

Berücksichtigung des nicht diffusen Schallfeldes im Hallraum durch Anwendung der Kuttruff'schen Nachhallzeitformel

Uwe Stephenson

HafenCity Universität Hamburg, E-Mail: uwe.stephenson@hcu-hamburg.de

Einführung, Annahmen, Methodik

Seit Jahrzehnten wird der Diffusfeld-Schallabsorptionsgrad von Proben im Hallraum unter Anwendung der Sabine'schen Formel bestimmt [1]. Dies ist bekanntlich systematisch falsch, da die Voraussetzung eines Diffusen Schallfeldes nicht gegeben bzw. dieses eben durch den Absorber gestört ist. So ist die Bestrahlungsdichte über dem Absorber durch einen „Sogeffekt“ übermäßig groß; dies täuscht einen zu hohen Absorptionsgrad vor. Zudem schwanken die Ergebnisse stark unter den Laboratorien; inwieweit systematisch oder zufällig ist kaum geklärt [2]. Zahlreiche Versuche zur Verbesserung der Diffusität des Schallfeldes wurden unternommen: Diffusoren nach verschiedenen Verteilungsregeln, Schrägstellung der Wände u.v.a.m. (s. nur z.B. [3]). Sie waren aber nicht sehr erfolgreich. Ein diffuses Schallfeld (Isotropie und Homogenität) bleibt eben eine Utopie. Nur bei sehr kleinen Absorptionsgraden – und zwar auf allen Flächen, nicht nur im Mittel – hier hilft auch die Eyring'sche Formel nicht – wäre es näherungsweise möglich [4]. Stattdessen ist hier nun der Ansatz, die Nichtdiffusität des Schallfeldes zu akzeptieren und rechnerisch wenigstens teilweise zu berücksichtigen, dies auf möglichst einfache Weise, möglichst analytisch, als nächstbessere Näherung, nicht durch aufwändige numerische Methoden, auch nicht iterative [5]. Dies gelingt im ersten Schritt analytisch durch Anwendung bzw. Inversion der Kuttruff'schen Nachhallzeitformel, die zwar diffuse Reflexionen, nicht aber homogene Bestrahlung annimmt, und dafür eine plausible Annahme macht [6,7]. Die Kuttruff-Formel ist für diesen einfach Ansatz geeignet, weil gerade sie die mit der Messmethodik systematisch verbundene Ungleichheit der Absorptionsgrade der Flächen berücksichtigt. Hieraus werden Korrekturformeln für nach Sabine „gemessene“ bzw. rückgerechnete Proben-Absorptionsgrade hergeleitet. Es zeigt sich, dass die so erhaltenen Proben-Absorptionsgrade z.T. viel niedriger sind, 1 nicht mehr überschreiten. Hierbei gehen die Flächenverhältnisse des Raumes ein, nicht aber die genaue Geometrie. Um auch die zu berücksichtigen, sowie berechnete Bestrahlungsstärken, wurde auch die radiosity-Methode angewandt. Dies wird in einem entsprechend benannten Folgepapier zu dieser Konferenz beschrieben.

Entsprechend der energetischen Betrachtungsweise werden hier Welleneffekte wie vor allem der Kanteneffekt und Moden-Verteilungen (abhängig von Größe und Lage der Probe und der Frequenz) nicht berücksichtigt. Die Frequenzabhängigkeit der Absorptionsgrade und Nachhallzeiten wird nicht explizit berücksichtigt. Einige weitere Bemerkungen dazu unter „Ausblick“.

Raumgeometrie, Einführung von Parametern

Zur Reduktion der Vielfalt möglicher Untersuchungen, erscheint die Einführung von Raumproportionen sinnvoll. Einziger absoluter Wert (hier letztlich unwichtig) sei die Raumlänge L . Dann sei P = Breite/Länge, Q = Höhe/Länge. D.h. der Hallraum sei rechnerisch als Quader angenommen (Bild 1). Damit diffuse Wandreflexionen zumindest plausibel sind, wird de facto (nicht explizit) jedoch eine leichte Schrägstellung bzw. Nichtparallelität der Wände angenommen, von der angenommen wird, dass sie nach wenigen Reflexionen ähnlich wirkt wie Diffusoren.

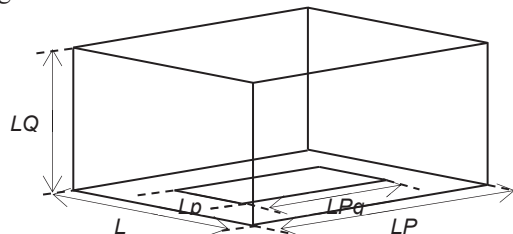


Abbildung 1 Abmessungen des Hallraums und der Prüffläche in der Mitte des Bodens

Dann sind Raumvolumen V und Gesamtoberfläche S

$$V = L^3 P Q \text{ und } S = 2L^2(P + Q + PQ) \quad (1);$$

Für die $N=6$ Teilflächen S_i des Quaders ($S_1 = L^2 P$ =Boden)

$$Q_i = S_i / S \quad (2)$$

werden Flächenanteile $Q_1 = \frac{S_B}{S} = P / (2(P + Q + PQ))$ (2a)

Die mittlere freie Weglänge ist dann [7] $\Lambda = 4V/S$ (3)

Die Probenfläche auf dem Boden habe in Richtung L die Länge Lp und in der Breite LPq , sodass ihr Flächenanteil am Boden

$$b = pq \quad (4)$$

sei. Der Anteil der Proben- an der Raumbooberfläche ist dann

$$B = Q_1 \cdot b \quad (5).$$

Berechnung der Nachhallzeit nach Sabine

Diese sei in hier passender Formulierung nachgeholt.

Der zu bestimmende Absorptionsgrad der Probe sei α_p , alle anderen Oberflächen haben den Absorptionsgrad α_0 . Die Luftabsorption sei für diese Studie vernachlässigt. Ein diffuses Schallfeld vorausgesetzt (!), ist bekanntermaßen die äquivalente Absorptionsfläche

$$A = \sum \alpha_i S_i \quad (6)$$

eine zentrale Größe der Nachhalltheorie (α_i = Absorptionsgrade der Einzelflächen, α_1 der mittlere des Bodens), damit zusammenhängend der flächengemittelte Absorptionsgrad des Raumes, der hier beträgt:

$$\alpha \equiv \alpha_m = \frac{A}{S} = \sum \alpha_i Q_i = Q_1(\alpha_1 - \alpha_0) + \alpha_0 \quad (7)$$

Entsprechend dem Flächenanteil der Probe auf dem Boden ist

$$\alpha_1 = b(\alpha_p - \alpha_0) + \alpha_0 \quad (8),$$

kombiniert

$$\alpha_m = B(\alpha_p - \alpha_0) + \alpha_0 \quad (9).$$

Gemeinsam allen grundlegenden Nachhallzeitformeln ist die Berechnung aus dem Verhältnis aus mittlerer freier Weglänge und einer mittleren Absorptionsgröße [4]

$$\tau = \frac{\Lambda}{c \cdot \alpha} \quad (10)$$

Die übliche, auf 60dB Pegelabfall bezogene Nachhallzeit ist dann

$$T = 6 \ln(10) \tau. \quad (11)$$

Mit der Schallgeschwindigkeit $c=340\text{m/s}$ bei 14°C und $\Lambda = 4V/S$ ergibt das eine allgemeine Nachhallzeit-Formel, hier in geeigneter allgemeiner Abkürzung geschrieben als

$$T = \frac{6 \ln(10)}{c} \frac{4V}{S \alpha} \approx \frac{0.163 \cdot V}{S \alpha} = \frac{C}{\alpha} \quad (12)$$

mit

$$C = \frac{6 \ln(10)}{c} \frac{4V}{S} \approx \frac{0.163 \cdot V}{S} \quad (13).$$

(Die Einheit s/m bei 0.163 wurde hier weggelassen). Die Herleitung der Sabine-Formel basiert auf der Annahme eines kontinuierlichen exponentiellen Energieabfalls im Raum [4]. Für sie speziell ergibt sich die bekannte sehr einfache Formel

$$T_{Sab} = \frac{C}{\alpha_m} = \frac{0.163 \cdot V}{A} \quad (14).$$

Berechnung der Nachhallzeit nach Eyring

Die Eyring'sche Nachhallzeitformel leitet sich aus einem Schallteilchenmodell ab (nach Durchlauf jeweils von Λ trifft es auf eine Wand und erleidet einen Energieverlust entsprechend α_m [4]), was zu einem stufenförmigen Energieabfall führt. Im Mittel ergibt sich eine e-Funktion. Letztlich wird α_m ersetzt durch den Absorptionsexponenten

$$\alpha'_m = -\ln(1 - \alpha_m) = -\ln(\rho_m) \quad (15).$$

Die Eyring'sche Nachhallzeit ist dann

$$T_{Ey} = \frac{C}{\alpha'_m} \quad (16).$$

Berechnung der Nachhallzeit nach Kuttruff

Es werden nun also noch diffuse Wandreflexionen angenommen, aber kein diffuses Schallfeld, d.h. keine konstante Bestrahlungsdichten B über alle Oberflächen mehr. (Definition: $B = I \cdot \cos(\vartheta)$, (17) wobei I die Intensität der einfallenden Strahlung ist und ϑ der Einfallswinkel zur Flächennormale; die Intensität wird hier als Skalar aufgefasst.) Zur allgemeinen Berechnung der orts- und zeitabhängigen Verteilung $B(r, t)$ stellte Kuttruff eine Integralgleichung auf [7]:

$$B(r, t) = \int_S \frac{\cos(\vartheta) \cdot \cos(\vartheta')}{\pi R^2} \cdot \rho(r') \cdot B\left(r', t - \frac{R}{c}\right) dS' \quad (18),$$

wobei r den Empfangsort beschreibt, r' den Sendeort, R den Abstand zwischen Sende- und Empfangsort, ϑ bzw. ϑ' die Polarwinkel der Einstrahlung bzw. Abstrahlung empfangs- bzw. sendeseitig, $\rho(r')$ den lokalen Reflexionsgrad und S die Raumboberfläche. Danach hängt die Bestrahlungsdichte an einem Punkt r also von der an einem anderen Punkt r' zu einer früheren Zeit $t - R/c$ ab. Eine solche Gleichung lässt sich daher nur numerisch lösen (radiosity-Methode [8]). Dabei werden die Oberflächen und Abstände diskretisiert zu ΔS_i bzw. R_{ij} , sodass sich – vereinfacht, für den stationären Fall - ein lineares Gleichungssystem

$$B_j = \sum_{i=1}^K f_{ij} \Delta S_i \rho_i B_i \quad (19)$$

mit gewissen „Formfaktoren“ $f_{ij} \approx \frac{\cos(\vartheta_{ij}) \cos(\vartheta_{ji})}{\pi R_{ij}^2}$ (20)

für die zu bestimmenden Bestrahlungsstärken B_j ergibt. (wobei die Formfaktoren eigentlich über alle Flächen ΔS_i und

ΔS_j zu mitteln sind, was schwierig ist). Um eine analytische Näherungslösung zu erhalten, nahm Kuttruff an, dass über allen Flächen die Schallenergie mit der gleichen Exponentialfunktion abnimmt und die eigentlich recht unterschiedlichen Laufstrecken durch die mittlere freie Weglänge ersetzt werden können (was sich durch numerische Experimente bestätigt). Daraus folgt, dass ein mit Flächen und Bestrahlungsstärken gewichteter 'effektiver' Absorptionsgrad die Nachhallzeit bestimmt. In diskreter Form lautet er

$$\alpha_K = \frac{\sum_{i=1}^K \alpha_i S_i B_i}{\sum_{i=1}^K S_i B_i} \quad (21)$$

Weiter nahm er als plausibel an, dass die Bestrahlungsdichte auf jeder Wand proportional ist zur „äquivalenten Reflexionsfläche“ aller anderen Flächen (was sich nach numerischen Experimenten als grobe Näherung erweist):

$$B_j \sim \sum_{i \neq j} \rho_i S_i \quad (22).$$

Daraus leitete er schließlich eine Korrekturformel für den Eyring'schen Absorptionsexponenten ab

$$\alpha'_K = \alpha'_m + \ln \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_m - \alpha_i) (1 - \alpha_i) S_i^2}{(1 - \alpha_m)^2 \cdot S^2 - \sum_{i=1}^N (1 - \alpha_i)^2 S_i^2} \right) \quad (23)$$

bei der nun, neben dem Mittel auch die Standardabweichungen der einzelnen Absorptionsgrade voneinander eine Rolle spielen, dabei meist die effektive Absorption erhöhen, also die Nachhallzeit sinken lassen:

$$T_{Sab} > T_{Ey} > T_{Kutt}$$

Die Kuttruff'sche Nachhallzeit ergibt sich dann im Stil der oben eingeführten Standardformel (14) zu

$$T_{Kutt} = \frac{C}{\alpha'_K} \quad (24).$$

Formel 23 soll nun für die hier deklarierten Variablen spezifiziert werden. Nutzt man die Flächenanteile $Q_i = S_i/S$, die Reflexionsgrade $\rho_i = 1 - \alpha_i$, $\rho_0 = 1 - \alpha_0$ und führt, analog zu Glng. 7 anstelle der Absorptions- Reflexionsgrade ein: $\rho_m = 1 - \alpha_m = Q_1(\rho_1 - \rho_0) + \rho_0$ (7a) so wird aus Glng. 23

$$\alpha'_K = \alpha'_m + \ln \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N (\rho_1 - \rho_m) \rho_i Q_i^2}{\rho_m^2 - \sum_{i=1}^N \rho_i^2 Q_i^2} \right) = \alpha'_m + \ln \left(1 + \frac{(\rho_1 - \rho_m) \rho_1 Q_1^2 + (\rho_0 - \rho_m) \rho_0 R^2}{\rho_m^2 - \rho_1^2 Q_1^2 - \rho_0^2 R^2} \right) \quad (25),$$

Letzteres für den vorliegende Fall mit nur zwei Abs.graden und der Abkürzung $R^2 = \sum_{i=2}^N Q_i^2$ (25a).

Führt man (um die Gleichung später besser invertieren zu können) einen mittleren Kuttruff- Reflexionsgrad ein durch

$$\rho_K = e^{-\alpha'_K} \quad (26)$$

und setzt für α'_K Glng. 25 ein, folgt (nach etwas Algebra)

$$\rho_K = \frac{\rho_m^2 - \rho_1^2 Q_1^2 - \rho_0^2 R^2}{\rho_m - \rho_1 Q_1^2 - \rho_0 R^2} \quad (27)$$

$\alpha'_K = -\ln(\rho_K)$ kann direkt eingesetzt werden in Glng. 24.

Man beachte dass ρ_1 in Glng. 27 bereits ein über die Bodenfläche gemittelter Reflexionsgrad ist, analog Glng. 8 ist

$$\rho_1 = b(\rho_p - \rho_0) + \rho_0 \quad (28)$$

wobei $\rho_p = 1 - \alpha_p$ der Reflexionsgrad der Probe ist.

Berechnung des Absorptionsgrades der Probe aus Messungen der Nachhallzeiten ohne (T_0) und mit Probe (T) nach Sabine

Dies ist wohlbekannt. Hierzu muss nur die Grundformel für die Nachhallzeit als Funktion eines mittleren

Absorptionsgrades (Glng.12) invertiert und zweimal angewandt werden: Aus der Leermessung folgt zunächst der Absorptionsgrad der Hallraumoberfläche (angenommen

$$\text{homogen): } \alpha_{0Sab} = \frac{c}{T_0} \quad (29),$$

aus der Messung mit Prüfobjekt der mittlere Abs.grad

$$\alpha_{mSab} = \frac{c}{T} \quad (30)$$

Um von diesem auf den Absorptionsgrad der Probe zu schließen, muss man hier noch Glng. 9 für den Fall Sabine

$$\alpha_{msab} = B(\alpha_{psab} - \alpha_{0sab}) + \alpha_{0sab} \quad (9s),$$

invertieren, und erhält als Absorptionsgrad der Probe

$$\alpha_{pSab} = \frac{1}{B}(\alpha_{msab} - \alpha_{0sab}) + \alpha_{0sab} = \frac{c}{B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) + \frac{c}{T_0} \quad (31)$$

Umrechnungsprinzip

Ziel ist es, nach Norm (also nach Sabine) bestimmte Proben-Absorptionsgrade „umzurechnen“ in realistischere, wie sie aus den gleichen gemessenen Nachhallzeiten nach Eyring oder Kuttruff bestimmt worden wären. Die mittleren Raum-Absorptionsgrade bzw. -Exponenten (α_m, α'_m resp. α_K') nach den drei betreffenden Grundgleichungen 14,16, 24 werden dabei gleichgesetzt.

Umrechnung von „Sabine-Absorptionsgraden“ in „Eyring-Absorptionsgrade“

Die Eyring-Absorptionsexponenten in Glng.16 werden gleichgesetzt den Sabine-Absorptionsgraden in Glng.14:

$$\text{Ohne Probe } \alpha_0' = \alpha_{0sab} \quad (32)$$

$$\text{Mit Probe } \alpha_m' = \alpha_{msab} \quad (33)$$

Inversion von Glng. 15 liefert die entsprechenden mittleren Absorptionsgrade für die Eyring-Rückrechnung:

$$\text{Ohne Probe } \alpha_{0Ey} = 1 - e^{-\alpha_0'} = 1 - e^{-\alpha_{0sab}} \quad (34)$$

$$\text{Mit Probe } \alpha_{mEy} = 1 - e^{-\alpha_m'} = 1 - e^{-\alpha_{msab}} \quad (35)$$

Die Umkehrung von Glng. 9 lautet für Eyring-Werte

$$\alpha_{pEy} = \frac{1}{B}(\alpha_{mEy} - \alpha_{0Ey}) + \alpha_{0Ey} \quad (36)$$

Einsetzen der Glngn. 34,35 und 9s in 36 liefert dann eine explizite Umrechnungsformel: $\alpha_{pEy} =$

$$\frac{1}{B} \left(e^{-\alpha_{0sab}} - e^{-B(\alpha_{psab} - \alpha_{0sab}) - \alpha_{0sab}} \right) + 1 - e^{-\alpha_{0sab}} \quad (37)$$

Zusammengefasst: Für die Umrechnung werden benötigt die Variablen B, α_{0sab} als Parameter, α_{psab} als Input- und α_{pEy} als Output-Variablen (Glngn. 9,34-36 oder 37).

Nachhallzeiten nach Eyring sind immer kleiner als die nach Sabine. Umgekehrt sind deshalb nach Eyring aus denselben Nachhallzeiten rückgerechnete Probenabsorptionsgrade stets kleiner als nach Sabine. Geht der Flächenanteil der Probe gegen $B \rightarrow 0$, ist $\alpha_{pEy} \approx \alpha_{pSab}$.

Umrechnung von „Sabine-Absorptionsgraden“ in „Kuttruff-Absorptionsgrade“

Zunächst: Für überall gleich Absorptionsgrade im Raum liefert die Kuttruff-Formel (25) keine anderen Nachhallzeiten als die nach Eyring. (Der Zähler in Glngn. 25 ist 0). Der Absorptionsgrad für den leeren Raum ist für Kuttruff derselbe wie für Eyring. Der Reflexionsgrad ist

$$\rho_0 = 1 - \alpha_{0Ey} \quad (38).$$

Nun also wird der Kuttruff- Absorptionsexponent (in Glng.24) gleichgesetzt dem mittleren Absorptionsgrad nach Sabine (Glng. 14)

$$\alpha_K' = \alpha_{msab} \quad (39)$$

(wobei α_{msab} aus dem Probenabsorptionsgrad α_{psab} nach Glng. 9s folgt). Der Kuttruff Reflexionsgrad ρ_K folgt aus α_K' nach Glng. 26. Um, im ersten Schritt, vom Kuttruff - Reflexionsgrad ρ_K für den ganzen Raum rückzuschließen auf den mittleren Reflexionsgrad $\rho_1 = 1 - \alpha_1$ der Boden-fläche (nicht schon der Probe darin), muss Glng. 27 invertiert werden. Nach Einsetzen von der zu Glng. 7 äquivalenten Glng.

$$\rho_m = Q_1(\rho_1 - \rho_0) + \rho_0 \quad (40)$$

in Glng. 27 ergibt sich (mit etwas Algebra)

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{\rho_0(1-2Q_1+Q_1^2-R^2) - \rho_K(1-Q_1-R^2)}{Q_1(1-Q_1)(\rho_K-2\rho_0)} \quad (41)$$

Der mittlere Absorptionsgrad des Bodens ist dann

$$\alpha_1 = 1 - \rho_1 \quad (42)$$

Und Inversion von Glng. 8 liefert schließlich den „Kuttruff-Absorptionsgrad“ der Probe zu

$$\alpha_{pKutt} = \frac{1}{b}(\alpha_1 - \alpha_{0Ey}) + \alpha_{0Ey} \quad (43).$$

Zusammengefasst: Für die Umrechnung werden benötigt b, alle Flächenanteile Q_i und α_{0sab} als Parameter, α_{psab} als Input- und α_{pKutt} als Output-Variablen (Glngn. 2-4, 7,25a,26, 34, 38, 41-43).

Da die Kuttruff -Nachhallzeiten (bei gleichen Absorptionsgraden) in den meisten Fällen kürzer sind als nach Eyring, sind umgekehrt die rückgerechneten Probenabsorptionsgrade nach Kuttruff noch kleiner als nach Eyring - und erstrecht kleiner als nach Sabine.

Diskussion einiger Ergebnisse

Es können hier nur wenige Beispiele gezeigt werden. Typische Parameterwerte waren: Raumlänge: 10m, gleiche Breite (P=1), Höhenverhältnis Q (variierend von 0.1, 0.2, 0.5, 1. Erster Fall: Die Probe bedeckt den ganzen Boden (b=1). Der Absorptionsgrad aller sonstigen Wände ist 5%.

Abb. 2 zeigt Nachhallzeiten als Funktion des Probenabsorptionsgrades für einen Flachraum (Q=0.1, Flächenanteil Boden 42%). Es zeigt sich: $T_{Sab} > T_{Ey} > T_{Kutt}$. Die Unterschiede für diesen – allerdings auch extremen Fall – sind erheblich: bei zu 100% absorbierender Probe sind die Nachhallzeiten nach Sabine: 0.152s, nach Eyring 0.114s, nach Kuttruff 0.069s.

Abb. 3 zeigt das Ergebnis der Konvertierung von Sabine- in Eyring- und Kuttruff -Absorptionsgrade. Man sieht klar, wie die Abweichungen mit zunehmendem Sabine-Absorptionsgrad steigen (Wirkung des „Sogeffektes“).

Tab.1 zeigt einige Zahlenwerte von rückgerechneten Absorptionsgraden für den Extremfall von Sabine-Absorptionswerten von 1.2.

Wie erwartet, hängen diese von den Raumproportionen ab.

Tab. 1: Rückgerechnete Absorptionsgrade

Rel. Raumhöhe Q	/ Eyring		/ Kuttruff Abs.grad
0.1 (sehr flach)	0.9179	(1.0797)	0.7457 (1.0744)
0.2 (flach)	0.9459	(1.0884)	0.8051 (1.1162)
0.5 (normal)	0.9995	(1.1043)	0.8728 (1.1181)
1 (hoch)	1.0442	(1.1169)	0.8964 (1.0691)

Sabine-Abs.grad 1.2, volle Bodendeckung b=1, in (): b=0.25

Man sieht: besonders bei voller Bodendeckung sind die Kuttruff-Absorptionsgrade deutlich geringer als nach Sabine und – richtigerweise - auch kleiner als 1.

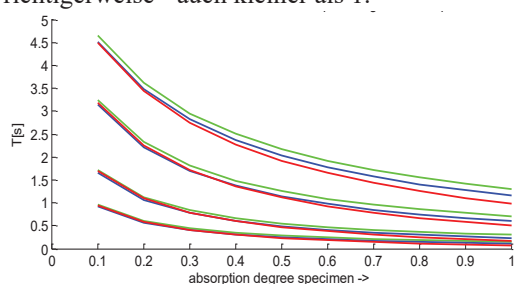


Abbildung 2: Nachhallzeiten nach Sabine (grün), Eyring (blau) und Kuttruff (rot) als Funktion des Probenabsorptionsgrades, mit $Q=0.1, 0.2, 0.5, 1$ (oberste Kurven) als Parameter, wie in Abb.3.

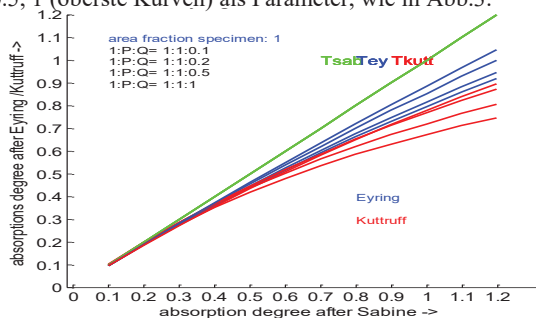


Abbildung 3: Probenabsorptionsgrade nach Eyring und Kuttruff als Funktion der Absorptionsgrade nach Sabine

Schlussfolgerung

Eine Rückrechnungsmethode von Nachhallzeiten auf Probenabsorptionsgrade nach Kuttruff wurde vorgestellt. Sie kommt mit nur wenig mehr Formeln als nach Sabine aus. Anders als fälschlicherweise bei der Rückrechnung nach Sabine wird hier aber nicht ein diffuses Schallfeld vorausgesetzt sondern die Ungleichbestrahlung der Raumbofläche, insbesondere der „Sogeffekt“ auf den Absorber berücksichtigt, der sonst zu hohe Absorptionswerte vortäuscht. Hat die Probe, wie üblich, einen kleinen Flächenanteil, so liefern die Kuttruff-Formeln einen um typischerweise 10% kleineren Absorptionsgrad als nach Sabine, nahezu unabhängig von den Raumproportionen. Ist der Boden nahezu zu 100% vom Absorber bedeckt, und der Raum hoch (Würfel), so sind die Kuttruff-Absorptionsgrade um eher 25% kleiner als ein Sabine-Wert von 1.2. Beträgt die Raumhöhe nur 10% der Länge und Breite (Flachraum), so ist die Abweichung z.B. -38%. Die Ergebnisse können also stark von den Raumproportionen abhängen. Dies könnte z.T. die erheblichen Unterschiede gemessener Absorptionsgrade in unterschiedlichen Hallräumen bei den Round Robins erklären.

Ausblick

Die Kuttruff-Theorie berücksichtigt zwar die Flächenverhältnisse, aber nicht die Raumgeometrie im Detail (Abstände und Winkel). Die Kuttruff-Theorie geht nachwievon von diffusen Reflexionen aus; das ist bedenklich, da nicht realistisch für große glatte Wände. Immerhin könnte der Effekt durch Schrägstellung der Wände teilweise ersetzt werden. Das wäre mit Schallteilchensimulation und geometrischen wie auch teildiffusen Reflexionen [9] zu überprüfen.

Mit der radiosity-Methode kann, im Gegensatz zur Kuttruff-Formel, die Raumgeometrie genauer berücksichtigt werden- allerdings ist diese eine etwas aufwändigere numerische Methode (aber mit vernachlässigbaren Rechenzeiten). Mit der radiosity-Methode können auch, wie erste Versuche zeigten, die ortsabhängig ungleichen Bestrahlungsstärken genauer erfasst werden (als nach der Kuttruff-Annahme), allerdings weiter unter der Annahme diffuser Reflexionen. Das führt zu noch niedrigeren Nachhallzeiten bzw. noch niedrigeren rückgerechneten Probenabsorptionsgraden als nach der Kuttruff-Formel.

Weiter wäre es dann wünschenswert, aus den Simulations-Ergebnissen empirische, von der geometrischen Konstellation abhängige Korrekturformeln für eine genauere Bestimmung des Schallabsorptionsgrades von Proben herzuleiten.

Inzwischen gelangen auch Messungen der Anisotropie des Schallfeldes in Hallräumen zur Berechnung ortsabhängiger Korrekturfaktoren für die ungleichen Bestrahlungsstärken der Proben [10]. Die Hypothese, dass damit die „gemessenen“ d.h. aus Nachhallzeiten rückgerechneten Absorptionsgrade der Probe ortsunabhängiger werden, konnte bestätigt werden. Auch diese Absorptionsgrade waren erheblich kleiner als nach Sabine.

Des Weiteren sollte selbstverständlich der Kanteneffekt und, bei tiefen Frequenzen, auch der Einfluss der Lage der Probe im Verhältnis zur Modenverteilung berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 354:2003-12, Messung der Schallabsorption in Hallräumen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2003
- [2] Tompson, D.; Vercammen, M.; Round Robin Project – Research for investigation of absorption measurement deviation. Peutz B.V., Molenhoek, 2009 S. 14
- [3] Vercammen, M.: The effectiveness of diffusors by determining the sound absorption in the reverberation room., Proc. of NAG, 1997
- [4] Stephenson, U.M.: A rigorous definition of the term “diffuse sound field” and a discussion of different reverberation formulae; in: Proc. of ICA, Buenos Aires, Argentina, 2016
- [5] Kuttruff, H.; Iterative Bestimmung des Schallabsorptionsgrads aus der gemessenen Nachhallzeit beim Hallraumverfahren; ACUSTICA vol. 81 (1995), S. 433-438
- [6] Kuttruff, H.: “Nachhall und effektive Absorption in Räumen mit diffuser Wandreflexion”; Acustica35(3), 141–153 (1976).
- [7] Kuttruff, H.: Room Acoustics. Elsevier Science Publishers Ltd., Barking, England, 3rd ed. (1991).
- [8] E.-M. Nosal, M. Hodgson, and I. Ashdown, “Improved algorithms and methods for room sound-field prediction by acoustical radiosity in arbitrary polyhedral rooms,” J. Acoust. Soc. Am. 116(2), 970–980 (2004).
- [9] Stephenson, U.; Eine Schallteilchen-Computer-Simulation zur Berechnung der für die Hörsamkeit in Konzertsälen maßgebenden Parameter. ACUSTICA 59 (1985), S. 1-20.
- [10] Weese, B., Steuck, C., Stephenson, U.; Verbesserte Berechnung des Schallabsorptionsgrades von Prüfobjekten im Hallraum durch Vermessung und Auswertung der Nicht-Diffusität des Schallfeldes; proc. DAGA 2020 Hannover, Hrg. DPG-GmbH, Bad Honnef, 2020