

# Untersuchungen zur Anwendbarkeit eines Referenzabsorbers für Absorptionsgradmessungen nach dem Hallraumverfahren

Volker Wittstock, Heinrich Bietz

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig volker.wittstock@ptb.de

## Einleitung

Die Unsicherheit von Absorptionsgradmessungen nach dem Hallraumverfahren wird für viele Anwendungen als inakzeptabel hoch angesehen. Seit langem werden Möglichkeiten diskutiert, einen Referenzabsorber mit bekanntem oder bestimmbar Absorptionsgrad einzusetzen, um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu erhöhen. In jüngerer Zeit ist im Rahmen der Überarbeitung der ISO 354<sup>1</sup> die Verwendung eines Referenzabsorbers vorgeschlagen worden<sup>2</sup>. Bei den in der PTB stattfindenden Schallschutz-Vergleichsmessungen wurde der vorgeschlagene Referenzabsorber im schiefwinkligen Hallraum der PTB gemessen, um Erfahrungen mit der praktischen Anwendbarkeit zu sammeln und Erkenntnisse über verschiedene Eigenschaften (Einbauwiederholbarkeit, zeitliche Konstanz, Klimaeinflüsse etc.) zu gewinnen. Es wurde bei zwei Terzbändern eine außergewöhnlich hohe Streuung der Ergebnisse festgestellt, um diese zu erklären wurden einige zusätzliche Untersuchungen durchgeführt. Weiterhin wurden seitens der PTB verschiedene Konfigurationen von Absorbern, die einen weiten Bereich von Absorptionsgraden abdecken, in beiden Hallräumen der PTB gemessen. Es wurde untersucht, ob sich die Differenzen zwischen den gemessenen Absorptionsgraden durch die Verwendung eines Referenzabsorbers signifikant verringern lassen. Im Beitrag werden die gewonnenen Erkenntnisse im Lichte der aktuellen Vorschläge zur Überarbeitung der ISO 354 diskutiert.

## Konzept eines Referenzabsorbers

Ein Referenzabsorber ist ein Prüfobjekt, dessen „wahrer“ Absorptionsgrad  $\alpha_{\text{Ref}}$  festgelegt ist. Die Ermittlung von  $\alpha_{\text{Ref}}$  kann z.B. durch Berechnung oder einen Ringversuch erfolgen. Wird dieser Referenzabsorber nun in einem bestimmten Hallraum gemessen, erhält man den für diesen Hallraum gültigen Absorptionsgrad  $\alpha_{\text{Ref,Mess}}$ . Der für einen beliebigen Absorber in diesem Hallraum gemessene Wert  $\alpha_{\text{Mess}}$  könnte nun in einen vom Hallraum unabhängigen Wert  $\alpha_{\text{Korr}}$  mit folgender Gleichung umgerechnet werden:

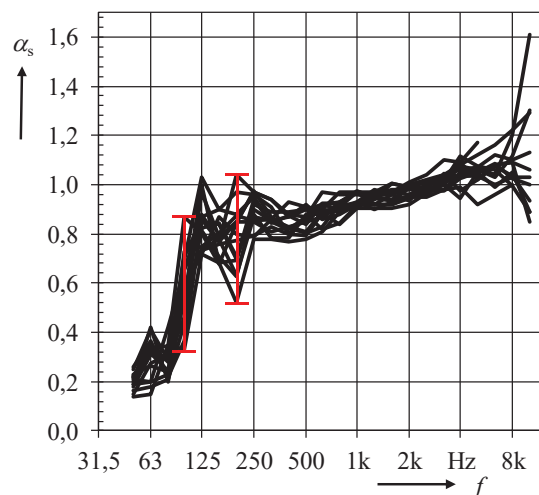
$$\alpha_{\text{Korr}} = \alpha_{\text{Mess}} \frac{\alpha_{\text{Ref}}}{\alpha_{\text{Ref,Mess}}} \quad (1)$$

Hierbei ist natürlich zu bedenken, dass alle Eingangsgrößen mit einer Messunsicherheit behaftet sind.

## Vergleichsmessungen in der PTB

Der bei den Vergleichsmessungen der PTB eingesetzte Referenzabsorber entspricht dem Vorschlag aus <sup>2</sup>. Er hat eine Gesamtfläche von 3,6 m x 3,0 m und besteht aus zwei Lagen kaschierter Mineralwolle von 100 mm Stärke, so dass sich insgesamt ein 200 mm dicker Absorber ergibt. Die seitlichen Flächen sind mit einem Holzrahmen abgedeckt. Der Absorber wurde zunächst von sechs Teams aus der PTB gemessen, um einen Referenzwert für die Vergleichsmessung zu erhalten, in deren Verlauf dann insgesamt neun Teilnehmer den Absorptionsgrad bestimmt haben. Der Absorber wurde für jede Messung ein- und

wieder ausgebaut. Alle fünfzehn Messergebnisse sind in Bild 1 dargestellt.



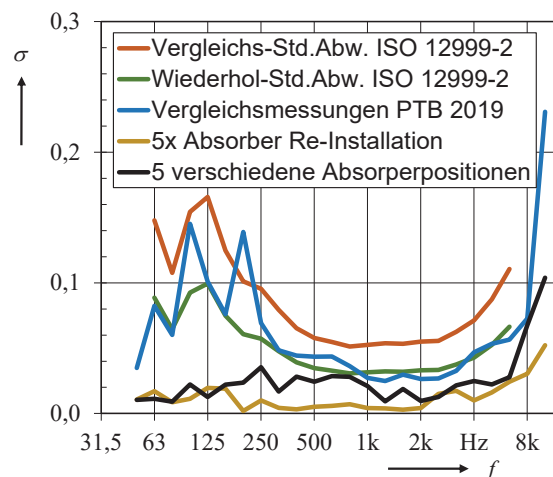
**Bild 1:** Zusammenfassung aller Ergebnisse der Vergleichsmessungen (Referenzmessungen und Teilnehmer)

Auffallend sind die erheblichen Streuungen der Ergebnisse bei 100 Hz und 200 Hz. Um diese erklären zu können, wurden in der Folge verschiedene Einflüsse näher untersucht:

- Einbau und Positionierung des Absorbers
- Luftfeuchtigkeit
- Mikrofonpositionen
- Vergleich mit dem rechtwinkligen Hallraum der PTB

## Einbau und Positionierung

Hier wurde zunächst der Absorber fünf Mal an derselben Position ein- und wieder ausgebaut. Alle Messparameter blieben unverändert. Danach wurde der Absorber an fünf verschiedenen, aber normgerechten Positionen im Hallraum eingebaut. Lautsprecher- und Mikrofonpositionen blieben jeweils unverändert.



**Bild 2:** Vergleich der aus wiederholtem Einbau und Variation der Absorberposition resultierenden Standardabweichungen zu denen der Vergleichsmessungen

Die aus den resultierenden Streuungen berechneten Standardabweichungen sind in Bild 2 dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet ist die nach ISO 12999-2<sup>3</sup> berechnete Vergleichsstandardabweichung und Wiederholstandardabweichung, wobei hier der Mittelwert aus den Vergleichsmessungen zu Grunde gelegt wurde. Ebenfalls eingezeichnet ist die aus den Vergleichsmessungen resultierende Standardabweichung. Diese folgt in weiten Bereichen eher der Wiederhol- als der Vergleichsstandardabweichung. Im Vergleich hierzu sind die Standardabweichungen für den Absorbereinbau und die Absorberpositionen klein und erklären keinesfalls die großen Werte bei 100 Hz und 200 Hz.

### Einfluss der Luftfeuchtigkeit

Eine mögliche Erklärung für die großen Streuungen bei einigen Frequenzen wäre, dass der Absorber Strukturresonanzen aufweist, die empfindlich auf die Veränderung diverser Randbedingungen reagieren. Hier wurden die klimatischen Bedingungen als möglicher Einfluss in Betracht gezogen. Eine statistische Analyse zeigt zum Beispiel bei 200 Hz eine recht schwache, aber nicht unerhebliche Korrelation zwischen Absorptionsgrad und Luftfeuchtigkeit. Es wurden zwei weitere Messungen durchgeführt, wobei die Luftfeuchtigkeit den bei den Vergleichsmessungen vorliegenden Variationsbereich vollständig abdeckte. Alle anderen Randbedingungen blieben unverändert, es wurde auch in beiden Fällen auf die gleiche Leerraum-Nachhallzeit zurückgegriffen, damit der Absorber nicht aus- und wieder eingebaut werden musste. Bild 3 zeigt die Absorptionsgrade aus der Vergleichsmessung und den Nachmessungen bei 200 Hz abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Der bei der Nachmessung ermittelte Absorptionsgrad zeigt keine Abhängigkeit von der Luftfeuchte, obwohl diese über ca. 20 % variiert wurde.

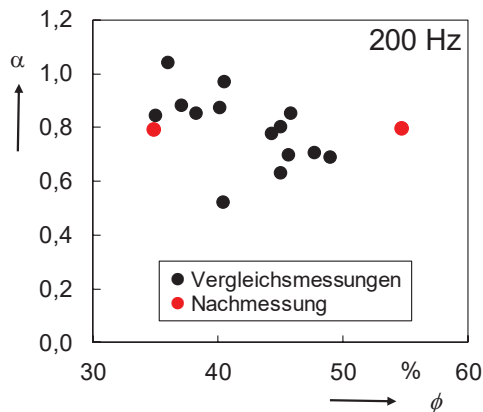


Bild 3: Absorptionsgrad bei 200 Hz in Abhängigkeit von der Luftfeuchte

### Einfluss der Mikrofonpositionen

Die Messnorm verlangt mindestens zwölf unabhängige Kombinationen von Lautsprecher- und Mikrofonpositionen, bei mindestens zwei Lautsprecherpositionen. In der Praxis werden meistens vier Mikrofonpositionen und drei Lautsprecherpositionen verwendet. Auch unter Beachtung der in der Messnorm geforderten Mindestabstände ergibt sich hier ein relativ großer Spielraum bei der Auswahl der Positionen. Um den Einfluss der Mikrofonpositionen auf die Streuung der Messergebnisse näher zu untersuchen, wurde eine weitere Zusatzmessung mit fünfzig Mikrofonpositionen und drei Lautsprecherpositionen durchgeführt. Hierzu wurde jede Mikrofonposition geometrisch erfasst, und die Übertragungsfunktionen von den drei Lautsprecherposi-

tionen zu dieser Mikrofonposition mittels Korrelationsmesstechnik (Sweep) bestimmt. Somit ergibt sich für den leeren Raum und den Raum mit Absorber jeweils ein Satz von 150 Übertragungsfunktionen, aus denen dann die entsprechenden Nachhallzeiten berechnet wurden. Für die statistische Auswertung wurden nun mittels eines Zufallsalgorithmus für eine vorgegebene Anzahl von  $n$  Mikrofonpositionen (z.B. 4) eine Anzahl von  $z$  Datensätzen gezogen. Hierbei wurde durch den Algorithmus sichergestellt, dass in einem Datensatz keine Mehrfachauswahl einer Mikrofonposition enthalten ist, und die gezogenen Mikrofonpositionen hinsichtlich des Abstandes untereinander den Anforderungen der Norm genügen. Dies ist erforderlich, weil man im vorgegebenen Raumvolumen nicht 50 Mikrofonpositionen finden kann, die alle untereinander einen Abstand von 1,5 m haben. Anschließend wurde für jeden gezogenen Datensatz (gleiche Positionen für leeren Raum und Raum mit Absorber) der Absorptionsgrad unter Verwendung aller drei Lautsprecherpositionen berechnet, so dass man letztlich  $z$  Datensätze von Absorptionsgraden erhält, deren Mittelwert und Standardabweichung berechnet wurde. Als Beispiel ist in Bild 4 das  $\pm 2\sigma$  Intervall für  $n = 4$  und  $z = 1000$  zusammen mit den Ergebnissen der Vergleichsmessung (wie in Bild 1) dargestellt.

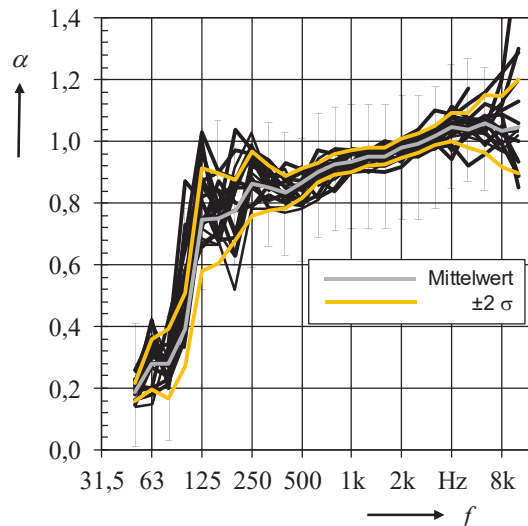


Bild 4: Mittelwert und  $\pm 2\sigma$  Intervall für  $n = 4$  und  $z = 1000$

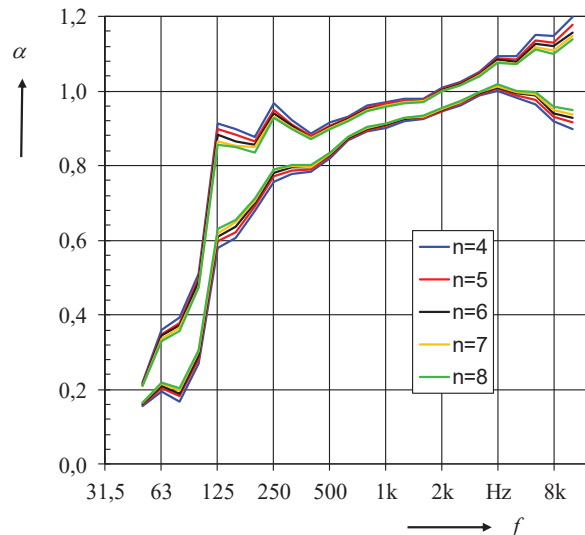
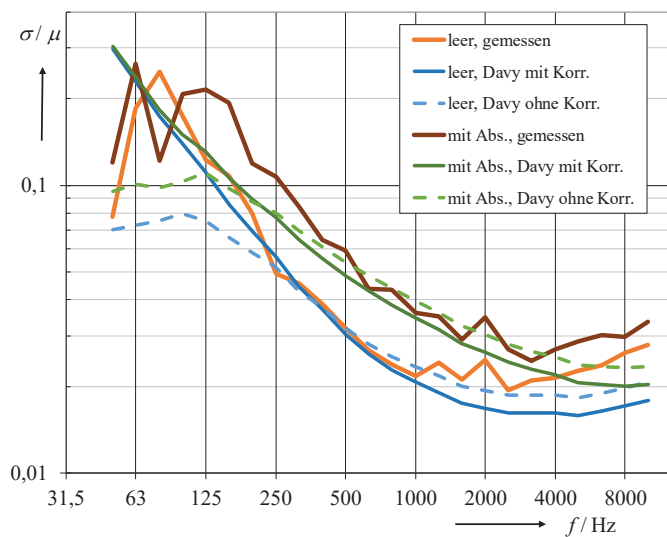


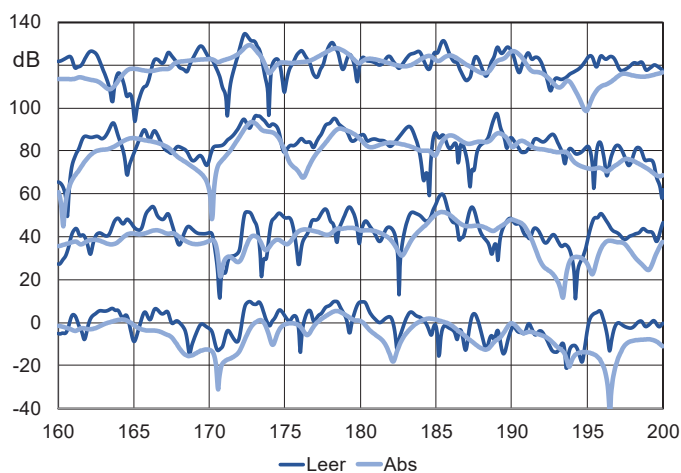
Bild 5: Einfluss der Anzahl  $n$  der Mikrofonpositionen auf die Streuung ( $\pm 2\sigma$ ),  $z = 1000$

Die resultierende Streuung deckt dabei zwar nicht die gesamten Ergebnisse ab (es wurden ja auch nicht alle Parameter variiert), es ist aber offensichtlich, dass die Wahl der Mikrofonpositionen die mit Abstand größte Streuung generiert. Dieses Ergebnis könnte den Schluss nahelegen, dass die Streuung durch Erhöhung der Anzahl der Mikrofonpositionen verringert werden kann. Wie aus Bild 5 ersichtlich ist, steht die Verringerung der Streuung in keinem Verhältnis zu dem messtechnischen Mehraufwand.

Für eine Einschätzung, ob die Streuung über die Mikrofonpositionen im Hallraum einer theoretisch zu erwartenden Größenordnung entspricht, wurde ein Rechenmodell von DAVY<sup>4</sup> in einer erweiterten Version, welche eine Korrektur für tiefe Frequenzen enthält, herangezogen. Der Vergleich zwischen gemessener und berechneter relativer Standardabweichung ist in Bild 6 dargestellt. Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung, bei der Messung mit Absorber sind die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung bei tiefen Frequenzen etwas größer.



**Bild 6:** Vergleich der relativen Standardabweichung gemessen und nach DAVY<sup>4</sup> gerechnet, 150 unabhängige Nachhallzeiten



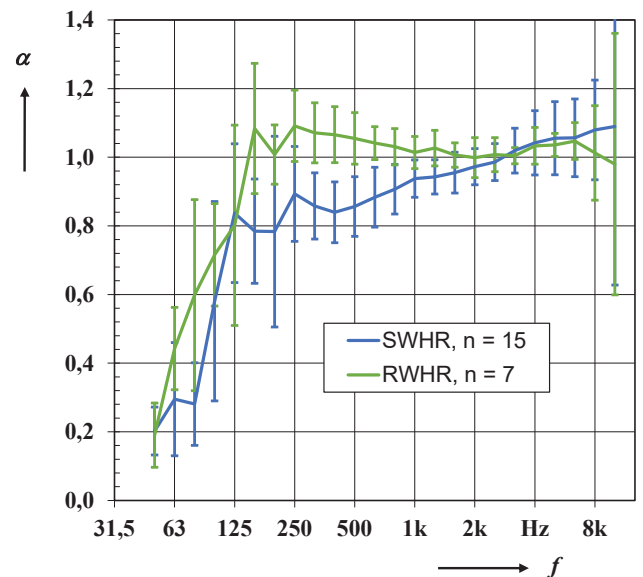
**Bild 7:** Mit und ohne Absorber gemessene schmalbandige Übertragungsfunktionen an vier Mikrofonpositionen. Die Kurven für jede Position sind um 20 dB versetzt dargestellt.

Weiterhin interessant ist der Vergleich von schmalbandig gemessenen Übertragungsfunktionen mit und ohne Absorber. Bild 7 zeigt beispielhaft die Übertragungsfunktionen in einem Frequenzbereich von 160 Hz bis 200 Hz für vier verschiedene Mikrofonpositionen. Durch Einbringung des Absorbers kommt es zu

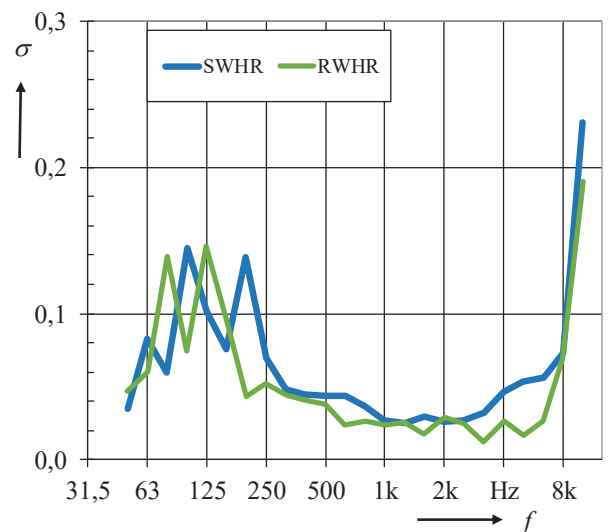
einer erheblichen Veränderung des Schallfeldes. Minima verschwinden teilweise, an anderer Stelle tauchen aber auch neue auf. Dies läuft der teilweise erhobenen Forderung zuwider, in einem Hallraum bestimmte „eingemessene“ Mikrofonpositionen zu verwenden.

### Vergleich mit rechteckigem Hallraum

Es besteht natürlich auch die Möglichkeit, dass die Streuungen bei tiefen Frequenzen durch den Messraum verursacht werden. Folglich wurden mit dem Referenzabsorber sieben unabhängige Messungen im zweiten Hallraum der PTB durchgeführt. Dieser hat eine rechteckige Geometrie und ein Volumen von 237 m<sup>3</sup>. Bild 8 und Bild 9 zeigen den Vergleich der Mittelwerte und der Standardabweichungen aus beiden Räumen. Bei den Absorptionsgraden gibt es insbesondere im Bereich mittlerer Frequenzen signifikante Abweichungen zwischen beiden Räumen. Die Standardabweichungen sehen dagegen ähnlich aus, in beiden Räumen gibt es ausgeprägte Maxima bei tiefen Frequenzen.



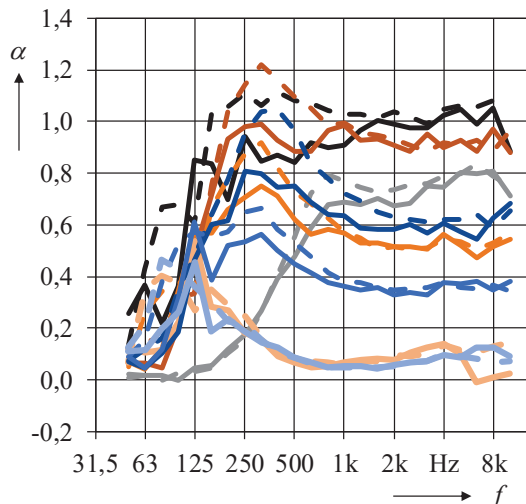
**Bild 8:** Mittelwerte aus schiefwinkligem (SWHR) und rechteckigem Hallraum (RWHR), mit  $\pm 2 \sigma$  Fehlerindikatoren



**Bild 9:** Zu Bild 8 gehörende Standardabweichungen

### Korrektur mit einem Referenzabsorber

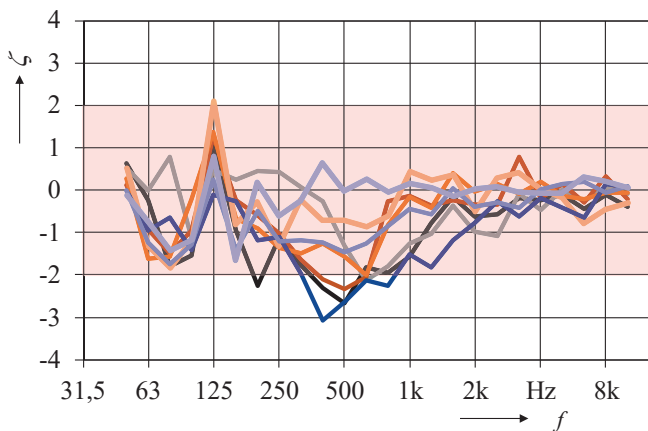
Um zu überprüfen, ob sich die systematischen Unterschiede zwischen den Messräumen durch Korrektur mit einem Referenzabsorber verringern lassen, wurden insgesamt neun verschiedene Absorberkonfigurationen, die einen weiten Bereich von Absorptionsgraden abdecken, in beiden Hallräumen gemessen. Die Ergebnisse sind zusammengefasst in Bild 10 dargestellt.



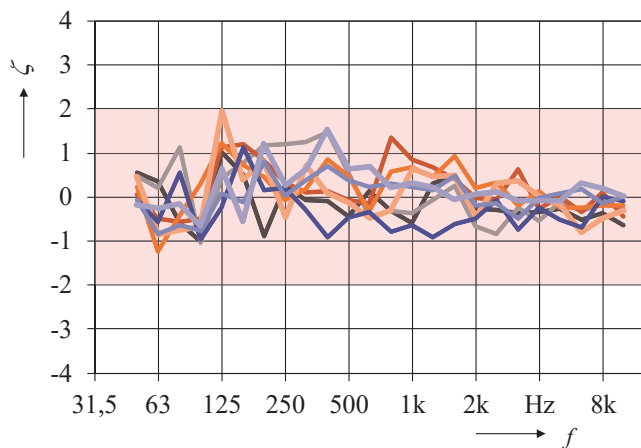
**Bild 10:** Absorptionsgrade von neun verschiedenen Proben; Gestrichelt: RWHR, durchgezogen: SWHR

Auf diese Messwerte wurde nun die Korrektur nach Gleichung (1) angewandt. Der nominelle Wert  $\alpha_{Ref}$  für den Referenzabsorber wurde aus dem Mittelwert der beiden in Bild 8 dargestellten Verläufe gebildet. Diese Werte wurden auch für  $\alpha_{Ref,Mess}$  herangezogen. Da die Prüfobjekte stark unterschiedliche Absorptionsgrade aufweisen, wurde zur besseren Einschätzung der Verbesserung durch die Korrektur eine kritische Differenz  $\zeta$  eingeführt. Hier wird die Differenz der Absorptionsgrade aus beiden Hallräumen auf die nach <sup>3</sup> ermittelten Messunsicherheiten  $u$  normiert:

$$\zeta = \frac{\alpha_{SWHR} - \alpha_{RWHR}}{\sqrt{u^2(\alpha_{SWHR}) + u^2(\alpha_{RWHR})}} \quad (2)$$



**Bild 11:** Kritische Differenz  $\zeta$  für den unkorrigierten Fall



**Bild 12:** Kritische Differenz  $\zeta$  für den korrigierten Fall

Diese Berechnung wurde für die unkorrigierten und die korrigierten Werte durchgeführt, die Ergebnisse sind in Bild 11 und Bild 12 dargestellt. Im unkorrigierten Fall sind die Differenzen unsymmetrisch um die Nulllinie verteilt, was die systematische Abweichung zwischen den Räumen widerspiegelt. Trotzdem liegen immerhin 94 % der Werte in einem Intervall von  $\pm 2 \zeta$ , welcher ähnlich wie ein 95 % Vertrauensintervall interpretiert werden kann. Die Werte für den korrigierten Fall verteilen sich gleichmäßiger um die Nulllinie, und es liegen jetzt auch alle Werte im  $\pm 2 \zeta$ -Intervall. Das Ergebnis dieser Untersuchung lässt also durchaus den Schluss zu, dass die Verwendung eines Referenzabsorbers die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus verschiedenen Hallräumen verbessert.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die bei der Vergleichsmessung aufgetretenen großen Streuungen des Absorptionsgrades sind im Wesentlichen auf die Unterschiede zwischen verschiedenen Mikrofonpositionen zurückzuführen. Beide Hallräume der PTB weisen hinsichtlich der Streuungen ein ähnliches Verhalten auf. Es treten jedoch systematische Abweichungen beim Absorptionsgrad auf, die durch Verwendung eines Referenzabsorbers verringert werden können.

Es wäre daher wünschenswert, einen Referenzabsorber zu entwickeln, der langfristig verfügbar, mechanisch robust und hinsichtlich seines Absorptionsgrades langzeitstabil wäre. Der nominelle Absorptionsgrad sollte dann entweder berechenbar sein oder im Rahmen eines Ringversuchs festgelegt werden.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Teilnehmern der Vergleichsmessung 2019 und bei allen Mitarbeitern der AG Angewandte Akustik der PTB für die tatkräftige Unterstützung. Der Firma Ecophon Schweden sei für die Bereitstellung des Referenzabsorbers gedankt.

<sup>1</sup> EN ISO 354:2003 Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen

<sup>2</sup> ISO/CD 354:2019 Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room

<sup>3</sup> DIN EN ISO 12999-2:2020 Akustik - Bestimmung und Anwendung der Messunsicherheiten in der Bauakustik - Teil 2: Schalldämpfung

<sup>4</sup> Davy, J.L.: The Variance of Decay Rates at Low Frequencies, Applied Acoustics 23 (1988), 63-79