

**Erarbeitung brauchbarer
Schalldämm-Definitionen
für die neue DIN 4109**

T 3196

T 3196

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7840-0

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin



Bericht

Report

Volker Wittstock

Erarbeitung brauchbarer Schalldämm- Definitionen für die neue DIN 4109

Kurztitel:

Schalldämmung nach DIN 4109

gefördert vom:

Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)

Braunschweig, 2007-10-16

Inhalt

1. EINLEITUNG.....	4
2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	4
2.1. ANFORDERUNGEN AN DIE DEFINITION	4
2.2. DERZEIT VERWENDETE DEFINITIONEN	5
2.2.1 <i>Das Labor-Schalldämm-Maß.....</i>	<i>5</i>
2.2.2 <i>Das Bau-Schalldämm-Maß.....</i>	<i>6</i>
2.2.3 <i>Schalldämm-Maße in der Prognose.....</i>	<i>6</i>
2.3. UNSICHERHEITEN BEI DER ERMITTLUNG DER LUFT-SCHALLDÄMMUNG.....	7
2.4. ZUORDNUNG VON UNSICHERHEITEN ZU VERSCHIEDENEN DEFINITIONEN	14
3. ÜBERSICHT ZU EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN.....	15
4. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DES KÖRPERSCHALLFELDS AUF DEM PRÜFLING.....	15
4.1. KONZEPTION DER UNTERSUCHUNGEN.....	15
4.2. MESSAUFBAU	16
4.3. MESSOBJEKTE UND DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN	18
4.4. ERGEBNISSE DER WIEDERHOLUNGSMESSUNGEN	18
4.5. ERGEBNISSE AN UNTERSCHIEDLICH GROßEN PLATTEN	21
4.6. AUSWERTUNGEN.....	24
4.6.1. <i>Abhängigkeit der Schalldämmung von der Plattengröße.....</i>	<i>24</i>
4.6.2. <i>Unsicherheit aufgrund unterschiedlicher Prüflingsgrößen.....</i>	<i>29</i>
5. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DER RAUMGRÖßEN.....	33
5.1 KONZEPTION DER UNTERSUCHUNGEN.....	33
5.2 GEMESSENE NACHHALLZEITEN.....	34
5.3 ERGEBNISSE DER WIEDERHOLUNGSMESSUNGEN	35
5.4 ERGEBNISSE IN UNTERSCHIEDLICHEN RAUMGEOMETRIEN	36
5.5 AUSWERTUNGEN.....	37
6. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS VON ABSORPTION UND DIFFUSION.....	40
6.1 MOTIVATION	40
6.2 DURCHGEFÜHRTE EXPERIMENTE.....	40
6.3 GEMESSENE SCHALLDÄMM-MAßE.....	43
6.3.1 <i>Gipsfaserplatte.....</i>	<i>43</i>
6.3.2 <i>Hartfaserplatte</i>	<i>45</i>
6.3.3 <i>Doppelwand.....</i>	<i>47</i>
6.4 AUSWERTUNGEN.....	48
6.4.1 <i>Auswirkung von Absorption und Diffusion auf Einzahlwerte</i>	<i>48</i>
6.4.2 <i>Mittlere Schalldämm-Spektren und zugehörige Streuungen.....</i>	<i>50</i>
6.4.3 <i>Mittlere Einzahlwerte Bau - Labor und zugehörige Streuungen.....</i>	<i>52</i>

7. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DER PRÜFLINGSGRÖÖE UND DER KANTENLÄNGENVERHÄLTNISSE	53
7.1 MOTIVATION	53
7.2 DURCHGEFÜHRTE EXPERIMENTE.....	53
7.3 GEMESSENE SCHALLDÄMMUNGEN	54
7.4 AUSWERTUNGEN.....	57
7.4.1 <i>Schalleistungen in diffusen Körper- und Luftschallfeldern.....</i>	<i>57</i>
7.4.2 <i>Schalldämmungen bei unterschiedlichen Kantenlängenverhältnissen.</i>	<i>60</i>
7.4.3 <i>Schalldämmungen bei unterschiedlichen Bauteilgrößen</i>	<i>61</i>
8. ZUSAMMENFASSUNG	61
9. VORSCHLÄGE FÜR DIE DIN 4109.....	62
DANKSAGUNG.....	63
LITERATUR.....	64

1. Einleitung

Die Mess- und Prognoseunsicherheiten bei der Schalldämmung von mehreren dB werden derzeit in der Bauakustik entweder nur sehr pauschal oder häufig auch gar nicht berücksichtigt. Dies ist umso kritischer, als Qualitätsabstufungen von je nur 3 dB zwischen bauaufsichtlich gefordertem Mindest-Schallschutz, erhöhtem Schallschutz und Komfort-Schallschutz somit kaum durch Messung oder Prognose unterschieden werden können.

Wenn man sich der Frage der Unsicherheiten z.B. über den Guide to the expression of uncertainty in measurement [GUM] nähert, so tritt bald ein grundlegendes Problem zutage. Jede Unsicherheitsanalyse beginnt mit der möglichst präzisen Definition der Messgröße und genau eine solche Definition gibt es für viele entscheidende Messgrößen in der Bauakustik nicht. Ohne eine solche Definition ist jedoch keine Unsicherheitsanalyse möglich.

Ein Blick in die [DIN 4109] macht die Notwendigkeit einer präzisen Definition deutlich, da dort bestimmten Bauteilen Luftschalldämm-Maße zugeordnet werden. Diese werden dann für Prognoserechnungen verwendet, um den geforderten Schallschutz nachzuweisen. Wenn nicht völlig klar ist, was unter der Luftschalldämmung von Bauteilen verstanden wird, kann einem solchen Verfahren nicht die erforderliche Zuverlässigkeit beigemessen werden.

Daher wird im Folgenden der Versuch unternommen, die zentrale Bauteilkenngröße, das Luftschalldämm-Maß zu definieren. Ganz wesentlich ist dabei, dass sich aus unterschiedlichen Definitionen auch Konsequenzen für die messtechnische Erfassung und die zugehörigen Unsicherheiten ergeben. Speziell wird dabei auf Unterschiede zwischen Schalldämmungen des identischen Bauteils unter Labor- und Baubedingungen eingegangen, die mit Hilfe der bauakustischen Modellmesstechnik untersucht werden.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Anforderungen an die Definition

Bevor verschiedene Definitionen hinsichtlich ihrer Eignung untersucht werden können, muss eine Vorstellung entwickelt werden, welchen Anforderungen eine Definition des Luftschalldämm-Maßes genügen muss.

Generell sollte die Definition eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Produkten ermöglichen. Anschaulich bedeutet dies, dass ein angegebener Unterschied von X dB in der Schalldämmung zwischen zwei Bauteilen sich im Mittel so auch am Bau wiederfindet. Außerdem sollte die der Schalldämmung beigeordnete Unsicherheit möglichst klein und auch einfach ermittelbar sein. Dabei muss der Aufwand für die messtechnische oder anderweitige Ermittlung möglichst niedrig sein. Wichtig ist des Weiteren, dass unterschiedliche Ermittlungsmethoden im Mittel zum gleichen Ergebnis für das gleiche Messobjekt führen.

Da der Begriff Schalldämmung bei Labormessungen, bei Baumessungen und bei Prognoserechnungen Anwendung findet, muss auch überprüft werden, ob für diese Zwecke unterschiedliche Definitionen verwendet werden sollten.

2.2. Derzeit verwendete Definitionen

2.2.1 Das Labor-Schalldämm-Maß

Nach [DIN EN ISO 140-3], der Messnorm für die Bestimmung der Schalldämmung von Bauteilen in Prüfständen, ist das „Schalldämm-Maß der zehnfache dekadische Logarithmus des Verhältnisses der auf eine zu prüfende Trennwand auftreffenden Schalleistung W_1 zu der durch den Prüfgegenstand übertragenen Schalleistung W_2 . Diese Größe wird mit R bezeichnet

$$R = 10 \lg \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

In dieser Norm wird das Schalldämm-Maß berechnet nach

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \text{ dB} . \quad (2)$$

Dabei ist

L_1 der mittlere Schalldruckpegel im Senderaum, in Dezibel (dB);

L_2 der mittlere Schalldruckpegel im Empfangsraum, in Dezibel (dB);

S die Fläche des Prüfgegenstandes, in Quadratmeter (m^2), die gleich der freien Prüföffnung ist;

A die äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum, in Quadratmeter (m^2)“

Ganz ähnlich lautet die Definition des Schalldämm-Maßes in der derzeit gültigen [DIN 4109]. Nach Anhang A6.3 kennzeichnet das Schalldämm-Maß die Luftschalldämmung von Bauteilen. Anschließend wird Gl. (2) angegeben und für Spezialfälle wird die Verwendung bestimmter Indizes vorgeschlagen, um z.B. unterschiedliche Messverfahren oder unterschiedliche Umgebungsbedingungen wie etwa mit und ohne Nebenwege, am Bau oder im Labor zu unterscheiden.

Die Definition im aktuellen Entwurf [E DIN 4109-1] lautet dagegen (Abschnitt 3.1.4): Das „Schalldämm-Maß kennzeichnet nach dieser Norm die Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen mit unterdrückter Flankenübertragung.“ Anschließend wird auf die Messung in Prüfständen eingegangen und Gl. (2) als Bestimmungsgleichung genannt. Gegenüber der gültigen Fassung der Norm ist also lediglich der Tatsache Rechnung getragen, dass das Schalldämm-Maß nun generell in Prüfständen mit unterdrückter Flankenübertragung zu bestimmen ist. Der Begriff Luftschalldämmung wird nicht näher erläutert. Es kann jedoch angenommen werden, dass darunter das Verhältnis von auftreffender zu transmittierter Schalleistung gemeint ist.

Eine weitere wichtige Schallschutz-Norm ist die [DIN EN 12354-1] und auch hier wird nach der Nennung von Gl. (1) auf die [DIN EN ISO 140-3] verwiesen.

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass in den gültigen Dokumenten zum Luftschallschutz unter der Schalldämmung immer das Verhältnis von auftreffender zu transmittierter Schall-Leistung verstanden wird. Durch den ausdrücklichen Verweis auf die Messnorm [DIN EN ISO 140-3] werden jedoch eine Vielzahl von Randbedingungen wie z.B. der Aufbau der Prüfstände und auch das Messverfahren festgelegt. Damit ist also die Definition des Schalldämm-Maßes an die

Messnorm gekoppelt und man könnte sagen, dass das Schalldämm-Maß das Ergebnis einer Messung nach [DIN EN ISO 140-3] ist.

2.2.2 Das Bau-Schalldämm-Maß

Im aktuellen Entwurf [E DIN 4109-1], Kap. 3.1.5., lautet die Definition: „Das Bau-Schalldämm-Maß R' kennzeichnet nach dieser Norm die Luftschalldämmung von Bauteilen im eingebauten Zustand einschließlich der Schallübertragung über die flankierenden Bauteile und andere Nebenwege.“

In der derzeit gültigen [DIN 4109] wird das Bau-Schalldämm-Maß analog definiert. Es wird jedoch zwischen einer Ermittlung am Bau oder in Prüfständen mit bauähnlicher Flankenübertragung unterschieden. Im aktuellen Entwurf [E DIN 4109-1] tauchen Prüfstände mit bauähnlicher Flankenübertragung nicht mehr auf, da sie nach der gültigen Norm [DIN EN ISO 140-1] nicht mehr zulässig sind.

Auch in der [DIN EN 12354-1], Kap. 3.1.1., wird das Bau-Schalldämm-Maß definiert. Danach ist es „der negative dekadische Logarithmus des Verhältnisses der in den Empfangsraum übertragenen Gesamtschalleistung zur Schalleistung, die auf ein trennendes Bauteil auftrifft.“ Es wird speziell darauf hingewiesen, dass sich die in den Empfangsraum übertragene Gesamtschalleistung aus den vom trennenden Bauteil und von anderen Elementen abgestrahlten Schalleistungen zusammensetzt.

Deutlich ist, dass das Bau-Schalldämm-Maß nach all diesen Definitionen eine Kombination aus den Eigenschaften des trennenden Bauteils und allen möglichen Nebenwegen ist. Zur Charakterisierung der schalltechnischen Eigenschaften von Bauteilen ist es daher nur sehr bedingt geeignet, wohl aber zur schalltechnischen Charakterisierung von Gebäuden.

2.2.3 Schalldämm-Maße in der Prognose

Bei der Prognose der Schalldämmung am Bau handelt es sich nun im Wesentlichen um eine Ermittlung des Bau-Schalldämm-Maßes aus den Labor-Schalldämm-Maßen des direkten Übertragungsweges und der Flankenwege.

Nach [DIN EN 12354-1] verläuft die Prognose in zwei Schritten. Zunächst werden die Ausgangsdaten, also die Labor-Schalldämm-Maße R in in-situ Werte R_{situ} umgerechnet. Dies erfolgt auf Grundlage der Verlustfaktoren am Bau und im Labor. Aus der Superposition der Energieanteile die auf verschiedenen Wegen übertragen werden, ergibt sich schließlich das Bau-Schalldämm-Maß. Leider wird das in-situ-Schalldämm-Maß nicht separat definiert. Aus der Beschreibung ist jedoch klar, dass es sich um das Schalldämm-Maß handelt, das ein Bauteil in einer konkreten Bausituation aufweist, wenn keinerlei Flankenübertragung stattfindet. Die Prognoserechnung nach [DIN EN 12354-1] kann sowohl für Terzwerte als auch für Einzahlwerte (bewertetes Schalldämm-Maß R_w bzw. Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswerten C oder C_{tr}) erfolgen. Letzterer Fall wird durch geeignete Indizes gekennzeichnet.

In der derzeit gültigen [DIN 4109] werden als Startpunkt für die Prognose Anforderungswerte für das bewertete Bau-Schalldämm-Maß angegeben. Diese Anforderung wird mit einem Rechenwert $R'_{w,R}$ verglichen, der sich entweder aus dem

Beiblatt 1 zur [DIN 4109] oder einer Eignungsprüfung ergibt, wobei Unterschiede in der Flankendämmung zu berücksichtigen sind. Die Eignungsprüfung basiert auf Messungen im Prüfstand mit unterdrückter Flankenübertragung.

Im Entwurf [E DIN 4109-1] wird der Ablauf der Prognose in mehrere Schritte unterteilt. Ausgangspunkt sind hierbei die Anforderungen, die in Form der Standard-Schallpegeldifferenz angegeben sind. Diese wird aber anschließend in ein erforderliches Bau-Schalldämm-Maß umgerechnet, das gemäß [E DIN 4109-3] berechnet wird. Bei dieser Rechnung wird auf eine in-situ Korrektur der Verlustfaktoren verzichtet. Lediglich in einzelnen Fällen im Massivbau beruhen die Massekurven auf bauüblichen Verlustfaktoren.

2.3. Unsicherheiten bei der Ermittlung der Luft-Schalldämmung

In einem vom DIBt geförderten Projekt wurden u.a. die wesentlichen Unsicherheitsbeiträge bei der Luftschalldämmung untersucht ([Wit04], [Wit05]). Dabei zeigte sich, dass gegenüber den eigentlichen Messunsicherheiten durch ungenügende Schallfeldabtastung oder Gerätetoleranzen vor allem die unterschiedliche Ausprägung der Luft- und Körperschallfelder in verschiedenen Prüfständen von Bedeutung ist. Verursacht wird dies durch

1. unterschiedliche Abmessungen von Sende- und Empfangsraum,
2. verschiedene Prüflingsgrößen und Kantenlängenverhältnisse,
3. die Randbedämpfung der Bauteile sowie
4. Luftdruck- und Temperaturunterschiede.

Einige der Effekte, wie etwa die Gerätetoleranzen [WB05] oder die Auswirkungen von Luftdruck und Temperatur [WB03], können beim derzeitigen Kenntnisstand auch in ihrer Größe benannt werden. Es ist jedoch nicht möglich, ein komplettes Unsicherheitsbudget anzugeben, da die Auswirkung der wichtigsten Einflussgrößen (Punkte 1, 2 und 3) bislang nicht zahlenmäßig erfasst werden konnte.

Daher ist es sinnvoll, auf das in [DIN EN ISO 140-2] verfolgte Konzept von Wiederhol- und Vergleichs-Standardabweichung zurückzugreifen. Mit der Vergleichs-Standardabweichung werden alle Unsicherheitskomponenten erfasst, die bei Messungen am identischen Prüfobjekt in verschiedenen Prüfständen durch verschiedenes Messpersonal mit verschiedenen Messgeräten und gleichem Messverfahren auftreten. Die Wiederhol-Standardabweichung charakterisiert demgegenüber die Unsicherheit von Messergebnissen, die am identischen Messobjekt im selben Prüfstand vom selben Personal mit dem selben Messgerät und -verfahren innerhalb eines kurzen Zeitintervalls erzielt wurden. Die Wiederhol-Standardabweichung umfasst somit nur einen Teil aller Unsicherheitsbeiträge und ist demnach niedriger als die Vergleichs-Standardabweichung. In [DIN EN ISO 140-2] sind Zahlenwerte für beide Standardabweichungen angegeben, die auf Ringversuchen beruhen. Da die Transparenz der zugrunde liegenden Rechnungen jedoch sehr gering ist und es zudem neuere Ringversuchsergebnisse gibt, wurden im Rahmen dieses Projekts Daten zu Ringversuchen erhoben (Tabelle 1) und neue Unsicherheitswerte berechnet.

Eine wichtige Kategorie von Messungen wird durch die [DIN EN ISO 140-2] jedoch nicht abgedeckt. Dies sind Messungen der Schalldämmung in der selben Prüfstands- oder Bausituation durch unterschiedliche Messteams mit jeweils eigenen Messgeräten. Dies entspricht nämlich der Unsicherheit von „Nachmessungen“ der erreichten Schalldämmung am Bau. Es wird vorgeschlagen, die zugehörige Standardabweichung „in-situ-Standardabweichung“ zu nennen. Ihr Wert wurde im Rahmen dieses Projekts auf der Grundlage PTB-interner Daten (Vergleichsmessungen an der PTB bzw. an der MPA Dortmund) sowie weiterer Daten ermittelt (Tabelle 2). Da hier zum Teil auch Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden, können diese Werte auch für die Ermittlung der Wiederhol-Standardabweichung herangezogen werden.

Zusätzlich zu den bislang aufgeführten Unsicherheitskomponenten spielen in der Praxis auch die Produktstreuungen eine wesentliche Rolle. Hierzu liegen jedoch kaum realistische Daten vor, da die verfügbaren Messergebnisse aus Ringversuchen stammen, deren Objekte gezielt aufgrund ihrer geringen Produktstreuung ausgewählt wurden.

Alle 214 vorliegenden Wiederhol-Standardabweichungen sind in Bild 1 dargestellt. Bei tiefen Frequenzen kommt es teilweise zu Werten von bis zu 5 dB, es gibt jedoch auch viele sehr niedrige Werte. Der quadratische Mittelwert über alle vorliegenden Ergebnisse liegt sehr gut bei den Werten aus der aktuellen [DIN EN ISO 140-2].

Für die Vergleichs-Standardabweichungen liegen nur 26 Ergebnisse vor (Bild 2). Bei tiefen Frequenzen treten Werte von bis zu 8 dB auf, dies ist jedoch wegen der sehr geringen Modenzahlen in Luft- und Körperschallfeldern nicht unerwartet. Überraschend ist hingegen die recht große Unsicherheit bei mittleren bis hohen Frequenzen, die bei einigen Ringversuchen aufgetreten ist. Der Mittelwert liegt bei tiefen Frequenzen in der Nähe der Werte aus der aktuellen [DIN EN ISO 140-2]. Bei mittleren bis hohen Frequenzen ergeben sich jedoch deutlich größere Werte.

Die Berechnung der in-situ-Standardabweichungen basiert auf 22 Ergebnissen (Bild 3). Die Werte streuen eher wenig, und der Mittelwert liegt, wie auch zu erwarten ist, zwischen den Werten für die Wiederhol- s_r und für die Vergleichs-Standardabweichung s_R .

Mehr noch als die bislang betrachteten spektralen Werte interessieren die Einzahlwerte, da sie in Anforderungen und Prognosen Verwendung finden. Aus den verfügbaren Daten wurden daher auch deren Wiederhol-, Vergleichs- und in-situ-Standardabweichungen berechnet (Bild 4 - Bild 6). Die auftretenden Werte liegen für die Wiederhol-Standardabweichung zwischen 0,0 und 1,0 dB, für die in-situ-Standardabweichung zwischen 0,3 und 1,2 dB und für die Vergleichs-Standardabweichung zwischen 0,5 und 2,3 dB. Die in der [DIN EN ISO 140-2] genannten Werte von 0,4 dB für die Wiederhol- und 0,4 bis 1,1 dB für die Vergleichs-Standardabweichung liegen in der gleichen Größenordnung. Die Mittelwerte der Standardabweichungen im Vergleich zu den Werten aus [DIN EN ISO 140-2] sind in Bild 7 vergleichend dargestellt. Dabei gilt im Mittel

$$s(R_W) < s(R_W + C) < s(R_W + C_{tr}) \quad (3)$$

sowie

$$s_r < s_{situ} < s_R \quad (4)$$

Tabelle 1 Ergebnisse von Ringversuchen: verschiedene Laboratorien, unterschiedliches Personal, unterschiedliche Messgeräte, p – Zahl der Laboratorien, n – Zahl der Messdurchläufe pro Teilnehmer

Objekt	Quelle	p	n
Doppelscheibe 6/16/6, Stahlprofil	[KO88]	15	6
2.2 mm Sandwich-Blech auf Stahlrahmen	[KO88]	15	1
Doppelscheibe 6/16/6, Stahlprofil	PTB	8	6
2.2 mm Sandwich-Blech auf Stahlrahmen	PTB	9	1
PVC Fenster mit 6/16/6 Verglasung	[RVGS91]	16	1
PVC Fenster mit 44R(6)8 Verglasung	[RVGS91]	16	6
Isolier-Doppelscheibe, 4/4-15-4	[Ra84]	5	6
Isolier-Doppelscheibe, 4/4-15-4	[KR84]	5	6
4 mm Verglasung	[RB04]	6	1
44-2 Verglasung	[RB04]	6	1
4(15)4 Verglasung	[RB04]	6	1
44-2(15)10 Verglasung	[RB04]	6	1
240 mm Kalksandsteinwand, fest eingebaut	[WW05]	20	7
240 mm Kalksandsteinwand, elastisch eingebaut	[WW05]	10	1
20 mm Spanplatte auf Holzständern	[LM86]	6	8
120 mm Kalksandsteinwand, Putz auf einer Seite	[LM86]	6	10
220 mm Kalksandsteinwand, Putz auf einer Seite	[LM86]	7	8
einschalige Gipskartonwand auf Metallständern	[Po94]	24	5
zweischalige Gipskartonwand auf Metallständern	[Po94]	24	5
Doppelscheibe 6/16/6, Einbau mit Kitt	Re07 ¹	20	1
Doppelscheibe 6/16/6, Einbau mit Dichtband	Re07 ¹	20	5
Hochdämmende Scheibe 44-2(16)10, Einbau mit Kitt	Re07 ¹	18	1
Hochdämmende Scheibe 44-2(16)10, Einbau mit Dichtband	Re07 ¹	20	5

¹ Ergebnisse eines aktuellen Ringversuchs organisiert von M. Rehfeld, noch unveröffentlicht

Tabelle 2 Ergebnisse von in-situ-Messungen, unterschiedliches Personal, unterschiedliche Messgeräte, gleiche Labor- oder Bausituation, *o* – Zahl der Teilnehmer, *n* – Zahl der Messdurchläufe pro Teilnehmer

Messobjekt	Quelle	<i>o</i>	<i>n</i>
Bau: Deckenaufbau bestehend aus 20 cm Stahlbeton, 2 cm Mineralwolle, PE-Folie, 5 cm schwimmender Estrich, Belag	[La96]	12	5
Bau: PVC-Fenster mit Isolierverglasung 4/12/4	[La96]	8	5
Bau: Deckenaufbau bestehend aus abgehängter Decke, Beton-Rippendecke, schwimmendem Estrich, Belag	[La96]	13	5
Bau: 240 mm Betonwand zwischen zwei identischen Räumen	[HCO95]	5	1
Bau: 240 mm Betonwand zwischen zwei identischen Räumen in offener Verbindung zu einer Treppe	[HCO95]	5	1
Bau: 240 mm Betonwand zwischen einem Bad und einem Wohnzimmer	[HCO95]	5	1
Bau: 140 mm Betondecke, 20 mm Mineralwolle, 45 mm schwimmender Estrich, 2 mm verklebte PVC Fliesen	MPA 88	71	1
Bau: 140 mm Betondecke, 20 mm Styropor, 45 mm schwimmender Estrich, 2 mm verklebte PVC Fliesen, 4 künstliche Schallbrücken	MPA 91	72	1
Bau: 24 cm Kalksandsteinwand	MPA 94	86	1
Bau: 24 cm Kalksandsteinwand	MPA 97	105	1
Bau: 24 cm Kalksandsteinwand	MPA 00	106	1
Bau: 4 Raum Anordnung, diagonale Messung, gemeinsames Bauteil: 24 cm Kalksandsteinwand	MPA 03	103	1
Labor: Holzbalkendecke	PTB 97	17	1
Labor: Stahlbetondecke mit verklebtem Parkett	PTB 00	16	1
Labor: Verglasung 6/16/6	PTB 04	12	1
Labor: Maximaldämmung des Fensterprüfstands der PTB	PTB 04	7	1
Labor: Verglasung 6/16/6 gemessen mit MLS	PTB 04	10	1
Bau: Vertikale Schalldämmung in einem Bürogebäude (A)	[Sim 05]	10	1
Bau: Vertikale Schalldämmung in einem Bürogebäude (B)	[Sim 05]	5	1
Bau: Horizontale Schalldämmung in einem Bürogebäude (D)	[Sim 05]	5	1
Bau: Vertikale Schalldämmung in einem Bürogebäude (E)	[Sim 05]	5	1
Bau: Horizontale Schalldämmung in einem Bürogebäude (F)	[Sim 05]	5	1
Labor: Stahlbetondecke mit Laminat	PTB 07	15	1

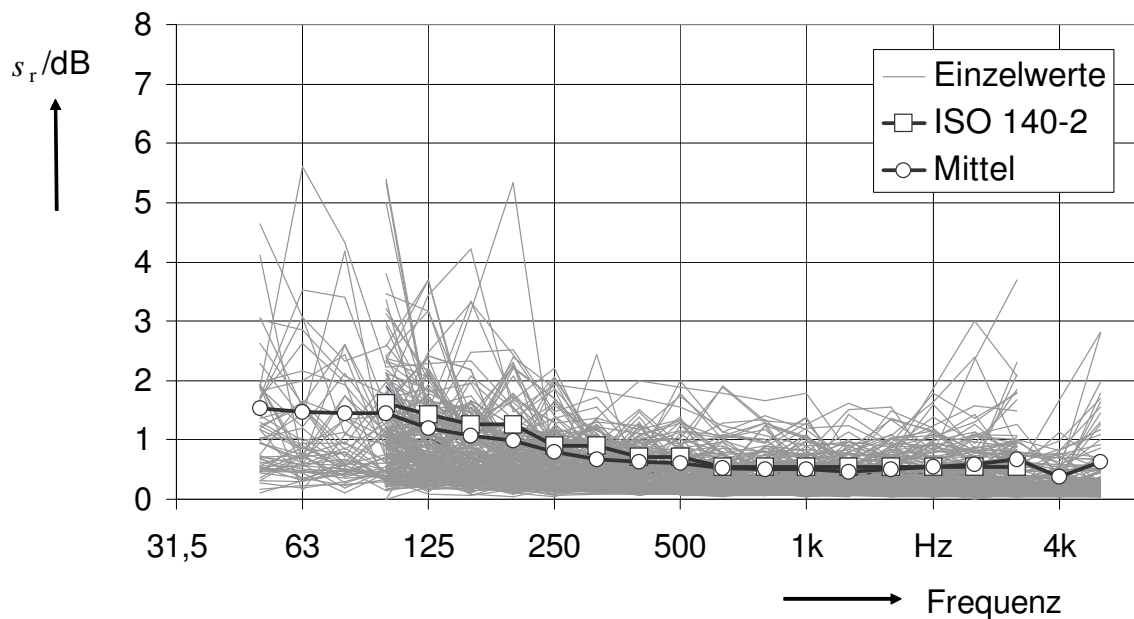


Bild 1 Wiederhol-Standardabweichungen aus den Ringversuchen, daraus berechneter Mittelwert sowie Werte aus [DIN EN ISO 140-2]

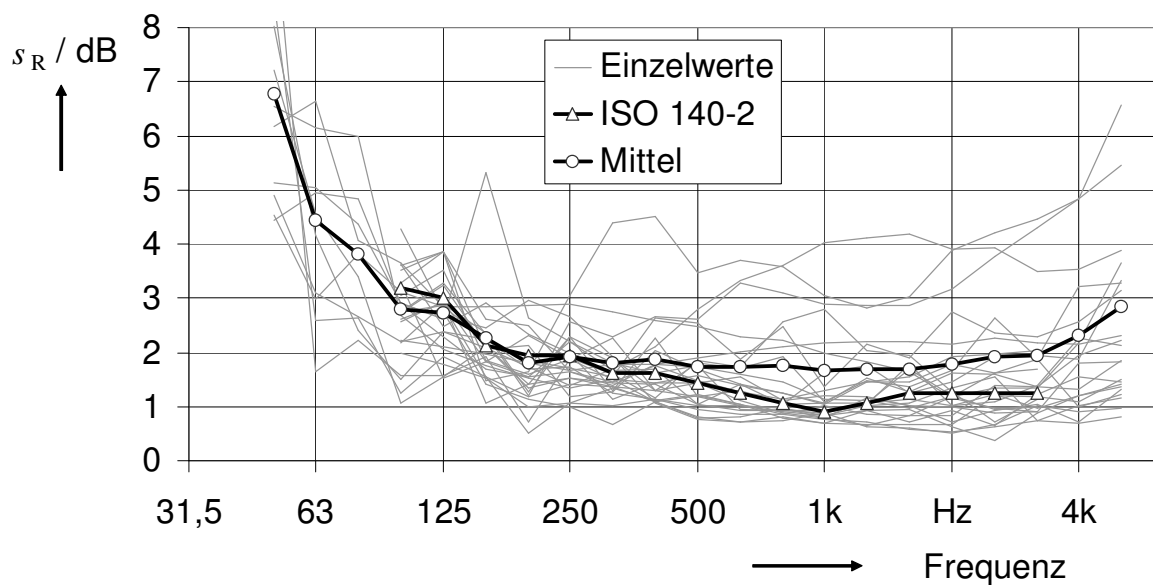


Bild 2 Vergleichs-Standardabweichungen aus den Ringversuchen, daraus berechneter Mittelwert sowie Werte aus [DIN EN ISO 140-2]

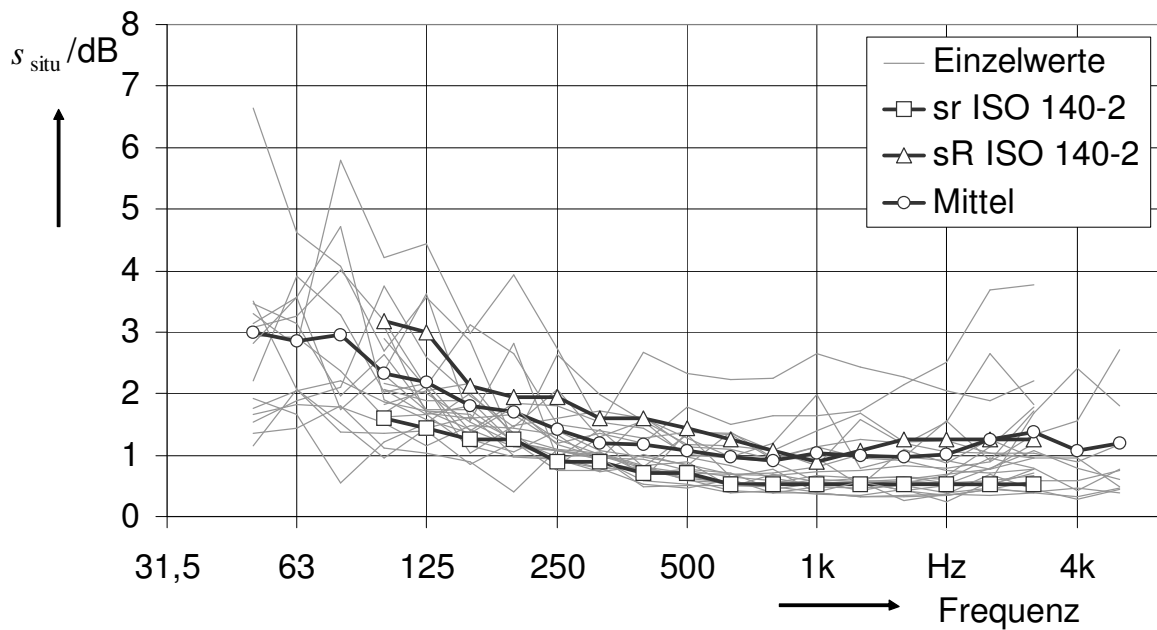


Bild 3 in-situ-Standardabweichungen, daraus berechneter Mittelwert sowie Wiederhol- und Vergleichs-Standardabweichung aus [DIN EN ISO 140-2]

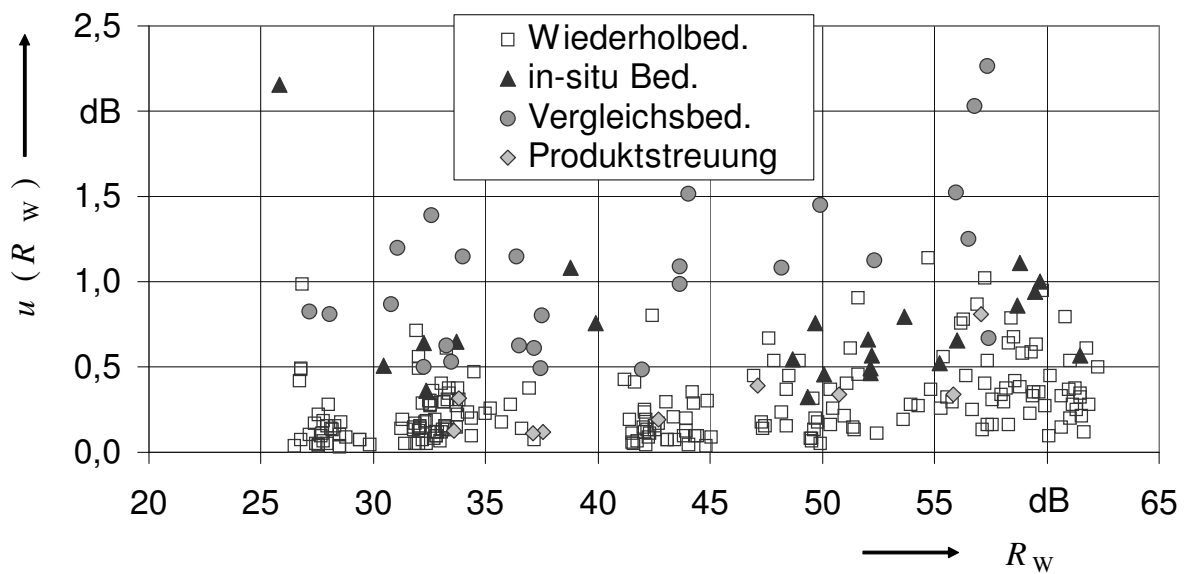


Bild 4 Wiederhol-, Vergleichs- und in-situ-Standardabweichungen des bewerteten Schalldämm-Maßes

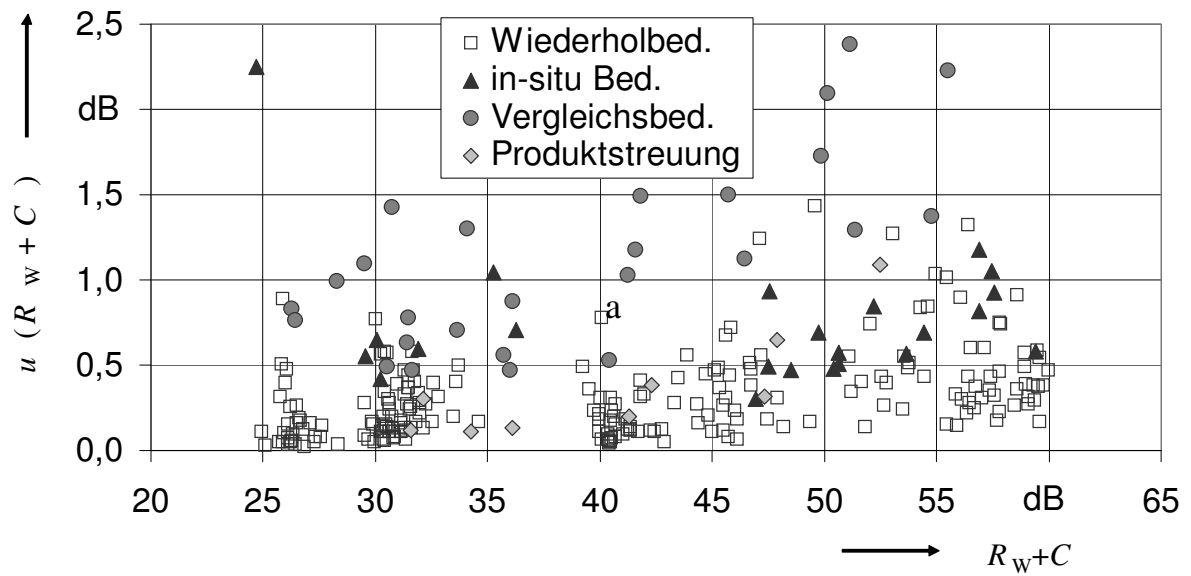


Bild 5 Wiederhol-, Vergleichs- und in-situ-Standardabweichungen der Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß R_w und Spektrum-Anpassungswert C

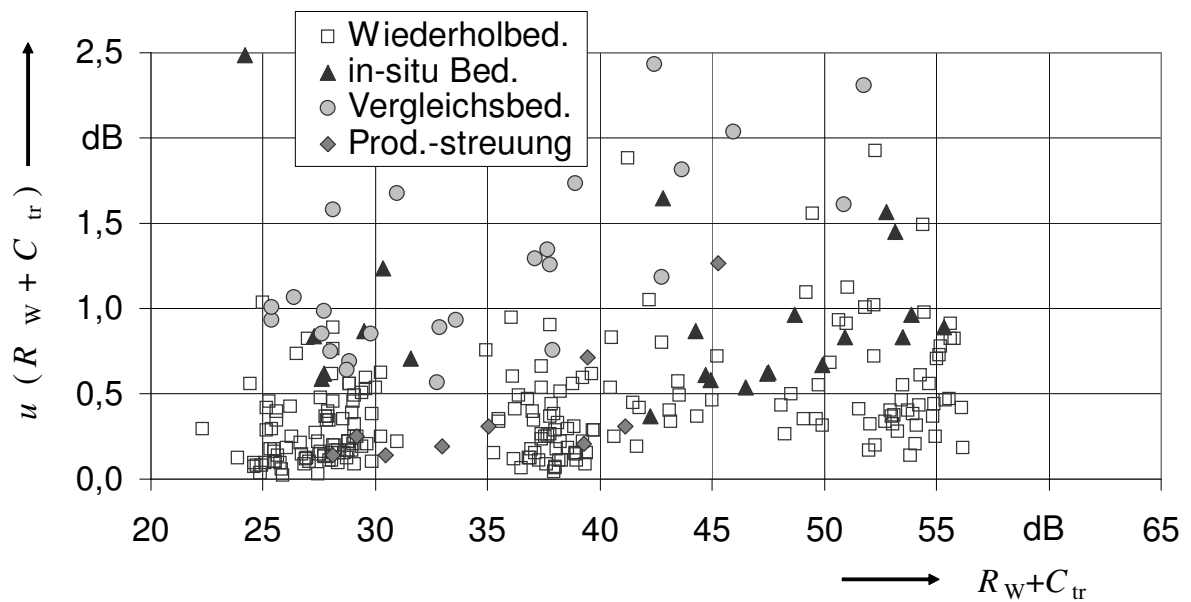


Bild 6 Wiederhol-, Vergleichs- und in-situ-Standardabweichungen der Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß R_w und Spektrum-Anpassungswert C_{tr}

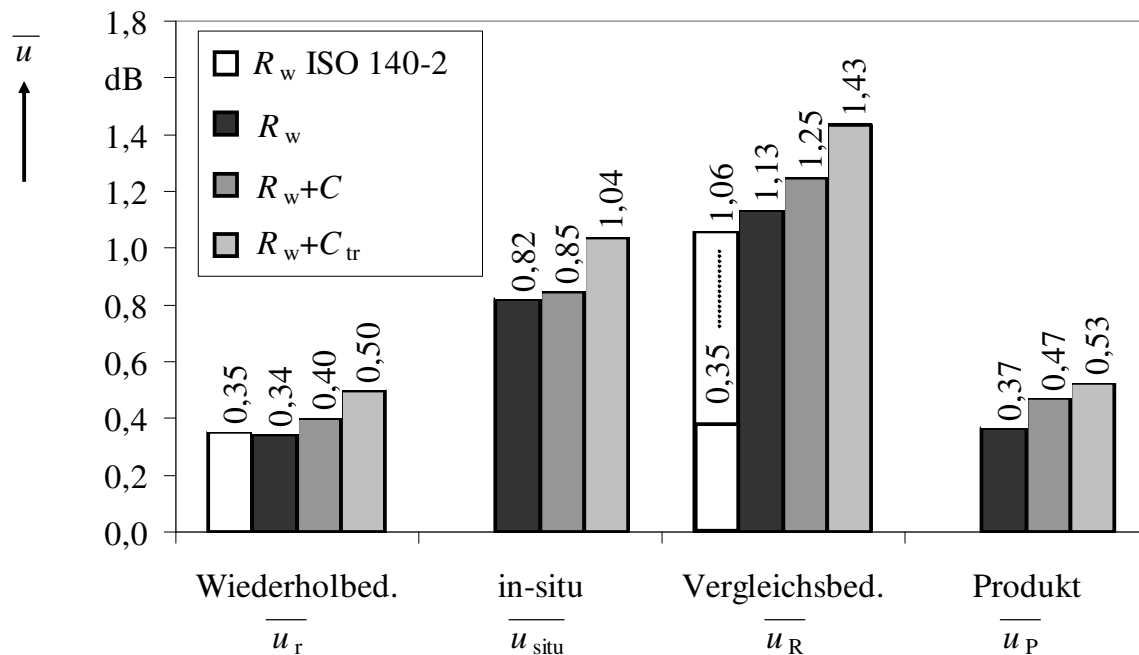


Bild 7 Mittelwerte von Wiederhol-, Vergleichs-, Produkt- und in-situ-Standardabweichungen für die Einzahlwerte

2.4. Zuordnung von Unsicherheiten zu verschiedenen Definitionen

Zur Zuordnung von Unsicherheiten zu Schalldämm-Definitionen ist es erforderlich, den Zweck der verschiedenen Schalldämmungen genau zu benennen.

Die Ergebnisse von **Labormessungen** dienen dazu, die schalltechnischen Eigenschaften eines bestimmten Bauteils zu quantifizieren und verschiedene Bauteile miteinander zu vergleichen. Die Grundgesamtheit umfasst demnach die Schalldämmung des untersuchten Bauteils in der Gesamtheit aller nach [DIN EN ISO 140-1] zulässigen Prüfstände, gemessen nach [DIN EN ISO 140-3]. Durch Auswahl eines konkreten Prüfstands wird nun eine Stichprobe gezogen, die als Schätzwert für den Mittelwert über alle Prüfstände dient. Die zugehörige Unsicherheit ist demnach die Vergleichs-Standardabweichung, also die Summe aus allen Unsicherheitskomponenten.

Baumessungen hingegen haben den Zweck, den konkret am Bau erreichten Schallschutz einzuschätzen. Hier geht es also nicht um die Charakterisierung eines speziellen Bauteiltyps, sondern um ein Exemplar dieses Typs in einer festen Bausituation. Die zugehörige Grundgesamtheit ist in diesem Fall also die Schalldämmung des untersuchten Bauteils in der konkreten Bausituation, gemessen nach [DIN EN ISO 140-6]. Dies bedeutet, dass die beteiligten Luftschall- wie auch Körperschallfelder konstant sind, so dass sich die Unsicherheit von Baumessungen nur aus denjenigen Unsicherheitskomponenten zusammensetzt, die bei der in-situ-Standardabweichung berücksichtigt sind.

Prognoserechnungen dienen nun dazu, die Schalldämmung am ausgeführten Gebäude aus den Schalldämmungen der einzelnen Bauteile zu berechnen. Die

Unsicherheit des Prognoseergebnisses ergibt sich aus der gewichteten Überlagerung der Unsicherheiten der eingehenden Bauteileigenschaften zuzüglich eines Unsicherheitsbeitrags für das angewendete Prognoseverfahren.

3. Das Prinzip der experimentellen Untersuchungen

Aus den bisherigen Ausführungen folgte u.a. die Frage, wie die unterschiedlichen Messergebnisse für die Labor-Schalldämmung eines Bauteils in unterschiedlichen Prüfständen zustande kommen und wie Labor-Schalldämmungen in in-situ-Schalldämmungen umgerechnet werden können. Da analytische Betrachtungen hierzu nicht ohne Weiteres zu quantitativen Ergebnissen führen, wurden bauakustische Modellmessungen durchgeführt, die eine kostengünstige Variation vieler Parameter unter Laborbedingungen ermöglichen. Die wesentlichen kontrollierenden Größen wie Luftschallwellenzahl, Wellenzahl der Biegewelle und Abmessungen der Bauteile wurden exakt maßstäblich verkleinert, so dass die ermittelten Einflüsse auch zahlenmäßig auf Originalgrößen übertragen werden können [KI07]. Der Modellmaßstab beträgt für alle Untersuchungen 1:8.

4. Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss des Körperschallfelds auf dem Prüfling

4.1. Konzeption der Untersuchungen

Eine erste experimentelle Untersuchung wurde der Frage gewidmet, welchen Einfluss die Lage der Körperschallmoden einer Trennwand auf die im Prüfstand gemessene Schalldämmung hat. Um nur die Lage der Körperschallmoden zu variieren, wurde eine Trennwand gemäß Bild 8 zwischen zwei Räume eines Bauakustik-Prüfstands eingebaut. Die Variation der Lage der Körperschallmoden erfolgte nun durch Variation der Größe des Trennbauteils bei konstantem Empfangs- und Senderaum.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt [Jüt05] und sind dort ausführlich dokumentiert. Im vorliegenden Bericht werden die Versuchsanordnungen sowie die wesentlichen Ergebnisse angegeben.

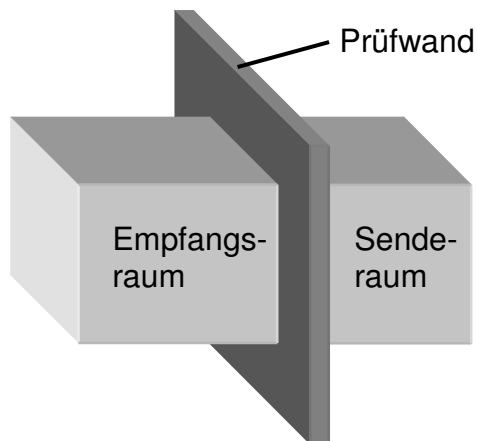


Bild 8 Prinzipieller Versuchsaufbau

4.2. Messaufbau

Der Modellprüfstand wurde gemäß den Anforderungen aus [ISO 140-1] angefertigt. Er wurde im Maßstab 1:8 verkleinert und bestand aus 38 mm dicken MDF-Platten (Bild 9). Die beiden Prüfstandshälften wurden auf Rollen gelagert und mittels Gewichten über Umlenkrollen definiert an die Prüfwand angekoppelt. Die Prüfwand selbst hing an einem Kran.

Die Messungen erfolgten mit einem vielkanaligen Mess- und Analysesystem. Als Sensoren kamen $\frac{1}{4}$ "-Messmikrofone zum Einsatz und als Quellen dienten selbst angefertigte Hexaeder mit einer Kantenlänge von ca. 40 mm (Bild 10).

Vor der Inbetriebnahme wurde die Maximaldämmung mit Hilfe von Gipsfaserplatten als Trennelemente gemessen. Die Zahl der übereinanderliegenden Gipsfaserplatten wurde sukzessive erhöht und es zeigte sich eine Maximaldämmung, die um mindestens 10 dB über den später gemessenen Schalldämmungen liegt. Auf eine diesbezügliche Korrektur der Messergebnisse wurde demgemäß verzichtet.

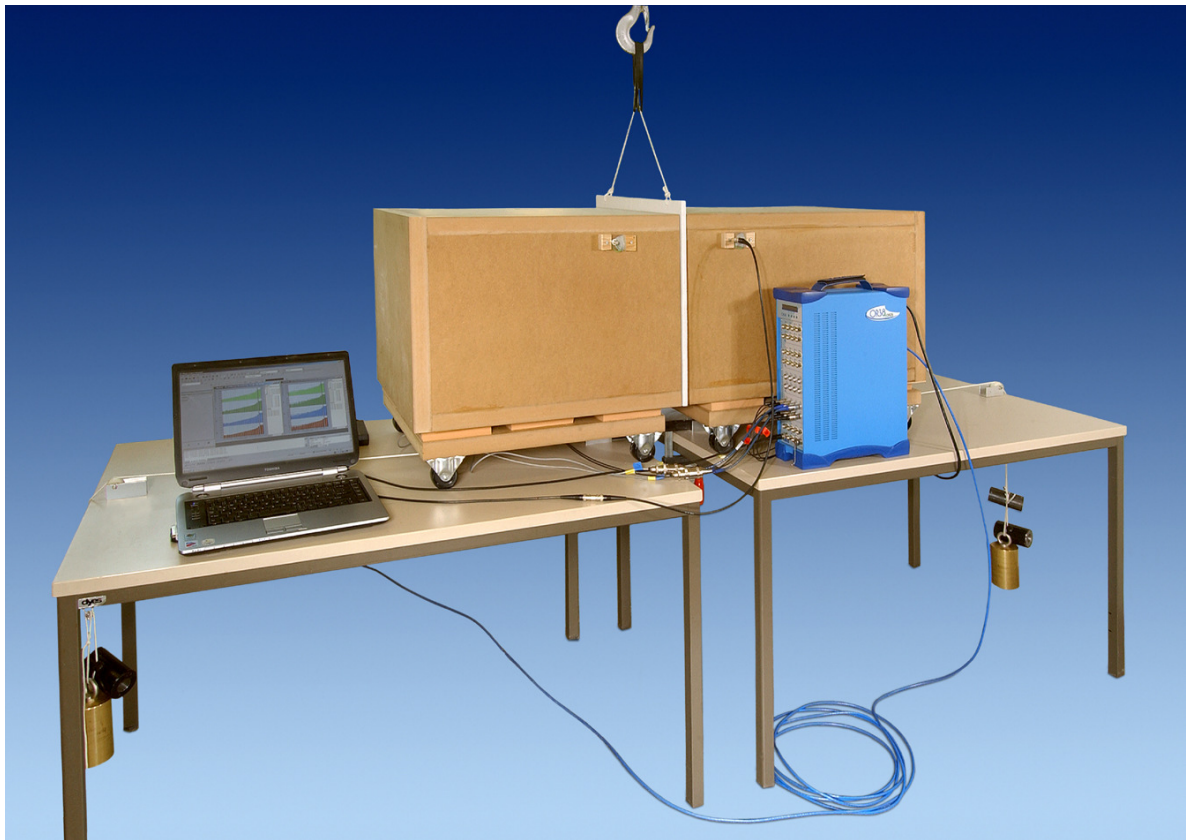


Bild 9 Foto des Versuchsaufbaus



Bild 10 Foto einer Modellschallquelle

4.3. Messobjekte und Durchführung der Messungen

Für die Untersuchungen wurden als Trennwände Gipskartonplatten, Spanplatten, Sperrholzplatten sowie Hartfaserplatten verwendet (Tabelle 3). Pro Material wurden 8 verschiedene Plattenabmessungen verwendet, wobei die Ausgangsfläche, die der Größe der Prüföffnung entspricht, maximal vervierfacht wurde. Bei der kleinsten Plattenabmessung liegen in der 800 Hz – Terz ca. 3 Eigenfrequenzen für die drei biegesteifen Materialien. Diese Terz entspricht 100 Hz im Original. Bei der Hartfaserplatte liegen im gleichen Frequenzband ca. 12 Eigenfrequenzen. Dies ist eine realistische Größenordnung für die Messung von Bauteilen in Prüfständen.

Tabelle 3 Verwendete Bauteile

Material	Gipskarton	Spanplatte	Sperrholz	Hartfaser
Dicke in mm	12,5	13	10	3
Koinzidenzgrenzfrequenz in kHz	2,5	2,5	3,2	10
Verlustfaktor nach [Sch96]	0,03	0,03	0,02	0,015

Die Schalldämmung wurde für jede Platte ein mal gemessen. Zusätzlich wurden für zwei Exemplare von jedem Plattenmaterial je fünf Wiederholungsmessungen durchgeführt, aus denen eine Wiederhol-Standardabweichung berechnet wurde.

4.4. Ergebnisse der Wiederholungsmessungen

Bei den Wiederholungsmessungen (Bild 11 – Bild 18) zeigen sich geringe Abweichungen von wenigen dB zwischen den Einzelmessungen. Die Frequenzlage von Minima und Maxima unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz bleibt in der Schalldämm-Kurve erhalten, lediglich der Wert der Schalldämmung schwankt, bedingt u.a. durch die jeweils unterschiedliche räumliche Abtastung. Oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz sind die Schwankungen etwas geringer, nur bei den ganz hohen Terzen treten z.T. erhebliche Streuungen auf, was u.a. auf das Grundrauschen zurückgeführt werden kann. Hierzu muss angemerkt werden, dass für eine Messung die Prüfstandhälften zwei mal getrennt und wieder zusammengefügt wurden, so dass in der Wiederholstreuung auch die Unsicherheiten durch unterschiedlichen Einbau des Prüfobjekts enthalten sind. Im Mittel ergeben sich Wiederholstandardabweichungen, die niedriger sind als die Werte aus [ISO 140-2] (Bild 19). Die Ergebnisse können somit als insgesamt gut wiederholbar eingeschätzt werden.

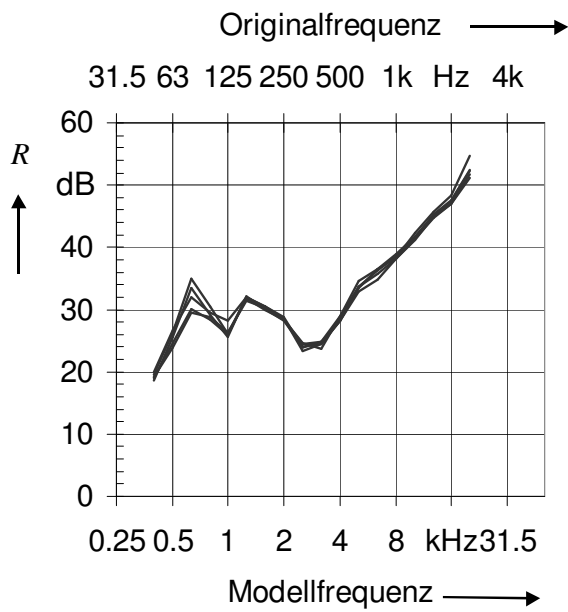


Bild 11 Wiederholungsmessungen für die Gipskartonplatte 1

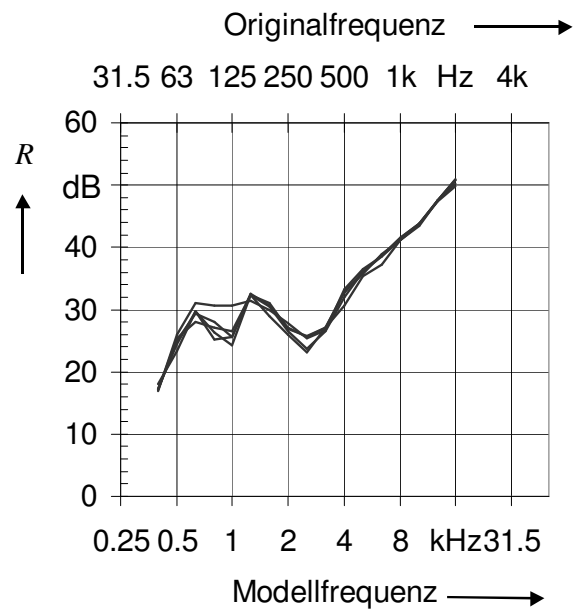


Bild 12 Wiederholungsmessungen für die Gipskartonplatte 5

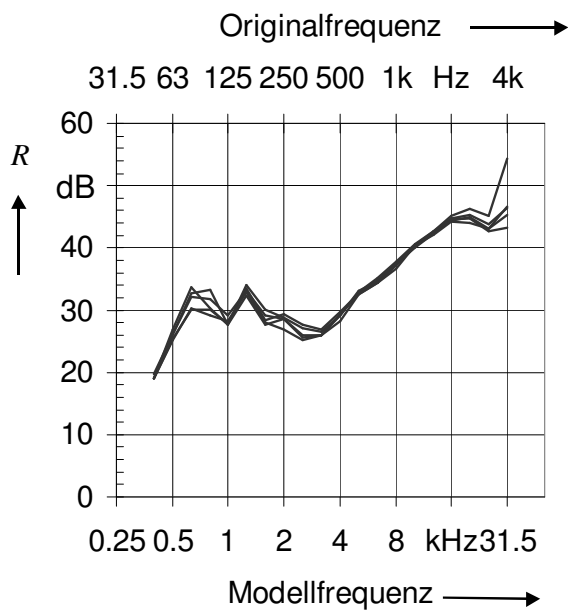


Bild 13 Wiederholungsmessungen für die Spanplatte 1

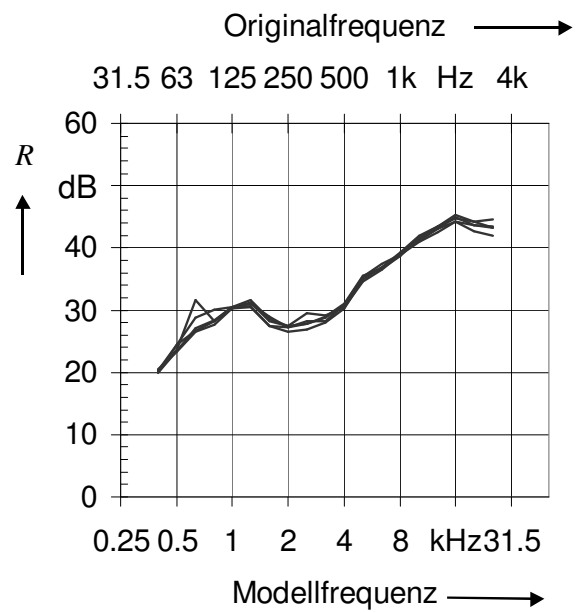


Bild 14 Wiederholungsmessungen für die Spanplatte 5

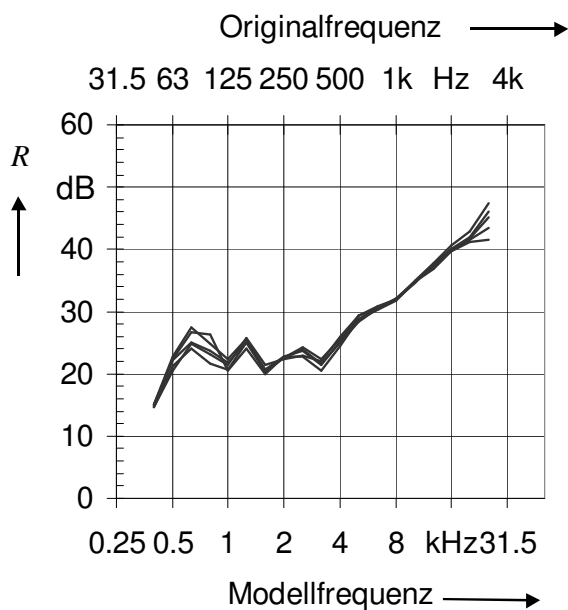


Bild 15 Wiederholungsmessungen für die Sperrholzplatte 1

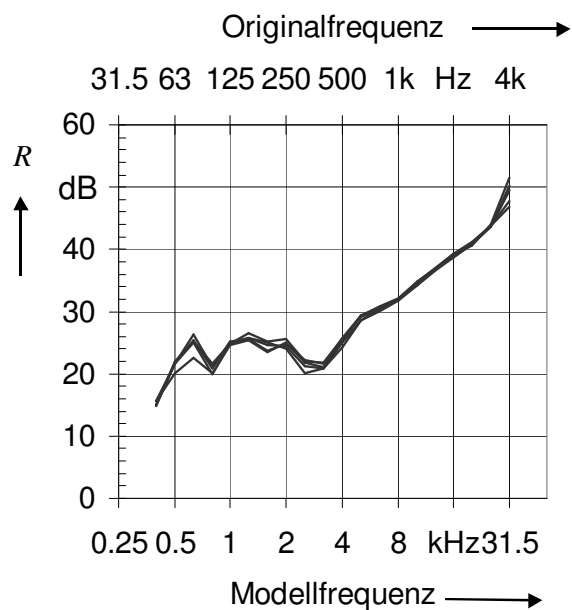


Bild 16 Wiederholungsmessungen für die Sperrholzplatte 5

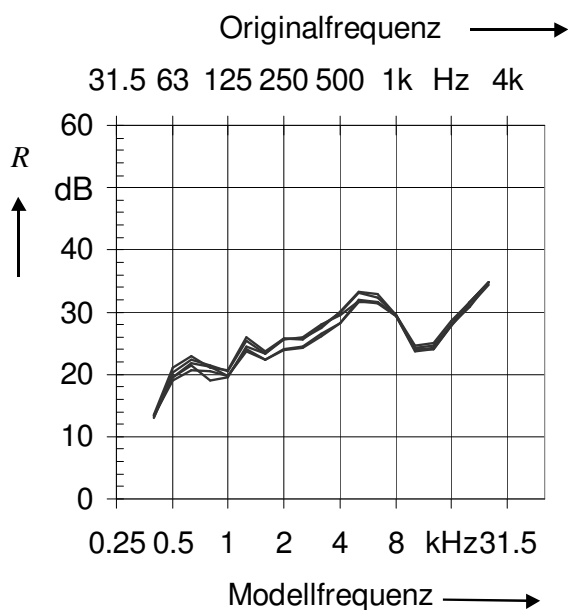


Bild 17 Wiederholungsmessungen für die Hartfaserplatte 1

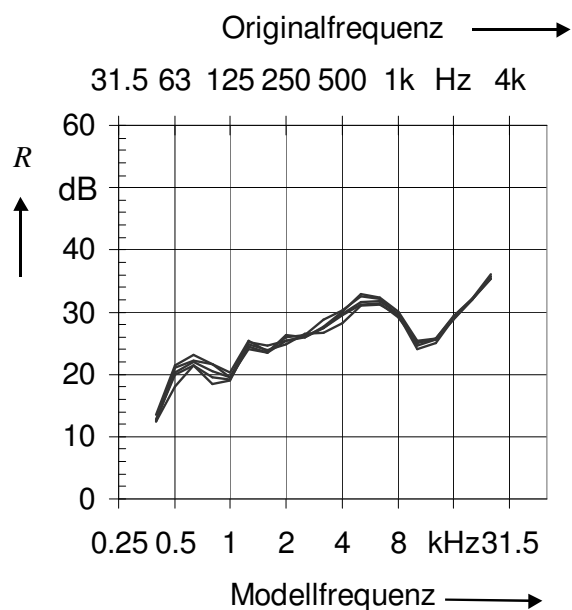


Bild 18 Wiederholungsmessungen für die Hartfaserplatte 5

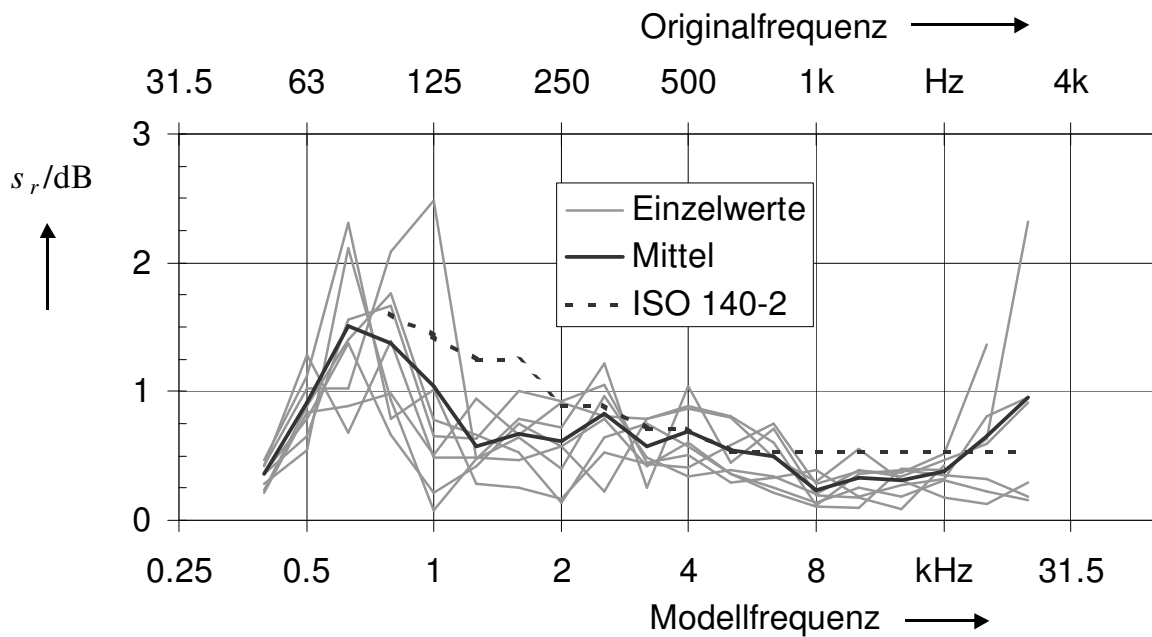


Bild 19 Wiederholstandardabweichungen der einzelnen Messungen sowie Mittelwert und Richtwert aus [ISO 140-2]

4.5. Ergebnisse an unterschiedlich großen Platten

Zu deutlich größeren Unterschieden in der Schalldämmung kommt es bei Verwendung unterschiedlicher Plattengrößen (Bild 20 – Bild 23). Unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz treten bei den biegesteifen Materialien regellose Schwankungen auf, die durch die Lage von Raum- und Plattenmoden zueinander bedingt sind. Bei den höheren Frequenzen kommt es hingegen zu einer systematischen Parallelverschiebung der Schalldämmung. Mit zunehmender Plattengröße steigt die Schalldämmung an. Dieser systematische Effekt wird auch in den Einzelwerten deutlich (Bild 24 – Bild 26), die einen Zuwachs von bis zu 3 dB bei einer Vervielfachung der Plattenfläche aufweisen.

Die Hartfaserplatte zeigt demgegenüber ein etwas anderes Verhalten (Bild 23). Die Streuungen bei den tiefen Frequenzen sind wesentlich geringer, da hier deutlich mehr Moden in den Terzen enthalten sind. Eine Verschiebung auf der Frequenzachse durch Vergrößerung der Platte hat somit nur geringe Auswirkungen. Auch die Zunahme der Schalldämmung mit der Plattengröße bei hohen Frequenzen ist nur gering ausgeprägt. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in der Bedämpfung der Platte durch die Einspannung, die bei der leichten Hartfaserplatte wesentlich effektiver ist als bei den schwereren Materialien.

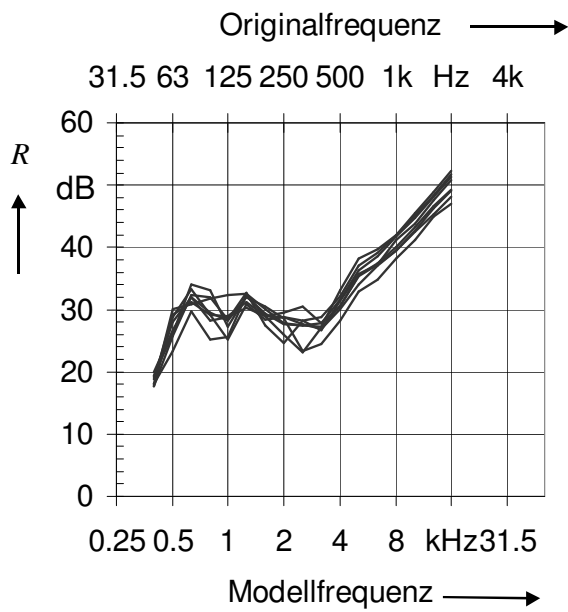


Bild 20 Schalldämmung verschieden großer Gipskartonplatten

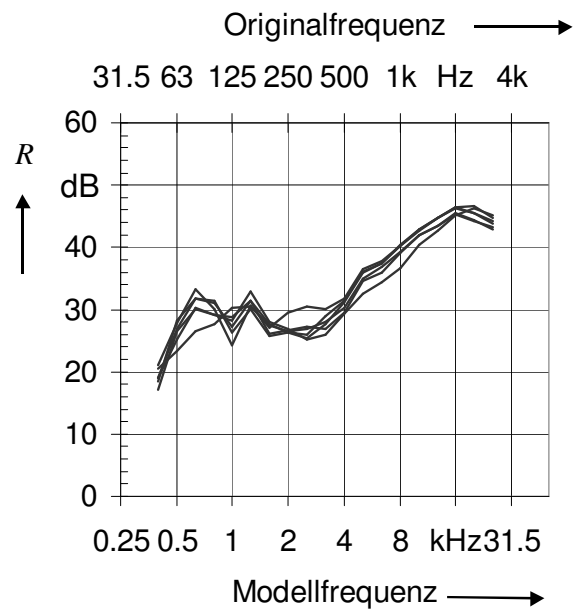


Bild 21 Schalldämmung verschieden großer Spanplatten

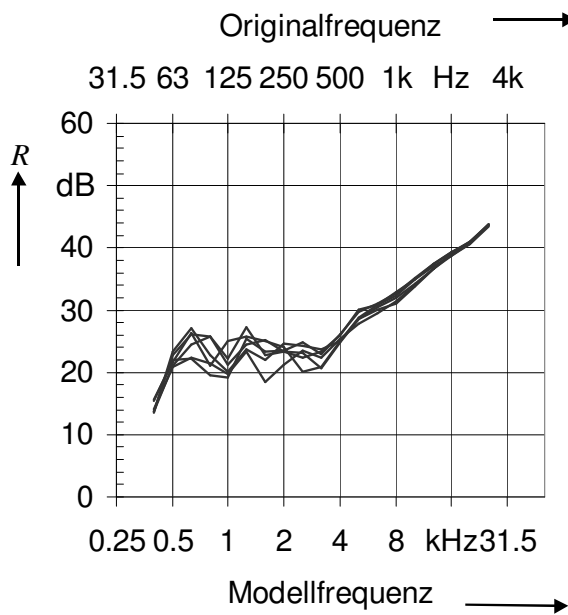


Bild 22 Schalldämmung verschieden großer Sperrholzplatten

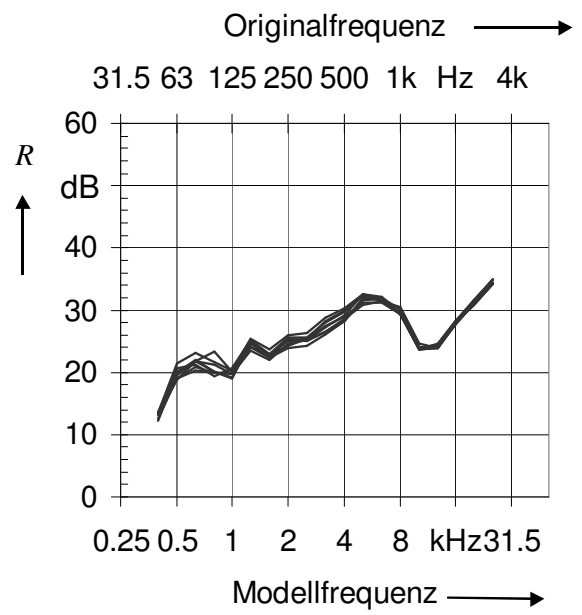


Bild 23 Schalldämmung verschieden großer Hartfaserplatten

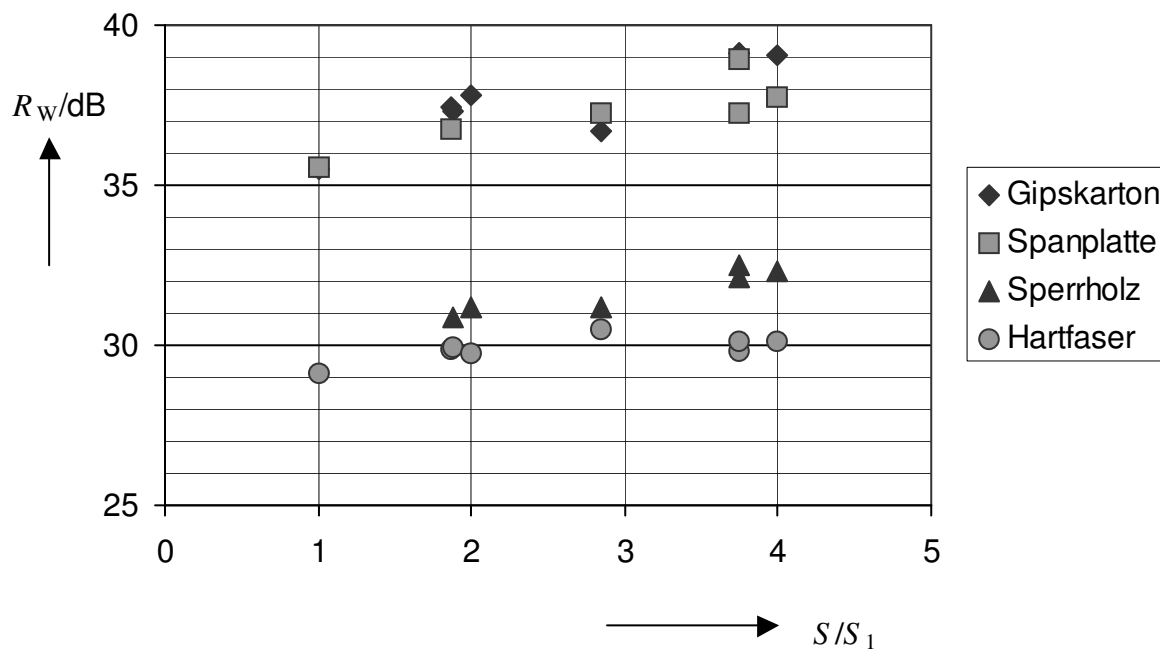


Bild 24 Bewertetes Schalldämm-Maß als Funktion von der Plattengröße

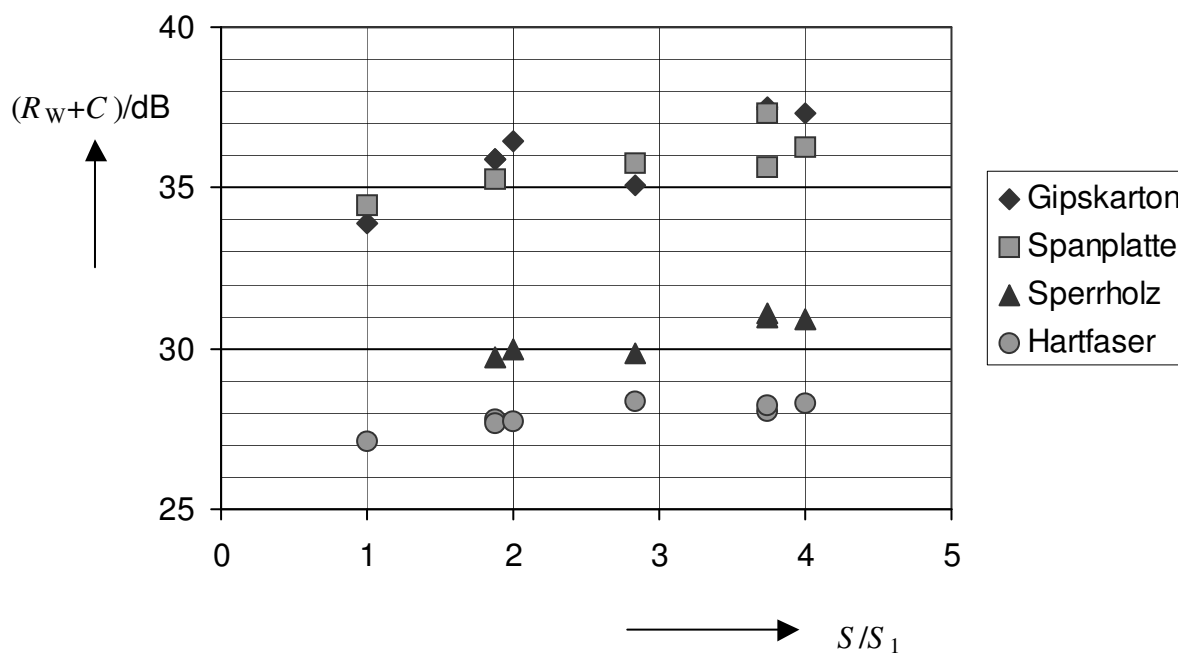


Bild 25 Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswert C als Funktion von der Plattengröße

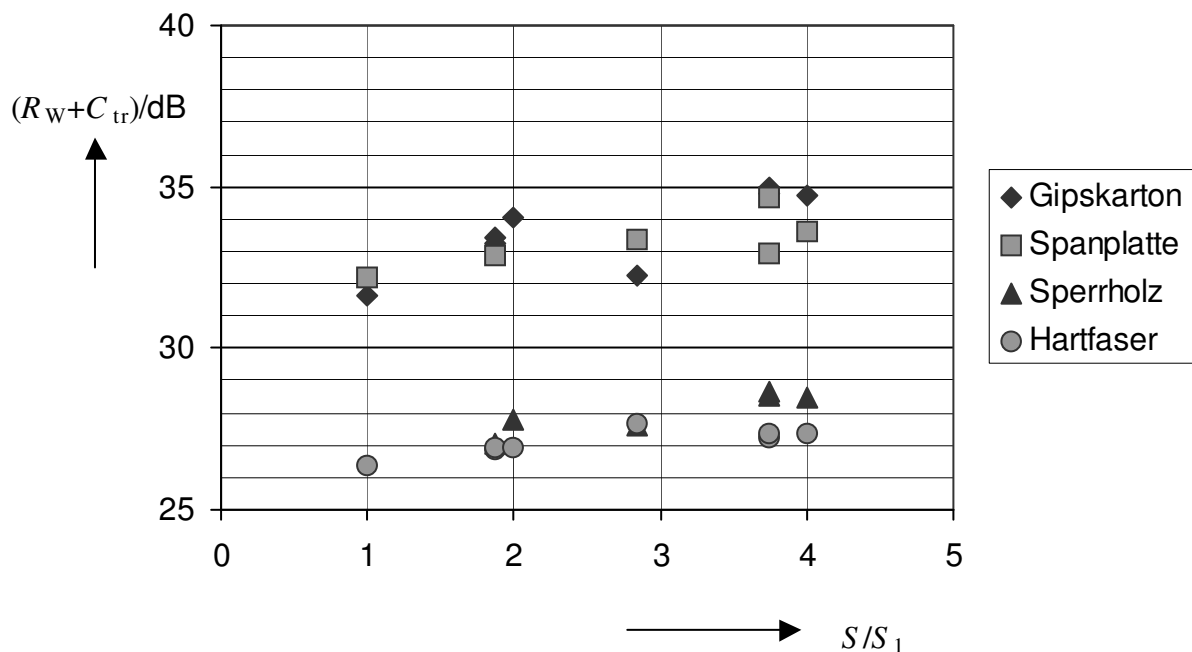


Bild 26 Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswert C_{tr} als Funktion von der Plattengröße

4.6. Auswertungen

4.6.1. Abhängigkeit der Schalldämmung von der Plattengröße

Die offenkundige Zunahme der Schalldämmung mit der Plattengröße führte zu dem empirischen Ansatz für die Schalldämmung

$$R_l = R_1 + B \lg \left(\frac{S_l}{S_1} \right) \text{dB} . \quad (5)$$

Hierbei ist R_1 die Schalldämmung der kleinsten Platte, R_l die Schalldämmung der Platte l und S_1 bzw. S_l bezeichnet den jeweils zugehörigen Flächeninhalt. Durch eine logarithmische Regression wurden die Faktoren B ermittelt, die die Zunahme der Schalldämmung mit dem Flächeninhalt charakterisieren. Es zeigte sich, dass nur oberhalb der jeweiligen Koinzidenzgrenzfrequenzen Bestimmtheitsmaße von größer als 0,5 erreicht werden [Jüt05], d.h. nur für diesen Bereich führt der Ansatz (5) zu einem im statistischen Sinne sinnvollen Ergebnis. Die auf diese Weise ermittelten Faktoren B liegen für die verschiedenen Plattenmaterialien zwischen 0 und 9 (Bild 27).

Mit der so ermittelten Abhängigkeit der Schalldämmung von der Plattengröße wurden nun alle Schalldämmungen oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz auf die Schalldämmung der jeweiligen Platte 1 gemäß Gl. (5) umgerechnet. Erwartungsgemäß fallen die Schalldämm-Kurven dann oberhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz übereinander (Bild 28 – Bild 31). Auch die Einzahlwerte zeigen dann keine systematische Abhängigkeit mehr von der Plattenfläche (Bild 32 – Bild 34).

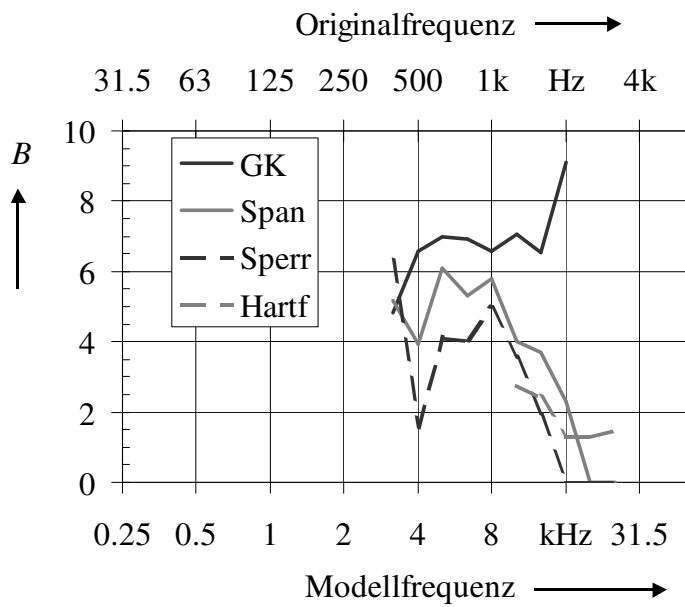


Bild 27 Empirische Vorfaktoren, die den Zusammenhang zwischen Schalldämmung und Plattengröße beschreiben

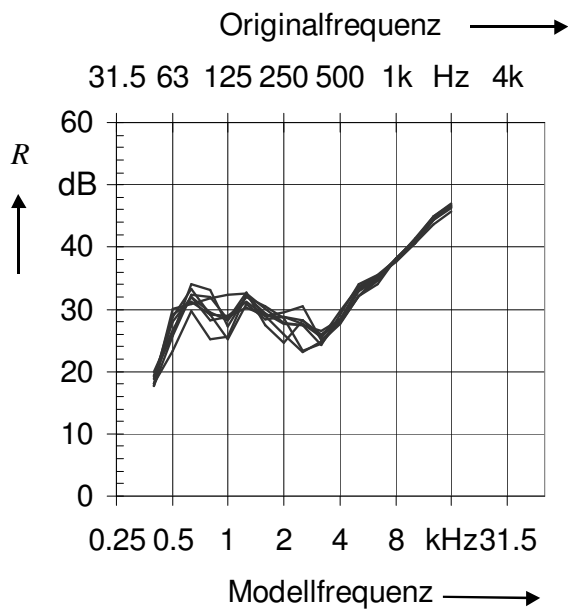


Bild 28 Auf Plattengröße normierte Schalldämmung, Gipskarton

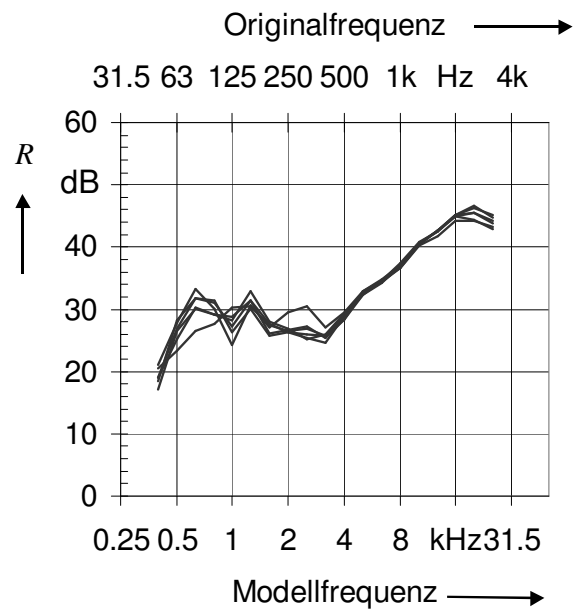


Bild 29 Auf Plattengröße normierte Schalldämmung, Spanplatte

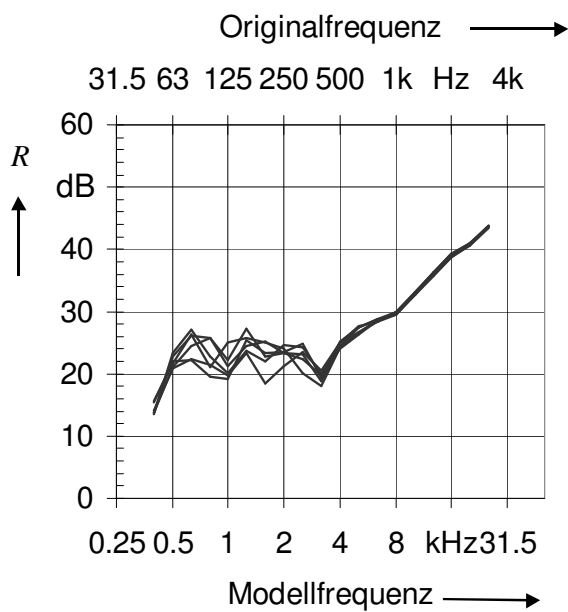


Bild 30 Auf Plattengröße normierte Schalldämmung, Sperrholz

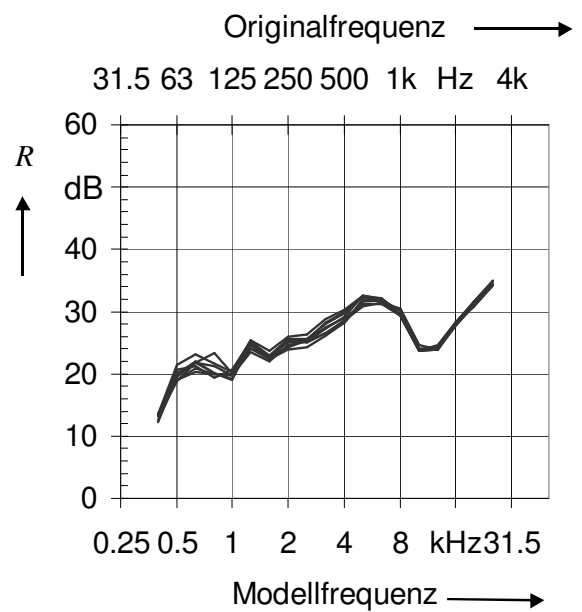


Bild 31 Auf Plattengröße normierte Schalldämmung, Hartfaser

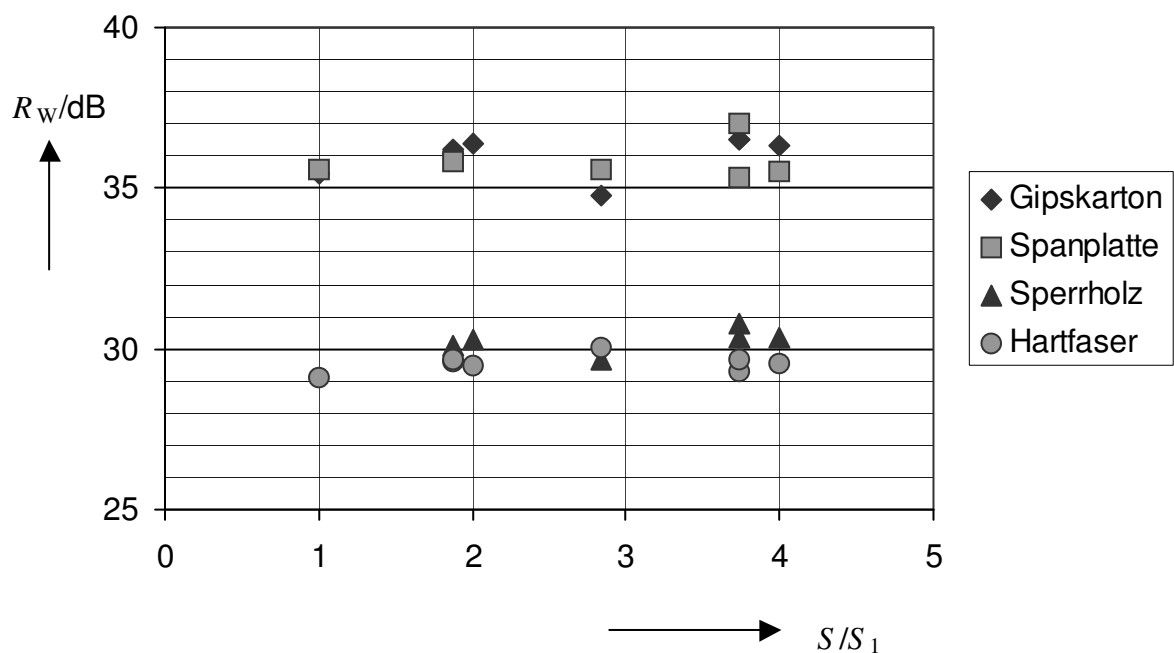


Bild 32 Bewertetes Schalldämm-Maß für normierte Schalldämm-Kurven

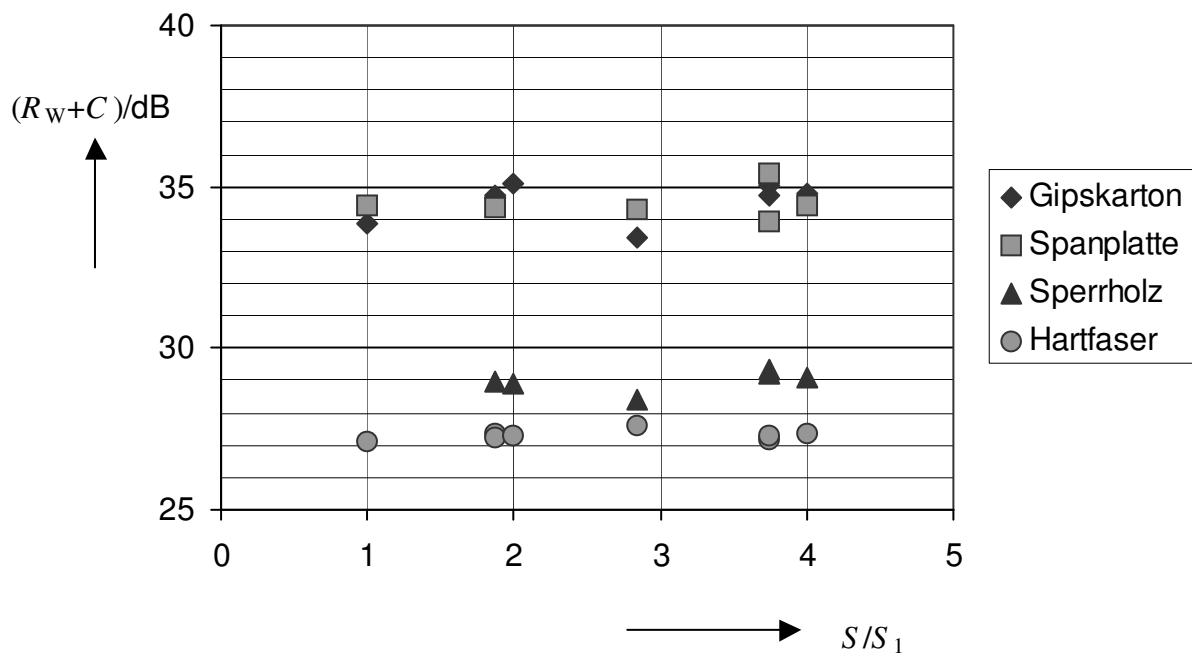


Bild 33 Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswert C für normierte Schalldämm-Kurven

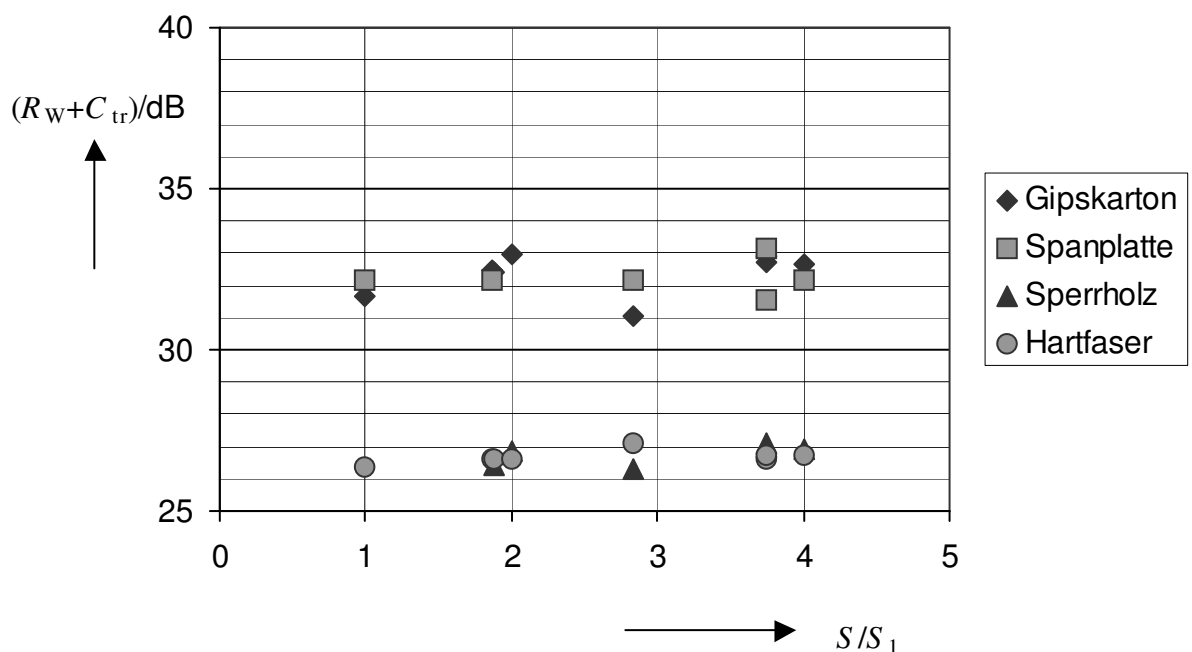


Bild 34 Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß und Spektrum-Anpassungswert C_{tr} für normierte Schalldämm-Kurven

Interessant ist nun, eine physikalische Erklärung für die beobachtete Zunahme der Schalldämmung mit der Plattengröße zu finden. Die naheliegende Vermutung ist hierbei, dass der beschallte Teil des Prüfobjekts durch den äußeren Plattenteil bedämpft wird. Gemäß [DIN EN 12354-1], Anhang B gilt

$$R_l = R_1 + 10 \lg \frac{\eta_l}{\eta_1} \text{ dB}, \quad (6)$$

mit den Verlustfaktoren η der jeweiligen Platte. Im Falle der kleinsten Platte können keine Energieabflüsse in den äußeren Teil der Platte erfolgen. Für den angeregten Teil der Platte l ergeben sich zusätzliche Verluste $\eta_{\text{Rand},l}$ gegenüber der Platte 1

$$\begin{aligned} R_l &= R_1 + 10 \lg \frac{\eta_1 + \eta_{\text{rand},l}}{\eta_1} \text{ dB} \\ &= R_1 + 10 \lg \left(1 + \frac{\eta_{\text{rand},l}}{\eta_1} \right) \text{ dB} \end{aligned} \quad (7)$$

Aus den gemessenen Differenzen im Schalldämmmaß lässt sich damit das Verhältnis aus Energieabflüssen über die Ränder und anderen Dämpfungseinflüssen abschätzen:

$$\frac{\eta_{\text{rand},l}}{\eta_1} = 10^{(R_l - R_1)/10 \text{ dB}} - 1 \quad (8)$$

Wegen der Streuung der Daten erscheint es sinnvoll, die empirisch ermittelten Gleichungen

$$R_l = R_1 + B \lg \left(\frac{S_l}{S_1} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

zu verwenden, so dass sich

$$\frac{\eta_{\text{rand},l}}{\eta_1} = 10^{\frac{B}{10} \lg \frac{S_l}{S_1}} - 1 \quad (10)$$

ergibt. Für die größte verwendete Platte ($l = 8$) liegt dieses Verhältnis bei mittleren Frequenzen bei ca. 1 (Bild 35), d.h. es fließt genau so viel Energie über die Ränder, wie in der Platte 1 selbst durch Abstrahlung und innere Verluste dissipiert wird.

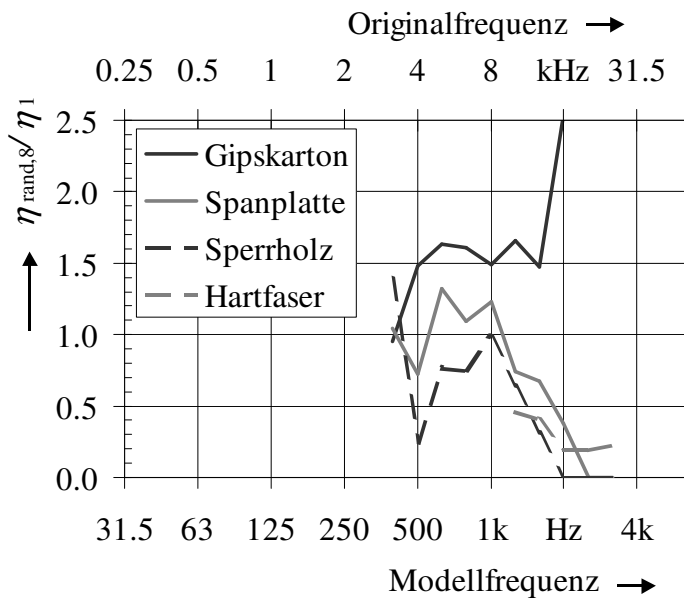


Bild 35 Verhältnis von Randverlusten zu ursprünglich vorhandenen Verlusten für die größte Platte (Gl. (10), $S_8/S_1 = 4$)

4.6.2. Unsicherheit aufgrund unterschiedlicher Prüflingsgrößen

Aus den gemäß Gl. (5) normierten Schalldämmungen wurde nun die Standardabweichung für jedes Material ermittelt. In dieser Standardabweichung sind alle Effekte enthalten, durch die sich die Messungen unterscheiden, weshalb sie hier als Gesamt-Standardabweichung bezeichnet wird.

Die Gesamt-Standardabweichung für die Hartfaserplatte liegt im untersuchten Frequenzbereich in der Größenordnung der Wiederhol-Standardabweichung (Bild 36). Durch die verschiedenen Plattengrößen werden somit keine nennenswerten Unsicherheitskomponenten hinzugefügt.

Ganz anders verhalten sich die biegesteifen Prüflinge (Bild 36). Unterhalb der Koinzidenz liegt die Gesamt-Standardabweichung erheblich über der Wiederhol-Standardabweichung. Hierbei kommt es zu großen Schwankungen zwischen den Materialien, die jedoch eher regellos sind und durch die zufällige Überlagerung von Raum- und Körperschallmoden verursacht werden. Eine Mittelung der Standardabweichung über die drei Materialien ist daher angebracht. Bei hohen Frequenzen nimmt die Gesamt-Standardabweichung hingegen auch bei den biegesteifen Materialien den Wert der Wiederhol-Standardabweichung an.

Die saubere Unterscheidung zwischen Wiederhol- und Gesamt-Standardabweichung bietet nun die Möglichkeit, eine Differenz-Standardabweichung zu ermitteln, die nur die Einflüsse durch unterschiedliche Lage der Körperschallmoden bei gleichen Luftschallfeldern beschreibt. Sie ergibt sich aus

$$s_{\text{Moden}} = \sqrt{s_{\text{ges}}^2 - s_r^2} \quad (11)$$

und liegt bei Werten zwischen 1 und 2 dB (Bild 37). Dieser Wert bezeichnet demnach eine Unsicherheit, die bei biegesteifen Materialien durch eine unzureichende Zahl

von Körperschallmoden bei Frequenzen unterhalb der Konizidengrenzfrequenz verursacht wird.

Von Interesse ist nun außerdem, wie sich diese Streuungen auf den Einzahlwert auswirken. Die Auswertung erfolgte hierfür analog zur Auswertung der spektralen Ergebnisse. Es wurde also die Gesamt-, Wiederhol- und Moden-Standardabweichung berechnet, wobei für die Auswertung die um den Flächeneinfluss korrigierten Schalldämmungen verwendet wurden. Die Moden-Standardabweichung liegt für den Einzahlwert bei maximal 0,5 dB (Bild 38 – Bild 40). Für die Hartfaserplatte wie auch z.T. für die Sperrholzplatte konnte diese Rechnung nicht ausgeführt werden, da Gesamt- und Wiederhol-Standardabweichungen in der gleichen Größenordnung liegen. Dass Moden-Standardabweichungen von 1-2 dB für die Terzwerte nur einer Moden-Standardabweichung von 0,5 dB für den Einzahlwert entsprechen, ist begründet durch die geringe Korrelation zwischen den Terzwerten, die schon in (Bild 28 – Bild 31) deutlich wird. Wenn dort eine Kurve bei einer Frequenz über den anderen liegt, so nimmt sie bei benachbarten Frequenzen mit hoher Wahrscheinlichkeit kein Maximum an, so dass sich im Mittel über alle Frequenzen eine recht gute Kompensation des modalen Effekts ergibt.

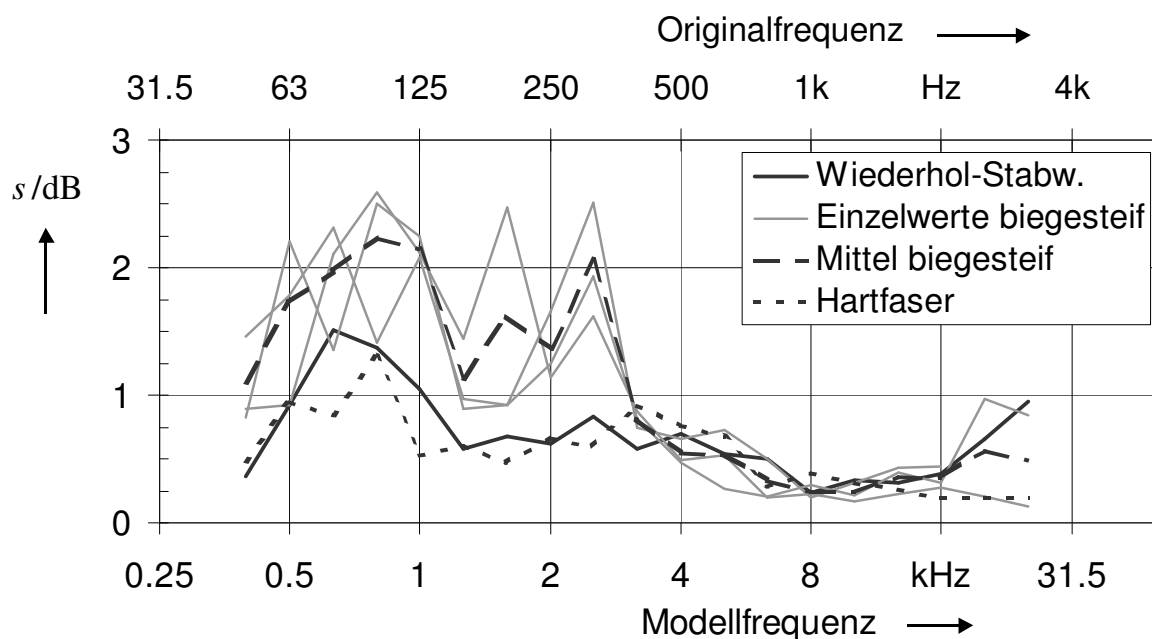


Bild 36 Gesamt-Standardabweichungen der normierten Schalldämmung im Vergleich zur Wiederhol-Standardabweichung

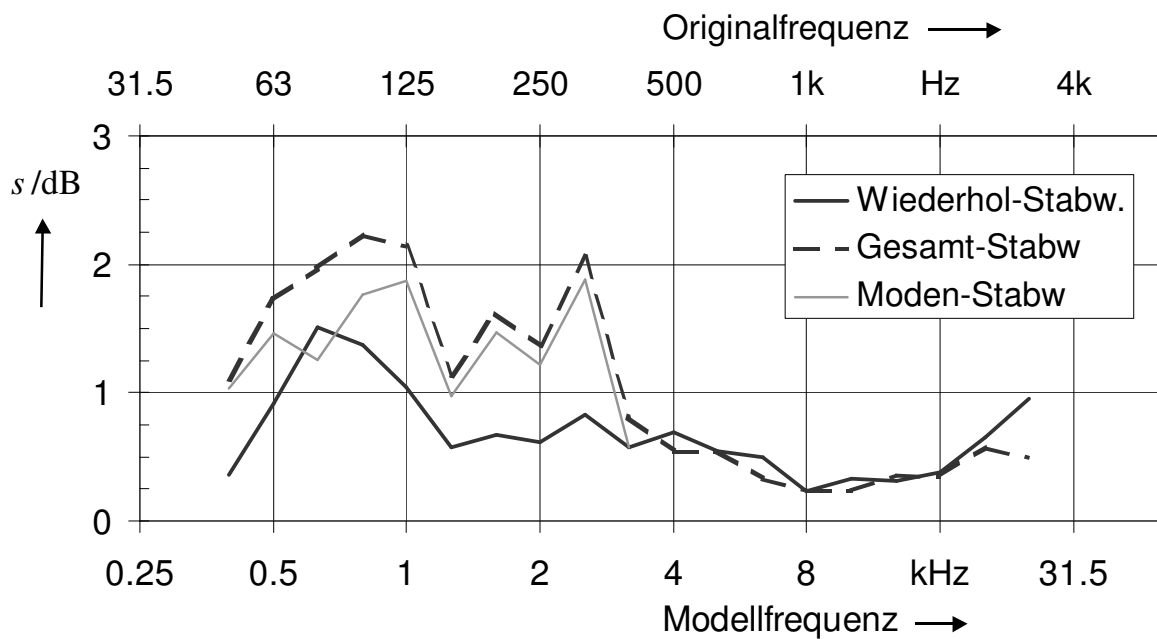


Bild 37 Gesamt-, Wiederhol- und Moden-Standardabweichungen der normierten Schalldämmung für die biegesteifen Materialien

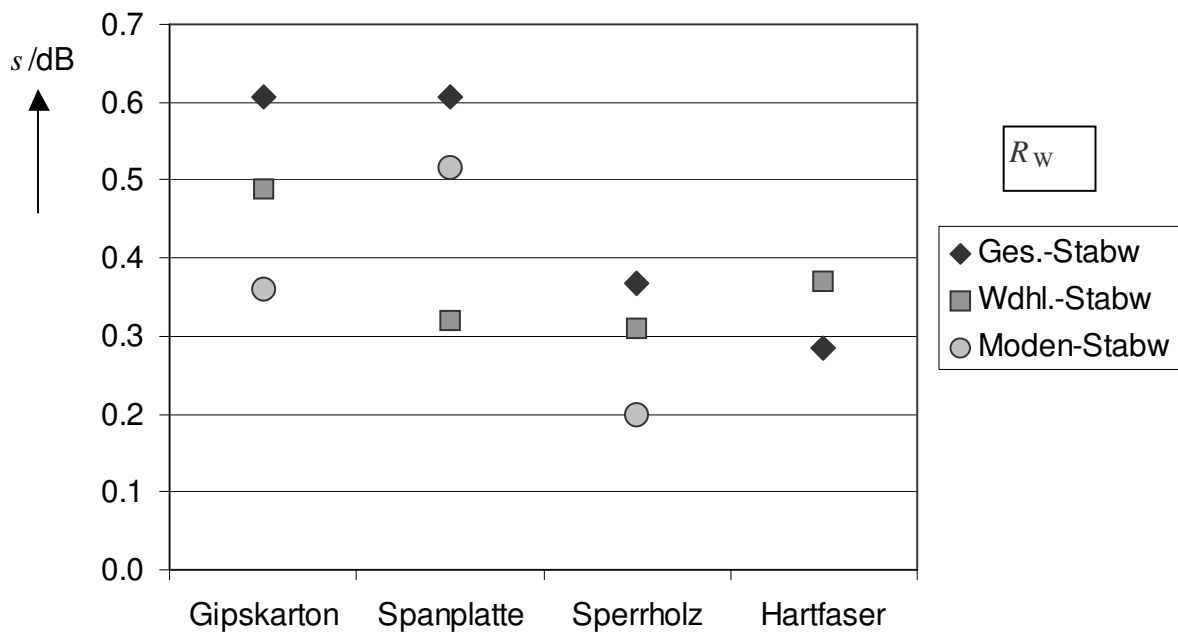


Bild 38 Gesamt-, Wiederhol- und Moden-Standardabweichungen für das bewertete Schalldämm-Maß

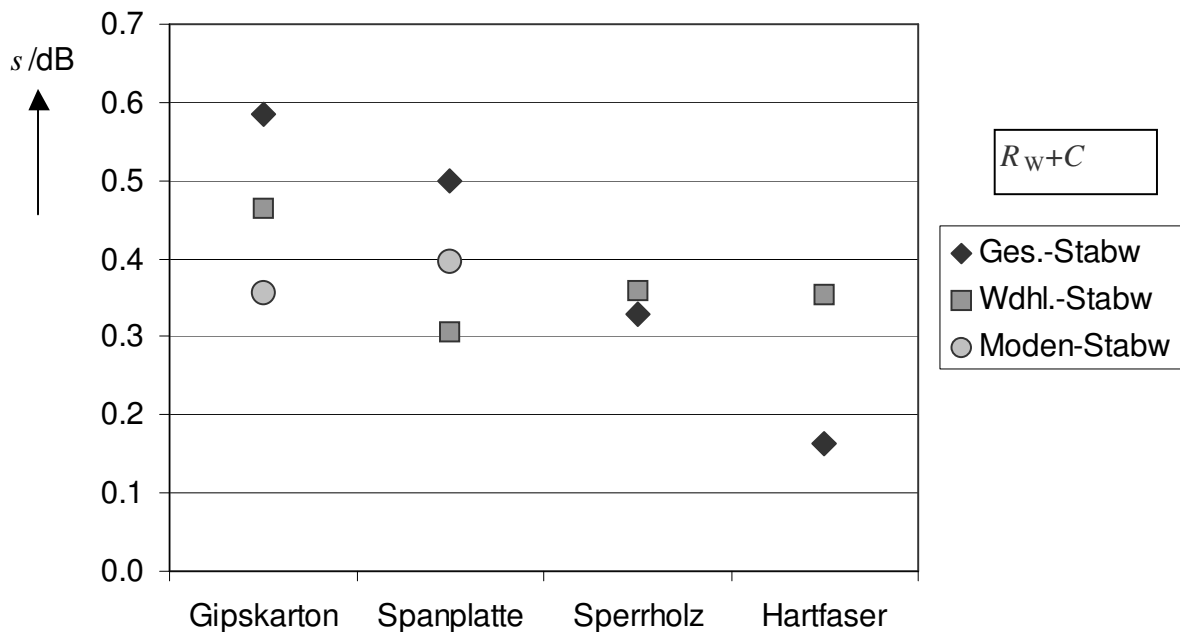


Bild 39 Gesamt-, Wiederhol- und Moden-Standardabweichungen für die Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß und Spektrumanpassungswert C

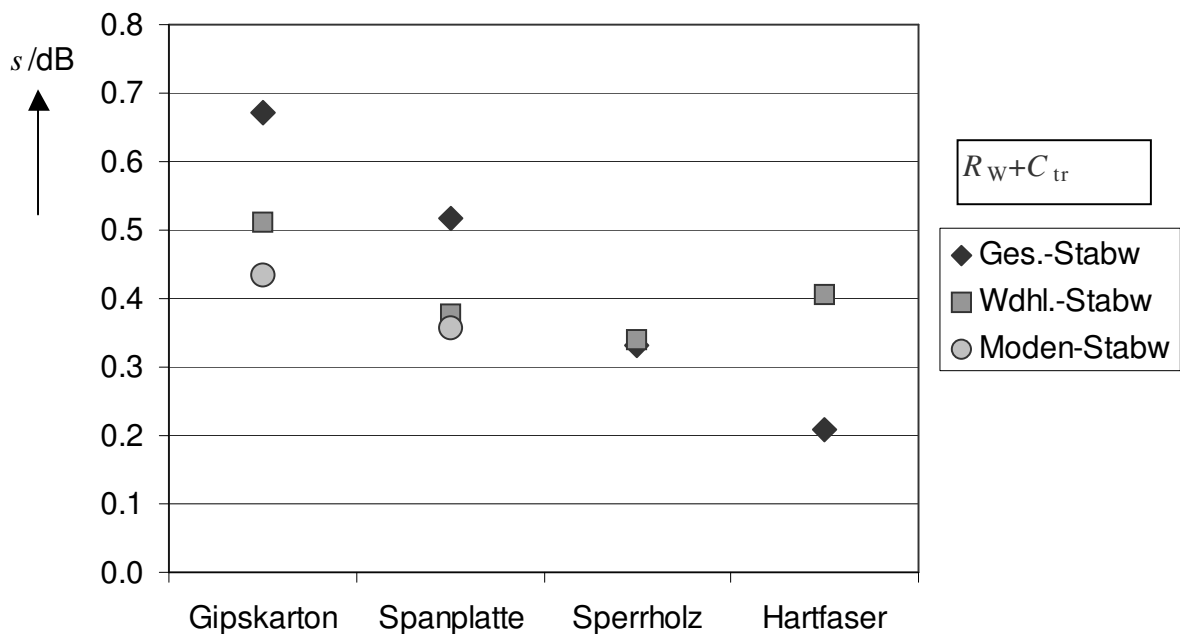


Bild 40 Gesamt-, Wiederhol- und Modenunsicherheiten für die Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß und Spektrumanpassungswert C_{tr}

5. Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Raumgrößen

5.1 Konzeption der Untersuchungen

Nachdem in Kapitel 4 das Körperschallfeld auf dem Prüfling allein variiert wurde, sollen nun verschiedene Raumabmessungen und damit Luftschallfelder verwendet werden. Hier interessiert vor allem, ob es wesentliche Unterschiede gibt, wenn der Prüfling zwischen zwei gleich großen Räumen – wie am Bau häufig anzutreffen – oder zwischen zwei unterschiedlich großen Räumen – wie in Prüfständen vorgeschrieben – eingebaut wird. Die Modellmesstechnik ermöglicht hierbei die Verwendung des identischen Prüflings bei Variation der Raumtiefe (Bild 41). Für die Untersuchungen wurden je sechs verschiedene Labor- und Bausituationen festgelegt (Tabelle 4, Tabelle 5), wobei für die Bausituationen auch eine hallige Situation sowie zwei Situationen mit verschieden großen Räumen verwendet wurden. Auch diese Untersuchungen wurden im Rahmen einer Diplomarbeit [So06] durchgeführt und sind dort ausführlich dokumentiert.

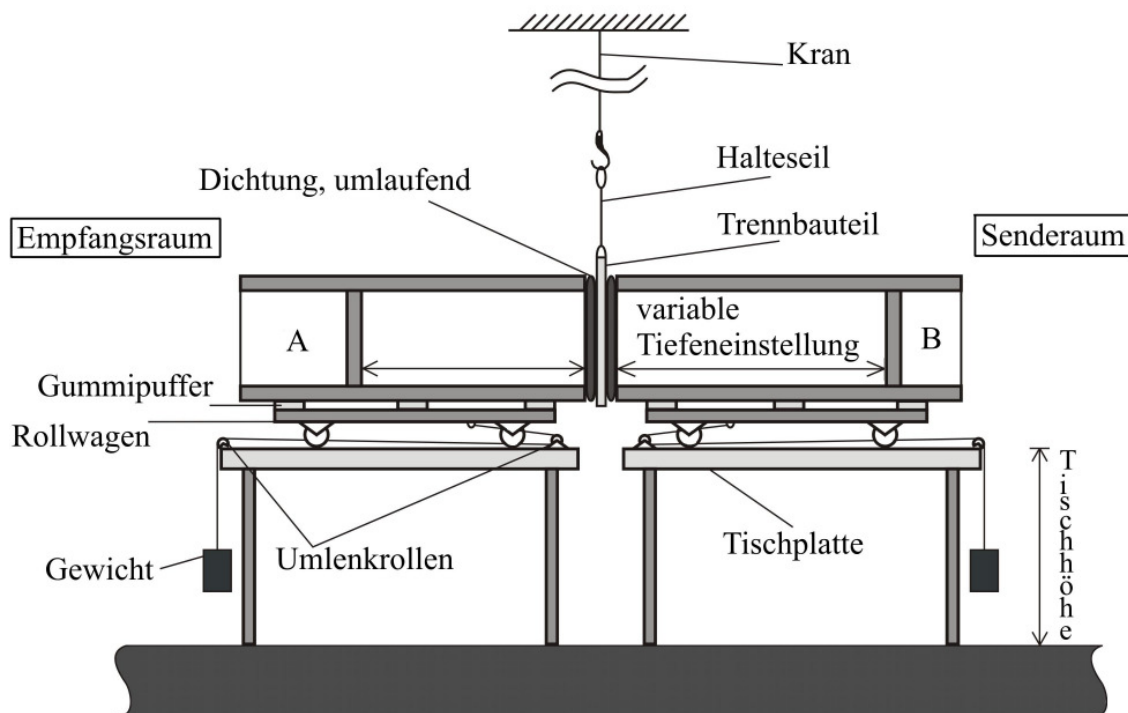


Bild 41 Versuchsaufbau mit einstellbarer Tiefe von Sende- und Empfangsraum

Tabelle 4: Prüfstandseinstellung für die Messungen an sechs Prüfstandsgeometrien

Modell- geometrie	Länge L [m] Senderraum	Länge L [m] Empfangsraum	Grundfläche im Original [m ²] (S - E)
A	0.860	0.570	24.8 zu 16.4
B	0.929	0.833	26.8 zu 24.0
C	0.633	0.570	18.2 zu 16.4
D	0.926	0.570	26.7 zu 16.4
E	0.780	0.702	22.5 zu 20.2
F	0.853	0.636	24.6 zu 18.3

Tabelle 5: Prüfstandseinstellung für die Messungen an sechs Baugeometrien

Modell- geometrie	Länge L [m] Senderraum	Länge L [m] Empfangsraum	Bedämpfung	Grundfläche im Original [m ²] (S - E)
A	0.490	0.490	hallig	14.0 zu 14.0
B	0.684	0.684	trocken	19.7 zu 19.7
C	0.626	0.626	trocken	18.0 zu 18.0
D	0.869	0.869	trocken	25.0 zu 25.0
E	0.766	0.626	trocken	22.0 zu 18.0
F	0.869	0.766	trocken	25.0 zu 22.0

5.2 Gemessene Nachhallzeiten

Die Nachhallzeiten in den Sende- und Empfangsräumen wurden auf unter 0,3 s eingestellt (Bild 42). Zu höheren Frequenzen fallen die Nachhallzeiten deutlich ab, was zum Einen durch die erhöhte Luftabsorption, aber auch durch die Absorption der verwendeten Materialien bedingt ist. Diese Nachhallzeiten im Modell entsprechen in der Realität Nachhallzeiten zwischen ca. 2,4 s bei tiefen Frequenzen und 0,5 s bei hohen Frequenzen. Dieser Bereich ist somit realistisch für übliche Situationen im Labor und am Bau. Wesentlich größer sind die Nachhallzeiten lediglich in einer unbedämpften Bausituation (Situation A, Tabelle 5). Die Modell-Nachhallzeiten liegen hier zwischen 0,7 und 0,06 s, was im Original Rohbausituationen bzw. Badezimmern mit Nachhallzeiten zwischen 6 und 0,5 s entspricht.

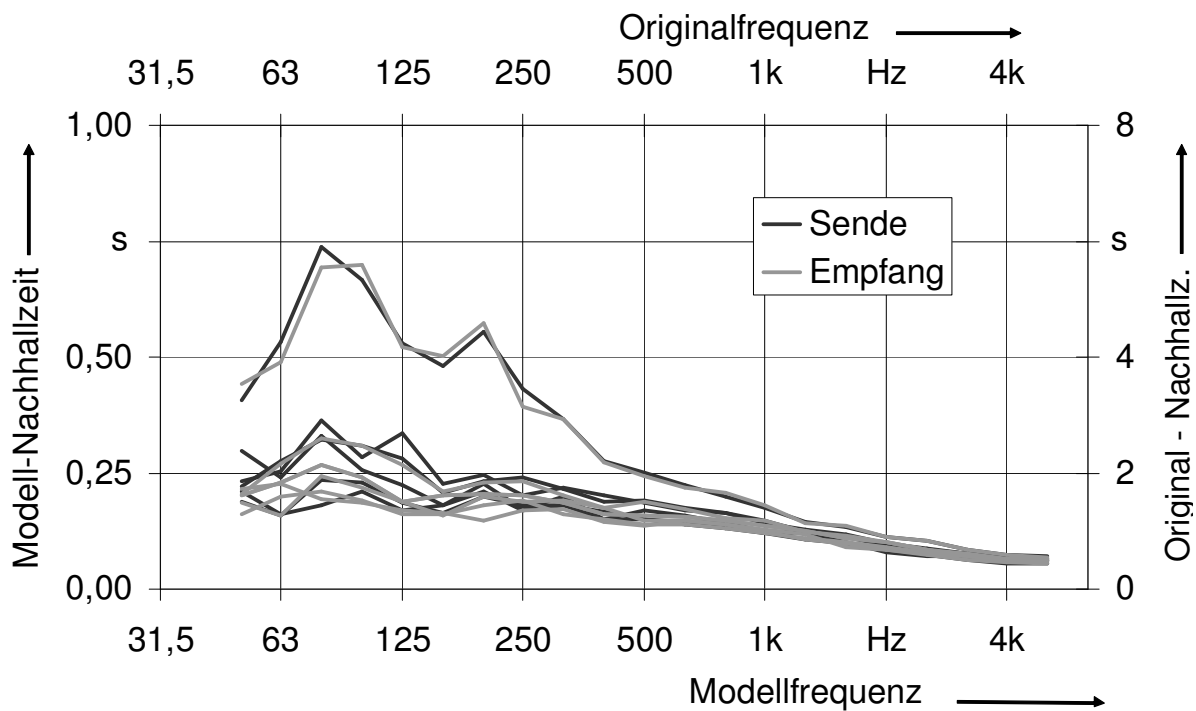


Bild 42: Nachhallzeiten der Bauelemente A-F im Sende- und Empfangsraum

5.3 Ergebnisse der Wiederholungsmessungen

Zur Absicherung der Ergebnisse wurden in einer Situation sechs Wiederholungsmessungen der Schalldämmung an der Gipsfaserplatte durchgeführt (Bild 43). Die daraus berechneten Wiederholstandardabweichungen liegen im Bereich der nach [ISO 140-2] zu erwartenden Werte und entsprechen in etwa den in Kapitel 4 ermittelten (Bild 44). Damit können die gemessenen Schalldämmungen als ausreichend wiederholbar eingestuft werden.

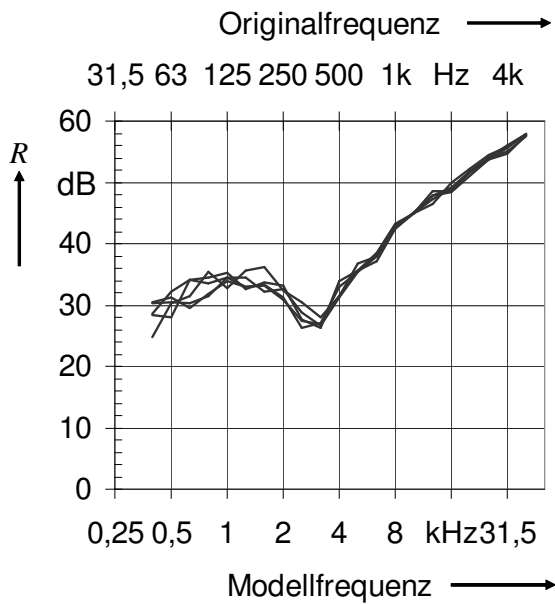


Bild 43 Wiederholungsmessungen an der Gipsfaserplatte

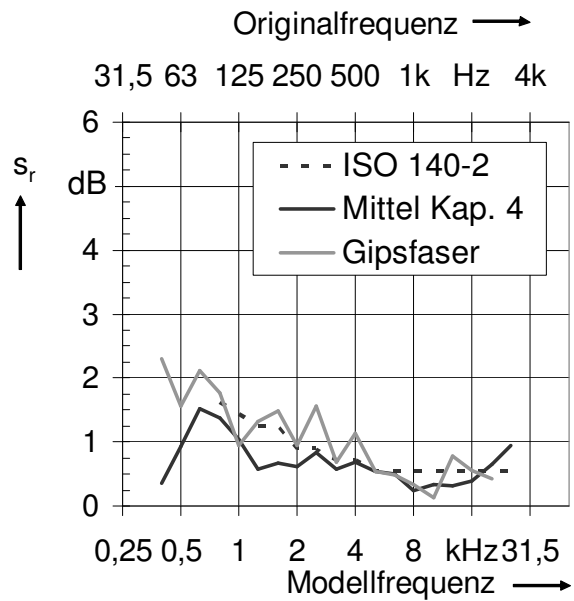


Bild 44 Wiederhol-Standardabweichungen an der Gipsfaserplatte sowie Mittelwert aus Kapitel 4 und Richtwert aus [ISO 140-2]

5.4 Ergebnisse in unterschiedlichen Raumgeometrien

Die Schalldämmung der Hartfaser- als auch der Gipsfaserplatte wurde anschließend in den verschiedenen Geometrien ermittelt. Hierbei kommt es zu einer Streuung der Messergebnisse, die wesentlich über der Wiederhol-Standardabweichung liegt (Bild 45 - Bild 48). Erwartungsgemäß ist die Streuung bei tiefen Frequenzen besonders groß und fällt zu höheren Frequenzen ab. Direkt sichtbar ist des Weiteren, dass die Streuungen in den Baugeometrien wesentlich größer ausfallen als in den Prüfstandsgeometrien. Damit wird deutlich, dass die wesentlichen Normvorgaben einer ausreichenden Bedämpfung sowie verschiedener Volumina im Send- und Empfangsraum tatsächlich die Streuung der gemessenen Schalldämmungen am selben Prüfling reduziert. Damit ist bezüglich der auftretenden Streuungen deutlich zwischen Labor-Schalldämmungen und Schalldämmungen am Bau zu unterscheiden, wobei für viele Anwendungen nur die Streuung am Bau interessiert.

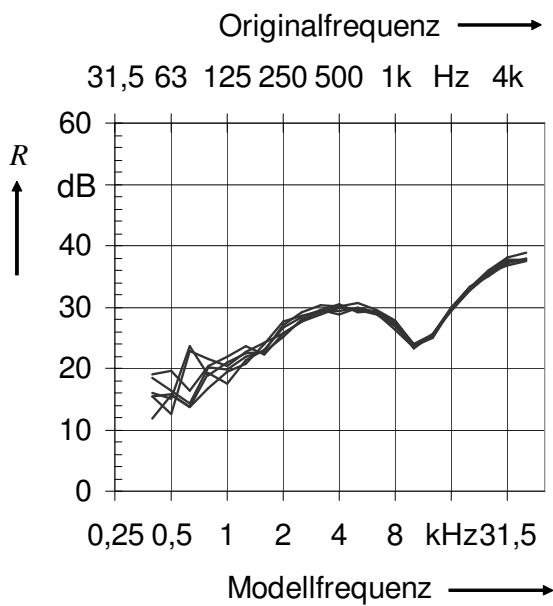


Bild 45 Schalldämmung der Hartfaserplatte in Prüfständen

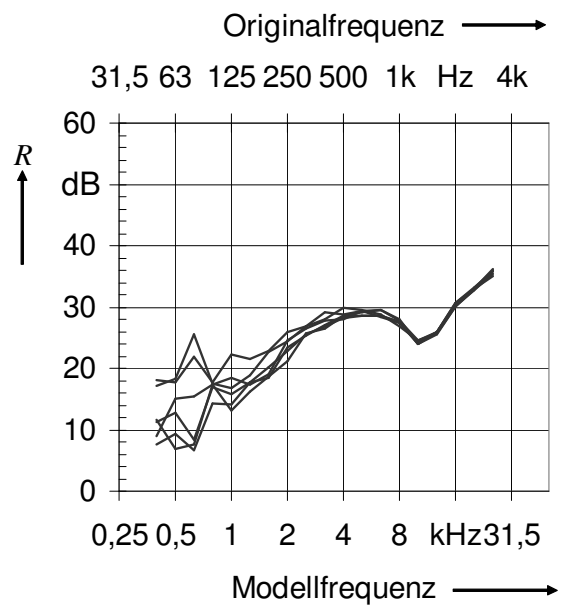


Bild 46 Schalldämmung der Hartfaserplatte am Bau

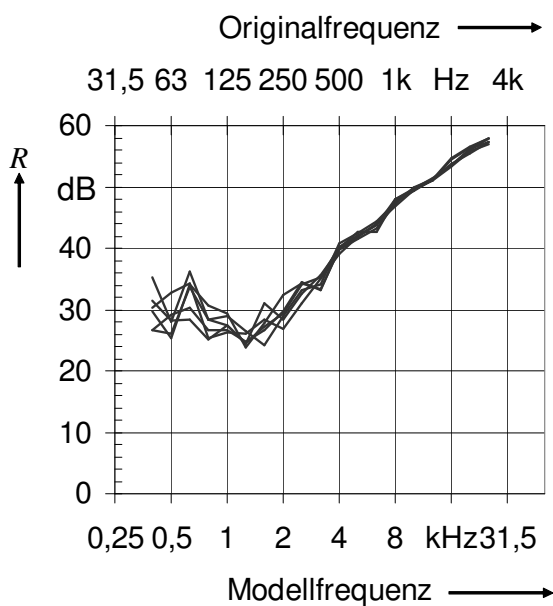


Bild 47 Schalldämmung der Gipsfaserplatte in Prüfständen

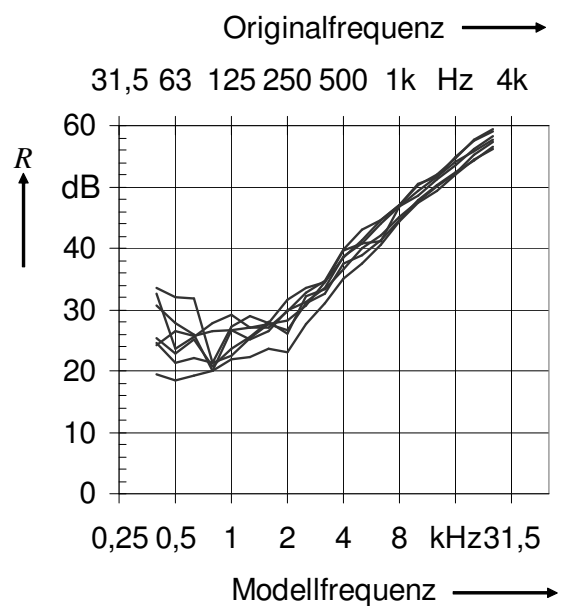


Bild 48 Schalldämmung der Gipsfaserplatte am Bau

5.5 Auswertungen

Werden nun aus den einzelnen Messergebnissen Mittelwerte der Schalldämmung am Bau und im Labor berechnet, so ergibt sich ein eindeutiger Trend (Bild 49, Bild 50). Die im Labor gemessenen Schalldämmungen werden am Bau nicht erreicht. Dieser Effekt ist bei tiefen Frequenzen stark ausgeprägt und nimmt zu höheren Frequenzen ab. Die Unterschiede in den mittleren Schalldämmungen betragen bis zu ca. 4 dB.

Interessant ist auch ein Blick auf die Standardabweichungen der am Bau und im Labor gemessenen Schalldämmungen (Bild 51, Bild 52). Es zeigt sich hier, dass die Schalldämmungen am Bau eine wesentlich größere Streuung aufweisen, als im Labor. Dass die beobachteten Standardabweichungen häufig unter der Vergleichs-Standardabweichung aus [ISO 140-2] liegen, ist auf die Verwendung der selben Messkette und auf weitere nicht variierte Größen zurückzuführen. Die im Experiment vorliegende Standardabweichung umfasst also nur einen Teil all jener Unsicherheitsbeiträge, die mit der Vergleichs-Standardabweichung erfasst werden.

Für die DIN 4109 ist vor allem das bewertete Schalldämm-Maß R_W von Interesse. Hier zeigen sich bei der Hartfaserplatte, die ein leichtes homogenes Bauteil repräsentiert, weder beim Mittelwert noch bei der Streuung nennenswerte Unterschiede zwischen Labor und Bau (Bild 53). Ursache hierfür ist das Bewertungsverfahren, bei dem in diesem Fall die tiefen Frequenzen ausgeblendet werden. Bei der Gipsfaserplatte, die ein homogenes schweres Bauteil darstellt, sind dagegen deutliche Unterschiede zwischen Bau und Labor auszumachen (Bild 53). Die Labor-Schalldämmungen sind im Mittel um ca. 1,3 dB größer als die Schalldämmungen am Bau. Die Standardabweichungen am Bau sind mit 1,6 dB wesentlich größer als die Standardabweichungen im Labor von nur 0,2 dB.

Wird als Einzahlwert dagegen $R_W + C_{tr,50-3150}$ verwendet, so werden die tiefen Frequenzen stärker in die Bewertung einbezogen (Bild 54). Es ergibt sich dann für beide Bauteile eine im Mittel um ca. 1,7 dB höhere Schalldämmung im Labor als am Bau. Die Standardabweichungen liegen am Bau mit ca. 1,8 dB wesentlich über den Laborwerten von 0,4 dB.

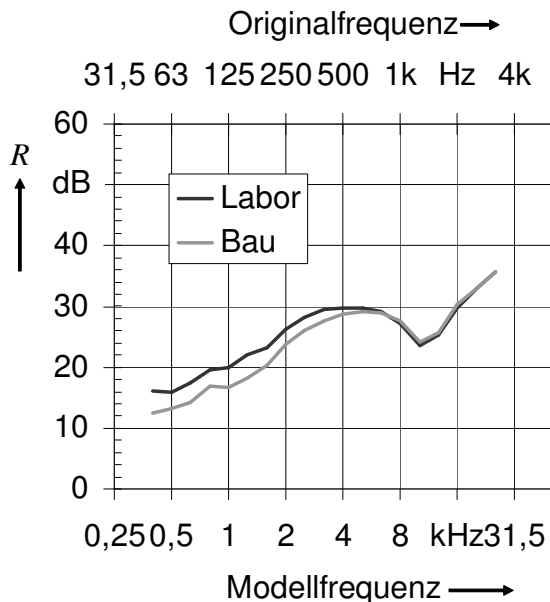


Bild 49 Schalldämmung (Mittelwerte) der Hartfaserplatte in Prüfständen und am Bau

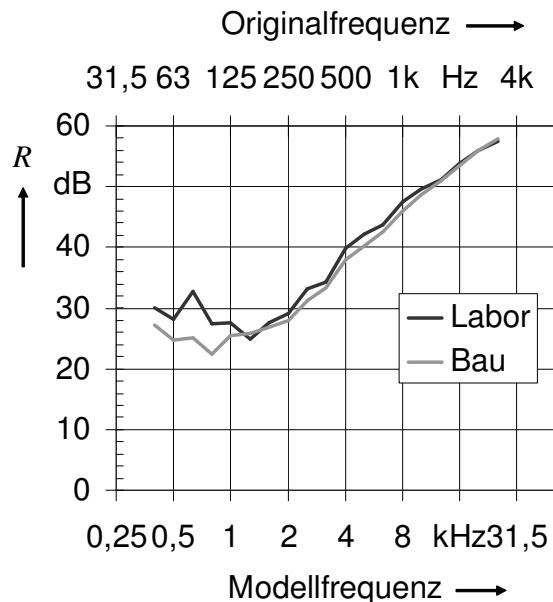


Bild 50 Schalldämmung (Mittelwerte) der Gipsfaserplatte in Prüfständen und am Bau

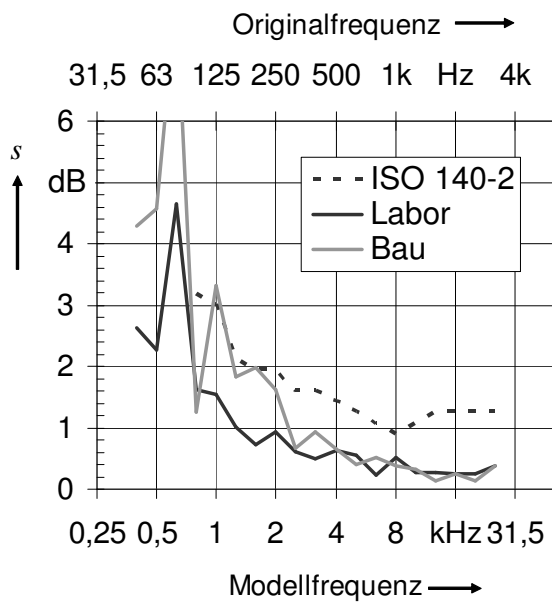


Bild 51 Standardabweichung der Schalldämmung der Hartfaserplatte in Prüfständen und am Bau und Vergleichs-Standardabweichung aus [ISO 140-2]

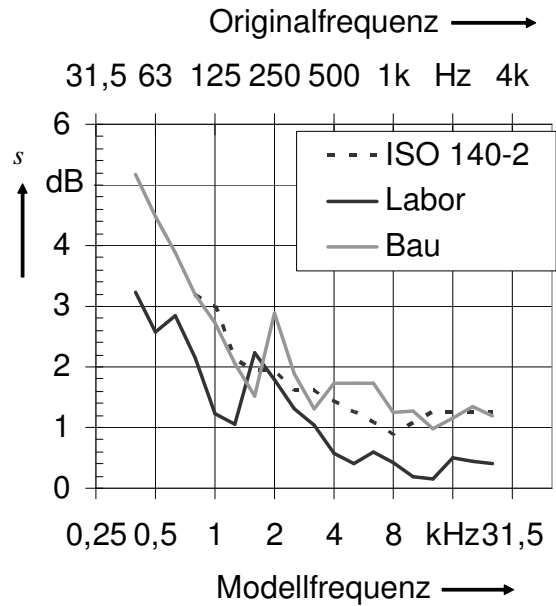


Bild 52 Standardabweichung der Schalldämmung der Gipsfaserplatte in Prüfständen am Bau und Vergleichs-Standardabweichung aus [ISO 140-2]

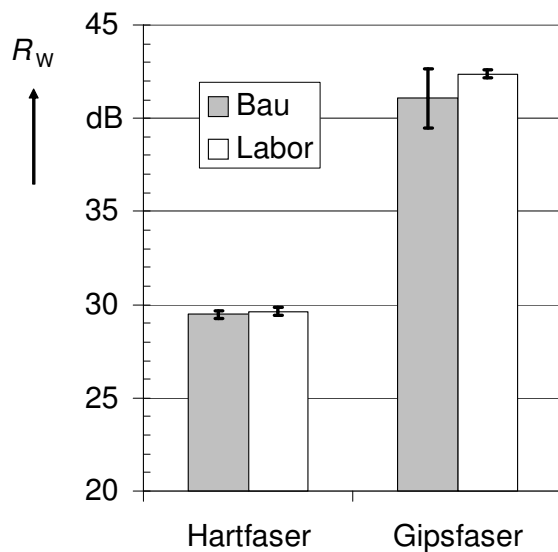


Bild 53 Bewertetes Schalldämm-Maß im Bau und im Labor

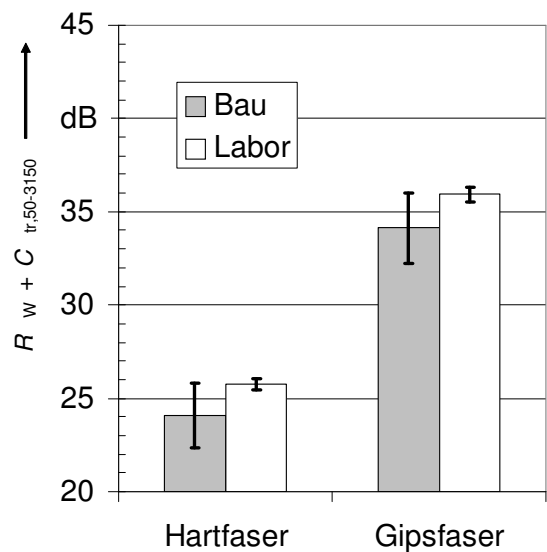


Bild 54 Summe aus bewertetem Schalldämm-Maß und $C_{tr,50-3150}$ im Bau und im Labor

6. Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Absorption und Diffusion

6.1 Motivation

Die Ergebnisse aus Kapitel 5 legen nahe, dass die Luftschalldämmung zwischen zwei gleich großen Räumen prinzipiell geringer ist als zwischen zwei unterschiedlich großen Räumen. Erzielt wurde dieses Ergebnis in leeren Räumen. In der Praxis sind jedoch die Räume üblicherweise nicht leer sondern möbliert, so dass sich die Frage stellt, welchen Einfluss die Anwesenheit von Streukörpern auf den Unterschied zwischen den Schalldämmungen zwischen gleich und unterschiedlich großen Räumen ausübt.

6.2 Durchgeführte Experimente

Für die Untersuchungen wurden die Baugeometrie B und die Laborgeometrie B aus Kapitel 5 ausgewählt (Tabelle 4, Tabelle 5). In jeder dieser Geometrien wurde die Luftschalldämmung von einer Hartfaserplatte, einer Gipsfaserplatte und einer Doppelwand aus Hartfaserplatten gemessen (Tabelle 6). Die Ständer der Doppelwand bestanden aus quadratischen Holzleisten mit 8 mm Kantenlänge, und die Wand war mit Absorbermaterial (Teichvlies) gefüllt. Dabei waren die Luftschallfelder hallig oder trocken, und es wurden Varianten mit und ohne Diffusoren einbezogen. Die Diffusorfläche von ca. 0,1 m² pro Raum betrug dabei 6-7 % der Raumboberflächen. Außerdem wurden Messungen mit Möbeln durchgeführt (Bild 55).

Tabelle 6: Übersicht über die durchgeführten Messungen bei Variation der Absorption und Diffusion

Absorption, Diffusion	Bau			Labor		
	Hartfaser	Gipsfaser	Doppel	Hartfaser	Gipsfaser	Doppel
trocken, mit Diffusor	X	X	X	X	X	X
trocken, ohne Diffusor	X	X	X	X	X	X
hallig, mit Diffusor	X	X	X	X	X	X
hallig, ohne Diffusor	X	X	X	X	X	X
möbliert	X	X	X	X	X	X

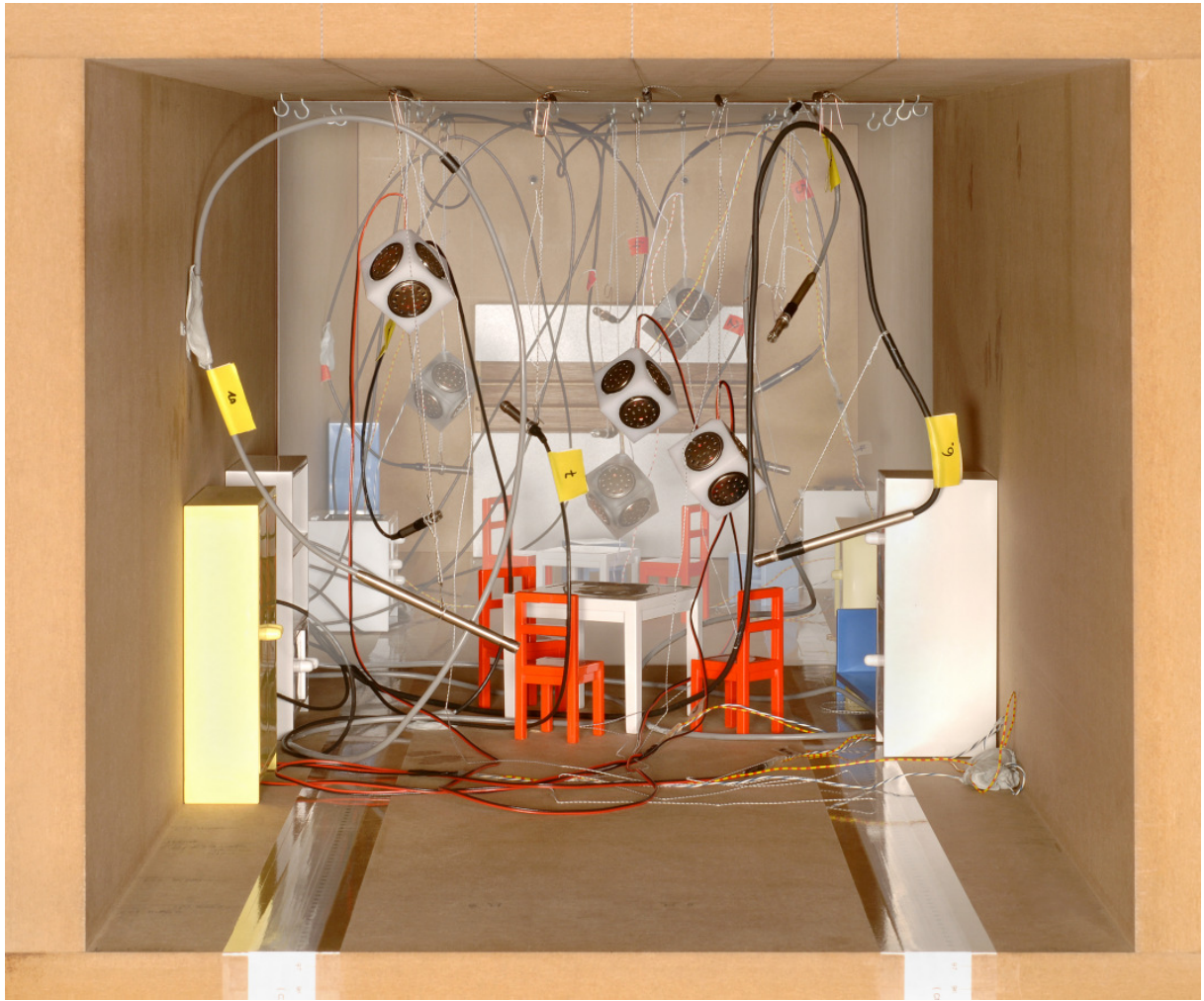


Bild 55: Blick in den möblierten Prüfstand; das Prüfobjekt ist hier halb transparent

Die Nachhallzeiten für die trockene Ausführung orientieren sich an den Vorgaben der [DIN EN ISO 140-3] (Bild 56 - Bild 58). Der hallige Zustand ist durch wesentlich längere Nachhallzeiten charakterisiert, und der möblierte Zustand entspricht bezüglich der vorliegenden Nachhallzeiten in etwa der trockenen Ausführung.

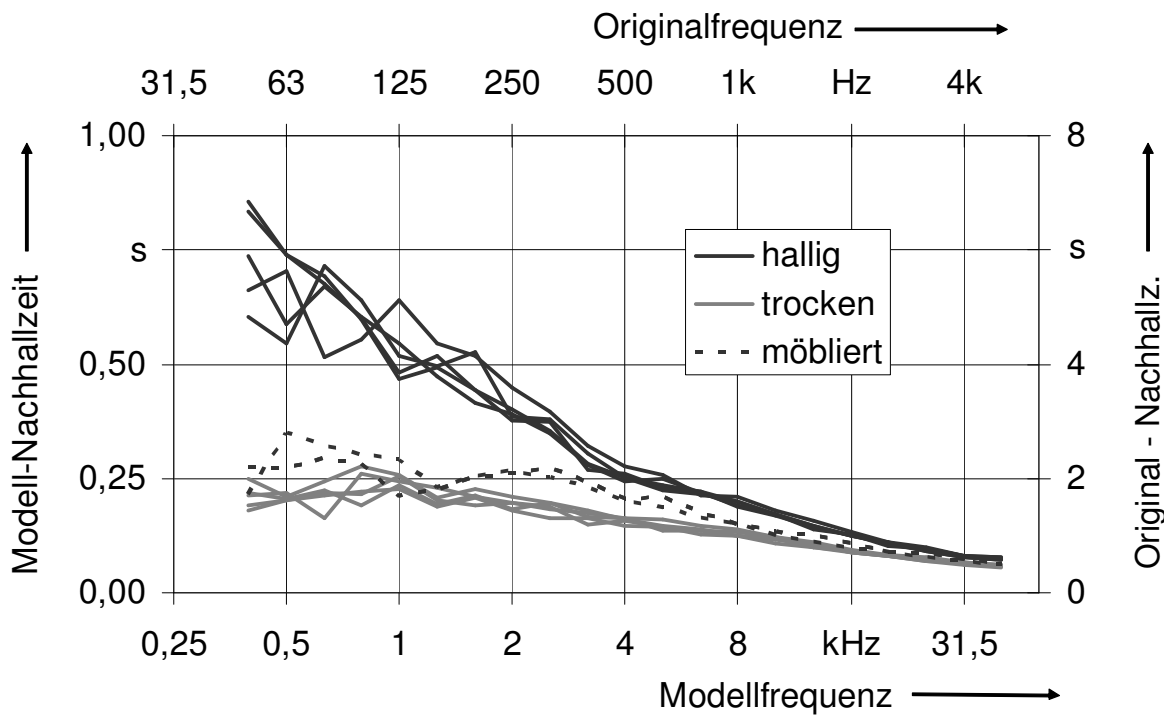


Bild 56: Nachhallzeiten bei der Messung der Gipsfaserplatte

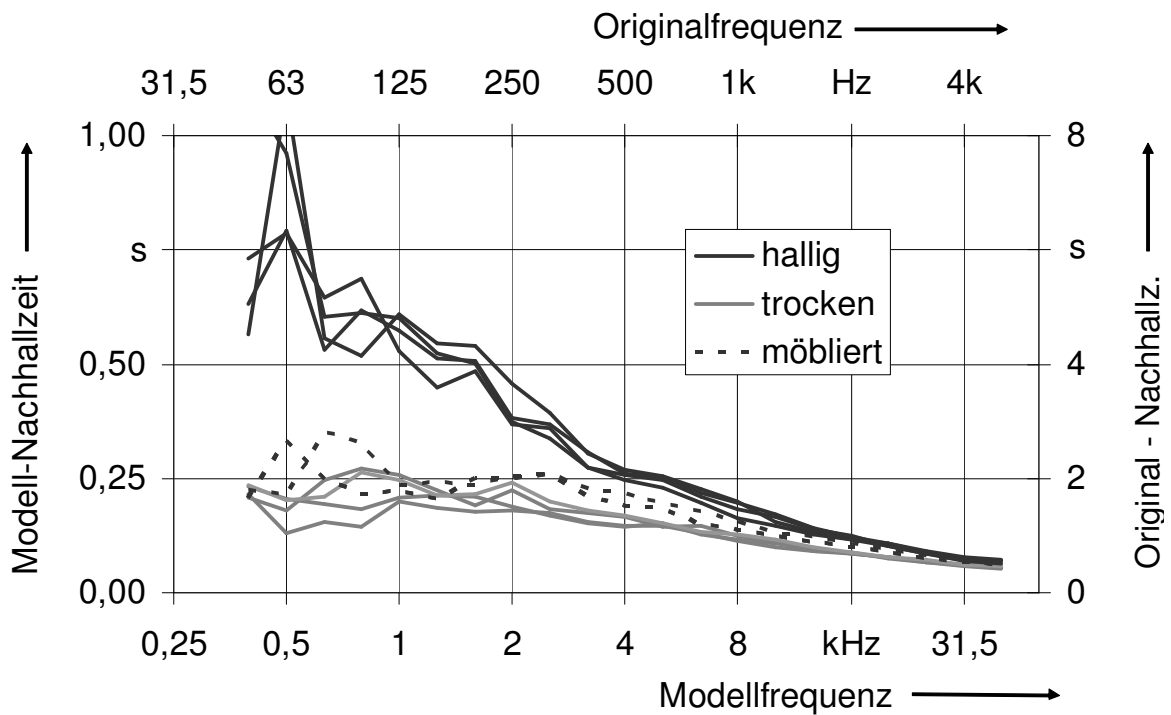


Bild 57: Nachhallzeiten bei der Messung der Hartfaserplatte

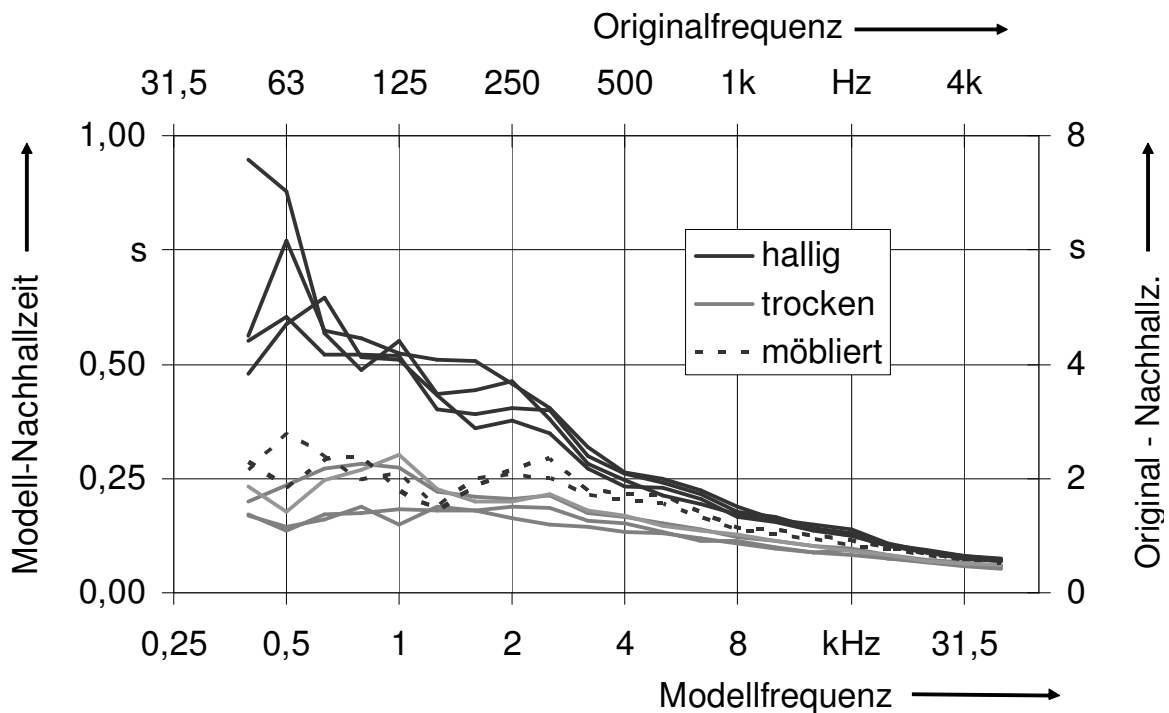


Bild 58: Nachhallzeiten bei der Messung der Doppelwand

6.3 Gemessene Schalldämm-Maße

6.3.1 Gipsfaserplatte

Bei der Gipsfaserplatte zeigt sich ein geringer Einfluss der Nachhallzeit auf das gemessene Luftschalldämm-Maß bei tiefen Frequenzen. In trockenen Umgebungen ist die Schalldämmung wenige dB größer als in halligen Umgebungen (Bild 59, Bild 60). Dies gilt sowohl im Prüfstand als auch am Bau. Das Ergebnis für die möblierte Variante liegt hier mal beim halligen, mal beim trockenen Fall.

Etwas größer sind die Unterschiede zwischen Labor- und Bausituation (Bild 61 - Bild 63). Besonders ausgeprägt sind die Differenzen zwischen Labor und Bau in halligen Umgebungen (Bild 62), wobei die Diffusoren die Differenz kaum beeinflussen.

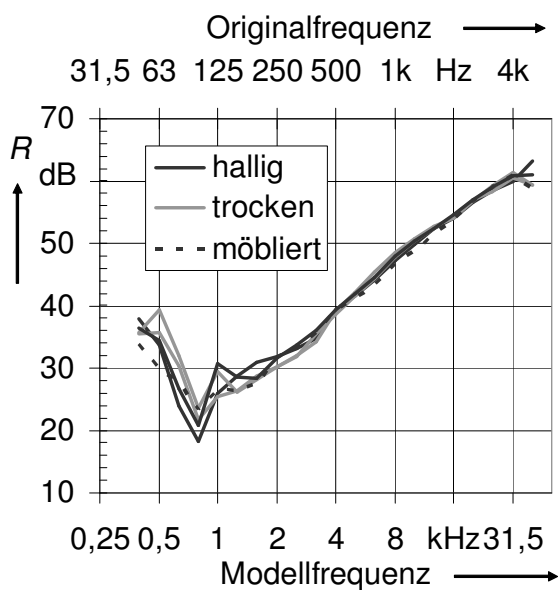


Bild 59 Schalldämmung der Gipsfaserplatte in Prüfständen

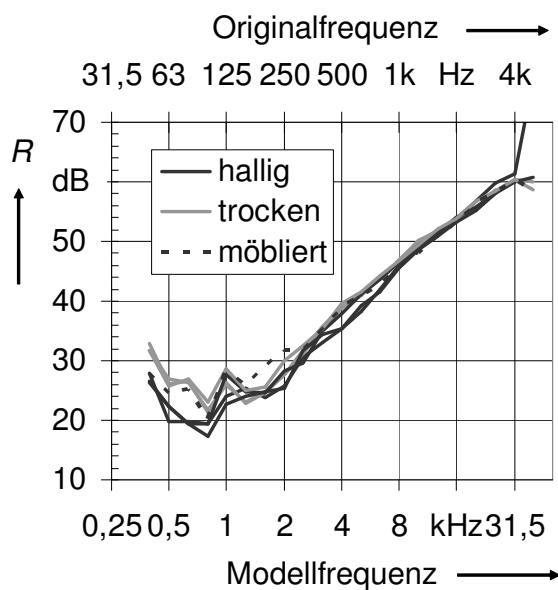


Bild 60 Schalldämmung der Gipsfaserplatte am Bau

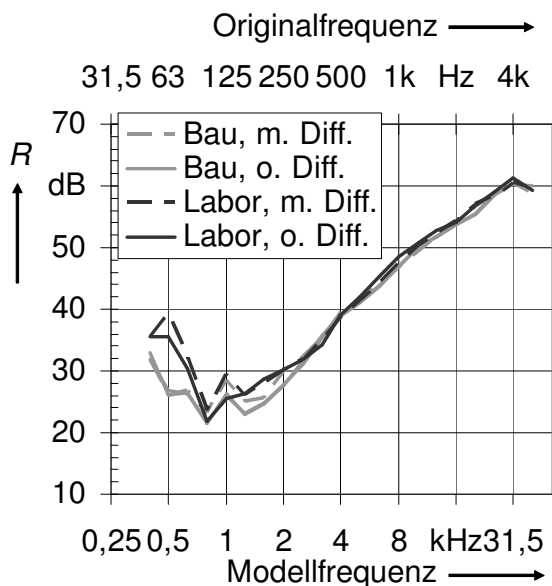


Bild 61 Schalldämmung der Gipsfaserplatte in trockenen Umgebungen in Prüfständen und am Bau

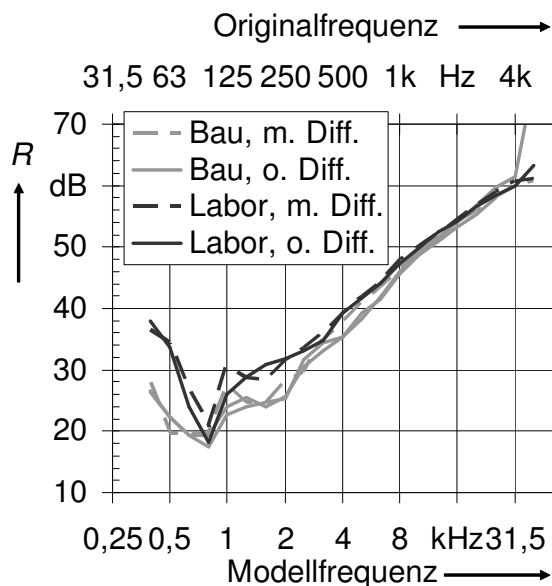


Bild 62 Schalldämmung der Gipsfaserplatte in halligen Umgebungen in Prüfständen und am Bau

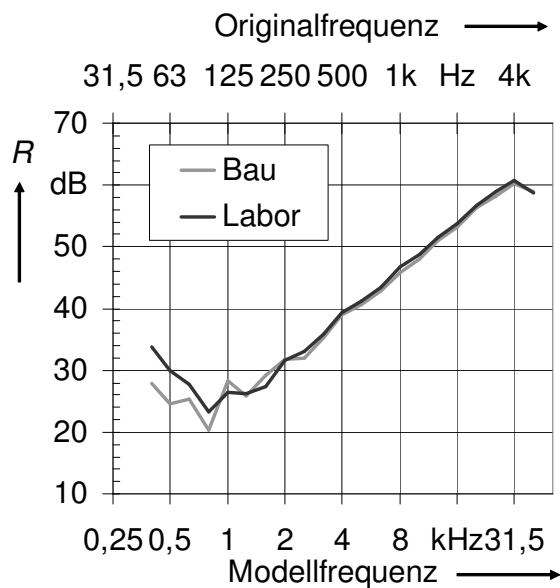


Bild 63 Schalldämmung der Gipsfaserplatte in möblierter Umgebung in Prüfständen und am Bau

6.3.2 Hartfaserplatte

Im Unterschied zur schweren Gipsfaserplatte ergeben sich für die Hartfaserplatte als Repräsentant eines leichten Bauteils praktisch keine Auswirkungen von Bedämpfung und Diffusion der Luftschallfelder auf das gemessene Schalldämm-Maß (Bild 64, Bild 65). Signifikant ist dagegen der Unterschied zwischen Labor und Bau bei tiefen Frequenzen, der durch Diffusoren oder Möbel kaum beeinflusst wird (Bild 66 - Bild 68).

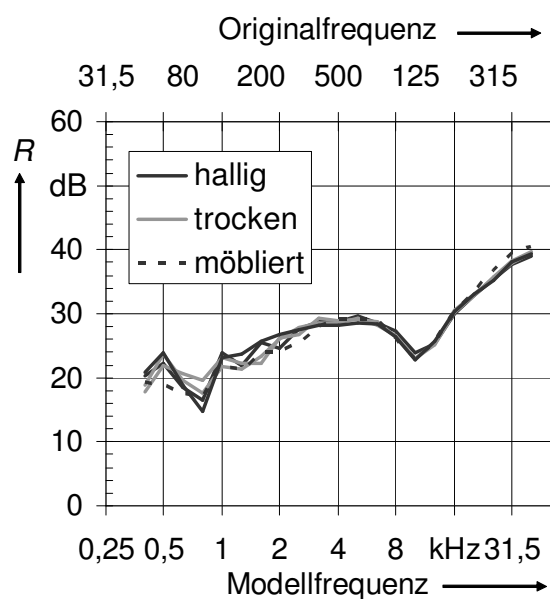


Bild 64 Schalldämmung der Hartfaserplatte in Prüfständen

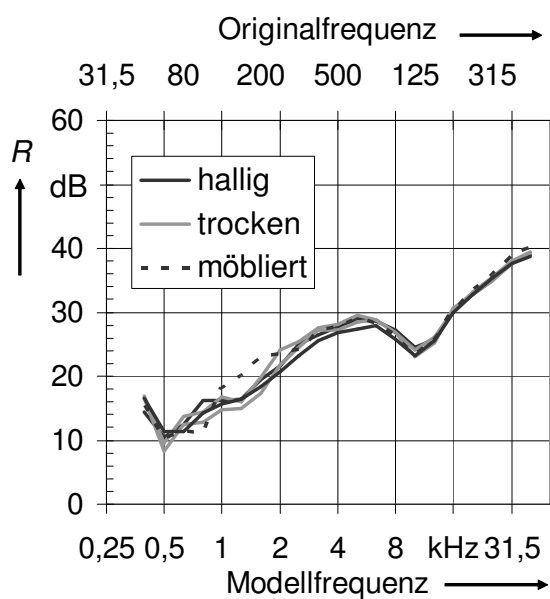


Bild 65 Schalldämmung der Hartfaserplatte am Bau

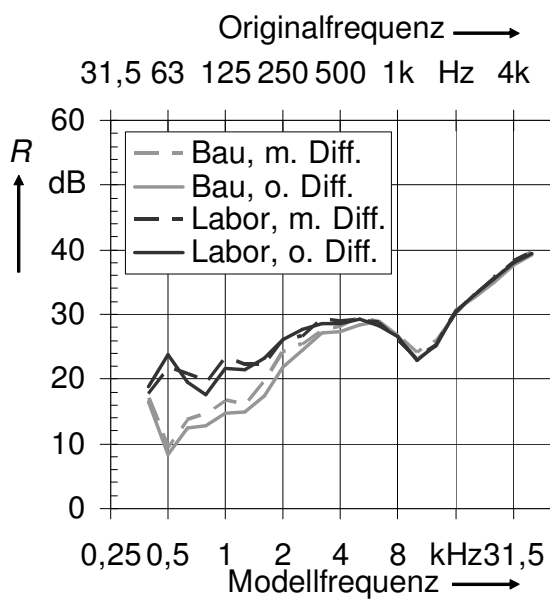


Bild 66 Schalldämmung der Hartfaserplatte in trockenen Umgebungen in Prüfständen und am Bau

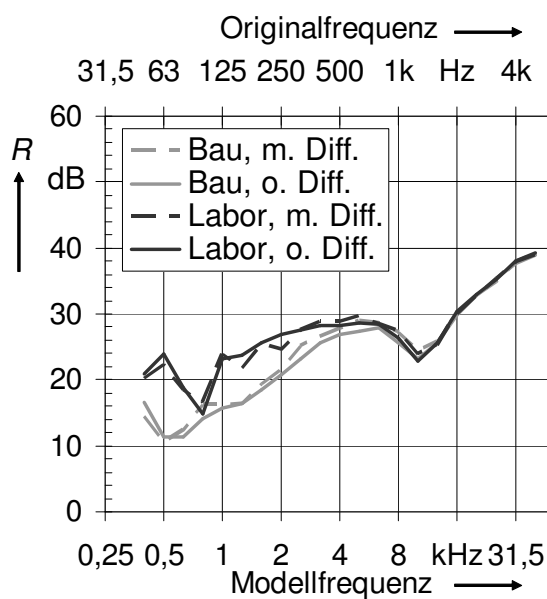


Bild 67 Schalldämmung der Hartfaserplatte in halligen Umgebungen in Prüfständen und am Bau

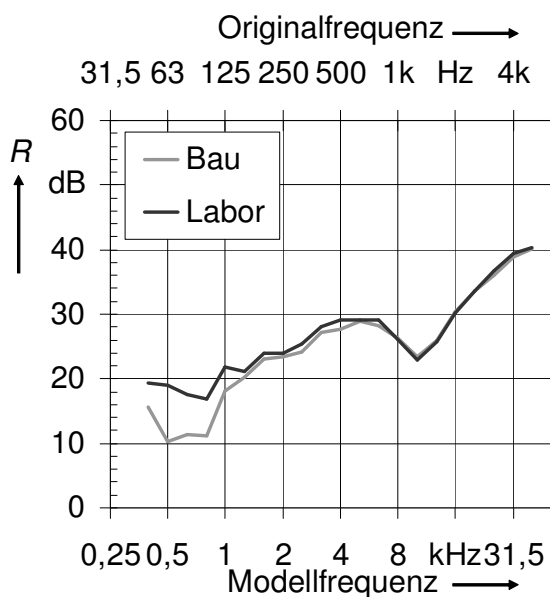


Bild 68 Schalldämmung der Hartfaserplatte in möblierter Umgebung in Prüfständen und am Bau

6.3.3 Doppelwand

Wie bei der leichten Hartfaserplatte ist auch bei der Doppelwand der Einfluss der Bedämpfung und der Diffusität in den Luftschallfeldern auf die gemessene Schalldämmung gering (Bild 69, Bild 70). Signifikant ist dagegen der Unterschied zwischen Schalldämmungen zwischen gleich großen Räumen (Bau) und verschiedenen großen Räumen (Labor) (Bild 71 - Bild 73). Der Einfluss der Diffusoren ist hier kaum feststellbar.

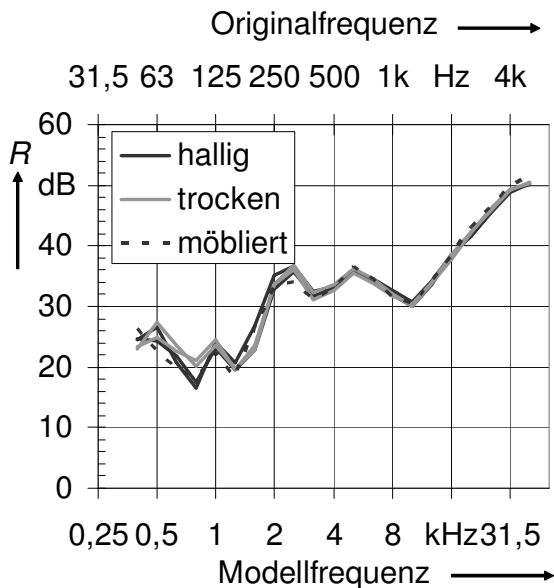


Bild 69 Schalldämmung der Doppelwand in Prüfständen

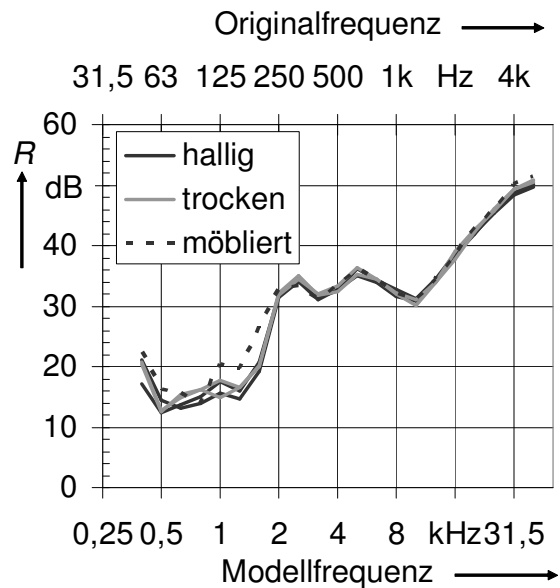


Bild 70 Schalldämmung der Doppelwand am Bau

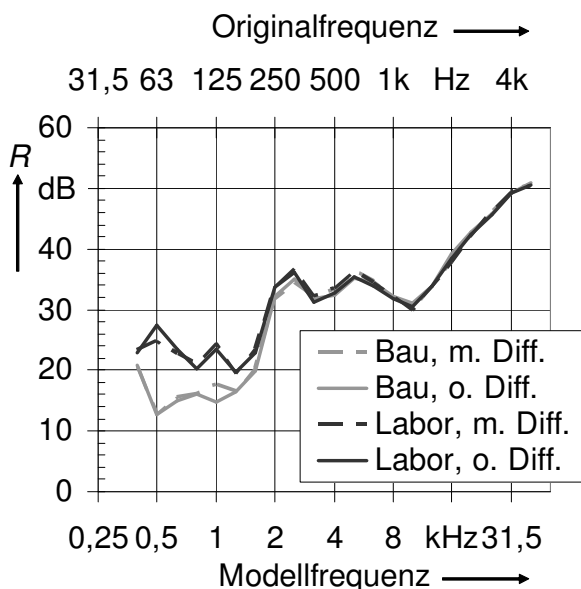


Bild 71 Schalldämmung der Doppelwand in trockenen Umgebungen in Prüfständen und am Bau

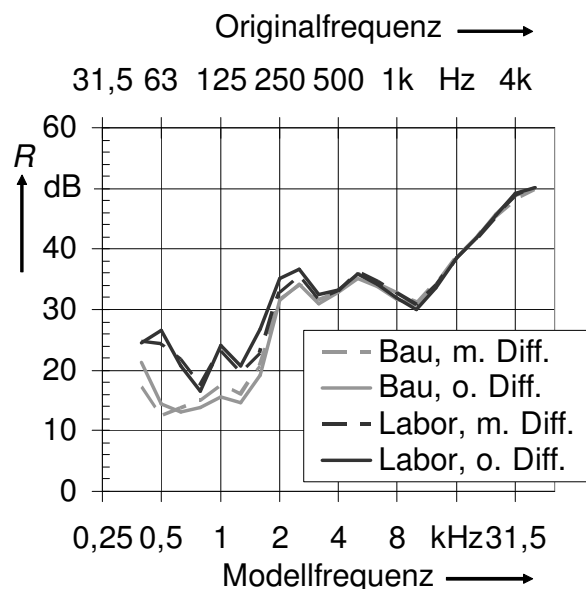


Bild 72 Schalldämmung der Doppelwand in halligen Umgebungen in Prüfständen und am Bau

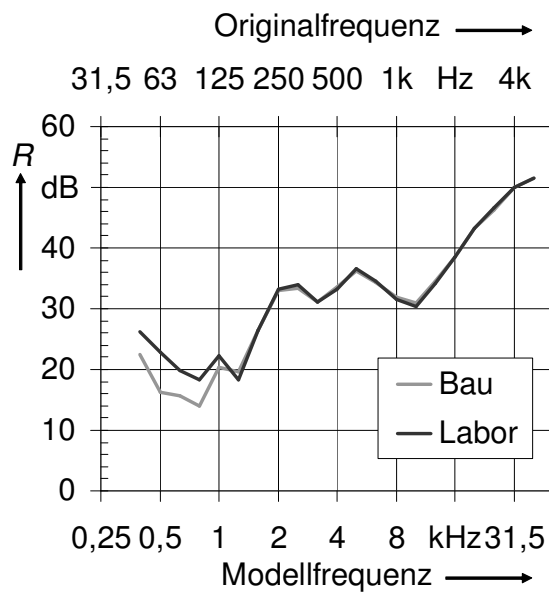


Bild 73 Schalldämmung der Doppelwand in möblierter Umgebung in Prüfständen und am Bau

6.4 Auswertungen

6.4.1 Auswirkung von Absorption und Diffusion auf Einzahlwerte

Zur weiteren Auswertung seien nun Einzahlwerte betrachtet. Dabei zeigt sich, dass die Differenz der bewerteten Schalldämm-Maße zwischen halligen und trockenen Messräumen nur bei der Gipsfaserplatte und auch nur bei Baugeometrien mit ca. - 1,5 dB signifikant ist (Bild 74). Für die anderen Bauteile und Randbedingungen liegen die Abweichungen in der Größenordnung von 0,5 dB und sind demnach im Rahmen der auftretenden Streuung als gleich groß anzusehen. Die Abweichungen für die Summe aus R_W und $C_{tr,50-3,15k}$ (Bild 75) sind mit bis zu -2,5 dB etwas stärker ausgeprägt, zeigen prinzipiell aber das gleiche Verhalten wie R_W . Die Summe aus R_W und $C_{tr,50-3,15k}$ zeigt von allen Einzahlwerten den stärksten Einfluss bei tiefen Frequenzen und wurde daher zusätzlich ermittelt, um eine maximal mögliche Auswirkung auf einen Einzahlwert abzuschätzen.

Die Differenz der Einzahlwerte mit und ohne Diffusoren ist tendenziell positiv und für die verschiedenen Bauteile in etwa gleich (Bild 76, Bild 77). Die Ausprägung des Effekts ist mit maximal 1,3 dB jedoch gering.

Den deutlichsten Unterschied gibt es hingegen zwischen den Einzahlwerten im Labor und am Bau (Bild 78, Bild 79) Hier werden Differenzen von über 3 dB (R_W) bzw. 4 dB erreicht ($R_W + C_{tr,50-3,15k}$). Am größten sind diese Unterschiede bei halligen Luftschallfeldern. Durch Diffusoren wird der Unterschied kaum beeinflusst. Erst durch Hinzufügen von Absorption ergibt sich eine Reduktion des Unterschieds zwischen Einzahlwerten im Labor und am Bau.

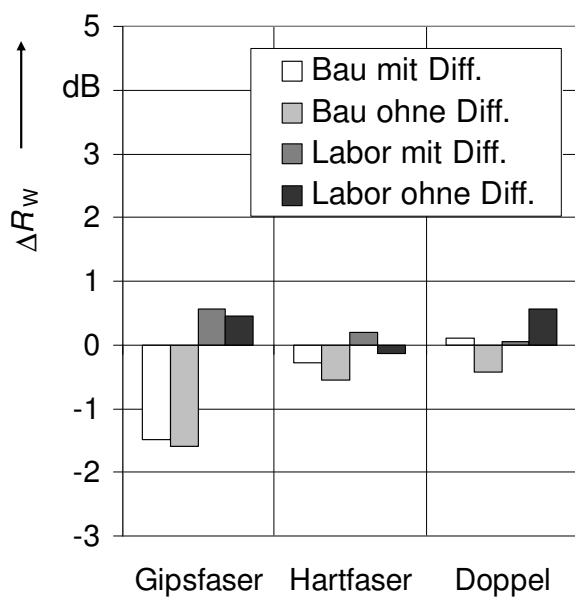


Bild 74 Differenzen des bewerteten Schalldämm-Maßes zwischen halligen und trockenen Umgebungen

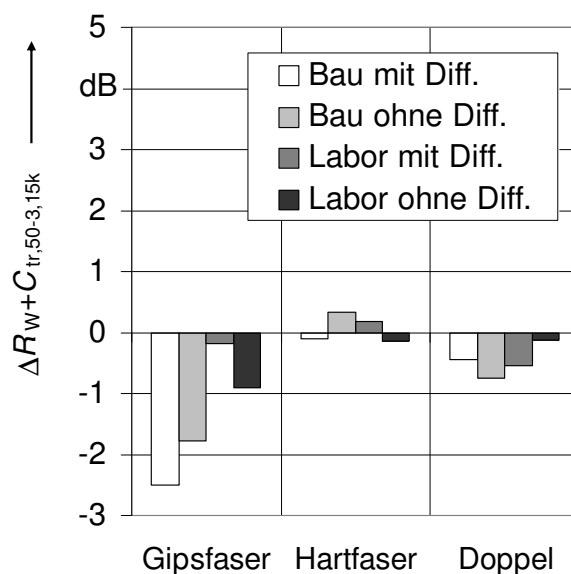


Bild 75 Differenzen von $R_w + C_{tr,50-3150}$ Maßes zwischen halligen und trockenen Umgebungen

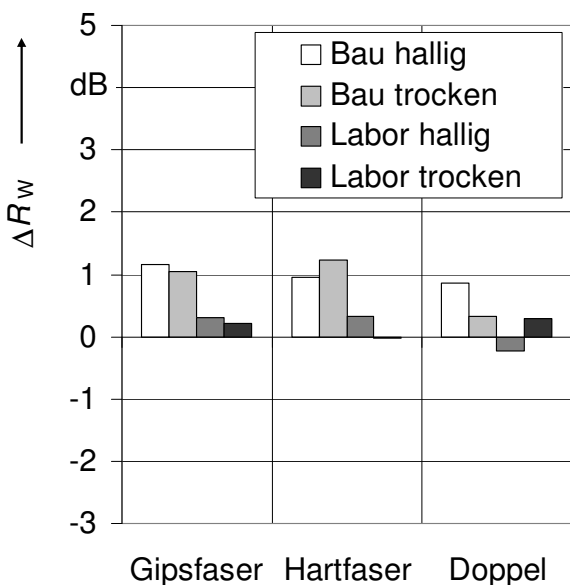


Bild 76 Differenzen des bewerteten Schalldämm-Maßes mit und ohne Diffusoren

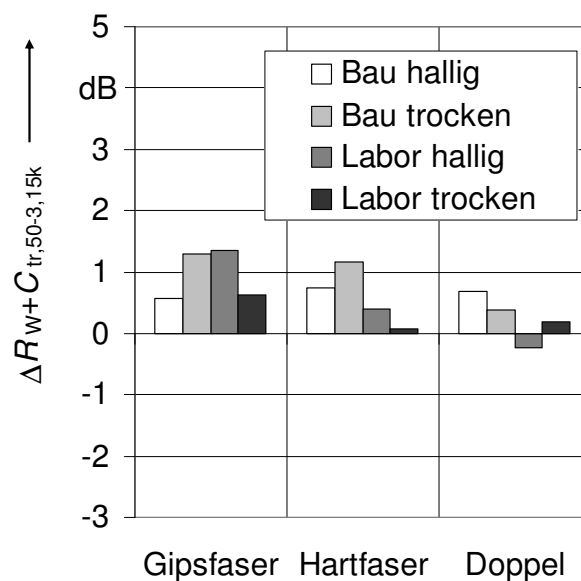


Bild 77 Differenzen von $R_w + C_{tr,50-3150}$ mit und ohne Diffusoren

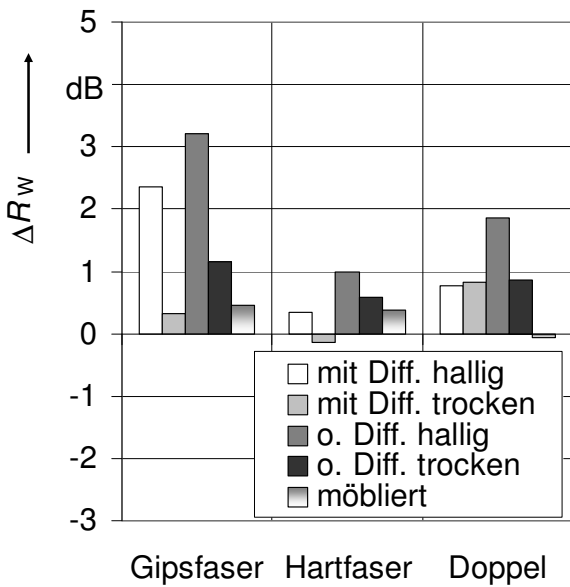


Bild 78 Differenzen des bewerteten Schalldämm-Maßes im Labor und am Bau

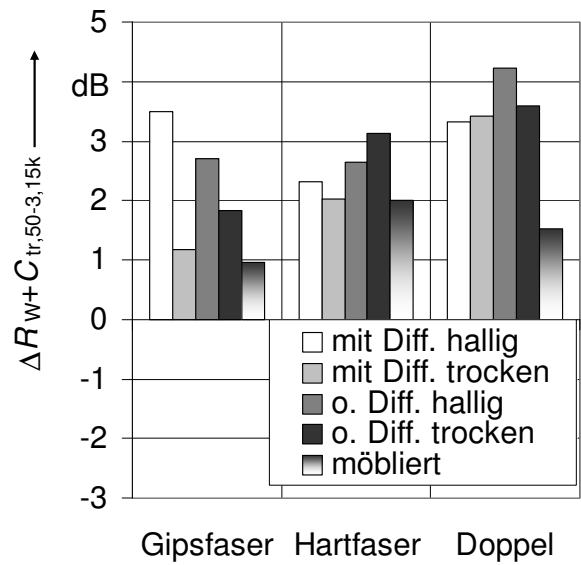


Bild 79 Differenzen von $R_w + C_{tr,50-3150}$ im Labor und am Bau

6.4.2 Mittlere Schalldämm-Spektren und zugehörige Streuungen

Da sich die Gleichheit oder Ungleichheit der Messräume als wichtigster Einfluss herauskristallisiert hat, wurden alle unter Laborbedingungen und alle unter Baubedingungen bestimmten Schalldämmungen gemittelt und die zugehörigen Standardabweichungen berechnet (Bild 80 - Bild 85). Die Ergebnisse liefern ein eindeutiges Bild. Vor allem bei tiefen Frequenzen ist die Schalldämmung zwischen gleich großen Räumen systematisch um mehrere dB geringer als zwischen verschieden großen Räumen. Die auftretenden Standardabweichungen sind für Messungen im Labor geringer als am Bau. Sie liegen jedoch unter den Werten der Vergleichs-Standardabweichung aus [DIN EN ISO 140-2], da hier außer den Raumabmessungen keine weiteren Parametervariationen durchgeführt wurden.

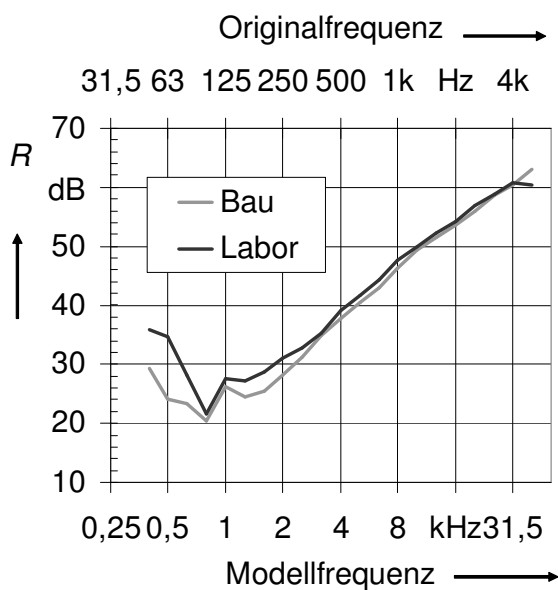


Bild 80 Schalldämmung (Mittelwerte) der Gipsfaserplatte in Prüfständen und am Bau

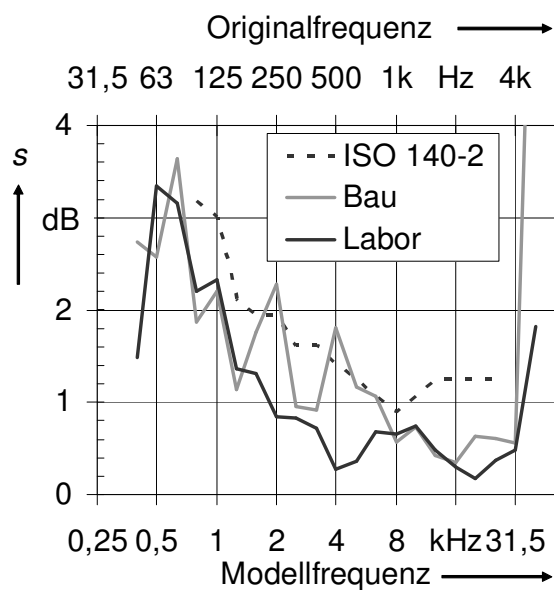


Bild 81 Standardabweichungen der Gipsfaserplatte in Prüfständen und am Bau

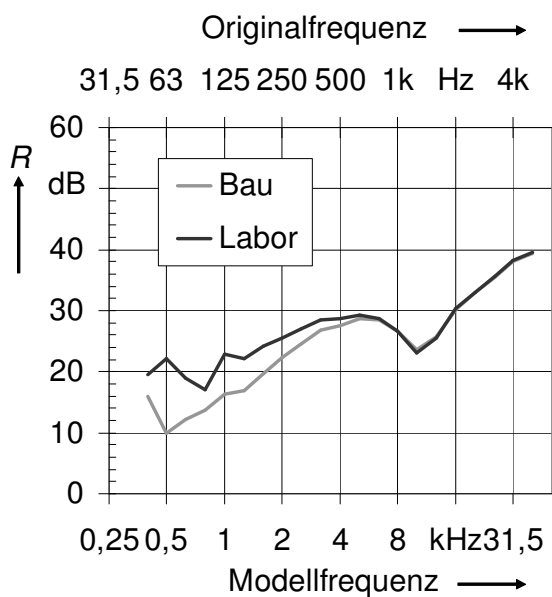


Bild 82 Schalldämmung (Mittelwerte) der Hartfaserplatte in Prüfständen und am Bau

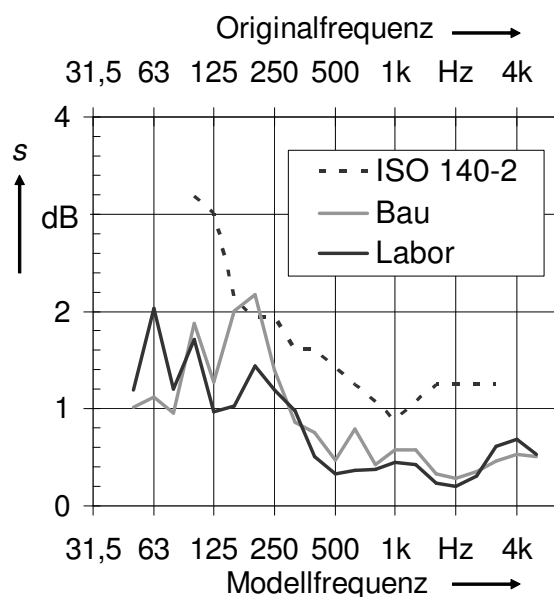


Bild 83 Standardabweichungen der Hartfaserplatte in Prüfständen und am Bau

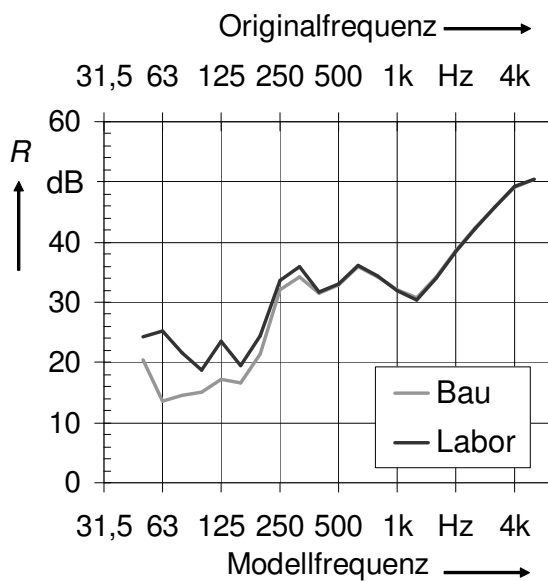


Bild 84 Schalldämmung (Mittelwerte) der Doppelwand in Prüfständen und am Bau

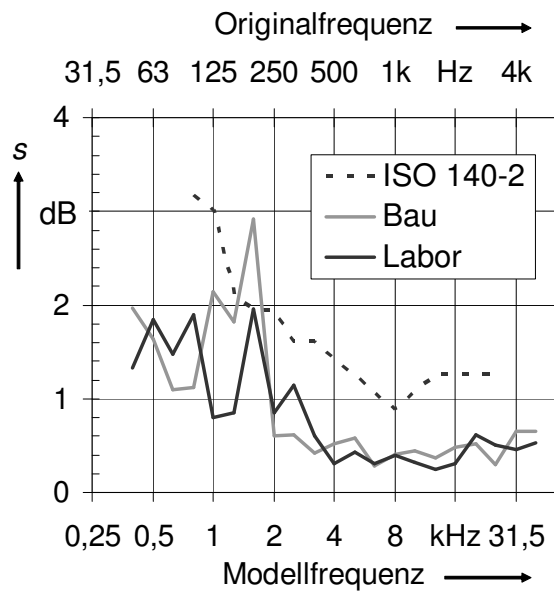


Bild 85 Standardabweichungen der Doppelwand in Prüfständen und am Bau

6.4.3 Mittlere Einzahlwerte im Bau und im Labor und zugehörige Streuungen

In einem letzten Auswertungsschritt wurden schließlich die Einzahlwerte gemittelt und die zugehörigen Standardabweichungen berechnet (Bild 86, Bild 87). Es zeigt sich hier für alle Bauteile der Trend, dass die mittlere Schalldämmung im Labor größer ist als am Bau. Die Verschiebung ist größer für die schwere Gipsfaserplatte und beträgt im Mittel ca. 1 dB für das bewertete Schalldämm-Maß und ca. 2 dB für $R_W + C_{tr,50-3,15k}$. Die Streuungen sind im Labor wesentlich geringer als am Bau. Dies ist hier als besonders signifikant anzusehen, da die durchgeführte Parametervariation bezüglich Halligkeit, mit und ohne Diffusoren sowie Möblierung am Bau und im Labor identisch waren. Ungleich große Messräume reduzieren somit die Streuung der gemessenen Schalldämmungen, führen jedoch andererseits zu einer vor allem bei tiefen Frequenzen höheren Schalldämmung.

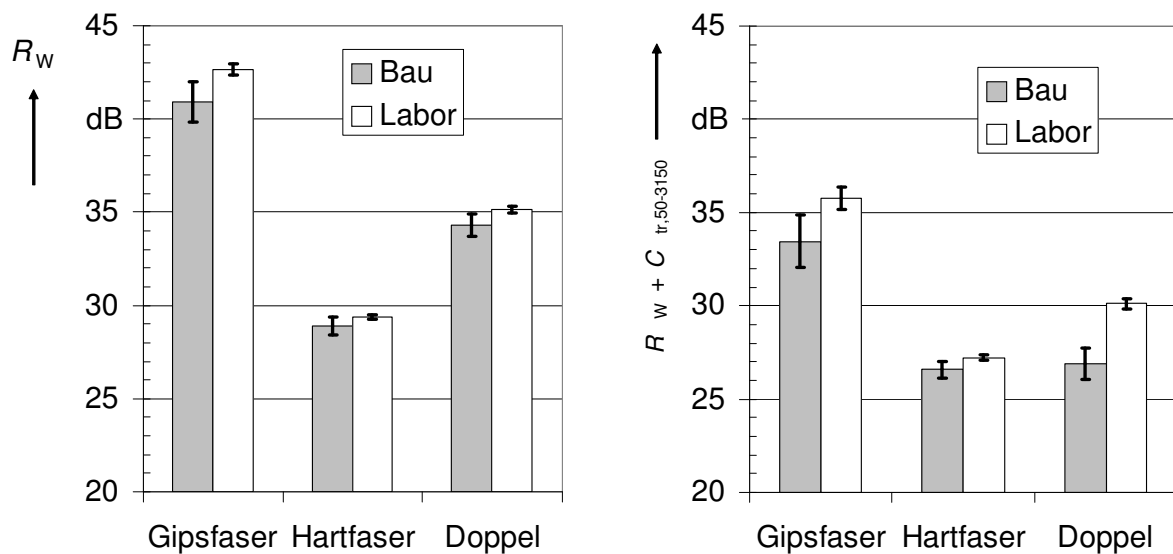


Bild 86 Bewertetes Schalldämm-Maß im Bau und im Labor **Bild 87** $R_w + C_{tr,50-3150}$ im Bau und im Labor

7. Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Prüflingsgröße und der Kantenlängenverhältnisse

7.1 Motivation

In den vorhergehenden Abschnitten wurden entweder allein die Körperschallfelder oder die Luftschallfelder variiert. In einem weiteren Experiment sollen nun sowohl Luft- als auch Körperschallfelder gemeinsam variiert werden, wobei speziell die Kantenlängenverhältnisse der Prüflinge über das in normgerechten Laboratorien übliche Maß hinaus untersucht werden soll.

7.2 Durchgeführte Experimente

Der Modellprüfstand bestand aus 38 mm dicken MDF-Platten. Er gestattet eine Variation der Breite der Prüföffnung durch eine verschiebbare Anordnung (Bild 88). Die Prüflinge wurden nun so gewählt, dass ihre Größe genau der Öffnungsgröße zuzüglich der Materialdicke des Prüfstands entspricht. Die Nachhallzeiten wurden in jeder Anordnung auf den Bereich zwischen 1 und 2 s im Originalmaßstab eingestellt.

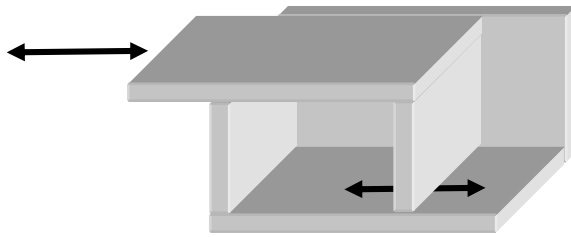


Bild 88 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus, Blick von der Prüföffnung in den Sende- oder Empfangsraum

Für die Experimente wurden Hartfaserplatten von 3 mm Dicke und Spanplatten von 28 mm Dicke verwendet. Dies entspricht im Original üblichen homogenen leichten bzw. schweren Wänden. Die Tiefe von Sende- und Empfangsraum betrug 0,48 m. Pro Material wurden fünf verschiedene Größen ausgewählt, die im Originalmaßstab zwischen 5 und 29 m² liegen (Tabelle 7). Alle Prüfobjekte wurden aus je einer Platte geschnitten. Trotzdem kommt es zu geringen Schwankungen der Flächenmasse, die zu Schalldämmmaß-Änderungen zwischen -0,4 und 0,2 dB bei der Hartfaserplatte und -0,12 und 0,06 dB bei der Spanplatte führen. Diese Schwankungen sind jedoch unabhängig von der Plattengröße, so dass sie in den weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 7 Plattengrößen

Platte	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
Höhe (Modell) / m	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Breite (Modell) / m	1,32	0,90	0,55	0,34	0,25
Modellfläche / m ²	0,449	0,306	0,187	0,116	0,085
Originalfläche / m ²	29	20	12	7,4	5,4
Flächenmasse Spanplatte / kg/m ²	17,01	17,03	17,07	16,90	16,72
Flächenmasse Hartfaser / kg/m ²	2,64	2,53	2,45	2,63	2,64

7.3 Gemessene Schalldämmungen

Die gemessenen Schalldämmungen zeigen eine recht starke Abhängigkeit von der Prüflingsgröße (Bild 89, Bild 90). Je größer der Prüfling, desto kleiner ist die Schalldämmung. Dies gilt tendenziell bei allen Frequenzen bei beiden Prüflingen.

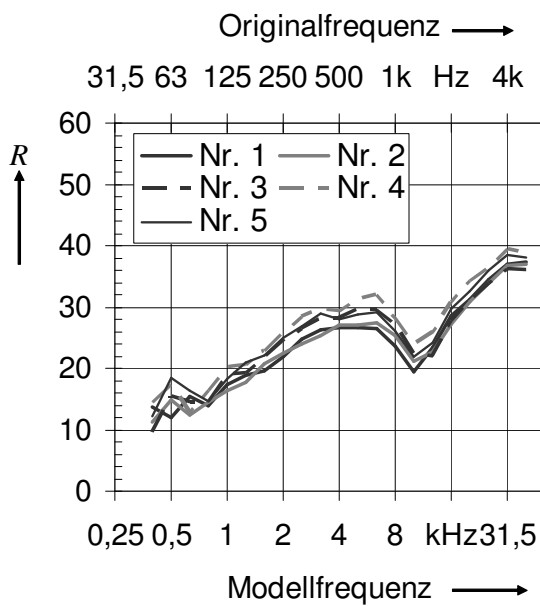


Bild 89 Schalldämmung der Hartfaserplatten verschiedener Größe

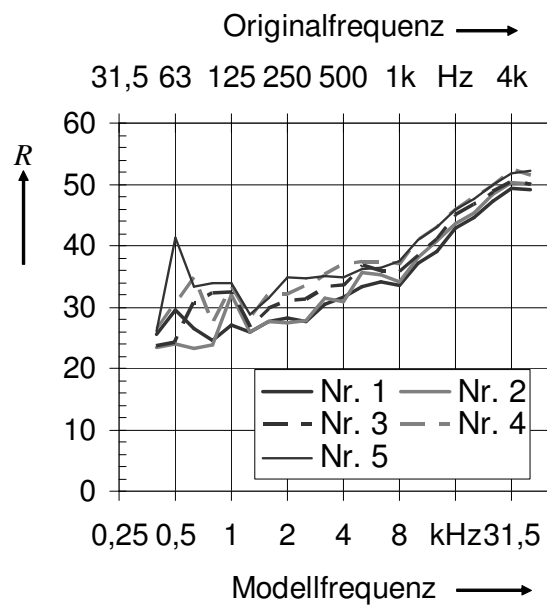


Bild 90 Schalldämmung der Spanplatten verschiedener Größe

Zur detaillierteren Auswertung wurden die Differenzen der gemessenen Schalldämmung zum jeweiligen Mittelwert berechnet

$$\Delta R_i = R_i - \bar{R} \quad (12)$$

Diese Differenz nimmt für die Hartfaserplatte Werte zwischen -3 und 3 dB an (Bild 91). Bei der Spanplatte sind die Differenzen bei höheren Frequenzen in der gleichen Größenordnung, bei tiefen Frequenzen dagegen wesentlich größer (Bild 92).

Für die Einzahlwerte wird der bereits angesprochene Trend, dass die Schalldämmung mit der Prüflingsgröße sinkt, sehr deutlich (Bild 93, Bild 94). Bei einer Vergrößerung der Prüflingsfläche um den Faktor 6 sinkt die Schalldämmung um ca. 4 dB. Damit kann ein wesentlicher Unterschied in der Schalldämmung in Labor- und Bausituationen auch durch unterschiedliche Bauteilgrößen verursacht werden.

Als Näherung ergibt sich für die Einzahlwerte in etwa eine Korrektur von

$$\Delta R_w = 5 \lg \left(\frac{S}{S_0} \right) \text{ dB} \quad (13)$$

Für die Darstellung (Bild 93, Bild 94) wurde als Bezugsfläche S_0 der Mittelwert der verwendeten Flächen eingesetzt. In der Praxis sollte hier bei Fenstern die genormte Prüffläche von ca. 2 m², für Wände ca. 10 m² und für Decken ca. 20 m² eingesetzt werden. Wenn die unter Baubedingungen vorliegenden Geometrien nennenswert davon abweichen, erlangt die Korrektur (13) eine für die Bauakustik nicht mehr zu vernachlässigende Größenordnung. Dies steht tendenziell auch im Einklang mit der bisherigen Praxis der [DIN 4109], Beiblatt 1, bei Fenstern mit Glasflächen von über 3 m² das bewertete Schalldämm-Maß um 2 dB zu vermindern.

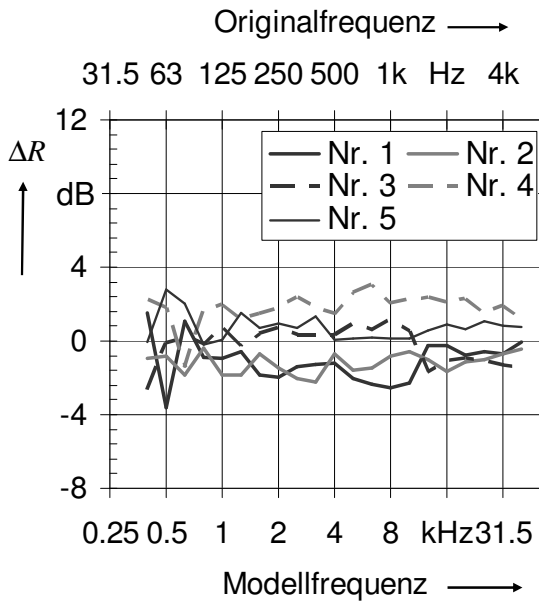


Bild 91 Änderung der Schalldämmung der Hartfaserplatten verschiedener Größe, bezogen auf Mittelwert

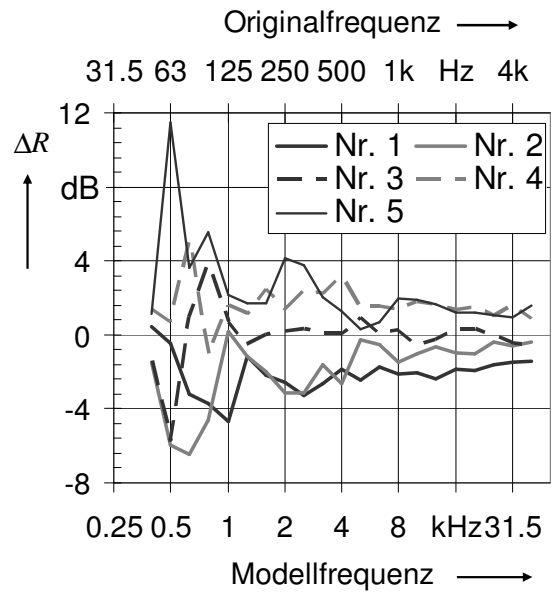


Bild 92 Änderung der Schalldämmung der Spanplatten verschiedener Größe, bezogen auf Mittelwert

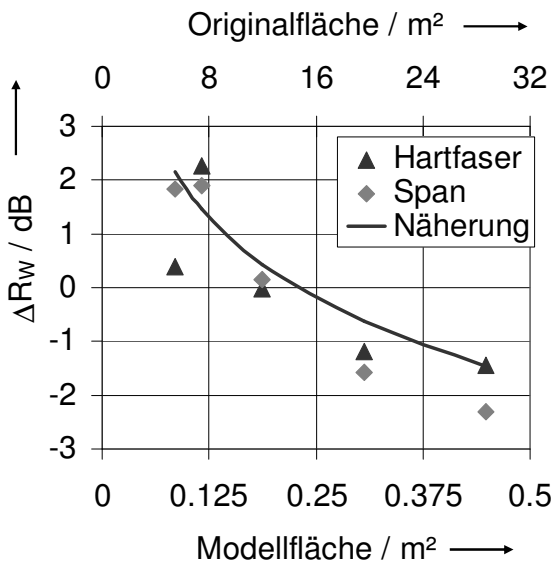


Bild 93 Änderung des bewerteten Schalldämm-Maßes mit der Prüflingsgröße

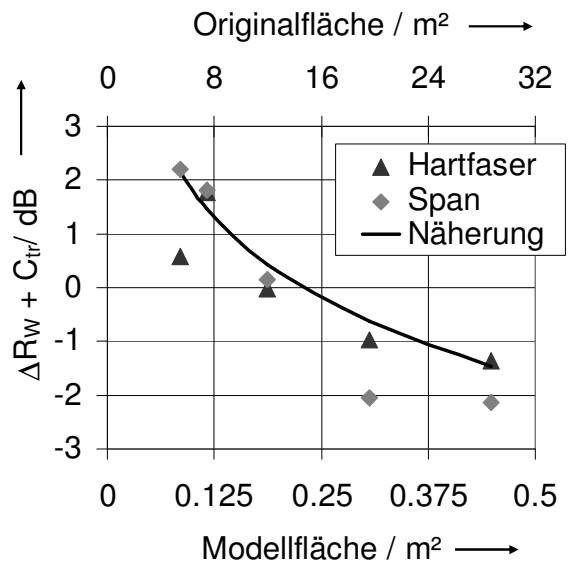


Bild 94 Änderung von $R_w + C_{tr}$ mit der Prüflingsgröße

7.4 Auswertungen

7.4.1 Schalleistungen in diffusen Körper- und Luftschallfeldern

Zur Erklärung der beobachteten Phänomene ist eine etwas ausführlichere Betrachtung der Schalleistungen in diffusen Schallfeldern erforderlich. Dazu wird zunächst von den bekannten Gleichungen des Luftschallfeldes ausgegangen, bevor analoge Beziehungen für das Biegewellenfeld auf plattenförmigen Strukturen aufgestellt werden.

Ausgangspunkt ist die Energiedichte im diffusen Luftschallfeld. Sie beträgt

$$w = \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (14)$$

In einer fortschreitenden Welle in einem diffusen Luftschallfeld gilt nach der Lauflänge $x(t)$

$$w(t) = w_0 (1 - \bar{\alpha})^{x(t)/l_m} e^{-m x(t)}. \quad (15)$$

Dabei ist berücksichtigt, dass die Welle bei jeder Reflexion an den Begrenzungen um den Betrag $(1 - \bar{\alpha})$ abgeschwächt wird. Eine solche Reflexion findet im Mittel ein Mal pro mittlerer freier Weglänge

$$l_m = \frac{4V}{S} \quad (16)$$

statt. Der zweite Term in (15) berücksichtigt die exponentielle Dämpfung bei der Ausbreitung in Luft. Mit dem Ansatz (15) und der Phasengeschwindigkeit c

$$x(t) = c t \quad (17)$$

sowie der Leistung P

$$P = -V \frac{dw}{dt} \quad (18)$$

gelangt man zur Bestimmungsgleichung für die Leistung

$$P = \frac{p^2}{\rho c} \frac{A}{4} \quad (19)$$

mit dem Absorptionsvermögen

$$A = 4 m V - S \ln(1 - \bar{\alpha}). \quad (20)$$

Gemessen wird das Absorptionsvermögen über die Nachhallzeit T . Mit dem Ansatz (15) gelangt man zur bekannten Gleichung

$$A = \frac{24 \ln(10) V}{c T}. \quad (21)$$

In Analogie dazu wird nun die Leistung für ein Biegewellenfeld auf einer homogenen Platte betrachtet. Die Energiedichte in einem solchen Feld ist

$$w_B = \frac{m}{S} v^2. \quad (22)$$

In Abhängigkeit von der Lauflänge $x(t)$ ist die Energiedichte

$$w_B(t) = w_0 (1 - \bar{\alpha})^{x(t)/l_m} e^{-2 \delta x(t)/c_g}, \quad (23)$$

wobei die Ausbreitungsdämpfung und die unvollständige Reflektion an den Begrenzungskanten ganz analog zu Gl. (15) berücksichtigt wurden. Die Abklingkonstante beschreibt das exponentielle Abklingen der Schallschnelle an einem festen Ort

$$v = v_0 e^{-\delta t}. \quad (24)$$

Um dies in eine Ausbreitungs-Dämpfungskonstante umzuwandeln, wird der entsprechende Term in Gl. (23) mit der Energie-Transportgeschwindigkeit, also der Gruppengeschwindigkeit, multipliziert. Der zusätzliche Faktor 2 im Exponenten resultiert aus der Tatsache, dass die Dämpfung für die Energie und nicht für die Feldgröße aufgeschrieben wird.

Die Dämpfungskonstante lässt sich über den Verlustfaktor η ausdrücken

$$\delta = f \eta \pi \quad (25)$$

der hierbei nicht die Randverluste, sondern nur die Verluste bei der Ausbreitung der Schallwelle auf der Platte beschreibt. Dies sind die Material- und die Abstrahlverluste. Die in der Zeit t zurückgelegte Lauflänge errechnet sich aus der Gruppengeschwindigkeit der Biegewelle

$$x(t) = c_g t \quad (26)$$

mit

$$c_g = 2 c_B. \quad (27)$$

Zur Leistung gelangt man nun über

$$\begin{aligned} P &= -S \frac{dw_B}{dt} \\ &= -S \frac{d \left(w_0 (1 - \bar{\alpha})^{c_g t / l_m} e^{-2 \eta \pi f t} \right)}{dt} \\ &= -S w_0 \left[\frac{c_g}{l_m} \ln(1 - \bar{\alpha}) (1 - \bar{\alpha})^{c_g t / l_m} e^{-2 \eta \pi f t} - (1 - \bar{\alpha})^{c_g t / l_m} 2 \eta \pi f e^{-2 \eta \pi f t} \right] \\ &= -S w \left[\frac{c_g}{l_m} \ln(1 - \bar{\alpha}) - 2 \eta \pi f \right] \end{aligned} \quad (28)$$

Mit w nach Gl. (22) folgt

$$P = m v^2 \left[2 \eta \pi f - \frac{c_g}{l_m} \ln(1 - \bar{\alpha}) \right]. \quad (29)$$

Die mittlere freie Weglänge ergibt sich aus dem Umfang U und der Plattenfläche S

$$l_m = \frac{\pi S}{U}. \quad (30)$$

Damit folgt die Leistung

$$P = m v^2 \left[2 \eta \pi f - \frac{c_g U}{\pi S} \ln(1 - \bar{\alpha}) \right]. \quad (31)$$

Für einen verschwindenden Absorptionsgrad an den Begrenzungskanten

$$\bar{\alpha} \rightarrow 0 \quad (32)$$

ergibt sich die bekannte Gleichung

$$P = m v^2 \eta \omega. \quad (33)$$

Eine Umformung der Gleichung (31) führt zur Körperschallentsprechung der allgemeinen Gleichung (19)

$$P = m v^2 \frac{c_g}{\pi S} a \quad (34)$$

mit der zur Absorptionsfläche nach Gl. (20) analogen Absorptionslänge

$$\begin{aligned} a &= \frac{2 \eta \pi^2 f S}{c_g} - U \ln(1 - \bar{\alpha}) \\ &= \frac{\eta \pi^2 S}{\lambda_B} - U \ln(1 - \bar{\alpha}) \end{aligned} \quad (35)$$

Wird nun die Nachhallzeit auf der Platte gemessen, so fällt die Energiedichte nach Gl. 9 auf den 10^{-6} -ten Teil ab:

$$w(T_{KS}) = w_0 (1 - \bar{\alpha})^{c_g T_{KS} U / \pi S} e^{-2 \eta \pi f T_{KS}} = 10^{-6} w_0. \quad (36)$$

Daraus folgt nun die zu Gl. (21) analoge Beziehung

$$a = \frac{6 \pi \ln(10)}{c_g} \frac{S}{T_{KS}}. \quad (37)$$

Einsetzen von Gl. (37) in Gl. (34) liefert nun

$$P = m v^2 \frac{6 \ln(10)}{T_{KS}} \approx 13,816 \frac{m v^2}{T_{KS}} \quad (38)$$

Wird nun der Gesamtverlustfaktor aus der gemessenen Nachhallzeit ermittelt

$$\eta_{tot} = \frac{2,2}{f T_{KS}} \quad (39)$$

und daraus die Leistung nach Gl. (33) bestimmt, so folgt

$$P = m v^2 \frac{2,2}{f T_{KS}} \omega \approx 13,823 \frac{m v^2}{T_{KS}}, \quad (40)$$

d.h. das übliche Verfahren nach Gln. (39) und (40) liefert zu Gl. (34) identische Ergebnisse.

7.4.2 Schalldämmungen bei unterschiedlichen Kantenlängenverhältnissen

Gln. (34) und (35) können nun noch kombiniert werden, so dass sich

$$P = m v^2 \omega \eta \underbrace{\left[1 - \frac{U}{\pi S} \frac{c_g}{\omega \eta} \ln(1 - \bar{\alpha}) \right]}_{\eta_{\text{tot}}} \quad (41)$$

ergibt. Der Gesamtverlustfaktor η_{tot} hängt also neben den Ausbreitungs- und Abstrahlverlusten auf dem Prüfling auch vom Verhältnis des Plattenumfangs U zur Plattenfläche S ab.

Die Schalldämmung eines Prüfobjekts ist nun proportional zum Gesamtverlustfaktor. Der Unterschied zwischen den Schalldämmungen zweier bis auf das Kantenlängenverhältnis identischer Prüflinge i und j ergibt sich nach Gl. (41) zu

$$\begin{aligned} \Delta R_{ij} &= R_i - R_j = 10 \lg \left(\frac{\eta_{\text{tot},i}}{\eta_{\text{tot},j}} \right) \text{dB} \\ &= 10 \lg \left(\frac{1 - \frac{U_i}{S_i} \frac{c_g}{\omega \eta} \ln(1 - \bar{\alpha})}{1 - \frac{U_j}{S_j} \frac{c_g}{\omega \eta} \ln(1 - \bar{\alpha})} \right) \text{dB} \end{aligned} \quad (42)$$

Im Grenzfall großer Absorptionsgrade $\bar{\alpha}$ an den Begrenzungsflächen und kleiner Ausbreitungsverluste ergibt sich daraus

$$\Delta R_{ij} = 10 \lg \left(\frac{U_i S_j}{S_i U_j} \right) \text{dB} \quad (43)$$

Das Verhältnis von Umfang zu Fläche beträgt bei der größten verwendeten Platte (Tabelle 7) 13,7/m und bei der kleinsten Platte 7,4/m. Daraus resultiert unter den genannten Bedingungen eine Änderung der Schalldämmung von 2,7 dB. Allerdings müsste die größere Platte auch die größere Schalldämmung aufweisen, da sie das größere Verhältnis von Umfang zu Fläche aufweist. Dass sich dieser Trend in den gemessenen Schalldämmungen nicht widerspiegelt, deutet darauf hin, dass die Randverluste der Prüflinge gegenüber den inneren Verlusten und den Abstrahlungsverlusten vernachlässigbar sind. Der Grund hierfür liegt in der verwendeten umlaufenden elastischen Dichtung, die einen nennenswerten Energieabfluss über die Bauteilränder offenbar wirksam verhindert.

Neben der Bedämpfung ändert sich durch das Verhältnis von Umfang zu Fläche auch der Abstrahlgrad eines Bauteils. Unterhalb der Koinzidenzfrequenz ist der Abstrahlgrad direkt proportional dem Verhältnis aus Umfang und Fläche, oberhalb der Koinzidenzfrequenz 1. Damit müsste sich in den Ergebnissen eine deutliche Frequenzabhängigkeit zeigen, was jedoch nicht der Fall ist. Es scheiden somit auch Abstrahlgradänderungen als mögliche Erklärung aus.

7.4.3 Schalldämmungen bei unterschiedlichen Bauteilgrößen

Neben den Kantenlängenverhältnissen wurden im Experiment auch die Bauteilgrößen verändert. Hierfür ist aus [KH05] bekannt, dass die Schalldämmung mit zunehmender Plattengröße sinkt. Bei einer Vergrößerung der Plattenfläche um den Faktor 6 ergibt sich eine Verringerung der Schalldämmung um ca. 1,5 dB. Experimentell beobachtet wurden hier jedoch Schalldämmmaß-Änderungen von ca. 4 dB. Der Effekt ist somit in der vermuteten Richtung vorhanden, in seiner Ausprägung jedoch wesentlich stärker als bislang bekannt.

8. Zusammenfassung

Die Auswertung der Ringversuche hat gezeigt, dass unterschieden werden muss, ob bei den Messungen die Bau- oder Laborsituation, das Personal und die verwendeten Messgeräte identisch sind oder nicht. Die den einzelnen Situationen entsprechenden Unsicherheiten des bewerteten Schalldämm-Maßes sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8 Versuchsbedingungen und zugehörige Unsicherheiten des bewerteten Schalldämm-Maßes

	Bauliche Situation oder Laborsituation	Personal	Messgeräte	$u(R_w)$
Vergleichsbedingungen	≠	≠	≠	Labor: 1,2 dB Bau: 1,4 dB
in-situ Bedingungen	=	≠	≠	0,8 dB
Wiederholbedingungen	=	=	=	0,4 dB

Aus den durchgeführten bauakustischen Modellmessungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen

- Die Lage der Körperschallmoden des Prüflings beeinflusst die Schalldämmung vor allem bei tiefen Frequenzen und bei biegesteifen Bauteilen. Der Effekt hat keine ausgeprägte Richtung und führt im bewerteten Schalldämm-Maß zu einer Unsicherheit von ca. 0,5 dB. Diese Unsicherheit ist ein nennenswerter Beitrag zur Vergleichs-Standardabweichung des bewerteten Schalldämm-Maßes von 1,2 dB.
- Die Schalldämmung zwischen gleich großen Räumen ist systematisch geringer als zwischen verschieden großen Räumen. Bei tiefen Frequenzen ist der Effekt stärker ausgeprägt als bei höheren Frequenzen. Durch Bedämpfung der Luftschallfelder, Einbringen von Diffusoren oder Möbeln wird die Differenz der Schalldämmungen geringer, verschwindet jedoch nicht. Der systematische Unterschied beträgt für das bewertete Schalldämm-Maß ca. 1 dB.
- Werden Schalldämm-Maße zwischen zwei verschieden großen Räumen gemessen, so ist die Streuung der Werte wesentlich geringer als bei der Messung zwischen gleich großen Räumen. Bei Variation allein der Raumgeometrien

ergeben sich für das bewertete Schalldämm-Maß Standardabweichungen von ca. 0,2 dB bei verschiedenen und ca. 0,8 dB bei gleich großen Räumen. Da alle Ringversuche, die zu Vergleichs-Standardabweichungen führten, in Laboratorien nach [DIN EN ISO 140-1] ausgeführt wurden, sind in der Vergleichs-Standardabweichung von 1,2 dB lediglich die 0,2 dB für die verschiedenen Raumgeometrien enthalten. Demnach kann die Vergleichs-Standardabweichung für Messungen unter Baubedingungen mit

$$u_R(R_{W,Bau}) = \sqrt{1,2^2 - 0,2^2 + 0,8^2} \approx 1,4 \text{ dB} \quad (44)$$

abgeschätzt werden

- Je größer das betrachtete Bauteil ist, desto geringere Werte nimmt seine Luftschalldämmung an. Dies gilt für alle Frequenzen, ist bei tiefen Frequenzen jedoch stärker ausgeprägt als bei hohen. Bei einer Versechsfachung der Fläche wurde eine Verringerung des bewerteten Schalldämm-Maßes um ca. 4 dB festgestellt.

9. Vorschläge für die DIN 4109

Ganz wesentlich für die Überarbeitung der DIN 4109 ist nun die Frage, welche Schalldämm-Maß-Definitionen an welcher Stelle verwendet werden. Hierbei ist eine Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen anzustreben, was bei einem Vorgehen analog zur [DIN EN 12354-1] gegeben ist.

Ausgangspunkt für die Prognose ist die Labor-Schalldämmung der beteiligten Bauteile. Hierfür wird vorgeschlagen:

Das mittlere Labor-Schalldämm-Maß eines Bauteils bezeichnet den zehnfachen dekadischen Logarithmus des Verhältnisses von auftreffender zu transmittierter Schalleistung, ermittelt unter Anwendung der [DIN EN ISO 140-3], gemittelt über die Gesamtheit aller nach [DIN EN ISO 140-1] zulässigen Prüfstände, normiert auf Bezugsluftdruck und -temperatur. Die zugehörige Unsicherheit ist die Vergleichs-Standardabweichung, z.B. nach [DIN EN ISO 140-2].

Diese Definition beruht auf dem Verständnis, dass alle nach Norm erzielten Messergebnisse gültige Realisierungen der Messgröße im Sinne der Definition sind. Durch einmaliges Messen in einem Labor wird eine Stichprobe gezogen, die zur Schätzung des Erwartungswerts der Grundgesamtheit dient. Als Standard-Unsicherheit dieses Messwerts wird die Vergleichs-Standardabweichung herangezogen.

Aus den mittleren Laborwerten können die Schalldämmungen berechnet werden, die im Mittel am Bau erreicht werden. Hierfür wird aufgrund der vorliegenden Messergebnisse ein Abschlag von 1 dB für das bewertete Schalldämm-Maß vorgeschlagen. Damit ergibt sich als Definition:

Das mittlere in-situ-Schalldämm-Maß eines Bauteils bezeichnet den zehnfachen dekadischen Logarithmus des Verhältnisses von auftreffender zu transmittierter Schalleistung gemittelt über alle Bausituationen, wobei eine Nebenwegübertragung auszuschließen ist. Die zugehörige Unsicherheit ist die Vergleichs-Standardabweichung, z.B. nach [DIN EN ISO 140-2] zuzüglich eines Betrags, der der Tatsache größerer Streuungen unter Baubedingungen Rechnung trägt.

Die in-situ-Schalldämmungen der verschiedenen an der Schallübertragung beteiligten Bauteile werden dann durch die Prognosegleichungen zum Bau-Schalldämm-Maß kombiniert. Vorher müssten hier evtl. anzuwendende Korrekturen wie die Verlustfaktorkorrektur eingerechnet werden. Der Vorschlag für die Definition lautet dann:

Das Bau-Schalldämm-Maß bezeichnet den zehnfachen dekadischen Logarithmus des Verhältnisses von auftreffender zu transmittierter Schalleistung in einer konkreten Bausituation, wobei die Nebenwegübertragung eingeschlossen ist. Die zugehörige Unsicherheit für die Nachmessung ist die in-situ-Standardabweichung, z.B. nach [DIN EN ISO 140-2]. Die Unsicherheit des Prognosewerts ergibt sich aus der gewichteten Überlagerung der Unsicherheiten der berücksichtigten Bauteile zuzüglich einer Unsicherheit für das verwendete Prognoseverfahren.

Das Bau-Schalldämm-Maß kann dann nach den erforderlichen Umrechnungen mit dem Anforderungswert in Form einer bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz verglichen werden.

Eine weitere wesentliche Frage ist, welche Werte im Bauteilkatalog aufzuführen sind. Im Sinne der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise wäre es wünschenswert, die mittleren in-situ-Schalldämm-Maße aufzuführen. Diese Werte werden im Mittel am Bau erreicht und sind somit als Ausgangspunkt für alle nachfolgenden Berechnungen geeignet.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Marcel Jüttner, Marc Sommerfeld und Christian Bethke für die Durchführung der Modellmessungen sowie Prof. W. Scholl für die Initiierung und kritische Begleitung der Arbeiten.

Literatur

- [DIN 4109] *Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise*, November 1989
- [E DIN 4109-1] *Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Anforderungen*, Januar 2006
- [DIN EN ISO 140-1] *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Anforderungen an Prüfstände mit unterdrückter Flankenübertragung* (ISO 140-1:1997 + AM 1:2004); Deutsche Fassung EN ISO 140-1:1997 + A1:2004
- [DIN EN ISO 140-2] *Akustik; Messung der Schalldämmung in Bauten und von Bauteilen; Teil 2: Bestimmung, Überprüfung und Anwendung von Präzisionsdaten*, 1991-06
- [DIN EN ISO 140-3] *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen* (ISO 140-3:1995 + AM 1:2004); Deutsche Fassung EN 20140-3:1995 + A1:2004
- [DIN EN ISO 140-4] *Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 4: Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden* (ISO 140-4:1998); Deutsche Fassung EN ISO 140-4:1998
- [DIN EN 12354-1] *Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen* Deutsche Fassung EN 12354-1:2000
- [GUM] *Guide to the expression of uncertainties in measurement*. first edition, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland)
- [HCO95] D. Hoffmeyer, J. Christensen, H.S. Olesen: *Nordic Intercomparison in the Field of Acoustics, 3. Measurement: Field measurements of airborne sound insulation*. DELTA Acoustics & Vibration, Nordtest Project No 1023-92, 1995
- [Jüt05] Marcel Jüttner: *Untersuchung der Schalldämmung von Wänden bei tiefen Frequenzen anhand von Modellmessungen*. Diplomarbeit an der Hochschule Mittweida (FH)
- [KH05] U.E Kernen, O.A.B. Hassan: *Airborne Sound Insulation of a Thin Plate of Finite Dimensions*. Acta Acustica united with Acustica, Volume 91, Number 4, July/August 2005 , pp. 732-739(8)
- [KI07] Christoph Kling: *The use of scale models in building acoustics*. Accepted for publication in Building Acoustics, 2007
- [KO88] P. Kruppa, H.S. Olesen: *Intercomparison of laboratory sound insulation measurements on window panes*. BCR-Information Applied Metrology, Vertrags-Nr.1448/1/0/078/84/5-BCR-DK(30), 1988

- [La96] J. Lang: *Results from two round robins for building acoustic measurements in buildings*. (in German) UBA-BE-067, Report of the Umweltbundesamt, Vienna, Austria, 1996
- [LM86] L.C.J. van Luxemburg, H.J. Martin: *Repeatability and reproducibility of laboratory airborne sound insulation measurements: a Dutch precision experiment*. Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, Zoetermeer/Leidschendam, 1986
- [Po94] R. Pompoli: *Intercomparison of laboratory measurements of airborne sound insulation of walls*. Forschungsbericht zum EU-Projekt MAT1-CT-940054, 1994
- [Ra84] B. Rasmussen: *Measurement of Sound Reduction Index for Glazings in a Staggered Test Opening*. Forschungsbericht zum Nordtest Projekt 360-82
- [RB04] A. Rehfeld; C. Boitte: *Dispersion of sound transmission loss of glazings*. Proc. InterNoise 04, Prague, CDROM
- [RVGS91] J. Roland, M. Villenave, L. Gagliardini, D. Soubrier: *Intercomparison of measurements of noise attenuation by double glazed windows in frames*. ECC-BCR study, Contract No.. 3165/1/0/078/87/7-BCR-B(30), 1991
- [Sch96] H. Schmidt *Schalltechnisches Taschenbuch: Schwingungskompendium*. 5., grundlegend neu bearb. und erw. Aufl. – Düsseldorf : VDI-Verl., 1996
- [Sim05] C. Simmons: *Uncertainty of measured and calculated sound insulation in buildings – results of a round robin test*. Proceedings of the Symposium Managing Uncertainty in Noise Measurement and Prediction, Le Mans, France, 27.-29. June 2005
- [So06] Marc Sommerfeld: *Einfluss von Raumgeometrie und Schallabsorption auf die Schalldämmung (Messungen an Prüfstandsmodellen)*. Diplomarbeit an der TU Braunschweig, 2006
- [WB03] Wittstock, V.; Bethke, C.; *The role of static pressure and temperature in building acoustics*. Journal of Building Acoustics, Vol. 10, No 2, 2003
- [WB05] Wittstock, V.; Bethke, C. *On the uncertainties of sound level meters*. Proceedings of Forum Acusticum 05, CDROM, Budapest, 30.08.-02.09 2005
- [Wit04] Volker Wittstock: *Quantitative Kriterien für die Verwendbarkeit bauakustischer Messergebnisse und für die bauaufsichtliche Anerkennung von Prüfstellen für bauakustische Messungen nach den neuen europäischen Messnormen*. PTB-Bericht zu den DIBt-Projekten P 32-5-5-5.61-1010/02 und P 32-5-5.61.1-1043/03, Dezember 2004

- [Wit05] Wittstock, V.; *Uncertainties in building acoustics*. Proceedings of Forum Acusticum 05, CDROM, Budapest, 30.08.-02.09 2005
- [WW05] Weise, W., Wittstock, V.; *Using round robin test results for the accreditation of laboratories in the field of building acoustics in Germany*. Journal of Building Acoustics, Vol. 12, No 3, 2005

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin ist das natur- und ingenieurwissenschaftliche Staatsinstitut und die technische Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland für das Messwesen und Teile der Sicherheitstechnik. Die PTB gehört zum Dienstbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Sie erfüllt die Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien auf der Grundlage der DIN EN ISO/IEC 17025.

Zentrale Aufgabe der PTB ist es, die gesetzlichen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darzustellen, zu bewahren und - insbesondere im Rahmen des gesetzlichen und industriellen Messwesens – weiterzugeben. Die PTB steht damit an oberster Stelle der metrologischen Hierarchie in Deutschland.

Zur Sicherstellung der weltweiten Einheitlichkeit der Maße arbeitet die PTB mit anderen nationalen metrologischen Instituten auf regionaler europäischer Ebene in EUROMET und auf internationaler Ebene im Rahmen der Meterkonvention zusammen. Das Ziel wird durch einen intensiven Austausch von Forschungsergebnissen und durch umfangreiche internationale Vergleichsmessungen erreicht.

***The Physikalisch-Technische Bundesanstalt** (PTB) in Braunschweig and Berlin is the national institute for science and technology and the highest technical authority of the Federal Republic of Germany for the field of metrology and certain sectors of safety engineering. The PTB comes under the auspices of the Federal Ministry of Economics and Labour. It meets the requirements for calibration and testing laboratories as defined in the EN ISO/IEC 17025.*

It is the fundamental task of the PTB to realize and maintain the legal units in compliance with the International System of Units (SI) and to disseminate them, above all within the framework of legal and industrial metrology. The PTB thus is on top of the metrological hierarchy in Germany.

To ensure worldwide coherence of measures, the PTB cooperates with other national metrology institutes within EUROMET on the regional European level and on the international level within the framework of the Metre Convention. The aim is achieved by an intensive exchange of results of research work carried out and by comprehensive international comparison measurements.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Bundesallee 100
D-38116 Braunschweig

Abbestraße 2-12
D-10587 Berlin