Unsicherheiten bei der Schalldämmung

Volker Wittstock

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, volker.wittstock@ptb.de

Einleitung

Eine transparente und realitätsnahe Berücksichtigung der Unsicherheiten ist für viele bauakustische Fragestellungen entscheidend. Ob z.B. ein Anforderungswert eingehalten wird, ein Labor korrekte Messergebnisse erzielt oder ein Produkt schalltechnisch besser als ein anderes ist, kann nur unter Berücksichtigung der jeweiligen Unsicherheiten entschieden werden. Wegen der Aktualität und großen Bedeutung dieser Fragen wurde an der PTB ein vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) finanziertes Projekt bearbeitet [1], dessen Ergebnisse im vorliegenden Beitrag kurz dargestellt werden.

Unsicherheitsbeiträge zur Schalldämmung

Bevor ein detailliertes Modell für die Unsicherheitsberechnung aufgestellt werden kann, muss der Frage nachgegangen werden, ob die Betrachtungen sinnvollerweise im dB-Maßstab oder in physikalischen Größen angestellt werden. Um diese Frage zu beantworten, wurden die Resultate des Ringversuchs an einer schweren Kalksandsteinwand [2] ausgewertet. Die ursprüngliche Datenmenge mit Ergebnissen aus 12 Laboratorien wurde dazu um Ergebnisse der gleichen Wand aus weiteren 8 Laboratorien ergänzt. Die nunmehr 20 Datensätze wurden terzweise auf Normalverteilung getestet [1]. Es zeigte sich, dass das Schalldämmmaß in dB wesentlich besser einer Normalverteilung gehorcht als die ebenfalls untersuchten Leistungsverhältnisse. Damit erscheint eine Untersuchung im Pegelmaßstab angemessen.

Für die Ermittlung der einzubeziehenden Unsicherheitsbeiträge wird von einer zweikanaligen simultanen Schalldruckpegelmessung im Sende- und Empfangsraum ausgegangen. Das hier zur Vermeidung von Verwechslungen mit der Vergleichgrenze R als y bezeichnete Schalldämmmaß ergibt sich aus

$$\begin{aligned} y = {} & L_{p,1} - L_{p,2} - K_{\text{abs}} - K_{\text{stör}} - K_{\text{SLM1}} - K_{\text{SLM2}} \\ & - K_{\text{mitt1}} - K_{\text{mitt2}} - K_{W1} - K_{W2} - K_{\text{quellpos}} - K_{\text{met}} \\ & - K_{\text{form}} - K_{\text{größe}} - K_{\eta} - K_{\text{rand}} - K_{\text{max}} - K_{\text{repro}} \end{aligned} , \tag{1}$$

wobei neben den mittleren Schalldruckpegeln $L_{p,1/2}$ je eine Korrektur für den Einfluss der Absorption im Empfangsraum K_{abs}, des Störgeräuschs im Empfangsraum $K_{\text{stör}}$, der verwendeten Messtechnik $K_{\text{SLM1/2}}$, der Volumen- und Zeitmittelung $K_{\text{mitt1/2}}$, der Abweichung vom ideal diffusen Feld $K_{\text{W1/2}}$, 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}, der Art der Einspannung (fest, elastisch, ...) K_{rand}, der Maximaldämmung des Prüfstands K_{max} sowie der begrenzten Bauteilreproduzierbarkeit K_{repro} angesetzt wurde. Die Unsicherheit des Schalldämmmaßes ergibt sich dann nach [3] bei Vernachlässigung etwaiger Korrelationen aus der quadratischen Überlagerung der einzelnen Unsicherheitsbeiträge

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{16} u^2(K_i)} \quad . \tag{2}$$

Einordnung der Unsicherheitskomponenten

Die Unsicherheitsbeiträge lassen sich in drei Gruppen unterteilen. Die erste Gruppe umfasst dabei diejenigen Beiträge, die bei wiederholten Messungen am gleichen Objekt im gleichen Prüfstand auftreten. Ihre Summe entspricht der in ISO 140-2 [4] verwendeten Wiederhol-Standardabweichung σ_r

$$\begin{aligned} \sigma_r = \Big[& u^2(K_{\text{stör}}) + u^2(K_{\text{mitt1}}) + u^2(K_{\text{mitt2}}) + u^2(K_{\text{abs}}) \\ & + u^2(K_{\text{quellpos}}) + u^2(K_{\text{met}}) \Big]^{1/2} \end{aligned} . \tag{3}$$

Ein Wert für die Wiederhol-Standardabweichung wurde in [1] ermittelt, indem die Ergebnisse der regelmäßig stattfindenden Vergleichsmessungen an der PTB und an der MPA Dortmund ausgewertet wurden. Bei diesen Messungen bestimmen ca. 10 (PTB) bzw. 100 (MPA) Messteams die Schalldämmung des selben Messobjekts im selben Prüfstand. Aus diesen Ergebnissen wurde eine Wiederhol-Standardabweichung bestimmt. Sie liegt über den Werten aus ISO 140-2 und auch über vorliegenden Ergebnissen unterschiedlicher Ringversuche. Für diese Abweichungen sind zwei Erklärungen möglich. Zum Einen beinhaltet der in [1] ermittelte Wert neben den in Gl. (3) aufgeführten Unsicherheitskomponenten zusätzlich noch den Messgeräteeinfluss, da jedes Team das jeweils eigene Gerät verwendet. Allerdings müsste dieser Unsicherheitsbeitrag in der Größenordnung von ca. einem dB liegen, um die Abweichungen quantitativ zu erklären. Da Messgeräteeinflüsse in dieser Größenordnung unwahrscheinlich sind, steht vielmehr zu vermuten, dass die Mikrofon- und Quellpositionen bei den Wiederholungsmessungen in den Ringversuchen nicht weit genug variiert wurden. Diese Variation sollte nach Möglichkeit den gesamten in der zugrundeliegenden Messvorschrift zugelassenen Bereich umfassen. In der Annahme, dass sich ein „gutes“ Labor durch kleine Wiederhol-Standardabweichungen auszeichnet, wurden jedoch häufig keine entsprechenden Variationen durchgeführt.

Die zweite Gruppe von Unsicherheiten umfasst die systematischen Abweichungen zwischen verschiedenen Laboratorien und wird in ISO 140-2 [4] als Labor-Standardabweichung σ_L bezeichnet

$$\begin{aligned} \sigma_L = \Big[& u^2(K_{\text{SLM1}}) + u^2(K_{\text{SLM2}}) + u^2(K_{W1}) + u^2(K_{W2}) \\ & + u^2(K_{\text{met}}) + u^2(K_{\text{form}}) + u^2(K_{\text{größe}}) + u^2(K_{\eta}) \\ & + u^2(K_{\text{rand}}) + u^2(K_{\text{max}}) \Big]^{1/2} \end{aligned} . \tag{4}$$

Die Summe aus Wiederhol- und Labor-Standardabweichung

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_L^2} \tag{5}$$

ist die Vergleichs-Standardabweichung σ_R.

Die dritte Gruppe von Unsicherheiten charakterisiert diejenigen Einflüsse, die sich aufgrund der begrenzten Bauteilreproduzierbarkeit ergeben. Auch hierzu wurden im Rahmen des beschriebenen Projekts Untersuchungen angestellt und es zeigte sich, dass die zugehörige Standardabweichung σ_{repro} bei gut reproduzierbaren Bauteilen wie z.B. der Kalksandsteinwand aus dem Ringversuch oder den Scheiben aus dem Verglasungs-Ringversuch bei ca. 1 dB liegt. Ein typischer Wert für wenig reproduzierbare Bauteile wie etwa Gipskarton-Ständerwände liegt dagegen bei ca. 3 dB.

Konsequenzen aus den Unsicherheiten

Zur Abschätzung der Konsequenzen, die sich aus den Unsicherheiten ergeben, werden hier nur die Einzahlwerte betrachtet. Dazu sei vereinfachend angenommen, dass die Vergleichs-

Standardabweichung bei 2 dB, die Wiederhol-Standardabweichung bei einem dB und die Reproduktions-Standardabweichung bei einem oder bei 3 dB liegt.
Eine erste interessierende Frage ist, wie viele Messungen erforderlich sind, um eine bauteilspezifische Schalldämmung, etwa für den Bauteilkatalog der DIN 4109 [5], mit definierter Unsicherheit angeben zu können. Werden n_1 Wiederholungsmessungen am selben Exemplar im selben Labor durchgeführt, so gilt für die Unsicherheit des Mittelwerts dieser Messungen [1]

$$u_1(\bar{y}) = \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_r^2 (1 - 1/n_1) + \sigma_{\text{repro}}^2} \quad . \tag{6}$$

Werden hingegen n_2 Wiederholungsmessungen an n_2 verschiedenen Exemplaren im selben Labor durchgeführt, ergibt sich die Unsicherheit des Mittelwerts zu

$$u_2(\bar{y}) = \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_r^2 (1 - 1/n_2) + \sigma_{\text{repro}}^2 / n_2} \quad . \tag{7}$$

Wird schließlich in n_3 Prüfständen je eine Messung durchgeführt, wobei in jedem Prüfstand ein anderes Prüfexemplar verwendet wird, so ergibt sich als Unsicherheit für den Mittelwert

$$u_3(\bar{y}) = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{\text{repro}}^2} / \sqrt{n_3} \quad . \tag{8}$$

Aus Gleichungen (6) - (8) lässt sich nun die erforderliche Zahl von Messungen für die verschiedenen Fälle berechnen (Tabelle 1). Eine angestrebte Unsicherheit von u = 1,0 dB wird nur bei Verwendung mehrerer Prüfstände erreicht, wobei für gut reproduzierbare Bauteile 5 und für weniger gut reproduzierbare Bauteile 13 Messungen erforderlich sind. Eine Wiederholung der Messung am selben Objekt im selben Prüfstand reduziert die Unsicherheit des Mittelwerts im allgemeinen nicht nennenswert, da die Wiederhol-Standardabweichung nur einen geringen Beitrag zur Gesamtunsicherheit liefert.

Tabelle 1 Erforderliche Zahl von Messungen zur Erreichung vorgegebener Unsicherheiten u (Gln. (6) - (8))

u Vorgabe	σ_{repro} = 1 dB			σ_{repro} = 3 dB		
	n_1	n_2	n_3	n_1	n_2	n_3
1,0	-	-	5	-	-	13
2,0	-	2	2	-	10	4
3,0	1	1	1	-	2	2

Ausgehend von den Werten aus dem Bauteilkatalog können Prognosen erstellt werden. Mit den dabei verwendeten Gleichungen kann nach [3] auch dem Prognosewert y_{Prog} eine Unsicherheit beigemessen werden [1]. Das Vorhaltemaß dient nun dazu, 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

$$y_{\text{D}} = y_{\text{Prog}} - k\, u\left(y_{\text{Prog}}\right) \cdot \tag{9}$$

Der zugehörige Erweiterungsfaktor k beträgt eins bei einer statistischen Sicherheit von 84 % und zwei bei einer statistischen Sicherheit von 97,5 % (einseitiger Vertrauensbereich).
Eine weitere interessierende Frage betrifft die Einbeziehung der Unsicherheiten bei Nachmessungen am Bau. Hierbei handelt es sich um eine Messung unter Wiederholbedingungen, sieht man vom Messgeräteeinfluss ab. Als Standardabweichung für diese Messungen können z.B. die aufgrund der Vergleichsmessungen errechneten Werte Verwendung finden, sofern sich die Bausituation nicht durch besonders erschwerende Bedingungen 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-Sandardabweichung

$$U = 2\sigma_r \tag{10}$$

annimmt. Alle Streuungen bedingt durch Effekte wie Bauteilgrößen, Kantenlängenverhältnisse, Energieableitung, Randeinspannung, Art des anregenden und des transmittierten Schallfeldes usw. sollten durch das Vorhaltemaß berücksichtigt sein.
Ein weiterer wichtiger Aspekt bei Nachmessungen am Bau ist die Aussage, die überprüft werden soll. Eine mögliche Aussage ist: die Schalldämmung liegt unter dem deklarierten Wert y_{D}. Zur Bestätigung dieser Aussage muss gefordert werden:

$$y_{\text{Mess}} + U < y_{\text{D}} \quad . \tag{11}$$

Eine andere Aussage lautet: die Schalldämmung liegt über dem deklarierten Wert y_{D}. Diese Aussage wird bestätigt durch

$$y_{\text{Mess}} - U > y_{\text{D}} \quad . \tag{12}$$

Falls der deklarierte Wert innerhalb des Unsicherheitsintervalls um den Messwert liegt

$$y_{\text{Mess}} - U < y_{\text{D}} < y_{\text{Mess}} + U \tag{13}$$

kann keine der beiden Aussagen bestätigt oder abgelehnt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit den Untersuchungen sind die Kenntnisse über Unsicherheiten in der Bauakustik wesentlich erweitert worden. Einige wichtige Fragen sind jedoch noch zu klären. So stellte sich heraus, dass es derzeit keine allgemein anerkannten Definitionen für viele bauakustische Messgrößen, wie etwa das Schalldämmmaß, gibt. Ohne eine solche Definition ist jedoch die Betrachtung der Unsicherheiten nicht sinnvoll. Des Weiteren müssen zur Unsicherheit der Einzahlwerte Untersuchungen angestellt werden, da diese für Deklarations- und Prognosezwecke verwendet werden. Insbesondere sollte hierbei in Erweiterung von [6] die Frage von möglichen Korrelationen zwischen benachbarten Terzen einbezogen werden.

Danksagung

Die Arbeiten wurden durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) finanziell gefördert. Für fachliche Anregungen und Diskussionen geht mein Dank an Prof. Dr. W. Scholl und Dr. W. Weise. Bei Herrn A. Terskan (MPA Dortmund) und bei Frau Prof. J. Lang (Wien) bedanke ich mich für die Bereitstellung von Messergebnissen.

Literatur

[1] Wittstock, V.: *Quantitative Kriterien für die Verwendbarkeit bauakustischer Messergebnisse und für die bauaufsichtliche Anerkennung von Prüfstellen für bauakustische Messungen nach den neuen europäischen Messnormen*. Abschlussbericht zu den DIBt-Projekten P 32-5-5.61-1010/02 und P 32-5-5.61.1-1043/03

[2] Meier, A.; Schmitz, A.; Raabe, G.: *Inter-laboratory test of sound insulation measurements on heavy walls: Part II – Results of main test*. Building Acoustics 6 (3), pp. 171 – 186, 1999

[3] *Guide to the expression of uncertainties in measurement*. first edition, 1993, corrected and reprinted 1995, International Organization for Standardization (Geneva, Switzerland)

[4] ISO 140-2:1991 *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements- Part 2: Determination, verification and application of precision data*.

[5] DIN 4109-3 *Schallschutz im Hochbau; Luft- und Trittschalldämmung in Gebäuden; Ausführungsbeispiele mit nachgewiesener Schalldämmung für Gebäude in Massivbauart*. Entwurf, Oktober 1984.

[6] H. Goydke, B.R.L. Siebert, W. Scholl: *Studie zur Bestimmung von Messunsicherheiten bei Schalldämmungsmessungen*. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 51(2004), S. 7 – 12