

**Berechnung der
Prognoseunsicherheit
nach DIN 4109**

T 3199

T 3199

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7837-0

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Braunschweig und Berlin



Bericht

Report

Volker Wittstock

Werner Scholl

Berechnung der Prognoseunsicherheit nach DIN 4109

Kurztitel:

DIN 4109: Prognoseunsicherheit

gefördert vom:

Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)

Braunschweig, 2008-08-08

Inhalt

1. EINLEITUNG	3
2. GRUNDLAGEN	4
2.1. BERECHNUNG DER SCHALLDÄMMUNG	4
2.1.1. <i>Massivbau</i>	4
2.1.2. <i>Leichtbau</i>	5
2.2. ERMITTLUNG DER UNSICHERHEITEN FÜR PROGNOSEN IM MASSIVBAU	6
2.2.1. <i>Annahme 13 unkorrelierter Wege</i>	6
2.2.2. <i>Annahme 31 unabhängiger Variabler</i>	7
2.3. ERMITTLUNG DER UNSICHERHEITEN FÜR PROGNOSEN IM LEICHTBAU	8
3. UMSETZUNG IN EIN RECHENBLATT	9
4. ÜBERPRÜFUNG DES RECHENBLATTS	12
4.1 MASSIVBAU	12
4.2 LEICHTBAU	15
5. PARAMETERSTUDIEN	17
6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	20
DANKSAGUNG	21
LITERATUR.....	21

1. Einleitung

Gemäß Anhang I der Bauproduktenrichtlinie [Ri89] gehört zu den sechs wesentlichen Anforderungen, die ein Bauwerk erfüllen muss, auch der Schallschutz. Üblicherweise wird hierzu ein rechnerischer Nachweis geführt, bei dem die Gebäudeeigenschaften aus den Eigenschaften der verwendeten Bauprodukte prognostiziert werden. Dazu wurde ein europäisch harmonisiertes Berechnungsverfahren entwickelt [DIN EN 12354-1], das nach Überarbeitung und Einführung der deutschen Schallschutz-Norm [DIN 4109] auch in Deutschland Anwendung finden wird.

Neben dem Prognosewert selbst spielt jedoch auch seine Unsicherheit eine wesentliche Rolle bei der Planung von Gebäuden. Ist sie bekannt, kann der Planer durch Berücksichtigung eines geeigneten Toleranzbereichs eine statistische Sicherheit wählen, mit der ein Anforderungswert oder ein zivilrechtlich vereinbarter Wert erfüllt wird.

Leider werden die Unsicherheiten in der bauakustischen Prognose derzeit nur unzureichend berücksichtigt. In der aktuellen [DIN 4109] werden die eingehenden Produkteigenschaften um das Vorhaltemaß von 2 dB vermindert, bevor die Gesamt-Schallübertragung berechnet wird. Das Vorhaltemaß deckt dabei u.a. auch die Unsicherheiten ab. In der [DIN EN 12354-1] werden Unsicherheiten dagegen überhaupt nicht berücksichtigt. Bei der aktuellen Überarbeitung der [DIN 4109] wird nun erstmals eine transparente Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Bauakustik angestrebt. Dies umfasst die komplette Kette von der messtechnischen Charakterisierung der Bauprodukte im Prüfstand über die Produktstreuung bis hin zur Prognose und deren messtechnische Überprüfung im ausgeführten Gebäude. Erst damit wird klar, welcher Akteur welche Unsicherheiten beiträgt und wie sich diese im ausgeführten Gebäude widerspiegeln.

In der Vergangenheit wurden zu einzelnen Unsicherheitsaspekten umfangreiche Untersuchungen angestellt (z.B. [Wit04], [Wit07]). Wie sich die Unsicherheiten der Produkteigenschaften in den Unsicherheiten der prognostizierten Gebäudeeigenschaften widerspiegeln, ist jedoch noch offen. Diesem Thema ist die vorliegende Arbeit gewidmet.

Ausgangspunkt für die Untersuchungen ist die Zusammenstellung der für die Prognose verwendeten Gleichungen. Darauf aufbauend wird dann nach dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ [GUM] die Unsicherheit des Prognoseergebnisses berechnet. Anschließend erfolgt die Umsetzung in ein Tabellenkalkulationsprogramm, das anhand von Berechnungsbeispielen überprüft wird. Die Tabellenkalkulation wird dabei so umfassend kommentiert und dokumentiert, dass das Berechnungsblatt auch von anderen Anwendern verwendet werden kann.

2. Grundlagen

2.1. Berechnung der Schalldämmung

2.1.1. Massivbau

Das resultierende Schalldämm-Maß zwischen zwei Räumen ergibt sich nach [DIN EN 12354-1] aus

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

mit

- $R_{Dd,w}$ bewertetes Schalldämm-Maß für die Direktübertragung [dB]
- $R_{Ff,w}$ bewertetes Schalldämm-Maß für den Übertragungsweg Ff [dB]
- $R_{Df,w}$ bewertetes Schalldämm-Maß für den Übertragungsweg Df [dB]
- $R_{Fd,w}$ bewertetes Schalldämm-Maß für den Übertragungsweg Fd [dB]
- n Anzahl der flankierenden Bauteile in einem Raum.

Die Dämmung des direkten Weges berechnet sich aus

$$R_{Dd,w} = (R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w}) \quad (2)$$

mit

- $R_{s,w}$ bewertetes Schalldämm-Maß des trennenden Bauteils [dB]
- $\Delta R_{Dd,w}$ bewertete Verbesserung des Gesamt-Schalldämm-Maßes durch zusätzliche Vorsatzschalen auf der Sende- und/oder Empfangsseite des trennenden Bauteils [dB].

Die Dämmung der Flankenwege ist

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \text{ dB} \quad (3)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \text{ dB} \quad (4)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \text{ dB} \quad (5)$$

mit

- $R_{F,w}$ bewertetes Schalldämm-Maß des flankierenden Bauteils F im Senderaum [dB]
- $R_{f,w}$ bewertetes Schalldämm-Maß des flankierenden Bauteils f im Empfangsraum [dB]
- $\Delta R_{Ff,w}$ gesamtes bewertetes Luftschallverbesserungsmaß durch eine zusätzliche Vorsatzschale auf der Sende- und/oder Empfangsseite des flankierenden Bauteils [dB]

- $\Delta R_{F_d,w}$ gesamtes bewertetes Luftschallverbesserungsmaß durch eine zusätzliche Vorsatzschale am flankierenden Bauteil auf der Sendeseite und/oder des trennenden Bauteils auf der Empfangsseite [dB]
- $\Delta R_{D_f,w}$ gesamtes bewertetes Luftschallverbesserungsmaß durch eine zusätzliche Vorsatzschale am trennenden Bauteil auf der Sendeseite und/oder am flankierenden Bauteil auf der Empfangsseite [dB]
- K_{Ff} Stoßstellendämm-Maß für den Übertragungsweg Ff [dB]
- K_{Fd} Stoßstellendämm-Maß für den Übertragungsweg Fd [dB]
- K_{Df} Stoßstellendämm-Maß für den Übertragungsweg Df [dB]
- S_s Fläche des trennenden Bauteils [m²]
- l_f gemeinsame Kopplungslänge der Verbindungsstelle zwischen dem trennenden Bauteil und den flankierenden Bauteilen F und f [m]
- l_0 Bezugs-Kopplungslänge; $l_0 = 1$ m.

Die Verbesserungsmaße ergeben sich aus der Summe der Verbesserungsmaße vor beiden Wänden, wobei das niedrigere Verbesserungsmaß nur zur Hälfte angerechnet wird:

$$\begin{aligned} \Delta R_{ij} &= \Delta R_i + \frac{\Delta R_j}{2} \quad \text{für } \Delta R_i > \Delta R_j \\ \Delta R_{ij} &= \Delta R_j + \frac{\Delta R_i}{2} \quad \text{für } \Delta R_j > \Delta R_i \end{aligned} \quad (6)$$

2.1.2. Leichtbau

Für den Leichtbau wird das Rechenmodell nach [Me04] verwendet. Dabei werden nur die Ff-Flankenwege berücksichtigt. Die Fd- und Df-Wege erwiesen sich dort in der Summe als unbedeutend für die Gesamtübertragung. Damit ergibt sich das bewertete Bauschalldämm-Maß zu

$$R'_w = -10 \lg \left[10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Ff,w}/10} \right] \text{dB} . \quad (7)$$

Die bewerteten Schalldämm-Maße für die Flankenwege können aus den bewerteten Flankenschallpegeldifferenzen $D_{n,f,w}$ berechnet werden

$$R_{Ff,w} = D_{n,f,w} + 10 \lg \frac{l_{lab} S_s}{l_f A_0} \text{dB} \quad (8)$$

mit

- l_{lab} Bezugslänge, für Wände: $l_{lab} = 3$ m; für Decken $l_{lab} = 4,5$ m
- A_0 Bezugsfläche; $A_0 = 10$ m².

2.2. Ermittlung der Unsicherheiten für Prognosen im Massivbau

2.2.1. Annahme 13 unkorrelierter Wege

Bei einer ersten Betrachtung erscheinen in Gl. (1) 13 Eingangsgrößen:

$$R'_w = -10 \lg \left[\sum_{i=1}^{13} 10^{-R_{i,w}/10} \right] \text{dB} \quad (9)$$

Werden diese als unkorreliert betrachtet, so folgt für die Unsicherheit des bewerteten Bauschalldämm-Maßes:

$$u(R'_w) = \sqrt{\sum_{i=1}^{13} \left[\frac{\partial R'_w}{\partial R_{i,w}} u(R_{i,w}) \right]^2} + u_{\text{prog}}^2 \quad (10)$$

mit der Unsicherheit des i -ten bewerteten Schalldämm-Maßes $u(R_{i,w})$. Der hier zusätzlich aufgeführte Unsicherheitsanteil u_{prog} umfasst die Unsicherheit des Prognoseverfahrens, die auch die unzureichende Abbildung der realen Bausituation durch das Prognosemodell beinhaltet. Mit der partiellen Ableitung

$$\frac{\partial R'_w}{\partial R_{i,w}} = \frac{10^{-R_{i,w}/10}}{\sum_{j=1}^{13} 10^{-R_{j,w}/10}} \quad (11)$$

folgt die Unsicherheit des bewerteten Bauschalldämm-Maßes:

$$u(R'_w) = \sqrt{\sum_{i=1}^{13} \left[\frac{10^{-R_{i,w}/10}}{\sum_{j=1}^{13} 10^{-R_{j,w}/10}} u(R_{i,w}) \right]^2} + u_{\text{prog}}^2 \quad (12)$$

Als nächstes gilt es, die Unsicherheit der 13 eingehenden bewerteten Schalldämm-Maße zu ermitteln. Dabei wird wiederum von einer unkorrelierten Überlagerung der Unsicherheiten der Eingangsgrößen ausgegangen.

Aus Gl. (2) folgt damit die Unsicherheit des Schalldämm-Maßes für die direkte Übertragung:

$$u(R_{\text{Dd},w}) = \sqrt{u^2(R_{\text{s},w}) + u^2(\Delta R_{\text{Dd},w})} \quad (13)$$

und aus Gln. (3) – (5) ergeben sich die Unsicherheiten für die 12 Flankenwege:

$$u(R_{\text{Ff},w}) = \sqrt{\frac{u^2(R_{\text{F},w}) + u^2(R_{\text{f},w})}{4} + u^2(\Delta R_{\text{Ff},w}) + u^2(K_{\text{Ff}})} \quad (14)$$

$$u(R_{\text{Fd},w}) = \sqrt{\frac{u^2(R_{\text{F},w}) + u^2(R_{\text{s},w})}{4} + u^2(\Delta R_{\text{Fd},w}) + u^2(K_{\text{Fd}})} \quad (15)$$

$$u(R_{Df,w}) = \sqrt{\frac{u^2(R_{s,w}) + u^2(R_{f,w})}{4} + u^2(\Delta R_{Df,w}) + u^2(K_{Df})} . \quad (16)$$

2.2.2. Annahme 31 unabhängiger Variabler

Bei genauerer Analyse der Gln. (13) – (16) wird deutlich, dass es hier zu erheblichen Korrelationen zwischen den 13 Schallausbreitungspfaden kommt. So geht z.B. die Unsicherheit der Schalldämmung des Trennbauteils $u(R_{s,w})$ sowohl in die Unsicherheit der Schalldämmung für den direkten Weg (Gl.(13)), als auch in die Unsicherheit der Schalldämmung für die 8 Fd- und Df-Wege ein (Gln. (15) und (16)). Damit ist die unkorrelierte Überlagerung der Unsicherheiten auf den 13 Wegen nach Gl. (12) nicht möglich.

Vielmehr müssen die Gln. (2) – (6) komplett in Gl. (1) eingesetzt werden. Die Unsicherheit des bewerteten Bauschalldämm-Maßes ergibt sich dann aus der Unsicherheit von insgesamt 31 Eingangsgrößen. Dies sind:

- o die Schalldämmung des direkten Bauteils und der 8 Flankenbauteile,
- o die 12 Stoßstellendämm-Maße und
- o die Verbesserungsmaße der 10 insgesamt möglichen Vorsatzschalen.

Diese Größen werden nun als unkorrelierte Eingangsgrößen betrachtet. Damit ergibt sich die Unsicherheit des bewerteten Bauschalldämm-Maßes zu

$$u(R'_w) = \sqrt{\sum_{i=1}^{31} \left[\frac{\partial R'_w}{\partial X_i} u(X_i) \right]^2} + u_{\text{prog}}^2, \quad (17)$$

wobei X_i allgemein für die Eingangsgrößen steht und $u(X_i)$ für die Unsicherheit der i -ten Eingangsgröße.

Der Sensitivitätskoeffizient für das Trennbauteil ergibt sich aus der partiellen Ableitung zu

$$\frac{\partial R'_w}{\partial R_{s,w}} = \frac{10^{-R_{Dd}/10} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 10^{-R_{id}/10} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 10^{-R_{Di}/10}}{\sum_{j=1}^{13} 10^{-R_j/10}} . \quad (18)$$

Für die 12 Stoßstellendämm-Maße ergibt sich ein Sensitivitätskoeffizient von

$$\frac{\partial R'_w}{\partial K_{ij}} = \frac{10^{-R_{ij}/10}}{\sum_{j=1}^{13} 10^{-R_j/10}} . \quad (19)$$

Die Sensitivitätskoeffizienten für die Schalldämmung der 4 Sendeflanken sind

$$\frac{\partial R'_w}{\partial R_i} = \frac{\frac{1}{2} (10^{-R_{ii}/10} + 10^{-R_{id}/10})}{\sum_{j=1}^{13} 10^{-R_j/10}} \quad (20)$$

und für die 4 Empfangsflanken

$$\frac{\partial R'_w}{\partial R_i} = \frac{\frac{1}{2} (10^{-R_{ii}/10} + 10^{-R_{Di}/10})}{\sum_{j=1}^{13} 10^{-R_j/10}} \quad (21)$$

Bei den Vorsatzschalen ergibt sich als Sensitivitätskoeffizient

$$\frac{\partial R'_w}{\partial \Delta R_i} = \frac{10^{-R_i/10}}{\sum_{j=1}^{13} 10^{-R_j/10}} \quad (22)$$

Bei zwei Vorsatzschalen im Weg i , ist für die Vorsatzschale mit dem geringeren Verbesserungsmaß

$$\frac{\partial R'_w}{\partial \Delta R_j} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 10^{-R_i/10}}{\sum_{j=1}^{13} 10^{-R_j/10}} \quad (23)$$

einzusetzen.

Gln. (17) – (23) ermöglichen nun eine Berechnung der Unsicherheit des bewerteten Bauschalldämm-Maßes auf der Grundlage der Unsicherheiten der Eingangsgrößen.

2.3. Ermittlung der Unsicherheiten für Prognosen im Leichtbau

Im Gegensatz zum Massivbau ergeben sich für Prognosen im Leichtbau nach Gl. (7) nur 5 Eingangsgrößen:

$$R'_w = -10 \lg \left[\sum_{i=1}^5 10^{-R_{i,w}/10} \right] \text{dB} \quad (24)$$

Zwischen diesen Eingangsgrößen bestehen nach Gl. (8) auch keinerlei gegenseitige Abhängigkeiten, so dass sich die Unsicherheit unter Vernachlässigung der Geometrie-Unsicherheiten zu

$$u(R'_w) = \sqrt{\sum_{i=1}^5 \left[\frac{\partial R'_w}{\partial R_{i,w}} u(R_{i,w}) \right]^2} + u_{\text{prog}}^2 \quad (25)$$

ergibt. Die Sensitivitätskoeffizienten sind hierbei

$$\frac{\partial R'_w}{\partial R_{i,w}} = \frac{10^{-R_{i,w}/10}}{\sum_{j=1}^5 10^{-R_{j,w}/10}} \quad (26)$$

3. Umsetzung in ein Rechenblatt

Die in Kapitel 2 aufgeführten Gleichungen für den Massivbau wurden in ein Excel-Rechenblatt umgesetzt (Bild 1). Jedem eingegebenen Schalldämm-Wert kann dabei auch eine Unsicherheit zugeordnet werden, die in die weiteren Berechnungen einbezogen wird. Die Unsicherheit des Prognoseverfahrens, die auch die unzureichende Abbildung der realen Bausituation durch das Prognosemodell beinhaltet, wurde generell mit

$$u_{\text{Prog}} = 0,8 \text{ dB} \quad (27)$$

abgeschätzt [Wit07].

Für das Beispiel aus [DIN EN 12354-1] ergibt sich das bewertete Bauschalldämm-Maß zu 52,2 dB (Bild 1). Die Unsicherheit der Eingangsgrößen wurde mit jeweils 2,0 dB abgeschätzt. Dieser Wert ergibt sich aus der Vergleichs-Standardabweichung für die Ermittlung von bewerteten Schalldämm-Maßen in Prüfständen von 1,2 dB zuzüglich der Standardabweichung für die Produktstreuung von ca. 1,0 dB [Wit07]. Letzterer Wert muss zwei mal berücksichtigt werden, da ein Exemplar des Produkts im Prüfstand und ein anderes Exemplar im Gebäude verwendet wird.

Mit diesen Eingaben ergibt sich für das Prognoseergebnis eine Unsicherheit von 1,5 dB. Die Unsicherheit des Ergebnisses ist geringer als die eingehenden Unsicherheiten, da es sich bei der Prognosegleichung um einen gewichteten Mittelwert handelt, bei dem sich die einzelnen Unsicherheitsbeiträge durch Mittelung kompensieren können.

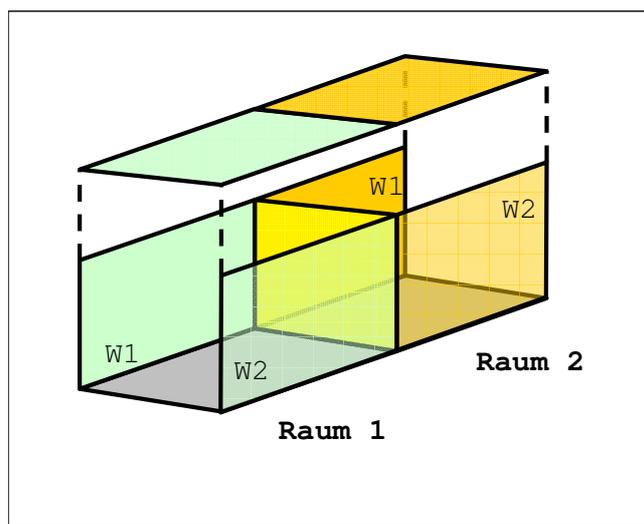
Schalldämm-Prognose nach EN 12354-1
Unsicherheitsberechnung

PTB

Objekt: Beispiel aus EN 12354-1, S. 51

Eingaben:

	Bauteil	Beschreibung	Rw, ΔRw, kij [dB] [m]	u(Rw,ΔRw,kij) [dB]
Raum 1	Wand 1		42	2
	Wand 1 Vorsatzschale			
	Wand 2		33	2
	Wand 2 Vorsatzschale			
	Boden		49	2
	Boden Auflage			
	Decke		46	2
	Decke Vorsatzschale			
Trennbauteil	Vorsatzschale Raum 1			
	Wand		57	2
	Vorsatzschale Raum 2			
	Höhe		2.55	
	Breite		4.5	
Stoßstellen	Wand1 (R1) - Wand1 (R2)		12.6	2
	Wand1 (R1) - Trennwand		6.7	2
	Trennwand - Wand1 (R2)		6.7	2
	Wand2 (R1) - Wand2 (R2)		33.5	2
	Wand2 (R1) - Trennwand		15.7	2
	Trennwand - Wand2 (R2)		15.7	2
	Decke (R1) - Decke (R2)		14.4	2
	Decke (R1) - Trennwand		9.2	2
	Trennwand - Decke (R2)		9.2	2
	Boden (R1) - Boden (R2)		12.4	2
	Boden (R1) - Trennwand		8.9	2
	Trennwand - Boden (R2)		8.9	2
Raum 2	Wand 1		42	2
	Wand 1 Vorsatzschale			
	Wand 2		33	2
	Wand 2 Vorsatzschale			
	Boden		49	2
	Boden Auflage			
	Decke		46	2
	Decke Vorsatzschale			
			R'w /dB =	52.16
			u-prog /dB =	1.47



Diese Software wurde in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt entwickelt. Die Software wird unentgeltlich, wie sie ist, zur Verfügung gestellt. Die PTB übernimmt keine Haftung, egal aus welchem Rechtsgrund, für die Nutzung der Software durch Andere und garantiert weder ausdrücklich noch konkludent für die Qualität, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Tauglichkeit, oder andere Merkmale der Software. Soweit gesetzlich zulässig lehnt die PTB jede Haftung für direkte Schäden, indirekte Schäden oder für Folgeschäden ab, die durch die Nutzung der Software entstehen.

Bild 1 Das Excel-Rechenblatt bei Anwendung im Massivbau

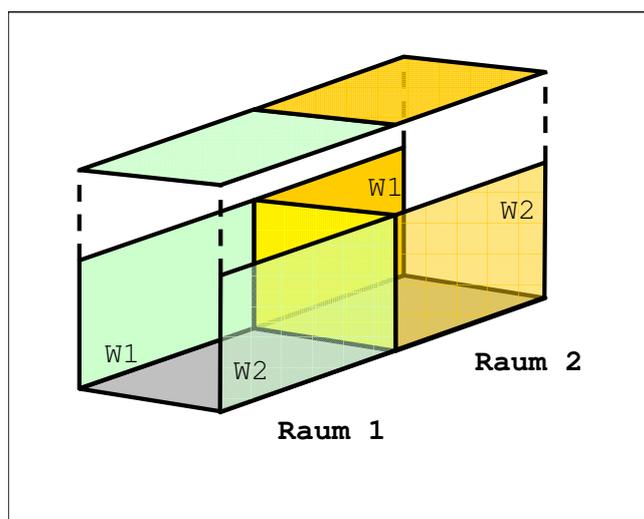
Schalldämm-Prognose nach EN 12354-1
Unsicherheitsberechnung

PTB

Objekt: Flensburg_1

Eingaben:

	Bauteil	Beschreibung	Rw, ΔRw, kij [dB] [m]	u(Rw,ΔRw,kij) [dB]
Raum 1	Wand 1		0	0
	Wand 1 Vorsatzschale			
	Wand 2		0	0
	Wand 2 Vorsatzschale			
	Boden		0	0
	Boden Auflage			
	Decke		0	0
	Decke Vorsatzschale			
Trennbauteil	Vorsatzschale Raum 1			
	Wand		66	2
	Vorsatzschale Raum 2			
	Höhe		2.6	
	Breite		3.65	
Stoßstellen	Wand1 (R1) - Wand1 (R2)		69.8	3
	Wand1 (R1) - Trennwand		100	0
	Trennwand - Wand1 (R2)		100	0
	Wand2 (R1) - Wand2 (R2)		62.8	3
	Wand2 (R1) - Trennwand		100	0
	Trennwand - Wand2 (R2)		100	0
	Decke (R1) - Decke (R2)		61.5	3
	Decke (R1) - Trennwand		100	0
	Trennwand - Decke (R2)		100	0
	Boden (R1) - Boden (R2)		63.5	3
	Boden (R1) - Trennwand		100	0
Trennwand - Boden (R2)		100	0	
Raum 2	Wand 1		0	0
	Wand 1 Vorsatzschale			
	Wand 2		0	0
	Wand 2 Vorsatzschale			
	Boden		0	0
	Boden Auflage			
	Decke		0	0
	Decke Vorsatzschale			
			R'w /dB =	60.62
			u-prog /dB =	1.57



Diese Software wurde in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt entwickelt. Die Software wird unentgeltlich, wie sie ist, zur Verfügung gestellt. Die PTB übernimmt keine Haftung, egal aus welchem Rechtsgrund, für die Nutzung der Software durch Andere und garantiert weder ausdrücklich noch konkludent für die Qualität, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Tauglichkeit, oder andere Merkmale der Software. Soweit gesetzlich zulässig lehnt die PTB jede Haftung für direkte Schäden, indirekte Schäden oder für Folgeschäden ab, die durch die Nutzung der Software entstehen.

Bild 2 Das Excel-Rechenblatt bei Anwendung im Leichtbau

Um das gleiche Rechenblatt auch im Leichtbau anwenden zu können, kann eine spezielle Eingabe verwendet werden (Bild 2). Die Dämmung des Trennbauteils wird normal eingegeben. Die Dämmung der vier Flankenwege wird jedoch in vier Stoßstellendämm-Maßen konzentriert, die sich aus der Flankenschallpegeldifferenz und einigen geometrischen Größen berechnet:

$$K_{Ff} = D_{n,f,w} + 10 \lg \frac{l_{lab} l_0}{A_0} \text{ dB} . \quad (28)$$

Werden dann die Schalldämmungen der Flankenbauteile zu 0 gesetzt und die anderen Stoßstellendämm-Maße hinreichend groß gewählt (z.B. 100 dB), so fließt die gesamte Schallenergie nur noch über die fünf nach Gl. (7) maßgeblichen Wege.

Auf diese Weise wurde in (Bild 2) ein Beispiel aus [SB04] nachgerechnet. Das Ergebnis von 60,6 dB stimmt mit dem damals erzielten Ergebnis überein. Die Unsicherheit liegt hier bei 1,6 dB, wenn die Unsicherheit des Trennbauteils mit 2,0 dB und die der Flankenschallpegeldifferenzen bzw. der Stoßstellendämm-Maße mit 3,0 dB angesetzt werden. Letzterer Wert ergibt sich dabei aus Gl. (14), da die Flankenschallpegeldifferenz mit dem Flankenschalldämm-Maß nur über geometrische Größen verknüpft ist und somit die selbe Unsicherheit hat. Wird darüber hinaus angenommen, dass jede Schalldämmung und auch das Stoßstellendämm-Maß eine Unsicherheit von 2,0 dB aufweisen und dass keine Vorsatzschale vorhanden ist, so ergibt sich die Unsicherheit für die Flankenschallpegeldifferenz zu 3,0 dB. Dieser Wert wurde in der Berechnungstabelle dem Stoßstellendämm-Maß als summarische Unsicherheit für den gesamten Übertragungsweg zugewiesen.

4. Überprüfung des Rechenblatts

4.1 Massivbau

Zur Absicherung des Rechenblatts werden die mit ihm erzielten Ergebnisse mit anderen unabhängigen Prognoseergebnissen verglichen. Für den Massivbau wird hierzu eine Datenmenge herangezogen, die aus einer PTB-internen normungsbegleitenden Forschungsarbeit aus den 90-er Jahren stammt. Sie besteht aus insgesamt 24 in ausgeführten Gebäuden gemessenen Schalldämmungen, die von Güteprüfstellen zur Verfügung gestellt wurden. Die zugehörigen Bausituationen sind gut dokumentiert, so dass Prognoserechnungen nach [DIN EN 12354-1] durchgeführt werden konnten. Außerdem wurde in den Vergleich das Beispiel aus [DIN EN 12354-1], S. 51 einbezogen, auch in der Variante mit zusätzlichem Estrich.

Mit den damals erzielten Prognoseergebnissen wurden nun die Ergebnisse des neu erstellten Excel-Rechenblatts verglichen (Bild 3). Die Ergebnisse stimmen insgesamt sehr gut überein. Die größten auftretenden Abweichungen liegen bei 0,6 dB. Die mittlere Abweichung beträgt 0,05 dB. Es besteht somit keine Systematik in der Abweichung. Die Standardabweichung der Differenzen zwischen beiden Prognoseergebnissen liegt bei 0,26 dB. Damit können die Ergebnisse als weitestgehend identisch angesehen werden.

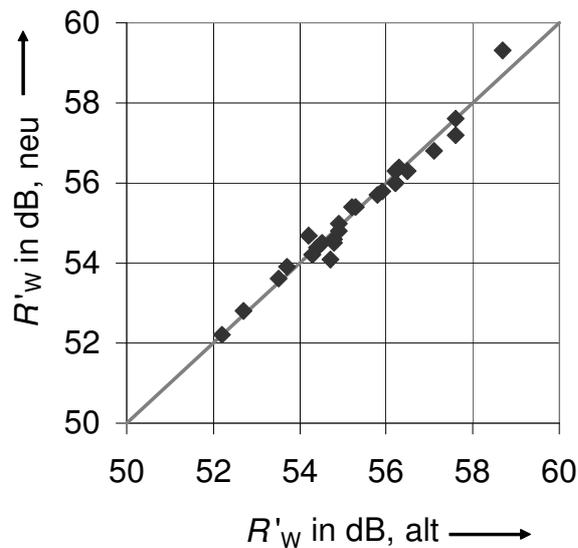


Bild 3 Vergleich von Prognoseergebnissen nach den alten PTB-Untersuchungen mit den Ergebnissen aus dem neuen Excel-Rechenblatt

Interessant ist nun, wie groß die Unsicherheiten der prognostizierten Schalldämmungen sind. Wird für die Unsicherheit der Eingangsgrößen generell 2,0 dB eingesetzt (vgl. Kapitel 3), so ergeben sich Unsicherheiten zwischen 1,5 und 2,1 dB (Bild 4), wenn die korrekten Gleichungen (17) – (23) verwendet werden. Werden dagegen die Korrelationen vernachlässigt (Gln. (9) - (16)), so ergeben sich Unsicherheiten, die 0,2 – 0,6 dB kleiner sind. Die vereinfachte Berechnung aus der unkorrelierten Überlagerung der 13 Einzelwege ist somit nicht zulässig.

Die Unsicherheit des Prognosewerts bewegt sich in der Größenordnung der Unsicherheiten der Eingabewerte. Eine nennenswerte Kompensation durch unkorrelierte Überlagerung mehrerer Schallausbreitungswege findet demnach nur begrenzt statt. Man muss jedoch berücksichtigen, dass die in Bild 4 gezeigten Unsicherheiten der Prognosewerte einen zusätzlichen pauschalen Anteil von 0,8 dB beinhalten, der die Unsicherheit des Prognoseverfahrens und die Unsicherheiten durch unvollständige Kenntnis der Bausituation abdeckt.

In den vorliegenden Ergebnissen ist die leichte Tendenz zu erkennen, dass höhere prognostizierte Schalldämmungen auch mit größeren Unsicherheiten behaftet sind (Bild 4). Die Datenbasis ist jedoch zu klein, um dies als generellen Trend festzustellen.

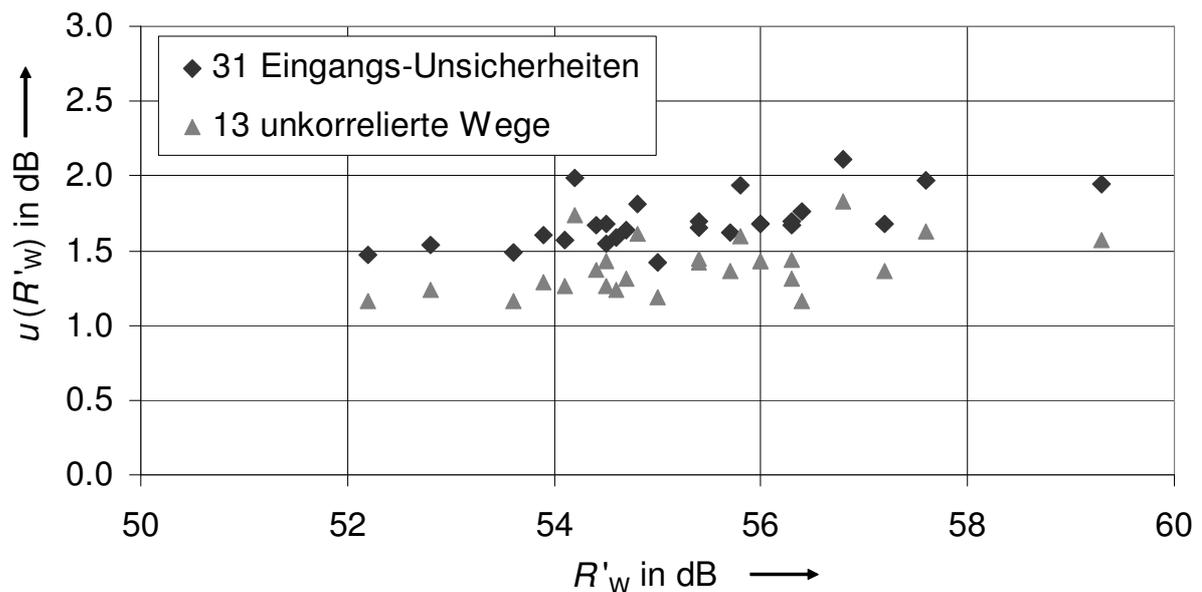


Bild 4 Unsicherheit der prognostizierten Schalldämmungen wenn für die Unsicherheiten der Eingangsgrößen jeweils 2,0 dB angesetzt werden

Ganz entscheidend ist nun der Vergleich zwischen Prognose- und Messergebnissen. Dazu wurden die 95%-Vertrauensbereiche durch Multiplikation der Unsicherheiten mit dem Erweiterungsfaktor 2 berechnet. Die für die Messungen zugrunde gelegte Unsicherheit beträgt dabei 0,8 dB. Dieser Wert ist die mittlere in-situ-Standardabweichung des bewerteten Schalldämm-Maßes [Wit07].

Generell stimmen Mess- und Prognosewerte gut überein (Bild 5). Von den 24 Fällen, bei denen Mess- und Prognosewerte vorliegen – Fälle 1 und 2 sind die aus [DIN EN 12354-1], S. 51 - überdecken sich die Verteilungen in 14 Fällen vollständig. Bei 6 Fällen liegt die Überdeckung zwischen 50 und 100%, 2 Fälle weisen eine nur geringe Überdeckung von unter 50% auf. Lediglich bei zwei Fällen liegt gar keine Überdeckung vor, d.h. hier besteht ein echter Widerspruch zwischen dem Prognoseergebnis und dem Messergebnis.

Dieses sehr gute Resultat zeigt deutlich, dass die angesetzten Unsicherheiten für das Prognoseverfahren von 0,8 dB und für die Unsicherheit der eingehenden akustischen Größen von 2,0 dB realistisch sind.

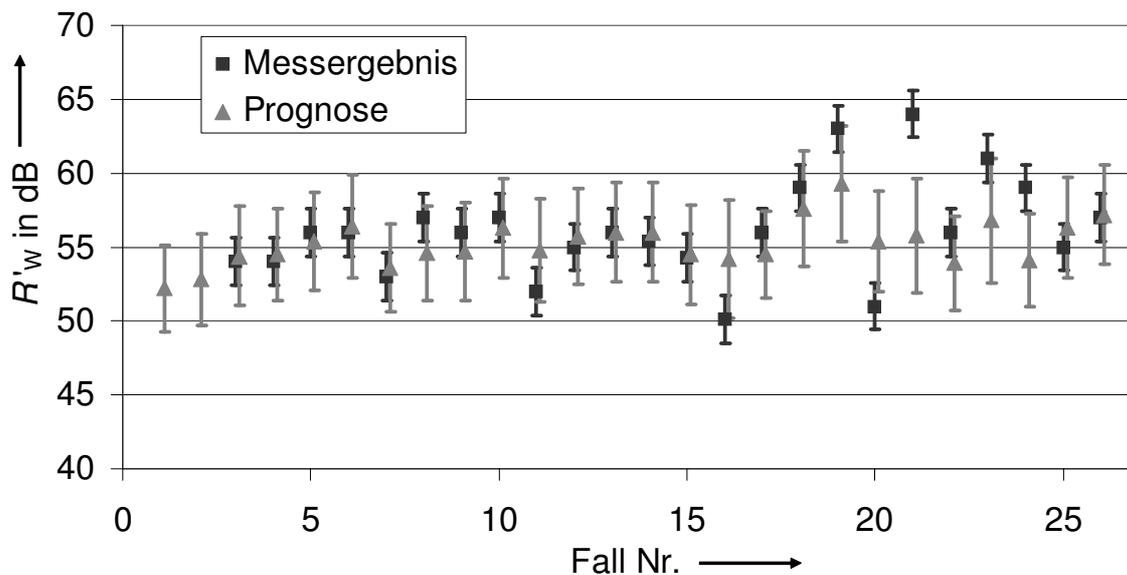


Bild 5 Vergleich von Mess- und Prognoseergebnissen für bewertete Schalldämm-Maße unter Einbeziehung der 95%-Vertrauensbereiche

4.2 Leichtbau

Die Überprüfung des Rechenblatts für den Leichtbau erfolgt mit einer Datenmenge, die der PTB durch ein anderes Forschungsprojekt ([SB04], [Me04]) zur Verfügung steht. Sie besteht aus insgesamt 24 gut dokumentierten Bausituationen, für die ebenfalls Mess- und Prognoseergebnisse vorliegen. Die mit dem neu erstellten Rechenblatt erzielten Prognoseergebnisse stimmen mit den damaligen Prognosen hervorragend überein (Bild 6). Die Abweichungen liegen bei höchstens 0,2 dB.

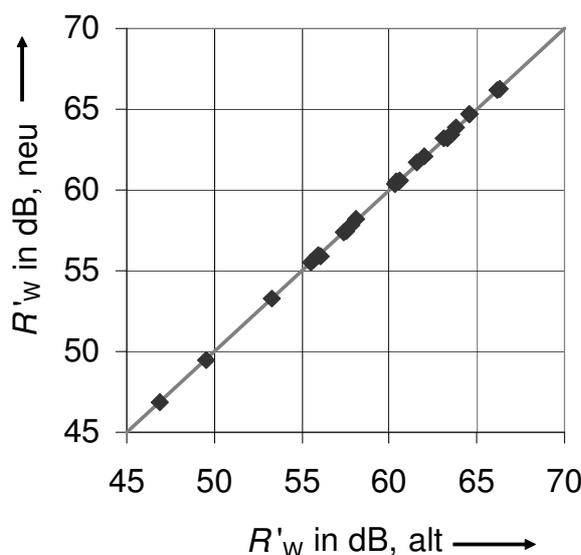


Bild 6 Vergleich von Prognoseergebnissen nach [Me04] mit den Ergebnissen aus dem neuen Excel-Rechenblatt

Die berechneten Unsicherheiten liegen zwischen 1,5 und 2,7 dB (Bild 7), wenn für die Unsicherheiten der Schalldämmung des direkten Weges 2,0 dB und für die der Flankenwege 3,0 dB angesetzt werden (vgl. Kapitel 3). Damit sind die Unsicherheiten der Prognoseergebnisse etwas größer als im Massivbau. Ursache hierfür ist, dass häufig nur ein oder zwei Wege die Schallübertragung dominieren, so dass sich die Unsicherheiten der verschiedenen Wege nicht nennenswert kompensieren können. Eine Abhängigkeit der Unsicherheit von der Schalldämmung selbst kann nicht beobachtet werden (Bild 7).

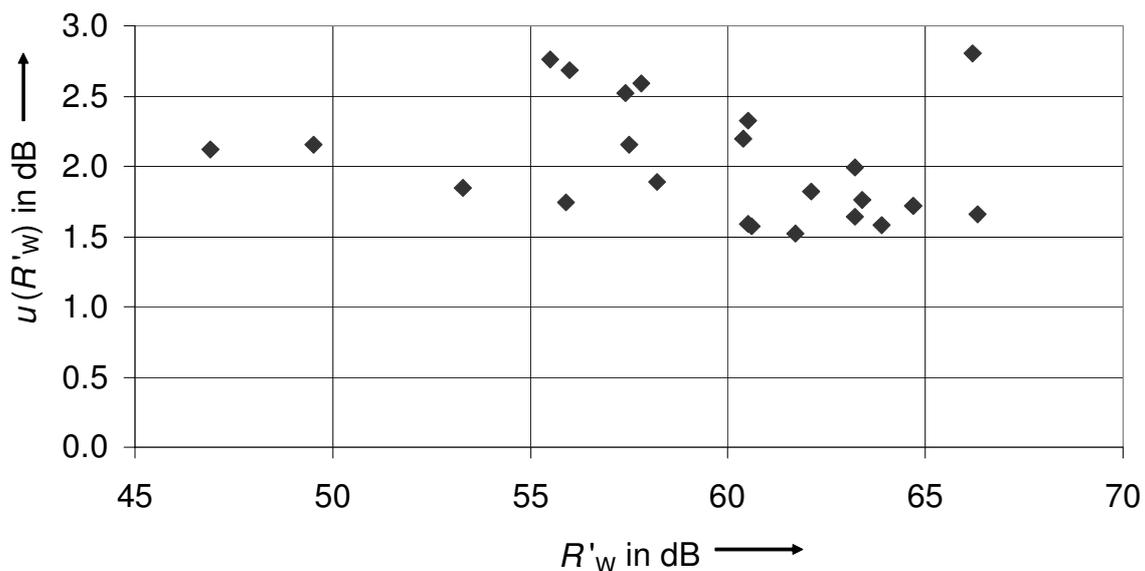


Bild 7 Unsicherheit der prognostizierten Schalldämmungen wenn für die Unsicherheiten der Schalldämmung des direkten Weges 2,0 dB und für die der Flankenwege 3,0 dB angesetzt werden

Auch der Vergleich zwischen Mess- und Prognoseergebnissen fällt sehr gut aus (Bild 8). Bei 18 Fällen überdecken sich die Vertrauensintervalle zu 100%, bei 5 Fällen zwischen 50 und 100% und bei einem Fall zwischen 0 und 50%. Der Fall, dass gar keine Überdeckung vorliegt, taucht überhaupt nicht auf. Die in [SB04] festgestellten Abweichungen zwischen Rechnung und Messung lassen sich demnach vollständig mit den auftretenden Unsicherheiten erklären. Außerdem erweisen sich die Unsicherheiten der Eingangsgrößen von 2,0 und 3,0 dB sowie die Prognoseunsicherheit von 0,8 dB als realistisch.

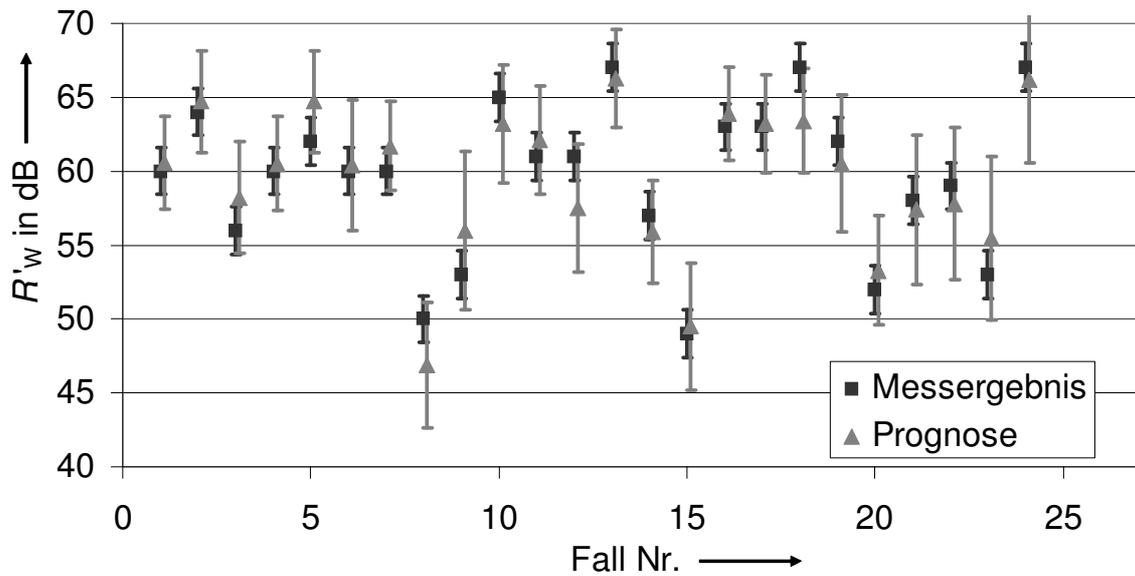


Bild 8 Vergleich von Mess- und Prognoseergebnissen für bewertete Schalldämm-Maße unter Einbeziehung der 95%-Vertrauensbereiche

5. Parameterstudien

Zur weiteren Überprüfung des Rechenblatts wurde die Auswirkung der Variation einzelner Einflussgrößen auf das Prognoseergebnis und die zugehörige Unsicherheit untersucht. Dazu wurde generell das Beispiel aus [DIN EN 12354-1] verwendet (Bild 1).

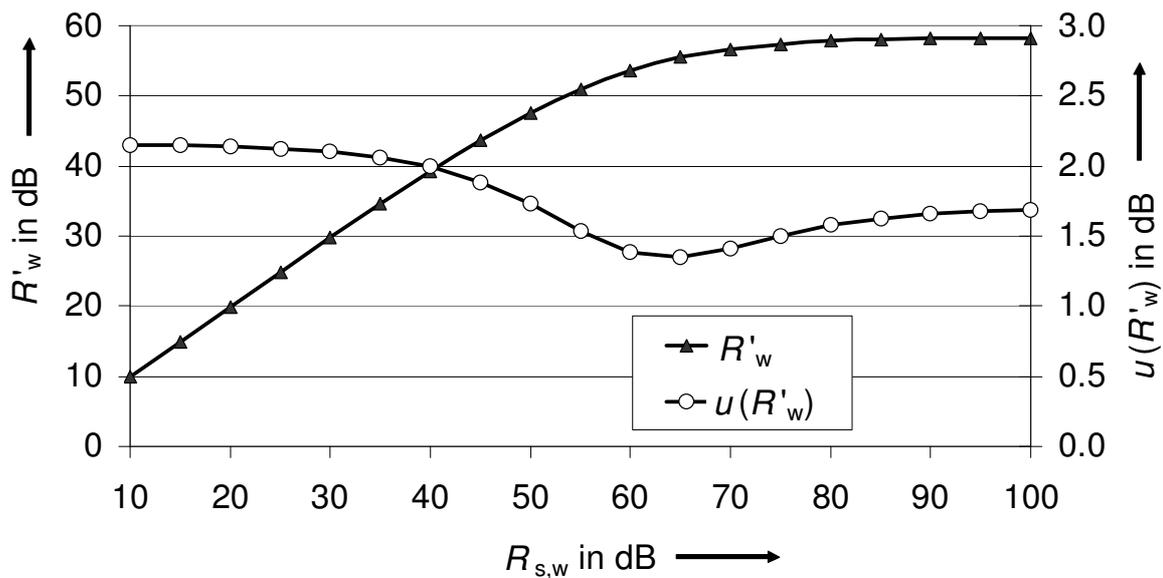


Bild 9 Auswirkung der Variation der Schalldämmung des Trennbauteils auf das Bauschalldämm-Maß und die zugehörige Unsicherheit

In einem ersten Test wurde nur die Schalldämmung des Trennbauteils ($R_{s,w}$) variiert. Bei sehr geringen Werten von $R_{s,w}$ ergeben sich auch sehr geringe Werte des bewerteten Bauschalldämm-Maßes R'_w (Bild 9). Die gesamte Schallenergie fließt nur über den direkten Weg. Die Unsicherheit von R'_w ergibt sich demnach aus der Unsicherheit von $R_{s,w}$ von 2,0 dB zuzüglich der Unsicherheit des Prognoseverfahrens von 0,8 dB. Energetische Addition dieser beiden Werte liefert 2,15 dB. Diesen Wert liefert auch das Rechenblatt (Bild 9). Wird nun die Schalldämmung des Trennbauteils $R_{s,w}$ erhöht, so steigt das bewertete Bauschalldämm-Maßes R'_w zunächst linear an, und die Unsicherheit verringert sich kaum. Erst wenn R'_w merklich weniger wächst als $R_{s,w}$ beginnt ein nennenswerter Energieanteil über die Flankenwege zu fließen. Es kommt zu einer unkorrelierten Überlagerung der Energieanteile auf den verschiedenen Wegen, so dass die Unsicherheit von R'_w merklich absinkt. Die Unsicherheit durchläuft bei $R_{s,w} = 65$ dB ein Minimum. Hier verteilt sich die Schallenergie am gleichmäßigsten auf die vorhandenen Wege. Bei weiterer Erhöhung der Schalldämmung $R_{s,w}$ steigt die Unsicherheit wieder an, da nun nur noch die vier Ff-Wege den Schall übertragen. Eine weitere Erhöhung von $R_{s,w}$ führt dann auch zu keiner weiteren Erhöhung von R'_w . Diese Ergebnisse sind alle plausibel und werden von dem Rechenblatt korrekt wiedergegeben.

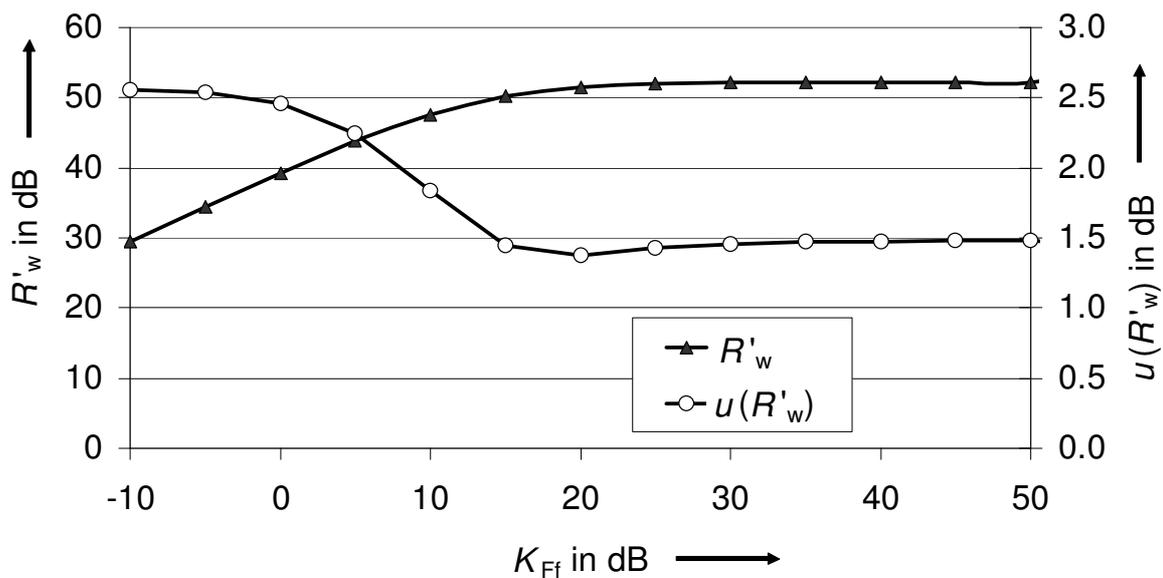


Bild 10 Auswirkung der Variation des Stoßstellendämm-Maßes der leichten Innenwand auf das Bauschalldämm-Maß und die zugehörige Unsicherheit

In einem zweiten Test wurde nur ein Stoßstellendämm-Maß K_{Ff} variiert. Prinzipiell ist hier das gleiche Verhalten zu beobachten wie bei der Variation von $R_{s,w}$ (Bild 9, Bild 10). Bei sehr geringen K_{Ff} ist die Unsicherheit jedoch größer. Die Schalldämmung des dominanten Pfads bestimmt sich hier neben dem Stoßstellendämm-Maß auch aus den Schalldämmungen der zugehörigen flankierenden Bauteile. Die zugehörigen Sensitivitätskoeffizienten betragen hier ca. 1 für die Unsicherheit von K_{Ff} (Gl. (19)) und ca. $\frac{1}{2}$ für die Unsicherheiten der Schalldämmung der flankierenden Bauteile (Gln. (20) und (21)). Die Unsicherheit von R'_w ist dann

$$u(R'_w) = \sqrt{2^2 + 1^2 + 1^2 + 0,8^2} \text{ dB} \approx 2,6 \text{ dB}. \quad (29)$$

Dieser Wert wird vom Arbeitsblatt ausgegeben.

Bei sehr hohen Werten des Stoßstellendämm-Maßes wird die Schalldämmung eines einzigen Übertragungsweges sehr groß. Die Schallausbreitung kann dann auf den 12 verbleibenden Wegen erfolgen. Die gewichtete unkorrelierte Überlagerung der Energieanteile führt dann zu einer Unsicherheit, die mit ca. 1,5 dB niedriger ist als in Bild 9. Dort ergab sich ein Wert von ca. 1,7 dB bei vier Übertragungswegen. Damit liefert auch dieser zweite Test insgesamt plausible Ergebnisse.

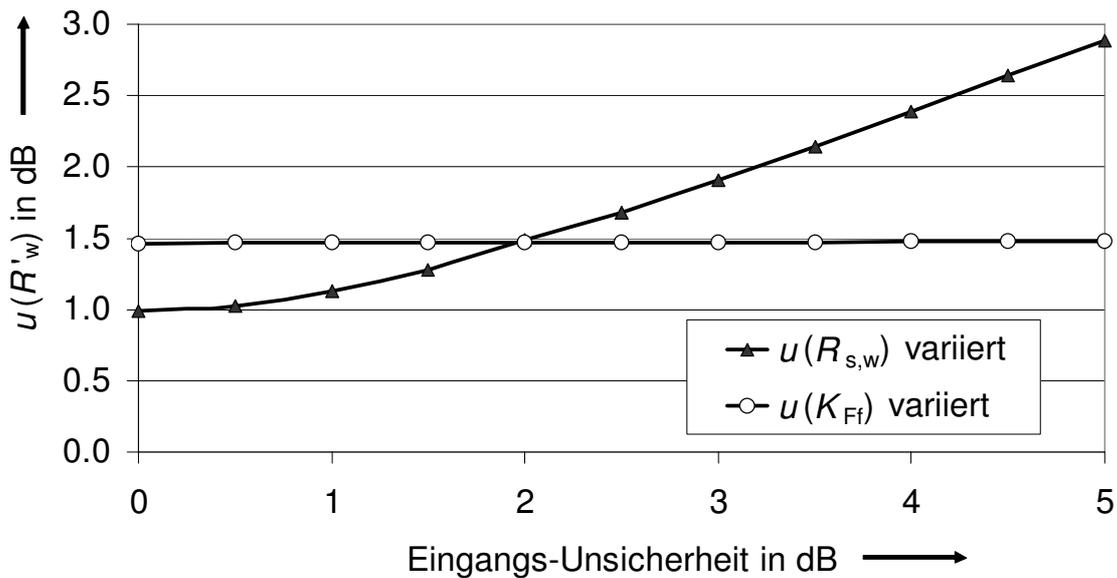


Bild 11 Auswirkung der Variation einer einzelnen Eingangs-Unsicherheit auf die Unsicherheit des Bauschalldämm-Maßes

Eine weitere interessante Frage ist, wie sich die Unsicherheit des Prognoseergebnisses ändert, wenn die Unsicherheit einer Eingangsgröße variiert wird. Dazu wurde das Beispiel aus [DIN EN 12354-1] mit allen Parametern wie in Bild 1 herangezogen.

Wird nur die Unsicherheit der Schalldämmung des Trennbauteils $u(R_{s,w})$ variiert, so ändert sich auch die Unsicherheit des Prognoseergebnisses (Bild 11) erheblich. Der Grund liegt darin, dass der Wert von R'_w sehr vom Wert von $R_{s,w}$ beeinflusst wird, wenn dieser in der Nähe des Wertes aus [DIN EN12354-1] von 57 dB liegt. Dies wird auch bereits in Bild 9 deutlich. R'_w wächst hier mit $R_{s,w}$.

Ohne Auswirkung auf die Unsicherheit des Bauschalldämm-Maßes R'_w ist hingegen die Variation der Unsicherheit des Stoßstellendämm-Maßes $u(K_{Ff})$ (Bild 11). Hier zeigt sich, dass R'_w praktisch gar nicht vom Wert von K_{Ff} abhängt, wenn dieser in der Nähe von 33 dB liegt. Auch dies kann wiederum bereits aus Bild 10 geschlossen werden, da mit wachsenden K_{Ff} keine Veränderung von R'_w einhergeht.

Sehr aufschlussreich ist auch die Variation aller eingehenden Unsicherheiten gemeinsam. Durchgeführt wurde diese Variation unter der Annahme dass alle eingehenden Unsicherheiten gleich groß sind. Ist diese Unsicherheit 0, so verbleibt für die Unsicherheit von R'_w nur noch die Unsicherheit des Prognoseverfahrens von

0,8 dB (Bild 12). Wird die Unsicherheit der Eingangsgrößen erhöht, so steigt auch die Unsicherheit des Prognoseergebnisses an. Dieser Anstieg erfolgt nach einem gewissen Einlaufen linear. Die Ursache hierfür ist der konstante „Arbeitspunkt“. Die Energie verteilt sich in der selben Weise auf die 13 Wege. Damit sind die Sensitivitätskoeffizienten konstant, so dass sich die Eingangsunsicherheiten zu einem konstanten Prozentsatz in der Prognoseunsicherheit widerspiegeln.

Damit liefern die mit dem Rechenblatt durchgeführten Parametervariationen insgesamt plausible Ergebnisse. Alle beobachteten Phänomene lassen sich physikalisch begründen, so dass das Rechenblatt als abgesichert gelten kann.

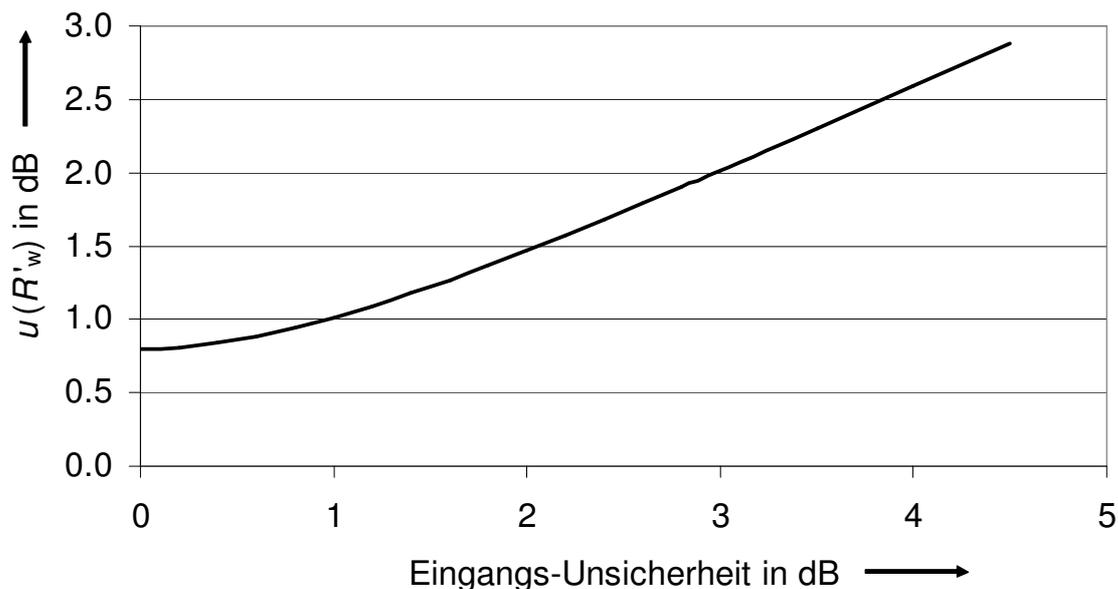


Bild 12 Auswirkung der Variation aller Eingangs-Unsicherheiten gemeinsam auf die Unsicherheit des Bauschalldämm-Maßes

6. Zusammenfassung und Ausblick

Für die Berechnung der Unsicherheit bauakustischer Prognosen wurde ein Rechenblatt erstellt. Es basiert auf dem Verfahren aus der [DIN EN 12354-1] sowie auf dem [GUM]. Das Rechenblatt wurde sowohl für den Massiv- als auch für den Leichtbau anhand vorliegender Beispiele überprüft. Die auftretenden Unterschiede zwischen Mess- und Prognoseergebnissen lassen sich durch die Unsicherheiten sehr gut erklären. Zusätzlich wurde das Rechenblatt durch Parametervariationen und Plausibilitätstests abgesichert.

Das Rechenblatt wurde auf den Internet-Seiten der PTB der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt (www.ptb.de/en12354). Damit kann eine breite Anwenderschicht Erfahrungen mit den Unsicherheiten bauakustischer Prognosen aufbauen, die dann wiederum für die Überarbeitung der [DIN 4109] nutzbar gemacht werden können.

Danksagung

Unser herzlicher Dank gilt Götz Raabe für die Überlassung der Rechenbeispiele für den Massivbau.

Literatur

- [DIN 4109] *Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise*, November 1989
- [DIN EN 12354-1] *Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen* Deutsche Fassung EN 12354-1:2000
- [GUM] *Guide to the expression of uncertainties in measurement*. first edition, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland)
- [Me04] Heinrich A. Metzen: *Berechnungsmodelle & Berechnungsansätze für den Holzbau* in: Werner Scholl, Heinrich Bietz: *Integration des Holz- und Skelettbbaus in die neue DIN 4109*. Abschlussbericht zum gleichnamigen DIBt-Projekt, Braunschweig, 2004
- [Ri89] Richtlinie des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte (89/106/EWG)
- [SB04] Werner Scholl, Heinrich Bietz: *Integration des Holz- und Skelettbbaus in die neue DIN 4109*. Abschlussbericht zum gleichnamigen DIBt-Projekt, Braunschweig, 2004
- [SSP01] Schumacher, R.; Saß, B.; Pütz, M.: *Grundlagenuntersuchungen zum Stoßstellendämm-Maß im Holzbau*. ift Rosenheim, Mai, 2001
- [Wit04] Volker Wittstock: *Quantitative Kriterien für die Verwendbarkeit bauakustischer Messergebnisse und für die bauaufsichtliche Anerkennung von Prüfstellen für bauakustische Messungen nach den neuen europäischen Messnormen*. Abschlussbericht zum gleichnamigen DIBt-Projekt, Dezember 2004
- [Wit07] Volker Wittstock: *Erarbeitung brauchbarer Schalldämm-Definitionen für die neue DIN 4109*. Abschlussbericht zum gleichnamigen DIBt-Projekt, Braunschweig, Oktober, 2007

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