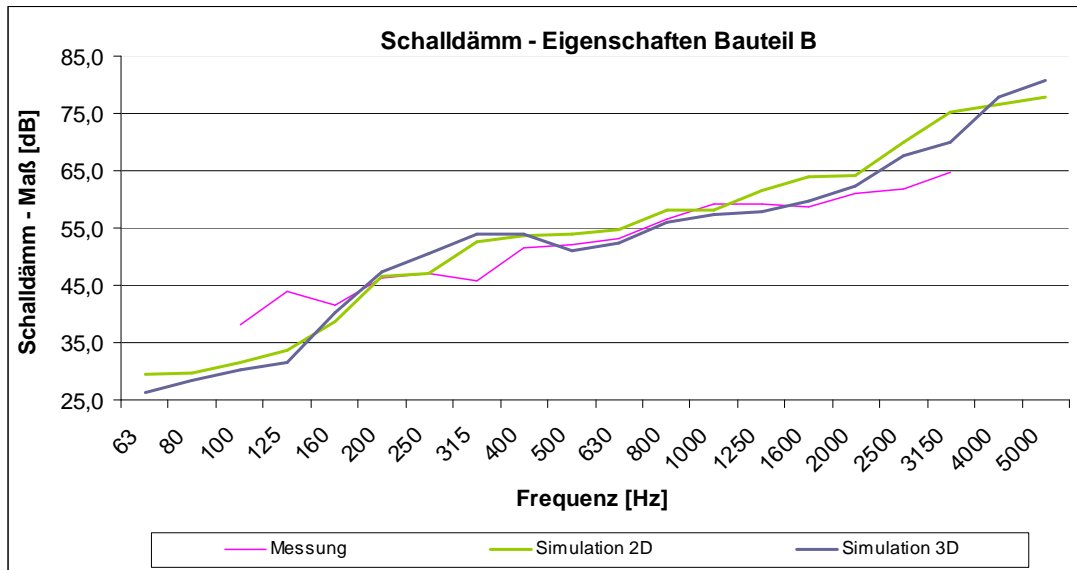


Abbildung 4.2.2.4: Vergleich der numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften mit den Messergebnissen

#### Auswertung der Ergebnisse des Bauteils B:

Die analytisch ermittelten Werte für die einschalige Wand aus 20 cm Beton ( $\rho = 2400 \text{ kg / m}^3$ ) weichen von den gemessenen Werten ab. Die geringsten Abweichungen der analytischen Betrachtung wurden nach Heckl erzielt.

Die numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften mittels 3D und 2D Simulationsmodell stimmen mit den Messergebnissen annähernd überein. Wie in Abbildung 4.2.2.3 dargestellt liefert die 3D numerische Simulation die genauesten Ergebnisse. Die Anstiege der numerischen und messtechnisch ermittelten Werte entsprechen den Literaturvorgaben nach [1] von ca. 6 dB je Oktave (Massengesetz, (3.7)).

**Bauteil C:**

In der nachfolgenden Abbildung 4.2.2.5 sind die numerisch nach FEM sowie analytisch nach Heckl [4] und DIN EN 12354 - 1 [7] ermittelten Schalldämmeigenschaften für das Bauteil C dargestellt.

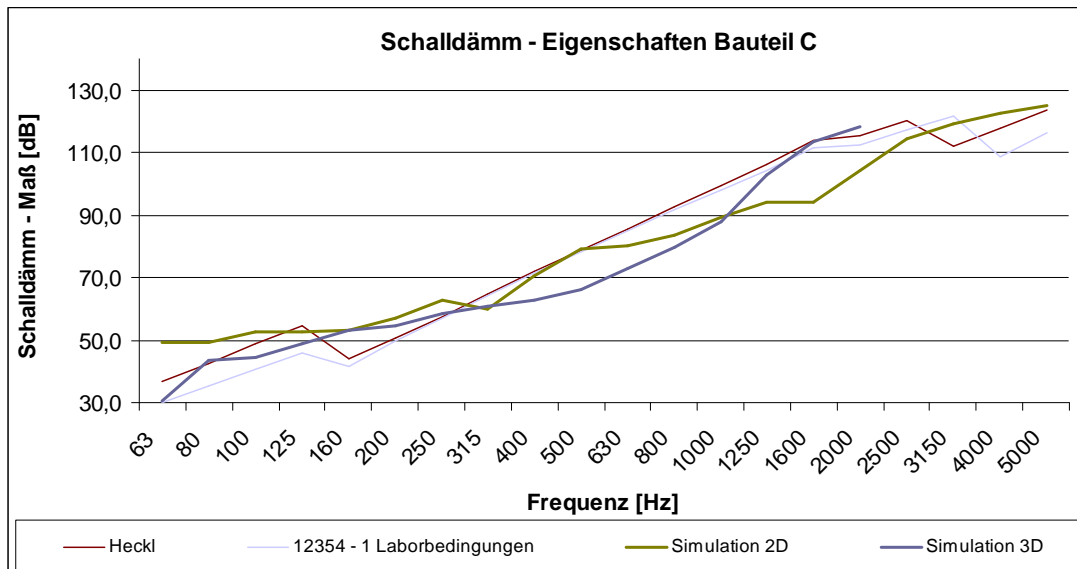


Abbildung 4.2.2.5: Schalldämm – Eigenschaften Bauteil C

**Auswertung der Ergebnisse des Bauteils C:**

Für das Bauteil C wurden aufgrund keines geeigneten Messobjektes keine Messungen durchgeführt. Daher können nur die analytisch ermittelten Werte mit den numerischen Ergebnissen verglichen werden. Die Anstiege der numerischen Ermittelten Werte entsprechen den Literaturvorgaben nach [1].

**Bauteil D:**

In der nachfolgenden Abbildung 4.2.2.6 und Abbildung 4.2.2.7 sind die numerisch nach FEM sowie analytisch nach Heckl [4] und DIN EN 12354 - 1 [7] ermittelten Schalldämmeigenschaften für das Bauteil D dargestellt.

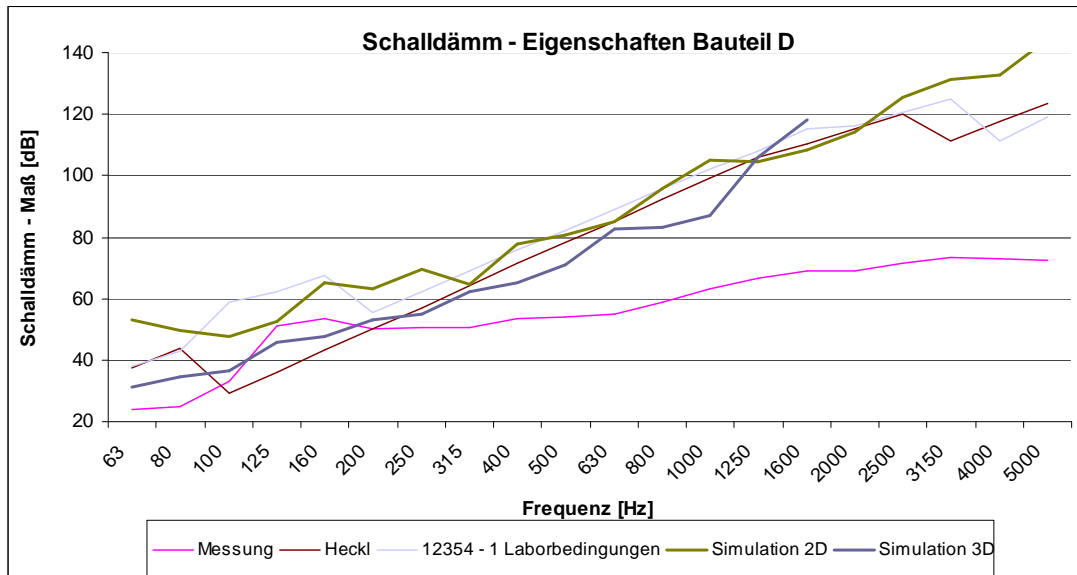


Abbildung 4.2.2.6: Schalldämm – Eigenschaften Bauteil D

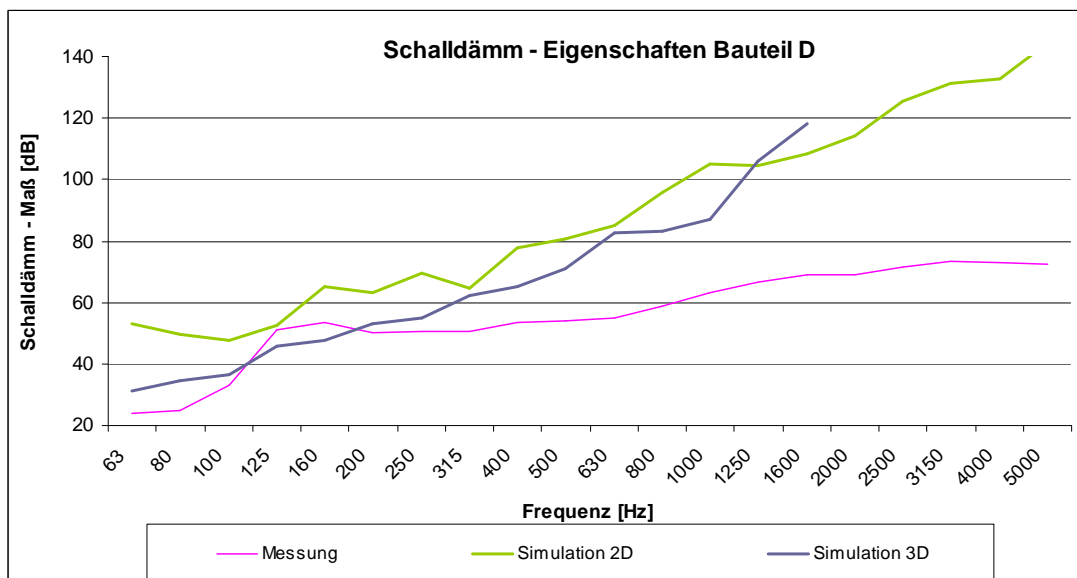


Abbildung 4.2.2.7: Vergleich der numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften mit den Messergebnissen

**Auswertung der Ergebnisse des Bauteils D:**

Die Messergebnisse weichen stark zwischen den gemessenen und berechneten Werten ab. Im Frequenzbereich unter 250 Hz sind die Messergebnisse ähnlich den analytischen und numerischen Ergebnissen. Ab einer Frequenz von  $f > 250$  Hz steigen die Abweichungen mit steigender Frequenz. Die Ergebnisse der analytischen Betrachtung stimmen mit dem 3D Simulationsmodell näherungsweise überein. Bei der 2D Simulation sind im Frequenzbereich  $f < 500$  Hz hohe Schalldämmeigenschaften ermittelt worden. Die 3D numerische Simulation konnte wie schon bei Bauteil C nur bis 2000 Hz durchgeführt werden, da der Diskretisierungsaufwand den vorhandenen Speicher des verwendeten Rechners überschreitet. Da die Ständerkonstruktion bei der Simulation nicht berücksichtigt wurde, sind aufgrund der Schallübertragung über die Ständerkonstruktion geringere Schalldämm – Eigenschaften zu erwarten, was auch mit den messtechnisch ermittelten Werten übereinstimmt.

Die numerische Simulation (3D) liefert besonders im tiefen Frequenzbereich die geringsten Abweichungen zur Messung. Ausschließlich analytisch betrachtet weichen die nach Heckl ermittelten Schalldämm – Eigenschaften am wenigsten von den Messergebnissen ab. Die Abweichungen zwischen der Messung und der analytischen bzw. numerischen Ermittlung können unter anderem auf die Einbaubedingungen der Vorsatzschale bezogen werden. In der analytischen und numerischen Betrachtung wurde die Befestigung der Vorsatzschalenkonstruktion nicht berücksichtigt.

**Bauteil E:**

In nachfolgender Abbildung 4.2.2.8 sind die messtechnisch, numerisch nach FEM (3 D Modell) sowie analytisch nach Heckl [4] und DIN EN 12354 - 1 [7] ermittelten Schalldämmeigenschaften für das Bauteil E dargestellt.



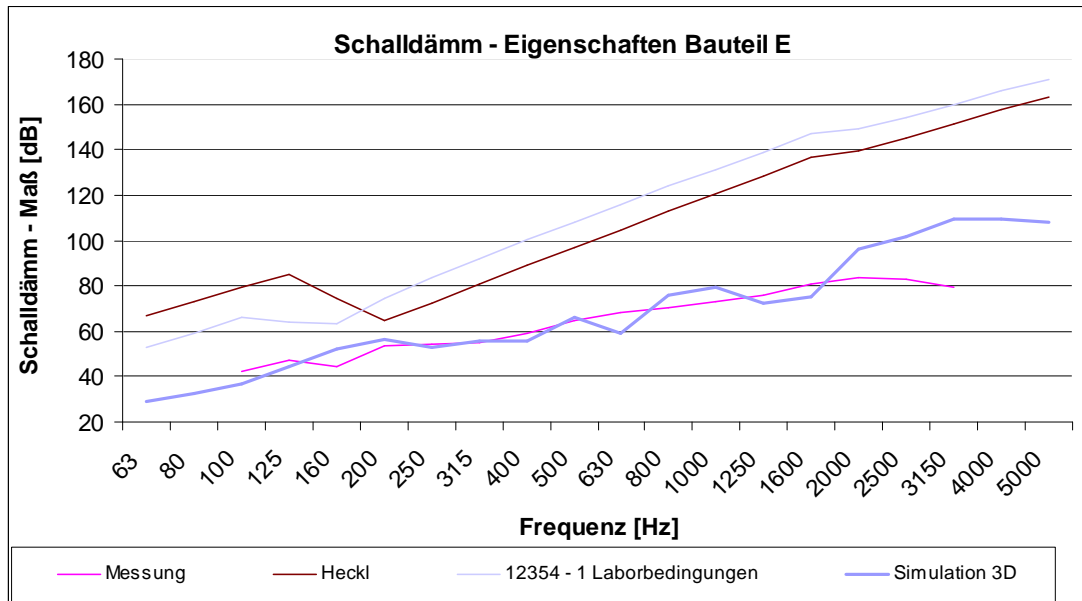


Abbildung 4.2.2.8: Analytisch bestimmte Schalldämm – Eigenschaften Bauteil E

### Auswertung der Ergebnisse des Bauteils E:

Die messtechnische Ermittlung stimmt näherungsweise mit der 3D Simulation überein. Die analytisch ermittelten Werte weichen von den Messergebnissen ab. Ab  $f = 250$  Hz steigt die Abweichung mit ansteigender Frequenz. Die Auswertung der in Anlage 7 aufgeführten numerisch und messtechnisch ermittelten Anstiege der Schalldämm – Eigenschaften ergab Werte entsprechend der Literaturangaben nach [4] von 18 dB Anstieg je Oktave im Bereich von  $f < f_i$  und 12 dB je Oktave im Bereich von  $f > f_i$ .

Die numerische Simulation nach FEM (3D) liefert daher die größte Übereinstimmung zu den gemessenen Schalldämm – Eigenschaften.

**Bauteil F:**

In nachfolgender Abbildung 4.2.2.9 sind die analytisch nach Heckl [4] und DIN EN 12354 - 1 [7], messtechnisch und numerisch nach FEM (3 D Modell) ermittelten Schalldämmeigenschaften für das Bauteil F dargestellt.

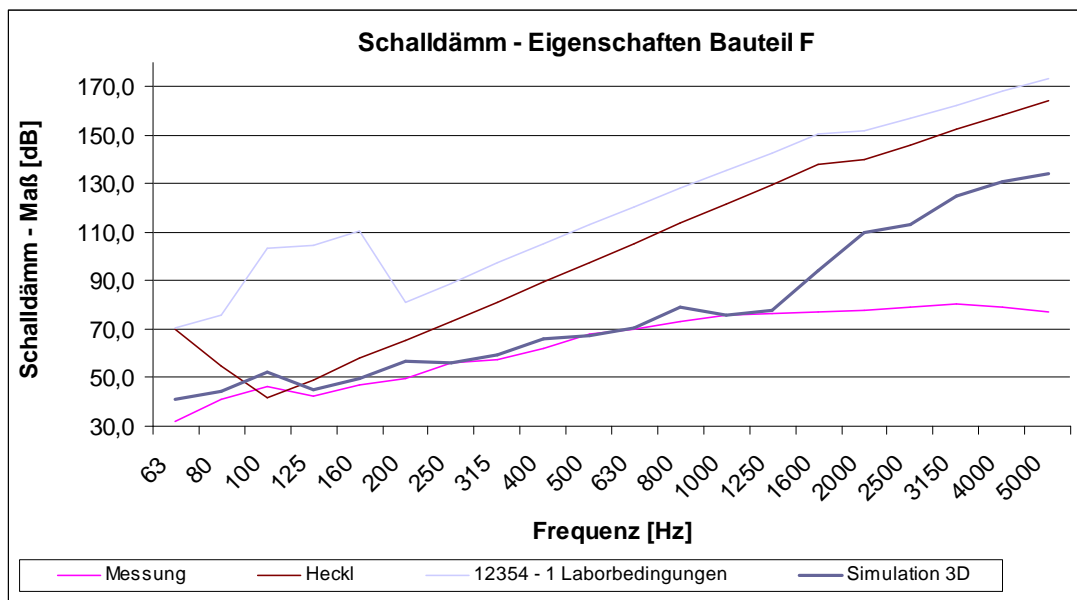


Abbildung 4.2.2.9: Schalldämm – Eigenschaften Bauteil F

**Auswertung der Ergebnisse des Bauteils F:**

Die Messergebnisse stimmen bis in den Frequenzbereich  $f = 1600$  Hz mit der 3D numerischen Simulation überein. In höheren Frequenzen ist die gemessene Schalldämmung geringer als die simulativ ermittelte. Die analytisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften weichen stark von den gemessenen Werten ab. Die Abweichung wird dabei mit steigender Frequenz größer. Die größte Übereinstimmung mit den Messdaten liefert daher die numerische Simulation. Ausschließlich analytisch betrachtet entsprechen die Ergebnisse nach Heckl [4] trotz großer Abweichungen im hohen Frequenzbereich den Messergebnissen. Die Anstiege der messtechnisch und numerisch ermittelten Schalldämm - Eigenschaften entsprechen den nach Heckl [4] angegebenen 18 dB pro Oktave im Bereich  $f < f_i$ . Die grafische Auswertung der Anstiege ist der Anlage 7 zu entnehmen.

**Bauteil G:**

In nachfolgender Abbildung 4.2.2.10 sind die analytisch nach Sharp [22], messtechnisch und numerisch nach FEM (3 D Modell) ermittelten Schalldämmeigenschaften für das Bauteil G dargestellt. Die messtechnisch ermittelten Schalldämmeigenschaften wurden ab 400 Hz mit einem Anstieg von 30 dB je Oktave interpoliert, da aufgrund eines zu geringen Schallpegels im Senderaum im Empfangsraum nur der Störpegel gemessen werden konnte.

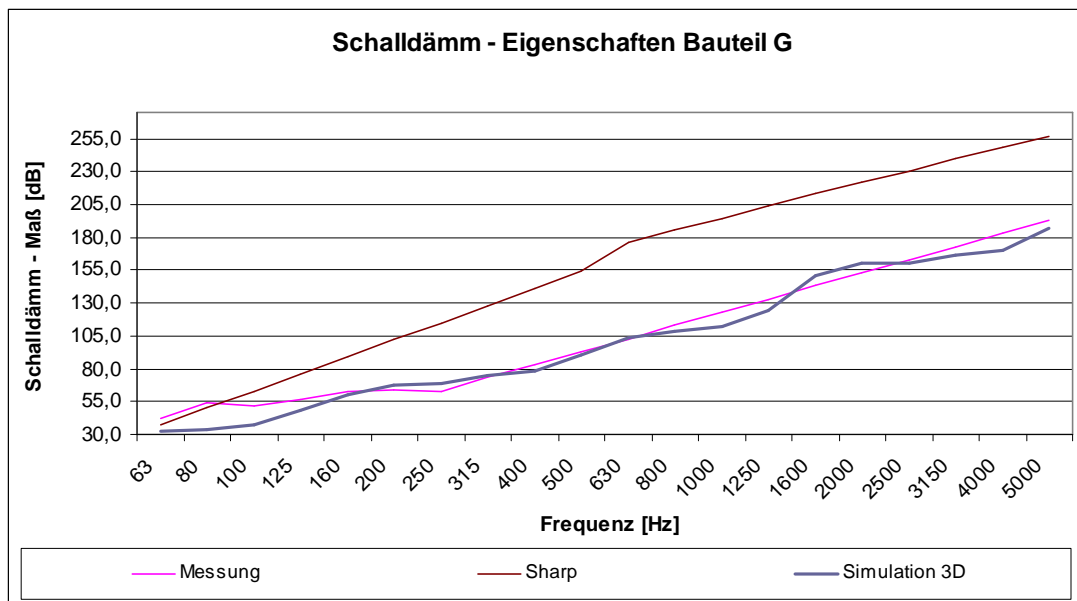


Abbildung 4.2.2.10: Schalldämm – Eigenschaften Bauteil G

**Auswertung der Ergebnisse des Bauteils G:**

Die nach FEM Methode bestimmten Schalldämm – Eigenschaften weisen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten auf. Der Anstieg des Schalldämm – Maßes entspricht den theoretischen Vorgaben von 30 dB je Oktave im Frequenzbereich  $f > f_{\alpha}$ . Der Anstieg im Frequenzbereich  $f > f_{\alpha}$  konnte messtechnisch nicht festgestellt werden, da  $f_{\alpha}$  mit 39,6 Hz unter dem gemessenen Bereich liegt. Die grafische Ermittlung der Anstiege ist Anlage 7 zu entnehmen.

In nachfolgender Abbildung 4.2.2.11 sind die nach FEM (3 D Modell) ermittelten Schalldämmeigenschaften für das Bauteil G im Vergleich zu einem zweischaligen Aufbau mit gleicher flächenbezogener Masse (Bauteil G1) dargestellt.

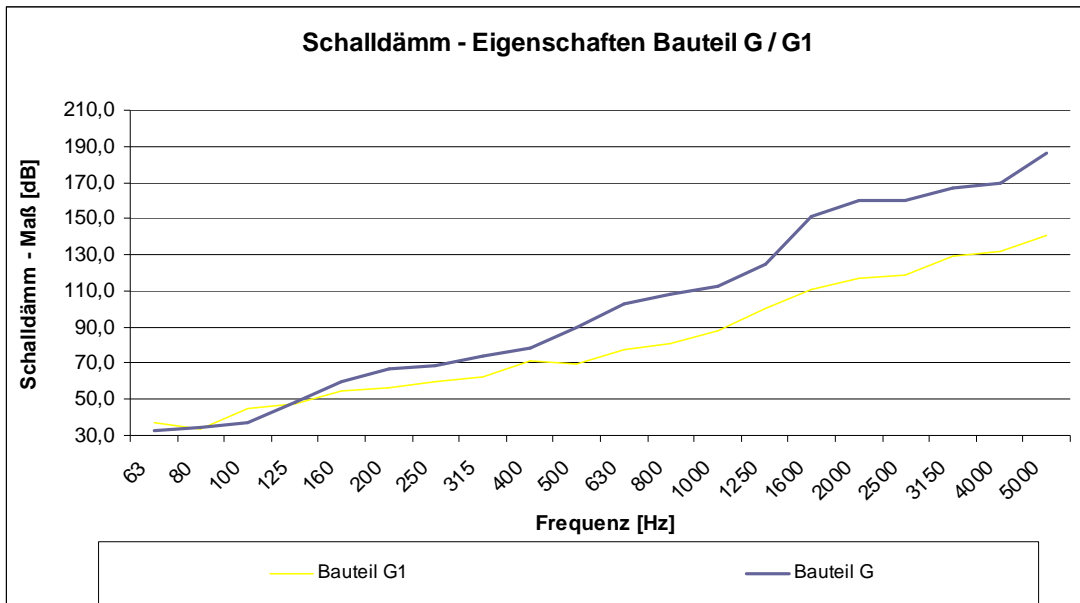


Abbildung 4.2.2.11 numerisch bestimmte Schalldämm – Eigenschaften Bauteil G und Bauteil G1

Da der Aufbau von Bauteil G1 aus 2 Schalen mit gleicher Schichtdicke besteht resultieren geringere Schalldämm – Eigenschaften als bei Bauteil G welches aus 3 Wandschalen mit differenzierten Schichtdicken besteht. Die flächenbezogene Masse ist bei beiden Bauteilen gleich. Der Anstieg der Schalldämm – Eigenschaften ist für den zweischaligen Aufbau geringer.

## **5. Zusammenfassung / Ausblick**

---

In der vorliegenden Arbeit wurden die messtechnisch, analytisch und numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften verschiedener Bauteilkonstruktionen betrachtet. Die messtechnische Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften ist zwar die exakteste Ermittlung, benötigt jedoch einen hohen geräte- und arbeitstechnischen Aufwand und kann nur bestehende Konstruktionen bewerten. Der Aufwand für die Erhöhung der Schalldämmeigenschaften von bestehenden oder unzureichend ausgelegten trennenden Bauteilen ist sehr groß und teilweise nicht oder nur sehr schwer möglich. So können die schalltechnischen Eigenschaften massiver Wände mit Vorsatzschalen oder einer Erhöhung der flächenbezogenen Masse verbessert werden. Dies kann, aufgrund von Installationen wie Lampen oder Steckdosen in der Wand oder an flankierenden Bauteilen, Fenstern in angrenzenden Außenwänden oder Türen in flankierenden Wänden, erschwert werden. Des Weiteren wird die Nutzfläche verringert und somit die Raumqualität negativ beeinflusst. Daher ist die genaue Bestimmung der Schalldämm – Eigenschaften mit einer möglichst geringen Abweichung zu gemessenen Ergebnissen notwendig.

Im Vergleich mit den Messergebnissen liefert die 3D Simulationen mittels FEM die größten Übereinstimmungen trotz einer fehlenden Flankenbetrachtung. Die analytisch ermittelten Werte weichen besonders in den hohen Frequenzbereichen von den gemessenen Werten ab. Die mehrschaligen Bauteile erreichen die analytisch bestimmten Schalldämm – Maße nicht und weichen stark ab. Mit ansteigender Frequenz steigt die Abweichung wodurch z. B. bei einer zweischaligen Betonwand (Bauteil F) bei 1000 Hz messtechnisch ein Schalldämm – Maß von 76 dB ermittelt wird und analytisch nach DIN 12354 ein Schalldämm – Maß von 135 dB. Die sich ergebende Differenz von 59 dB ist als sehr hoch zu bewerten.

Bei der Betrachtung der messtechnisch ermittelten Bauschalldämm-Maße (Anlage 1) der mehrschaligen Bauteile E, F und G ist ein Abfall der Schalldämmung ab 3150 Hz festzustellen. Dieser Einbruch der Schalldämm – Eigenschaften resultiert aus einem Messfehler. Bei einem Vergleich der gemessenen Schalldruckpegel im Senderraum mit dem Schalldruckpegel im Empfangsraum und dem gemessenen Störgeräuschpegel entspricht der Schalldruckpegel im Empfangsraum bei höheren Frequenzen dem Störgeräuschpegel. Daher ist z. B. bei Bauteil F ab 3150 Hz die Schalldämmung der Wand so groß, dass kein oder nur sehr geringe Schallpegel im Empfangsraum gemessen werden konnten, welche vom Störgeräusch überdeckt wurden. Für die genaue Ermittlung der Schalldämm – Eigenschaften der mehrschaligen Bauteile E – G muss daher ein höherer Schalldruckpegel im Senderraum erzeugt werden, als mit der verwendeten Schallquelle OmniPower (im Frequenzbereich z.B.  $f \geq 3150$  Hz bei Bauteil F) möglich

ist. Daher sind für die mehrschaligen Bauteile E und F nur die Schalldämm – Eigenschaften bis 3150 Hz und für das Bauteil G die Schalldämm – Eigenschaften bis 400 Hz repräsentativ.

Zusammenfassend weist von den analytischen Betrachtungen in Frequenzbändern die Ermittlung nach Heckl [4] die geringste Abweichung zu den Messergebnissen auf. Bei einschaligen Bauteilen und Bauteilen mit biegeweichen Vorsatzschalen liefern die Einzahlangaben nach DIN 4109 bzw. DIN EN 12354 – 1 mit geringem zeitlichen und rechentechnischen Aufwand näherungsweise äquivalente Werte zu den Messergebnissen. Die numerische Ermittlung weist von allen betrachteten Verfahren die genaueste Näherungslösung auf. Für einschalige Bauteile ergaben sich auch nach dem 2D numerischen Modell genaue Näherungslösungen. Die numerischen Ergebnisse wurden im Bezug auf den Anstieg der Schalldämm – Eigenschaften untersucht und weisen, wie die durchgeführten Messungen, näherungsweise die in [1] und [4] angegebenen Werte auf.

Bei mehrschaligen Bauteilen können, durch eine fehlende oder mangelhafte Entkopplung der Wandschalen, die Messergebnisse von den analytisch ermittelten Werten differenzieren. Dies ist damit zu begründen das die analytische Betrachtung von einem idealen Bauteil ohne massive Verbindung ausgeht. Bei den Bauteilen mit Vorsatzschale wurde die Ständerkonstruktion nicht berücksichtigt, woraus rechnerisch und simulativ höhere Schalldämm – Eigenschaften resultieren.

Die genaue Ermittlung der Schalldämm – Eigenschaften ist von den genauen Materialeigenschaften abhängig, welche je nach analytischem Ermittlungsverfahren unter anderem durch den Verlustfaktor  $\eta$ , das E – Modul  $E$ , die Longitudinalwellengeschwindigkeit  $c_L$  oder die Poisson Zahl  $\mu$  definiert werden. Die Angaben weichen je nach Quelle zum Teil stark voneinander ab. So wird für Beton nach DIN 12354 – 1 [7] ein innerer Verlustfaktor von  $\eta = 0,006$  angegeben, nach FESI [23] wird ein Verlustfaktor von  $\eta = 0,01 - 0,6$  angegeben. Dies hat erheblichen Einfluß auf die ermittelten Schalldämm – Eigenschaften. Nach Heckl (3.51) führt die Verdopplung des Verlustfaktors zu einer Erhöhung des Schalldämm – Maßes von  $\approx 3$  dB.

Die Ergebnisse der numerischen Simulation insbesondere des dreischaligen Wandaufbaus ergaben eine näherungsweise Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Daher eignet sich die FEM besonders für die Ermittlung der Schalldämm – Eigenschaften von Konstruktionen ohne bekannte analytische Berechnungsmethoden. Ein Beispiel ist der vierschalige Wandaufbau.

Für die frequenzabhängige Analyse wird die Bedeutsamkeit von rechnergestützten Simulationsprogrammen, aufgrund der sich stetig steigernden Rechenleistung, ansteigen. Daher ist es wichtig, die in der Arbeit noch nicht berücksichtigte Schallübertragung über flankierende Bauteile, in die Simulation einzubinden, um noch exaktere Ergebnisse zu erhalten.

Anlagen

## **Anlagen**

---

## **Anlage 1: Messergebnisse**

---

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
Bauteil A (24 cm Kalksandstein Mauerwerk)	A1-1
Bauteil B (20 cm Beton)	A1-5
Bauteil D (20 cm Beton mit Vorsatzschale)	A1-9
Bauteil E (20 cm KS MW, 5 cm Dämmung, 20 cm KS MW)	A1-13
Bauteil F (20 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)	A1-17
Bauteil G (30 cm Beton, 5 cm Dämmung, 25 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)	A1-21

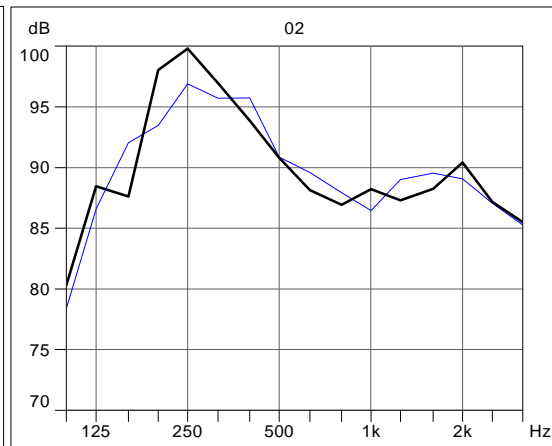
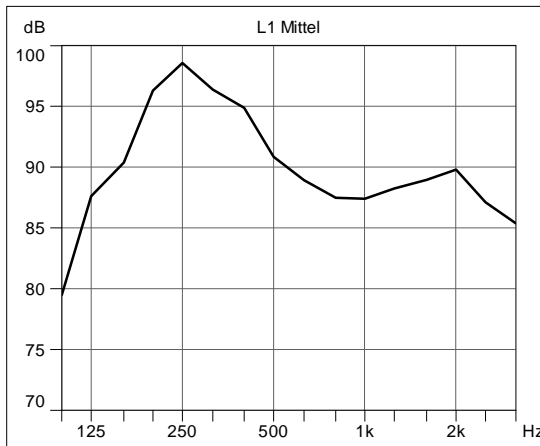


**Bauteil A**

Gemessener Wert: L1 Schalldruckpegel Senderraum

Dargestellter Wert: Mittelwert

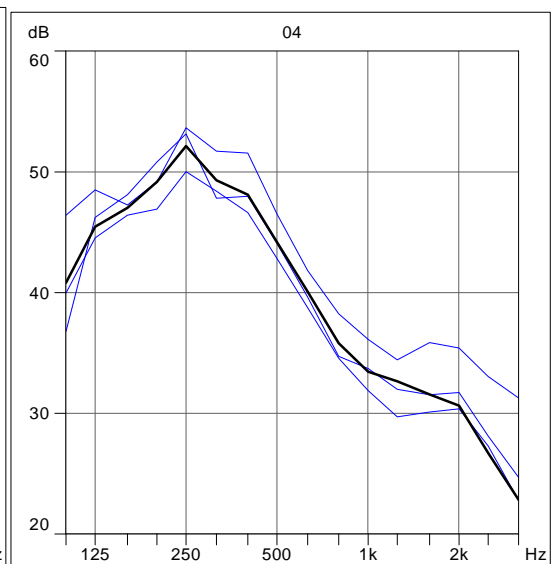
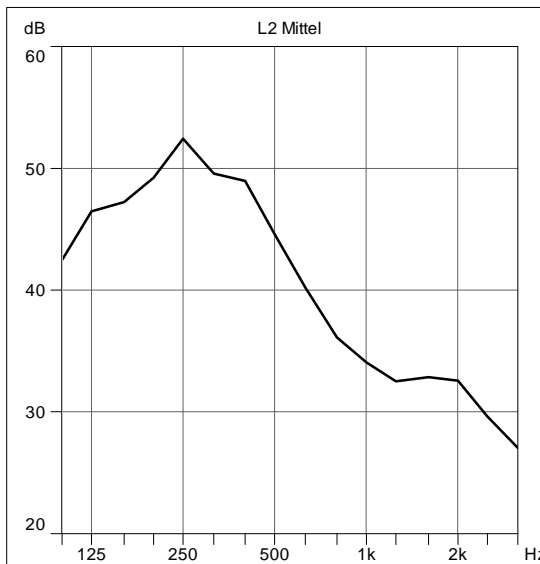
Dargestellter Wert: Messwerte



Gemessener Wert: L2 Schalldruckpegel Empfangsraum

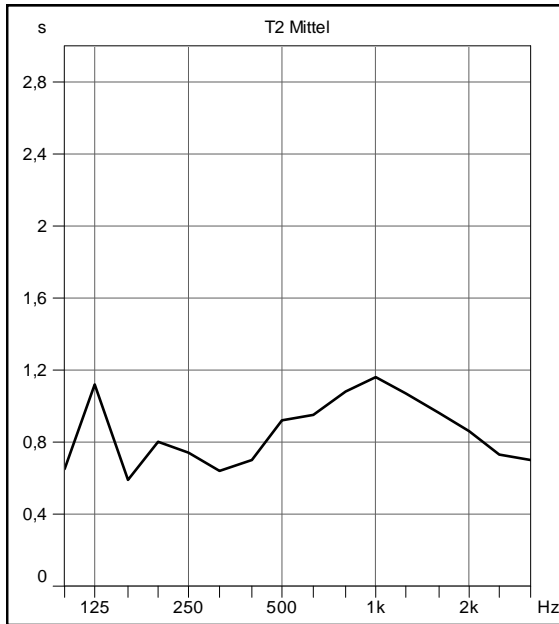
Dargestellter Wert: Mittelwert

Dargestellter Wert: Messwerte

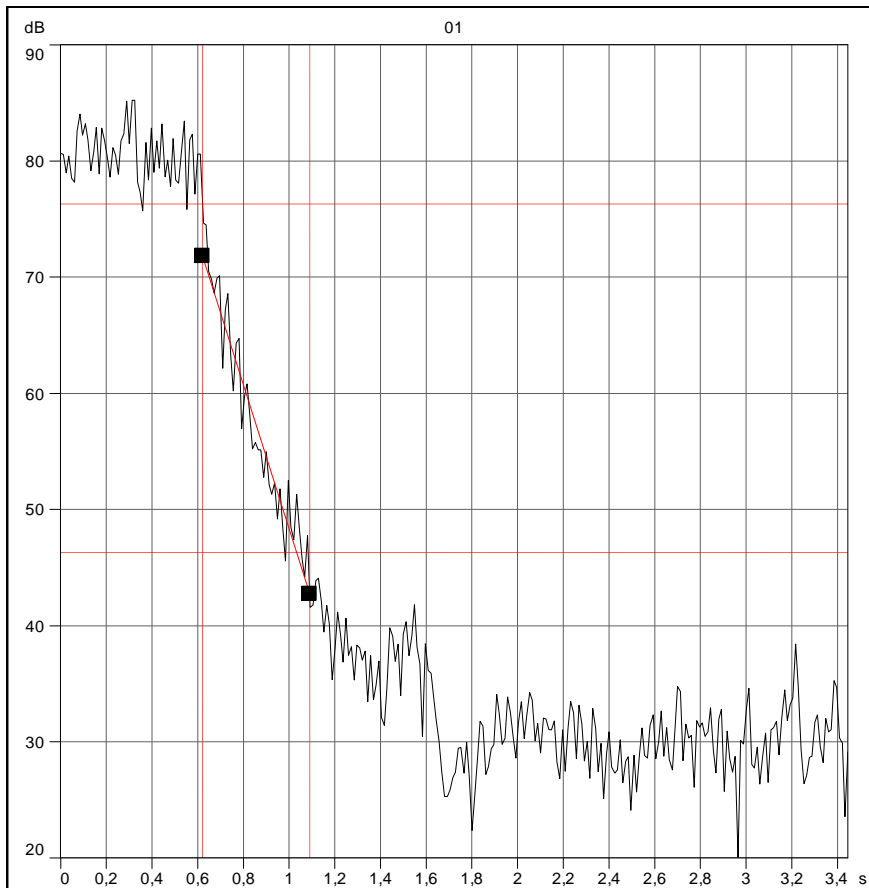


Gemessener Wert: T2 Nachhallzeit Empfangsraum

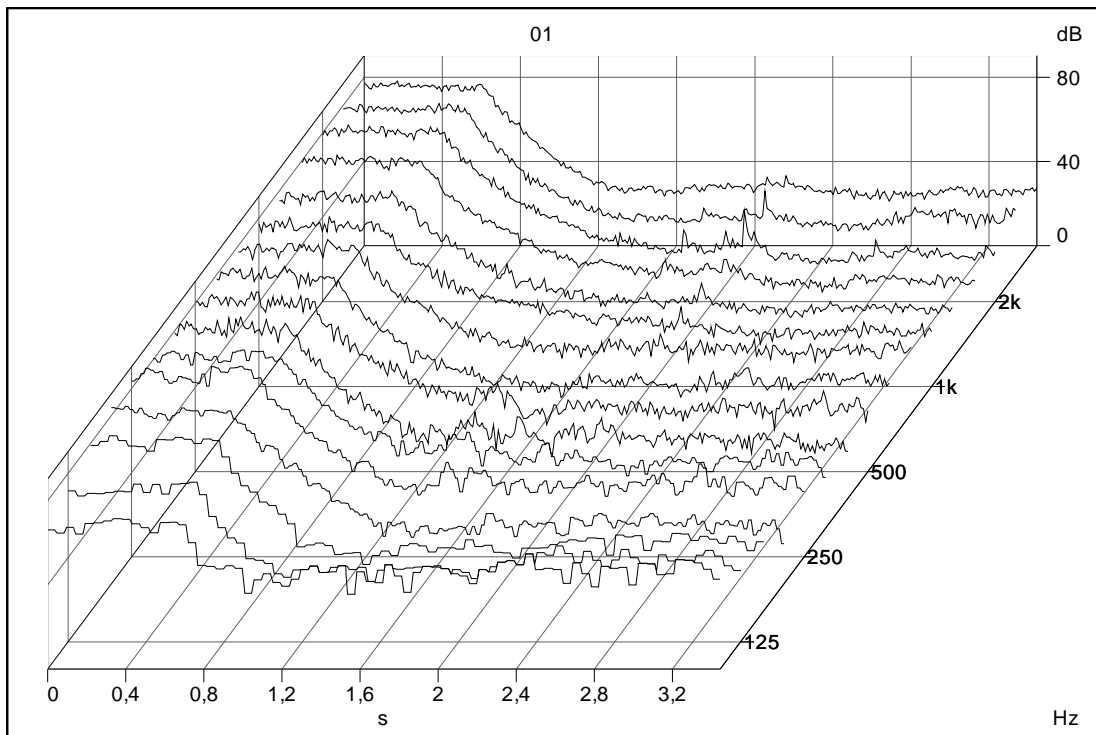
Dargestellter Wert: Mittelwert



Dargestellter Wert: Abklingkurve Nachhallzeit bei 500 Hz



## Dargestellter Wert : Multispektrum Nachhallzeit



**Bau-Schalldämm-Maß nach ISO 140-4**

**Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden**

---

Auftraggeber: Prüfdatum: 10.10.2005

Beschreibung von Aufbau und Lage des Trennbauteils und der Prüfanordnung, Meßrichtung:  
 Bauteil A

Fläche S des Trennbauteils: 17,70 m<sup>2</sup>  
 Volumen des Senderraumes: m<sup>3</sup>  
 Volumen des Empfangsraumes: 76,38 m<sup>3</sup>

- - - - - der Frequenzbereich entsprechend  
 ————— der Kurve der Bezugswerte (ISO 717-1)

Frequenz f Hz	R' Terz dB
50 63 80	
100 125 160	36,8 43,3 42,5
200 250 315	47,7 46,4 46,5
400 500 630	46,0 47,5 50,1
800 1000 1250	53,3 55,6 57,6
1600 2000 2500	57,5 58,2 57,7
3150 4000 5000	58,4

Bewertung nach ISO 717-1

$R'_w (C; C_{tr}) = 54 (-1; -4) \text{ dB}$        $C_{50-3150} = \text{N/A dB}; C_{50-5000} = \text{N/A dB}; C_{100-5000} = \text{N/A dB};$   
 $C_{tr,50-3150} = \text{N/A dB}; C_{tr,50-5000} = \text{N/A dB}; C_{tr,100-5000} = \text{N/A dB};$

Die Ermittlung basiert auf Gebäude-Messungen, die in Terzbändern gewonnen wurden

---

Nr. des Prüfberichtes: Name des Prüfinstituts:

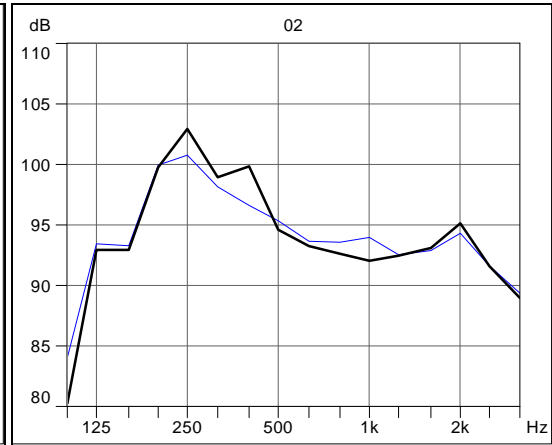
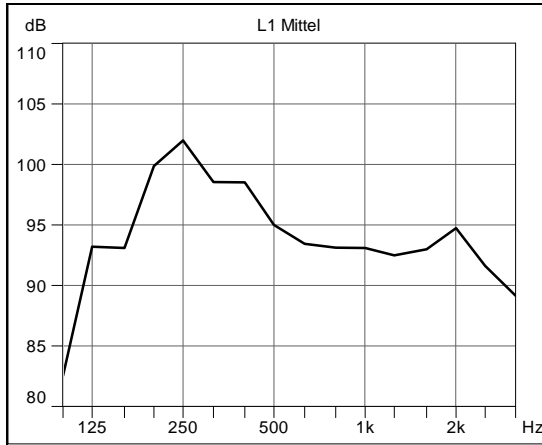
Datum: 20.07.2009 Unterschrift:

**Bauteil B**

Gemessener Wert: L1 Schalldruckpegel Senderaum

Dargestellter Wert: Mittelwert

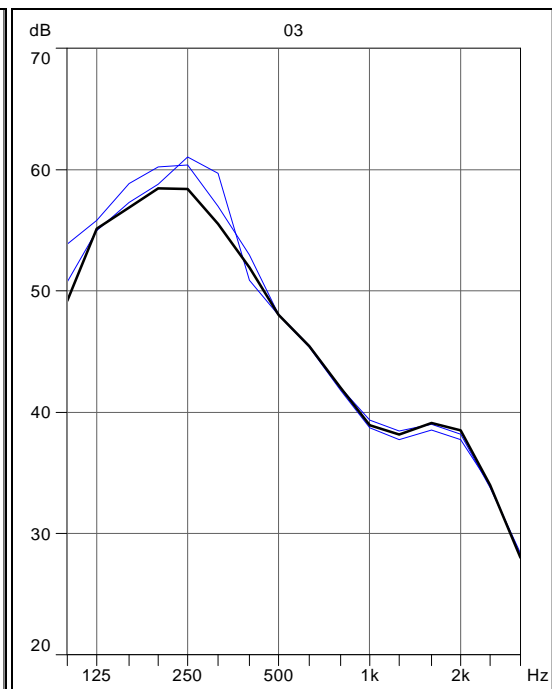
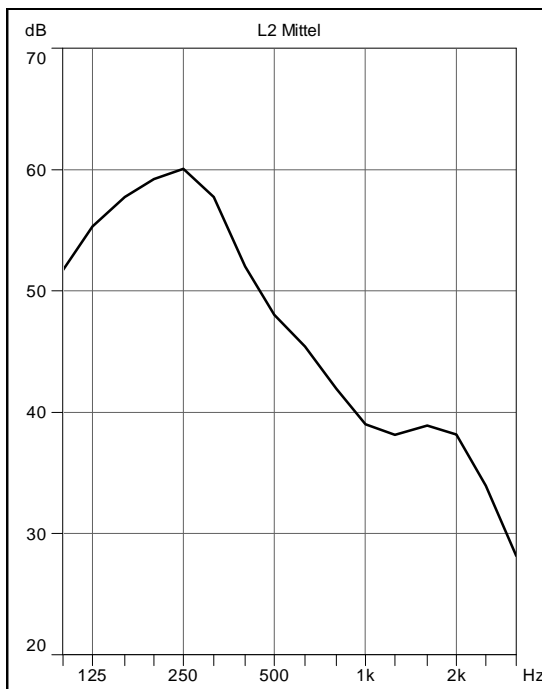
Dargestellter Wert: Messwerte



Gemessener Wert: L2 Schalldruckpegel Empfangsraum

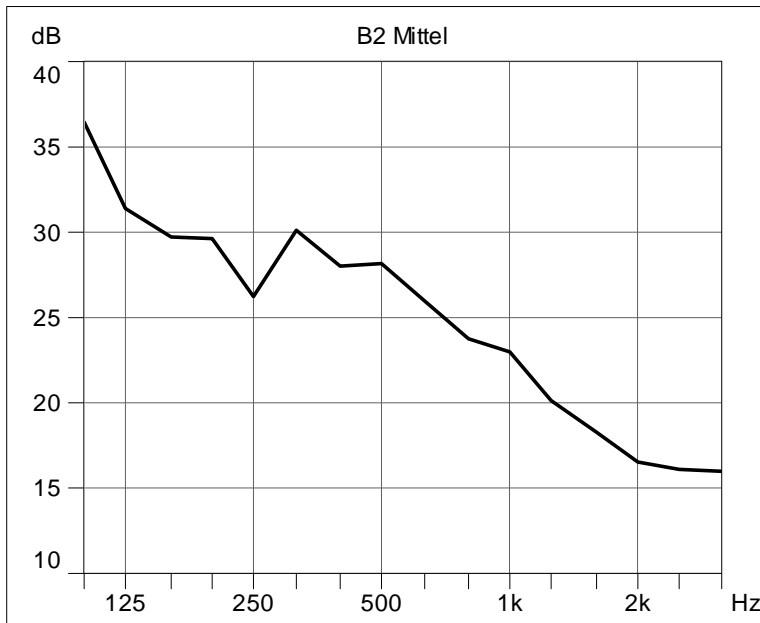
Dargestellter Wert: Mittelwert

Dargestellter Wert: Messwerte



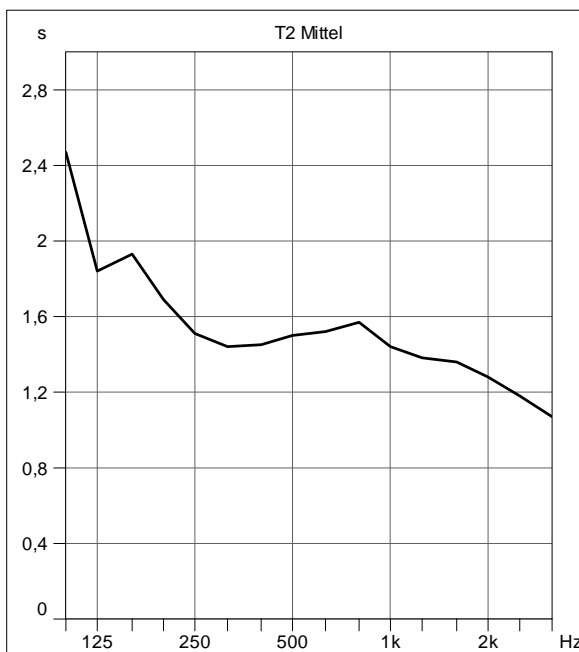
Gemessener Wert: B2 Störgeräuschpegel

Dargestellter Wert: Mittelwert

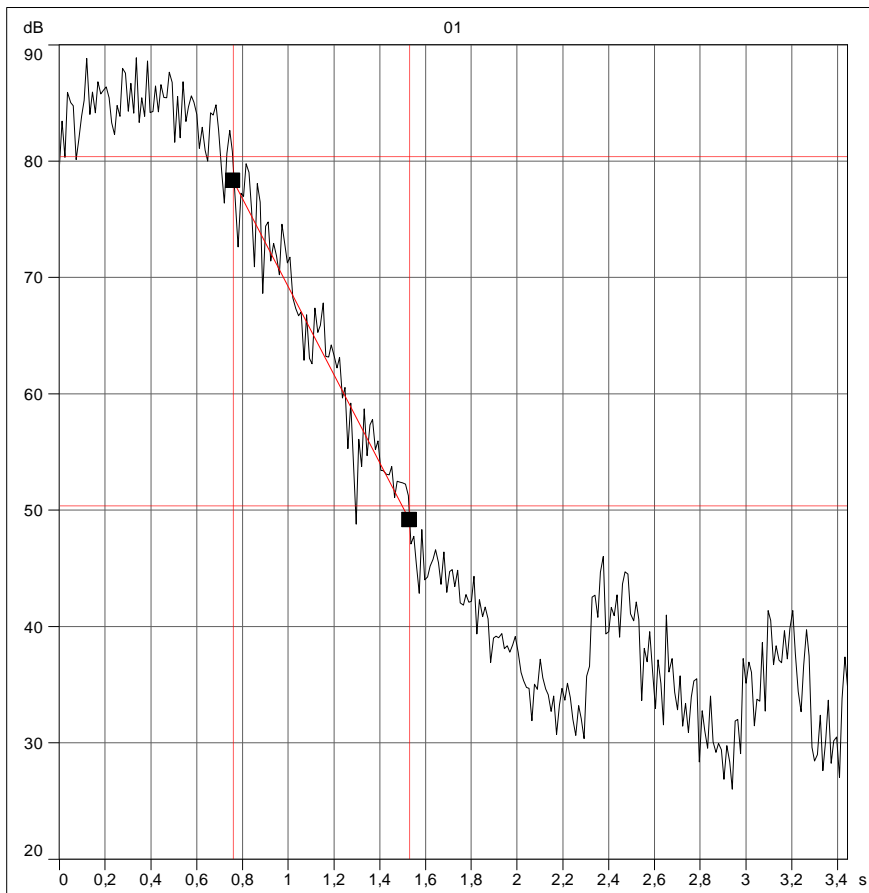


Gemessener Wert: T2 Nachhallzeit Empfangsraum

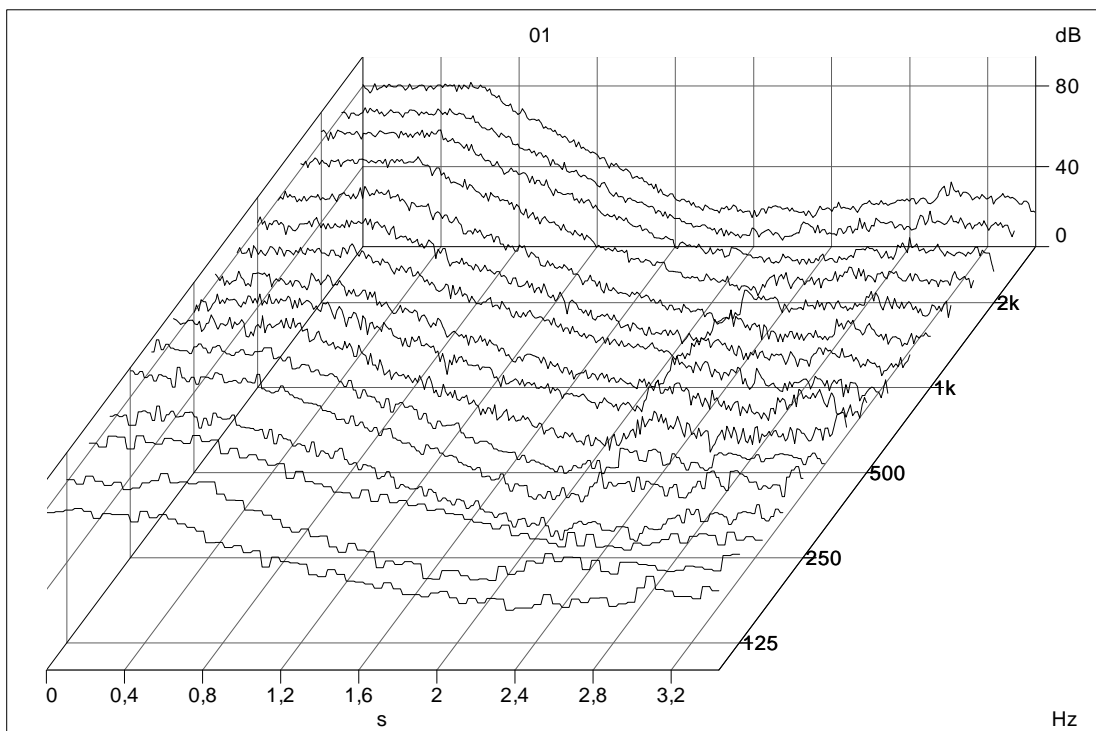
Dargestellter Wert: Mittelwert



Dargestellter Wert: Abklingkurve Nachhallzeit bei 500 Hz



Dargestellter Wert: Multispektren Nachhallzeit



**Bau-Schalldämm-Maß nach ISO 140-4**

**Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden**

---

Auftraggeber: Prüfdatum: 10.10.2005

Beschreibung von Aufbau und Lage des Trennbauteils und der Prüfanordnung, Meßrichtung:  
 Bauteil B

Fläche S des Trennbauteils: 16,50 m<sup>2</sup>  
 Volumen des Senderraumes: m<sup>3</sup>  
 Volumen des Empfangsraumes: 47,19 m<sup>3</sup>

- - - - - der Frequenzbereich entsprechend  
 ————— der Kurve der Bezugswerte (ISO 717-1)

Frequenz f Hz	R' Terz dB
50	
63	
80	
100	38,2
125	43,9
160	41,6
200	46,3
250	47,1
315	45,8
400	51,5
500	52,1
630	53,2
800	56,5
1000	59,1
1250	59,2
1600	58,8
2000	61,1
2500	61,8
3150	64,7
4000	
5000	

Bewertung nach ISO 717-1

$R'_w (C; C_{tr}) = 56 (-1; -5) \text{ dB}$        $C_{50-3150} = \text{N/A dB}; C_{50-5000} = \text{N/A dB}; C_{100-5000} = \text{N/A dB};$   
 $C_{tr,50-3150} = \text{N/A dB}; C_{tr,50-5000} = \text{N/A dB}; C_{tr,100-5000} = \text{N/A dB};$

Die Ermittlung basiert auf Gebäude-Messungen, die in Terzbändern gewonnen wurden

---

Nr. des Prüfberichtes: Name des Prüfinstituts:

Datum: 20.07.2009 Unterschrift:

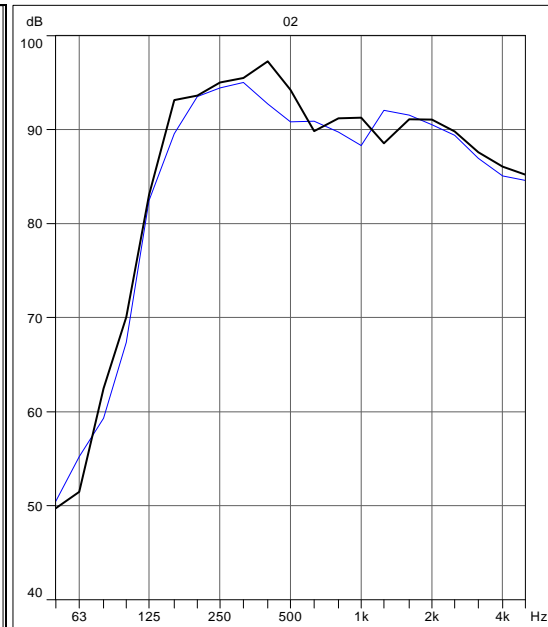
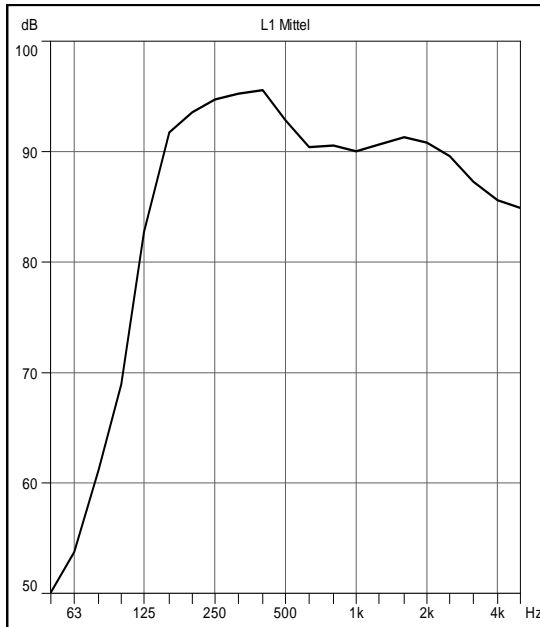


**Bauteil D**

Gemessener Wert: L1 Schalldruckpegel Senderraum

Dargestellter Wert: Mittelwert

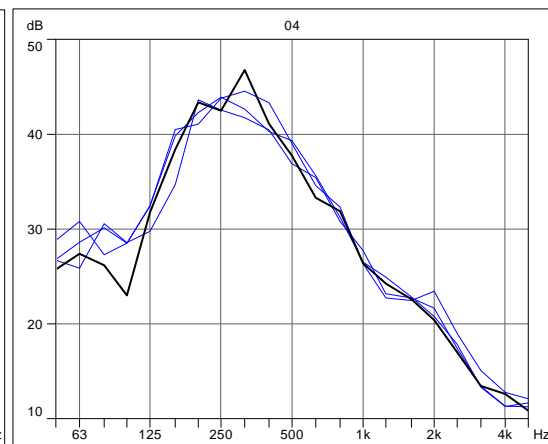
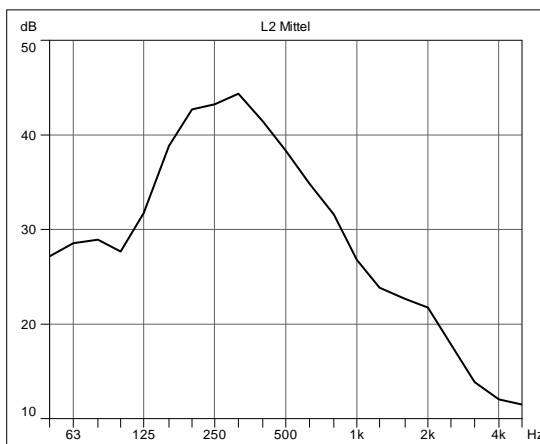
Dargestellter Wert: Messwerte



Gemessener Wert: L2 Schalldruckpegel Empfangsraum

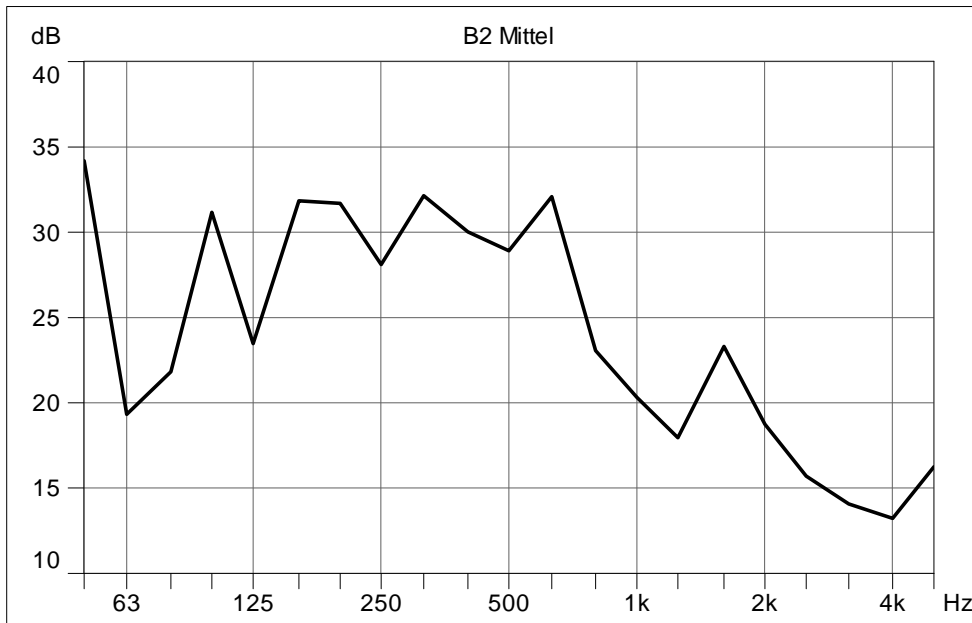
Dargestellter Wert: Mittelwert

Dargestellter Wert: Messwerte



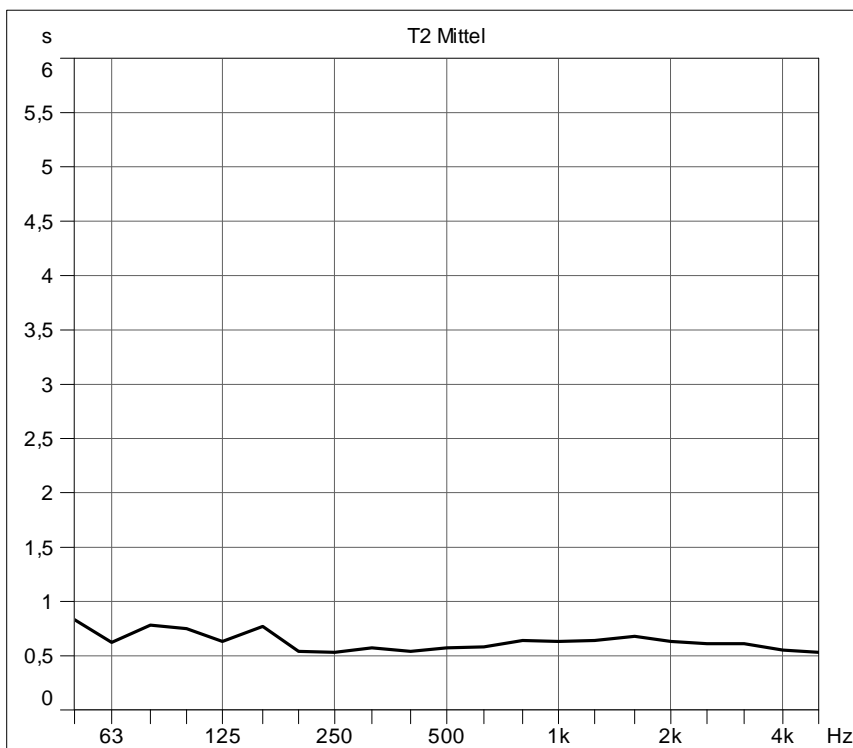
Gemessener Wert: B2 Störgeräuschpegel

Dargestellter Wert: Mittelwert

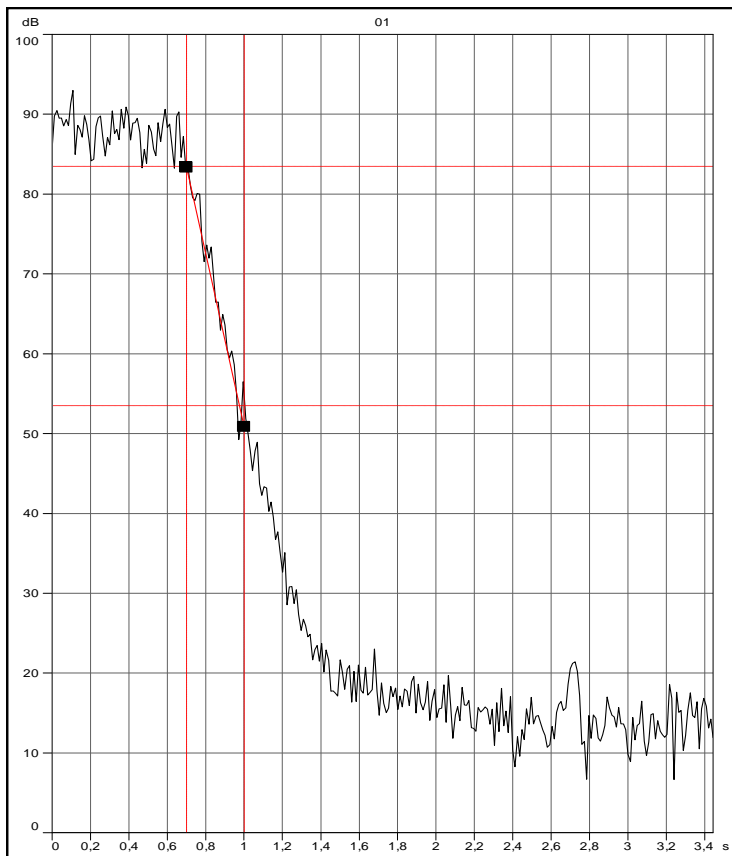


Gemessener Wert: T2 Nachhallzeit Empfangsraum

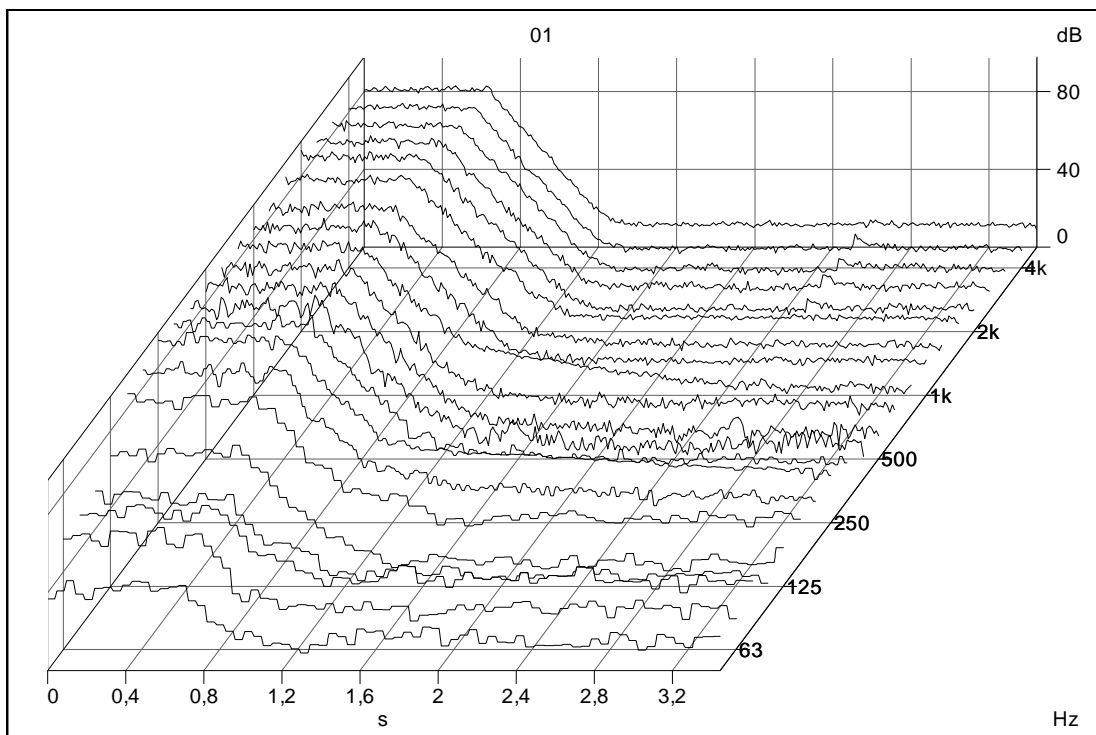
Dargestellter Wert: Mittelwert

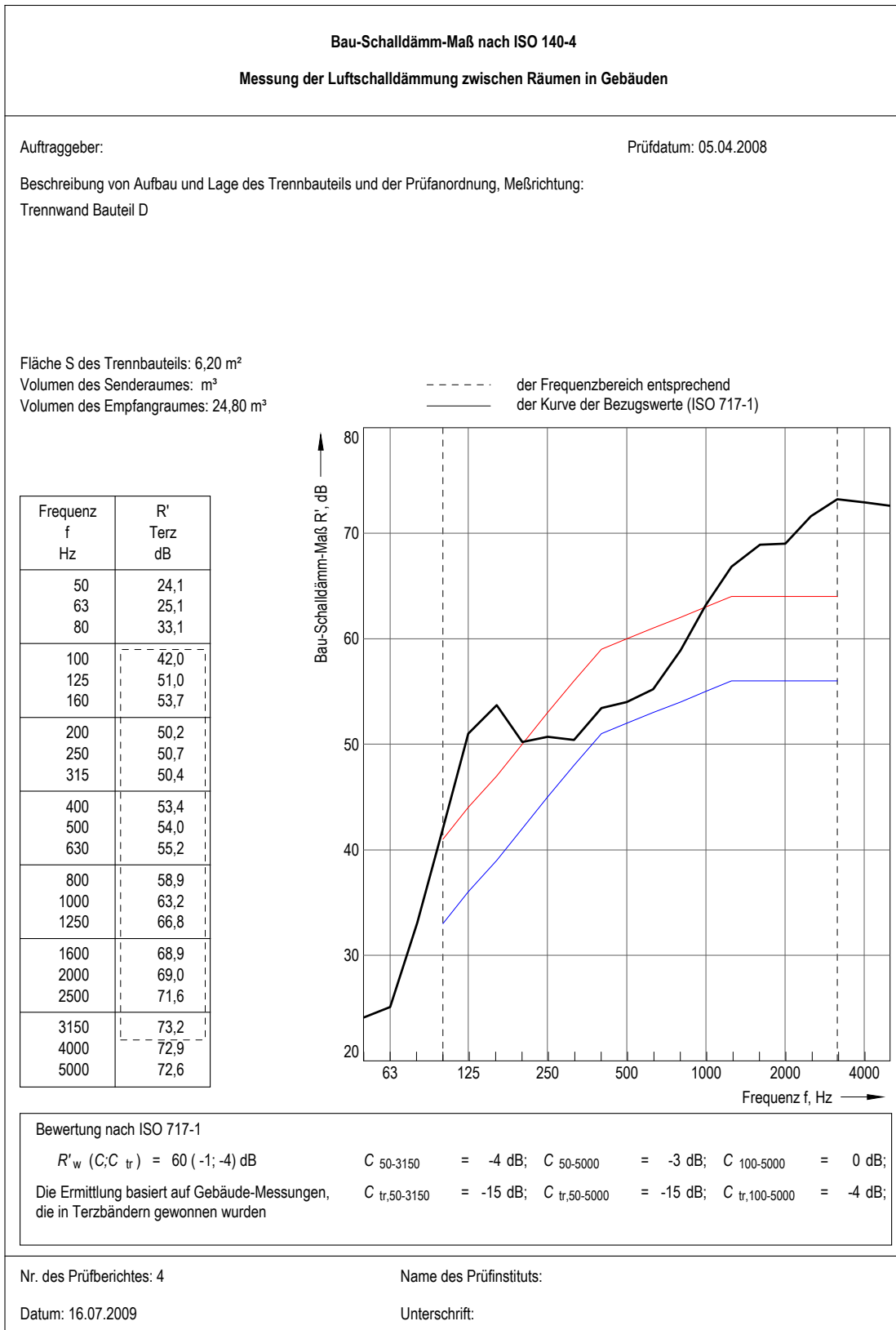


Dargestellter Wert: Abklingkurve Nachhallzeit 500 Hz



Dargestellter Wert: Multispektrum Nachhallzeit



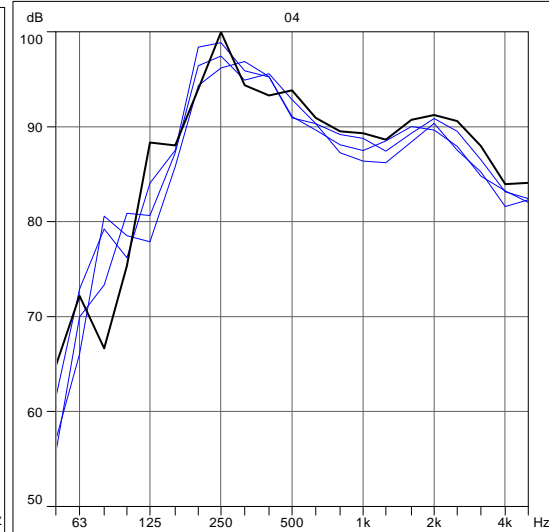
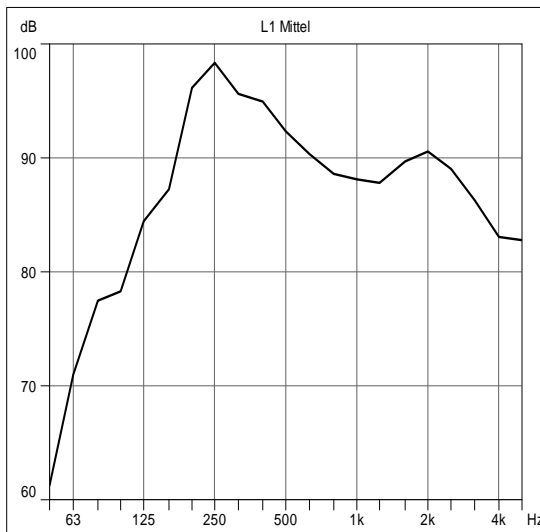


**Bauteil E**

Gemessener Wert: L1 Schalldruckpegel Senderraum

Dargestellter Wert: Mittelwert

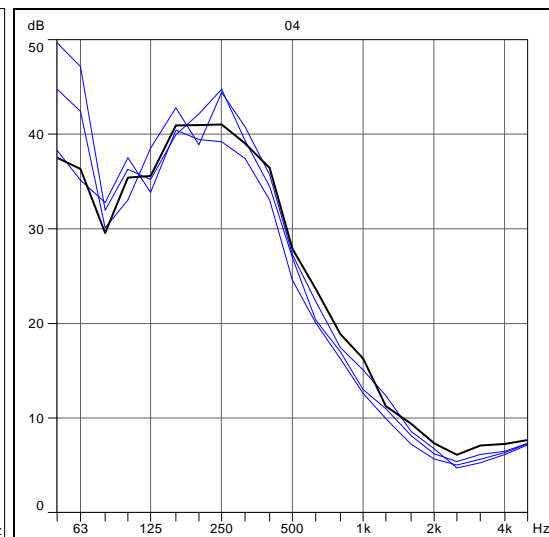
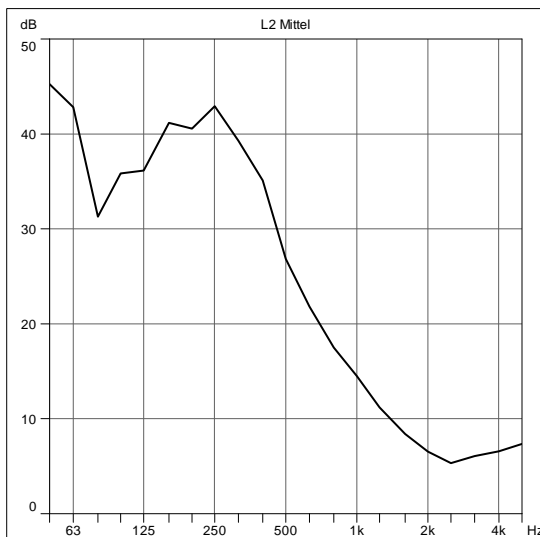
Dargestellter Wert: Messwerte



Gemessener Wert: L2 Schalldruckpegel Empfangsraum

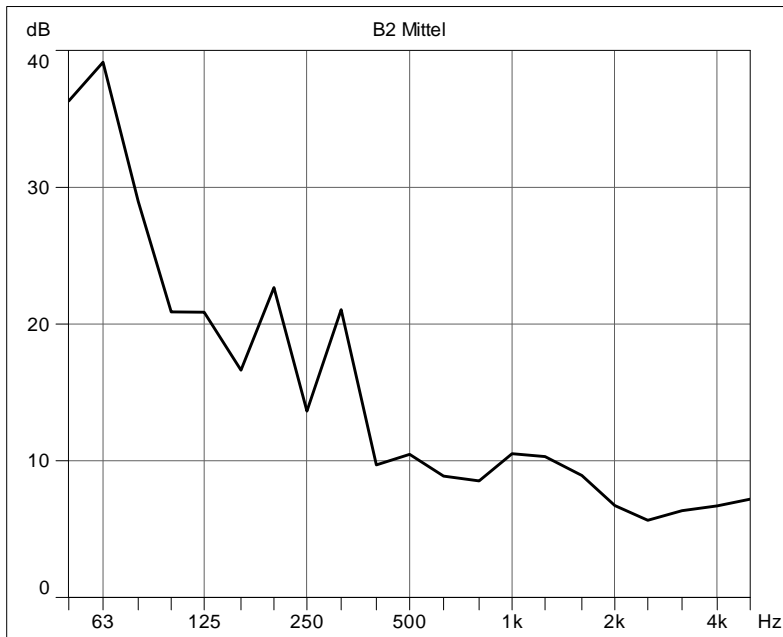
Dargestellter Wert: Mittelwert

Dargestellter Wert: Messwerte



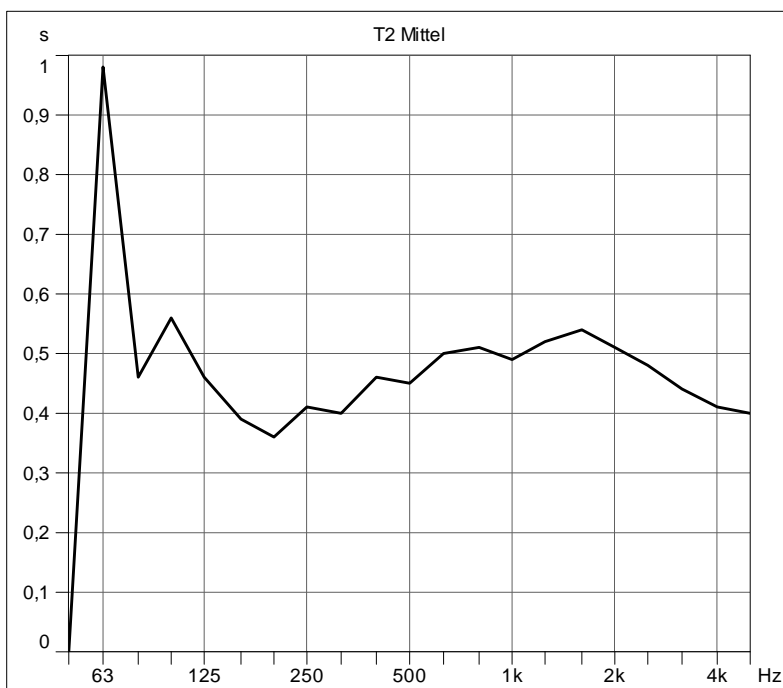
Gemessener Wert: B2 Störgeräuschpegel

Dargestellter Wert: Mittelwert

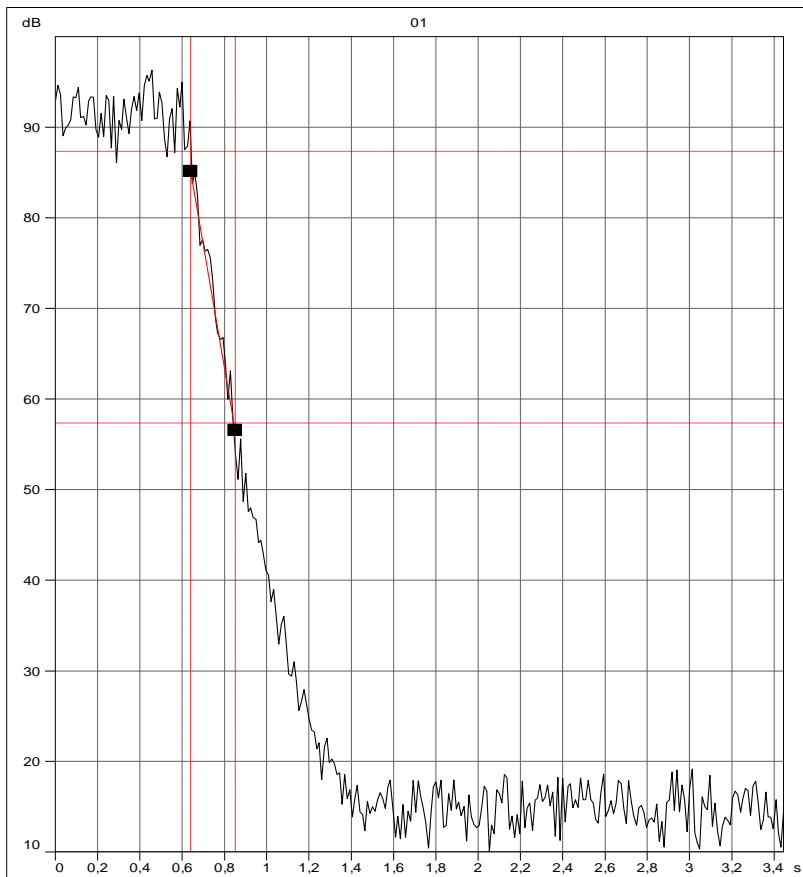


Gemessener Wert: T2 Nachhallzeit Empfangsraum

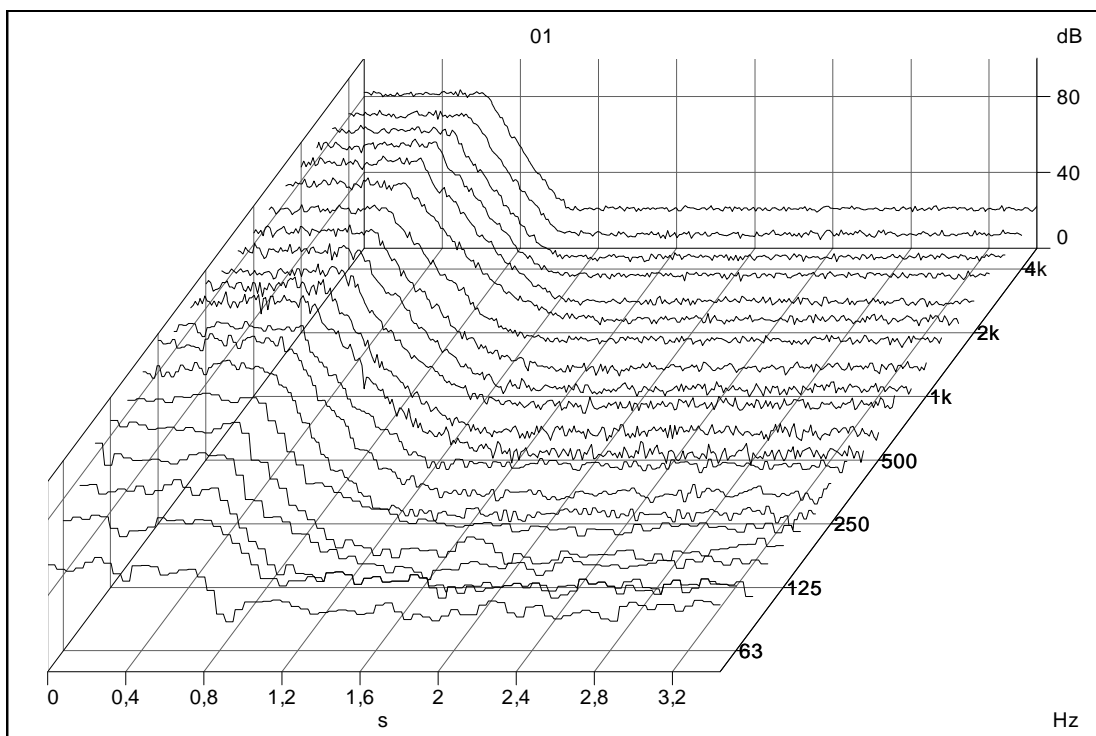
Dargestellter Wert: Mittelwert

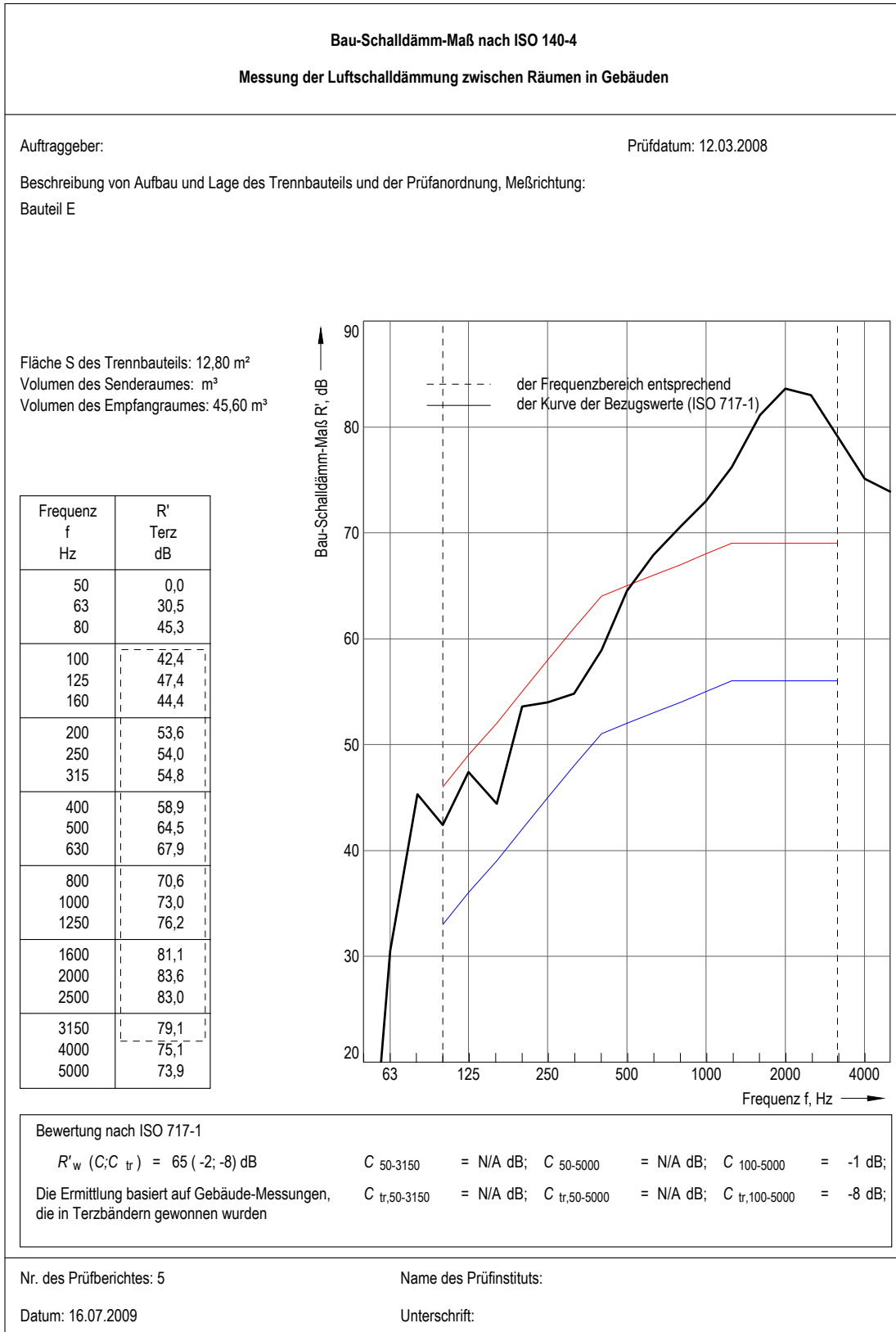


Dargestellter Wert: Abklingkurve Nachhallzeit bei 500 Hz



Dargestellter Wert: Multispektrum Nachhallzeit





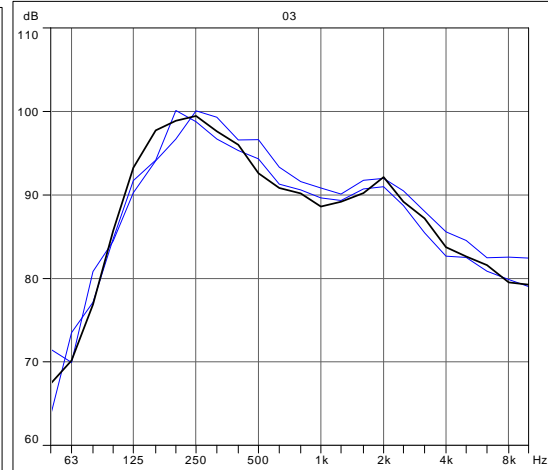
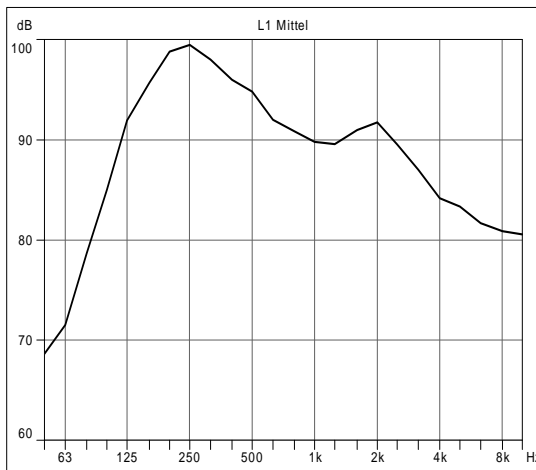


**Bauteil F**

Gemessener Wert: L1 Schalldruckpegel Senderraum

Dargestellter Wert: Mittelwert

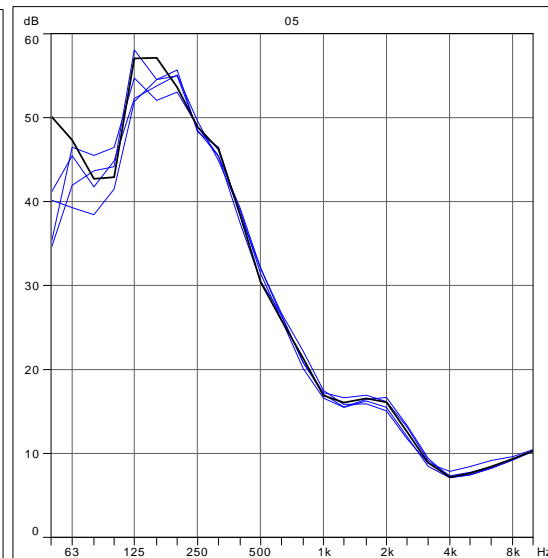
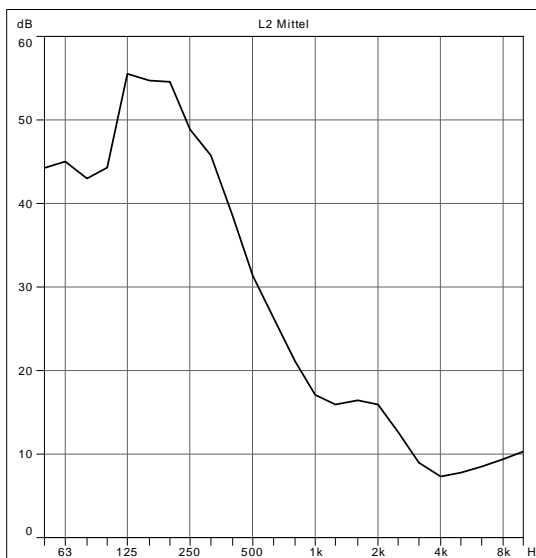
Dargestellter Wert: Messwerte



Gemessener Wert: L2 Schalldruckpegel Empfangsraum

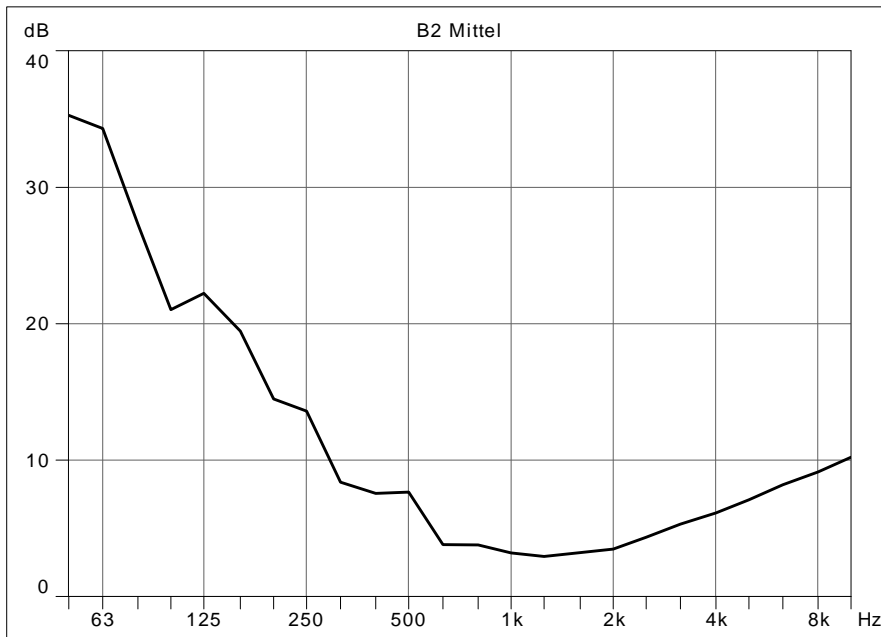
Dargestellter Wert: Mittelwert

Dargestellter Wert: Messwerte



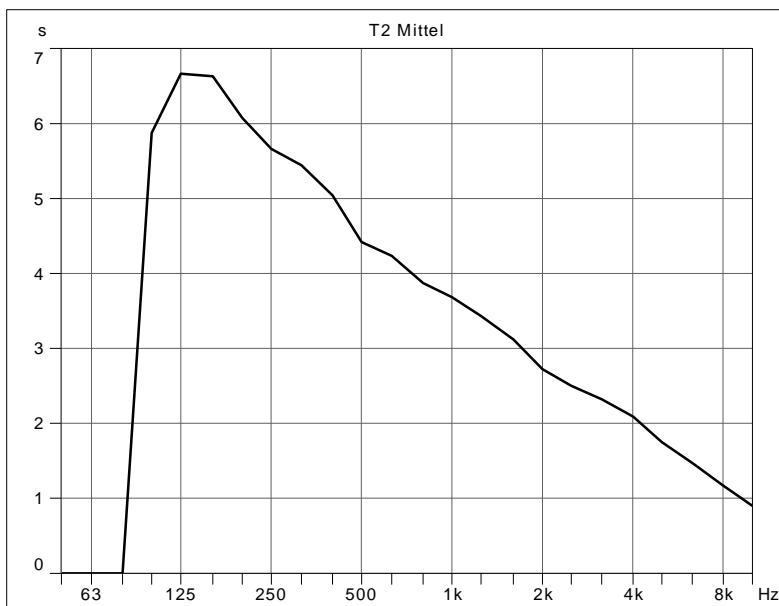
Gemessener Wert: B2 Störgeräuschpegel

Dargestellter Wert: Mittelwert

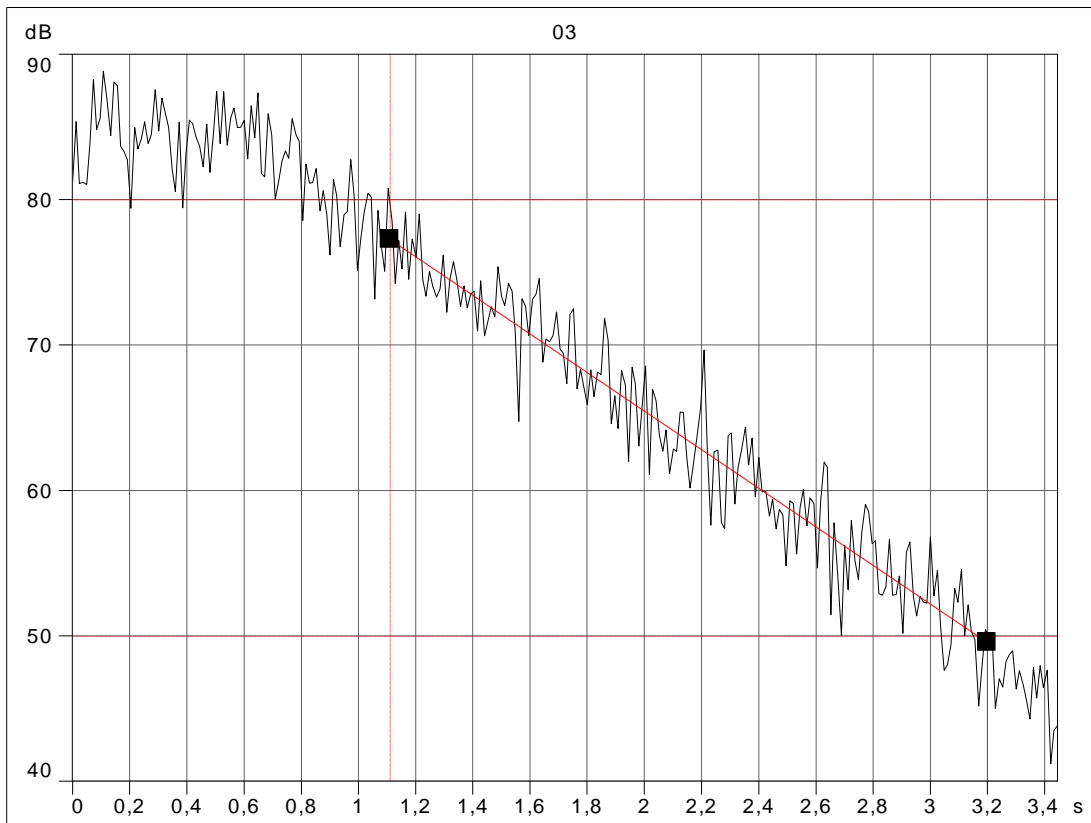


Gemessener Wert: T2 Nachhallzeit Empfangsraum

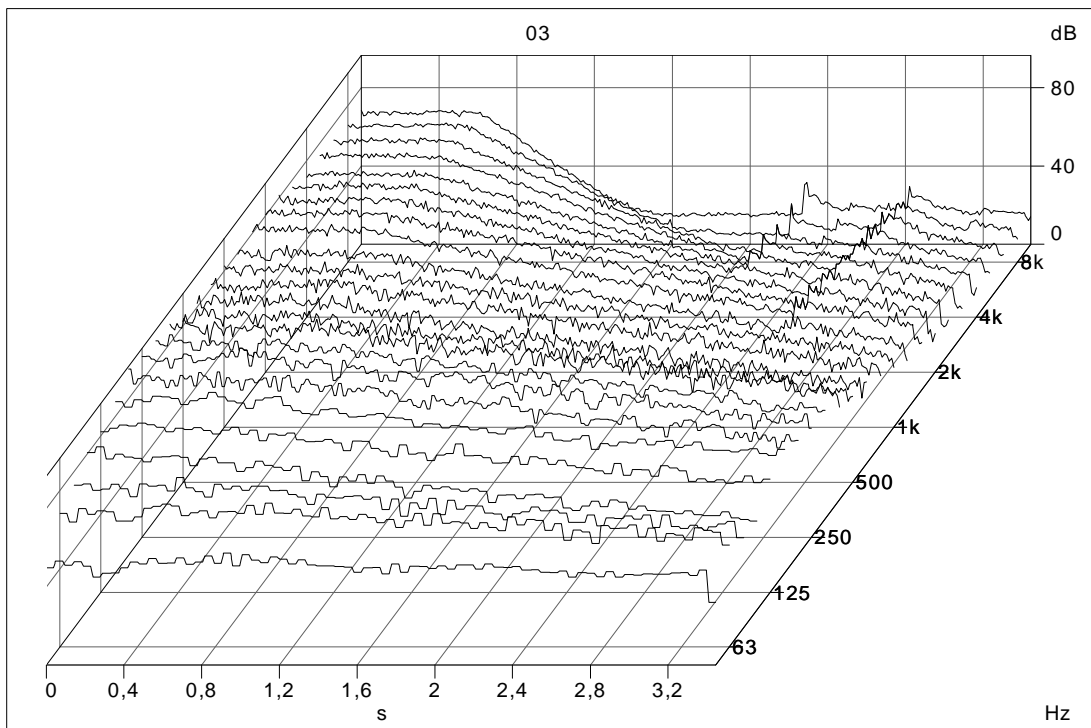
Dargestellter Wert: Mittelwert



Dargestellter Wert: Abklingkurve Nachhallzeit bei 500 Hz



Dargestellter Wert: Multispektrum Nachhallzeit



**Bau-Schalldämm-Maß nach ISO 140-4**

**Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden**

---

Auftraggeber: Prüfdatum: 09.09.2009

Beschreibung von Aufbau und Lage des Trennbauteils und der Prüfanordnung, Meßrichtung:  
 Bauteil F  
 Aufbau: 20 cm Stahlbeton, (2 cm + 3 cm) Trittschalldämmung, 20 cm Stahlbeton

Fläche S des Trennbauteils: 29,38 m<sup>2</sup>  
 Volumen des Senderraumes: m<sup>3</sup>  
 Volumen des Empfangsraumes: 310,98 m<sup>3</sup>

Frequenz f Hz	R' Terz dB
50	30,5
63	32,0
80	41,2
100	46,1
125	42,4
160	46,9
200	49,8
250	55,9
315	57,4
400	62,3
500	67,7
630	69,7
800	73,3
1000	76,1
1250	76,7
1600	77,2
2000	77,9
2500	79,3
3150	80,7
4000	79,1
5000	77,0

- - - - - der Frequenzbereich entsprechend  
 ————— der Kurve der Bezugswerte (ISO 717-1)

**Bewertung nach ISO 717-1**

$R'_w (C; C_{tr}) = 66 (-3; -8) \text{ dB}$        $C_{50-3150} = -5 \text{ dB}; C_{50-5000} = -4 \text{ dB}; C_{100-5000} = -2 \text{ dB};$   
 Die Ermittlung basiert auf Gebäude-Messungen, die in Terzbändern gewonnen wurden       $C_{tr,50-3150} = -15 \text{ dB}; C_{tr,50-5000} = -15 \text{ dB}; C_{tr,100-5000} = -8 \text{ dB};$

---

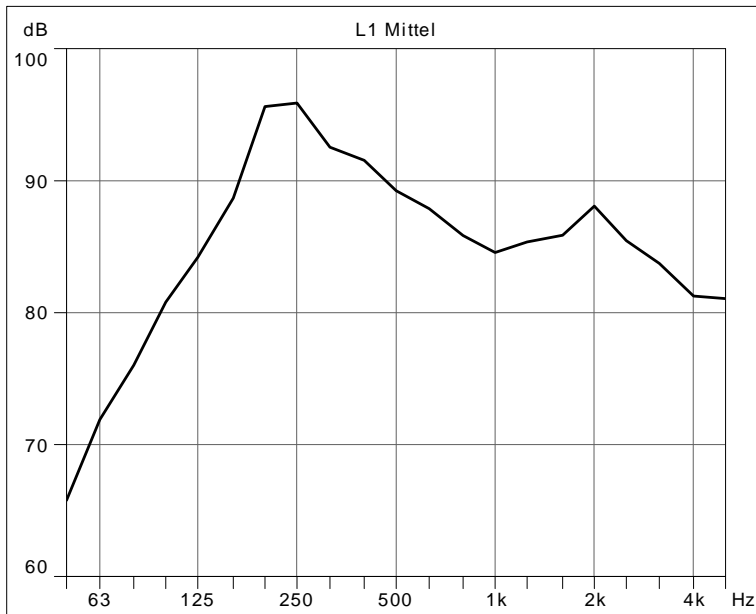
Nr. des Prüfberichtes: Name des Prüfinstituts:

Datum: 10.09.2009 Unterschrift:

**Bauteil G**

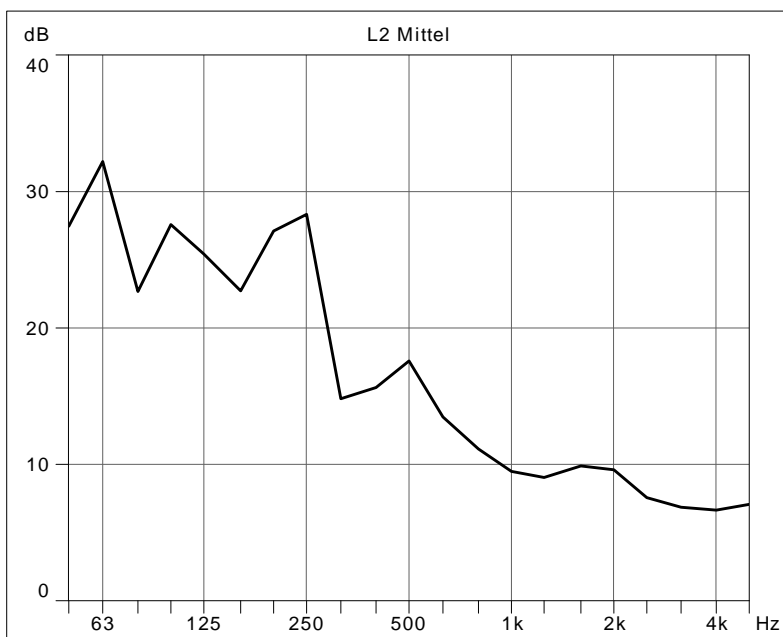
Gemessener Wert: L1 Schalldruckpegel Senderraum

Dargestellter Wert: Mittelwert



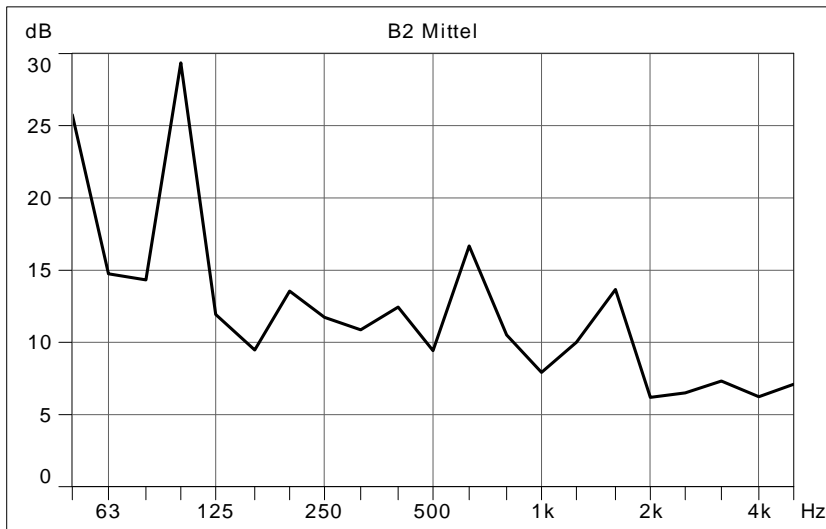
Gemessener Wert: L2 Schalldruckpegel Empfangsraum

Dargestellter Wert: Mittelwert



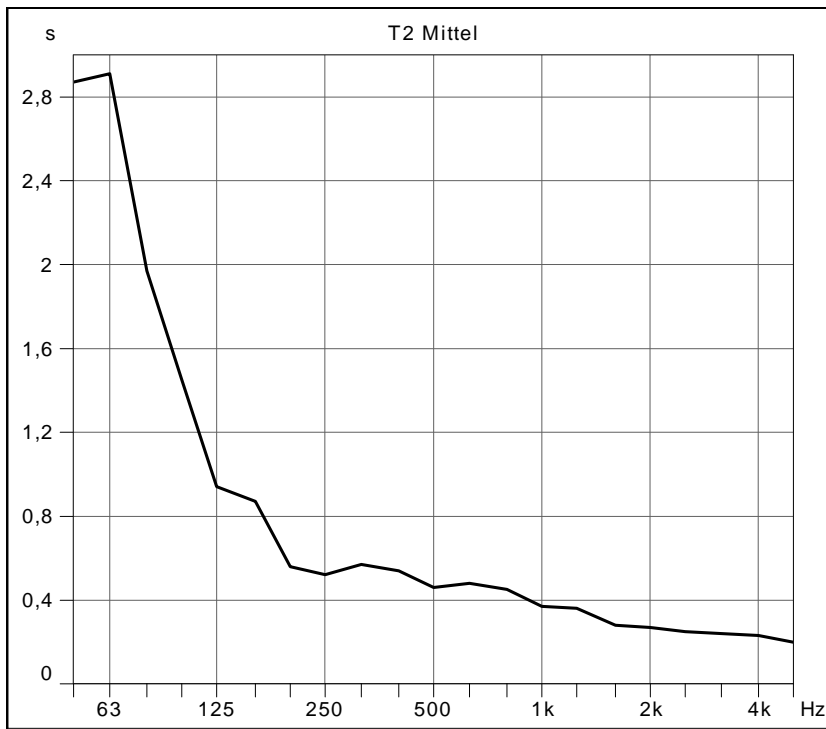
Gemessener Wert: B2 Störgeräuschpegel

Dargestellter Wert: Mittelwert

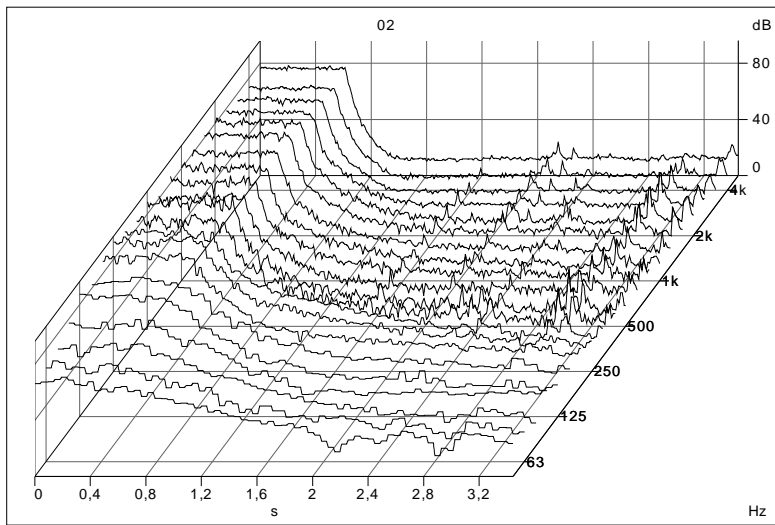


Gemessener Wert: T2 Nachhallzeit Empfangsraum

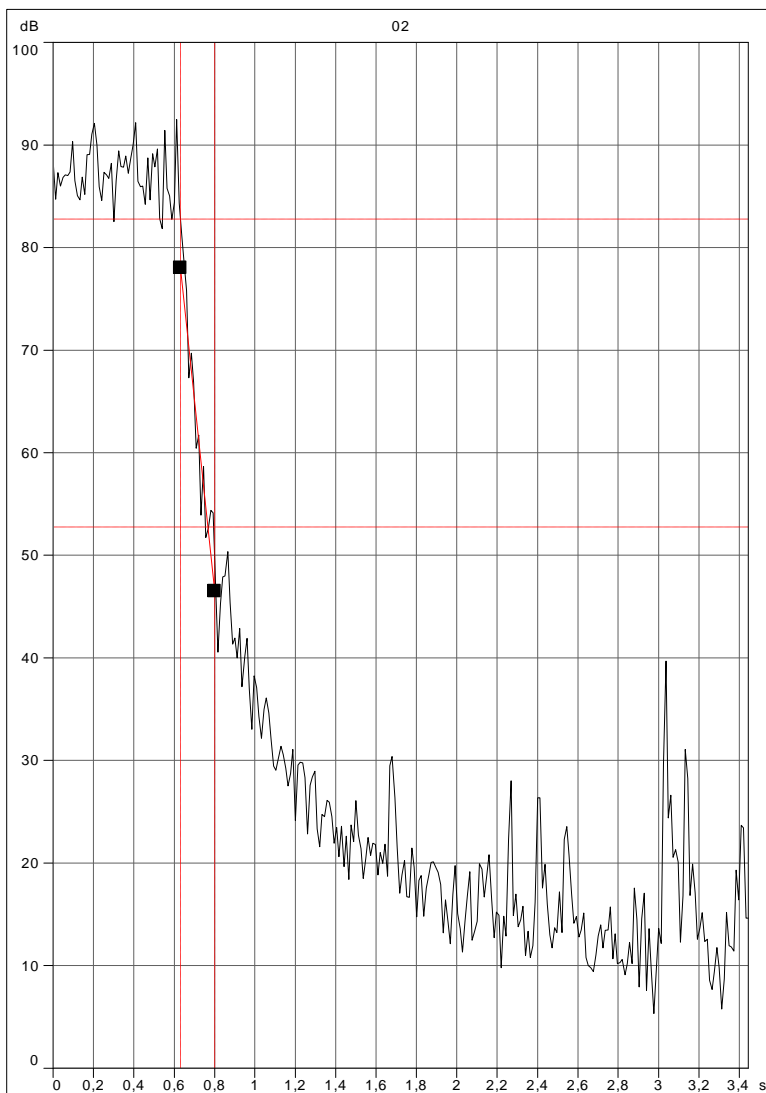
Dargestellter Wert: Mittelwert



Dargestellter Wert: Multispektrum Nachhallzeit



Dargestellter Wert: Abklingkurve Nachhallzeit bei 500 Hz



Messung (ab 315 Hz entspricht der gemessene Schallpegel dem Störgeräuschpegel, daher entspricht  $R'_w$  nicht dem tatsächlichen Wert.)

**Bau-Schalldämm-Maß nach ISO 140-4**  
**Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden**

Auftraggeber: Prüfdatum: 26.11.2009

Beschreibung von Aufbau und Lage des Trennbauteils und der Prüfanordnung, Meßrichtung:  
 30 cm Beton, 2 cm + 3 cm Trittschalldämmung, 25 cm Beton, 2 cm + 3 cm Trittschalldämmung, 20 cm Beton

Fläche S des Trennbauteils: 29,40 m<sup>2</sup>  
 Volumen des Senderraumes: m<sup>3</sup>  
 Volumen des Empfangsraumes: 316,00 m<sup>3</sup>

- - - - - der Frequenzbereich entsprechend  
 ————— der Kurve der Bezugswerte (ISO 717-1)

Frequenz f Hz	R' Terz dB
50	40,6
63	42,0
80	54,0
100	52,5
125	56,2
160	63,0
200	63,7
250	62,4
315	72,9
400	70,9
500	65,9
630	68,9
800	68,9
1000	68,4
1250	69,5
1600	68,1
2000	70,4
2500	69,5
3150	68,4
4000	65,9
5000	64,7

Bewertung nach ISO 717-1

$R'_w (C; C_{tr}) = 69 (-1; -3) \text{ dB}$        $C_{50-3150} = -2 \text{ dB}; C_{50-5000} = -2 \text{ dB}; C_{100-5000} = -2 \text{ dB};$   
 $C_{tr,50-3150} = -8 \text{ dB}; C_{tr,50-5000} = -8 \text{ dB}; C_{tr,100-5000} = -3 \text{ dB};$

Die Ermittlung basiert auf Gebäude-Messungen, die in Terzbändern gewonnen wurden

Nr. des Prüfberichtes: Name des Prüfinstituts:

Datum: 30.11.2009 Unterschrift:



Messung idealisiert (Anstieg ab 315 Hz nach Sharp idealisiert (30 dB / Oktave))

**Bau-Schalldämm-Maß nach ISO 140-4**  
**Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden**

Auftraggeber: Prüfdatum: 26.11.2009

Beschreibung von Aufbau und Lage des Trennbauteils und der Prüfanordnung, Meßrichtung:  
 Bauteil G  
 Aufbau des Bauteils:  
 30 cm Beton, 2 cm + 3 cm Trittschalldämmung, 25 cm Beton, 2 cm + 3 cm Trittschalldämmung, 20 cm Beton

Fläche S des Trennbauteils: 29,40 m<sup>2</sup>  
 Volumen des Senderraumes: m<sup>3</sup>  
 Volumen des Empfangsraumes: 316,00 m<sup>3</sup>

Frequenz f Hz	R' Terz dB
50	40,6
63	42,0
80	54,0
100	51,7
125	56,2
160	63,0
200	63,7
250	62,4
315	72,9
400	82,9
500	92,9
630	102,9
800	112,9
1000	122,9
1250	132,9
1600	142,9
2000	150,0
2500	150,0
3150	150,0
4000	150,0
5000	150,0

----- der Frequenzbereich entsprechend  
 der Kurve der Bezugswerte (ISO 717-1)

Bewertung nach ISO 717-1

$R'_w (C; C_{tr}) = 78 (-3; -9) \text{ dB}$        $C_{50-3150} = -5 \text{ dB}; C_{50-5000} = -4 \text{ dB}; C_{100-5000} = -2 \text{ dB};$   
 $C_{tr,50-3150} = -17 \text{ dB}; C_{tr,50-5000} = -17 \text{ dB}; C_{tr,100-5000} = -9 \text{ dB};$

Die Ermittlung basiert auf Gebäude-Messungen, die in Terzbändern gewonnen wurden

Nr. des Prüfberichtes: Name des Prüfinstituts:

Datum: 30.11.2009 Unterschrift:

## **Anlage 2: Ermittlung der Ergebnisse der analytischen Betrachtung**

---

<b><u>Inhalt</u></b>	<b><u>Seite</u></b>
<b>A 2.1 Analytische Betrachtung des einschaligen homogenen Wandaufbaus</b>	<b>A2-1</b>
A 2.1.1 Schalldämmeigenschaften Bauteil A nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989	A2-4
A 2.1.2 Schalldämmeigenschaften Bauteil B nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989	A2-5
A 2.1.3 Schalldämm – Eigenschaften nach DIN 12354 - 1 Bauteil A	A2-6
A 2.1.4 Schalldämmeigenschaften nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil B	A2-9
A 2.1.5 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil A	A2-13
A 2.1.6 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil B	A2-17
A 2.1.7 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil A	A2-21
A 2.1.8 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil A	A2-22
<b>A 2.2 Analytische Betrachtung des einschaligen Wandaufbaus zuzüglich einer biegeweichen Vorsatzschalenkonstruktion</b>	<b>A2-23</b>
A 2.2.1 Schalldämmeigenschaften Bauteil C nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989 [6]	A2-25
A 2.2.2 Schalldämmeigenschaften Bauteil D nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989 [6]	A2-27
A 2.2.3 Schalldämm – Eigenschaften nach DIN 12354 – 1 [7] Bauteil C	A2-28
A 2.2.4 Schalldämmeigenschaften nach DIN EN 12354 – 1 [7] Bauteil D	A2-32
A 2.2.5 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil C	A2-36
A 2.2.6 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil D	A2-40
A 2.2.7 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil C	A2-41
A 2.2.8 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil D	A2-42

<b>A 2.3</b>	<b>Analytische Betrachtung des zweischaligen homogenen Wandaufbaus</b>	A2-43
A 2.3.1	Schalldämmeigenschaften Bauteil E nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989 [6]	A2-45
A 2.3.2	Schalldämmeigenschaften Bauteil F nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989 [6]	A2-46
A 2.3.3	Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil E	A2-47
A 2.3.4	Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil F	A2-51
A 2.3.5	Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil E	A2-54
A 2.3.6	Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil F	A2-55
<b>A 2.4</b>	<b>Analytische Betrachtung des dreischaligen Wandaufbaus nach Sharp [22]</b>	A2-56

## A 2.1 Analytische Betrachtung des einschaligen homogenen Wandaufbaus

Folgende Bauteile werden betrachtet:

- Bauteil A: Trennwand 24 cm Mauerwerk
- Bauteil B: Trennwand 20 cm Stahlbeton

### Bauteil A

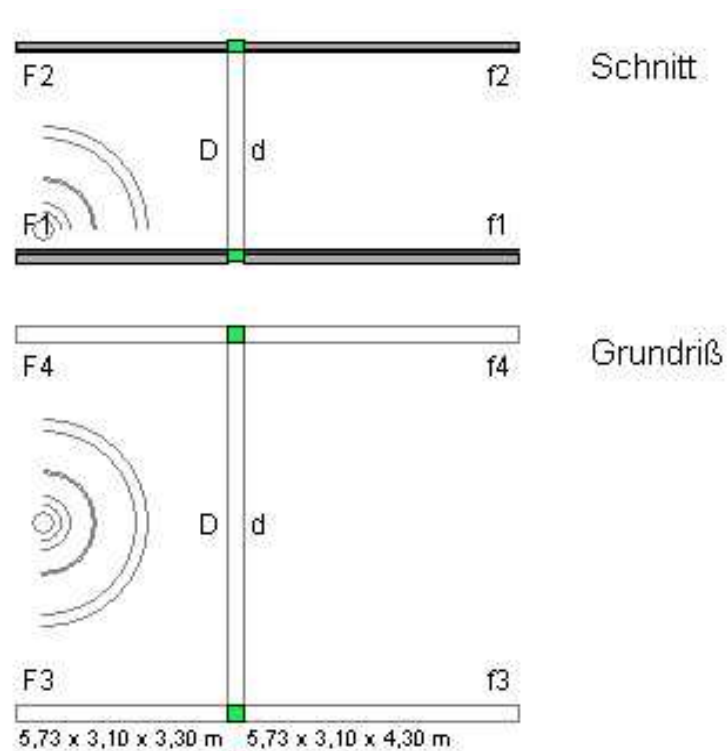


Abbildung A 2.1.1: Raumgeometrien des Empfangs- und Senderraums Bauteil A

Abmessungen Senderaum:

- Breite: 5,73 m
- Höhe: 3,10 m
- Tiefe: 3,30 m

Abmessungen Empfangsraum:

- Breite: 5,73 m
- Höhe: 3,10 m
- Tiefe: 4,30 m

**Bauteil B:**

Raumgeometrie:

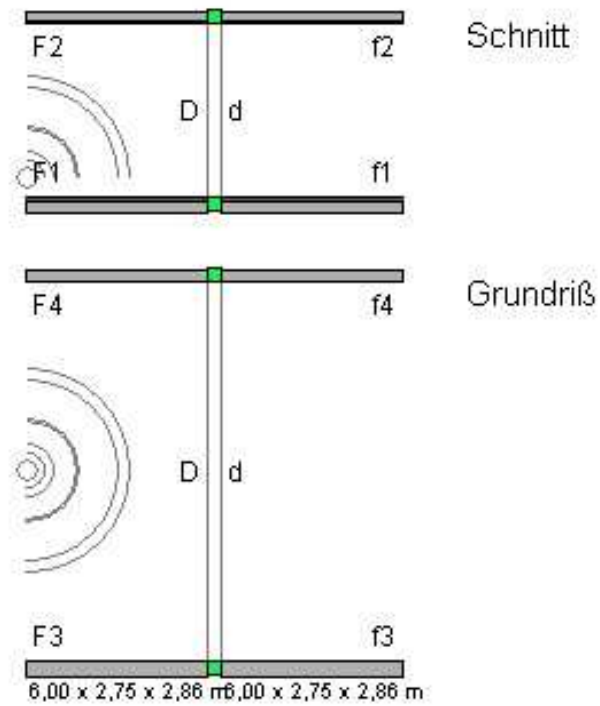


Abbildung A 2.1.2: Raumgeometrien des Empfangs- und Senderraums Bauteil B

Abmessungen Senderraum: Breite: 6,00 m

Höhe: 2,75 m

Tiefe: 2,86 m

Abmessungen Empfangsraum: Breite: 6,00 m

Höhe: 2,75 m

Tiefe: 2,86 m

**Aufbau der betrachteten Trennwände zuzüglich der flankierenden Bauteile****Bauteil A**

Aufbau des Bauteils von innen nach außen:

**Trennwand**      24 cm Mauerwerk mit der Rohdichte  $\rho = 1800 \text{ kg /m}^3$

**flankierende Bauteile**

**Außenwand**      24 cm Mauerwerk der Rohdichte  $\rho = 1800 \text{ kg /m}^3$

**Trennwand**      24 cm Mauerwerk mit der Rohdichte  $\rho = 1800 \text{ kg /m}^3$

**Fußboden**      5 cm Zementestrich

2 cm Trittschalldämmung

20 cm Beton

**Decke**            analog dem Fußbodenaufbau

**Bauteil B**

Aufbau des Bauteils von innen nach außen:

**Trennwand**      20 cm Stahlbeton mit der Rohdichte  $\rho = 2400 \text{ kg /m}^3$

**flankierende Bauteile**

**Außenwand**      20 cm Stahlbeton

**Trennwand**      20 cm Stahlbeton

**Fußboden**      5 cm Zementestrich

2 cm Trittschalldämmung

20 cm Stahlbeton

**Decke**            analog dem Fußbodenaufbau

**A 2.1.1 Schalldämmeigenschaften Bauteil A nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989**

Ermittlung der flächenbezogenen Masse der Bauteile nach [6] (3.16):  $m' = 1720 \text{ kg} / \text{m}^3 * 0,24 \text{ m}$

$$m' = 412,8 \text{ kg} / \text{m}^2$$

Die Rohdichte des Bauteils wird nach [6] Tabelle 3, Zeile 3, Spalte 2 abgemindert. Somit ergibt sich nach [6] Tabelle 1, Zeile 21 ein bewertetes Schalldämm – Maß von  $R_{w,R} = 53 \text{ dB}$ .

**Ermittlung des Korrekturwertes  $K_{L,1}$ :**

Zur Berechnung der mittleren flächenbezogenen Masse müssen die flächenbezogenen Massen der flankierenden Bauteile nach (3.16) bestimmt werden.

Außenwand:  $m' = 1720 \text{ kg} / \text{m}^3 * 0,24 \text{ m}$   
 $= 412,8 \text{ kg} / \text{m}^2$

Trennwand:  $m' = 412,8 \text{ kg} / \text{m}^2$

Fußboden: Aufgrund der unter dem Estrich befindlichen Entkoppelung (Trittschalldämmung) wird dieses Bauteil nicht für die Ermittlung der mittleren flächenbezogenen Masse betrachtet.

Decke:  $m' = 2300 \text{ kg} / \text{m}^3 * 0,24 \text{ m}$   
 $= 552,0 \text{ kg} / \text{m}^2$

Der Estrich wird bei der Berechnung aufgrund der Entkoppelung (Trittschalldämmung) nicht für die Ermittlung der mittleren flächenbezogenen Masse betrachtet.

Die mittlere flächenbezogene Masse berechnet sich wie folgt:

$$m'_{L,mittel} = (m'_{Außenwand} + m'_{Trennwand} + m'_{Decke}) / 3$$

$$= (412,8 \text{ kg} / \text{m}^2 + 412,8 \text{ kg} / \text{m}^2 + 552,0 \text{ kg} / \text{m}^2) / 3$$

$$= 459,2 \text{ kg} / \text{m}^2$$

Nach [6] Tabelle 13, Zeile 1, Spalte 2 ist bei  $m'_{L,mittel} \geq 400 \text{ kg} / \text{m}^2$  der Korrekturwert  $K_{L,1} = 0 \text{ dB}$

Der Korrekturwert  $K_{L,2}$  ist aufgrund keiner biegeweichen Vorsatzschale:  $K_{L,2} = 0 \text{ dB}$ .

Damit ergibt sich ein bewertetes Schalldämm – Maß nach (3.16) von:

$$\begin{aligned} R'_{w,R} &= R_{w,R} + K_{L,1} + K_{L,2} \\ &= 53 \text{ dB} + 0 \text{ dB} + 0 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\underline{R'_{w,R} = 53 \text{ dB}}$$

### A 2.1.2 Schalldämmeigenschaften Bauteil B nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989

Analog wie bei Bauteil A wird die flächenbezogene Masse nach (3.16) ermittelt. Zu beachten ist das mit einer Rohdichte von Stahlbeton nach [6] Abschnitt 2.2.2.1 von  $2300 \text{ kg / m}^3$  zu rechnen ist.

Trennwand:  $m' = 2300 \text{ kg / m}^3 * 0,20 \text{ m}$   
 $= 460 \text{ kg / m}^2$

nach Tabelle 1 des Beiblatt 1 der DIN 4109 [6] Zeile 21 ergibt sich damit ein bewertetes Schalldämm – Maß von  $R_{w,R} = 54 \text{ dB}$ .

Ermittlung des Korrekturwertes  $K_{L,1}$ :

Außenwand:  $m' = 2300 \text{ kg / m}^3 * 0,20 \text{ m}$   
 $= 460 \text{ kg / m}^2$

Trennwand: analog wie Außenwand

Fußboden: Aufgrund der unter dem Estrich befindlichen Entkoppelung (Trittschalldämmung) wird dieses Bauteil nicht für die Ermittlung der mittleren flächenbezogenen Masse betrachtet.

Decke:  $m' = 2300 \text{ kg / m}^3 * 0,20 \text{ m}$   
 $= 460 \text{ kg / m}^2$

Der Estrich wird bei der Berechnung nicht für die Ermittlung der mittleren flächenbezogenen Masse betrachtet.

Die mittlere flächenbezogene Masse berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned} m'_{L,mittel} &= (460 \text{ kg / m}^2 + 460 \text{ kg / m}^2 + 460 \text{ kg / m}^2) / 3 \\ &= 460 \text{ kg / m}^2 \end{aligned}$$



Nach Tabelle 13, Zeile 1, Spalte 2 ist bei  $m'_{L,mittel} \geq 400 \text{ kg / m}^2$  der Korrekturwert  $K_{L,1} = 0 \text{ dB}$

Der Korrekturwert  $K_{L,2}$  ist aufgrund keiner biegeweichen Vorsatzschale:  $K_{L,2} = 0 \text{ dB}$ .

Damit ergibt sich ein bewertetes Schalldämm – Maß nach (3.17) von

$$R'_{w,R} = 54 \text{ dB} + 0 \text{ dB} + 0 \text{ dB}$$

$$\underline{R'_{w,R} = 54 \text{ dB}}$$

### A 2.1.3 Schalldämm – Eigenschaften nach DIN 12354 - 1 Bauteil A

Für das Trennende Bauteil A (KS Mauerwerk) werden nachfolgende Werte für die weitere Berechnung verwendet.

Tabelle A 2.1.1 Bauteileigenschaften des Bauteils A

$t$ [m]	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$m'$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$l_1$ [m]	$l_2$ [m]	$F$ [m <sup>2</sup> ]	$R_{w'}$ [dB]
0,24	1800	432	5,73	3,10	17,6	56,8

Nach Gleichung [7] B 5 (3.20) ergibt sich für Bauteile mit  $m' > 150 \text{ kg / m}^2$  folgendes bewertetes Schalldämm – Maß:

$$R_w = 37,5 \lg (m' / m'_0) - 42 \text{ dB}$$

$$R_w = 37,5 \lg (432 \text{ kg / m}^2 / 1 \text{ kg / m}^2) - 42 \text{ dB}$$

$$R_w = 56,8 \text{ dB}$$

In nachfolgender Tabelle sind die ermittelten Werte für die flankierenden Bauteile dargestellt:

Tabelle A 2.1.2 Eigenschaften der flankierenden Bauteile

flankierendes Bauteil	$t$ [m]	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$m'$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$l_1$ [m]	$l_2$ [m]	$F$ [m <sup>2</sup> ]	$R_w'$ [dB]
Trenndecke	0,20	2400	480	5,73	3,30	18,9	58,5
Fußboden *)	0,20	2400	480	5,73	4,30	24,6	58,5
Trennwand KS	0,24	1800	432	3,10	3,30	10,2	56,8
Trennwand KS	0,24	1800	432	3,10	3,30	10,2	56,8

Der Aufbau der Bauteile ist im Sende- und Empfangsraum gleich.

\*) Der Fußboden weist einen Zementestrich auf Trittschalldämmung mit folgenden Eigenschaften auf:

Tabelle A 2.1.3 Eigenschaften des Zementestrich auf Trittschalldämmung

Bauteil	$m'_1$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$m'_2$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$s'$ [MN/m <sup>3</sup> ]	$f_0$ [Hz]	$\Delta R_w$ [dB]
Vorsatzschale Zementestrich	460	100	40	111	1,6

Die Resonanzfrequenz ermittelt sich aus der der Gleichung D.1 [7] (3.21)

$$f_R = 111,65 \text{ Hz}$$

Stoßstellendämm – Maß für Stoßstellen:

Die Abhängigkeit der flächenbezogenen Masse  $M$  der mit den Stoßstellen verbundenen Bauteile wird nach [7] Gleichung E.2 (3.2.2) ermittelt.

Folgende Werte wurden ermittelt:

Tabelle A 2.1.4 Ergebnisse der Stoßstellendämm - Maße

Bauteil Übertragungsweg ij (flankierende Bauteile)	$m_i$ [kg / m <sup>2</sup> ]	Stoßstelle bildendens Bauteils	$m_{ji}$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$M$
Fußboden F 1	480	Trennwand KS Mauerwerk	432	- 0,046
Decke F 2	480	Trennwand KS Mauerwerk	432	- 0,046
Trennwand F 3	432	Trennwand KS Mauerwerk	432	0,000
Trennwand F 4	432	Trennwand KS Mauerwerk	432	0,000

Das Stoßstellendämm – Maß wird nach den Gleichungen E 3 bis E 9 der DIN 12354 – 1 ermittelt (3.23 – 3.26). Die Übertragungswege sind der Darstellung der Raumgeometrie zu entnehmen.

Somit ergeben sich folgende Werte:

Tabelle A 2.1.5 Ermittlung der Stoßstellendämm – Maße der Übertragungswege

Flankierendes Bauteil	$M$ [-]	Stoßstellendämm – Maße $K$ der Übertragungswege								
		$K_{Ff}$			$K_{Fd}$			$K_{Df}$		
		Gleichung	Übertragungsweg	[dB]	Gleichung	Übertragungsweg	[dB]	Gleichung	Übertragungsweg	[dB]
Fußboden F1	- 0,046	E3 a	F1 – f1	7,9	E3 b	F1 – d	8,7	E3 b	D – f1	8,7
Fußboden F 2	- 0,046	E3 a	F2 - f2	7,9	E3 b	F2 - d	8,7	E3 b	D – f2	8,7
Trennwand F 3	0,000	E4 a	F3 – f3	5,7	E4 b	F3 - d	5,7	E4 b	D – f3	5,7
Trennwand F 4	0,000	E4 a	F4 – f4	5,7	E4 b	F4 - d	5,7	E4 b	D – f4	5,7

Die Flankendämm – Maße werden nach den Gleichungen 28 a [7] ermittelt (3.27 – 3.29).

Folgende Flankendämm – Maße wurden ermittelt:

Tabelle A 2.1.6 Ermittelte Flankendämm – Maße der flankierenden Bauteile

Bauteil	$l_f$ [m]	$R_{Ff,w}$ [dB]	$R_{Fd,w}$ [dB]	$R_{Df,w}$ [dB]
Fußboden F1	5,73	73,8	72,9	72,9
Decke F 2	5,73	71,4	71,3	71,3
Trennwand F 3	3,10	70,1	70,1	70,1
Trennwand F 4	3,10	70,1	70,1	70,1

Abschließend ermittelt sich das Bauschalldämm – Maß nach (3.18) wie folgt:

$$R'_w = 10 * \lg( 10^{R_{Dd, w} / 10} + \sum 10^{-R_{Ff, w} / 10} + \sum 10^{-R_{Fd, w} / 10} + \sum 10^{-R_{Df, w} / 10} )$$

$$R'_w = 10 * \lg( 10^{5,68} + (10^{-7,38} + 10^{-7,14} + 10^{-7,01} + 10^{-7,01}) + (10^{-7,29} + 10^{-7,13} + 10^{-7,01} + 10^{-7,01}) + (10^{-7,29} + 10^{-7,13} + 10^{-7,01} + 10^{-7,01}) )$$

$$\underline{R'_w = 55,2 \text{ dB}}$$

### A 2.1.4 Schalldämmeigenschaften nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil B

Für das Trennende Bauteil B (Beton) werden nachfolgende Werte für die weitere Berechnung verwendet.

Tabelle A 2.1.7 Bauteileigenschaften der Bauteils B

$t$ [m]	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$m'$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$l_1$ [m]	$l_2$ [m]	$F$ [m <sup>2</sup> ]	$R'_w$ [dB]
0,20	2400	508	6,00	2,75	16,5	59,5

Nach Gleichung B 5 [7] (3.20) ergibt sich für Bauteile mit  $m' > 150 \text{ kg / m}^2$  folgendes bewertetes Schalldämm – Maß:

$$R_w = 37,5 \lg (m' / m'_0) - 42 \text{ dB}$$

$$R_w = 37,5 \lg (508 \text{ kg / m}^2 / 1 \text{ kg / m}^2) - 42 \text{ dB}$$

$$R_w = 59,5 \text{ dB}$$

In nachfolgender Tabelle sind die ermittelten Werte für die flankierenden Bauteile dargestellt:

Tabelle A 2.1.8 Eigenschaften der flankierenden Bauteile

flankierendes Bauteil	$t$ [m]	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$m'$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$l_1$ [m]	$l_2$ [m]	$F$ [m <sup>2</sup> ]	$R'_w$ [dB]
Trenndecke	0,20	2400	480	6,00	2,86	17,2	58,5
Fußboden *)	0,20	2400	480	6,00	2,86	17,2	58,5
Trennwand Beton	0,20	2400	508	2,75	2,86	7,9	59,5
Trennwand Beton	0,20	2400	508	2,75	2,86	7,9	59,5

Der Aufbau der Bauteile ist im Sende- und Empfangsraum gleich.

\*) Der Fußboden weist einen Zementestrich auf Trittschalldämmung mit folgenden Eigenschaften siehe Bauteil A auf:

**Die Resonanzfrequenz ermittelt sich aus der der Gleichung D.1 der DIN 12354 – 1 (3.21)**

$$f_R = 111,65 \text{ Hz}$$

Damit ergibt sich die Gleichung zur Ermittlung des Luftschallverbesserungsmaß  $\Delta R_w = 1,6 \text{ dB}$  nach Tabelle D.3 [7]

Stoßstellendämm – Maß für Stoßstellen:

Die Abhängigkeit der flächenbezogenen Masse  $M$  der mit den Stoßstellen verbundenen Bauteile wird nach Gleichung E.2 der DIN 12354 – 1 [7] (3.22) ermittelt.

Tabelle A 2.1.9 Ergebnisse der Stoßstellen - Maße

Bauteil Übertragungsweg ij (flankierende Bauteile)	$m_i$ [kg / m <sup>2</sup> ]	Stoßstelle bildenens Bauteils	$m_{ij}$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$M$
Fußboden F 1	480	Trennwand Beton	508	0,025
Decke F 2	480	Trennwand Beton	508	0,025
Trennwand F 3	508	Trennwand Beton	508	0,000
Trennwand F 4	508	Trennwand Beton	508	0,000

Die Übertragungswege sind der Darstellung der Raumgeometrie zu entnehmen.

Somit ergeben sich folgende Werte:

Tabelle A 2.1.10 Ermittlung der Stoßstellendämm – Maße der Übertragungswege

Flankierendes Bauteil	$M$ [-]	Stoßstellendämm – Maße $K$ der Übertragungswege								
		$K_{Ff}$			$K_{Fd}$			$K_{Df}$		
		Gleichung	Übertragungsweg	[dB]	Gleichung	Übertragungsweg	[dB]	Gleichung	Übertragungsweg	[dB]
Fußboden F1	0,025	E3 a	F1 – f1	9,1	E3 b	F1 – d	8,7	E3 b	D – f1	8,7
Fußboden F 2	0,025	E3 a	F2 - f2	9,1	E3 b	F2 - d	8,7	E3 b	D – f2	8,7
Trennwand F 3	0,000	E4 a	F3 – f3	5,7	E4 b	F3 - d	5,7	E4 b	D – f3	5,7
Trennwand F 4	0,000	E4 a	F4 – f4	5,7	E4 b	F4 - d	5,7	E4 b	D – f4	5,7

Die Flankendämm – Maße werden nach den Gleichungen 28 a der DIN 12354 – 1 (3.27 – 3.29) ermittelt.

Folgende Flankendämm – Maße wurden ermittelt:

Tabelle A 2.1.11 Ermittelte Flankendämm – Maße der flankierenden Bauteile

Bauteil	$l_f$ [m]	$R_{Ff,w}$ [dB]	$R_{Fd,w}$ [dB]	$R_{Df,w}$ [dB]
Fußboden F1	6,00	74,5	73,7	73,7
Decke F 2	6,00	72,1	72,1	72,1
Trennwand F 3	2,75	73,0	73,0	73,0
Trennwand F 4	2,75	73,0	73,0	73,0

Abschließend ermittelt sich das Bauschalldämm – Maß nach (3.18) wie folgt:

$$R'_{w'} = 10 * \lg( 10^{R_{Dd, w} / 10} + \sum 10^{-R_{Ff, w} / 10} + \sum 10^{-R_{Fd, w} / 10} + \sum 10^{-R_{Df, w} / 10}$$

$$\underline{R'_{w'} = 57,6 \text{ dB}}$$

**A 2.1.5 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil A****Prüfstandbedingungen**

In nachfolgender Tabelle sind die Eigenschaften von Bauteil A dargestellt:

<i>Schalldämm Maß KS einschlig Laborbedingungen (<math>\eta_{tot,lab}</math>)</i>				
<i>Schale</i>	<b>1</b>			
<i>Dicke</i>	<b>0,24</b>			[m]
<i>Dichte</i>	<b>1800</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>m'</i>	<b>432</b>			[kg/m <sup>2</sup> ]
<i>Dichte Luft</i>	<b>1,18</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>l<sub>1</sub></i>	<b>5,73</b>			[m]
<i>l<sub>2</sub></i>	<b>3,1</b>			[m]
<i>c<sub>0</sub></i>	<b>343</b>			[m/s]
<i>c<sub>L</sub></i>	<b>2600</b>	<b>nach DIN 12354 - 1</b>		[m/s]
<i>S</i>	<b>17,763</b>			[m <sup>2</sup> ]
<i><math>\eta_{int}</math></i>	<b>0,015</b>			

<i>f<sub>c</sub></i>	<b>104,74</b>	[Hz]
<i>f<sub>11</sub></i>	<b>37,77</b>	[Hz]
<i>f<sub>ref</sub></i>	<b>1000</b>	[Hz]
=>	$f_{11} < f_c / 2$	

In nachfolgender Tabelle sind die ermittelten Schalldämm – Eigenschaften von Bauteil A dargestellt.

<i>f</i> [Hz]	<i>k<sub>0</sub></i>	<i>lambda</i>	<i>Abstrahlgrad</i> $\sigma_f$	<i>Abstrahlgrad</i> $\sigma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\lambda$	<i>Bemerkung</i>
63	1,2	-0,1	0,9	0,8	0,2	0,0	0,8	$f < f_c$
80	1,5	-0,1	1,0	0,8	0,2	0,0	0,9	
100	1,8	-0,1	1,1	0,8	0,2	0,0	1,0	
125	2,3	-0,1	1,2	2,5				$f > f_c \Rightarrow \sigma = \sigma_1$
160	2,9	-0,1	1,3	1,7				
200	3,7	-0,1	1,4	1,4				
250	4,6	-0,1	1,5	1,3				
315	5,8	-0,1	1,7	1,2				
400	7,3	-0,1	1,8	1,2				
500	9,2	-0,1	1,9	1,1				
630	11,5	-0,1	2,0	1,1				
800	14,7	-0,1	2,1	1,1				
1000	18,3	-0,1	2,2	1,1				
1250	22,9	-0,1	2,3	1,0				
1600	29,3	-0,1	2,5	1,0				
2000	36,6	-0,1	2,6	1,0				
2500	45,8	-0,1	2,7	1,0				
3150	57,7	-0,1	2,8	1,0				
4000	73,3	-0,1	2,9	1,0				
5000	91,6	-0,1	3,0	1,0				



$f$ [Hz]	$\eta_{tot,lab}$	$\tau$	Bemerkung $\tau$	$R$ [dB]
63	0,12722038	0,000291172	$f < f_c$	35,4
80	0,114585708	0,000181562		37,4
100	0,104072165	8,13824E-05	$f ? f_c$	40,9
125	0,094668566	0,000488404	$f > f_c$	33,1
160	0,085417729	0,000121111		39,2
200	0,077983532	4,92488E-05		43,1
250	0,071334183	2,25964E-05		46,5
315	0,065186479	1,07603E-05		49,7
400	0,059536082	5,20296E-06		52,8
500	0,054834283	2,70071E-06		55,7
630	0,0504872	1,39032E-06		58,6
800	0,046491766	7,07373E-07		61,5
1000	0,043167092	3,7866E-07		64,2
1250	0,040193413	2,03456E-07		66,9
1600	0,037268041	1,02579E-07		69,9
2000	0,034917142	5,52818E-08		72,6
2500	0,032814433	2,97887E-08		75,3
3150	0,030870358	1,56878E-08		78,0
4000	0,029083546	8,0732E-09		80,9
5000	0,027596706	4,33288E-09		83,6

**Baubedingungen**

In nachfolgender Tabelle sind die Eigenschaften von Bauteil A dargestellt:

<i>Schalldämm Maß KS einschalig</i>				
<i>Schale</i>	<b>1</b>			
<i>Dicke</i>	<b>0,24</b>			[m]
<i>Dichte</i>	<b>1800</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>m'</i>	<b>432</b>			[kg/m <sup>2</sup> ]
<i>Dichte Luft</i>	<b>1,18</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>l<sub>1</sub></i>	<b>5,73</b>			[m]
<i>l<sub>2</sub></i>	<b>3,1</b>			[m]
<i>c<sub>0</sub></i>	<b>343</b>			[m/s]
<i>c<sub>L</sub></i>	<b>2600</b>	<b>nach DIN 12354 - 1</b>		[m/s]
<i>S</i>	<b>17,763</b>			[m <sup>2</sup> ]
<i>η<sub>int</sub></i>	<b>0,015</b>			

<i>f<sub>c</sub></i>	<b>104,74</b>	[Hz]
<i>f<sub>11</sub></i>	<b>37,77</b>	[Hz]
<i>f<sub>ref</sub></i>	<b>1000,00</b>	[Hz]
=>	<i>f<sub>11</sub> &lt; f<sub>c</sub>/2</i>	

In nachfolgender Tabelle sind die Körperschall – Absorptionsgrade der Flankierenden Bauteile von Bauteil A dargestellt:

<i>Körperschall - Absorptionsgrad</i>									
<i>Flankierendes Bauteil</i>	<i>t</i>	<i>c<sub>L</sub></i>	<i>f<sub>c</sub></i>	<i>K<sub>Ff</sub></i>	<i>K<sub>Fd</sub></i>	<i>K<sub>Df</sub></i>	<i>a<sub>k</sub></i>	<i>l<sub>k</sub></i>	<i>I<sub>kak</sub></i>
<b>Fußboden</b>	<b>0,20</b>	<b>3500</b>	<b>93,37</b>	<b>8,4</b>	<b>8,7</b>	<b>8,7</b>	<b>0,34</b>	<b>5,73</b>	<b>1,95</b>
<b>Decke</b>	<b>0,20</b>	<b>3500</b>	<b>93,37</b>	<b>8,4</b>	<b>8,7</b>	<b>8,7</b>	<b>0,34</b>	<b>5,73</b>	<b>1,95</b>
<b>Trennwand</b>	<b>0,24</b>	<b>2600</b>	<b>104,74</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>0,50</b>	<b>3,10</b>	<b>1,56</b>
<b>Trennwand</b>	<b>0,24</b>	<b>2600</b>	<b>104,74</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>0,50</b>	<b>3,10</b>	<b>1,56</b>

In nachfolgender Tabelle sind die ermittelten Schalldämm – Eigenschaften von Bauteil A dargestellt.

$f$ [Hz]	$k_0$	$\lambda$	Abstrahlgrad $\sigma_f$	Abstrahlgrad $\sigma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\lambda$	Bemerkung
63	1,2	-0,1	0,9	0,8	0,2	0,0	0,8	$f < f_c$
80	1,5	-0,1	1,0	0,8	0,2	0,0	0,9	
100	1,8	-0,1	1,1	0,8	0,2	0,0	1,0	
125	2,3	-0,1	1,2	2,5				$f > f_c \Rightarrow \sigma = \sigma_1$
160	2,9	-0,1	1,3	1,7				
200	3,7	-0,1	1,4	1,4				
250	4,6	-0,1	1,5	1,3				
315	5,8	-0,1	1,7	1,2				
400	7,3	-0,1	1,8	1,2				
500	9,2	-0,1	1,9	1,1				
630	11,5	-0,1	2,0	1,1				
800	14,7	-0,1	2,1	1,1				
1000	18,3	-0,1	2,2	1,1				
1250	22,9	-0,1	2,3	1,0				
1600	29,3	-0,1	2,5	1,0				
2000	36,6	-0,1	2,6	1,0				
2500	45,8	-0,1	2,7	1,0				
3150	57,7	-0,1	2,8	1,0				
4000	73,3	-0,1	2,9	1,0				
5000	91,6	-0,1	3,0	1,0				

$f$ [Hz]	$\eta_{tot}$	$\tau$	Bemerkung $\tau$	$R$ [dB]
63	0,18793246	0,000209456	$f < f_c$	36,8
80	0,153094073	0,000142686		38,5
100	0,136657417	6,19772E-05	$f ? f_c$	42,1
125	0,126080082	0,000366724	$f > f_c$	34,4
160	0,109373213	9,4585E-05		40,2
200	0,097150124	3,95326E-05		44,0
250	0,086526137	1,8629E-05		47,3
315	0,076848229	9,12739E-06		50,4
400	0,068035477	4,55298E-06		53,4
500	0,060747443	2,43783E-06		56,1
630	0,054038917	1,29894E-06		58,9
800	0,047894598	6,86654E-07		61,6
1000	0,042795757	3,81945E-07		64,2
1250	0,038245026	2,13822E-07		66,7
1600	0,033776645	1,13182E-07		69,5
2000	0,030191474	6,39347E-08		71,9
2500	0,026988939	3,62186E-08		74,4
3150	0,024031376	2,01523E-08		77,0
4000	0,021315834	1,10152E-08		79,6
5000	0,019058165	6,27411E-09		82,0

**A 2.1.6 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil B****Prüfstandbedingungen**

In nachfolgender Tabelle sind die Eigenschaften von Bauteil B dargestellt:

<i>Schalldämm Maß Beton einschalig Laborbedingungen (<math>\eta_{tot,lab}</math>)</i>				
<i>Schale</i>	<b>1</b>			
<i>Dicke</i>	<b>0,2</b>			[m]
<i>Dichte:</i>	<b>2400</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>m'</i>	<b>480</b>			[kg/m <sup>2</sup> ]
<i>Dichte Luft</i>	<b>1,18</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>l<sub>1</sub></i>	<b>6</b>			[m]
<i>l<sub>2</sub></i>	<b>2,75</b>			[m]
<i>c<sub>0</sub></i>	<b>343</b>			[m/s]
<i>c<sub>L</sub></i>	<b>3500</b>	<b>nach DIN 12354 - 1</b>		[m/s]
<i>S</i>	<b>16,5</b>			[m <sup>2</sup> ]
<i><math>\eta_{int}</math></i>	<b>0,006</b>			

In nachfolgender Tabelle ist die Ermittlung des Absorptionsgrades dargestellt:

<i>Ermittlung Abstrahlgrad</i>				
<i>f [Hz]</i>	<i>Abstrahlgrad</i> $\sigma_1$	<i>Abstrahlgrad</i> $\sigma_2$	<i>Abstrahlgrad</i> $\sigma_3$	
<b>63</b>		<b>12,12244898</b>	<b>0,794421117</b>	<b><math>f &lt; f_c</math></b>
<b>80</b>		<b>15,39358601</b>	<b>0,895211182</b>	
<b>100</b>	<b>3,88432921</b>		<b>1,000876529</b>	<b><math>f &gt; f_c</math></b>
<b>125</b>	<b>1,988019624</b>		<b>1,119013978</b>	
<b>160</b>	<b>1,549645384</b>		<b>1,266019795</b>	
<b>200</b>	<b>1,369556075</b>		<b>1,415453162</b>	
<b>250</b>	<b>1,263384694</b>		<b>1,582524744</b>	
<b>315</b>	<b>1,192183703</b>		<b>1,77637962</b>	
<b>400</b>	<b>1,142152903</b>		<b>2,001753058</b>	
<b>500</b>	<b>1,108884928</b>		<b>2,238027956</b>	
<b>630</b>	<b>1,083511936</b>		<b>2,51218015</b>	
<b>800</b>	<b>1,064019631</b>		<b>2,830906323</b>	
<b>1000</b>	<b>1,050232587</b>		<b>3,165049489</b>	
<b>1250</b>	<b>1,039580674</b>		<b>3,538632904</b>	
<b>1600</b>	<b>1,030521379</b>		<b>4,003506116</b>	
<b>2000</b>	<b>1,024193558</b>		<b>4,476055912</b>	
<b>2500</b>	<b>1,019214378</b>		<b>5,004382646</b>	
<b>3150</b>	<b>1,015158836</b>		<b>5,617405588</b>	
<b>4000</b>	<b>1,011879922</b>		<b>6,330098977</b>	
<b>5000</b>	<b>1,009470067</b>		<b>7,077265809</b>	

In nachfolgender Tabelle sind die ermittelten Schalldämm – Eigenschaften von Bauteil A dargestellt.

$f$ [Hz]	$k_0$	$\lambda$	Abstrahlgrad $\sigma_f$	Abstrahlgrad $\sigma$		$\eta_{tot,lab}$	$\tau$	Bemerkung $\tau$	$R$ [dB]
63	1,2	-0,1	0,8	0,11	$f < f_c$	0,13068931	3,32751E-05	$f < f_c$	44,8
80	1,5	-0,1	0,9	0,12		0,11665079	2,38687E-05		46,2
100	1,8	-0,1	1,1	0,14	$f > f_c$	0,10496907	1,24628E-06	$f ? f_c$	59,0
125	2,3	-0,1	1,2	0,15		0,09452063	1,31283E-06	$f > f_c$	58,8
160	2,9	-0,1	1,3	0,17		0,08424192	8,99055E-07		60,5
200	3,7	-0,1	1,4	1,4		0,0759817	3,26048E-05		44,9
250	4,6	-0,1	1,5	1,3		0,06859354	1,57358E-05		48,0
315	5,8	-0,1	1,6	1,2		0,06176275	7,77944E-06		51,1
400	7,3	-0,1	1,7	1,1		0,05548454	3,88166E-06		54,1
500	9,2	-0,1	1,9	1,1		0,05026031	2,06804E-06		56,8
630	11,5	-0,1	2,0	1,1		0,04543022	1,092E-06		59,6
800	14,7	-0,1	2,1	1,1		0,04099085	5,69984E-07		62,4
1000	18,3	-0,1	2,2	1,1		0,03729677	3,12479E-07		65,1
1250	22,9	-0,1	2,3	1,0		0,03399268	1,71997E-07		67,6
1600	29,3	-0,1	2,4	1,0		0,03074227	8,91125E-08		70,5
2000	36,6	-0,1	2,5	1,0		0,02813016	4,92518E-08		73,1
2500	45,8	-0,1	2,7	1,0		0,02579381	2,72343E-08		75,6
3150	57,7	-0,1	2,8	1,0		0,02363373	1,47409E-08		78,3
4000	73,3	-0,1	2,9	1,0		0,02164838	7,8086E-09		81,1
5000	91,6	-0,1	3,0	1,0		0,01999634	4,30771E-09		83,7

$f_c$	<b>93,37</b>	[Hz]
$f_{11}$	<b>50,40</b>	[Hz]
$f_{ref}$	<b>1000</b>	[Hz]
=>	$f_{11} > f_c/2$	

**Baubedingungen**

In nachfolgender Tabelle sind die Eigenschaften von Bauteil B dargestellt:

<i>Schalldämm Maß Beton einschalig</i>				
<i>Schale</i>	<b>1</b>			
<i>Dicke</i>	<b>0,2</b>			[m]
<i>Dichte:</i>	<b>2400</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>m'</i>	<b>480</b>			[kg/m <sup>2</sup> ]
<i>Dichte Luft</i>	<b>1,18</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>l<sub>1</sub></i>	<b>6</b>			[m]
<i>l<sub>2</sub></i>	<b>2,75</b>			[m]
<i>c<sub>0</sub></i>	<b>343</b>			[m/s]
<i>c<sub>L</sub></i>	<b>3500</b>	<i>nach DIN 12354 - 1</i>		[m/s]
<i>S</i>	<b>16,5</b>			[m <sup>2</sup> ]
<i>η<sub>int</sub></i>	<b>0,006</b>			

<i>f<sub>c</sub></i>	<b>93,37</b>	[Hz]
<i>f<sub>11</sub></i>	<b>50,40</b>	[Hz]
<i>f<sub>ref</sub></i>	<b>1000</b>	[Hz]
=>	<i>f<sub>11</sub> &gt; f<sub>c</sub>/2</i>	

In nachfolgender Tabelle sind die Körperschall – Absorptionsgrade der Flankierenden Bauteile von Bauteil A dargestellt:

<i>Körperschall - Absorptionsgrad</i>									
<i>Flankierendes Bauteil</i>	<i>t</i>	<i>c<sub>L</sub></i>	<i>f<sub>c</sub></i>	<i>K<sub>Ff</sub></i>	<i>K<sub>Fd</sub></i>	<i>K<sub>Df</sub></i>	<i>a<sub>k</sub></i>	<i>l<sub>k</sub></i>	<i>l<sub>kak</sub></i>
<i>Fußboden</i>	<b>0,20</b>	<b>3500</b>	<b>93,37</b>	<b>9,1</b>	<b>8,7</b>	<b>8,7</b>	<b>0,33</b>	<b>6,00</b>	<b>1,99</b>
<i>Decke</i>	<b>0,20</b>	<b>3500</b>	<b>93,37</b>	<b>9,1</b>	<b>8,7</b>	<b>8,7</b>	<b>0,33</b>	<b>6,00</b>	<b>1,99</b>
<i>Trennwand</i>	<b>0,20</b>	<b>3500</b>	<b>93,37</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>0,48</b>	<b>2,75</b>	<b>1,31</b>
<i>Trennwand</i>	<b>0,20</b>	<b>3500</b>	<b>93,37</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>5,7</b>	<b>0,48</b>	<b>2,75</b>	<b>1,31</b>

In nachfolgender Tabelle ist die Ermittlung des Absorptionsgrades dargestellt:

Ermittlung Abstrahlgrad				
$f$ [Hz]	Abstrahlgrad $\sigma_1$	Abstrahlgrad $\sigma_2$	Abstrahlgrad $\sigma_3$	
63		12,12244898	0,794421117	$f < f_c$
80		15,39358601	0,895211182	
100	3,88432921		1,000876529	$f > f_c$
125	1,988019624		1,119013978	
160	1,549645384		1,266019795	
200	1,369556075		1,415453162	
250	1,263384694		1,582524744	
315	1,192183703		1,77637962	
400	1,142152903		2,001753058	
500	1,108884928		2,238027956	
630	1,083511936		2,51218015	
800	1,064019631		2,830906323	
1000	1,050232587		3,165049489	
1250	1,039580674		3,538632904	
1600	1,030521379		4,003506116	
2000	1,024193558		4,476055912	
2500	1,019214378		5,004382646	
3150	1,015158836		5,617405588	
4000	1,011879922		6,330098977	
5000	1,009470067		7,077265809	

In nachfolgender Tabelle sind die ermittelten Schalldämm – Eigenschaften von Bauteil A dargestellt.

$f$ [Hz]	$k_0$	$\lambda$	Abstrahlgrad $\sigma_f$	Abstrahlgrad $\sigma$		$\eta_{tot}$	$\tau$	Bemerkung $\tau$	$R$ [dB]
63	1,2	-0,1	0,8	0,11	$f < f_c$	1,11882803	3,02409E-05	$f < f_c$	45,2
80	1,5	-0,1	0,9	0,12		0,99353691	2,14947E-05		46,7
100	1,8	-0,1	1,1	0,14	$f > f_c$	0,88927986	1,47109E-07	$f ? f_c$	68,3
125	2,3	-0,1	1,2	0,15		0,79602953	1,55885E-07	$f > f_c$	68,1
160	2,9	-0,1	1,3	0,17		0,70429405	1,07538E-07		69,7
200	3,7	-0,1	1,4	1,4		3,84598419	6,44143E-07		61,9
250	4,6	-0,1	1,5	1,3		2,8557436	3,77966E-07		64,2
315	5,8	-0,1	1,6	1,2		2,15314488	2,23153E-07		66,5
400	7,3	-0,1	1,7	1,1		1,63668825	1,3159E-07		68,8
500	9,2	-0,1	1,9	1,1		1,28101535	8,11389E-08		70,9
630	11,5	-0,1	2,0	1,1		1,00218118	4,95017E-08		73,1
800	14,7	-0,1	2,1	1,1		0,78291408	2,98425E-08		75,3
1000	18,3	-0,1	2,2	1,1		0,62480444	1,86529E-08		77,3
1250	22,9	-0,1	2,3	1,0		0,50068454	1,16773E-08		79,3
1600	29,3	-0,1	2,4	1,0		0,39355479	6,96096E-09		81,6
2000	36,6	-0,1	2,5	1,0		0,31771055	4,36077E-09		83,6
2500	45,8	-0,1	2,7	1,0		0,25731679	2,73E-09		85,6
3150	57,7	-0,1	2,8	1,0		0,20755038	1,67855E-09		87,8
4000	73,3	-0,1	2,9	1,0		0,16683277	1,01325E-09		89,9
5000	91,6	-0,1	3,0	1,0		0,13654962	6,30822E-10		92,0

**A 2.1.7 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil A**

In nachfolgender Tabelle sind die Materialdaten für Bauteil A dargestellt.

<b>Schalldämm Maß KS einschalig</b>			
<i>Schale</i>	1	2	
<i>Dicke</i>	<b>0,24</b>	-	[m]
<i>Dichte:</i>	<b>1800</b>	-	[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>Dämm - Dicke</i>	-		[m]
<i>Poisson Zahl</i>	<b>0,009</b>	-	
<i>E-Modul</i>	<b>6E+09</b>	-	
<i>Verlustfaktor</i>	<b>0,015</b>	-	(nach DIN EN 12354-1)
<i>m''</i>	<b>432</b>	-	[kg/m <sup>2</sup> ]
<i>Dichte Luft</i>	<b>1,18</b>	-	[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>Dynam. Steifigkeit</i>	-		[MN/m <sup>3</sup> ]

In nachfolgender Tabelle sind die berechneten Schalldämm –Eigenschaften dargestellt.

<i>f</i> [Hz]	<i>R</i> <sub>1</sub> [dB]		<i>R</i> [dB]
<b>63</b>	<b>43,5</b>	<i>f</i> < 148 Hz	<b>43,5</b>
<b>80</b>	<b>45,6</b>		<b>45,6</b>
<b>100</b>	<b>47,5</b>		<b>47,5</b>
<b>125</b>	<b>49,4</b>		<b>49,4</b>
<b>160</b>	<b>34,7</b>		<b>34,7</b>
<b>200</b>	<b>37,6</b>		<b>37,6</b>
<b>250</b>	<b>40,5</b>		<b>40,5</b>
<b>315</b>	<b>43,6</b>		<b>43,6</b>
<b>400</b>	<b>46,7</b>		<b>46,7</b>
<b>500</b>	<b>49,6</b>		<b>49,6</b>
<b>630</b>	<b>52,6</b>		<b>52,6</b>
<b>800</b>	<b>55,7</b>		<b>55,7</b>
<b>1000</b>	<b>58,6</b>		<b>58,6</b>
<b>1250</b>	<b>61,5</b>		<b>61,5</b>
<b>1600</b>	<b>64,7</b>		<b>64,7</b>
<b>2000</b>	<b>67,6</b>		<b>67,6</b>
<b>2500</b>	<b>70,5</b>		<b>70,5</b>
<b>3150</b>	<b>73,6</b>		<b>73,6</b>
<b>4000</b>	<b>76,7</b>		<b>76,7</b>
<b>5000</b>	<b>79,6</b>		<b>79,6</b>

<i>f</i> <sub>R</sub> =	-	[Hz]
<i>f</i> <sub>C</sub> =	<b>148,03</b>	[Hz]



**A 2.1.8 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil B**

In nachfolgender Tabelle sind die Materialdaten für Bauteil B dargestellt.

<b>Schalldämm Maß Beton einschalig</b>			
<i>Schale</i>	1	2	
<i>Dicke</i>	<b>0,2</b>	-	[m]
<i>Dichte:</i>	<b>2400</b>	-	[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>Dämm - Dicke</i>	-		[m]
<i>Poisson Zahl</i>	<b>0,2</b>	-	
<i>E-Modul</i>	<b>3,65E+10</b>	-	
<i>Verlustfaktor</i>	<b>0,006</b>	-	(nach DIN EN 12354-1)
<i>m''</i>	<b>480</b>	-	[kg/m <sup>2</sup> ]
<i>Dichte Luft</i>	<b>1,18</b>	-	[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>Dynam. Steifigkeit</i>	-		[MN/m <sup>3</sup> ]

In nachfolgender Tabelle sind die berechneten Schalldämm –Eigenschaften dargestellt.

<i>f</i> [Hz]	<i>R</i> <sub>1</sub> [dB]		<i>R</i> [dB]
<b>63</b>	<b>44,4</b>	<i>f</i> < 81,5 Hz	<b>44,4</b>
<b>80</b>	<b>46,5</b>		<b>46,5</b>
<b>100</b>	<b>28,1</b>		<b>28,1</b>
<b>125</b>	<b>31,0</b>		<b>31,0</b>
<b>160</b>	<b>34,3</b>		<b>34,3</b>
<b>200</b>	<b>37,2</b>		<b>37,2</b>
<b>250</b>	<b>40,1</b>		<b>40,1</b>
<b>315</b>	<b>43,1</b>		<b>43,1</b>
<b>400</b>	<b>46,2</b>		<b>46,2</b>
<b>500</b>	<b>49,1</b>		<b>49,1</b>
<b>630</b>	<b>52,1</b>		<b>52,1</b>
<b>800</b>	<b>55,2</b>		<b>55,2</b>
<b>1000</b>	<b>58,1</b>		<b>58,1</b>
<b>1250</b>	<b>61,0</b>		<b>61,0</b>
<b>1600</b>	<b>64,3</b>		<b>64,3</b>
<b>2000</b>	<b>67,2</b>		<b>67,2</b>
<b>2500</b>	<b>70,1</b>		<b>70,1</b>
<b>3150</b>	<b>73,1</b>		<b>73,1</b>
<b>4000</b>	<b>76,2</b>		<b>76,2</b>
<b>5000</b>	<b>79,1</b>		<b>79,1</b>

<i>f</i> <sub>R</sub> =	-	[Hz]
<i>f</i> <sub>C</sub> =	<b>81,48</b>	[Hz]

## A.2.2 Analytische Betrachtung des einschaligen Wandaufbaus zuzüglich einer biegeweichen Vorsatzschalenkonstruktion

Folgende Bauteile werden betrachtet:

- Bauteil C: Trennwand 24 cm Mauerwerk mit Vorsatzschalenkonstruktion
- Bauteil D: Trennwand 20 cm Stahlbeton mit Vorsatzschalenkonstruktion

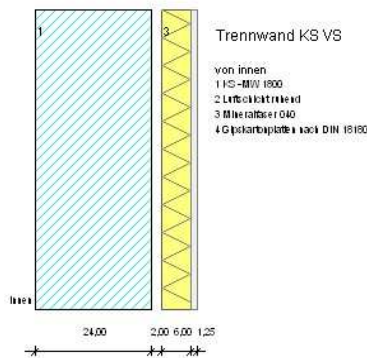


Abbildung A 2.2.1: Bauteil C

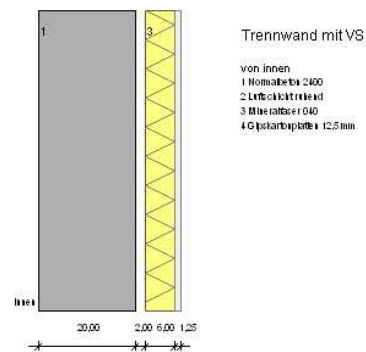


Abbildung A 2.2.2: Bauteil D

### Bauteil C:

Raumgeometrie:

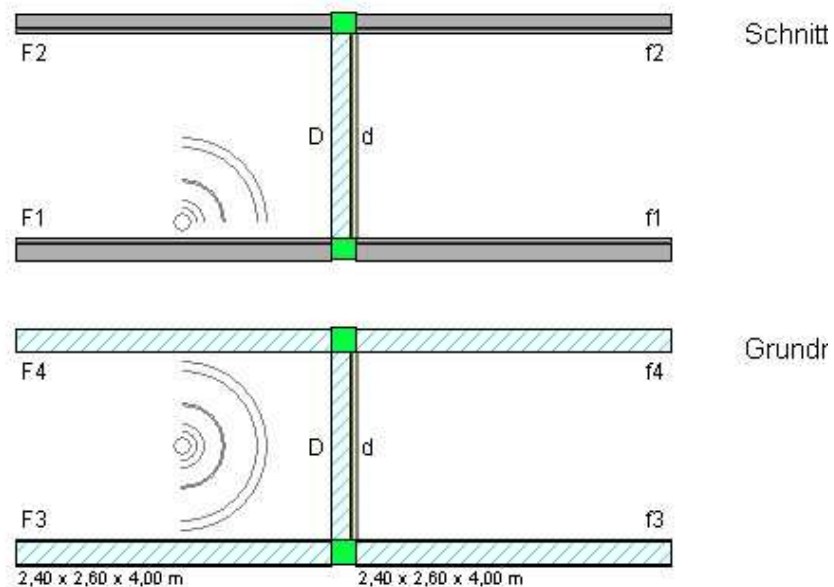


Abbildung A 2.2.3: Raumgeometrien des Empfangs- und Senderraums Bauteil C

**Bauteil D:**

Raumgeometrie:

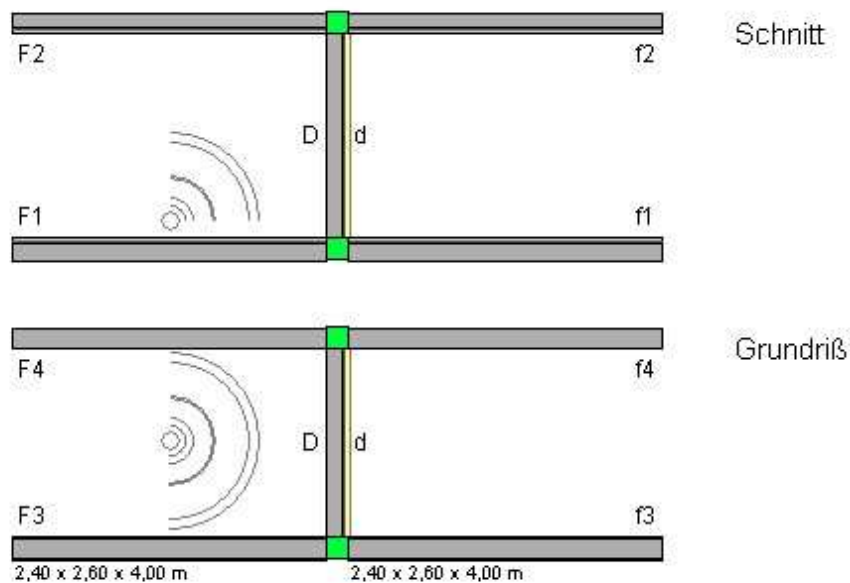


Abbildung A 2..2.4: Raumgeometrien des Empfangs- und Senderraums Bauteil D

**Aufbau der betrachteten Trennwände zuzüglich der flankierenden Bauteile****Bauteil C**

Aufbau des Bauteils von innen nach außen:

<b>Trennwand</b>	24 cm Mauerwerk mit der Rohdichte $\rho = 1800 \text{ kg /m}^3$
	2,0 cm Luftschicht
	6,0 cm Dämmstoff
	1,25 cm Gipskartonplatte mit der Rohdichte $\rho = 900 \text{ kg /m}^3$

**flankierende Bauteile**

<b>Außenwand</b>	24 cm Mauerwerk der Rohdichte $\rho = 1800 \text{ kg /m}^3$
<b>Trennwand</b>	24 cm Mauerwerk mit der Rohdichte $\rho = 1800 \text{ kg /m}^3$

<b>Fußboden</b>	5 cm Zementestrich
	2 cm Trittschalldämmung
	20 cm Beton
<b>Decke</b>	analog dem Fußbodenaufbau

### Bauteil D

Aufbau des Bauteils von innen nach außen:

<b>Trennwand</b>	20 cm Stahlbeton mit der Rohdichte $\rho = 2400 \text{ kg / m}^3$
	2,0 cm Luftschicht
	6,0 cm Dämmstoff
	1,25 cm Gipskartonplatte mit der Rohdichte $\rho = 1800 \text{ kg / m}^3$

#### **flankierende Bauteile**

<b>Außenwand</b>	20 cm Stahlbeton, beidseitig verputzt
<b>Trennwand</b>	20 cm Stahlbeton
<b>Fußboden</b>	5 cm Zementestrich
	2 cm Trittschalldämmung
	20 cm Stahlbeton
<b>Decke</b>	analog dem Fußbodenaufbau

### A 2.2.1 Schalldämmeigenschaften Bauteil C nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989 [6]

Ermittlung der flächenbezogenen Masse der Bauteile nach (3.16):

$$\begin{aligned}
 \text{Trennwand:} \quad m' &= 1720 \text{ kg / m}^3 \cdot 0,24 \text{ m} \\
 &= 427,8 \text{ kg / m}^2
 \end{aligned}$$

Die Rohdichte des Bauteils wird nach [6] Tabelle 3, Zeile 3, Spalte 2 abgemindert. Somit ergibt sich nach [6] Tabelle 8, Zeile 8 ein bewertetes Schalldämm – Maß von  $R_{w,R} = 56$  dB.

#### Ermittlung des Korrekturwertes $K_{L,1}$ :

Zur Berechnung der mittleren flächenbezogenen Masse müssen die flächenbezogenen Massen der flankierenden Bauteile nach (3.16) bestimmt werden.

$$\begin{aligned} \text{Außenwand:} \quad m' &= 1720 \text{ kg / m}^3 * 0,24 \text{ m} + 15 \text{ kg / m}^2 + 25 \text{ kg / m}^2 \\ &= 452,8 \text{ kg / m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Trennwand:} \quad m' &= 1720 \text{ kg / m}^3 * 0,24 \text{ m} \\ &= 412,8 \text{ kg / m}^2 \end{aligned}$$

Fußboden: Aufgrund der unter dem Estrich befindlichen Entkoppelung (Trittschalldämmung) wird dieses Bauteil nicht für die Ermittlung der mittleren flächenbezogenen Masse betrachtet.

$$\begin{aligned} \text{Decke:} \quad m' &= \rho_{\text{Beton}} * d_{\text{Beton}} \\ &= 2300 \text{ kg / m}^3 * 0,24 \text{ m} \\ &= 552,0 \text{ kg / m}^2 \end{aligned}$$

Der Estrich wird bei der Berechnung aufgrund der Entkoppelung (Trittschalldämmung) nicht für die Ermittlung der mittleren flächenbezogenen Masse betrachtet.

Die mittlere flächenbezogene Masse berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned} m'_{L,\text{mittel}} &= (m'_{\text{Außenwand}} + m'_{\text{Trennwand}} + m'_{\text{Decke}}) / 3 \\ &= (452,8 \text{ kg / m}^2 + 412,8 \text{ kg / m}^2 + 552,0 \text{ kg / m}^2) / 3 \\ &= 472,5 \text{ kg / m}^2 \end{aligned}$$

Nach Tabelle 13, Zeile 2, Spalte 2 ist bei  $m'_{L,\text{mittel}} \geq 400 \text{ kg / m}^2$  der Korrekturwert  $K_{L,1} = + 2$  dB

Der Korrekturwert  $K_{L,2}$  ist aufgrund des Fußbodens als flankierendes biegeweiches Bauteil nach [6] Tabelle 15 Zeile 1, Spalte 2  $K_{L,2} = 1$  dB.

Damit ergibt sich ein bewertetes Schalldämm – Maß nach (3.17):

$$R'_{w,R} = R_{w,R} + K_{L,1} + K_{L,2}$$

$$= 56 \text{ dB} + 2 \text{ dB} + 1 \text{ dB}$$

$$\underline{R'_{w,R} = 59 \text{ dB}}$$

### A 2.2.2 Schalldämmeigenschaften Bauteil D nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989 [6]

Ermittlung der flächenbezogenen Masse der Bauteile nach (3.16):

Trennwand:  $m' = 2300 \text{ kg / m}^3 * 0,20 \text{ m}$

$$= 460 \text{ kg / m}^2$$

nach [6] Tabelle 8, Zeile 21 ergibt sich damit ein bewertetes Schalldämm – Maß von  $R_{w,R} = 57 \text{ dB}$ .

#### **Ermittlung des Korrekturwertes $K_{L,1}$ :**

Außenwand:  $m' = 2300 \text{ kg / m}^3 * 0,20 \text{ m}$

$$= 460 \text{ kg / m}^2$$

Trennwand: analog wie Außenwand

Fußboden: Aufgrund der unter dem Estrich befindlichen Entkoppelung (Trittschalldämmung) wird dieses Bauteil nicht für die Ermittlung der mittleren flächenbezogenen Masse betrachtet.

Decke:  $m' = 2300 \text{ kg / m}^3 * 0,20 \text{ m}$

$$= 460 \text{ kg / m}^2$$

Der Estrich wird bei der Berechnung aufgrund der Entkoppelung (Trittschalldämmung) nicht für die Ermittlung der mittleren flächenbezogenen Masse betrachtet.

Die mittlere flächenbezogene Masse berechnet sich wie folgt:

$$m'_{L,mittel} = (460 \text{ kg / m}^2 + 460 \text{ kg / m}^2 + 460 \text{ kg / m}^2) / 3$$

$$= 460 \text{ kg / m}^2$$

Nach Tabelle 13, Zeile 2, Spalte 2 ist bei  $m'_{L,mittel} \geq 400 \text{ kg / m}^2$  der Korrekturwert  $K_{L,1} = + 2 \text{ dB}$

Der Korrekturwert  $K_{L,2}$  ist aufgrund des Fußbodens als flankierendes biegeweiches Bauteil nach Zeile 1:  $K_{L,2} = + 1 \text{ dB}$ .

Damit ergibt sich ein bewertetes Schalldämm – Maß nach (3.17):

$$R'_{w,R} = R_{w,R} + K_{L,1} + K_{L,2}$$

$$= 57 \text{ dB} + 2 \text{ dB} + 1 \text{ dB}$$

$$= 60 \text{ dB}$$

### **A 2.2.3 Schalldämm – Eigenschaften nach DIN 12354 – 1 [7] Bauteil C**

Für das Trennende Bauteil C (KS MW mit VS) werden nachfolgende Werte für die weitere Berechnung verwendet.

Tabelle A 2.2.1 Bauteileigenschaften des Bauteils C

$t$ [m]	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$m'$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$l_1$ [m]	$l_2$ [m]	$F$ [m <sup>2</sup> ]	$R'_w$ [dB]
0,24	1800	432	2,40	2,60	6,20	63,2

Nach [7] Gleichung B 5 (3.20) ergibt sich für Bauteile mit  $m' > 150 \text{ kg / m}^2$  folgendes bewertetes Schalldämm – Maß:

$$R_w = 37,5 \lg (m' / m'_0) - 42 \text{ dB}$$

$$R_w = 56,8 \text{ dB}$$

Die Resonanzfrequenz ermittelt sich aus der der Gleichung D.2 der DIN 12354 – 1 [7].

$$f_R = 56,8 \text{ Hz}$$

Damit ergibt sich die Gleichung zur Ermittlung des Luftschallverbesserungsmaß  $\Delta R_w$  nach Tabelle D.3 [7]:

$$\Delta R_w = 6,3 \text{ dB}$$

Somit ergibt sich das bewertete Schalldämm – Maß nach der Gleichung 27 [7] (3.19):

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \text{ dB}$$

$$R_{Dd,w} = 56,8 \text{ dB} + 6,3 \text{ dB}$$

$$R_{Dd,w} = 63,2 \text{ dB}$$

In nachfolgender Tabelle sind die ermittelten Werte für die flankierenden Bauteile dargestellt:

Tabelle A 2.2.2 Eigenschaften der flankierenden Bauteile

flankierendes Bauteil	$t$ [m]	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$m'$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$l_1$ [m]	$l_2$ [m]	$F$ [m <sup>2</sup> ]	$R'_w$ [dB]
Trenndecke	0,20	2400	480	2,40	4,00	9,6	58,5
Fußboden *)	0,20	2400	480	2,40	4,00	9,6	58,5
Trennwand KS	0,24	1800	432	2,60	4,00	10,4	56,8
Trennwand KS	0,24	1800	432	2,60	4,00	10,4	56,8

Der Aufbau der Bauteile ist im Send- und Empfangsraum gleich.

\*) Der Fußboden weist einen Zementestrich auf Trittschalldämmung mit folgenden Eigenschaften auf:

Tabelle A 2.2.3 Eigenschaften des Zementestrich auf Trittschalldämmung

Bauteil	$m'_1$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$m'_2$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$s'$ [MN/m <sup>3</sup> ]	$f_0$ [Hz]	$\Delta R_w$ [dB]
Vorsatzschale Zementestrich	460	100	40	111	1,6

Die Resonanzfrequenz ermittelt sich aus der der Gleichung D.1 der DIN 12354 – 1 (3.21)



$$f_R = 111,65 \text{ Hz}$$

Damit ergibt sich die Gleichung zur Ermittlung des Luftschallverbesserungsmaß  $\Delta R_w$  nach Tabelle D.3 [7].

$$\Delta R_w = 1,6 \text{ dB}$$

Stoßstellendämm – Maß für Stoßstellen:

Die Abhängigkeit der flächenbezogenen Masse  $M$  der mit den Stoßstellen verbundenen Bauteile wird nach Gleichung E.2 [7] (3.22) ermittelt.

Folgende Werte wurden ermittelt:

Tabelle A 2.2.4 Ergebnisse der Stoßstellenmaße

Bauteil Übertragungsweg ij (flankierende Bauteile)	$m_i$ [kg / m <sup>2</sup> ]	Stoßstelle bildenens Bauteils	$m_{ij}$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$M$
Fußboden F 1	480	Trennwand KS Mauerwerk	432	- 0,046
Decke F 2	480	Trennwand KS Mauerwerk	432	- 0,046
Trennwand F 3	432	Trennwand KS Mauerwerk	432	0,000
Trennwand F 4	432	Trennwand KS Mauerwerk	432	0,000

Das Stoßstellendämm – Maß wird nach den Gleichungen E 3 bis E 9 [7] (3.23 – 3.26) ermittelt.

Tabelle A 2.2.5 Ermittlung der Stoßstellen - Maße der Übertragungswege

Flankierendes Bauteil	$M$ [-]	Stoßstellendämm – Maße $K$ der Übertragungswege								
		$K_{Ff}$			$K_{Fd}$			$K_{Df}$		
		Gleichung	Übertragungsweg	[dB]	Gleichung	Übertragungsweg	[dB]	Gleichung	Übertragungsweg	[dB]
Fußboden F1	- 0,046	E3 a	F1 – f1	7,9	E3 b	F1 – d	8,7	E3 b	D – f1	8,7
Fußboden	- 0,046	E3 a	F2 - f2	87,9	E3 b	F2 - d	8,7	E3 b	D – f2	8,7

Flankierendes Bauteil	M [-]	Stoßstellendämm – Maße K der Übertragungswege								
		$K_{Ff}$			$K_{Fd}$			$K_{Df}$		
		Gleichung	Übertragungsweg	[dB]	Gleichung	Übertragungsweg	[dB]	Gleichung	Übertragungsweg	[dB]
F 2										
Trennwand F 3	0,000	E4 a	F3 – f3	5,7	E4 b	F3 - d	5,7	E4 b	D – f3	5,7
Trennwand F 4	0,000	E4 a	F4 – f4	5,7	E4 b	F4 - d	5,7	E4 b	D – f4	5,7

Die Flankendämm – Maße werden nach den Gleichungen 28 a) der DIN 12354 – 1 ermittelt.

Folgende Flankendämm – Maße wurden ermittelt:

Tabelle A 2.2.6 Ermittelte Flankendämm – Maße der flankierenden Bauteile

Bauteil	$l_f$ [m]	$R_{Ff,w}$ [dB]	$R_{Fd,w}$ [dB]	$R_{Df,w}$ [dB]
Fußboden F1	2,40	73,1	77,7	72,2
Decke F 2	2,40	70,6	76,9	70,6
Trennwand F 3	2,60	66,3	72,7	66,3
Trennwand F 4	2,60	66,3	72,7	66,3

Abschließend ermittelt sich das Bauschalldämm – Maß nach (3.18) wie folgt:

$$R'_{w'} = 10 * \lg( 10^{R_{Dd,w}/10} + \sum 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum 10^{-R_{Fd,w}/10} + \sum 10^{-R_{Df,w}/10} )$$

$$R'_{w'} = 10 * \lg( 10^{6,32} + (10^{-7,31} + 10^{-7,06} + 10^{-6,63} + 10^{-6,63}) + (10^{-7,77} + 10^{-7,69} + 10^{-7,27} + 10^{-7,27}) + (10^{-7,22} + 10^{-7,06} + 10^{-6,63} + 10^{-6,63}) )$$

$$\underline{R'_{w'} = 57,3 \text{ dB}}$$

### **A 2.2.4 Schalldämmeigenschaften nach DIN EN 12354 – 1 [7] Bauteil D**

Für das Trennende Bauteil D (Beton mit VS) werden nachfolgende Werte für die weitere Berechnung verwendet.

Tabelle A 2.2.7 Bauteileigenschaften des Bauteils D

$t$ [m]	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$m'$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$l_1$ [m]	$l_2$ [m]	$F$ [m <sup>2</sup> ]	$R'_w$ [dB]
0,20	2400	494	2,40	2,60	6,20	59,0

Nach Gleichung B 5 der DIN 12354 - 1 (3.20) ergibt sich für Bauteile mit  $m' > 150 \text{ kg / m}^2$  folgendes bewertetes Schalldämm – Maß:

$$R_w = 37,5 \lg (m' / m'_0) - 42 \text{ dB}$$

$$R_w = 59,0 \text{ dB}$$

Das Verbesserungsmaß  $\Delta R_w$  ergibt sich wie folgt:

Die Resonanzfrequenz ermittelt sich aus der der Gleichung D.2 [7]

$$f_R = 56,82 \text{ Hz}$$

Damit ergibt sich die Gleichung zur Ermittlung des Luftschallverbesserungsmaß  $\Delta R_w$  nach Tabelle D.3 [7]

$$\Delta R_w = 35 - R_w / 2$$

$$\Delta R_w = 5,5 \text{ dB}$$

Somit ergibt sich das bewertete Schalldämm – Maß nach der Gleichung 27 [7] (3.19)

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \text{ dB}$$

$$R_{Dd,w} = 59,0 \text{ dB} + 5,5 \text{ dB}$$

$$R_{Dd,w} = 64,5 \text{ dB}$$

In nachfolgender Tabelle sind die ermittelten Werte für die flankierenden Bauteile dargestellt:

Tabelle A 2.2.8 Eigenschaften der flankierenden Bauteile

flankierendes Bauteil	$t$ [m]	$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	$m'$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$l_1$ [m]	$l_2$ [m]	$F$ [m <sup>2</sup> ]	$R'_w$ [dB]
Trenndecke	0,20	2400	480	2,40	4,00	9,6	58,5
Fußboden *)	0,20	2400	480	2,40	4,00	9,6	58,5
Trennwand Beton	0,20	2400	508	2,60	4,00	10,4	59,5
Trennwand Beton	0,20	2400	508	2,60	4,00	10,4	59,5

Der Aufbau der Bauteile ist im Sende- und Empfangsraum gleich.

\*) Der Fußboden weist einen Zementestrich auf Trittschalldämmung mit folgenden Eigenschaften auf:

Tabelle A 2.2.9 Eigenschaften des Zementestrich auf Trittschalldämmung

Bauteil	$m'_1$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$m'_2$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$s'$ [MN/m <sup>3</sup> ]	$f_0$ [Hz]	$\Delta R_w$ [dB]
Vorsatzschale Zementestrich	460	100	40	111	1,6

Die Resonanzfrequenz ermittelt sich aus der der Gleichung D.1 [7] (3.21)

$$f_R = 111,65 \text{ Hz}$$

Damit ergibt sich die Gleichung zur Ermittlung des Luftschallverbesserungsmaß  $\Delta R_w = 1,6 \text{ dB}$  nach Tabelle D.3 [7].

Stoßstellendämm – Maß für Stoßstellen:

Tabelle A 2.2.10 Ergebnisse der Stoßstellenmaße (3.22)

Bauteil Übertragungsweg ij (flankierende Bauteile)	$m_i$ [kg / m <sup>2</sup> ]	Stoßstelle bildenens Bauteils	$m_j$ [kg / m <sup>2</sup> ]	$M$
Fußboden F 1	480	Trennwand Beton	494	0,012
Decke F 2	480	Trennwand Beton	494	0,012
Trennwand F 3	508	Trennwand Beton	494	- 0,012
Trennwand F 4	508	Trennwand Beton	494	- 0,012

Das Stoßstellendämm – Maß wird nach den Gleichungen E 3 bis E 9 der DIN 12354 – 1 [7] (3.23 – 3.26) ermittelt. Die Übertragungswege sind der Darstellung der Raumgeometrie zu entnehmen.

Somit ergeben sich folgende Werte:

Tabelle A 2.2.11 Ermittlung der Stoßstellenmaße der Übertragungswege

Flankierendes Bauteil	$M$ [-]	Stoßstellendämm – Maße $K$ der Übertragungswege								
		$K_{Ff}$			$K_{Fd}$			$K_{Df}$		
		Gleichung	Übertragungsweg	[dB]	Gleichung	Übertragungsweg	[dB]	Gleichung	Übertragungsweg	[dB]
Fußboden F1	0,012	E3 a	F1 – f1	8,9	E3 b	F1 – d	8,7	E3 b	D – f1	8,7
Fußboden F 2	0,012	E3 a	F2 - f2	8,9	E3 b	F2 - d	8,7	E3 b	D – f2	8,7
Trennwand F 3	- 0,012	E4 a	F3 – f3	5,5	E4 b	F3 - d	5,7	E4 b	D – f3	5,7
Trennwand F 4	- 0,012	E4 a	F4 – f4	5,5	E4 b	F4 - d	5,7	E4 b	D – f4	5,7

Die Flankendämm – Maße werden nach den Gleichungen 28 a [7] (3.27 – 3.29) ermittelt.

Folgende Flankendämm – Maße wurden ermittelt:

Tabelle A 2.2.12 Ermittelte Flankendämm – Maße der flankierenden Bauteile

Bauteil	$l_f$ [m]	$R_{Ff,w}$ [dB]	$R_{Fd,w}$ [dB]	$R_{Df,w}$ [dB]
Fußboden F1	2,40	74,1	77,9	73,3
Decke F 2	2,40	71,6	77,1	71,6
Trennwand F 3	2,60	68,8	74,2	68,7
Trennwand F 4	2,60	68,8	74,2	68,7

Abschließend ermittelt sich das Bauschalldämm – Maß nach (3.18) wie folgt:

$$R'_w = 10 * \lg( 10^{6,37} + (10^{-7,41} + 10^{-7,16} + 10^{-6,88} + 10^{-6,88}) + (10^{-7,79} + 10^{-7,71} + 10^{-7,42} + 10^{-7,42}) + (10^{-7,33} + 10^{-7,16} + 10^{-6,87} + 10^{-6,87}))$$

$$\underline{R'_w = 59,1 \text{ dB}}$$

**A 2.2.5 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil C****Prüfstandbedingungen**

Schalldämm Maß KS MW mit VS Laborbedingungen ( $\eta_{tot,lab}$ )				
<i>Schale</i>	<b>1</b>			
<i>Dicke</i>	0,2			[m]
<i>Dichte:</i>	1800			[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>m'</i>	360			[kg/m <sup>2</sup> ]
<i>Dichte Luft</i>	1,18			[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>l<sub>1</sub></i>	5,73			[m]
<i>l<sub>2</sub></i>	3,1			[m]
<i>c<sub>0</sub></i>	343			[m/s]
<i>c<sub>L</sub></i>	2600	nach DIN 12354 - 1		[m/s]
<i>S</i>	17,8			[m <sup>2</sup> ]
<i><math>\eta_{int}</math></i>	0,015			[-]

<i>f</i> [Hz]	<i>k<sub>0</sub></i>		<i>Abstrahlgrad</i> <i><math>\sigma_f</math></i>	<i>Abstrahlgrad</i> <i><math>\sigma</math></i>	<i><math>\delta_1</math></i>	<i><math>\delta_2</math></i>	<i><math>\lambda</math></i>	<i>Bemerkung</i>
63	1,2	-0,1	0,9	0,4	0,2	0,0	0,7	$f < f_c$
80	1,5	-0,1	1,0	0,4	0,2	0,0	0,8	
100	1,8	-0,1	1,1	0,4	0,2	0,0	0,9	
125	2,3	-0,1	1,2	0,4	0,2	0,0	1,0	
160	2,9	-0,1	1,3	2,2				$f > f_c \Rightarrow \sigma = \sigma_2$
200	3,7	-0,1	1,4	1,6				
250	4,6	-0,1	1,5	1,4				
315	5,8	-0,1	1,7	1,3				
400	7,3	-0,1	1,8	1,2				
500	9,2	-0,1	1,9	1,2				
630	11,5	-0,1	2,0	1,1				
800	14,7	-0,1	2,1	1,1				
1000	18,3	-0,1	2,2	1,1				
1250	22,9	-0,1	2,3	1,1				
1600	29,3	-0,1	2,5	1,0				
2000	36,6	-0,1	2,6	1,0				
2500	45,8	-0,1	2,7	1,0				
3150	57,7	-0,1	2,8	1,0				
4000	73,3	-0,1	2,9	1,0				
5000	91,6	-0,1	3,0	1,0				

$f$ [Hz]	$\eta_{tot,lab}$	$\tau$	Bemerkung $\tau$	$R$ [dB]
63	0,108516983	0,000209991	$f < f_c$	36,8
80	0,09798809	0,000133326		38,8
100	0,089226804	8,71046E-05		40,6
125	0,081390472	5,68328E-05	$f = f_c$	42,5
160	0,073681441	0,000390766	$f > f_c$	34,1
200	0,067486277	0,000126064		39,0
250	0,061945153	5,25425E-05		42,8
315	0,056822066	2,36913E-05		46,3
400	0,052113402	1,10557E-05		49,6
500	0,048195236	5,60688E-06		52,5
630	0,044572667	2,83432E-06		55,5
800	0,041243138	1,4207E-06		58,5
1000	0,038472576	7,51757E-07		61,2
1250	0,035994511	3,999E-07		64,0
1600	0,033556701	1,99657E-07		67,0
2000	0,031597618	1,06743E-07		69,7
2500	0,029845361	5,70951E-08		72,4
3150	0,028225299	2,98543E-08		75,2
4000	0,026736288	1,52573E-08		78,2
5000	0,025497255	8,13854E-09		80,9

$f_c$	125,69	[Hz]
$f_{11}$	31,48	[Hz]
$f_{ref}$	1000	[Hz]
=>	$f_{11} < f_c / 2$	

Schalldämm Maß KS MW mit VS Laborbedingungen ( $\eta_{tot,lab}$ )				
Schale	<b>2</b>			
Dicke	0,0115			[m]
Dichte:	900			[kg/m <sup>3</sup> ]
$m'$	10,35			[kg/m <sup>2</sup> ]
Dichte Luft	1,18			[kg/m <sup>3</sup> ]
$l_1$	5,73			[m]
$l_2$	3,1			[m]
$c_0$	343			[m/s]
$c_L$	1800	nach Schmidt		[m/s]
$S$	17,763			[m <sup>2</sup> ]
$\eta_{int}$	0,015			[-]



$f$ [Hz]	$k_0$		Abstrahlgra $d \sigma_f$	Abstrahlgra $d \sigma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\lambda$	Bemerkung
63	1,2	-0,1	0,9	0,0	0,0	0,0	0,1	$f < f_c$
80	1,5	-0,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,2	
100	1,8	-0,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,2	
125	2,3	-0,1	1,2	0,0	0,0	0,0	0,2	
160	2,9	-0,1	1,3	0,0				$f > f_c \Rightarrow \sigma = \sigma_2$
200	3,7	-0,1	1,4	0,0				
250	4,6	-0,1	1,5	0,0				
315	5,8	-0,1	1,7	0,0				
400	7,3	-0,1	1,8	0,0				
500	9,2	-0,1	1,9	0,0				
630	11,5	-0,1	2,0	0,0				
800	14,7	-0,1	2,1	0,0				
1000	18,3	-0,1	2,2	0,0				
1250	22,9	-0,1	2,3	0,0				
1600	29,3	-0,1	2,5	0,0				
2000	36,6	-0,1	2,6	0,0				
2500	45,8	-0,1	2,7	0,0				
3150	57,7	-0,1	2,8	0,0				
4000	73,3	-0,1	2,9	2,2				
5000	91,6	-0,1	3,0	1,6				

$f$ [Hz]	$\eta_{tot,lab}$	$\tau$	Bemerkung $\tau$	$R$ [dB]
63	0,017688613	0,066662938	$f < f_c$	11,8
80	0,017385908	0,047090045		13,3
100	0,017134021	0,033581266		14,7
125	0,016908726	0,023698742		16,3
160	0,016687091	0,01594847		18,0
200	0,01650898	0,011070707		19,6
250	0,016349673	0,00763818		21,2
315	0,016202384	0,005171935		22,9
400	0,01606701	0,003438713		24,6
500	0,015954363	0,002339064		26,3
630	0,015850214	0,001563553		28,1
800	0,01575449	0,001027483		29,9
1000	0,015674837	0,000692164		31,6
1250	0,015603592	0,000465114		33,3
1600	0,015533505	0,000298825		35,2
2000	0,015477182	0,000199892		37,0
2500	0,015426804	0,000133463		38,7
3150	0,015380227	8,7675E-05	$f = f_c$	40,6
4000	0,015337418	0,003717195		24,3
5000	0,015301796	0,001090344		29,6

Nach (3.51) und (3.52) wurde das Schalldämm – Maß der Konstruktion bestimmt.

$f$ [Hz]	$R_1$ [dB]	$R_2$ [dB]	$R_1 + R_2$ [dB]		$R$ [dB]
63	36,8	11,8	48,5	$f < 1429,2$ Hz	29,8
80	38,8	13,3	52,0		35,3
100	40,6	14,7	55,3		40,6
125	42,5	16,3	58,7		45,9
160	34,1	18,0	52,1		41,4
200	39,0	19,6	58,6		49,8
250	42,8	21,2	64,0		57,2
315	46,3	22,9	69,1		64,3
400	49,6	24,6	74,2		71,5
500	52,5	26,3	78,8		78,1
630	55,5	28,1	83,5		84,8
800	58,5	29,9	88,4		91,7
1000	61,2	31,6	92,8		98,1
1250	64,0	33,3	97,3		104,5
1600	67,0	35,2	102,2		111,6
2000	69,7	37,0	106,7		112,7
2500	72,4	38,7	111,2		117,2
3150	75,2	40,6	115,8	121,8	
4000	78,2	24,3	102,5	108,5	
5000	80,9	29,6	110,5	116,5	

$f_R =$	215,50		[Hz]
$f_c =$	125,69	3157,51	[Hz]

## A 2.2.6 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil D

### Prüfstandbedingungen

Schalldämm Maß Beton einschalig Laborbedingungen ( $n_{\text{tot,lab}}$ )				
Schale	1			
Dicke	0,2			[m]
Dichte:	2400			[kg/m <sup>3</sup> ]
$m'$	480			[kg/m <sup>2</sup> ]
Dichte Luft	1,18			[kg/m <sup>3</sup> ]
$l_1$	6			[m]
$l_2$	2,75			[m]
$c_0$	343			[m/s]
$c_L$	3500	nach DIN 12354 - 1		[m/s]
$S$	16,5			[m <sup>2</sup> ]
$\eta_{\text{int}}$	0,006			[-]

Schalldämm – Eigenschaften der Wandschale siehe Bauteil B.

Schalldämmeigenschaften der Vorsatzschale siehe Bauteil C.

Nach (3.51) und (3.52) wurde das Schalldämm – Maß der Konstruktion bestimmt.

$f$ [Hz]	$R_1$ [dB]	$R_2$ [dB]	$R_1 + R_2$ [dB]		$R$ [dB]
63	44,8	11,8	56,5	$f < 1429,2$ Hz	37,8
80	46,2	13,3	59,5		42,8
100	57,0	14,7	71,8		57,0
125	58,8	16,3	75,1		62,3
160	60,5	18,0	78,4		67,8
200	44,9	19,6	64,4		55,7
250	48,0	21,2	69,2		62,4
315	51,1	22,9	74,0		69,2
400	54,1	24,6	78,7		76,0
500	56,8	26,3	83,2		82,4
630	59,6	28,1	87,7		88,9
800	62,4	29,9	92,3		95,6
1000	65,1	31,6	96,6		101,9
1250	67,6	33,3	101,0		108,2
1600	70,5	35,2	105,7		115,1
2000	73,1	37,0	110,1		116,1
2500	75,6	38,7	114,4	120,4	
3150	78,3	40,6	118,9	124,9	
4000	81,1	24,3	105,4	$f > 1429,2$ Hz	111,4
5000	83,7	29,6	113,3		119,3

$f_R =$	214,69		[Hz]
$f_c =$	93,37	3157,51	[Hz]

### A 2.2.7 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil C

In nachfolgender Tabelle sind die Materialdaten für Bauteil C dargestellt.

KS Mauerwerk + Vorsatzschale			
Schicht	1	2	
Dicke	0,24	0,0125	[m]
Dichte:	1800	900	[kg/m <sup>3</sup> ]
Dämm - Dicke	0,06		[m]
Poisson Zahl	0,009	0,15	
E-Modul	6E+09	3,2E+09	
Verlustfaktor	0,015	0,03	(nach DIN EN 12354-1)
$m''$	432	11,25	[kg/m <sup>2</sup> ]
Dichte Luft	1,18	1,18	[kg/m <sup>3</sup> ]
Dynam. Steifigkeit	20		[MN/m <sup>3</sup> ]

In nachfolgender Tabelle sind die berechneten Schalldämm –Eigenschaften dargestellt.

$f$ [Hz]	$R_1$ [dB]	$R_2$ [dB]	$R_1 + R_2$ [dB]		$R$ [dB]
63	43,5	11,8	55,3	$f < 148,03$ [Hz]	36,5
80	45,6	13,9	59,5		42,8
100	47,5	15,8	63,3		48,6
125	49,4	17,8	67,2		54,4
160	34,7	19,9	54,6	$f < 1429,17$ [Hz]	44,0
200	37,6	21,8	59,5		50,8
250	40,5	23,8	64,3		57,5
315	43,6	25,8	69,3		64,6
400	46,7	27,9	74,5		71,8
500	49,6	29,8	79,4		78,6
630	52,6	31,8	84,4		85,6
800	55,7	33,9	89,6		92,9
1000	58,6	35,8	94,4		99,7
1250	61,5	37,8	99,3		106,5
1600	64,7	39,9	104,6	$f > 1429,17$ [Hz]	114,0
2000	67,6	41,8	109,5		115,5
2500	70,5	43,8	114,3	$f < 2720,86$ [Hz]	120,3
3150	73,6	32,2	105,8	$f > 1429,17$ [Hz]	111,8
4000	76,7	35,3	112,0		118,0
5000	79,6	38,3	117,8		123,8

$f_R =$	216,09		[Hz]
$f_C =$	148,03	2720,86	[Hz]

### A 2.2.8 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil D

In nachfolgender Tabelle sind die Materialdaten für Bauteil D dargestellt.

Beton + Vorsatzschale			
Schicht	1	2	
Dicke	0,2	0,0125	[m]
Dichte:	2400	900	[kg/m <sup>3</sup> ]
Dämm - Dicke	0,06		[m]
Poisson Zahl $\mu$	0,2	0,15	
E-Modul	3,65E+10	3,2E+09	
Verlustfaktor	0,006	0,03	
$m''$	480	11,25	[kg/m <sup>2</sup> ]
Dichte Luft	1,18	1,18	[kg/m <sup>3</sup> ]
Dynam. Steifigkeit	20		[MN/m <sup>3</sup> ]

In nachfolgender Tabelle sind die berechneten Schalldämm –Eigenschaften dargestellt.

$f$ [Hz]	$R_1$ [dB]	$R_2$ [dB]	$R_1 + R_2$ [dB]		$R$ [dB]	
63	44,4	11,8	56,2	$f < 1429,17$ Hz	37,5	
80	46,5	13,9	60,4	$f < 81,48$ Hz	43,7	
100	28,1	15,8	44,0	$f < 1429,17$ Hz	29,2	
125	31,0	17,8	48,8		36,0	
160	34,3	19,9	54,2		43,5	
200	37,2	21,8	59,0		50,3	
250	40,1	23,8	63,9		57,1	
315	43,1	25,8	68,9		64,1	
400	46,2	27,9	74,1		71,4	
500	49,1	29,8	78,9		78,1	
630	52,1	31,8	83,9		85,2	
800	55,2	33,9	89,1		92,4	
1000	58,1	35,8	94,0		99,2	
1250	61,0	37,8	98,8		106,0	
1600	64,3	39,9	104,2		$f > 1429,17$ Hz	110,2
2000	67,2	41,8	109,0		$f < 2720,86$ Hz	115,0
2500	70,1	43,8	113,9	$f > 1429,17$ Hz	119,9	
3150	73,1	32,2	105,3		111,3	
4000	76,2	35,3	111,5		117,5	
5000	79,1	38,3	117,4		123,4	

$f_R =$	214,69		[Hz]
$f_C =$	81,48	2720,86	[Hz]

### A 2.3 Analytische Betrachtung des zweischaligen homogenen Wandaufbaus

Folgende Bauteile werden betrachtet:

- Bauteil A: Trennwand 20 cm Kalksandsteinmauerwerk, 5 cm Dämmung, 25 cm

Kalksandsteinmauerwerk

- Bauteil B: Trennwand 20 cm Stahlbeton, 5 cm Dämmung, 20 cm Stahlbeton

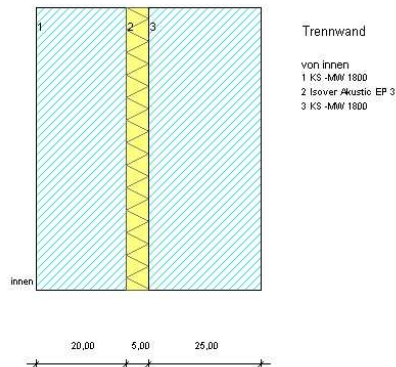


Abbildung A 2.3.1: Bauteil E

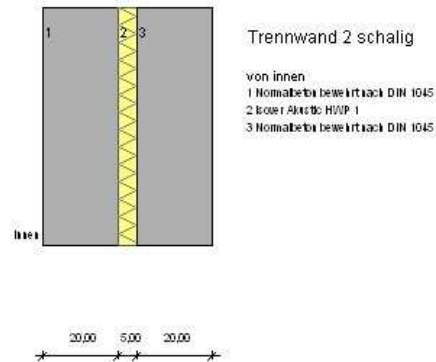


Abbildung A 2.3.2: Bauteil F

### Aufbau der betrachteten Trennwände zuzüglich der flankierenden Bauteile

#### Bauteil E

Aufbau des Bauteils von innen nach außen:

**Trennwand** 20 cm Mauerwerk mit der Rohdichte  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$

5 cm Dämmung

25 cm Mauerwerk mit der Rohdichte  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$

#### **flankierende Bauteile**

**Außenwand** 1,5 cm Kalkgipsputz mit der flächenbezogenen Masse von  $m' = 15 \text{ kg/m}^2$

24 cm Mauerwerk der Rohdichte  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$

1,5 cm Kalkzementputz mit der flächenbezogenen Masse  $m' = 25 \text{ kg/m}^2$

<b>Trennwand</b>	24 cm Mauerwerk mit der Rohdichte $\rho = 1800 \text{ kg /m}^3$
<b>Fußboden</b>	5 cm Zementestrich
	2 cm Trittschalldämmung
	20 cm Beton
<b>Decke</b>	analog dem Fußbodenaufbau

### **Bauteil F**

Aufbau des Bauteils von innen nach außen:

<b>Trennwand</b>	20 cm Stahlbeton mit der Rohdichte $\rho = 2400 \text{ kg /m}^3$
	5 cm Dämmung
	20 cm Stahlbeton mit der Rohdichte $\rho = 2400 \text{ kg /m}^3$

### **flankierende Bauteile**

<b>Trennwand</b>	20 cm Stahlbeton mit der Rohdichte $\rho = 2400 \text{ kg /m}^3$
	5 cm Dämmung
	20 cm Stahlbeton mit der Rohdichte $\rho = 2400 \text{ kg /m}^3$
<b>Trennwand 2</b>	analog Trennwand 1
<b>Fußboden</b>	5 cm Zementestrich
	2 cm Trittschalldämmung
	20 cm Stahlbeton
<b>Decke</b>	20 cm Stahlbeton

**A 2.3.1 Schalldämmeigenschaften Bauteil E nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989 [6]**

Ermittlung der flächenbezogenen Masse der Bauteile nach (3.16):

$$\begin{aligned} \text{Trennwand:} \quad m' &= \rho_{\text{Bauteil}} \cdot d_{\text{Bauteil}} \\ &= 1720 \text{ kg / m}^3 \cdot 0,45 \text{ m} \\ &= 774 \text{ kg / m}^2 \end{aligned}$$

Die Rohdichte des Bauteils wird nach [6] Tabelle 3, Zeile 3, Spalte 2 abgemindert. Somit ergibt sich nach [6] Tabelle 6, Zeile 21 ein bewertetes Schalldämm – Maß von  $R'_{w,R} = 61$  dB. Unter Einbezug des Abschnittes 2.3.2 des Beiblatt 1 der DIN 4109, welcher einen Aufschlag für zweischalige Ausführungen mit durchgehender Trennfuge beinhaltet, wird das bewertete Schalldämm – Maß um 12 dB erhöht. Damit ergibt sich folgendes Ergebnis.

$$R'_{w,R} = 61 \text{ dB} + 12 \text{ dB}$$

$$R'_{w,R} = 73 \text{ dB}$$

**Ermittlung der Korrekturwerte  $K_{L,1}$  und  $K_{L,2}$ :**

Aufgrund der fehlenden Konformität mit den Tabellen 9 und 10 wird der Korrekturwert  $K_{L,1} = 0$  dB gesetzt. Dies ist damit zu begründen, dass aufgrund der Gebäudetrennfugen keine flankierenden Bauteile vorhanden sind.

Der Korrekturwert  $K_{L,2}$  ist aufgrund des Fußbodens als flankierendes biegeweiches Bauteil nach Tabelle 15, Spalte 2, Zeile 1:  $K_{L,2} = 1$  dB.

Damit ergibt sich ein bewertetes Schalldämm – Maß nach (3.17) von:

$$\begin{aligned} R'_{w,R} &= R_{w,R} + K_{L,1} + K_{L,2} \\ &= 73 \text{ dB} + 0 \text{ dB} + 1 \text{ dB} \\ &= 74 \text{ dB} \end{aligned}$$



### **A 2.3.2 Schalldämmeigenschaften Bauteil F nach Beiblatt 1 zur DIN 4109 / 11.1989**

Ermittlung der flächenbezogenen Masse der Bauteile nach (3.16):

Zu beachten ist das mit einer Rohdichte von Stahlbeton nach [6] Abschnitt 2.2.2.1 von  $2300 \text{ kg / m}^3$  zu rechnen ist.

$$\begin{aligned} \text{Trennwand:} \quad m' &= \rho_{\text{Bauteil}} * d_{\text{Bauteil}} \\ &= 2300 \text{ kg / m}^3 * 0,40 \text{ m} \\ &= 920 \text{ kg / m}^2 \end{aligned}$$

nach [6] Tabelle 6, Zeile 21 ergibt sich damit ein bewertetes Schalldämm – Maß von  $R_{w,R} = 64 \text{ dB}$ . Unter Einbezug des Abschnittes 2.3.2 des Beiblatt 1 der DIN 4109 ergibt sich folgendes Ergebnis.

$$R'_{w,R} = 63 \text{ dB} + 12 \text{ dB}$$

$$R'_{w,R} = 75 \text{ dB}$$

#### **Ermittlung der Korrekturwerte $K_{L,1}$ und $K_{L,2}$ :**

Aufgrund der fehlenden Konformität mit den Tabellen 9 und 10 wird der Korrekturwert  $K_{L,1} = 0 \text{ dB}$  gesetzt. Dies ist damit zu begründen, dass aufgrund der Gebäudetrennfugen keine flankierenden Bauteile vorhanden sind.

Der Korrekturwert  $K_{L,2}$  ist aufgrund des Fußbodens als flankierendes biegeweiches Bauteil nach Zeile 1:  $K_{L,2} = 1 \text{ dB}$ .

Damit ergibt sich ein bewertetes Schalldämm – Maß nach (3.17) von

$$\begin{aligned} R'_{w,R} &= R_{w,R} + K_{L,1} + K_{L,2} \\ &= 75 \text{ dB} + 0 \text{ dB} + 1 \text{ dB} \\ &= 76 \text{ dB} \end{aligned}$$

**A 2.3.3 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil E****Prüfstandbedingungen**

Schalldämm Maß KS zweischalig Laborbedingungen ( $\eta_{\text{tot,lab}}$ )				
Schale	<b>1</b>			
Dicke	<b>0,2</b>			[m]
Dichte:	<b>1800</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
$m'$	<b>360</b>			[kg/m <sup>2</sup> ]
Dichte Luft	<b>1,18</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
Abstrahlgrad $d\sigma$				
$l_1$	<b>5,73</b>			[m]
$l_2$	<b>3,1</b>			[m]
$c_0$	<b>343</b>			[m / s]
$c_L$	<b>2600</b>	<b>nach DIN 12354 - 1</b>		[m / s]
$S$	<b>17,763</b>			[m <sup>2</sup> ]
$\eta_{\text{int}}$	<b>0,015</b>			

$f_c$	<b>125,69</b>	[Hz]
$f_{11}$	<b>31,48</b>	[Hz]
$f_{\text{ref}}$	<b>1000,00</b>	[Hz]
=>	$f_{11} < f_c/2$	

$f$ [Hz]	$k_0$		Abstrahlgrad $\sigma_f$	Abstrahlgrad $\sigma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\lambda$	Bemerkung
63	1,2	-0,1	0,9	0,4	0,2	0,0	0,7	$f < f_c$
80	1,5	-0,1	1,0	0,4	0,2	0,0	0,8	
100	1,8	-0,1	1,1	0,4	0,2	0,0	0,9	
125	2,3	-0,1	1,2	0,4	0,2	0,0	1,0	
160	2,9	-0,1	1,3	2,2				$f > f_c \Rightarrow \sigma = \sigma_2$
200	3,7	-0,1	1,4	1,6				
250	4,6	-0,1	1,5	1,4				
315	5,8	-0,1	1,7	1,3				
400	7,3	-0,1	1,8	1,2				
500	9,2	-0,1	1,9	1,2				
630	11,5	-0,1	2,0	1,1				
800	14,7	-0,1	2,1	1,1				
1000	18,3	-0,1	2,2	1,1				
1250	22,9	-0,1	2,3	1,1				
1600	29,3	-0,1	2,5	1,0				
2000	36,6	-0,1	2,6	1,0				
2500	45,8	-0,1	2,7	1,0				
3150	57,7	-0,1	2,8	1,0				
4000	73,3	-0,1	2,9	1,0				
5000	91,6	-0,1	3,0	1,0				

$f$ [Hz]	$\eta_{tot,lab}$	$\tau$	Bemerkung $\tau$	$R$ [dB]
63	0,108516983	0,000209991	$f < f_c$	36,8
80	0,09798809	0,000133326		38,8
100	0,089226804	8,71046E-05		40,6
125	0,081390472	5,68328E-05	$f = f_c$	42,5
160	0,073681441	0,000390766	$f > f_c$	34,1
200	0,067486277	0,000126064		39,0
250	0,061945153	5,25425E-05		42,8
315	0,056822066	2,36913E-05		46,3
400	0,052113402	1,10557E-05		49,6
500	0,048195236	5,60688E-06		52,5
630	0,044572667	2,83432E-06		55,5
800	0,041243138	1,4207E-06		58,5
1000	0,038472576	7,51757E-07		61,2
1250	0,035994511	3,999E-07		64,0
1600	0,033556701	1,99657E-07		67,0
2000	0,031597618	1,06743E-07		69,7
2500	0,029845361	5,70951E-08		72,4
3150	0,028225299	2,98543E-08		75,2
4000	0,026736288	1,52573E-08		78,2
5000	0,025497255	8,13854E-09		80,9

Schalldämm Maß KS zweischalig Laborbedingungen ( $\eta_{tot,lab}$ )				
Schale	2			
Dicke	0,25			[m]
Dichte:	1800			[kg/m <sup>3</sup> ]
$m'$	450			[kg/m <sup>2</sup> ]
Dichte Luft	1,18			[kg/m <sup>3</sup> ]
Abstrahlgrad $\sigma$				
$l_1$	5,73			[m]
$l_2$	3,1			[m]
$c_0$	343			[m / s]
$c_L$	2600	nach DIN 12354 - 1		[m / s]
$S$	17,763			[m <sup>2</sup> ]
$\eta_{int}$	0,015			

$f_c$	100,55	[Hz]
$f_{11}$	39,35	[Hz]
$f_{ref}$	1000	[Hz]
=>	$f_{11} < f_c/2$	

$f$ [Hz]	$k_0$		Abstrahlgra $d \sigma_f$	Abstrahlgrad $\sigma$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\lambda$	Bemerkung
63	1,2	-0,1	0,9	0,9	0,3	0,0	0,8	$f < f_c$
80	1,5	-0,1	1,0	0,9	0,3	0,0	0,9	
100	1,8	-0,1	1,1	0,9	0,3	0,0	1,0	
125	2,3	-0,1	1,2	2,3				
160	2,9	-0,1	1,3	1,6				$f > f_c \Rightarrow \sigma = \sigma_2$
200	3,7	-0,1	1,4	1,4				
250	4,6	-0,1	1,5	1,3				
315	5,8	-0,1	1,7	1,2				
400	7,3	-0,1	1,8	1,2				
500	9,2	-0,1	1,9	1,1				
630	11,5	-0,1	2,0	1,1				
800	14,7	-0,1	2,1	1,1				
1000	18,3	-0,1	2,2	1,1				
1250	22,9	-0,1	2,3	1,0				
1600	29,3	-0,1	2,5	1,0				
2000	36,6	-0,1	2,6	1,0				
2500	45,8	-0,1	2,7	1,0				
3150	57,7	-0,1	2,8	1,0				
4000	73,3	-0,1	2,9	1,0				
5000	91,6	-0,1	3,0	1,0				

$f$ [Hz]	$\eta_{tot,lab}$	$\tau$	Bemerkung $\tau$	$R$ [dB]
63	0,131896229	0,000328425	$f < f_c$	34,8
80	0,118735112	0,000204132		36,9
100	0,107783505	9,63792E-05	$f = f_c$	40,2
125	0,09798809	0,000345919	$f > f_c$	34,6
160	0,088351801	9,62919E-05		40,2
200	0,080607846	4,03776E-05		43,9
250	0,073681441	1,88123E-05		47,3
315	0,067277583	9,04387E-06		50,4
400	0,061391753	4,40165E-06		53,6
500	0,056494045	2,29489E-06		56,4
630	0,051965833	1,18561E-06		59,3
800	0,047803923	6,05014E-07		62,2
1000	0,044340721	3,24627E-07		64,9
1250	0,041243138	1,74784E-07		67,6
1600	0,038195876	8,8303E-08		70,5
2000	0,035747022	4,7669E-08		73,2
2500	0,033556701	2,57272E-08		75,9
3150	0,031531623	1,35698E-08		78,7
4000	0,02967036	6,99386E-09		81,6
5000	0,028121569	3,75869E-09		84,2

Nach (3.51) und (3.52) wurde das Schalldämm – Maß der Konstruktion bestimmt.

Dicke	<b>0,2</b>	<b>0,25</b>	[m]			
Dichte:	<b>1800</b>	<b>1800</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]			
Dämm - Dicke	<b>0,05</b>		[m]			
$m''$	<b>360</b>	<b>450</b>	[kg/m <sup>2</sup> ]			
Dichte Luft	<b>1,18</b>	<b>1,18</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]			
Dynam. Steifigkeit	<b>12,5</b>					
$f$ [Hz]	$R_1$ [dB]	$R_2$ [dB]	$R_1 + R_2$			$R$ [dB]
<b>63</b>	<b>36,8</b>	<b>34,8</b>	<b>71,6</b>	<b><math>f &lt; 1715</math> Hz</b>		<b>52,9</b>
<b>80</b>	<b>38,8</b>	<b>36,9</b>	<b>75,7</b>			<b>59,0</b>
<b>100</b>	<b>40,6</b>	<b>40,2</b>	<b>80,8</b>			<b>66,0</b>
<b>125</b>	<b>42,5</b>	<b>34,6</b>	<b>77,1</b>			<b>64,3</b>
<b>160</b>	<b>34,1</b>	<b>40,2</b>	<b>74,2</b>			<b>63,6</b>
<b>200</b>	<b>39,0</b>	<b>43,9</b>	<b>82,9</b>			<b>74,2</b>
<b>250</b>	<b>42,8</b>	<b>47,3</b>	<b>90,1</b>			<b>83,3</b>
<b>315</b>	<b>46,3</b>	<b>50,4</b>	<b>96,7</b>			<b>91,9</b>
<b>400</b>	<b>49,6</b>	<b>53,6</b>	<b>103,1</b>			<b>100,4</b>
<b>500</b>	<b>52,5</b>	<b>56,4</b>	<b>108,9</b>			<b>108,1</b>
<b>630</b>	<b>55,5</b>	<b>59,3</b>	<b>114,7</b>			<b>116,0</b>
<b>800</b>	<b>58,5</b>	<b>62,2</b>	<b>120,7</b>			<b>124,0</b>
<b>1000</b>	<b>61,2</b>	<b>64,9</b>	<b>126,1</b>			<b>131,4</b>
<b>1250</b>	<b>64,0</b>	<b>67,6</b>	<b>131,6</b>			<b>138,8</b>
<b>1600</b>	<b>67,0</b>	<b>70,5</b>	<b>137,5</b>			<b>146,9</b>
<b>2000</b>	<b>69,7</b>	<b>73,2</b>	<b>142,9</b>	<b><math>f &gt; 1715</math> Hz</b>		<b>148,9</b>
<b>2500</b>	<b>72,4</b>	<b>75,9</b>	<b>148,3</b>			<b>154,3</b>
<b>3150</b>	<b>75,2</b>	<b>78,7</b>	<b>153,9</b>			<b>159,9</b>
<b>4000</b>	<b>78,2</b>	<b>81,6</b>	<b>159,7</b>			<b>165,7</b>
<b>5000</b>	<b>80,9</b>	<b>84,2</b>	<b>165,1</b>			<b>171,1</b>
$f_R =$	<b>39,79</b>		[Hz]			
$f_C =$	<b>125,69</b>	<b>100,55</b>	[Hz]			

**A 2.3.4 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach DIN EN 12354 – 1 Bauteil F****Prüfstandbedingungen**

2 Wandschalen mit jeweils:

Schalldämm Maß Beton zweischalig Laborbedingungen ( $\eta_{\text{tot,lab}}$ )				
Schale	<b>1</b>			
Dicke	<b>0,2</b>			[m]
Dichte:	<b>2400</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
$m'$	<b>480</b>			[kg/m <sup>2</sup> ]
Dichte Luft	<b>1,18</b>			[kg/m <sup>3</sup> ]
Abstrahlgrad $\sigma$				
$l_1$	<b>6</b>			[m]
$l_2$	<b>2,75</b>			[m]
$c_0$	<b>343</b>			[m / s]
$c_L$	<b>3500</b>	<b>nach DIN 12354 - 1</b>		[m / s]
S	<b>16,5</b>			[m <sup>2</sup> ]
$\eta_{\text{int}}$	<b>0,006</b>			

Ermittlung Abstrahlgrad				
$f$ [Hz]	Abstrahlgrad $\sigma_1$	Abstrahlgrad $\sigma_2$	Abstrahlgrad $\sigma_3$	
63		12,12244898	0,794421117	$f < f_c$
80		15,39358601	0,895211182	
100	3,88432921		1,000876529	$f > f_c$
125	1,988019624		1,119013978	
160	1,549645384		1,266019795	
200	1,369556075		1,415453162	
250	1,263384694		1,582524744	
315	1,192183703		1,77637962	
400	1,142152903		2,001753058	
500	1,108884928		2,238027956	
630	1,083511936		2,51218015	
800	1,064019631		2,830906323	
1000	1,050232587		3,165049489	
1250	1,039580674		3,538632904	
1600	1,030521379		4,003506116	
2000	1,024193558		4,476055912	
2500	1,019214378		5,004382646	
3150	1,015158836		5,617405588	
4000	1,011879922		6,330098977	
5000	1,009470067		7,077265809	

$f$ [Hz]		$k_0$		Abstrahlgrad $\sigma_f$	Abstrahlgrad $\sigma$		$\eta_{tot,lab}$	$\tau$	Bemerkung $\tau$	$R$ [dB]
63		1,2	-0,1	0,8	0,11	$f < f_c$	0,13068931	3,32751E-05	$f < f_c$	44,8
80		1,5	-0,1	0,9	0,12		0,11665079	2,38687E-05		46,2
100		1,8	-0,1	1,1	0,14	$f > f_c$	0,10496907	1,24628E-06	$f = f_c$	59,0
125		2,3	-0,1	1,2	0,15		0,09452063	1,31283E-06	$f > f_c$	58,8
160		2,9	-0,1	1,3	0,17		0,08424192	8,99055E-07		60,5
200		3,7	-0,1	1,4	1,4		0,0759817	3,26048E-05		44,9
250		4,6	-0,1	1,5	1,3		0,06859354	1,57358E-05		48,0
315		5,8	-0,1	1,6	1,2		0,06176275	7,77944E-06		51,1
400		7,3	-0,1	1,7	1,1		0,05548454	3,88166E-06		54,1
500		9,2	-0,1	1,9	1,1		0,05026031	2,06804E-06		56,8
630		11,5	-0,1	2,0	1,1		0,04543022	1,092E-06		59,6
800		14,7	-0,1	2,1	1,1		0,04099085	5,69984E-07		62,4
1000		18,3	-0,1	2,2	1,1		0,03729677	3,12479E-07		65,1
1250		22,9	-0,1	2,3	1,0		0,03399268	1,71997E-07		67,6
1600		29,3	-0,1	2,4	1,0		0,03074227	8,91125E-08		70,5
2000		36,6	-0,1	2,5	1,0		0,02813016	4,92518E-08		73,1
2500		45,8	-0,1	2,7	1,0		0,02579381	2,72343E-08		75,6
3150		57,7	-0,1	2,8	1,0		0,02363373	1,47409E-08		78,3
4000		73,3	-0,1	2,9	1,0		0,02164838	7,8086E-09		81,1
5000		91,6	-0,1	3,0	1,0		0,01999634	4,30771E-09		83,7

$f_c$	<b>93,37</b>	[Hz]
$f_{11}$	<b>50,40</b>	[Hz]
$f_{ref}$	<b>1000,00</b>	[Hz]
=>	$f_{11} < f_c/2$	

Nach (3.51) und (3.52) wurde das Schalldämm – Maß der Konstruktion bestimmt.

Dicke	0,2	0,2	[m]			
Dichte:	2400	2400	[kg/m <sup>3</sup> ]			
Dämm - Dicke	0,05		[m]			
Schalleinfallswinkel	90	90	[°]			
m''	480	480	[kg/m <sup>2</sup> ]			
Dichte Luft	1,18	1,18	[kg/m <sup>3</sup> ]			
Dynam. Steifigkeit	12,5	12,5				
f [Hz]	R <sub>1</sub> [dB]	R <sub>2</sub> [dB]	R <sub>1</sub> + R <sub>2</sub>			R [dB]
63	44,8	44,8	89,6	f < 1715 Hz		70,8
80	46,2	46,2	92,4			75,8
100	59,0	59,0	118,1			103,3
125	58,8	58,8	117,6			104,8
160	60,5	60,5	120,9			110,3
200	44,9	44,9	89,7			81,0
250	48,0	48,0	96,1			89,3
315	51,1	51,1	102,2			97,4
400	54,1	54,1	108,2			105,5
500	56,8	56,8	113,7			112,9
630	59,6	59,6	119,2			120,5
800	62,4	62,4	124,9			128,2
1000	65,1	65,1	130,1			135,4
1250	67,6	67,6	135,3			142,5
1600	70,5	70,5	141,0			150,3
2000	73,1	73,1	146,2		f > 1715 Hz	
2500	75,6	75,6	151,3			157,3
3150	78,3	78,3	156,6			162,6
4000	81,1	81,1	162,1			168,1
5000	83,7	83,7	167,3			173,3
f <sub>R</sub> =	36,32		[Hz]			
f <sub>C</sub> =	93,37	93,37	[Hz]			



### A 2.3.5 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil E

In nachfolgender Tabelle sind die Materialdaten für Bauteil E dargestellt.

Schalldämm - Maß KS Mauerwerk zweischalig			
Schicht	1	2	
Dicke	0,2	0,25	[m]
Dichte:	1800	1800	[kg/m <sup>3</sup> ]
Dämm - Dicke	0,05		[m]
Poisson Zahl	0,009	0,009	nach FESI
E-Modul	6E+09	6E+09	nach FESI
Verlustfaktor	0,015	0,015	(nach DIN EN 12354-1)
$m''$	360	450	[kg/m <sup>2</sup> ]
Dichte Luft	1,18	1,18	[kg/m <sup>3</sup> ]
Dynam. Steifigkeit	12,5		[MN/m <sup>3</sup> ]

In nachfolgender Tabelle sind die berechneten Schalldämm –Eigenschaften dargestellt.

$f$ [Hz]	$R_1$ [dB]	$R_2$ [dB]	$R_1 + R_2$		$R$ [dB]
63	41,9	43,9	85,8	$f < 142$ Hz	67,0
80	44,0	45,9	89,9		73,2
100	45,9	47,9	93,8		79,0
125	47,9	49,8	97,7		84,9
160	50,0	35,3	85,3	$f < 177,63$ Hz	74,6
200	35,3	38,2	73,4	$f < 1715$ Hz	64,7
250	38,2	41,1	79,2		72,5
315	41,2	44,1	85,3		80,5
400	44,3	47,2	91,5		88,8
500	47,2	50,1	97,3		96,5
630	50,2	53,1	103,3		104,6
800	53,3	56,2	109,6		112,9
1000	56,2	59,1	115,4		120,6
1250	59,1	62,0	121,2		128,4
1600	62,4	65,3	127,6		137,0
2000	65,3	68,2	133,4	$f > 1715$ Hz	139,4
2500	68,2	71,1	139,2		145,2
3150	71,2	74,1	145,3		151,3
4000	74,3	77,2	151,5		157,5
5000	77,2	80,1	157,3		163,3

$f_{R=}$	39,79		[Hz]
$f_{c=}$	177,63	142,11	[Hz]

**A 2.3.6 Schalldämmeigenschaften frequenzabhängig nach Heckl [4] Bauteil F**

In nachfolgender Tabelle sind die Materialdaten für Bauteil F dargestellt.

<b>Schalldämm - Maß Beton zweischalig</b>			
<i>Schicht</i>	1	2	
<i>Dicke</i>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	[m]
<i>Dichte:</i>	<b>2400</b>	<b>2400</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>Dämm - Dicke</i>	<b>0,05</b>		[m]
<i>Poisson Zahl</i>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	
<i>E-Modul</i>	<b>3,65E+10</b>	<b>3,65E+10</b>	
<i>Verlustfaktor</i>	<b>0,006</b>	<b>0,006</b>	(nach DIN EN 12354-1)
<i>m''</i>	<b>480</b>	<b>480</b>	[kg/m <sup>2</sup> ]
<i>Dichte Luft</i>	<b>1,18</b>	<b>1,18</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]
<i>Dynam. Steifigkeit</i>	<b>12,5</b>		[MN/m <sup>3</sup> ]

In nachfolgender Tabelle sind die berechneten Schalldämm –Eigenschaften dargestellt.

$f$ [Hz]	$R_1$ [dB]	$R_2$ [dB]	$R_1 + R_2$		$R$ [dB]
63	44,4	44,4	88,8	$f < 81,5$ Hz	70,1
80	46,5	25,2	71,7		55,0
100	28,1	28,1	56,3		41,5
125	31,0	31,0	62,1		49,3
160	34,3	34,3	68,5		57,9
200	37,2	37,2	74,3		65,6
250	40,1	40,1	80,1		73,4
315	43,1	43,1	86,2		81,4
400	46,2	46,2	92,4		89,7
500	49,1	49,1	98,2		97,4
630	52,1	52,1	104,2		105,5
800	55,2	55,2	110,5		113,8
1000	58,1	58,1	116,3		121,5
1250	61,0	61,0	122,1		129,3
1600	64,3	64,3	128,5	137,9	
2000	67,2	67,2	134,3	$f > 1715$ Hz	140,3
2500	70,1	70,1	140,1		146,1
3150	73,1	73,1	146,2		152,2
4000	76,2	76,2	152,4		158,4
5000	79,1	79,1	158,2		164,2

$f_R =$	<b>36,32</b>		[Hz]
$f_c =$	<b>81,48</b>	<b>81,43</b>	[Hz]

## A 2.4 Analytische Betrachtung des dreischaligen Wandaufbaus nach Sharp [22]

Bauteil G

In nachfolgender Tabelle sind die Materialdaten für Bauteil G dargestellt.

	Schale 1	Zwischenraum	Schale 2	Zwischenraum	Schale 3	
Material	Beton	Dämmung	Beton	Dämmung	Beton	
Schichtdicke	<b>0,3</b>	<b>0,05</b>	<b>0,25</b>	<b>0,05</b>	<b>0,2</b>	[m]
Dichte	<b>2400</b>		<b>2400</b>		<b>2400</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]
$m'$	<b>720</b>		<b>600</b>		<b>480</b>	[kg/m <sup>2</sup> ]
$M$	<b>1800</b>					
dynamische Steifigkeit		<b>20</b>		<b>20</b>		[MN/m <sup>3</sup> ]
$f_c$	<b>54,32</b>		<b>65,19</b>		<b>81,48</b>	[Hz]

$\rho_0$	<b>1,18</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c_0$	<b>343</b>	[m/s]
$f_{\alpha,\beta,1}$	<b>15,56</b>	[Hz]
$f_{\alpha,\beta,2}$	<b>8,75</b>	[Hz]
$a$	<b>0,01259259</b>	
$b$	<b>0,00011574</b>	

$f_\alpha$	<b>39,55</b>	[Hz]
$f_\beta$	<b>43,82</b>	[Hz]
$f_{I1}$	<b>545,92</b>	[Hz]
$f_{I2}$	<b>1091,84</b>	[Hz]

In nachfolgender Tabelle sind die berechneten Schalldämm –Eigenschaften dargestellt.

$f$ [Hz]	Bereich	$R_2$ [dB]	$R_3$ [dB]	$R$ [dB]
	$f < f_\alpha$			
<b>63</b>	$f_\beta < f < f_I$	<b>25,0</b>	<b>22,1</b>	<b>37,0</b>
<b>80</b>		<b>28,1</b>	<b>25,2</b>	<b>50,5</b>
<b>100</b>		<b>31,0</b>	<b>28,1</b>	<b>63,1</b>
<b>125</b>		<b>33,9</b>	<b>31,0</b>	<b>75,7</b>
<b>160</b>		<b>37,2</b>	<b>34,3</b>	<b>89,6</b>
<b>200</b>		<b>40,1</b>	<b>37,2</b>	<b>102,2</b>
<b>250</b>		<b>43,0</b>	<b>40,1</b>	<b>114,8</b>
<b>315</b>		<b>46,0</b>	<b>43,1</b>	<b>127,9</b>
<b>400</b>		<b>49,1</b>	<b>46,2</b>	<b>141,4</b>
<b>500</b>		<b>52,0</b>	<b>49,1</b>	<b>154,0</b>
<b>630</b>	$f_I > f$	<b>55,0</b>	<b>52,1</b>	<b>176,5</b>
<b>800</b>		<b>58,1</b>	<b>55,2</b>	<b>185,9</b>
<b>1000</b>		<b>61,0</b>	<b>58,1</b>	<b>194,6</b>
<b>1250</b>		<b>63,9</b>	<b>61,0</b>	<b>203,3</b>
<b>1600</b>		<b>67,2</b>	<b>64,3</b>	<b>213,0</b>
<b>2000</b>		<b>70,1</b>	<b>67,2</b>	<b>221,7</b>
<b>2500</b>		<b>73,0</b>	<b>70,1</b>	<b>230,4</b>
<b>3150</b>		<b>76,0</b>	<b>73,1</b>	<b>239,4</b>
<b>4000</b>		<b>79,1</b>	<b>76,2</b>	<b>248,8</b>
<b>5000</b>		<b>82,0</b>	<b>79,1</b>	<b>257,5</b>

## **Anlage 3: Materialdaten**

---

In nachfolgenden Tabellen sind die verwendeten Materialdaten zusammengefasst.

Tabelle A 3.1 Absorptionsgrade der Materialien

Frequenz [Hz]		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Bauteil									
Kalksandstein	Absorptionsgrad $\alpha$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09	0,09
Beton		0,08	0,09	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
Gipskarton		0,08	0,09	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04

Tabelle A 3.2 Konstanten der verwendeten Materialien

Wert	Kalksandstein	Beton	Gipskarton	Dämmung	Luft
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1800	2400	900	30	1,18
Poisson Zahl	0,009	0,2	0,15	-	-
E - Modul	$6 \cdot 10^9$	$3,65 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^9$	-	-
Verlustfaktor $n$	0,015	0,006	0,03	-	-
Strömungswiderstand $R_f$ [kg/(m <sup>3</sup> s)]	-	-	-	5000	-
Dynamische Steifigkeit $s'$ [MN / m <sup>3</sup> ]	-	-	-	20	-
Longitudinalwellen- geschwindigkeit $c_L$ [m/s]	2600	3500	1800	-	-

## Anlage 4: Ergebnisse der numerischen Simulation mit Ray – Tracing Methode (Raynoise)

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
A 4.1 Bauteil A (24 cm KS MW)	A4-1
A 4.2 Bauteil B (20 cm Beton)	A4-2
A 4.3 Bauteil C (24 cm KS MW mit VS)	A4-3
A 4.4 Bauteil D (20 cm Beton mit VS)	A4-4
A 4.5 Bauteil E (25 cm KS MW, 5 cm Dämmung, 20 cm KS MW)	A4-5
A 4.6 Bauteil F (20 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)	A4-6
A 4.7 Bauteil G (30 cm Beton, 5 cm Dämmung, 25 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)	A4-7

### A 4.1 Bauteil A (24 cm KS MW)

In nachfolgenden Abbildungen ist das Schalldämm - Verhalten des Bauteils A frequenzabhängig dargestellt.

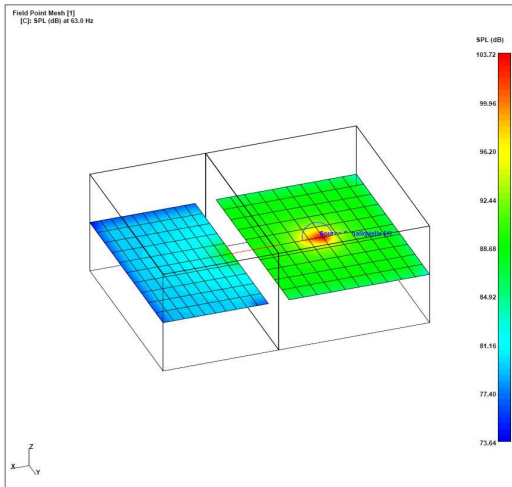


Abbildung A 4.1.1 Transmission BT A bei 63 Hz

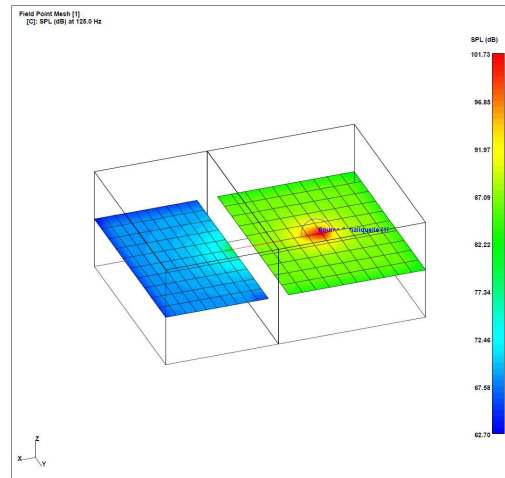


Abbildung A 4.1.2 Transmission BT A bei 125 Hz

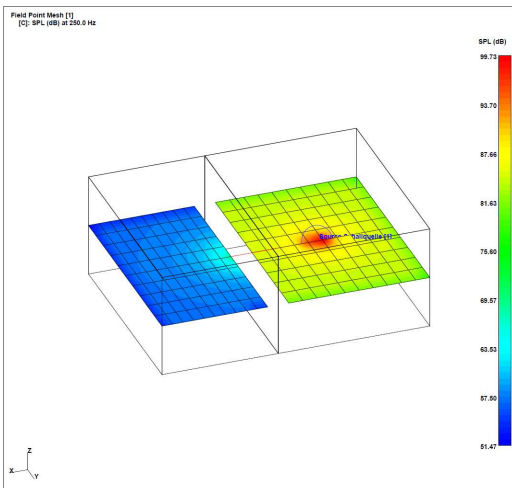


Abbildung A 4.1.3 Transmission BT A bei 250 Hz

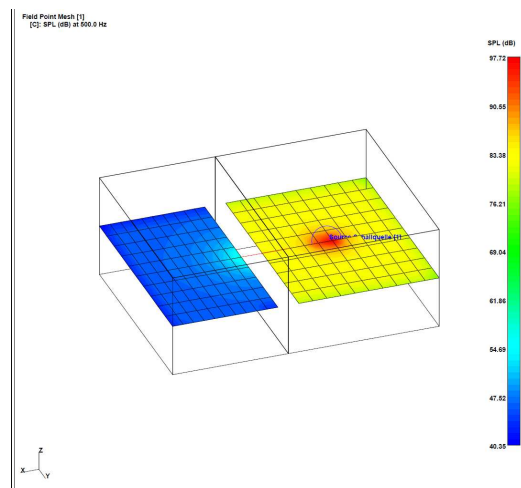


Abbildung A 4.1.4 Transmission BT A bei 500 Hz

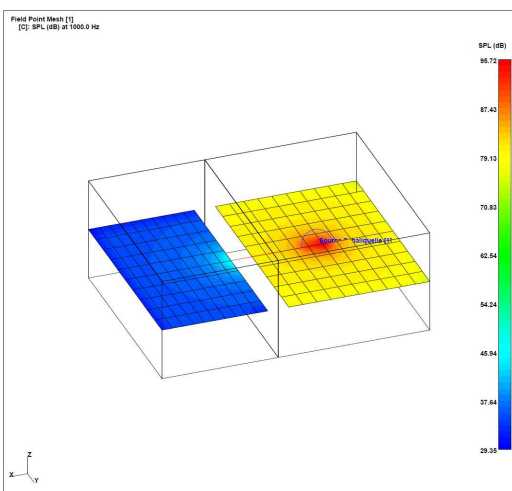


Abbildung A 4.1.5 Transmission BT A bei 1000 Hz

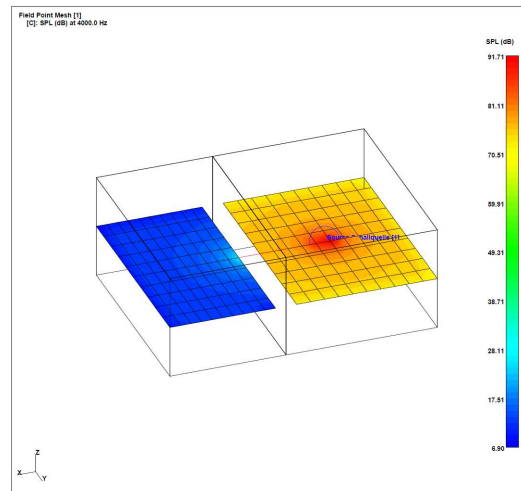


Abbildung A 4.1.6 Transmission BT A bei 4000 Hz

### A 4.2 Bauteil B (20 cm Beton)

In nachfolgenden Abbildungen ist das Schalldämm - Verhalten des Bauteils B frequenzabhängig dargestellt.

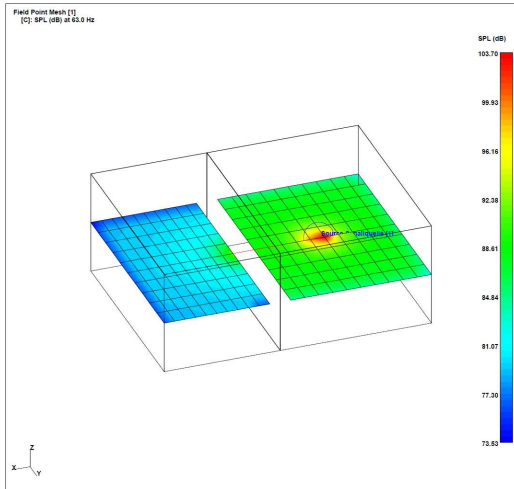


Abbildung A 4.2.1 Transmission BT B bei 63 Hz

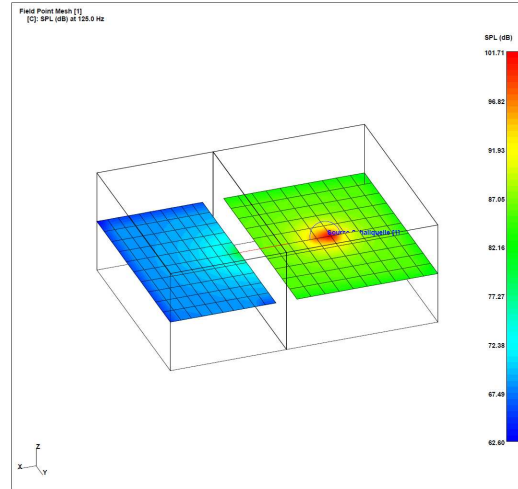


Abbildung A 4.2.2 Transmission BT B bei 125 Hz

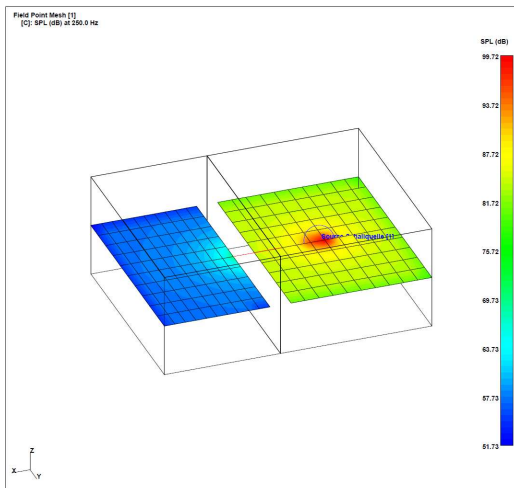


Abbildung A 4.2.3 Transmission BT B bei 250 Hz

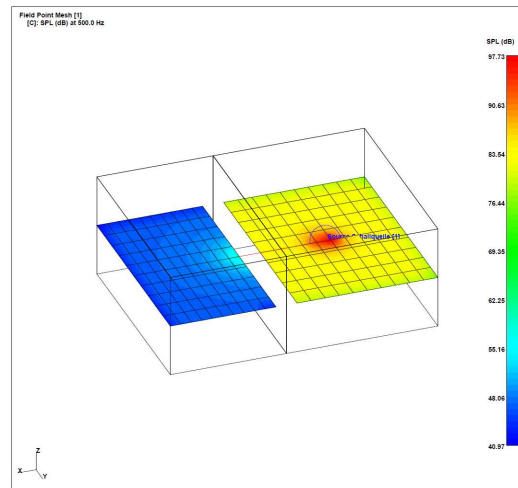


Abbildung A 4.2.4 Transmission BT B bei 500 Hz

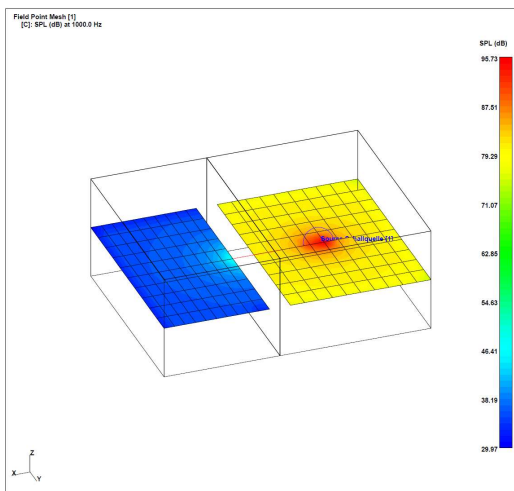


Abbildung A 4.2.5 Transmission BT B bei 1000 Hz

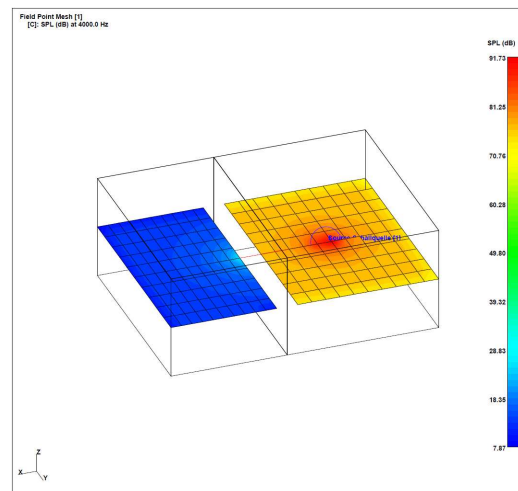


Abbildung A 4.2.6 Transmission BT B bei 4000 Hz



### A 4.3 Bauteil C (24 cm KS MW mit VS)

In nachfolgenden Abbildungen ist das Schalldämm - Verhalten des Bauteils C frequenzabhängig dargestellt.

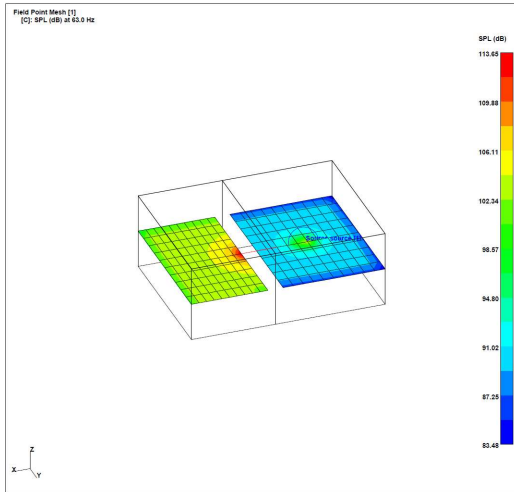


Abbildung A 4.3.1 Transmission BT C bei 63 Hz

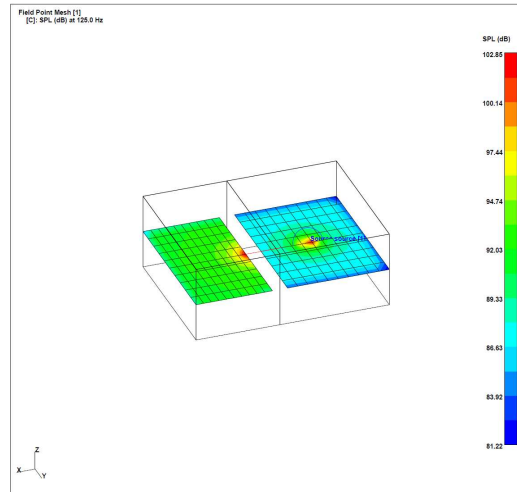


Abbildung A 4.3.2 Transmission BT C bei 125 Hz

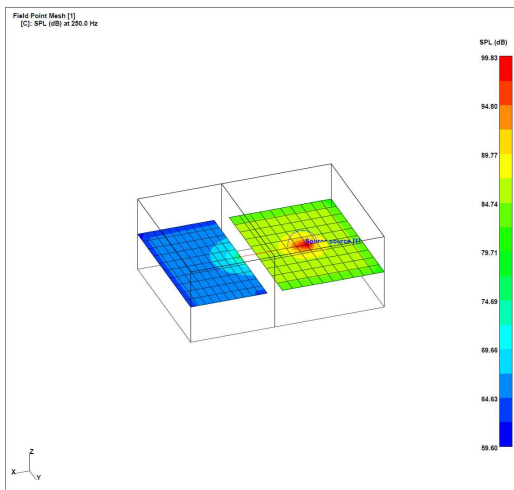


Abbildung A 4.3.3 Transmission BT C bei 250 Hz

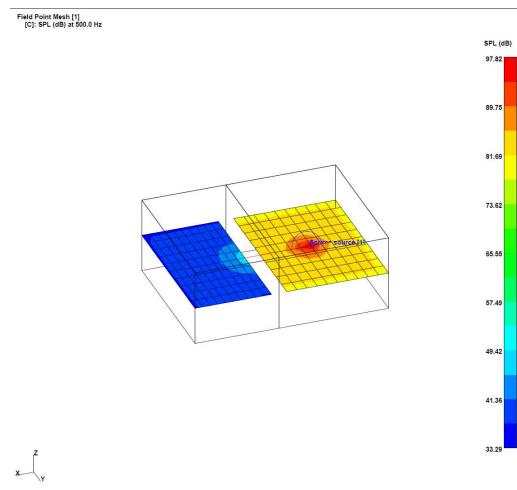


Abbildung A 4.3.4 Transmission BT C bei 500 Hz

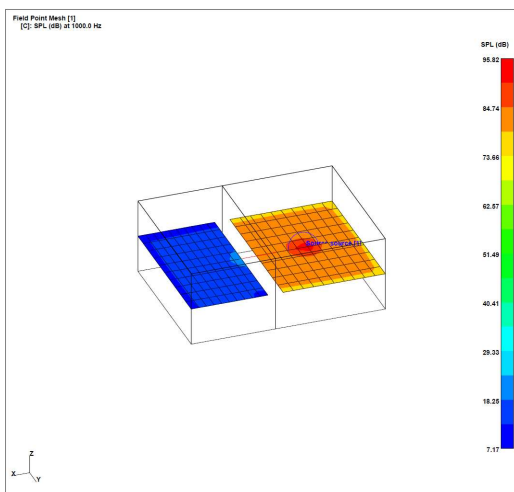


Abbildung A 4.3.5 Transmission BT C bei 1000 Hz

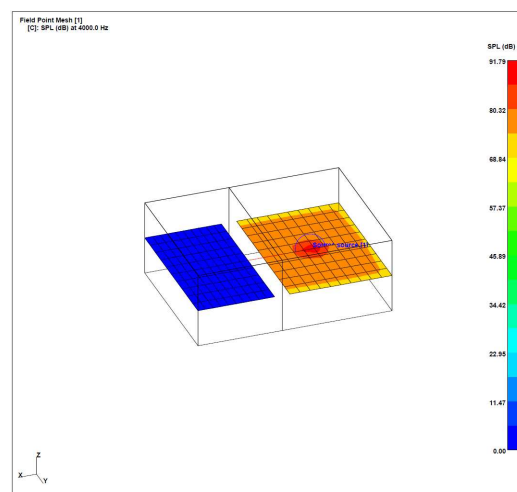


Abbildung A 4.3.6 Transmission BT C bei 4000 Hz

### A 4.4 Bauteil D (20 cm Beton mit VS)

In nachfolgenden Abbildungen ist das Schalldämm - Verhalten des Bauteils D frequenzabhängig dargestellt.

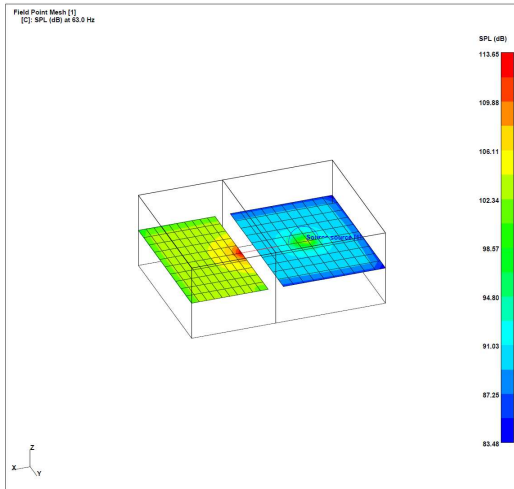


Abbildung A 4.4.1 Transmission BT D bei 63 Hz

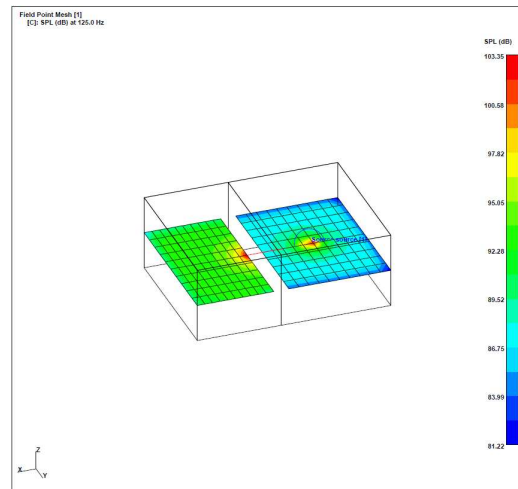


Abbildung A 4.4.2 Transmission BT D bei 125 Hz

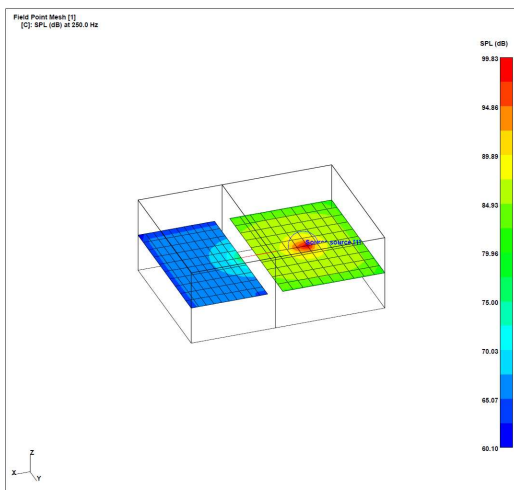


Abbildung A 4.4.3 Transmission BT D bei 250 Hz

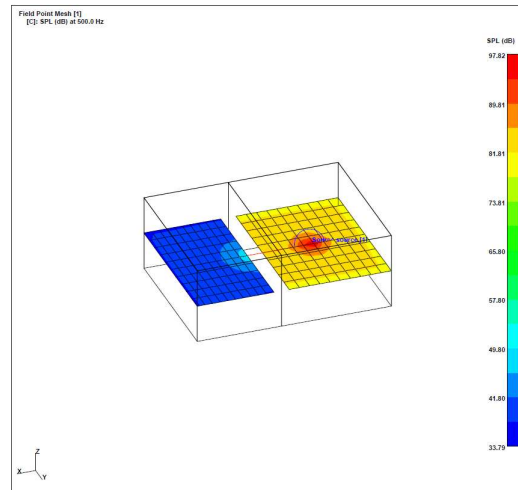


Abbildung A 4.4.4 T ransmission BT D bei 500Hz

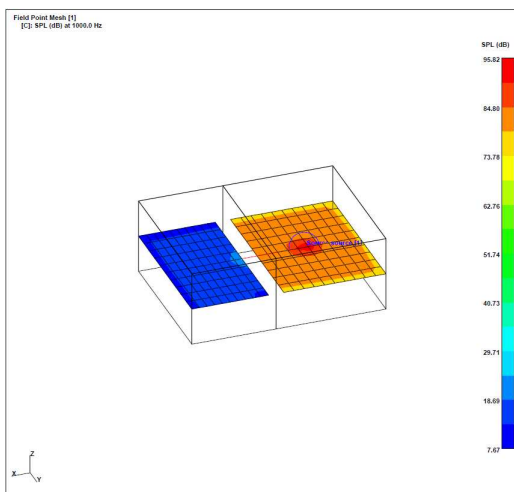


Abbildung A 4.4.5 Transmission BT D bei 1000 Hz

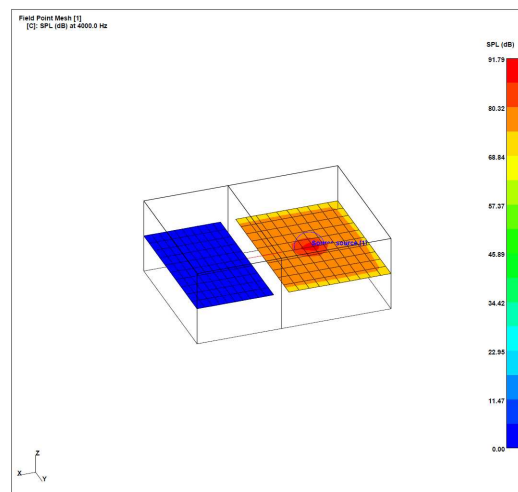


Abbildung A 4.4.6 Transmission BT D bei 4000Hz

**A 4.5 Bauteil E (25 cm KS MW, 5 cm Dämmung, 20 cm KS MW)**

In nachfolgenden Abbildungen ist das Schalldämm - Verhalten des Bauteils E frequenzabhängig dargestellt.

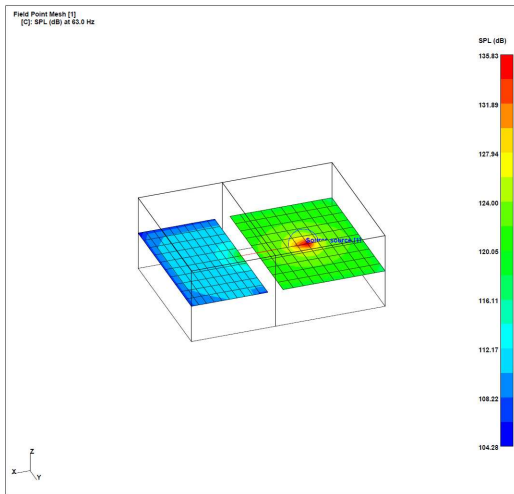


Abbildung A 4.5.1 Transmission BT E bei 63 Hz

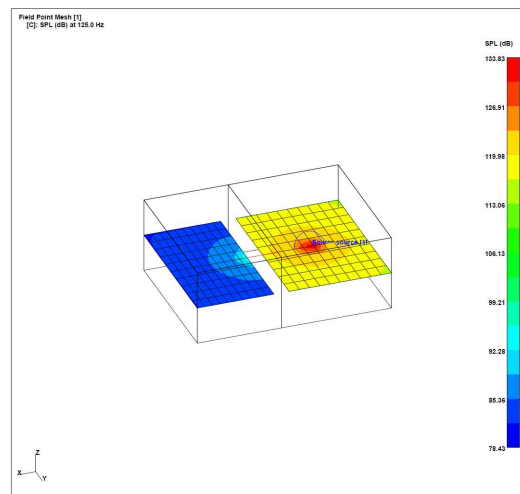


Abbildung A 4.5.2 Transmission BT E bei 125 Hz

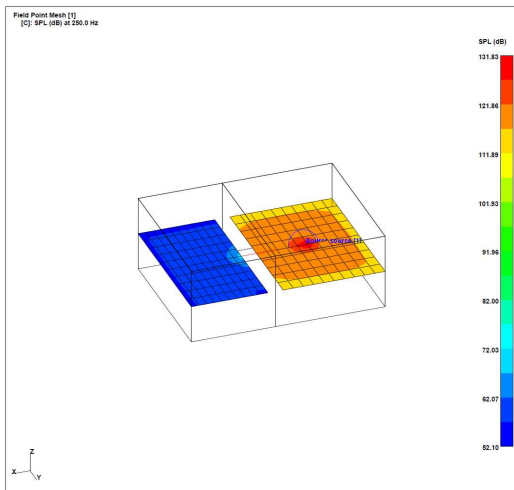


Abbildung A 4.5.3 Transmission BT E bei 250 Hz

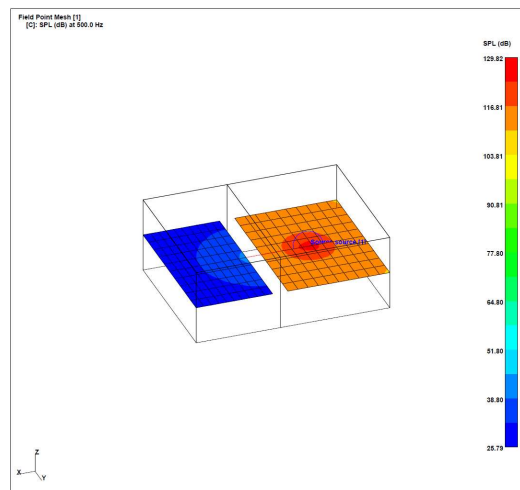


Abbildung A 4.5.4 Transmission BT E bei 500 Hz

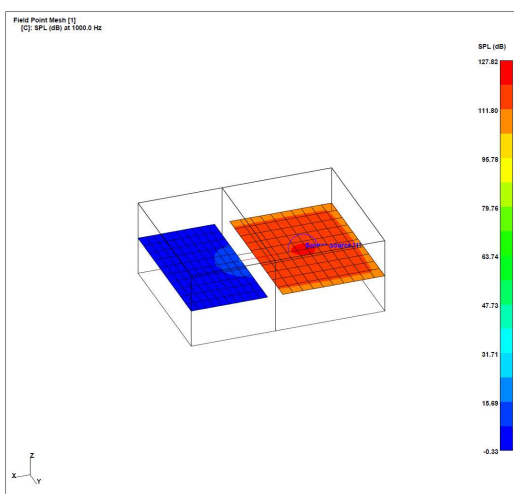


Abbildung A 4.5.5 Transmission BT E bei 1000 Hz

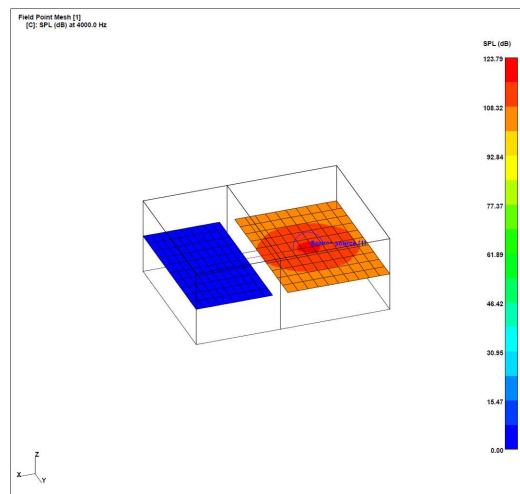


Abbildung A 4.5.6 Transmission BT E bei 4000 Hz

**A 4.6 Bauteil F (20 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)**

In nachfolgenden Abbildungen ist das Schalldämm - Verhalten des Bauteils F frequenzabhängig dargestellt.

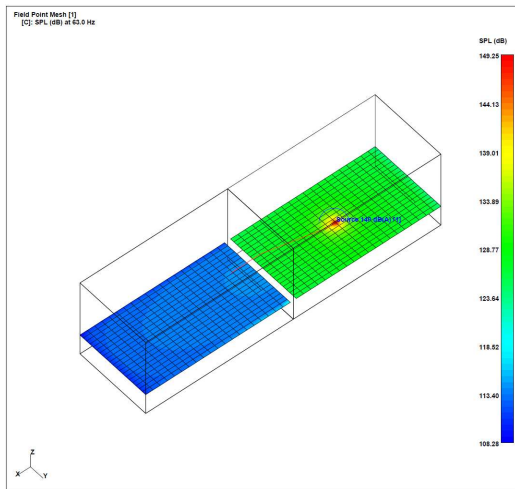


Abbildung A 4.6.1 Transmission BT F bei 63 Hz

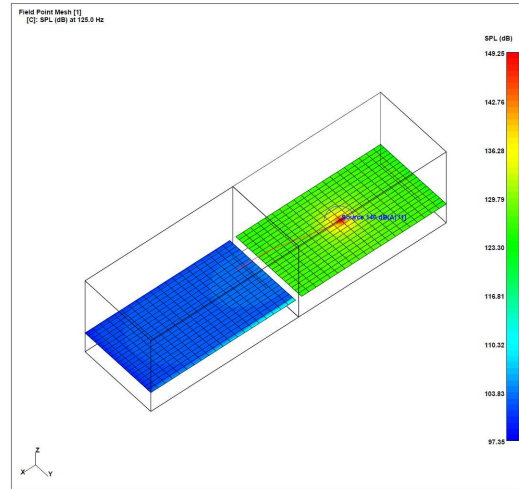


Abbildung A 4.6.2 Transmission BT F bei 125 Hz

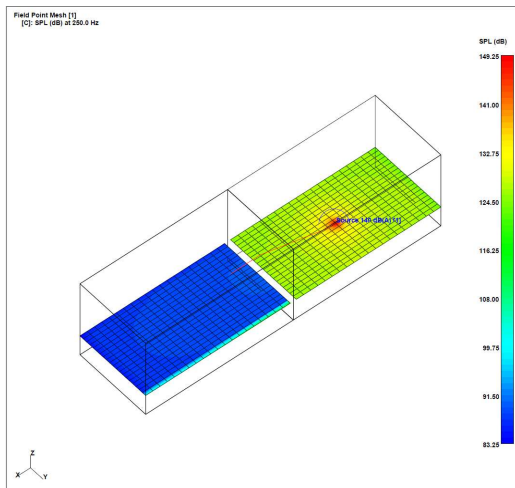


Abbildung A 4.6.3 Transmission BT F bei 250 Hz

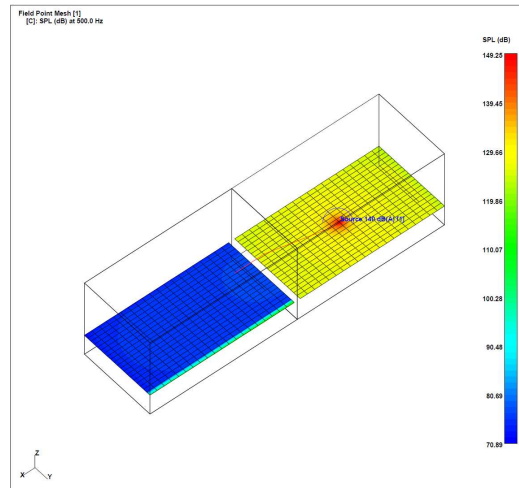


Abbildung A 4.4 Transmission BT F bei 500 Hz

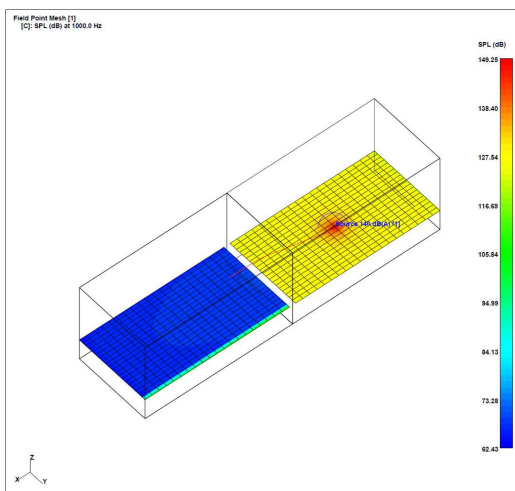


Abbildung A 4.4.5 Transmission BT F bei 1000 Hz

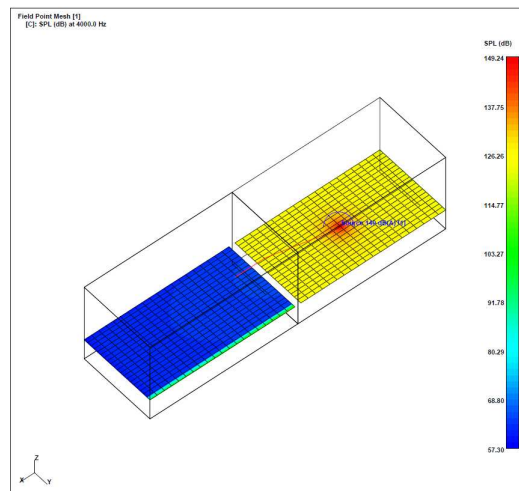


Abbildung A 4.4.6 Transmission BT F bei 4000 Hz

**A 4.7 Bauteil G (30 cm Beton, 5 cm Dämmung, 25 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)**

In nachfolgenden Abbildungen ist das Schalldämm - Verhalten des Bauteils G frequenzabhängig dargestellt.

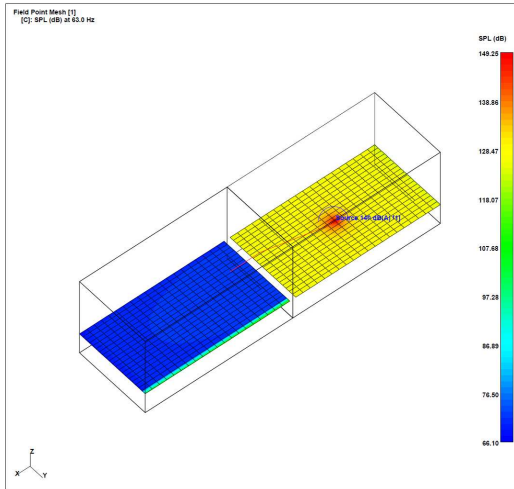


Abbildung A 4.7.1 Transmission BT G bei 63 Hz

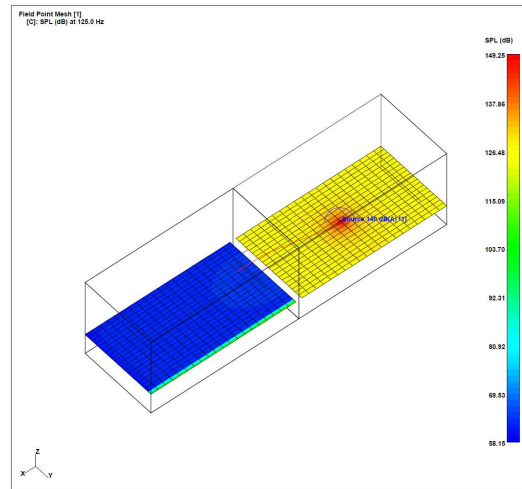


Abbildung A 4.7.2 Transmission BT G bei 125 Hz

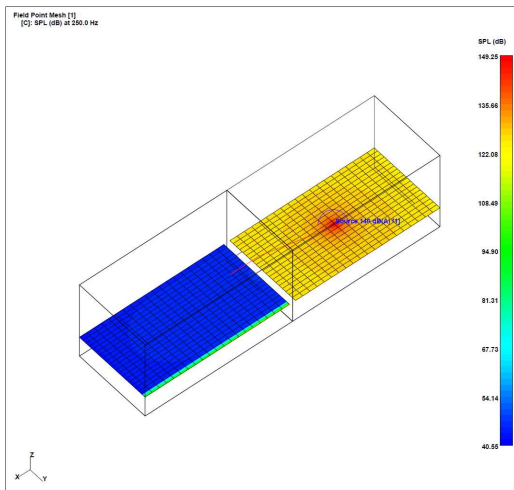


Abbildung A 4.7.3 Transmission BT G bei 250 Hz

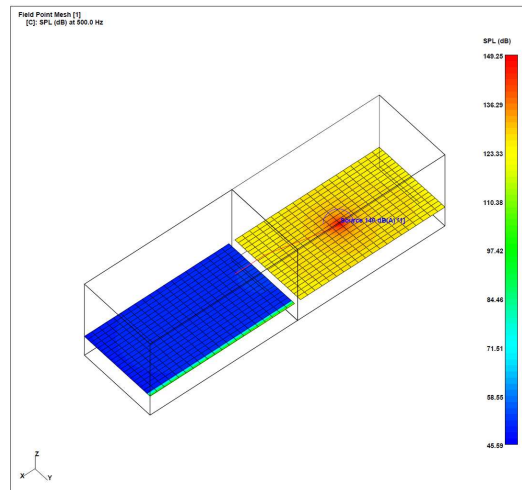


Abbildung A 4.7.4 Transmission BT G bei 500 Hz

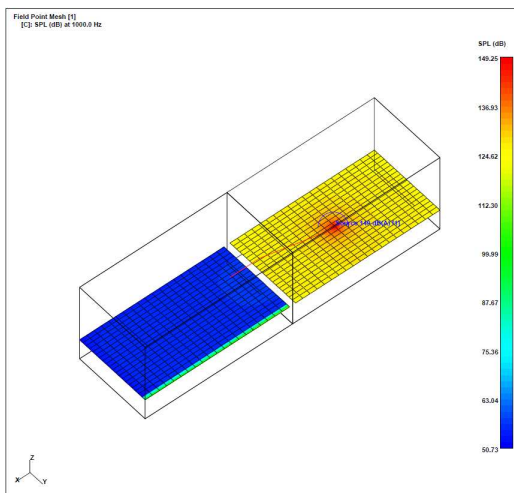


Abbildung A 4.7.5 Transmission BT G bei 1000 Hz

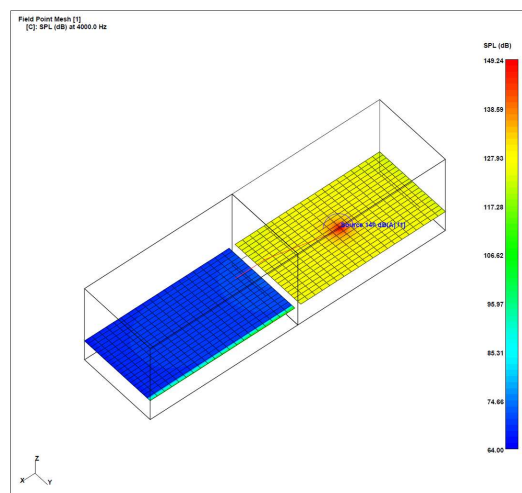


Abbildung A 4.7.6 Transmission BT G bei 4000 Hz

## **Anlage 5: Ergebnisse der numerischen Simulation mittels FEM (3D Modell)**

<b><u>Inhalt</u></b>	<b><u>Seite</u></b>
A 5.1 Bauteil A (24 cm KS MW)	A5-1
A 5.2 Bauteil B (20 cm Beton)	A5-9
A 5.3 Bauteil C (24 cm KS MW mit VS)	A5-17
A 5.4 Bauteil D (20 cm Beton mit VS)	A5-28
A 5.5 Bauteil E (25 cm KS MW, 5 cm Dämmung, 20 cm KS MW)	A5-39
A 5.6 Bauteil F (20 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)	A5-50
A 5.7 Bauteil G (30 cm Beton, 5 cm Dämmung, 25 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)	A5-61



## COMSOL Multiphysics - Modelldokumentation Bauteil A

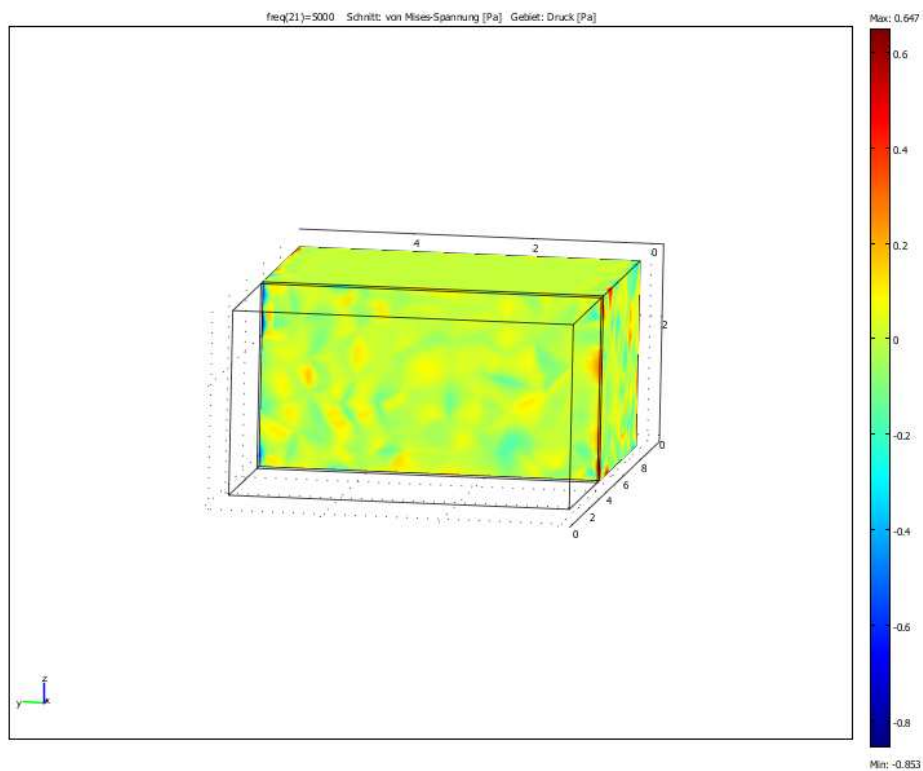
### (24 cm Kalksandsteinmauerwerk)

#### 1. Modelleigenschaften

Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (3D)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

#### 2. Postprozessing





### 3. Geometrie

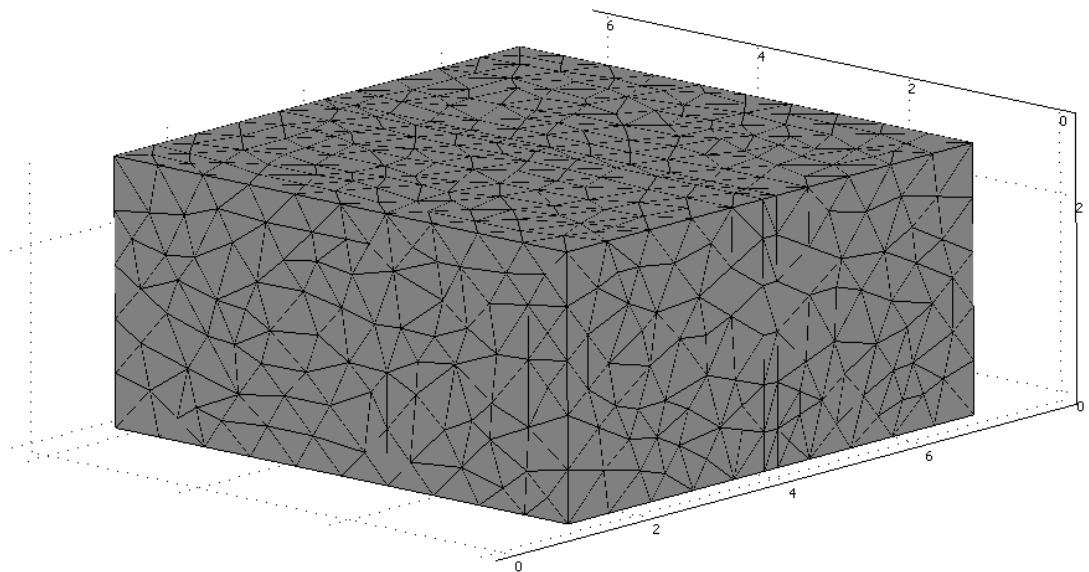
Raumdimensionen: 3D

Unabhängige Variablen: x, y, z

#### 3.1. Netz

##### 3.1.1. Statistik zur Netzinformation

Anzahl an Freiheitsgraden	12399
Netzknotenzahl	1281
Anzahl an Elementen	5686
Vierflächig	5686
Prismatisch	0
Würfelförmig	0
Anzahl an Randelementen	1842
Dreieckig	1842
Vierseitig	0
Anzahl an Kantenelementen	244
Knotenelementanzahl	24
Minimale Elementqualität	0.271
Element-Volumenverhältnis	0.02





### **3.2. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid)**

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid

#### **3.2.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid	freq	Hz	Anregungsfrequenz

#### **3.2.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus**

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### **3.2.3. Variablen**

Abhängige Variablen: u, v, w

Formfunktionen: shlag(2,'u'), shlag(2,'v'), shlag(2,'w')

#### **3.2.4. Randbedingungen**

Rand		12-15	16	11
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	<b>p_t_acpr*nx_acpr</b>	<b>p_t_acpr2*nx_acpr2</b>
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	<b>p_t_acpr*ny_acpr</b>	<b>p_t_acpr2*ny_acpr2</b>
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	<b>p_t_acpr*nz_acpr</b>	<b>p_t_acpr2*nz_acpr2</b>

### 3.2.5. Gebietbedingungen

Gebiet		3
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>E</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhos</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	<b>poisson</b>

### 3.3. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr

#### 3.3.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i*(kx*x+ky*y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### 3.3.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gestreute Welle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.3.3. Variablen

Abhängige Variablen: p

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p')$

### 3.3.4. Randbedingungen

Rand		16	22-26
Typ		Normale Beschleunigung	Schall: harte Grenzfläche (Wand)
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$\text{nx\_acsld} * \text{u\_tt\_acsld} + \text{ny\_acsld} * \text{v\_tt\_acsld} + \text{nz\_acsld} * \text{w\_tt\_acsld}$	0

### 3.3.5. Gebietbedingungen

Gebiet		4	5
Fluidichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>	<b>cw</b>

## 3.4. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr2

### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.4.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwelle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.4.3. Variablen

Abhängige Variablen: p2

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p2')$

### 3.4.4. Randbedingungen

Rand		1-5, 7-10	11
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$\text{nx\_acslid} * \text{u\_tt\_acslid} + \text{ny\_acslid} * \text{v\_tt\_acslid} + \text{nz\_acslid} * \text{w\_tt\_acslid}$

### 3.4.5. Gebietbedingungen

Gebiet		1	2
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>	<b>cw</b>

#### 4. Globale Ausdrücke

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
R	$10 \cdot \log_{10}(I_1/I_2)$	dB	Schalldämm - Maß
k0	$(2 \cdot \pi \cdot \text{freq}) / c_w$		
kx	$k_0 \cdot \cos(\text{theta})$		
ky	$k_0 \cdot \sin(\text{theta})$		

#### 5. Konstanten

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
dL	0.24[m]		Schichtdicke der Struktur
E	$6e9[N/m^2]$		E - Modul
poisson	0.009		Poisson Zahl
rhos	$1800[kg/m^3]$		Rohdichte der Struktur
rho	$1.18[kg/m^3]$		Rohdichte des Fluid
cw	343[m/s]		Schallgeschwindigkeit in Luft
theta	45		Schalleinfallswinkel
n	0.015		Verlustfaktor

#### 6. Integrations-Kopplungsvariablen

##### 6.1. Geometrie

##### 6.1.1. Ursprung Rand: 11

Name	Wert
Variablenname	I2
Ausdruck	$Ix\_acpr2$
Ordnung	4
Global	Ja

**6.1.2. Ursprung Rand: 16**

Name	Wert
Variablenname	I1
Ausdruck	lx_acpr
Ordnung	4
Global	Ja



## COMSOL Multiphysics-Modelldokumentation Bauteil B

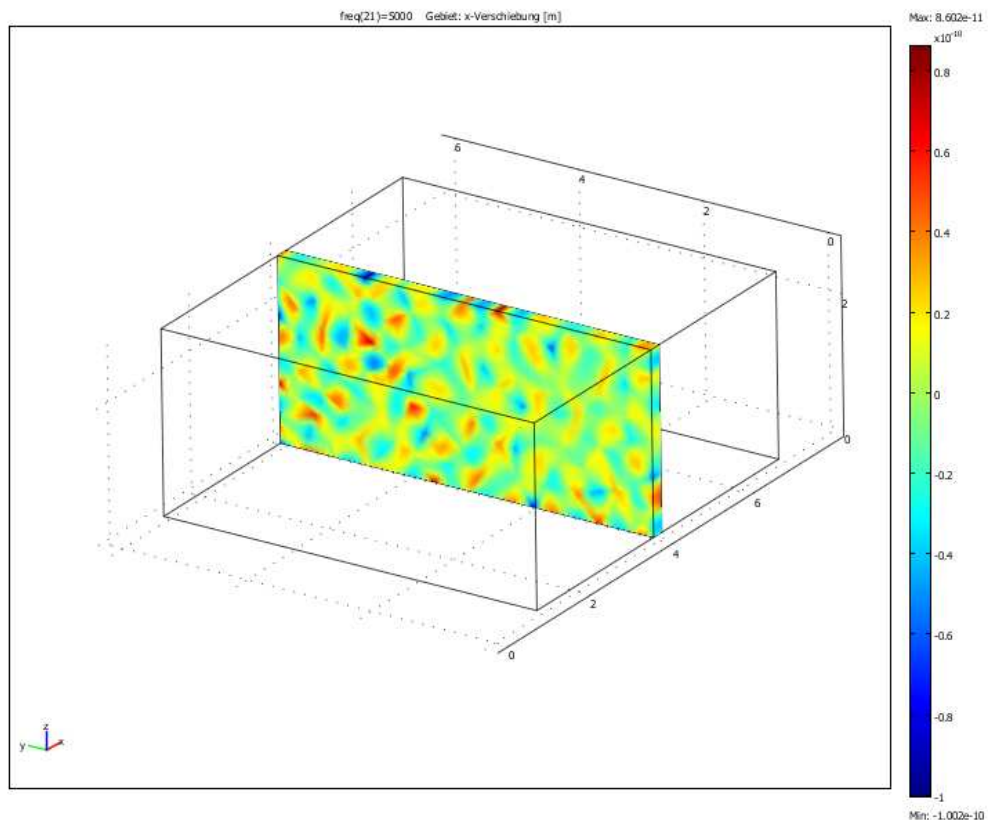
### (20 cm Beton)

#### 1. Modelleigenschaften

Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (3D)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

#### 2. Postprozessing



### 3. Geometrie

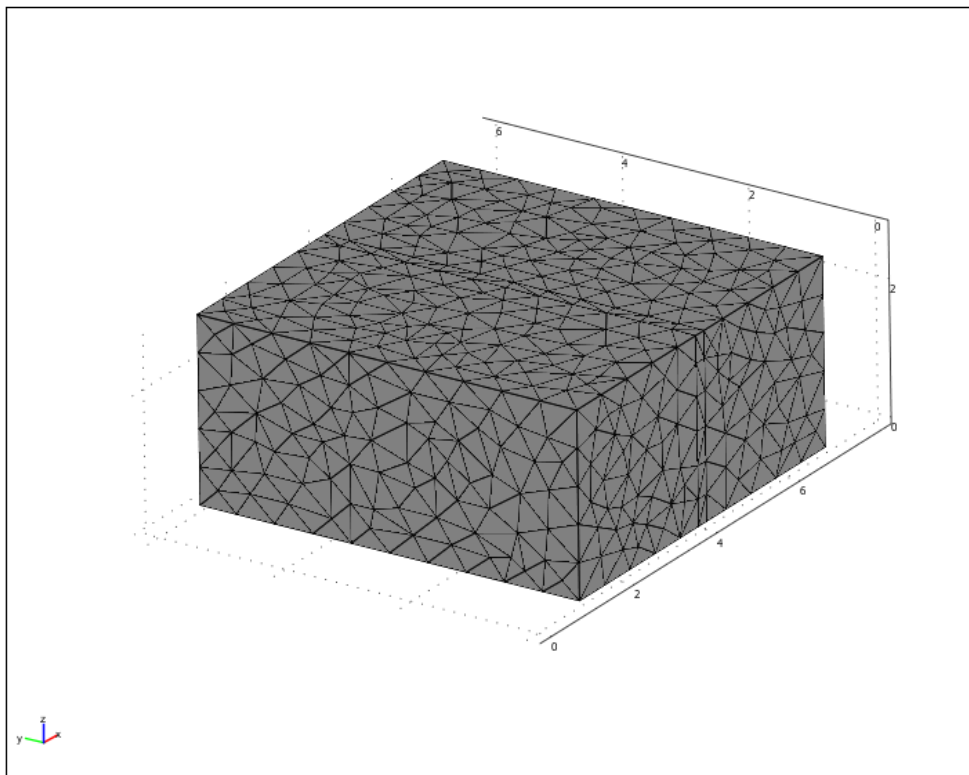
Raumdimensionen: 3D

Unabhängige Variablen: x, y, z

#### 3.1. Netz

##### 3.1.1. Statistik zur Netzinformation

Anzahl an Freiheitsgraden	12513
Netzknotenzahl	1293
Anzahl an Elementen	5774
Vierflächig	5774
Prismatisch	0
Würfelförmig	0
Anzahl an Randelementen	1836
Dreieckig	1836
Vierseitig	0
Anzahl an Kantenelementen	244
Knotenelementanzahl	24
Minimale Elementqualität	0.295
Element-Volumenverhältnis	0.02





**3.2. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid)**

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid

**3.2.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid	freq	Hz	Anregungsfrequenz

**3.2.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus**

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

**3.2.3. Variablen**

Abhängige Variablen: u, v, w

Formfunktionen: shlag(2,'u'), shlag(2,'v'), shlag(2,'w')

**3.2.4. Randbedingungen**

Rand		12-15	16	11
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	p_t_acpr*nx_acpr	p_t_acpr2*nx_acpr2
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	p_t_acpr*ny_acpr	p_t_acpr2*ny_acpr2
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	p_t_acpr*nz_acpr	p_t_acpr2*nz_acpr2

### 3.2.5. Gebietbedingungen

Gebiet		3
Youngscher Modul (E)	Pa	E
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	rhos
dampingtype		Verlustfaktor
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	1
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	0.001
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	poisson

### 3.3. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr

#### 3.3.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i*(kx*x+ky*y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### 3.3.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gestreute Welle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.3.3. Variablen

Abhängige Variablen: p

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p')$

### 3.3.4. Randbedingungen

Rand		16	22-26
Typ		Normale Beschleunigung	Schall: harte Grenzfläche (Wand)
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$\text{nx\_acslid} * \text{u\_tt\_acslid} + \text{ny\_acslid} * \text{v\_tt\_acslid} + \text{nz\_acslid} * \text{w\_tt\_acslid}$	0

### 3.3.5. Gebietbedingungen

Gebiet		4	5
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>	<b>cw</b>

## 3.4. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr2

### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.4.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwelle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.4.3. Variablen

Abhängige Variablen: p2

Formfunktionen: shlag(2,'p2')

### 3.4.4. Randbedingungen

Rand		1-5, 7-10	11
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_tt\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$

### 3.4.5. Gebietbedingungen

Gebiet		1	2
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>	<b>cw</b>

#### 4. Globale Ausdrücke

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
R	$10 \cdot \log_{10}(I_1/I_2)$	dB	Schalldämm - Maß
k0	$(2 \cdot \pi \cdot \text{freq}) / c_w$		
kx	$k_0 \cdot \cos(\text{theta})$		
ky	$k_0 \cdot \sin(\text{theta})$		

#### 5. Konstanten

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
dL	0.2[m]		Schichtdicke der Struktur
E	$36.5e9[\text{N}/\text{m}^2]$		E - Modul
poisson	0.2		Poisson Zahl
rhos	$2400[\text{kg}/\text{m}^3]$		Rohdichte der Struktur
rho	$1.18[\text{kg}/\text{m}^3]$		Rohdichte des Liquids
cw	$343[\text{m}/\text{s}]$		Schallgeschwindigkeit in Luft
theta	45		Schalleinfallswinkel
n	0.006		Verlustfaktor

#### 6. Integrations-Kopplungsvariablen

##### 6.1. Geometrie

##### 6.1.1. Ursprung Rand: 11

Name	Wert
Variablenname	I2
Ausdruck	$I_x \cdot \text{acpr}^2$
Ordnung	4
Global	Ja

**6.1.2. Ursprung Rand: 16**

<b>Name</b>	<b>Wert</b>
Variablenname	l1
Ausdruck	lx_acpr
Ordnung	4
Global	Ja



## COMSOL Multiphysics-Modelldokumentation Bauteil C

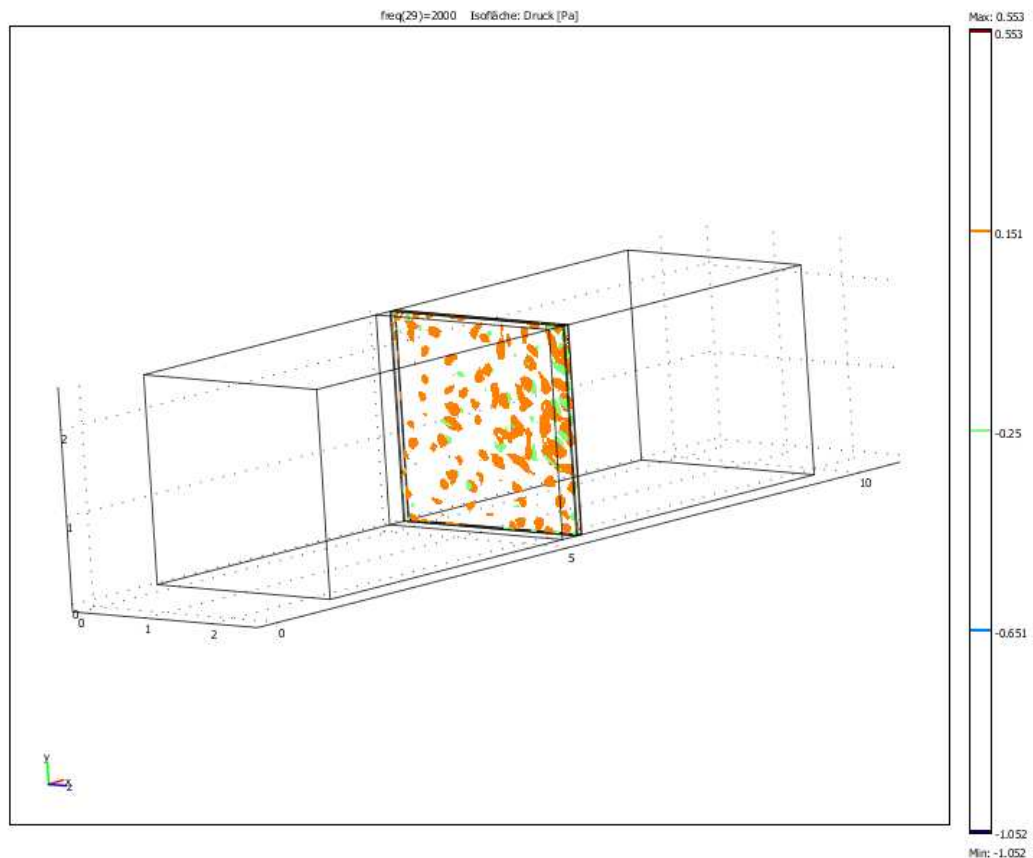
### (24 cm KS MW mit VS)

#### 1. Modelleigenschaften

Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (3D)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

#### 2. Postprozessing



### **3. Geometrie**

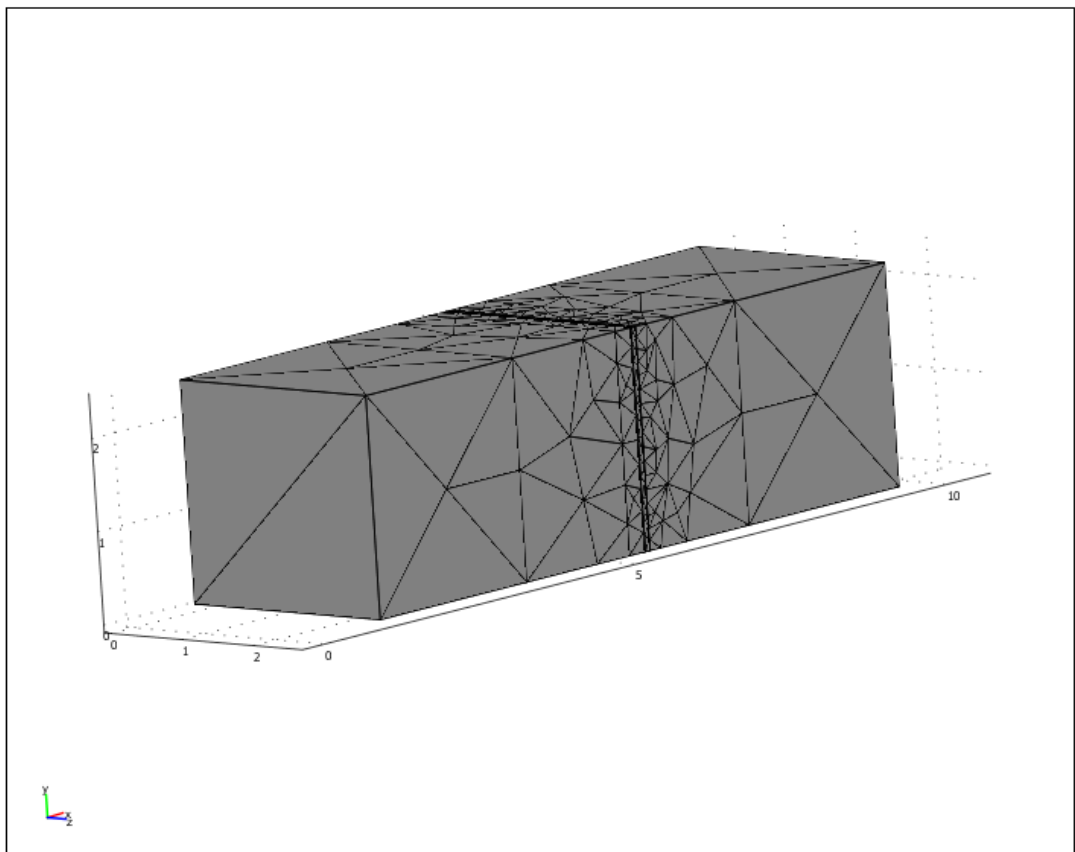
Raumdimensionen: 3D

Unabhängige Variablen: x, y, z

#### **3.1. Netz**

##### **3.1.1. Statistik zur Netzinformation**

Anzahl an Freiheitsgraden	26927
Netzknotenzahl	1495
Anzahl an Elementen	7602
Vierflächig	7602
Prismatisch	0
Würfelförmig	0
Anzahl an Randelementen	2972
Dreieckig	2972
Vierseitig	0
Anzahl an Kantenelementen	304
Knotenelementanzahl	28
Minimale Elementqualität	0.066
Element-Volumenverhältnis	0





### **3.2. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid)**

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid

#### **3.2.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid	freq	Hz	Anregungsfrequenz

#### **3.2.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus**

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### **3.2.3. Variablen**

Abhängige Variablen: u, v, w

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'u')$ ,  $\text{schlag}(2, 'v')$ ,  $\text{schlag}(2, 'w')$

#### **3.2.4. Randbedingungen**

Rand		7-10	6	11
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2*nx\_acpr2$	$p\_t\_acpr3*nx\_acpr3$
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2*ny\_acpr2$	$p\_t\_acpr3*ny\_acpr3$
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2*nz\_acpr2$	$p\_t\_acpr3*nz\_acpr3$

### 3.2.5. Gebietbedingungen

Gebiet		2
Youngscher Modul (E)	Pa	E
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	rhos
dampingtype		Verlustfaktor
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	1
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	0.001
Verlustfaktor (eta_s)	1	n
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	poisson

### 3.3. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid2)

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid2

#### 3.3.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid2	freq	Hz	Anregungsfrequenz

#### 3.3.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### 3.3.3. Variablen

Abhängige Variablen: u2, v2, w2

Formfunktionen: shlag(2,'u2'), shlag(2,'v2'), shlag(2,'w2')

### 3.3.4. Randbedingungen

Rand		22-25	26	21
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	<b>p_t_acpr*nx_acpr</b>	<b>p_t_acpr3*nx_acpr3</b>
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	<b>p_t_acpr*ny_acpr</b>	<b>p_t_acpr3*ny_acpr3</b>
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	<b>p_t_acpr*nz_acpr</b>	<b>p_t_acpr3*nz_acpr3</b>

### 3.3.5. Gebietbedingungen

Gebiet		5
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>EGK</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhoGK</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>
Verlustfaktor (eta_s)	1	<b>nGK</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	<b>poissonGK</b>

## 3.4. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr

### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i*(kx*x+ky*y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.4.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gestreute Welle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.4.3. Variablen

Abhängige Variablen: p

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p')$

### 3.4.4. Randbedingungen

Rand		26	31
Typ		Normale Beschleunigung	Schall: harte Grenzfläche (Wand)
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$\text{nx\_acslid2} * \text{u2\_tt\_acslid2} + \text{ny\_acslid2} * \text{v2\_tt\_acslid2} + \text{nz\_acslid2} * \text{w2\_tt\_acslid2}$	0

### 3.4.5. Gebietbedingungen

Gebiet		6
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>

**3.5. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)**

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr2

**3.5.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

**3.5.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus**

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gestreute Welle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

**3.5.3. Variablen**

Abhängige Variablen: p2

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p2')$

### 3.5.4. Randbedingungen

Rand		1-5	6
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_tt\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$

### 3.5.5. Gebietbedingungen

Gebiet		1
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>

## 3.6. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr3)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr3

### 3.6.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr3	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr3	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr3	k_acpr3	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr3	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.6.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwelle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.6.3. Variablen

Abhängige Variablen: p3

Formfunktionen: shlag(2,'p3')

### 3.6.4. Randbedingungen

Rand		11	12-15, 17-20	21
Typ		Normale Beschleunigung	Schall : harte Grenz fläche (Wand )	Normale Beschleunigung
Eingang sbesch. (nacc)	m /s <sup>2</sup>	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_t\_t\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$	0	$nx\_acslid2*u2\_tt\_acslid2+ny\_acslid2*v2\_t\_t\_acslid2+nz\_acslid2*w2\_tt\_acslid2$

### 3.6.5. Gebietbedingungen

Gebiet		3	4
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rho</b>	<b>rho</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>	<b>cw</b>
dampType		Nichts	<b>Delany-Bazley</b>
Strömungswiderstand (Rf)	kg/(m <sup>3</sup> s)	0	<b>5000</b>

#### 4. Globale Ausdrücke

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
R	$10 \cdot \log_{10}(I_1/I_2)$		Schalldämm- Maß
k0	$(2 \cdot \pi \cdot \text{freq}) / c_w$		
kx	$k_0 \cdot \cos(\text{theta})$		
ky	$k_0 \cdot \sin(\text{theta})$		

#### 5. Konstanten

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
dL	0.24[m]		Schichtdicke der Struktur (KS MW)
E	6e9[N/m <sup>2</sup> ]		E – Modul (KS MW)
poisson	0.009		Poisson Zahl (KS MW)
rhos	1800[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte der Struktur (KS MW)
rhow	1.18[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte des Liquids
cw	343[m/s]		Schallgeschwindigkeit in Luft
theta	45		Schalleinfallswinkel
n	0.015		Verlustfaktor (KS MW)
EGK	3.2e9[N/m <sup>2</sup> ]		E – Modul GK
poissonGK	0.15		Poisson Zahl GK
rhoGK	900[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte der Struktur (GK)
nGK	0.03		Verlustfaktor (GK)
rhoMIWO	30[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte der Dämmung

#### 6. Integrations-Kopplungsvariablen

##### 6.1. Geometrie

##### 6.1.1. Ursprung Rand: 6

Name	Wert
Variablenname	I2
Ausdruck	lx_acpr2
Ordnung	4
Global	Ja



**6.1.2. Ursprung Rand: 26**

<b>Name</b>	<b>Wert</b>
Variablenname	I1
Ausdruck	lx_acpr
Ordnung	4
Global	Ja



## COMSOL Multiphysics-Modelldokumentation Bauteil D

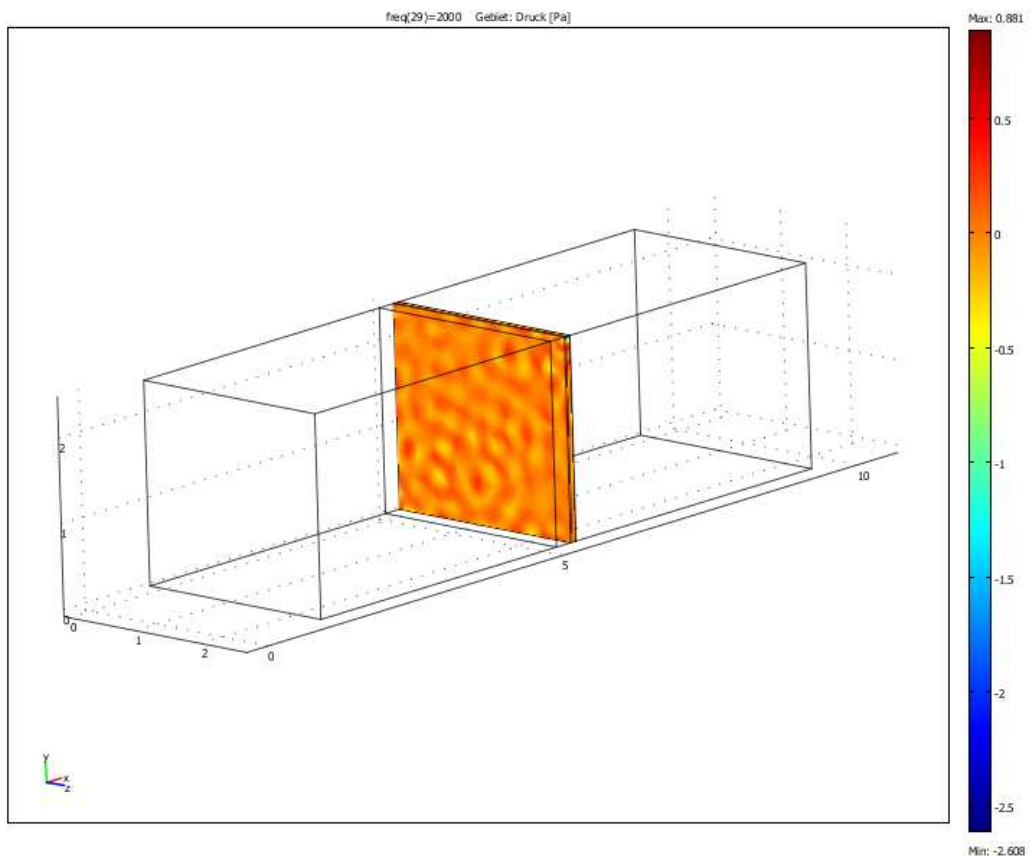
### (20 cm Beton mit VS)

#### 1. Modelleigenschaften

Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (3D)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

#### 2. Postprozessing



### **3. Geometrie**

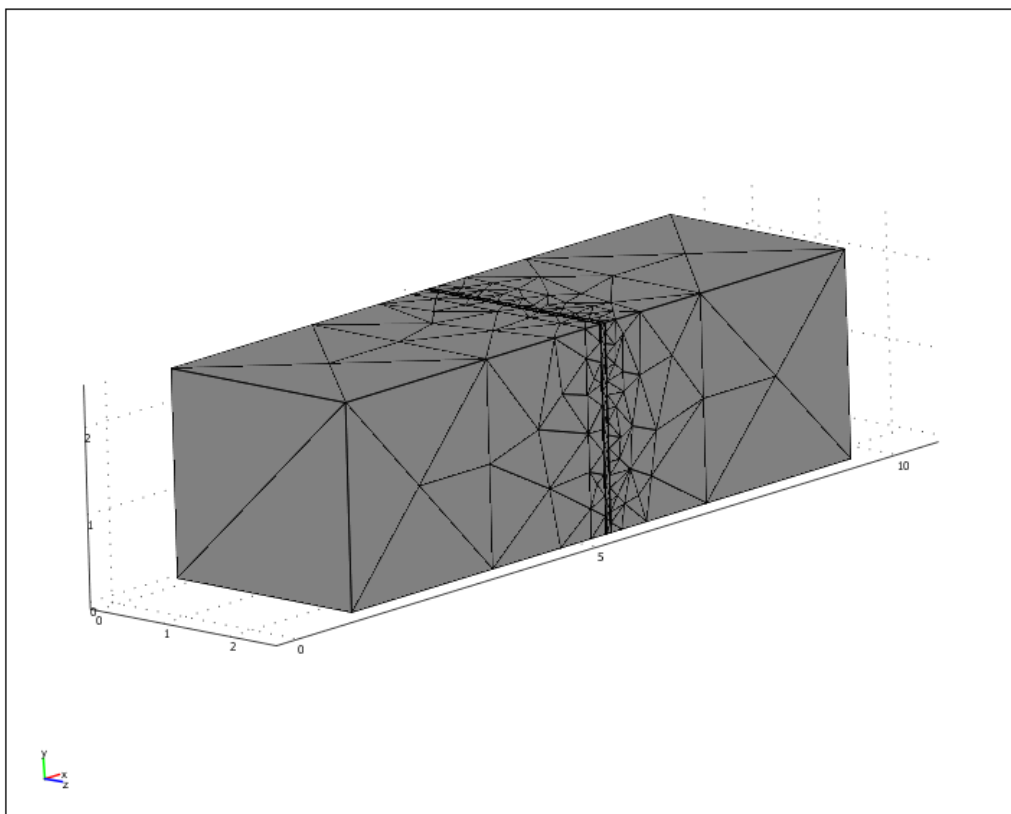
Raumdimensionen: 3D

Unabhängige Variablen: x, y, z

#### **3.1. Netz**

##### **3.1.1. Statistik zur Netzinformation**

Anzahl an Freiheitsgraden	26927
Netzknotenzahl	1495
Anzahl an Elementen	7602
Vierflächig	7602
Prismatisch	0
Würfelförmig	0
Anzahl an Randelementen	2972
Dreieckig	2972
Vierseitig	0
Anzahl an Kantenelementen	304
Knotenelementanzahl	28
Minimale Elementqualität	0.066
Element-Volumenverhältnis	0



### **3.2. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid)**

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid

#### **3.2.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid	freq	Hz	Anregungsfrequenz

#### **3.2.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus**

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### **3.2.3. Variablen**

Abhängige Variablen: u, v, w

Formfunktionen: shlag(2,'u'), shlag(2,'v'), shlag(2,'w')

#### **3.2.4. Randbedingungen**

Rand		7-10	6	11
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	p_t_acpr2*nx_acpr2	p_t_acpr3*nx_acpr3
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	p_t_acpr2*ny_acpr2	p_t_acpr3*nx_acpr3
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	p_t_acpr2*nz_acpr2	p_t_acpr3*nx_acpr3

### 3.2.5. Gebietbedingungen

Gebiet		2
Youngscher Modul (E)	Pa	E
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	rhos
dampingtype		Verlustfaktor
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	1
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	0.001
Verlustfaktor (eta_s)	1	n
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	poisson

### 3.3. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid2)

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid2

#### 3.3.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid2	freq	Hz	Anregungsfrequenz

#### 3.3.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### 3.3.3. Variablen

Abhängige Variablen: u2, v2, w2

Formfunktionen: shlag(2,'u2'), shlag(2,'v2'), shlag(2,'w2')

### 3.3.4. Randbedingungen

Rand		22-25	26	21
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	<b>p_t_acpr*nx_acpr</b>	<b>p_t_acpr3*nx_acpr3</b>
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	<b>p_t_acpr*ny_acpr</b>	<b>p_t_acpr3*ny_acpr3</b>
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	<b>p_t_acpr*nz_acpr</b>	<b>p_t_acpr3*nz_acpr3</b>

### 3.3.5. Gebietbedingungen

Gebiet		5
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>EGK</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhoGK</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>
Verlustfaktor (eta_s)	1	<b>nGK</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	<b>poissonGK</b>

## 3.4. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr

### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i*(kx*x+ky*y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.4.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gestreute Welle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.4.3. Variablen

Abhängige Variablen: p

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p')$

### 3.4.4. Randbedingungen

Rand		26	31
Typ		Normale Beschleunigung	Schall: harte Grenzfläche (Wand)
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$\text{nx\_acslid2} * \text{u2\_tt\_acslid2} + \text{ny\_acslid2} * \text{v2\_tt\_acslid2} + \text{nz\_acslid2} * \text{w2\_tt\_acslid2}$	0

### 3.4.5. Gebietbedingungen

Gebiet		6
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>

### 3.5. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr2

#### 3.5.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### 3.5.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gestreute Welle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### 3.5.3. Variablen

Abhängige Variablen: p2

Formfunktionen: shlag(2,'p2')



### 3.5.4. Randbedingungen

Rand		1-5	6
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_tt\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$

### 3.5.5. Gebietbedingungen

Gebiet		1
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>

## 3.6. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr3)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr3

### 3.6.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr3	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr3	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr3	k_acpr3	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr3	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.6.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwelle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.6.3. Variablen

Abhängige Variablen: p3

Formfunktionen: shlag(2,'p3')

### 3.6.4. Randbedingungen

Rand		11	12-15, 17-20	21
Typ		Normale Beschleunigung	Schall : harte Grenz fläche (Wan d)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_tt\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$	0	$nx\_acslid^2*u^2\_tt\_acslid+ny\_acslid^2*v^2\_tt\_acslid+nz\_acslid^2*w^2\_tt\_acslid$

### 3.6.5. Gebietbedingungen

Gebiet		3	4
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>	<b>cw</b>
dampType		Nichts	<b>Delany-Bazley</b>
Strömungswiderstand (Rf)	kg/(m <sup>3</sup> ·s)	0	<b>5000</b>

#### 4. Globale Ausdrücke

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
R	$10 \cdot \log_{10}(I_1/I_2)$		Schalldämm - Maß
k0	$(2 \cdot \pi \cdot \text{freq}) / c_w$		
kx	$k_0 \cdot \cos(\theta)$		
ky	$k_0 \cdot \sin(\theta)$		

#### 5. Konstanten

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
dL	0.2[m]		Schichtdicke der Struktur (Beton)
E	36.5e9[N/m <sup>2</sup> ]		E – Modul (Beton)
poisson	0.009		Poisson Zahl (Beton)
rhos	2400[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte der Struktur (Beton)
rhow	1.18[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte des Liquids
cw	343[m/s]		Schallgeschwindigkeit in Luft
theta	45		Schalleinfallswinkel
n	0.006		Verlustfaktor (Beton)
EGK	3.2e9[N/m <sup>2</sup> ]		E – Modul GK
rhoGK	900[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte der Struktur (GK)
poissonGK	0.15		Poisson Zahl GK
nGK	0.03		Verlustfaktor (GK)
rhoMIWO	30[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte der Dämmung

#### 6. Integrations-Kopplungsvariablen

##### 6.1. Geometrie

##### 6.1.1. Ursprung Rand: 6

Name	Wert
Variablenname	I2
Ausdruck	$I_{x\_acpr2}$
Ordnung	4
Global	Ja

**6.1.2. Ursprung Rand: 26**

<b>Name</b>	<b>Wert</b>
Variablenname	l1
Ausdruck	lx_acpr
Ordnung	4
Global	Ja



## COMSOL Multiphysics-Modelldokumentation Bauteil E

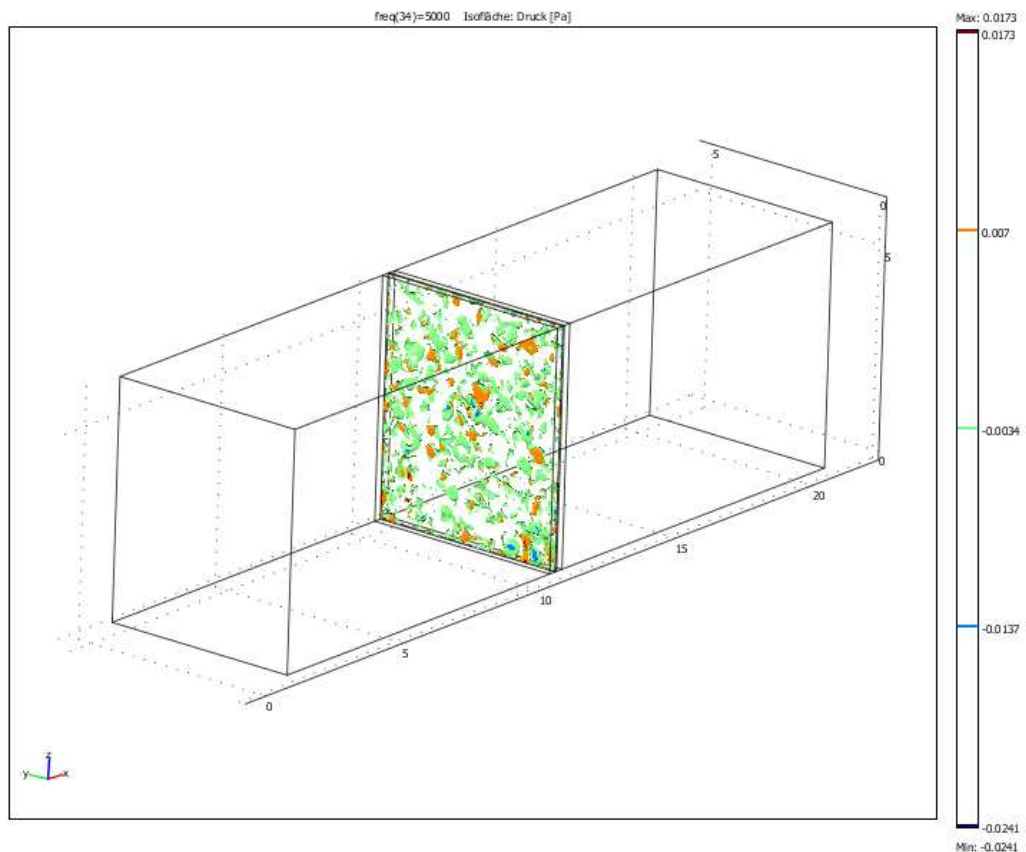
(24 cm KS MW, 5 cm Dämmung, 24 cm KS MW)

### 1. Modelleigenschaften

Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (3D)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

### 2. Postprocessing



### **3. Geometrie**

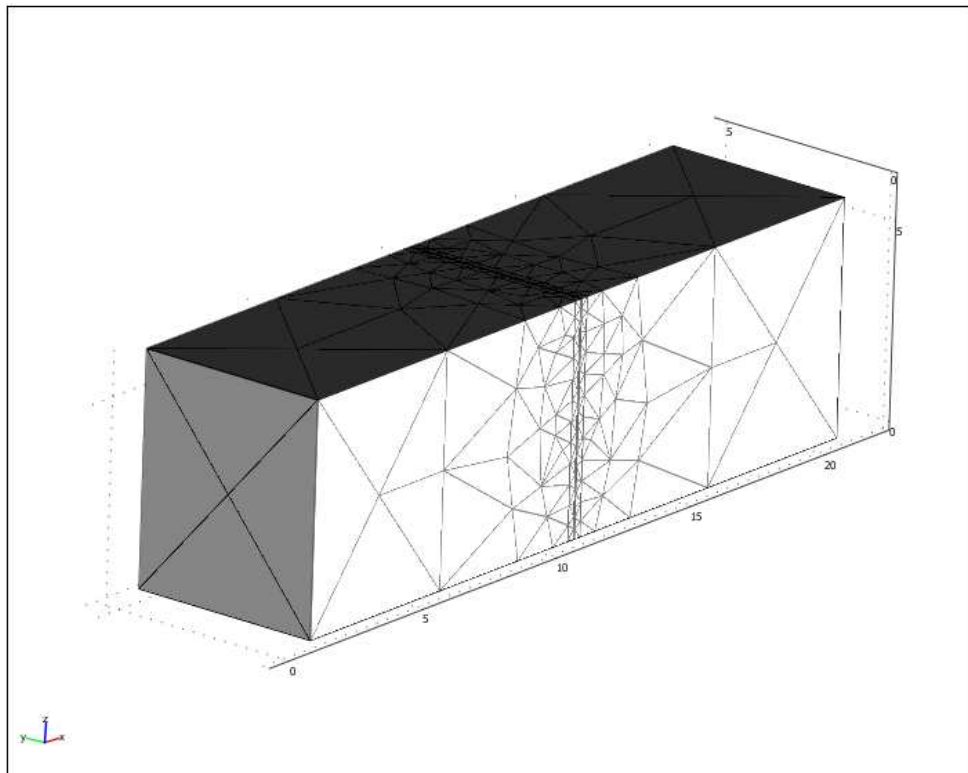
Raumdimensionen: 3D

Unabhängige Variablen: x, y, z

#### **3.1. Netz**

##### **3.1.1. Statistik zur Netzinformation**

Anzahl an Freiheitsgraden	29911
Netzknotenzahl	1493
Anzahl an Elementen	7459
Vierflächig	7459
Prismatisch	0
Würfelförmig	0
Anzahl an Randelementen	3037
Dreieckig	3037
Vierseitig	0
Anzahl an Kantenelementen	283
Knotenelementanzahl	24
Minimale Elementqualität	0.152
Element-Volumenverhältnis	0



### **3.2. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid)**

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid

#### **3.2.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid	freq	Hz	Anregungsfrequenz

#### **3.2.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus**

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### **3.2.3. Variablen**

Abhängige Variablen: u, v, w

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'u')$ ,  $\text{schlag}(2, 'v')$ ,  $\text{schlag}(2, 'w')$

#### **3.2.4. Randbedingungen**

Rand		7-10	6	11
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2 * nx\_acpr2$	$p\_t\_acpr3 * nx\_acpr3$
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2 * ny\_acpr2$	$p\_t\_acpr3 * ny\_acpr3$
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2 * nz\_acpr2$	$p\_t\_acpr3 * nz\_acpr3$

### 3.2.5. Gebietbedingungen

Gebiet		2
Youngscher Modul (E)	Pa	E
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	rhos
dampingtype		Verlustfaktor
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	1
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	0.001
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	poisson

### 3.3. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid2)

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid2

#### 3.3.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid2	freq	Hz	Anregungsfrequenz

#### 3.3.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### 3.3.3. Variablen

Abhängige Variablen: u2, v2, w2

Formfunktionen: shlag(2,'u2'), shlag(2,'v2'), shlag(2,'w2')



### 3.3.4. Randbedingungen

Rand		17-20	16	21
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr3 * nx\_acpr3$	$p\_t\_acpr * nx\_acpr$
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr3 * ny\_acpr3$	$p\_t\_acpr * ny\_acpr$
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr3 * nz\_acpr3$	$p\_t\_acpr * nz\_acpr$

### 3.3.5. Gebietbedingungen

Gebiet		4
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>E</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhos</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	<b>poisson</b>

## 3.4. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr

### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i*(kx*x+ky*y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.4.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamte Welle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.4.3. Variablen

Abhängige Variablen: p

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p')$

### 3.4.4. Randbedingungen

Rand		21	26
Typ		Normale Beschleunigung	Schall: harte Grenzfläche (Wand)
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$\text{nx\_acslid2} * \text{u2\_tt\_acslid2} + \text{ny\_acslid2} * \text{v2\_tt\_acslid2} + \text{nz\_acslid2} * \text{w2\_tt\_acslid2}$	0

### 3.4.5. Gebietbedingungen

Gebiet		5
Fluidichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>

### 3.5. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr2

#### 3.5.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### 3.5.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwelle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### 3.5.3. Variablen

Abhängige Variablen: p2

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p2')$

### 3.5.4. Randbedingungen

Rand		1-5	6
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_tt\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$

### 3.5.5. Gebietbedingungen

Gebiet		1
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>

## 3.6. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr3)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr3

### 3.6.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr3	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr3	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr3	k_acpr3	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr3	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.6.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwelle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.6.3. Variablen

Abhängige Variablen: p3

Formfunktionen: shlag(2,'p3')

### 3.6.4. Randbedingungen

Rand		11	12-15	16
Typ		Normale Beschleunigung	Schall : harte Grenz fläche (Wan d)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_tt\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$	0	$nx\_acslid^2*u\_tt\_acslid^2+ny\_acslid^2*v\_tt\_acslid^2+nz\_acslid^2*w\_tt\_acslid^2$

### 3.6.5. Gebietbedingungen

Gebiet		3
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>
dampType		<b>Delany-Bazley</b>
Strömungswiderstand (Rf)	kg/(m <sup>3</sup> · s)	<b>5000</b>

#### **4. Globale Ausdrücke**

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
RR	$10 \cdot \log_{10}(I_1/I_2)$	dB	Schalldämm -Maß
k0	$(2 \cdot \pi \cdot \text{freq}) / c_w$		
kx	$k_0 \cdot \cos(\text{theta})$		
ky	$k_0 \cdot \sin(\text{theta})$		

#### **5. Konstanten**

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
E	$6e9[\text{N/m}^2]$		E – Modul (KS MW)
poisson	0.009		Poisson Zahl (KS MW)
rhos	$1800[\text{kg/m}^3]$		Rohdichte der Struktur (KS MW)
rhow	$1.18[\text{kg/m}^3]$		Rohdichte des Fluid
cw	$343[\text{m/s}]$		Schallgeschwindigkeit in Luft
theta	45		Schalleinfallswinkel
n	0.015		Verlustfaktor (KS MW)
rhoMIWO	$30[\text{kg/m}^3]$		Rohdichte der Dämmung

#### **6. Integrations-Kopplungsvariablen**

##### **6.1. Geom1**

##### **6.1.1. Ursprung Rand: 6**

Name	Wert
Variablenname	I2
Ausdruck	$Ix\_acpr2$
Ordnung	4
Global	Ja

**6.1.2. Ursprung Rand: 21**

<b>Name</b>	<b>Wert</b>
Variablenname	I1
Ausdruck	lx_acpr
Ordnung	4
Global	Ja



## COMSOL Multiphysics-Modelldokumentation Bauteil F

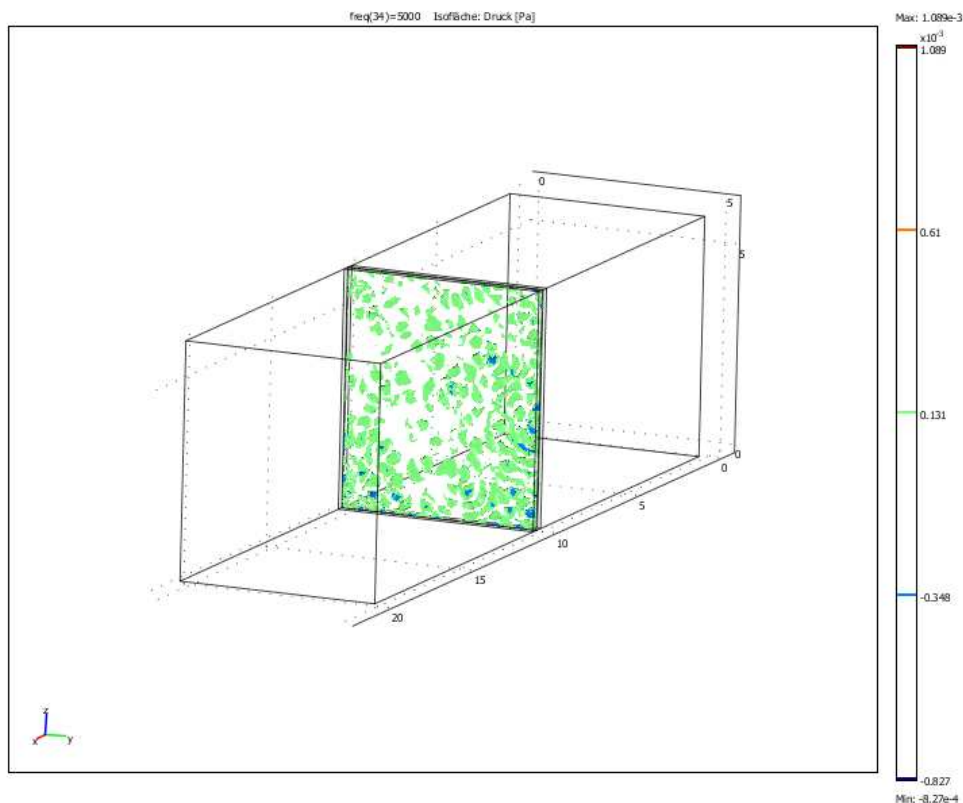
(20 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)

### 1. Modelleigenschaften

Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (3D)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

### 2. Postprozessing





### **3. Geometrie**

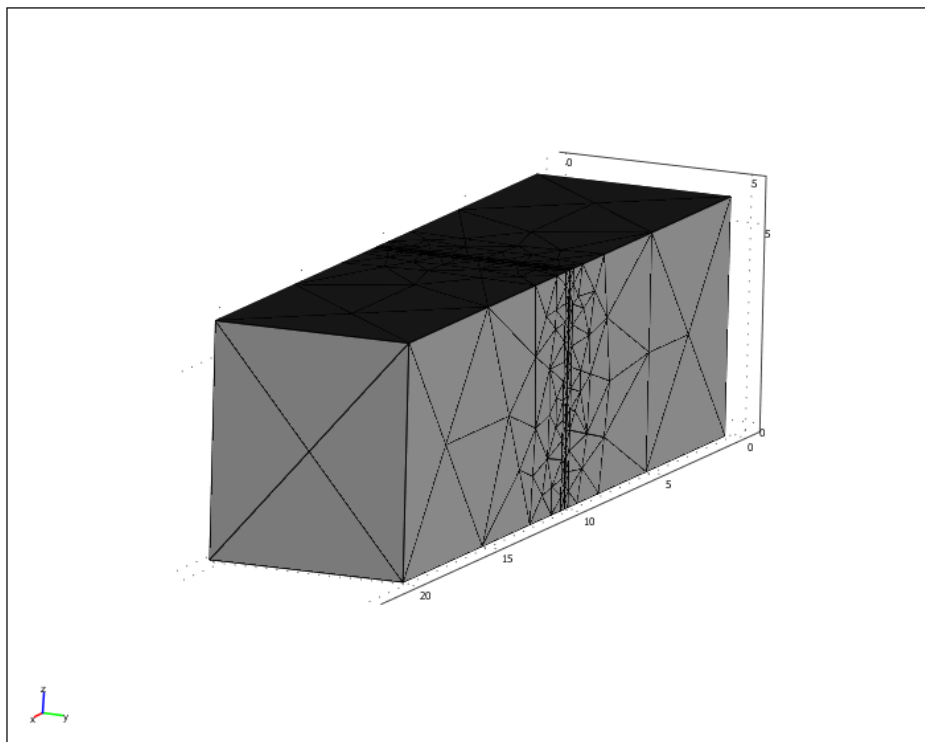
Raumdimensionen: 3D

Unabhängige Variablen: x, y, z

#### **3.1. Netz**

##### **3.1.1. Statistik zur Netzinformation**

Anzahl an Freiheitsgraden	29911
Netzknotenzahl	1493
Anzahl an Elementen	7459
Vierflächig	7459
Anzahl an Randelementen	3037
Dreieckig	3037
Vierseitig	0
Anzahl an Kantenelementen	283
Knotenelementanzahl	24
Minimale Elementqualität	0.152



### **3.2. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid)**

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid

#### **3.2.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid	freq	Hz	Anregungsfrequenz

#### **3.2.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus**

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### **3.2.3. Variablen**

Abhängige Variablen: u, v, w

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'u')$ ,  $\text{schlag}(2, 'v')$ ,  $\text{schlag}(2, 'w')$

#### **3.2.4. Randbedingungen**

Rand		7-10	6	11
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2 * nx\_acpr2$	$p\_t\_acpr3 * nx\_acpr3$
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2 * ny\_acpr2$	$p\_t\_acpr3 * ny\_acpr3$
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2 * nz\_acpr2$	$p\_t\_acpr3 * nz\_acpr3$

### 3.2.5. Gebietbedingungen

Gebiet		2
Youngscher Modul (E)	Pa	E
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	rhos
dampingtype		Verlustfaktor
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	1
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	0.001
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	poisson

### 3.3. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid2)

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid2

#### 3.3.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid2	freq	Hz	Anregungsfrequenz

#### 3.3.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### 3.3.3. Variablen

Abhängige Variablen: u2, v2, w2

Formfunktionen: shlag(2,'u2'), shlag(2,'v2'), shlag(2,'w2')

### 3.3.4. Randbedingungen

Rand		17-20	16	21
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr3 * nx\_acpr3$	$p\_t\_acpr * nx\_acpr$
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr3 * ny\_acpr3$	$p\_t\_acpr * ny\_acpr$
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr3 * nz\_acpr3$	$p\_t\_acpr * nz\_acpr$

### 3.3.5. Gebietbedingungen

Gebiet		4
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>E</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhos</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	<b>poisson</b>

## 3.4. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr

### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i*(kx*x+ky*y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.4.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamte Welle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.4.3. Variablen

Abhängige Variablen: p

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p')$

### 3.4.4. Randbedingungen

Rand		21	26
Typ		Normale Beschleunigung	Schall: harte Grenzfläche (Wand)
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$\text{nx\_acslid2} * \text{u2\_tt\_acslid2} + \text{ny\_acslid2} * \text{v2\_tt\_acslid2} + \text{nz\_acslid2} * \text{w2\_tt\_acslid2}$	0

### 3.4.5. Gebietbedingungen

Gebiet		5
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>

**3.5. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)**

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr2

**3.5.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

**3.5.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus**

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwellen
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

**3.5.3. Variablen**

Abhängige Variablen: p2

Formfunktionen: shlag(2,'p2')

### 3.5.4. Randbedingungen

Rand		1-5	6
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_tt\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$

### 3.5.5. Gebietbedingungen

Gebiet		1
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>

### 3.6. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr3)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr3

#### 3.6.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr3	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr3	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr3	k_acpr3	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr3	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.6.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwelle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.6.3. Variablen

Abhängige Variablen: p3

Formfunktionen: shlag(2,'p3')

### 3.6.4. Randbedingungen

Rand		11	12-15	16
Typ		Normale Beschleunigung	Schall : harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_tt\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$	0	$nx\_acslid^2*u\_tt\_acslid^2+ny\_acslid^2*v\_tt\_acslid^2+nz\_acslid^2*w\_tt\_acslid^2$

### 3.6.5. Gebietbedingungen

Gebiet		3
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>
dampType		<b>Delany-Bazley</b>
Strömungswiderstand (Rf)	kg/(m <sup>3</sup> ·s)	<b>5000</b>



#### 4. Globale Ausdrücke

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
R	$10 \cdot \log_{10}(I_1/I_2)$	dB	Schalldämmung
k0	$(2 \cdot \pi \cdot \text{freq}) / c_w$		
kx	$k_0 \cdot \cos(\text{theta})$		
ky	$k_0 \cdot \sin(\text{theta})$		

#### 5. Konstanten

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
E	$36.5e9[\text{N/m}^2]$		E – Modul (Beton)
poisson	0.2		Poisson Zahl (Beton)
rhos	$2400[\text{kg/m}^3]$		Rohdichte der Struktur (Beton)
rhow	$1.18[\text{kg/m}^3]$		Rohdichte des Fluids
cw	$343[\text{m/s}]$		Schallgeschwindigkeit in Luft
theta	45		Schalleinfallswinkel
n	0.006		Verlustfaktor Beton
rhoMIWO	$30[\text{kg/m}^3]$		Rohdichte der Dämmung

#### 6. Integrations-Kopplungsvariablen

##### 6.1. Geom1

##### 6.1.1. Ursprung Rand: 6

Name	Wert
Variablenname	I2
Ausdruck	$I_x_{acpr2}$
Ordnung	4
Global	Ja

##### 6.1.2. Ursprung Rand: 21

Name	Wert
Variablenname	I1
Ausdruck	$I_x_{acpr}$
Ordnung	4
Global	Ja



## COMSOL Multiphysics-Modelldokumentation Bauteil G

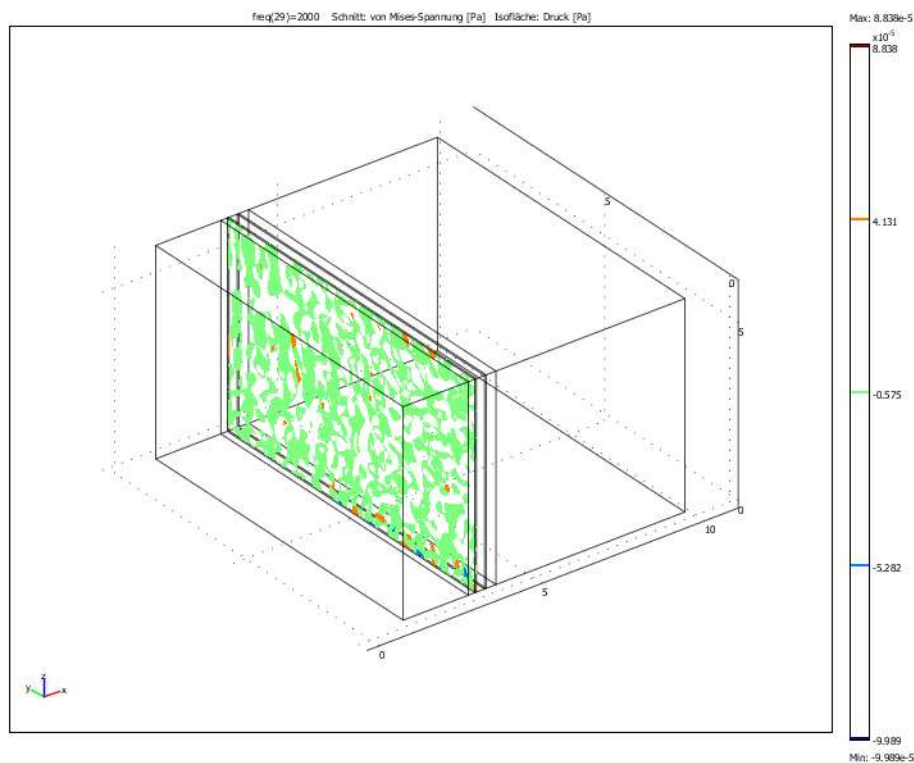
(30 cm Beton, 5 cm Dämmung, 25 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)

### 1. Modelleigenschaften

Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (3D)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

### 2. Postprozessing



### 3. Geometrie

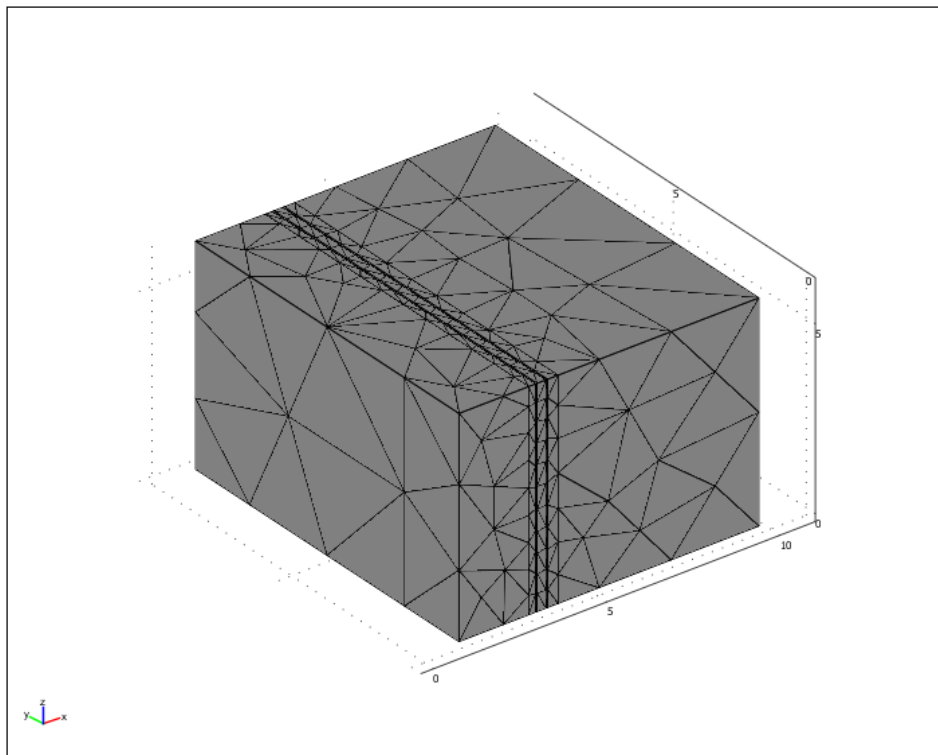
Raumdimensionen: 3D

Unabhängige Variablen: x, y, z

#### 3.1. Netz

##### 3.1.1. Statistik zur Netzinformation

Anzahl an Freiheitsgraden	28527
Netzknotenzahl	1367
Anzahl an Elementen	6801
Vierflächig	6801
Anzahl an Randelementen	2972
Dreieckig	2972
Anzahl an Kantenelementen	368
Knotenelementanzahl	32
Minimale Elementqualität	0.074



#### 3.2. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid)

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid

### 3.2.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid	freq	Hz	Anregungsfrequenz

### 3.2.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.2.3. Variablen

Abhängige Variablen: u, v, w

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'u')$ ,  $\text{schlag}(2, 'v')$ ,  $\text{schlag}(2, 'w')$

### 3.2.4. Randbedingungen

Rand		7-10	6	11
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2*nx\_acpr2$	$p\_t\_acpr3*nx\_acpr3$
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2*ny\_acpr2$	$p\_t\_acpr3*ny\_acpr3$
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr2*nz\_acpr2$	$p\_t\_acpr3*nz\_acpr3$

### 3.2.5. Gebietbedingungen

Gebiet		2
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>E</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhos</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>

### **3.3. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid2)**

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid2

#### **3.3.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
refpntx	refpntx_acslid2	0	m	Referenz-Punktmoment Berechnung x Koord.
refpnty	refpnty_acslid2	0	m	Referenz-Punktmoment Berechnung y Koord.
refpntz	refpntz_acslid2	0	m	Referenz-Punktmoment Berechnung z Koord.

#### **3.3.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus**

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### **3.3.3. Variablen**

Abhängige Variablen: u2, v2, w2

Formfunktionen: shlag(2,'u2'), shlag(2,'v2'), shlag(2,'w2')

#### **3.3.4. Randbedingungen**

Rand		17-20	16	21
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung (Fx)	N/m <sup>2</sup>	0	p_t_acpr3*nx_acpr3	p_t_acpr4*nx_acpr4
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung (Fy)	N/m <sup>2</sup>	0	p_t_acpr3*ny_acpr3	p_t_acpr4*ny_acpr4
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung (Fz)	N/m <sup>2</sup>	0	p_t_acpr3*nz_acpr3	p_t_acpr4*nz_acpr4

### 3.3.5. Gebietbedingungen

Gebiet		4
Youngscher Modul (E)	Pa	E
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	rhos
dampingtype		Verlustfaktor
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	1
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	0.001
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	poisson

### 3.4. Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (acslid3)

Typ des Anwendungsmodus: Festkörper, Spannung-Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acslid3

#### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acslid3	freq	Hz	Anregungsfrequenz
refpntx	refpntx_acslid3	0	m	Referenz-Punktmoment Berechnung x Koord.
refpnty	refpnty_acslid3	0	m	Referenz-Punktmoment Berechnung y Koord.
refpntz	refpntz_acslid3	0	m	Referenz-Punktmoment Berechnung z Koord.

#### 3.4.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Frequenzantwort
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.4.3. Variablen

Abhängige Variablen:  $u_3$ ,  $v_3$ ,  $w_3$

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'u_3')$ ,  $\text{schlag}(2, 'v_3')$ ,  $\text{schlag}(2, 'w_3')$

### 3.4.4. Randbedingungen

Rand		27-30	26	31
Flächenlast (Kraft/Fläche) x-Richtung ( $F_x$ )	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr4*nx\_acpr4$	$p\_t\_acpr*nx\_acpr$
Flächenlast (Kraft/Fläche) y-Richtung ( $F_y$ )	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr4*ny\_acpr4$	$p\_t\_acpr*ny\_acpr$
Flächenlast (Kraft/Fläche) z-Richtung ( $F_z$ )	N/m <sup>2</sup>	0	$p\_t\_acpr4*nz\_acpr4$	$p\_t\_acpr*nz\_acpr$

### 3.4.5. Gebietbedingungen

Gebiet		6
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>E</b>
Dichte ( $\rho$ )	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhos</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter ( $\alpha_M$ )	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter ( $\beta_{adK}$ )	s	<b>0.001</b>
Poissonsches Verhältnis ( $\nu$ )	1	<b>poisson</b>

## 3.5. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr

### 3.5.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i*(k_x*x+k_y*y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.5.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamte Welle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.5.3. Variablen

Abhängige Variablen: p

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p')$

### 3.5.4. Randbedingungen

Rand		31	36
Typ		Normale Beschleunigung	Schall: harte Grenzfläche (Wand)
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$\text{nx\_acslid3} * \text{u3\_tt\_acslid3} + \text{ny\_acslid3} * \text{v3\_tt\_acslid3} + \text{nz\_acslid3} * \text{w3\_tt\_acslid3}$	0

### 3.5.5. Gebietbedingungen

Gebiet		7
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>



**3.6. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)**

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr2

**3.6.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

**3.6.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus**

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwelle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

**3.6.3. Variablen**

Abhängige Variablen: p2

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p2')$

### 3.6.4. Randbedingungen

Rand		1-5	6
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_tt\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$

### 3.6.5. Gebietbedingungen

Gebiet		1
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>

## 3.7. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr3)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr3

### 3.7.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr3	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr3	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr3	k_acpr3	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr3	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.7.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysotyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwelle
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

### 3.7.3. Variablen

Abhängige Variablen: p3

Formfunktionen: shlag(2,'p3')

### 3.7.4. Randbedingungen

Rand		11	12-15	16
Typ		Normale Beschleunigung	Schall : harte Grenz fläche (Wan d)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$nx\_acslid*u\_tt\_acslid+ny\_acslid*v\_tt\_acslid+nz\_acslid*w\_tt\_acslid$	0	$nx\_acslid^2*u\_tt\_acslid^2+ny\_acslid^2*v\_tt\_acslid^2+nz\_acslid^2*w\_tt\_acslid^2$

### 3.7.5. Gebietbedingungen

Gebiet		3
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhoMIWO</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>
dampType		<b>Delany-Bazley</b>
Strömungswiderstand (Rf)	kg/(m <sup>3</sup> · s)	<b>5000</b>

### 3.8. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr4)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr4

#### 3.8.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr4	freq	Hz	Anregungsfrequenz
p_i	p_i_acpr4	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr4	k_acpr4	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr4	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### 3.8.2. Eigenschaften des Anwendungsmodus

Eigenschaft	Wert
Standard Elementtyp	Lagrange - Quadratisch
Analysetyp	Zeitharmonisch
Eigenwerte angeben mit	Eigenfrequenz
Lösen nach	Gesamtwellen
Ultraschwache Variationsformulierung	Aus
Referenzsystem	Referenzsystem (ref)
Schwache Nebenbedingungen	Aus
Nebenbedingungstyp	Ideal

#### 3.8.3. Variablen

Abhängige Variablen: p4

Formfunktionen:  $\text{schlag}(2, 'p4')$

### 3.8.4. Randbedingungen

Rand		21	22-25	26
Typ		Normale Beschleunigung	Schal: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$nx\_acsl d2 * u2\_tt\_acsl d2 + ny\_acsl d2 * v2\_tt\_acsl d2 + nz\_acsl d2 * w2\_tt\_acsl d2$	0	$nx\_acsl d3 * u3\_tt\_acsl d3 + ny\_acsl d3 * v3\_tt\_acsl d3 + nz\_acsl d3 * w3\_tt\_acsl d3$

### 3.8.5. Gebietbedingungen

Gebiet		5
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhoMIWO</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>
dampType		<b>Delany-Bazley</b>
Strömungswiderstand (Rf)	kg/(m <sup>3</sup> · s)	<b>5000</b>

## 4. Globale Ausdrücke

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
R	$10 * \log_{10}(I1/I2)$	dB	Schalldämm - Maß
k0	$(2 * \pi * \text{freq}) / cw$		
kx	$k0 * \cos(\text{theta})$		
ky	$k0 * \sin(\text{theta})$		

**5. Konstanten**

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
E	36.5e9[N/m <sup>2</sup> ]		E - Modul
poisson	0.2		Poisson Zahl
rhos	2400[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte der Struktur
rhof	1.18[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte des Fluid
cw	343[m/s]		Schallgeschwindigkeit in Luft
theta	45		Schalleinfallswinkel
n	0.006		Verlustfaktor
rhoMIWO	30[kg/m <sup>3</sup> ]		Rohdichte Mineralwolle

**6. Integrations-Kopplungsvariablen****6.1. Geom1****6.1.1. Ursprung Rand: 6**

Name	Wert
Variablenname	I2
Ausdruck	lx_acpr2
Ordnung	4
Global	Ja

**6.1.2. Ursprung Rand: 31**

Name	Wert
Variablenname	I1
Ausdruck	lx_acpr
Ordnung	4
Global	Ja

## Anlage 6: Ergebnisse der numerischen Simulation mittels FEM (2D Modell)

<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
A 6.1 Bauteil A (24 cm KS MW)	A6-1
A 6.2 Bauteil B (20 cm Beton)	A6-4
A 6.3 Bauteil C (24 cm KS MW mit VS)	A6-7
A 6.4 Bauteil D (20 cm Beton mit VS)	A6-12



## **COMSOL Multiphysics – Modelldokumentation Bauteil A (Zusammenfassung)**

### **(24 cm KS – Mauerwerk)**

#### **1. Modelleigenschaften**

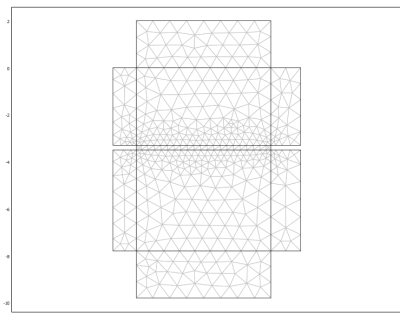
Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (2D)
  - Ebene Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

#### **2. Geometrie**

Raumdimensionen: 2D

#### **3.1. Netz**



#### **3.2. Anwendungsmodus: Ebene Dehnung (acpn)**

Typ des Anwendungsmodus: Ebene Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpn



### 3.2.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpn	freq	Hz	Anregungsfrequenz

### 3.2.2. Randbedingungen

Rand		11, 21	14	12
Kantenlast x-Richtung (Fx)	1	0	$p\_t\_acpr \cdot nx\_acpr$	$p\_t\_acpr^2 \cdot nx\_acpr^2$
Kantenlast y-Richtung (Fy)	1	0	$p\_t\_acpr \cdot ny\_acpr$	$p\_t\_acpr^2 \cdot ny\_acpr^2$

### 3.2.3. Gebietbedingungen

Gebiet			5
Youngscher Modul (E)		Pa	<b>E</b>
Dichte (rho)		kg/m <sup>3</sup>	<b>rhos</b>
dampingtype			<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)		1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)		s	<b>0.001</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)		1	<b>poisson</b>
Dicke (thickness)		m	<b>0.2</b>

## 3.3. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

### 3.3.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
kz	kz_acpr	0	1/m	Wellenzahl aus der Ebene
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i \cdot (kx \cdot x + ky \cdot y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.3.2. Randbedingungen

Rand		4-6, 24, 26, 28	14
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acpn \cdot u\_tt\_acpn + ny\_acpn \cdot v\_tt\_acpn$

### 3.4. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)

#### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
kz	kz_acpr2	0	1/m	Wellenzahl aus der Ebene
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### 3.4.2. Randbedingungen

Rand		1-3, 7-8, 18, 20, 22, 27	12
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$n_x \cdot a_{cpn} \cdot u_{tt\_acpn} + n_y \cdot a_{cpn} \cdot v_{tt\_acpn}$

### 4. Globale Ausdrücke

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
kx	$k0 \cdot \cos(\theta)$		
ky	$k0 \cdot \sin(\theta)$		
k0	$(2 \cdot \pi \cdot \text{freq}) / c_w$		
R	$10 \cdot \log_{10}(I_1/I_2)$		Schalldämm - Maß

### 5. Konstanten

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
dL	0.24[m]		Schichtdicke Struktur
E	$6e9[N/m^2]$		E - Modul
poisson	0.009		Poisson Zahl
rhos	$1800[kg/m^3]$		Rohdichte Struktur
rhow	$1.18[kg/m^3]$		Rohdichte Fluid
cw	343[m/s]		Schallgeschwindigkeit Luft
theta	45		Schalleinfallswinkel
n	0.015		Verlustfaktor



## COMSOL Multiphysics – Modelldokumentation Bauteil B (Zusammenfassung)

### (20 cm Beton)

#### 1. Modelleigenschaften

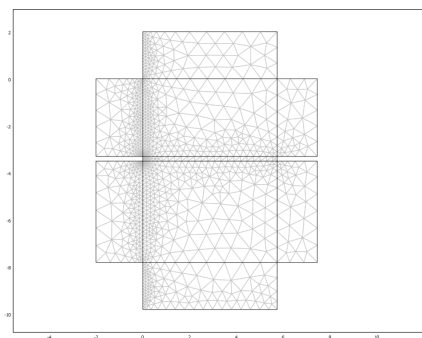
Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (2D)
  - Ebene Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

#### 2. Geometrie

Raumdimensionen: 2D

##### 3.1. Netz



##### 3.2. Anwendungsmodus: Ebene Dehnung (acpn)

Typ des Anwendungsmodus: Ebene Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpn

### 3.2.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpn	freq	Hz	Anregungsfrequenz

### 3.2.2. Randbedingungen

Rand		11, 21	14	12
Kantenlast x-Richtung (Fx)	1	0	$p\_t\_acpr * nx\_acpr$	$p\_t\_acpr2 * nx\_acpr2$
Kantenlast y-Richtung (Fy)	1	0	$p\_t\_acpr * ny\_acpr$	$p\_t\_acpr2 * ny\_acpr2$

### 3.2.3. Gebietbedingungen

Gebiet		5
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>E</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhos</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	<b>poisson</b>
Dicke (thickness)	m	<b>0.2</b>

## 3.3. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

### 3.3.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
kz	kz_acpr	0	1/m	Wellenzahl aus der Ebene
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i*(kx*x+ky*y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

### 3.3.2. Randbedingungen

Rand		4-6, 15, 17, 24-26, 28	14
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acpn * u\_tt\_acpn + ny\_acpn * v\_tt\_acpn$

### 3.4. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)

#### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
kz	kz_acpr2	0	1/m	Wellenzahl aus der Ebene
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### 3.4.2. Randbedingungen

Rand		1-3, 7-8, 18, 20, 22, 27	12
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$n_x \text{acpn} * u_{tt} \text{acpn} + n_y \text{acpn} * v_{tt} \text{acpn}$

### 4. Globale Ausdrücke

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
kx	$k0 * \cos(\text{theta})$		
ky	$k0 * \sin(\text{theta})$		
k0	$(2 * \pi * \text{freq}) / c_w$		
R	$10 * \log_{10}(I_1 / I_2)$		Schalldämm - Maß

### 5. Konstanten

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
dL	0.2[m]		structure thickness
E	36.5e9[N/m <sup>2</sup> ]		Young's modulus
poisson	0.2		Poisson ratio
rhos	2400[kg/m <sup>3</sup> ]		structure density
rhow	1.18[kg/m <sup>3</sup> ]		liquid density
cw	343[m/s]		sound speed in liquid
theta	45		angle
n	0.006		



## **COMSOL Multiphysics – Modelldokumentation Bauteil C (Zusammenfassung)**

### **(24 cm KS – MW mit VS)**

#### **1. Modelleigenschaften**

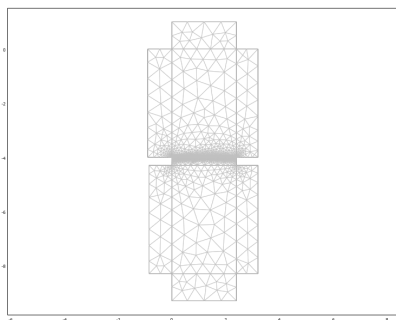
Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (2D)
  - Ebene Dehnung (Acoustics Modul)
  - Ebene Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

#### **2. Geometrie**

Raumdimensionen: 2D

##### **3.1. Netz**



##### **3.2. Anwendungsmodus: Ebene Dehnung (acpn)**

Typ des Anwendungsmodus: Ebene Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpn

### 3.2.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpn	freq	Hz	Anregungsfrequenz

### 3.2.2. Randbedingungen

Rand		11, 27	12	14
Kantenlast x-Richtung (Fx)	1	0	$p\_t\_acpr2 * nx\_acpr2$	$p\_t\_acpr3 * nx\_acpr3$
Kantenlast y-Richtung (Fy)	1	0	$p\_t\_acpr2 * ny\_acpr2$	$p\_t\_acpr3 * ny\_acpr3$

### 3.2.3. Gebietbedingungen

Gebiet		5
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>E</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhos</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	<b>poisson</b>
Dicke (thickness)	m	<b>0.2</b>

## 3.3. Anwendungsmodus: Ebene Dehnung (acpn2)

### 3.3.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpn2	freq	Hz	Anregungsfrequenz

### 3.3.2. Randbedingungen

Rand		17, 31	18	20
Kantenlast x-Richtung (Fx)	1	0	$p\_t\_acpr3 * nx\_acpr3$	$p\_t\_acpr * nx\_acpr$
Kantenlast y-Richtung (Fy)	1	0	$p\_t\_acpr3 * ny\_acpr3$	$p\_t\_acpr * ny\_acpr$

### 3.3.3. Gebietbedingungen

Gebiet		8
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>EGK</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhoGK</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	<b>poissonGK</b>
Dicke (thickness)	m	<b>0.0125</b>

### 3.4. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr

#### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
kz	kz_acpr	0	1/m	Wellenzahl aus der Ebene
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i*(kx*x+ky*y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### 3.4.3. Randbedingungen

Rand		1-3, 33, 35, 37	20
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acpn2*u2\_tt\_acpn2+ny\_acpn2*v2\_tt\_acpn2$



### **3.5. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)**

#### **3.5.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
kz	kz_acpr2	0	1/m	Wellenzahl aus der Ebene
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### **3.5.2. Randbedingungen**

Rand		4-8, 24, 26, 28, 36	12
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acpn*u\_tt\_acpn+ny\_acpn*v\_tt\_acpn$

### **3.6. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr3)**

#### **3.6.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr3	freq	Hz	Anregungsfrequenz
kz	kz_acpr3	0	1/m	Wellenzahl aus der Ebene
p_i	p_i_acpr3	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr3	k_acpr3	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr3	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### **3.6.2. Randbedingungen**

Rand		14	18
Typ		Normale Beschleunigung	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	$nx\_acpn*u\_tt\_acpn+ny\_acpn*v\_tt\_acpn$	$nx\_acpn^2*u\_tt\_acpn^2+ny\_acpn^2*v\_tt\_acpn^2$

### 3.6.3. Gebietbedingungen

Gebiet		6	7
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>	<b>rhow</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>	<b>cw</b>
dampType		Nichts	<b>Delany-Bazley</b>
Strömungswiderstand (Rf)	kg/(m <sup>3</sup> · s)	0	<b>5000</b>

### 4. Globale Ausdrücke

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
kx	$k0 \cdot \cos(\theta)$		
ky	$k0 \cdot \sin(\theta)$		
k0	$(2 \cdot \pi \cdot \text{freq}) / cw$		
R	$10 \cdot \log_{10}(I1/I2)$		Schalldämm - Maß

### 5. Konstanten

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
E	$6e9[N/m^2]$		E – Modul KS MW
poisson	0.009		Poisson Zahl KS MW
rhos	$1800[kg/m^3]$		Dichte Struktur KS MW
rhow	$1.18[kg/m^3]$		Dichte Fluid
cw	$343[m/s]$		Schallgeschwindigkeit Fluid
theta	45		Schalleinfallswinkel
n	0.015		Verlustfaktor KS MW
EGK	$3.2e9[N/m^2]$		E - Modul GK
poissonGK	0.15		Poisson Zahl GK
rhoGK	$900[kg/m^3]$		GK Rohdichte
nGK	0.03		Verlustfaktor
rhoMIWO	$30[kg/m^3]$		



## COMSOL Multiphysics – Modelldokumentation Bauteil C (Zusammenfassung)

### (20 cm Beton mit VS)

#### 1. Modelleigenschaften

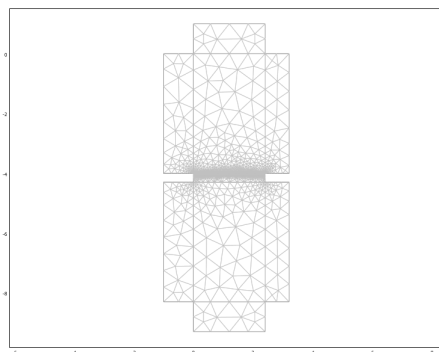
Im Modell verwendete Anwendungsmodi und Module:

- Geom1 (2D)
  - Ebene Dehnung (Acoustics Modul)
  - Ebene Dehnung (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)
  - Druck-Akustik (Acoustics Modul)

#### 2. Geometrie

Raumdimensionen: 2D

##### **3.1. Netz**



##### **3.2. Anwendungsmodus: Ebene Dehnung (acpn)**

Typ des Anwendungsmodus: Ebene Dehnung (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpn

### 3.2.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpn	freq	Hz	Anregungsfrequenz

### 3.2.2. Randbedingungen

Rand		11, 27	12	14
Kantenlast x-Richtung (Fx)	1	0	$p\_t\_acpr2 * nx\_acpr2$	$p\_t\_acpr3 * nx\_acpr3$
Kantenlast y-Richtung (Fy)	1	0	$p\_t\_acpr2 * ny\_acpr2$	$p\_t\_acpr3 * ny\_acpr3$

### 3.2.3. Gebietbedingungen

Gebiet		5
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>E</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhos</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	<b>poisson</b>
Dicke (thickness)	m	<b>0.2</b>

## 3.3. Anwendungsmodus: Ebene Dehnung (acpn2)

### 3.3.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpn2	freq	Hz	Anregungsfrequenz

### 3.3.2. Randbedingungen

Rand		17, 31	18	20
Kantenlast x-Richtung (Fx)	1	0	$p\_t\_acpr3 * nx\_acpr3$	$p\_t\_acpr * nx\_acpr$
Kantenlast y-Richtung (Fy)	1	0	$p\_t\_acpr3 * ny\_acpr3$	$p\_t\_acpr * ny\_acpr$

### 3.3.4. Gebietbedingungen

Gebiet		8
Youngscher Modul (E)	Pa	<b>EGK</b>
Dichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhoGK</b>
dampingtype		<b>Verlustfaktor</b>
Massendämpfungsparameter (alphadM)	1/s	<b>1</b>
Steifigkeits-Dämpfungsparameter (betadK)	s	<b>0.001</b>
Poissonsches Verhältnis (nu)	1	<b>poissonGK</b>
Dicke (thickness)	m	<b>0.0125</b>

### 3.4. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr)

Typ des Anwendungsmodus: Druck-Akustik (Acoustics Modul)

Name des Anwendungsmodus: acpr

#### 3.4.1. Skalare Variablen

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr	freq	Hz	Anregungsfrequenz
kz	kz_acpr	0	1/m	Wellenzahl aus der Ebene
p_i	p_i_acpr	$\exp(-i*(kx*x+ky*y))$ [Pa]	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr	k_acpr	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### 3.4.2. Randbedingungen

Rand		4-6, 33, 35, 37	20	21, 23, 34
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung	Neutral
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acpn2*u2\_tt\_acpn2+ny\_acpn2*v2\_tt\_acpn2$	0

### **3.5. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr2)**

#### **3.5.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr2	freq	Hz	Anregungsfrequenz
kz	kz_acpr2	0	1/m	Wellenzahl aus der Ebene
p_i	p_i_acpr2	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr2	k_acpr2	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr2	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### **3.5.2. Randbedingungen**

Rand		1-3, 7-8, 24, 26, 28, 36	12
Typ		Schall: harte Grenzfläche (Wand)	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acpn*u\_tt\_acpn+ny\_acpn*v\_tt\_acpn$

### **3.6. Anwendungsmodus: Druck-Akustik (acpr3)**

#### **3.6.1. Skalare Variablen**

Name	Variable	Wert	Einheit	Beschreibung
freq	freq_acpr3	freq	Hz	Anregungsfrequenz
kz	kz_acpr3	0	1/m	Wellenzahl aus der Ebene
p_i	p_i_acpr3	0	Pa	Einfallende Druckwelle
k0	k0_acpr3	k_acpr3	1/m	Wellenzahl im Fernfeld
p_ref	p_ref_acpr3	20e-6	Pa	Referenzdruck

#### **3.6.2. Randbedingungen**

Rand		13, 15, 29-30	14	18
Typ		Neutral	Normale Beschleunigung	Normale Beschleunigung
Eingangsbeschleunigung (nacc)	m/s <sup>2</sup>	0	$nx\_acpn*u\_tt\_acpn+ny\_acpn*v\_tt\_acpn$	$nx\_acpn^2*u\_tt\_acpn^2+ny\_acpn^2*v\_tt\_acpn^2$

### 3.6.3. Gebietbedingungen

Gebiet		6	7
Fluiddichte (rho)	kg/m <sup>3</sup>	<b>rhow</b>	<b>rhoMIWO</b>
Schallgeschwindigkeit (cs)	m/s	<b>cw</b>	<b>cw</b>
dampType		Nichts	<b>Delany-Bazley</b>
Strömungswiderstand (Rf)	kg/(m <sup>3</sup> · s)	0	<b>5000</b>

### 4. Globale Ausdrücke

Name	Ausdruck	Einheit	Beschreibung
kx	$k0 \cdot \cos(\theta)$		
ky	$k0 \cdot \sin(\theta)$		
k0	$(2 \cdot \pi \cdot \text{freq}) / cw$		
R	$10 \cdot \log_{10}(I1/I2)$		Schalldämm - Maß

### 5. Konstanten

Name	Ausdruck	Wert	Beschreibung
E	$36.5e9 [N/m^2]$		E – Modul Beton
poisson	0.2		Poisson Zahl Beton
rhos	$2400 [kg/m^3]$		Dichte Struktur beton
rhow	$1.18 [kg/m^3]$		Dichte Fluid
cw	$343 [m/s]$		Schallgeschwindigkeit Fluid
theta	45		Schalleinfallswinkel
n	0.006		Verlustfaktor Beton
EGK	$3.2e9 [N/m^2]$		E - Modul GK
poissonGK	0.15		Poisson Zahl GK
rhoGK	$900 [kg/m^3]$		GK Rohdiche
nGK	0.03		Verlustfaktor
rhoMIWO	$30 [kg/m^3]$		

**Anlage 7: Grafische Auswertung der messtechnisch und numerisch ermittelten Anstiege der Schalldämm – Eigenschaften**

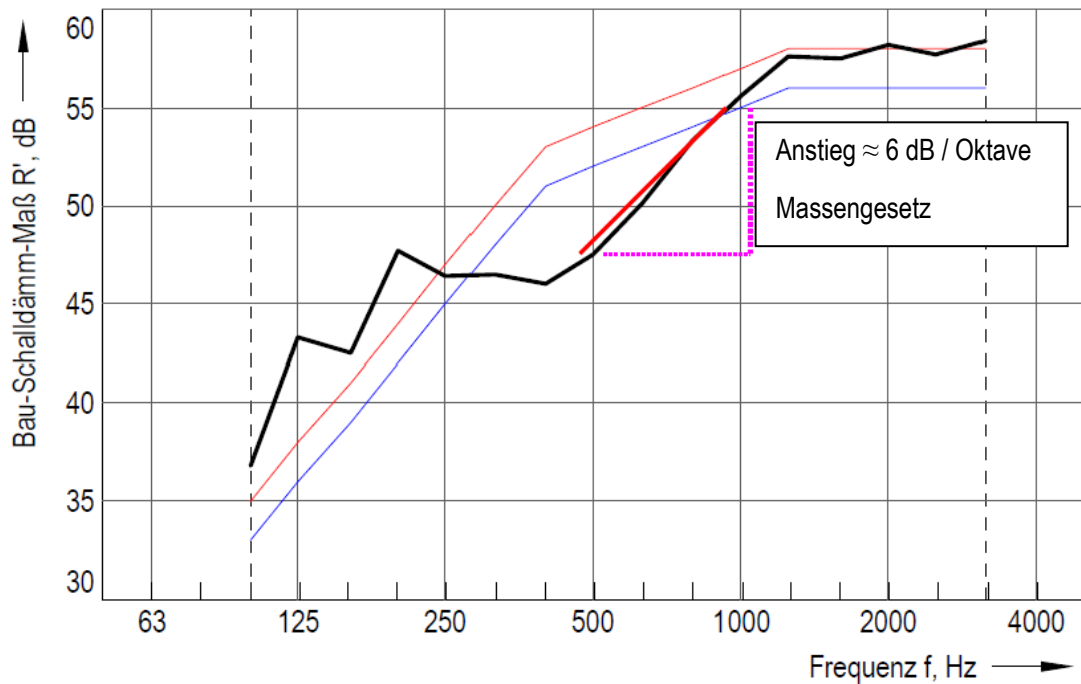
<b><u>Inhalt</u></b>	<b><u>Seite</u></b>
A 7.1 Bauteil A (24 cm KS MW)	A7-1
A 7.2 Bauteil B (20 cm Beton)	A7-2
A 7.3 Bauteil C (24 cm KS MW mit VS)	A7-3
A 7.4 Bauteil D (20 cm Beton mit VS)	A7-3
A 7.5 Bauteil E (25cm KS MW, 5 cm Dämmung, 20 cm KS MW))	A7-4
A 7.6 Bauteil F (20 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)	A7-5
A 7.7 Bauteil G (30 cm Beton, 5 cm Dämmung, 25 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)	A7-6



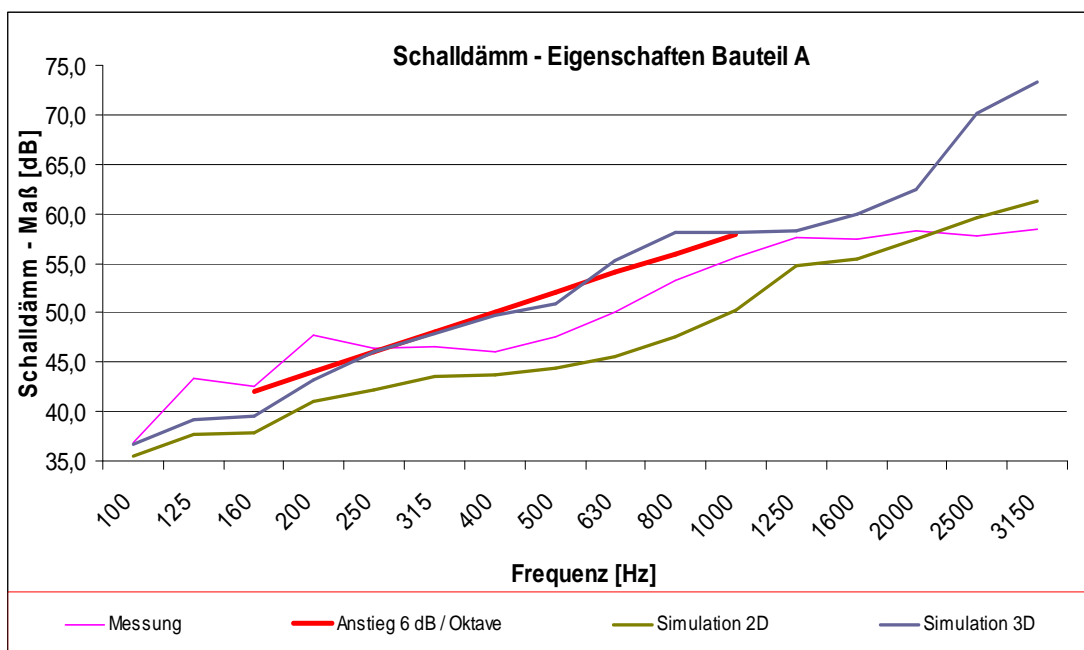
### A 7.1 Bauteil A (24 cm KS MW)

In nachfolgenden Abbildungen sind die Anstiege der messtechnisch und numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften für Bauteil A dargestellt.

Messtechnische Ermittlung:



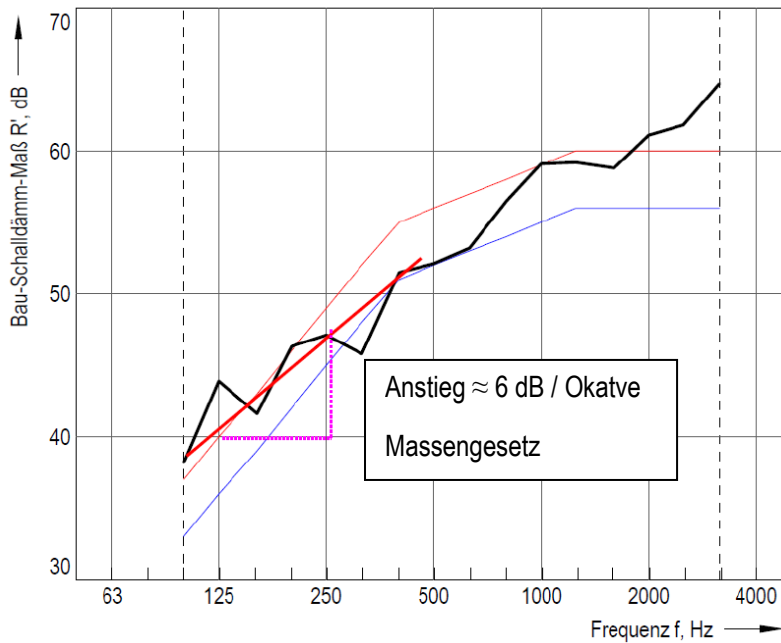
Numerische Ermittlung:



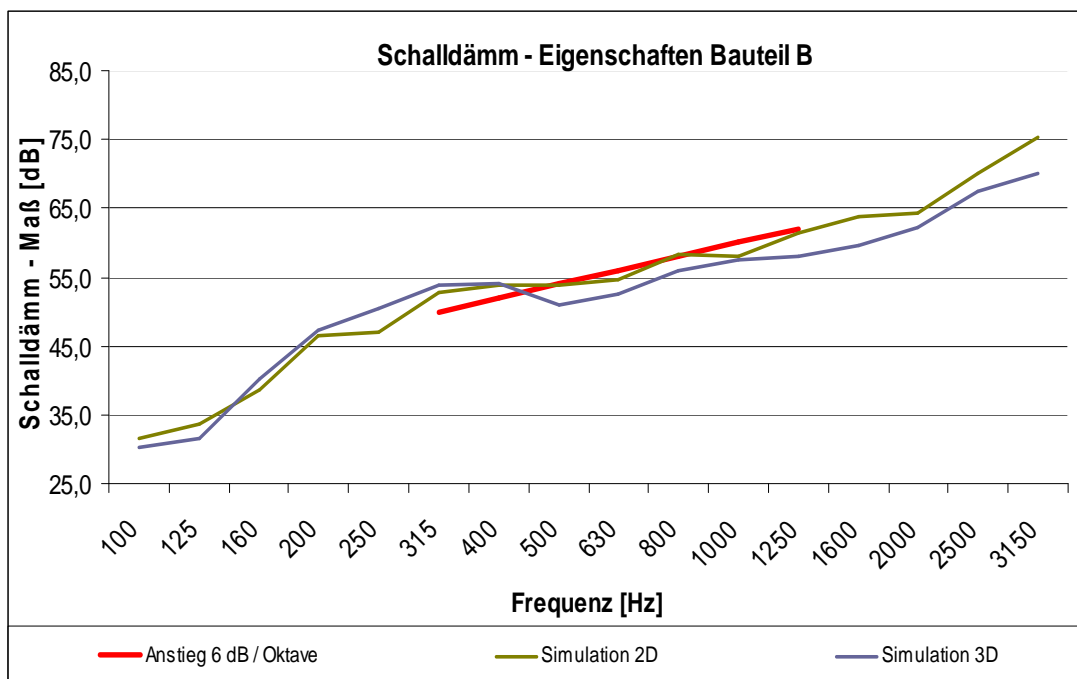
## A 7.2 Bauteil B (20 cm Beton)

In nachfolgenden Abbildungen sind die Anstiege der messtechnisch und numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften für Bauteil B dargestellt.

Messtechnische Ermittlung:

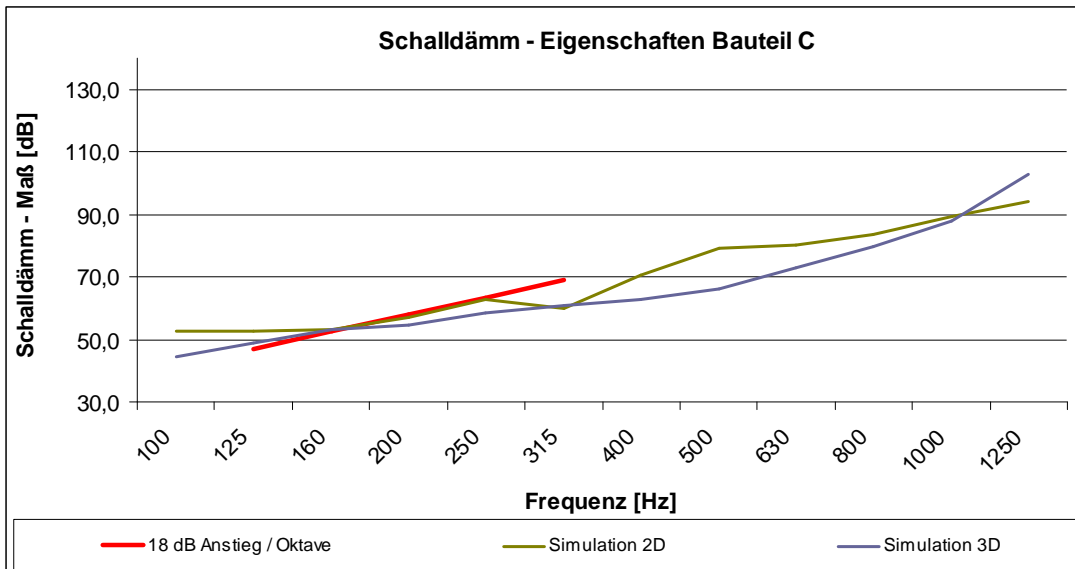


Numerische Ermittlung:



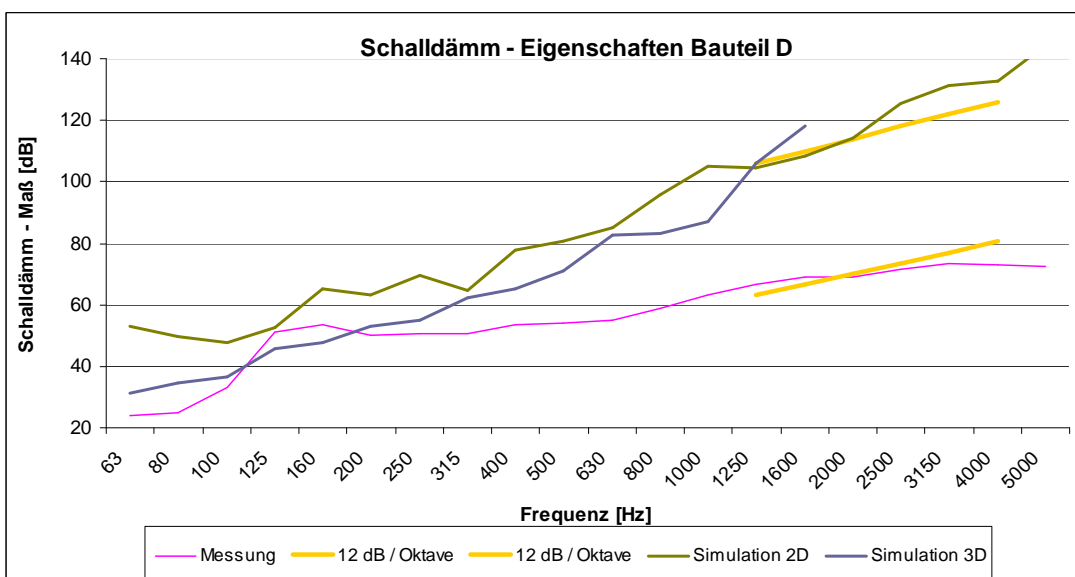
### A 7.3 Bauteil C (24 cm KS MW mit VS)

In nachfolgender Abbildung sind die Anstiege der numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften für Bauteil C dargestellt.



### A 7.4 Bauteil D (20 cm Beton mit VS)

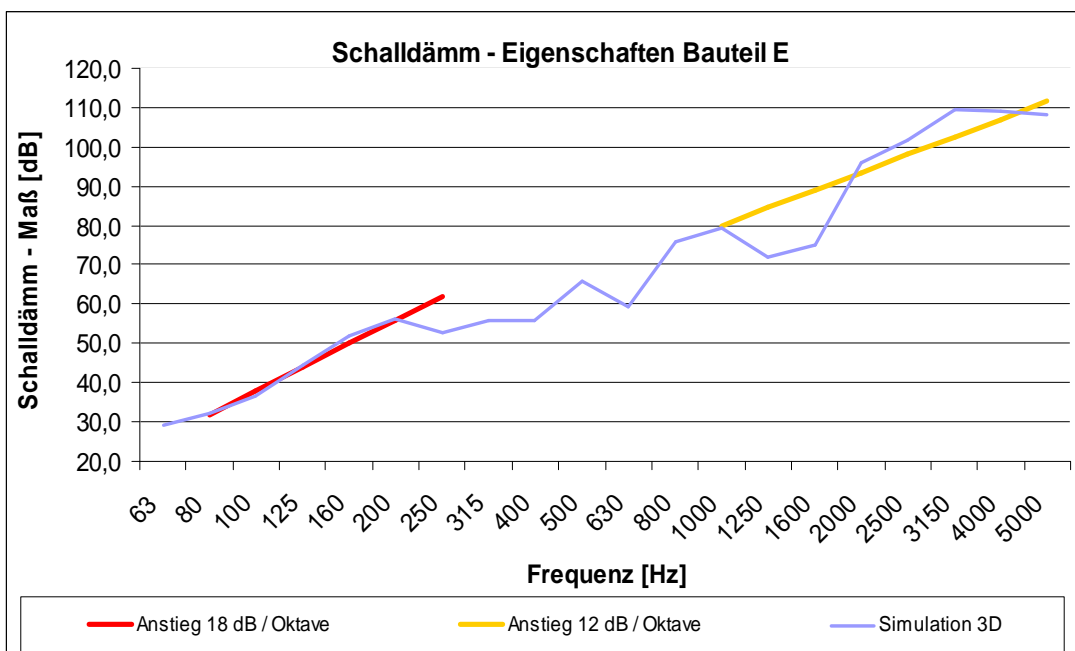
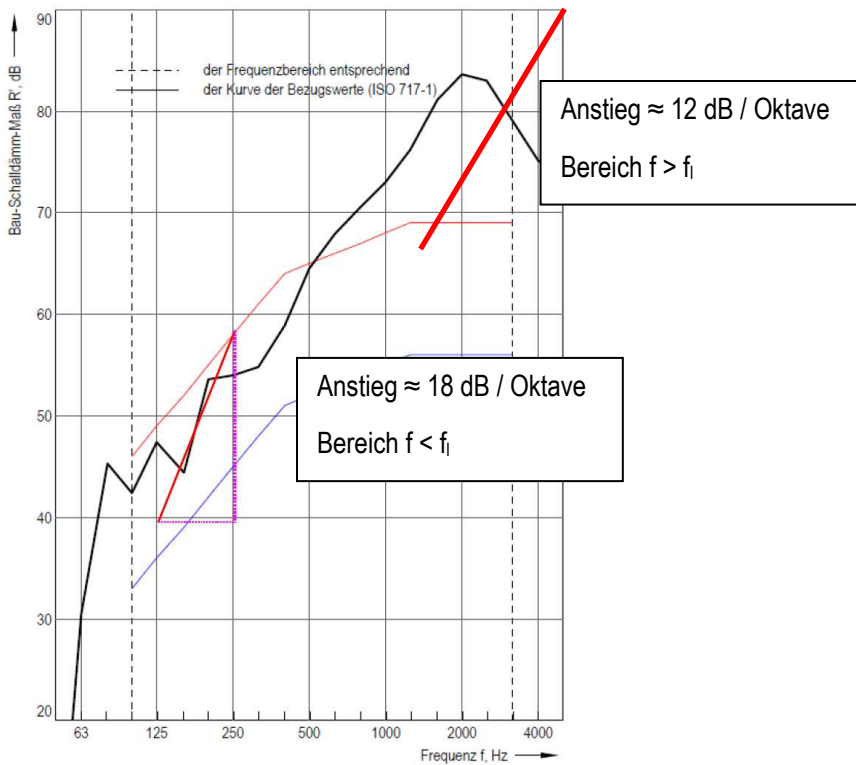
In nachfolgender Abbildung sind die Anstiege der messtechnisch und numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften für Bauteil C dargestellt.



### A 7.5 Bauteil E (25cm KS MW, 5 cm Dämmung, 20 cm KS MW)

In nachfolgenden Abbildungen sind die Anstiege der numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften für Bauteil E dargestellt.

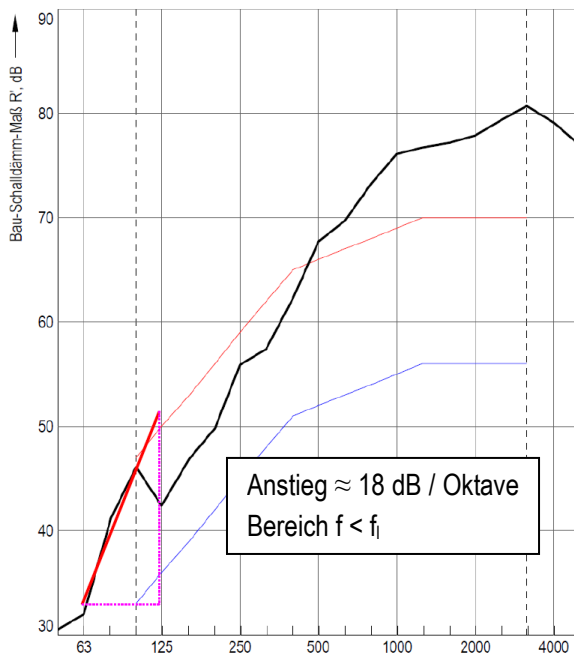
Messtechnische Ermittlung:



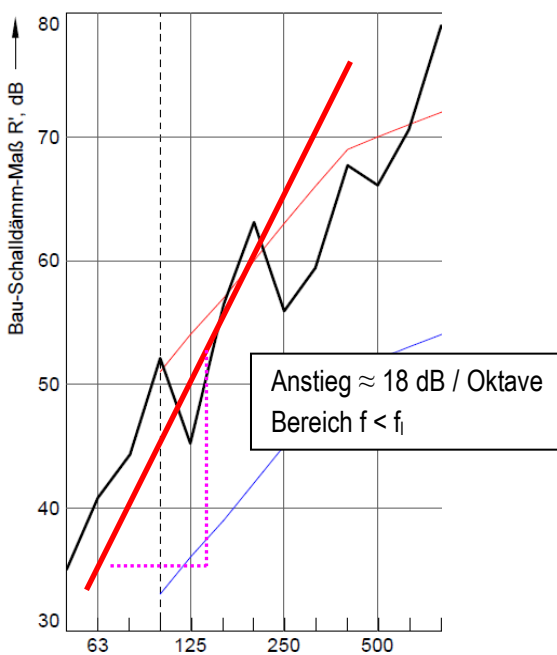
## A 7.6 Bauteil F (20 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)

In nachfolgender Abbildung sind die Anstiege der numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften für Bauteil F dargestellt.

### Messtechnische Ermittlung



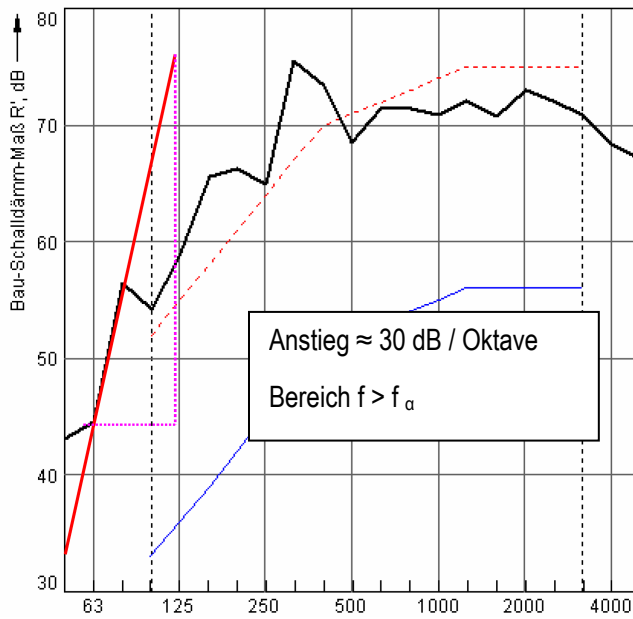
### Numerische Ermittlung (3D):



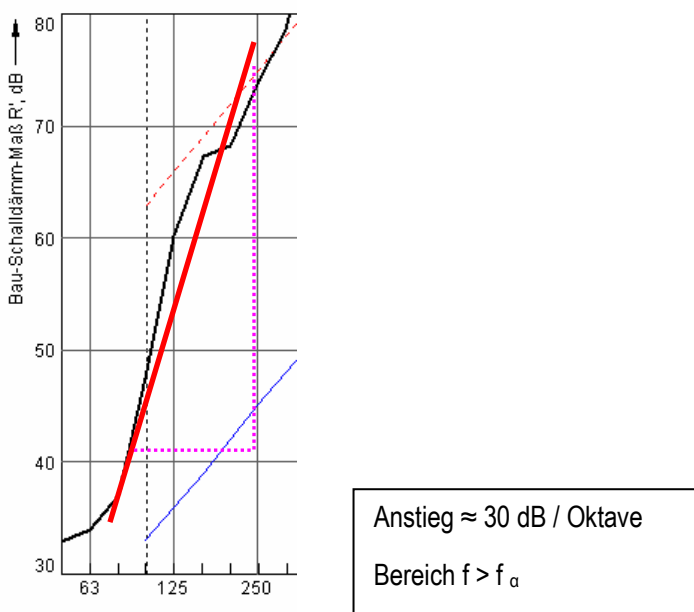
**A 7.7 Bauteil G (30 cm Beton, 5 cm Dämmung, 25 cm Beton, 5 cm Dämmung, 20 cm Beton)**

In nachfolgender Abbildung sind die Anstiege der numerisch ermittelten Schalldämm – Eigenschaften für Bauteil G dargestellt.

Messtechnische Ermittlung



Numerische Ermittlung (3D):



## Literaturverzeichnis

---

- [1] Schirmer, W.: Technischer Lärmschutz. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996
- [2] Fasold, W.: und Veres V.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Berlin: Verlag für Bauwesen GmbH, 1998
- [3] Kollmann F. G.: Maschinenakustik: Grundlagen, Messtechnik, Berechnung, Beeinflussung. Berlin: Springer – Verlag, 2000
- [4] Müller G.: und Möser M. (Hrsg.): Taschenbuch der Technischen Akustik. Berlin Heidelberg: Springer Verlag 2007
- [5] Norm DIN 4109: Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise, November 1989
- [6] Norm Beiblatt 1 zu DIN 4109. Schallschutz im Hochbau, Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren, November 1989
- [7] Norm DIN EN 12354 – 1 : 2000: Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen
- [8] DIN EN ISO 140-4: Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Teil 4: Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden, Dezember 1998
- [9] DIN EN ISO 717-1: Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Teil 1: Luftschalldämmung, November 2006
- [10] Comsol Multiphysics GmbH : COMSOL Multiphysics Einführung, Mai 2009
- [11] COMSOL Multiphysics GmbH: Acoustics Module User's Guide Comsol 3.4, Oktober 2007
- [12] COMSOL Multiphysics GmbH: COMSOL Multiphysics User's Guide, Oktober 2007
- [13] COMSOL Multiphysics GmbH: Acoustic Transmission Loss through Periodic Elastic Structures, 2008
- [14] LMS INTERNATIONAL: RAYNOISE Revision 3.1 Users Manual, 2008
- [15] Ackermann L. : Simulation der Schalltransmission durch Wände. Braunschweig, 2002
- [16] Sarradj E. : Numerische Akustik. Dresden, 2007
- [17] Langer S. :Prospects of numerical simulations in building acoustics. Braunschweig, 2004
- [18] Hübelt J.: Technische Akustik. Mittweida, 2009

- [19] Brüel und Kjaer GmbH: Daten und Fakten Omnipower™ Schallquelle, Juni 2003
- [20] Fahy F. :Foundations of Engineering Acoustics. Southampton UK, ELSEVIER ACADEMIC PRESS 2005
- [21] Schmidt H.: Schalltechnisches Taschenbuch. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996
- [22] Marshall Long: Architectural Acoustics. London, ELSEVIER ACADEMIC PRESS 2006
- [23] EUROPEAN FEDERATION OF ASSOCIATIONS OF INSULATION CONSTRUCTORS.:  
Eigenschaften von Baustoffen – Schalldämmung, Absorption, Dämpfung. Berlin, 2002



**Selbstständigkeitserklärung**

---

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'D. Jerusel'.

Chemnitz, 30.11.2009

Daniel Jerusel