Berechnung der Nachhallzeit in Rechteckräumen mit ungleichmäßiger Absorberverteilung

Moritz Späh[1], Xiaoru Zhou[1], Klaudius Hengst[2], Ting Zhang[1]
[1] *Fraunhofer Institut für Bauphysik, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart*
E-Mail: moritz.späh@ibp.fraunhofer.de
[2] *Knauf Gips KG, Am Bahnhof 7, 97346 Iphofen*

Einleitung

Die Nachhallzeit ist nach wie vor eine der wichtigsten Parameter der Raumakustik. Vor allem in „normalen“ Räumen wie Besprechungsräume, Klassenzimmer, Wohnräume oder Seminarräume wird die Raumakustik, wenn sie überhaupt geplant wird, über die Nachhallzeit beurteilt und eingestellt. Die grundlegendste Methode die Nachhallzeit in Räumen zu beurteilen, ist die Berechnung nach Sabine [1], die durch die Ergänzung von Eyring [2] auch für Räume mit hohem gemittelten Schallabsorptionsgrad und sehr kurzen Nachhallzeiten anwendbar gemacht wurde. Dennoch gehen beide Ansätze davon aus, dass die Verteilung der Schallabsorption in allen Raumrichtungen relativ gleichmäßig und die Abmessungen des Raumes eher homogen sind, so dass sich ein (nahezu) diffuses Schallfeld einstellt. In realen Rechteckräumen jedoch, in denen die nach Sabine ermittelte notwendige Schallabsorption ausschließlich oder überwiegend durch absorbierende Unterdecken eingebracht wird, ergeben sich bei Messungen regelmäßig längere Nachhallzeiten. Dies ist schon lange bekannt, so dass in der Vergangenheit verschiedene Ansätze zur Berechnung der Nachhallzeit vorgeschlagen wurden, die alle auf einer verschieden gearteten Berücksichtigung der unterschiedlich verteilten Absorptionsfläche im Raum beruhen [3 – 5]. Untersuchungen dazu wurden in [6, 7] vorgestellt. Alle diese Ansätze berücksichtigen nicht, dass mit der ungleichmäßigen Absorberverteilung die Abklingkurven der Nachhallzeit nicht immer gerade, sondern auch durchhängend verlaufen können. Daher wurde in [8] eine neue Berechnungsmethode vorgestellt, die dieses Verhalten berücksichtigt und eine bessere Übereinstimmung mit Messergebnissen sowie einen Hinweis auf die Art der Abklingkurven ermöglicht.

Neues Rechenverfahren

Das Rechenverfahren [8] geht davon aus, dass das Schallfeld im Raum in vier Teilschallfelder aufgeteilt werden kann: in x- y- und z-Richtung, sowie in das diffuse Schallfeld. Daher setzt sich die Schallenergiedichte im Raum aus diesen vier Anteilen zusammen. Die Berechnungsgleichungen des Modells sind in [8] beschrieben. Die Berechnung beruht auf der Ermittlung des Schalldruckquadrats der einzelnen Schallfelder, das über der Zeit zur Abklingkurve des gesamten Schallfelds summiert wird. Für die einzelnen Teilschallfelder wird zunächst ein Startwert der Abklingkurve ermittelt, indem für die einzelnen Raumrichtungen von einer Kugelschallquelle in Raummitte ausgegangen wird, deren initiale Welle an den entsprechenden Raumoberflächen eine Reflexion erfährt und sich bis in die Raummitte ausbreitet. Beim Durchlaufen der Schallwelle im Raum werden die folgenden Absorptionsmechanismen in dieser Reihenfolge angenommen: Luftabsorption, Schallabsorption durch streifenden Schalleinfall (an den entsprechenden seitlich begrenzenden Flächen), Schallabsorption bei der Reflexion sowie Verluste durch die Streuung der senkrecht zur Ausbreitungsrichtung angeordneten Oberflächen. Die Reihenfolge der Absorptionsmechanismen wird durch effektive Absorptionsgrade berücksichtigt, so dass die Summe der einzelnen Absorptionsanteile nicht größer als eins wird. Der Startwert für den diffusen Schallfeldanteil wird aus dem Gesamt-Schalldruckpegel eines statistischen Schallfelds, abzüglich der Startwerte der Schallfelder in den drei Raumrichtungen ermittelt. Dabei wird die gesamte Absorptionsfläche im Raum nach der Eyringschen Absorption berücksichtig, sowie die mittlere freie Weglänge, eine Kugelausbreitung und eine Reflexion zugrunde gelegt.

Für das Abklingen der einzelnen Schallfelder werden wiederum die oben genannten Absorptionsmechanismen und auch die gleiche Reihenfolge angenommen, jedoch von einer ebenen Wellenausbreitung ausgegangen. Damit erhält man vier Abklingkurven, die zu einer gesamten Abklingkurve summiert wird. In Pegeldarstellung sind alle Abklingkurven der Teilsysteme Geraden mit unterschiedlichem Startwert, die in der Summe für Räume mit diffusem Schallfeld ebenfalls eine Gerade ergeben (die Gerade des diffusen Schallfelds), Im Falle eines Raums mit ungleichmäßiger Absorberverteilung erzeugen sie jedoch eine durchhängende Kurve, aus der die Nachhallzeit für einen Abfall von 0 bis -30 dB ermittelt wird.

Beispiel Klassenraum

Als Beispielraum wird ein Klassenraum betrachtet, der schon in den Untersuchungen in [6, 7] zugrunde gelegt wurde. Es handelt sich dabei um einen Muster-Klassenraum mit einer Länge von 10 m, einer Breite von 6,88 m und einer Höhe von 2,85 m (mit Unterdecke), der von Knauf für raumakustische Untersuchungen aufgebaut wurde. Eine Längswand war die vorhandene Außenwand eines Industriegebäudes aus gedämmter Leichtmetallkonstruktion mit Fenstern, die anderen drei Wände bestanden aus Gipskarton-Ständerwänden, die einseitig doppelt beplankt ausgeführt waren. Die Rohdecke war eine Betonrippendecke, die zwischen den Rippen mit GKB verkleidet war, der Raum hatte einen Betonboden. Der Raum ist in Bild 1 dargestellt.

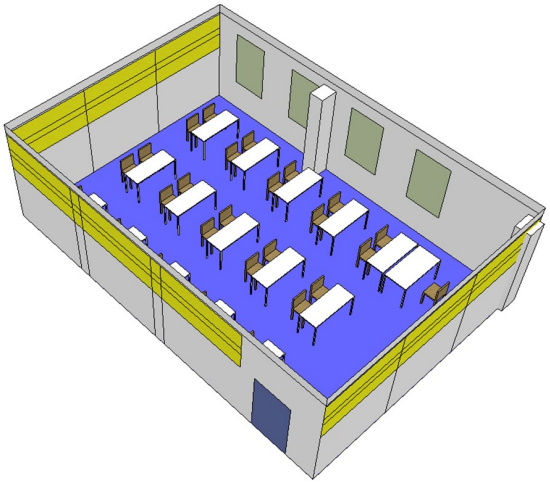

Abbildung 1: Klassenraum der Knauf Gips KG.

Berechnungsergebnisse

Die berechneten Abklingkurven der einzelnen Teilsysteme sowie die Summen-Abklingkurve für den Fall, bei dem die Decke mit einer absorbierenden Unterdecke mit α_w=0.7 ausgestattet war, sind für die 2 kHz Oktave in Abbildung 2 dargestellt.

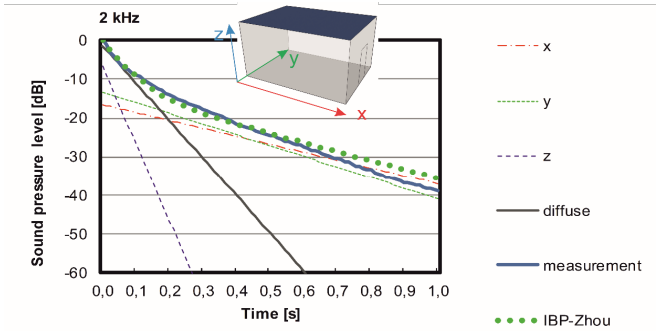

Abbildung 2: Berechnete und gemessene Abklingkurven für den Klassenraum bei der 2 kHz Oktave.

Die Ergebnisse in Abbildung 2 zeigen, dass in Z-Richtung die Kurve am steilsten ist, denn in dieser Richtung wirkt die schallabsorbierende Unterdecke am stärksten, jedoch ist der Startwert dieser Abklingkurve höher als in den anderen beiden Raumrichtungen, weil diese Raumdimension die kleinste ist. Für die beiden anderen Richtungen x und y sind die Abklingkurven deutlich flacher. Die Kurve für das Diffusfeld liegt in ihrer Steilheit zwischen den Raumrichtungen, besitzt aber den höchsten Startwert. Damit bestimmt sie die Summen-Abklingkurve (in Abb. 2 mit IBP-Zhou bezeichnet) zu Beginn des Abklingvorgangs. Im späteren Verlauf wird diese Abklingkurve durch die beiden x- und y-Richtungen bestimmt, so dass sie insgesamt durchhängt. Dieses Verhalten stimmt gut mit der gemessenen Abklingkurve im Raum überein.

Für die weiteren relevanten Oktavfrequenzen sind die Kurven in Abbildung 3 dargestellt.

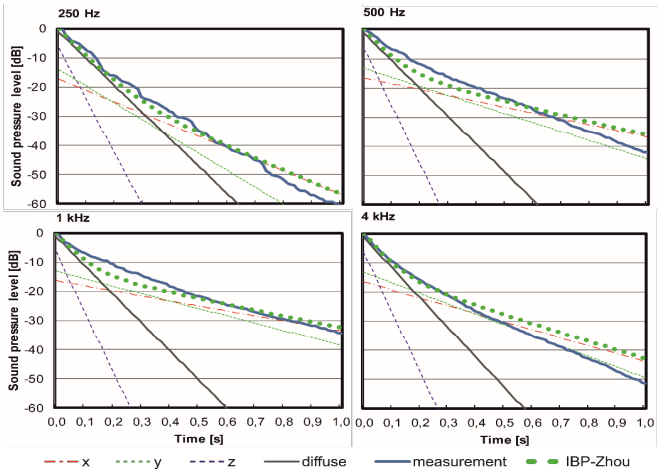

Abbildung 3: Berechnete und gemessene Abklingkurven für den Klassenraum für weitere Oktaven.

Auch für die Oktaven bei 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz und 4kHz zeigt sich ein ähnliches Bild in Abbildung 3, d.h. sowohl die berechnete Summen-Abklingkurve als auch gemessenen Abklingkurven sind mehr oder weniger durchhängend, die Berechnung ergibt ähnliche Werte zu gemessenen Nachhallzeiten.

Vergleich mit anderen Berechnungsverfahren

Die Ergebnisse des neuen Rechenverfahrens [8] wurden mit den Rechenverfahren nach Sabine, Eyring, Fitzroy, Arau-Puchades und EN 12354-6 verglichen, die in [6] näher beschrieben sind. Hierbei wurden für drei verschiedene Laborräume, die mit sehr unterschiedlicher schallabsorbierender Ausstattung gemessen und berechnet wurden, für insgesamt 43 Raumvarianten der relative Fehler von Berechnungsergebnis minus Messergebnis nach Gleichung (1) bestimmt:

$$\text{relativer Fehler} = \frac{T_{berechnet} - T_{gemessen}}{T_{gemessen}} \qquad (1)$$

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 in Boxplots dargestellt.

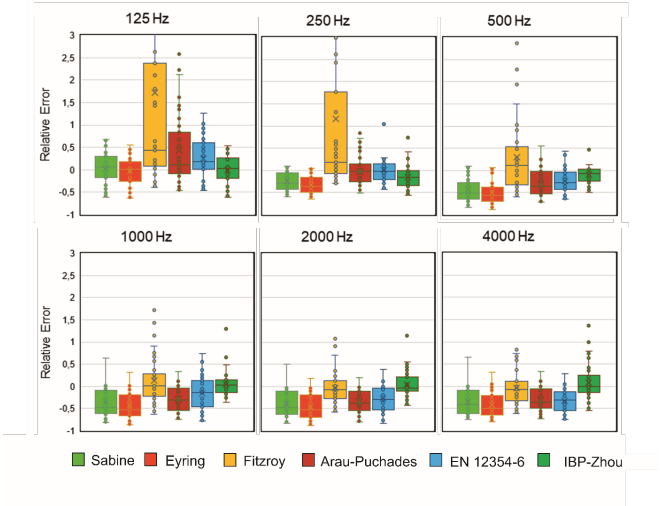

Abbildung 4: Boxplots des relativen Fehlers von Berechnung minus Messung für 43 verschiedene Raumvarianten.

Der Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden bezüglich des relativen Fehlers zeigt, dass z.B. die Berechnung nach Sabine und Eyring bei Frequenzen ab 250 Hz aufwärts im Mittel (das x innerhalb der Box) bei negativen Werten liegt, denn beide Verfahren liefern bei Räumen mit ungleichmäßiger Verteilung der Absorption kürzere Nachhallzeiten als gemessen. Dagegen liefert die Berechnung nach Fitzroy vor allem tieffrequent deutlich längere Nachhallzeiten als gemessen, und besitzt daher einen mittleren relativen Fehler mit positivem Wert. Außerdem zeigt die sehr große Box (die mittleren 50% aller ermittelten Werte), dass die Streuung der relativen Fehler (und damit der berechneten Werte) nach dieser Rechenmethode zumindest tieffrequent sehr groß ist. Die Berechnung nach Arau-Puchades und nach EN 12364-6 liefern ähnliche relative Fehler. Das neue Rechenverfahren, auch hier bezeichnet mit IBP-Zhou, liefert dagegen im Mittel die beste Übereinstimmung mit der Messung (Mittelwerte nahe null) und durch die kleinsten Boxen ersichtlich, die geringste Streuung des relativen Fehlers. Das bedeutet, dass das Rechenverfahren sowohl bei Rechteckräumen mit gleichmäßiger Verteilung der Absorption, als auch bei Räumen mit sehr ungleichmäßiger Verteilung die Nachhallzeit am besten abschätzen kann.

Online-Rechentool

Um das Berechnungsmodell auch Personen zugänglich zu machen, die weniger Erfahrung bei der Programmierung in Tabellenkalkulationsprogrammen haben, wurde es in einem Online-Tool umgesetzt, das mit dem genannten Link [9] verwendet werden kann. Dabei wurden bei der Programmierung innovative Methoden eingesetzt. In Abbildung 5 ist die Startseite des Online-Rechentools gezeigt.

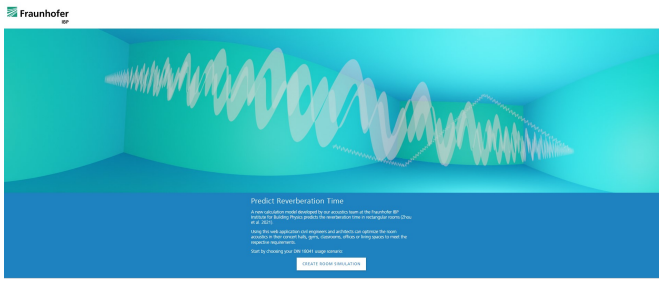

Abbildung 5: Startseite des Online-Rechentools.

Zunächst kann der Zielbereich der Nachhallzeit nach DIN 18041:16 für Räume der Raumgruppe A ausgewählt werden, mit dem die Ergebnisse verglichen werden sollen. Dann erfolgt die Eingabe der Raumparameter und die Zuordnung von Materialien für die einzelnen 6 Raumoberflächen des Rechteckraums. Dabei können mehrere Materialien pro Oberfläche mit ihren Absorptionsgraden sowie verschiedene Streugrade gewählt werden, die für die einzelnen Oberflächen jeweils gemittelt werden.

Für die Auswahl der Streugrade werden im Rechentool aktuell drei verschiedene Streugradkurven angeboten, die aus den wenigen in der Literatur vorhandenen Angaben zu Streugraden abgeleitet sind. Dabei ist zu beachten, dass die Streugrade nicht materialabhängig, sondern eher von der Konstruktion der Oberflächen abhängig sind und auch etwaige Streuung von Möblierung mitberücksichtigen sollten. Die Berechnungsergebnisse sind von der Wahl der Streugrade abhängig, insbesondere wenn die mittlere Absorption in der entsprechenden Raumrichtung gering ist, so dass die Auswahl der Streugrade mit Bedacht vorgenommen werden sollte.

Die Übersicht über die Oberflächen des Raumes zeigt grafisch sowohl die gewählten Absorptionsgrade als auch die Streugrade für die einzelnen Materialien an. Weiterhin können die klimatischen Bedingungen, die die Luftabsorption beeinflussen, für den betrachteten Raum ausgewählt werden.

Nach dem Start der Berechnung werden die Ergebnisse der Berechnung ausgegeben. Hierbei wird ein Bookmark erstellt, der eine Weitergabe der Berechnung mit den entsprechenden gewählten Parametern ermöglicht. Der Vergleich der berechneten Nachhallzeiten mit der Nachhallzeit nach Sabine sowie ein Vergleich zum gewählten DIN 18041 Toleranzbereich wird sowohl online als auch im PDF-Bericht zur Berechnung dargestellt, siehe Abbildung 6.

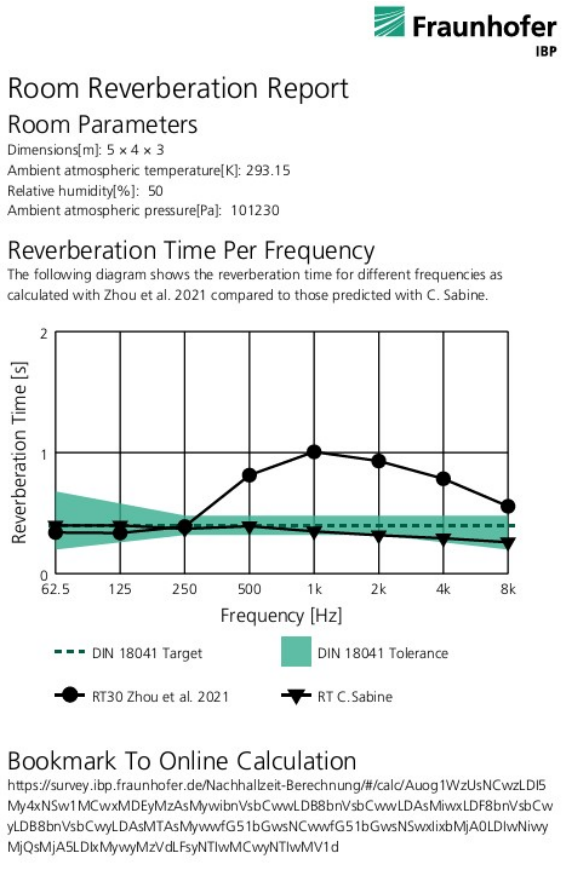

Abbildung 6: Auszug des PDF-Berichts des Online Rechentools mit Bookmark.

Bei der Online-Berechnung können zusätzlich auch die Abklingkurven der berechneten Oktav-Mittenfrequenzen eingesehen werden, so dass gegebenenfalls durchhängende Abklingkurven identifiziert werden können. Dies ist für eine Beispielrechnung bei 500 Hz in Abbildung 7 dargestellt.

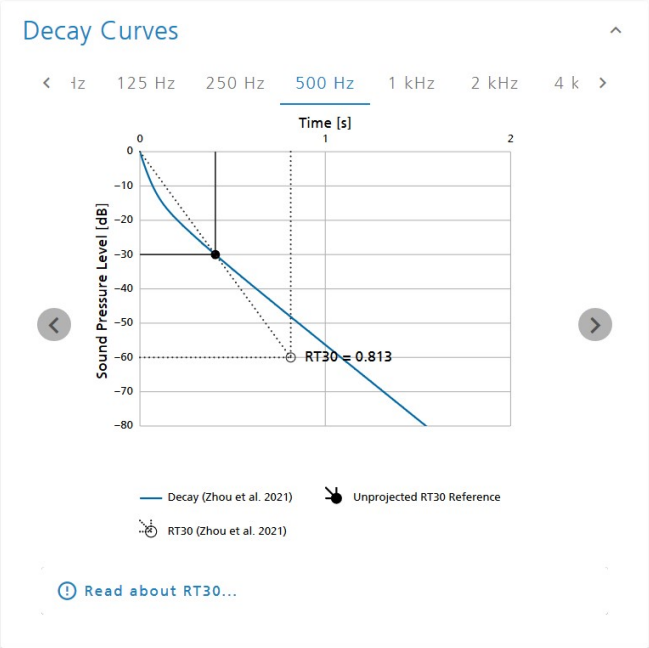

Abbildung 7: Online-Darstellung der berechneten Abklingkurve für eine Beispielrechnung bei 500 Hz.

Weiterhin ermöglicht das Rechentool die Ausgabe der Berechnungsergebnisse in einem PDF-Bericht, der alle Eingaben und die Ergebnisse der Berechnung umfasst. Ein Auszug des Berichts ist in Abbildung 6 dargestellt.

Zusammenfassung

Das vorgestellte Rechenmodell berechnet die Nachhallzeiten in Rechteckräumen mit ungleichmäßiger Absorberverteilung unter Berücksichtigung des oftmals vorkommenden nicht-diffusen Schallfelds. Zur Berechnung werden Absorptionsgrade und Streugrade verwendet, wobei die Streuung bei geringer Absorption in der jeweiligen Raumrichtung einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse hat, wie es auch in realen Räumen der Fall ist. Das Berechnungsmodell ermöglicht es, die Charakteristik auch von durchhängenden Abklingkurven in Räumen mit ungleichmäßiger Absorberverteilung zu berücksichtigen und nachzuvollziehen. Daher sind die mit dem Modell ermittelten Nachhallzeiten näher an den gemessenen Nachhallzeiten, als bei anderen vorhandenen Berechnungsmodellen. Das Berechnungsmodell wurde in einem Online-Tool umgesetzt, so dass es für die Allgemeinheit für eigene Berechnungen zugänglich ist. Zur Dokumentation dieser Berechnungen ist ein PDF-Bericht abrufbar, der die Eingabe und Berechnungsergebnisse dokumentiert.

Danksagung

Für die Unterstützung der Entwicklung der Berechnungsmethode und die Bereitstellung von Messergebnissen sowie die finanzielle Unterstützung danken wir der Knauf Gips KG und Herrn Hengst. Für die innovative Umsetzung des Online-Rechentools danken wir unserem Kollegen Benjamin Müller und Anton Stötzer, der die Programmierung durchgeführt und viele Ideen bei der Realisierung und Darstellung des Rechentools umgesetzt hat.

Literatur

[1] Sabine, WC., Beranek, LL., Hunt, FV.: Collected papers on Acoustics. Peninsula Publishing, Los Altos, California, 1992.

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

[3] Fitzroy, D.: Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption. J Acoust Soc Am 1959; 31(7):893.

[4] Arau-Puchades, H.: An improved reverberation formula. Acustica 1988; 65:163–180.

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

[6] Späh, M., Zhou, X., Hengst, K.: Klassenraumakustik und Absorberverteilung – Messungen und Berechnungen. Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, München.

[7] Hengst, K., Späh, M., Zhou, X.: Klassenraumakustik und Absorberverteilung - Messungen. Fortschritte der Akustik, DAGA 2018, München.

[8] 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

[9] Link zum Online-Rechentool: https://survey.ibp.fraunhofer.de/Nachhallzeit-Berechnung/ (Stand 08.2021)