

**Unsicherheitsbudget für
Installationsgeräusche nach DIN 4109
"Schallschutz im Hochbau"**

T 3279

T 3279

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

2012

ISBN 978-3-8167-8721-1

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

Heinrich Bietz

Unsicherheitsbudget für Installationsgeräusche nach DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“

Kurztitel:

DIN 4109: Installationsgeräusch-Unsicherheit

gefördert vom:

Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)

Braunschweig, 2012-05-15

Inhalt

1. EINLEITUNG.....	3
2. LABORMESSVERFAHREN ZUR CHARAKTERISIERUNG VON QUELLEN	4
2.1. MÖGLICHKEITEN ZUR QUELLCHARAKTERISIERUNG	4
2.2. CHARAKTERISIERUNG VON QUELLEN NACH DIN EN 15657-1	5
2.2.1. <i>Messprinzip</i>	5
2.2.2. <i>Ringversuch zur Ermittlung der Unsicherheit</i>	6
2.3. MESSUNGEN AN ARMATUREN NACH DIN EN ISO 3822	11
2.3.1. <i>Messprinzip</i>	11
2.3.2. <i>Ringversuch zur Ermittlung der Unsicherheit</i>	14
2.4. PRODUKTSTREUUNGEN	16
3. PROGNOSEN BEI INSTALLATIONSGERÄUSCHEN	16
4. MESSUNGEN AM BAU.....	18
4.1 AKTUELLE NORMUNGSSITUATION	18
4.2 MESSUNG NACH DIN EN ISO 10052 UND DIN 4109-11	18
4.3 MESSUNG NACH DIN 52219.....	19
4.4 VERGLEICHSMESSUNGEN NACH BEIDEN MESSVERFAHREN	20
4.4.1 <i>Messaufgaben</i>	20
4.4.2 <i>Beschreibung der Empfangsräume</i>	21
4.4.3 <i>Beschreibung der Schallquellen und der Betriebszyklen</i>	21
4.4.4 <i>Spektrale und zeitliche Struktur der Geräusche</i>	22
4.4.5 <i>Nachhallzeiten und ihre Unsicherheiten</i>	26
4.4.6 <i>Oktav-Schalldruckpegel und ihre Unsicherheiten</i>	28
4.4.7 <i>Unterschiede zwischen Raummitte und Raumecke</i>	30
4.4.8 <i>A-bewertete Installationsgeräuschpegel</i>	31
4.4.9 <i>Zur Unsicherheit der A-bewerteten Installationsgeräuschpegel</i>	34
4.5 SIMULATIONEN ZU DEN UNTERSCHIEDEN ZWISCHEN BEIDEN MESSVERFAHREN ...	35
4.5.1 <i>Motivation und Grundprinzip</i>	35
4.5.2 <i>Detailliertes Rechenmodell</i>	36
4.5.3 <i>Eingangsdaten</i>	40
4.5.4 <i>Testrechnungen</i>	44
4.5.5 <i>Abweichungen zwischen DIN 52219 und DIN EN ISO 10052</i>	46
4.6 VORSCHLAG ZUR UNSICHERHEIT FÜR MESSUNGEN AM BAU	52
5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	54
DANKSAGUNG	55
LITERATUR	56

1. Einleitung

Die DIN 4109 „Schallschutz im Hochbau“ wird derzeit grundlegend überarbeitet. Einen Schwerpunkt stellt hierbei die adäquate Berücksichtigung der Unsicherheiten dar, die bei Labor-Messergebnissen, Prognosewerten und Nachmessungen am ausgeführten Gebäude von zentraler Bedeutung sind, z.B. für die Einhaltung bzw. Überprüfung gesetzlicher oder anderweitiger Anforderungen. Ein entsprechendes Konzept für die Behandlung von Unsicherheiten bei der Luft- und Trittschalldämmung wurde von der PTB bereits erarbeitet und in den Normungsprozess eingebracht. Mit dem nun vorliegenden Abschlussbericht wird diese Betrachtungsweise erstmals auf Installationsgeräusche erweitert.

Der grundlegende Ansatz besteht darin, die Unsicherheiten, die bei den einzelnen physikalischen Prozessen auftreten, zu separieren. Die wichtigsten Prozesse sind die Anregung des Gebäudes durch die Quelle, die Ausbreitung des Schalls im Gebäude, die Schallabstrahlung in den schutzbedürftigen Raum sowie die Nachmessung vor Ort. Durch diese Aufteilung der Unsicherheitsanteile lassen sich letztlich auch Zuständigkeiten zuweisen.

Ausgangspunkt einer solchen Betrachtungsweise für Installationsgeräusche ist die Beschreibung der Quelle, möglichst durch eine Labormessung. Für die Unsicherheit der Labormessung ist das Prüflabor zuständig während der Hersteller der Schallquelle für die Streuung verschiedener Exemplare seines Produktes zuständig ist. Die Anregung des Gebäudes durch die Quelle, die Weiterleitung des Schalls im Baukörper wie auch die Schallabstrahlung werden durch eine bauakustische Prognose erfasst. In die Unsicherheit des Prognoseergebnisses fließt die Unsicherheit der Quellbeschreibung (Summe aus Labormessung und Produktstreuung) sowie die Unsicherheit der Prognose ein.

Der tatsächlich erreichte Schallschutz wird häufig durch Nachmessungen im ausgeführten Gebäude überprüft. Die bei dieser Messung auftretenden Unsicherheiten sind durch das verwendete genormte Messverfahren maßgeblich bestimmt und werden im Folgenden ausführlich untersucht.

Installationsgeräusche lassen sich in Geräusche unterteilen, die von den Quellen als Luft- oder als Körperschall in die Gebäudestruktur eingeleitet werden oder die durch Kanäle oder Schächte übertragen werden. Der über den Luftschall angeregte Geräuschanteil kann mit bekannten Methoden behandelt werden. Ausgehend von der Luftschalleistung der Quelle kann über die Luftschalldämmung der an der Schallausbreitung beteiligten Bauteile der Schalldruckpegel im Empfangsraum prognostiziert werden. Eine analoge Betrachtung ist für den Körperschallanteil derzeit kaum möglich. Der entscheidende Unterschied liegt in der Anregung einer Gebäudestruktur durch eine Körperschallquelle. Während bei einer Luftschallquelle die emittierte Schalleistung als praktisch konstant angesehen werden kann, hängt sie bei einer Körperschallquelle stark von der Empfangsstruktur ab. In verschiedene Empfänger werden von derselben Schallquelle verschiedene Schalleistungen injiziert. In diesem Bericht werden daher überwiegend Installationsgeräusche betrachtet, die von Körperschallquellen verursacht werden.

2. Labormessverfahren zur Charakterisierung von Quellen

2.1. Möglichkeiten zur Quellcharakterisierung

Es existieren sehr unterschiedliche Ansätze zur Charakterisierung von Körperschallquellen, der häufigsten und wichtigsten Ursache von Installationsgeräuschen. Für eine allgemeine Beschreibung bedarf es wegen der nicht vernachlässigbaren Wechselwirkung zwischen Quelle und Empfangsstruktur einer aktiven und einer passiven Quellgröße. Für translatorische Anregungen sind die Kurzschlusskraft bzw. die freie Schnelle als Quellaktivität gebräuchlich. Die Kurzschlusskraft ist dabei diejenige Kraft, die bei vollständig behinderter Bewegung der Quelle auftritt. Die freie Schnelle wiederum ist die Schnelle bei unbehinderter Bewegung der Quelle. Als passive Quellgröße dient die Mobilität, das Verhältnis aus freier Schnelle und Kurzschlusskraft oder auch ihr Kehrwert, die Quellimpedanz. Solche Kennwerte existieren im Allgemeinen für jeden Kontaktpunkt der Quelle mit der Empfangsstruktur für alle translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade. Zudem sind Körperschallquellen meist über mehr als einen Kontaktpunkt an die Empfangsstruktur angekoppelt. In diesen Fällen spielen auch die Wechselwirkungen zwischen den Einleitungspunkten für die insgesamt eingespeiste Schalleistung eine wichtige Rolle, was üblicherweise durch Transfermobilitäten erfasst wird. Bei Translationen beschreiben sie die Schnelle an einem Punkt bezogen auf eine Kraftanregung an einem anderen Punkt.

Angesichts dieser Fülle von Kenngrößen für eine exakte Beschreibung einer Körperschallquelle erscheint es unumgänglich, Vereinfachungen vorzunehmen. Dazu gehört die Vernachlässigung einzelner Freiheitsgrade oder die Vernachlässigung von Wechselwirkungen. Vorschläge für eine allgemeine Charakterisierung von Körperschallquellen finden sich z.B. in [MP87], [PG00] oder [Mo01]. Daneben gibt es eine große Zahl aktueller Arbeiten auf diesem Gebiet z.B. [Alb06], [Bo10], [Späh06], [Sch11].

Genormte Labormessverfahren existieren für die Charakterisierung von Abwassersystemen [DIN EN 14366], von Umwälzpumpen für Heizungsanlagen [DIN EN 1151-2], von Armaturen und Geräten der Wasserinstallation [DIN EN ISO 3822] sowie von Whirlwannen [DIN EN 15657-1]. Das letztgenannte Verfahren bedient sich der Empfangsplattenmethode, bei der die insgesamt in eine Platte eingespeiste Körperschalleistung unter Annahme eines diffusen Schallfelds ermittelt wird. Dieses Verfahren wurde auch bereits auf den Fall zweier verschiedener Empfangsplatten erweitert [GQM07] und angewendet [Wi10]. In diesem Fall lassen sich aus den gemessenen Körperschalleistungen auf beiden Platten Rückschlüsse auf eine summarisch wirkende aktive Quellstärke und eine zugeordnete passive Quellgröße ziehen.

Im Folgenden wird nur auf diejenigen genormten Verfahren ausführlicher eingegangen, zu denen Informationen über die Unsicherheiten vorliegen. Dies sind die Verfahren nach [DIN EN ISO 3822] und [DIN EN 15657-1].

2.2. Charakterisierung von Quellen nach DIN EN 15657-1

2.2.1. Messprinzip

Bei dem in [DIN EN 15657-1] beschriebenen Verfahren handelt es sich um ein Empfangsplattenverfahren. Es ist prinzipiell für alle Sender-Empfänger-Anordnungen anwendbar, bei denen die Empfängermobilität 10 dB unter der Sendermobilität liegt. Die Anwendung wurde jedoch auf Whirlwannen beschränkt, weil zum Zeitpunkt der Normung nur für diese Art von Geräuschen Erfahrungen vorliegen [Späh06].

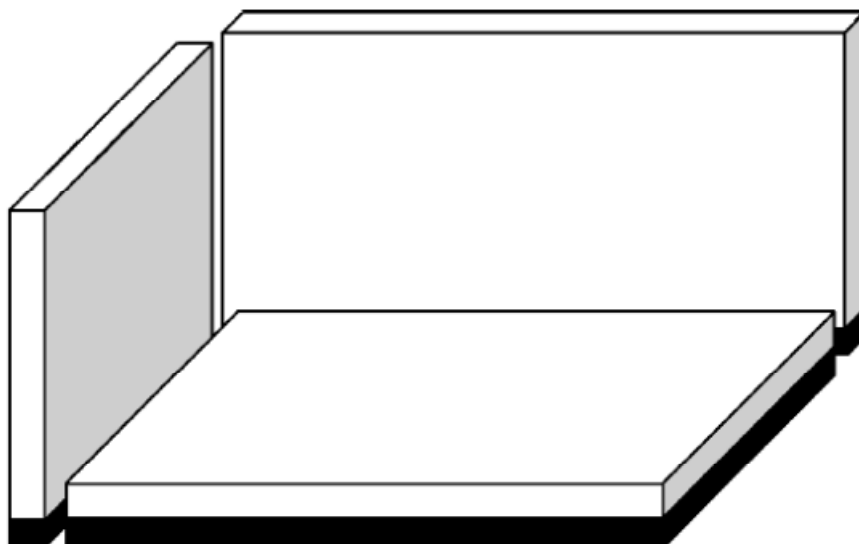


Bild 1 Prüfstand zur Bestimmung der Körperschall-Leistung nach [DIN EN 15657-1]

Für die Messung ist ein spezieller Prüfstand erforderlich (Bild 1). Er besteht aus drei voneinander getrennten Betonplatten mit einer Dichte von $(2300 \pm 200) \text{ kg/m}^3$ und einer Dicke von $(10 \pm 1) \text{ cm}$. Die Fläche S jeder Platte muss mindestens 5, vorzugsweise jedoch mehr als 7 m^2 betragen. Das Kantenlängenverhältnis muss bei etwa $1 : \sqrt{2}$ liegen, und der Verlustfaktor bei tiefen Frequenzen (50 bis 100 Hz) bei mindestens 8%. Das Prüfobjekt wird zur Messung mit allen drei Platten verbunden. Aus dem gemessenen mittleren Pegel der Plattenschnelle L_v wird mit dem Verlustfaktor η der auf die Platten übertragene Pegel der Körperschalleistung L_{Ws}

$$L_{Ws} = L_v + 10 \lg(2 \pi f \eta m S) \text{ dB} - 60 \text{ dB} \quad (1)$$

ermittelt. Hierbei steht m für die flächenbezogene Masse der Empfangsplatte, S für die Plattenfläche und f für die Terzband-Mittenfrequenz. Diese Ergebnisse werden dann mit dem Mittelwert des Realteils der Punktmobilität für alle Kontaktpunkte in Terzbändern $\overline{\text{Re}(Y_{\text{rec}})}$ auf eine charakteristische Empfangsplatte mit der Mobilität $Y_{\infty, \text{rec}}$ umgerechnet

$$L_{Ws, n} = L_{Ws} + 10 \lg \left(\frac{Y_{\infty, \text{rec}}}{\overline{\text{Re}(Y_{\text{rec}})}} \right) \text{ dB}, \quad (2)$$

wozu die Realteile der Eingangsmobilität der Empfangsplatte an den Einleitungsstellen gemessen werden müssen. Schließlich wird die Quelle fiktiv mit einer exakt

festgelegten baulichen Situation verbunden, und es wird der A-bewertete Schalldruckpegel in einem diagonal unter dem Aufstellraum der Whirlwanne gelegenen Raum berechnet. Dieser Schalldruckpegel wird durch den Körperschalleintrag der Whirlwanne hervorgerufen und in der deutschen Fassung der Norm als A-bewerteter abgeglicherer Bezugs-Körperschalldruckpegel bezeichnet.

2.2.2. Ringversuch zur Ermittlung der Unsicherheit

2010 wurde ein Ringversuch durchgeführt, um die mit dem Empfangsplattenverfahren verbundenen Unsicherheiten zu ermitteln ([SCFG10], [WVS11]). Als Testquelle diente ein Inertialshaker, der über einen Kraftsensor mit einer Grundplatte fest verbunden war. Die Grundplatte stand auf drei Beinen auf der Empfangsplatte. Als Anregungssignal wurde breitbandiges Rauschen verwendet. Der zugehörige Leistungsverstärker wurde mit der Quelle versendet.

Tabelle 1 Details der für den Ringversuch verwendeten Empfangsplatten

	Material	Länge m	Breite m	Dicke m	Beschreibung
Lab 1	Beton	2,1	2,7	0,08	freie, elastisch gelagerte Platte
Lab 2		2,8	2,0	0,10	schwingungsisolierte gedämpfte Platte, wie in der Norm beschrieben
Lab 3					
Lab 4					
Lab 5					
Lab 6		5,0	3,7	0,16	aufgelegte Platte, Bodenplatte eines Bauakustik-Prüfstands
Lab 7		3,4	3,4	0,14	Standarddecke für die Überprüfung von Hammerwerken
Lab 8		2,1	3,1	0,13	Decke eines kleinen Hallraums, beschichtet mit einer 8mm Epoxid-Schicht
Lab 9	Alu	1,5	2,1	0,02	freie Aluminiumplatte mit elastischer Lagerung an den Ecken

Von den neun unabhängigen Ergebnissen stammen fünf aus Laboratorien, die zumindest die horizontale Empfangsplatte eines Prüfstands nach [DIN EN 15657-1] zur Verfügung hatten (Tabelle 1, Laboratorien 1 - 5). Die übrigen Teilnehmer verwendeten andere Empfangsplatten, die entweder nicht vom Gebäude getrennt waren oder aus Aluminium bestanden (Tabelle 1, Laboratorien 6 - 9).

Die Quelle war an fünf verschiedenen Orten auf der Empfangsplatte aufzustellen, in einer Ecke, an einer Kante, in Plattenmitte und an zwei weiteren zufälligen Positionen. Die Messungen waren für alle Positionen durchzuführen, und die Ergebnisse mussten einzeln übermittelt werden.

Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist, dass die Quellmobilität wesentlich über der Mobilität der Empfangsplatten liegt. Um dies zu überprüfen, wurde die Quellmobilität direkt gemessen und auch mit dem 2-Stufen-Verfahren ermittelt [WVS11]. Die Mobilität der Empfangsplatten wurde im Rahmen des Ringver-

suchs von allen Teilnehmern gemessen. Es zeigt sich, dass die Quellmobilität in der Tat deutlich über der Mobilität der Empfangsplatten liegt (Bild 2). Alle Empfangsplatten aus Beton liegen überdies in Bezug auf ihre Mobilität dicht beieinander. Lediglich die Aluminiumplatte weist eine um ca. 10 dB höhere Mobilität auf. Die Verlustfaktoren auf den Platten streuen dagegen wesentlich stärker (Bild 3). Bei hohen Frequenzen zeigt die Aluminiumplatte einen deutlich niedrigeren Verlustfaktor, während die an das Gebäude angekoppelte Betonplatte aus Labor sechs einen auffällig hohen Verlustfaktor aufweist.

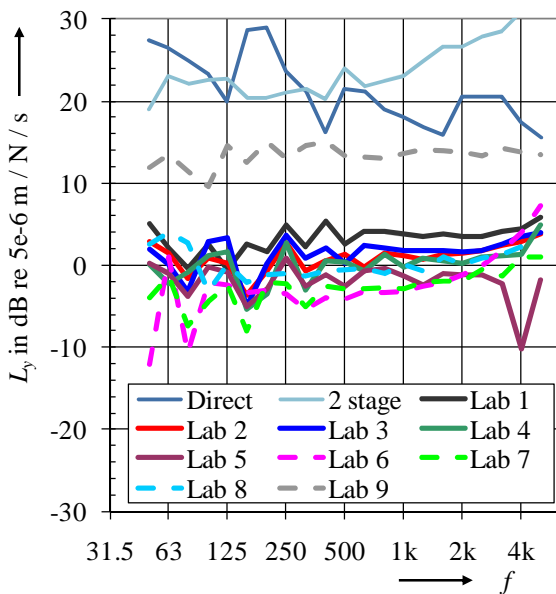


Bild 2 Pegel der Quellmobilitäten (direkt gemessen [SCFG10] und mit dem Zwei-Stufen-Verfahren ermittelt) und der Mobilitäten der Empfangsplatten

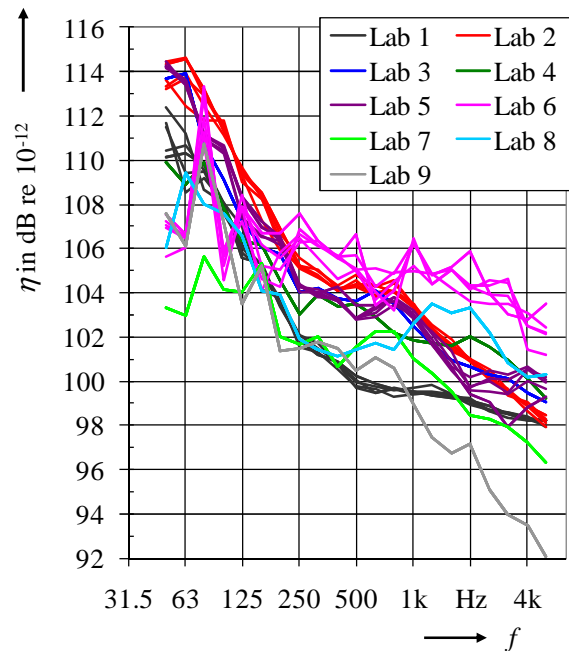


Bild 3 Verlustfaktoren der Platten aus dem Ringversuch

Die Ergebnisse aller Teilnehmer zeigen nur eine geringe Abhängigkeit vom genauen Aufstellungsort der Quelle (Bild 4, Tabelle 2). Lediglich für Labor sechs liefert die Eckposition einen deutlich geringeren A-bewerteten abgeglichenen Bezugs-Körperschalldruckpegel. Des Weiteren ist ein systematischer Versatz zwischen den Laboratorien festzustellen (Bild 4, Tabelle 2), obwohl die Werte auf die jeweilige Eingangsmobilität (Gl. (2)) und zusätzlich auf die wirkende Kraft normiert wurden [WVS11]. Die niedrigsten Werte liefert die Aluminiumplatte, die auch in Bezug auf die Mobilität die Anforderungen der Norm nur bedingt erfüllt (Bild 2).

Da die Quelle in jedem Labor neu montiert werden musste, wurde der Einfluss der Quellmontage separat untersucht. Dazu wurde eine Messung an einer bestimmten Position wiederholt. Es zeigt sich jedoch, dass die dabei auftretenden Abweichungen klein sind im Vergleich zu den Abweichungen zwischen den Laboratorien (Bild 5). Die Montage der Quelle kann damit als Ursache für den systematischen Versatz zwischen den Laboratorien ausgeschlossen werden.

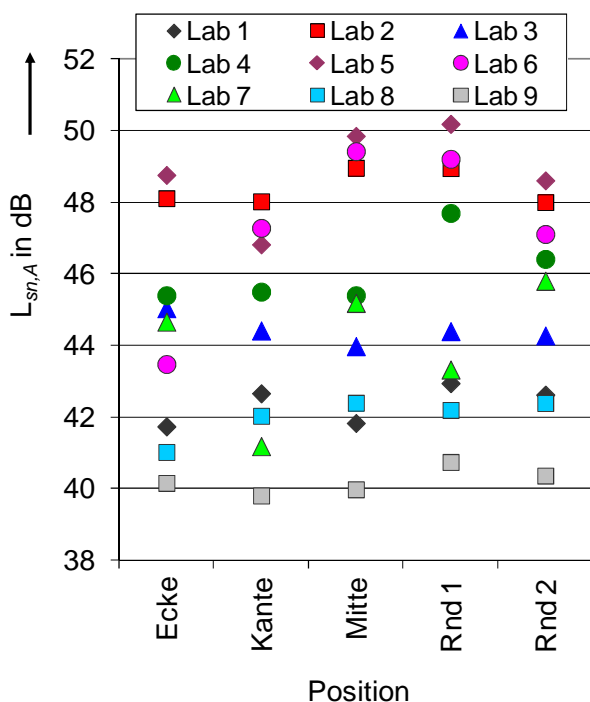


Bild 4 Gemessene A-bewertete abgegliche Bezugskörperschall-druckpegel der einzelnen Teilnehmer an unterschiedlichen Aufstellorten der Schallquelle auf der Empfangsplatte

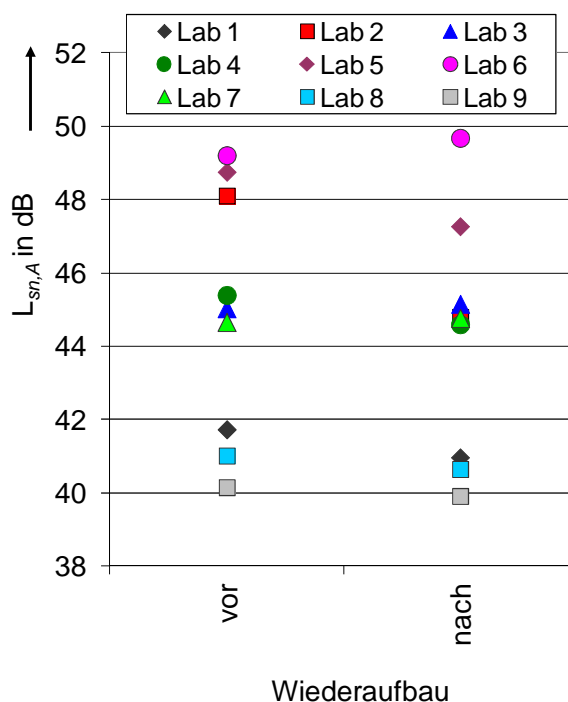


Bild 5 Gemessene A-bewertete abgegliche Bezugskörperschall-druckpegel der einzelnen Teilnehmer vor und nach dem Wiederaufbau der Testquelle

Tabelle 2 Gemessene A-bewertete abgegliche Bezugskörperschall-druckpegel der einzelnen Teilnehmer an unterschiedlichen Aufstellorten der Schallquelle auf der Empfangsplatte

	Ecke dB	Kante dB	Mitte dB	Rnd 1 dB	Rnd 2 dB	Mittel dB	St.abw. dB
Lab 1	41,7	42,7	41,8	42,9	42,6	42,4	0,5
Lab 2	48,1	48,0	49,0	48,9	48,0	48,4	0,5
Lab 3	45,0	44,4	44,0	44,4	44,3	44,4	0,4
Lab 4	45,4	45,5	45,4	47,7	46,4	46,1	1,0
Lab 5	48,8	46,8	49,9	50,2	48,6	48,8	1,3
Lab 6	43,5	47,3	49,4	49,2	47,1	47,3	2,4
Lab 7	44,7	41,2	45,2	43,3	45,8	44,0	1,8
Lab 8	41,0	42,0	42,4	42,2	42,4	42,0	0,6
Lab 9	40,2	39,8	40,0	40,7	40,4	40,2	0,4

Die Unabhängigkeit der Messergebnisse vom genauen Aufstellort der Quelle auf der Empfangsplatte eröffnet die Möglichkeit, die Messungen in einem Laboratorium als Wiederholmessung aufzufassen. Davon ausgehend wurde mit den Ergebnissen aus normgemäßen Prüfständen (Laboratorien eins bis fünf) eine Auswertung nach [DIN EN ISO 5725-2] vorgenommen. Die spektralen Werte für die Wiederhol-Standardabweichungen liegen bei ca. 3 dB (Bild 6). Sie sind außerdem für alle fünf Laboratorien in etwa gleich groß. Die Vergleichs-Standardabweichung liegt dagegen bei ca. 4 dB (Bild 7). Nur bei 4 und 5 kHz sind die Werte erheblich größer in Folge eines sehr stark abweichenden Messwertes aus einem Laboratorium.

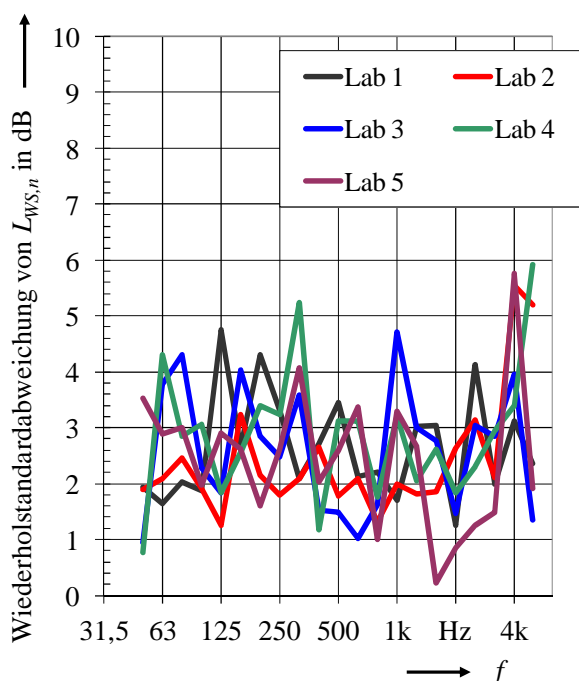


Bild 6 Wiederhol-Standardabweichungen der abgeglichenen Bezugs-Körperschalldruckpegel in den einzelnen Laboratorien

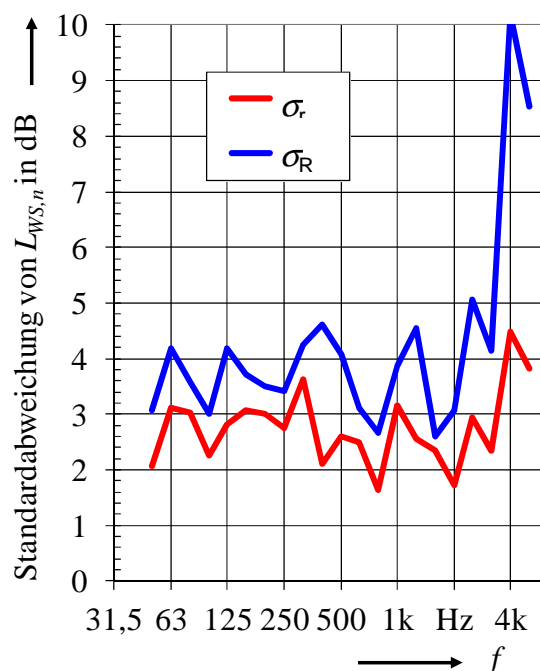


Bild 7 Mittlere Wiederhol-Standardabweichung und Vergleichs-Standardabweichung der abgeglichenen Bezugs-Körperschalldruckpegel

Die Wiederhol-Standardabweichungen der A-Werte sind mit 0,4 bis 1,3 dB deutlich niedriger als die Wiederhol-Standardabweichungen der Terzwerte (Bild 8). Dies deutet darauf hin, dass bei den Wiederholungsmessungen nur geringe Korrelationen vorliegen, so dass die Summenbildung die Unsicherheit deutlich reduziert. Bei den Vergleichs-Standardabweichungen ist dieser Effekt wesentlich geringer. Hier reduziert sich der Terzwert von ca. 4 dB lediglich auf einen A-Wert von 2,8 dB (Bild 9). Die Vergleichs-Standardabweichung aus Ringversuchen wird in der gesamten angewandten Akustik und auch in der Bauakustik als Schätzwert für die Unsicherheit verwendet [ISO DIS 12999-1]. Mit 2,8 dB für die Quellcharakterisierung ist dieser Wert erheblich größer als für das bewertete Schalldämm-Maß mit 1,2 dB und für den Normtrittschallpegel mit 1,5 dB. Zu bedenken ist auch, dass die hier verwendete Testquelle breitbandigen Schall abgestrahlt hat. Häufig enthalten Installationsgeräusche auch Töne, für die noch größere Unsicherheiten zu erwarten sind.

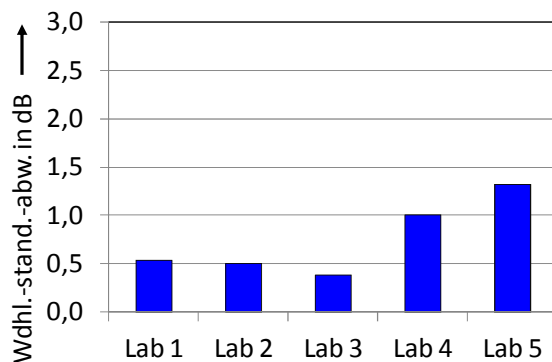


Bild 8 Wiederhol-Standardabweichungen der A-bewerteten abgeglichenen Bezugs-Körperschalldruckpegel in den einzelnen Laboratorien

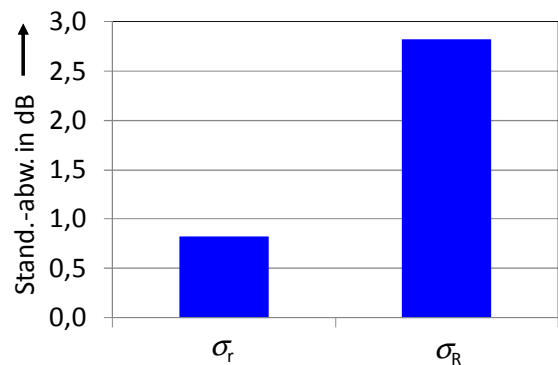


Bild 9 Mittlere Wiederhol-Standardabweichung und Vergleichs-Standardabweichung der A-bewerteten abgeglichenen Bezugs-Körperschalldruckpegel

Die zusätzlichen Messergebnisse der Laboratorien sechs bis neun wurden anschließend mit der Methode der kritischen Differenzen nach [DIN EN ISO 140-2] überprüft. Die Grundidee ist, dass ein Mittelwert sowie Wiederhol- und Vergleichs-Standardabweichungen aus einem Ringversuch vorliegen. Wenn ein weiteres Labor nun Messungen ausführt, so sollte die Abweichung zwischen dem Mittelwert aus dem neuen Labor x und dem Mittelwert des Ringversuchs eine kritische Differenz in nicht mehr als 5 % der Fälle überschreiten. Die kritische Differenz ist

$$\text{CrD}_{95} \left(\left| \overline{L_{WS,n}} - \overline{L_{WS,n,x}} \right| \right) = 2 \sqrt{\sigma_R^2 \left(1 + \frac{1}{p} \right) - \sigma_r^2 \left(1 + \frac{1}{p} - \frac{1}{q_x} - \frac{1}{p^2} \sum_{i=1}^p \frac{1}{q_i} \right)}, \quad (3)$$

wobei angenommen wurde, dass das neue Labor q_x Messungen ausgeführt hat. Mit

$$q_i = q_x = q = p = 5 \quad (4)$$

vereinfacht sich Gl. (3) zu

$$\text{CrD}_{95} \left(\left| \overline{L_{WS,n}} - \overline{L_{WS,n,x}} \right| \right) = 2 \sqrt{\sigma_R^2 \left(1 + \frac{1}{p} \right) - \sigma_r^2 \left(1 - \frac{1}{p q} \right)}. \quad (5)$$

Die aus den Ergebnissen der Laboratorien sechs bis neun berechneten Differenzen liegen für die Terzwerte weitgehend unter den kritischen Differenzen (Bild 10). Die A-Werte liegen vollständig innerhalb der kritischen Differenz (Bild 11). Überschreitungen der kritischen Differenz sind bei 50 und 80 Hz (Labor 6), bei 100 Hz (Labor 7), bei 250 und 800 Hz (Labor 8) und bei 100-200 Hz und 630-1000 Hz (Labor 9) festzustellen. Statistisch sind somit nur die Ergebnisse der Aluminiumplatte aus Labor 9 auffällig. Die Auswertung nach [DIN EN ISO 5725-2] korrespondiert damit sehr gut mit dem subjektiven Eindruck der Ergebnisübersicht (Bild 4).

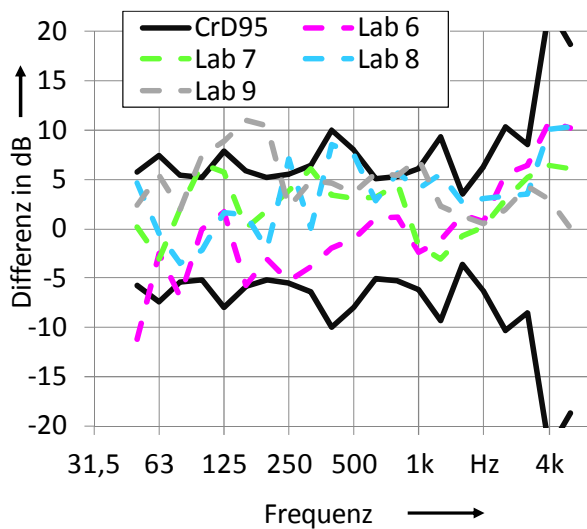


Bild 10 Kritische Differenzen der abgeglichenen Bezugs-Körperschall-druckpegel nach Gl. (5) und individuelle Abweichungen der Ergebnisse aus den von der Norm abweichenden Laboratorien

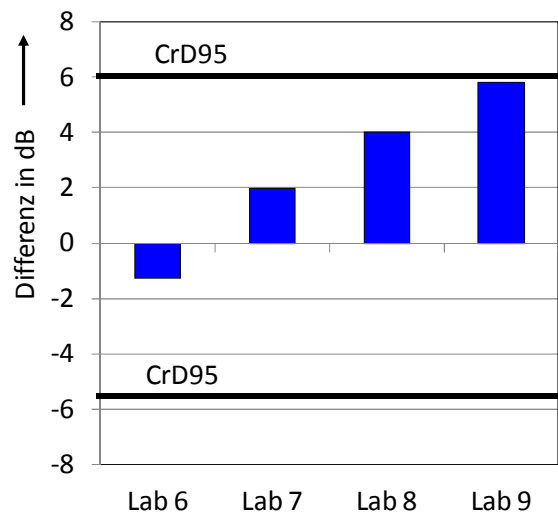


Bild 11 Kritische Differenzen der A-bewerteten abgeglichenen Bezugs-Körperschall-druckpegel nach Gl. (5) und individuelle Abweichungen der Ergebnisse aus den von der Norm abweichenden Laboratorien

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mit diesem Ringversuch die prinzipielle Anwendbarkeit des Verfahrens nach [DIN EN 15657-1] zur Charakterisierung von Körperschallquellen nachgewiesen werden konnte. Die Unsicherheit, abgeschätzt aus der Vergleichs-Standardabweichung, liegt bei ca. 4,0 dB in Terzen und bei ca. 2,8 dB für den A-Wert. Die Wiederhol-Standardabweichung liegt typischerweise bei 3,0 dB in Terzen und bei 0,8 dB für den A-Wert. Zudem zeigte sich, dass auch auf Empfangsplatten, die nicht in allen Punkten den Anforderungen nach [DIN EN 15657-1] genügen, Messergebnisse erzielt werden konnten, die statistisch nicht im Widerspruch zu denjenigen Ergebnissen standen, die in völliger Übereinstimmung mit [DIN EN 15657-1] erzielt wurden.

2.3. Messungen an Armaturen nach DIN EN ISO 3822

2.3.1. Messprinzip

Geräusche, die beim Wasserdurchfluss durch Armaturen und Geräte der Wasserinstallation entstehen, können nach [DIN EN ISO 3822] im Labor geprüft werden. Die zu prüfende Armatur wird dazu an das Ende der Messleitung angeschlossen, die an der Wand eines Raumes befestigt ist (Bild 12). Das von der Armatur erzeugte Geräusch wird von der Messleitung auf die Messwand übertragen und von dort in den Messraum abgestrahlt. Gemessen wird der räumliche Mittelwert des Schalldruckpegels im Messraum. Da die so ermittelten Messwerte stark von Details des Laboraufbaus abhängen, wird das von der Armatur erzeugte Geräusch in Relation zu dem von einem Installationsgeräuschnormal (IGN) erzeugten Geräusch (Bild 13) gesetzt. Es handelt sich bei diesem Messverfahren demnach um ein Substitutionsverfahren. Außerdem sind die Konstruktion und die Befestigung der Messleitung an der Messwand genau festgelegt. So muss die Messwand z.B. eine flächenbezogene Masse zwischen 100 und 250 kg/m² bei einer Fläche zwischen 8 und 12 m² aufweisen.

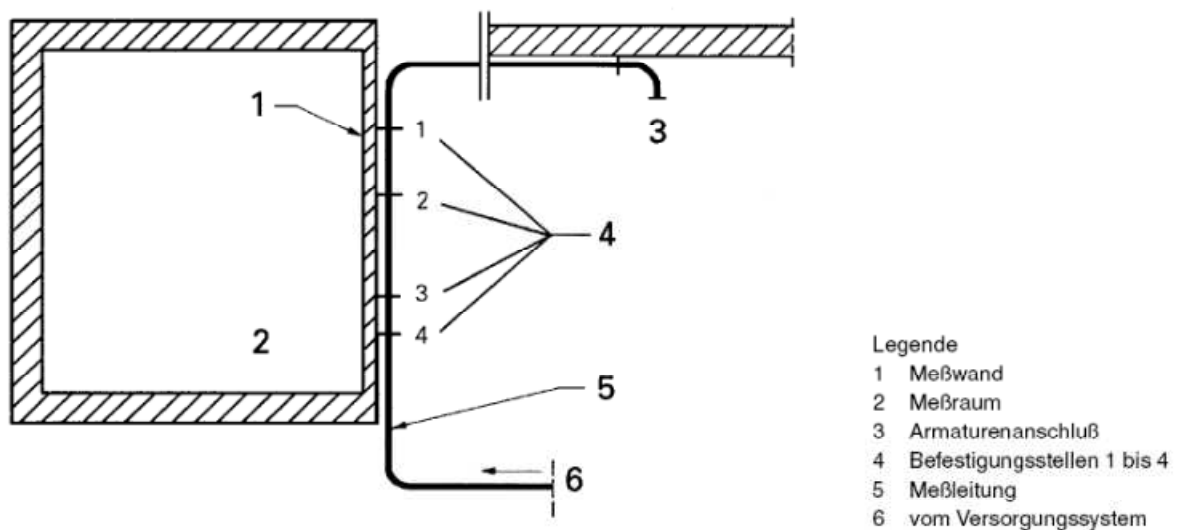


Bild 1: Beispiel einer Prüfanordnung

Bild 12 Laboraufbau zur Messung von Armaturengeräuschen nach [DIN EN ISO 3822]

Als frequenzabhängige Kenngröße dient der Armaturengeräuschpegel je Oktave L_{apn} . Er ergibt sich aus

$$L_{apn} = L_n - (L_{sn} - L_{srn}) \quad (6)$$

mit dem mittleren Oktavschallpegel im Messraum in der n-ten Oktave L_n , dem entsprechenden Oktavschallpegel bei Betrieb des Installationsgeräuschnormal L_{sn} bei einem Fließdruck von 0,3 MPa und dem Bezugswert des Oktavschallpegels für das IGN L_{srn} bei einem Fließdruck von 0,3 MPa (Tabelle 3). Hauptkenngröße ist jedoch der Armaturengeräuschpegel L_{ap} , der sich durch die A-Bewertung des Oktavspektrums gemäß

$$L_{ap} = 10 \lg \sum_{n=1}^6 10^{\frac{L_n - (L_{sn} - L_{srn}) + A_n}{10 \text{ dB}}} \quad (7)$$

ergibt. Dabei bezeichnet der Index n die Oktaven zwischen 125 Hz und 4 kHz und A_n den Wert der A-Bewertung bei diesen Frequenzen.

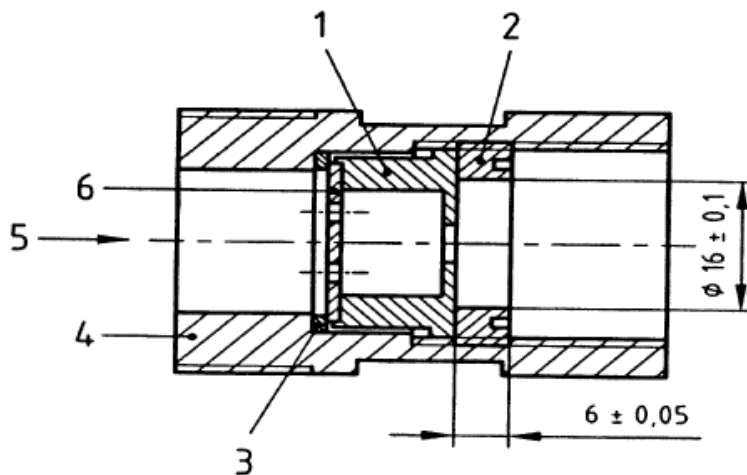


Bild 13 Installationsgeräuschnormal (IGN) zur Messung von Armaturengeräuschen nach [DIN EN ISO 3822]

Tabelle 3 Bezugswerte der Oktavschaallpegel L_{sm} in dB nach [DIN EN ISO 3822]

Oktavmittenfrequenz in Hz	125	250	500	1k	2k	4k
Bezugswerte der Oktavschaallpegel L_{sm} in dB	35	39	42	42	37	25

Ein Bezug auf die Nachhallzeit oder die äquivalente Absorptionsfläche des Messraums ist bei diesem Verfahren nicht erforderlich, da mit Gleichungen (6) und (7) ein absoluter Bezug zum Pegel des Installationsgeräuschnormals hergestellt wird. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass sich die Absorption im Messraum bei der Messung an Armatur und Installationsgeräuschnormal nicht unterscheidet. Es wird jedoch generell gefordert, dass die Nachhallzeit im Messraum in den Oktaven von 125 Hz bis 2 kHz zwischen 1 und 5 s liegt. Zudem muss das Volumen des Messraums mindestens 30 m³ betragen, wobei für neue Laboratorien ein Messraumvolumen von 50 m³ empfohlen wird. Die Eigengeräusche der Installationsanlage müssen mindestens 10 dB unter dem Geräusch der zu prüfenden Armatur liegen. Außerdem ist die Messung des Fremdgeräuschs vorgeschrieben. Bei Fremdgeräuschabständen über 15 dB ist keine Korrektur durchzuführen. Liegt der Fremdgeräuschabstand zwischen 6 und 15 dB, so ist eine entsprechende Korrektur durchzuführen. Bei noch geringerem Fremdgeräuschabstand wird der Korrekturwert zu 1,3 dB festgesetzt, und es muss im Prüfbericht vermerkt werden, dass die angegebenen Armaturengeräuschpegel an der Grenze der Messbarkeit liegen.

Kritisch anzumerken ist zu diesem Messverfahren, dass die ermittelten Kenngrößen nicht direkt als Eingangsgrößen für Prognoserechnungen im ausgeführten Gebäude verwendet werden können. Der Grund liegt darin, dass der Armaturengeräuschpegel lediglich beschreibt, um wieviel dB eine Armatur leiser oder lauter ist als das Installationsgeräuschnormal. Eine Klassifizierung in laute und leise Armaturen ist jedoch möglich.

2.3.2. Ringversuch zur Ermittlung der Unsicherheit

Die Unsicherheiten des Messverfahrens nach [DIN EN ISO 3822] wurden in einem von der MPA Dortmund organisierten Ringversuch eingehend untersucht [KW04]. Die Messergebnisse wurden der PTB dankenswerterweise zur Verfügung gestellt. Für die Messungen wurden ein geräuscharmer Strömungswiderstand, ein Installationsgeräuschnormal sowie eine Mischbatterie verwendet. Letztere wurde in den Stellungen kalt, warm und mischend eingesetzt. Das Installationsgeräuschnormal wurde bei Fließdrücken von 0,15 und 0,2 MPa betrieben. Insgesamt nahmen 18 europäische Laboratorien an dem Ringversuch teil.

Die verwendeten Geräuschquellen decken einen weiten Bereich von Installationsgeräuschpegeln ab (Bild 14). Mit Installationsgeräuschpegeln von deutlich über 30 dB in einem breiten Frequenzbereich ist das Installationsgeräuschnormal bei dem höheren Fließdruck am lautesten. Die leiseste Quelle aus dem Ringversuch, der geräuscharme Strömungswiderstand liegt ca. 30 dB niedriger.

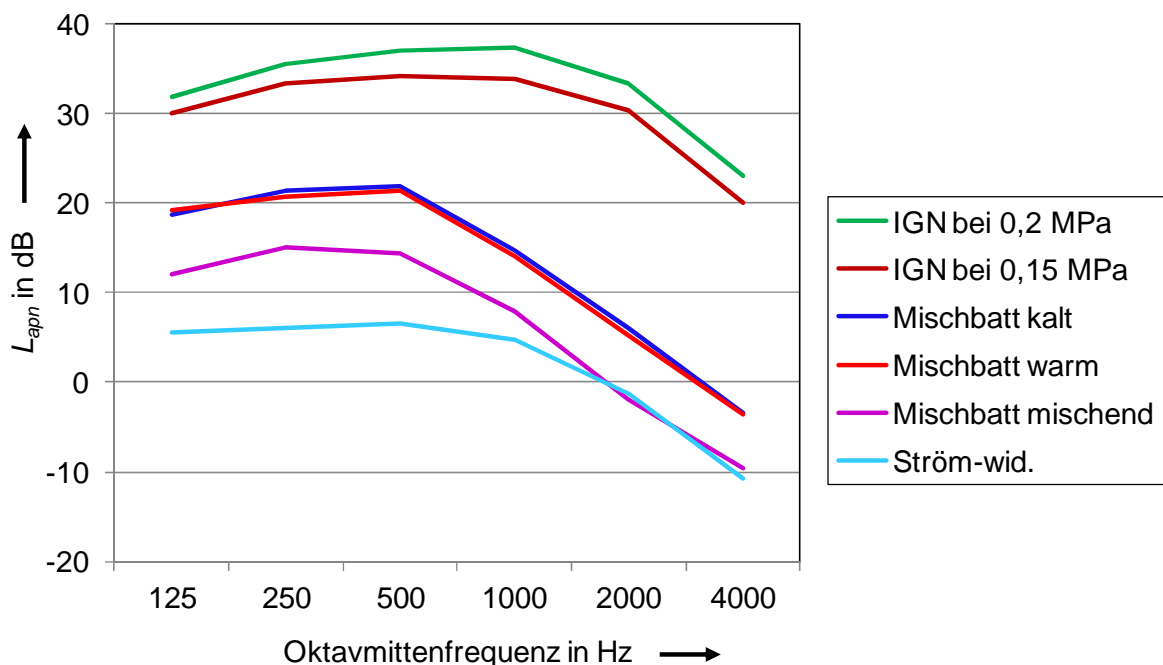


Bild 14 Über alle Ringversuchsteilnehmer gemittelte Armaturengeräuschpegel nach [DIN EN ISO 3822] aus dem Ringversuch [KW04]

Die Standardabweichung der Ergebnisse der Teilnehmer kann als Schätzwert für die Vergleichs-Standardabweichung des Verfahrens herangezogen werden. Diese Werte liegen zwischen 0,7 und 8,0 dB (Bild 15). Für die beiden leisesten Quellen zeigt sich eine mit der Frequenz deutlich fallende Standardabweichung, während für die anderen Quellen die Standardabweichung nahezu frequenzunabhängig ist. Insgesamt ist festzustellen, dass die Standardabweichung vom Armaturengeräuschpegel selbst abhängt. Je lauter das Armaturengeräusch, desto geringer ist die Standardabweichung.

Die Wiederhol-Standardabweichung dieser Messungen wurde an der MPA Dortmund in einem Vorversuch ermittelt. Sie liegt in Oktaven bei ca. 0,2 dB und ist damit deutlich kleiner als die Vergleichs-Standardabweichung.

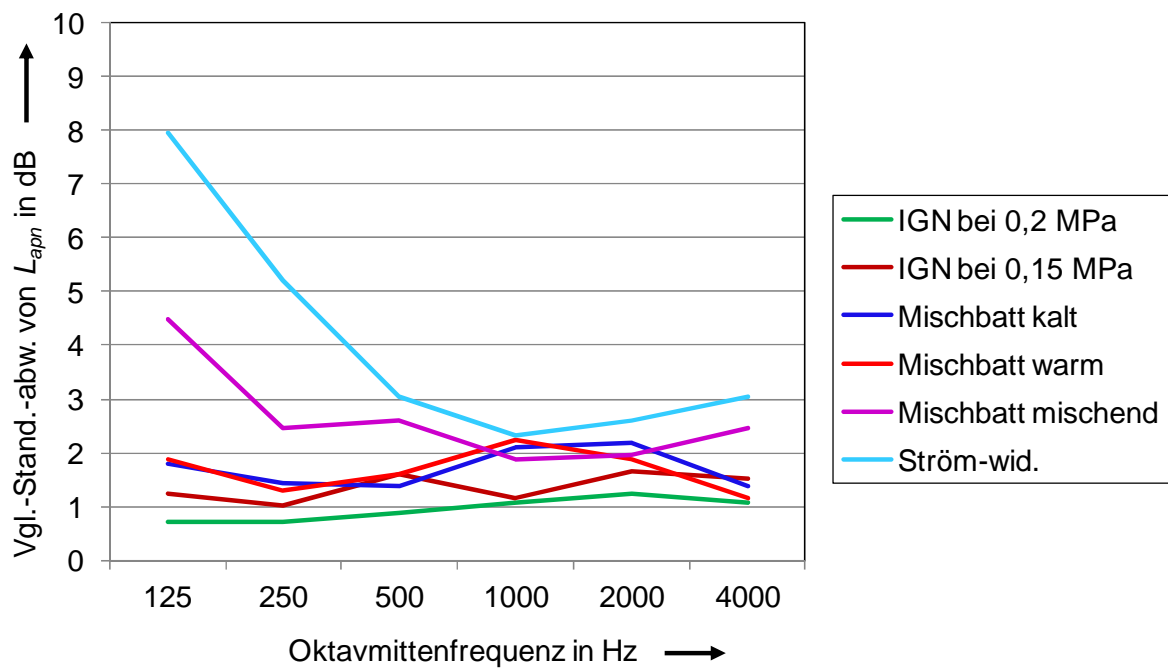


Bild 15 Vergleichs-Standardabweichungen von Armaturengeräuschpegeln nach [DIN EN ISO 3822] aus dem Ringversuch [KW04]

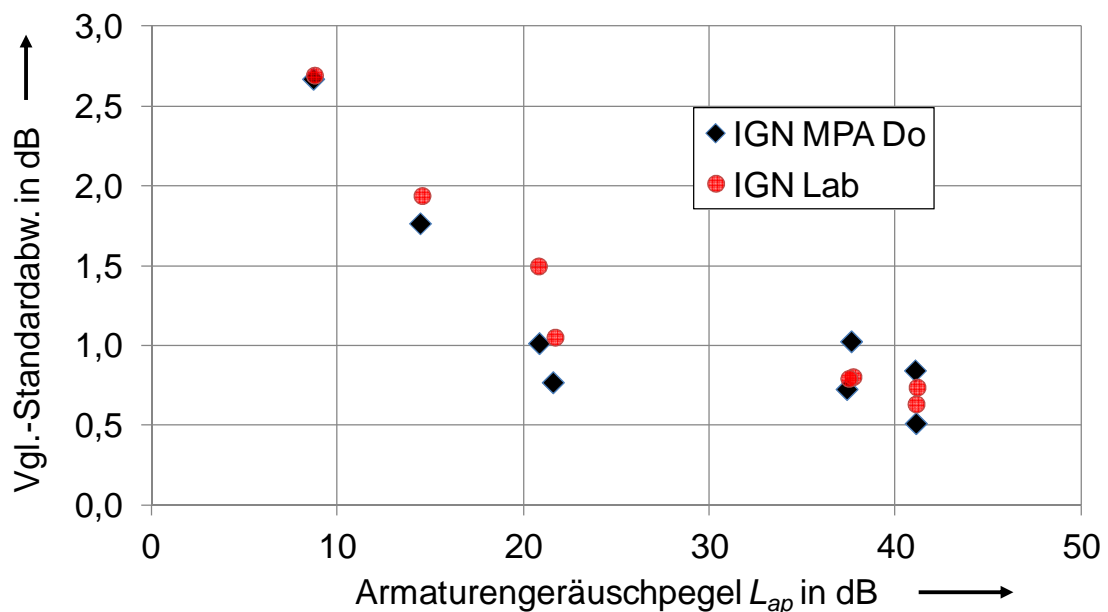


Bild 16 Vergleichs-Standardabweichung der A-bewerteten Armaturengeräuschpegel nach [DIN EN ISO 3822] aus dem Ringversuch [KW04] bei Bezug auf das mitgesendete Installationsgeräuschnormal der MPA Dortmund und bei Bezug auf die laboreigenen Installationsgeräuschnormale

Die Vergleichs-Standardabweichungen der A-bewerteten Armaturengeräuschpegel liegen zwischen 0,5 und 2,7 dB (Bild 16). Wie aufgrund der Oktavwerte bereits zu erwarten war, zeigen sie eine klare Abhängigkeit vom Armaturengeräuschpegel

selbst. Die dargestellten Ergebnisse sind unterschieden nach dem für die Messung als Referenz verwendeten Installationsgeräuschnormal. Bei Verwendung des von der MPA mitgesendeten Installationsgeräuschnormals sinken die Standardabweichungen für die Mischbatterie ($L_{ap} = 14 \dots 23$ dB) leicht, wohingegen die anderen Geräusche keine systematische Änderung zeigen. Da das Messverfahren nach [DIN EN ISO 3822] die Verwendung der laboreigenen Installationsgeräuschnormale vorsieht, sind die zugehörigen Standardabweichungen realistischer.

Es lässt sich hier festhalten, dass die Unsicherheit des A-bewerteten Armaturengeräuschpegels nach [DIN EN ISO 3822] zwischen 0,5 und 2,7 dB liegt. Für Luftschallmessungen in der Bauakustik sind die Unsicherheiten damit recht groß, verglichen z.B. mit dem Wert für bewertete Schalldämm-Maße von 1,2 dB nach [ISO DIS 12999-1].

2.4. Produktstreuungen

Zu Produktstreuungen der schalltechnischen Kennwerte von Körperschallquellen liegen aktuell keine Kenntnisse vor. Lediglich für eine künstliche Testschallquelle, das Normhammerwerk gibt es eine Abschätzung. Danach liegt die Standardabweichung für verschiedene Realisierungen der nominell identischen Quelle frequenzabhängig zwischen 0,2 und 1,0 dB [Wi12]. Hierzu ist anzumerken, dass es sich beim Hammerwerk um eine Quelle handelt, die speziell für eine hohe Stabilität konstruiert wurde. Die genannten Standardabweichungen können daher als Untergrenze für real auftretende Produktstreuungen angesehen werden.

3. Prognosen bei Installationsgeräuschen

Das einzige genormte Verfahren für die Prognose von Installationsgeräuschen ist die [DIN EN 12354-5]. Der insgesamt in einem schutzbedürftigen Raum durch eine haustechnische Anlage erzeugte Schalldruckpegel wird auf drei Ursachen zurückgeführt. Dies sind die Luftschallübertragung durch Kanäle und Rohre, die Luftschallübertragung durch die Baukonstruktion und die Körperschallübertragung durch die Baukonstruktion. Im Empfangsraum werden die Einzelbeiträge dieser verschiedenen Übertragungswege energetisch überlagert. Alle Berechnungen werden in Oktavbändern zwischen 63 Hz und 4 kHz ausgeführt.

Ausgangspunkt für die Berechnung der Luftschallübertragung durch Kanäle und Rohre ist der Schalleistungspegel der Quelle, z.B. des Lüfters. Von diesem wird die auf dem Ausbreitungspfad wirksame Dämpfung subtrahiert, um schließlich unter Berücksichtigung der Abstrahlcharakteristik am Auslass den mittleren Schalldruckpegel im Empfangsraum bezogen auf eine äquivalente Absorptionsfläche von 10 m² zu berechnen.

Die Luftschallübertragung durch das Gebäude wird in enger Analogie zu den anderen Teilen der Normenreihe DIN EN 12354 behandelt. Ausgehend vom Luftschalleistungspegel der Quelle wird ermittelt, wie stark die Wände des Senderraums mit Luftschall angeregt werden. Anschließend wird über das Flankenschalldämmmaß ein Schalldruckpegel im Empfangsraum berechnet, wiederum bezogen auf 10 m² Absorption.

Zur Berechnung der Körperschallübertragung durch das Gebäude nach [DIN EN 12354-5] ist als wesentliche Eingangsgröße die charakteristische Körperschall-

leistung der Quelle erforderlich. Unter Berücksichtigung je eines speziellen Kopplungs- und Anpassungsterms wird ermittelt, wie viel Schallleistung in das angeregte Bauteil übertragen wird. Die Berechnung des Schalldruckpegels im Empfangsraum erfolgt wiederum über das Flankenschalldämmmaß unter Bezug auf eine Absorption von 10 m².

Damit steht ein prinzipielles Berechnungswerkzeug für den Schall aus haustechnischen Anlagen zur Verfügung. Einer sofortigen Anwendung steht jedoch entgegen, dass die benötigten Eingangsgrößen nur in wenigen Ausnahmefällen verfügbar sind.

Tabelle 4 Abschätzung der Unsicherheit eines prognostizierten A-bewerteten Installationsgeräuschpegels

	u in dB
Messung der Quelle im Labor	2,8
Produktstreuung der Quelle im Labor	1,0
Produktstreuung der Quelle am Bau	1,0
Kopplungsterm	1,0
Anpassungsterm	1,0
Messung der Flankenschalldämmung im Labor	1,2
Produktstreuung des Bauteils im Labor	1,0
Produktstreuung des Bauteils am Bau	1,0
Unsicherheit des Prognoseergebnisses	3,9

Zur Unsicherheit der A-bewerteten Prognoseergebnisse lässt sich eine nur sehr grobe Schätzung vornehmen (Tabelle 4). Ausgehend von einer Unsicherheit der Quellbeschreibung von 2,8 dB (Kapitel 2.2) und einer geschätzten realistischen Produktstreuung von 1,0 dB ergibt sich eine Unsicherheit als Eingang in die Prognoserechnung von

$$u_{\text{input}} = \sqrt{2,8^2 + 1^2 + 1^2} \text{ dB} = 3,1 \text{ dB} \quad (8)$$

Analog zu [WS08] wurde hier die Produktstreuung zwei Mal berücksichtigt, da ein Exemplar bei der Messung im Labor und ein anderes bei der Montage im Gebäude verwendet wird. Des Weiteren werden die Unsicherheiten des Kopplungs- und des Anpassungsterms mit je einem dB abgeschätzt. Für die Unsicherheit des Flankendämm-Maßes werden 1,2 dB angesetzt [WS08], wobei auch hierfür wieder die Produktstreuung des betreffenden Elements zwei Mal zu berücksichtigen ist (Tabelle 4). Wird nun davon ausgegangen, dass die Schallübertragung auf einem einzigen Weg erfolgt, so ergibt sich eine Unsicherheit von 3,9 dB für das Prognoseergebnis. Falls sich der Schallenergiefluss auf viele Wege verteilt, so ergeben sich wesentlich mehr Einflussgrößen, die entsprechend ihrem Energieanteil zu wichten sind. Bei einer gleichmäßigen Verteilung der Energien auf viele Ausbreitungswege reduziert sich die Unsicherheit des Prognoseergebnisses auf 3,4 dB. Im Vergleich dazu ist die Unsicherheit einer prognostizierten

Luftschalldämmung mit Werten zwischen 1 und 2 dB im Massivbau deutlich geringer, zumal die Eingangsdaten (Tabelle 4) eher niedrig angesetzt wurden.

Angesichts dessen ist es als ein hervorragendes Ergebnis anzusehen, dass die in [RMF11] an Heizungsanlagen festgestellten Abweichungen zwischen prognostiziertem und gemessenem A-bewertetem Schalldruckpegel in der Größenordnung von nur 2 dB liegen.

4. Messungen am Bau

4.1 Aktuelle Normungssituation

Installationsgeräusche wurden in Deutschland in der Vergangenheit nach [DIN 52219] gemessen. Diese Norm ist durch die [DIN EN ISO 10052] in Kombination mit [DIN 4109-11] ersetzt worden. Für die Überarbeitung der [DIN 4109] stellt sich damit die Frage, ob die Anforderungswerte wie geplant unverändert übernommen werden können, oder ob eine Änderung zu empfehlen ist. Dazu werden im Folgenden beide Messverfahren miteinander verglichen.

4.2 Messung nach DIN EN ISO 10052 und DIN 4109-11

Der Schalldruckpegel von haustechnischen Anlagen wird nach der [DIN EN ISO 10052] im Empfangsraum an zwei festen Positionen gemessen. Eine Position muss nahe der Ecke mit den akustisch härtesten Oberflächen, vorzugsweise in einer Entfernung von 0,5 m von den Wänden sein. Die zweite Position muss im Hallfeld des Raums sein. Die Entfernung zu sämtlichen Schallquellen muss mindestens 1,5 m betragen. In jeder Position muss die Messzeit so gewählt werden, dass mindestens ein Betriebszyklus der Anlage erfasst wird. Es sind insgesamt drei Zyklen zu verwenden, einer für die Messung in der Raumecke und zwei für die Messung im Hallfeld. In Deutschland ist der $L_{AF,max}$ zu verwenden, der sich aus den drei Messergebnissen nach

$$L_{AFmax} = 10 \log \left[\frac{1}{3} \left(10^{L_{AF,max,1}/10} + 10^{L_{AF,max,2}/10} + 10^{L_{AF,max,3}/10} \right) \right] \text{ dB} \quad (9)$$

berechnet. Damit werden die Ergebnisse in der Raumecke und im Hallfeld im Verhältnis 1 zu 2 gewichtet. Die Raumeigenschaften werden in der [DIN EN ISO 10052] durch das Nachhallmaß k berücksichtigt

$$L_{AFmax,n} = L_{AFmax} - k - 10 \lg \frac{A_0 T_0}{0,16 V} \text{ dB} \quad (10)$$

Es ergibt sich aus der mittleren Nachhallzeit der Oktaven mit den Mittenfrequenzen 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz

$$k = 10 \log \left[\frac{1}{3} \frac{(T_{500} + T_{1000} + T_{2000})}{T_0} \right] \text{ dB} \quad (11)$$

Zusätzlich fließen noch das Raumvolumen V sowie die Bezugswerte für die Nachhallzeit und das Absorptionsvermögen ein

$$T_0 = 0,5 \text{ s}; A_0 = 10 \text{ m}^2 \quad . \quad (12)$$

Die Messung der Nachhallzeit muss nach [DIN EN ISO 3382-2] erfolgen. Die in [DIN EN ISO 10052] ermöglichte Schätzung mit Hilfe von Tabellen ist in Deutschland nach [DIN 4109-11] nicht zulässig.

Weiterhin wurde in der [DIN 4109-11] festgelegt, dass eine Störgeräuschemessung grundsätzlich durchzuführen ist. Falls der Störabstand zwischen 6 und 10 dB liegt, ist eine Korrektur gemäß

$$L = 10 \log \left[10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10} \right] \text{ dB} \quad (13)$$

durchzuführen. Dabei ist L der korrigierte Signalpegel, L_{sb} der gemeinsame Pegel von Signal und Fremdgeräusch und L_b der Fremdgeräuschpegel. Sollte die Differenz zwischen dem Signalpegel und dem Fremdgeräuschpegel kleiner als 6 dB sein, wird der einem Störabstand von 6 dB entsprechende Korrekturwert von 1,3 dB verwendet. Ein so ermittelter Wert ist im Messbericht mit „≤“ anzugeben, so dass sofort ersichtlich ist, dass es sich um eine Maximalabschätzung handelt.

Neben diesen Festlegungen werden in der [DIN EN ISO 10052] auch die für die Messung zu verwendenden Betriebsbedingungen und die Betriebszyklen für die verschiedenen haustechnischen Anlagen beschrieben. Detaillierte Anleitungen existieren für den Betrieb von Armaturen, Duschkabinen, Badewannen, Toiletten, für das Füllen und Entleeren von Waschbecken und Badewannen, für mechanische Lüftungen, haustechnische Heizungs- und Kühlanlagen, Fahrstühle, Müllabwurfschächte, Kessel, Gebläse und andere haustechnische Nebenanlagen, motorbetriebene Garagentore sowie sonstige Arten von haustechnischen Anlagen.

4.3 Messung nach DIN 52219

Hauptkenngröße in der [DIN 52219] ist der Installations-Schallpegel. Er ist der in Gebäuden beim Gebrauch einer Armatur gemessene Schallpegel mit der Frequenzbewertung A und der Zeitbewertung Fast. Gemessen wird er im jeweiligen schutzbedürftigen Raum etwa in Raummitte. Voraussetzung für die Messung ist ein möglichst niedriger Fremdgeräuschpegel. Ist die Differenz zwischen dem zu messenden A-Schallpegel beim Betätigen der Anlage und dem Fremdgeräuschpegel größer als 10 dB, so ist keine Korrektur des Messwerts erforderlich. Bei Fremdgeräuschabständen zwischen 3 und 10 dB ist ein Korrekturwert vom Messwert abzuziehen, der zwischen 3 und 0,5 dB liegt und aus einem Nomogramm ermittelt wird. Ist der Fremdgeräuschabstand kleiner als 3 dB, kann der A-bewertete Schallpegel nicht genau bestimmt werden. Er ist jedoch kleiner als der gemessene Wert.

Die [DIN 52219] enthält auch detaillierte Aussagen zur Betätigung der überprüften Anlagen. So sind die Ventile von Auslaufarmaturen während der Messung mehrmals langsam voll zu öffnen und zu schließen. Mischbatterien sind hierbei getrennt für Kalt- und Warmwassereinlauf zu betätigen. Druckspüler und Spülkästen sind bis zum Anschlag zu betätigen. Bei Spülkästen ist bis zum Schließen des Füllventils zu messen. Als Messwert gilt bei der Untersuchung von Auslaufarmaturen und WC-Spüleinrichtungen der größte A-bewertete Schallpegel, der sich bei dreimaligem Öffnen und Schließen der Armatur im arithmetischen Mittel ergibt. Kurzzeitige Spitzen, die beim Betätigen der Armaturen und Geräte entstehen, sind nicht zu berücksichtigen.

Die gemessenen A-bewerteten Schalldruckpegel werden auf eine äquivalente Absorptionsfläche von $A_0 = 10 \text{ m}^2$ bezogen und dann als Installations-Pegel

$$L_{\text{IN}} = L + 10 \log \frac{A}{A_0} \text{ dB} \quad (14)$$

bezeichnet, wobei die Absorption A aus dem Mittelwert der Nachhallzeiten zwischen 250 Hz und 2 kHz berechnet wird und L den A- und F-bewerteten Schalldruckpegel bezeichnet. In „Zweifelsfällen“ können auch frequenzabhängige Pegel in Oktavbändern zwischen 125 Hz und 4 kHz gemessen werden, die anschließend mit den Nachhallzeiten in den entsprechenden Oktavbändern korrigiert werden. Aus diesem korrigierten Spektrum kann dann ein A-Wert berechnet werden, der in Bezug auf die Korrektur genauer ist als der direkt ermittelte A-Wert.

4.4 Vergleichsmessungen nach beiden Messverfahren

4.4.1 Messaufgaben

In der PTB wurde eine interne Vergleichsmessung durchgeführt mit dem Ziel, Messunsicherheiten praktisch zu erfassen und systematische Unterschiede zwischen den verschiedenen Messverfahren aufzuzeigen. Die Vorgehensweise war analog zu den Referenzmessungen, die für die Schallschutz-Vergleichsmessungen durchgeführt werden. Verschiedene Messteams mit möglichst verschiedener technischer Ausstattung führen an bestimmten Messobjekten die gleiche Messaufgabe durch. Im hier beschriebenen Fall bestand die Messaufgabe darin, in zwei verschiedenen Empfangsräumen die Installationsgeräusche von vier unterschiedlichen Geräuschquellen zu bestimmen. Hierbei sollte sowohl das in [DIN 52219] als auch das in [DIN EN ISO 10052] beschriebene Verfahren zur Anwendung kommen, wobei im letzteren Fall [DIN 4109-11] mit zu berücksichtigen ist. Insgesamt haben sechs Messteams teilgenommen. Die Messungen fanden in einem Gebäudetrakt des Helmholtz-Baus 2 in der PTB statt. Bild 17 zeigt eine Prinzipskizze des Gebäudetraktes mit den Empfangsräumen und der Lage der Schallquellen.

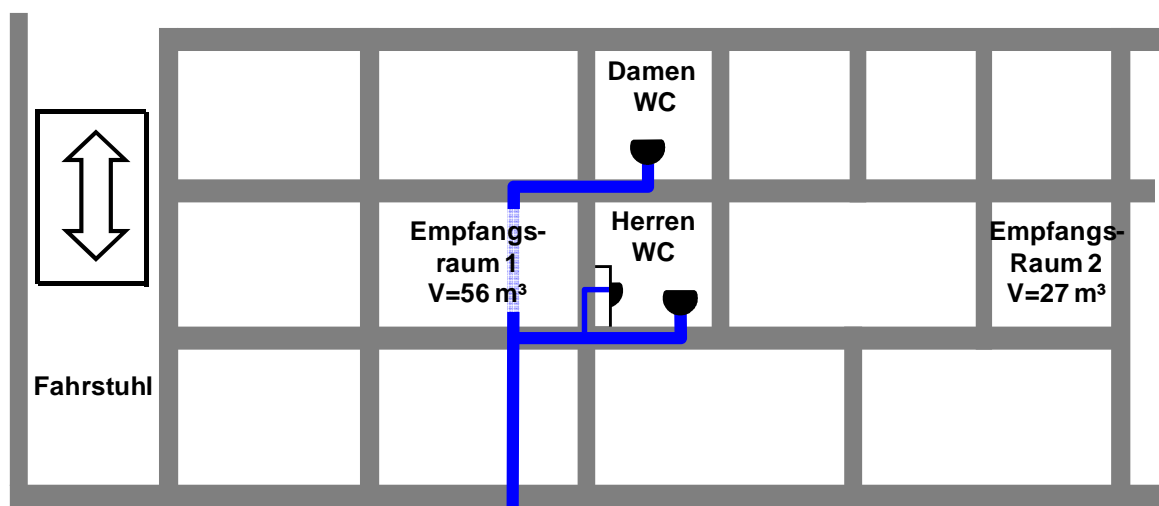


Bild 17 Prinzipskizze des Bürogebäudes, in dem die Installationsgeräusche gemessen wurden. Das Abwasserrohr liegt in der flurseitigen Wand des Empfangsraums 1

4.4.2 Beschreibung der Empfangsräume

Raum 1 hat ein Volumen von ca. 55,8 m³. Zur Verbesserung der Raumakustik ist die Decke teilweise mit absorbierendem Material verkleidet. Bild **30** (Seite 27) zeigt einen typischen Verlauf der Nachhallzeit, welche im mittleren Frequenzbereich ca. 0,5 s beträgt. Der Raum grenzt direkt an das Herren-WC an. Das Fallrohr zur Entwässerung des ein Stockwerk höher liegenden Damen-WCs ist in die flurseitige Wand eingelassen. In diesen Fallstrang ist auf Fußbodenniveau auch die Entwässerung der Herrentoilette eingekoppelt.

Raum 2 ist mit einem Volumen von ca. 27,1 m³ nur etwa halb so groß wie Raum 1. Allerdings sind hier keine Akustikplatten verbaut, so dass die ebenfalls in Bild **30** eingezeichnete Nachhallzeit im mittleren Frequenzbereich knapp 1 s beträgt. Die Lage von Raum 2 wurde bewusst gewählt, um einen Raum mit größerem Abstand zu den Schallquellen zu haben. Hier ist zu erwarten, dass die Messungen hinsichtlich des Störgeräuschabstandes kritischer sind als in Raum 1.

4.4.3 Beschreibung der Schallquellen und der Betriebszyklen

Fahrrstuhl

Der Fahrstuhl befindet sich an der Stirnseite des Gebäudetraktes. Der Maschinenraum ist auf dem Dachboden untergebracht. Der Fahrkorb besitzt keine Türen. Die Zugangstüren in den Fluren müssen manuell betätigt werden. Aus diesem Grund wurde für die Messzyklen auf das eigentlich in der Norm vorgeschriebene Öffnen und Schließen der Türen verzichtet. Da [DIN 52219] keine Angaben zur Messung von Aufzügen macht, wurde der in [DIN EN ISO 10052] beschriebene Zyklus analog angewendet. Weiterhin wurden zwei von der Norm abweichende Betriebszyklen untersucht, so dass sich insgesamt drei Betriebszyklen ergaben:

- Normzyklus: Die Fahrt beginnt in der untersten Etage. Auf dem Weg in die oberste Etage findet auf jeder Etage ein Zwischenhalt statt. Ist die oberste Etage erreicht, fährt der Fahrstuhl ohne Zwischenhalt zurück in die Ausgangsposition. Die Dauer des Zyklus beträgt ca. 65 s.
- Nur Aufwärtsfahrt: Der Fahrstuhl fährt ohne Zwischenhalt von der untersten zur obersten Etage durch. Die Dauer dieses Zyklus beträgt ca. 22 s.
- Nur Abwärtsfahrt: Der Fahrstuhl fährt ohne Zwischenhalt von der obersten zur untersten Etage durch. Die Dauer dieses Zyklus beträgt ebenfalls ca. 22 s.

Der Fahrstuhl war stets mit einer Person belastet.

Urinal (im Herren-WC)

An der zu Empfangsraum 1 angrenzenden Wand sind zwei Urinale angebracht. Die Installation ist als Vorwand-Installation ausgeführt, und die Urinale sind mit Druckspülern ausgestattet. Für die Messung wurde der Betätigungshebel bis zum Anschlag durchgedrückt und wieder losgelassen, wobei der Spülvorgang erst durch das Loslassen des Betätigungshebels ausgelöst wird. Ein Zyklus dauert ca. 15 s. Aus technischen Gründen wurde das linke der beiden Urinale verwendet.

Toilette im Herren-WC

Die Toilette im Herren-WC ist als wandhängendes WC in Vorwandinstallation ausgeführt. Die Installation befindet sich an der flurseitigen Wand. Zur Messung wurde die Drückerplatte betätigt und ca. 5 s gehalten, bis der Spülkasten vollständig

entleert war. Dies war notwendig, weil bei nur kurzer Betätigung der Drückerplatte nur eine Teilentleerung stattfindet, die ggf. nicht reproduzierbar ist. Die Dauer des Messzyklus betrug ca. 45 s.

Toilette im Damen-WC

Die Toilette im Damen-WC ist technisch identisch mit der Toilette im Herren-WC. Interessant ist, dass das abgehende Fallrohr so verlegt ist, dass es direkt in der flurseitigen Wand von Empfangsraum 1 verläuft. Das Herren-WC wird ebenfalls über diesen Fallstrang entwässert.

Bei allen Messungen wurde darauf geachtet, dass die Bedienelemente so betätigt werden dass keine relevanten Nutzergeräusche entstehen. Dies spiegelt sich auch in den gemessenen Pegel-Zeit-Verläufen wieder.

4.4.4 Spektrale und zeitliche Struktur der Geräusche

Im Folgenden sind jeweils der Pegel-Zeit-Verlauf und das Oktavspektrum zum Zeitpunkt des maximalen A-Pegels für jede Quelle, jeden Messraum sowie für Raum- und Eckmikrofon beispielhaft dargestellt. Bemerkenswert ist, dass der durch einen roten Balken im Zeitverlauf dargestellte Maximalwert an den beiden Mikrofonpositionen auch bei Quellen mit ausgeprägten transienten Komponenten (Fahrstuhl) durchaus zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten kann, obwohl es sich um das gleiche Geräuschereignis handelt. Ist einem Signalverlauf ein einzelner Maximalwert eindeutig zuzuweisen, oder handelt es sich um ein eher stationäres Signal, wurde auf eine Markierung verzichtet. Die teilweise auftretende Unterschreitung der Störgeräuschpegel in den Oktavspektren ist darauf zurückzuführen, dass Nutzsignal und Störgeräusch nicht gleichzeitig gemessen werden können. Es kann also durchaus vorkommen, dass während der Messung ein niedrigerer Störgeräuschpegel auftritt als derjenige, welcher vorher oder nachher durch eine Messung bestimmt wurde.

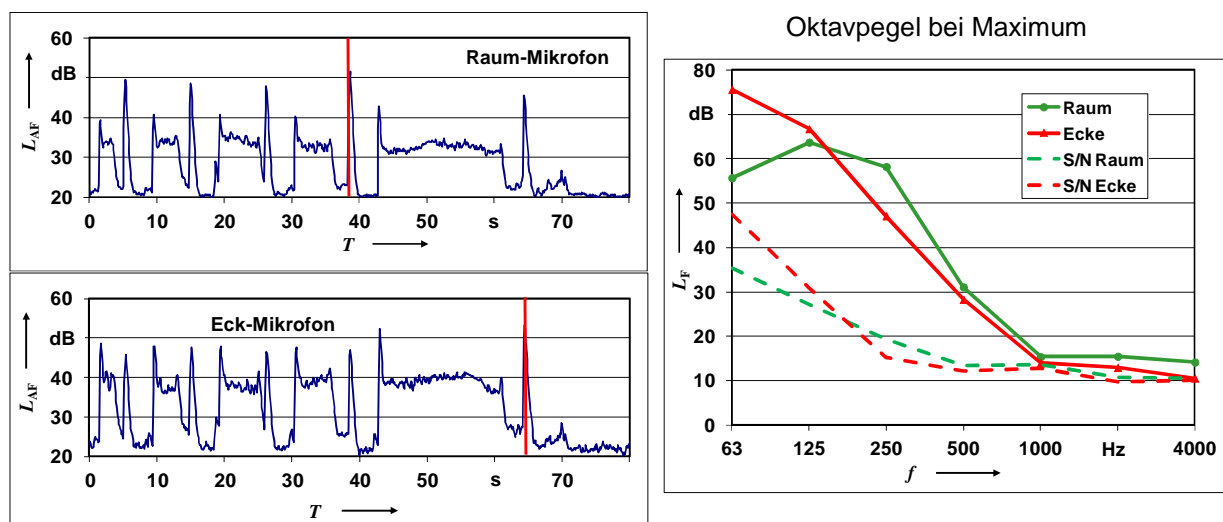


Bild 18: Raum 1 ($V = 56 \text{ m}^3$), Fahrstuhl, Normfahrt

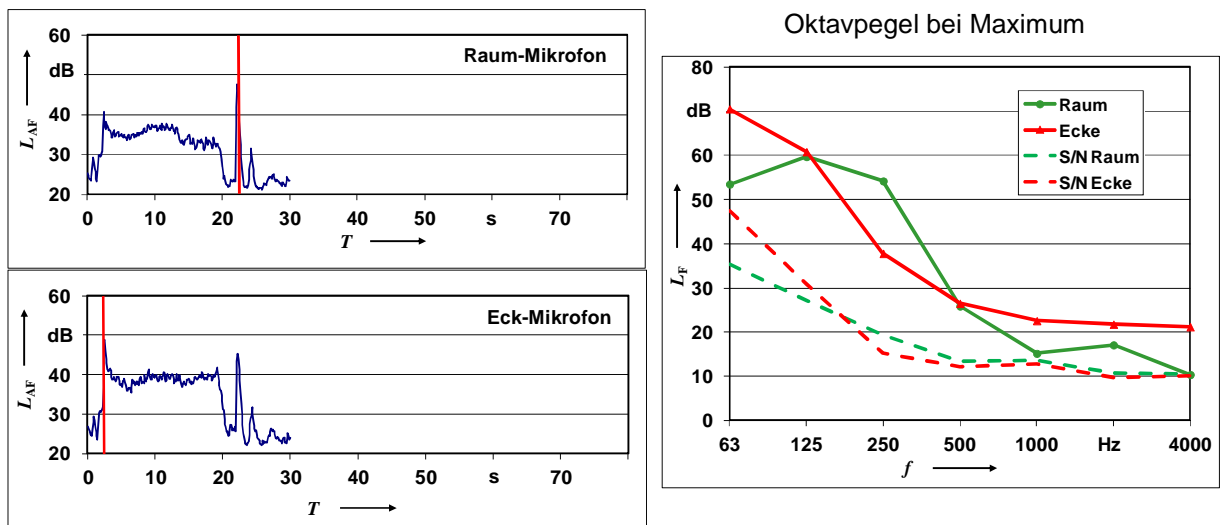


Bild 19: Raum 1 ($V=56 \text{ m}^3$), Fahrstuhl, Aufwärtsfahrt

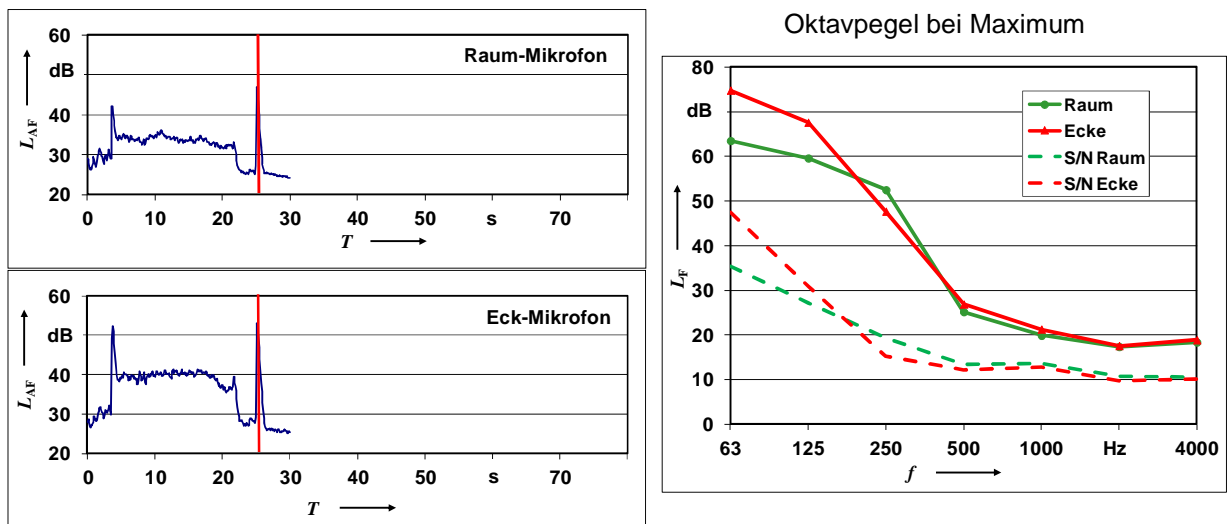


Bild 20: Raum 1 ($V=56 \text{ m}^3$), Fahrstuhl, Abwärtsfahrt

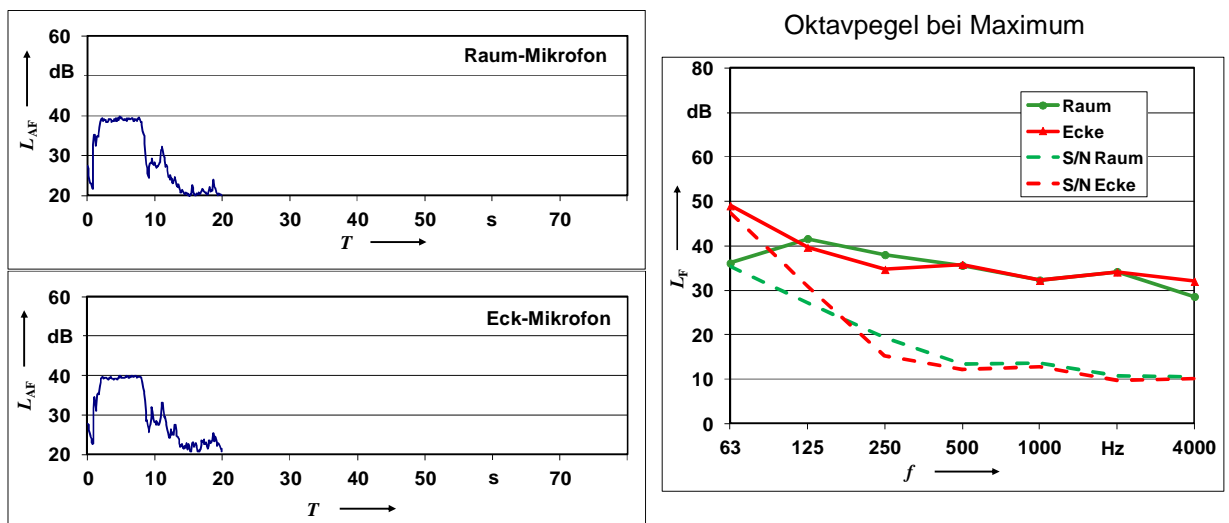


Bild 21: Raum 1 ($V=56 \text{ m}^3$), Spülung Urinal

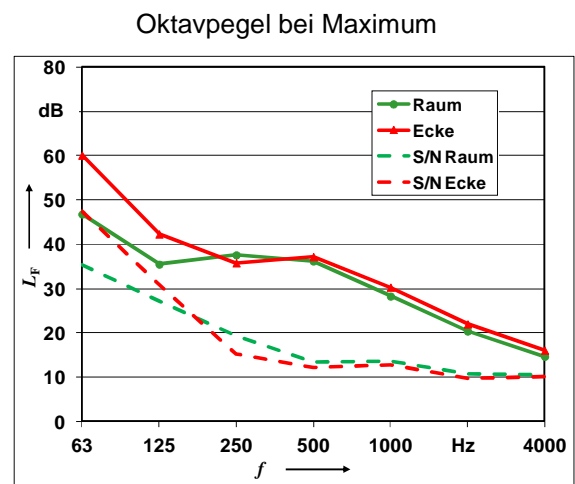
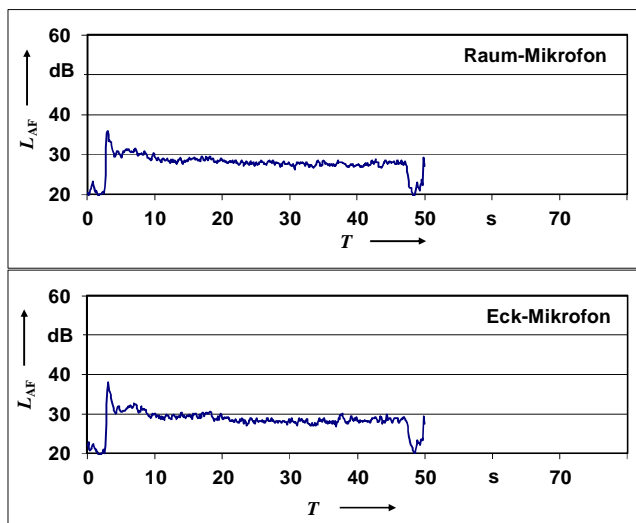


Bild 22: Raum 1 ($V=56 \text{ m}^3$), Spülung Herren-WC

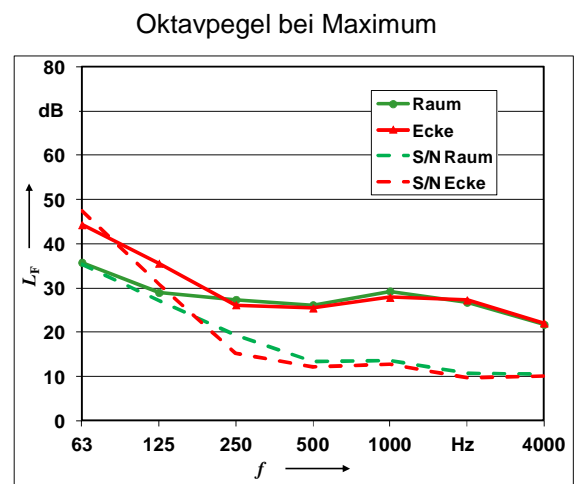
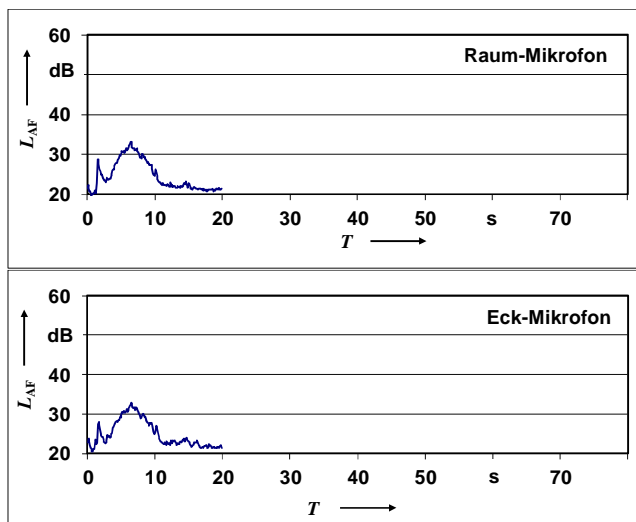


Bild 23: Raum 1 ($V=56 \text{ m}^3$), Spülung Damen-WC

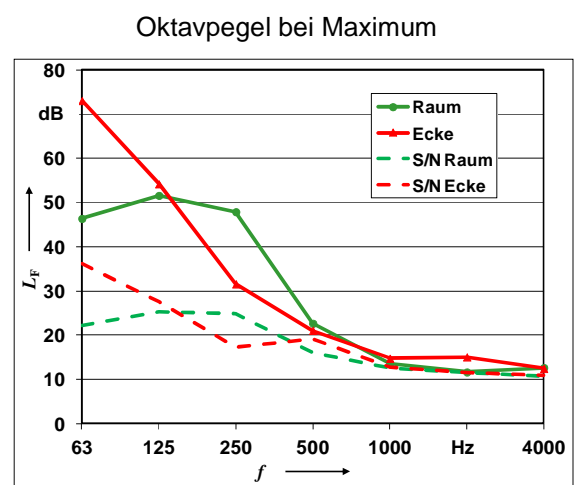
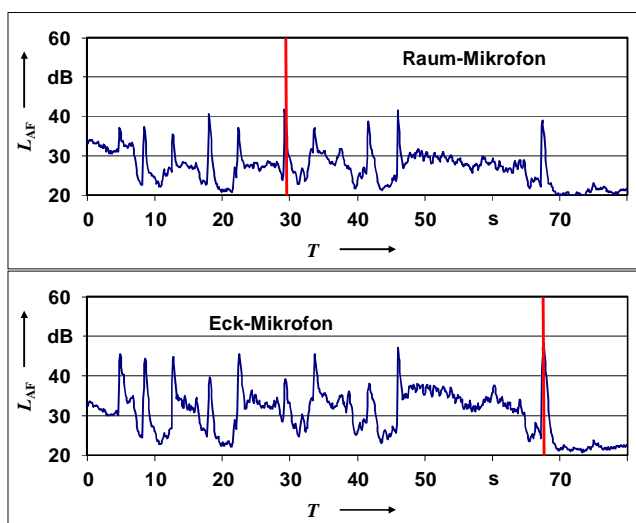


Bild 24: Raum 2 ($V=27 \text{ m}^3$), Fahrstuhl, Normfahrt

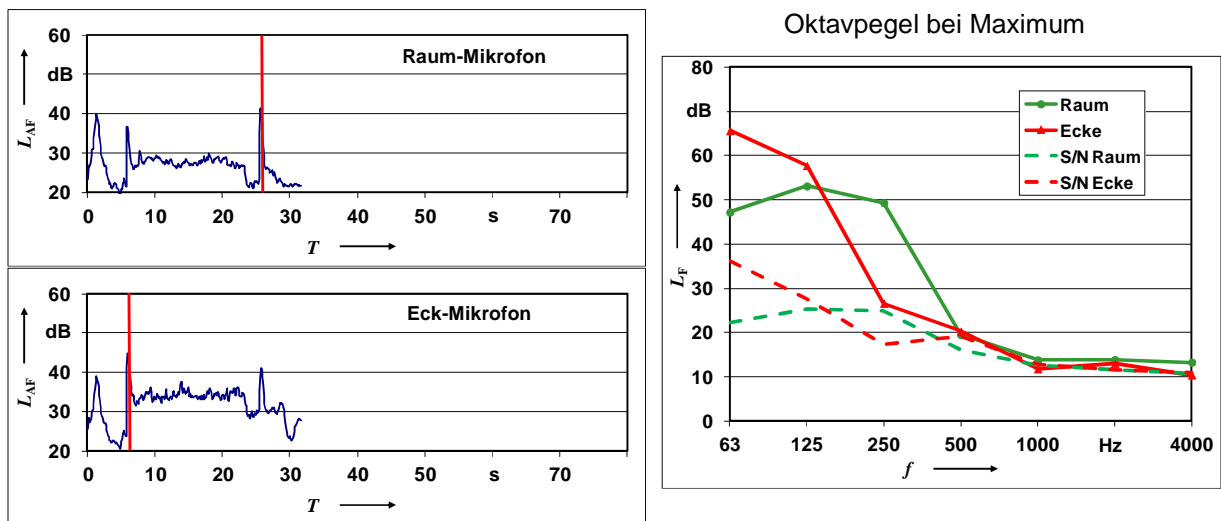


Bild 25: Raum 2 (V=27 m³), Fahrstuhl, Aufwärtsfahrt

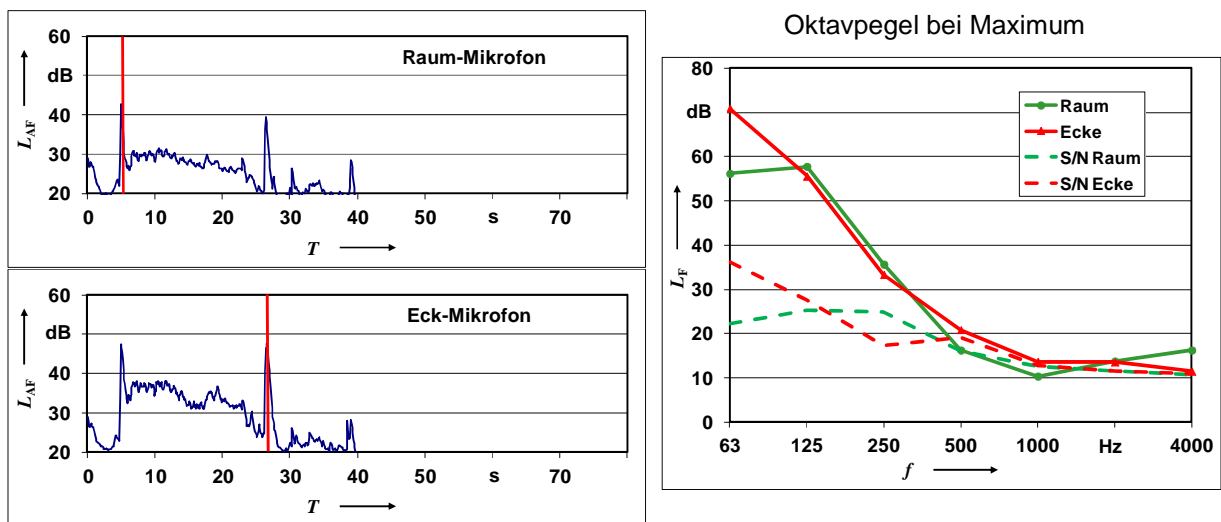


Bild 26: Raum 2 (V=27 m³), Fahrstuhl, Abwärtsfahrt

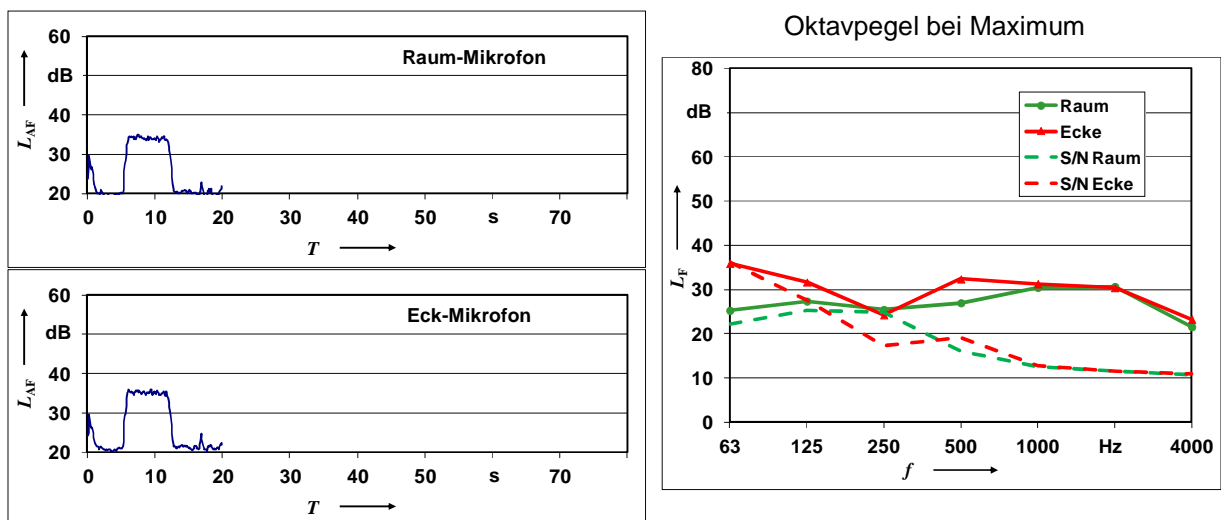


Bild 27: Raum 2 (V=27 m³), Spülung Urinal

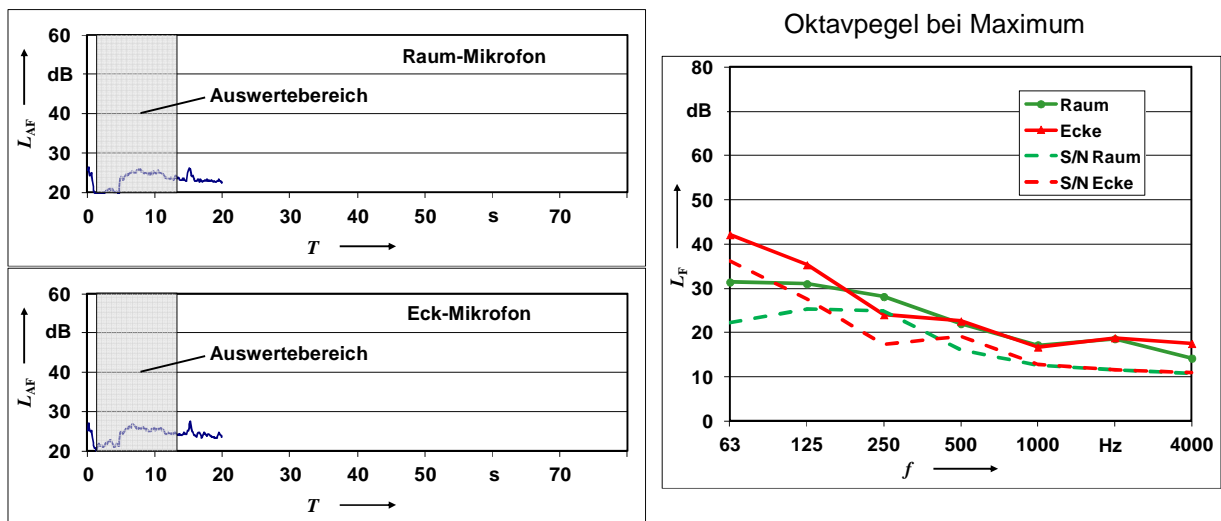


Bild 28: Raum 2 ($V=27 \text{ m}^3$), Spülung Herren-WC

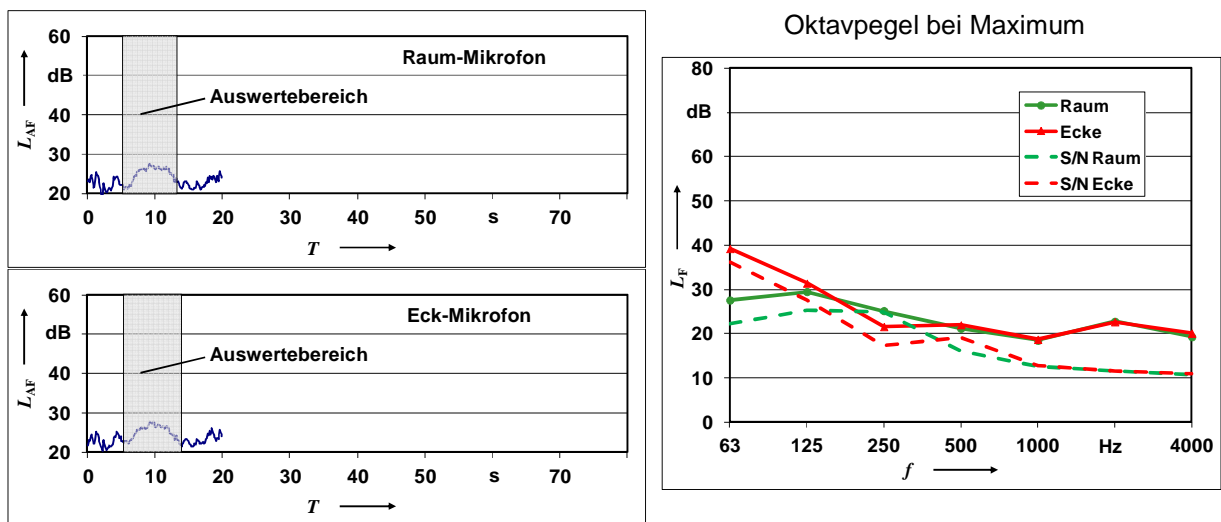


Bild 29: Raum 2 ($V=27 \text{ m}^3$), Spülung Damen-WC

4.4.5 Nachhallzeiten und ihre Unsicherheiten

Während [DIN EN ISO 52210] unter bestimmten Randbedingungen die Abschätzung der Nachhallkorrektur mittels einer Tabelle zulässt, fordert [DIN 4109-11] grundsätzlich die Messung der Nachhallzeit, und zwar explizit in Oktavbändern. Die Bestimmung des Nachhallmaßes k erfolgt dann gemäß Gleichung (11). Als Mindestanforderung wird die Verwendung von einer Lautsprecherposition und zwei Mikrofonpositionen verlangt, allerdings haben die meisten an der Vergleichsmessung teilnehmenden Messteams mehr Positionen verwendet. Zur Nachhallmessung kam sowohl abgeschaltetes Rauschen als auch die Methode der integrierten Impulsantwort zum Einsatz. Wie in Bild 30 ersichtlich ist, weisen die gemessenen Nachhallzeiten außer im Frequenzband 63 Hz eine recht niedrige Standardabweichung auf. Dies wird auch bei Betrachtung der in Bild 31 dargestellten resultierenden Nachhallmaße deutlich. Die signifikante Abweichung des von Messteam 1 in Empfangsraum 2 ermittelten Wertes für k erklärt sich dadurch, dass in diesem Fall die messende Person sowohl bei der Nachhall- als auch bei der Pegelmessung im Empfangsraum anwesend war. In Empfangsraum 1 kommt dieser Effekt nicht zum

Tragen, da dieser Raum eine deutlich kürzere Nachhallzeit besitzt und somit die relative Änderung der äquivalenten Absorptionsfläche deutlich kleiner ausfällt.

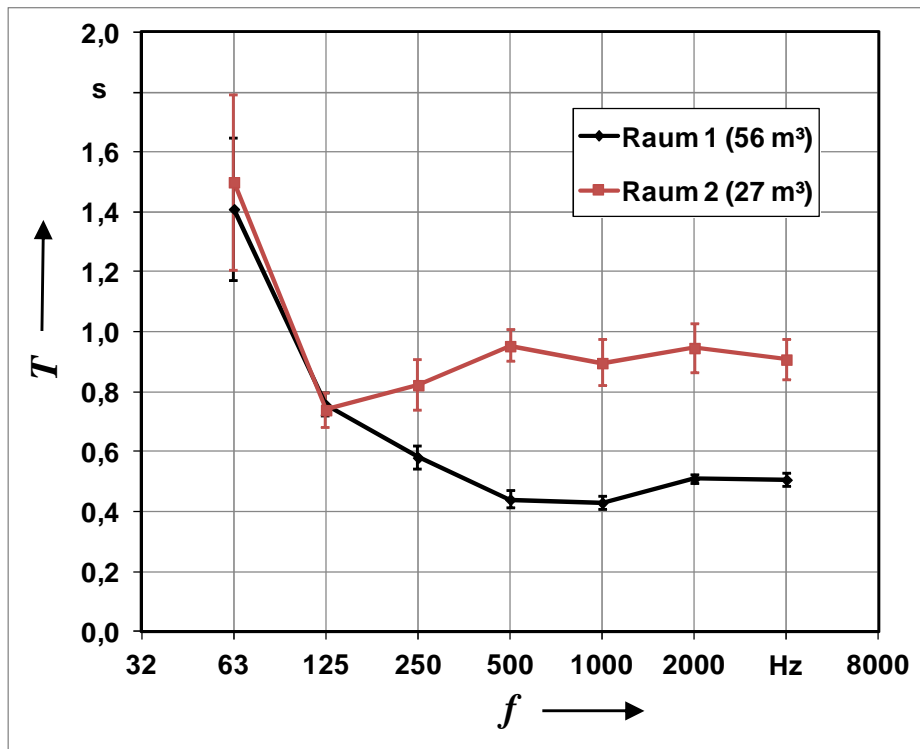


Bild 30: Oktav-Nachhallzeiten beider Räume, mittleres Ergebnis aller Messteams, die Fehlerbalken markieren die einfache Standardabweichung

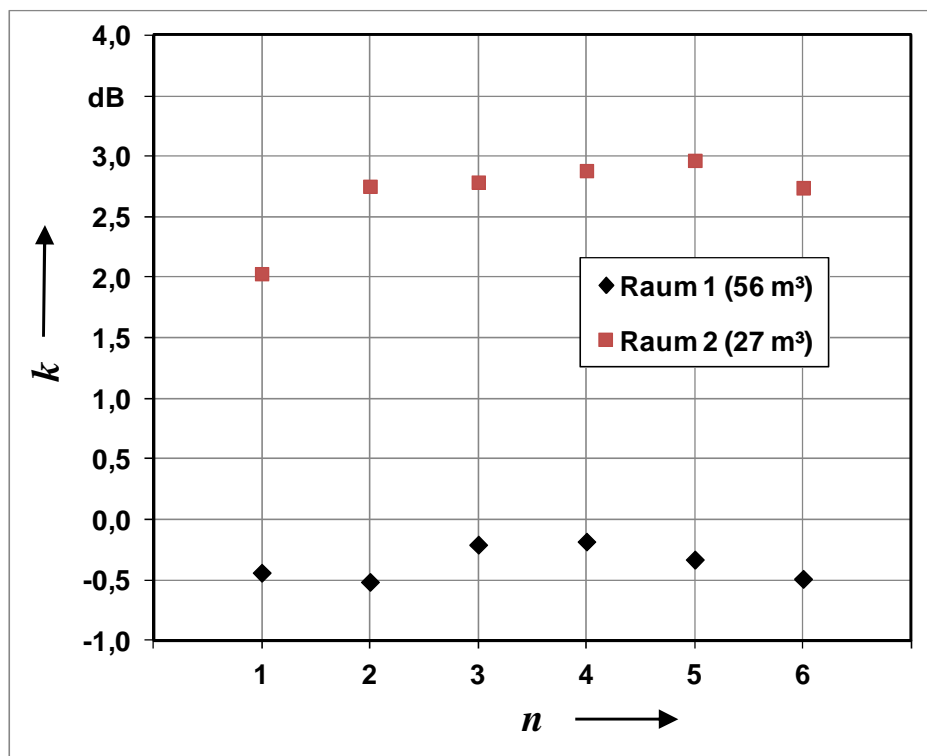


Bild 31: Darstellung des vom jeweiligen Messteam n ermittelten Nachhallmaßes k

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Bestimmung der Nachhallzeit trotz unterschiedlicher Messmethoden von allen Messteams mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden konnte. Die Standardunsicherheit des Nachhallmaßes beträgt für den ersten Raum 0,1 dB und für den zweiten Raum 0,3 dB. Es ist daher zu erwarten, dass der Einfluss der Nachhallzeitmessung auf die Gesamtunsicherheit eine eher untergeordnete Rolle spielen wird.

4.4.6 Oktav-Schalldruckpegel und ihre Unsicherheiten

Wenngleich [DIN 4109-11] als Anforderungswert ausschließlich $L_{AF,max}$ festlegt, so kann doch die Betrachtung der gemessenen Oktavspektren interessante Hinweise auf beobachtete Phänomene liefern. In den folgenden Bildern sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der von den Messteams gelieferten Oktavwerte dargestellt. Bei der Beurteilung der Graphen ist zu beachten, dass die Messung des „richtigen“ Oktavpegels, also des mit der Zeitkonstante „Fast“ gemessenen Oktavpegels im Moment des Auftretens des maximalen A-Pegels, technisch erhebliche Probleme bereitet. Einige der von den Messteams verwendeten Geräte sind dazu gar nicht in der Lage, sondern liefern nur den maximalen Oktavwert, der innerhalb des Messzeitraumes irgendwann aufgetreten ist, wobei dieser Zeitpunkt nicht unbedingt mit dem des maximal auftretenden A-Wertes übereinstimmen muss. Einige Geräte bieten dagegen die Möglichkeit, die „Fast“-bewerteten Oktav- und A-Werte in einem konstanten Zeitintervall abzutasten und zu speichern („Multispektren“). Aber auch hier besteht eine gewisse Unsicherheit insbesondere bei sehr impulshaften Schallereignissen, weil bedingt durch die zeitdiskrete Abtastung der Maximalwert eventuell nicht richtig getroffen wird. Es gibt jedoch auch Geräte, die genau das Oktavspektrum zum Zeitpunkt des maximal aufgetretenen A-Werts ausgeben. Alle dargestellten Werte beinhalten keine Störpegelkorrektur.

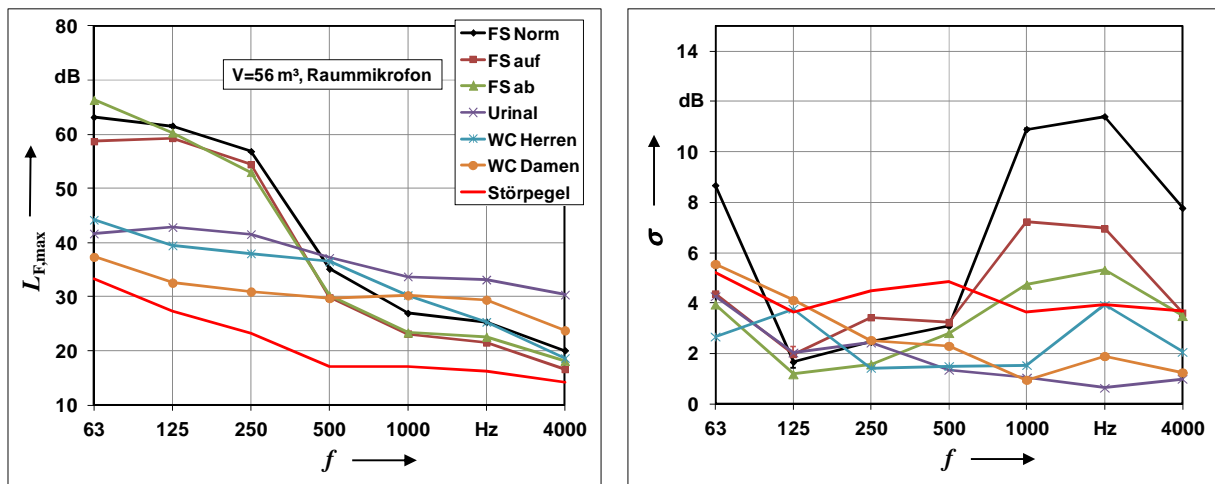


Bild 32: Über alle Messteams gemittelte Oktavpegel mit zugehöriger Standardabweichung, Raum 1, Raummikrofon

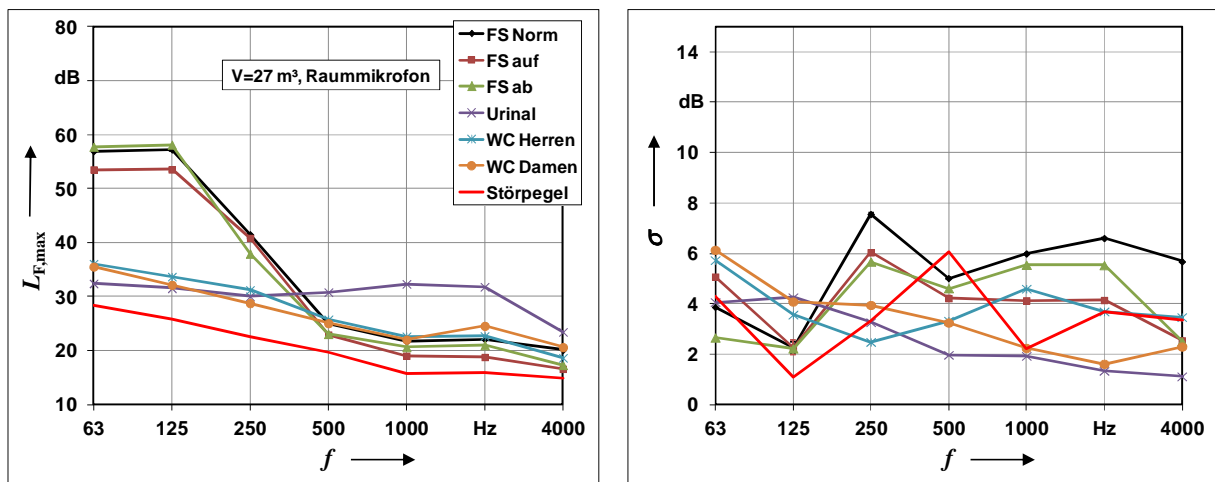


Bild 33: Über alle Messteams gemittelte Oktavpegel mit zugehöriger Standardabweichung, Raum 2, Raummikrofon

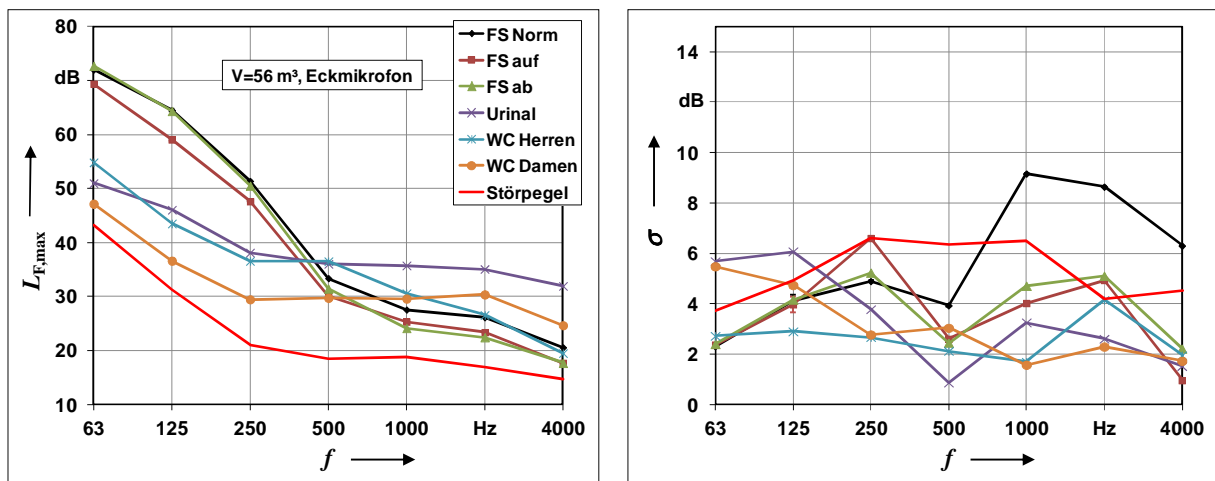


Bild 34: Über alle Messteams gemittelte Oktavpegel mit zugehöriger Standardabweichung, Raum 1, Eckmikrofon

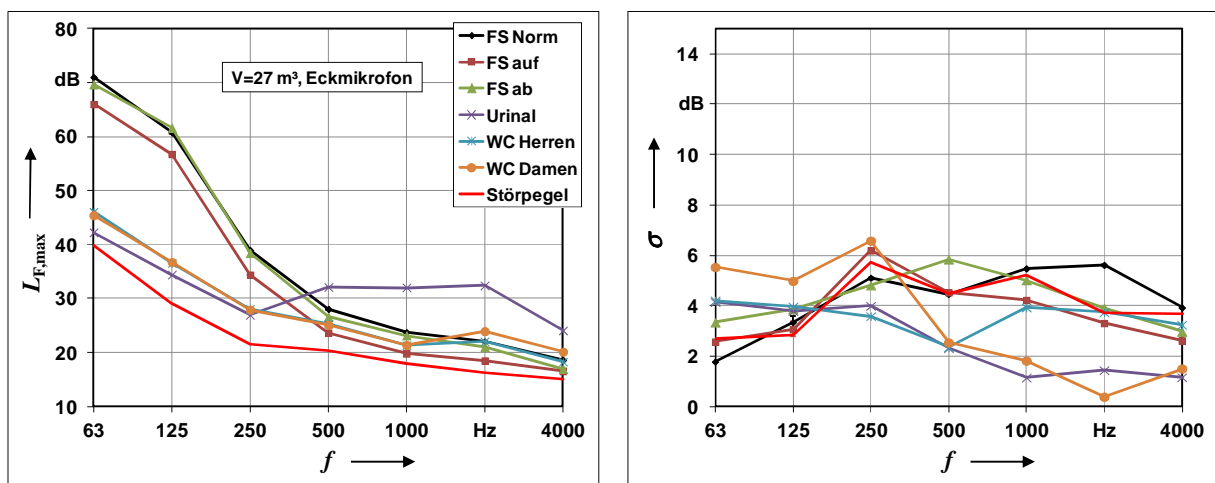


Bild 35: Über alle Messteams gemittelte Oktavpegel mit zugehöriger Standardabweichung, Raum 2, Eckmikrofon

Zunächst fällt auf, dass fast alle Quellen ein mit der Frequenz fallendes Spektrum aufweisen. Insbesondere beim Fahrstuhl überwiegen die Frequenzanteile unter

250 Hz. Vor diesem Hintergrund ist es als kritisch zu betrachten, dass die neue Messnorm für die Nachhallkorrektur nur die aus den Frequenzbändern von 500 Hz bis 2 kHz gemittelte Nachhallzeit berücksichtigt, wogegen [DIN 52219] im „Zweifelsfall“ auch die oktavweise Korrektur aller Frequenzbänder erlaubt.

Erwartungsgemäß erfahren die meisten Quellen in Raum 2 insbesondere ab 250 Hz aufwärts eine deutliche Abschwächung. Etwas ungewöhnlich ist der Verlauf beim Urinal. Da hier der Druckspüler die maßgebende Geräuschquelle ist, kann eine Ausbreitung des Installationsgeräusches über das Trinkwassernetz als wahrscheinlich angenommen werden. Es wird ebenfalls ersichtlich, dass in Raum 2 einige Geräuschpegel schon deutlich durch das Störgeräusch beeinflusst werden.

4.4.7 Unterschiede zwischen Raummitte und Raumecke

Eine zentrale Fragestellung war die eventuelle Auswirkung der mit [DIN EN ISO 10052] neu eingeführten Eckposition auf den gemessenen Installationsgeräuschpegel. Dies ist insbesondere in Hinblick auf die A-bewerteten Schalldruckpegel als zentrale Messgröße interessant, worauf im nächsten Kapitel näher eingegangen wird. Für eine nähere Betrachtung ist aber auch eine Auswertung der Oktavspektren von Interesse. Die folgenden Grafiken zeigen die über alle Messteams gemittelte Differenz zwischen den Schalldruckpegeln in der Raumecke und Raummitte sowie die dazugehörigen Standardabweichungen.

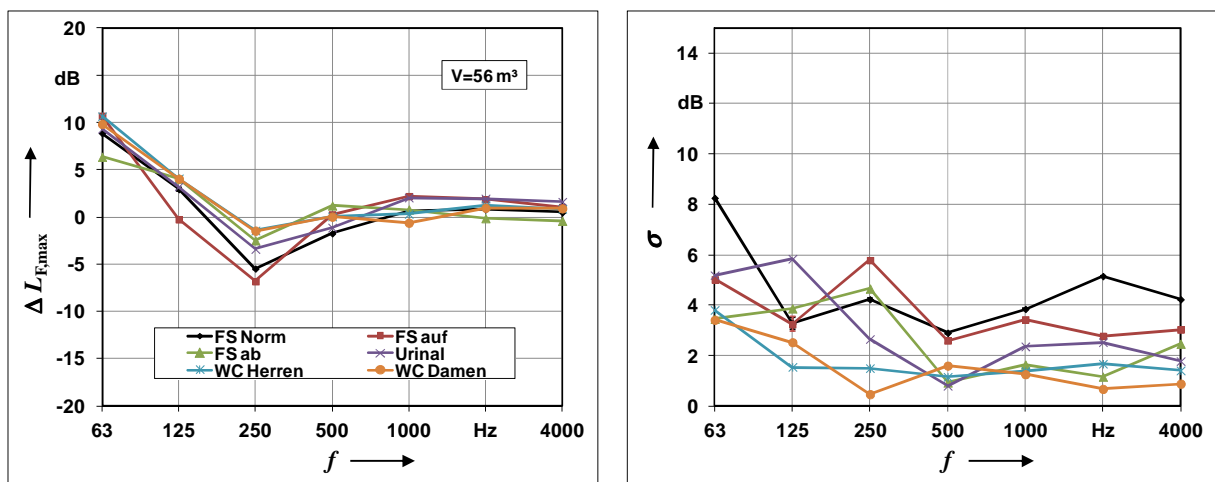


Bild 36: Differenzpegel Ecke-Raum mit zugehöriger Standardabweichung, Raum 1

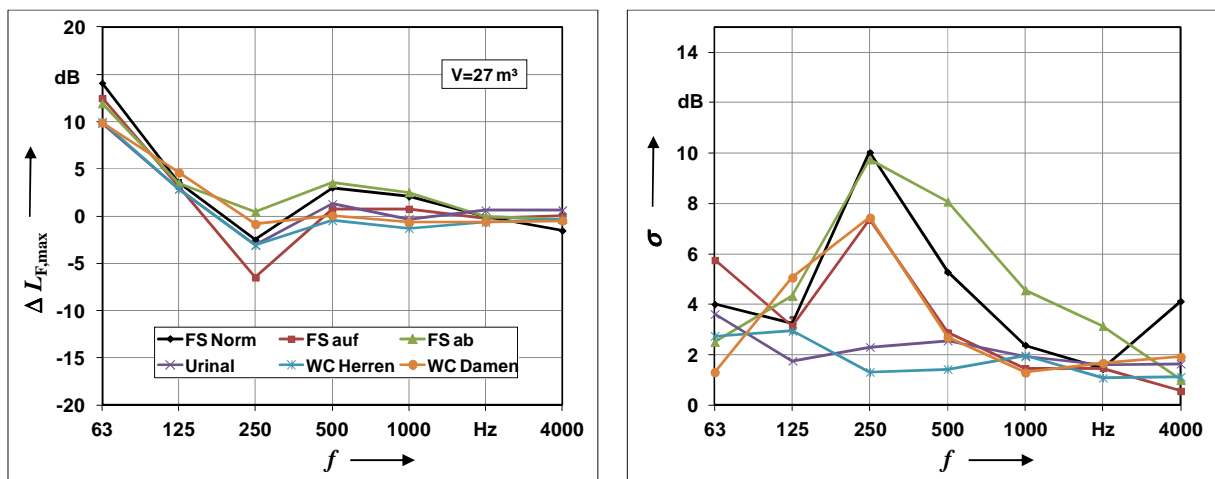


Bild 37: Differenzpegel Ecke-Raum mit zugehöriger Standardabweichung, Raum 2

Generell zeigt die Differenz den zu erwartenden Verlauf mit destruktiver Interferenz bei 250 Hz und konstruktiver Interferenz bei tieferen Frequenzen. Ein solcher Verlauf würde nach [Wa55] in ideal diffusen Schallfeldern mit ausreichend vielen Moden zu einer Überhöhung von 9 dB bei 63 Hz führen. Dass die Differenzen vor allem im kleineren Raum 2 etwas größer sind, liegt an der äußerst geringen Modenzahl in den tiefen Oktaven.

Berücksichtigt man, dass jedes Messteam andere Feldpunkte und z.T. auch andere Raumecken ausgewählt hat, so ist die Standardabweichung der Differenzen als gering zu bewerten. Eine Ausnahme sind die teilweise hohen Standardabweichungen bei 250 Hz in Raum 2. Bemerkenswert ist weiterhin, dass die Schalldruckpegeldifferenz zwischen Eck- und Raumposition für alle Quellen in etwa gleich groß ist. Dies deutet darauf hin, dass diese Differenz überwiegend von der modalen Struktur des Schallfeldes und nicht von der Quelle abhängt.

4.4.8 A-bewertete Installationsgeräuschpegel

Die A-bewerteten Installationsgeräuschpegel sind bedingt durch den größeren räumlichen Abstand zu den Geräuschquellen im kleineren Empfangsraum ($V = 27 \text{ m}^3$) um ca. 10 dB kleiner als im größeren Empfangsraum (Bild 38). Vergleicht man die direkte Messung der A-Pegel nach DIN 52219 (Blautöne) mit der Messung nach der neuen Norm DIN 4109-11 (Rottöne), so wird deutlich, dass die nach der neuen Norm gemessenen Werte generell über den nach der alten Norm bestimmten Werten liegen. Während dieser Effekt für die Sanitärgeräusche schwach ausgeprägt ist (0,4 bis 0,9 dB), kann er beim Fahrstuhl wesentlich größere Werte annehmen (0,3 bis 2,8 dB). Die Ursache hierfür ist die unterschiedliche spektrale Form des Geräuschs. Bei den Sanitärgeräuschen dominieren Frequenzen ab ca. 250 Hz den A-Wert (Bild 32 – Bild 35). In diesem Frequenzbereich ist der Unterschied zwischen dem Eckmikrofon und dem Mikrofon in Raummitte gering (Bild 36, Bild 37), so dass die Berücksichtigung des Eckmikrofons kaum Auswirkung auf den Messwert hat. Anders ist es beim Fahrstuhl. Hier sind die tiefen Frequenzen auch für den A-Wert entscheidend, z.T. ist sogar der 63 Hz Oktavwert dominant (Bild 32 – Bild 35). Bei diesen Frequenzen wurden Pegelüberhöhungen von 10 dB und mehr in der Ecke beobachtet (Bild 36, Bild 37), so dass die Hinzunahme der Eckposition den A-bewerteten Installationsgeräuschpegel erheblich vergrößert.

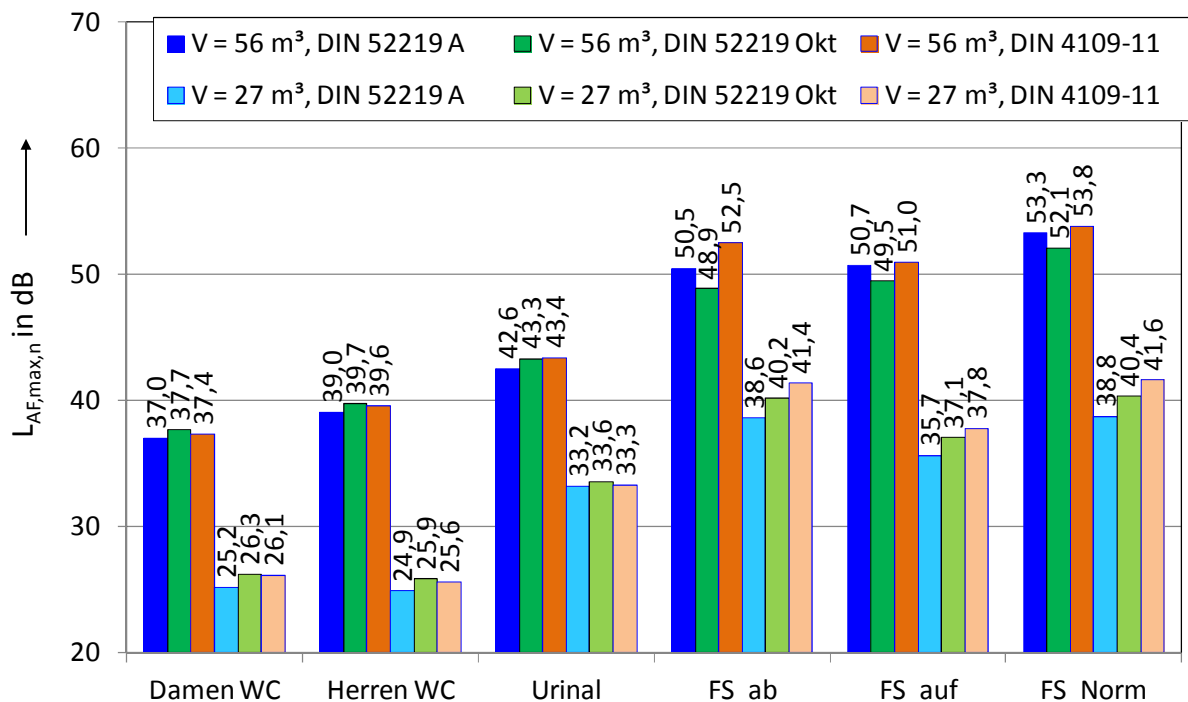


Bild 38 Über alle Messteams gemittelte Installationsgeräuschpegel

In „Zweifelsfällen“ war nach DIN 52219 auch die Messung und Nachhallbewertung in Oktaven von 125 Hz bis 4 kHz zulässig. Die mit diesem Verfahren erzielten A-Werte verhalten sich in Bezug auf die anderen Messverfahren uneindeutig (Grüntöne in Bild 38). Bei den Fahrstuhlgeräuschen fehlt der Energieanteil in der 63 Hz Oktave, so dass die aus Oktaven ermittelten Werte vor allem im größeren Empfangsraum entsprechend niedriger ausfallen als bei der direkten Messung des A-Werts. Überlagert ist diesem Effekt noch die Bewertung mit der mittleren Nachhallzeit im Fall der direkten Messung des A-Werts. Bei DIN 52219 werden die Oktaven von 250 Hz bis 2 kHz und bei DIN 4109-11 die Oktaven von 500 Hz – 2 kHz einbezogen. Da der Nachhallverlauf jedoch über der Frequenz nicht glatt ist (Bild 30) und sich insbesondere bei 125 Hz von den höheren Oktaven deutlich unterscheidet, kommt es zu weiteren Abweichungen zwischen den Messverfahren.

Bei der Untersuchung von Unterschieden zwischen den Messverfahren interessieren neben den bislang betrachteten Mittelwerten auch die von den einzelnen Teilnehmern der Vergleichsmessungen beobachteten Abweichungen. Diese liegen zwischen 1 und -5 dB (Bild 39) bzw. zwischen 3 und -6 dB (Bild 40). Die neue Messvorschrift liefert demnach nicht in allen Fällen einen größeren Wert. Vielmehr streuen die Differenzen und liegen im Mittel etwas unter 0 dB. Die Mittelwerte der Differenzen für die einzelnen Quellen liegen für die direkte Messung des A-Werts zwischen -0,1 und -2,9 dB (Tabelle 5). Für die Messung in Oktaven sind wiederum größere Streuungen zu beobachten. Über alle Quellen gemittelt betragen die Abweichungen zwischen -0,4 und -1,6 dB (Tabelle 5). Hierbei ist jedoch anzumerken, dass eine solche Mittelung nur über eine repräsentativ Auswahl von Quellen sinnvoll ist, so dass der hier gefundene Mittelwert nicht ohne Weiteres verallgemeinerbar ist.

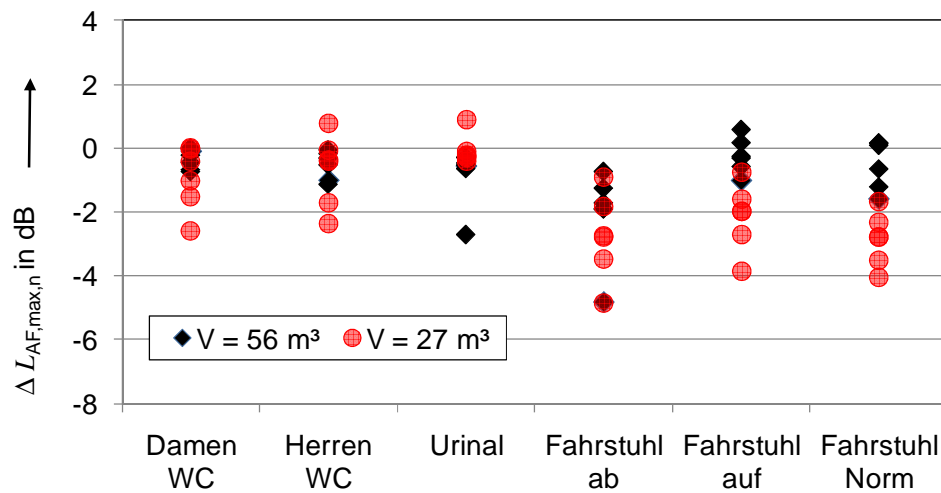


Bild 39 Abweichung zwischen DIN 52219 (direkte Messung des A-Werts) und DIN 4109-11 in Kombination mit DIN EN ISO 10052, Ergebnisse der einzelnen Teilnehmer

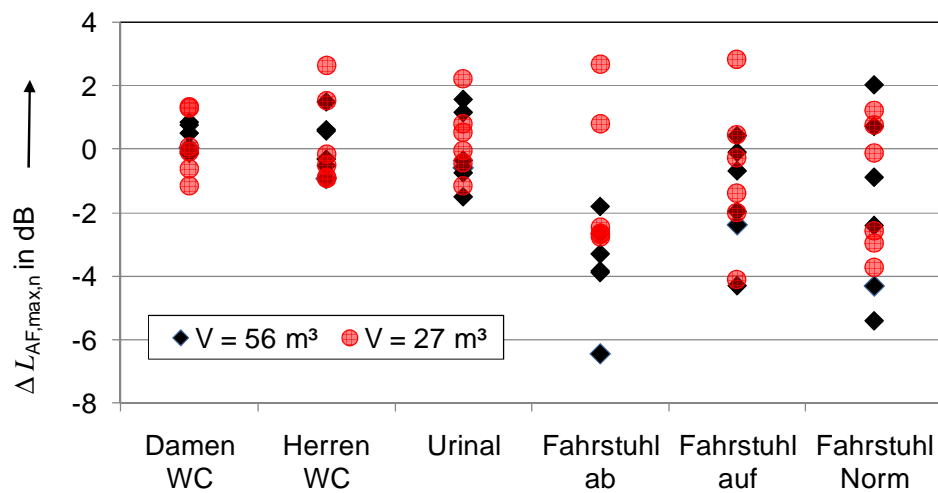


Bild 40 Abweichung zwischen DIN 52219 (Messung und Nachhallkorrektur in Oktaven zwischen 125 Hz und 4 kHz) und DIN 4109-11 in Kombination mit DIN EN ISO 10052, Ergebnisse der einzelnen Teilnehmer

Tabelle 5 Über alle Teilnehmer gemittelte Differenzen der Installationsgeräuschpegel in dB zwischen altem (DIN 52219) und neuem Messverfahren (DIN 4109 -11) in beiden Empfangsräumen

	DIN 52219 A – DIN 4109-11		DIN 52219 Okt – DIN 4109-11	
	V = 56 m ³	V = 27 m ³	V = 56 m ³	V = 27 m ³
Damen WC	-0,4	-0,9	0,3	0,1
Herren WC	-0,5	-0,7	0,1	0,3
Urinal	-0,9	-0,1	-0,1	0,3
Fahrstuhl auf	-2,1	-2,8	-3,7	-1,2
Fahrstuhl ab	-0,2	-2,1	-1,5	-0,7
Fahrstuhl Norm	-0,5	-2,9	-1,7	-1,2
Mittel	-0,8	-1,6	-1,1	-0,4

4.4.9 Zur Unsicherheit der A-bewerteten Installationsgeräuschpegel

Aus den vorliegenden Messwerten wurden die Standardabweichungen der A-bewerteten Installationsgeräuschpegel berechnet, die als Schätzung für die Unsicherheiten verwendet werden können. Diese Werte liegen zwischen 0,5 und 3,5 dB (Bild 41, Tabelle 6). Für die Messung in Oktaven nach DIN 52219 (Tabelle 6, grüne Symbole in Bild 41) liegen diese Werte tendenziell über denen der anderen Messverfahren. Als Erklärung kommt hier die unterschiedliche Art der Ermittlung der maximalen Oktavspektren in Frage. Die Hinzunahme der Eckposition nach DIN 4109 verringert die Standardabweichung der A-bewerteten Installationsgeräuschpegel im Mittel kaum (rote versus blaue Symbole in Bild 41, Mittelwerte in Tabelle 6). Bei Betrachtung der Einzelwerte zeigt sich jedoch, dass vor allem bei den von tiefen Frequenzen dominierten Fahrstuhlgeräuschen eine Reduktion der Standardabweichungen zu beobachten ist (Tabelle 6).

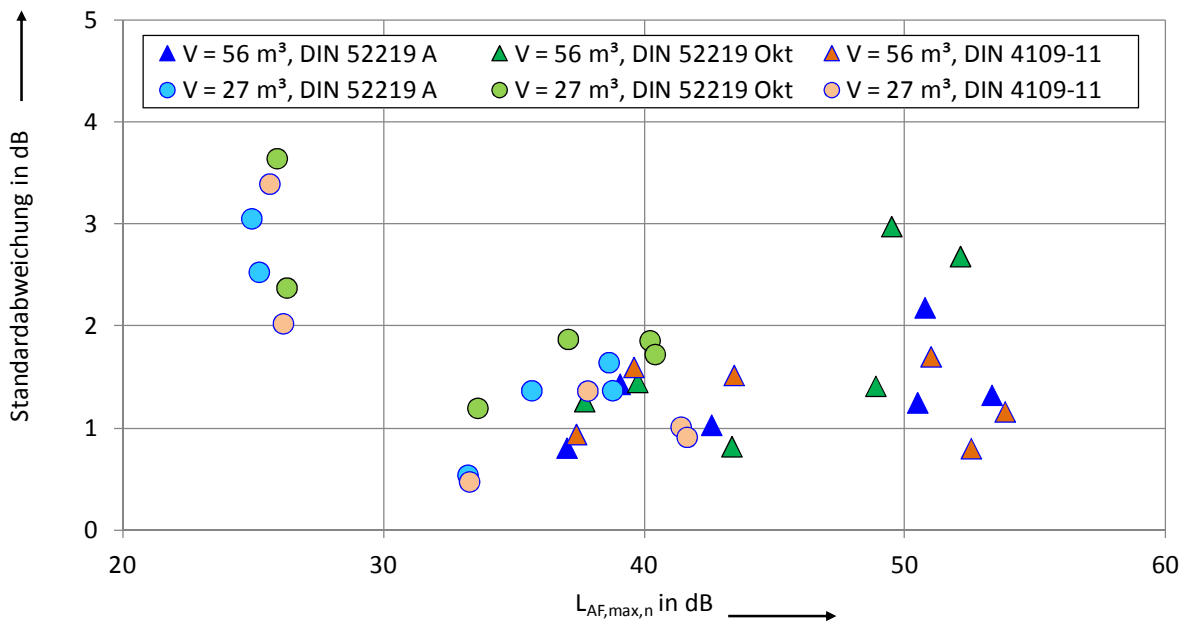


Bild 41 Standardabweichungen der Installationsgeräuschpegel

Tabelle 6 Standardabweichungen der A-bewerteten Installationsgeräuschpegel in dB in beiden Empfangsräumen

	DIN 52219 A		DIN 52219 Okt		DIN 4109-11	
	27	56	27	56	27	56
Damen WC	2,53	0,81	2,38	1,26	2,03	0,94
Herren WC	3,06	1,43	3,65	1,45	3,40	1,60
Urinal	0,54	1,03	1,20	0,82	0,48	1,52
Fahrstuhl auf	1,65	1,25	1,86	1,41	1,01	0,80
Fahrstuhl ab	1,37	2,18	1,87	2,98	1,37	1,70
Fahrstuhl Norm	1,37	1,33	1,73	2,69	0,91	1,16
Mittel	1,94	1,41	2,25	1,94	1,81	1,33

4.5 Simulationen zu den Unterschieden zwischen beiden Messverfahren

4.5.1 Motivation und Grundprinzip

Trotz des hohen messtechnischen Aufwands bei den PTB-internen Vergleichsmessungen ist die vorliegende Datenbasis recht gering, so dass allgemeine Aussagen über die Abweichungen zwischen altem und neuem Messverfahren kaum zu treffen sind. Zudem ist nicht klar, wie sich die unterschiedlichen Einflussgrößen auswirken. Wegen der Komplexität der Verfahren bietet sich eine Verbreiterung der Datenbasis mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen an. Bei diesem Verfahren werden zufällig generierte Eingangsgrößen in ein

Rechenmodell eingespeist, das den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen korrekt herstellt. Die Rechnung wird mit immer neu generierten zufälligen Eingangsgrößen sehr oft wiederholt. Dabei wird die Verteilung der Ausgangsgrößen registriert, aus der dann z.B. eine Standardunsicherheit und ein Erwartungswert berechnet werden kann.

Im hier vorliegenden Fall wird davon ausgegangen, dass ein kompletter Satz von Eingangsdaten aus einem Nachhallspektrum, vier Schalldruckpegelspektren bei Betrieb der Schallquelle und zwei Störschallspektren besteht. Ein Störschallspektrum gilt für die Eckposition und eins für die Position in Raummitte. Das Nachhallspektrum wird als Mittelwert für den gesamten Raum verstanden und die vier Schalldruckspektren bei Betrieb der Quelle gelten für die Eckposition und für die drei Ergebnisse in Raummitte. Es wird angenommen, dass alle Werte in Oktaven zwischen 63 Hz und 4 kHz vorliegen. Andere Frequenzbereiche beinhalten keine nennenswerten Energieanteile, so dass ein direkt gemessener A-bewerteter Schalldruckpegel gleich dem Summenpegel der Oktaven zwischen 63 Hz und 4 kHz ist.

Ein kompletter Satz Eingangsdaten gestattet die Berechnung der Installationsgeräuschpegel nach den verschiedenen Verfahren. Bei Durchführung von sehr vielen Rechnungen kann daraus eine Verteilungsdichte für die Differenzen zwischen den Messverfahren ermittelt werden.

4.5.2 Detailliertes Rechenmodell

Nach [DIN EN ISO 10052] wird der A-bewertete Summenschalldruckpegel direkt bestimmt und anschließend auf die mittlere Nachhallzeit in den Oktaven 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz bezogen

$$L_{AFmax,n,10052A} = \overline{L_{AFmax}} + 10 \lg \frac{0,16 V}{T_m A_0} \text{ dB} \quad (15)$$

$$T_m = \frac{1}{3} (T_{Okt,500} + T_{Okt,1000} + T_{Okt,2000}) .$$

Dabei berechnet sich der mittlere A-bewertete Summenpegel aus der energetischen Mittelung von zwei Schalldrücken in Raummitte und dem Schalldruck in der Raumecke

$$\overline{L_{AFmax}} = 10 \log \left[\frac{1}{3} \left[10^{L_{AFmax,1}/10} + 10^{L_{AFmax,2}/10} + 10^{L_{AFmax,4}/10} \right] \right] \text{ dB} . \quad (16)$$

Die einzelnen Summenpegel ergeben sich aus dem gemessenen A-Pegel und dem zugehörigen A-bewerteten Störgeräuschpegel nach

$$L_{AFmax} = \begin{cases} L'_{AFmax} - 1,3 \text{ dB} & L'_{AFmax} - L_B < 6 \text{ dB} \\ 10 \log \left[10^{L'_{AFmax}/10} - 10^{L_B/10} \right] \text{ dB} & 6 \text{ dB} < L'_{AFmax} - L_B < 10 \text{ dB} \\ L'_{AFmax} & L'_{AFmax} - L_B > 10 \text{ dB} \end{cases} . \quad (17)$$

Für die Monte-Carlo-Simulation werden die A-bewerteten Schalldruckpegel aus den Oktavwerten von 63 Hz bis 4 kHz berechnet

$$L'_{AFmax} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^7 10^{(L'_{i,Okt} + A_i)/10} \right] \text{ dB} \quad , \quad (18)$$

mit den genormten Werten der A-Bewertung A_i . Nach [DIN 52219] erfolgt die Bestimmung der Kenngröße als direkte Messung des A-Werts unter Bezug auf die mittlere Nachhallzeit der Oktaven zwischen 250 Hz und 2 kHz

$$L_{AFmax,n,52219A} = L_{AFmax} + 10 \lg \frac{0,16 V}{T_m A_0} \text{ dB} \quad (19)$$

$$T_m = \frac{1}{4} (T_{Okt,250} + T_{Okt,500} + T_{Okt,1000} + T_{Okt,2000}) \quad .$$

Der maximale Schalldruckpegel ergibt sich aus der arithmetischen Mittelung der drei gemessenen A-bewerteten Pegel in Raummitte

$$L'_{AFmax} = \frac{1}{3} (L'_{AFmax,1} + L'_{AFmax,2} + L'_{AFmax,3}) \quad (20)$$

und der Störgeräuschkorrektur, die hier allerdings bei Störabständen zwischen 3 und 10 dB anzuwenden ist

$$L_{AFmax} = \begin{cases} L'_{AFmax} - 3,0 \text{ dB} & L'_{AFmax} - L_B < 3 \text{ dB} \\ 10 \log \left[10^{L'_{AFmax}/10} - 10^{L_B/10} \right] \text{ dB} & 3 \text{ dB} < L'_{AFmax} - L_B < 10 \text{ dB} \\ L'_{AFmax} & L'_{AFmax} - L_B > 10 \text{ dB} \end{cases} \quad . \quad (21)$$

[DIN 52219] ermöglicht außerdem eine Messung in Oktaven zwischen 125 Hz und 4 kHz. Für jeden der drei betrachteten Zyklen der Schallquelle ergibt sich ein normierter maximaler A-bewerteter Schalldruckpegel nach

$$L_{AFmax,n,1/2/3} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^6 10^{(L_{i,n,Okt} + A_i)/10} \right] \text{ dB} \quad (22)$$

$$L_{i,n,Okt,1/2/3} = L_{i,Okt,1/2/3} + 10 \lg \frac{0,16 V}{T_i A_0} \quad .$$

Die Nachhallkorrektur und auch die Störgeräuschkorrektur

$$L_{i,Okt} = \begin{cases} L'_{i,Okt} - 3,0 \text{ dB} & L'_{i,Okt} - L_{B,Okt} < 3 \text{ dB} \\ 10 \log \left[10^{L'_{i,Okt}/10} - 10^{L_{B,Okt}/10} \right] \text{ dB} & 3 \text{ dB} < L'_{i,Okt} - L_{B,Okt} < 10 \text{ dB} \\ L'_{i,Okt} & L'_{i,Okt} - L_{B,Okt} > 10 \text{ dB} \end{cases} \quad . \quad (23)$$

werden hier in Oktaven frequenzweise durchgeführt. Die Kenngröße ergibt sich letztlich aus der arithmetischen Mittelung der drei bereits auf die Absorptionsfläche normierten A-bewerteten Schalldruckpegel

$$L_{AFmax,n,52219Okt} = \frac{1}{3} (L_{AFmax,n,1} + L_{AFmax,n,2} + L_{AFmax,n,3}) \quad (24)$$

Eine Übersicht über die verschiedenen Messverfahren und die zugehörigen Eingangsdaten geben Bild 42 – Bild 44.

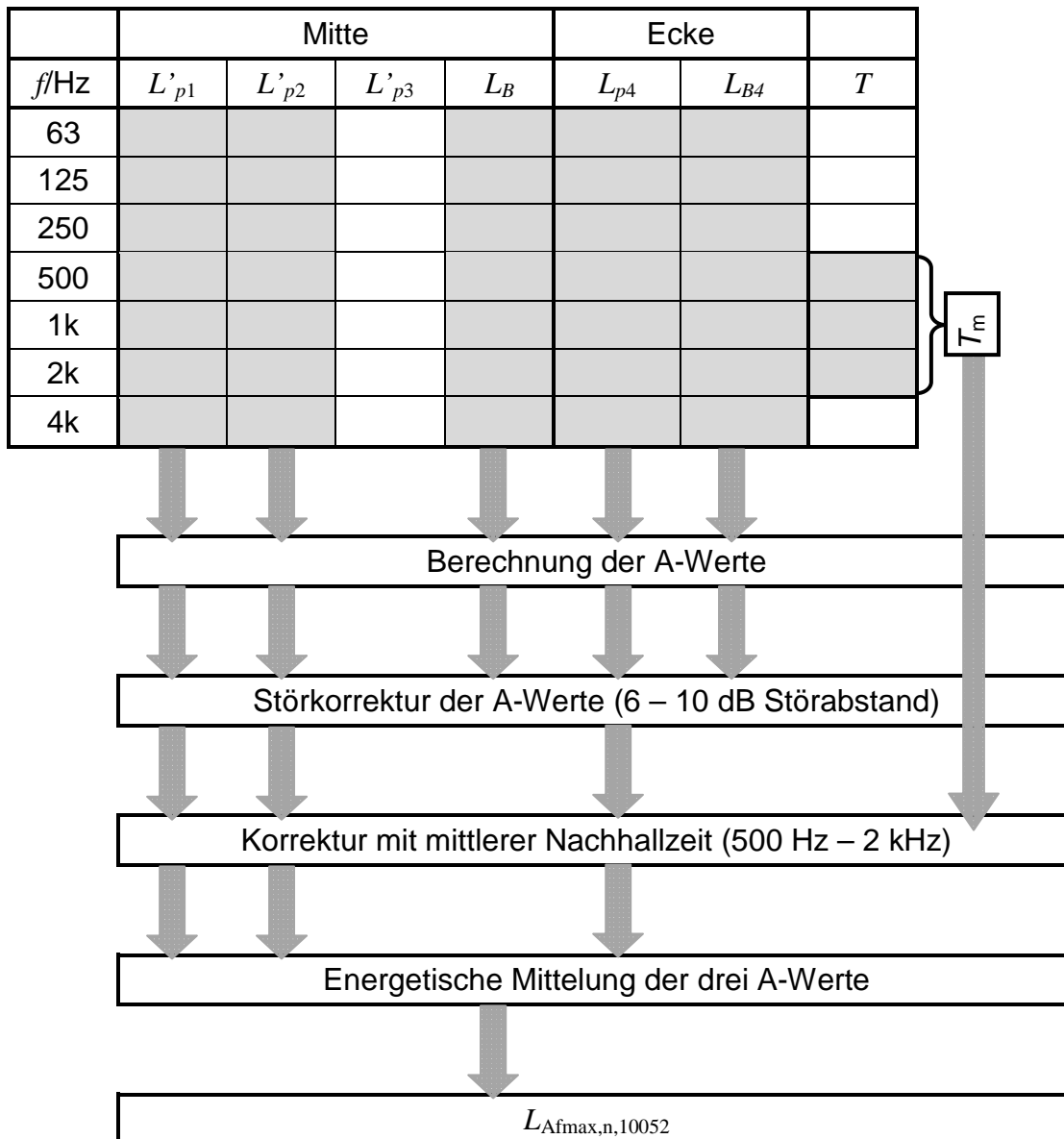


Bild 42 Schema zur Ermittlung des $L_{Afmax,n,10052}$, direkte Messung des A-Werts nach [DIN EN ISO 10052]

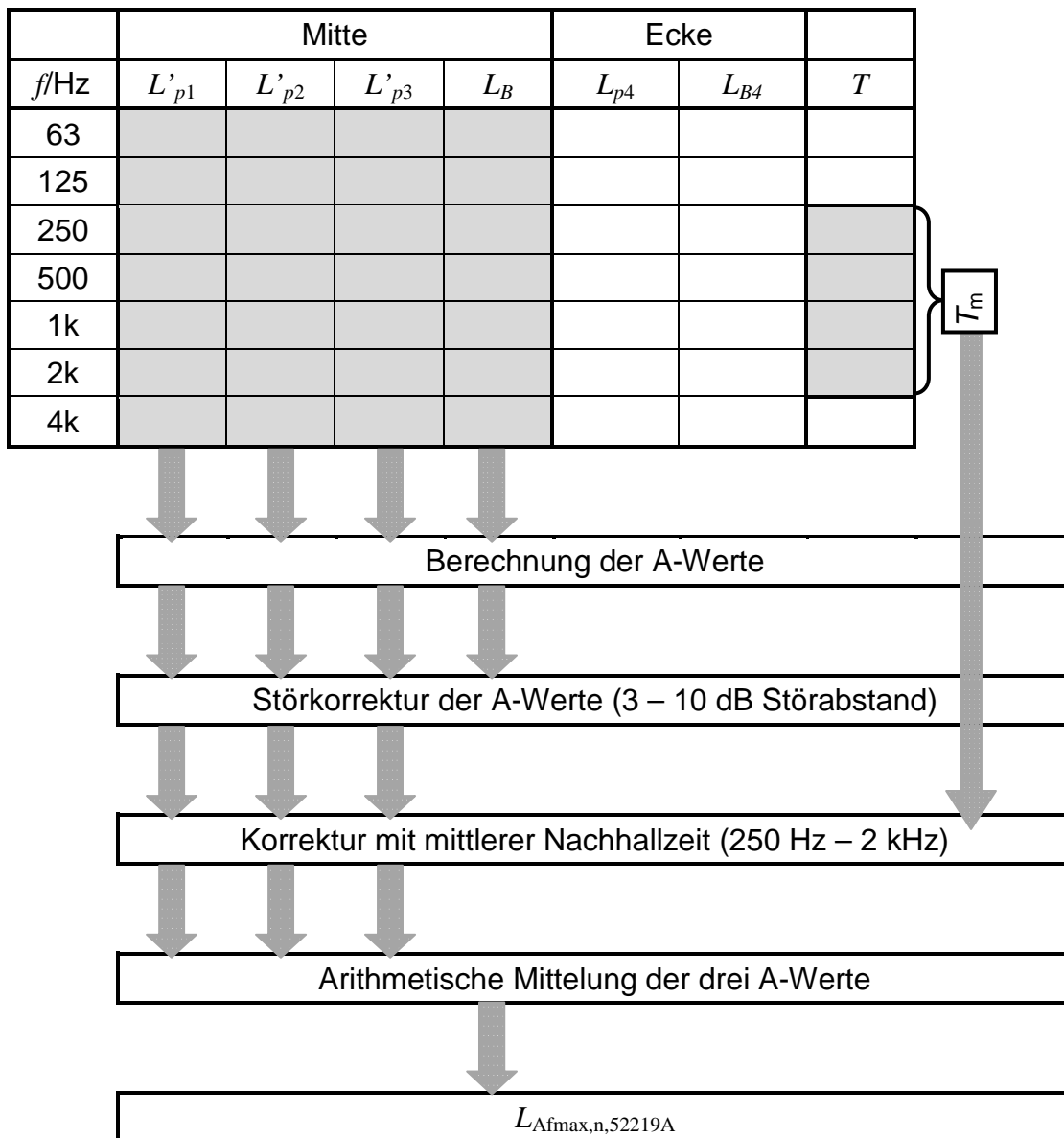


Bild 43 Schema zur Ermittlung des $L_{Afmax,n,52219A}$, direkte Messung des A-Werts nach [DIN 52219]

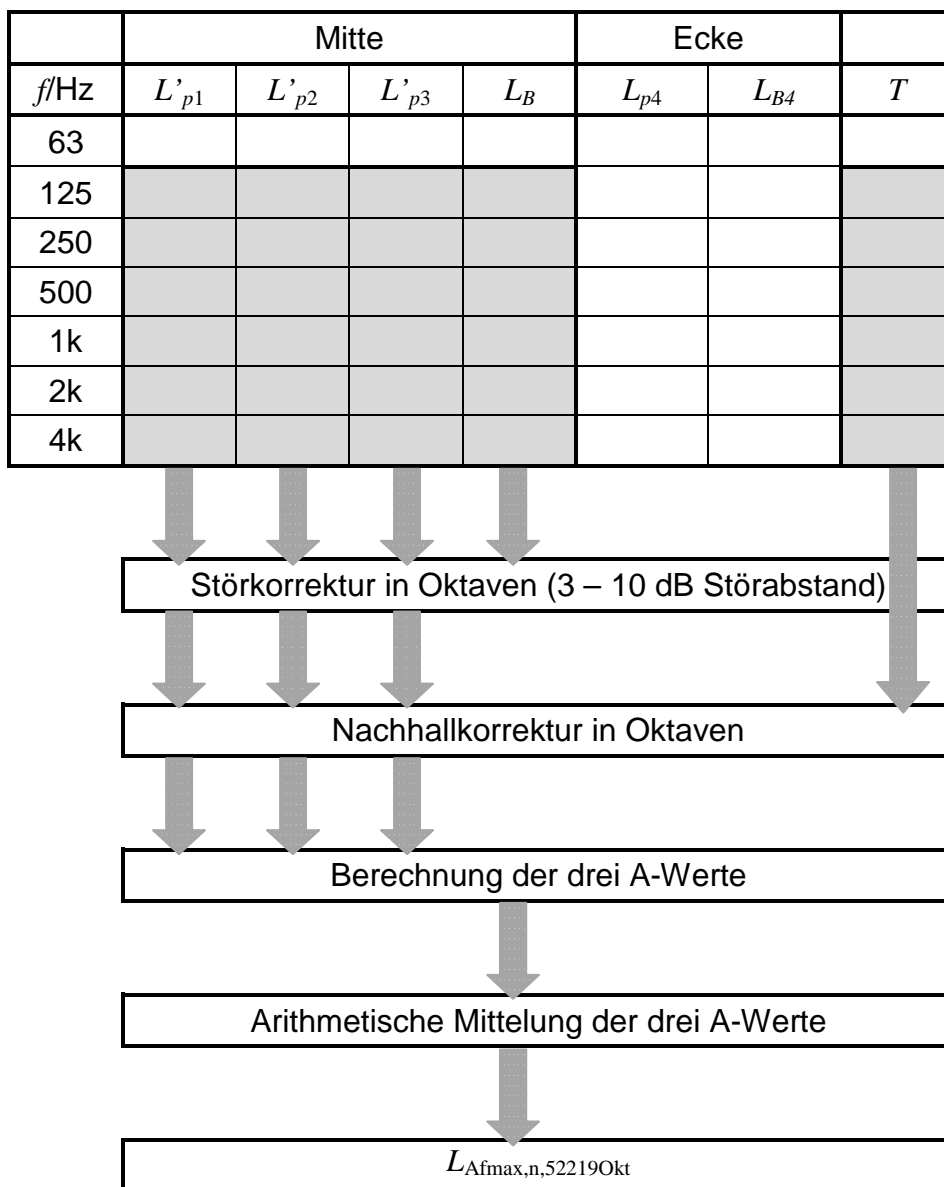


Bild 44 Schema zur Ermittlung des $L_{Afmax,n,52219Okt}$, Messung in Oktaven zwischen 125 Hz und 4 kHz nach [DIN 52219]

4.5.3 Eingangsdaten

Um zu realistischen Simulationsergebnissen zu gelangen, müssen sinnvolle Eingangswerte verwendet werden. Daher wird hier detailliert dargestellt, welche Annahmen getroffen wurden.

Die Oktav-Nachhallzeiten werden nach folgender Gleichung generiert

$$T_i = T_0 + T_{streu} \cdot (\text{RND} - 0,5) \quad . \quad (25)$$

Die Funktion RND erzeugt eine gleichverteilte Zufallszahl zwischen 0 und 1, und T_{streu} ist ein Parameter, der die Streubreite einstellt. Zum Beispiel liegen die Nachhallzeiten zwischen 0,3 und 2,1 s für $T_{streu} = 1,8$ s und $T_0 = 1,2$ s. Dieser Bereich überdeckt die in gewöhnlichen Räumen üblichen Nachhallzeiten. Ein Beispiel für eine so generierte Nachhallzeit zeigt Bild 45.

Für die Schalldruckpegelspektren wird zunächst eine Neigung zufällig ermittelt. Diese liegt gleichverteilt zwischen $\pm m_{\text{streu}}/2$ dB pro Oktave (Bild 46) mit dem offset m_0

$$m = m_0 + m_{\text{streu}} (\text{RND} - 0,5) \quad . \quad (26)$$

Diese Neigung dreht das Spektrum um den Wert von 0 dB bei einer Frequenz von 4 kHz (Bild 46). Der abgedeckte Bereich der Neigung zwischen -3 und 10 dB / Oktave geht dabei leicht über den experimentell abgedeckten Bereich hinaus (Bild 32 – Bild 35). Der dort beobachtete spektrale Abfall liegt in etwa zwischen 1 und 8 dB / Oktave.

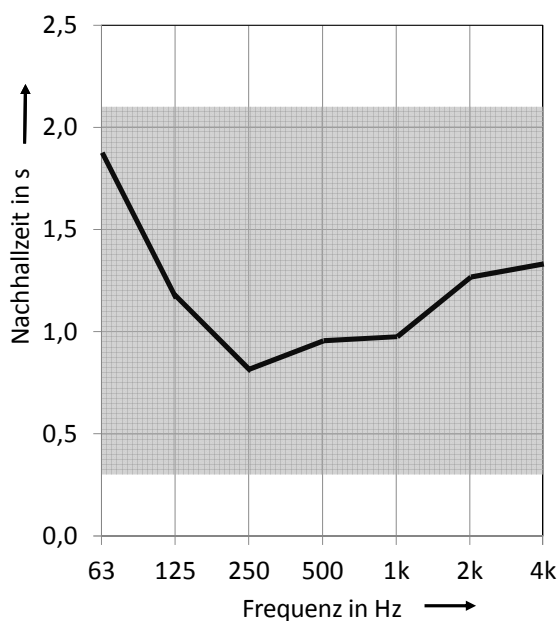


Bild 45 Streubereich für die Nachhallzeiten und generiertes Zahlenbeispiel, $T_{\text{streu}} = 1,8$ s

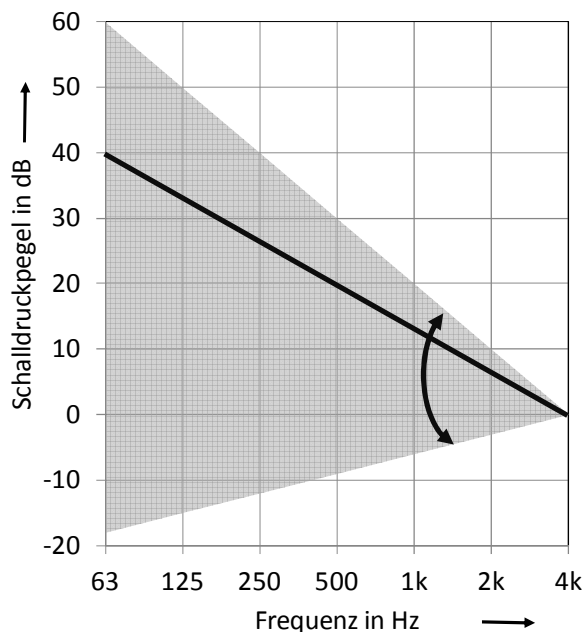


Bild 46 Streubereich und Beispiel für die Neigung des Schalldruckpegelspektrums, $m_{\text{streu}} = 13$, $m_0 = 6,5$

Anschließend wird ein Spektrum für den Schalldruckpegel in Raummitte, zunächst ohne überlagertes Störgeräusch, zufällig bestimmt. In jeder einzelnen Oktave i streut es um maximal $\pm L_{1,\text{streu}}/2$ um die durch die Steigung bestimmten Werte (Bild 47)

$$L_{i,\text{Okt}} = L_{1,\text{streu}} (\text{RND} - 0,5) - m i \quad . \quad (27)$$

Als nächstes wird ein Störschallspektrum $L_{i,\text{BG},1}$ generiert. Dieses liegt gleichverteilt in einem für Installationsgeräusche in Gebäuden typischen Bereich (Bild 48, vgl. auch Bild 32 – Bild 35).

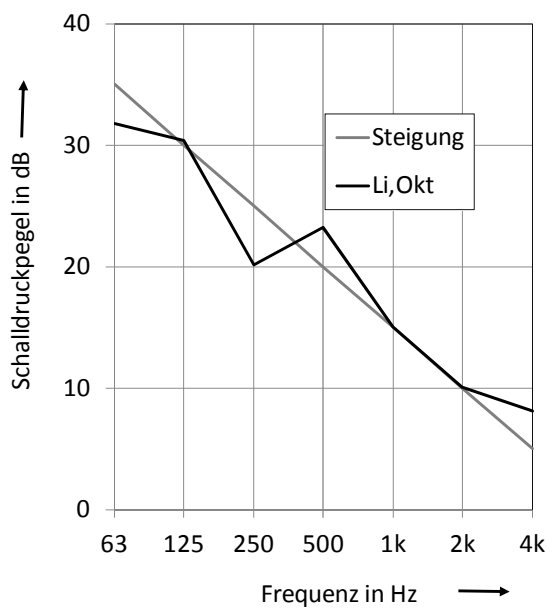


Bild 47 Beispiel für Steigung und Schalldruckpegel $L_{i,Okt}$, $L_{1,Streu} = 10$ dB, $m = 5$ dB/Oktave

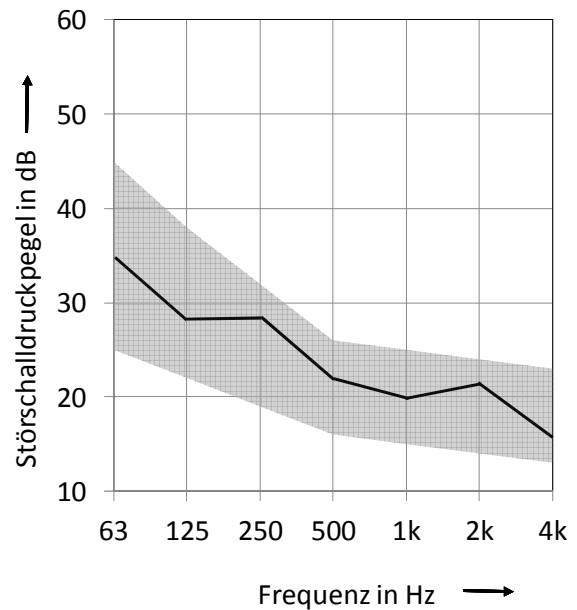


Bild 48 Streubereich für das Störschallspektrum und Beispiel für ein generiertes Sörschallspektrum

Aus dem Störschallspektrum und dem Schalldruckspektrum in Raummitte $L_{i,Okt}$ werden die A-Werte berechnet. Das Oktavspektrum in Raummitte wird nun mit einer frequenzunabhängigen Korrektur K versehen

$$L_{i,Okt,1} = L_{i,Okt} + K \quad , \quad (28)$$

so dass sich ein bestimmter Störabstand zwischen den A-Werten einstellt. Dieser Störabstand wird zufällig generiert gemäß

$$\Delta L_{BG} = \Delta L_0 + \Delta L_{streu} (\text{RND} - 0,5) \quad . \quad (29)$$

Das zweite und das dritte Schalldruckspektrum in Raummitte ergeben sich dann aus dem ersten gemäß

$$\begin{aligned} L_{i,Okt,2} &= L_{i,Okt,1} + L_{2,Streu} (\text{RND} - 0,5) \\ L_{i,Okt,3} &= L_{i,Okt,1} + L_{3,Streu} (\text{RND} - 0,5) \quad . \end{aligned} \quad (30)$$

Die Oktavpegel des zweiten und dritten Spektrums streuen damit um maximal $\pm L_{2,Streu}/2$ bzw. $\pm L_{3,Streu}/2$ um die Werte des ersten Spektrums. Auch das Spektrum in der Raumecke wird aus dem ersten Spektrum berechnet. Zum Oktavwert wird ein Wert K_{ecke} addiert (Bild 49), der unterhalb von 250 Hz zu einer systematischen Zunahme des Schalldruckpegels in der Ecke führt

$$L_{i,Okt,4} = L_{i,Okt,1} + K_{ecke} \quad . \quad (31)$$

Die Zahlenwerte der Drucküberhöhung in der Raumecke sind durch die Ergebnisse der PTB-internen Vergleichsmessung begründet (Bild 36, Bild 37). Anschließend wird ein zweites Störschallspektrum für den Wert in der Raumecke generiert. Dieses streut lediglich um das erste Störschallspektrum

$$L_{i,BG,2} = L_{i,BG,1} + BG_{\text{streu}} (\text{RND} - 0,5) \quad (32)$$

Schließlich werden die Schalldruckspektren 1-3 (Raummitte) mit dem Störschallspektrum 1 und das Schalldruckspektrum 4 (Raumecke) mit dem Störschallspektrum 2 energetisch überlagert. Damit entstehen vier Schalldruckspektren und zwei Störschallspektren, die eine generelle spektrale Form aufweisen. Überdies ist der Störabstand für Schalldruckpegel 1 in Raummitte festgelegt. Da die anderen Schalldruckpegel zufällig um diesen Schalldruckpegel streuen, gilt dieser Störabstand näherungsweise für alle betrachteten Spektren. Ein Beispiel für so generierte Oktavspektren ist in Bild 50 dargestellt.

Mit diesen Eingangsgrößen und den Gleichungen (15) – (24) können nun Simulationsrechnungen durchgeführt werden.

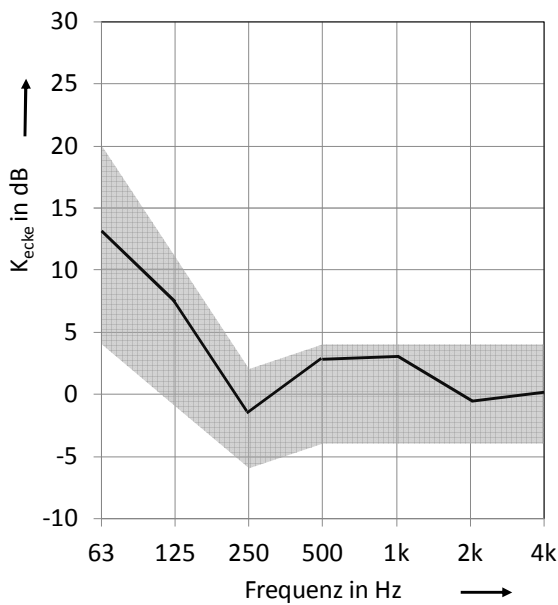


Bild 49 Differenz zwischen dem Schalldruckpegel in der Ecke und an wandfernen Messpunkten, Streubereich und generiertes Zahlenbeispiel

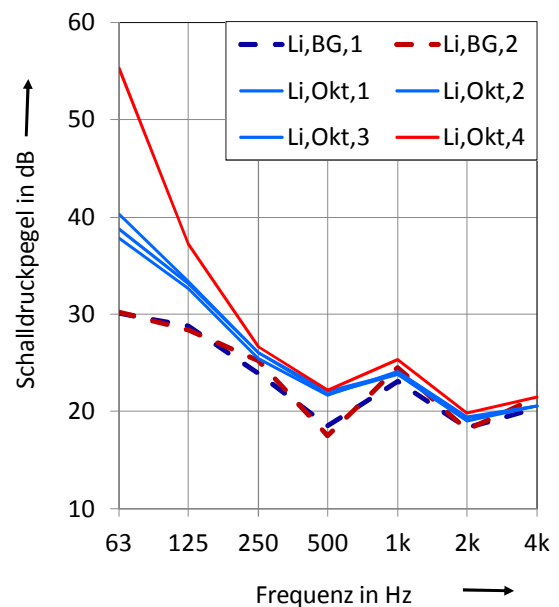


Bild 50 Beispiel für Störschall-überlagerte Schalldruckpegel in Raummitte $L_{i,Okt,1-3}$ und Raumecke $L_{i,Okt,4}$ sowie zugehörige Störschallspektren $L_{i,BG,1/2}$

4.5.4 Testrechnungen

Das für die Simulationen verwendet Rechenprogramm wurde zunächst umfangreichen Tests unterzogen. Ein erster Test bezog sich dabei auf die erforderliche Zahl von Rechendurchläufen. Mit weit streuenden Eingangsparametern (Tabelle 7) wurde die Zahl der Rechendurchläufe zwischen $2 \cdot 10^4$ und $2 \cdot 10^6$ variiert, wobei in einen Durchlauf ca. 50 Zufallszahlen einfließen (vgl. Bild 42 – Bild 44).

Tabelle 7 Für die Testrechnungen verwendeter Parametersatz

m_0 dB/Okt	m_{Streu} dB/Okt	ΔL_{streu} dB	ΔL_0 dB	T_{streu} s	T_0 s	$L_{1,\text{streu}}$ dB	$L_{2,\text{streu}}$ dB	$L_{3,\text{streu}}$ dB	BG_{streu} dB
3,5	13	20	10,001	1,8	1,2	10	4	4	4

Aus den berechneten Verteilungsdichten (Bild 51) wurden die letztlich interessierenden Erwartungswerte und die Standardabweichungen berechnet (Bild 52, Bild 53). Beide Werte erweisen sich als numerisch sehr stabil, so dass im Weiteren mit $2 \cdot 10^5$ Rechendurchläufen gearbeitet wird, was insgesamt $1 \cdot 10^6$ Zufallszahlen entspricht.

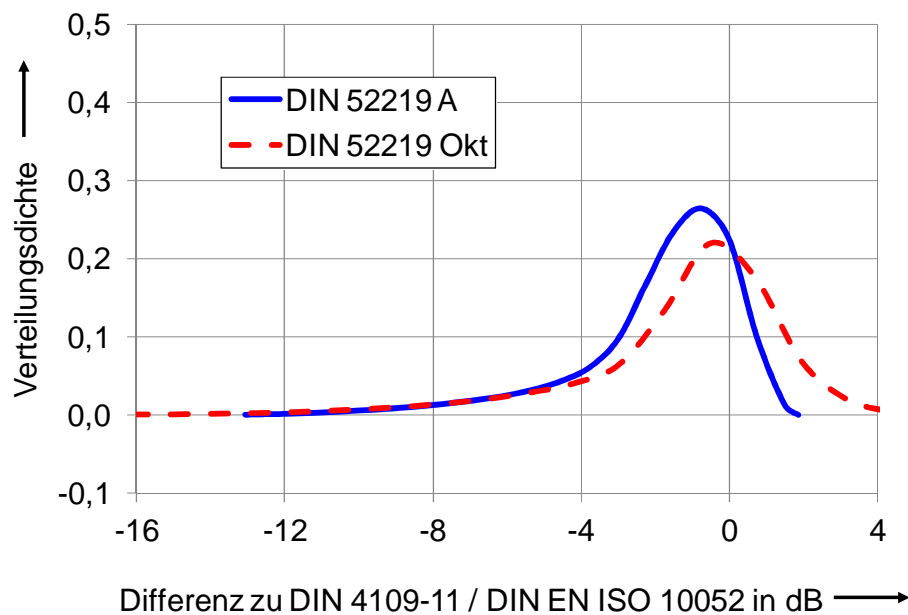


Bild 51 Berechnete Verteilungsdichten für die Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11, $2 \cdot 10^6$ Rechendurchläufe

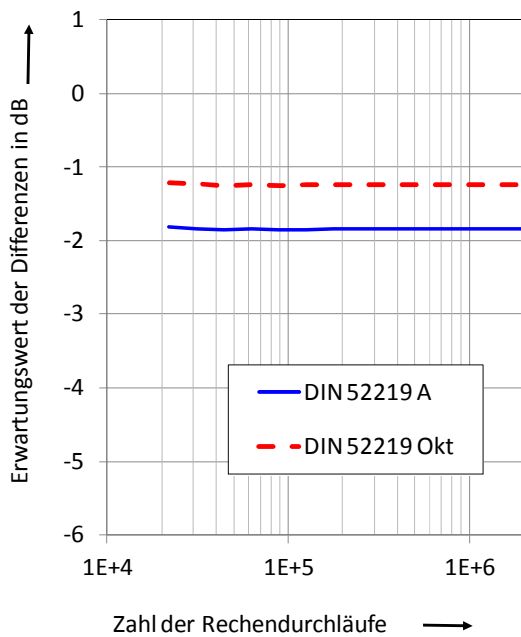


Bild 52 Erwartungswert der Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11 bei Variation der Zahl der Rechendurchläufe

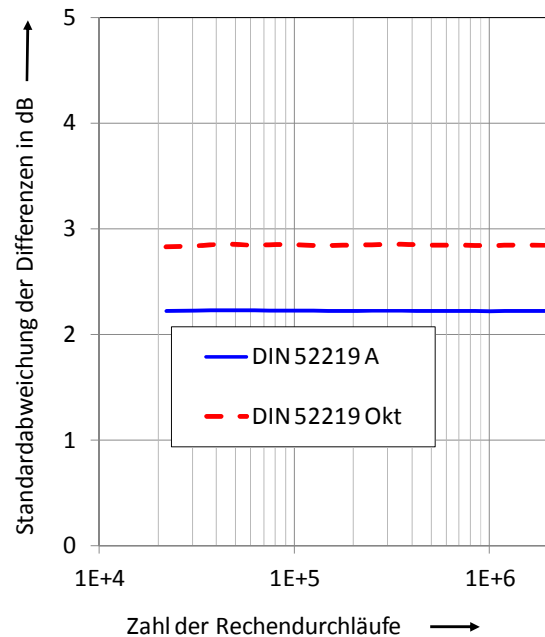


Bild 53 Standardabweichung der Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11 bei Variation der Zahl der Rechendurchläufe

In den ersten Testrechnungen zeigte sich eine systematische Differenz zwischen alter und neuer Norm von ca. -2 dB (Bild 52). Die Frage ist nun, welche Parameter überwiegend für diesen Effekt verantwortlich sind. Um dieser Frage nachzugehen, wurden die Differenzen zwischen dem Schalldruckpegel in der Raumecke und der Raummitte (Bild 49) testweise auf 0 gesetzt. Außerdem wurde der Störabstand zwischen 1 und 20 dB variiert, wobei jeweils eine Streubreite von $\Delta L_{\text{streu}} = \pm 2$ dB angesetzt wurde. Die restlichen Parameter blieben gegenüber Tabelle 7 unverändert. Die Ergebnisse dieser Rechnungen ergeben das erwartete Resultat. Für große Störabstände liegt der Erwartungswert der Differenzen für die direkte Messung der A-Werte sehr gut bei 0 dB (Bild 54). Ist der Störabstand hingegen geringer, so stellt sich eine systematische Differenz von -1,7 dB ein, die durch die unterschiedliche Behandlung der Störpegelkorrektur in den beiden Normen verursacht wird. Die zugehörige Standardabweichung ist mit ca. 0,8 dB recht gering (Bild 55). Für die Messung in Oktaven ergibt sich ein qualitativ ähnliches Bild, wenngleich die Standardabweichung deutlich größer ist. Mit diesem Test konnte somit gezeigt werden, dass die Abweichungen zwischen dem alten und dem neuen Messverfahren überwiegend durch die Zunahme der Eckposition sowie die unterschiedliche Behandlung der Störpegelkorrektur verursacht werden.

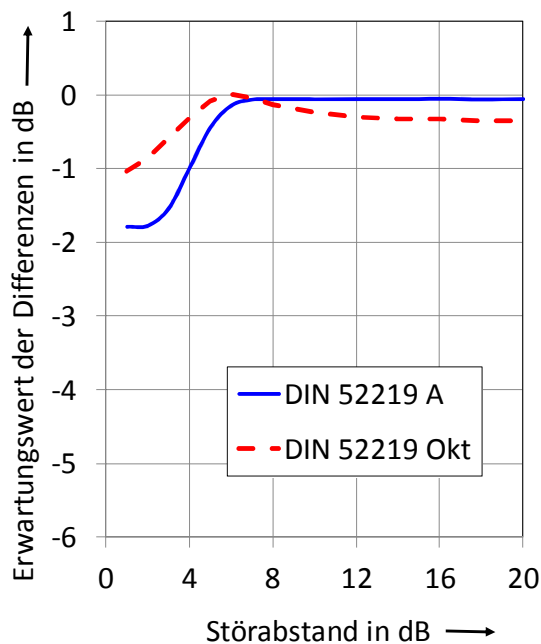


Bild 54 Erwartungswert der Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11 bei Variation des Störabstands, $K_{Ecke} = 0 \pm 2$ dB

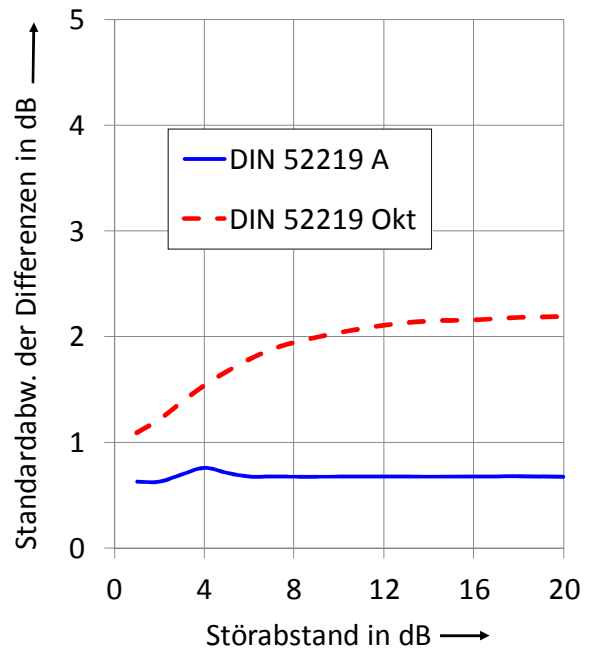


Bild 55 Standardabweichung der Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11 bei Variation des Störabstands, $K_{Ecke} = 0 \pm 2$ dB

4.5.5 Abweichungen zwischen DIN 52219 und DIN EN ISO 10052

Da die Schalldrucküberhöhung in der Ecke stark frequenzabhängig ist, wirkt sich die Berücksichtigung der Eckposition für steil abfallende Spektren stärker aus als für flache Spektren. Daher wurde die Neigung des Spektrums zwischen -3 und 10 dB / Oktave in Schritten von einem dB / Oktave variiert, wobei die jeweilige Neigung innerhalb einer Spanne von ± 1 dB / Oktave gleichverteilt war. Die übrigen Parameter blieben gegenüber Tabelle 7 unverändert.

Mit zunehmender Neigung des Spektrums werden die Verteilungsdichten flacher und breiter (Bild 56, Bild 57). Dies gilt sowohl für die Differenz der direkt gemessenen A-Werte (Bild 56) als auch für die Differenz zwischen dem Oktavverfahren nach DIN 52219 und der Messung des A-Werts nach DIN 4109-11 (Bild 57). Mit größeren spektralen Neigungen zeigt sich außerdem eine zunehmende Asymmetrie in der Verteilungsdichte, vor allem für die direkte Messung der A-Werte.

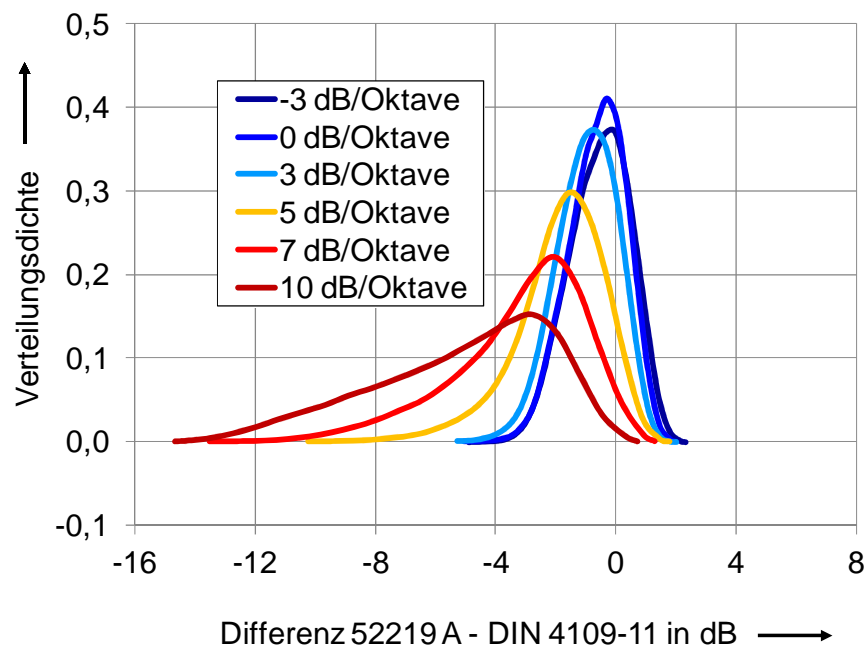


Bild 56 Berechnete Verteilungsdichten für die Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts) und DIN 4109-11, Variation des spektralen Abfalls, andere Parameter nach Tabelle 7

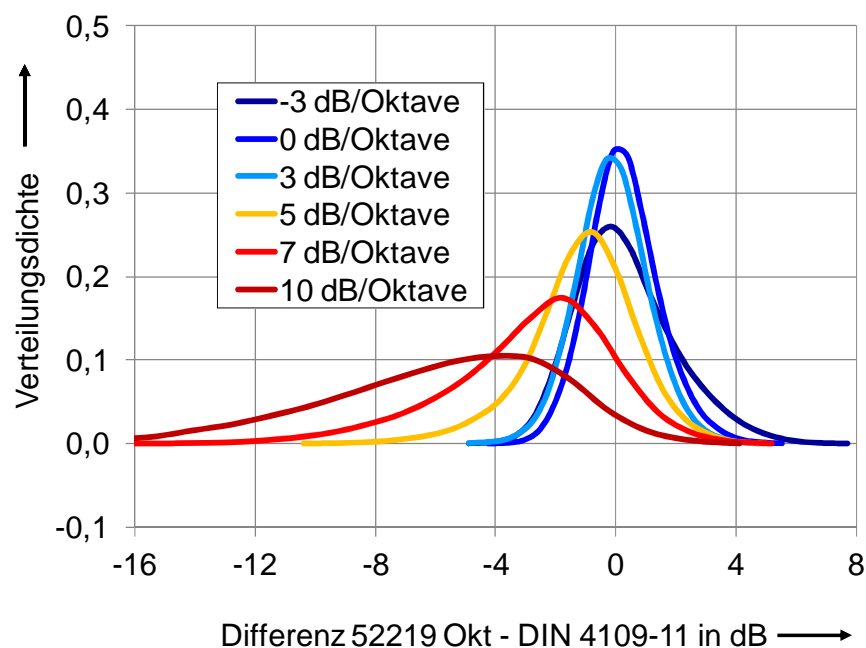


Bild 57 Berechnete Verteilungsdichten für die Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung und Nachhallbewertung in Oktaven) und DIN 4109-11, Variation des spektralen Abfalls, andere Parameter nach Tabelle 7

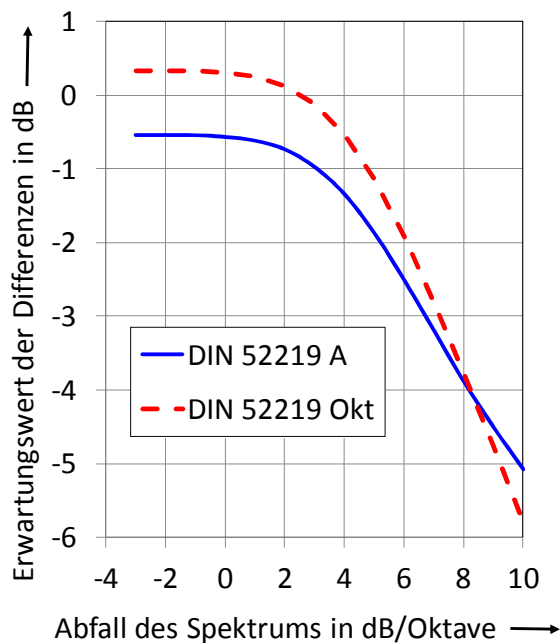


Bild 58 Erwartungswert der Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11 bei unterschiedlicher spektraler Form, andere Parameter nach Tabelle 7

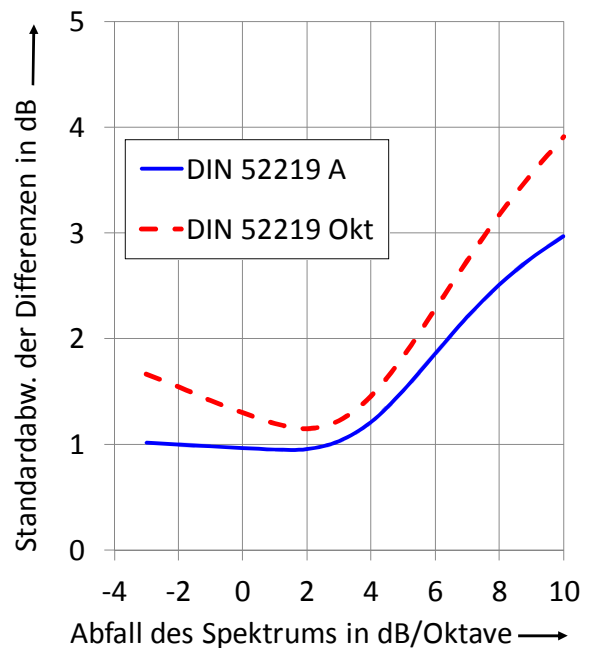


Bild 59 Standardabweichung der Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11 bei unterschiedlicher spektraler Form, andere Parameter nach Tabelle 7

Für flache Spektren liegen die Erwartungswerte der Differenzen bei ca. -0,5 dB, sofern die direkte Messung der A-Werte betrachtet wird (Bild 58). Mit einer Standardabweichung von nur einem dB streuen die Differenzen auch nur wenig (Bild 59). Werden die Spektren steiler, so sinkt der Erwartungswert der Differenz zwischen altem und neuem Messverfahren erheblich und erreicht bei 10 dB / Oktave einen Werte von -6 dB (Bild 58). Die Standardabweichungen steigen hier auf ca. 3 dB an (Bild 59).

Für die Messung in Oktaven ergibt sich qualitativ das gleiche Verhalten. Allerdings zeigt sich, dass vor allem im Bereich der flachen Spektren die Messung in Oktaven systematisch höhere Erwartungswerte ergibt (Bild 58). Das bedeutet, dass beide in DIN 52219 beschriebenen Verfahren einen systematischen Versatz von ca. 1 dB aufweisen. Die Messung in Oktaven liefert im Mittel einen um 1 dB höheren Installationsgeräuschpegel als die Messung und Bewertung in Oktaven.

Insgesamt bestätigen sich damit die experimentell gefundenen Ergebnisse (Tabelle 6). Für die eher flachen Spektren zeigten sich Abweichungen zwischen alter und neuer Norm von ca. -0,5 dB während für die steileren Spektren Abweichungen von bis zu -3,7 dB auftraten.

Es stellt sich nun die Frage, ob der Versatz zwischen der Messung in Oktaven und der Messung des A-Werts durch die Streuung der Nachhallzeit verursacht wird. Daher wurde die Nachhallzeit in allen Oktaven generell auf 0,5 s gesetzt und die Rechnung wiederholt. Die so ermittelten Verteilungsdichten weisen für flache Spektren zwei Gipfel auf (Bild 60, Bild 61). Die Streuung wurde in diesem Bereich

durch die Festlegung der Nachhallzeit so stark reduziert, dass die unterschiedliche Behandlung der Störschallkorrektur nach alter und neuer Norm sichtbar wird. Demgemäß liegt ein Gipfel bei einer Differenz von -1,7 dB. Für steilere Spektren werden die Verteilungsdichten breiter, so dass beide Gipfel zu einem verschmelzen. Auch für die Messung in Oktaven ist dieser Effekt sichtbar (Bild 61). Er ist jedoch geringer ausgeprägt, da bei der Oktavmessung die Störgeräuschkorrektur in Oktaven vorgenommen wird.

Im Bereich flacher Spektren verschwindet der systematische Versatz zwischen der Messung in Oktaven und der direkten Messung des A-Werts tatsächlich durch die Festlegung der Nachhallzeit (Bild 64). Auch die Standardabweichungen liegen in der gleichen Größenordnung. Die Unterschiede in den Verteilungsdichten (Bild 60, Bild 61) zeigen sich im Erwartungswert und in der Standardabweichung somit kaum.

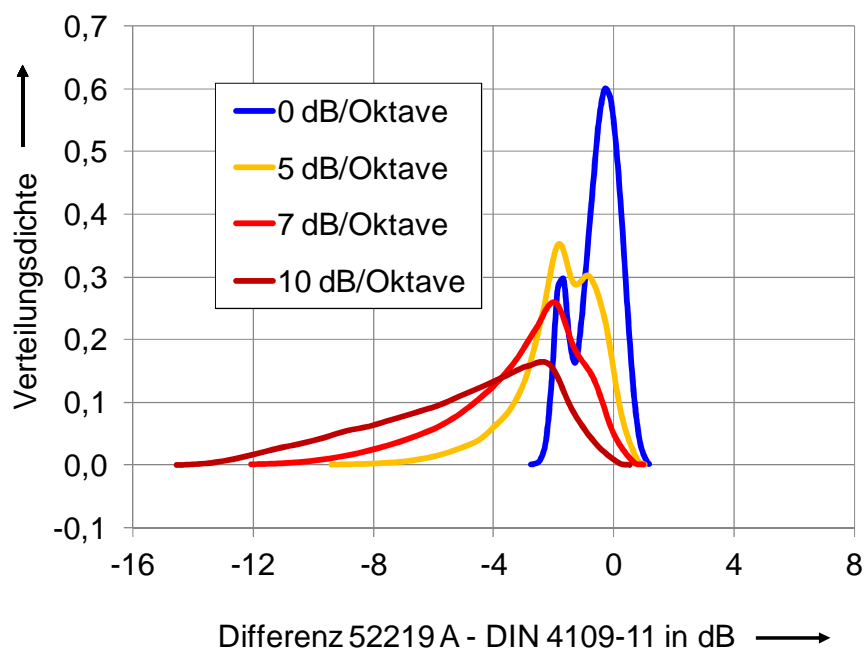


Bild 60 Berechnete Verteilungsdichten für die Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts) und DIN 4109-11, Variation des spektralen Abfalls, andere Parameter nach Tabelle 7 mit einer konstanten Nachhallzeit von 0,5 s

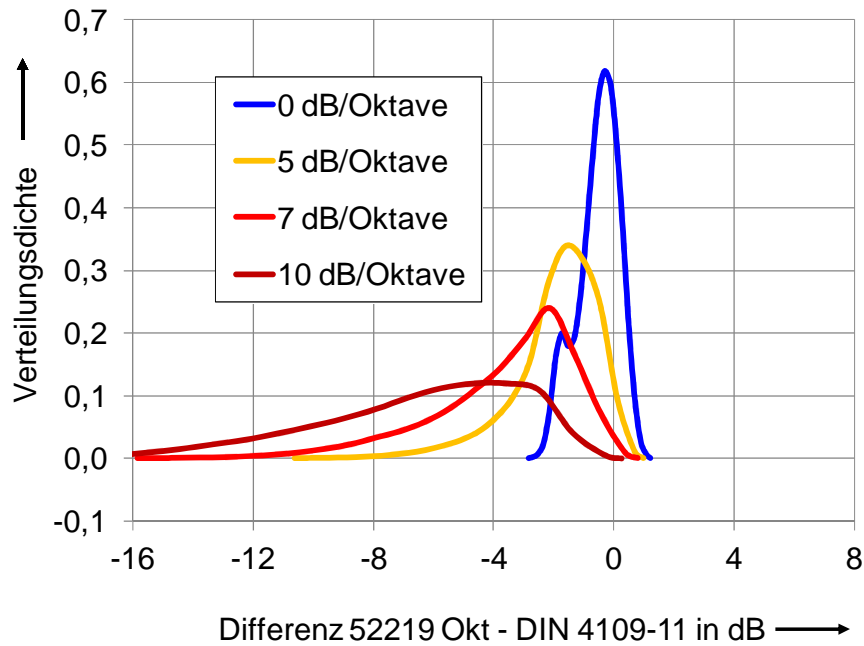


Bild 61 Berechnete Verteilungsdichten für die Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung und Nachhallbewertung in Oktaven) und DIN 4109-11, Variation des spektralen Abfalls, andere Parameter nach Tabelle 7 mit einer konstanten Nachhallzeit von 0,5 s

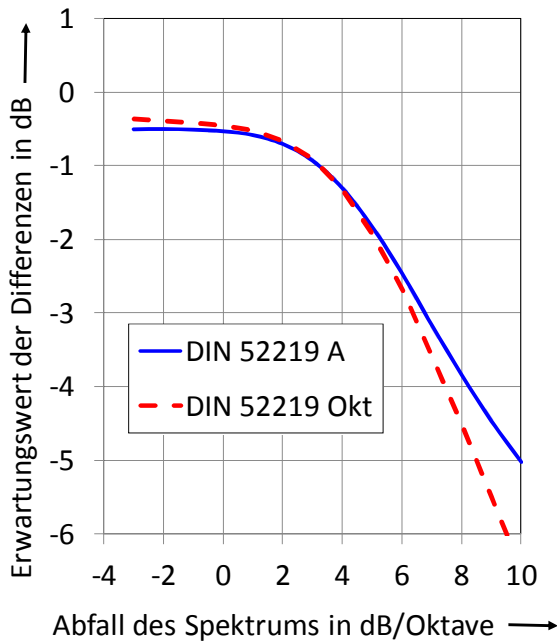


Bild 62 Erwartungswert der Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11 bei unterschiedlicher spektraler Form, Parameter nach Tabelle 7, konstante Nachhallzeit

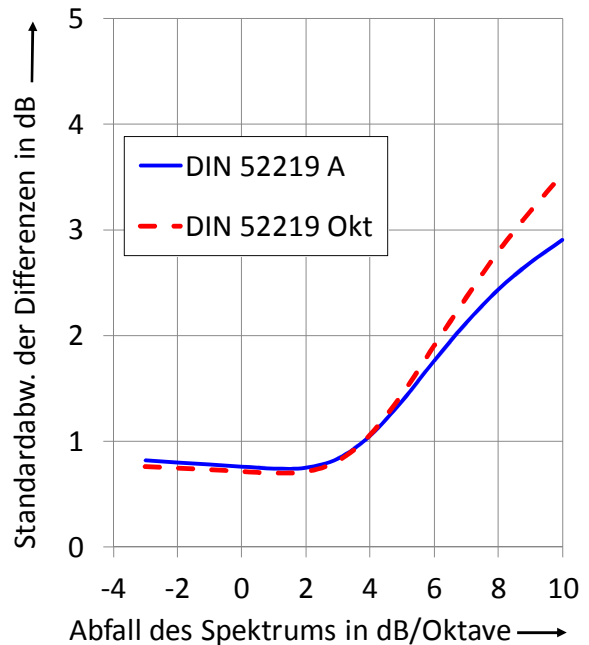


Bild 63 Standardabweichung der Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11 bei unterschiedlicher spektraler Form, Parameter nach Tabelle 7, konstante Nachhallzeit

Neben der Steilheit des Spektrums spielt der Störabstand für die Unterschiede zwischen alter und neuer Messvorschrift eine wesentliche Rolle. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurden für eine weitere Simulation die Parameter der Tabelle 7 angesetzt. Allerdings wurde der Störabstand zwischen 0 und 20 dB variiert, wobei – abgesehen vom Störabstand von 0 dB – jeweils eine Spanne von $\Delta L_{\text{streu}} = \pm 1$ dB angesetzt wurde. Für große Störabstände ergibt sich für die direkte Messung des A-Werts ein Versatz von ca. -1,7 dB zwischen den Messergebnissen nach alter und neuer Messvorschrift (Bild 64). Dieser Wert entspricht in etwa dem Mittelwert über die untersuchten spektralen Abfälle von -3 bis 10 dB / Oktave (Bild 62). Die zugehörigen Standardabweichungen liegen bei ca. 2,3 dB (Bild 65). Sinkt der Störabstand unter 6 dB, so sinkt auch die Differenz der Erwartungswerte (Bild 64). Nach einem Minimum bei ca. 3 dB Störabstand steigt der Erwartungswert der Differenz wieder auf ca.-1,7 dB an. Die Standardabweichung sinkt dagegen kontinuierlich mit sinkendem Störabstand (Bild 65).

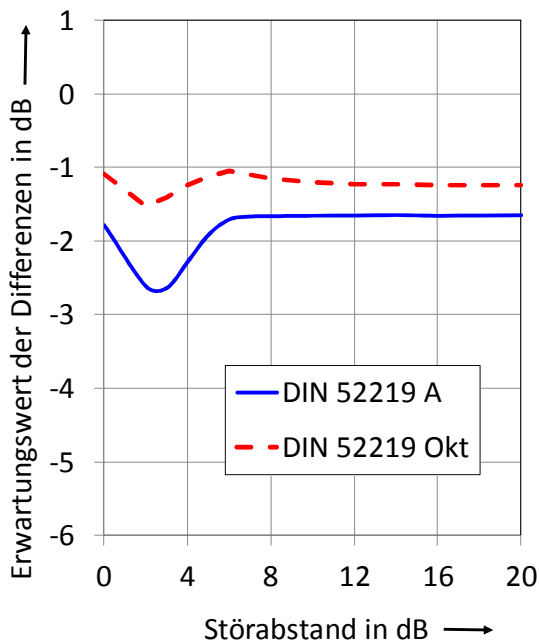


Bild 64 Erwartungswert der Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11 bei unterschiedlichen Störabständen

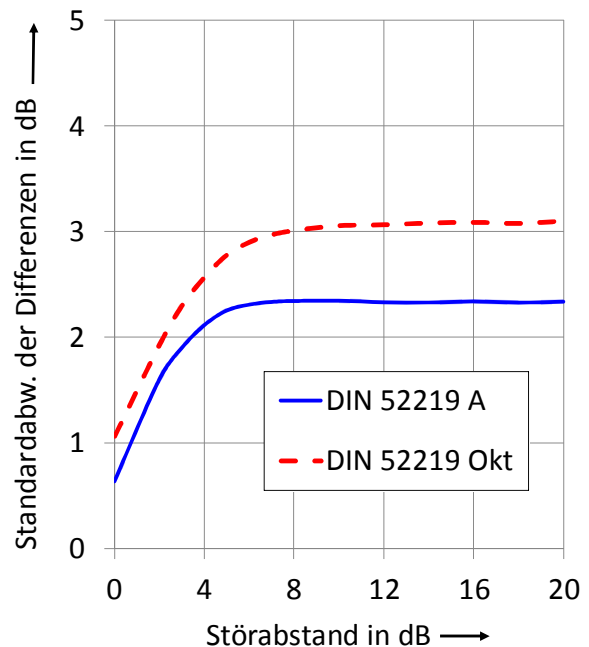


Bild 65 Standardabweichung der Differenz zwischen Installationsgeräuschpegeln ermittelt nach DIN 52219 (Messung des A-Werts oder der Oktavwerte) und DIN 4109-11 bei unterschiedlichen Störabständen

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Monte-Carlo-Simulationen die experimentellen Ergebnisse gut bestätigen. Für den Unterschied zwischen alter und neuer Messnorm ist die spektrale Form und der Störabstand wesentlich.

4.6 Vorschlag zur Unsicherheit für Messungen am Bau

Für die Unsicherheit von Messungen am Bau sind in-situ Bedingungen nach [ISO DIS 12999-1] anzusetzen. Dies bedeutet, dass die Messungen von verschiedenen Messteams mit unterschiedlicher apparativer Ausstattung am selben Messobjekt vorgenommen werden.

Neben den in Abschnitt 4.4 beschriebenen Messungen sind solche Messergebnisse auch in [Le07] dokumentiert. Gegenstand der Messung waren das Öffnungs- und Schließgeräusch eines Garagentors sowie die Geräusche einer Heizungsanlage und einer WC-Spülung. Neun verschiedene Messteams nahmen an diesen Messungen teil, die u.a. auch nach [DIN EN ISO 10052] durchgeführt wurden. Die in [DIN 4109-11] zusätzlich getroffenen Festlegungen wurden in [Le07] nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass keine Störgeräuschkorrektur durchgeführt wurde und dass die Nachhallkorrektur mit Hilfe einer Tabelle abgeschätzt wurde. Die zu messenden Pegel lagen jedoch zwischen 63 und 71 dB, so dass ein Störgeräuscheinfluss ausgeschlossen werden kann. Zudem hatte sich in Abschnitt 4.4 gezeigt, dass die Unsicherheit der Nachhallkorrektur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Unsicherheit des Endergebnisses ausübt. Damit können die Ergebnisse vom österreichischen Forum Schall mit in die Auswertung einbezogen werden. Für den A-bewerteten Installationsgeräuschpegel ergeben sich für alle vier Geräusche Standardabweichungen von ca. 1,5 dB.

Auch an der PTB liegen entsprechende Messergebnisse vor. Sie wurden im Rahmen der bauakustischen Vergleichsmessungen durch insgesamt 17 Messteams an den selben haustechnischen Anlagen im selben Empfangsraum ermittelt [SWB08]. Gemessen wurden die Ablaufgeräusche aus einem Waschbecken und das Geräusch bei der Betätigung eines WCs. Für das Waschbecken ergab sich aus den gemessenen $L_{AF,max,nT}$ – Werten eine Standardabweichung von 1,9 dB bei einem Mittelwert von 20,7 dB. Für das WC lag die Standardabweichung bei nur 1,3 dB bei einem Mittelwert von 26,4 dB. Die geringere Standardabweichung beim WC lässt sich mit dem größeren Störgeräuschabstand erklären.

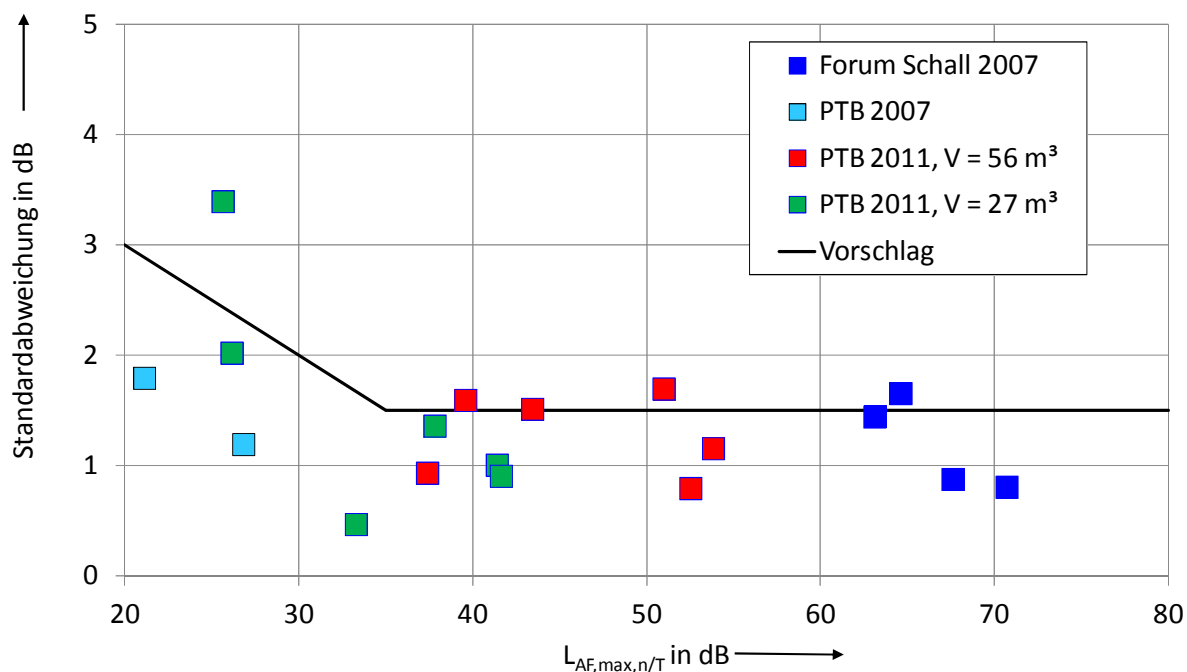


Bild 66 Standardabweichung des A-bewerteten Installationsgeräuschpegels nach DIN EN ISO 10052 aus unterschiedlichen Vergleichsmessungen und Vorschlag für eine Unsicherheit für die DIN 4109

Einen Überblick über alle vorliegenden Installationsgeräuschpegel und die zugehörigen Standardabweichungen gibt Bild 66. Die A-bewerteten Installationsgeräuschpegel liegen zwischen ca. 20 und 70 dB. Ab einem Installationsgeräuschpegel von 35 dB streuen die Standardabweichungen um einen Wert von 1,5 dB. Dieser Wert entspricht dem geometrischen Mittel der Standardabweichungen in diesem Bereich, und er wird daher als realistischer Schätzwert für die Unsicherheit von Installationsgeräuschpegeln vorgeschlagen.

Zu niedrigeren Installationsgeräuschpegeln liegen nur wenige Werte vor. Deutlich ist, dass bei den PTB-Vergleichsmessungen 2007 recht niedrige Standardabweichungen auftraten. Diese Messungen wurden in einem speziellen Prüfstand unter labornahen Bedingungen durchgeführt. Sie stellen somit eher eine Untergrenze für die Unsicherheit dar. Die im Jahr 2011 festgestellten größeren Standardabweichungen sind demgegenüber deutlich realistischer. Es wird daher vorgeschlagen, die Unsicherheit mit der folgenden Gleichung

$$u = \begin{cases} 5,0 \text{ dB} - 0,1 L_{AF,max,n/T} & L_{AF,max,n/T} < 35 \text{ dB} \\ 1,5 \text{ dB} & \text{sonst} \end{cases} \quad (33)$$

abzuschätzen (Bild 66). Beim aktuellen Anforderungswert von 30 dB beträgt die Unsicherheit damit 2,0 dB. Bei niedrigeren Installationsgeräuschpegeln ist die Unsicherheit größer und beträgt z.B. 3,0 dB bei einem Installationsgeräuschpegel von 20 dB.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Ein großer Schwerpunkt des Forschungsprojekts lag auf der Untersuchung der Installationsgeräuschmessungen im ausgeführten Gebäude. Zusätzlich zur Ermittlung der Unsicherheit ergab sich hier die spezielle Frage, ob durch die Einführung der DIN EN ISO 10052 als Messnorm die selben Werte wie bei der alten Messnorm DIN 52219 erreicht werden. Dies wurde zunächst anhand eines umfangreichen Messprogramms untersucht. Sechs verschiedene Messteams mit unterschiedlicher apparativer Ausstattung führten in zwei verschiedenen Empfangsräumen an sechs Geräuschquellen Installationsgeräuschmessungen nach alter und neuer Norm durch. Im Mittel über alle Teilnehmer zeigte sich ein um 0 – 3 dB höherer Installationsgeräuschpegel nach der neuen Norm. Um die Ursachen für diese Abweichungen genauer zu verstehen, wurden Monte-Carlo-Simulationen ausgeführt. Es zeigte sich, dass die Einführung einer Mikrofonposition in der Raumecke wesentlich ist. Bei tiefen Frequenzen sind die Schalldruckpegel hier um ca. 10 dB höher als an wandfernen Messpunkten, was bei tieffrequenten Geräuschen zu einer Erhöhung des A-Werts führt. Auch darf nach neuer Messnorm eine Störgeräuschkorrektur nur bis zu einem Störabstand von 6 dB durchgeführt werden, während nach alter Norm 3 dB zulässig waren. Im zuständigen Normungsausschuss wurde aufgrund dieser Ergebnisse eine Erhöhung des Anforderungswerts nach DIN 4109 bereits diskutiert. Für die Unsicherheit von Installationsmessungen vor Ort wird aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ein Wert von 1,5 dB vorgeschlagen, wenn der Installationsgeräuschpegel über 35 dB liegt. Zu niedrigeren Installationsgeräuschpegeln steigt nach dem erarbeiteten Vorschlag die Unsicherheit um 0,1 dB pro dB an. Beim aktuellen Anforderungswert von 30 dB liegt die Unsicherheit damit bei 2,0 dB.

Daneben wurden die Unsicherheiten bei Labormessungen an Quellen untersucht. Für die Quellcharakterisierung mit der Empfangsplattenmethode nach DIN EN 15657-1 wurde 2010 unter wesentlicher Beteiligung der PTB ein Ringversuch durchgeführt, der für den A-Wert eine Unsicherheit von 2,8 dB lieferte. Für den Armaturengeräuschpegel nach DIN EN ISO 3822 folgt aus einem Ringversuch eine Unsicherheit von 1 – 2 dB für eine Mischbatterie, je nach Mischerstellung, und für einen geräuscharmen Strömungswiderstand 2,7 dB. Für andere Labormessungen an Quellen können beim derzeitigen Kenntnisstand keine Unsicherheiten angegeben werden, zumal auch die Messverfahren selbst noch in der Entwicklung sind.

Weitgehend offen ist dagegen die Unsicherheit bei der Prognose von Installationsgeräuschen, da das einzige verfügbare Prognoseverfahren nach DIN EN 12354-5 bislang praktisch nicht angewendet wird. Da trotzdem ein Anforderungswert nach DIN 4109 einzuhalten ist, besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe „Angewandte Akustik“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, die die Installationsmessungen ausgeführt haben. Dies waren Dipl.-Ing. Christian Bethke, Dr.-Ing. Martin Schmelzer, Dipl.-Ing. Sylvia Stange-Kölling und M.Sc. Jan-Henning Schmidt. Dank geht außerdem an Dr. Anatol Worch für die Messdaten des Ringversuchs an Armaturen sowie an die Teilnehmer des Ringversuchs mit der Körperschallquelle. Schließlich sei auch dem Fachbereichsleiter Prof. Dr. Werner Scholl gedankt für die Initiierung und kritische Begleitung des Forschungsvorhabens.

Literatur

- [Alb06] T. H. Alber: *Valves as sources of structure- and fluid-borne sound*. Dissertation, University of Liverpool, 2006
- [BW12] Bietz, H.; Wittstock, V.: *Installationsgeräuschmessungen nach alter und neuer Norm im Vergleich*. Tagungsband der DAGA12 auf CDROM, Darmstadt, März 2012
- [Bo10] H. A. Bonhoff: *The influence and significance of cross-order terms in interface mobilities for structure-borne sound source characterization*. Dissertation, TU Berlin, 2010
- [DIN 4109] *Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise*, 1989-11
- [DIN 4109-11] *Schallschutz im Hochbau – Teil 11: Nachweis des Schallschutzes – Güte- und Eignungsprüfung*, 2010-05
- [DIN EN 1151-2] *Pumpen – Kreiselpumpen – Umwälzpumpen mit elektrischer Leistungsaufnahme bis 200 W für Heizungsanlagen und Brauchwassererwärmungsanlagen für den Hausgebrauch – Teil 2: Geräuschprüfvorschrift (vibro-akustisch) zur Messung von Körperschall und Flüssigkeitsschall*. 2006-11
- [DIN EN 12354-5] *Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 5: Installationsgeräusche*; Deutsche Fassung EN 12354-5:2009
- [DIN EN 14366] *Messung der Geräusche von Abwasserinstallationen im Prüfstand*. 2005-02
- [DIN EN 15657-1] *Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden – Messung des Luft- und Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand – Teil 1: Vereinfachte Fälle, in denen die Admittanzen der Anlagen wesentlich höher sind als die der Empfänger am Beispiel von Whirlwannen*; Deutsche Fassung EN 15657-1:2009
- [DIN EN ISO 140-2] *Akustik; Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen; Teil 2: Angaben von Genauigkeitsanforderungen* (ISO 140-2:1991); Deutsche Fassung EN 20140-2:1993
- [DIN EN ISO 3382-2] *Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen* (ISO 3382-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 3382-2:2008
- [DIN EN ISO 3822-1] *Akustik – Prüfung des Geräuschverhaltens von Armaturen und Geräten der Wasserinstallation im Laboratorium – Teil 1: Messverfahren* (ISO 3822-1:1999 + Amd 1:2008); Deutsche Fassung EN ISO 3822-1:1999 + A1:2008
- [DIN EN ISO 5725-2] *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen – Teil 2: Grundlegende Methode für Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens* (ISO 5725-2:1994)

- einschließlich Technisches Korrigendum 1:2002)*
- [DIN EN ISO 10052] *Akustik – Messung der Luftschalldämmung und Trittschalldämmung und des Schalls von haustechnischen Anlagen in Gebäuden – Kurzverfahren (ISO 10052:2004 + Amd 1:2010); Deutsche Fassung EN ISO 10052:2004 + A1:2010*
- [GUM] *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainties in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100:2008*
- [GQM07] B.M. Gibbs, N. Qi and A.T. Moorhouse. *A practical characterisation for vibro-acoustic sources in buildings. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 93, (2007), 84-93*
- [ISO DIS 12999-1] *Bestimmung und Anwendung der Messunsicherheiten in der Bauakustik – Teil 1: Schalldämmung (ISO/DIS 12999-1:2012); Deutsche Fassung prEN ISO 12999-1:2012*
- [KW04] D. Kutzer, A. Worch: *ENAG SANTAP 2nd round robin test 57 character to examine the noise emission of sanitary taps according to EN ISO 3822. Berichtsentwurf, 2004*
- [Le07] Christoph Lechner: *Ringversuch 2007 Messung der Schallimmission haustechnischer Geräusche und der Schalldämmung von Außenbauteilen. Report REP-0120, Wien, 2007*
- [Mo01] A. T. Moorhouse: *On the characteristic power of structure-borne sound sources. Journal of Sound and Vibration, Volume 248, Issue 3, 29 November 2001, Pages 441–459*
- [MP87] J. M. Mondot, B.A.T. Petersson: *Characterization of structure-borne sound sources: The source descriptor and the coupling function. Journal of Sound and Vibration, Volume 114, Issue 3, May 1987, Pages 507–518*
- [PG00] B.A.T. Petersson, B. Gibbs: *Towards a structure-borne sound source characterization. Applied Acoustics, Volume 61, Issue 3, November 2000, Pages 325–343*
- [RMF10] A. Ruff, A.R. Mayr, H.-M. Fischer: *Prognose für die Schallübertragung von Heizungsanlagen in Gebäuden. Tagungsband der DAGA 10 auf CDROM, Düsseldorf, März 2010*
- [Sch11] Pieter Schevenels: *Investigation of the source-structure-sound interaction in the framework of the source characterization and sound radiation of vibrating sources in buildings. Dissertation, KU Leuven, März, 2011*
- [Sim97] Christian Simmons: *Measurement of sound pressure levels at low frequencies in rooms. NordTest, TR 385, 1997*
- [Späh06] M. M. Späh: *Characterisation of structure-borne sound sources in buildings. Dissertation, University of Liverpool, 2006*

- [SCFG10] J. Scheck, M. Chamaoun, H.-M. Fischer, B. Gibbs: *Preparation of a Round Robin on the Reception Plate Method to Characterise Structure-Borne Sound Sources in Buildings*, InterNoise 2010, Lisbon
- [SWB08] Stange-Kölling, S.; Wittstock, V.; Bietz, H.: *Schallschutz-Vergleichsmessungen in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt im Jahr 2007*, Tagungsband der DAGA 08 auf CDROM, Dresden, 10. – 13. März 2008
- [Wa55] Waterhouse, R. V.: *Interference patterns in reverberant sound fields*, Journal of the Acoustical Society of America, 27, 247-258, (1955)
- [Wi10] Wittstock, V.: *Characterisation of structure-borne sound sources in buildings by the two-stage reception plate method*. Tagungsband der InterNoise 2010 auf CDROM, Lissabon, Juni, 2010
- [Wi12] Wittstock, V.: *On the spectral shape of the sound generated by standard tapping machines*. Acta Acustica united with Acustica, Vol. 98 (2012), 301-308
- [WS08] Wittstock, V.; Scholl, W.: *Berechnung der Prognoseunsicherheit nach DIN 4109*. Abschlussbericht zum gleichnamigen DIBt-Forschungsprojekt, Braunschweig, September, 2008
- [WVS11] Wittstock, V.; Villot, M., Scheck, J.: *Results of a round robin on structure-borne sound power*. Proceedings of FORUM ACUSTICUM auf CDROM, Aalborg, Denmark, Juni 2011

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