

**Quantitative Kriterien für die Verwendbarkeit
bauakustischer Messergebnisse und für die
bauaufsichtliche Anerkennung von Prüfstellen
für bauakustische Messungen nach den neuen
europäischen Messnormen**

T 3066

T 3066

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.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6732-X

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

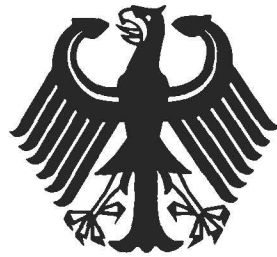
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de



Bericht

Report

**Quantitative Kriterien für die Verwendbarkeit bauakustischer
Messergebnisse und für die bauaufsichtliche Anerkennung von
Prüfstellen für bauakustische Messungen nach den neuen europäischen
Messnormen**

gefördert vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)
Az.: P 32-5-5.61-1010/02 und P 32-5-5.61.1-1043/03

Autor:

Dr.-Ing. Volker Wittstock

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin



Bericht

Report

Quantitative Kriterien für die Verwendbarkeit bauakustischer Messergebnisse und für die bauaufsichtliche Anerkennung von Prüfstellen für bauakustische Messungen nach den neuen europäischen Messnormen

gefördert vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)

Az.: P 32-5-5.61-1010/02 und P 32-5-5.61.1-1043/03

Kurztitel:

Anerkennungskriterien für bauakustische Messungen und Prüfstellen

Autor:

Dr.-Ing. Volker Wittstock

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 2(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 2(112) of report of 2004-11-10

Inhalt

VERWENDETE FORMELZEICHEN UND KONSTANTEN.....	4
1 EINLEITUNG	7
2 KONZEPTE ZUR BERÜCKSICHTIGUNG DER MESSUNSIKERHEIT.....	8
2.1. WAHRER WERT, ZUFÄLLIGE UND SYSTEMATISCHE ABWEICHUNGEN	8
2.2. STATISTIK IN DER MESSTECHNIK.....	8
2.2.1. Grundbegriffe, Voraussetzungen.....	8
2.2.2. Punktschätzungen.....	8
2.2.3. Intervallschätzungen	9
2.2.4. Erwartungstreue von Schätzungen.....	11
2.2.5. Vergleich zweier unabhängiger Messreihen	11
2.2.6. In der Bauakustik verwendete Unsicherheitsangaben.....	12
2.2.7. Ermittlung von Wiederhol- und Vergleichsgrenzen aus Ringversuchen	13
2.2.8. Vergleich zweier abhängiger Messreihen	13
2.2.9. Test auf Unabhängigkeit zweier Messreihen.....	14
2.2.10. Test auf Normalverteilung.....	14
2.2.11. Beispiel: Statistische Auswertungen des Kalksandstein-Ringversuchs	16
2.3. MESSUNSIKERHEIT NACH GUM	20
2.3.1. Motivation	20
2.3.2. Grundkonzept	21
2.3.3. Ermittlung der Unsicherheit der Eingangsgrößen	22
2.3.4. Erweiterte Messunsicherheit	23
2.4. DARSTELLUNG UND WEITERGABE VON EINHEITEN	23
2.5. PRINZIPIELLE ÜBERLEGUNGEN ZU UNSICHERHEITEN IN DER BAUAKUSTIK.....	24
3. VERGLEICHSMESSUNGEN	28
3.1. BISHERIGES VERFAHREN.....	28
3.2. VORSCHLAG FÜR EIN NEUES VERFAHREN BEI DER LUFTSCHALLDÄMMUNG	28
3.3. VORSCHLAG FÜR EIN NEUES VERFAHREN BEIM NORMTRITTSCHALLPEGEL	30
4. ANERKENNUNG BAUAKUSTISCHER PRÜFSTELLEN	34
4.1. ZIELSTELLUNG	34
4.2. ANERKENNUNG VON PRÜFSTELLEN NACH ISO 140-2	34
4.3. ANERKENNUNG VON PRÜFSTELLEN NACH WEISE.....	36
4.4. VERGLEICH DER VERFAHREN	37
4.5. ANERKENNUNG VON WANDPRÜFSTÄNDEN	37
4.6. ANERKENNUNG VON FENSTERPRÜFSTÄNDEN.....	41
4.7. OFFENE FRAGEN BEI DER ANERKENNUNG VON PRÜFSTÄNDEN	42
5. UNSICHERHEITEN BEIM LUFTSCHALLDÄMM-MAß.....	43
5.1. MODELL	43
5.2. ZUR UNSICHERHEIT DER ABSORPTIONSKORREKTUR	47
5.3. ZUR UNSICHERHEIT DER SCHALLDRUCKPEGELDIFFERENZ	54
5.4. ZUR UNSICHERHEIT BEI DEN VERGLEICHSMESSUNGEN AN DER MPA DORTMUND	55
5.5. ZUM EINFLUSS DER VERWENDETEN MESSGERÄTE	56
5.6. ZUR UNSICHERHEIT DER EINFALLENDEN SCHALLLEISTUNG.....	57
5.7. ZUR UNSICHERHEIT DER TRANSMITTIERTEN SCHALLLEISTUNG	59
5.8. ZUM EINFLUSS DER QUELLPOSITION	60
5.9. ZUM EINFLUSS VON LUFTDRUCK UND TEMPERATUR	61
5.10. ZUM EINFLUSS DES KANTENLÄNGENVERHÄLTNISSES UND DER PRÜFLINGSGRÖßE	65
5.11. ZUM EINFLUSS DER RANDEINSPANNUNG UND DER ENERGIEABLEITUNG	69
5.12. ZUM EINFLUSS DER MAXIMALSCHALLDÄMMUNG	72
5.13. ZUM EINFLUSS DER BAUTEILREPRODUZIERBARKEIT	74
5.12.1. Kalksandstein-Wände.....	74

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 3(109) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 3(109) of report of 2004-11-10

5.12.2. Fenster und Scheiben.....	79
5.12.3. Gipskarton-Ständerwände.....	82
5.12.4. Betondecken.....	84
5.14. KOMBINIERTE UNSICHERHEIT UND VERGLEICH MIT RINGVERSUCHEN SOWIE ISO 140-2	84
5.15. ZUR UNSICHERHEIT DER EINZAHLWERTE.....	87
6. KONSEQUENZEN AUS DEN UNSICHERHEITEN.....	88
6.1. DER BAUTEILKATALOG DER DIN 4109	88
6.2. ERMITTLUNG EINER BAUTEILSPEZIFISCHEN SCHALLDÄMMUNG	88
6.3. BESTIMMUNG EINER BAUTEILSPEZIFISCHEN PRODUKTSTREUUNG	91
6.4. ZUR BILDUNG VON BAUTEILGRUPPEN.....	93
6.5. FORTPFLANZUNG DER UNSICHERHEITEN BIS IN DIE PROGNOSEWERTE	95
6.6. ZUM VORHALTEMAß	100
6.7. NACHMESSUNGEN AM BAU	100
7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	102
DANKSAGUNG.....	103
LITERATUR.....	103
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	106
TABELLENVERZEICHNIS.....	109
ANHANG: VORSCHLAG ZUM UMGANG MIT DEN UNSICHERHEITEN BEI DER ERSTELLUNG EINES BAUTEILKATALOGS UND BEI PROGNOSEN.....	110

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 4(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 4(112) of report of 2004-11-10

Verwendete Formelzeichen und Konstanten

A	Äquivalente Absorptionsfläche im Empfangsraum
B	statischer Luftdruck
c	Schallgeschwindigkeit
c_i	Sensitivitätskoeffizient
$\text{CrD}_{100(1-\alpha/2)}$	kritische Differenz zwischen zwei Einzelwerten
d_i	gepaarte Differenzen (bei abhängigen Messreihen)
D_n	Prüfgröße für den Test auf Normalverteilung
f	Frequenz
F_0	Verteilungsfunktion der Normalverteilung
i, j	Laufindizes
k	Erweiterungsfaktor, Wellenzahl
K_{abs}	Korrektur für die Absorption im Empfangsraum
K_{Bau}	Korrektur für die Umrechnung von einer mittleren Laborsituation zu einer konkreten Bausituation
$K_{W1/2}$	Korrektur für den Unterschied zwischen den tatsächlichen und den über die Diffusfeldannahme gemessenen Leistungsanteilen im Sende- und Empfangsraum
K_{η}	Korrektur für die Energieableitung in den Prüfstand
K_{rand}	Korrektur für die Randeinspannung (fest / elastisch)
K_{form}	Korrektur für die Form (Kantenlängenverhältnis) des Prüflings
$K_{\text{größe}}$	Korrektur für die Größe (Flächeninhalt) des Prüflings
K_{max}	Korrektur für die Maximalschalldämmung des Prüfstands
K_{met}	Korrektur für den Einfluss von Luftdruck und Temperatur
K_{mitt}	Korrektur für die unvollkommene Volumenmittelung des Schalldruckpegels
K_{quellpos}	Korrektur für den Einfluss der Quellposition
K_{repro}	Korrektur für die Reproduzierbarkeit des Prüflings
K_{SLM}	Korrektur für die komplette Messkette vom Mikrofon bis zur Anzeige einschließlich der Kalibrierung
$K_{\text{stör}}$	Störgeräuschkorrektur
L_n	Prüfgröße für den Test auf Normalverteilung
$L_{p1/2}$	Gemessener mittlere Schalldruckpegel im Sende- und Empfangsraum
l	Kantenlänge
m	Zahl der an einer Schallübertragung beteiligten Bauteile

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 5(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 5(112) of report of 2004-11-10

n	Erforderliche Zahl von Messungen
n	Stichprobenumfang
n_x	Zahl der von einer neu anzuerkennenden Prüfstelle durchgeführten Messungen
n_i	Zahl der von der i -ten Prüfstelle durchgeführten Messungen
p	Schalldruck, Zahl der an einem Ringversuch teilnehmenden Stellen
P	Schalleistung
r	Wiederholgrenze
r_{xy}	Stichprobenkorrelation (Korrelationskoeffizient)
R	Vergleichgrenze
R_L	spezifische Gaskonstante für Luft
s	empirische Standardabweichung einer Stichprobe
s_p	empirische Standardabweichung von zwei Stichproben
S	Fläche des Prüflings
S_n	empirische Verteilungsfunktion
t	Testgröße zur Überprüfung der Unabhängigkeit
$t_{n,1-\alpha}$	Quantil der t -Verteilung zum Vertrauensniveau $1-\alpha$ bei n Freiheitsgraden
T_{rev}	Nachhallzeit
T_W	Prüfgröße nach WEISE
T	Temperatur
u	Standardmessunsicherheit
$u_{\alpha/2}$	Quantil der Normalverteilung zum Konfidenzniveau $1-\alpha$
U	erweiterte Messunsicherheit
V	Volumen des Empfangsraums
W	Schalleistung
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert einer Stichprobe
y	Schalldämmung
α	Irrtumswahrscheinlichkeit
μ	Erwartungswert einer normalverteilten Grundgesamtheit
ν	effektiver Freiheitsgrad
σ	Standardabweichung einer normalverteilten Grundgesamtheit
σ_L	Labor-Standardabweichung
σ_r	Wiederhol-Standardabweichung
σ_R	Vergleichs-Standardabweichung
$\chi^2_{n,1-\alpha}$	Quantil der χ^2 -Verteilung zum Vertrauensniveau $1-\alpha$ bei n Freiheitsgraden
ρ	Luftdichte

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 6(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 6(112) of report of 2004-11-10

κ	Adiabatexponent
η	Gesamtverlustfaktor
η_s	Strahlungs-Verlustfaktor
η_i	innerer Verlustfaktor
η_{ab}	Ableitungs-Verlustfaktor

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 7(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 7(112) of report of 2004-11-10

1 Einleitung

Bauakustische Messungen werden aus unterschiedlichen Motivationen heraus durchgeführt. Labormessungen dienen zur Charakterisierung der schalltechnischen Eigenschaften einzelner Bauteile, wobei das Messergebnis frei von systematischen Einflüssen der Prüfstandseigenschaften, der Auswahl der Messgeräte oder der verwendeten Messmethode und somit eine tatsächliche Bauteilbeschreibung sein sollte. Stammt ein Messergebnis aus einer Prüfstelle für die Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse, so darf es für Prognoserechnungen für den Nachweis des Schallschutzes im bauaufsichtlichen Verfahren herangezogen werden. Um die Einhaltung hoher Qualitätsstandards in diesen Prüfstellen sicherzustellen, müssen neu gebaute Prüfstände von der Bauaufsicht anerkannt werden. Zudem wird von Mitarbeitern dieser Prüfstellen gefordert, dass sie an regelmäßig in der PTB stattfindenden Vergleichsmessungen erfolgreich teilnehmen.

Messungen am Bau verfolgen nun das Ziel, den tatsächlich vorliegenden Schallschutz zu ermitteln und ggf. die Ursachen für Diskrepanzen zwischen Planungs- und Messwerten aufzufinden. Solche Messungen werden von sachverständigen Prüfstellen für die Durchführung von Güteprüfungen nach DIN 4109 durchgeführt, die in einer vom Verband der Materialprüfungsämter geführten Liste verzeichnet sind. Auch von diesen Prüfstellen wird gefordert, dass sie regelmäßig an Vergleichsmessungen teilnehmen, die bei der Materialprüfanstalt Dortmund stattfinden. Der Anschluss an die PTB-Ergebnisse wird über eine PTB-Messung an der MPA Dortmund sichergestellt.

Insgesamt kann das Niveau der Qualitätssicherung in der bauakustischen Messtechnik damit als recht hoch betrachtet werden. Ein wesentlicher noch verbesserungswürdiger Punkt betrifft jedoch die Fragen der Messunsicherheit, die oft gar nicht oder nicht mit der erforderlichen Transparenz berücksichtigt werden. Um hier wesentliche Fortschritte zu erzielen, wurden die in diesem Bericht dargestellten Untersuchungen initiiert. Im Mittelpunkt steht dabei die Entwicklung quantitativer Kriterien für die Anerkennung von Prüfständen und Messergebnissen. Solche Kriterien werden aktuell benötigt, um die derzeit laufende Überarbeitung des Bauteilkatalogs der DIN 4109 nebst der erforderlichen Sicherheitszuschläge auf eine solide Basis zu stellen und die Anerkennung bzw. auch Ablehnung von Prüfstellen so weit abzusichern, dass die Entscheidung einer juristischen Überprüfung standhält.

Um Verwechslungen zwischen der Vergleichsgrenze und der Schalldämmung zu vermeiden, wurde die Schalldämmung generell mit y bezeichnet.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 8(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 8(112) of report of 2004-11-10

2 Konzepte zur Berücksichtigung der Messunsicherheit

2.1. Wahrer Wert, zufällige und systematische Abweichungen

Das heute in der Akustik verwendete Unsicherheitskonzept geht davon aus, dass es einen wahren Wert gibt, der die untersuchte Eigenschaft des Messobjekts exakt quantifiziert. Bei Messungen kommt es jedoch zu Abweichungen zwischen dem Messergebnis und dem wahren Wert, die einerseits systematischer und andererseits zufälliger Natur sein können. Systematische Abweichungen werden dabei durch Untersuchung der zugrundeliegenden physikalischen Effekte erfasst und das Messergebnis wird entsprechend korrigiert. Die verbleibenden Messabweichungen werden dann zu zufälligen Abweichungen erklärt und mit Hilfe statistischer Methoden beschrieben. Ein kurzer Abriss der für die Akustik wichtigsten Methoden zur Erfassung solcher Abweichungen findet sich im folgenden Abschnitt.

2.2. Statistik in der Messtechnik

2.2.1. Grundbegriffe, Voraussetzungen

Alle möglichen Realisierungen X_i einer Zufallsgröße X werden als Grundgesamtheit bezeichnet. Je nach Art der Größe kann die Grundgesamtheit durch verschiedene Verteilungsfunktionen beschrieben werden, deren Parameter die Grundgesamtheit quantitativ beschreiben.

Bei Messungen geht es nun im Kern darum, auf der Basis von Stichproben Aussagen über die Grundgesamtheit zu treffen. Werden dabei Aussagen über einzelne Größen, wie z.B. den Mittelwert getroffen, handelt es sich um Punktschätzungen. Werden hingegen Aussagen darüber getroffen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Parameter innerhalb eines Intervalls liegt, so handelt es sich um Intervallschätzungen.

Die im Folgenden dargestellten statistischen Verfahren setzen voraus, dass die Grundgesamtheit einer Normalverteilung gehorcht, was in vielen technischen Anwendungen ohne weitere Überprüfung vorausgesetzt wird. Eine Begründung hierfür liefert das Gesetz der großen Zahl, das besagt, dass eine Summe aus vielen beliebig verteilten Einflussgrößen selbst normal verteilt ist. Solange die insgesamt beobachtete statistische Messabweichung von einer Vielzahl ähnlich großer Effekte verursacht wird, sollte sie also mit einer Normalverteilung gut beschreibbar sein.

Es gibt jedoch auch die Möglichkeit, mit Hilfe statistischer Tests eine Aussage zu treffen, ob eine Stichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammt. Für die in der Akustik meist vorliegenden kleineren Stichprobengrößen ist z.B. der Kolmogorow-Smirnow-Test geeignet (siehe unten und [Ha86]).

2.2.2. Punktschätzungen

Als Schätzwert für den Erwartungswert μ einer normalverteilten Grundgesamtheit wird der arithmetische Mittelwert der Stichprobe vom Umfang n

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 9(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 9(112) of report of 2004-11-10

und als Schätzwert für die Standardabweichung σ die empirische Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

verwendet. Für die Schätzung weiterer Parameter und weitergehende Erläuterungen sei auf die Fachliteratur verwiesen (z.B. [Ha86]).

2.2.3. Intervallschätzungen

Die wichtigsten Intervallschätzungen beziehen sich auf die sogenannten Konfidenzintervalle, die ausgehend von den verfügbaren Informationen Aussagen darüber gestatten, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein geschätzter Parameter innerhalb eines Intervalls liegt. Je nach Art der verfügbaren Informationen sind hier unterschiedliche Fälle zu betrachten.

Ist die Standardabweichung der Grundgesamtheit σ z.B. aus Ringversuchen bekannt, so kann ausgehend von einer Stichprobe des Umfangs n für den gesuchten Mittelwert der Grundgesamtheit μ folgendes Toleranzintervall

$$\left[\bar{x} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} u_{\alpha/2} ; \bar{x} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} u_{\alpha/2} \right] \quad (2.3)$$

angegeben werden. Der Wert $u_{\alpha/2}$ ist dabei das Quantil der Normalverteilung zum Konfidenzniveau $1-\alpha$, das sich aus der frei gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit α ergibt. Es wird üblicherweise aus Tabellen abgelesen. In der akustischen Messtechnik wird häufig ein Konfidenzniveau von 95% gewählt, so dass sich

$$u_{5/2} = 1,96 \approx 2 \quad (2.4)$$

ergibt. Dies bedeutet, dass mit 95% Wahrscheinlichkeit der gesuchte Mittelwert innerhalb des angegebenen Intervalls liegt. Wird zudem nur eine Messung durchgeführt folgt mit

$$n = 1 \quad (2.5)$$

das in der Akustik oft verwendete Intervall:

$$[x - 2\sigma ; x + 2\sigma]. \quad (2.6)$$

Ist die Standardabweichung der Grundgesamtheit σ hingegen nicht bekannt, so ergibt sich wiederum ausgehend von einer Stichprobe des Umfangs n das Konfidenzintervall für den Mittelwert der Grundgesamtheit zu

$$\left[\bar{x} - \frac{t_{n-1;1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} s ; \bar{x} + \frac{t_{n-1;1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} s \right]. \quad (2.7)$$

Hierbei ist $t_{n-1;1-\alpha/2}$ das Quantil der t -Verteilung bei $n-1$ Freiheitsgraden zum Konfidenzniveau $1-\alpha$. Die Anzahl der Freiheitsgrade einer statistischen Kenngröße ist die Anzahl der unabhängigen Beobachtungswerte, die deren Berechnung zugrunde liegt, minus der Anzahl der in die Berechnung eingehenden zusätzlichen Parameter, die ebenfalls auf den Beobachtungswerten basieren [Ma04].

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 10(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 10(112) of report of 2004-11-10

Für große Zahlen n nähert sich das Quantil der t -Verteilung dem Quantil der Normalverteilung an, so dass sich in diesem Grenzfall das in Gl. (2.3) angegebene Konfidenzintervall ergibt.

Neben Konfidenzintervallen für den Mittelwert kann auch ein solches für die Standardabweichung interessieren. Bei unbekanntem Mittelwert der Grundgesamtheit μ ergibt sich ein solches Intervall zu

$$\left[s \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi_{n-1,1-\alpha/2}^2}} ; s \sqrt{\frac{(n-1)}{\chi_{n-1,\alpha/2}^2}} \right]. \quad (2.8)$$

wobei $\chi_{n-1,\alpha/2}^2$ bzw. $\chi_{n-1,1-\alpha/2}^2$ die Quantile der χ^2 -Verteilung zum Konfidenzniveau $1-\alpha$ bei $n-1$ Freiheitsgraden sind.

Bei manchen Anwendungen interessiert ein Intervall, in dem der Mittelwert einer zukünftigen Stichprobe des Umfangs n_2 mit Trefferwahrscheinlichkeit $1-p$ liegt. Ein solches Intervall heißt Prognoseintervall und berechnet sich auf Grundlage einer vorliegenden Stichprobe des Umfangs n_1 mit Mittelwert \bar{x} und empirischer Standardabweichung s zu

$$\left[\bar{x} - t_{n-1;1-p/2} s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} ; \bar{x} + t_{n-1;1-p/2} s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right]. \quad (2.9)$$

Davon deutlich verschieden ist ein Intervall, das mindestens $p\%$ der zukünftigen Beobachtungen enthält. Bei diesen sogenannten Toleranzintervallen ist zu unterscheiden, ob die Standardabweichung der Grundgesamtheit bekannt ist oder ob lediglich ein Schätzwert auf der Grundlage einer Stichprobe (Umfang n , Mittelwert \bar{x} , empirischer Standardabweichung s) vorliegt. Im ersteren Fall ist das gesuchte Toleranzintervall

$$\left[\bar{x} - l s ; \bar{x} + l s \right], \quad (2.10)$$

wobei der Toleanzfaktor l aus der Gleichung

$$\phi\left(\frac{u_{1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} + 1\right) - \phi\left(\frac{u_{1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} - 1\right) = p, \quad (2.11)$$

bestimmt wird, was mit Hilfe der Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung $\phi(x)$ erfolgen kann.

Im letzteren Fall dagegen ergibt sich das Toleranzintervall zu

$$\left[\bar{x} - \lambda s ; \bar{x} + \lambda s \right], \quad (2.12)$$

wobei die Toleranzfaktoren λ in Abhängigkeit von der minimalen Trefferwahrscheinlichkeit p , der Sicherheitswahrscheinlichkeit $1-\alpha$ und des Stichprobenumfangs n z.B. in [Ha86, S. 165] vertafelt sind.

Neben den hier angegebenen zweiseitig begrenzten Intervallen gibt es auch einseitig begrenzte Intervalle, die z.B. bei der Nachmessung von Grenzwerten eine Rolle spielen. Für ausführlichere Darstellungen wird jedoch auf die Fachliteratur verwiesen wird (z.B. [Ha86]).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 11(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 11(112) of report of 2004-11-10

2.2.4. Erwartungstreue von Schätzungen

Eine wichtige Anforderung an Schätzungen besteht darin, dass sie erwartungstreu sein sollten. Dies bedeutet anschaulich, dass kein systematischer Zusammenhang zwischen dem Stichprobenumfang n und dem Schätzergebnis bestehen darf. Arithmetischer Mittelwert und empirische Standardabweichung liefern erwartungstreue Schätzwerte für den Erwartungswert und die Standardabweichung der Grundgesamtheit.

In der akustischen Messtechnik, zumal in Messnormen, sind jedoch auch häufig Aussagen der Art „Der Unterschied zwischen maximalem und minimalem gemessenen Schalldruckpegel darf nicht größer als 5 dB sein.“ anzutreffen. Hierzu muss kritisch angemerkt werden, dass eine solche Differenz bei den in der Praxis angetroffenen Verteilungen der Grundgesamtheiten nicht aufgrund einer Stichprobe erwartungstreu geschätzt werden kann, da mit zunehmender Stichprobengröße diese Differenz systematisch anwächst. Hier sollte daher auf eine geeignete Intervallschätzung zurückgegriffen werden.

2.2.5. Vergleich zweier unabhängiger Messreihen

Ist die Standardabweichung beider Stichproben unbekannt aber gleich, so ergibt sich mit der empirischen Standardabweichung der beiden Stichproben [Ha86, S. 508]

$$s_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} x_{1i}^2 - \frac{1}{n_1} \left(\sum_{i=1}^{n_1} x_{1i} \right)^2 + \sum_{j=1}^{n_2} x_{2j}^2 - \frac{1}{n_2} \left(\sum_{j=1}^{n_2} x_{2j} \right)^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (2.13)$$

ein Konfidenzintervall für die Abweichung der Mittelwerte der beiden Grundgesamtheiten

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - t_{n_1+n_2-2; 1-\alpha/2} s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} < \mu_1 - \mu_2 < \bar{x}_1 - \bar{x}_2 + t_{n_1+n_2-2; 1-\alpha/2} s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (2.14)$$

Falls beide Messreihen aus der gleichen Grundgesamtheit gewonnen wurden, gilt

$$\mu_1 - \mu_2 = 0, \quad (2.15)$$

woraus sich für die Abweichung der Mittelwerte beider Stichproben folgendes Konfidenzintervall ergibt

$$-t_{n_1+n_2-2; 1-\alpha/2} s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} < \bar{x}_2 - \bar{x}_1 < t_{n_1+n_2-2; 1-\alpha/2} s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}. \quad (2.16)$$

Für Messreihen mit $n_2 = 1$ ergibt sich als empirische Standardabweichung

$$s_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} x_{1i}^2 - \frac{1}{n_1} \left(\sum_{i=1}^{n_1} x_{1i} \right)^2}{n_1 - 1} = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (x_{1i} - \bar{x}_1)^2 = s_1^2 \quad (2.17)$$

die empirische Standardabweichung der ersten Messreihe. Für das Konfidenzintervall bedeutet dies:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 12(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 12(112) of report of 2004-11-10

$$-t_{n_1-1;1-\alpha/2} s_1 \sqrt{\frac{1}{n_1} + 1} < x_2 - \bar{x}_1 < t_{n_1-1;1-\alpha/2} s_1 \sqrt{\frac{1}{n_1} + 1}. \quad (2.18)$$

Sind hingegen die Standardabweichungen σ_1 und σ_2 bekannt, so lautet das Konfidenzintervall für die Abweichung der Mittelwerte der beiden Grundgesamtheiten [Ha89, S. 506]

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - u_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} < \mu_1 - \mu_2 < \bar{x}_1 - \bar{x}_2 + u_{1-\alpha/2} \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}. \quad (2.19)$$

Als Spezialfall ergibt sich hier für die Differenz aus zwei Einzelwerten der gleichen Grundgesamtheit mit

$$\mu_1 = \mu_2 \quad (2.20)$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \quad (2.21)$$

$$n_1 = n_2 = 1 \quad (2.22)$$

das Konfidenzintervall

$$-u_{1-\alpha/2} \sqrt{2} \sigma < x_2 - x_1 < u_{1-\alpha/2} \sqrt{2} \sigma. \quad (2.23)$$

Die Größe

$$\text{CrD}_{100(1-\alpha/2)} = u_{1-\alpha/2} \sqrt{2} \sigma \quad (2.24)$$

bezeichnet hierbei die kritische Differenz zwischen zwei Messwerten, die nur in 100 $(1-\alpha/2)$ % der Fälle überschritten wird.

2.2.6. In der Bauakustik verwendete Unsicherheitsangaben

In der bauakustischen Messtechnik wird heute ein Vertrauensniveau von 95% verwendet [ISO 140-2], was ausgehend von Gl. (2.24) mit

$$u_{1-0,05/2} = 1,96 \approx 2 \quad (2.25)$$

zur Vergleichsgrenze

$$R = 2\sqrt{2} \sigma_R \quad (2.26)$$

und zur Wiederholgrenze

$$r = 2\sqrt{2} \sigma_r \quad (2.27)$$

führt. Diese Werte bezeichnen demnach die kritische Differenz zweier aus der selben Grundgesamtheit stammender Einzelwerte, die in 95% der Fälle nicht überschritten werden. Bei der Wiederholgrenze müssen die beiden Werte dabei unter Wiederholbedingungen (siehe ISO 140-2) und bei der Vergleichsgrenze unter Vergleichsbedingungen gewonnen worden sein.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 13(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 13(112) of report of 2004-11-10

2.2.7. Ermittlung von Wiederhol- und Vergleichsgrenzen aus Ringversuchen

Wieder- und Vergleichsgrenze werden üblicherweise unter Verwendung des in [ISO 5725-2] angegebenen Verfahrens aus Ringversuchsergebnissen berechnet. Ausgangspunkt sind dabei Ergebnisse aus insgesamt p Laboratorien in denen je n Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden. Berechnet wird zunächst der Mittelwert \bar{y}_i und die empirische Wiederholstandardabweichung s_i in jedem Labor. Der Mittelwert dieser empirischen Standardabweichungen

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p s_i^2} \quad (2.28)$$

ist dann die im Rahmen des Ringversuchs ermittelte Wiederholstandardabweichung, aus der nach Gl. (2.27) die Wiederholgrenze ermittelt werden kann.

Die Laborstandardabweichung, die die zwischen den teilnehmenden Laboratorien auftretenden Abweichungen charakterisiert, berechnet sich aus den Labormittelwerten \bar{y}_i und dem Gesamtmittelwert \bar{y} gemäß

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (\bar{y}_i - \bar{y})^2 - \frac{\sigma_r^2}{n}} \quad (2.29)$$

mit

$$\bar{y} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \bar{y}_i^2}, \quad (2.30)$$

wobei hier noch zusätzlich der durch die Wiederholstreuungen verursachte Anteil berücksichtigt werden muss. Die Vergleichsstandardabweichung des Ringversuchs ist dann

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_r^2}, \quad (2.31)$$

woraus die Vergleichsgrenze nach Gl. (2.26) berechnet werden kann.

2.2.8. Vergleich zweier abhängiger Messreihen

Liegen zwei Messreihen des gleichen Umfangs n vor, bei denen eine paarweise Zuordnung der Messwerte möglich ist (z.B. beim Vergleich zweier Spektren die Werte bei gleicher Frequenz) und liegt zusätzlich eine Abhängigkeit der Messreihen vor, so werden zweckmäßigerweise die gepaarten Differenzen

$$d_i = x_{1i} - x_{2i} \quad (2.32)$$

betrachtet. Diese Differenzen stammen aus einer Normalverteilung, so dass sie in der gleichen Weise wie einzelne Messreihen statistisch ausgewertet werden können (vgl. Kap. 2.2.2 und 2.2.3). Beispielhaft seien hier nur Konfidenzintervalle für den Mittelwert der gepaarten Differenzen betrachtet. Ist die Standardabweichung der gepaarten Differenzen σ_d bekannt, so ergibt sich ein Vertrauensintervall für den Mittelwert der gepaarten Differenzen zu

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 14(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 14(112) of report of 2004-11-10

$$\left[\bar{d} - \frac{\sigma_d}{\sqrt{n}} u_{1-\alpha/2} ; \bar{d} + \frac{\sigma_d}{\sqrt{n}} u_{1-\alpha/2} \right] \quad (2.33)$$

Im Fall der unbekannt Standardabweichung wird die empirische Standardabweichung der gepaarten Differenzen verwendet

$$s_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (2.34)$$

um das Konfidenzintervall

$$\left[\bar{d} - \frac{s_d}{\sqrt{n}} t_{n-1,1-\alpha/2} ; \bar{d} + \frac{s_d}{\sqrt{n}} t_{n-1,1-\alpha/2} \right] \quad (2.35)$$

zu berechnen.

2.2.9. Test auf Unabhängigkeit zweier Messreihen

Voraussetzung für die Vergleiche zweier Messreihen ist die Kenntnis über etwaige Abhängigkeiten zwischen diesen. Bei normalverteilten Zufallsvariablen X und Y kann zur Überprüfung der Unabhängigkeit eine Testgröße

$$t = \frac{r_{xy} \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \quad (2.36)$$

mit der Stichprobenkorrelation (auch Korrelationskoeffizient)

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^2 - n \bar{x}^2) \sum_{i=1}^n (y_i^2 - n \bar{y}^2)}} \quad (2.37)$$

verwendet werden. Die Hypothese der Unabhängigkeit wird verworfen, falls sich die Ungleichung

$$|t| > t_{n-2;1-\alpha/2} \quad (2.38)$$

bewahrheitet, wobei wie üblich α die Irrtumswahrscheinlichkeit ist.

2.2.10. Test auf Normalverteilung

Da in der Bauakustik fast ausschließlich Pegelgrößen, d.h. logarithmierte Größen verwendet werden, können normalverteilte Grundgesamtheiten nicht ohne Weiteres vorausgesetzt werden. Es erscheint daher angebracht, einen Test auf Vorliegen von Normalverteilung hier mit vorzustellen.

Beim Kolmogorow-Smirnow-Test, der bereits ab einer Stichprobengröße von $n=5$ angewandt werden kann, wird die empirische Verteilungsfunktion der Stichprobe $S_n(x)$ mit der theoretisch zu erwartenden der Normalverteilung $F_0(x)$ verglichen (Bild 2.1).

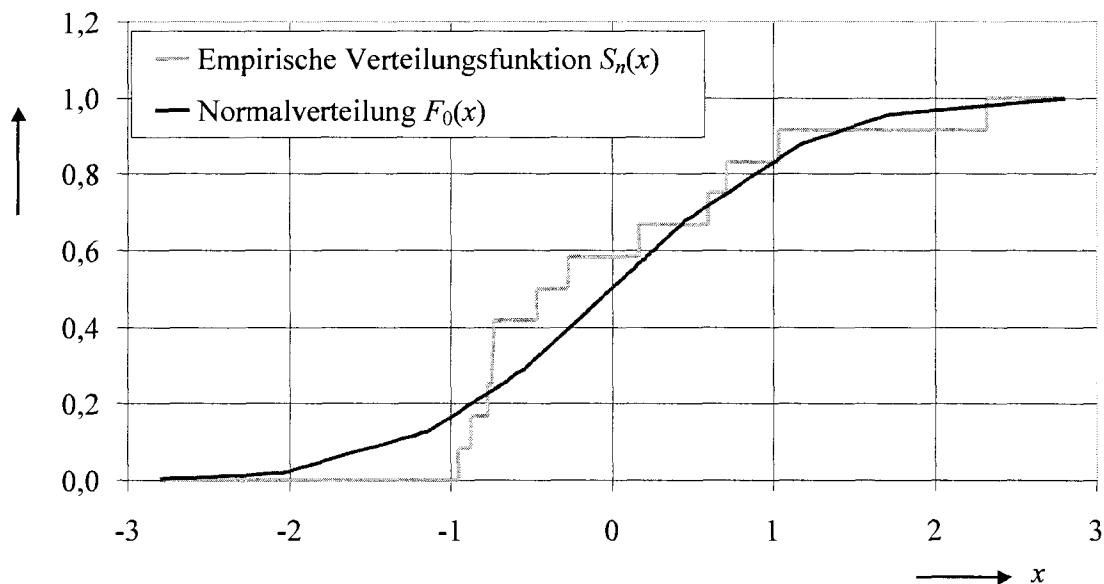


Bild 2.1 Veranschaulichung des Kolmogorow-Smirnow-Tests

Die Hypothese, dass die Stichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit mit bekanntem Erwartungswert μ und bekannter Standardabweichung σ stammt, wird zum Niveau α verworfen, falls

$$\sqrt{n} D_n \geq d_{n,1-\alpha} \quad (2.39)$$

ist. Die Quantile $d_{n,1-\alpha}$ sind z.B. in [Ha89, S. 184] tabelliert und die Prüfgröße D_n bezeichnet den maximalen Abstand zwischen den beiden Kurven in Bild 2.1

$$D_n = \sup |S_n(x) - F_0(x)|. \quad (2.40)$$

Sind Erwartungswert und Standardabweichung der Grundgesamtheit nicht bekannt, so sind sie aus der Stichprobe zu schätzen. Die Hypothese auf Vorliegen einer Normalverteilung wird nun verworfen, wenn

$$\sqrt{n} L_n \geq l_{n,1-\alpha} \quad (2.41)$$

mit

$$L_n = \sup \left| S_n(x) - \phi\left(\frac{x - \bar{x}}{s}\right) \right|, \quad (2.42)$$

den z.B. in [Ha89, S. 185] tabellierten Quantilen $l_{n,1-\alpha}$ und der Standardnormalverteilung $\phi(\mu = 0, \sigma = 1)$.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 16(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 16(112) of report of 2004-11-10

2.2.11. Beispiel: Statistische Auswertungen des Kalksandstein-Ringversuchs

Zur Veranschaulichung der vorgenannten statistischen Zusammenhänge sei hier als Beispiel die Schalldämmung einer Kalksandsteinwand betrachtet ([Me00], fester Einbau, nicht auf Verlustfaktor normiert). Es liegen $n = 12$ Einzelwerte pro Terz vor (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1 Stichprobe für die Beispielrechnung

f/Hz	Terz-Schalldämmmaße in dB											
50	36,8	40,9	42,2	34,6	37,4	29,9	40,8	41,1	41,1	48,3	45,7	40,7
63	38,6	44,2	48,3	49,0	33,9	33,7	34,2	43,7	48,5	31,4	46,2	43,4
80	40,5	43,4	43,1	41,9	39,9	37,2	40,5	43,9	41,0	35,7	44,3	40,4
100	43,9	47,2	47,7	43,9	41,6	45,2	42,4	43,5	41,0	34,8	45	42,8
125	40,5	47,4	42,8	41,9	41,6	42,9	41,8	41,8	41,6	42,4	41,5	44,8
160	39,9	45,9	46,7	41,7	41,5	43,5	39,7	44,2	43,1	42,0	44,1	44,8
200	40,1	47,8	44,9	40,8	43,5	42,3	39,7	39,5	40,7	40,6	43,6	42,5
250	42,6	50,3	47,1	43,0	46,0	43,3	42,1	42,6	42,3	43,8	44,9	46,2
315	45,5	52,3	50,0	44,8	49,0	49,2	44,0	46,7	45,1	46,1	47,8	50,6
400	47,8	54,4	52,9	49,3	51,3	51,8	47,0	48,9	48,0	48,5	50,5	52,4
500	50,5	56,9	54,8	51,5	54,8	55,8	49,7	51,9	50,1	51,9	53,4	55,4
630	53,0	58,8	57,0	55,7	57,7	58,0	52,9	53,3	54,1	55,1	55,6	58,1
800	55,5	61,3	59,6	57,7	59,6	60,1	55,5	55,2	55,9	57,2	57,9	60,4
1000	57,7	63,2	61,3	59,6	61,4	61,4	57,4	58,2	58,7	59,1	59,6	62
1250	59,6	64,8	63,2	61,7	64,0	63,8	59,7	60,9	60,6	61,3	61,9	63,9
1600	62,0	66,1	65,1	63,0	65,1	65,1	61,9	61,7	62,2	63,0	63,7	64,9
2000	65,2	67,4	66,2	65,2	66,0	66,5	64,0	64,1	64,2	65,1	65,6	66
2500	66,7	68,6	67,1	67,1	67,3	68,1	65,9	65,6	65,9	66,5	67,4	66,9
3150	69,2	69,1	68,6	69,0	68,3	69,8	67,3	67,2	67,7	67,6	68,5	69,1
4000	70,1	70,7	70,0	70,4	69,5	70,4	69,1	68,4	69,2	69,3	69,6	69,3
5000	64,4	66,2	65,1	65,9	64,2	64,1	64,4	63,9	65,2	64,8	69,4	63,8

Mittelwerte, Standardabweichungen sowie verschiedene Intervalle finden sich in Tabelle 2.2. Die Konfidenzintervalle für die Standardabweichung der Grundgesamtheit (Gl. (2.8)), wurden mit den χ^2 -Quantilen,

$$\chi_{n-1;1-\alpha/2}^2 = \chi_{n-1;0,975}^2 = 21,92 \quad (2.43)$$

$$\chi_{n-1;\alpha/2}^2 = \chi_{n-1;0,025}^2 = 3,816, \quad (2.44)$$

abgelesen aus [Ha89, S. 893], berechnet.

Die Konfidenzintervalle, die den Erwartungswert der Grundgesamtheit mit 95% Wahrscheinlichkeit beinhalten, ergeben sich aus Gl. (2.7) mit dem t -Quantil abgelesen aus [Ha89, S. 892]

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 17(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 17(112) of report of 2004-11-10

$$t_{n-1;1-\alpha/2} = t_{11;0,975} = 2,201. \quad (2.45)$$

Für die Prognoseintervalle, die die Mittelwerte einer zukünftigen Stichprobe des Umfangs $m = 5$ beinhalten (Gl. (2.9) fanden die gleichen Quantile Anwendung. Der Parameter λ zur Berechnung der Toleranzintervalle (Gl. (2.12)), die 95% der zukünftigen Beobachtungen beinhalten, wurde aus [Ha89, S. 165] abgelesen

$$\lambda = 3,16. \quad (2.46)$$

Die Ergebnisse bei 500 Hz seien beispielhaft näher betrachtet. Das Konfidenzintervall für die Standardabweichung ist mit einer Spanne von ca. 2,5 dB recht groß. Ursache hierfür ist der geringe Stichprobenumfang von $n = 12$. Das Konfidenzintervall für den Erwartungswert der Grundgesamtheit liegt mit einer Spanne von 3 dB hingegen in der erwarteten Größenordnung. Interessant ist, dass die Spannweite des Prognoseintervalls, das den Mittelwert einer zukünftigen Stichprobe des Umfangs $m = 5$ enthält, mit 5 dB wesentlich größer ist. Am größten ist jedoch das Toleranzintervall, das bei einer Spanne von 15 dB mit 95% Wahrscheinlichkeit 95% der zukünftigen Messwerte beinhaltet.

Tabelle 2.2 verschiedene Intervalle für den Ringversuch, $\alpha = 0,05$,

f Hz	Stabw. dB	Konf.-Int. für Stabw. dB		Mittel- wert dB	Konf.-Int. für Mittelwert dB		Prog.-Int. für Mittelw. ($m = 5$) dB		Tol.-Int. $p = 0,95$ dB	
50	4,83	3,42	8,21	39,9	36,9	43,0	34,3	45,6	24,7	55,2
63	6,56	4,65	11,14	41,2	37,1	45,4	33,6	48,9	20,5	62,0
80	2,61	1,85	4,44	41,0	39,3	42,6	37,9	44,0	32,7	49,2
100	3,35	2,37	5,69	43,3	41,1	45,4	39,3	47,2	32,7	53,8
125	1,85	1,31	3,14	42,6	41,4	43,8	40,4	44,7	36,7	48,4
160	2,21	1,57	3,75	43,1	41,7	44,5	40,5	45,7	36,1	50,1
200	2,48	1,76	4,21	42,2	40,6	43,7	39,2	45,1	34,3	50,0
250	2,48	1,76	4,21	44,5	42,9	46,1	41,6	47,4	36,7	52,4
315	2,64	1,87	4,48	47,6	45,9	49,3	44,5	50,7	39,3	55,9
400	2,33	1,65	3,96	50,2	48,7	51,7	47,5	53,0	42,9	57,6
500	2,44	1,73	4,14	53,0	51,5	54,6	50,2	55,9	45,3	60,7
630	2,13	1,51	3,62	55,8	54,4	57,1	53,3	58,3	49,0	62,5
800	2,17	1,54	3,68	58,0	56,6	59,4	55,5	60,5	51,1	64,8
1000	1,86	1,32	3,15	60,0	58,8	61,1	57,8	62,1	54,1	65,8
1250	1,78	1,26	3,02	62,1	61,0	63,2	60,0	64,2	56,5	67,7
1600	1,55	1,10	2,64	63,6	62,7	64,6	61,8	65,5	58,7	68,6
2000	1,04	0,74	1,76	65,5	64,8	66,1	64,2	66,7	62,2	68,7
2500	0,90	0,64	1,53	66,9	66,3	67,5	65,9	68,0	64,1	69,8
3150	0,85	0,60	1,43	68,4	67,9	69,0	67,4	69,4	65,8	71,1
4000	0,66	0,47	1,12	69,7	69,2	70,1	68,9	70,4	67,6	71,7
5000	1,54	1,09	2,61	65,1	64,1	66,1	63,3	66,9	60,3	70,0

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 18(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 18(112) of report of 2004-11-10

Als nächstes soll nun überprüft werden, ob ein in einem weiteren Labor erzielter Messwert zur bereits vorliegenden Datenmenge „passt“. Dazu wird überprüft, ob die Ungleichung (2.18) erfüllt ist:

$$|x_2 - \bar{x}_1| < t_{n_1-1; 1-\alpha/2} s_1 \sqrt{\frac{1}{n_1} + 1}. \quad (2.47)$$

Wie man sieht (Tabelle 2.3), ist die Bedingung nur bei 4 kHz verletzt, d.h. die nachträglich hinzugefügte Einzelmessung zeigt bei allen anderen Frequenzen keine signifikante Abweichung zu den bereits vorliegenden Ergebnissen.

Tabelle 2.3 Überprüfung der hinzugefügten Messreihe

f/Hz	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630
x_2	34,0	32,3	44,0	40,8	45,1	42,9	42,6	45,6	50,2	53,0	55,5	58,7
$ x_2 - \bar{x}_1 $	5,9	9,0	3,0	2,5	2,5	0,2	0,4	1,1	2,6	2,8	2,4	2,9
$t_{11;0,95} s_1 \sqrt{\frac{1}{12} + 1}$	11,1	15,0	6,0	7,7	4,2	5,1	5,7	5,7	6,1	5,3	5,6	4,9
f/kHz	0,8	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0			
x_2	59,2	62,2	63,7	64,6	66,4	68,1	68,0	67,6	66,8			
$ x_2 - \bar{x}_1 $	1,2	2,2	1,6	1,0	0,9	1,1	0,4	2,1	1,7			
$t_{11;0,95} s_1 \sqrt{\frac{1}{12} + 1}$	5,0	4,3	4,1	3,6	2,4	2,1	1,9	1,5	3,5			

Als nächstes sei mit Hilfe des Kolmogorow-Smirnow-Tests überprüft, ob die Ringversuchsergebnisse ($n = 12$) aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammt. Dazu werden die Schalldämmmaße der Größe nach sortiert (1. Zeile in Tabelle 2.4). Anschließend werden die Werte normiert (2. Zeile in Tabelle 2.4), wobei hier anzumerken ist, dass die Schalldämmmaße mit mehr als einer Dezimalstelle verarbeitet wurden so dass es zu unterschiedlichen normierten Werten kommt, obwohl die Schalldämmungen in Tabelle 2.4 als gleich ausgewiesen sind. Die empirische Verteilungsfunktion $S_n(y)$ ist nun einfach eine Treppenfunktion, die jeweils bei dem i -ten normierten Schalldämmwert auf den Wert i/n springt (3. Zeile in Tabelle 2.4, vgl. Bild 2.1, dort ist das Beispiel dargestellt). Die Werte der Verteilungsfunktion der Normalverteilung (4. Zeile in Tabelle 2.4) können aus Tabellen oder mit üblichen Tabellenkalkulationsprogrammen gewonnen werden. Bei der Ermittlung der maximalen Abweichung zwischen Zeilen 3 und 4 in Tabelle 2.4, muss berücksichtigt werden, dass die empirische Verteilungsfunktion an den angegebenen Stellen springt (vgl. Bild 2.1). Für Spalte 2 heißt dies z.B. dass an der Stelle $-0,95$ sowohl der Wert von 0 als auch der Wert 0,08 vorliegt. Wird dies berücksichtigt, so ergibt sich die maximale Abweichung an der Stelle $-0,73$ zu

$$L_n = \sup \left| S_n(y) - \phi \left(\frac{y - \bar{y}}{s} \right) \right| = 0,19 \quad (2.48)$$

und aus Gl. (2.41) folgt schließlich

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 19(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 19(112) of report of 2004-11-10

$$\begin{aligned} \sqrt{12} \cdot 0,19 &\geq 0,85 \\ 0,66 &\geq 0,85 \end{aligned} \quad (2.49)$$

mit $t_{1;0,95} = 0,85$ nach [Ha89, S. 185]. Die Hypothese, dass die Stichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammt, wird also bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % nicht verworfen. Es spricht somit nichts dagegen, die Grundgesamtheit als normal verteilt zu betrachten. Dies gilt, ausgenommen lediglich die Werte bei 125 Hz, auch für alle anderen Terzwerte dieses Ringversuchs (Tabelle 2.5).

Tabelle 2.4 Kolmogorow-Smirnow-Test für das Beispiel ($f = 250$ Hz)

y	42,1	42,3	42,6	42,6	42,7	43,3	43,8	44,9	46,0	46,2	47,1	50,3
$\frac{y - \bar{y}}{s}$	-0,95	-0,88	-0,77	-0,75	-0,73	-0,46	-0,27	0,17	0,60	0,70	1,03	2,32
$S_n(y)$	0,08	0,17	0,25	0,33	0,42	0,50	0,58	0,67	0,75	0,83	0,92	1,00
$\phi\left(\frac{y - \bar{y}}{s}\right)$	0,17	0,19	0,22	0,23	0,23	0,32	0,39	0,57	0,73	0,76	0,85	0,99

Tabelle 2.5 Prüfgröße des Kolmogorow-Smirnow-Tests für den Kalksandstein-Ringversuch

f/Hz	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500
$\sqrt{n} L_n$	0,79	0,74	0,63	0,60	0,94	0,34	0,76	0,66	0,44	0,74	0,62
f/kHz	0,63	0,8	1,0	1,25	1,6	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0	
$\sqrt{n} L_n$	0,54	0,66	0,63	0,58	0,74	0,53	0,37	0,47	0,46	0,76	

Zum Schluss wird nun noch untersucht, ob die Ergebnisse in den einzelnen Terzen voneinander unabhängig sind (vgl. Kap. 3.2.9). Da das Vorliegen einer Normalverteilung bereits gezeigt wurde, wird als nächster Schritt der Korrelationskoeffizient nach Gl. (2.37) berechnet (Tabelle 2.6). Mit dem Wert

$$t_{n-2;1-\alpha/2} = t_{10;0,975} = 2,228 \quad (2.50)$$

lässt sich mit Gl. (2.36) ein Korrelationskoeffizient berechnen, ab dem eine Unabhängigkeit nach Kriterium (2.38) nicht mehr vorliegt. Dieser Wert liegt bei 0,58. Somit sind die Werte zwischen ca. 125 Hz und 2,5 kHz (graue Markierungen in Tabelle 2.6) nicht unabhängig voneinander. Unabhängig von allen anderen Terzwerten sind lediglich die Ergebnisse bei 50 Hz und 5 kHz.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 20(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 20(112) of report of 2004-11-10

Tabelle 2.6 Korrelationskoeffizient für die Ergebnisse des Ringversuchs, graue Markierungen zeigen eine Überschreitung des für Unabhängigkeit höchstzulässigen Wertes von $r_{xy} = 0,58$ an

f Hz		63			125			250			500			1k			2k			4k	
	1	0,1	0,2	0,4	0	0,2	0,1	0,2	0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,5	0,4	0,4
63	0,1	1	0,7	0,5	0,2	0,5	0,2	0,2	0,1	0,2	0	0	0	0,1	0	0	0,1	0,1	0	0	0,4
	0,2	0,7	1	0,7	0,1	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1	0	0,1	0	0	0	0	0,1	0,1	0,5
	0,4	0,5	0,7	1	0,3	0,5	0,6	0,4	0,5	0,6	0,5	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2
125	0	0,2	0,1	0,3	1	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,4	0,5	0
	0,2	0,5	0,5	0,5	0,6	1	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7	0,7	1	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	0,5	0,7	0,4
250	0,2	0,2	0,3	0,4	0,8	0,7	0,9	1	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,7	0,4	0,5	0,2
	0	0,1	0,2	0,5	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,6	0,5	0,1
	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1	1	0,9	0,9	1	0,9	1	0,9	0,8	0,6	0,6	0,1
500	0,2	0	0,1	0,5	0,7	0,7	0,8	0,8	1	1	1	0,9	1	1	1	1	0,9	0,9	0,6	0,5	0,1
	0,2	0	0,1	0,3	0,7	0,6	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1	1	0,9	0,8	0,6	0,6	0,1
	0,2	0	0	0,4	0,7	0,6	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1	0,9	0,9	0,7	0,6	0,1
1k	0,1	0,1	0,1	0,4	0,8	0,7	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,8	0,6	0,6	0
	0,2	0	0	0,4	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1	0,9	0,8	0,6	0,5	0
	0,1	0	0	0,4	0,7	0,6	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,9	0,6	0,6	0,1
2k	0,1	0,1	0	0,5	0,7	0,6	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1	1	0,8	0,8	0,1
	0,2	0,1	0	0,5	0,6	0,4	0,8	0,7	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	1	1	0,8	0,8	0,3
	0,5	0	0,1	0,5	0,4	0,3	0,5	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	1	0,8	0
4k	0,4	0	0,1	0,5	0,5	0,2	0,7	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,8	0,8	0,8	1	0,2
	0,4	0,4	0,5	0,2	0	0,2	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0,1	0,1	0,3	0	0,2	1

2.3. Messunsicherheit nach GUM

2.3.1. Motivation

Derzeit wird die Messunsicherheit in der Bauakustik ausschließlich durch Ringversuche ermittelt. Jeder Teilnehmer liefert ein Messergebnis und aus der statistischen Auswertung der Daten aller Teilnehmer wird eine empirische Standardabweichung s bestimmt, die von nun an sowohl als Standardabweichung der Grundgesamtheit σ als auch als Messunsicherheit jeder einzelnen Prüfstelle Anwendung findet. Dies bedeutet, dass alle Messlabors automatisch die gleiche Unsicherheit besitzen

Dieses Konzept besitzt mehrere Nachteile. Ein wesentlicher besteht darin, dass die Streuung bzw. die Wiederhol- und Vergleichgrenze für nur wenige, häufig sogar nur ein Untersuchungsobjekt tatsächlich im Ringversuch ermittelt worden ist, später jedoch auf alle möglichen Untersuchungsobjekte übertragen wird. Zudem können systematische Einflüsse, die z.B. durch Verwendung der gleichen Messmethode verursacht werden und somit bei allen Ringversuchsteilnehmern gleichermaßen auftreten, nicht erkannt werden. Die Zahl der Ringversuchsteilnehmer ist zudem recht gering, so dass es oft fraglich ist, ob die empirische Standardabweichung tatsächlich bereits einen guten Schätzwert für die Standardabweichung der Grundgesamtheit liefert. Diese Tatsache findet ihren Ausdruck in den recht großen Konfidenzintervallen für die Standardabweichung (vgl. 3.2.9.). Schließlich ist hier noch

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 21(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 21(112) of report of 2004-11-10

anzumerken, dass die Rückführbarkeit auf Normale bei einem solchen Verfahren nicht möglich ist, da eine Rückführung prinzipiell eine hierarchische Ordnung der Messlaboratorien erfordert, wobei die Messunsicherheit zunimmt, je geringer die Hierarchie des jeweiligen Labors ist.

Da diese Nachteile nicht nur in der akustischen Messtechnik sondern auch in vielen anderen Disziplinen immer deutlicher hervortraten, wurde vom BIPM ein Leitfaden zur Ermittlung der Unsicherheit erstellt ([GUM], „Guide to the Expression of Uncertainty in Masurement“), der mittlerweile von den meisten mit Messtechnik befassten internationalen Organisationen und auch von der ISO übernommen wurde. Ziel dieses Leitfadens ist, die Ermittlung der Unsicherheit auf eine weltweit einheitliche wissenschaftliche Basis zu stellen um somit auch eine Vergleichbarkeit der angegebenen Unsicherheiten zu erreichen.

Wesentlicher Unterschied zum bisherigen Verfahren ist dabei, dass jedem Messergebnis eine aufgrund der tatsächlich vorliegenden Messbedingungen ermittelte Unsicherheit individuell beigeordnet wird. Bei Ringversuchen wird nun von jedem beteiligten Labor neben dem Messwert auch eine Unsicherheit bestimmt, wobei der Ringversuch selbst nicht mehr zur Ermittlung der Unsicherheit sondern lediglich zu ihrer Überprüfung dient.

2.3.2. Grundkonzept

Nach GUM ist die Messunsicherheit ein Parameter, der einem Messergebnis zugeordnet ist und der die Verteilung derjenigen Werte charakterisiert, die dem Messobjekt vernünftigerweise beigemessen werden können. Mit dieser Definition ist der bislang verwendete „wahre Wert“ abgeschafft. Ergebnis der Messung ist nun nicht mehr ein Messwert, der eine bestmögliche Annäherung an den wahren Wert darstellt, sondern eine Verteilungsfunktion.

Ausgangspunkt einer Unsicherheitsanalyse ist die möglichst exakte Definition der Messgröße. Davon ausgehend wird dann ein Modell aufgestellt

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (2.51)$$

das die Messgröße Y mit den Eingangsgrößen X_i verknüpft. Die Funktion f beschreibt, wie die Messgröße aus den Eingangsgrößen bestimmt wird. Meist wird es sich um eine analytische Funktion handeln. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass f experimentell ermittelt wurde, als Computeralgorithmus vorliegt, numerisch berechnet wurde oder eine Kombination aus allen Varianten darstellt.

Ein Schätzwert für die Messgröße Y ergibt sich, indem das Modell verwendet wird und anstelle der Eingangsgrößen X_i ihre Schätzwerte x_i verwendet werden

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (2.52)$$

Die Unsicherheit des Schätzwerts y ergibt sich dann bei unkorrelierten Eingangsgrößen zu

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i u_i)^2}. \quad (2.53)$$

wobei der i -te Sensitivitätskoeffizient

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 22(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 22(112) of report of 2004-11-10

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X_1=x_1, \dots, X_N=x_N} \quad (2.54)$$

gleich der partiellen Ableitung der Modellfunktion f nach der i -ten Eingangsgröße X_i und u_i die der i -ten Eingangsgröße zugeordnete Unsicherheit ist. Falls eine Korrelation zwischen Eingangsgrößen vorliegt, so ist dies bei der Unsicherheitsermittlung zu berücksichtigen (siehe [GUM]).

2.3.3. Ermittlung der Unsicherheit der Eingangsgrößen

Nach GUM gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten, die Unsicherheit der Eingangswerte zu ermitteln. Die Typ-A-Methode setzt eine wiederholte Messung der Eingangsgröße voraus. Als Schätzwert wird dann der arithmetische Mittelwert \bar{x}_i und als Unsicherheit die experimentelle Standardabweichung des Mittelwerts

$$u(\bar{x}_i) = \frac{s_i}{\sqrt{n_i}} \quad (2.55)$$

mit der Standardabweichung s_i verwendet. Ist die Zahl der Wiederholungen kleiner als 10, so ist die Verlässlichkeit einer so abgeschätzten Unsicherheit als gering einzustufen.

Bei der Typ-B-Methode werden bekannte Messergebnisse, vorliegende Erfahrungen, Herstellerangaben, Kalibrierdaten, Referenzwerte aus Handbüchern oder ähnliche Informationen verwendet, um die Unsicherheit der Eingangsgrößen X_i zu ermitteln. Zu unterscheiden sind hier mehrere Fälle.

- Falls eine Verteilungsdichte für X_i begründet angenommen werden kann, so ist der Erwartungswert dieser Verteilung als Schätzwert x_i und die Wurzel der Varianz als zugehörige Standardunsicherheit $u(x_i)$ zu verwenden.
- Können Ober- und Untergrenze a_+ und a_- für die Größe X_i angegeben werden, so ist eine Gleichverteilung für die Größe X_i anzunehmen, woraus sich für den Schätzwert

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \quad (2.56)$$

und für die Unsicherheit

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{12}}(a_+ - a_-) \quad (2.57)$$

ergibt. Falls zusätzlich bekannt ist, dass Werte in der Intervallmitte wahrscheinlicher sind als an den Rändern, so kann auch eine Rechteck- oder Normalverteilung angenommen werden. Für den Fall einer höheren Wahrscheinlichkeit an den Intervallrändern ist eine u-förmige Verteilung angebracht.

- Ist für X_i nur ein Wert bekannt, so ist dieser als Schätzwert x_i zu verwenden. Die Unsicherheit ist aus der Quelle für x_i zu übernehmen. Falls dies nicht möglich ist, so ist die Standardunsicherheit aus „unequivocal“ Daten zu berechnen bzw. aufgrund von Erfahrungswerten zu schätzen.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 23(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 23(112) of report of 2004-11-10

2.3.4. Erweiterte Messunsicherheit

Üblicherweise wird dem Messergebnis die erweiterte Messunsicherheit U zugeordnet, die sich aus der Unsicherheit der Messgröße $u(y)$ und dem Erweiterungsfaktor k ergibt

$$U = k u(y). \quad (2.58)$$

Falls der Messgröße eine Normalverteilung beigegeben werden kann, so ist der Erweiterungsfaktor 2 zu verwenden, was einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% entspricht. Die Annahme einer Normalverteilung ist gerechtfertigt, wenn sich die Unsicherheit der Messgröße Y aus mehreren ($N \geq 3$) Unsicherheitskomponenten ergibt, die ähnlich große Unsicherheitsbeiträge liefern und denen unabhängige Eingangsgrößen mit gutmütigen Verteilungsdichten (z.B. Rechteck-, Normal- oder Dreiecksverteilung) zugrunde liegen.

Die der Messgröße beigeordnete Standardunsicherheit kann als zuverlässig betrachtet werden, wenn keine der Eingangsunsicherheiten $u(x_i)$ mit der Typ-A-Methode mit weniger als 10 Wiederholungen bestimmt wurde. Ein Maß für die Zuverlässigkeit der Standardunsicherheit ist der effektive Freiheitsgrad ν_{eff} , der mit der Welch-Satterthwaite Gleichung

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}. \quad (2.59)$$

berechnet werden kann. Hierbei ist ν_i der effektive Freiheitsgrad für den i -ten Unsicherheitsbeitrag, der für Typ-B-Unsicherheitsermittlungen gegen unendlich strebt und für Typ-A-Unsicherheitsermittlungen $n-1$ (n – Zahl der Wiederholungen) beträgt. Ausgehend vom berechneten effektiven Freiheitsgrad kann dann ein zugehöriger Erweiterungsfaktor angegeben werden.

Wenn eine der Bedingungen Normalverteilung oder Zuverlässigkeit nicht erfüllt ist, so ist auf anderem Wege (siehe GUM) aus der Verteilungsfunktion der Messgröße Y ein Erweiterungsfaktor k so zu berechnen, dass die Überdeckungswahrscheinlichkeit 95% beträgt.

Tabelle 2.7 Erweiterungsfaktoren k für verschiedene effektive Freiheitsgrade bei einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95%

ν_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

2.4. Darstellung und Weitergabe von Einheiten

Die Darstellung und Weitergabe von Einheiten ist in der Bundesrepublik eine gesetzliche Aufgabe, die von der PTB federführend wahrgenommen wird. Dabei wird die jeweilige Messgröße durch ein Primärnormal verkörpert an das meist durch direkten Vergleich die Transferrnormale angeschlossen werden. Die Transferrnormale werden dann zu den anderen angeschlossenen Laboratorien überführt und dort als Normal verwendet. Zur Abdeckung

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 24(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 24(112) of report of 2004-11-10

großer Messbereiche ist es dabei häufig erforderlich, verschiedene Transfornormale zu verwenden.

Für eine Messgröße Y ergibt sich eine Differenz Δ zwischen dem von der PTB für das Transfornormal ermittelten Wert Y_{PTB} und dem vom Labor bestimmten Wert Y_{Lab}

$$\Delta = Y_{\text{PTB}} - Y_{\text{Lab}}. \quad (2.60)$$

Werden dann im Labor Messungen an anderen Objekten durchgeführt, so ist die Abweichung Δ jeweils zu korrigieren, d.h. die Messgröße ergibt sich aus dem Messwert und der Korrektur zu

$$Y = Y_{\text{Lab}} - \Delta. \quad (2.61)$$

Die Unsicherheit der Messgröße Y ergibt sich dann aus der Überlagerung zwischen der Unsicherheit des Messlabors und der Unsicherheit der Korrektur.

Es können nun im Labor weitere Transfornormale vermessen und weitergegeben werden, so dass sich schließlich eine hierarchische Struktur ergibt, an deren Spitze die PTB steht. Durch diese Kalibrierkette wird sichergestellt, dass alle in das System einbezogenen Labore gleiche Maßstäbe verwenden und die Messgrößen auf die jeweiligen Primärnormale rückgeführt sind. Die Unsicherheit nimmt mit der Länge der Kette zu, da bei jeder Weitergabe durch ein Transfornormal eine weitere unsicherheitsbehaftete Korrektur hinzugefügt wird.

2.5. Prinzipielle Überlegungen zu Unsicherheiten in der Bauakustik

In der Bauakustik wie auch in der akustischen Emissionsmesstechnik wird die Unsicherheit derzeit üblicherweise durch Vergleichs- und Wiederholstreuungen beschrieben, die durch Ringversuche ermittelt wurden. Diese Streuungen werden dem Messverfahren als Unsicherheit zugeschrieben. Bestimmte einzuhaltende Anforderungen - z.B. an den Prüfstands Aufbau, die Zahl und Anordnung der Messpunkte oder die verwendete Messtechnik - sichern dabei die Übertragbarkeit der aus dem Ringversuch stammenden Streuungen auf die generelle Anwendung des Messverfahrens.

Nach internationaler Übereinkunft sollten Messunsicherheiten neuerdings jedoch vorzugsweise nach [GUM] bestimmt werden. Dabei wird ausgehend von der Definition der Messgröße ein mathematisches Modell für die Messprozedur abgeleitet, das wiederum Grundlage für die Berechnung der Unsicherheiten ist. Ergebnis der Messung ist dann eine Verteilungsfunktion, die diejenigen Werte beschreibt, die der Messgröße vernünftigerweise beizumessen sind.

Bevor die Unsicherheit einer Messung ermittelt werden kann, ist es erforderlich, den Zweck der zu analysierenden Messung klar zu formulieren. Im Falle bauakustischer Messungen soll das Messergebnis einerseits eine quantitative Beschreibung des Prüflings liefern, um einen Vergleich unterschiedlicher Produkte zu ermöglichen. Andererseits sollte auf Grundlage des Messergebnisses jedoch auch eine Prognose über die akustischen Eigenschaften des betreffenden Bauteils in der konkreten Einbausituation möglich sein.

Diese Zusammenhänge seien zunächst am Beispiel des Luftschalldämm-Maßes betrachtet. Idealerweise wird diese Größe durch den 10-fachen Logarithmus des Verhältnisses von auftretender zu transmittierter Luftschalldleistung definiert. Allerdings hängt eine so definierte Messgröße von vielen Einflussfaktoren ab, wie z.B. von den Einbaubedingungen [Me00], von

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 25(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 25(112) of report of 2004-11-10

Luftdruck und Temperatur [WiBe03], vom Kantenlängenverhältnis des Prüflings, von der Prüflingsgröße, von der Art des anregenden Schallfelds usw..

Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten, diese zusätzlichen Einflüsse zu berücksichtigen. Eine besteht darin, eine Mittelung über die in der Praxis mögliche Variabilität in die Definition der Messgröße zu integrieren. Das Luftschalldämm-Maß wäre dann definiert als der 10fache Logarithmus des Verhältnisses von auftreffender zu transmittierter Luft-Schallleistung, gemittelt über verschiedene Kantenlängenverhältnisse und Wandgrößen, über unterschiedliche Einbaubedingungen und anregende Schallfelder, über Luftdrücke und Temperaturen sowie über hinreichend viele Realisierungen des untersuchten Bauteils.

Eine solche Definition führt zu einer Gesamt-Unsicherheit, die sich aus der Überlagerung der Messunsicherheit mit den weiteren Unsicherheitsbeiträgen ergibt. Ausgehend von Mittelwert \bar{y} und Gesamt-Unsicherheit $u(y)$ kann dann ein Prognosewert angegeben werden, dessen Festlegung eine eher politische Entscheidung ist (Bild 2.2). Wenn z.B. akzeptabel ist, dass das prognostizierte Luftschalldämm-Maß in 84% der realisierten Bauten mindestens erreicht wird, so liegt der Prognosewert bei

$$y_{84\%} = \bar{y} - u(y). \quad (2.62)$$

Es können jedoch auch beliebige andere Überdeckungswahrscheinlichkeiten definiert werden. Dieses Vorgehen weist Ähnlichkeiten mit dem Vorhaltemaß der alten DIN 4109 auf.

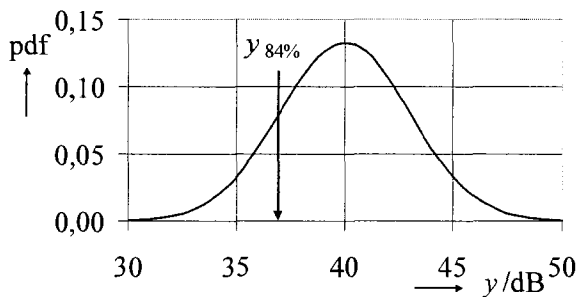


Bild 2.2 Verteilungsdichte (pdf) und Prognosewert

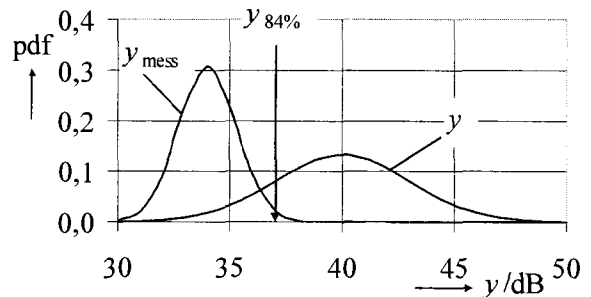


Bild 2.3 Verteilungsdichten (pdf) für gemessene und praktisch vorkommende Werte

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 26(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 26(112) of report of 2004-11-10

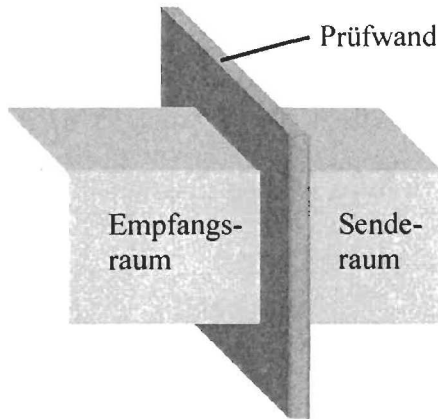


Bild 2.4 Vorschlag für eine Messanordnung nach WEISE [We03]

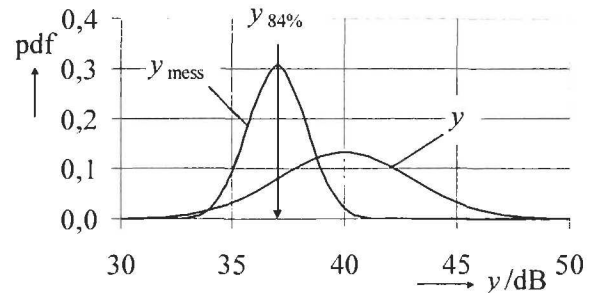


Bild 2.5 Verteilungsdichten (pdf) für gemessene und praktisch vorkommende Werte

Eine Alternative zu dieser Herangehensweise besteht nun darin, das Luftschalldämm-Maß nicht über eine Mittelung der Einbaubedingungen, Bauteilabmessungen, Raumgeometrien usw. sondern über eine spezielle Messanordnung zu definieren. Die Unsicherheit der Messungen wird dadurch reduziert (Bild 2.3). Bei der Umrechnung dieses Messwertes in einen Prognosewert müssen dann jedoch die Auswirkungen einer Variation der Bauteilabmessungen, der Einbaubedingungen, der Sende- und Empfangsraumgeometrie usw. berücksichtigt werden, was zu einer breiteren Verteilung der praktisch auftretenden Werte führt. Zur Berechnung eines Prognosewertes müssen dann die Parameter derjenigen Verteilungsdichte verwendet werden, die die in der Praxis auftretende Vielfalt beschreibt (Gl. (2.62)).

Von WEISE [We03] wurde vorgeschlagen, die Schalldämmung von Wänden in einem Aufbau zu messen, bei dem kein Körperschall-Impedanzsprung an den Rändern vorliegt. Dies wäre z.B. erreichbar durch einen Aufbau wie in Bild 2.4, bei dem die Prüfwand wesentlich größer ist als die gemeinsame Wandfläche von Sende- und Empfangsraum. Damit würde insbesondere bei tiefen Frequenzen ein Minimum der Schalldämmung gemessen werden, da die Modendichte auf der großen Prüfwand viel höher ist als bei kleineren Wänden, wodurch die Schalltransmission verbessert würde. Wird dieser Ansatz konsequent weiter verfolgt, so stellt sich die Frage, ob nicht alle Messbedingungen so gewählt werden können, dass der Erwartungswert der gemessenen Verteilung ein guter Schätzwert für einen Prognosewert ist (Bild 2.5)

$$\bar{y}_{\text{Mess}} = y_{84\%} \quad (2.63)$$

Die dritte Möglichkeit, die Schalldämmung zu definieren, besteht in der Herstellung eines Prototypen mit idealen Eigenschaften. Seine Schalldämmung nebst zugehöriger Unsicherheit wird von der PTB bestimmt. Anschließend wird der Prototyp zu den anderen Prüfstellen verbracht, dort wird die Schalldämmung gemessen und die Abweichung zum PTB-Bezugswert ermittelt, die dann als Korrektur bei allen weiteren Messungen Anwendung findet. Damit würde sich eine rückführbare Messkette ergeben, alle Messergebnisse für Schalldämm-Maße ließen sich mit definierter Unsicherheit auf den Prototyp zurückführen.

In der Praxis würde ein solches Vorgehen jedoch erhebliche Schwierigkeiten mit sich bringen. Da unterschiedlich große Prüföffnungen zulässig sind, müsste der Prototyp in seinen

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 27(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 27(112) of report of 2004-11-10

Abmessungen einstellbar sein. Zudem müssten mehrere Prototypen, jeweils für unterschiedliche Schalldämmungen (wenig dämmend bis hoch dämmend) bereitgestellt werden. Auch die Frage des Materials ist nicht ohne Weiteres zu beantworten. Angestrebt werden könnte z.B. eine „ideal schlappe Masse“, deren praktische Realisierung jedoch kaum möglich sein wird. Das entscheidende Argument gegen eine Prototyp-Definition ist jedoch, dass die auftretenden Probleme durch sie nicht gelöst werden können. Es stünde auch bei rückführbaren Labor-Messergebnissen die Frage, wie diese Werte mit den am Bau gemessenen Werten korrelieren bzw. wie eine Umrechnung erfolgen kann.

Derzeit wird in der Bauakustik ein Mittelweg zwischen den beiden erstgenannten Herangehensweisen beschritten. Die Prüfgeometrie ist z.B. bei Fenstern und Verglasungen sehr genau vorgegeben und auch durch die Vorgabe von Sende- und Empfangsraumvolumen, Nachhallzeiten und anderen Messbedingungen ergeben sich Unterschiede zwischen der Verteilung der Labor-Messwerte und der eine ungleich größere Vielfalt abdeckenden Verteilung für die am Bau auftretenden Werte.

3. Vergleichsmessungen

3.1. Bisheriges Verfahren

Die regelmäßig in der PTB stattfindenden Vergleichsmessungen haben zum Ziel, die Messunsicherheit bei bauakustischen Messungen zu begrenzen. Die Prüfstellen zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse kommen dazu in die PTB und führen Luftschalldämmungs- und Trittschallmessungen aus.

Beim derzeitigen Auswertungsverfahren soll das Luftschallmessergebnis innerhalb bestimmter Toleranzen um einen Mittelwert liegen, der im Vorfeld durch vier unabhängige, von der PTB durchgeführte Messungen festgelegt ist. Die zulässigen Toleranzen ergeben sich dabei aus den kritischen Differenzen, die für eine 95%-ige Sicherheit aus den Wiederholstreuungen aus [VDR58] berechnet wurden. Da bei den Vergleichsmessungen jedoch keine echten Wiederholbedingungen vorliegen, sondern weitere Unsicherheitsfaktoren hinzukommen, werden die kritischen Differenzen noch um einen frequenzabhängigen Wert vergrößert. Der so entstandene Toleranzschlauch ist nun Entscheidungsgrundlage, ob eine Prüfstelle korrekte Ergebnisse erzielt oder nicht. Akzeptiert werden die Ergebnisse, wenn die Summe aller Toleranzüberschreitungen zwischen 250 Hz und 5 kHz nicht mehr als 3 dB beträgt und außerdem etwaige systematische, d.h. bei allen Frequenzen vorliegende Abweichungen kleiner als 0,3 dB sind.

Auch das Trittschallmessergebnis muss innerhalb bestimmter Toleranzen um einen Bezugswert liegen, wobei als Toleranzen wiederum Wiederholstreuungen aus [VDR58] verwendet werden, die um einen bestimmten Betrag vergrößert werden. Die Kriterien, die an das Messergebnis angelegt werden, sind identisch zum Luftschall, lediglich der Frequenzbereich, innerhalb dessen die Summe der Toleranzüberschreitungen nur 3 dB betragen darf, ist mit 100 Hz – 5 kHz etwas breiter. Der zentrale Unterschied zu den Luftschallmessungen besteht darin, dass der Bezugswert aus einer simultan durchgeführten PTB-Messung stammt. Dabei wird lediglich überprüft, ob die einzelnen Schalldruck-Messwerte am gleichen Ort übereinstimmen. Es handelt sich also um einen reinen Vergleich der Messkette vom Mikrofon bis zum Anzeigewert.

3.2. Vorschlag für ein neues Verfahren bei der Luftschalldämmung

Der wesentliche Nachteil des bestehenden Verfahrens besteht darin, dass die Herkunft der derzeit verwendeten Toleranzen nicht endgültig geklärt werden konnte und dass für alle Arten von Bauteilen die gleichen Toleranzen verwendet werden. Daher wird hier ein neues Verfahren vorgeschlagen, bei dem PTB-Mitarbeiter n unabhängige Referenzmessungen ($n \geq 5$) der Luftschalldämmung am Vergleichsobjekt durchführen, woraus ein mittleres Schalldämmmaß \bar{y} und eine empirische Standardabweichung s berechnet werden kann.

Wenn nun eine Prüfstelle eine Schalldämmung y am unveränderten Objekt ermittelt, so muss gefordert werden, dass (vgl. Abschnitt 2.2.5)

$$\bar{y} - t_{n-1;1-\alpha/2} s \sqrt{\frac{1}{n} + 1} < y < \bar{y} + t_{n-1;1-\alpha/2} s \sqrt{\frac{1}{n} + 1} \quad (3.1)$$

wobei für die Irrtumswahrscheinlichkeit α ein Wert von 5% angesetzt wird. Die daraus resultierenden Faktoren sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Die Kriterien zur Einhaltung der Gl.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 29(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 29(112) of report of 2004-11-10

(3.1) bleiben gegenüber dem bisherigen Verfahren unverändert, d.h. die Summe der Toleranzüberschreitungen darf nicht mehr als 3 dB betragen und systematische Abweichungen müssen kleiner als 0,3 dB sein. Kriterium (3.1) sollte in 95% der Fälle eingehalten werden, d.h. bei ca. 20 Terzen darf eine Terz außerhalb des Toleranzschlauchs liegen. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine Unabhängigkeit der Messergebnisse in den einzelnen Terzen.

Tabelle 3.1 Faktoren für Gl. (3.1) bei n unabhängigen PTB-Referenzmessungen und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{n-1;0,975} \sqrt{1/n+1}$	15,56	4,97	3,56	3,04	2,78	2,62	2,51	2,43	2,37

Tabelle 3.2 Korrelationskoeffizient für die Ergebnisse der PTB-Vergleichsmessungen 2000, Luftschallergebnisse, graue Markierungen zeigen eine Überschreitung des für Unabhängigkeit höchstzulässigen Wertes von $r_{xy} = 0,56$ an

f Hz	63				125				250				500				1k				2k				4k						
	1,0	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3	0,5	0,2	0,6	0,6	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
63	0,2	1,0	0,4	0,5	0,7	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,6	0,0	0,2	0,5	0,1	0,1	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
	0,4	0,4	1,0	0,3	0,3	0,2	0,2	0,0	0,4	0,4	0,0	0,1	0,3	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2
	0,1	0,5	0,3	1,0	0,6	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,4	0,0	0,1	0,6	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5
125	0,1	0,7	0,3	0,6	1,0	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,6	0,1	0,2	0,3	0,0	0,2	0,3	0,0	0,2	0,3	0,0	0,3	0,5	0,4	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1
	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	1,0	0,5	0,3	0,6	0,1	0,0	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
	0,3	0,2	0,2	0,0	0,2	0,5	1,0	0,5	0,5	0,0	0,3	0,0	0,4	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
250	0,1	0,3	0,0	0,2	0,4	0,3	0,5	1,0	0,4	0,4	0,3	0,0	0,5	0,0	0,6	0,5	0,0	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,0	0,4	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
	0,2	0,3	0,4	0,0	0,3	0,6	0,5	0,4	1,0	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,4	0,3	0,0	0,4	0,5	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
	0,0	0,3	0,4	0,2	0,2	0,1	0,0	0,4	0,3	1,0	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
500	0,1	0,6	0,0	0,4	0,6	0,0	0,3	0,3	0,1	0,2	1,0	0,4	0,3	0,7	0,3	0,0	0,5	0,1	0,3	0,0	0,5	0,1	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5
	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3	0,1	0,4	1,0	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2	0,0	0,2	0,0	0,3	0,1	0,0	0,3	0,1	0,4	0,3	0,4	0,1	0,4	0,4
	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3	0,3	1,0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,1	0,4	0,3	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5
1k	0,3	0,5	0,0	0,6	0,3	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,7	0,5	0,2	1,0	0,0	0,2	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5
	0,5	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,3	0,6	0,4	0,1	0,3	0,2	0,3	0,0	1,0	0,7	0,4	0,6	0,6	0,6	0,5	0,0	0,6	0,5	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	
	0,2	0,1	0,2	0,5	0,2	0,1	0,2	0,5	0,3	0,1	0,0	0,3	0,3	0,2	0,7	1,0	0,5	0,5	0,7	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
2k	0,6	0,4	0,2	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,5	0,2	0,3	0,7	0,4	0,5	1,0	0,8	0,7	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	0,6	0,2	0,3	0,5	0,0	0,2	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,6	0,6	0,5	0,8	1,0	0,7	0,7	0,1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	0,2	0,4	0,2	0,6	0,3	0,1	0,1	0,4	0,5	0,1	0,3	0,3	0,4	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
4k	0,3	0,5	0,1	0,6	0,5	0,0	0,2	0,2	0,3	0,1	0,4	0,1	0,3	0,8	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,7	0,4	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
	0,2	0,1	0,2	0,5	0,4	0,1	0,2	0,0	0,2	0,2	0,5	0,4	0,5	0,5	0,0	0,3	0,4	0,1	0,4	0,4	0,1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Die Unabhängigkeit von Vergleichsmessungsergebnissen wurde sowohl für PTB-Daten als auch für Daten aus der MPA Dortmund nach Kapitel 2.2.8 überprüft. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3. Bis auf den Bereich um ca. 1,6 kHz, wo Korrelationen mit in der Nähe liegenden Terzen auftreten und einigen versprengten Ausreißern kann bei den PTB-Vergleichsmessungen von unabhängigen Terzen ausgegangen werden (Tabelle 3.2). Ganz ähnliches Verhalten zeigen die Ergebnisse der Vergleichsmessungen an der MPA Dortmund (Tabelle 3.3). Der Block des Korrelationsbereichs ist hier etwas größer, jedoch treten keine versprengten Ausreißer auf. Ursache hierfür ist sicher die größere

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 30(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 30(112) of report of 2004-11-10

zugrundeliegende Datenmenge. An den Vergleichsmessungen bei der MPA Dortmund nahmen über 100 Prüfstellen teil, an der PTB nur 12.

Tabelle 3.3 Korrelationskoeffizient für die Ergebnisse der MPA-Vergleichsmessungen 2000, Luftschallergebnisse, graue Markierungen zeigen eine Überschreitung des für Unabhängigkeit höchstzulässigen Wertes von $r_{xy} = 0,53$ an

f Hz	63		125				250				500				1k				2k				4k			
	1,0	0,7	0,2	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1				
63	0,7	1,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1				
	0,2	0,0	1,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1				
	0,1	0,2	0,0	1,0	0,4	0,4	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2				
125	0,1	0,1	0,1	0,4	1,0	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1				
	0,0	0,0	0,2	0,4	0,5	1,0	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2				
	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	1,0	0,5	0,5	0,4	0,5	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0				
250	0,1	0,2	0,0	0,3	0,5	0,4	0,5	1,0	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0				
	0,1	0,2	0,1	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3				
	0,1	0,2	0,1	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	1,0	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,5	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2				
500	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	1,0	0,8	0,8	0,8	0,7	0,5	0,6	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2				
	0,1	0,1	0,1	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,6	0,6	0,8	1,0	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3				
	0,1	0,1	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	0,8	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3				
1k	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2	0,4	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	0,8	0,6	0,7	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3				
	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	1,0	0,8	0,8	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3				
	0,1	0,0	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,6	0,8	1,0	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3				
2k	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,3	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	1,0	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4				
	0,0	0,0	0,1	0,4	0,2	0,4	0,1	0,1	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,8	1,0	0,8	0,8	0,5	0,5				
	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	0,3	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	1,0	0,9	0,5	0,5				
4k	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0	0,7	0,7				
	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,0	0,0	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,7	0,7	1,0				

3.3. Vorschlag für ein neues Verfahren beim Normtrittschallpegel

Auch für das derzeitige Verfahren bei der Überprüfung des Normtrittschallpegels sind einige Nachteile aufzuführen. Ein wesentlicher ist, dass durch den bloßen Vergleich der Anzeigewerte kein realistischer Eindruck von den auftretenden Unsicherheiten vermittelt wird. Des Weiteren erscheinen auch beim Normtrittschallpegel die zulässigen Toleranzen willkürlich festgelegt.

Daher wird für den Normtrittschallpegel ein Verfahren analog zum Luftschall vorgeschlagen. Dies bedeutet, dass PTB-Mitarbeiter mindestens fünf unabhängige Messungen durchführen, aus denen dann mit Gl. (3.1) ein zulässiger Toleranzschlauch berechnet wird, innerhalb dessen die Messergebnisse der Prüfstellen dann mit 95 % Wahrscheinlichkeit liegen müssen. Die hierfür vorauszusetzende Unabhängigkeit kann auch für die Trittschallergebnisse näherungsweise angesetzt werden (Tabelle 3.4, Tabelle 3.5), obwohl die auftretenden Korrelationen beim Trittschall größer sind als beim Luftschall.

Wichtig bei diesem Verfahren ist die zeitliche Konstanz des Prüfobjekts auch über längere Zeiträume. Ob dies im Fall von Trittschallergebnissen vorausgesetzt werden kann, wurde anhand von Daten der MPA Dortmund überprüft. Der verwendete Deckenaufbau besteht aus

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 31(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 31(112) of report of 2004-11-10

2 mm verklebten PVC-Platten, 50 cm Zementestrich, einer Lage Abdeckfolie, 6/5 mm PE Trittschalldämmstoff, 140 mm Vollbetonplattendecke. Die Messergebnisse der ca. 100 Teilnehmer, bezogen auf den Mittelwert, zeigen keinen zeitlichen Trend (Bild 3.1 - Bild 3.3), so dass zeitliche Konstanz angesetzt werden kann.

Tabelle 3.4 Korrelationskoeffizient für die Ergebnisse der PTB-Vergleichsmessungen 2000, Trittschallergebnisse, graue Markierungen zeigen eine Überschreitung des für Unabhängigkeit höchstzulässigen Wertes von $r_{xy} = 0,56$ an

f Hz	63			125			250			500			1k			2k			4k		
	1,0	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,5	0,4	0,6	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,7	0,6	0,6	0,3	0,0
63	0,4	1,0	0,6	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,2	0,1	0,0	0,3	0,1	0,2	0,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0
	0,5	0,6	1,0	0,2	0,8	0,2	0,3	0,3	0,4	0,1	0,4	0,1	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,0
	0,4	0,0	0,2	1,0	0,1	0,7	0,5	0,2	0,5	0,5	0,3	0,8	0,2	0,1	0,2	0,2	0,7	0,5	0,5	0,1	0,2
125	0,2	0,1	0,8	0,1	1,0	0,4	0,3	0,3	0,1	0,0	0,4	0,2	0,5	0,2	0,4	0,5	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1
	0,4	0,0	0,2	0,7	0,4	1,0	0,4	0,1	0,6	0,3	0,1	0,8	0,4	0,1	0,0	0,2	0,6	0,2	0,2	0,2	0,4
	0,5	0,2	0,3	0,5	0,3	0,4	1,0	0,3	0,8	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,4	0,5	0,5	0,4	0,1	0,4
250	0,4	0,0	0,3	0,2	0,3	0,1	0,3	1,0	0,4	0,7	0,7	0,2	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	0,9	0,8	0,8	0,6
	0,6	0,2	0,4	0,5	0,1	0,6	0,8	0,4	1,0	0,4	0,2	0,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	0,5	0,4	0,1	0,3
	0,3	0,1	0,1	0,5	0,0	0,3	0,2	0,7	0,4	1,0	0,1	0,1	0,4	0,5	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8	0,7	0,6
500	0,2	0,0	0,4	0,3	0,4	0,1	0,2	0,7	0,2	0,1	1,0	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,4	0,5	0,3	0,4	0,3
	0,3	0,3	0,1	0,8	0,2	0,8	0,3	0,2	0,5	0,1	0,5	1,0	0,6	0,2	0,2	0,3	0,5	0,1	0,1	0,3	0,5
	0,3	0,1	0,4	0,2	0,5	0,4	0,2	0,7	0,1	0,4	0,5	0,6	1,0	0,6	0,3	0,5	0,2	0,6	0,5	0,8	0,6
1k	0,4	0,2	0,4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,8	0,1	0,5	0,7	0,2	0,6	1,0	0,9	0,8	0,7	0,9	0,8	0,9	0,6
	0,3	0,0	0,4	0,2	0,4	0,0	0,1	0,7	0,0	0,3	0,7	0,2	0,3	0,9	1,0	0,8	0,7	0,8	0,6	0,6	0,4
	0,2	0,2	0,3	0,2	0,5	0,2	0,4	0,8	0,0	0,3	0,7	0,3	0,5	0,8	0,8	1,0	0,6	0,8	0,6	0,7	0,4
2k	0,7	0,2	0,4	0,7	0,2	0,6	0,5	0,7	0,5	0,6	0,4	0,5	0,2	0,7	0,7	0,6	1,0	0,9	0,8	0,5	0,2
	0,6	0,1	0,4	0,5	0,3	0,2	0,5	0,9	0,5	0,7	0,5	0,1	0,6	0,9	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,4
	0,6	0,1	0,3	0,5	0,2	0,2	0,4	0,8	0,4	0,8	0,3	0,1	0,5	0,8	0,6	0,6	0,8	0,9	1,0	0,9	0,5
4k	0,3	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,8	0,1	0,7	0,4	0,3	0,8	0,9	0,6	0,7	0,5	0,8	0,9	1,0	0,8
	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,4	0,4	0,6	0,3	0,6	0,3	0,5	0,6	0,6	0,4	0,4	0,2	0,4	0,5	0,8	1,0

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 32(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 32(112) of report of 2004-11-10

Tabelle 3.5 Korrelationskoeffizient für die Ergebnisse der MPA-Vergleichsmessungen 2000, Trittschallergebnisse, graue Markierungen zeigen eine Überschreitung des für Unabhängigkeit höchstzulässigen Wertes von $r_{xy} = 0,53$ an

f Hz	63		125		250		500		1k		2k		4k									
	1,0	0,3	0,0	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0		
63	0,3	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	
	0,0	0,1	1,0	0,3	0,0	0,0	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	
	0,3	0,1	0,3	1,0	0,0	0,2	0,4	0,2	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	
125	0,3	0,1	0,0	0,0	1,0	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	
	0,3	0,1	0,0	0,2	0,3	1,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	
	0,1	0,1	0,3	0,4	0,1	0,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,3
250	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,5	1,0	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,5	0,5	0,3	0,2	
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,0	0,1	0,5	0,6	1,0	0,6	0,6	0,6	0,7	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,4	0,4	
	0,1	0,2	0,1	0,3	0,0	0,2	0,5	0,5	0,6	1,0	0,7	0,5	0,6	0,5	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	
500	0,2	0,2	0,2	0,4	0,1	0,3	0,6	0,5	0,6	0,7	1,0	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	
	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,5	0,5	0,6	0,5	0,7	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,4	0,4	
	0,0	0,2	0,1	0,4	0,1	0,1	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7	0,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,3	
1k	0,0	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,5	0,6	0,5	0,5	0,7	0,8	0,8	1,0	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,5	0,3	
	0,0	0,2	0,2	0,3	0,0	0,1	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	
	0,0	0,3	0,2	0,3	0,0	0,2	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,8	0,6	0,4	
2k	0,1	0,2	0,2	0,3	0,0	0,2	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,9	0,8	0,6	0,4	
	0,1	0,2	0,1	0,4	0,0	0,1	0,6	0,5	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,9	0,7	0,6	
	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	
4k	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,9	1,0	0,9	
	0,0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0	

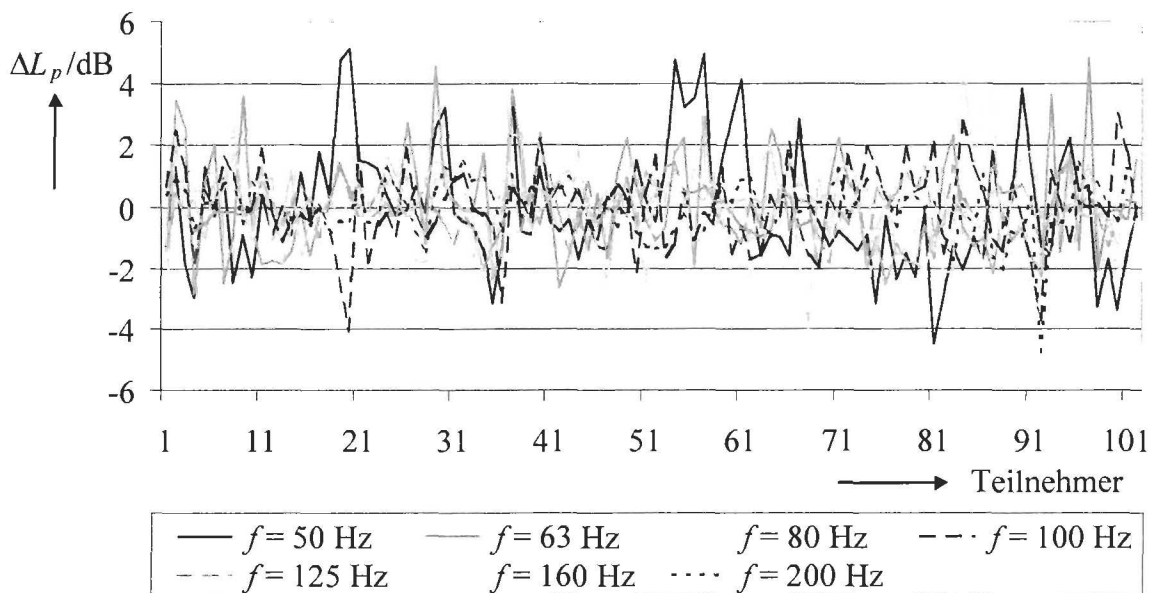


Bild 3.1 Zeitliche Entwicklung der bei den Vergleichsmessungen an der MPA Dortmund gemessenen Normtrittschallpegel, Bereich tiefer Frequenzen

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 33(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 33(112) of report of 2004-11-10

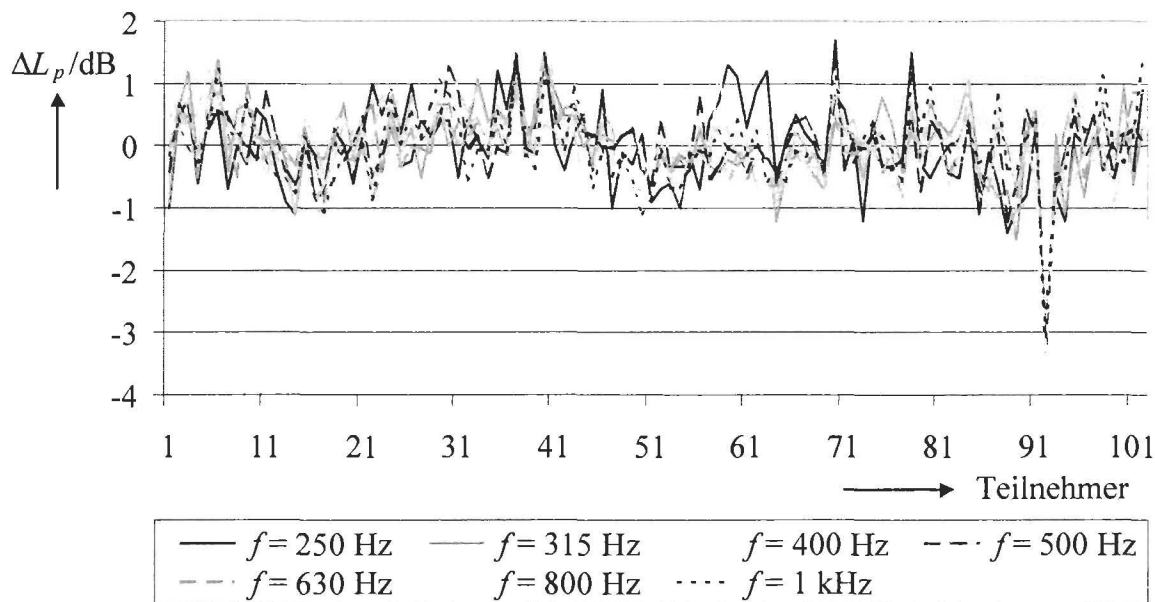


Bild 3.2 Zeitliche Entwicklung der bei den Vergleichsmessungen an der MPA Dortmund gemessenen Normtrittschallpegel, Bereich mittlerer Frequenzen

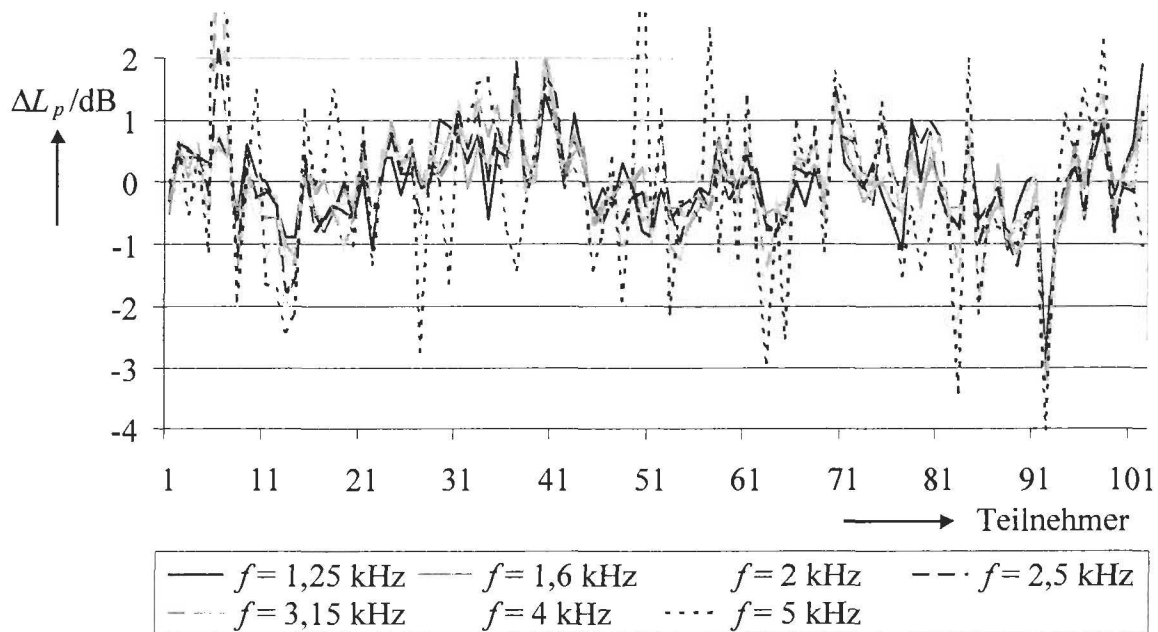


Bild 3.3 Zeitliche Entwicklung der bei den Vergleichsmessungen an der MPA Dortmund gemessenen Normtrittschallpegel, Bereich hoher Frequenzen

4. Anerkennung bauakustischer Prüfstellen

4.1. Zielstellung

Wenn eine Prüfstelle die Befugnis zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse erlangen möchte oder eine Prüfstelle zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Prüfzeugnisse neue Prüfstände errichtet, so ist beim DIBt ein entsprechender Antrag zu stellen. Das DIBt beauftragt dann die PTB mit der technischen Durchführung der Anerkennung. In diesem Kapitel soll nun beschrieben werden, wie solche Anerkennungen ablaufen, welche Kriterien anzusetzen sind und welche Vorschläge für Verbesserungen dem DIBt unterbreitet werden können.

4.2. Anerkennung von Prüfstellen nach ISO 140-2

Beim Verfahren nach ISO 140-2 wird ein Referenzobjekt, dessen Eigenschaften aus einem Ringversuch bekannt sind, in der neu anzuerkennenden Prüfstelle n_x mal gemessen, wobei

$$n_x \geq 5 \quad (4.1)$$

gefordert wird. Weiterhin wird gefordert, dass die Standardabweichung s_x aus diesen fünf Wiederholmessungen die Bedingung

$$s_x \leq m r \quad (4.2)$$

erfüllt. Der Faktor m ergibt sich hierbei aus Tabelle 4.1.

Zugrunde liegt diesem Ansatz ein Test der Hypothese, dass s_x nicht signifikant größer ist als die Wiederholstandardabweichung σ_r (vgl. Gl. 2.8) da mit

$$s_x \leq m 2 \sqrt{2} \sigma_r \quad (4.3)$$

und

$$m 2 \sqrt{2} \approx \sqrt{\frac{\chi_{n-1;0,998}^2}{n-1}} \quad (4.4)$$

(vgl. Tabelle 4.1) die Gleichung für den einseitigen Test für ein sehr hohes Vertrauensniveau von 99,8% folgt

$$s_x \leq \sqrt{\frac{\chi_{n-1;0,998}^2}{n-1}} \sigma_r \quad (4.5)$$

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 35(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 35(112) of report of 2004-11-10

Tabelle 4.1 Faktor m für unterschiedliche Stichprobenumfänge n

n	5	6	7	8	9	10
m	0,72	0,68	0,65	0,63	0,61	0,60
$m 2\sqrt{2}$	2,04	1,92	1,84	1,78	1,73	1,70
$\sqrt{\frac{\chi_{n-1;0,998}^2}{n-1}}$	2,06	1,94	1,86	1,80	1,74	1,70

Ist die Bedingung (4.2) erfüllt, können die Messergebnisse zur Überprüfung der Vergleichsgrenze herangezogen werden. Dazu werden in den Terzen die Mittelwerte des Labors \bar{y}_x mit den Gesamtmittelwerten \bar{y} des Ringversuchs verglichen. Die kritische Differenz ist nach ISO 140-2:

$$\text{CrD}_{95}(|\bar{y} - \bar{y}_x|) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{R^2 \left(1 + \frac{1}{p}\right) - r^2 \left(1 + \frac{1}{p} - \frac{1}{n_x} - \frac{1}{p^2} \sum_{i=1}^p \frac{1}{n_i}\right)} \quad (4.6)$$

mit der Zahl der am Ringversuch beteiligten Laboratorien p und der Zahl der im i -ten Laboratorium durchgeführten Messungen n_i . Um die Hintergründe für diese Gleichung etwas besser verstehen zu können, sie sie hier noch etwas umgeformt.

$$\begin{aligned} \text{CrD}_{95}(|\bar{y} - \bar{y}_x|) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(2\sqrt{2} \sigma_R\right)^2 \left(1 + \frac{1}{p}\right) - \left(2\sqrt{2} \sigma_r\right)^2 \left(1 + \frac{1}{p} - \frac{1}{n_x} - \frac{1}{p^2} \sum_{i=1}^p \frac{1}{n_i}\right)} \\ &= 2 \sqrt{\sigma_R^2 \left(1 + \frac{1}{p}\right) - \sigma_r^2 \left(1 + \frac{1}{p} - \frac{1}{n_x} - \frac{1}{p^2} \sum_{i=1}^p \frac{1}{n_i}\right)} \\ &= 2 \sqrt{\sigma_L^2 \left(1 + \frac{1}{p}\right) + \sigma_r^2 \left(\frac{1}{n_x} + \frac{1}{p^2} \sum_{i=1}^p \frac{1}{n_i}\right)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

wobei die Laborstreuung

$$\sigma_L^2 = \sigma_R^2 - \sigma_r^2 \quad (4.8)$$

eingeführt wurde. Zur Veranschaulichung sei nun noch angenommen, dass alle Ringversuchsteilnehmer n Messungen durchgeführt haben ($n_i = n$), woraus folgt

$$\text{CrD}_{95}(|\bar{y} - \bar{y}_x|) \approx 2 \sqrt{\sigma_L^2 \left(1 + \frac{1}{p}\right) + \sigma_r^2 \left(\frac{1}{n_x} + \frac{1}{pn}\right)}. \quad (4.9)$$

Aus einem Vergleich der Gl. (4.9) mit (2.19) und (2.24) wird nun deutlich, dass hier eine kritische Differenz angegeben ist, bei der zwei Ursachen für Streuungen berücksichtigt werden. Die erste Ursache ist die Abweichung aufgrund verschiedener Laboreigenschaften, ausgedrückt in der Laborstandardabweichung σ_L . Für diesen Effekt gibt es p Ergebnisse aus dem Ringversuch und ein Ergebnis aus dem neu anzuerkennenden Labor. Als zweite mögliche Ursache für Abweichungen ist die nicht verschwindende Wiederholstandard-

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 36(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 36(112) of report of 2004-11-10

abweichung eingeschlossen. Sie ist für die Ringversuchsteilnehmer und das neu hinzugekommene Labor gleich (s.o.) und es liegen p n Ergebnisse aus dem Ringversuch und n_x neue Ergebnisse vor.

Für die einzelnen Frequenzbänder werden die kritischen Differenzen nach Gl. (4.6) berechnet. Eine Prüfstelle wird dann anerkannt, wenn die Bedingung

$$\bar{y} - \text{CrD}_{95} (|\bar{y} - \bar{y}_x|) < \bar{y}_x < \bar{y} + \text{CrD}_{95} (|\bar{y} - \bar{y}_x|) \quad (4.10)$$

in 95% der Fälle eingehalten wird. Bei 21 Terzen ist somit eine Überschreitung zulässig, wenn die Werte in den einzelnen Terzen als voneinander unabhängig betrachtet werden. Diese Unabhängigkeit liegt bei bauakustischen Messergebnissen jedoch meist nicht vor (vgl 2.2.10).

4.3. Anerkennung von Prüfstellen nach Weise

Das Verfahren nach ISO 140-2 berücksichtigt nicht die Größe der Abweichung sondern prüft lediglich in Form einer ja-nein Entscheidung, ob die Abweichung zwischen Messwert und Ringversuchs-Mittelwert kleiner als die kritische Differenz ist. Nachteilig ist des Weiteren, dass diese Überprüfung in jeder einzelnen Terz separat durchgeführt wird, so dass systematische Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Terzbänder nicht aufgedeckt werden können. Um hier zu Verbesserungen zu kommen, kann z.B. statistisch getestet werden, ob die Abweichungen zwischen dem Ringversuchsmittelwert \bar{y} und dem neu hinzugekommenen Mittelwert einer Normalverteilung gehorchen. Wird für diesen Test ein χ^2 -Test verwendet, so ergibt sich die von WEISE [We04] vorgeschlagene Prüfgröße

$$T_W = \sum_{\text{Terzen}} \left(\frac{2(\bar{y} - \bar{y}_x)}{\text{CrD}_{95} (|\bar{y} - \bar{y}_x|)} \right)^2 \quad (4.11)$$

in der die Abweichungen auf die kritischen Differenzen bezogen und über alle Terzen aufaddiert werden. Diese Prüfgröße gehorcht einer χ^2 -Verteilung und sollte bei einem Vertrauensniveau von 5% abhängig von der Zahl der Terzen einen bestimmten Wert nicht überschreiten (Tabelle 4.2). Bei 21 Terzen beträgt dieser Wert 32,7.

Der Vorteil dieser Überprüfungsmethode besteht neben der Einbeziehung der Höhe der Abweichung vor allem darin, dass keinerlei zusätzliche Informationen vorliegen müssen. Die Eingangsgrößen, die für die Methode der kritischen Differenzen erforderlich sind, ermöglichen auch eine Auswertung der Prüfgröße (4.11). Allerdings bleibt als wesentliche Voraussetzung die Unabhängigkeit der Ergebnisse in den einzelnen Terzen erhalten, die in der Praxis meist nicht vorliegt. Trotzdem wird die Anwendung dieses Verfahrens vorgeschlagen, da durch die Korrelationseffekte keine Verschärfung erwartet wird.

Tabelle 4.2 obere Werte χ_α^2 der χ^2 -Verteilung, $\alpha = 5\%$ (nach BRONSTEIN [Br91], S. 21)

Freiheitsgrade	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
χ_α^2	18,3	19,7	21,0	22,4	23,7	25,0	26,3	27,6	28,9	30,1	31,4	32,7

4.4. Vergleich der Verfahren

Die Auswirkungen einer Anwendung dieser beiden unterschiedlichen Verfahren seien an zwei Beispielen kurz veranschaulicht.

Betrachtet werden zwei neu errichtete Fensterprüfstände, für die eine Anerkennung beantragt wird. In beiden wird ein Luftschalldämm-Maß für die Bezugsscheibe gemessen, die vorher in einem Ringversuch verwendet wurde. Die Ergebnisse und die kritischen Differenzen zeigen Bild 4.1 und Bild 4.2.

Bei Auswertung nach ISO 140-2 würde der Prüfstand 1 anerkannt werden, da in allen Terzen der gemessene Mittelwert innerhalb der kritischen Differenzen um den Gesamtmittelwert liegt. Prüfstand 2 hingegen müsste zurückgewiesen werden, da in 2 Terzen eine Überschreitung vorliegt.

Bei der Auswertung nach WEISE ergäbe sich das gegenteilige Ergebnis, da das im Prüfstand 1 gemessene Schalldämm-Maß eine Prüfsumme nach Gl. (4.11) von 42,7 liefert, wohingegen sich für den Prüfstand 2 eine Summe von 12,8 ergibt. Bewertet werden nach dem Vorschlag von WEISE somit alle Abweichungen vom Mittelwert wohingegen nach dem Verfahren nach ISO 140-2 lediglich die Einhaltung des Kriteriums (4.10) überprüft wird.

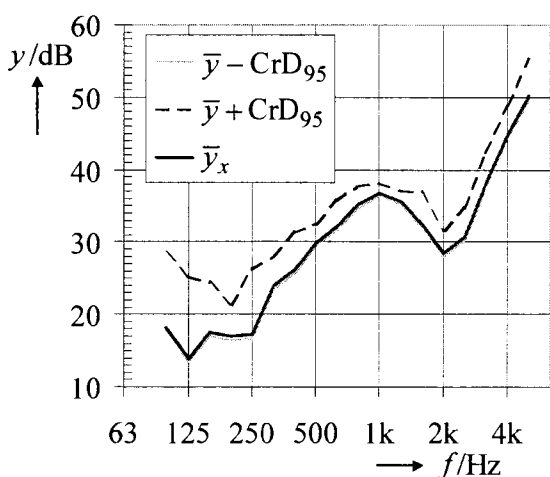


Bild 4.1 In Prüfstand 1 gemessene Schalldämmung und kritische Differenzen

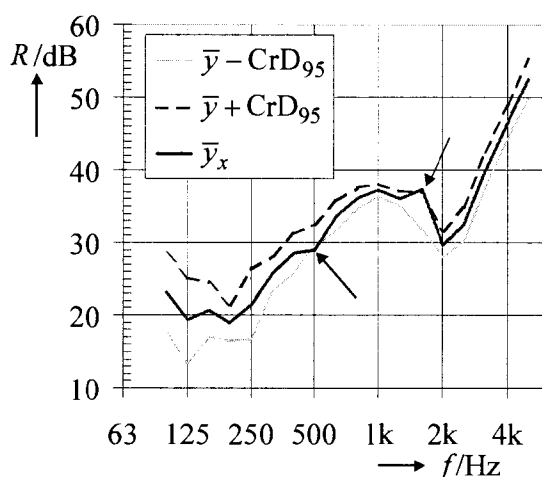


Bild 4.2 In Prüfstand 2 gemessene Schalldämmung und kritische Differenzen

4.5. Anerkennung von Wandprüfständen

Für die Anerkennung von Wandprüfständen existiert ein etabliertes Verfahren, dem die Ergebnisse eines Ringversuchs mit einer schweren Kalksandsteinwand [Me00] zugrunde liegen. Von den neu anzuerkennenden Prüfstellen wurde bislang verlangt, dass der Mittelwert aus mehreren Wiederholungsmessungen dem Kriterium (4.10) genügt. Für die Zukunft wird vorgeschlagen, das Kriterium nach WEISE (4.11) auf den Mittelwert aus fünf Wiederholungsmessungen anzuwenden.

Gegenüber den Originalergebnissen sind in der Zwischenzeit jedoch noch weitere Ergebnisse hinzugekommen, da mit jeder neu anzuerkennenden Prüfstelle ein weiterer Datensatz hinzukommt. Der ursprüngliche Teilnehmerkreis von 12 Prüfstellen hat sich mittlerweile auf

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 38(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 38(112) of report of 2004-11-10

19 vergrößert und es wird vorgeschlagen, aus dem jeweils vorhandenen Datenbestand die kritischen Differenzen nach Gl. (4.6) und schließlich die Prüfgröße (4.11) zu berechnen.

Des Weiteren stellt sich die Frage, ob die kritischen Differenzen auf Basis der um den Gesamtverlustfaktor korrigierten Messwerte oder der unkorrigierten Messwerte zu berechnen sind. In [Me00] war gezeigt worden, dass die Laborstandardabweichungen nach Anwendung der Korrektur im mittleren Frequenzbereich erheblich sanken, so dass eine generelle Anwendung der Korrektur empfohlen wurde. Für die Anerkennungsmessungen erscheint dies jedoch nicht zweckmäßig, da keine scharfe Frequenzgrenze für den Gültigkeitsbereich der Korrektur angegeben werden kann. Gegen eine Anwendung der Korrektur spricht auch, dass in Prüfzeugnissen nach dem derzeitigen Stand der Normung die unkorrigierten Werte anzugeben sind, so dass es plausibel erscheint, diese Werte einer Anerkennungsprozedur zugrunde zu legen.

Zu Vergleichszwecken wurden dennoch die kritischen Differenzen für die vier diskutierten Fälle (12 und 19 Prüfstellen, mit und ohne Verlustfaktorkorrektur) berechnet. Die zugrundeliegenden Datenmengen sind in Bild 4.3 bis Bild 4.6 dargestellt. Der Unterschied zwischen den kritischen Differenzen für die 12 und für die 19 Prüfstände ist gering (Bild 4.7). Lediglich im tiefen Frequenzbereich verläuft die Kurve für die größere Datenmenge etwas glatter, was mit der größeren Vielzahl der abgedeckten modalen Strukturen erklärt werden kann. Bei 4 und 5 kHz steigt die kritische Differenz für die 19 Prüfstände gegenüber dem Wert für 12 Prüfstände etwas an. Ursache hierfür ist die in den späteren Messungen beobachtete Verschiebung der ersten Dickenresonanz von 5 auf 4 kHz, die auch in Bild 4.3 bis Bild 4.6 gut zu erkennen ist. Auch die Wirkung der Verlustfaktorkorrektur tritt deutlich in Erscheinung. Bei tiefen Frequenzen bis etwa 125 Hz wird die kritische Differenz durch Anwendung der Korrektur tendenziell vergrößert, im mittleren Frequenzbereich zwischen ca. 250 und 2000 Hz wird sie reduziert und bei noch höheren Frequenzen ist die Korrektur ohne Auswirkung.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 39(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 39(112) of report of 2004-11-10

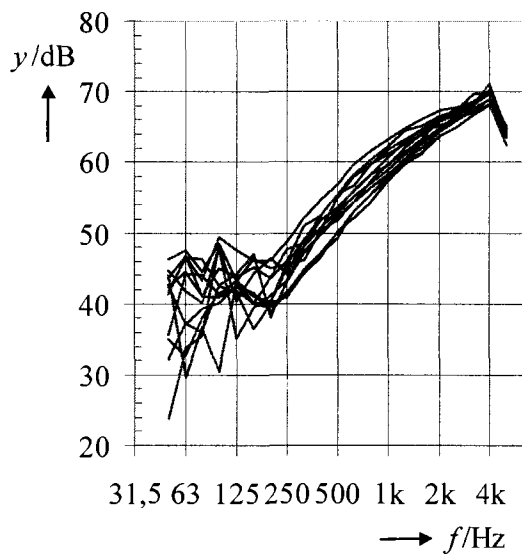


Bild 4.3 Gemessene Schalldämmungen an der Kalksandsteinwand, insgesamt 12 Prüfstände, ohne Verlustfaktor-Korrektur

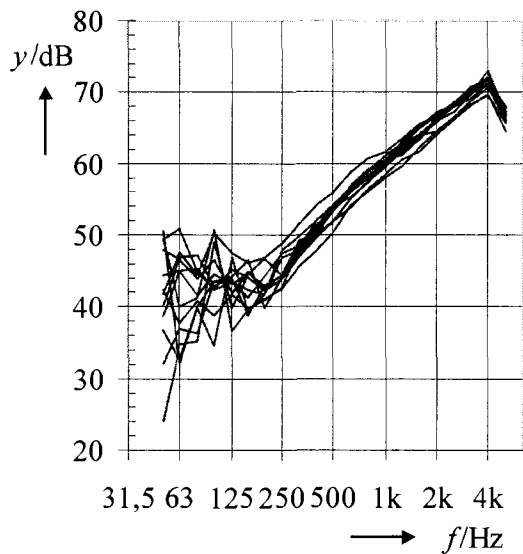


Bild 4.4 Gemessene Schalldämmungen an der Kalksandsteinwand, insgesamt 12 Prüfstände, mit Verlustfaktor - Korrektur

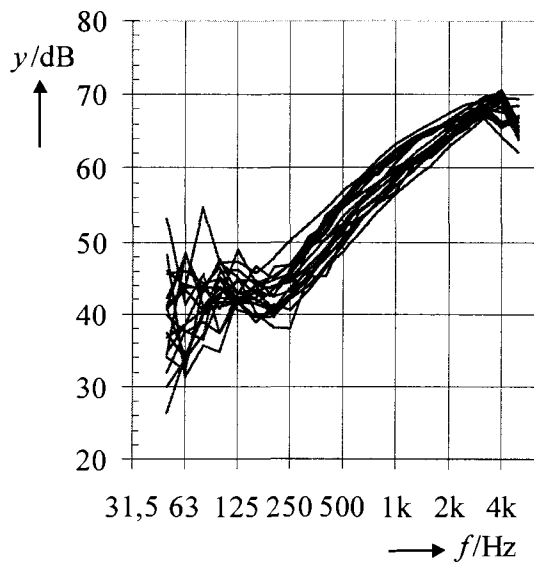


Bild 4.5 Gemessene Schalldämmungen an der Kalksandsteinwand, insgesamt 19 Prüfstände, ohne Verlustfaktor-Korrektur

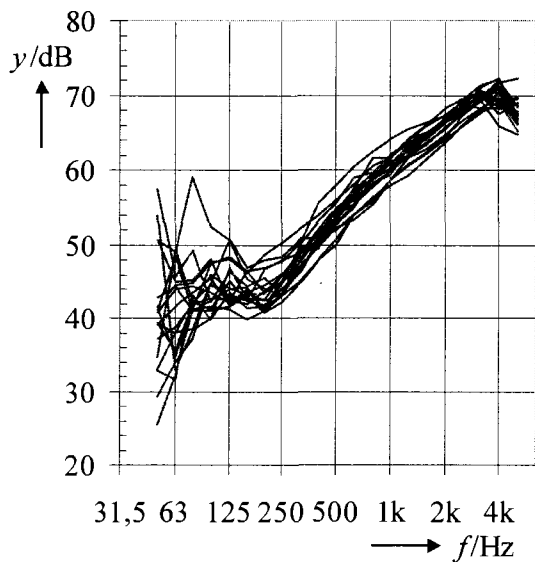


Bild 4.6 Gemessene Schalldämmungen an der Kalksandsteinwand, insgesamt 19 Prüfstände, mit Verlustfaktor-Korrektur

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 40(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 40(112) of report of 2004-11-10

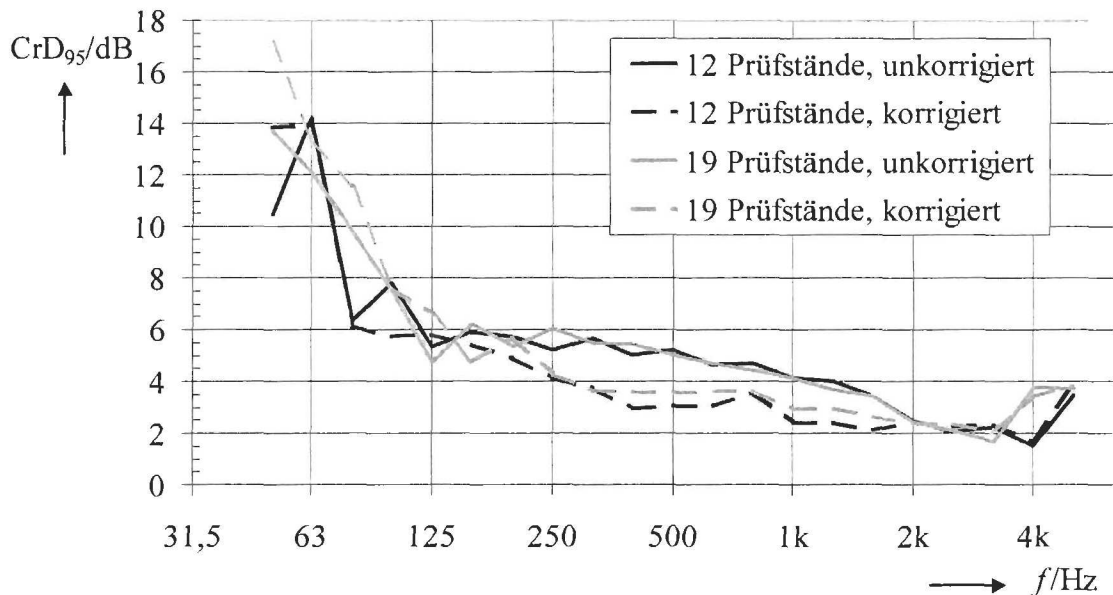


Bild 4.7 Kritische Differenzen für die unterschiedlichen Datenmengen

Zusammenfassend wird folgender detaillierter Ablaufplan für die Anerkennung von Wandprüfständen vorgeschlagen:

1. Bereitstellung der Kalksandsteine durch die PTB
2. Elastischer Einbau der Prüfwand, Verklebung der Steine mit Dünnbettmörtel (z.B. Salith DB), ca. 3 cm Fuge um die Wand an den Seiten und oben, unten fest aufstehend, Verfüllung der Fuge mit elastischem Material (z.B. Silikon), beidseitiges Aufbringen von je 0,5 cm Putz der Mörtelgruppe IVa (z.B. Heidelberger Haftputz IP27R)
3. Messung des Luftschalldämm-Maßes und der Körperschallnachhallzeit durch die Prüfstelle
4. Übermittlung des Ergebnisses aus 3. an die PTB und Beurteilung des Ergebnisses durch die PTB
5. Entfernung des elastischen Fugenmaterials und Verfüllung der Fuge mit Quellschutt (z.B. Quickschutt US 600-4), Abdichtung der Fuge
6. Durchführung von fünf Wiederholungsmessungen des Luftschalldämm-Maßes und der Körperschallnachhallzeit auf der Kalksandsteinwand durch die Prüfstelle unter Variation der Lautsprecher- und Mikrofonpositionen und ggf. der Absorberanordnung
7. Übermittlung des Ergebnisses aus 6. an die PTB und Beurteilung des Ergebnisses durch die PTB
8. Nachmessung der Schalldämmung durch die PTB vor Ort, Kriterium (3.1) sollte eingehalten sein, bei auftretenden Diskrepanzen: Untersuchung der Ursachen
9. Hinzufügen einer biegeweichen Vorsatzschale, Messung der Maximalschalldämmung durch die Prüfstelle

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 41(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 41(112) of report of 2004-11-10

10. Übermittlung des Ergebnisses aus 9. an die PTB und Beurteilung des Ergebnisses durch die PTB
11. Rückbau der Kalksandsteinwand und der Vorsatzschale, Bestimmung der Rohdichte der Kalksandsteinwand
12. Abfassung eines Prüfberichts durch die Prüfstelle
13. Erstellung eines Gutachtens durch die PTB auf Grundlage des Prüfberichts

4.6. Anerkennung von Fensterprüfständen

Als Referenzobjekte für die Fensterprüfstände dienen eine Doppelscheibe (6/16/6), ein einschaliges und ein zweischaliges Metallelement. Für die Doppelscheibe liegen aus [KO88] Ergebnisse für die mittlere Schalldämmung, die Wiederholgrenze r und die Vergleichsgrenze R vor. Allerdings wurde aus diesen Daten eine Untermenge verwendet, um die derzeit von der PTB verwendeten kritischen Differenzen zu berechnen. Der genaue Rechenweg ist heute nicht mehr im Detail nachvollziehbar. Für das einschalige Metallelement liegen ebenfalls aus [KO88] Messergebnisse vor. Für dieses Objekt wurden jedoch keine Wiederholungsmessungen durchgeführt, so dass in Ermangelung besserer Alternativen die Wiederholgrenze für die Scheibe auch für das einschalige Metallelement angewendet wird. Das zweischalige Metallelement wird lediglich zur Bestimmung der Maximaldämmung des Prüfstands verwendet.

Für die Anerkennung von Fensterprüfständen wird folgender Ablauf vorgeschlagen:

1. Bereitstellung der Referenzobjekte durch die PTB
2. Einbau der Doppelscheibe
3. Durchführung von fünf Wiederholungsmessungen des Luftschalldämm-Maßes durch die Prüfstelle unter Variation der Lautsprecher- und Mikrofonpositionen und ggf. der Absorberanordnung
4. Übermittlung des Ergebnisses aus 3. an die PTB und Beurteilung des Ergebnisses durch die PTB
5. Nachmessung der Schalldämmung durch die PTB vor Ort, Kriterium (3.1) sollte eingehalten sein, bei auftretenden Diskrepanzen: Untersuchung der Ursachen
6. Einbau des einschaligen Metallelements
7. Einmalige Messung der Luftschalldämmung durch die Prüfstelle
8. Übermittlung des Ergebnisses aus 7. an die PTB und Beurteilung des Ergebnisses durch die PTB (Vergleich mit vorliegenden Ringversuchsergebnissen)
9. Bündiger Einbau des doppelschaligen und des einschaligen Metallelements
10. Einmalige Messung der Luftschalldämmung als Maximaldämmung durch die Prüfstelle
11. Übermittlung des Ergebnisses aus 10. an die PTB und Beurteilung des Ergebnisses durch die PTB
12. Abfassung eines Prüfberichts durch die Prüfstelle
13. Erstellung eines Gutachtens durch die PTB auf Grundlage des Prüfberichts

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 42(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 42(112) of report of 2004-11-10

4.7. Offene Fragen bei der Anerkennung von Prüfständen

Im Zuge der Anerkennung bauakustischer Prüfstände gibt es eine Reihe von offenen Fragen. So werden derzeit Prüfstände für Decken und Türen nur auf Einhaltung der Kriterien aus [ISO 140-1] überprüft. Referenzobjekte existieren nicht. Gleiches trifft auch für die Bestimmung des Absorptionsgrads und des Strömungswiderstands zu. Für die Zukunft ist hier zu überlegen, ob nicht eine Datenbank analog zu den Fenster- und Wandprüfständen aufgebaut werden kann, wozu zunächst geeignete Referenzobjekte hergestellt werden müssten.

Um die Messergebnisse aus Decken- und Türenprüfständen in gleicher Weise abzusichern wie bei Wand- und Fensterprüfständen, wird vorgeschlagen, von den neuen Prüfständen oder in den neu gebauten Prüfständen jeweils fünf Wiederholungsmessungen an gewöhnlichen Untersuchungsobjekten durchführen zu lassen, die durch die PTB vor Ort durch eine Einzelmessung unter Anwendung des Kriteriums (3.1) überprüft wird.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 43(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 43(112) of report of 2004-11-10

5. Unsicherheiten beim Luftschalldämm-Maß

5.1. Modell

Ausgangspunkt für die Unsicherheitsbetrachtung sei zunächst die physikalische Definition für die Schalldämmung:

$$y_p = 10 \lg \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \text{ dB} . \quad (5.1)$$

Die einfallende und die transmittierte Schallleistung W_1 und W_2 werden durch die volumengemittelten Schalldrücke p_1 und p_2 im Sende- und Empfangsraum bestimmt

$$W_1 = \frac{p_1^2 S}{\rho c 4} \quad (5.2)$$

$$W_2 = \frac{p_2^2 A}{\rho c 4} , \quad (5.3)$$

womit sich das Schalldämm-Maß zu

$$y_p = L_{p1} - L_{p2} + 10 \lg \left(\frac{S}{A} \right) \text{ dB} . \quad (5.4)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{-K_{\text{abs}}}$

ergibt. Gl. (5.4) wird in den meisten Messverfahren (z.B. ISO 140-er Reihe) als Bestimmungsgleichung für die Schalldämmung verwendet.

Für eine umfassende Analyse nach GUM werden jedoch weitere Korrekturen erforderlich

$$y = L_{p,1} - L_{p,2} - K_{\text{stör}} - K_{\text{SLM1}} - K_{\text{SLM2}} - K_{\text{mitt1}} - K_{\text{mitt2}} - K_{\text{abs}} - K_{W1} - K_{W2} - K_{\text{quellpos}} - K_{\text{met}} - K_{\text{form}} - K_{\text{größe}} - K_{\eta} - K_{\text{rand}} - K_{\text{max}} - K_{\text{repro}} , \quad (5.5)$$

wobei neben der bereits erklärten Korrektur K_{abs} je eine Korrektur für den Einfluss

- des Störgeräuschs im Empfangsraum $K_{\text{stör}}$,
- der verwendeten Messtechnik für den Sende- und den Empfangspegel K_{SLM1} und K_{SLM2} ,
- der Volumen- und Zeitmittelung des Sende- und Empfangspegels K_{mitt1} und K_{mitt2} ,
- der unzulänglichen Beschreibung der einfallenden Schallleistung durch Gl. (5.2),
- der unzulänglichen Beschreibung der transmittierten Schallleistung durch Gl. (5.3),
- der Quellposition(en) K_{quellpos} ,
- der meteorologischen Bedingungen K_{met} ,
- des Kantenlängenverhältnisses des Prüflings K_{form} ,
- der Prüflingsgröße $K_{\text{größe}}$,
- der Energieableitung in den Prüfstand K_{η} ,

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 44(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 44(112) of report of 2004-11-10

- der Art der Einspannung (fest, elastisch, ...) K_{rand} ,
- der Maximaldämmung des Prüfstands K_{max} sowie
- der begrenzten Bauteilreproduzierbarkeit K_{repro}

angesetzt wurde (5.5). Zugrunde liegt diesem erweiterten Modell eine zweikanalige simultane Messung des Sende- und Empfangspegels wobei die Störgeräuschkorrektur des Sendepiegels vernachlässigt wird. Für einkanalige sukzessive Messungen müssten zusätzlich noch die zeitlichen Schwankungen der Anregung berücksichtigt werden.

Die Unsicherheit des Schalldämm-Maßes $u(y)$ ergibt sich nun aus der Überlagerung der Teilunsicherheiten:

$$u(y) = \left[u^2(K_{\text{Stör}}) + u^2(K_{\text{SLM1}}) + u^2(K_{\text{SLM2}}) + u^2(K_{\text{mitt1}}) + u^2(K_{\text{mitt2}}) + u^2(K_{\text{abs}}) + u^2(K_{W1}) + u^2(K_{W2}) + u^2(K_{\text{quellpos}}) + u^2(K_{\text{met}}) + u^2(K_{\text{form}}) + u^2(K_{\text{größe}}) + u^2(K_{\eta}) + u^2(K_{\text{rand}}) + u^2(K_{\text{max}}) + u^2(K_{\text{repro}}) \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

wobei etwaige Korrelationen zwischen den Einflussgrößen durch diesen Ansatz vernachlässigt werden. Die einzelnen Unsicherheitsbeiträge werden im Folgenden diskutiert wobei vorliegende Ergebnisse z.B. aus Ringversuchen, aber auch interne PTB-Daten Verwendung finden. Die Gesamtunsicherheit nach (5.6) entspricht der bislang verwendeten Vergleichs-Standardabweichung, wenn diese unter Variation all der beteiligten Einflussfaktoren ermittelt wurde. In den vorliegenden Ringversuchen ist dies weitestgehend der Fall, sieht man von Fenster- und Scheibenmessungen ab, bei denen die Form und die Größe des Prüflings nicht variiert wird.

Interessant ist nun, welche Unsicherheitsbeiträge zur Wiederholstreuung und welche zur Laborstreuung beitragen.

Bei Wiederholungsmessungen der Schalldämmung am gleichen Aufbau im gleichen Prüfstand sollten bei jeder Wiederholung unterschiedliche Quell- und Mikrofonpositionen sowohl bei der Bestimmung der Pegeldifferenz als auch bei der Nachhallzeitmessung verwendet werden. Auch die meteorologischen Bedingungen und das Störgeräusch werden im gewissen Rahmen schwanken. Form, Größe, Randeinspannung, Energieableitung, Maximaldämmung wie auch Schallpegelmesser bleiben hingegen unverändert. Die Wiederholstandardabweichung aus solchen Messungen ist daher

$$s_r = \sqrt{u^2(K_{\text{Stör}}) + u^2(K_{\text{mitt1}}) + u^2(K_{\text{mitt2}}) + u^2(K_{\text{abs}}) + u^2(K_{\text{quellpos}}) + u^2(K_{\text{met}})} \quad (5.7)$$

Werden im Rahmen von Ringversuchen Mittelwerte aus verschiedenen Prüfständen miteinander verglichen so reduziert sich der Anteil der Unsicherheitsbeiträge durch die Zahl der Wiederholungsmessungen gemäß Gl. (2.51). Außerdem sollten in Ringversuchen nur sehr gut reproduzierbare Objekte verwendet werden, so dass der zugehörige Unsicherheitsbeitrag vernachlässigt werden kann. Bei n Messungen in jedem Labor bleibt dann die sogenannte Laborstandardabweichung

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 45(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 45(112) of report of 2004-11-10

$$s_L = \left[u^2(K_{\text{SLM1}}) + u^2(K_{\text{SLM2}}) + u^2(K_{W1}) + u^2(K_{W2}) + u^2(K_{\text{met}}) + u^2(K_{\text{form}}) + u^2(K_{\text{größe}}) + u^2(K_{\eta}) + u^2(K_{\text{rand}}) + u^2(K_{\text{max}}) - \frac{s_r^2}{n} \right]^{1/2} \quad (5.8)$$

übrig. Die meteorologischen Effekte sind hier nochmals enthalten, da die mittleren Bedingungen in den verschiedenen Prüfständen vor allem aufgrund verschiedener geographischer Höhen unterschiedlich sind (siehe unten).

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird nun versucht, aus den vorliegenden Daten Informationen über die einzelnen Korrekturen und insbesondere ihre Unsicherheiten abzuleiten.

Zuvor soll jedoch noch untersucht werden, ob gegenüber der bisher üblichen Statistik der Pegelgrößen eine Statistik der physikalischen Größen in der Bauakustik eher angebracht wäre. Dazu wird der in Abschnitt 1 bereits eingeführte Test auf Normalverteilung auf die Ergebnisse des erweiterten Ringversuchs an der Kalksandsteinwand angewendet. Als Eingangsdaten finden dabei das Schalldämmmaß y , das Verhältnis von auftreffender zu transmittierter Schalleistung W_1/W_2 sowie der Kehrwert davon Verwendung. Bild 5.1 zeigt am Beispiel der 50 Hz – Terz die berechneten Verteilungsfunktionen. Die Verteilung der Schalldämmmaße kommt der Normalverteilung sehr nahe. Die anderen beiden Verteilungsfunktionen zeigen demgegenüber große Abweichungen. Für die Prüfgröße nach Gl. (2.37) ergeben sich insgesamt Werte, die meist unter dem kritischen Wert von 0,85 liegen (Bild 5.2). Bei den allermeisten Frequenzen kommt die Verteilung des Schalldämmmaßes der Normalverteilung am nächsten, da sie den niedrigsten Wert für die Prüfgröße liefert. Doch auch bei den anderen beiden Größen besteht nach den Testergebnissen ab ca. 160 Hz kein Grund, an der Normalverteilung zu zweifeln. Die Ursache dafür liegt in der recht geringen Streuung der bei diesen Frequenzen auftretenden Schalldämmwerte. Die Logarithmusfunktion kann in diesem kleinen Bereich gut linearisiert werden, so dass sowohl die Leistungsverhältnisse selbst als auch die logarithmierten Werte durchaus normalverteilt sein können. Bei tiefen Frequenzen ist hingegen die Standardabweichung mit bis zu 7 dB bei 50 Hz sehr groß und es ist interessant, dass hier die logarithmierte Größe Schalldämmmaß wesentlich besser einer Normalverteilung genügt als die Leistungsverhältnisse. Aufschlussreich ist auch die Verteilung bei 4 kHz, da hier größere Abweichungen von der Normalverteilung auftreten. In der Verteilungsfunktion der Schalldämmmaße (Bild 5.3) lassen sich zwei Bereiche erkennen, in denen viele Werte liegen, um $x \approx -1,2$ sowie um $x \approx 0,7$. Die Ursache liegt in der Verschiebung der ersten Dickenresonanz zwischen den verwendeten Steinchargen, so dass für die Werte bei 4 kHz tatsächlich zwei Datenmengen mit jeweils eigenen Mittelwerten existieren. Behandelt man diese Daten als eine Datenmenge, so ist die zugehörige Verteilung durch eine Normalverteilung nur schlecht beschreibbar.

Insgesamt erscheint es somit angebracht, die weiteren Untersuchungen auf einer Statistik im Pegelmaßstab aufzubauen, da die logarithmierte Größe am besten einer Normalverteilung gehorcht. Auftretende Abweichungen von der Normalverteilung deuten auf systematische Effekte hin.

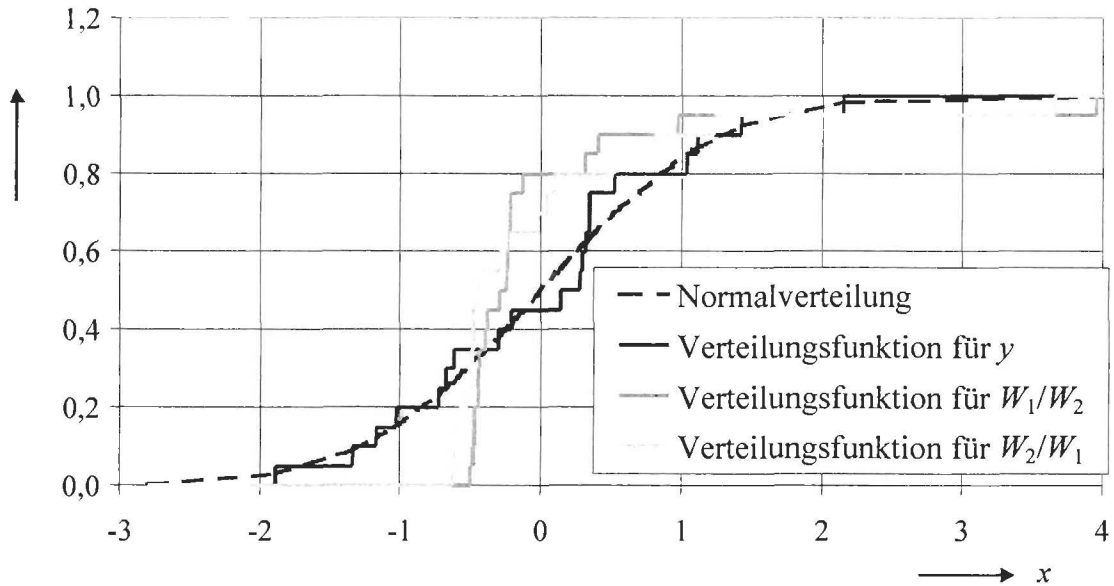


Bild 5.1 Empirische Verteilungsfunktionen für y , W_1/W_2 , W_2/W_1 sowie Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung für die Ergebnisse des erweiterten Kalksandsteinwand-Ringversuchs in der 50 Hz – Terz

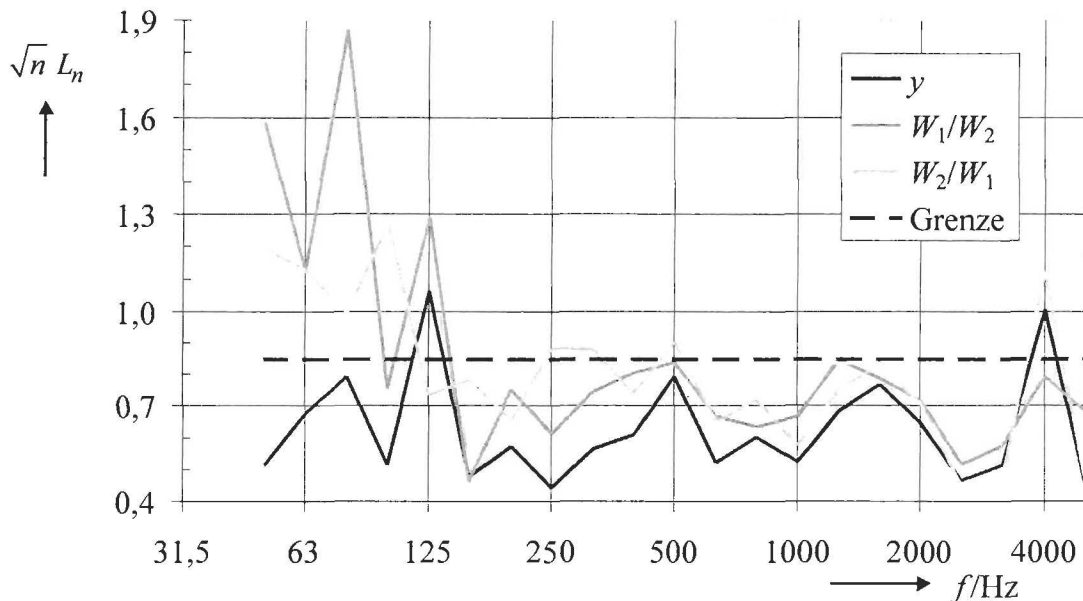


Bild 5.2 Prüfgröße $\sqrt{n} L_n$ für den Test auf Normalverteilung für den erweiterten Kalksandsteinwand-Ringversuch

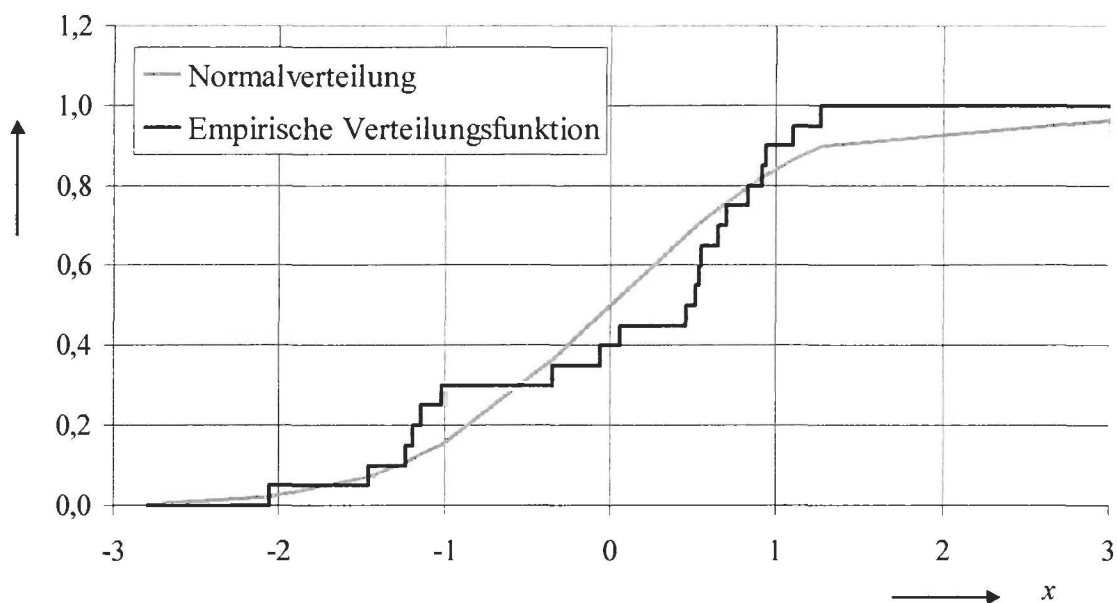


Bild 5.3 Verteilungsfunktion des Schalldämmmaßes bei 4 kHz

5.2. Zur Unsicherheit der Absorptionskorrektur

Die Absorption im Empfangsraum wird üblicherweise durch eine Messung der mittleren Nachhallzeit T_{rev} bestimmt

$$A = \frac{24 \ln(10)}{c} \frac{V}{T_{\text{rev}}} \quad (5.9)$$

Für die Schallgeschwindigkeit kann

$$c = \sqrt{\kappa R_L T} \quad (5.10)$$

eingesetzt werden, so dass sich für den gesamten Absorptionsterm

$$K_{\text{abs}} = -10 \lg \left(\frac{S}{A} \right) \text{dB} = -10 \lg \left(\frac{\sqrt{\kappa R_L T}}{24 \ln(10)} T_{\text{rev}} \frac{S}{V} \right) \text{dB} \quad (5.11)$$

als Modellgleichung ergibt. Neben der mittleren Nachhallzeit sind somit auch die Temperatur T , die Fläche des Prüflings S und das Volumen des Empfangsraums V als Messgrößen zu betrachten. Sowohl der Adiabatenexponent

$$\kappa = 1,402 \quad (5.12)$$

als auch die spezifische Gaskonstante für Luft

$$R_L = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \quad (5.13)$$

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 48(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 48(112) of report of 2004-11-10

können als konstant angenommen werden. Die Unsicherheiten dieser beiden Größen sind im Rahmen der hier angestellten Betrachtungen vernachlässigbar.

Die Unsicherheit der Absorptionskorrektur ist dann mit Gl. (5.11)

$$u(K_{\text{abs}}) = \sqrt{\left[\frac{\partial K_{\text{abs}}}{\partial T} u(T)\right]^2 + \left[\frac{\partial K_{\text{abs}}}{\partial S} u(S)\right]^2 + \left[\frac{\partial K_{\text{abs}}}{\partial V} u(V)\right]^2 + \left[\frac{\partial K_{\text{abs}}}{\partial T_{\text{rev}}} u(T_{\text{rev}})\right]^2} \quad (5.14)$$

Mit den partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial K_{\text{abs}}}{\partial T} = -\frac{5 \text{ dB}}{\ln(10)} \frac{1}{T} \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial K_{\text{abs}}}{\partial T_{\text{rev}}} = -\frac{10 \text{ dB}}{\ln(10)} \frac{1}{T_{\text{rev}}} \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial K_{\text{abs}}}{\partial S} = -\frac{10 \text{ dB}}{\ln(10)} \frac{1}{S} \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial K_{\text{abs}}}{\partial V} = -\frac{10 \text{ dB}}{\ln(10)} \frac{1}{V} \quad (5.18)$$

ergibt sich die Unsicherheit der Absorptionskorrektur zu

$$u(K_{\text{abs}}) = \frac{10}{\ln(10)} \sqrt{\left[\frac{1}{2} \frac{u(T)}{T}\right]^2 + \left[\frac{u(S)}{S}\right]^2 + \left[\frac{u(V)}{V}\right]^2 + \left[\frac{u(T_{\text{rev}})}{T_{\text{rev}}}\right]^2} \text{ dB} \quad (5.19)$$

Als nächstes sind nun die Unsicherheiten der Eingangsgrößen zu bestimmen. Für die Temperaturmessung kann

$$\frac{u(T)}{T} \approx \frac{1 \text{ K}}{293 \text{ K}} \approx 0,003 \quad (5.20)$$

abgeschätzt werden. Die Unsicherheit der Prüflingsfläche mit den Kantenlängen l_1 und l_2

$$S = l_1 l_2 \quad (5.21)$$

kann über die Unsicherheit der Längenmessung

$$\begin{aligned} u(S) &= \sqrt{\left[\frac{\partial S}{\partial l_1} u(l_1)\right]^2 + \left[\frac{\partial S}{\partial l_2} u(l_2)\right]^2} \\ &= \sqrt{l_2^2 u^2(l_1) + l_1^2 u^2(l_2)} \end{aligned} \quad (5.22)$$

ermittelt werden. Da die Unsicherheit der Längenmessung in beiden Richtungen gleich ist

$$u(l_1) = u(l_2) = u(l) \quad (5.23)$$

folgt

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 49(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 49(112) of report of 2004-11-10

$$\frac{u(S)}{S} = \frac{u(l)\sqrt{l_1^2 + l_2^2}}{l_1 l_2}. \quad (5.24)$$

Mit Werten für Fenster von

$$l_1 \approx l_2 \approx 1 \text{ m}; u(l) \approx 0,01 \text{ m} \quad (5.25)$$

bzw. für Wände

$$l_1 \approx l_2 \approx 3,5 \text{ m}; u(l) \approx 0,03 \text{ m} \quad (5.26)$$

kann abgeschätzt werden

$$\frac{u(S)}{S} \approx 0,015. \quad (5.27)$$

In analoger Weise folgt für die Unsicherheit des Empfangsraumvolumens

$$\frac{u(V)}{V} = \frac{u(l)\sqrt{l_1^2 l_2^2 + l_2^2 l_3^2 + l_1^2 l_3^2}}{l_1 l_2 l_3}. \quad (5.28)$$

$$\frac{u(V)}{V} \approx 0,015. \quad (5.29)$$

Um die Unsicherheit der Nachhallzeitmessung zu bestimmen, bietet es sich an, die in der PTB regelmäßig stattfindenden Vergleichsmessungen auszuwerten. Bei diesen Messungen wird von verschiedenen PTB-Mitarbeitern mit verschiedenen Messgeräten sowie von Mitarbeitern der in die Vergleichsmessungen einbezogenen Prüfstellen die mittlere Nachhallzeit im Empfangsraum von Wand-, Decken- oder Fensterprüfstand der PTB gemessen (Tabelle 5.1).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 50(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 50(112) of report of 2004-11-10

Tabelle 5.1 Einbezogene Daten aus den Vergleichsmessungen an der PTB

Messung	Testobjekt	Jahr	Teilnehmerzahl
Luftschalldämmung	Verglasung 6/16/6	2004	10 Prüfstellen, 5 PTB-Referenzmessungen
Trittschalldämmung	Holzbalkendecke, Auflage Trockenestrich	2004	10 Prüfstellen
Luftschalldämmung	Betondecke mit schwimmendem Estrich, Auflage Echtholzparkett, geklebt	2000	10 Prüfstellen, 5 PTB-Referenzmessungen
Trittschalldämmung	Betondecke mit schwimmendem Estrich, Auflage Echtholzparkett, geklebt	2000	10 Prüfstellen
Luftschalldämmung	Holzbalkendecke, Auflage Trockenestrich	1997	10 Prüfstellen, 4 PTB-Referenzmessungen
Trittschalldämmung	Holzbalkendecke, Auflage Trockenestrich	1997	10 Prüfstellen
Luftschalldämmung	Holzbalkendecke	1994	11 Prüfstellen, 4 PTB-Referenzmessungen
Trittschalldämmung	Holzbalkendecke	1994	11 Prüfstellen

Die dabei auftretenden empirischen Standardabweichungen bezogen auf den Mittelwert liegen bei hohen Frequenzen unter 0,1 und steigen zu tiefen Frequenzen an (Bild 5.4). Als Maximalwert kann für die bezogene Unsicherheit abgeschätzt werden:

$$\frac{u(T_{\text{rev}})}{T_{\text{rev}}} = \frac{s}{T_{\text{rev}}} \approx \begin{cases} 0,3 - 0,2 \lg\left(\frac{f}{50 \text{ Hz}}\right) & f < 500 \text{ Hz} \\ 0,1 & f \geq 500 \text{ Hz} \end{cases} \quad (5.30)$$

Diese Abschätzung wurde so gewählt, dass lediglich ein einziger Punkt in Bild 5.4 oberhalb dieser Gerade liegt. Dies ist erforderlich, da die zugrundeliegenden Messungen (Vergleichsmessungen, deren Ergebnis die Anerkennung als Prüfstelle bestimmt) mit besonderer Sorgfalt durchgeführt wurden. Unter Praxisbedingungen sind hier eher größere Streuungen zu erwarten.

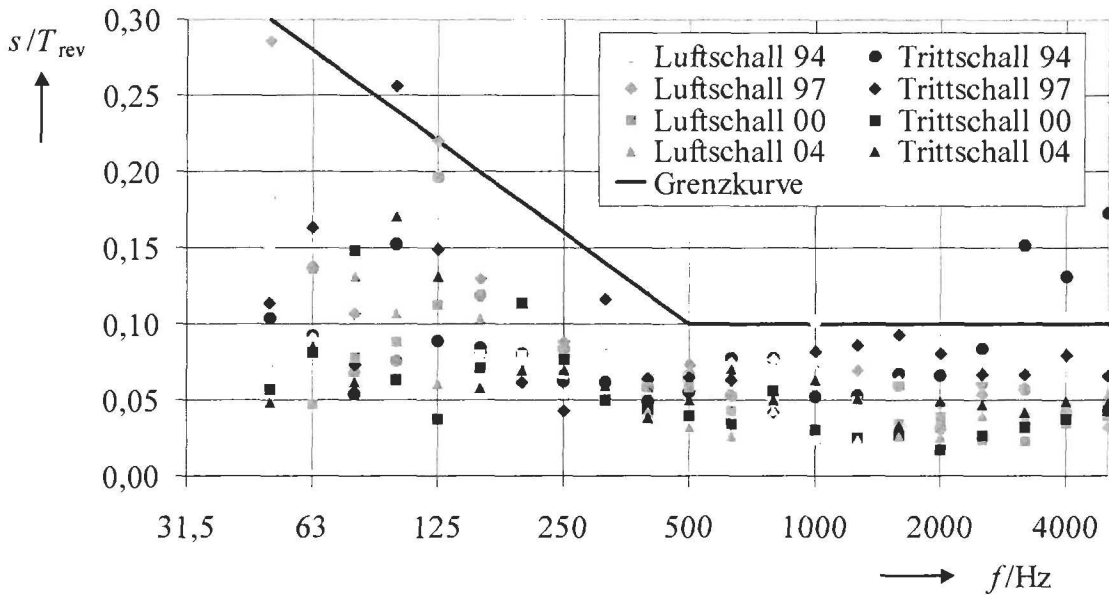


Bild 5.4 Auf Mittelwerte bezogene empirische Standardabweichungen für die Nachhallzeitmessung, berechnet aus den Vergleichsmessungen

Ein weiterer Aspekt bei der Ermittlung des Absorptionsvermögens ist die Frage der Mittelung. Als Kenngröße wird letztlich das mittlere Absorptionsvermögen verwendet, wobei dieses üblicherweise aus der mittleren Nachhallzeit T_{rev} wie folgt ermittelt wird

$$A_1 = \frac{24 \ln(10) V}{c} \frac{1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{rev,i})} \quad (5.31)$$

Die entscheidende Frage ist nun, ob diese Mittelungsvorschrift den physikalischen Gegebenheiten entspricht, da eine Mittelung über die Absorption

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i) \\ &= \frac{24 \ln(10) V}{c} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_{rev,i}} \right) \end{aligned} \quad (5.32)$$

zu einem (anderen) mittleren Absorptionsvermögen A_2 führt. Mit zunehmender Streuung der einzelnen gemessenen Nachhallzeiten ergibt sich eine wachsende Diskrepanz zwischen den Ergebnissen nach (5.31) und (5.32). Um zu quantitativen Aussagen für diesen Effekt zu kommen, wurden in einem üblichen bauakustischen Empfangsraum von 50 m³ Volumen und 1 – 2 s Nachhallzeit die Nachhallzeiten drei Mal wiederholt gemessenen, wobei jeweils die 15, 20 und 30 dB – Abfälle ausgewertet wurden. Die Abweichung der Absorptionskorrektur

$$\Delta K_A = 10 \lg \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \text{ dB} \quad (5.33)$$

(Bild 5.5) liegt – abgesehen von den Werten bei 63 Hz, bei denen im untersuchten Raum offenbar größere Schallfeldinhomogenitäten auftreten – bei tiefen Frequenzen durchaus in der Größenordnung von $-0,5$ dB und steigt zu höheren Frequenzen auf 0 dB an. Es treten nur negative Werte auf, d.h. A_1 ist immer kleiner als A_2 .

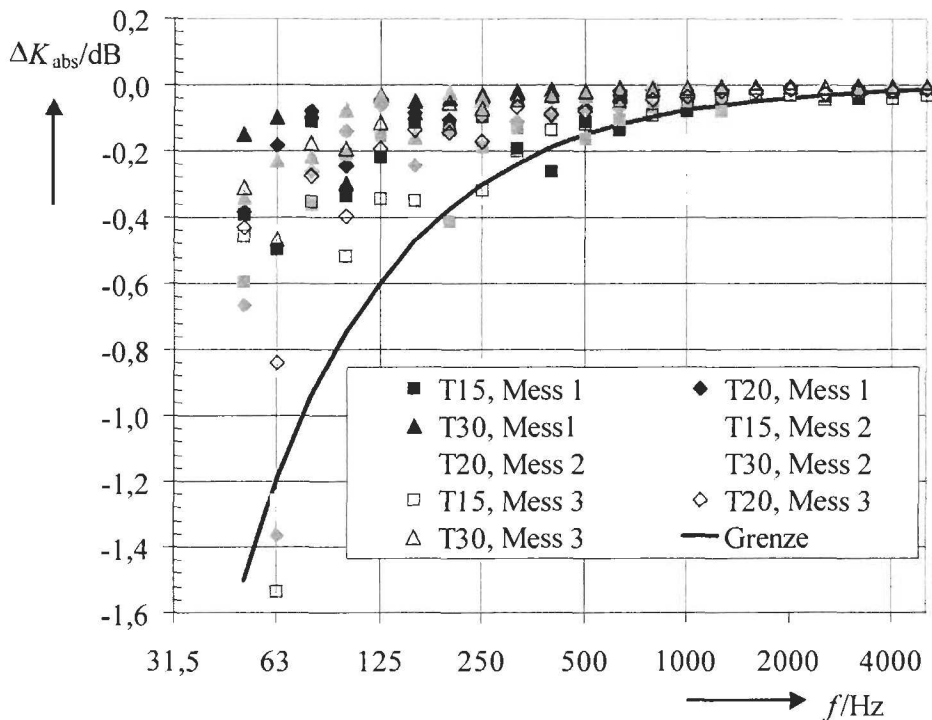


Bild 5.5 Unterschiede der Absorptionskorrektur für verschiedene Mittelungsarten und Maximalwert dieser Abweichung nach Gl. (5.34)

Um hier zu einer Einschätzung zu kommen, welche Mittelungsart korrekt ist, muss man sich den Zweck der Messung vor Augen führen. Dieser besteht darin, die vom Prüfling in den Empfangsraum eingespeiste Schallleistung zu bestimmen. Bei Verwendung des Diffusfeldverfahrens muss dazu bekannt sein, wie viel Energie pro Zeiteinheit vom Raum dissipiert wird, also wie groß die Dämpfung ist. Die Zielgröße ist demnach das Absorptionsvermögen und nicht die Nachhallzeit und es erscheint dann nur folgerichtig, die Mittelung nach Gl. (5.32) auszuführen.

Dass die Abweichungen ΔK_A bei tiefen Frequenzen groß sind, liegt an der dort vorliegenden geringen Zahl von Eigenfrequenzen pro Terzband. Im betrachteten Raum gibt es in der 50 Hz – Terz gar keine, in der 63 Hz – Terz drei und in der 80 und 100 Hz - Terz jeweils 5 Moden. Die Moden innerhalb eines Terzbands können durchaus sehr unterschiedliche Dämpfungen aufweisen, da jede eine individuelle Verteilung der Feldgrößen aufweist und somit die Wirksamkeit der vorhandenen Absorption durch ihre Lage bestimmt wird. Wenn nun unterschiedliche Raumpunkte als Quell- und Mikrofonort verwendet werden, so werden die Moden unterschiedlich stark angeregt und es kommt zu größeren Streuungen der innerhalb eines Terzbands gemessenen Nachhallzeiten. Mit steigender Frequenz nimmt die Modenzahl zu und die Abweichungen ΔK_A werden entsprechend geringer.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 53(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 53(112) of report of 2004-11-10

Der Maximalwert der Abweichungen lässt sich abschätzen durch

$$\Delta K_{A,\max} = -1,5 \frac{50 \text{ Hz}}{f} \text{ dB} . \quad (5.34)$$

Die zugehörige Kurve ist in Bild 5.5 dargestellt.

In der bezogenen Standardabweichung nach Bild 5.4 ist die Mittelungsart bislang nicht enthalten, da bei den Vergleichsmessungen immer über die Nachhallzeiten gemittelt wird. Zur Unsicherheit nach Gl. (5.19) ist also die Unsicherheit durch die Mittelungsart hinzuzufügen, die sich unter Annahme einer Rechteckverteilung zwischen 0 und $\Delta K_{A,\max}$ nach GUM zu

$$u(\Delta K_A) = \frac{\Delta K_{A,\max}}{\sqrt{12}} \quad (5.35)$$

ergibt.

Insgesamt ist die Unsicherheit der Nachhallzeitmessung für den Absorptionsterm dominant (Gln. (5.20), (5.27), (5.29) und (5.30)), so dass sich in der Überlagerung aller Effekte die Frequenzabhängigkeit der Unsicherheit der Nachhallmessung auch in der kombinierten, Unsicherheit des Absorptionsterms widerspiegelt (Bild 5.6).

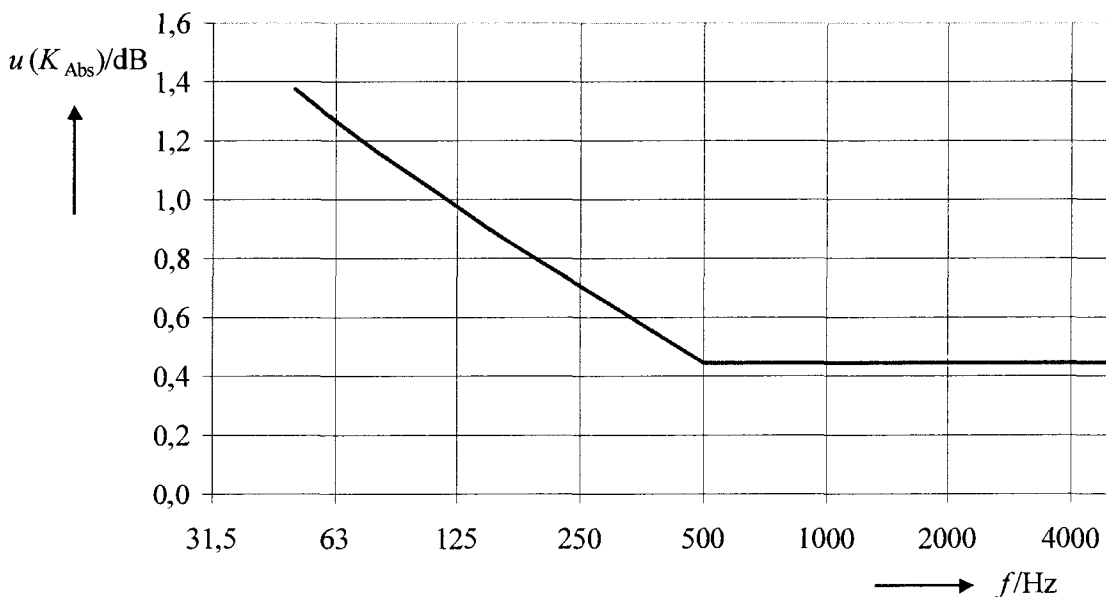


Bild 5.6 Unsicherheit der Absorptionskorrektur berechnet nach Gln. (5.19) und (5.35)

5.3. Zur Unsicherheit der Schalldruckpegeldifferenz

Die Unsicherheit der Schalldruckpegeldifferenz kann aus den PTB-Vergleichsmessungen abgeschätzt werden, da Messdaten vorliegen, die bei unverändertem Objekt und Prüfstand von verschiedenen Messpersonen mit unterschiedlichen Messgeräten und unterschiedlichen Mittelungsarten (kontinuierlich veränderte oder diskrete Mess- und Anregungspositionen) gewonnen wurden (vgl. Tabelle 5.1). Die Standardabweichung dieser Schalldruckpegeldifferenzen wird verursacht durch die Variationen in den auftretenden Störgeräuschen, verwendeten Messtechniken, Quell- und Mikrofonpositionen sowie meteorologischen Bedingungen

$$s_{VM} = \left[u^2(K_{stör}) + u^2(K_{SLM1}) + u^2(K_{SLM2}) + u^2(K_{mitt1}) + u^2(K_{mitt2}) + u^2(K_{quellpos}) + u^2(K_{met}) \right]^{1/2} \quad (5.36)$$

Sie liegt bei höheren Frequenzen unter 1 dB und steigt zu tiefen Frequenzen hin an. Konservativ lässt sich diese Streuung abschätzen als

$$s_{VM} \approx \begin{cases} 3 \text{ dB} - 2 \lg\left(\frac{f}{50 \text{ Hz}}\right) \text{ dB} & f < 500 \text{ Hz} \\ 1 \text{ dB} & f \geq 500 \text{ Hz} \end{cases} \quad (5.37)$$

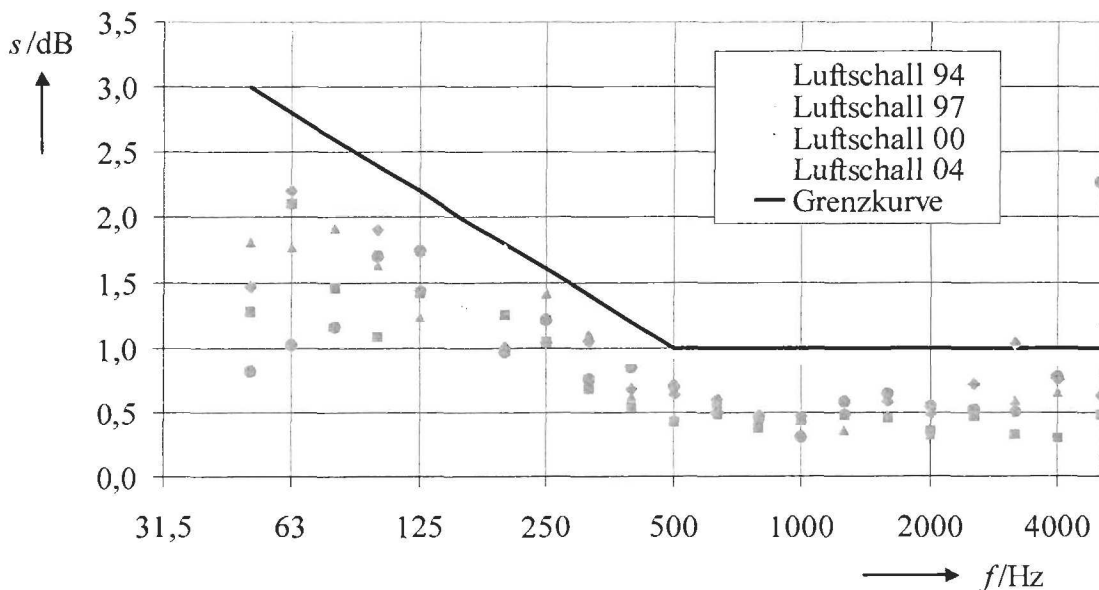


Bild 5.7 Unsicherheit der Schalldruckpegeldifferenz aus den Vergleichsmessungen

5.4. Zur Unsicherheit bei den Vergleichsmessungen an der MPA Dortmund

Dankenswerterweise hat die MPA Dortmund Ergebnisse der dort regelmäßig stattfindenden Vergleichsmessungen zur Verfügung gestellt. Es liegen gemessene Schalldämmmaße von gut 70 Messteams vor, die mit ihrer eigenen Messtechnik am selben Objekt in der selben Bausituation Messungen durchführen. Die Messungen an jedem Objekt erstrecken sich über jeweils drei Jahre. Zunächst liefert jedes Messteam ein erstes Messergebnis ab. Sind die Abweichungen zu einem vorher bestimmten Referenzwert signifikant, so werden die Gründe dafür untersucht und es wird gegebenenfalls eine erneute Messung durchgeführt. Für die Auswertungen im Rahmen dieses Projekts interessieren die ersten Ergebnisse, da diese ein Abbild der in der Praxis tatsächlich auftretenden Unsicherheiten sind.

Die empirische Standardabweichung dieser Ergebnisse umfasst die Unsicherheitsbeiträge aus 5.2 und 5.3

$$s = \left[u^2(K_{\text{stör}}) + u^2(K_{\text{SLM1}}) + u^2(K_{\text{SLM2}}) + u^2(K_{\text{mitt1}}) + u^2(K_{\text{mitt2}}) + u^2(K_{\text{abs}}) + u^2(K_{\text{quellpos}}) + u^2(K_{\text{met}}) \right]^{1/2} \quad (5.38)$$

Einen Vergleich dieser Streuung mit der quadratischen Summe der Grenzkurven aus 5.2 und 5.3 zeigt Bild 5.8. Deutlich ist zu erkennen, dass die Grenzkurve auch für die Messungen an der MPA Dortmund näherungsweise ihre Gültigkeit behält. Unter 2 kHz liegt die Streuung immer unter der Grenzkurve, bei höheren Frequenzen kommt es teilweise zu erheblichen Überschreitungen. Der Grund hierfür ist in der z.T. sehr hohen Schalldämmung (diagonale Messrichtung in einer 4-Raum-Anordnung) zu suchen, so dass die Störgeräuschkorrektur viel stärker zur Unsicherheit beiträgt, als bei den PTB-Vergleichsmessungen.

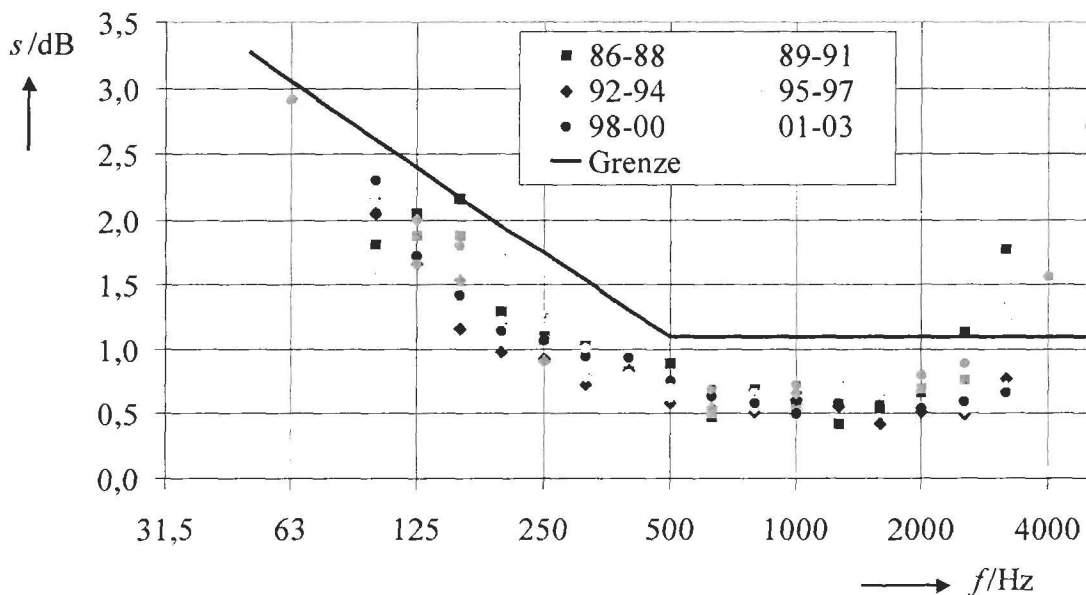


Bild 5.8 Unsicherheit der Vergleichsmessungen in den verschiedenen Jahren an der MPA Dortmund und Grenzkurve aus den PTB Vergleichsmessungen (Kap. 5.2 und 5.3)

5.5. Zum Einfluss der verwendeten Messgeräte

Im Rahmen des Ringversuchs an der Kalksandsteinwand wurden wiederholte Schalldämmungs-Messungen von 12 verschiedenen Prüfstellen in jeweils eigenen Prüfständen durchgeführt. Zusätzlich hat auch ein PTB Messteam mit der selben Messtechnik in jedem der beteiligten Prüfstände eine Schalldämmung experimentell bestimmt. Vergleicht man die in den jeweiligen Vergleichsstreuungen enthaltenen Unsicherheiten, so erkennt man, dass sie sich nur im Messgeräteeinfluss unterscheiden. Der summarische Messgeräteeinfluss müsste somit aus

$$u(K_{SLM}) = \sqrt{u^2(K_{SLM1}) + u^2(K_{SLM2})} = \sqrt{s_R^2 - s_{R,PTB}^2} \quad (5.39)$$

errechnet werden können (Bild 5.9).

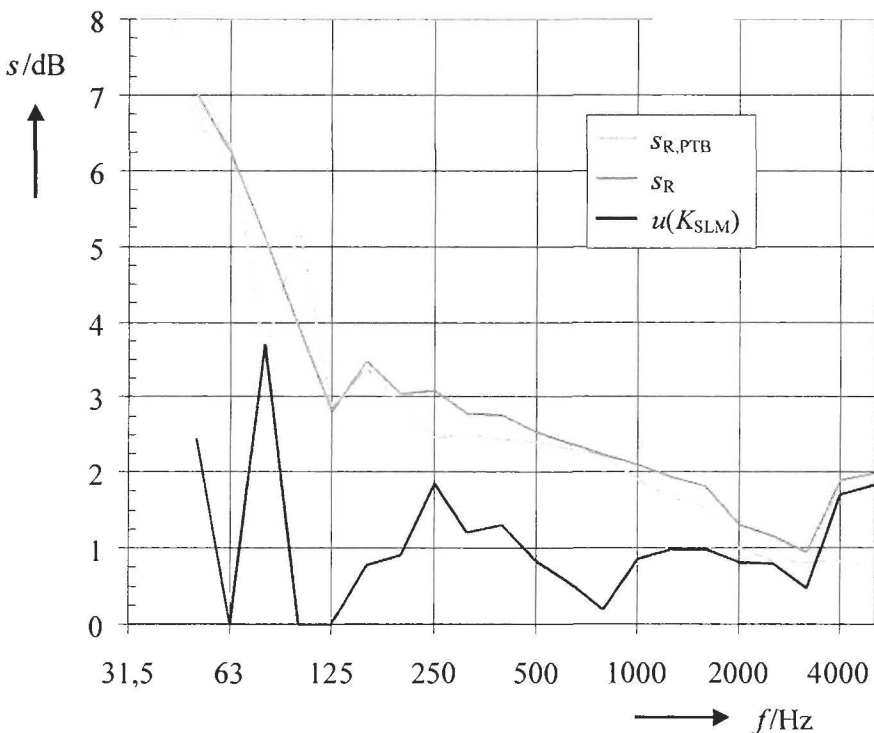


Bild 5.9 Vergleichsstreuungen des Kalksandsteinwand-Ringversuchs, PTB-Ergebnisse, Ergebnisse der Prüfstellen und berechneter Messgeräteeinfluss

Bei 63, 100 und 125 Hz wird der Ausdruck unter der Wurzel auf der rechten Seite von Gl. (5.39) negativ, bei diesen Frequenzen kann der Messgeräteeinfluss daher nicht berechnet werden. Bei den anderen Frequenzen ist dagegen eine Berechnung möglich und man erkennt, dass der Messgeräteeinfluss mit der Frequenz stark schwankt und Werte zwischen 0 und 3 dB annehmen kann. Insgesamt scheint der Einfluss damit recht groß zu sein, z.T. sogar größer als der in den vorherigen Abschnitten ermittelte summarische Einfluss aus Mittelung, Quellpositionen, Absorptionskorrekturen usw.. Die Ursache hierfür ist in der aus nur 12 Werten abgeschätzten Standardabweichung zu suchen. Das 95%-Konfidenzintervall für die Standardabweichung umfasst in diesem Fall mehrere dB (vgl. Kapitel 1), so dass sich die

Standardabweichungen s_R und $s_{R,PTB}$ statistisch nicht signifikant voneinander unterscheiden. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden die separat ermittelten Messgeräteeinflüsse daher nicht weiter verwendet. Es wird vielmehr auf die Ergebnisse des Abschnitts 5.2 zurückgegriffen.

5.6. Zur Unsicherheit der einfallenden Schalleistung

Wie in [We01] ausgeführt, ist die auf den Prüfling einfallende Schalleistung keiner direkten Messung zugänglich. Vielmehr handelt es sich um ein gedankliches Konstrukt, das sich aus der Modellvorstellung eines halbrundlich ausgedehnten diffusen Schallfelds ergibt, dessen Berandungsebene der Prüfling ist. Unter diesen Annahmen gelangt man zur üblicherweise verwendeten Gl. (5.2).

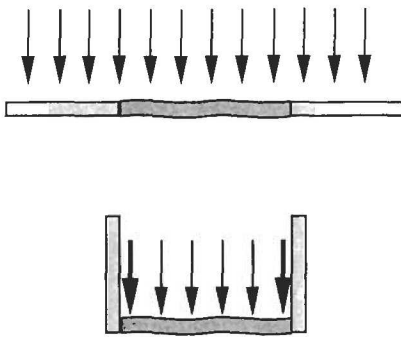


Bild 5.10 Einfallende Leistung im unendlichen Halbraum und in einem seitlich begrenzten Raum

Bei real ausgeführten Messungen, also in Labor-Senderräumen üblicher Abmessungen wie auch in den meisten Bausituationen, liegen diese Voraussetzungen jedoch nicht vor. Neben Abweichungen aufgrund der Verteilung der Schalleinfallswinkel, unzureichender Modendichte bei tiefen Frequenzen usw. spielen auch die Berandungen des Schallfelds eine wesentliche Rolle [We01]. Durch die Anwesenheit der seitlichen Berandungen kommt es zu einem erhöhten Schalleinfall an den Rändern des Prüflings (Bild 5.10). Die räumliche Ausdehnung dieser Überhöhung liegt bei ca. dem 0,3-fachen der Luftschallwellenlänge. Physikalisch erklären lässt sich dies reziprok zu dem Effekt, dass eine schwingende Platte mehr Schall aussendet, wenn sie nicht in den unbegrenzten Halbraum sondern in einen seitlich begrenzten Raum abstrahlt.

Als Gleichung für die einfallende Schalleistung wird in [We01]

$$W_1 = \frac{p_1^2}{\rho c} \frac{S}{4} \left(1 + \frac{2(l_1 + l_2)}{k S} \right) \quad (5.40)$$

angegeben, wobei l_1 und l_2 die Kantenlängen des Prüflings sind. Als Korrektur für die einfallende Schalleistung ergibt sich damit

$$K_{W1} = -10 \lg \left(1 + \frac{2(l_1 + l_2)}{k S} \right) \text{ dB} . \quad (5.41)$$

Anzuwenden ist diese Korrektur in Messanordnungen, bei denen der Prüfling die gesamte Trennwand zwischen zwei benachbarten Räumen einnimmt, also in Wandprüfständen. In Fensterprüfständen ist der Effekt vernachlässigbar.

Für übliche Wandprüfstände mit $S = 10 \text{ m}^2$ ergeben sich Korrekturen von mehreren dB bei tiefen Frequenzen (Bild 5.11). Der Einfluss der Form ist mit nur 0,1 dB vernachlässigbar.

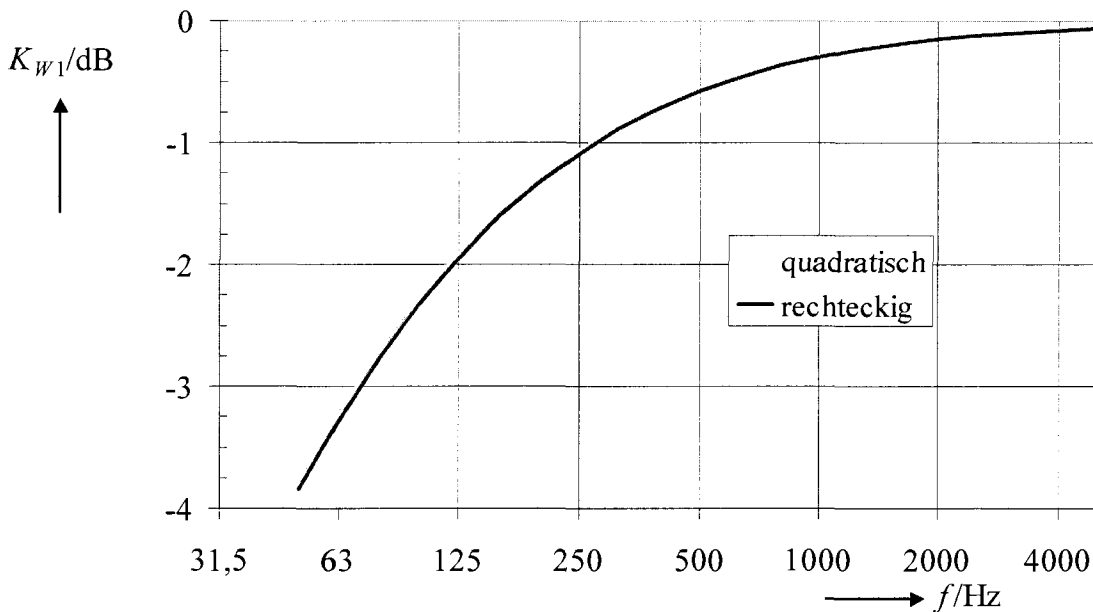


Bild 5.11 Korrektur der einfallenden Schalleistung nach [We01], $l_1/l_2 = 1$ (quadratisch), $l_1/l_2 = 1,6$ (rechteckig)

Bei Anwendung der Korrektur (5.41) spielt für die Unsicherheit der einfallenden Schalleistung jedoch ein anderer Effekt eine entscheidende Rolle. Insbesondere bei tiefen Frequenzen liegt nämlich in Senderäumen üblicher Abmessungen kein diffuses Schallfeld vor. Es existieren vielmehr einzelne Moden, so dass der anregende Schalldruck weder in seiner räumlichen Einwirkung noch in der spektralen Verteilung hinreichend gleichmäßig ist. Die Grenzfrequenz, ab der sich in Räumen ein diffuses Schallfeld einstellt, berechnet sich nach SCHRÖDER aus dem Raumvolumen V und der Nachhallzeit T_{rev} [Ku73] zu

$$f_g \approx \frac{5000}{\sqrt{2,2\pi \frac{V}{\text{m}^3} T_{\text{rev}}}} \text{ Hz.} \quad (5.42)$$

Für bauakustische Prüfstände wird in [ISO 140-1] eine Nachhallzeit zwischen 1 und 2 s gefordert, so dass sich aus dem ebenfalls geforderten Volumen von ca. 50 m³ eine untere Grenzfrequenz zwischen 270 und 380 Hz einstellt. Erst ab diesen Frequenzen kann von einem diffusen Schallfeld ausgegangen werden. Eine Erhöhung des Volumens auf die für Hallräume übliche Größe von 200 m³ reduziert die untere Grenzfrequenz um die Hälfte.

Abweichungen vom ideal diffusen Feld können sowohl zu überhöhter als auch zu verminderter Schalltransmission führen und leisten einen wesentlichen Beitrag zu den großen Werten der Laborstandardabweichung bei tiefen Frequenzen. Eine Berechnung der Größe des Effekts erscheint im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen jedoch nicht möglich.

5.7. Zur Unsicherheit der transmittierten Schalleistung

Bei Anwendung des Schalldruckverfahrens wird die transmittierte Schalleistung mit dem Diffusfeldverfahren ermittelt. Allerdings wird in der Bauakustik sowohl die Waterhouse-[Wa55] als auch die Vorländer-Korrektur [Vo95] vernachlässigt. Erstere berücksichtigt die vor den Wänden gegenüber dem Volumenmittelwert erhöhte Energiedichte, letztere den unter Einbeziehung der Luftabsorption ermittelten Zusammenhang zwischen mittlerem Schalldruckquadrat und Schalleistung. Unter Einbeziehung dieser beiden Korrekturen ist die transmittierte Schalleistung

$$W_2 = \frac{p_2^2}{\rho c} \frac{A}{4} e^{A/S_2} \left(1 + \frac{S_2 c}{8 f V} \right) \quad (5.43)$$

mit dem Volumen des Empfangsraums V und der Oberfläche des Empfangsraums S_2 . Die entsprechende Korrektur lautet dann

$$K_{W_2} = 10 \lg \left[e^{A/S_2} \left(1 + \frac{S_2 c}{8 f V} \right) \right] \text{ dB} . \quad (5.44)$$

Schon in [We01] wurde darauf hingewiesen, dass die Korrektur für die einfallende Schalleistung in etwa der negativen Korrektur der transmittierten Schalleistung entspricht (Bild 5.11, Bild 5.12). Eine Anwendung beider Korrekturen würde demnach Schalldämmungen ergeben, die in etwa einem Weglassen beider Korrekturen entsprechen. Generell muss jedoch von einem solchen Weglassen abgeraten werden, da ein solches Vorgehen bei Vergleichen zu Ergebnissen, die mit anderen Verfahren bestimmt wurden, etwa mit dem Intensitätsverfahren, häufig zu Unstimmigkeiten führt.

Doch auch bei der transmittierten Schalleistung wird die Unsicherheit bei Berücksichtigung der Korrektur (5.44) durch den Umstand dominiert, dass es sich beim Schallfeld im Empfangsraum nur näherungsweise um ein Diffusfeld handelt, so dass die Schalleistung W_2 mit größeren Unsicherheiten behaftet ist, deren Größe im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht bestimmt werden kann.

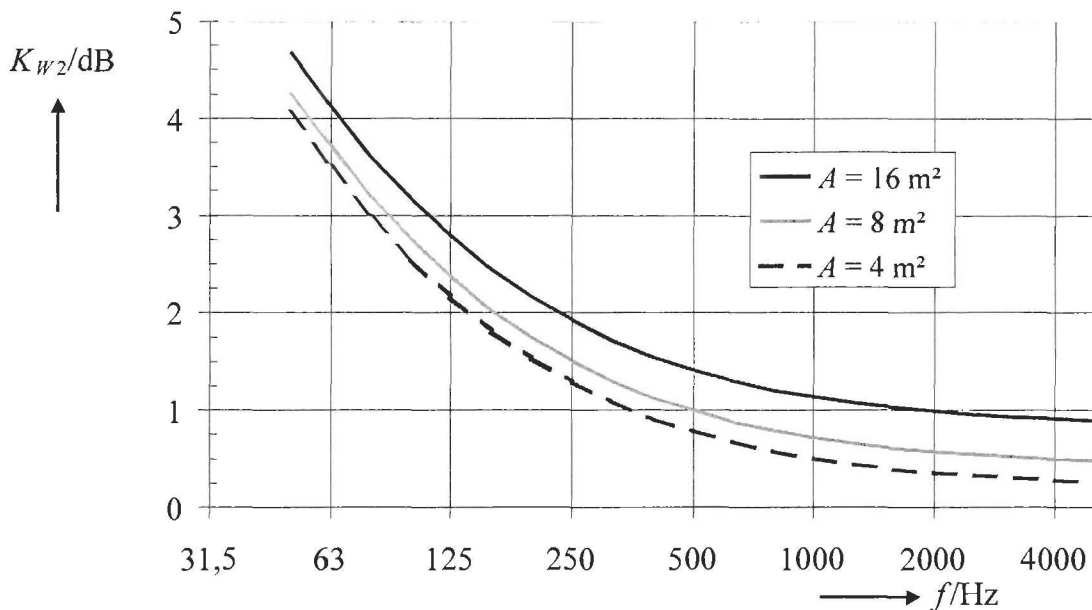


Bild 5.12 Korrektur der transmittierten Schalleistung, Beispiel: $V = 50 \text{ m}^3$, $S = 83 \text{ m}^2$, $A = 4; 8; 16 \text{ m}^2$ (entspricht Nachhallzeiten von 2,0; 1,0 und 0,5 s)

5.8. Zum Einfluss der Quellposition

Ringversuchs-Messergebnisse aus Fensterprüfständen führten zu der Vermutung, dass die Quellposition insbesondere bei tiefen Frequenzen einen großen Einfluss auf das Schalldämmungs-Messergebnis hat. Dieser Effekt wurde daher in einem anschließenden Projekt in mehreren verschiedenen Fensterprüfständen bei Frequenzen von 50 bis 250 Hz untersucht [OP89].

Neben numerischen und analytischen Berechnungen wurden vor allem auch Messungen durchgeführt, bei denen die Position einer Schallquelle innerhalb eines Rasters variiert wurde. Das Raster deckte dabei ca. 1/8 des Senderraumvolumens ab, wobei Mindestabstände von 40 bzw. 60 cm zu den Raumbegrenzungsflächen eingehalten wurden. Die mittels zweier Drehmikrofone gemessenen Schalldruckpegeldifferenzen zwischen Senderraum und Empfangsraum zeigten eine deutliche Abhängigkeit von der Anregeposition. Eine statistische Auswertung über alle ca. 1000 Anregepositionen lieferte eine insgesamt doch recht große Streuung (Bild 5.13). Es zeigt sich jedoch auch, dass die Werte für die verwendete Doppelscheibe tendenziell größer sind als für die Metallelemente, die höhere Dämmungen aufweisen und in geringerem Maße Resonanzerscheinungen unterliegen. Für die Doppelscheibe liegen Ergebnisse aus zwei verschiedenen Prüfständen vor.

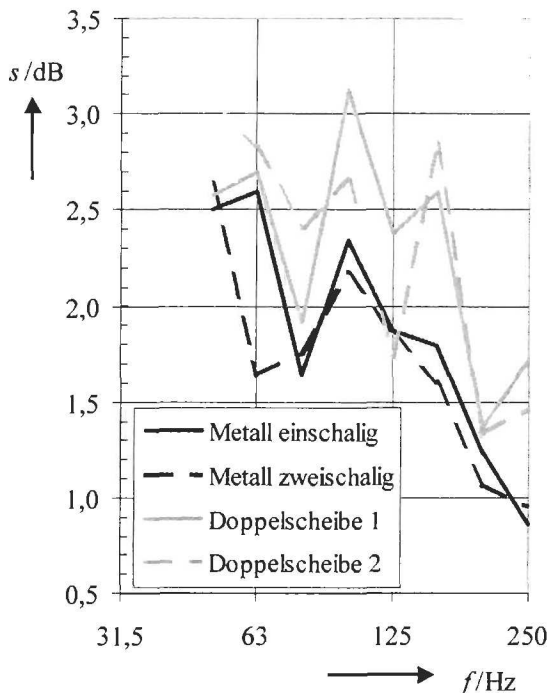


Bild 5.13 Empirische Standardabweichung der mittleren Schalldruckpegeldifferenzen für verschiedene Objekte

Als Konsequenz aus diesen Ergebnissen wurde eine Prozedur vorgeschlagen, mit deren Hilfe einige wenige Lautsprecherpositionen so ausgewählt werden, dass der Beitrag zur Gesamtunsicherheit des Schalldämm-Maßes nur ca. 10% beträgt. Diese Prozedur fand Eingang in die Normung (ISO 140-3).

Interessant ist nun ein Vergleich zwischen Bild 5.13 und Bild 5.7, in dem die Summe der Unsicherheiten aus Messgerät-, Luftdruck- und Temperatureinflüssen sowie Quellpositionen aus den Vergleichsmessungen dargestellt ist. Die Unsicherheiten liegen in der gleichen Größenordnung. Die Ursache hierfür liegt darin, dass bei Fensterprüfständen der Einfluss der Quellposition besonders kritisch ist, da im Gegensatz zu Wandprüfständen eine Anregung über eine relativ kleine Fläche erfolgt (stärkere Modenabhängigkeit). Zudem sind in die Streuungen zwischen Ergebnissen aus je einer Quellposition dargestellt, wohingegen in den Bild 5.7 zugrundeliegenden Ergebnissen häufig eine Mittelung über mehrere Quellpositionen enthalten ist. Es ist somit zu erwarten, dass verschiedene Quellpositionen in der Praxis zu eher geringeren Streuungen

der Schalldämmung führen, als in Bild 5.13 dargestellt. Bei Verwendung von n Lautsprecherpositionen multipliziert sich der Beitrag dieser Unsicherheitskomponente mit $1/\sqrt{n}$.

5.9. Zum Einfluss von Luftdruck und Temperatur

Luftdruck- und Temperaturschwankungen führen zu einer systematischen Änderung der Schalldämmung. Durch theoretische wie auch experimentelle Untersuchungen wurde in [WB03] gezeigt, dass die entsprechende Korrektur

$$K_{\text{met}} = m \lg \left(\frac{B}{B_N} \sqrt{\frac{T_N}{T}} \right) \text{ dB} \quad (5.45)$$

beträgt, wobei B_N und T_N Bezugswerte für Luftdruck und Temperatur (in K) sind. Der Faktor m liegt für einschalige Bauteile sehr gut beim theoretisch erwarteten Wert von -20 und für die zwei für die Experimente verwendeten zweischaligen Bauteile zwischen -36 und -10 . Somit erscheint die Verwendung des Werts -20 für alle Arten von Bauteilen angebracht. Die Korrektur ist ihrem Betrag nach gering (Bild 5.14). Vor allem der Temperatureinfluss beträgt nur wenige zehntel dB.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 62(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 62(112) of report of 2004-11-10

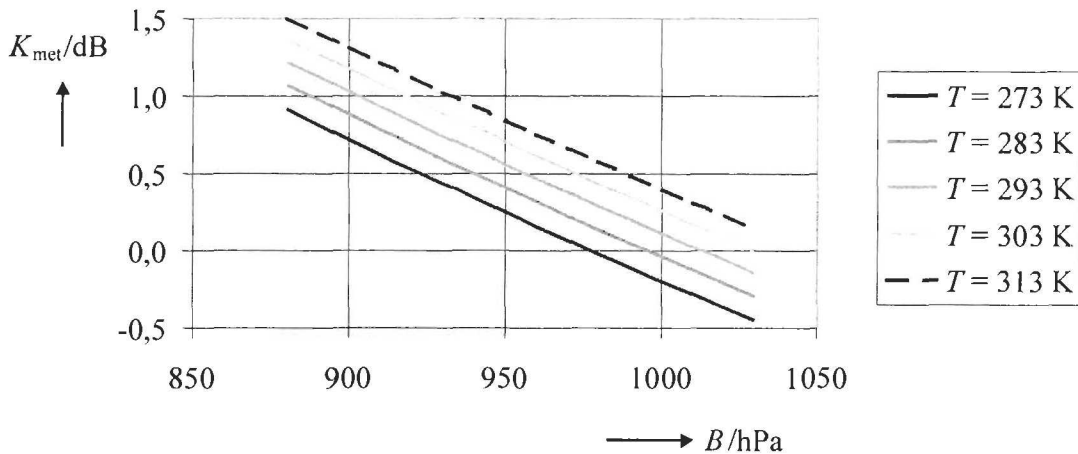


Bild 5.14 Meteorologische Korrektur für die Schalldämmung nach [WB03], $m = -20$

Zur Ableitung von (5.45) wurde vorausgesetzt, dass das Prüfobjekt selbst seine Eigenschaften nicht ändert. Für die meisten Bauteile kann dies sicher vorausgesetzt werden. Bei speziellen Verglasungen kann es jedoch zu zusätzlichen Temperatureinflüssen kommen, die durch Gl. (5.45) bislang nicht abgedeckt sind.

Die Unsicherheit der meteorologischen Korrektur kann nun nach GUM aus (5.45) zu

$$u(K_{\text{met}}) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{\text{met}}}{\partial m}\right)^2 u^2(m) + \left(\frac{\partial K_{\text{met}}}{\partial B}\right)^2 u^2(B) + \left(\frac{\partial K_{\text{met}}}{\partial T}\right)^2 u^2(T)} \quad (5.46)$$

bestimmt werden. Berechnung der partiellen Ableitungen liefert schließlich

$$u(K_{\text{met}}) = \sqrt{\left[\lg\left(\frac{B}{B_N} \sqrt{\frac{T_N}{T}}\right)\right]^2 u^2(m) + \left(\frac{m}{\ln(10)}\right)^2 \left\{\left[\frac{u(B)}{B}\right]^2 + \left[\frac{u(T)}{2T}\right]^2\right\}} \quad (5.47)$$

Als nächstes muss nun für die Eingangsgrößen ein Schätzwert und eine zugehörige Standardunsicherheit bestimmt werden.

Für m können dazu die Messergebnisse aus [WB03] verwendet werden, wobei sich Werte von $u(m) = 1,82$ für einschalige Bauteile und $u(m) = 7,36$ für zweischalige Bauteile ergeben.

Beim Luftdruck existieren zwei prinzipielle Möglichkeiten. Die offensichtliche besteht darin, den Luftdruck zu messen und als Standardunsicherheit die Geräteangabe zu verwenden. In diesem Fall kommt man zu bezogenen Standardunsicherheiten von unter einem Prozent. Bislang wird der Luftdruck jedoch nicht gemessen und die Laboratorien besitzen meist auch keine rückgeführten Barometer. Daher ist es erforderlich, die auftretenden Luftdrücke etwas näher zu betrachten.

Für die Größe der auftretenden Luftdruckschwankungen sind im Wesentlichen zwei Effekte verantwortlich. Einerseits führen verschiedene Wetterlagen am gleichen Ort zu Änderungen des Luftdrucks und andererseits nimmt der Luftdruck systematisch mit wachsender geographischer Höhe ab. Dieser Zusammenhang wird in Bild 5.15 veranschaulicht.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 63(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 63(112) of report of 2004-11-10

Ausgewertet wurden hierfür die täglichen Luftdruckmesswerte verschiedener Wetterstationen in Deutschland für einen Zeitraum von 10 Jahren. Die wetterbedingten Luftdruckschwankungen am gleichen Ort führen zu sehr geringen Standardabweichungen von nur ca. 1% des Mittelwerts und auch die Spanne zwischen Maximum und Minimum ist mit ca. 6% vom Mittelwert niedrig. Für den Vergleich von Schalldämm-Messergebnissen aus dem selben Prüfstand (geographische Höhe konstant) kann somit ohne Luftdruckmessung

$$\frac{u(B)}{B} = 0,01 \quad (5.48)$$

angesetzt werden. Werden hingegen Schalldämm-Messergebnisse aus unterschiedlichen Prüfständen (unterschiedliche geographische Höhe) verglichen, so kann der Mittelwert des Luftdrucks in gegebener Höhe sehr gut durch die internationale Standardatmosphäre mit den Gleichungen

$$B(h) = B_0 (1 - a h)^b \quad (5.49)$$

$$B_0 = 101325,00 \text{ Pa} \quad (5.50)$$

$$a = 2,2560 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1} \quad (5.51)$$

$$b = 5,2553 \quad (5.52)$$

berechnet werden. Ein Bereich von 0 bis 500 m deckt sicher die allermeisten Prüfstellen ab, so dass sich für die anzusetzende Rechteckverteilung unter Berücksichtigung der maximal dreiprozentigen wetterbedingten Luftdruckschwankungen ein Druckbereich von 920 bis 1040 hPa ergibt, woraus eine bezogene Standardunsicherheit für den Luftdruck von

$$\frac{u(B)}{B} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{\sqrt{12}} \frac{2}{B_{\max} + B_{\min}} = 0,04 \quad (5.53)$$

folgt.

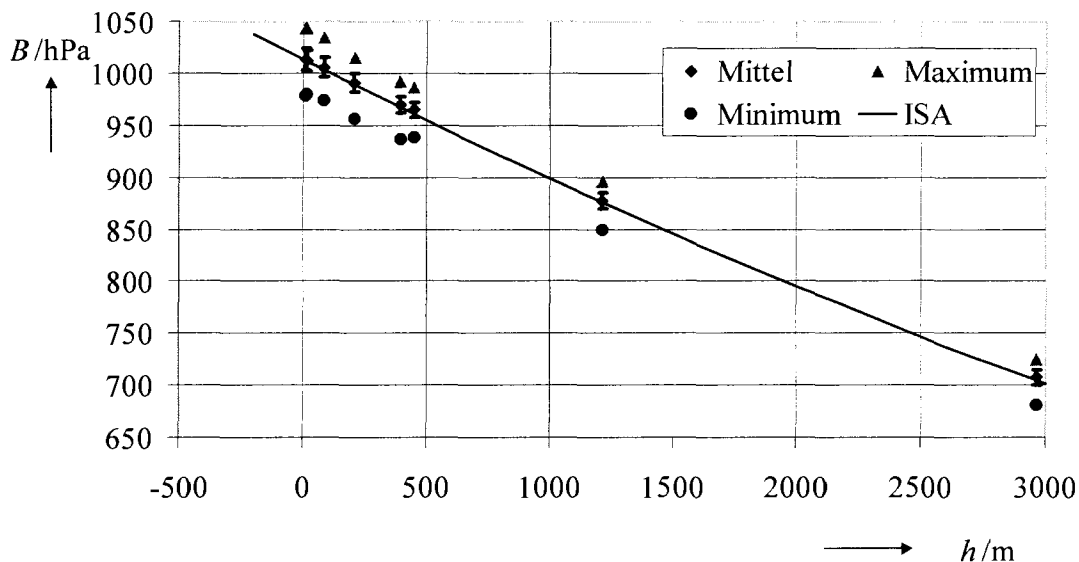


Bild 5.15 Zusammenhang zwischen geographischer Höhe und Luftdruck berechnet nach der internationalen Standardatmosphäre (ISA) sowie Mittelwerte, Standardabweichungen und Maximal- und Minimalwerte einiger deutscher Wettermessstationen (Quelle: Internetseite des Deutschen Wetterdienstes)

Auch für die Temperaturkorrektur sind die zwei Fälle Messung der Temperatur oder Nichtberücksichtigung der Temperatur zu betrachten. Im Fall der Messung kann für übliche Thermometer eine Standardunsicherheit von 1 K und damit eine bezogene Standardunsicherheit von

$$\frac{u(T)}{T} = 0,003 \quad (5.54)$$

angesetzt werden. Wird, wie bislang bei bauakustischen Messungen üblich, der Temperatureinfluss nicht berücksichtigt, so kann analog zum Luftdruck für Labormessungen eine Spanne von 286 bis 296 K angesetzt werden, so dass sich eine bezogene Standardunsicherheit von

$$\frac{u(T)}{T} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{\sqrt{12}} \frac{2}{T_{\max} + T_{\min}} = 0,01 \quad (5.55)$$

ergibt. Für Baumessungen ist die Spanne höher anzusetzen, etwa von 271 bis 301 K, was zu

$$\frac{u(T)}{T} = 0,03 \quad (5.56)$$

führt.

Das Unsicherheitsbudget für die verschiedenen Fälle zeigt Tabelle 5.2. Für die Berechnung des Unsicherheitsbeitrags des Wertes m wurden für die Bezugswerte die ungünstigen Annahmen $B_N = 1013 \text{ hPa}$ und $T_N = 296 \text{ K}$ getroffen. Die aufgeführten Unsicherheitsbeiträge

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 65(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 65(112) of report of 2004-11-10

treten dann bei derjenigen Kombination aus Luftdruck und Temperatur auf, bei der die Kennimpedanz den größten Abstand zum Referenzwert hat. Für das Beispiel wurde $B = 920 \text{ hPa}$ und $T = 303 \text{ K}$ verwendet.

Tabelle 5.2 Unsicherheitsbudget für die meteorologische Korrektur

Größe	Schätzwert	Standardunsicherheit des Schätzwerts	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag zur Schalldämmung
Luftdruck	B	Messung: $0,005 B$	normal	$\frac{m}{\ln(10)} \frac{1}{B}$	0,04 dB
		o. Mess. gleicher Ort: $0,01 B$	normal		0,09 dB
		o. Mess. versch. Ort: $0,04 B$	rechteck		0,35 dB
Temperatur	T	Messung: $0,003 T$	normal	$\frac{m}{\ln(10)} \frac{1}{2T}$	0,01 dB
		o. Mess. Labor: $0,01 T$	rechteck		0,04 dB
		o. Mess. Bau: $0,03 T$	rechteck		0,13 dB
m	-20	einschalig: 1,82	normal	$\lg\left(\frac{B}{B_N} \sqrt{\frac{T_N}{T}}\right)$	0,09 dB
		zweischalig: 7,36			0,35 dB

Tabelle 5.3 Unsicherheiten für die meteorologische Korrektur in dB

		einschalig			zweischalig		
		Mess.	o. Mess. Labor	o. Mess. Bau	Mess.	o. Mess. Labor	o. Mess. Bau
T	B						
	Mess.	0,10	0,11	0,16	0,35	0,35	0,38
	o. Mess. gl. Ort	0,13	0,13	0,18	0,36	0,36	0,38
	o. Mess. versch. Ort	0,36	0,36	0,38	0,50	0,50	0,51

5.10. Zum Einfluss des Kantenlängenverhältnisses und der Prüflingsgröße

Führt man für homogene rechteckige am Rand eingespannte Prüflinge ein Gedankenexperiment durch und vergrößert, ausgehend von einem Verhältnis 1:1 das Kantenlängenverhältnis bei gleichbleibendem Flächeninhalt kontinuierlich, so wird deutlich, dass der Prüfling vor allem bei tiefen Frequenzen zunehmend an Schwingungen gehindert wird und die Schalldämmung somit anwächst. Das gleiche Gedankenexperiment ausgeführt für eine Vergrößerung des Prüflings bei gleichbleibendem Kantenlängenverhältnis führt zu einer Verbesserung der Schwingfähigkeit und somit zu einer Verringerung der Schalldämmung. Messtechnisch treten diese Effekte jedoch nicht in Erscheinung, da sich bei Veränderung der Geometrie des Prüflings auch immer mehrere andere Parameter, wie etwa die Abmessungen von Sende- und Empfangsraum und somit die Schallfeldeigenschaften ändern. Um zu vergleichbaren Schalldämmungen für Bauteile zu gelangen, ist in ISO 140-2 die Fläche des Prüflings bei Wänden mit ca. 10 m^2 und das Kantenlängenverhältnis indirekt dadurch festgelegt, dass die kürzere Seite eine Länge von mindestens 2,30 m aufweisen muss.

Bei inhomogenen Bauteilen wie etwa Gipskartonständerwänden liegt der wesentliche Geometrieinfluss darin, dass die Abmessungen der Einzelelemente unterschiedlich gut zu

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 66(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 66(112) of report of 2004-11-10

den Abmessungen der Prüföffnung passen und somit spezielle Randstücke entstehen können, deren Schalldämmung von der Schalldämmung der sonstigen Wand abweicht. In [PS98] konnte gezeigt werden, dass dieser Effekt bei tiefen Frequenzen zu stark variierenden Schalldämmungen führt.

In [Ke04] wurde die Abhängigkeit der Schalldämmung dünner homogener Platten von der Plattengröße sowohl experimentell als auch analytisch untersucht. Bei Vergrößerung der Plattenfläche um den Faktor 9 ergab sich in weiten Frequenzbereichen eine Reduktion des Schalldämmmaßes um ca. 2 dB. Bei der Koinzidenzgrenzfrequenz und auch bei sehr tiefen Frequenzen war diese Reduktion stärker ausgeprägt.

Für die Schalldämmung von Wänden am Bau bedeutet diese Größenabhängigkeit eine zusätzliche Unsicherheit. Es ergibt sich nach [Ke04] bei vorkommenden üblichen Wandgrößen zwischen 4 und 25 m² eine Spanne von ca. ±0,7 dB um den Labor-Schalldämmwert für 10 m². Bei Zugrundelegung einer Rechteckverteilung führt dies zu

$$u(K_{\text{Größe}}) \approx \frac{1,4 \text{ dB}}{\sqrt{12}} \approx 0,4 \text{ dB}. \quad (5.57)$$

In den Labor-Ringversuchen ist dieser Unsicherheitsbeitrag bislang nicht enthalten, da die Prüflinge dabei immer ca. 10 m² groß waren.

Um auch zu experimentell abgesicherten Unsicherheits-Abschätzungen zu gelangen, wurde für einige der vorliegenden Ringversuchsergebnisse untersucht, ob ein systematischer Zusammenhang zwischen den Terzwerten der Schalldämmung und der Prüflingsgröße oder dem Kantenlängenverhältnis gefunden werden kann. Bei den beispielhaft dargestellten Ergebnissen (vgl. Bild 5.16, Bild 5.17, Bild 5.18, Bild 5.19) für eine schwere Kalksandsteinwand sowie eine mittelschwere Ziegelwand ist dies ebensowenig der Fall wie für die anderen untersuchten Beispiele. Allerdings variiert bei diesen Daten die Fläche nur zwischen 9,7 und 10,3 m² bzw. 9 und 16 m² und auch das Kantenlängenverhältnis deckt mit Werten zwischen 1 und 1,5 bzw. 1,8 nur einen kleinen Bereich ab. Zudem sind dem Geometrieinfluss all die anderen Einflüsse z.B. die Schallfeldinhomogenität untrennbar überlagert, so dass die offenbar geringen Auswirkungen der Prüflingsgeometrie verdeckt werden.

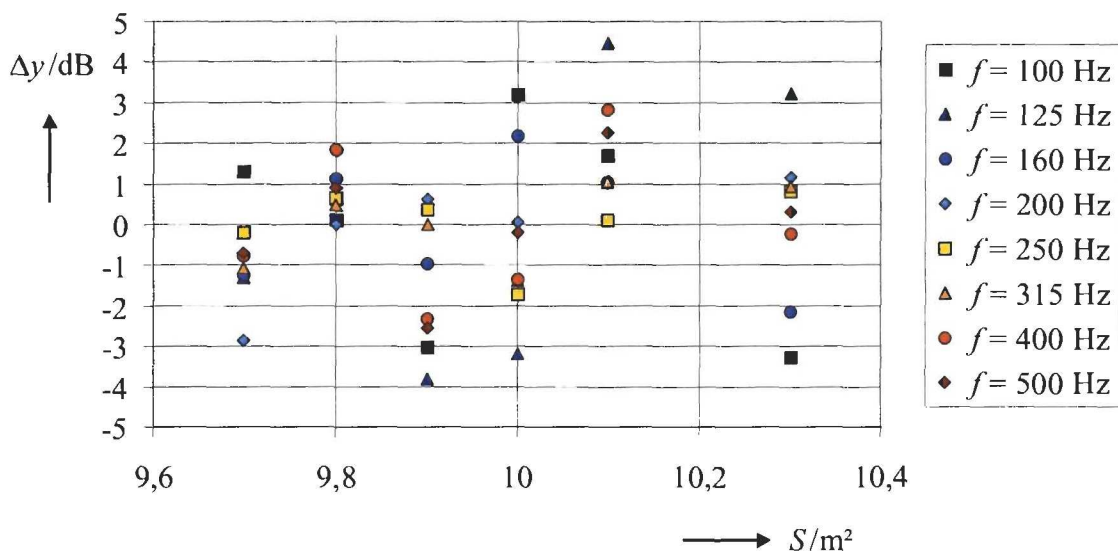


Bild 5.16 Differenzen der Schalldämmung im jeweiligen Prüfstand zum Mittelwert über alle Prüfstände in Abhängigkeit von der Prüflingsfläche, Bereich tiefer Frequenzen, mittelschwere Wand aus [LM86]

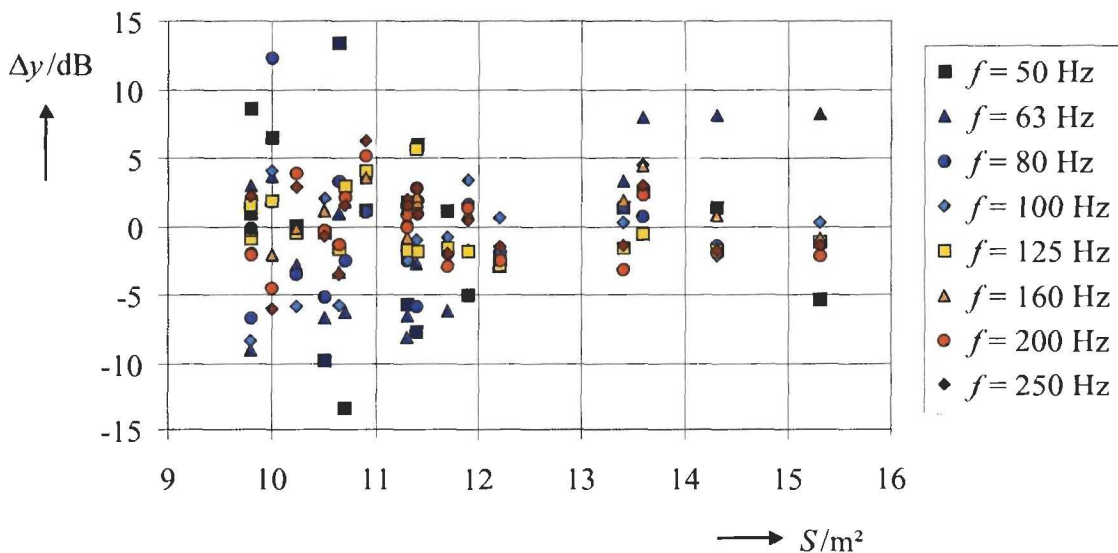


Bild 5.17 Differenzen der Schalldämmung im jeweiligen Prüfstand zum Mittelwert über alle Prüfstände in Abhängigkeit von der Prüflingsfläche, Bereich tiefer Frequenzen, Kalksandsteinwand aus [Me00] zuzüglich PTB-interner Daten

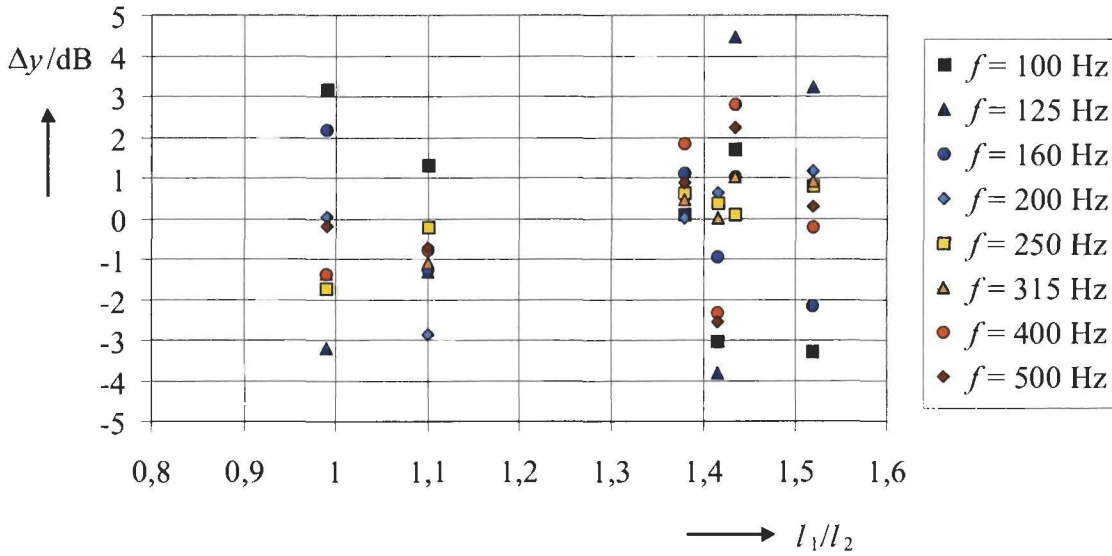


Bild 5.18 Differenzen der Schalldämmung im jeweiligen Prüfstand zum Mittelwert über alle Prüfstände in Abhängigkeit vom Kantenlängenverhältnis, Bereich tiefer Frequenzen, mittelschwere Wand aus [LM86]

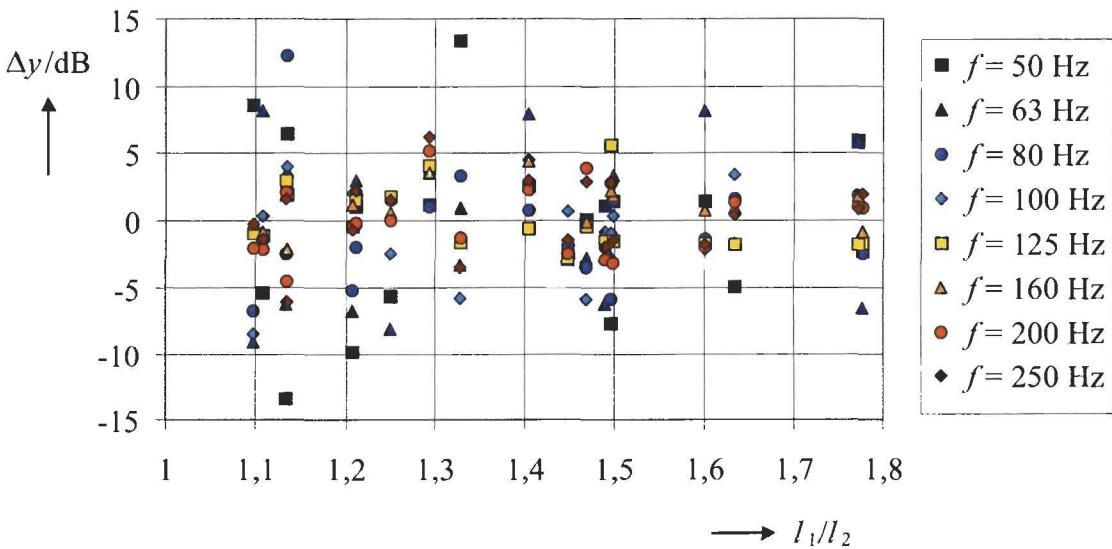


Bild 5.19 Differenzen der Schalldämmung im jeweiligen Prüfstand zum Mittelwert über alle Prüfstände in Abhängigkeit vom Kantenlängenverhältnis, Bereich tiefer Frequenzen, Kalksandsteinwand aus [Me00] zuzüglich PTB-interner Daten

5.11. Zum Einfluss der Randeinspannung und der Energieableitung

Bei Bau- wie auch bei Labormessungen kommen verschiedene Randeinspannungen des Prüflings zum Einsatz. Üblich sind feste und elastische Einspannungen unter Verwendung von Quellschuttel bzw. elastischem Fugenmaterial wie Silikon oder Acryl. Unterschiedliche Randbedingungen führen zu veränderten Frequenzlagen der einzelnen Körperschallmoden auf dem Prüfling. Da die Schalldämmung vor allem bei tiefen Frequenzen wesentlich von der Überlappung dieser Körperschallmoden mit den Raummoden von Sende- und Empfangsraum abhängt, ergibt sich ein ungerichteter Einfluss der Randeinspannung auf die Schalldämmung bei tiefen Frequenzen. Bei höheren Frequenzen sind hingegen zwei andere Effekte wesentlich. Dies ist zum Einen der Energieeintrag in den Prüfstand, der bei fester Einspannung auftritt, wie eine Dämpfung wirkt und somit die Schalldämmung erhöht. Zum Anderen führt die bei fester Einspannung höhere Steifigkeit des Prüflings, ebenfalls zu einer Erhöhung der Schalldämmung.

Während des Ringversuchs an der Kalksandsteinwand [Me00] und bei den weiteren Messungen an der gleichen Wand wurden Messungen in insgesamt 11 Prüfständen durchgeführt, bei denen die Wand einmal elastisch und einmal fest eingebaut war. Für die feste Einspannung wurden dabei mehrere Wiederholungsmessungen durchgeführt, bei der elastischen Einspannung nur eine.

Die Differenzen der Schalldämmungen

$$\Delta y = y_{\text{fest}} - y_{\text{elastisch}} \quad (5.58)$$

in elf verschiedenen Prüfständen zeigen in der Tat das erwartete Verhalten (Bild 5.20). Bei tiefen Frequenzen (bis ca. 125 Hz) treten große Änderungen in der Schalldämmung aufgrund der modalen Effekte auf. Eine generelle Richtung der Abweichung existiert jedoch nicht, so dass der Mittelwert aller Differenzen nahe bei 0 liegt. Ab ca. 125 Hz ist die Schalldämmung bei fester Einspannung dann systematisch größer als bei der elastischen Einspannung

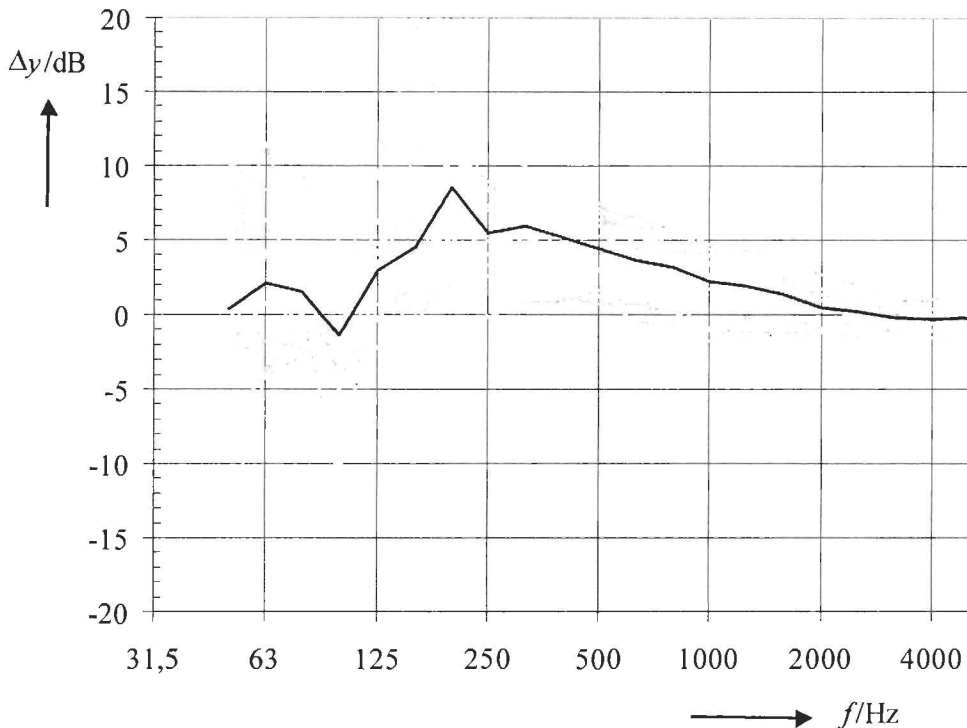


Bild 5.20 Differenzen der Schalldämmung zwischen festem und elastischem Einbau im jeweils selben Prüfstand (grau) und Mittelwert dieser Differenzen (schwarz), ohne Korrektur der Körperschallnachhallzeit

Innerhalb der erwähnten Messungen wurde zusätzlich auch der Gesamtverlustfaktor der Kalksandsteinwand sowohl bei der festen als auch bei der elastischen Einspannung ermittelt. Der Gesamtverlustfaktor bei der festen Einspannung umfasst dabei drei wesentliche Anteile, die Strahlungsdämpfung, die inneren Verluste der Wand sowie den Energieeintrag in den restlichen Prüfstand. Bei der elastischen Einspannung fällt der letzte Anteil heraus, da man von einer Totalreflexion der BiegeWellen an der elastischen Fuge ausgehen kann.

Die Unterschiede in den gemessenen Verlustfaktoren

$$\Delta\eta = 10 \lg \left(\frac{\eta_{\text{fest}}}{\eta_{\text{elastisch}}} \right) \text{ dB} \quad (5.59)$$

liegen bei mittleren Frequenzen zwischen -2 und 6 und im Mittel bei ca. 3 dB (Bild 5.21). Die Schwankungen sind sehr groß, es gibt sogar Fälle, in denen der Verlustfaktor bei der elastischen Anbindung größer ist als bei starrer Anbindung (negative Werte in Bild 5.21). Eine Erklärung hierfür liegt in den Scherungsverlusten in der elastischen Fuge, die bei geringen Gesamtverlusten zum Tragen kommen.

Bei genügend hohen Frequenzen kann man nun davon ausgehen, dass zumindest im Mittel über die Prüfstände die Strahlungsverluste η_s und die inneren Verluste η_i bei fester und elastischer Ankopplung gleich sind. Die einzelnen Verlustanteile aus Gl. (5.59) können dann aufgesplittet werden

$$\overline{\Delta\eta} = 10 \lg \left(\frac{\eta_s + \eta_i + \eta_{ab}}{\eta_s + \eta_i} \right) \text{dB} = 10 \lg \left(1 + \frac{\eta_{ab}}{\eta_s + \eta_i} \right) \text{dB}. \quad (5.60)$$

Mit den im Mittel höchstens 3 dB ergibt sich, dass für den Fall der schweren Kalksandsteinwand die Energieableitung η_{ab} in der gleichen Größenordnung wie die Summe aus inneren Verlusten und Strahlungsverlusten liegt.

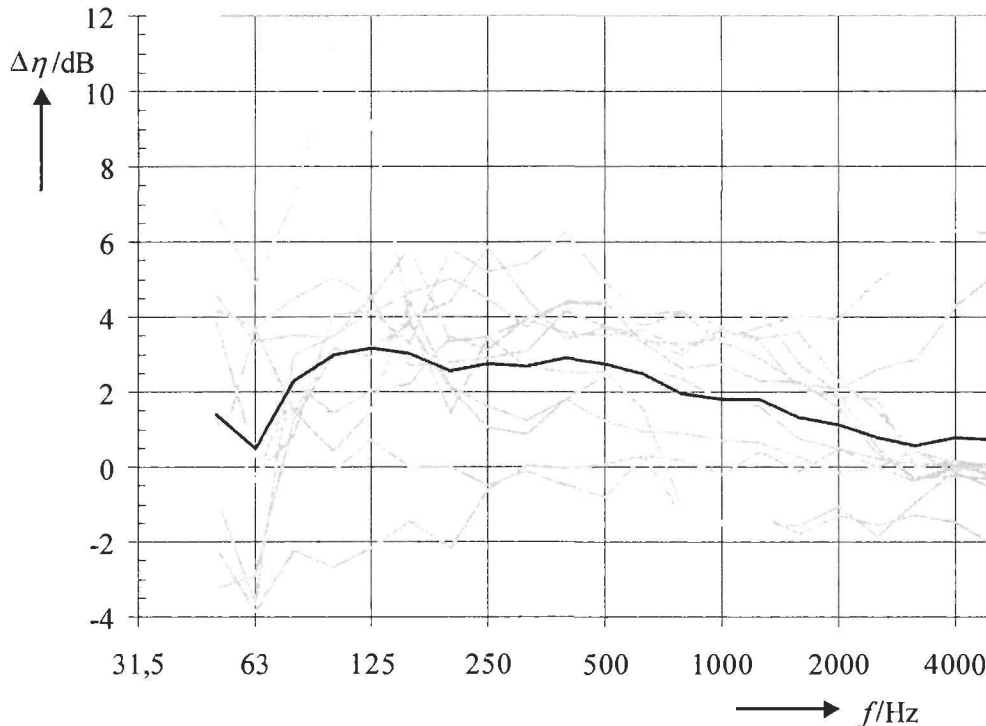


Bild 5.21 Unterschiede im Gesamtverlustfaktor zwischen fester und elastischer Einspannung und zugehöriger Mittelwert (schwarz)

Zur Trennung der Eigenschaften von Prüfstand und Prüfling wurde in [Me00] vorgeschlagen, die gemessene Schalldämmung generell mit dem Gesamtverlustfaktor zu korrigieren. Insbesondere für den Vergleich verschiedenartiger Bauteile ist dies jedoch nur sinnvoll, wenn der Energieeintrag in den Prüfstand wesentlich größer als die Summe aus inneren und Strahlungsverlusten ist. Für die untersuchte Kalksandsteinwand ist dies im Mittel nicht der Fall. Dass die Vergleichsstreuung bei Anwendung der Korrektur geringer wird [Me00], liegt an der Tatsache, dass nur gleichartige Kalksandsteinwände miteinander verglichen wurden, bei denen die inneren und die Strahlungsverluste annähernd gleich bleiben.

Auch nach Korrektur mit dem Gesamtverlustfaktor ist die Schalldämmung bei fester Einspannung ab ca. 125 Hz systematisch größer als bei elastischer Anbindung (Bild 5.22). Gegenüber Bild 5.20 sind die Differenzen im mittleren Frequenzbereich jedoch ca. 2 dB geringer, d.h. die Verlustfaktorkorrektur hat die Differenz reduziert. Die verbleibenden Unterschiede sind auf die erhöhte Steifigkeit der Kalksandsteinwand durch die feste Anbindung zurückzuführen.

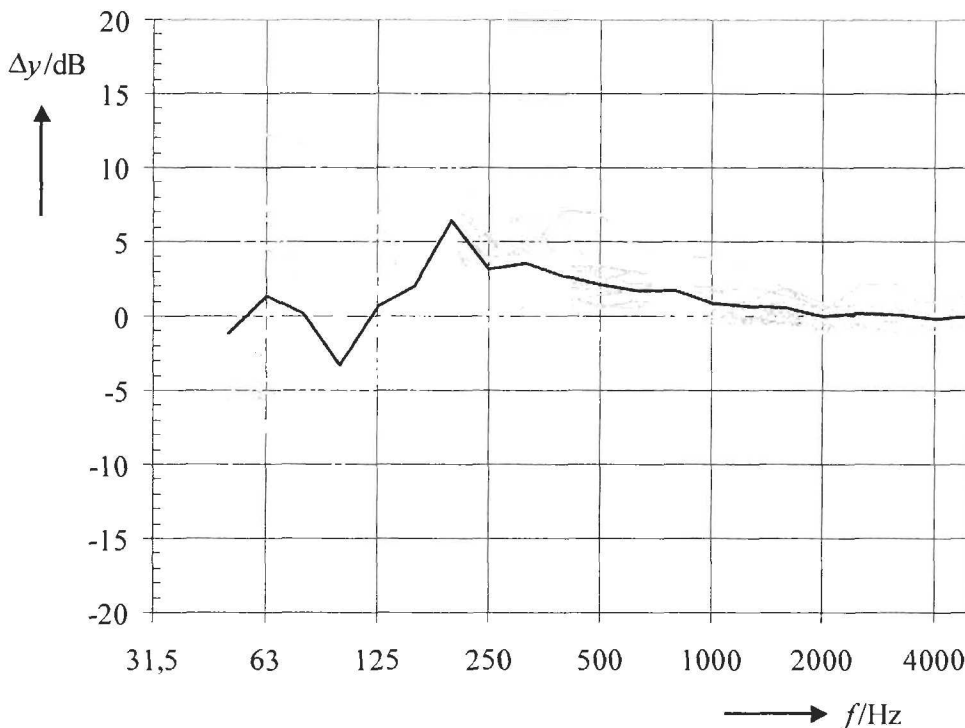


Bild 5.22 Differenzen der Schalldämmung zwischen festem und elastischem Einbau im jeweils selben Prüfstand (grau) und Mittelwert dieser Differenzen (schwarz), mit Korrektur der Körperschallnachhallzeit

5.12. Zum Einfluss der Maximalschalldämmung

Bei allen messtechnischen Ermittlungen der Schalldämmung ist zu berücksichtigen, dass der Schall nicht nur durch den Prüfling, sondern auch auf Nebenwegen übertragen wird. Prüfstände nach [ISO 140-1] sollen zwar nebenwegsfrei sein, doch praktisch bedeutet diese Forderung lediglich, dass die Nebenwege stark unterdrückt sind.

Um den Einfluss der Nebenwege zu quantifizieren wird bei Labormessungen nach [ISO 140-3] ein Test normativ vorgeschrieben, bei dem die Schalldämmung des Prüflings wesentlich erhöht wird, etwa durch eine zusätzliche Vorsatzschale. Die so ermittelte Schalldämmung wird Maximaldämmung genannt. Sie hängt auch von den Eigenschaften des Prüflings ab, da z.B. schwere Prüfwände die Schalllängsleitung stärker behindern als leichte.

Diese Problematik wird durch die Gleichung aus [ISO 140-3] erfasst

$$y = -10 \lg \left[10^{-y'/10\text{dB}} - 10^{-y_{\max}/10\text{dB}} \right] \text{dB} . \quad (5.61)$$

wobei y die Schalldämmung des Bauteils allein, y' die Schalldämmung der Gesamtanordnung und y_{\max} die Maximalschalldämmung ist. Gl. (5.61) lässt sich umformen zu

$$y = y' - K_{\max} \quad (5.62)$$

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 73(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 73(112) of report of 2004-11-10

mit der Korrektur

$$K_{\max} = 10 \lg \left[1 - 10^{(y' - y_{\max})/10 \text{ dB}} \right] \text{ dB}. \quad (5.63)$$

Die Unsicherheit dieser Korrektur kann nun nach GUM berechnet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Messgrößen y' und y_{\max} unabhängig sind

$$u(K_{\max}) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{\max}}{\partial y'} \right)^2 u^2(y') + \left(\frac{\partial K_{\max}}{\partial y_{\max}} \right)^2 u^2(y_{\max})}. \quad (5.64)$$

Ausführen der partiellen Integration liefert

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_{\max}}{\partial y'} &= \frac{10^{(y' - y_{\max})/10 \text{ dB}}}{1 - 10^{(y' - y_{\max})/10 \text{ dB}}} \\ &= -\frac{\partial K_{\max}}{\partial y_{\max}} \end{aligned} \quad (5.65)$$

und schließlich die Unsicherheit der Korrektur

$$u(K_{\max}) = \frac{10^{(y' - y_{\max})/10 \text{ dB}}}{1 - 10^{(y' - y_{\max})/10 \text{ dB}}} \sqrt{u^2(y') + u^2(y_{\max})}. \quad (5.66)$$

Als guter Schätzwert für die Unsicherheit der beiden Einzelmessungen kann die Wiederholstandardabweichung verwendet werden, wobei hier vereinfachend angenommen wird, dass diese bei der Bestimmung von y' und von y_{\max} identisch ist:

$$u(y') = u(y_{\max}) = s_r. \quad (5.67)$$

Unter diesen Voraussetzungen lässt sich die Unsicherheit der Korrektur für die Maximaldämmung berechnen zu

$$u(K_{\max}) = \frac{10^{(y' - y_{\max})/10 \text{ dB}}}{1 - 10^{(y' - y_{\max})/10 \text{ dB}}} \sqrt{2} s_r. \quad (5.68)$$

Bei kleinen Korrekturen ist die Unsicherheit, ausgedrückt als 68 und 95% - Vertrauensbereich, vernachlässigbar klein (Bild 5.23). Wächst die Korrektur hingegen an, so nimmt auch ihre Unsicherheit wesentlich zu. Vor diesem Hintergrund wird auch klar, dass der nach [ISO 140-3], Anhang B maximal zulässige Abstand von -6 dB zwischen y' und y_{\max} (entsprechend einer Korrektur von $-1,3$ dB) erforderlich ist, um die Gesamtunsicherheit innerhalb der in [ISO 140-2] angegebenen Grenzen zu halten. Bei konsequenter Einführung des GUM in der Bauakustik und damit einhergehender Lösung von fest vorgegebenen Unsicherheiten wären durchaus größere Korrekturen zulässig, da mit der Größe der Korrektur auch die Unsicherheit automatisch ansteigen würde, was bei der weiteren Verwendung der Werte Berücksichtigung finden müsste. Nach GUM nicht mehr zulässig ist hingegen die Verwendung eines festen Korrekturwertes von $-1,3$ dB für alle Abstände größer als -6 dB zwischen y' und y_{\max} , da dies nicht der beste Schätzwert für die Korrektur ist. Der beste Schätzwert ergibt sich in jedem Fall aus Gl. (5.63).

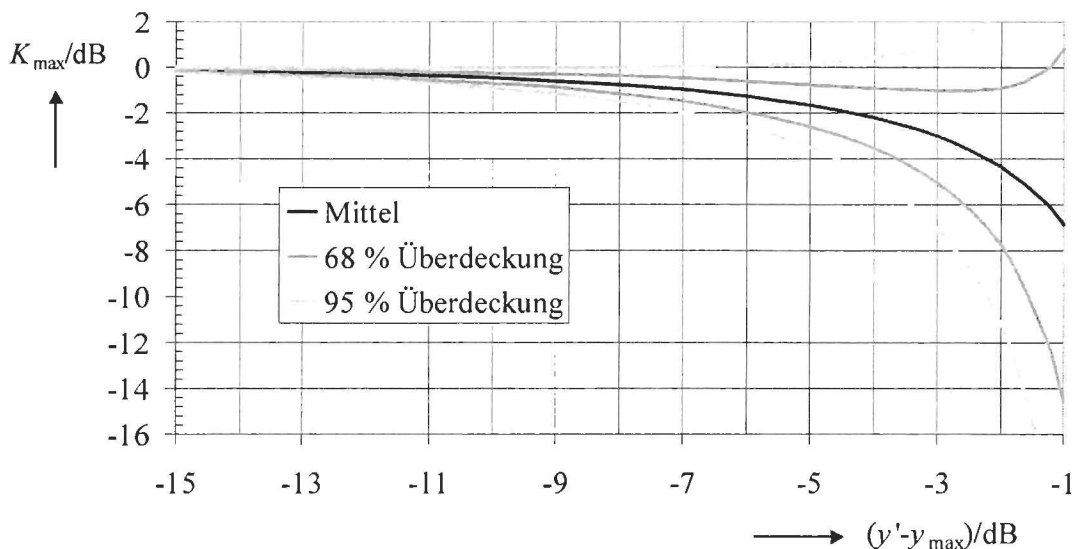


Bild 5.23 Korrektur für die Maximalschalldämmung K_{\max} sowie zugehörige 68% und 95% - Vertrauensbereiche mit $s_r = 2$ dB

5.13. Zum Einfluss der Bauteilreproduzierbarkeit

5.12.1. Kalksandstein-Wände

Um zu Aussagen über die Reproduzierbarkeit von Kalksandsteinwänden zu gelangen, kann der Ringversuch [Me00] herangezogen werden. In Vorbereitung zu diesem Ringversuch wurde die später verwendete Wand drei Mal in den Wandprüfstand der PTB eingebaut und es wurde die Schalldämmung jeder Wand wiederholt gemessen. Die Mittelwerte des Schalldämm-Maßes für die drei Wände liegen dicht beieinander (Bild 5.24). Die Abweichungen zwischen den Schalldämmungen der einzelnen Wände und dem Mittelwert über alle drei Wände betragen bei tiefen Frequenzen bis zu 2 dB und sinken zu höheren Frequenzen auf 0,5 dB (Bild 5.25). Aus der großen Zahl der Wiederholungsmessungen ($n = 12, 10, 21$) ergibt sich jedoch ein sehr schmales 95%-Konfidenzintervall für den Mittelwert, so dass die vorliegenden Abweichungen in weiten Frequenzbereichen als systematisch betrachtet werden müssen, d.h. die vorliegenden Abweichungen sind durch Unterschiede im Aufbau der Wand begründet, da Prüfstand, Messapparaturen usw. unverändert blieben.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 75(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 75(112) of report of 2004-11-10

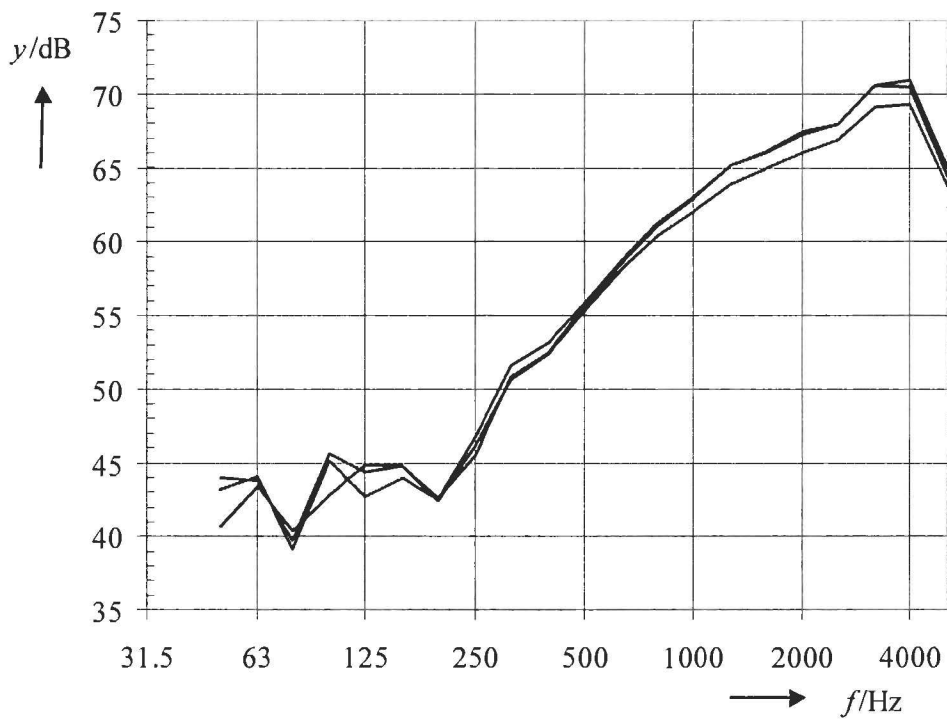


Bild 5.24 Schalldämmung der Kalksandsteinwand nach [Me00]

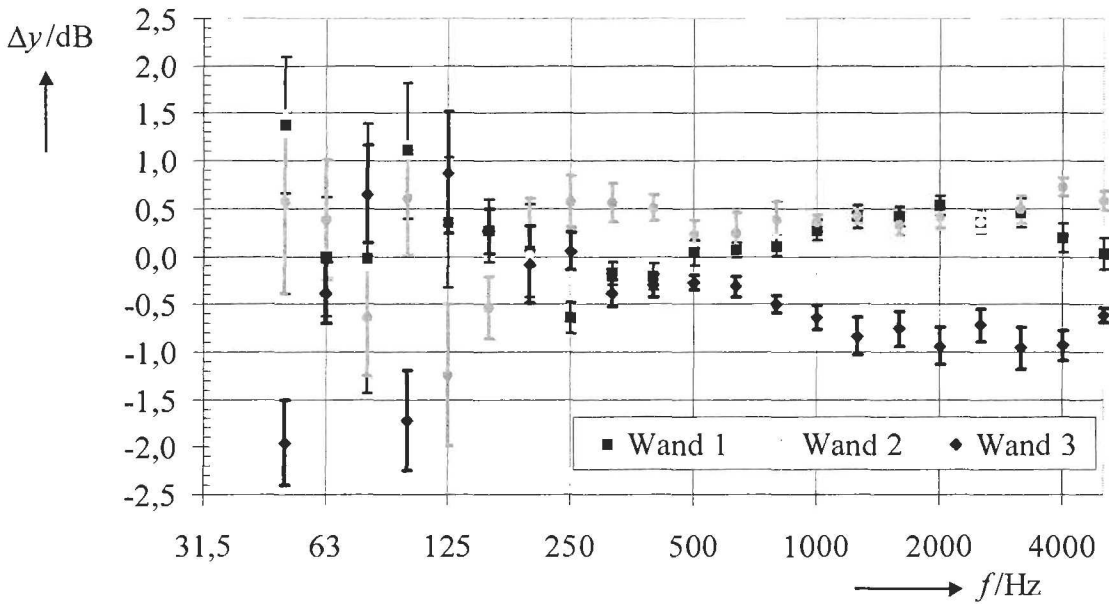


Bild 5.25 Differenz zwischen den an den drei Wandaufbauten gemessenen Schalldämmungen nach [Me00] und der mittleren Schalldämmung mit 95%-Vertrauensbereichen

Eine empirische Standardabweichung aus den drei Werten für jede Terz zu berechnen erschien wenig sinnvoll, da die zugehörigen Konfidenzintervalle sehr groß wären, was die weitere Verwendbarkeit von so gewonnenen Produktstreuungen in Frage stellen würde. Stattdessen wurden die Ergebnisse zu Oktaven zusammengefasst. Innerhalb der Oktaven wurde aus den insgesamt 9 Abweichungen zum jeweiligen Terzmittelwert eine empirische Standardabweichung berechnet:

$$s = u(K_{\text{repro}}) = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 (y_{ij} - \bar{y}_i)^2} . \quad (5.69)$$

Die berechneten Standardabweichungen betragen maximal 1,2 dB (Bild 5.26). Diese geringen Werte stellen sicherlich eine untere Grenze dar, da sowohl die verwendeten Steine als auch Mörtel und Putz aus jeweils einer einzigen Produktionscharge stammen. Zudem sind die Steine innerhalb einer Lage nicht sondern nur die Lagen untereinander vollflächig verklebt. Damit ist der Beitrag des Mörtels zum Gesamtverhalten der Wand gering. Außerdem wurden die Aufbauten von den gleichen Handwerkern mit größter Sorgfalt ausgeführt. In der Praxis am Bau sind daher größere Streuungen durch den Aufbau aber auch durch die verwendeten Materialien zu erwarten.

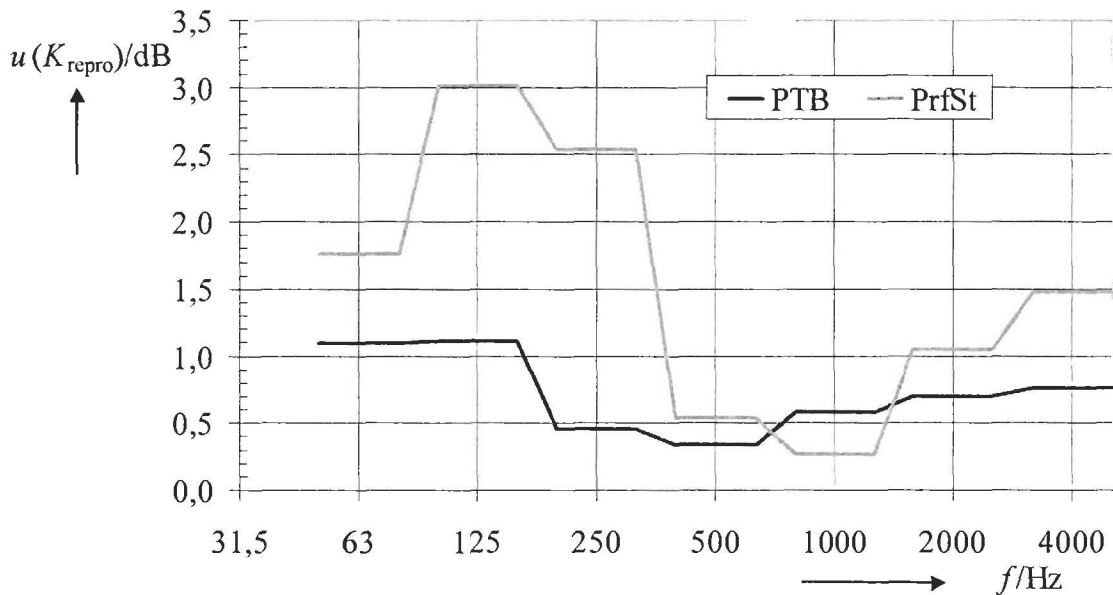


Bild 5.26 Oktavgemittelte Bauteilstreuungen für die Kalksandsteinwand in der PTB und bei einer anderen Prüfstelle

Über Kalksandsteinwände gibt es außerdem Ergebnisse aus einem vorhergehenden vom DIBt-geförderten Projekt [We03] bei dem die Ringversuchs-Kalksandsteinwand zwei mal in einen unveränderten Prüfstand eingebaut wurde. Für den ersten Wandaufbau liegen insgesamt fünf Wiederholungsmessungen vor, für den zweiten nur eine. Die Ergebnisse für diese beiden Aufbauten zeigen etwas größere Abweichungen als beim PTB-Homogenitätstest (Bild 5.27). Dass die Abweichungen bei vielen Terzen im statistischen Sinne signifikant sind, zeigt Bild 5.28, in dem einerseits der Absolutbetrag der Abweichung zwischen beiden Wandaufbauten und andererseits ein mit Gl. (2.18) berechnetes 95%-Intervall für diese Abweichung dargestellt sind. Eine Berechnung der empirischen Standardabweichung analog zu den drei PTB-Aufbauten liefert auch deutlich größere Werte als für die PTB-Aufbauten (Bild 5.26). Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die Steine zwar nominell identisch sind (Abmessungen, Rohdichte), jedoch aus unterschiedlichen Produktionschargen stammen. Für die spätere Anwendung scheinen diese höheren Werte realistischer, da auch in der Praxis keine Informationen über Produktionschargen und zugehörige akustische Eigenschaften vorliegen.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 78(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 78(112) of report of 2004-11-10

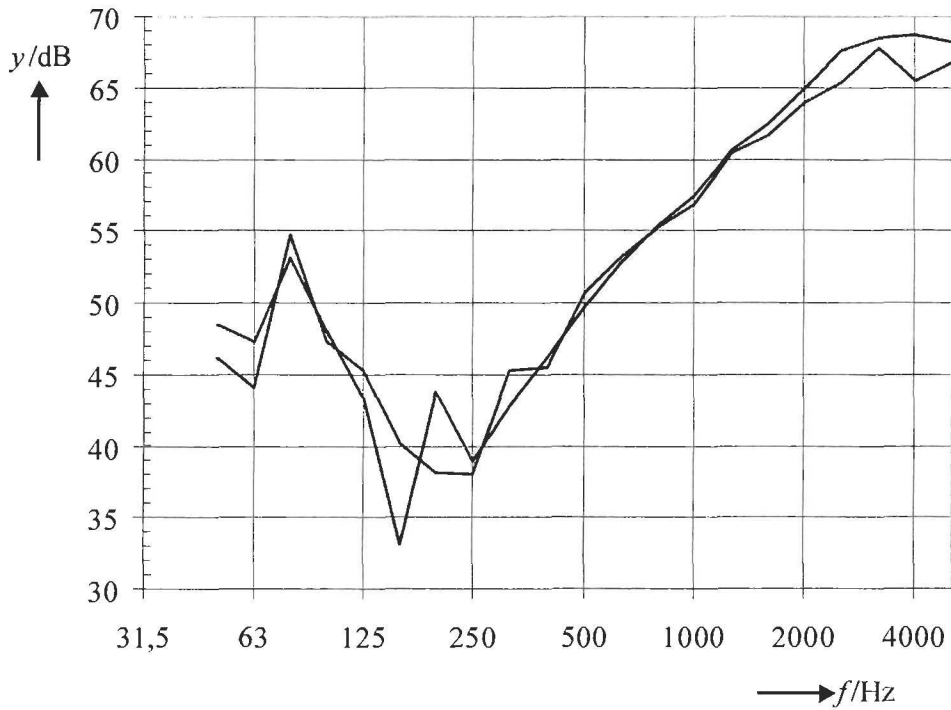


Bild 5.27 Schalldämmung zweier Aufbauten der Kalksandsteinwand im gleichen Prüfstand nach [We03]

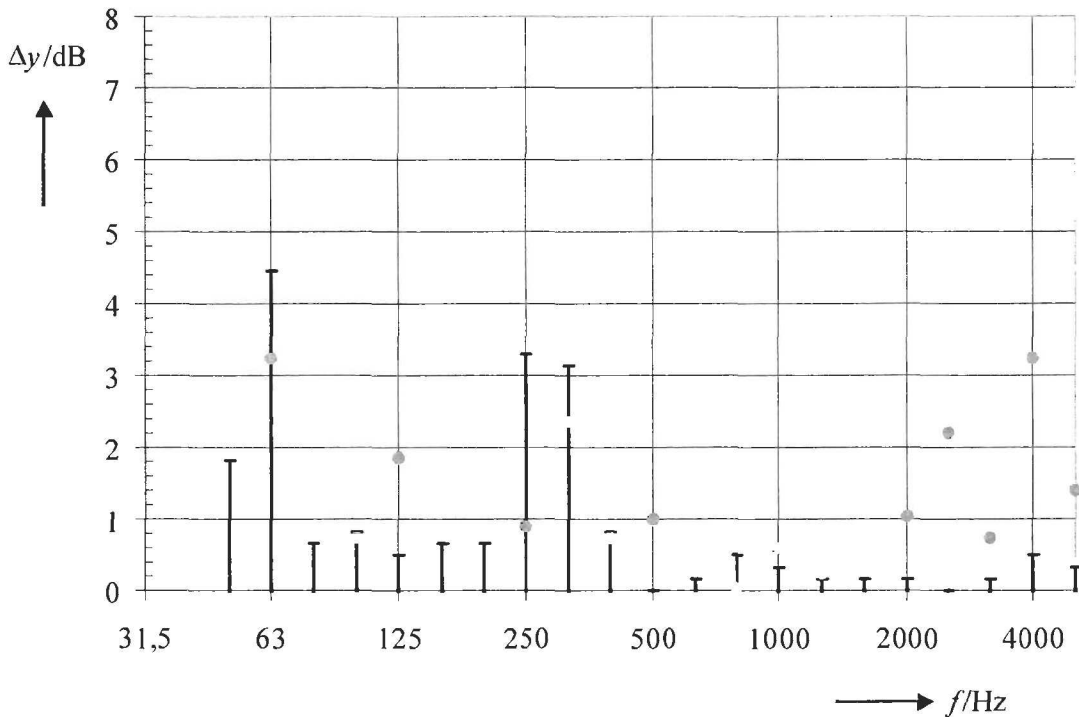


Bild 5.28 Absolutbetrag der Schalldämmungsdifferenz zweier Wandaufbauten nach [We03] und 95%-Vertrauensbereich für diese Differenz

5.12.2. Fenster und Scheiben

Zur Unsicherheit der Schalldämmung von Fenstern und Scheiben sind mehrere Ringversuche durchgeführt worden, in die auch immer ein Homogenitätstest eingeschlossen war. Dabei wurden alle später verwendeten Untersuchungsobjekte in einem Messlabor unter möglichst identischen Bedingungen vermessen. Verwendet wurden Doppelscheiben 6-16-6 [KO88], 4/4-15-4 [Ra84] und [KR84], ein- und zweischalige Metallelemente [KO88] sowie Doppelscheiben in Kunststoffrahmen [RVGS91]. Bei der Herstellung dieser Ringversuchsobjekte wurde auf die Homogenität der Serie Wert gelegt, so dass die ermittelten Standardabweichungen einen unteren Grenzwert darstellen.

Die Standardabweichung für die Produktstreuung liegt für die Doppelscheiben bei ca. 0,5 dB (Bild 5.30) bzw. 1 dB (Bild 5.32). Für die Doppelscheiben im Kunststoffrahmen treten bei lokalen Extremwerten in der Schalldämmung (vgl. Bild 5.29 und Bild 5.30) Standardabweichungen von bis zu 1,5 dB auf. Als Schätzwert für die Produktstreuung von Fenstern und Scheiben erscheint somit ein Wert von ca. 1 dB angemessen.

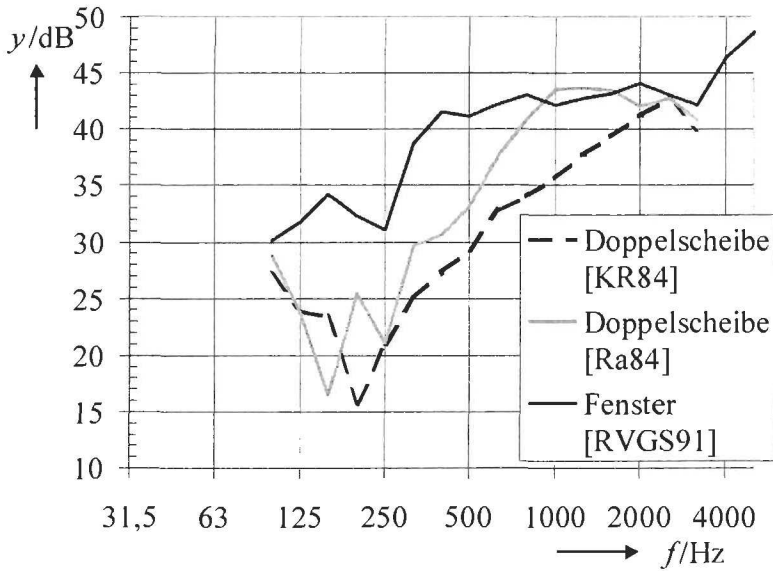


Bild 5.29 Mittlere Schalldämmungen aus Homogenitätstest an Fenstern und Doppelscheiben

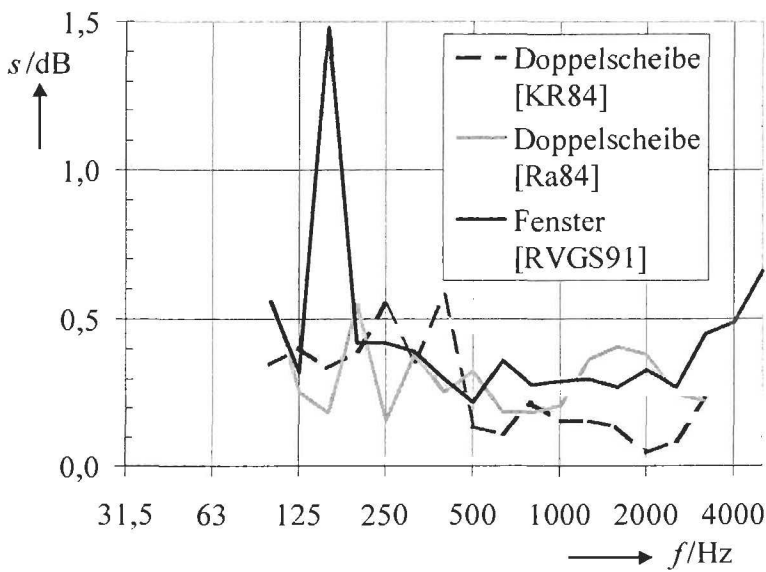


Bild 5.30 Empirische Standardabweichungen aus Homogenitätstests an Fenstern und Doppelscheiben

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 81(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 81(112) of report of 2004-11-10

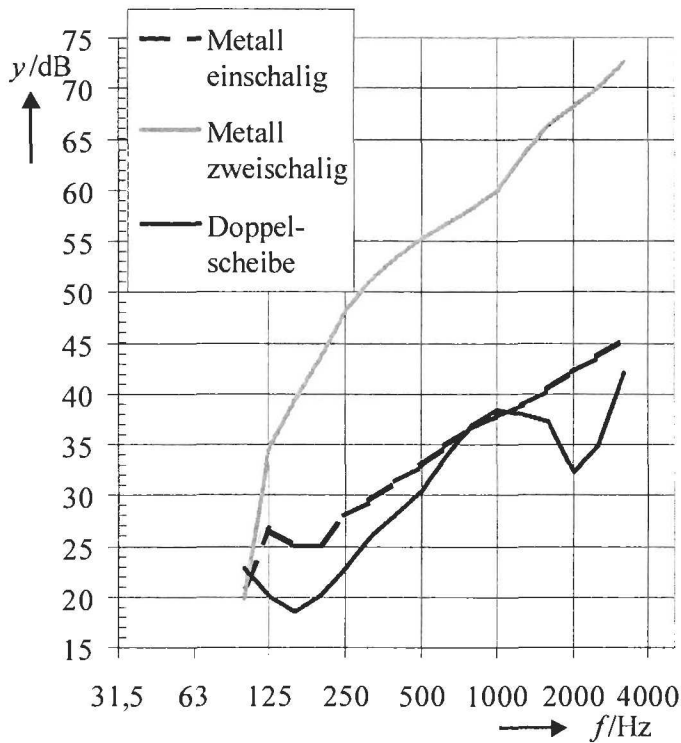


Bild 5.31 Schalldämmungen der Objekte aus dem Homogenitätstest für [KO88]

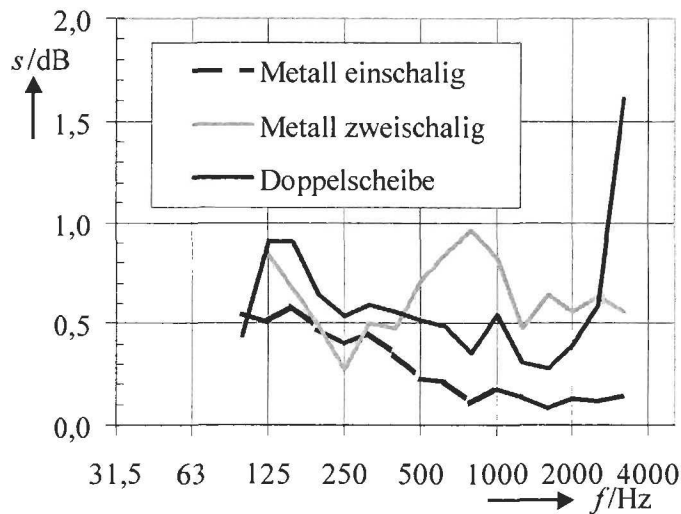


Bild 5.32 Empirische Standardabweichungen aus dem Homogenitätstest für die Ringversuchsobjekte nach [KO88]

5.12.3. Gipskarton-Ständerwände

Zu den Produktstreuungen von Gipskartonständerwänden gibt es mehrere interessante Quellen. Eine ist der von POMPOLI organisierte Ringversuch [Po94] mit einer einseitig und einer zweiseitig beplankten Wand, der das Ziel hatte, Wiederhol- und Vergleichsgrenzen für die nach ISO 140-3 gemessenen Schalldämmungen von Wänden zu bestimmen.

Die Vergleichsstreuungen sind insgesamt groß und erreichen Werte von bis zu 4 dB. In einer weiterführenden Untersuchung [PS98] konnte gezeigt werden, dass die Ursachen je nach Frequenzbereich unterschiedlich sind. Bei tiefen Frequenzen, bei denen ein- und beidseitig beplankte Wand gleiche Streuungen liefern, ist wesentlich, wie das Raster der verwendeten Gipskartonständerwände (1,2 m Ständerabstand) in die Prüföffnung passt, d.h. ob relativ kleine Randstücke vorliegen, die dann das Gesamtverhalten der Wand wesentlich beeinflussen. Zudem wirkt sich bei tiefen Frequenzen das recht unterschiedliche Volumen der Senderäume (53 bis 230 m³) aus. Gravierender waren die Streuungen jedoch bei der verwendeten beidseitig beplankten Konstruktion bei höheren Frequenzen. Mit SEA-Rechnungen wurde in [PS98] gezeigt, dass neben Prüfstandeigenschaften wie Material des Einbaurahmens oder Größe der Prüföffnung auch die Art der Verschraubung, die Befestigung der U-Schienen an Decke und Fußboden sowie die handwerkliche Verarbeitung eine Rolle spielen.

Setzt man voraus, dass in beiden Ergebnissen alle Unsicherheitsbeiträge enthalten sind und lediglich die Beiträge durch die Bauteilreproduzierbarkeit unterschiedlich sind

$$s_{R,\text{einseit}}^2 = \sum_{i=1}^N u^2(K_i) + u^2(K_{\text{repro,einseit}}). \quad (5.70)$$

$$s_{R,\text{zweiseit}}^2 = \sum_{i=1}^N u^2(K_i) + u^2(K_{\text{repro,zweiseit}}). \quad (5.71)$$

so lässt sich der durch Bauteilstreuungen verursachte Unsicherheitsbeitrag ausdrücken als

$$u^2(K_{\text{repro,einseit}}) - u^2(K_{\text{repro,zweiseit}}) = s_{R,\text{zweiseit}}^2 - s_{R,\text{einseit}}^2. \quad (5.72)$$

Unter der Annahme

$$u^2(K_{\text{repro,einseit}}) \ll u^2(K_{\text{repro,zweiseit}}) \quad (5.73)$$

gelangt man zu einer Mindestabschätzung für die Bauteilstreuung der zweiseitig beplankten Wand

$$u^2(K_{\text{repro,zweiseit}}) \approx \sqrt{s_{R,\text{zweiseit}}^2 - s_{R,\text{einseit}}^2}. \quad (5.74)$$

Da die Bedingung (5.73) erst ab ca. 250 Hz eingehalten ist, ergeben sich erst ab dieser Frequenz sinnvolle Ergebnisse. Mit Standardabweichungen von bis zu 4 dB muss die Reproduzierbarkeit der Schalldämmung beidseitig beplankter Gipskartonständerwände als schlecht bezeichnet werden (Bild 5.34).

Zur Bauteilstreuung an Gipskartonständerwänden existieren außerdem PTB-interne Daten. Es liegen Schalldämm-Ergebnisse aus drei verschiedenen Wandprüfständen vor. In jedem Prüfstand wurden 8 verschiedene beidseitig beplankte Gipskartonständerwände vermessen,

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 83(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 83(112) of report of 2004-11-10

wobei neben der Variation der Hohlraumdicken und flächenbezogenen Massen auch einfach und doppelt beplankte Aufbauten einbezogen wurden. Wesentlich ist, dass in allen drei Prüfständen die gleichen Aufbauten verwendet wurden. Es handelt sich somit um einen Ringversuch mit drei teilnehmenden Labors und 8 Prüfobjekten.

Eine Streuung aus nur 3 Einzelergebnissen zu berechnen ist nicht sinnvoll. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass auch bei unterschiedlichen Mittelwerten für jede der 8 verschiedenen Konstruktionen die Standardabweichung gleich ist, da sich die Aufbauten in ihrer Art sehr ähneln und die Messlabors wie auch die Messtechnik unverändert bleiben. Die Streuung der Differenzen zum jeweiligen Mittelwert

$$s_R = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^3 (y_{ij} - \bar{y}_i)^2} . \quad (5.75)$$

kann damit als Vergleichsstandardabweichung angesehen werden. Ihre Werte liegen zwischen der ein- und der zweiseitig beplankten Wand aus [Po94] (Bild 5.33). Unter der Voraussetzung, dass die Unsicherheitsbeiträge bei diesen Messungen in der gleichen Größenordnung liegen wie bei [Po94], kann nun auch für diese Versuchsergebnisse eine Mindest-Produktstreuung analog zu Gl. (5.74) errechnet werden. Sie liegt bei Werten zwischen 1 und 3 dB (Bild 5.34).

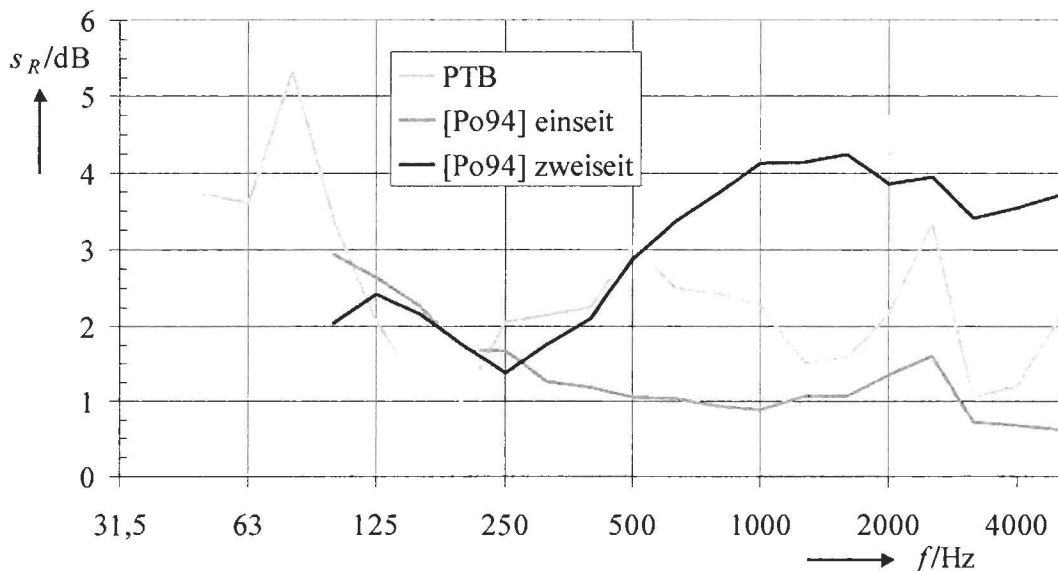


Bild 5.33 Vergleichsstandardabweichungen für die ein- und zweiseitig beplankte Gipskartonständerwand sowie aus PTB-internen Daten

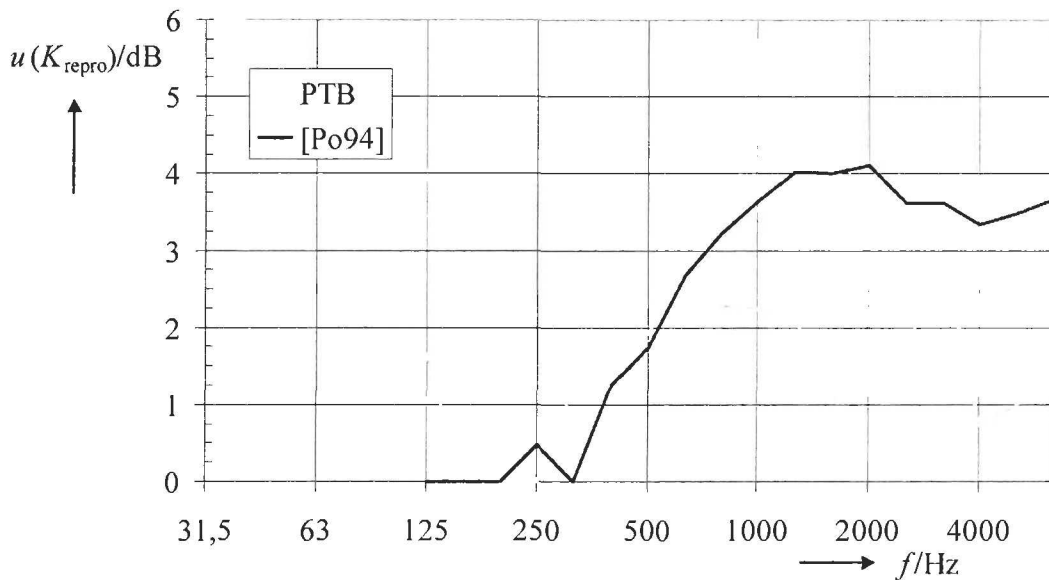


Bild 5.34 Bauteilstreuungen für zweiseitig beplankte Gipskartonständerwände

5.12.4. Betondecken

Zur Produktstreuung von Betondecken wurden in [CS89] ausführliche Messungen vorgestellt. Es zeigt sich, dass die empirische Standardabweichung baugleicher Decken bei ca. 1,7 dB für Terzbandbreiten und bei 1,3 dB im Einzahlwert liegt.

5.14. Kombinierte Unsicherheit und Vergleich mit Ringversuchen sowie ISO 140-2

Die kombinierte Unsicherheit der Schalldämmung ergibt sich aus der Überlagerung der verschiedenen Unsicherheitsbeiträge (vgl. Gl. (5.6)). Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse kann diese Kombination der Teilunsicherheiten nur für die in der Wiederholstreuung zusammengefassten Beiträge durchgeführt werden (Gl. (5.7)). Zu den Laborstreuungen kann beim jetzigen Kenntnisstand keine Aufspaltung der Unsicherheitsbeiträge vorgenommen werden.

Geht man davon aus, dass der Messgeräteeinfluss eher gering ist, so kann die Wiederhol-Standardabweichung nach Kapitel 5.2 und 5.3 abgeschätzt werden. Es ist nun interessant, diese eher konservativ abgeschätzten Werte mit Ringversuchsergebnissen (Tabelle 5.4) und den Werten aus [ISO 140-2] zu vergleichen (Bild 5.35). Zu diesem Vergleich können allerdings nur solche Versuche herangezogen werden, bei denen mehrere Wiederholungsmessungen in jedem Prüfstand durchgeführt wurden (4. Spalte in Tabelle 5.4).

In Bild 5.35 entsprechen die Werte aus [ISO 140-2] in etwa einem Mittelwert der vorliegenden Ergebnisse während die Abschätzung nach Kapitel 5.2 und 5.3 eher eine Obergrenze angibt. Die in den bisher durchgeführten Ringversuchen auftretenden Wiederholstreuungen sind z.T. erheblich kleiner als die PTB-Grenze. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass der Messgeräteeinfluss wider Erwarten einen nennenswerten

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 85(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 85(112) of report of 2004-11-10

Beitrag zur Unsicherheit liefert. Allerdings müsste dieser Einfluss allein in der gleichen Größenordnung wie die Summe aller anderen in der Wiederholstreuung erfassten Einflüsse liegen, was als unwahrscheinlich einzustufen ist. Trotzdem sollten die durch Schallpegelmesser verursachten Unsicherheiten in Zukunft detailliert untersucht werden, da bei allen Messverfahren der angewandten Akustik dieser Unsicherheitsbeitrag von Interesse ist.

Die geringe Wiederholstandardabweichung bei den Ringversuchen ist jedoch viel wahrscheinlicher dadurch verursacht, dass bei der Durchführung der Wiederholungsmessungen durch die jeweiligen Prüfstellen ein möglichst niedriger Wert für die Wiederholstandardabweichung angestrebt wurde, so dass Mikrofon- und Quellpositionen nicht oder nicht in ausreichendem Maße variiert wurden. Bei den der PTB-Grenze in Bild 5.35 zugrundeliegenden Vergleichsmessungen an der PTB und der MPA Dortmund kann dies prinzipiell nicht passieren, da jede Wiederholungsmessung durch ein neues Messteam vorgenommen wird und keine Informationen zu den Mikrofon- und Quellpositionen außer den Normvorgaben vorliegen.

Auch bei den Vergleichs-Standardabweichungen entsprechen die Werte aus [ISO 140-2] in etwa einem Mittelwert über die verschiedenen Ringversuche (Bild 5.36). Bei einigen Ringversuchen liefert eine unzureichende Bauteilreproduzierbarkeit einen großen Unsicherheitsbeitrag, so dass die Werte für die Vergleichs-Standardabweichung um diesen Betrag vergrößert werden. Dazu gehören vor allem die Werte für die zweischalige Gipskartonständerwand aus [Po94] sowie für die Doppelverglasungen aus [RB04].

Tabelle 5.4 Einbezogene Ringversuchsergebnisse für Luftschalldämmung

Prüfling	Quelle	Teilnehmerzahl	Zahl der Wiederholungen
Kalksandsteinwand fest	PTB	19	3-15
Kalksandsteinwand elastisch	PTB	11	1
einschalige GKS-Wand	[Po94]	24	5
zweischalige GKS-Wand	[Po94]	24	5
leichtes Trennbau teil	[LM86]	6	8
mittelschwere Ziegelwand	[LM86]	6	8
schwere Ziegelwand	[LM86]	7	8
Doppelscheibe 6/16/6	[Ra84]	5	6
Doppelscheibe 6/16/6	[KO88]	13	5
Fenster mit Scheibe 44R(6)8	[RVGS91]	15	12
Verglasung 4	[RB04]	6	1
Verglasung 44-2	[RB04]	6	1
Verglasung 4(15)4	[RB04]	6	1
Verglasung 44-2(15)10	[RB04]	6	1

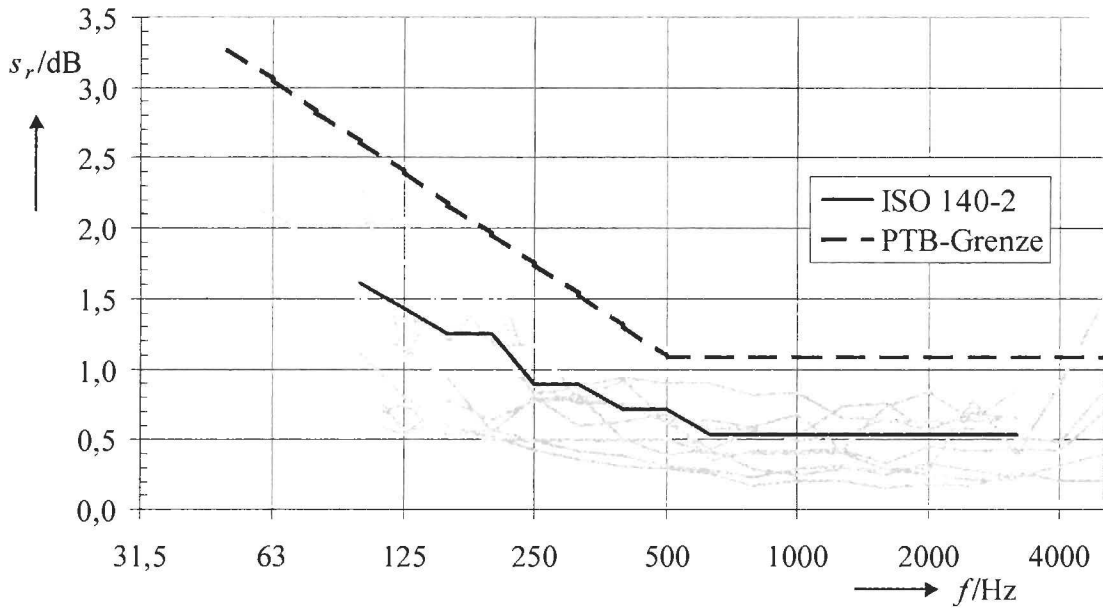


Bild 5.35 Wiederholstandardabweichungen aus den Ringversuchen (grau), aus ISO 140-2 sowie konservative Abschätzung nach Kapitel 5.2 und 5.3

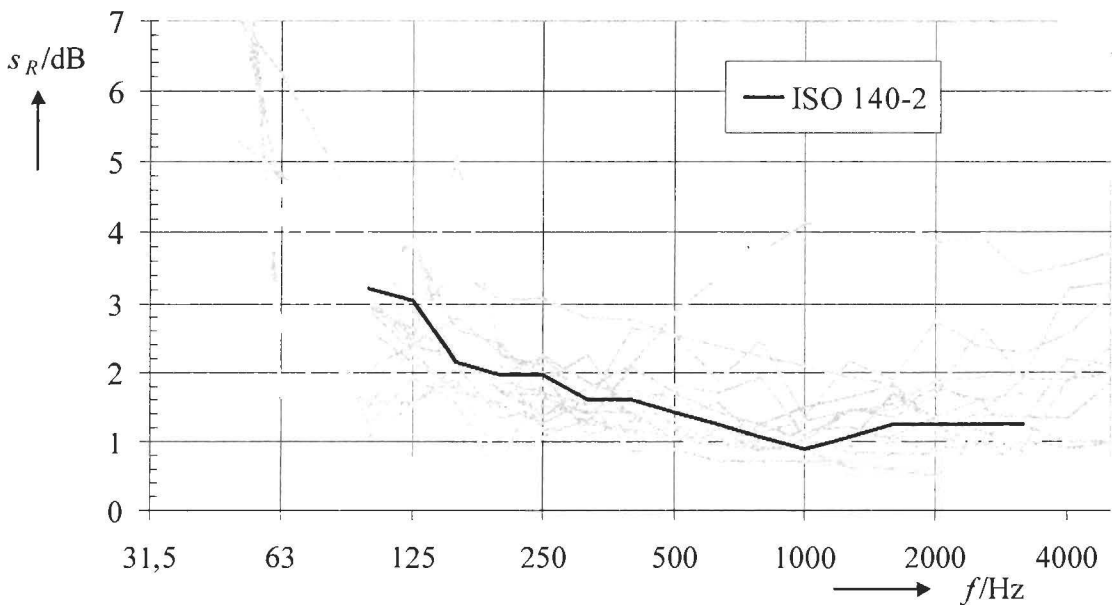


Bild 5.36 Vergleichsstandardabweichungen aus den Ringversuchen (grau) und aus ISO 140-2

5.15. Zur Unsicherheit der Einzahlwerte

Bislang wurden hier nur die Unsicherheiten der Terzwerte betrachtet. Für Planungszwecke werden jedoch meistens Einzahlwerte wie das bewertete Schalldämmmaß verwendet. Die Unsicherheit dieses Wertes kann aus den Terzwerten berechnet werden, wobei sich neben den Terz-Unsicherheiten auch der Erwartungswert in den einzelnen Terzen, d.h. der spektrale Verlauf der Schalldämmung in der Unsicherheit der Einzahlangabe widerspiegelt.

Eine solche Unsicherheitsberechnung erfolgte in [GSS04] mit der Monte Carlo Methode. Für die Unsicherheiten der Terzwerte wurden die Werte aus [ISO 140-2] verwendet. Vorausgesetzt wurde des Weiteren eine Unabhängigkeit zwischen den Terzen und das Vorliegen vom normalverteilten Terz-Unsicherheiten. Anhand verschiedener realistischer Schalldämmkurven wurde die Unsicherheit des bewerteten Schalldämmmaßes dann ermittelt. Für Bauteile, in denen sich der Einzahlwert bei wenigen tiefen Terzen entscheidet, ergaben sich relativ hohe Unsicherheiten von 2 dB und mehr. Sind hingegen viele vornehmlich mittlere bis hohe Terzen für die Einzahlwertbildung entscheidend, so liegt die Unsicherheit der Einzahlangabe bei 0,5 dB oder auch darunter. Man erkennt hier bereits, dass die Art des Spektrums die Unsicherheit des Einzahlwerts nennenswert beeinflusst.

Unberücksichtigt ist in dieser Untersuchung der Einfluss der Bauteilstreuung, da dieser in den Ringversuchen, die zu den Werten aus [ISO 140-2] führten, nicht enthalten ist. Außerdem sind die Unsicherheitsangaben in [ISO 140-2] gemessen an der Realität vorliegender Ergebnisse zu optimistisch (vgl. Kapitel 5.14) und auch die Unabhängigkeit der einzelnen Terzen kann zumindest bei höheren Frequenzen nicht vorausgesetzt werden. Es steht somit zu erwarten, dass die Unsicherheit der Einzahlangabe wesentlich größer ist als in [GSS04] berechnet.

6. Konsequenzen aus den Unsicherheiten

6.1. Der Bauteilkatalog der DIN 4109

Die [DIN 4109-3] sowie die [DIN 4109-7] enthalten einen Katalog von Bauteilen, denen typische Schalldämmungen sowie Vorhaltemaße zugeordnet werden. Diese Katalogwerte werden von Planern und Architekten verwendet, um den bauaufsichtlich geforderten Nachweis des Schallschutzes im Hochbau zu erbringen. Die Vorhaltemaße von derzeit 2 dB [DIN 4109-2, Abschnitt 4.1.2.1] werden dabei im Planungsverfahren von der Schalldämmung des betreffenden Bauteils abgezogen, um alle auftretenden Unsicherheiten zu berücksichtigen. Da ein solches Vorgehen keine Möglichkeit zur Differenzierung zwischen verschiedenen Unsicherheitsbeiträgen zulässt und immer wieder die Frage nach der quantitativen Begründung für die verwendeten Vorhaltemaße auftaucht, werden im Folgenden die verschiedenen Unsicherheiten in ihrer Auswirkung auf eine prognostizierte Luftschalldämmung untersucht.

6.2. Ermittlung einer bauteilspezifischen Schalldämmung

Bei der Bestimmung einer bauteilspezifischen Schalldämmung interessiert vor allem die Frage, wieviele Messungen erforderlich sind, um die Schalldämmung eines Bauteils hinreichend genau angeben zu können. Um diese Frage zu beantworten sei zunächst vorausgesetzt, dass Wiederhol-, Vergleichs- und Reproduktionsstandardabweichungen der Grundgesamtheit σ_r , σ_R und σ_{repro} bekannt sind, z.B. aus Ringversuchen. Werden nun **n Wiederholungsmessungen am selben Exemplar im selben Labor** durchgeführt, so gilt für die Unsicherheit des Mittelwerts aus diesen Messungen

$$u_1(\bar{y}) = \sqrt{\sigma_L^2 + \frac{\sigma_r^2}{n} + \sigma_{\text{repro}}^2} = \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_r^2 + \frac{\sigma_r^2}{n} + \sigma_{\text{repro}}^2} = \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_r^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right) + \sigma_{\text{repro}}^2} \quad (6.1)$$

Der Anteil der Wiederholungsunsicherheit reduziert sich durch die Wiederholungen, wohingegen Labor- und Reproduktionsunsicherheiten unbeeinflusst bleiben. Werden hingegen **n Wiederholungsmessungen an n verschiedenen Exemplaren im selben Labor** durchgeführt, ergibt sich die Unsicherheit des Mittelwerts zu

$$u_2(\bar{y}) = \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_r^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right) + \frac{\sigma_{\text{repro}}^2}{n}} \quad (6.2)$$

In diesem Fall reduzieren sich zusätzlich noch die Reproduktionsunsicherheiten. Wird schließlich in **n Prüfständen je eine Messung durchgeführt, wobei in jedem Prüfstand ein anderes Prüfexemplar verwendet wird**, so ergibt sich als Unsicherheit für den Mittelwert

$$u_3(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sigma_L^2}{n} + \frac{\sigma_r^2}{n} + \frac{\sigma_{\text{repro}}^2}{n}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{\text{repro}}^2} \quad (6.3)$$

Für zwei Beispiele wurden die Unsicherheiten u_1 , u_2 und u_3 berechnet (Bild 6.1, Bild 6.2). Als Standardabweichungen wurden die Werte aus [ISO 140-2] bei 250 Hz ($\sigma_R = 2$ dB, $\sigma_r = 1$ dB) angesetzt und für die Bauteilreproduzierbarkeit einmal ein niedriger Wert, $\sigma_{\text{repro}} = 1$ dB (Bild 6.1) und einmal ein hoher Wert von 3 dB (Bild 6.2).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 89(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 89(112) of report of 2004-11-10

In beiden Fällen zeigt sich, dass eine Erhöhung der Zahl der Messungen am gleichen Prüfling im gleichen Prüfstand die Unsicherheit nur sehr wenig reduziert (Bild 6.1, Bild 6.2). Die Ursache liegt darin, dass die Wiederholungsunsicherheit in beiden realistisch gewählten Zahlenbeispielen nur einen geringen Beitrag zur Gesamtunsicherheit liefert. Auch die Verwendung mehrerer Prüfxemplare im gleichen Prüfstand reduziert die Unsicherheit nur dann, wenn die Produktstreuung groß im Vergleich zu den übrigen Streuungen ist. Im zweiten Beispiel ist dies der Fall, im ersten nicht. Am effektivsten ist in jedem Fall die Verwendung verschiedener Prüfstände und verschiedener Prüfobjekte. Die Unsicherheit reduziert sich in diesen Fällen um $1/\sqrt{n}$. Besteht das Ziel in einer Unsicherheit von maximal 1 dB, so kann dies nur unter Verwendung mehrerer Prüfstände erreicht werden, wobei nach Bild 6.1 fünf und nach Bild 6.2 dreizehn Messungen erforderlich sind. Die Zahl von erforderlichen Messungen zur Einhaltung bestimmter vorgegebener Unsicherheiten kann Tabelle 6.1 entnommen werden.

Tabelle 6.1 Erforderliche Zahl von Messungen zur Einhaltung vorgegebener Unsicherheiten, $\sigma_R = 2$ dB, $\sigma_r = 1$ dB

u (Vorgabe)	$\sigma_{\text{repro}} = 1$ dB			$\sigma_{\text{repro}} = 3$ dB		
	n_1 (ohne Variation)	n_2 (Variation des Prüflings)	n_3 (Variation von Prüfling und Prüfstand)	n_1 (ohne Variation)	n_2 (Variation des Prüflings)	n_3 (Variation von Prüfling und Prüfstand)
1,0	-	-	5	-	-	13
1,5	-	-	3	-	-	6
2,0	-	2	2	-	10	4
2,5	1	1	1	-	3	2
3,0	1	1	1	-	2	2

In der Bauakustik sind auch Situationen denkbar, in denen keine Informationen zu den Standardabweichungen vorliegen. In diesem Fall ist eine Aufspaltung der einzelnen Unsicherheitsbeiträge nicht möglich. Dadurch wird es erforderlich, alle Einflussgrößen zu variieren, um daraus eine empirische Standardabweichung s berechnen zu können, mit der alle Unsicherheitsbeiträge erfasst werden. Es ist also in n verschiedenen Prüfständen je eine Messung durchzuführen. Nach GUM sollte n größer als 10 sein, um zu verlässlichen Werten zu kommen. Die Unsicherheit des Mittelwerts aus den n Messungen berechnet sich dann zu

$$u(\bar{y}) = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (6.4)$$

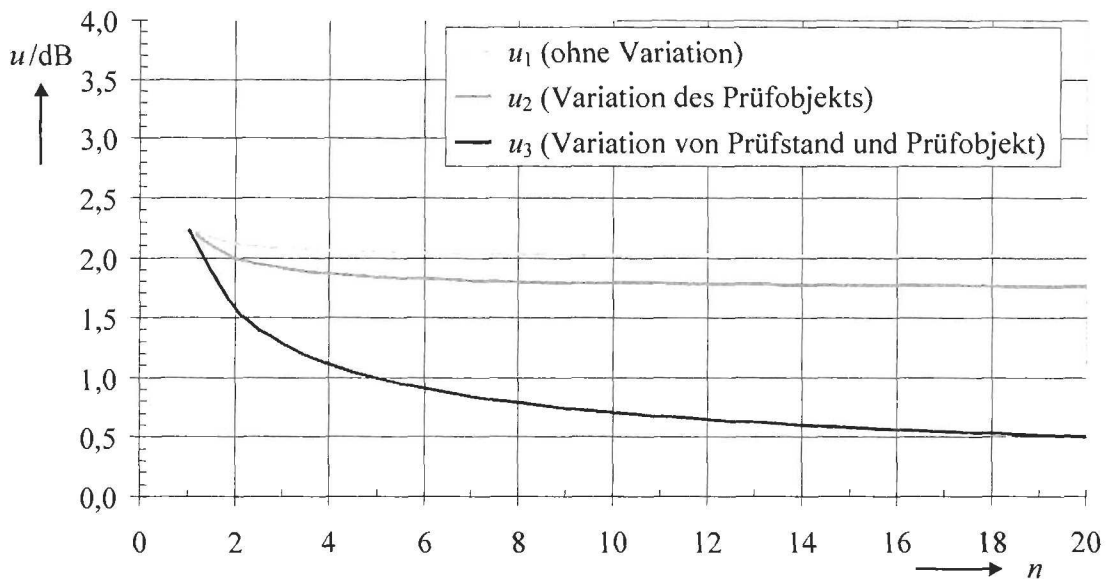


Bild 6.1 Unsicherheit u des Mittelwertes der Schalldämmung aus n Messungen, $\sigma_R = 2$ dB, $\sigma_r = 1$ dB und $\sigma_{\text{repro}} = 1$ dB (gute Reproduzierbarkeit der Messobjekte)

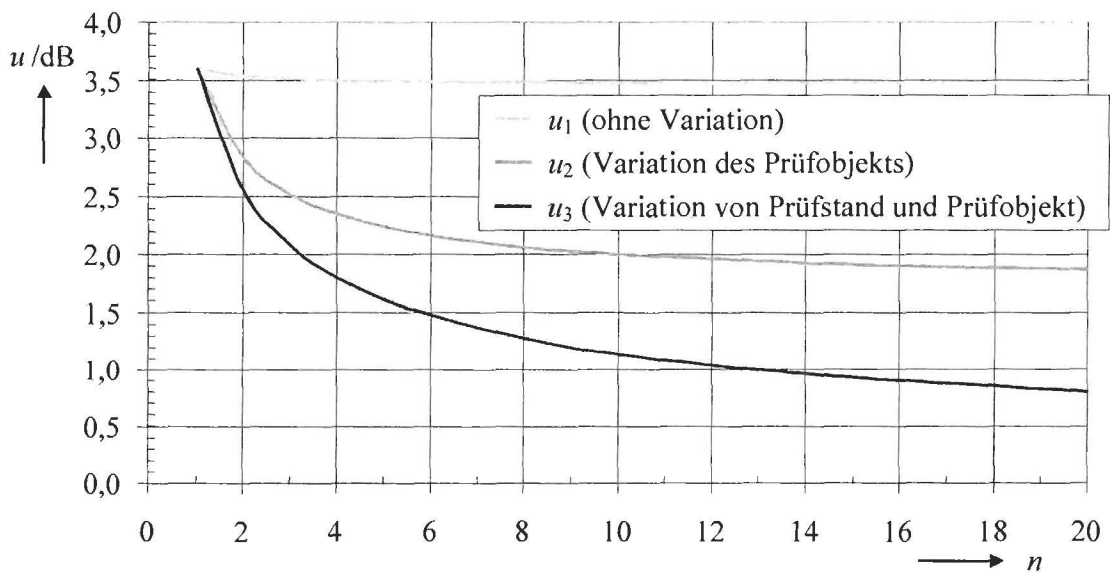


Bild 6.2 Unsicherheit u des Mittelwertes der Schalldämmung aus n Messungen, $\sigma_R = 2$ dB, $\sigma_r = 1$ dB und $\sigma_{\text{repro}} = 3$ dB (geringe Reproduzierbarkeit der Messobjekte)

6.3. Bestimmung einer bauteilspezifischen Produktstreuung

Neben der Schalldämmung des Bauteils interessiert für Prognosezwecke auch die Standardabweichung, die die Bauteilstreuungen kennzeichnet. Dieser Wert darf keinesfalls mit der oben beschriebenen Unsicherheit verwechselt werden. Während die Unsicherheit u eines Mittelwerts im Idealfall mit der Zahl der Messungen sinkt, etwa nach Gl. (6.4), verändert sich die Standardabweichung s selbst nicht in systematischer Weise mit steigender Zahl der Messungen. Mit zunehmender Zahl der Messungen kann sie lediglich genauer geschätzt werden.

Generell muss angemerkt werden, dass die Datenlage zur Produktstreuung äußerst dürftig ist. Dies ist umso kritischer, als die Produktstreuung mit hoher Wahrscheinlichkeit einen nennenswerten Beitrag zur Gesamtunsicherheit liefert, da selbst bei den ausgewählten Ringversuchsobjekten Standardabweichungen von bis zu 4 dB auftreten, z.B. [Po94].

In der Zukunft sollten daher verstärkt Produktstreuungen ermittelt werden. Dazu ist es erforderlich, mehrere nominell identische Exemplare eines Bauteils im gleichen Prüfstand aufzubauen und die jeweilige Schalldämmung zu messen. Dabei ist wichtig, dass die Prüfobjekte aus der ganz normalen Serienproduktion stammen und nicht, wie bei Ringversuchen üblich, unter besonders kontrollierten Bedingungen hergestellt, gelagert und eingebaut werden. Bei Ständerwänden wäre es darüberhinaus empfehlenswert, etwaige Randstücke bei jedem der Aufbauten unterschiedlich zu wählen. Die empirische Standardabweichung aus diesen Messungen setzt sich dann zusammen aus der Produktstreuung und der Wiederholstreuung und es stellt sich die Frage, wie diese beiden Anteile separiert werden können.

Eine Möglichkeit besteht darin, an jedem Exemplar nur eine Messung durchzuführen und eine z.B. aus der Teilnahme an Ringversuchen bekannte Wiederholstandardabweichung s_r des durchführenden Labors einzusetzen um die gesuchte Bauteilstandardabweichung aus der empirischen Standardabweichung s der gemessenen Schalldämmungen zu bestimmen

$$s_{\text{repro}} = \sqrt{s^2 - s_r^2} . \quad (6.5)$$

Kritisch hierbei ist jedoch, dass die Wiederholstandardabweichung eines Labors durchaus auch vom Bauteil abhängen kann, da sich z.B. das Schallfeld im Empfangsraum aufgrund der Kombination von Raum und Quelle, in diesem Fall dem Prüfobjekt, einstellt. Außerdem sind Differenzen von quadrierten Standardabweichungen meist recht ungenau, da die Standardabweichungen in der Bauakustik häufig aus nur wenigen Wiederholungsmessungen bestimmt werden und somit selbst recht ungenau sind.

Eine zweite Möglichkeit zur Ermittlung der Bauteilstreuung besteht darin, bei den Messungen an den verschiedenen Exemplaren des nominell gleichen Bauteils die Messbedingungen so exakt wie möglich konstant zu halten, d.h. immer die gleichen Mikrofon- wie auch Quellpositionen zu verwenden. Damit wird die Wiederholstreuung erheblich reduziert, so dass die empirische Standardabweichung der Schalldämmung der verschiedenen Prüflinge näherungsweise der Bauteil-Standardabweichung entspricht

$$s = \sqrt{s_r^2 + s_{\text{repro}}^2} \approx s_{\text{repro}} . \quad (6.6)$$

Auf diese Art wurde die Homogenität der Ringversuchsobjekte z.B. in [KO88] überprüft. Auch hier muss allerdings vorausgesetzt werden, dass die vorhandenen Unterschiede der Prüfobjekte sich nicht in einer Veränderung der sende- wie auch empfangsseitigen Schallfelder auswirken.

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Bauteilstreuung besteht in der Durchführung von n Wiederholungsmessungen am gleichen Bauteil. Bei gleicher Zahl von Wiederholungen für alle Prüfobjekte ist die empirische Standardabweichung der Mittelwerte aus diesen Messungen

$$s = \sqrt{\frac{s_r^2}{n} + s_{\text{repro}}^2} \quad (6.7)$$

Für hinreichend viele Messungen n ergibt sich dann

$$s \approx s_{\text{repro}} \quad (6.8)$$

Üblicherweise ist die Wiederholstandardabweichung nicht bekannt. Für eine Abschätzung der erforderlichen Zahl von Messungen sei sie hier mit 1 dB abgeschätzt, was dem Wert aus [ISO 140-2] bei 250 Hz entspricht. Um dann mit Gl. (6.8) eine Reproduktionsstreuung von 1 dB mit höchstens 0,1 dB Abweichung erfassen zu können sind fünf Wiederholungsmessungen erforderlich (Bild 6.3). Ist die Reproduktionsstreuung kleiner, so werden wesentlich mehr Wiederholungsmessungen benötigt. Bei $s_{\text{repro}} = 0,5$ dB ergeben sich bereits neun Wiederholungsmessungen. Ist die Reproduktionsstreuung hingegen größer, so sind nur ganz wenige Wiederholungsmessungen erforderlich. Für $s_{\text{repro}} = 2$ dB genügen drei Wiederholungen und für $s_{\text{repro}} = 3$ dB nur zwei.

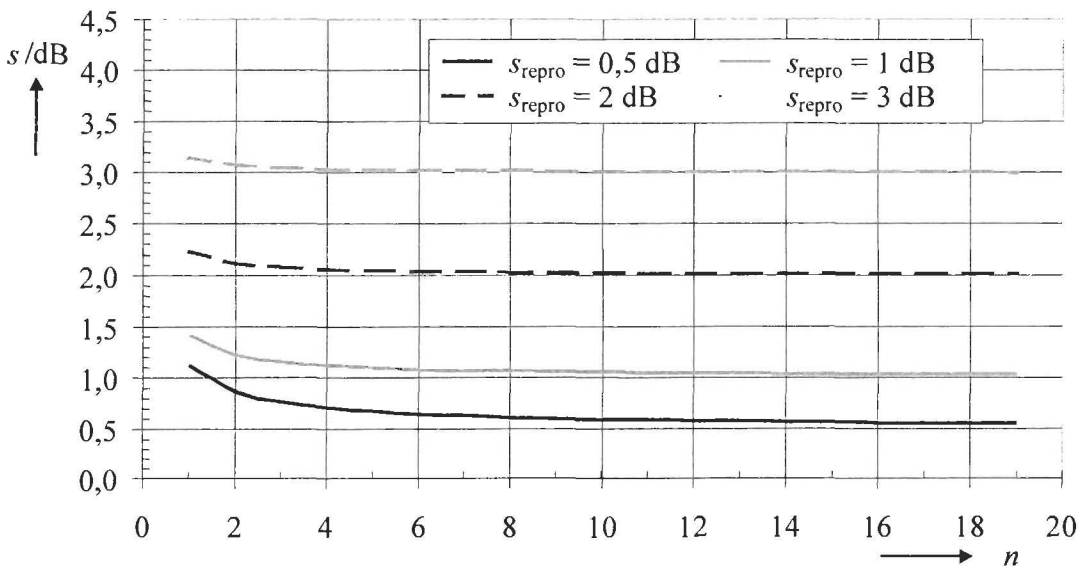


Bild 6.3 Empirische Standardabweichung der Mittelwerte aus n Wiederholungsmessungen für $s_r = 1$ dB

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Bestimmung der Reproduktionsstreuungen betrifft die erforderliche Zahl m der Exemplare des nominell gleichen Bauteils. Um hier zu einer Entscheidung zu kommen, sei auf Abschnitt 2.2.3 verwiesen, wo mit Gl. (2.8) ein Vertrauensbereich für die Standardabweichung angegeben ist. Soll sich die Standardabweichung der Grundgesamtheit σ_{repro} mit 95% Wahrscheinlichkeit in einem

Intervall um die empirische Standardabweichung s_{repro} der Stichprobe befinden, so ist dieses Intervall sehr groß (Bild 6.4). Die Intervallbreite sinkt mit wachsender Stichprobengröße nur wenig, erst bei $m = 8$ Prüfobjekten liegt die Obergrenze des Intervalls beim doppelten Wert der empirischen Standardabweichung. Für ein 80%-Intervall wird dies bereits bei einer Stichprobengröße von $m = 5$ Prüfobjekten erreicht. Fünf Prüfobjekte scheinen demnach ein absolutes Minimum für die Bestimmung einer Produktstreuung darzustellen.

In Zukunft sollte in die Auswertung neben der Berechnung der Reproduktions-Standardabweichung s_{repro} auch eine Untersuchung zu Korrelationen zwischen den Terzwerten einbezogen werden, da diese Information für die Berechnung der Unsicherheit von Einzahlwerten (siehe 5.15) erforderlich ist.

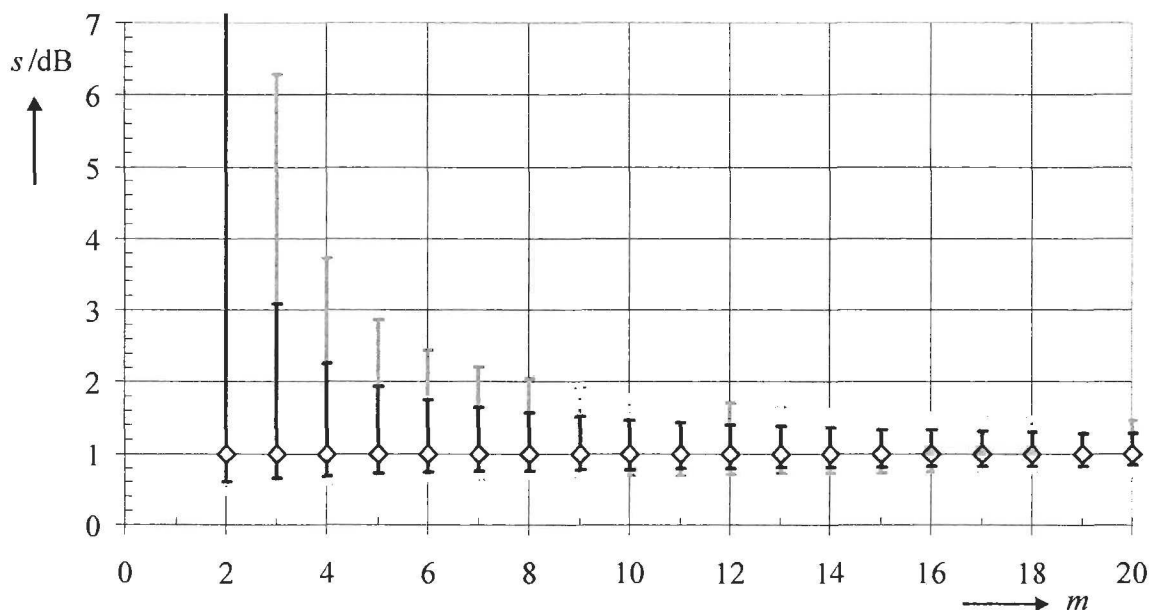


Bild 6.4 95% (grau) und 80% (schwarz) -Vertrauensbereiche für eine angenommene empirische Reproduktionsstandardabweichung von $s_{\text{repro}} = 1$ dB in Abhängigkeit von der Zahl der Prüfobjekte m

6.4. Zur Bildung von Bauteilgruppen

Da die Bestimmung bauteilspezifischer Kennwerte, wie in Kapitel 6.2 und 6.3 gezeigt, aufwändig und kostspielig ist, besteht ein starkes Interesse, Bauteilgruppen zu bilden, für die dann gemeinsame mittlere Schalldämmungen oder/und gemeinsame Reproduktionsstandardabweichungen verwendet werden können. Die entscheidende Frage hierbei ist, welche Kriterien für die Bildung von Bauteilgruppen herangezogen werden können.

Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung rein bautechnischer Parameter, wie z.B. Massivwand aus Kalksandstein mit bestimmter flächenbezogener Masse, Vermörtelung, Putzschicht usw.. Die Zugehörigkeit zu einer Bauteilgruppe ist dann bestimmt durch eine Übereinstimmung typischer Merkmale. Diese Merkmale können sein:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 94(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 94(112) of report of 2004-11-10

- physikalische Ursachen für Fehlerquellen wie z.B. Undichtigkeiten, Gewichtsabweichungen, Inhomogenitäten
- physikalische Effekte, auf denen die Schalldämmung beruht
- Frequenzlage wesentlicher Effekte wie Koinzidenz, Resonanzen
- statistische Streuparameter

Die konkrete Entscheidung, ob ein Bauteil zu einer Gruppe gehört oder nicht, ist jedoch in diesen Fällen nicht objektivierbar. Im Fall von Kalksandsteinen könnte es z.B. passieren, dass die innere Dämpfung einer neuen Steinsorte zu einer höheren mittleren Schalldämmung führt, gleichzeitig aber auch die Reproduktionsstandardabweichung erhöht. Ob dies der Fall ist oder nicht kann letztlich erst nach Durchführung der in 6.2. und 6.3. beschriebenen Messungen am fraglichen Bauteil festgestellt werden. Ähnliche Beispiele sind z.B. Verschraubungsarten oder Änderungen der Ständergeometrie bei Leichtbauwänden oder Änderungen des Lochprofils von Hohlziegeln. Die Verwendung rein bautechnischer Parameter zur Bildung von Bauteilgruppen wird somit immer subjektiv eingefärbt sein.

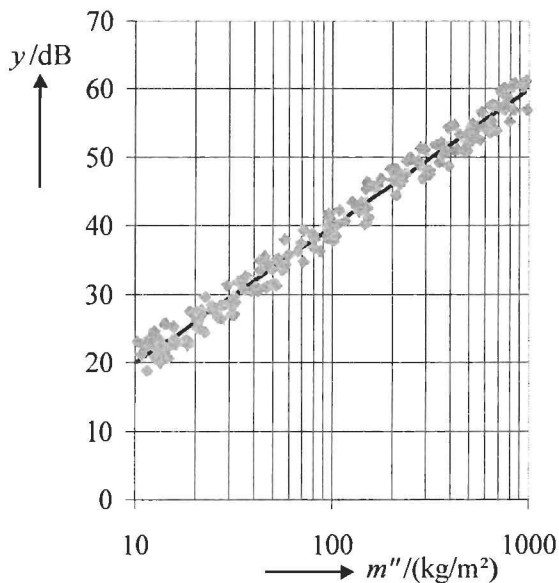


Bild 6.5 Konstante Reproduktions-Standardabweichung

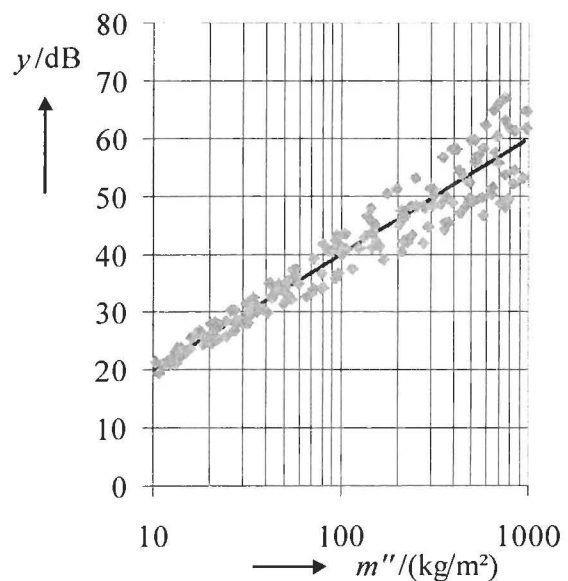


Bild 6.6 Ansteigende Reproduktions-Standardabweichung

Ein weiteres Verfahren zur Bildung von Bauteilgruppen kann aus akustischen Ergebnissen abgeleitet werden. Dazu ist es erforderlich ein Modell zu kennen, das eine Berechnung der Schalldämmung in Abhängigkeit von bekannten Bauteileigenschaften ermöglicht. Ein Bauteil gehört dann zu dieser Gruppe, wenn die Modellformel gilt und es darüberhinaus keine weiteren Einflussgrößen gibt. Beispielfähig betrachtet sei hierfür eine Bauteilgruppe, deren Dämmung sich ausschließlich auf Grund der Bauteilmasse ergibt (Bild 6.5). In diesem Fall kann die Reproduktions-Standardabweichung ermittelt werden, indem die einzelnen gemessenen Schalldämmmaße um das Massegesetz korrigiert werden und anschließend aus diesen korrigierten Werten eine Standardabweichung berechnet wird. Voraussetzung für ein solches Verfahren ist allerdings, dass sich die Reproduktions-Standardabweichung nicht mit der Masse verändert. Im angeführten Beispiel gibt es plausible Gründe für eine Erhöhung der

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 95(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 95(112) of report of 2004-11-10

Reproduktions-Standardabweichung mit der Masse, da bei hoch schalldämmenden Bauteilen, also bei großer Masse, höhere Anforderungen an die Dichtigkeit und Konstanz der Bauausführung zu stellen sind, als bei Bauteilen mit geringer Schalldämmung (beispielhaft dargestellt in Bild 6.6). In diesem Fall müssten wiederum Klassen gebildet werden, deren Breite subjektiv festzulegen wäre.

Beide vorgestellte Möglichkeiten zur Bildung von Bauteilgruppen besitzen somit entscheidende Nachteile so dass für die Praxis keine generelle Empfehlung gegeben werden kann.

6.5. Fortpflanzung der Unsicherheiten bis in die Prognosewerte

Gegenstand einer Prognose des Schallschutzes am Bau ist u.a. die Schalldämmung zwischen zwei Räumen, die sich als Summe der Schallübertragung auf den verschiedenen Ausbreitungspfaden ergibt.

Ausgangspunkt für Prognoserechnungen sind bauteilbezogene Schalldämmwerte sowie eine zugeordnete Unsicherheit aus dem Bauteilkatalog.

$$\bar{y}; u(\bar{y}). \quad (6.9)$$

Sind diese Werte gemäß Kap. 6.2 ermittelt worden, so kennzeichnen sie das mittlere Bauteilverhalten in einer mittleren Laborsituation. Die Prognose bezieht sich jedoch auf ein einzelnes Exemplar des fraglichen Bauteils. Für die Schalldämmung dieses Einzelexemplars wird der im Bauteilkatalog angegebene Mittelwert verwendet

$$y = \bar{y} \quad (6.10)$$

und für die Unsicherheit muss die Reproduktionsstandardabweichung zusätzlich berücksichtigt werden. Im Normalfall beinhaltet die Unsicherheit des Mittelwerts jedoch auch einen durch Produktstreuungen verursachten Anteil (siehe Gl. (6.1) bis (6.3)), so dass dieser Anteil aus der Unsicherheit des Mittelwerts herauszurechnen ist

$$u(y) = \sqrt{u^2(\bar{y}) - \frac{\sigma_{\text{repro}}^2}{n} + \sigma_{\text{repro}}^2}. \quad (6.11)$$

Ist bekannt, durch welche Mittelungsart der Mittelwert bestimmt wurde, so kann die entsprechende Gleichung eingesetzt werden. Für je eine Messung in n Prüfständen an je einem Prüfexemplar (Gl. (6.3)) ergibt sich:

$$u(y) = \sqrt{\frac{\sigma_R^2}{n} + \sigma_{\text{repro}}^2}. \quad (6.12)$$

Im allgemeinen wird man aber diesen zusätzlichen Aufwand nicht treiben und die Unsicherheit mit der für große n gültigen Näherung

$$u(y) \approx \sqrt{u^2(\bar{y}) + \sigma_{\text{repro}}^2} \quad (6.13)$$

berechnen. Das Ergebnis der Umrechnung (Gl. (6.10) und (6.13)) ist nun die Schalldämmung eines einzelnen Exemplars des betrachteten Bauteils in einer mittleren Laborsituation.

Als nächstes ist die mittlere Laborsituation in eine konkrete Bausituation umzurechnen. Dies geschieht durch Anwendung eines Korrekturwerts K_{Bau}

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 96(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 96(112) of report of 2004-11-10

$$y_{\text{Bau}} = y - K_{\text{Bau}} \cdot \quad (6.14)$$

Die Größe dieser Korrektur kann auf der Grundlage des derzeitigen Kenntnisstands nicht angegeben werden. Es gibt einige Gründe, die dafür sprechen, dass die Schalldämmung in der mittleren Laborsituation eher größer ist als am Bau. Einer davon ist, dass Laboratorien, die hohe Schalldämmergebnisse liefern, von der Industrie bevorzugt beauftragt werden, ein anderer, dass die Labore durch die vorgeschriebene Asymmetrie zwischen Sende- und Empfangsraum so gebaut sind, dass im Mittel höhere Schalldämmungen als am Bau erzielt werden.

Die Unsicherheit dieser Schalldämmung eines einzelnen Exemplars des betrachteten Bauteils in einer konkreten Bausituation ergibt sich nun aus der Überlagerung der Unsicherheit nach Gl. (6.13) und der zusätzlich durch die Bausituationen eingeführten Unsicherheit

$$u(y_{\text{Bau}}) = \sqrt{u^2(y) + u^2(K_{\text{Bau}})} \cdot \quad (6.15)$$

Sofern die zugrundeliegenden Laborsituationen die Vielfalt der in der Praxis vorkommenden Bausituationen hinreichend gut repräsentieren, kann die die Bausituationen charakterisierende Standardabweichung durch die Labor-Standardabweichung ersetzt werden, womit sich

$$u(y_{\text{Bau}}) = \sqrt{u^2(y) + \sigma_L^2} \quad (6.16)$$

ergibt. In den meisten Fällen decken die Laborsituationen jedoch nur einen kleinen Ausschnitt der am Bau auftretenden Situationen ab, so dass

$$u^2(K_{\text{Bau}}) > \sigma_L \quad (6.17)$$

erwartet werden kann. Über die Größe der durch unterschiedliche Bausituationen verursachten Standardabweichung kann beim derzeitigen Kenntnisstand jedoch keine Aussage gemacht werden. Prinzipiell müsste man hierzu von statistischen Erhebungen über übliche Bauteilgrößen, Kantenlängenverhältnisse, Sende- und Empfangsraumvolumina usw. ausgehen und daraus die Schalldämmung in den unterschiedlichen Situationen ermitteln und anschließend daraus eine Standardabweichung berechnen.

Das Prognoseergebnis ergibt sich nun durch Verknüpfung der Schalldämmmaße der an der Schallübertragung beteiligten Bauteile entsprechend dem verwendeten Prognoseverfahren (hier durch eine allgemeine Funktion f ausgedrückt)

$$y_{\text{Prog}} = f(y_{1,\text{Bau}}, y_{2,\text{Bau}}, \dots, y_{n,\text{Bau}}) \cdot \quad (6.18)$$

Die Unsicherheit dieses Prognosewertes ihrerseits entsteht durch die Überlagerung der bauteilbezogenen Unsicherheiten gemäß Gl. (6.15) mit der durch das Prognoseverfahren zusätzlich eingeführten Unsicherheit

$$u(y_{\text{Prog}}) = f\left(u(K_{\text{Prog}}), u(y_{1,\text{Bau}}), u(y_{2,\text{Bau}}), \dots, u[y_{n,\text{Bau}}]\right) \cdot \quad (6.19)$$

Zur Veranschaulichung der Sachverhalte sei hier ein stark vereinfachtes Beispiel betrachtet, bei dem die resultierende Schalldämmung einer Wand mit einer eingebauten Tür zu bestimmen sei. Der komplette daraus resultierende Rechenweg ist in Bild 6.7 schematisch dargestellt.

Die in diesem Fall sehr einfache Prognosegleichung lautet:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 97(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 97(112) of report of 2004-11-10

$$y_{\text{Prog}} = 10 \lg \left[\frac{S_{\text{W}} + S_{\text{T}}}{S_{\text{W}} 10^{-y_{\text{W,Bau}}/(10\text{dB})} + S_{\text{T}} 10^{-y_{\text{T,Bau}}/(10\text{dB})}} \right] \text{ dB.} \quad (6.20)$$

mit der Wandfläche S_{W} , der Türfläche S_{T} und den für Einzelexempare am Bau gültigen Schalldämmmaßen $y_{\text{W,Bau}}$ und $y_{\text{T,Bau}}$. Für das angegebene Beispiel (Zahlenwerte siehe Bild 6.7) ergibt sich ein Prognosewert von 50 dB.

Die Unsicherheit des Prognosewertes lässt sich durch das GUM-Verfahren unter Annahme von unkorrelierten Unsicherheitsbeiträgen analytisch ermitteln zu

$$u(y_{\text{Prog}}) = \left\{ \left[\frac{\partial y_{\text{Prog}}}{\partial y_{\text{W,Bau}}} u(y_{\text{W,Bau}}) \right]^2 + \left[\frac{\partial y_{\text{Prog}}}{\partial y_{\text{T,Bau}}} u(y_{\text{T,Bau}}) \right]^2 + \left[\frac{\partial y_{\text{Prog}}}{\partial S_{\text{T}}} u(S_{\text{T}}) \right]^2 + \left[\frac{\partial y_{\text{Prog}}}{\partial S_{\text{W}}} u(S_{\text{W}}) \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (6.21)$$

Mit den Sensitivitätskoeffizienten

$$c_1 = \frac{\partial y_{\text{Prog}}}{\partial y_{\text{W,Bau}}} = \frac{S_{\text{W}} 10^{-y_{\text{W,Bau}}/(10\text{dB})}}{S_{\text{W}} 10^{-y_{\text{W,Bau}}/(10\text{dB})} + S_{\text{T}} 10^{-y_{\text{T,Bau}}/(10\text{dB})}} \quad (6.22)$$

$$c_2 = \frac{\partial y_{\text{Prog}}}{\partial y_{\text{T,Bau}}} = \frac{S_{\text{T}} 10^{-y_{\text{T,Bau}}/(10\text{dB})}}{S_{\text{W}} 10^{-y_{\text{W,Bau}}/(10\text{dB})} + S_{\text{T}} 10^{-y_{\text{T,Bau}}/(10\text{dB})}} \quad (6.23)$$

$$c_3 = \frac{\partial y_{\text{Prog}}}{\partial S_{\text{W}}} = \frac{10 \text{ dB}}{\ln 10} \left[\frac{1}{S_{\text{W}} + S_{\text{T}}} - \frac{10^{-y_{\text{W,Bau}}/(10\text{dB})}}{S_{\text{W}} 10^{-y_{\text{W,Bau}}/(10\text{dB})} + S_{\text{T}} 10^{-y_{\text{T,Bau}}/(10\text{dB})}} \right] \quad (6.24)$$

$$c_4 = \frac{\partial y_{\text{Prog}}}{\partial S_{\text{T}}} = \frac{10 \text{ dB}}{\ln 10} \left[\frac{1}{S_{\text{W}} + S_{\text{T}}} - \frac{10^{-y_{\text{T,Bau}}/(10\text{dB})}}{S_{\text{W}} 10^{-y_{\text{W,Bau}}/(10\text{dB})} + S_{\text{T}} 10^{-y_{\text{T,Bau}}/(10\text{dB})}} \right] \quad (6.25)$$

ergibt sich für das Beispiel eine Unsicherheit des Prognosewertes von 2,2 dB. Das zugehörige Unsicherheitsbudget zeigt, dass die wesentlichen Unsicherheitsbeiträge von den Schalldämmmaßen stammen, obwohl die Unsicherheit der Flächen mit 0,5 bzw. 0,1 m² recht groß angesetzt wurde (Tabelle 6.2). Interessant ist hier, dass die Unsicherheit des Prognosewertes kleiner ist als die Unsicherheit der beiden eingehenden Schalldämmmaße. Die Ursache ist, dass sich der Prognosewert als gewichteter Mittelwert aus zwei Einzelwerten berechnet. Die Unsicherheit eines solchen Mittelwerts ist immer geringer als die Unsicherheit der Einzelwerte. Im Grenzfall, dass ein Einzelwert den Mittelwert bestimmt, ist die Unsicherheit des Mittelwerts gleich der Unsicherheit des dominanten Einzelwerts.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 98(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 98(112) of report of 2004-11-10

Tabelle 6.2 Unsicherheitsbudget für das Prognosebeispiel

Größe	Wert	Verteilung	u_i	c_i	$c_i u_i$
$y_{W,Bau}$	53 dB	normal	3 dB	0,386	1,16 dB
$y_{T,Bau}$	44 dB	normal	3 dB	0,614	1,84 dB
S_W	10 m ²	normal	0,5 m ²	0,362 dB/m ²	0,18 dB
S_T	2 m ²	normal	0,1 m ²	0,362 dB/m ²	0,04 dB
y_{Prog}	50 dB	normal			2,18 dB

Das oben behandelte Beispiel lässt sich ohne Weiteres auf den allgemeinen Fall übertragen, dass n Bauteile an der Schallübertragung beteiligt sind. Die Prognosegleichung lautet dann

$$y_{Prog} = 10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n S_i 10^{-y_i/(10dB)}} \right] \text{ dB.} \quad (6.26)$$

Die Unsicherheit des Prognosewertes ergibt sich aus

$$u(y_{Prog}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_{S,i} u(S_i)]^2 + [c_{y,i} u(y_i)]^2}. \quad (6.27)$$

mit den Sensitivitätskoeffizienten

$$c_{S,i} = \frac{10 \text{ dB}}{\ln 10} \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^n S_i} - \frac{10^{-y_i/(10dB)}}{\sum_{i=1}^n S_i 10^{-y_i/(10dB)}} \right] \quad (6.28)$$

und

$$c_{y,i} = \frac{S_i 10^{-y_i/(10dB)}}{\sum_{i=1}^n S_i 10^{-y_i/(10dB)}}. \quad (6.29)$$

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 99(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 99(112) of report of 2004-11-10

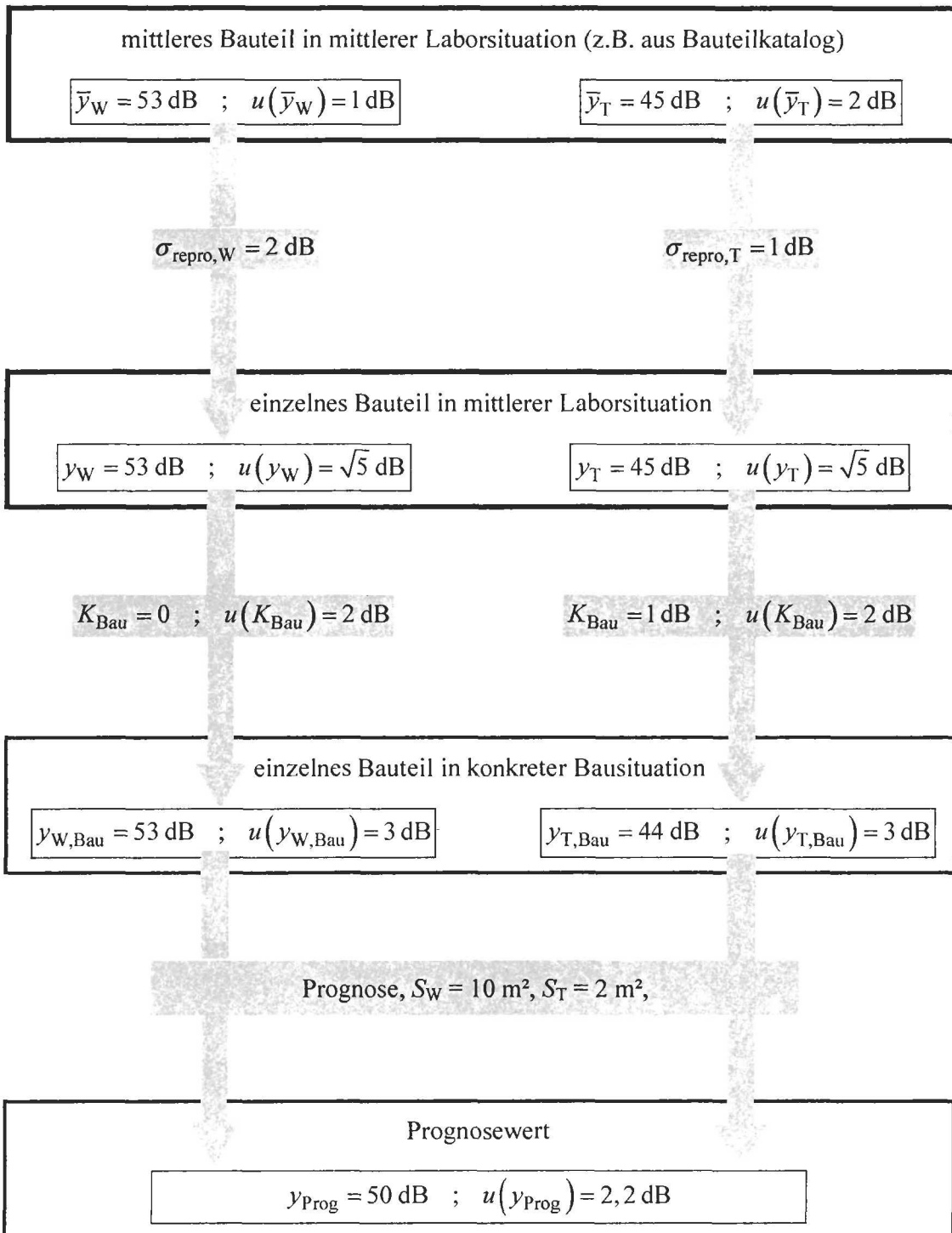


Bild 6.7 Schematische Darstellung der Fortpflanzung der Unsicherheiten

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 100(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 100(112) of report of 2004-11-10

6.6. Zum Vorhaltemaß

Das Vorhaltemaß sollte nun dazu dienen, die dem Prognosewert beigeordnete summarische Unsicherheit zu berücksichtigen. Dazu wird vom prognostizierten Wert ein Vielfaches der Unsicherheit so abgezogen, dass mit einer bestimmter statistischen Sicherheit die in der Praxis auftretende Schalldämmung über der deklarierten Schalldämmung y_D liegt

$$y_D = y_{\text{Prog}} - k u(y_{\text{Prog}}). \quad (6.30)$$

Es handelt sich also im statistischen Sinne um einen einseitigen Vertrauensbereich. Der zugehörige Erweiterungsfaktor k beträgt unter Annahme von Normalverteilung eins bei einer statistischen Sicherheit von 84 % und zwei bei einer statistischen Sicherheit von 97,5 %. Die Unsicherheit des Prognosewertes beinhaltet Anteile durch das Prognoseverfahren, die Bausituation, der Reproduktionsstreuungen sowie Unsicherheiten bei der messtechnischen Bestimmung der Schalldämmung (vgl. Gln. (6.19), (6.15) und (6.13)).

Für das in Kapitel 6.5 angegebene realistische Zahlenbeispiel ergibt sich ein Vorhaltemaß von 2,2 dB bei einer statistischen Sicherheit von 84 %. Dies bedeutet, für die Schalldämmung der Kombination aus Wand und Tür wird eine Schalldämmung von 48 dB (gerundet auf ganze dB) deklariert.

6.7. Nachmessungen am Bau

Eine weitere häufig diskutierte Frage betrifft die Nachmessung von bauaufsichtlich geforderten oder privatrechtlich vereinbarten Schalldämmungen am ausgeführten Bau. Derzeit wird dabei die Unsicherheit der Messung in den allermeisten Fällen nicht berücksichtigt. Um dies in der Zukunft auf eine etwas solidere Basis zu stellen, seien hier einige Untersuchungen angestellt.

Zunächst soll der Frage nachgegangen werden, welche Unsicherheitsbeiträge vorliegen. Bei der Messung in der konkreten Bausituation werden Anzahl und Orte für Quell- und Mikrofonpositionen sowohl für die Schalldruckpegeldifferenz- als auch für die Absorptionsgradmessungen ausgewählt. Auch die Wahl des Messgeräts obliegt dem Messteam. Störgeräusch und meteorologische Bedingungen müssen wie vorliegend akzeptiert werden. Damit ergibt sich aus Sicht der messenden Personen eine Messung unter Wiederholbedingungen, sieht man vom Messgeräteinfluss ab. Als Standardabweichung für diese Messungen können z.B. die aufgrund der PTB-Vergleichsmessungen errechneten Werte Verwendung finden (siehe Kapitel 5.14), sofern sich die Bausituation nicht durch besonders erschwerende Bedingungen, wie etwa sehr kleine oder nicht vollständig abgetrennte Räume auszeichnet. Das Messergebnis soll hier als y_{Mess} bezeichnet werden dessen erweiterte Unsicherheit U für einen Überdeckungsbereich von 95 % (Erweiterungsfaktor $k = 2$) den doppelten Wert der Wiederhol-Standardabweichung

$$U = 2 \sigma_r \quad (6.31)$$

beträgt. Alle Streuungen bedingt durch Effekte wie Bauteilgrößen, Kantenlängenverhältnisse, Energieableitung, Randeinspannung, Art des anregenden wie auch des transmittierten Schallfeldes sind für eine feste Bausituation nicht variabel. Außerdem sollten diese Effekte während der schalltechnischen Planung durch das Vorhaltemaß nach 6.6. berücksichtigt sein, liegen also in der Verantwortung des Planers und nicht des Messenden.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 101(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 101(112) of report of 2004-11-10

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Nachmessung am Bau betrifft die genaue Aussage, die durch die Nachmessung überprüft werden soll. Die erste Variante hierzu ist: die Schalldämmung liegt mit großer Sicherheit unter dem deklarierten Wert y_D . Zur Bestätigung dieser Aussage muss gefordert werden, dass das Messergebnis erhöht um die erweiterte Messunsicherheit kleiner als y_D ist (siehe Bild 6.8):

$$y_{\text{Mess},1} + U < y_D \quad (6.32)$$

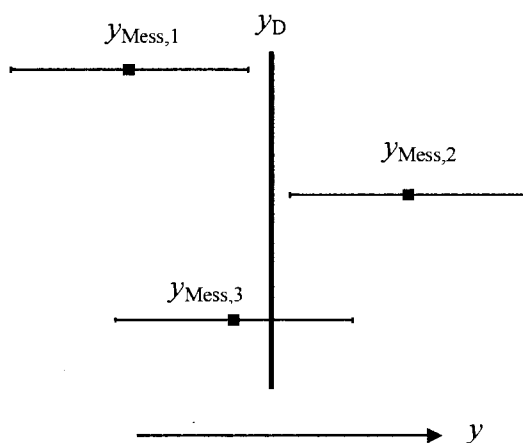
In der zweiten Variante lautet die Aussage: die Schalldämmung liegt mit großer Sicherheit über dem deklarierten Wert y_D . Diese Aussage wird bestätigt durch

$$y_{\text{Mess},2} - U > y_D \quad (6.33)$$

Falls der deklarierte Wert innerhalb des Unsicherheitsintervalls um den Messwert liegt

$$y_{\text{Mess},3} - U < y_D < y_{\text{Mess},3} + U, \quad (6.34)$$

so kann keine der beiden oben getroffenen Aussagen bestätigt oder abgelehnt werden.



Bei üblichen bauakustischen Messungen liegt die Wiederholstandardabweichung in der Größenordnung von einem dB, d.h. die erweiterte Messunsicherheit für eine Einzelmessung beträgt ca. 2 dB. Falls bei einer Nachmessung durch die Unsicherheit keine Aussage getroffen werden kann, so besteht die Möglichkeit, die Messungen zu wiederholen, allerdings möglichst mit anderen Quell- und Mikrofonpositionen. Die Unsicherheit des Mittelwertes aus diesen Messungen reduziert sich dann um $1/\sqrt{n}$, wobei n die Zahl der Wiederholungsmessungen ist.

Bild 6.8 Nachmessung eines deklarierten Werts

7. Zusammenfassung und Ausblick

Das Hauptziel des Projekts bestand darin, quantitative Kriterien für die Anerkennung von bauakustischen Prüfstellen und Messergebnissen zu ermitteln.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden zunächst die wesentlichen statistischen Grundlagen der Messtechnik sowie die Prinzipien zur Erfassung und Berücksichtigung der Messunsicherheit dargestellt. Darauf aufbauend wurden detaillierte Vorschläge für die Anerkennung von bauakustischen Prüfstellen und für die Durchführung von Vergleichsmessungen erarbeitet, die die existierenden Verfahren durch eine Erhöhung der Transparenz der Entscheidungen wesentlich verbessern.

In einem nächsten Abschnitt erfolgte dann eine Untersuchung der mit der Luftschalldämmung verbundenen Unsicherheiten. Ausgangspunkt war eine Analyse der verschiedenen Einflussfaktoren, die schließlich zur Identifikation von insgesamt 16 Unsicherheitsbeiträgen führte. Die Größenordnung einiger Unsicherheitsbeiträge konnte auf der Grundlage vorliegender Daten abgeschätzt werden, wobei neben vorliegenden Ringversuchsergebnissen aus der Literatur auch PTB-interne Daten, die u.a. aus der Anerkennung von Prüfstellen bzw. aus Vergleichsmessungen stammen, und Ergebnisse der Vergleichsmessungen an der MPA Dortmund verwendet wurden.

In einem nächsten Schritt wurden die einzelnen Unsicherheitsbeiträge den bislang in der Bauakustik verwendeten Präzisionsmaßen Wiederholgrenze und Vergleichsgrenze nach ISO 140-2 zugeordnet, wodurch ein quantitativer Vergleich mit vorliegenden Ringversuchsergebnissen und den Werten aus ISO 140-2 möglich wurde. Es zeigte sich, dass die in ISO 140-2 angegebenen Werte meist geringer sind als die tatsächlich auftretenden Unsicherheiten.

Abschließend wurden die aus den Unsicherheiten erwachsenden Konsequenzen für die bauakustische Praxis aufgezeigt. Neben Fragen zum Vorhaltemaß und zu Nachmessungen am Bau wurde im Einzelnen untersucht, wie viele verschiedene Exemplare eines Bauteils in wie vielen verschiedenen Prüfständen gemessen werden müssen, damit die dem Mittelwert aus diesen Messungen beigeordnete Unsicherheit bestimmte Obergrenzen nicht überschreitet. Diese Erkenntnisse werden u.a. für die Erstellung des Bauteilkatalogs der DIN 4109 benötigt. Außerdem wurde an einem Beispiel die Fortpflanzung der Unsicherheiten von den Werten aus dem Bauteilkatalog bis hin zum Prognosewert durchgerechnet. Hierbei ergab sich, dass die Unsicherheit des Prognosewerts immer geringer oder höchstens gleich der einzelnen Unsicherheiten der beteiligten Bauteile ist.

Summarisch kann somit konstatiert werden, dass die wesentlichen Projektziele erreicht wurden. Bei der Bearbeitung des Projekts traten jedoch neue Aspekte zutage, die in der Zukunft bearbeitet werden sollten. Dazu gehören u.a. die Bestimmung von Produktstreuungen, die Berechnung der Unsicherheit von Einzahlwerten bei teilweise korrelierten Terzwerten sowie die Frage nach der verwendeten Definition für die Schalldämmung. Letztere Frage ist von zentraler Bedeutung, da es durch Verwendung unterschiedlicher Definitionen in verschiedenen Kontexten immer wieder zu Missverständnissen kommt und auch kein Unsicherheitsbudget ohne exakte Definition der Messgröße aufgestellt werden kann.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 103(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 103(112) of report of 2004-11-10

Danksagung

Für die Finanzierung gebührt der Dank dem Deutschen Institut für Bautechnik. Wesentliche Daten haben Herr A. Terskan (MPA Dortmund) und Frau Prof. Dr. J. Lang (Wien) beige-steuert. Zudem gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. W. Scholl sowie Herrn Dr. W. Weise für eine Vielzahl von Anregungen sowie für die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen.

Literatur

- [Br91] I.N. Bronstein, K.A. Semendjajew: *Taschenbuch der Mathematik*. 25. Auflage, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1991
- [CS89] R.J.M. Craik, J.A. Steel: *The effect of workmanship on sound transmission through buildings: Part I – Airborne sound*. *Applied Acoustics*, 27, 57-63, 1989
- [DIN 4109-2] *Schallschutz im Hochbau; Luft- und Trittschalldämmung in Gebäuden; Anforderungen, Nachweise und Hinweise für Planung und Ausführung*. Entwurf, Oktober 1984
- [DIN 4109-3] *Schallschutz im Hochbau; Luft- und Trittschalldämmung in Gebäuden; Ausführungsbeispiele mit nachgewiesener Schalldämmung für Gebäude in Massivbauart*. Entwurf, Oktober 1984
- [DIN 4109-7] *Schallschutz im Hochbau; Luft- und Trittschalldämmung in Gebäuden; Rechenverfahren und Ausführungsbeispiele für den Nachweis des Schallschutzes in Skelettbauten und Holzhäusern*. Entwurf, Oktober 1984
- [EN 12354] *Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements*.
- [GSS04] H. Goydke, B.R.L. Siebert, W. Scholl: *Studie zur Bestimmung von Messunsicherheiten bei Schalldämmungsmessungen*. *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* 51(2004), S. 7 – 12
- [GUM] *Guide to the expression of uncertainties in measurement*. first edition, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland)
- [Ha86] Joachim Hartung, Bärbel Elpelt, Karl-Heinz Klösener: *Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*. 5., durchgesehene Auflage, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1986
- [ISO 140-1] *Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 1: Anforderungen an Prüfstände mit unterdrückter Flankenübertragung*, 1997
- [ISO 140-2] *Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 2: Angaben von Genauigkeitsanforderungen*, 1991
- [ISO 140-3] *Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen*, 1995
- [ISO 5725-2] *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen - Teil 2: Ein grundlegendes Verfahren für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichspräzision von festgelegten Meßverfahren*. 1994

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 104(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 104(112) of report of 2004-11-10

- [Ke04] U.E. Kernen: *Sound insulation of a single plate: A discussion on the area dependency of the sound reduction index*. Proc. of InterNoise 2004, Prag, CDROM
- [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
- [KR84] S.D. Kristensen, B. Rasmussen: *Repeatability and Reproducibility of Sound Insulation Measurements*. Forschungsbericht zum Nordtest Projekt 235-80
- [Ku73] H. Kuttruff: *Room Acoustics*. Applied Science Publishers Ltd, Essex, England, 1973
- [LM86] L.C.J. van Luxemburg, H.J. Martin: *Repeatibility and reproducibility of laboratory airborne sound insulation measurements: a Dutch precision experiment*. Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, Zoetermeer/Leidschendam, 1986
- [Ma04] Internetseite der Universität Heidelberg:
www.ma.uni-heidelberg.de/inst/biom/lexikon/
- [Me00] A. Meier: *Die Bedeutung des Verlustfaktors bei der Bestimmung der Schalldämmung im Prüfstand*. Dissertation, RWTH Aachen, Shaker, 2000
- [OP89] H.S. Olesen, D.B. Pedersen: *The development of guidelines for the choice of loudspeaker positions for building acoustic laboratory measurements*. synthesis report zum EU-Projekt 3173/1/0/078/87/8-BCR-DK(30)
- [Po94] R. Pompoli: *Intercomparison of laboratory measurements of airborne sound insulation of walls*. Forschungsbericht zum EU-Projekt MAT1-CT-940054, 1994
- [PS98] R. Pompoli, R.S. Smith: *Possible reasons for the discrepancy in the reproducibility results of the inter-comparison of laboratory measurements of airborne sound insulation of walls*. Präsentation auf dem 18. Treffen der CEN/TC126/WG1, Zürich, 1998
- [Ra84] B. Rasmussen: *Measurement of Sound Reduction Index for Glazings in a Staggered Test Opening*. Forschungsbericht zum Nordtest Projekt 360-82
- [RB04] M. Rehfeld, C. Boitte: *Dispersion of sound transmission loss of glazings*. Proc. of InterNoise 2004, CDROM, Prag, 2004
- [RVGS90] J. Roland, M. Villenave, L. Gagliardini, D. Soubrier: *Comparative Testing on the sound reduction index of double-paned windows*. Forschungsbericht zur ECC-BCR Studie, Vertrags-Nr. 3198/1/0/127/87/11-BCR-F(30), 1990
- [RVGS91] J. Roland, M. Villenave, L. Gagliardini, D. Soubrier: *Intercomparison of measurements of noise attenuation by double glazed windows in frames*. Forschungsbericht zur ECC-BCR Studie, Vertrags-Nr. 3165/1/0/078/87/7-BCR-B(30), 1991
- [VDR58] G. Venzke, P. Dämmig, D. Reichow: *Zufällige und systematische Fehler bei Luftschalldämmungs- und Trittschallmessungen*. ACUSTICA 8, 1958, S. 315-325

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 105(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 105(112) of report of 2004-11-10

- [Vo95] M. Vorländer: *Revised relation between the sound power and the average sound pressure level in rooms and consequences for acoustic measurements*. ACUSTICA, Vol. 81, 1995, 332-343
- [Wa55] R.V. Waterhouse: *Interference patterns in reverberant sound fields*. J. Acoust. Soc. Am. 27 (1955), 247-258
- [We01] W. Weise: *Corrections of incident power in sound reduction index measurements*. acta acustica - ACUSTICA, Vol. 87, 2001, 475-481
- [We03] W. Weise: *Untersuchung der Ursachen signifikanter Abweichungen von Messergebnissen aus unterschiedlichen, nach der europäischen Norm DIN EN ISO 140 normgerechten Prüfständen für die Schalldämmung*. Abschlussbericht der PTB zum gleichnamigen durch das DIBt geförderte Projekt, Braunschweig, 2003
- [We04] W. Weise, V. Wittstock: *Using round robin test results for the accreditation of laboratories in the field of building acoustics*. Veröffentlichung in Vorbereitung
- [WB03] V. Wittstock, C. Bethke: *The role of static pressure and temperature in building acoustics*. Journal of Building Acoustics, Vol. 10, No 2, 2003

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 106(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 106(112) of report of 2004-11-10

Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1	Veranschaulichung des Kolmogorow-Smirnow-Tests.....	15
Bild 2.2	Verteilungsdichte (pdf) und Prognosewert	25
Bild 2.3	Verteilungsdichten (pdf) für gemessene und praktisch vorkommende Werte	25
Bild 2.4	Vorschlag für eine Messanordnung nach WEISE [We03].....	26
Bild 2.5	Verteilungsdichten (pdf) für gemessene und praktisch vorkommende Werte	26
Bild 3.1	Zeitliche Entwicklung der bei den Vergleichsmessungen an der MPA Dortmund gemessenen Normtrittschallpegel, Bereich tiefer Frequenzen	32
Bild 3.2	Zeitliche Entwicklung der bei den Vergleichsmessungen an der MPA Dortmund gemessenen Normtrittschallpegel, Bereich mittlerer Frequenzen	33
Bild 3.3	Zeitliche Entwicklung der bei den Vergleichsmessungen an der MPA Dortmund gemessenen Normtrittschallpegel, Bereich hoher Frequenzen.....	33
Bild 4.1	In Prüfstand 1 gemessene Schalldämmung und kritische Differenzen.....	37
Bild 4.2	In Prüfstand 2 gemessene Schalldämmung und kritische Differenzen.....	37
Bild 4.3	Gemessene Schalldämmungen an der Kalksandsteinwand, insgesamt 12 Prüfstände, ohne Verlustfaktor-Korrektur	39
Bild 4.4	Gemessene Schalldämmungen an der Kalksandsteinwand, insgesamt 12 Prüfstände, mit Verlustfaktor -Korrektur.....	39
Bild 4.5	Gemessene Schalldämmungen an der Kalksandsteinwand, insgesamt 19 Prüfstände, ohne Verlustfaktor-Korrektur	39
Bild 4.6	Gemessene Schalldämmungen an der Kalksandsteinwand, insgesamt 19 Prüfstände, mit Verlustfaktor-Korrektur.....	39
Bild 4.7	Kritische Differenzen für die unterschiedlichen Datenmengen	40
Bild 5.1	Empirische Verteilungsfunktionen für y , W_1/W_2 , W_2/W_1 sowie Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung für die Ergebnisse des erweiterten Kalksandsteinwand-Ringversuchs in der 50 Hz – Terz.....	46
Bild 5.2	Prüfgröße $\sqrt{n} L_n$ für den Test auf Normalverteilung für den erweiterten Kalksandsteinwand-Ringversuch	46
Bild 5.3	Verteilungsfunktion des Schalldämmmaßes bei 4 kHz.....	47
Bild 5.4	Auf Mittelwerte bezogene empirische Standardabweichungen für die Nachhallzeitmessung, berechnet aus den Vergleichsmessungen	51
Bild 5.5	Unterschiede der Absorptionskorrektur für verschiedene Mittelungsarten und Maximalwert dieser Abweichung.....	52
Bild 5.6	Unsicherheit der Absorptionskorrektur.....	53
Bild 5.7	Unsicherheit der Schalldruckpegeldifferenz aus den Vergleichsmessungen.....	54

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 107(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 107(112) of report of 2004-11-10

Bild 5.8	Unsicherheit der Vergleichsmessungen in den verschiedenen Jahren an der MPA Dortmund und Grenzkurve aus den PTB Vergleichsmessungen (Kap. 5.2 und 5.3)	55
Bild 5.9	Vergleichsstreuungen des Kalksandsteinwand-Ringversuchs, PTB-Ergebnisse, Ergebnisse der Prüfstellen und berechneter Messgeräteeinfluss	56
Bild 5.10	Einfallende Leistung im unendlichen Halbraum und in einem seitlich begrenzten Raum	57
Bild 5.11	Korrektur der einfallenden Schallleistung nach [We01], $l_1/l_2 = 1$ (quadratisch), $l_1/l_2 = 1,6$ (rechteckig)	58
Bild 5.12	Korrektur der transmittierten Schallleistung, Beispiel: $V = 50 \text{ m}^3$, $S = 83 \text{ m}^2$, $A = 4; 8; 16 \text{ m}^2$ (entspricht Nachhallzeiten von 2,0; 1,0 und 0,5 s)	60
Bild 5.13	Empirische Standardabweichung der mittleren Schalldruckpegeldifferenzen für verschiedene Objekte	61
Bild 5.14	Meteorologische Korrektur für die Schalldämmung nach [WB03], $m = -20$	62
Bild 5.15	Zusammenhang zwischen geographischer Höhe und Luftdruck berechnet nach der internationalen Standardatmosphäre (ISA) sowie Mittelwerte, Standardabweichungen und Maximal- und Minimalwerte einiger deutscher Wettermessstationen (Quelle: Internetseite des Deutschen Wetterdienstes)	64
Bild 5.16	Differenzen der Schalldämmung im jeweiligen Prüfstand zum Mittelwert über alle Prüfstände in Abhängigkeit von der Prüflingsfläche, Bereich tiefer Frequenzen, mittelschwere Wand aus [LM86]	67
Bild 5.17	Differenzen der Schalldämmung im jeweiligen Prüfstand zum Mittelwert über alle Prüfstände in Abhängigkeit von der Prüflingsfläche, Bereich tiefer Frequenzen, Kalksandsteinwand aus [Me00] zuzüglich PTB-interner Daten	67
Bild 5.18	Differenzen der Schalldämmung im jeweiligen Prüfstand zum Mittelwert über alle Prüfstände in Abhängigkeit vom Kantenlängenverhältnis, Bereich tiefer Frequenzen, mittelschwere Wand aus [LM86]	68
Bild 5.19	Differenzen der Schalldämmung im jeweiligen Prüfstand zum Mittelwert über alle Prüfstände in Abhängigkeit vom Kantenlängenverhältnis, Bereich tiefer Frequenzen, Kalksandsteinwand aus [Me00] zuzüglich PTB-interner Daten	68
Bild 5.20	Differenzen der Schalldämmung zwischen festem und elastischem Einbau im jeweils selben Prüfstand (grau) und Mittelwert dieser Differenzen (schwarz), ohne Korrektur der Körperschallnachhallzeit	70
Bild 5.21	Unterschiede im Gesamtverlustfaktor zwischen fester und elastischer Einspannung und zugehöriger Mittelwert (schwarz)	71
Bild 5.22	Differenzen der Schalldämmung zwischen festem und elastischem Einbau im jeweils selben Prüfstand (grau) und Mittelwert dieser Differenzen (schwarz), mit Korrektur der Körperschallnachhallzeit	72
Bild 5.23	Korrektur für die Maximalschalldämmung K_{\max} sowie zugehörige 68% und 95% - Vertrauensbereiche mit $s_r = 2 \text{ dB}$	74
Bild 5.24	Schalldämmung der Kalksandsteinwand nach [Me00]	75

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 108(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 108(112) of report of 2004-11-10

Bild 5.25 Differenz zwischen den an den drei Wandaufbauten gemessenen Schalldämmungen nach [Me00] und der mittleren Schalldämmung mit 95%-Vertrauensbereichen	76
Bild 5.26 Oktavgemittelte Bauteilstreuungen für die Kalksandsteinwand in der PTB und bei einer anderen Prüfstelle	77
Bild 5.27 Schalldämmung zweier Aufbauten der Kalksandsteinwand im gleichen Prüfstand nach [We03].....	78
Bild 5.28 Absolutbetrag der Schalldämmungsdifferenz zweier Wandaufbauten nach [We03] und 95%-Vertrauensbereich für diese Differenz.....	79
Bild 5.29 Mittlere Schalldämmungen aus Homogenitätstest an Fenstern und Doppelscheiben	80
Bild 5.30 Empirische Standardabweichungen aus Homogenitätstests an Fenstern und Doppelscheiben.....	80
Bild 5.31 Schalldämmungen der Objekte aus dem Homogenitätstest für [KO88].....	81
Bild 5.32 Empirische Standardabweichungen aus dem Homogenitätstest für die Ringversuchsobjekte nach [KO88].....	81
Bild 5.33 Vergleichsstandardabweichungen für die ein- und zweiseitig beplankte Gipskartonständerwand sowie aus PTB-internen Daten	83
Bild 5.34 Bauteilstreuungen für zweiseitig beplankte Gipskartonständerwände.....	84
Bild 5.35 Wiederholstandardabweichungen aus den Ringversuchen (grau), aus ISO 140-2 sowie konservative Abschätzung nach Kapitel 5.2 und 5.3	86
Bild 5.36 Vergleichsstandardabweichungen aus den Ringversuchen (grau) und aus ISO 140-2	86
Bild 6.1 Unsicherheit u des Mittelwertes der Schalldämmung aus n Messungen, $\sigma_R = 2$ dB, $\sigma_r = 1$ dB und $\sigma_{\text{repro}} = 1$ dB (gute Reproduzierbarkeit der Messobjekte)	90
Bild 6.2 Unsicherheit u des Mittelwertes der Schalldämmung aus n Messungen, $\sigma_R = 2$ dB, $\sigma_r = 1$ dB und $\sigma_{\text{repro}} = 3$ dB (geringe Reproduzierbarkeit der Messobjekte).....	90
Bild 6.3 Empirische Standardabweichung der Mittelwerte aus n Wiederholungsmessungen für $s_r = 1$ dB	92
Bild 6.4 95% (grau) und 80% (schwarz) -Vertrauensbereiche für eine angenommene empirische Reproduktionsstandardabweichung von $s_{\text{repro}} = 1$ dB in Abhängigkeit von der Zahl der Prüfobjekte m	93
Bild 6.5 Konstante Reproduktions-Standardabweichung	94
Bild 6.6 Ansteigende Reproduktions-Standardabweichung	94
Bild 6.7 Schematische Darstellung der Fortpflanzung der Unsicherheiten	99
Bild 6.8 Nachmessung eines deklarierten Werts.....	101

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 109(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 109(112) of report of 2004-11-10

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Stichprobe für die Beispielrechnung.....	16
Tabelle 2.2	verschiedene Intervalle für den Ringversuch, $\alpha = 0,05$,.....	17
Tabelle 2.3	Überprüfung der hinzugefügten Messreihe.....	18
Tabelle 2.4	Kolmogorow-Smirnow-Test für das Beispiel ($f = 250$ Hz)	19
Tabelle 2.5	Prüfgröße des Kolmogorow-Smirnow-Tests für den Kalksandstein-Ringversuch	19
Tabelle 2.6	Korrelationskoeffizient für die Ergebnisse des Ringversuchs, graue Markierungen zeigen eine Überschreitung des für Unabhängigkeit höchstzulässigen Wertes von $r_{xy} = 0,58$ an	20
Tabelle 2.7	Erweiterungsfaktoren k für verschiedene effektive Freiheitsgrade bei einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95%.....	23
Tabelle 3.1	Faktoren bei n unabhängigen PTB-Referenzmessungen und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%	29
Tabelle 3.2	Korrelationskoeffizient für die Ergebnisse der PTB-Vergleichsmessungen 2000, Luftschallergebnisse, graue Markierungen zeigen eine Überschreitung des für Unabhängigkeit höchstzulässigen Wertes von $r_{xy} = 0,56$ an	29
Tabelle 3.3	Korrelationskoeffizient für die Ergebnisse der MPA-Vergleichsmessungen 2000, Luftschallergebnisse, graue Markierungen zeigen eine Überschreitung des für Unabhängigkeit höchstzulässigen Wertes von $r_{xy} = 0,53$ an	30
Tabelle 3.4	Korrelationskoeffizient für die Ergebnisse der PTB-Vergleichsmessungen 2000, Trittschallergebnisse, graue Markierungen zeigen eine Überschreitung des für Unabhängigkeit höchstzulässigen Wertes von $r_{xy} = 0,56$ an	31
Tabelle 3.5	Korrelationskoeffizient für die Ergebnisse der MPA-Vergleichsmessungen 2000, Trittschallergebnisse, graue Markierungen zeigen eine Überschreitung des für Unabhängigkeit höchstzulässigen Wertes von $r_{xy} = 0,53$ an	32
Tabelle 4.1	Faktor m für unterschiedliche Stichprobenumfänge n	35
Tabelle 4.2	Obere Werte χ_{α}^2 der χ^2 -Verteilung, $\alpha = 5\%$ (nach BRONSTEIN [Br91], S. 21)	36
Tabelle 5.1	Einbezogene Daten aus den Vergleichsmessungen an der PTB	50
Tabelle 5.2	Unsicherheitsbudget für die meteorologische Korrektur	65
Tabelle 5.3	Unsicherheiten für die meteorologische Korrektur in dB	65
Tabelle 5.4	Einbezogene Ringversuchsergebnisse für Luftschalldämmung	85
Tabelle 6.1	Erforderliche Zahl von Messungen zur Einhaltung vorgegebener Unsicherheiten, $\sigma_R = 2$ dB, $\sigma_r = 1$ dB	89
Tabelle 6.2	Unsicherheitsbudget für das Prognosebeispiel	98

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 110(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 110(112) of report of 2004-11-10

Anhang: Vorschlag zum Umgang mit den Unsicherheiten bei der Erstellung eines Bauteilkatalogs und bei Prognosen

A1 Festlegung von Kennwerten für einen Bauteilkatalog

- Schritt 1: Einschätzung der Reproduzierbarkeit des Bauteils

gute Reproduzierbarkeit ? dann: $\sigma_{\text{repro}} = 1,0 \text{ dB}$	geringe Reproduzierbarkeit ? dann: $\sigma_{\text{repro}} = 3,0 \text{ dB}$
---	--

- Schritt 2: Vorgabe einer angestrebten Unsicherheit $u(\bar{y})$ für den Mittelwert \bar{y} aus mehreren Schalldämmungsmessungen (der als Kennwert in den Bauteilkatalog aufgenommen werden soll)

⇒ im allgemeinen kann die angestrebte Unsicherheit nur durch Messungen in verschiedenen Laboratorien erreicht werden

⇒ Bei je einer Messung in n verschiedenen Prüfständen ergibt sich die erforderliche Zahl n aus nachstehender Tabelle

$u(\bar{y})$	gute Reproduzierbarkeit	geringe Reproduzierbarkeit
1,0 dB	5	13
1,5 dB	3	6
2,0 dB	2	4
3,0 dB	1	2

- Im Bauteilkatalog erscheint:

$$\bar{y}, u(\bar{y}), \sigma_{\text{repro}}$$

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 111(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 111(112) of report of 2004-11-10

A2 Eingangsgrößen für Prognose bestimmen

Für alle m beteiligten Bauteile sind die nachfolgenden Schritte durchzuführen:

- Werte aus Bauteilkatalog auslesen

$$\bar{y}, u(\bar{y}), \sigma_{\text{repro}}$$

- Auf Einzelbauteil umrechnen

$$y_{\text{einzel}} = \bar{y}; \quad u(y_{\text{einzel}}) = \sqrt{u^2(\bar{y}) + \sigma_{\text{repro}}^2}$$

- Auf konkrete Bausituation umrechnen

$$y_{\text{Bau}} = y_{\text{einzel}} - K_{\text{Bau}}; \quad u(y_{\text{Bau}}) = \sqrt{u^2(y_{\text{einzel}}) + u^2(K_{\text{Bau}})}$$

- Als Bauteil-Eingangsgrößen für die Prognose (z.B. nach EN 12354-1) sind dann einzusetzen

$$y_{\text{Bau}}; \quad u(y_{\text{Bau}})$$

A3 Durchführung der Prognoserechnung

- Bestimmung des Prognosewerts aus den Eingangsgrößen, z.B. nach EN 12354

$$y_{\text{Prog}} = f(y_{\text{Bau},1}, \dots, y_{\text{Bau},m})$$

- Berechnung der zugehörigen Unsicherheit

- Fall 1: ein Weg dominant (Index i)

$$u(y_{\text{Prog}}) = u(y_{\text{Bau},i})$$

- Fall 2: alle m Wege tragen gleich viel zur Schallübertragung bei und alle $u(y_{\text{Bau},i})$ sind gleich groß

$$u(y_{\text{Prog}}) = \frac{u(y_{\text{Bau},i})}{\sqrt{m}}$$

- Allgemein: Unsicherheit des Prognosewerts liegt zwischen Fall 1 und Fall 2

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Seite 112(112) zum Bericht vom 2004-11-10

Page 112(112) of report of 2004-11-10

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