

Nachhallzeit in Räumen mit ungleich verteilten Schallabsorptionsflächen

Reinhard O. Neubauer

Ing.-Büro Neubauer VDI, E-Mail: info@Reinhard-Neubauer-VDI.de

1 Einleitung

Die Berechnung der Nachhallzeit in kubischen Räumen mit den bekannten Nachhallzeitformeln (Sabine, Eyring, Millington-Sette) setzt im allgemeinen eine Gleichverteilung der schallabsorbierenden Flächen voraus. Diese Forderung ist eine von einer Anzahl von Voraussetzungen zur Beschreibung des zu gewährleistenden diffusen Schallfeldes in Räumen zur Berechnung der Nachhallzeit. Die Verwendung der Sabine'schen Gleichung ist überdies, unter der Annahme einer Gleichverteilung der Schallabsorptionsflächen, im allgemeinen begrenzt auf kleine Schallabsorptionsgrade. Für größere Schallabsorptionsgrade der Schallabsorptionsflächen eignet sich die Anwendung der Eyring'schen Nachhallzeitformel. In der gängigen Praxis ist jedoch weder eine Gleichverteilung der schallabsorbierenden Flächen, noch ein diffuses Schallfeld in dem Raum zu erwarten. Üblicherweise beschränkt sich in realen Räumen die Schallabsorptionsfläche auf die Decke und den Fußboden. Es kann deshalb nicht unmittelbar erwartet werden, dass die Gleichung von Sabine oder Eyring, die tatsächliche Nachhallzeit richtig schätzt. Bereits 1959 wurde von Fitzroy [1] eine empirische Gleichung zur Nachhallzeit angegeben die bei ungleichmäßiger Verteilung der schallabsorbierenden Flächen zu einem besseren Schätzwert der tatsächlichen Nachhallzeit führen sollte. In diesem Beitrag werden die bekannten Nachhallzeitgleichungen (Sabine, Eyring, Millington-Sette, Fitzroy, Arau Tohyama und das Model nach prEN 12354-6 Annex D [2]) verglichen und es wird eine Korrektur der Fitzroy Gleichung vorgestellt. Die Berechnungsergebnisse werden abschließend mit messtechnisch ermittelten Nachhallzeiten verglichen und computersimulierten Nachhallzeiten gegenübergestellt.

2 Berechnungsgrundlagen

Für die raumakustischen Berechnungen wurden die bekannten Gleichungen von Sabine, Eyring und Millington-Sette sowie der in [3] angegebenen Fitzroy-Kuttruff Gleichung verwendet. Ergänzend werden die Berechnungsergebnisse nach dem Vorschlag im Annex D der prEN 12354-6 zur Berechnung der Nachhallzeit für ungleichverteilte Schallabsorptionsflächen im Raum vergleichend dargestellt. Die untersuchten Räume sind kubisch und besitzen ein Volumen von 52 m³ bis 1900 m³. Die ermittelten Nachhallzeiten in den Räumen wurden in-situ gemessen. Die jeweiligen Schallabsorptionsgrade der vorhandenen Flächen sind nicht bekannt. Es wurden deshalb, aufgrund der ermittelten Nachhallzeiten, die jeweiligen Schallabsorptionsflächen „geschätzt“ und mit der Sabine'schen Gleichung „kalibriert“. Die ermittelten Schallabsorptionsgrade wurden für die Berechnungen einheitlich zugrunde gelegt. Bei der allgemeinen Betrachtung wurden willkürliche Schallabsorptionsgrade vorausgesetzt und frei gewählte Volumina von 100 m³ bis 8750 m³ berechnet.

3 Fitzroy-Kuttruff

Bei der Anwendung der Nachhallzeitformel nach Fitzroy zeigt sich, dass die berechneten Nachhallzeiten in einigen Fällen weit über den gemessenen Nachhallzeiten liegen [3]. Die Formel wurde von Fitzroy empirisch auf der Grundlage der Eyring'schen Formel abgeleitet. Kuttruff entwickelte in [4] eine Korrektur für die Eyring'sche Nachhallformel und konnte zeigen, dass die Korrektur auch für Räume angewendet werden kann, wenn eine Fläche einen wesentlich höheren Schallabsorptionsgrad aufweist als die restlichen Flächen. Auf dieser Grundlage wurde eine Gleichung abgeleitet, die für die Fitzroy-Gleichung mit der modifizierten Kuttruff-Korrektur eine modifizierte Fitzroy-Gleichung darstellt [3, 5]. Diese Fitzroy-Kuttruff-Gleichung (NF) unterteilt den Raum in Decke und Fußboden sowie in Wandflächen.

Die Fitzroy-Kuttruff-Gleichung (NF) ist in Gl. (1) wiedergegeben:

$$T_{60} = \left(\frac{0.32 * V}{S} \right) * \left(\frac{h(l+w)}{\bar{\alpha}_{ww}} + \frac{lw}{\bar{\alpha}_{CF}} \right) \quad (1)$$

mit V, S Volumen V in m³; bzw. Umfassungsfläche S in m²
 h, l, w Höhe, Länge und Breite des Raumes in m

Der mittlere effektive Schallabsorptionsgrad für die Wände (ww) sowie für die Decke und Fußboden („CF“ Ceiling-Floor) ist: $\bar{\alpha}_{ww}^*$; $\bar{\alpha}_{CF}^*$

$$\bar{\alpha}_{ww}^* = -\ln(1-\bar{\alpha}) + \frac{\rho_{ww}(\rho_{ww}-\bar{\rho}) * S_{ww}^2}{(\bar{\rho} * S)^2} \quad (2)$$

$$\bar{\alpha}_{CF}^* = -\ln(1-\bar{\alpha}) + \frac{\rho_{CF}(\rho_{CF}-\bar{\rho}) * S_{CF}^2}{(\bar{\rho} * S)^2} \quad (3)$$

mit $\bar{\alpha}$ Mittlerer Schallabsorptionsgrad
 $\rho = (1-\alpha)$ Reflexionsgrad

4 Berechnungsergebnisse

Bei dem Vergleich der berechneten Nachhallzeiten für Räume mit geringer Schallabsorption der Umfassungsflächen zeigt sich, dass die berechneten Nachhallzeiten geringe Unterschiede aufweisen [6]. Wird ein Raum mit gleichverteilter, jedoch hoher Schallabsorption betrachtet, erweist sich bekannter Weise die Sabine'sche Nachhallzeitformel als ungeeignet, da sie bei wachsendem Schallabsorptionsgrad gegen einen konstanten Wert strebt und nicht Null werden kann. Im Vergleich mit Gl. (1) zeigen die bekannten Nachhallzeitgleichungen bei hoher Raumabsorption keine großen Unterschiede [7], außer der Sabine'schen Gleichung. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 1 dargestellt.

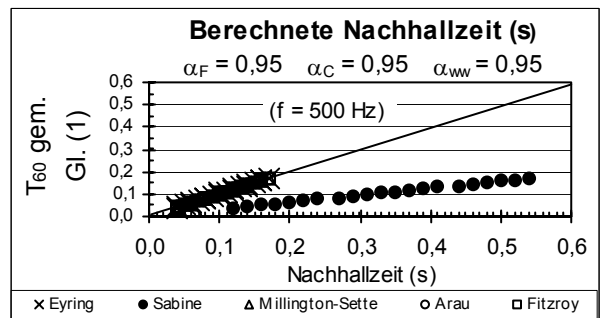


Abb. 1: Vergleich berechneter Nachhallzeiten mit hoher Absorption für Volumina von 100 m³ bis 8750 m³

In Abb. 1 ist der Vergleich der berechneten Nachhallzeiten bei hoher Raumbedämpfung für eine Frequenz von 500 Hz dargestellt. Die berechnete Nachhallzeit nach Sabine ist die kürzeste und weicht von der Gl. (1) wesentlich ab. Die durchgezogene Linie stellt Übereinstimmung zwischen den berechneten und nach Gl. (1) bestimmten Nachhallzeiten dar. In Abb. 2 sind die berechneten Nachhallzeiten bei 500 Hz bei ungleichverteilter Schallabsorption dargestellt. Die größte Schallabsorption wurde für die Decke gefolgt für den Fußboden vorausgesetzt. Die Wände wurden mit einer geringen Schallabsorption berücksichtigt.

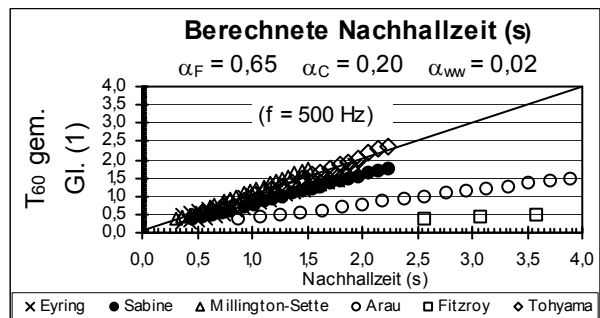


Abb. 2: Vergleich der Nachhallzeiten bei ungleicher Absorption

Aus dem Vergleich der berechneten Nachhallzeiten in Abb. 2 zeigt sich, dass mit der Fitzroy-Gleichung die längsten Nachhallzeiten ermittelt werden. Die Gleichung von Arau ergibt Nachhallzeiten die etwa zwischen denen von Fitzroy und Sabine liegen. Millington-Sette lieferte bei dieser Untersuchung die kürzesten Nachhallzeiten.

5 Messergebnisse

Um die Berechnungsmodelle mit Messungen der Nachhallzeit vergleichen zu können wurden in-situ Messungen in 25 Räumen mit Volumina zwischen 52 m³ und 1900 m³ ausgewertet. Der jeweilige Schallabsorptionsgrad wurde dabei geschätzt und mit den gemessenen Nachhallzeiten „kalibriert“. Zum Abgleich mit den Messergebnissen wurde die Sabine'sche Formel herangezogen. Der so gefundene Schallabsorptionsgrad der jeweiligen Flächen wurde dann zur Berechnung der Nachhallzeiten der Berechnungsmodelle herangezogen. In der Abb. 3 sind die Ergebnisse mit der Gl. (1) verglichen.

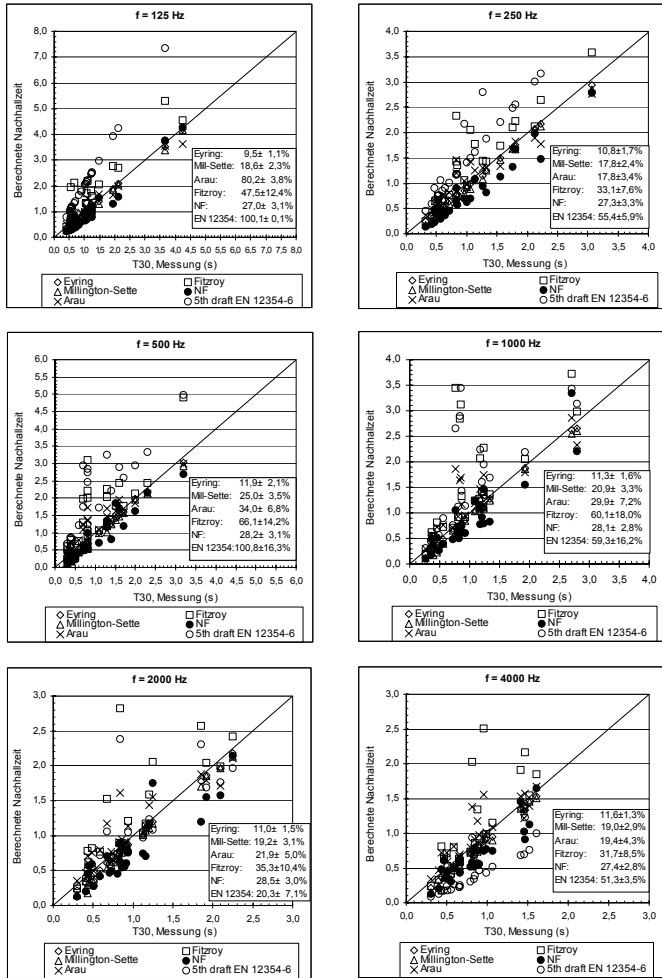


Abb. 3: Vergleich von Messung und Berechnung je Terz

Aus dem Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den gemessenen Nachhallzeiten ist ersichtlich, dass, unter Verwendung des „kalibrierten“ Schallabsorptionsgrades, die berechneten Nachhallzeiten nach Gl. (1) im Vergleich mit den bekannten Nachhallzeitformeln eine gute Übereinstimmung zeigt. Insbesondere im Vergleich mit dem Modellansatz nach prEN 12354-6 Annex D [2] zeigte sich für die Gl. (1) eine bessere Annäherung an die gemessenen Nachhallzeiten. NF weicht im Mittel um rd. 28 % und EN 12354 um rd. 65 % vom Messwert ab. Die Gleichung nach Eyring zeigt dabei durchweg die beste Annäherung an den Messwert mit einer Abweichung von 11 %. Für die Fitzroy-Gleichung wurde durch die Einführung der modifizierten Kuttruff-Korrektur eine Verbesserung im Mittel von rd. 39 %, bezüglich der vorliegenden Datenmenge, erreicht.

6 Computer-Simulationsergebnisse

Die „kalibrierten“ Schallabsorptionsgrade wurden zum Vergleich der Berechnungsergebnisse nach Gl. (1) in einem raumakustischen Simulationsprogramm zur Berechnung der Nachhallzeiten verwendet. Die Ergebnisse sind in der Abb. 4 dargestellt. Für die Untersuchung wurde das Computer-Simulationsprogramm CATT-Acoustic [8] verwendet.

Die relative Abweichung zwischen den Ergebnissen nach Gl. (1) und den computersimulierten Nachhallzeiten (CATT), bei gleichen Eingabedaten, betrug im Mittel 25,8 ± 0,7 %.

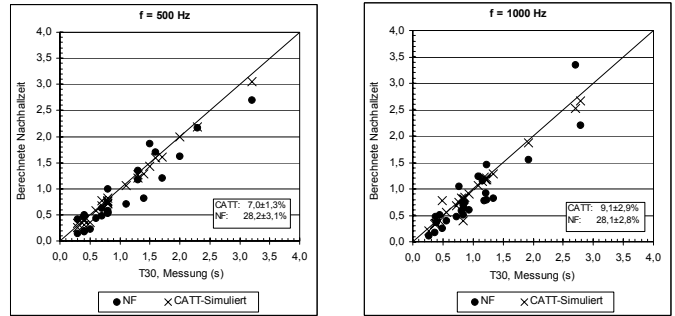


Abb. 4: Vergleich der Ergebnisse nach Gl. (1) und der berechneten Nachhallzeiten des Computer-Simulationsprogramms (CATT), bei den Frequenzen 500 Hz und 1000 Hz

In der Abb. 4 ist der Vergleich der Berechnungsergebnisse von Simulation und Gl. (1), bei gleichen Eingabedaten, dargestellt. Für die untersuchte Datenmenge betrug die mittl. Abweichung vom Messwert bei 125 Hz bis 4 kHz für die Simulationsberechnung (CATT) 8,4 % und für Gl. (1) 27,7 %. Die rel. Abweichung vom Messwert für das Modell nach prEN 12354-6 betrug 64,5 %. Die mittlere relative Abweichung zwischen Gl. (1) und prEN 12354-6 betrug rd. 110 %. Die mittleren relativen Abweichungen vom Messwert sind in Abb. 5 dargestellt.

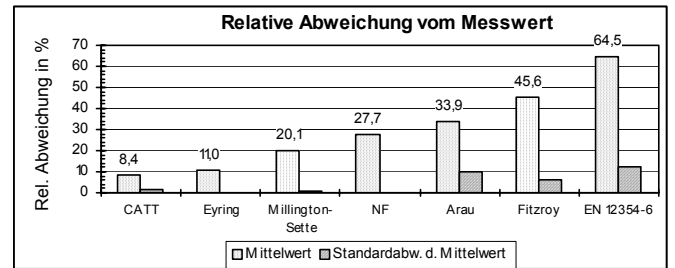


Abb. 5: Mittlere Abweichungen über die Frequenzen 125 Hz bis 4 kHz und mittlere Standardabweichung des Mittelwertes

In Abb. 5 ist der Vergleich der mittleren rel. Abweichungen über die Frequenzen von 125 Hz bis 4 kHz dargestellt. Für die vorliegende Datenmenge mit den „kalibrierten“ Schallabsorptionsgraden zeigt sich, dass im Vergleich mit den computersimulierten Berechnungen, Eyring 8,4 %, die Gl. (1) 25,8 % und EN 12354-6 71,7 % im Mittel abweicht.

Literatur

- [1] Fitzroy, D. (1959). Reverberation formulae which seems to be more accurate with non-uniform distribution of absorption, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. **31**, pp. 893-897.
- [2] European Standard prEN 12354-6, February 2001, 5th draft.
- [3] Neubauer, R.O. (1999). Prediction of Reverberation Time in Rectangular Rooms with a Modified Fitzroy Equation, ISSEM'99, 8th International Symposium on Sound Engineering and Mastering, Gdansk, Poland, pp.115 - 122.
- [4] Kuttruff, H. (1976). Nachhall und effektive Absorption in Räumen mit diffuser Wandreflexion, *Acustica*, Vol. **35**, pp. 141-153.
- [5] Neubauer R.O. (2000). Estimation of Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non Uniformly Distributed Absorption Using a Modified Fitzroy Equation, 7th ICSV, Garmisch-Partenkirchen, Germany, Vol. **3**, pp. 1709 - 1716.
- [6] Neubauer R.O. (2000). Prediction of Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non Uniformly Distributed Absorption Using a Modified Fitzroy Equation, EAA Symposium on Architectural Acoustics, 16. - 20.October 2000, Madrid, Spain, II Ibero-American Congress of Acoustics, AAQ 09, pp. 1-7.
- [7] Neubauer, R.O. (2001). Estimation of Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non-Uniformly Distributed Absorption Using a Modified Fitzroy Equation, *Journal of Building Acoustics*, (Submitted for Publication).
- [8] CATT-Acoustic, Computer program, Sweden.