

Subjektive Bewertung der Schalldämmung

Thomas Rauscher¹, Reinhard Neubauer¹, Maria Zaglauer², Philip Leistner²

¹ IBN Bauphysik GmbH & Co. KG, 85049 Ingolstadt, E-Mail: in@ibn.de

² Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, 70569 Stuttgart

Einleitung

Die Kennzeichnung der Luftschalldämmung wird anhand einer Einzahlgröße vorgenommen. In europäischen Ländern wird hierbei vor allem auf zwei wichtige Kenngrößen zurückgegriffen. Zum einen ist dies das bewertete Bau-Schalldämm-Maß R'_w , anhand dessen beispielweise in Deutschland Anforderungen abgeleitet werden. Zum anderen findet beispielsweise in Österreich und Schweden die Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ Verwendung. Beide Kenngrößen sind in DIN EN ISO 16283-1 [1] definiert. In der vorliegenden Untersuchung wird der Fragestellung einer subjektiven Evaluierung des Unterschieds zwischen R'_w und $D_{nT,w}$ in Form eines Hörversuches basierend auf einem Messdatensatz von Luftschalldämmungsmessungen an Trennbauteilen in Wohnräumen nachgegangen. Die Ergebnisse des Hörversuchs zeigen, dass die subjektive beurteilte Lautstärke stärker und signifikant mit der Kenngröße $D_{nT,w}$ korreliert, wohingegen der Zusammenhang mit der Kenngröße R'_w schwächer und nicht signifikant ausfällt.

Theoretische Grundlagen

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der beiden Kenngrößen R'_w und $D_{nT,w}$ ist in Abbildung 1 skizziert.

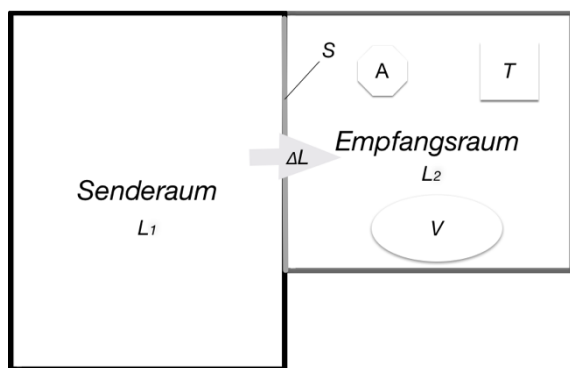


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Luftschalldämmungsmessung mit entsprechenden geometrischen und akustischen Kenngrößen.

Es werden zunächst die Schalldruckpegel im Senderaum (L_1) und im Empfangsraum (L_2) messtechnisch erfasst, wie in ISO 16283-1 [1] festgelegt. Des Weiteren wird im Empfangsraum die Nachhallzeit (T) gemessen.

Zur Berechnung der Kenngröße R'_w werden außerdem die geometrischen Kenngrößen (Empfangsraum-)Volumen (V) und die Trennbauteilfläche (S) bestimmt. Mittels der Sabine'schen Nachhallzeitformel wird die äquivalente Schallabsorptionsfläche (A) berechnet. Aus diesen Größen

wird schließlich das Bau-Schalldämm-Maß gemäß Gleichung 1 ermittelt:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \cdot \lg(S/A) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Die Differenz aus Sende- und Empfangsraumpegel bildet bei der Ermittlung der Kenngröße $D_{nT,w}$ ebenfalls die Ausgangsbasis. Als Korrekturgröße dient direkt die gemessene Nachhallzeit, die auf eine Bezugsnachhallzeit von $T = 0,5$ s bezogen wird, wie in Gleichung 2 formuliert.

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \cdot \lg(T/T_0) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

Durch eine Bewertung dieser Terzbandwerte gemäß ISO 717-1 [2] erhält man schließlich die Einzahlgröße R'_w bzw. $D_{nT,w}$. Gemäß ISO 12354-1 [3] kann eine Umrechnung der beiden Kenngrößen vorgenommen werden, wie in Gleichung 3 dargestellt.

$$D_{nT,w} - R'_w = 10 \cdot \lg(0.32 \cdot V/S) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

Der in dieser Gleichung direkte Zusammenhang der Differenz der beiden Kenngrößen zum Quotienten aus Volumen und Trennbauteilfläche (V/S) stellte die Grundidee dar, einen Datensatz von Luftschalldämmungsmessungen u.a. mit Hilfe statistischer Methoden zu untersuchen. Im Anschluss daran wurden exemplarische Datensätze ausgewählt, um einen Hörversuch in Form eines Labor-Experiments mit möglichst realitätsnahen Bedingungen durchführen zu können.

Es wurde folgende Alternativhypothese aufgestellt:

Es besteht eine signifikante von Null verschiedene Korrelation zwischen der subjektiv beurteilten Lautstärke und den Kenngrößen R'_w und $D_{nT,w}$.

Die Ergebnisse des Hörversuchs werden vergleichend betrachtet, um die Fragestellung zu prüfen, welche der beiden Kenngrößen einen stärkeren Zusammenhang mit den subjektiven Lautstärkeurteilen aufweist und damit ein besserer Indikator für die subjektiv wahrgenommene Schalldämmung darstellt.

Methode

Der Messdatensatz beinhaltete 72 Messungen von Wohnungstrennwänden und -decken mit einer Trennbauteilfläche von $S \geq 10 \text{ m}^2$. Es wurden Messungen von Wohnräumen wie Wohn-, Schlaf- und Arbeitszimmer mit in den Datensatz aufgenommen. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Anzahl an Messungen bzw. Trennbauteilen mit einer Aufteilung nach Art der Möblierung und Bauteilart dargestellt.

Tabelle 1: Anzahl der im Messdatensatz enthaltenen Trennbauteile unterteilt nach Art der Möblierung und Bauteilart

Trennbauteil	Art der Möblierung		Bauteilart	
	möbliert	unmöbliert	massiv	leicht
Wand	16	6	22	0
Decke	34	15	34	15

Es wird ersichtlich, dass im Datensatz hauptsächlich Trennbauteile massiver Bauart enthalten sind, was zu einer ersten Einschränkung der Verwendung ausschließlich massiver Bauteile für den Hörversuch führt, um statistisch signifikante Aussagen treffen zu können.

Ein Teil der objektiven Evaluierung des Datensatzes bestand in der Auswertung mittels deskriptiver Statistik.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung der im Datensatz erfassten akustischen und geometrischen Kenngrößen R'_w , $D_{nT,w}$, Volumen (V), Trennbauteilfläche (S) und Nachhallzeit (T) anhand des Shapiro-Wilk-Tests dargestellt.

Tabelle 2: Test auf Normalverteilung der akustischen und geometrischen Kenngrößen des Messdatensatzes anhand des Shapiro-Wilk-Tests

Statistische Größe	Akustische/geometrische Kenngrößen				
	R'_w	$D_{nT,w}$	V	S	T
W_{krit}	0.975				0.953
Testgröße W	0.983	0.981	0.849	0.941	0.965
p -Wert	0.950	0.940	$1.3 \cdot 10^{-6}$	0.004	0.186

Die beiden Kenngrößen der Luftschalldämmung sind demgemäß normalverteilt. Aus dieser Erkenntnis und aus dem Ergebnis der Visualisierung der Verteilung dieser beiden Kenngrößen anhand eines Boxplots gemäß Abbildung 2 wurden Trennbauteile mit R'_w - bzw. $D_{nT,w}$ -Werten in Anlehnung an die in der Grafik dargestellten Mittelwerte bzw. Mediane ausgewählt.

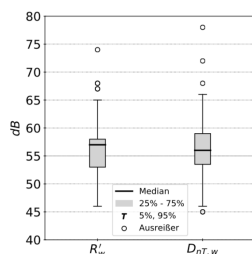


Abbildung 2: Verteilung der Werte der Schalldämm-Kenngrößen R'_w und $D_{nT,w}$ innerhalb des Messdatensatzes dargestellt anhand eines Boxplots.

Aus Tabelle 2 geht weiterhin hervor, dass die mittlere Nachhallzeit (Werte von 400 Hz bis 1250 Hz) möblierter Räume ebenfalls einer Normalverteilung folgt. Eine visuelle Darstellung dieser Nachhallzeitwerte in Abhängigkeit des

Volumens zeigt Abbildung 3. Daraus geht hervor, dass der Mittelwert der mittleren Nachhallzeit bei $T = 0.5$ s liegt. Die Auswahl der Messungen für den Hörversuch wurde - soweit möglich - auf Nachhallzeit-Werte mit diesem Mittelwert eingeschränkt.

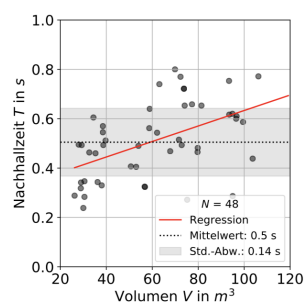


Abbildung 3: Mittlere Nachhallzeit T (400 Hz bis 1250 Hz) möblierter Räume innerhalb des Messdatensatzes in Abhängigkeit des Volumens V

Tabelle 3 zeigt schließlich die endgültige Auswahl der Trennbauteile bzw. Messdaten unter Angabe der dazugehörigen akustischen und geometrischen Kenngrößen. Um bei der Durchführung des Hörversuchs eine Unterscheidbarkeit der Signale zu gewährleisten, wurden Messwerte ausgewählt, die unterschiedliche Differenzwerte der beiden Kenngrößen ($D_{nT,w} - R'_w$), aufweisen, wie ebenfalls in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Auswahl der Daten für den Hörversuch aus dem Messdatensatz unter Angabe der akustischen und geometrischen Kenngrößen

Akustische/geometrische Kenngrößen					
R'_w	$D_{nT,w} - R'_w$	$D_{nT,w}$	V	S	T
[dB]	[dB]	[dB]	[m ³]	[m ²]	[s]
51	0	51	38.5	11.2	0.58
56	4	60	93.4	11.6	0.54
55	3	58	93.5	13.4	0.61
59	-2	57	77.3	31.7	0.65
53	1	54	96.5	28.2	0.59
53	-1	52	58.9	24.2	0.65

Am Hörversuch nahmen insgesamt 16 Probanden teil. In Tabelle 5 ist die Häufigkeitsverteilung nach Alter und Geschlecht der Probanden wiedergegeben.

Tabelle 4: Häufigkeitsverteilung nach Alter und Geschlecht der Hörversuchprobanden

	Alter (Jahre)			
	20-29	30-39	40-49	50-59
Häufigkeit	2	6	6	2
	Geschlecht			
	M	W	D	-
Häufigkeit	9	7	0	-

Der Hörversuch wurde in Form eines Dominanzpaarvergleiches als „forced choice“ A/B-Vergleich durchgeführt. Im Einklang mit einem Messwiederholungsdesign, beurteilte jeder Proband alle Paare. Die Probanden wählten dabei das jeweils subjektiv lautere Signal. Als unabhängige Variable diente der Schalldruckpegel, als abhängige Variable die subjektiv wahrgenommene Lautstärke.

Für den Hörversuch wurden drei wohnraumtypische Signale ausgewählt: Musik, Sprache und Rauschen mit einer maximalen Länge von 12 Sekunden. Als Musiksignal diente ein Popmusikstück, als Sprachsignal wurde ein aus einer männlichen und weiblichen Stimme zusammengesetztes Signal verwendet. Das Rausch-Signal beinhaltete Rosa-Rauschen. In Abbildung 5 sind jeweils der Zeit- und Frequenzverlauf der Signale dargestellt.

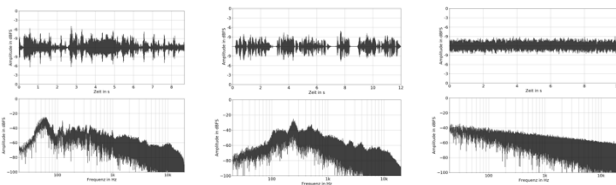


Abbildung 4: Zeit- (oben) und Frequenzdarstellung (unten) der Signale Musik (links), Sprache (mittig) und Rauschen (rechts).

Diese Signale wurden anschließend anhand sechs verschiedener Filter im Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz bearbeitet. Als Grundlage der Filter dienten die in Tabelle 2 bereits dargestellten Messungen massiver Trennbauteile. Hierbei wurde der Frequenzbereich der terzbandbreit vorliegenden Differenzwerte ($L_1 - L_2$) rechnerisch erweitert. Die Probanden bewerteten insgesamt 45 Paare von Signalen, die das Schalldämm-Maß der Trennbauteile darstellten. Der Hörversuch fand in ruhiger Umgebung mit einem A-bewerteten Grundgeräuschpegel von ca. 20 dB statt. Die Signale wurden mittels Audiointerface (Focusrite Scarlett 4i4) und geschlossenem Kopfhörer (Beyerdynamic DT1770) wiedergegeben (siehe Abbildung 4).



Abbildung 5: Wiedergabesystem bestehend aus Audiointerface (Focusrite Scarlett 4i4, links) und geschlossenem Kopfhörer (Beyerdynamic DT1770, rechts).

Vor dem Hörversuch wurden die Probanden durch einen Trainingsdurchlauf mit sechs Paarvergleichen an die Versuchsumgebung und die Bewertungsmethode herangeführt. Die Probanden wurden gebeten/instruiert, das jeweils subjektiv lautere Signal auszuwählen. Der Hörversuch dauerte ca. 45 Minuten. Die Reihenfolge der Darbietung der

Paarvergleiche wurde für jeden Probanden zufällig generiert [4].

Ergebnisse des Hörversuches

Zur Validierung der Probandenurteile wurde ein Post-Screening durchgeführt. Nach Ausschluss der Urteile eines Probanden zeigten die Konkordanz- und die Konsistenzüberprüfung, die anhand der Methode der zirkulären Triaden vorgenommen wurde, konsistente Urteile aller übrigen Probanden. Die Urteile wurden anschließend anhand des „Law of Comparative Judgement“ in eine Rangfolge überführt [5]. Diese Rangfolge wurde mit der Rangfolge der jeweiligen Kenngrößen R'_w bzw. $D_{nT,w}$ verglichen und die Korrelation überprüft. Diese Überprüfung fand für jedes der drei Signale separat statt.

Die Ergebnisse des Hörversuchs sind in Abbildung 6 dargestellt.

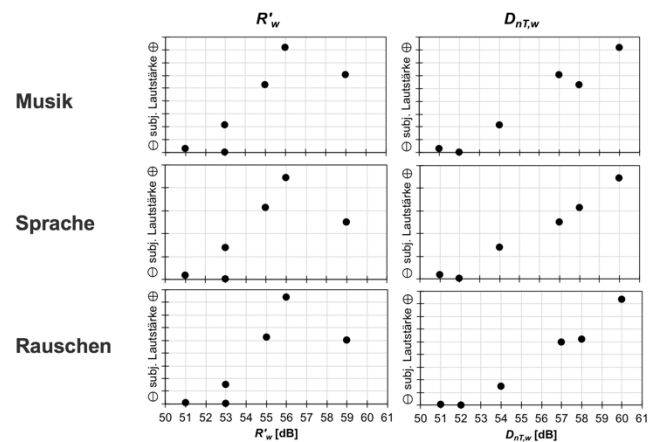


Abbildung 6: Ergebnisse der subjektiven Beurteilungen des Hörversuchs in Abhängigkeit des Signals (oben: Musik, mittig: Sprache, unten: Rauschen) und der Schalldämm-Kenngröße (links: R'_w , rechts: $D_{nT,w}$).

Es zeigt sich, dass unabhängig von der Signalart ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen den Urteilen der Probanden und der Kenngröße $D_{nT,w}$ besteht, wohingegen die Kenngröße R'_w nur bedingt einen linearen Zusammenhang zu den Urteilen erkennen lässt.

Die statistische Überprüfung der Hörversuchshypothese fand anhand des Rangreihenkorrelationskoeffizienten Spearman's ρ statt [6]. Die Analyse durch diesen Koeffizienten besagt, dass die Nullhypothese verworfen werden kann, wenn der Wert ρ gleich oder größer einem kritischen Wert von in diesem Fall $\rho_{krit} = 0.886$ ist. Dieser Wert wurde für ein Signifikanzniveau von 0.05 bestimmt. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse in Abhängigkeit der Signalart aufgeführt.

Tabelle 5: Statistische Hypothesenüberprüfung anhand des Rangreihenkorrelationskoeffizienten Spearman's ρ (kritischer Wert: $\rho = 0.886$)

Kenngröße	Signal		
	Musik	Sprache	Rauschen
R'_w	0.843	0.729	0.786
$D_{nT,w}$	0.886	0.943	0.986

Es zeigt sich, dass diese Analyse die Aussagen der visuellen Darstellung der Hörversuchsergebnisse bestätigt. Der Korrelationskoeffizient aus der Rangfolge der subjektiven Bewertungen und der Rangfolge der Kenngröße R'_w erreicht bei keinem der drei Signale den kritischen Wert. Die Nullhypothese wird nicht verworfen, mit dem Ergebnis, dass statistisch keine Korrelation zwischen den subjektiven Bewertungen und der Kenngröße R'_w besteht. Der Korrelationskoeffizient bei Betrachtung der Kenngröße $D_{nT,w}$ hingegen erreicht und überschreitet stets den kritischen Wert, so dass die Nullhypothese verworfen werden kann. Statistisch besteht somit eine signifikant von Null verschiedene Korrelation zwischen den subjektiven Bewertungen und der Kenngröße $D_{nT,w}$.

Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse dieses Hörversuchs zeigen eine von der Art des Signals unabhängigen, starken und signifikanten Zusammenhang zwischen den Beurteilungen der Lautstärke als Indikator für die empfundene Schalldämmung und der Kenngröße $D_{nT,w}$. Die Korrelation der subjektiven Urteile und der Kenngröße R'_w waren hingegen nicht signifikant.

Bevor eine uneingeschränkte Empfehlung zur bevorzugten und einheitlichen Verwendung der Kenngröße $D_{nT,w}$ gegeben werden kann, sind weitere Untersuchungen notwendig.

Folgestudien sollten darauf abzielen, die in dieser Untersuchung vorgestellten Ergebnisse in Feldstudien zu replizieren, beispielsweise unter Verwendung von Lautsprechern oder aber in Form einer Online-Befragung mittels Crowd-Sourcing. Des Weiteren wäre es sinnvoll, verschiedene Hörversuchsszenarien zu entwickeln, um signalabhängige, frequenzabhängige oder bauteilspezifische Unterschiede herauszuarbeiten.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 16283-1 Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 1: Luftschalldämmung, Beuth Verlag, Berlin, 2018
- [2] DIN EN ISO 717-1 Akustik - Bewertung der Schalldämmung In Gebäuden und von Bauteilen - Teil 1: Luftschalldämmung, Beuth Verlag, Berlin, 2020.
- [3] DIN EN ISO 12354-1 Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil1: Luftschalldämmung zwischen Räumen, Beuth Verlag, Berlin, 2017
- [4] Zacharov N. Sensory Evaluation of Sound. CRC Press, Boca Radon, Florida, 2018

[5] Bortz J. Döring N. Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2006

[6] Sheskin D. J. Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures. Chapman and Hall/CRC Press, Boca Radon, Florida, 2000