Berechnung der Nachhallzeit in Rechteckräumen mit ungleichmäßiger Absorberverteilung – Teil II Raumkonfigurationen und Beispielberechnungen

Klaudius Hengst[1], Moritz Späh[2,] Xiaoru Zhou[2]

[1] *Knauf Gips KG, 97346 Iphofen, E-Mail:hengst.klaudius@knauf.de*

[2] *Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, 70569 Stuttgart, E-Mail: moritz.spaeh@ibp.fraunhofer.de*

Einleitung

Die Nachweisführung raumakustischer Gutachten üblicher Räume erfolgt in der Regel auf Grundlage von Prognosemodellen nach Sabine [1] oder Eyring [2]. Als Beispiele seien hier Klassenzimmer, Büros, Mensen oder Besprechungsräume genannt. Gemäß DIN 18041 [3] können das Räume der Gruppe A mit Nutzungsschwerpunkt Sprachkommunikation über mittlere und größere Entfernungen, oder Räume der Gruppe B, mit dem Schwerpunkt der Kommunikation über geringe Entfernungen sein.

Das Prognoseverfahren nach Sabine setzt die Bedingung eines annähernd diffusen Schallfeldes voraus. Auf der DAGA 2018 wurden Untersuchungen in einem Musterklassenraum vorgestellt die nahelegen, dass diese Bedingung selbst in einem eingerichteten Klassenraum nicht zwangsläufig vorhanden ist [4,5], d.h. dass Nachhallzeiten gemessen werden, die länger sind als sie nach Sabine prognostiziert werden. Die auf der DAGA 2020 vorgestellten Ergebnisse aus einem kleineren und zudem massiv gebauten Raum bestätigten diese Beobachtung [6].

Diese Messergebnisse zeigen, dass ein Absorber in einem nicht ideal diffuses Schallfeld weniger wirksam sein kann als die Messung unter idealen Bedingungen im Hallraum ausweist [7]. Daher müssen die im Hallraum ermittelte Absorptionswerte in der Berechnung nach Sabine mit Bedacht verwendet werden.

Die aktuelle DIN 18041 greift im normativen Anhang A die Thematik diffuser Schallfelder auf und weist darauf hin, dass bei ungleichmäßig verteilter äquivalenter Absorptionsfläche im Raum, numerische Methoden wie Strahlenverfolgung oder erweiterte Rechenmethoden wie nach [8] zum Einsatz kommen können.

Ein raumakustisches Modell für einen der genannten Räume zu entwerfen stellt in den meisten Fällen einen unverhältnismäßig hohen Aufwand dar. Das Prognosemodell nach EN 12354-6 Anhang D stellt den Anwender ebenfalls vor eine anspruchsvolle Aufgabe, nicht zuletzt durch die Notwendigkeit von Streugraden.

Im Rahmen von Forschungsprojekten in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) in Stuttgart wurde ein Rechenmodell entwickelt, das eine Berechnung der Nachhallzeit in Rechteckräumen mit ungleichmäßiger Absorberverteilung und realistischere Nachhallzeitprognosen ermöglicht [9,10].

Praxisbeispiele - Absorptionswerte

Bei jeder Nachhallzeitprognose stellt sich die Frage nach den Eingangsdaten, den Absorptionswerten. In der Regel ist es ausreichend, Decke, Boden und Wände sowie größere Einrichtungsgegenstände wie Stühle, Tische, Schränke und gegebenenfalls Absorberelemente in die Berechnung einzubeziehen. Abbildung 1 zeigt eine Tabelle, der in den Beispielrechnungen verwendeten Absorptionsgrade α_s. Auf Personen im Raum wurde bewusst verzichtet, da die Belegungsdichte eines Raumes zwar die Akustik positiv beeinflussen kann, aber keine Voraussetzung für einen akustisch funktionierenden Raum darstellen sollte.

Als Datenquellen dienten zum einen die DIN 18041, die im Anhang beispielhaft Absorptionsgrade verschiedener Materialien auflistet. Die Absorptionsdaten der verwendeten Akustikdecken und der Möblierung wurden im Hallraum bestimmt. Weiterhin flossen Erfahrungswerte wie die der Absorptionswirkung von Gipskarton-Ständerwänden in die Datenbank mit ein.

Frequenz f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Material	**Absorptionsgrad alpha**					
GKB-Akustikdecke 1	0,56	0,83	0,53	0,49	0,33	0,35
GKB-Akustikdecke 2	0,55	0,75	0,80	0,75	0,75	0,75
MW-Akustikdecke 3	0,55	0,65	0,70	0,70	0,65	0,60
Teppichboden	0,02	0,04	0,07	0,19	0,29	0,35
Linoleum auf Beton	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Massivwand	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
Gipskarton	0,06	0,04	0,02	0,04	0,06	0,06
Verglasung	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02
Polsterstühle	0,07	0,11	0,28	0,39	0,34	0,31
Tische + Stühle	0,01	0,02	0,04	0,04	0,05	0,06

Abbildung 1: In den Prognosen verwendete Absorptionsgrade in Oktavbändern.

Praxisbeispiele - Streugrade

Streugrade werden als Eingangsdaten für das neue Prognosemodell, sowie für die Berechnung nach EN 12354-6 Anhang D benötigt. Es gibt derzeit nur eine überschaubare Anzahl an Quellen, aus denen entsprechende Werte entnommen werden können. Die Festlegung der in Abbildung 2 gezeigten Streugrade erfolgte unter Einbeziehung der Quellen [11,12].

Die Tabelle in Abbildung 2 zeigt Streugrade mit und ohne Möblierung. Dabei werden allen Oberflächen (Decke, Boden, Wände) dieselben Streugrade zugewiesen, abhängig davon, ob der Raum möbliert ist oder nicht.

Streugrade weisen, verglichen mit Absorptionsgraden, deutlich geringere Werte auf. Zudem kann festgestellt werden, dass die Berechnungen sehr sensibel auf Veränderungen der Streugrade reagieren, d.h. geringe Veränderungen des Streugrades können, bei geringer

Absorption in einer Raumrichtung, zu einer erheblichen Veränderung im Prognoseergebnis führen.
Die Absorptions- und Streugrade wurden bei allen Prognosemodellen beim jeweiligen Raum gleich gelassen, so dass ein direkter Vergleich der Rechenverfahren möglich ist.

Frequenz f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
	Streugrad s					
ohne Möblierung	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
mit Möblierung	0,03	0,05	0,10	0,17	0,12	0,10

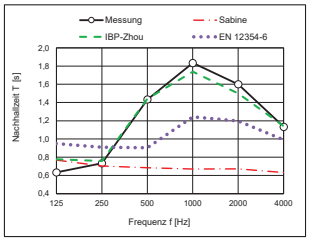
Abbildung 2: Streugrade in Oktavbändern, abhängig vom Möblierungszustand [9].

Messergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden vier Raumszenarien vorgestellt, bei denen die Absorptionsflächen im Raum unterschiedlich verteilt sind. In diesen Räumen wurden die Nachhallzeiten T20 gemäß [13] gemessen und ausgewertet und mit den Rechenverfahren nach [1], [8] und [9] verglichen.

Abbildung 3 zeigt den Test-Klassenraum aus [4], bei dem nur eine einzige große Absorptionsfläche in Form einer Akustikdecke vorhanden ist. Die Prognose nach Sabine unterschätzt die Nachhallzeit, verglichen mit den gemessenen Werten ab 250 Hz deutlich, was auf ein nicht-diffuses Schallfeld hindeutet. Die Berechnung nach EN-12354-6 bildet die Nachhallzeit tendenziell besser ab, unterschätzt jedoch ebenfalls die realen Verhältnisse. Einzig das neue Prognosemodell kann in diesem nicht diffusen Schallfeld den Nachhallzeitverlauf in guter Übereinstimmung mit den Messwerten abbilden.

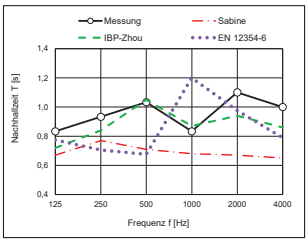
Dieses Szenario entspricht in der Regel keinem üblichen Klassenraum, jedoch finden sich in der Praxis durchaus Räume, die in Ausstattung und Größe vergleichbar sind. Als Beispiel seien hier Mensen, Aulen aber auch größere Wohnräume mit geringer Möblierung genannt.



Abmessungen (LxBxH):	10,0 m x 6,9 m x 2,85 m
Decke:	GKB-Akustikdecke. alpha_w = 0,70
Boden:	Beton
Wände:	GKB, Fenster, Blech-Sandwichkonstruktion
Einrichtungsgegenstände:	Keine

Abbildung 3: Links oben: Foto des Test-Klassenraums, ca. 70 m² unmöbliert; rechts oben: gemessene und prognostizierte Nachhallzeiten; unten: Raumdaten.

Durch das Einbringen von Tischen und Stühlen (vgl. Abb. 4) erhöht sich die äquivalente Absorptionsfläche im Raum nur geringfügig. Die deutlich niedrigere gemessene Nachhallzeit im Raum bestätigt jedoch ein diffuseres Schallfeld, als es ohne Möblierung der Falls ist (Abb. 3). Die Prognose nach Sabine liefert jedoch auch in diesem Zustand noch immer deutlich kürzere Nachhallzeiten als gemessen. Die erweiterte Rechenmethode nach EN 12354-6 zeigt einen sehr ungleichmäßigen Nachhallzeitverlauf, es zeigen sich deutliche Abweichungen von den Messwerten. Das neue Prognosemodell bildet die reale Nachhallzeit tendenziell gut ab. Obgleich es tief- und hochfrequent Abweichungen zur Messung gibt, ist es doch deutlich genauer als die Prognosemodelle nach Sabine oder EN 12354-6 Anhang D.

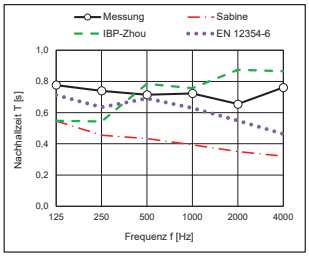


Abmessungen (LxBxH):	10,0 m x 6,9 m x 2,85 m
Decke:	GKB-Akustikdecke. alpha_w = 0,70
Boden:	Beton
Wände:	GKB, Fenster, Blech-Sandwichkonstruktion
Einrichtungsgegenstände:	15 Tische, 30 Stühle

Abbildung 4: Links oben: Foto des Test-Klassenraums möbliert, ca. 70 m²; rechts oben: gemessene und prognostizierte Nachhallzeiten; unten: Raumdaten.

Abbildung 5 zeigt einen Besprechungsraum mit einer Fläche von etwa 120 m² bei einer relativ geringen lichten Raumhöhe von 2,83 m. Durch die Akustikdecke und den Teppichboden ergibt sich eine deutlich höhere Absorption in Z-Richtung, während die Wände in x- und y-Richtung nur geringe Absorption aufweisen.

Obwohl die Ausstattung des Raumes üblich ist, führt die Möblierung offensichtlich nicht zu einem ausreichend diffusen Schallfeld, um eine Prognose nach Sabine zu rechtfertigen. Die zwei erweiterten Rechenmethoden zeigen ein gemischtes Bild. Die gemessene Nachhallzeit wird teilweise unter- und teilweise überschätzt. Beide Berechnungsmethoden zeigen jedoch bessere Übereinstimmung mit den Messwerten als die Prognose nach Sabine und verbessern die raumakustische Prognose deutlich.

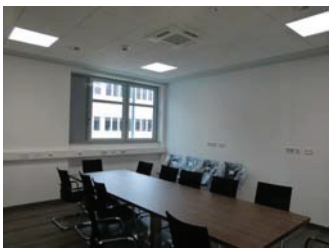


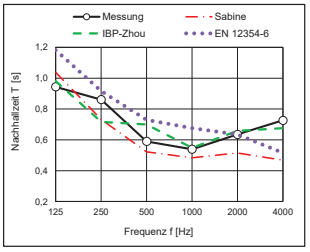
Abmessungen (LxBxH):	16,4 m x 7,5 m x 2,83 m
Decke:	GKB-Akustikdecke 2. alpha_w = 0,80
Boden:	Teppich auf Beton
Wände:	GKB, Massiv, Vergasung
Einrichtungsgegenstände:	Polsterstühle, Tische, Sideboard

Abbildung 5: Links oben: Foto des Besprechungsraums mit ca. 120 m² Grundfläche; rechts oben: gemessene und prognostizierte Nachhallzeiten; unten: Raumdaten.

Der Vergleich zwischen Messung und Prognose im vierten, mit 30 m² relativ kleinen, Besprechungsraum (vgl. Abb. 6) zeigt eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung mit dem Prognosemodell nach Sabine bis 1000 Hz. Dies legt den Schluss nahe, dass das Schallfeld tief- und mittelfrequent für dieses Rechenmodell ausreichend diffus ist. Das liegt vermutlich nicht zuletzt an der vergleichsweise gering absorbierenden Akustikdecke.

Ab 1000 Hz steigt die gemessene Nachhallzeit etwas an und weicht damit von der Prognose nach Sabine ab. Dieser Verlauf wird durch das neue Prognosemodell abgebildet. Zusätzlich lässt sich in diesem Raum ein leichtes Flatterecho ausmachen. Das erweiterte Rechenmodell nach EN 12354-6 überschätzt die Nachhallzeit tendenziell etwas und bietet in diesem Raum für die Prognose keine Vorteile.





Abmessungen (LxBxH):	5,9 m x 5,2 m x 3,0 m
Decke:	Mineralfaser Akustikdecke 3. alpha_w = 0,60
Boden:	Linoleum auf Beton
Wände:	GKB, Massiv, Fenster, Verglasung
Einrichtungsgegenstände:	Polsterstühle, Tische, Sideboard

Abbildung 6 Links oben: Foto des Besprechungsraums mit ca. 30 m² Grundfläche; rechts oben: gemessene und prognostizierte Nachhallzeiten; unten: Raumdaten.

Zusammenfassung/Fazit

Nachhallzeitprognosen auf Grundlage des neuen Rechenmodells zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten der hier vorgestellten vier unterschiedlichen Raumsituationen. Auch bei weiteren Räumen unterschiedlicher Ausstattung konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnungen und Messungen festgestellt werden. Es zeigt sich, dass die verwendeten Streugrade für viele übliche Raumszenarien passend sind.

Bei ungleichmäßiger Verteilung der äquivalenten Absorptionsfläche und dem daraus resultierenden nicht diffusen Schallfeld unterschätzt die Rechenmethode nach Sabine die Nachhallzeit zum Teil erheblich. Je extremer die Ungleichverteilung ist, desto deutlicher zeigt sich der Unterschied zwischen Messung und Berechnung.

Die erweiterte Rechenmethode gemäß EN12354-6 Anhang D bezieht Streugrade in die Nachhallzeitprognose mit ein. Die Ergebnisse sind bei nicht ideal diffusem Schallfeld in der Regel genauer als die Prognose mit der Berechnungsmethode nach Sabine. Trotzdem weicht das Ergebnis in vielen Fällen zum Teil erheblich von den Messwerten ab.

Der Einsatz des neuen Prognoseverfahrens IBP-Zhou, als Ergänzung zu den üblichen Methoden, kann die raumakustische Planungssicherheit erhöhen und die Nachweisführung positiv unterstützen, indem mögliche ungünstige raumakustische Szenarien im Vorfeld erkannt werden und die deutlich längere Nachhallzeit prognostiziert werden kann.

Damit stellt das Modell ein Bindeglied zwischen einer Nachhallzeitprognose nach Sabine und raumakustischer Simulationssoftware dar, da die Rechenmethode in Tabellenkalkulationsprogrammen umsetzbar ist.

Literatur

[1] Sabine, W. C.: Collected Papers on Acoustics, Harvard University Press, 1922

[2] Eyring, CF.: Reverberation Time in “Dead” Rooms. J Acoust Soc Am, Volume 1, Jan. 1930, p 168.

[3] DIN 18041:2016-03 Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung, Beuth Verlag

[4] Hengst, K.; Späh, M; Zhou, X.: Klassenraumakustik und Absorberverteilung – Messungen, DAGA 2018, München

[5] Späh, M.; Hengst, K.; Zhou, X.: Klassenraumakustik und Absorberverteilung – Messungen und Berechnungen, DAGA 2018, München

[6] Hengst, K.; Aoki, Y.; Späh, M.; Zhou, X.: Schallabsorption einer gelochten Akustikdecke bei winkelabhängigem Schalleinfall; DAGA 2020, Hannover

[7] DIN EN ISO 354:2003-12 Messung der Schallabsorption in Hallräumen, Beuth Verlag

[8] EN 12354-6:2003: Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 6: Sound absorption in enclosed spaces.

[9] Zhou, X., Späh, M., Hengst, K., Zhang, T.: Predicting the Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non-Uniform Absorption Distribution. Applied Acoustics 171 (2021) 1 January 2021, 107539, https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107539

[10] Späh, M.; Zhou, X.; Hengst, K.; Zhang, T.: Berechnung der Nachhallzeit in Rechteckräumen mit ungleichmäßiger Absorberverteilung, DAGA 2021, Wien

[11] Rychtáriková, M. Correction algorithm for sound scattering coefficient measurements. ICA 2016 Buenos Aires.

[12] Vorländer, M. Case studies in measurement of random incidence scattering coefficients. Acta Acustica United Acustica Sept. 2004;90(5):858–67.

[13] DIN EN ISO 3382-2:2008-09, Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik-Teil 2, Beuth Verlag