

Gekrümmte Abklingkurven in Hallräumen

Jamilla Balint¹, Gerhard Graber¹

¹ *Signal Processing and Speech Communication Laboratory,
Graz University of Technology, Austria, Email: balint@tugraz.at, graber@tugraz.at*

Einleitung

Die Reproduzierbarkeit von Absorptionsgradmessungen in verschiedenen Hallräumen stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar. Etliche Ringversuche in den letzten Jahrzehnten bilden die Problematik ab [1]. Ein Absorber wird in verschiedenen Hallräumen gemessen und die erzielten Absorptionsgrade weisen über den gesamten Frequenzbereich erhebliche Abweichungen auf. Der Messvorgang ist in der ISO 354 [2] festgelegt und basiert auf der Nachhalltheorie von Wallace Clement Sabine. In diesem Beitrag wird auf die Bestimmung der Nachhallzeit als wesentlicher Parameter bei der Absorptionsgradberechnung eingegangen. Dazu werden zunächst theoretische Grundlagen erörtert sowie zwei Hypothesen diskutiert, die für die unzureichende Reproduzierbarkeit verantwortlich sein könnten. Die erste Hypothese basiert auf der nicht eindeutigen Auswertung der Nachhallzeit durch lineare Regression bei gekrümmten Abklingvorgängen. Die zweite Hypothese setzt sich mit der Auswirkung von Streuobjekten in Hallräumen (Diffusoren) und deren Auswirkung auf den Abklingvorgang auseinander.

Theorie

Der Absorptionsgrad für diffusen Schalleinfall wird im Hallraum nach ISO 354 [2] bestimmt. Dabei wird die Nachhallzeit T_1 im leeren Hallraum gemessen und anschließend die äquivalente Absorptionsfläche A_1 des Raumes nach Gl. 1 berechnet. Ebenso wird dies mit der Probe im Hallraum durchgeführt (s. Gl. 2) und anschließend durch Differenzbildung und Division durch die Absorberfläche der Absorptionsgrad der Probe nach Gl. 3 bestimmt.

$$A_1 = \frac{55.3 \cdot V}{c_1 \cdot T_1} - 4 \cdot V \cdot m_1 \quad [\text{m}^2] \quad (1)$$

$$A_2 = \frac{55.3 \cdot V}{c_2 \cdot T_2} - 4 \cdot V \cdot m_2 \quad [\text{m}^2] \quad (2)$$

$$A = A_2 - A_1 \Rightarrow \alpha = \frac{A}{S} \quad (3)$$

Dabei stellt c die Schallgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, V das gesamte Raumvolumen in m^3 , m den Dämpfungskoeffizienten in $\frac{1}{\text{m}}$ und S die Oberfläche des Absorbers in m^2 dar. Im folgenden Abschnitt soll nun näher auf die Bestimmung der Nachhallzeit eingegangen werden.

Berechnung der Nachhallzeit

Es gibt zwei unterschiedliche Verfahren zur Ermittlung der Nachhallzeit. Das erste Verfahren bedient sich dem abgeschalteten Rauschen, wobei hier aufgrund der unterschiedlichen Amplituden- und Phasenlage des Messsignals zum Abschaltzeitpunkt etliche Messungen an einem Punkt durchgeführt werden müssen. Der Schalldruckpegelabfall wird gemessen und mittels einer Regressionsgerade die Nachhallzeit bestimmt. Der Auswertebereich hängt dabei vom vorhandenen Signalrauschabstand ab. Das zweite Verfahren basiert auf der Messung der Impulsantwort und die Berechnung der Abklingkurve mittels der Schröder Rückwärtsintegration nach Gl. 4. Da es sich bei der Anregung um ein deterministisches Signal handelt (Sweep-Signal oder MLS-Signal), ist die Impulsantwort eindeutig und muss an einer Messposition nicht mehrfach gemessen und gemittelt werden. Die Schröder Rückwärtsintegration ist definiert als

$$E(t) = \int_t^\infty p^2(\tau) d\tau, \quad (4)$$

wobei $E(t)$ die Abklingkurve und $p^2(\tau)$ die quadrierte Impulsantwort darstellt. Schröder hat in seiner ersten Publikation zur Rückwärtsintegration [3] schon darauf hingewiesen, dass die Ermittlung der Nachhallzeit mittels seiner neu vorgeschlagenen Methode zahlreiche Vorteile gegenüber der Methode mit dem abgeschalteten Rauschen aufweist. Die Vorteile sind hier kurz zusammengefasst:

- keine Mittelung an einer Messposition erforderlich
- eindeutig reproduzierbar aufgrund des deterministischen Quellsignals
- Abklingvorgang auch innerhalb der ersten -5 dB Abfall auswertbar
- Krümmung in der Abklingkurve sichtbar falls vorhanden

Auf die Krümmung der Abklingkurve, die Schröder erwähnt hat, soll im folgenden Absatz näher eingegangen werden.

Gekrümmte Abklingkurven

In gekoppelten Räumen sind gekrümmte Abklingkurven ein bekanntes Phänomen [4]. Durch die Ankopplung eines halligen Raumes an einen bedämpften Raum kann eine lebendige Halligkeit erzielt werden, ohne die Sprachverständlichkeit zu beeinträchtigen. Gekrümmte Abklingkurven können jedoch auch innerhalb eines Raumes

entstehen, wie schon zahlreiche Autoren gezeigt haben [5, 6]. Im tiefen Frequenzbereich, d.h. im Bereich unterhalb der Schröderfrequenz in dem die Modendichte gering ist, kann eine Krümmung durch die unterschiedlichen Abklingzeiten der axialen, tangentialen und schrägen Moden zustande kommen. Da die axialen und tangentialen Moden überwiegen, ist die Krümmung immer vorhanden. Bei hohen Frequenzen kann zusätzlich die ungleichmäßige Absorption an den Raumboberflächen dazu führen, dass eine Krümmung entsteht [7, 8].

Da die Betrachtung der Abklingkurve in Terz- oder Oktavbändern erfolgt, bedeutet das immer, dass eine Summe von Abklingvorgängen betrachtet wird:

$$H(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot e^{-\frac{13.8}{T_i} t}, \quad (5)$$

wobei A_i die Amplitude der i -ten Mode darstellt und T_i die Abklingzeit der jeweiligen Mode. Bei Vorhandensein von unterschiedlichen Abklingzeiten innerhalb eines Frequenzbandes weist der Abfall daher eine Krümmung auf. In Abb. 1 ist ein Beispiel für eine gekrümmte Kurve dargestellt. Die erste Mode besitzt einen Anfangspegel von $A_1 = 0$ dB und eine Abklingzeit von 1 s. Die zweite Mode besitzt einen Anfangspegel von $A_2 = -10$ dB und eine Abklingzeit von $T_2 = 2$ s. Die Summe aus beiden Moden ist daher gekrümmt.

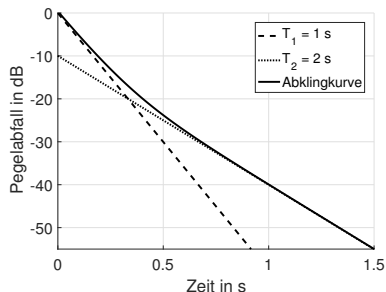


Abbildung 1: Abklingvorgang von zwei Moden mit den Abklingzeiten $T_1 = 1$ s und $T_2 = 2$ s, sowie die Summe aus beiden Abklingvorgängen, die einen gekrümmten Abklingvorgang darstellt

Werden nun die Nachhallparameter EDT , T_{20} und T_{30} mittels einer Regressionsgerade bestimmt (s. Abb. 2), so ergeben sich für die Anfangsnachhallzeit $EDT = 1.1$ s, die Nachhallzeit $T_{20} = 1.3$ s (bestimmt über den Pegelabfall von -5 dB bis -25 dB) und für $T_{30} = 1.5$ s (bestimmt über den Pegelabfall von -5 dB bis -35 dB). Die berechneten Parameter repräsentieren gewisse Abschnitte der Abklingkurve, jedoch stellen sie nicht die physikalischen Gegebenheiten dar, die der Abklingkurve zugrunde liegen.

Messungen

Es wurden Messungen in einem Hallraum durchgeführt (Volumen $V = 240$ m³, rechteckiger Hallraum der Technischen Universität Dänemark, Lyngby), um die

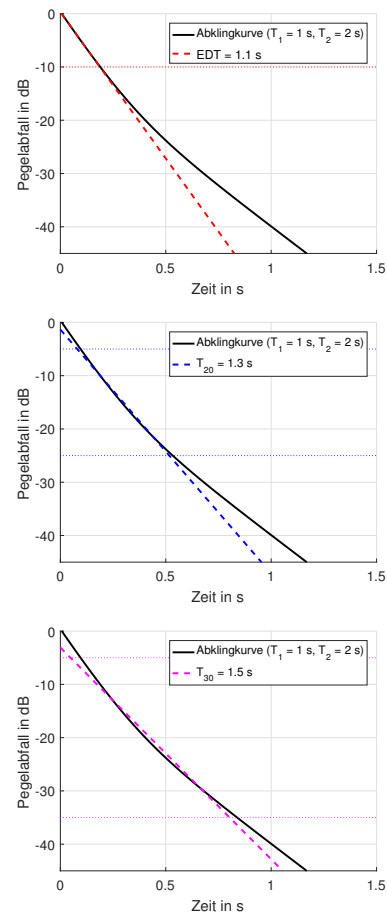


Abbildung 2: Gekrümmte Abklingkurve mit den Abklingzeiten $T_1 = 1$ s und $T_2 = 2$ s, sowie die mittels linearer Regression bestimmten zugehörigen Nachhallparameter $EDT = 1.1$ s, $T_{20} = 1.3$ s und $T_{30} = 1.5$ s.

Krümmung der Abklingkurve mit unterschiedlicher Anzahl von Diffusoren im Raum zu untersuchen. Die Diffusoren wurden unregelmäßig von der Decke gehängt (0, 6 und 20 Diffusoren), die Größe sowie das Gewicht entsprachen den Anforderungen laut ISO 354. Weiters wurden Messungen ohne und mit 12 m² Absorber durchgeführt (Mineralwolle, Strömungswiderstand $\sigma = 12.9 \frac{kPa \cdot s}{m^2}$, Aufbauhöhe $d = 100$ mm). Die Montage des Absorbers erfolgte nach ISO 354 am Hallraumboden mit abgedeckten Seitenflächen. Es wurden Impulsantworten an 12 unabhängigen Positionen gemessen und die Abklingkurve mittels Schröder Rückwärtsintegration bestimmt und anschließend gemittelt.

Ergebnisse

In Abb. 3 ist die gemittelte Abklingkurve über 12 Messpositionen für $f = 125$ Hz im leeren Hallraum (ohne Absorber) mit 0, 6 und 20 Diffusoren dargestellt. Die Abklingkurve weist eine Krümmung auf die sich mit der Diffusoranzahl verändert. Sobald der Absorber eingebracht wird, verringert sich die Abklingzeit, jedoch bleibt die Krümmung trotz Diffusoren im Raum bestehen (Messergebnisse s. Abb. 4).

In Abb. 5 ist die gemittelte Abklingkurve für $f = 2$ kHz

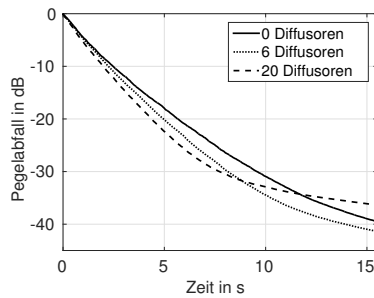


Abbildung 3: Abklingvorgang mit 0, 6 und 20 Diffusoren bei $f = 125$ Hz im Hallraum ohne Absorber

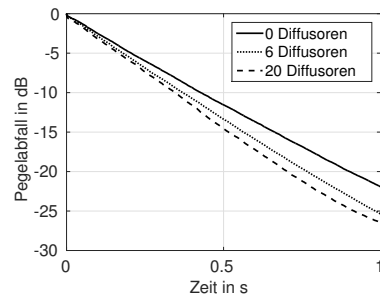


Abbildung 6: Abklingvorgang mit 0, 6 und 20 Diffusoren bei $f = 2$ kHz im Hallraum mit 12 m^2 Absorber



Abbildung 4: Abklingvorgang mit 0, 6 und 20 Diffusoren bei $f = 125$ Hz im Hallraum mit 12 m^2 Absorber

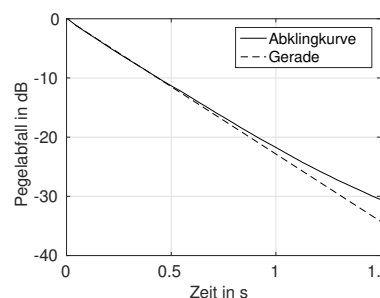


Abbildung 7: Abklingvorgang mit 0 Diffusoren bei $f = 2$ kHz im Hallraum mit 12 m^2 Absorber, Darstellung der gekrümmten Abklingkurve und einer Gerade

im leeren Hallraum (ohne Absorber) dargestellt. Die Abklingkurve weist keine Krümmung auf, aber mit zunehmender Anzahl der Diffusoren wird der Abklingvorgang steiler. Wird nun ein Absorber normgerecht in den Hallraum eingebracht (liegend am Boden), so scheint auf den ersten Blick dass die Abklingkurven stets gerade verlaufen und mit zunehmender Anzahl der Diffusoren werden (s. Abb. 6). Wird die Abklingkurve im Raum ohne Diffusoren näher betrachtet, ist ersichtlich dass eine Krümmung vorliegt. In Abb. 7 ist die Abklingkurve im Hallraum ohne Diffusoren sowie eine Gerade dargestellt. Ab ca. -15 dB weicht die gemessene Kurve von der Geraden ab.

kurve und das verwendete Messverfahren erhoben. Aus den Daten geht hervor, dass aufgrund der unterschiedlichen Größe der Räume, der tiefe Frequenzbereich in dem die Modendichte gering ist und es zu einer gekrümmten Abklingkurve kommt, stark variiert. Im kleinsten Raum ($V = 123 \text{ m}^3$) liegt die Schröderfrequenz bei 512 Hz, im größten Raum ($V = 393 \text{ m}^3$) liegt sie bei 260 Hz. Durch die Auswertung der Nachhallzeit T_{20} , T_{30} oder T_{40} mittels einer Regressionsgeraden kann es somit zu einer erheblichen Abweichung zwischen den Hallraumergebnissen kommen. Weiters wird vorwiegend die Messmethode mit dem abgeschalteten Rauschen bevorzugt, was die Auswertung einer gekrümmten Abklingkurve erschwert. Die visuelle Inspektion einer Abklingkurve reicht jedoch nicht aus und macht es in vielen Fällen unmöglich zu entscheiden, ob eine Krümmung vorliegt oder nicht. In [1] wurde die Vergleichsstandardabweichung aus fünf Ringversuchen mit insgesamt 15 Messreihen erhoben. Aus der Untersuchung geht hervor, dass die Abweichung höher ist als in der ISO 354 angenommen und vom Absorptionsgrad der Probe abhängt. Weiters ist der Untersuchung auch zu entnehmen, dass die Abweichung im tiefen Frequenzbereich viel höher ist als im hohen Frequenzbereich. Da die Krümmung der Abklingkurve im tiefen Frequenzbereich viel stärker ausgeprägt ist als im hohen Frequenzbereich, kann dadurch die erhöhte Abweichung erklärt werden. Dass im Hallraum ohne Absorber die Abklingkurve im hohen Frequenzbereich nicht gekrümmt ist, lässt sich damit erklären, dass eine gleichmäßige Verteilung der Absorption an den Raumbegrenzungsflächen vorliegt.

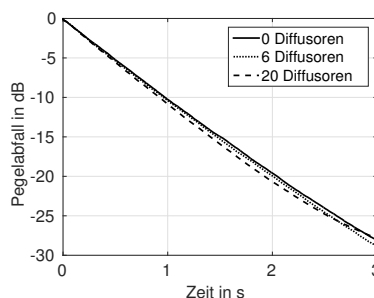


Abbildung 5: Abklingvorgang mit 0, 6 und 20 Diffusoren bei $f = 2$ kHz im Hallraum ohne Absorber

Diskussion

In Tabelle 1 sind Daten aus 22 Hallräumen zusammengetragen [9]. Dabei wurden die Größe des Hallraumes, die Schröderfrequenz, sowie Größe und Anzahl der Diffusoren, der verwendete Nachhallparameter zur Auswertung des Absorptionsgrades, die Überprüfbarkeit der Abkling-

Da die Auswertung einer gekrümmten Abklingkurve mit-

Tabelle 1: Daten aus 22 Hallräumen

Hallraumvolumen	123 - 393 m ³
Schröderfrequenz	260 - 512 Hz
Anzahl der Diffusoren	1 - 19
Größe der Diffusoren	0.8 - 24 m ²
verwendete Nachhallzeit	T_{20} : 16 T_{30} : 3 T_{40} : 1 k.A.: 2
Abklingkurve überprüfbar	ja: 20 nein: 2
abgeschaltetes Rauschen	19
Impulsantwort	3

tels einer Regressionsgeraden nur einen gewissen Abschnitt des Abklingvorganges berücksichtigt (wie das bei den Nachhallparametern T_{20} und T_{30} der Fall ist), kann das je nach gewähltem Parameter zu unterschiedlichen Nachhallzeiten führen. Als Konsequenz werden die daraus berechneten Absorptionsgrade in unterschiedlichen Hallräumen ebenfalls stark voneinander abweichen. Um multiexponentielle Abklingvorgänge zu charakterisieren, gibt es Ansätze mittels Bayesischer Analyse [4]. In [7] wurde von den Autoren vorgeschlagen, dass es teilweise notwendig ist, bis zu sieben Abklingterme für die Charakterisierung eines Abklingvorganges anzusetzen. Dies wäre in der Praxis jedoch nicht handhabbar. Kuttruff hat in [6] gezeigt, dass der Abklingvorgang im Wesentlichen die Laplace-Transformierte der Dämpfungsverteilung ist. Somit kann aus der Abklingkurve durch die inverse Laplacetransformation ebenso die Dämpfungsverteilung abgeschätzt werden.

Fazit

Es wurde gezeigt, dass die Berücksichtigung von gekrümmten Abklingkurven im gesamten Frequenzbereich relevant ist. Die Krümmung des Abklingvorganges ist kein Indikator für mangelnde Diffusität sondern rührt von den physikalischen Gegebenheiten her, dass Moden unterschiedliche Abklingzeiten besitzen und die Betrachtung der Daten innerhalb eines Frequenzbandes in einer Krümmung resultiert. Weiters ist auch gezeigt worden, dass bei einer ungleichmäßig verteilten Absorption im Raum eine Krümmung entstehen kann. Dieser Umstand kann auch in der Praxis in Klassenräumen oder Büroräumen mit akustischen Maßnahmen, die sich z.B. rein auf die Decke beschränken, beobachtet werden. Weiters wurde gezeigt, dass in Hallräumen ebenfalls gekrümmte Abklingkurven vorhanden sind. Im tiefen Frequenzbereich aufgrund der unterschiedlichen Dämpfung der Moden und im hohen Frequenzbereich aufgrund der ungleichmäßig verteilten Absorption wenn eine Probe in den Raum eingebracht wird und normgemäß am Boden installiert wird. Bei Einbringen von Diffusoren in den Hallraum verringert sich die Krümmung, dadurch steigt auch der berechnete Absorptionsgrad mit zunehmender Anzahl von Diffusoren. Aufgrund der unterschiedlichen

Anzahl der Diffusoren in Hallräumen und der variierenden Größe der Hallräume wird die Hypothese aufgestellt, dass diese Faktoren Einfluss auf die Reproduzierbarkeit von Absorptionsgradmessungen haben. Daher wird vorgeschlagen, dass bei Vorhandensein einer gekrümmten Abklingkurve die Nachhallzeit nicht mittels einer Regressionsgeraden bestimmt wird, sondern über einen multiexponentiellen Fit. Dadurch würde der gesamte Abklingvorgang berücksichtigt werden (nicht nur Teilabschnitte wie in Abb. 2 dargestellt).

Literatur

- [1] Wittstock, V.: Unsicherheiten bei der Messung des Absorptionsgrades im Hallraum. 40. Jahrestagung für Akustik, Oldenburg, 2014
- [2] ISO 354: Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation chamber. International Organization of Standardization, 2003
- [3] Schroeder, M.: New Method of Measuring Reverberation Time. J. Acoust. Soc. Am. 37, 409-412, 1965
- [4] Xiang, N.; Goggans, P.; Jasa, T.; Robinson, P.: Bayesian characterization of multiple-slope sound energy decays in coupled-volume systems. J. Acoust. Soc. Am. 129, 741, 2011
- [5] Jacobsen, F.: Decay rates and wall absorption at low frequencies. J. of Sound and Vibration. 81(3), 405-412, 1982
- [6] Kuttruff, H.: Eigenschaften und Auswertung von Nachhallkurven. Acoustica 8, 1958
- [7] Hunt, F.V.; Beranek, L.; Maa, D.Y.: Analysis of Sound Decay in Rectangular Rooms. J. Acoust. Soc. Am. (11), 80-94, 1939
- [8] Nilsson, E.: Decay Processes in Rooms with Non-Diffuse Sound Fields Part I: Ceiling Treatment with Absorbing Material. Building Acoust. 11, 39-60, 2004
- [9] A.-C. Thysell: Test Codes for suspended ceilings. Sound absorption RRT. Tyrens AB project no. 224628, 2011