



RAUMAKUSTIK EINES TONSTUDIOS

Jakob Siebenrock

BACHELORARBEIT

angefertigt im Rahmen des Seminars
Elektro- und Raumakustik

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Signal Processing and Speech Communication Laboratory

Institutsleiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Technische Universität Graz

Graz, 21. Juni 2023

Kurzfassung

Die akustische Optimierung eines Raumes ist für die Aufnahme und Wiedergabe von Musik von entscheidender Bedeutung. Ohne Anpassung und Optimierung des Raumverhaltens an den jeweiligen Verwendungszweck ist eine qualitativ hochwertige Aufnahme nicht möglich. Zwei Eigenschaften des Raumes sind dabei besonders zu beachten. Zum einen muss die Nachhallzeit des Raumes in allen Frequenzbereichen auf das gewünschte Maß reduziert werden. Zum anderen müssen die Eigenmoden des Raumes erkannt und gedämpft bzw. gebrochen werden. Besonderes Augenmerk wird in dieser Arbeit darauf gelegt, ein geeignetes akustisches Abbild des Raumes zu entwerfen. Dies geschieht durch Messung und Simulation des leeren Raumes. Mit Hilfe dieses Entwurfs ist es möglich, den Umfang des Ausbaus kompetent abzuschätzen.

Abstract

The acoustic optimisation of a room is crucial for the recording and reproduction of music. Without adapting and optimising the room's behaviour to the respective purpose, a high-quality recording is not possible. Two characteristics of the room must be given special attention. First, the reverberation time of the room must be reduced to the desired level in all frequency ranges. Secondly, the room's eigenmodes must be recognised and damped or refracted. In this work, special attention is paid to designing a suitable acoustic image of the room. This is done by measuring and simulating the empty room. With the help of this design, it is possible to competently estimate the extent of the acoustical treatment.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Messung des leeren Raumes	2
2.1	Konzept	2
2.1.1	Verwendete Geräte	2
2.1.2	Positionierung	3
2.1.3	Messverfahren	3
2.1.4	Mittelung der Ergebnisse	4
2.2	Messung	5
2.2.1	Aufbau	5
2.2.2	Ergebnisse	6
2.3	Modale Eigenschaften	9
3	Simulation des leeren Raumes	11
3.1	Erstellen eines Modells in Catt-Acoustic	11
3.1.1	Grenzen der Simulationssoftware	11
3.1.2	Raumkomplexität	12
3.1.3	Streuungsparameter „Scattering“	13
3.1.4	Beugungsparameter „Diffraction“	19
3.2	Kalibrierung des Raummodells durch die Leermessung	22
3.2.1	Ziel der Kalibrierung	22
3.2.2	Vorgehensweise	22
3.2.3	Vergleich zwischen Simulation und Messung	23
3.2.4	Anpassung der Absorptionsgrade α und Scattering	23
3.2.5	Simulationsergebnisse nach der Anpassung	26
4	Simulation der akustischen Optimierung	28
4.1	Simulationsmodell	28
4.2	Simulationsergebnisse	29
5	Zusammenfassung und Ausblick	30

Literatur

- [1] *Akustik - Messungen von akustischen Parametern der Raumakustik, Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen*, Norm, 2009.
- [2] *Raumakustik Laborunterlagen*, TU Graz.
- [3] *Akustische Messtechnik Vorlesungsunterlagen*, TU Graz.
- [4] *Raumakustik Vorlesungsunterlagen*, TU Graz.
- [5] B. Dalenbäck, *Whitepaper: What is geometrical Acoustics?* http://www.catt.se/What_is_Geometrical_Acoustics.pdf, 2018.
- [6] H. Kuttruff, *Room Acoustics*. Aachen: Elsevier Science Publishers, 2019, ISBN: 978-0-367-87099-7.
- [7] B. Dalenbäck, *Reverberation time, diffuse reflection, Sabine, and computerized prediction - part I*, <https://www.catt.se/diffseries/index.htm>, Accessed: 2022-11-11.
- [8] B. Dalenbäck, „Engineering principles and techniques in room acoustics prediction,“ *BNAM 2010*, 2010.
- [9] J. H. R. X. Zeng C. L. Christensen, *Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model*, https://odeon.dk/pdf/A15-ApplAc_2006_Zeng_Lynge_Rindel.pdf, 2006.
- [10] K. S. u. D. S. W. M. Willems, *Formeln und Tabellen Bauphysik, 4. Auflage*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016, ISBN: 978-3-658-16049-4.
- [11] B. Dalenbäck, *Whitepaper regarding diffraction v6*, <http://www.catt.se/CATT-A-Diffraction-Whitepaper.pdf>, 2016.
- [12] D. T. B. P. Menounou I. J. Busch-Vishniac, „Directive line source model: A new model for sound diffraction by half planes and wedges,“ *The Journal of the Acoustical Society of America* 107, 2000.
- [13] *Welcher Absorber eignet sich am besten zur Schallabsorption*, <https://www.jochenschulz.me/de/blog/steinwolle-glaswolle-hanf-absorber-material>, Accessed: 2022-11-10.

1

Einleitung

Voraussetzung für eine gezielte akustische Gestaltung eines Tonstudios ist ein möglichst genaues Bild des zu bearbeitenden Raumes. Dies soll einerseits in Form einer Messung geschehen, die nach vorgegebenen Normen durchgeführt wird, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Zum anderen wird eine Simulation in der Software 'Catt-Acoustic' durchgeführt, um den Umfang des Ausbaus abschätzen zu können. Für beide Bereiche ergeben sich Herausforderungen und Grenzen, die der Raumakustiker/die Raumakustikerin kennen muss.

Bei der Messung ist es wichtig, ein nachvollziehbares und wiederholbares Messkonzept zu erstellen. Dies wird durch eine bestimmte Anordnung der Messpunkte und Quellenpositionen und durch ein deterministisches Quellsignal erreicht. Durch die Mittelung vieler Messergebnisse an verschiedenen Messpunkten im Raum können ortsabhängige Unterschiede in den raumakustischen Eigenschaften des Raumes eliminiert werden. Diese spielen insbesondere im tieffrequenten Bereich eine wesentliche Rolle. Das Ergebnis ist ein für den gesamten Raum gültiger Mittelwert.

Auch die Simulation birgt einige Herausforderungen. Zum einen stellt sie immer nur ein eingeschränktes Abbild der Realität dar. Catt-Acoustic beschränkt sich hier auf Ray-Tracing, eine Methode, die nur die geometrische Raumakustik berücksichtigt. Die modalen Eigenschaften des Raumes müssen daher getrennt von der Simulation betrachtet werden. Zum anderen können die Ergebnisse einer reinen Simulation nicht als gegeben hingenommen werden. Sie kann nur in Abstimmung mit realen Messergebnissen zu realistischen Ergebnissen führen.

Nach diesem Prinzip wird in dieser Arbeit zuerst eine Messung nach ÖNORM 3382-2 durchgeführt, um ein geeignetes raumakustisches Bild zu erhalten. Anschließend wird eine Simulation durchgeführt und mit der Messung abgeglichen. Am Ende der Arbeit wird ein Vorschlag zur akustischen Bearbeitung des Studios mit Hilfe der Simulation in Catt-Acoustic unterbreitet.

2

Messung des leeren Raumes

Die korrekte Durchführung der raumakustischen Messung ist für die Raumakustik wichtig, da alle weiteren Verfahren, einschließlich der Simulation, davon abhängig sind. Falsche Messwerte können daher leicht zu einer falschen Behandlung des Raumes führen. Im folgenden Kapitel wird das Messverfahren des leeren Raumes erläutert.

2.1 Konzept

Das Messkonzept orientiert sich an der ÖNORM EN ISO 3382-2 [1]. Um eine gültige Nachhallzeit in einem Raum bestimmen zu können, ist es notwendig, ein reproduzierbares Verfahren zu etablieren. Dies wird einerseits durch die Wahl eines deterministischen Quellsignals erreicht, andererseits ist darauf zu achten, dass das Mikrofon nur die Rauminformation aufnimmt und die Messung nicht durch die Schallquelle selbst verfälscht wird. Dies wird durch die Wahl des Quellen- und Mikrofontyps sowie durch die Wahl der Messpositionen gewährleistet.

2.1.1 Verwendete Geräte

Für raumakustische Messungen werden möglichst kugelförmig abstrahlende Schallquellen benötigt, um den Raum gleichmäßig anzuregen. Ebenso wichtig ist es, den Raum laut genug anzuregen, um eine von Störgeräuschen unabhängige Messung durchführen zu können. Bei der Messung der Nachhallzeit T_{30} muss der Pegel in jedem zu messenden Frequenzband mindestens 45 dB über dem Störgeräuschpegel liegen. [1]

Konkret wird in dieser Arbeit der Dodekaeder Nor276 von Norsonic verwendet. Dazu gehört ein entsprechender Verstärker Nor280. Das Messsignal wird von der Software ARTA erzeugt, die auch die Analyse der Messsignale übernimmt. Die DA- und AD-Wandlung übernimmt das Audio-Interface Focusrite Scarlett 2i2.

Die Messmikrofone müssen ebenfalls omnidirektional sein. Möglichst kleine Membrangrößen (1/2 Zoll oder kleiner) sind erforderlich, um den Einfluss der Kapsel selbst im Schallfeld zu minimieren. Das Mikrofon wird entweder direkt an das Analysegerät oder an ein Aufzeichnungsgerät angeschlossen. [1]

Es ist wichtig, dass Lautsprecher und Mikrofon in ihrem linearen Bereich betrieben werden. Übersteuerungen führen zu Verzerrungen und damit zu deutlichen Verfälschungen der Messung.

Zusätzlich wird ein Messgerät zur Bestimmung der Raumtemperatur eingesetzt. Diese ist wichtig, um die Schallgeschwindigkeit bestimmen zu können. Die Messung der Luftfeuchtigkeit ist bei Nachhallzeiten unter 1,5s zu vernachlässigen. [2]

Verwendungszweck	Bezeichnung
Schallquelle	Norsonic Dodekaeder Nor276
Verstärker	Norsonic Nor280
Interface	Focusrite Scarlett 2i2
Messmikrofon	NTi M2230 Messmikrofon
Messgerät für Temperatur	Thermohygrometer Testo 610
Analysetool	Laptop mit ARTA Messsoftware

Abb. 2.1: Geräteliste

2.1.2 Positionierung

Die Messung erfolgt gemäß ÖNORM 3382-2 für Präzisionsmessungen an zwei Schallquellenpositionen (Q1, Q2). Die Schallquellen sind entweder an Positionen aufzustellen, an denen später üblicherweise Schallquellen wie z.B. Instrumente aufgestellt werden, oder, wenn dies nicht möglich ist, an Positionen, an denen der Raum möglichst gleichmäßig angeregt wird. Eine Quelle (Q2) ist in der Ecke des Raumes aufgestellt. Die andere (Q1) steht an der Stelle, an der später ein Schlagzeug stehen wird. (Siehe Abbildung 2.3) [1]

Um den Einfluss des Direktschalls von der Schallquelle zu minimieren, müssen Mikrofone ebenso mindestens

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}}$$

von der Quelle entfernt sein. Bei einer erwarteten Nachhallzeit von ca. 0,5 Sekunden und einem Raumvolumen von $97m^3$ entspricht dies ca. 1,5m. Die Schallgeschwindigkeit wird mit $340\frac{m}{s}$ angenommen. [1]

Die Mikrofone müssen mindestens $\frac{\lambda}{2}$ der niedrigsten zu messenden Frequenz voneinander entfernt sein. Bei 125Hz entspricht dies etwa 1,4m. Die Mikrofonpositionen sollen so im Raum verteilt sein, dass eine gleichmäßige und reproduzierbare Messung der Nachhallzeit nach Mittelung aller Messungen möglich ist. [1]

Je nach Anwendungsbereich muss auch die Höhe der Mikrofone gewählt werden. Da es sich hier um ein Studio handelt, in dem die Kopfhöhe einer Person etwa zwischen 1,30m (sitzend) und 1,80m (stehend) liegt, werden auch die Mikrofone in dieser Höhe platziert. [1]

2.1.3 Messverfahren

Es stehen zwei Messverfahren zur Verfügung. Zum einen ist eine Messung mit abgeschaltetem Rauschen möglich, bei der der Raum gleichmäßig mit einem rosa Rauschen angeregt wird. Eine andere Möglichkeit ist die Bestimmung der Nachhallzeit aus der Raumimpulsantwort. Diese wird ursprünglich mit einer Impulsschallquelle bestimmt. Da dies bei einer elektroakustischen Schallquelle kaum verzerrungsfrei möglich ist, wird zur Bestimmung der Raumimpulsantwort die Messung mit einem Sinus-Sweep verwendet. Dabei werden alle Frequenzen des gewünschten Frequenzbereiches mit einer vorgegebenen Gewichtung durchfahren. Die Gewichtung der Frequenzen kann frei gewählt werden, in dieser Arbeit wird ein exponentieller Sweep verwendet. Dieser entspricht von der Schallenergieverteilung einem rosa Spektrum und bietet im Gegensatz zum linearen Sweep einen höheren Signal zu Rausch Abstand (SNR) zu tiefen Frequenzen hin. [3]

Ein weiterer Vorteil der Sweep-Messung ist, dass die Anregung deterministisch ist. Daher ist nur eine Messung pro Messposition erforderlich, um die Reproduzierbarkeit der Messung zu gewährleisten.

Je länger die Zeit des Sinus-Sweeps gewählt wird, desto mehr Schallenergie wird in den Raum abgestrahlt, was zu einer Erhöhung des SNR führt. Erfahrungsgemäß werden Sweepzeiten empfohlen, die dem Zwei- bis Vierfachen der längsten Nachhallzeit des Raumes entsprechen. Dies entspricht im konkreten Fall 2-4 Sekunden. [3]

Nach der Messung der Systemantwort mit dem Sinus-Sweep kann die Impulsantwort $h(t)$ durch Entfaltung gewonnen werden. Dabei kann zwischen einer Division im Bildbereich oder einer Entfaltung im Zeitbereich mit Hilfe eines zum Quellsignal inversen Filters gewählt werden. Da ein Raum akustisch näherungsweise ein lineares zeitinvariantes (LTI) System ist, kann er vollständig durch seine Impulsantwort beschrieben werden. Die Impulsantwort entspricht dabei dem Schalldruckverlauf im Raum nach Anregung durch einen diracförmigen akustischen Impuls. [3]

Durch die Schröder-Rückwärtsintegration kann nun aus der Impulsantwort des Raumes die Abklingzeit berechnet werden. Daraus können die Nachhallzeiten T_{20}/T_{30} sowie die Early Decay Time (*EDT*) abgelesen werden. [4]

2.1.4 Mittelung der Ergebnisse

Für jede Quellposition muss die Messung an jedem Messpunkt durchgeführt werden.

$$T = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Tm_i = \frac{1}{12} \cdot \sum_{i=1}^{12} Tm_i \quad (2.1)$$

Nach den 12 Messungen, d.h. 6 verschiedenen Messpositionen für Q1 und ebenfalls 6 verschiedenen Messpositionen für Q2 und der Berechnung der Abklingvorgänge können die einzelnen Nachhallzeiten mit Gleichung 2.1 arithmetisch gemittelt werden, um eine gültige Gesamtnachhallzeit des Raumes zu erhalten. T ist die Gesamtnachhallzeit des Raumes nach der Mittelung, n ist die Anzahl der Messungen und Tm sind die Nachhallzeiten der einzelnen Messungen. Die Mittelung ist für jedes Oktavband einzeln durchzuführen. [1]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} = \sqrt{\frac{1}{11} \sum_{i=1}^{12} (x_i - \mu)^2} \quad (2.2)$$

Zur Überprüfung der Gültigkeit eines Messergebnisses kann mit Gleichung 2.2 auch eine Standardabweichung berechnet werden. σ ist die Standardabweichung der Messung, n die Anzahl der Messungen, x_i die Messergebnisse an den einzelnen Messpositionen und μ der arithmetische Mittelwert aller Messergebnisse. [1]

Der Messaufbau sieht wie folgt aus:

Position	Raumkoordinaten		
	x	y	h
Q1	0,3m	1,5m	1,8m
Q2	4,5m	7,2m	1,7m
M1	3,0m	6,0m	1,8m
M2	1,3m	6,3m	1,5m
M3	2,2m	4,7m	1,7m
M4	3,2m	3,7m	1,6m
M5	1,5m	2,3m	1,5m
M6	3,3m	1,5m	1,4m

Abb. 2.2: Mikrofon- und Quellpositionen

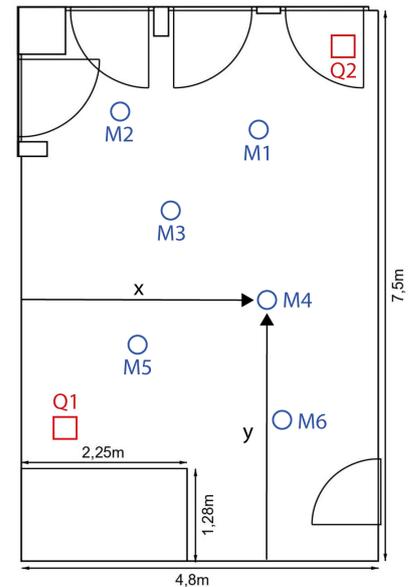


Abb. 2.3: Grundriss (nicht maßstäblich)

M1-M6 repräsentieren die Messpositionen im Raum, Q1 und Q2 die zwei Quellpositionen. In Abbildung 2.2 sind die Positionen der Messpunkte und Quellen beschrieben, Abbildung 2.3 zeigt den Grundriss mit eingezeichneten Quellen und Mikrofonen.

2.2 Messung

2.2.1 Aufbau

Ziel der Messung ist es, ein möglichst genaues Abbild der akustischen Verhältnisse im Raum zu erhalten und damit eine Referenz für die Simulation zu schaffen. Anhand der Messwerte des Raumes kann die Simulation des leeren Raumes angepasst und verbessert werden (Unterabschnitt 3.2.1). Wichtige Vergleichsparameter sind hierbei die Nachhallzeit T_{30} , die EDT , das Klarheitsmaß C_{80} sowie die Schwerpunktzeit T_s .

Die modalen Eigenschaften des Raumes werden bei der Messung nicht berücksichtigt. Der Grund dafür ist, dass keine Resonanzabsorber in den Raum eingebracht werden. Die modalen Eigenschaften sind für den akustischen Ausbau entsprechend zu berücksichtigen, eine Messung ist für die Planung jedoch nicht erforderlich. Für die Tiefenabsorption werden nur Kantenabsorber in den Raum eingebracht, die keine eigene Resonanzfrequenz besitzen.

Die Messung erfolgt, wie im Messkonzept beschrieben, mit 2 Quellpositionen und 6 Messpunkten. Die folgenden Diagramme zeigen die raumakustischen Gütemaße, die mit Hilfe der Raumimpulsantwort bzw. des Raumabklingverhaltens ermittelt wurden. Der Frequenzbereich ist zu Oktavbändern zusammengefasst, da dies der Simulation entspricht und somit eine bessere Vergleichbarkeit ermöglicht.



Abb. 2.4: Messaufbau im Raum, Quelle an Position Q1, Mikrophon an Position M3



Abb. 2.5: Messaufbau im Raum, Quelle an Position Q2, Mikrophon an Position M1

Abbildung 2.4 und Abbildung 2.5 zeigen den Messaufbau.

2.2.2 Ergebnisse

Betrachtet werden die Messergebnisse für die raumakustischen Parameter T_{30} , EDT , T_s und C_{80} .

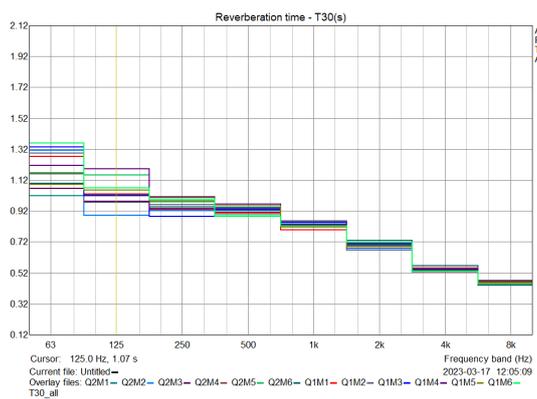


Abb. 2.6: T_{30} an allen 6 Messpositionen an 2 Quellpositionen, Einzelmessungen. Visualisierung mit ARTA

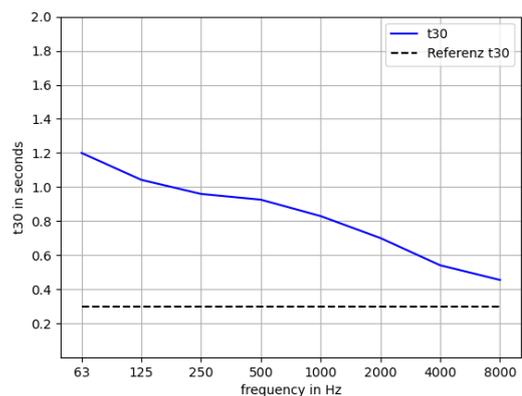


Abb. 2.7: T_{30} an allen 6 Messpositionen an 2 Quellpositionen, arithmetischer Mittelwert. Visualisierung mit Matlab

In Abbildung 2.6 sind die Messergebnisse der einzelnen Messdurchgänge dargestellt. Es sind Abweichungen zwischen den Messungen in der 63 Hz und 125 Hz Oktave zu erkennen. Dies ist

auf die unterschiedliche räumliche Positionierung von Mikrofon und Quelle zurückzuführen. Ab 250 Hz spielt die Position nur noch eine vernachlässigbare Rolle. Um die Messfehler zu kompensieren, wird aus allen Messungen das arithmetische Mittel gebildet (Abbildung 2.7). In den folgenden Schritten wird nur mit dem arithmetischen Mittelwert der Messungen weitergearbeitet.

In Abbildung 2.7 ist die Referenz T_{30} die gewünschte Nachhallzeit in einem Tonstudio von 0,3 Sekunden über alle Frequenzen.

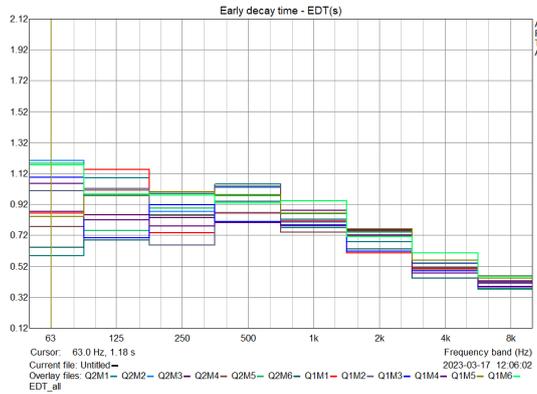


Abb. 2.8: EDT an allen 6 Messpositionen an 2 Quellpositionen, Einzelmessungen. Visualisierung mit ARTA

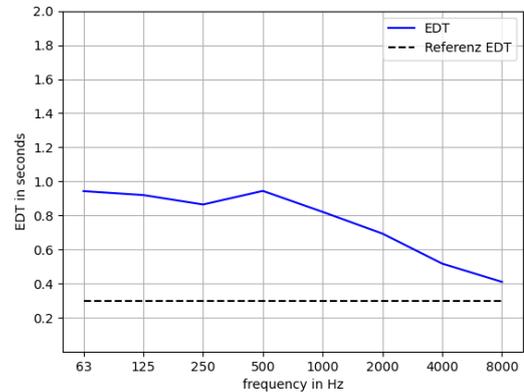


Abb. 2.9: EDT an allen 6 Messpositionen an 2 Quellpositionen, arithmetischer Mittelwert. Visualisierung mit Matlab

Wie bei T_{30} zeigt Abbildung 2.8 die Einzelmessungen der EDT und Abbildung 2.9 den arithmetischen Mittelwert. In Abbildung 2.8 ist eine nicht zu vernachlässigende Raumabhängigkeit der EDT bis zu hohen Frequenzen (2000 Hz) zu erkennen. Eine pauschale Bewertung des Raumes ist daher allein aus den EDT-Messungen nicht möglich. Sie wird jedoch als Vergleichsgröße für den Abgleich mit der raumakustischen Simulation (Unterabschnitt 3.2.1) weiterhin verwendet. Die folgenden Auswertungen erfolgen ebenfalls nur mit dem arithmetischen Mittelwert (Abbildung 2.9) aus den Messungen. Die Referenz EDT zeigt wiederum die gewünschte Nachhallzeit in Tonstudios von 0,3s.

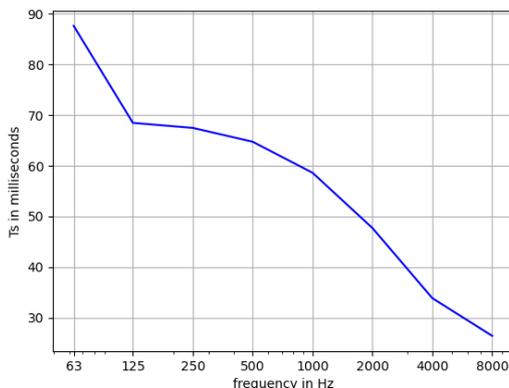


Abb. 2.10: T_s an allen 6 Messpositionen an 2 Quellpositionen, arithmetischer Mittelwert. Visualisierung mit Matlab

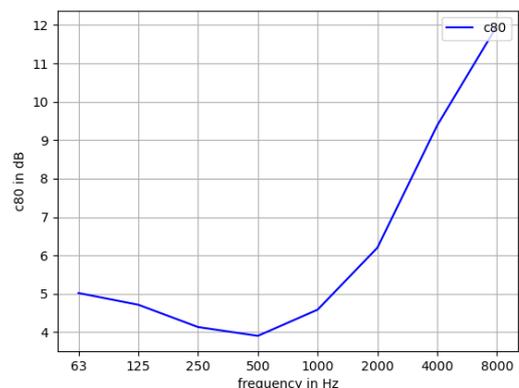


Abb. 2.11: C_{80} an allen 6 Messpositionen an 2 Quellpositionen, arithmetischer Mittelwert. Visualisierung mit Matlab

Abbildung 2.10 ist die Darstellung der Schwerpunktzeit T_s , Abbildung 2.11 des Klarheitsmaßes C_{80} . Beide raumakustischen Gütemaße sind wichtige Parameter zur Bewertung eines Raumes für musikalische Anwendungen. Es sind keine Referenzwerte angegeben, da diese für Konzertsäle und andere, großflächigere Anwendungsbereiche aufgestellt wurden. Ein Studioraum erfüllt diese Voraussetzung (z.B. $C_{80} > 0\text{dB}$ über alle Oktaven) bereits ohne Bearbeitung.

Sie wurden dennoch gemessen und werden hier angegeben, da sie sich zur Kalibration mit der raumakustischen Simulation als hilfreich erweisen können. Beide Parameter weisen allerdings eine signifikante Standardabweichung auf.

Parameter	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T_{30} [s]	0,11	0,08	0,04	0,02	0,02	0,02
EDT [s]	0,21	0,15	0,10	0,09	0,05	0,05
T_s [s]	0,09	0,09	0,09	0,07	0,06	0,03
C_{80} [dB]	2,23	2,12	1,86	1,35	0,74	0,12

Abb. 2.12: Standardabweichung der raumakustischen Parameter.

In Abbildung 2.12 werden die Standardabweichungen angezeigt, die aus Gleichung 2.2 berechnet wurden. Man erkennt eine Abnahme der Standardabweichung zu den hohen Frequenzen hin. Dies ist auf die stärkere Ortsabhängigkeit der Messung bei tiefen Frequenzen zurückzuführen. Zwischen den Mikrofonpositionen kommt es durch die Ausbildung von Moden unterhalb der Schröderfrequenz (siehe Gleichung 2.4) und durch Erstreflexionen zu abweichenden Messungen. Je höher die gemessene Frequenz ist, desto geringer ist der Einfluss dieser Faktoren. (Siehe Abschnitt 2.3).

Durch die Betrachtung der Standardabweichung kann auch die Aussagekraft der Messung überprüft werden. Diese Auswertung ist nicht standardisiert und muss vom Raumakustiker/von der Raumakustikerin eigenständig durchgeführt werden.

In der 125 Hz Oktave beträgt die Standardabweichung für T_{30} ca. 10,5% (siehe Abbildung 2.7 und Abbildung 2.12). Dies zeigt, dass eine Bewertung dieser Oktave allein durch die statistische Raumakustik zu unzutreffenden Ergebnissen führen kann. Bei einer Abweichung in dieser Größenordnung in Abhängigkeit von der Quellen- und Mikrofonposition kann kein valides Ergebnis gemittelt über den gesamten Raum ermittelt werden.

Für die Oktave 500 Hz beträgt die Standardabweichung ca. 4,5%. Oberhalb dieses Frequenzbandes kann der Mittelwert der Messung (Abbildung 2.7) als aussagekräftiges Ergebnis angesehen werden. Wie in Abbildung 2.6 und Abbildung 2.12 ersichtlich, nimmt die Standardabweichung oberhalb dieser Oktave weiter ab.

Die anderen genannten Parameter zeigen ein ähnliches Verhalten wie die T_{30} . Sie zeigen jedoch im Vergleich eine deutlich höhere Standardabweichung bis zu höheren Frequenzen. So weist die EDT bei 1kHz noch eine Abweichung von ca. 11% auf. Daher ist Vorsicht geboten, wenn es um die Gültigkeit der Ergebnisse von Mittelwertmessungen geht. Ähnliches zeigt sich auch bei den Auswertungen der T_s und C_{80} .

Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Arbeit ein besonderes Augenmerk auf die Auswertung der T_{30} gelegt und die anderen Parameter als zusätzliche Möglichkeiten zum Abgleich herangezogen.

2.3 Modale Eigenschaften

Die akustische Betrachtung eines Raumes muss frequenzabhängig unterschiedlich bewertet werden. Dabei wird grundsätzlich zwischen zwei Betrachtungsweisen unterschieden. Im höherfrequenten Bereich bedient man sich der geometrischen Raumakustik, die Schall ausschließlich als Strahl ansieht. Diese Näherung ist möglich, da die Wellenlänge des Schalls klein genug ist, damit keine wellentheoretischen Effekte im Raum mehr auftreten.

Im tieffrequenten Bereich gewinnen die modalen Eigenschaften des Raumes an Bedeutung. Deshalb muss für diesen die wellentheoretische Akustik eingesetzt werden. Moden hängen stark von den geometrischen Eigenschaften ab und können für einen quaderförmigen Raum näherungsweise mit einer mathematischen Formel berechnet werden, die sich aus der Lösung der Wellengleichung ergibt. [4]

$$|f_e| = \left(\frac{c}{2}\right) \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (2.3)$$

Die Moden sind als Eigenfrequenzen f_e des Raumes zu betrachten. Durch Reflexion und Interferenz entstehen zwischen parallelen Wänden stehende Wellen, die in der Aufnahme und Wiedergabe zu hörbaren Verzerrungen im Tieftonbereich führen. Moden werden in axiale, tangential und schräge Moden eingeteilt. Dies bedeutet, dass sie sich entweder in einer Raumrichtung (axial), zwei Raumrichtungen (tangential) oder in allen drei Raumrichtungen (schräg) ausbreiten. Besonderes Augenmerk sind bei der Betrachtung des Raumes auf Frequenzen zu legen, bei denen mehrere dieser Eigenmoden übereinanderliegen. In diesen Frequenzbereichen treten die größten Verzerrungen auf. [4]

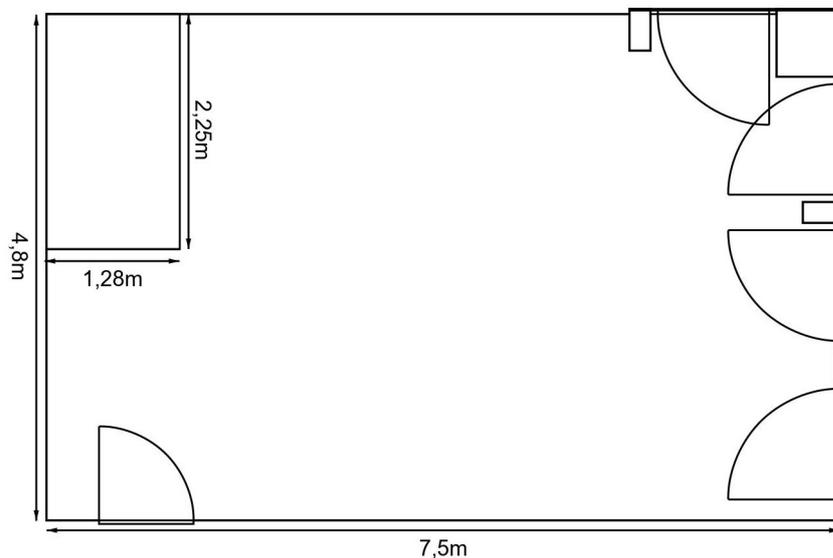


Abb. 2.13: Grundriss des Raums

Für den Grundriss (Abbildung 2.13) ergeben sich die Raumlängen $l_x=7,5\text{m}$, $l_y=4,8\text{m}$. Gleichung 2.3 kann nur für quaderförmige Räume verwendet werden, d.h. für Räume mit rechteckiger Grundfläche. Die Aussparung in der Ecke muss daher bei dieser Berechnung (Annäherung,

Orientierung) vernachlässigt werden. Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit wird mit $c=340\frac{m}{s}$ angenommen. Bei einer Höhe von $l_z=2,61m$ ergeben sich die in Tabelle 2.1 aufgelisteten, axialen Moden.

Richtung axial	Ordnung x,y,z				
	1	2	3	4	5
$f_{x,0,0}$ [Hz]	22,6	45,3	68,0	90,6	113,3
$f_{0,y,0}$ [Hz]	35,4	70,8	106,3	141,6	177,1
$f_{0,0,z}$ [Hz]	65,1	130,3	195,4	260,5	325,7

Tabelle 2.1: Axiale Moden n-ter Ordnung

Im Bereich von etwa 68Hz ist eine Überschneidung einiger axialer Moden aus Tabelle 2.1 markiert. Zusätzlich tritt ebenso eine tangentielle Mode $f_{1,0,1}=69Hz$ auf (errechnet mit Gleichung 2.3). Somit entsteht in diesem Bereich eine problematische Mehrfachmode, auf die in der akustischen Bearbeitung des Raumes zu achten ist.

Die Frequenz, die als Teiler zwischen der wellentheoretischen und geometrischen Betrachtungsweise in der Akustik gilt, wird als Schröderfrequenz bezeichnet. Abhängig ist sie sowohl vom Volumen des Raums als auch von der Nachhallzeit (Gleichung 2.4). [2]

$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.4)$$

Wie bereits erwähnt, sind dies nur Näherungen im quaderförmigen Raum, die in der Realität nur als Orientierung zu betrachten sind. Die durchschnittliche Nachhallzeit über alle Oktaven beträgt nach der Messung etwa 0,8 Sekunden. Bei einem Raumvolumen von $94m^3$ und nach Einsetzen in Gleichung 2.4 ergibt sich die Schröderfrequenz $f_s = 185Hz$. Alle Moden oberhalb dieser Frequenz sind daher nicht mehr relevant in der Betrachtung.

3

Simulation des leeren Raumes

Die Simulation ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der akustischen Planung eines Raumes. Mit ihrer Hilfe kann abgeschätzt werden, wie sich der Raum verhält, wenn Materialien eingebracht werden. Sie ist jedoch nicht als absolute Wahrheit, sondern als Orientierungshilfe zu betrachten, da eine vollständige Abbildung der Realität durch eine Simulation nie erreicht werden kann.

3.1 Erstellen eines Modells in Catt-Acoustic

Zur Erstellung eines raumakustischen Konzeptes wird eine Simulation des Raumes mit der Software Catt-Acoustic durchgeführt. Grundsätzlich sind Simulationen zur Orientierung und Veranschaulichung sehr hilfreich, können aber nie völlig exakt sein. Daher sind Simulationsergebnisse immer mit Vorsicht zu genießen. Die richtige Wahl der Parameter ist bei der Simulation von großer Bedeutung und hat entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. Im Folgenden werden die Funktionen und Grenzen von Catt-Acoustic näher erläutert und erste Simulationsergebnisse diskutiert.

3.1.1 Grenzen der Simulationssoftware

Jedem Computerprogramm sind Grenzen gesetzt. Durch die ständig steigende Rechenleistung können Simulationen zwar immer komplexer werden, an den Grenzen der raumakustischen Betrachtungsweisen ändert dies jedoch nichts. Catt-Acoustic arbeitet mit dem Konzept des Raytracing, einer rein strahlenbasierten Berechnungsmethode. Effekte, die durch die Welleneigenschaften des Schalls entstehen, werden somit nicht berücksichtigt. Dazu gehören unter anderem die Beugung der Welle an Objekten im Raum, auf die in Unterabschnitt 3.1.4 näher eingegangen wird, oder modale Eigenschaften. Auch Streueffekte an Oberflächen, die in der Realität sehr komplex sind, werden in Catt-Acoustic durch mathematische Modelle ersetzt. Aus diesen Gründen sollte die Simulationssoftware eher als Diskussionspartner denn als verlässliche Wahrheit betrachtet werden. [5]

Wellentheoretische Effekte

Die offensichtliche Einschränkung von Catt-Acoustic liegt in der grundsätzlichen Betrachtungsweise der Software. Sie betrachtet Schall ausschließlich als Strahlen mit Energiegehalt. Das bedeutet, dass alle wellentheoretischen Effekte, die in der Akustik insbesondere bei tiefen Frequenzen auftreten, vernachlässigt werden. Dies hat zur Folge, dass Simulationsergebnisse unterhalb der Schröderfrequenz nur mit größter Vorsicht interpretiert werden dürfen. Die Schröderfrequenz bezeichnet die Grenzfrequenz, bis zu der Betrachtungen der geometrischen Raumakustik, d.h. des Schalls als energiehaltiger Strahl, zulässig sind. Sie ist sowohl direkt proportional zur Nachhallzeit als auch indirekt proportional zum Raumvolumen. Die gewünschte Nachhallzeit in einem Tonstudio beträgt für alle Frequenzen ca. 0,3 Sekunden, das Raumvolumen ca. 95m^3 . Daraus ergibt sich eine Schröderfrequenz von ca. 113 Hz für einen akustisch optimalen Raum.

Die Leermessungen des Raumes zeigen eine Nachhallzeit von ca. 0,8 Sekunden, gemittelt über alle Frequenzoktaven. Daraus ergibt sich bei gleichem Volumen eine Frequenz von 185 Hz. Unterhalb dieser Frequenz, in den folgenden Diagrammen konkret ab der 125 Hz Oktave, können die Simulationsergebnisse nur sehr bedingt als Orientierung verwendet werden.

Streuungseffekte

Die Streuung beschreibt die Diffusion, die beim Auftreffen des Schalls auf fast alle Materialien auftritt. Sie hängt stark von der Struktur des Materials ab, die sich je nach geometrischen Eigenschaften bei verschiedenen Frequenzen unterschiedlich verhält. Catt-Acoustic verwendet als Näherung die Lambert-Verteilung [6], ein mathematisches Modell zur Beschreibung von Reflexionen an Oberflächen. Die Streuung wird durch Kosinusfunktionen approximiert. Da es sich um ein Zufallsmodell handelt, das in jedem Simulationslauf für jede auftretende Reflexion neu berechnet wird, unterscheiden sich die Ergebnisse von Simulationslauf zu Simulationslauf. Eine arithmetische Mittelung der Ergebnisse ist möglich, führt aber zu keiner signifikanten Verbesserung der Ergebnisse. [7]

Frequenzauflösung

Die Genauigkeit der Simulation wird auch dadurch eingeschränkt, dass die Simulation in Catt-Acoustic in Oktavbändern erfolgt. Daher sind alle Ergebnisse als Mittelung über eine Oktave zu verstehen.

3.1.2 Raumkomplexität

Es ist zu erwarten, dass eine detaillierte Simulation auch zu genaueren Ergebnissen führt. In der Praxis ist dies jedoch nicht unbedingt der Fall. Tatsächlich führt eine höhere Komplexität nicht zwangsläufig zu besseren Ergebnissen. Für diese Beobachtung gibt es mehrere Gründe: Unter anderem können bei komplexen räumlichen Darstellungen tendenziell weniger Schallstrahlen von der Quelle zum Empfänger gelangen. Durch die Mittelung von weniger Schallstrahlen am Empfänger erreicht das Ergebnis eine deutlich höhere Varianz. Zum anderen können die entscheidenden Effekte, die bei komplexeren Raumverhältnissen auftreten würden, durch das rein auf geometrischer Raumakustik basierende Berechnungsverfahren nur näherungsweise realisiert werden. Insbesondere bei komplexen Raummodellen ist daher auf eine geeignete Anzahl von Schallstrahlen zu achten. Je kleiner diese gewählt wird, desto unsicherer ist die Aussagekraft der Simulation.

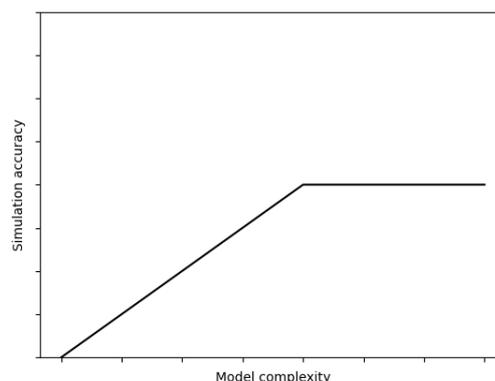


Abb. 3.1: Simulationsergebnisse abhängig von der Komplexität des Raummodells [8]

Abbildung 3.1 zeigt den schematischen Zusammenhang zwischen Modellkomplexität und Simulationsergebnissen. Es ist ersichtlich, dass ab einem bestimmten Komplexitätsgrad keine genaueren Vorhersagen durch Simulationen auf der Basis der geometrischen Akustik erzielt werden können. [8]

Ausgehend von dieser Beobachtung werden zwei Simulationsvarianten desselben Raumes untersucht, wobei die eine möglichst detailliert und die andere auf das Wesentliche reduziert ist. Die Simulationsergebnisse werden dann verglichen und interpretiert. Dieses Vorgehen soll eine geeignete Bewertung des Raumes liefern, mit deren Hilfe in Abschnitt 3.2 weitere Schritte zur Verbesserung des Modells durch die Kalibrierung mit der raumakustischen Leermessung durchgeführt werden. Des Weiteren soll untersucht werden, ob sich der Mehraufwand, der durch die exakte Modellierung entsteht, positiv auf die Simulationsergebnisse auswirkt.

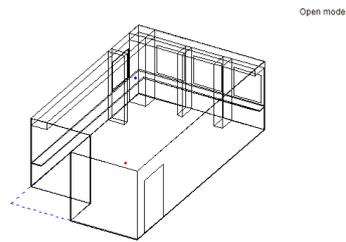


Abb. 3.2: Raummodell - exakte Darstellung

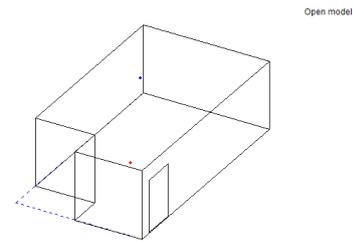


Abb. 3.3: Raummodell - geglättete Darstellung

In Abbildung 3.2 ist die exakte Raummodellierung zu sehen, Abbildung 3.3 zeigt den auf das Wesentlichste reduzierten Raum.

3.1.3 Streuungsparameter „Scattering“

Theorie

Der mathematische Ansatz von Catt-Acoustic, den Schall in Form von Strahlen darzustellen und die Schallenergie bei jeder Reflexion im Raum entsprechend anzupassen, basiert auf der Nachhallzeitberechnung nach Eyring, die auf dem Prinzip der 'Verfolgung des mittleren Strahlenschicksals' beruht. [4] Die Berechnungsmethode nach Eyring setzt allerdings ein vollkommen diffuses Schallfeld voraus. Dies entspricht in der Simulation Scattering von 100%. Mit dieser Gleichsetzung kann das Raytracing-Modell mit der theoretischen Berechnung der Nachhallzeit nach Eyring abgeglichen werden. [8]

Die Nachhallzeit nach der Sabineformel hat in der Raumakustik ebenfalls große Bedeutung. Auf den Vergleich zwischen dieser Berechnungsmethode und Raytracing wird allerdings verzichtet, da die Eyringformel aufgrund eben genannter Gründe aussagekräftiger ist. Die rein mathematischen Ansätze zur Berechnung der Nachhallzeit (Sabine, Eyring) dienen in der Simulation lediglich als Orientierungshilfe im leeren Raum und spielen für die weiteren Schritte, wie der Kalibrierung mit der Leermessung (Abschnitt 3.2), keine Rolle mehr.

Bei den folgenden Betrachtungen ist zu beachten, dass bei einer gemessenen Nachhallzeit von ca. 0,8s die Simulation unterhalb von ca. 185Hz aufgrund wellentheoretischer Effekte nicht mehr gültig ist. Zusätzlich wird immer die am Ende gewünschte Nachhallzeit von 0,3s bei allen Frequenzen als 'Reference RT' eingeblendet. Die 'Eyring RT' entspricht der berechneten Nachhallzeit nach der Eyring-Formel. [4]

Funktionsweise

Mit Scattering versucht Catt-Acoustic, Streueffekte an Oberflächen zu simulieren. Dies geschieht durch die Aufspaltung der Schallstrahlen in eine Primärreflexion und zusätzliche Streureflexionen bei jedem Kontakt mit einer Oberfläche. Jeder dieser Oberflächen wird Scattering von 0-100% zugeordnet. Abhängig von den geometrischen Eigenschaften des Materials können Schallstrahlen also in Abhängigkeit von der Frequenz nach geometrischen Regeln (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) reflektiert oder zufällig im Raum verteilt werden. [7]

Implementierung

Diese Eigenschaften werden durch die Wahl von Streukoeffizienten für alle Materialien implementiert. Für übliche Materialien wird eine Streuung von ca. 20% nach der ursprünglichen Methode empfohlen. [7]

Andere Ansätze beziehen den Streufaktor auf die geometrischen Details des Raumes. So wird z.B. die Oberflächenstruktur eines akustischen Diffusors bei detaillierter Darstellung in der Akustiksoftware mit einem Streufaktor von 0 verwendet. In einem vereinfachten Modell wird anstelle der Struktur der Streufaktor verwendet. [9]

Die folgenden Abbildungen zeigen, dass der verwendete Algorithmus bei geometrisch einfachen Darstellungen einer realen Messung im Raum ähnlich nahe kommt wie bei der komplexen Darstellung. Dies lässt den Schluss zu, dass geometrisch komplexe Strukturen auch in einer Simulation sehr gut durch Scattering ersetzt werden können und die Ungenauigkeiten zur Realität aus anderen Einschränkungen resultieren.

Alle Simulationsergebnisse stammen aus Catt-Acoustic und wurden in Matlab visualisiert. Die 'Eyring RT' wird von der Simulationssoftware aus den in Catt-Acoustic übergebenen Absorptionsgraden der Oberflächen berechnet, die 'Simulation' entspricht der Raytracing-Methode von Catt-Acoustic. Die Absorptionsgrade α der einzelnen Materialien für das exakte Simulationsmodell wurden der Literatur entnommen (Abbildung 3.4) [10].

Die Absorptionsgrade sind in Oktavbändern von 125-4000Hz angegeben. Catt-Acoustic simuliert die Ergebnisse für diese Frequenzbänder. Die Oktavbänder 8kHz und 16kHz werden von Catt-Acoustic aus dem Absorptionswert für 4kHz und in der Software vorgegebenen Werten für die Dissipation durch Luft extrapoliert.

Material	α					
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Wand (Beton)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Wand (Rigips)	0,31	0,08	0,04	0,07	0,09	0,08
Fenster	0,28	0,20	0,10	0,06	0,03	0,02
Decke (Beton)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Boden (Teppich, 6mm)	0,00	0,02	0,04	0,15	0,36	0,32
Tür (Holz)	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05

Abb. 3.4: Absorptionsgrade der Materialien, exaktes Modell [10]

Um die Absorptionsfaktoren des geglätteten Simulationsmodells zu ermitteln, werden die Absorptionsfaktoren aus Abbildung 3.4 mit dem Flächeninhalt der jeweiligen Oberfläche multipliziert. Daraus ergeben sich äquivalente Absorptionsflächen. Diese werden anschließend aufaddiert

und durch den Flächeninhalt der neuen Gesamtfläche dividiert (siehe Gleichung 3.1). Dies passiert einerseits bei der Rückwand des Raumes, in der sich drei Fenster befinden (Abbildung 3.5), andererseits bei der Seitenwand, in der sich ein Fenster befindet (Abbildung 3.6). Die anderen Flächen bleiben unverändert.

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2}{S} \quad (3.1)$$

Beispiel für die Berechnung von α für das geglättete Raummodell

$$\alpha_{RW} = \frac{\alpha_{Fenster} \cdot S_{Fenster} + \alpha_{Wand(Beton)} \cdot S_{Wand(Beton)}}{S_{RW}}$$

$$\frac{0,28 \cdot 3 \cdot 1,124m^2 + 0,01 \cdot 9,157m^2}{12,528m^2} = 0,08$$

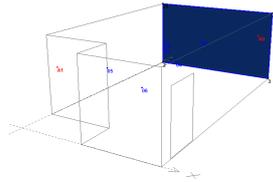


Abb. 3.5: Rückwand des Raumes, geglättetes Raummodell

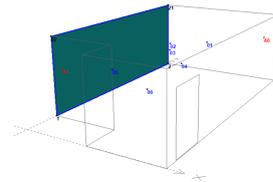


Abb. 3.6: Seitenwand des Raumes, geglättetes Raummodell

Material	α					
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Rückwand (Abbildung 3.5)	0,08	0,06	0,03	0,03	0,02	0,03
Seitenwand (Abbildung 3.6)	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
Wand (Rigips)	0,31	0,08	0,04	0,07	0,09	0,08
Decke (Beton)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Boden (Teppich, 6mm)	0,00	0,02	0,04	0,15	0,36	0,32
Tür (Holz)	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05

Abb. 3.7: Absorptionsgrade der Materialien, geglättetes Modell. Aus [10] bzw. ermittelt durch Gleichung 3.1

Die Quell- und Mikrofonpositionen wurden in der Simulation gleich wie in der Messung platziert.

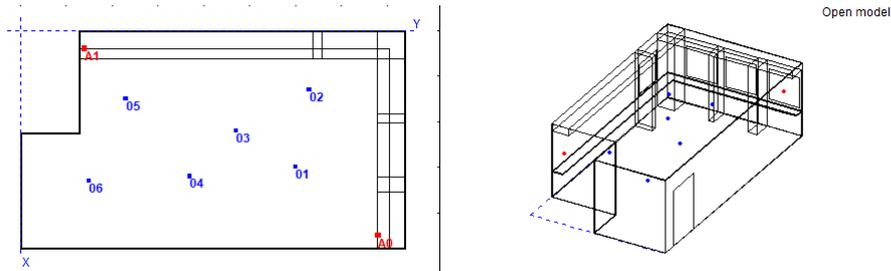


Abb. 3.8: Quell- und Mikrofonpositionen in Catt-Acoustic. Positionen wurden gleich gewählt wie in der Messung des leeren Raumes (Abbildung 2.2)

Ergebnisse

Abbildung 3.9 und Abbildung 3.10 zeigen die Ergebnisse der Nachhallzeit T_{30} im exakt nachgebauten Raummodell, Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12 im geglätteten. Dabei werden die Werte für Scattering 0% und 100% verglichen, also das minimal diffuse zum volldiffusen Schallfeld.

Zur Verdeutlichung sind im Folgenden die Simulationsergebnisse des exakten Raummodells in blau und die des geglätteten Raummodells in rot dargestellt. Die Eyring-Nachhallzeit ist in gelb dargestellt.

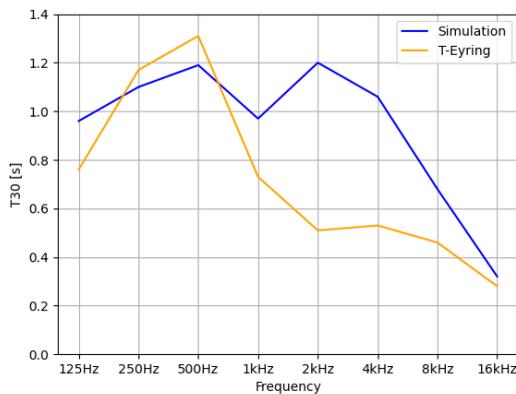


Abb. 3.9: T_{30} des exakten Raummodells mit Scattering=0%

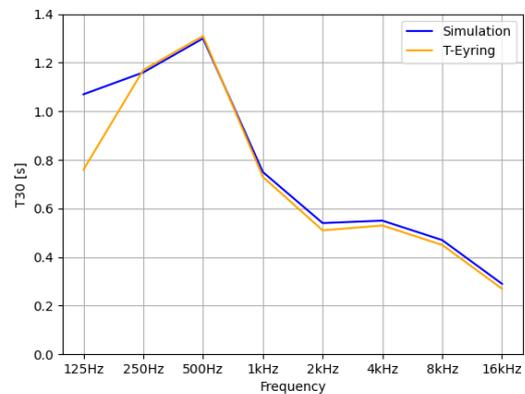


Abb. 3.10: T_{30} des exakten Raummodells mit Scattering=100%

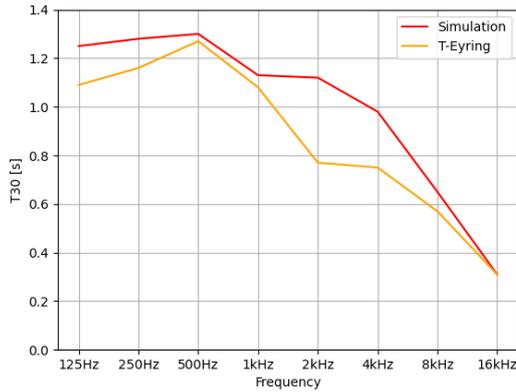


Abb. 3.11: T_{30} des geglätteten Raummodells mit $Scattering=0\%$



Abb. 3.12: T_{30} des geglätteten Raummodells mit $Scattering=100\%$

Die Funktionalität der Raytracing-Simulation kann in beiden Modellen durch den Vergleich der Nachhallzeiten mit $Scattering = 100\%$ und der theoretischen Nachhallzeit nach Eyring überprüft werden (siehe Abbildung 3.10 und Abbildung 3.12). Diese stimmen in beiden Simulationsmodellen ab der 500 Hz Oktave nahezu überein. Unterhalb dieses Frequenzbandes gibt es Abweichungen, insbesondere in der 125 Hz Oktave. In diesem Frequenzbereich ist die Simulation jedoch aufgrund wellentheoretischer Effekte nicht mehr genau.

Durch den Vergleich der beiden Extreme (0%, 100%) kann die Empfindlichkeit des Modells auf $Scattering$ untersucht werden. Bei beiden Modellen ist der Unterschied im Frequenzbereich zwischen 1 kHz und 8 kHz besonders deutlich. Beim exakten Simulationsmodell ist der Effekt jedoch stärker. Hier ergibt sich eine Abweichung von bis zu ca. 0,7s bei 2kHz zwischen der Simulation bei $Scattering = 0\%$ und 100% bzw. der Eyring-RT (Abbildung 3.9 und Abbildung 3.10). Das geglättete Modell zeigt ebenfalls die größte Abweichung bei 2kHz. Sie beträgt etwa 0,35s (Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12). Diese Beobachtung zeigt die Bedeutung des Streuparameters in der Simulation. Die beiden gewählten Werte (0% und 100%) für $Scattering$ sind jedoch nicht empfehlenswert und entsprechen nicht der Realität. Ein realistischer Kompromiss muss gefunden werden. Aufgrund empirischer Beobachtungen wird für gängige Materialien ein $Scattering$ von ca. 20% empfohlen. [9]

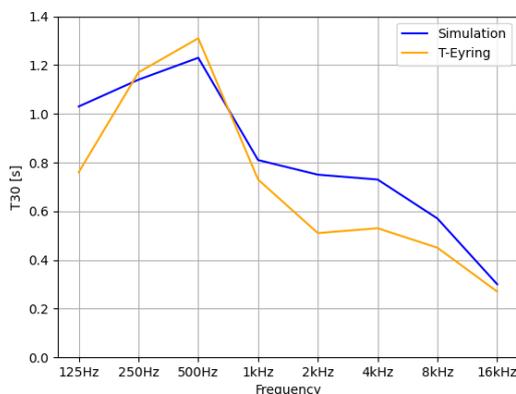


Abb. 3.13: T_{30} des exakten Raummodells mit $Scattering=20\%$



Abb. 3.14: T_{30} des geglätteten Raummodells mit $Scattering=20\%$

In Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 sind die Simulationsergebnisse beider Modelle für Scattering = 20% dargestellt. Hier zeigt das exakte Raummodell eine größere Abweichung von der Eyring-Nachhallzeit als das geglättete Modell. Der Frequenzbereich, in dem die Abweichung am größten ist, ist identisch mit dem vorhergehenden Extremenvergleich.

Betrachtet man die beiden Raummodelle (exakt und geglättet), so zeigt sich eine Differenz von T_{30} zwischen Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14. Diese beträgt bei Betrachtung der Simulationsergebnisse bis zu ca. 0,3 Sekunden bei 1 kHz. Die Validität der beiden Simulationen kann anhand der örtlichen Standardabweichung überprüft werden.

Parameter	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T_{30} , exaktes Raummodell [s]	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01
T_{30} , geglättetes Raummodell [s]	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01

Abb. 3.15: Örtliche Standardabweichung beider Simulationsmodelle bei Scattering = 20%.

In Abbildung 3.15 sind die Standardabweichungen für beide Simulationsmodelle bei Scattering = 20% angegeben. Scattering = 0%, 100% wurden nicht angegeben, da sie für den weiteren Verlauf der Arbeit nicht mehr relevant sind. Es ist zu erkennen, dass die Simulationsergebnisse bereits bei 125Hz eine geringe Standardabweichung von ca. 3,9% im exakten Modell und 4,3% im geglätteten Modell aufweisen. Dies täuscht über die Validität der Simulation im tieffrequenten Bereich hinweg, da Catt-Acoustic das modale Schallfeld, welches das Schallfeld in diesem Frequenzbereich maßgeblich beeinflusst, nicht simulieren kann. Es ist wichtig, die Schröder-Frequenz bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Auf die Bedeutung der Simulationsergebnisse wird in Abschnitt 3.2 eingegangen, wenn die Simulationen mit der Leerraummessung verglichen werden.

Diese Unterschiede zeigen sich auch in der *EDT*. Diese betrachtet die frühe Schallenergie im Raum, also die Primär- und Sekundärreflexionen und stellt die wahrgenommene Räumlichkeit dar [4]. Verglichen werden die Simulationsergebnisse mit Scattering 20% und 100%. Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17 zeigen die Ergebnisse des exakten Raummodells, Abbildung 3.18 und Abbildung 3.19 das geglättete.



Abb. 3.16: *EDT* und T_{30} des exakten Raummodells mit Scattering=20%

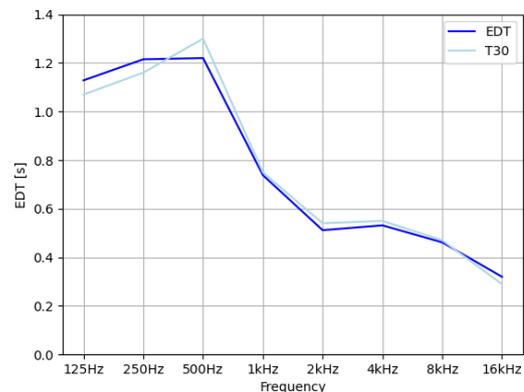


Abb. 3.17: *EDT* und T_{30} des exakten Raummodells mit Scattering=100%

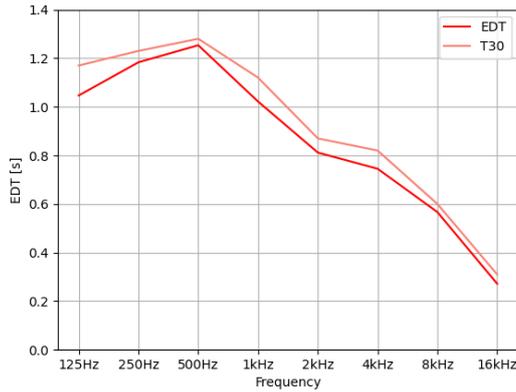


Abb. 3.18: EDT und T_{30} des geglätteten Raummodells mit $Scattering=20\%$

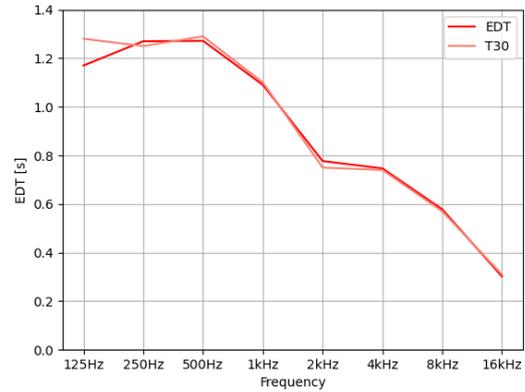


Abb. 3.19: EDT und T_{30} des geglätteten Raummodells mit $Scattering=100\%$

Das Verhalten der Simulation ist ähnlich wie bei der T_{30} . Auch hier sind die größten Abweichungen zwischen den beiden gewählten Streufaktoren (20% und 100%) zwischen 1kHz und 8kHz zu beobachten. Die Wahl von $Scattering$ für die EDT hat jedoch einen geringeren Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Insbesondere im geglätteten Modell (Abbildung 3.18 und Abbildung 3.19) hat $Scattering$ kaum Einfluss auf das Simulationsergebnis.

Um einen geeigneten Wert für $Scattering$ zu wählen, wird empfohlen, die Simulationsergebnisse mit den im Raum gemessenen Ergebnissen zu vergleichen und entsprechend anzupassen. Dabei orientiert man sich an den gemessenen Nachhallzeiten und EDT s im Raum. Dies geschieht zusätzlich zur Anpassung der Absorptionsgrade der Materialien. [8]

3.1.4 Beugungsparameter „Diffraction“

Diffraction ist die Nachahmung der Beugung von Schallwellen an Objekten im Raum. Dieser Effekt tritt bei Schallwellen bis zu einer Wellenlänge auf, die etwa der Größe des Objekts entspricht. Weil Catt-Acoustic auf Raytracing basiert und Schall lediglich als Strahl betrachtet, bedient es sich der 'Secondary Edge-Sources' Methode (SES). Sie basiert auf der DLSM Methode (Directive Line Source Model). Durch diese Wahl kann Catt-Acoustic Limitierungen aus den klassischeren geometrischen Berechnungsmethoden für Beugung umgehen. [11]

DLSM ist geeignet, geometrisch komplexere, gerichtete Schallquellen als Zusammensetzung vieler Linienquellen darzustellen. Die Abstrahlcharakteristik der Linienquellen wird durch bekannte mathematische Modelle approximiert. [11]

Funktionsweise

Die SES-Methode betrachtet Objekte, die nach der DLSM-Methode beugungsfähig sind, als eine Kombination von Kantenquellen. Sie sind als gerichtete Punktquellen zu verstehen, die auf der Kante dieses Objekts liegen. Der maximale Abstand dieser Quellen auf einer Kante beträgt etwa 3,6mm. Dementsprechend können Kanten aus tausenden dieser Punktquellen bestehen.

In Abbildung 3.20 sind eine Quelle (S) und zwei Empfänger (R1,R2) dargestellt. Die Trennlinie in der Mitte stellt eine Wand im Schallfeld dar. Sie ist endlich groß und mit dem Boden

verbunden. In diesem Beispiel wird Diffraction nur auf der Oberkante der Wand betrachtet, nicht auf den Seitenkanten. R1 wird direkt von der Quelle angestrahlt, R2 befindet sich im 'Schattenbereich' des Schallfeldes, wird also nicht direkt angestrahlt. [11]

Bei reinem Raytracing gelangt also keine Schallenergie zu R2. Wird Diffraction für die Wand aktiviert (Abbildung 3.21), so werden an der Kante eine Vielzahl von Kantenquellen platziert (in der Abbildung 'edge source', nur Oberkante). Das bedeutet, dass für die gesamte Oberkante der Wand, die von der Punktquelle S hinlaufenden Schallstrahlen (in Abbildung 3.21 zu sehen als strichlierte Strahlen zur Wand) durch die Kantenquellen an der Wand zu einem Empfänger weitergeleitet werden. Welche Richtcharakteristik diese Quellen zeigen, hängt vom Abstand und der Lage der Wand zur Quelle S sowie zum jeweiligen Empfänger ab. Am Empfänger summieren sich die Einflüsse aller Quellen auf, wodurch eine Impulsantwort entsteht. In Abbildung 3.22 ist der Aufbau von der Seite zu sehen. [11]

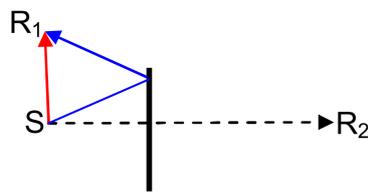


Abb. 3.20: Diffraction nicht aktiv [11], Ansicht von oben

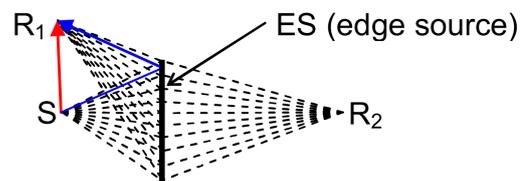


Abb. 3.21: Diffraction aktiv [11], Ansicht von oben

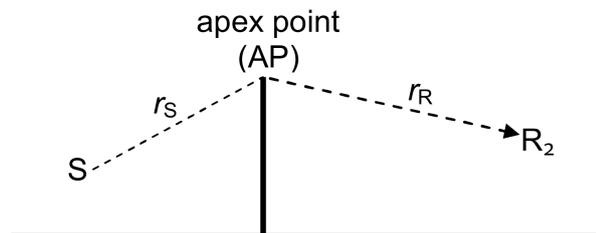


Abb. 3.22: Ansicht von der Seite [11]

Die Art der Addition hängt von der Position, d.h. dem Winkel, und dem Abstand zwischen der Wand und dem Empfänger R ab. Abbildung 3.23 zeigt den Einfluss von Diffraction in den Impulsantworten der Empfänger. $h_{R1,R2}$ sind die Impulsantworten der Empfänger R1,2. Der direkte Einfluss der Punktquelle ('direct') ist rot, die Reflexion am Objekt ('specular') blau. Die Impulsantwort der aufsummierten Kantenquellen ist in schwarz dargestellt. Es fällt auf, dass die Impulsantwort zu R1 negativ addiert ist. Durch die Richtwirkung der Kantenquellen kann es durch gedrehte Polaritäten zu negativen Aufsummierungen kommen.

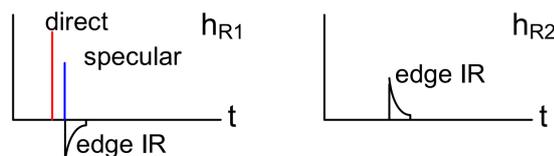


Abb. 3.23: Impulsantworten an den Empfängern R1,2 mit Diffraction [11]

Limitierungen

Auch die SES-Methode unterliegt Einschränkungen. So muss ein frequenzabhängiger Mindestabstand zwischen Empfänger bzw. Quelle und der berechneten Kantenquelle eingehalten werden (Gleichung 3.2). k bezeichnet die Wellenzahl $\frac{2\pi}{\lambda}$. r ist der Abstand zwischen Wand und der Quelle S bzw. einem Empfänger.

$$kr \gg 1 \quad (3.2)$$

Wird dieser unterschritten, sind die der DLSM-Methode zugrunde liegenden mathematischen Modelle nicht mehr zutreffend. In der Praxis wählt man $kr > 3$, um die Bedingung zu erfüllen.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Positionierung des Empfängers im Verhältnis zur Quelle und zur Wand. Im Schallfeld werden drei Bereiche unterschieden. (Abbildung 3.24)

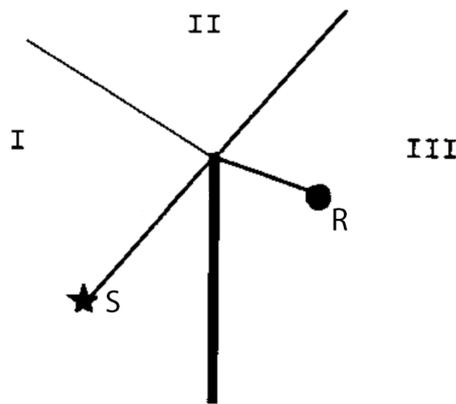


Abb. 3.24: Unterteilung der Bereiche im Schallfeld mit eingebrachter Wand [12]

Befindet sich ein Empfänger R im Bereich I, so empfängt er sowohl direkte als auch von der Wand reflektierte Schallstrahlen. Im Bereich II treten keine Reflexionen auf, so dass der Empfänger nur direkte Schallstrahlen von der Quelle S empfängt. Der Schattenbereich III ist der Bereich, der von der Quelle S nicht bestrahlt werden kann. Der Empfänger R befindet sich im Schatten der dazwischen befindlichen Wand.

Für jeden Bereich dieses Schallfeldes werden unterschiedliche mathematische Berechnungsmethoden verwendet. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass darauf geachtet werden muss, einen Empfänger eindeutig in einem der drei Bereiche zu platzieren. In den Grenzbereichen dazwischen ist die DLSM-Methode nicht anwendbar oder führt zu falschen Ergebnissen. [12]

Bedeutung

Diffraction ist besonders wichtig in geometrisch komplexen Räumen oder wenn die Empfänger den größten Teil der Schallenergie durch Reflexionen und nicht durch Direktschall erhalten. Dies ist im vorliegenden Raum nicht der Fall. Im exakten Modell (Abbildung 3.2) hat die Einführung von Beugung im Raum nur minimale Auswirkungen (Abbildung 3.25). Nur eine sehr spezifische Wahl des Empfängers, z.B. hinter einer Säule, führt zu einem anderen Ergebnis. Allerdings wurden die Empfänger in der Simulation dort platziert, wo auch die Mikrofone in der Messung stehen, um eine entsprechende Vergleichbarkeit herzustellen. Darüber hinaus ist es wichtig, die tatsächliche Nutzung des Raumes im Auge zu behalten und dementsprechend dort zu messen bzw. zu simulieren, wo später die Aufnahmen im Raum stattfinden.

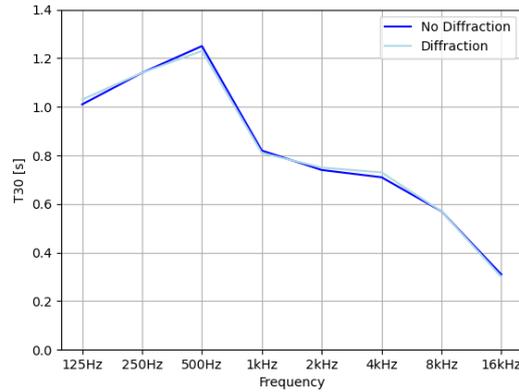


Abb. 3.25: Unterschied der T_{30} des exakten Raummodells mit und ohne Diffraction 2ter Ordnung, Scattering = 20%

Diffraction 2ter Ordnung bedeutet, dass Erst- und Zweitreflexionen noch an Oberflächen zu Diffraction führen. Zu sehen sind vernachlässigbare Unterschiede, die auf Abweichungen zwischen den Simulationsdurchgängen zurückzuführen sind.

Durch den geringen Einfluss von Diffraction in der Simulation wird der Parameter in allen folgenden Simulationsdurchgängen deaktiviert.

3.2 Kalibrierung des Raummodells durch die Leermessung

Mit Hilfe der Leerraummessung soll nun die Simulation kalibriert werden. Zur Einstellung der Ergebnisse müssen die Simulationsparameter entsprechend angepasst werden. Verglichen werden die Parameter T_{30} , EDT , C_{80} und T_s . Vorrangige Bedeutung hat allerdings der Abgleich der Nachhallzeit T_{30} .

3.2.1 Ziel der Kalibrierung

Ziel ist es, eine raumakustische Simulation des leeren Raumes zu erstellen, die der entsprechenden Messung möglichst nahe kommt. Erst wenn dieses Ziel erreicht ist, kann in der Simulation eine raumakustische Optimierung durchgeführt werden, deren Ergebnisse als verlässliche Orientierungshilfe dienen. Dafür werden im Raum sowohl Absorptionsgrade und das Scattering entsprechend angepasst.

3.2.2 Vorgehensweise

In einem ersten Schritt werden die Simulationsergebnisse der unkalibrierten Simulationen mit den aus der Messung erhaltenen Daten verglichen. Anschließend werden die aus der Literatur übernommenen Absorptionsgrade α des geglätteten Simulationsmodells (Abbildung 3.7) modifiziert, um die Simulation an die Messung anzugleichen. Für ein möglichst geglättetes Raummodell wird aufgrund empirischer Beobachtungen Scattering von 20% empfohlen. Daher werden bei konstantem Scattering zunächst die Absorptionsgrade des geglätteten Modells so angepasst, dass die Nachhallzeit T_{30} zwischen raumakustischer Messung und Simulation übereinstimmt. Die Anpassung der Absorptionsgrade erfolgt empirisch. Im Optimalfall würden die Absorptionsgrade aller Oberflächen gleichmäßig angepasst werden. Dies bedeutet aber einen großen Rechenaufwand, weshalb nur die Rückwand und Seitenwand angepasst wurden (siehe Abbildung 3.5 und

Abbildung 3.6). Diese stehen orthogonal aufeinander und decken eine große Fläche ab, was eine ausreichende Gleichmäßigkeit bereitstellt.

Die neuen Absorptionsgrade werden dann mittels Gleichung 3.1 auf das exakte Simulationsmodell umgerechnet. Dabei werden die Absorptionsgrade und Oberflächengrößen der Fenster wieder wie im ursprünglichen exakten Simulationsmodell übernommen. Das Resultat sind neue Absorptionsgrade für beide Modelle.

Anschließend wird das Scattering für das exakte Simulationsmodell so angepasst, dass die T_{30} im exakten Simulationsmodell ebenso etwa den Nachhallzeiten der Messung entspricht. Daraus resultieren zwei verschiedene Scatteringfaktoren und Scattering für die unterschiedlichen Simulationsmodelle.

3.2.3 Vergleich zwischen Simulation und Messung

Zunächst werden die Ergebnisse der Leermessung mit den beiden Simulationsmodellen (exakt und geglättet) verglichen. Die Simulationsergebnisse des exakten Modells sind wie im vorherigen Kapitel immer blau, die des geglätteten Modells rot dargestellt. Die Messung wird schwarz dargestellt. Für alle Simulationsergebnisse gilt Scattering = 20%. Der Vergleich erfolgt zwischen dem 125Hz und 8kHz Oktavband, da Catt-Acoustic die 63Hz Oktave nicht berücksichtigt. Die 8kHz Oktave wird von Catt-Acoustic approximiert. Es werden nur die Ergebnisse für T_{30} verglichen, da die Modelle nur anhand dieses Parameters verglichen werden.

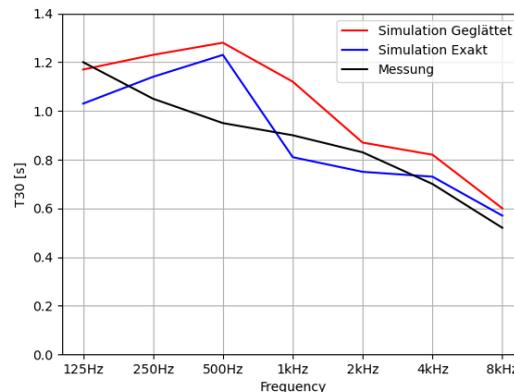


Abb. 3.26: T_{30} Vergleich der Messung und der beiden unangepassten Simulationsmodelle

Das geglättete Modell mit Scattering = 20% liegt über den Messwerten, während das exakte Simulationsmodell mit gleichem Scattering geringere Werte für die T_{30} zeigt.

Man sieht, dass z.B. im geglätteten Modell, insbesondere im Bereich von 250Hz bis 1kHz, die Absorptionsgrade in Catt-Acoustic höher zu wählen sind als in der Literatur angegeben.

3.2.4 Anpassung der Absorptionsgrade α und Scattering

In Abbildung 3.27 sind die angepassten Absorptionsgrade des geglätteten Modells aufgelistet. Die veränderten Materialien wurden mit dem Zusatz '[neu]' versehen.

Die Simulation mit den angepassten Absorptionsgraden aus Abbildung 3.27 ist in Abbildung 3.28 dargestellt. In der 125-Hz-Oktave ist eine genaue Anpassung durch Variation der Absorptionsgrade nicht möglich, da die Ergebnisse von Durchgang zu Durchgang schwanken.

Material	α					
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Rückwand (Abbildung 3.5) [neu]	0,08	0,13	0,16	0,13	0,04	0,11
Seitenwand (Abbildung 3.6)[neu]	0,03	0,09	0,17	0,12	0,04	0,11
Wand (Rigips)	0,31	0,08	0,04	0,07	0,09	0,08
Decke (Beton)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Boden (Teppich, 6mm)	0,00	0,02	0,04	0,15	0,36	0,32
Tür (Holz)	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05

Abb. 3.27: Absorptionsgrade der Materialien, geglättetes Modell, angepasst (siehe Abbildung 3.7).

Die Standardabweichung beträgt hier etwa 5,5% (siehe Abbildung 3.29). Abgeschwächt gilt dieser Effekt ebenso für die 250Hz Oktave. Bei 8kHz approximiert Catt-Acoustic nur die Absorptionsgrade und damit auch die T_{30} . Daher ist auch in dieser Oktave keine exakte Anpassung möglich.

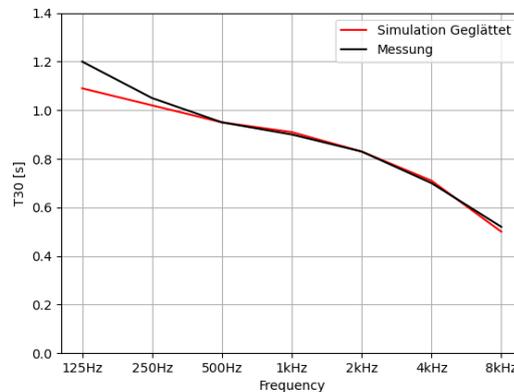


Abb. 3.28: T_{30} Vergleich zwischen angepasster Simulation (geglättetes Raummodell mit Abbildung 3.27) und Messung. Scattering = 20%

Parameter	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T_{30} , geglättetes Raummodell [neu] [s]	0,06	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01

Abb. 3.29: Örtliche Standardabweichung des angepassten, geglätteten Simulationsmodells bei Scattering = 20%.

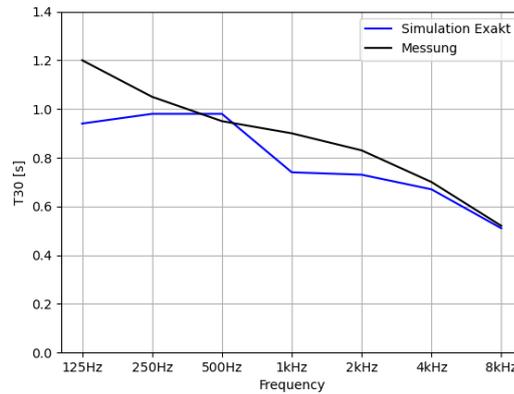
Mit der Umrechnung durch Gleichung 3.1 ergeben sich auch für das exakte Modell neue Absorptionsgrade. Diese sind in Abbildung 3.30 dargestellt. Nachdem im geglätteten Modell die beiden Außenwände (Abbildung 3.5 und Abbildung 3.6) getrennt angepasst wurden, müssen diese nun auch im exakten Modell getrennt betrachtet werden.

Die Simulationsergebnisse mit den Absorptionsgraden aus Abbildung 3.30 sind in Abbildung 3.31 dargestellt. Im Vergleich zu Abbildung 3.26 bleibt der relative Kurvenverlauf erhalten. Der Einbruch der Nachhallzeit bei 1kHz ist weiterhin signifikant, im Bassbereich ist die Simulation ebenfalls nicht zuverlässig anpassbar. Auch hier ist die 125 Hz Oktave für die Betrachtung von geringer Relevanz, da hier bereits das modale Schallfeld dominiert.

Es muss ein Mittelweg gefunden werden, um den Nachhallfrequenzgang möglichst nahe an die Messung anzunähern. Dazu wird empirisch ein neuer Scatteringfaktor bestimmt. Es zeigt sich, dass ein guter Kompromiss bei Scattering = 12% liegt.

Material	α					
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Rückwand (Beton)[neu]	0,01	0,04	0,09	0,08	0,02	0,08
Seitenwand (Beton) [neu]	0,01	0,08	0,17	0,12	0,04	0,11
Fenster	0,28	0,20	0,10	0,06	0,03	0,02
Wand (Rigips)	0,31	0,08	0,04	0,07	0,09	0,08
Decke (Beton)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Boden (Teppich, 6mm)	0,00	0,02	0,04	0,15	0,36	0,32
Tür (Holz)	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05

Abb. 3.30: Absorptionsgrade der Materialien, exaktes Modell, angepasst (siehe Abbildung 3.4).

Abb. 3.31: T_{30} Vergleich zwischen angepasster Simulation (exaktes Raummodell) und Messung. Scattering = 20%

Parameter	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
T_{30} , exaktes Raummodell [neu] [s]	0,03	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01

Abb. 3.32: Örtliche Standardabweichung des angepassten, exakten Simulationsmodells bei Scattering = 20%.

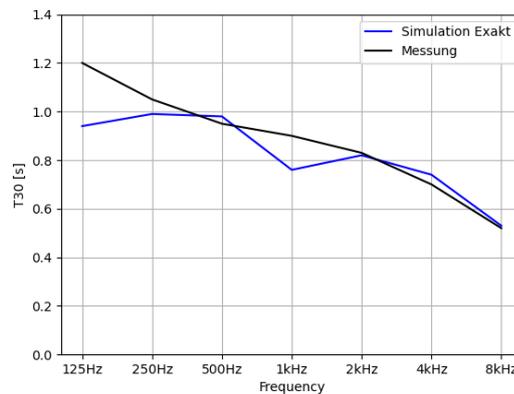
Abb. 3.33: T_{30} Vergleich zwischen angepasster Simulation (exaktes Raummodell) und Messung. Scattering = 12%

Abbildung 3.33 zeigt den T_{30} -Frequenzgang nach Anpassung mit Scattering auf 12%. Der Verlauf der Kurve ist durch die Anpassung mit Scattering nicht möglich. Man erkennt ein ähnli-

ches Verhalten wie bei Abbildung 3.9 und Abbildung 3.10. Im Bereich zwischen 1kHz und 8kHz wird die Kurve gegenüber Abbildung 3.31 aufgrund des geringeren Streufaktors angehoben. Der Kompromiss, die 1kHz-Oktave deutlich unter dem Messwert zu belassen, wurde eingegangen, um alle anderen Oktaven möglichst nahe an das Ergebnis der Leermessung heranzuführen.

3.2.5 Simulationsergebnisse nach der Anpassung

Die Kalibrierung der Simulation durch Anpassung der Absorptionsgrade α und Scattering funktioniert für beide Modelle nur in Bezug auf die Nachhallzeit des Raumes. Eine exakte Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung wird nicht angestrebt. Auch nach der Anpassung ist die Simulation nicht als Realität anzusehen. Sie dient lediglich einer eingeschränkten Orientierung. Dies zeigt sich auch bei der Auswertung der hier aufgeführten raumakustischen Gütemaße. Nach der Auswertung von T_{30} für beide Simulationsmodelle werden nun auch EDT , C_{80} und T_s betrachtet. Wiederum sind die Simulationsergebnisse für das exakte Raummodell (Scattering = 12%) in blau und für das geglättete Modell (Scattering = 20%) in rot dargestellt.

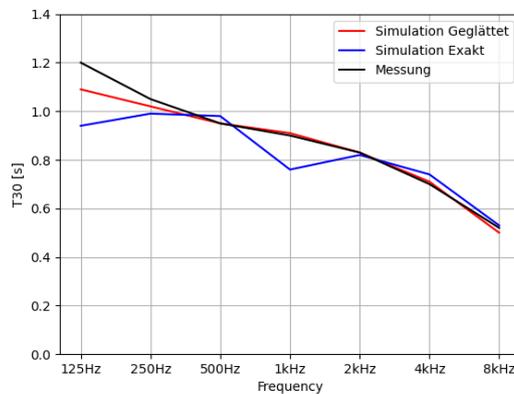


Abb. 3.34: T_{30} Vergleich zwischen angepassten Simulationen und Messung

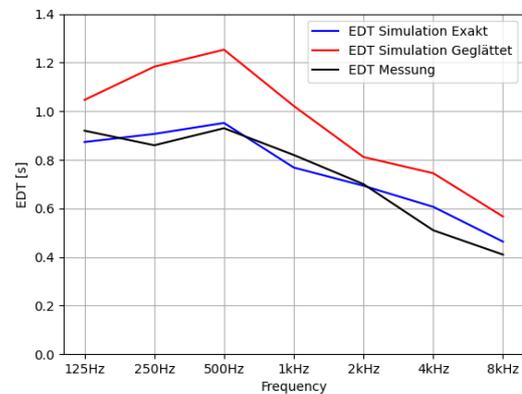


Abb. 3.35: EDT Vergleich zwischen angepassten Simulationen und Messung

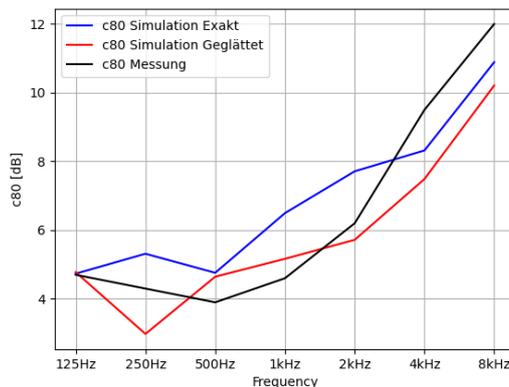


Abb. 3.36: C_{80} Vergleich zwischen angepassten Simulationen und Messung

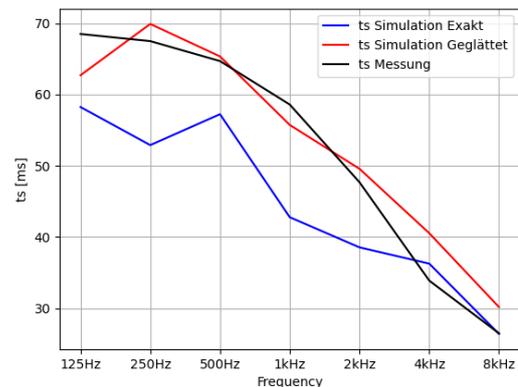


Abb. 3.37: T_s Vergleich zwischen angepassten Simulationen und Messung

Je nach Parameter sind hier mehr oder weniger genaue Ergebnisse zu erkennen. Dies verdeutlicht, dass trotz der Anpassung der T_{30} im geglätteten Simulationsmodell die Simulation nicht als verlässliche Wahrheit angesehen werden darf (siehe Abbildung 3.35, Abbildung 3.36, Abbildung 3.37).

Das exakte Simulationsmodell zeigt neben der T_{30} vor allem bei der EDT gute Übereinstimmung mit dem Ergebnis der Leermessung (Abbildung 3.35). Zwar weichen auch C_{80} und T_s von der Messung ab, jedoch sind diese Parameter im Bereich der Studioakustik von untergeordneter Bedeutung. Dies lässt den Schluss zu, dass das exakte Simulationsmodell eine geeignete Referenz zur Durchführung der raumakustischen Optimierung darstellt.

4

Simulation der akustischen Optimierung

Auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 3 wird nun ein Vorschlag für ein ausgebautes Studio ausgearbeitet.

4.1 Simulationsmodell

Aufgrund der Erkenntnisse aus dem Vergleich der beiden raumakustischen Simulationsmodelle wird im Folgenden das exakte Modell mit angepassten Absorptionsfaktoren und Scattering = 12% verwendet. Dieses Modell zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Messung im leeren Raum und stellt somit eine geeignete Referenz dar.

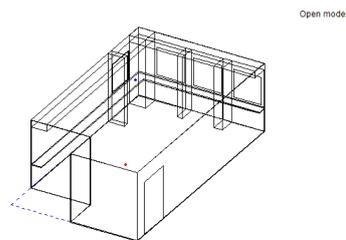


Abb. 4.1: Exaktes Simulationsmodell - vor Einbringen der Absorber

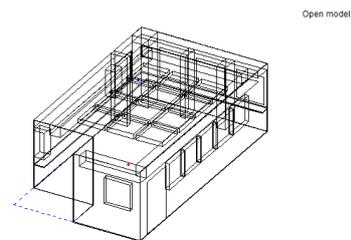


Abb. 4.2: Exaktes Simulationsmodell - nach Einbringen der Absorber

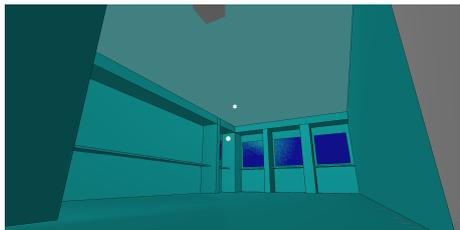


Abb. 4.3: Exaktes Simulationsmodell - vor Einbringen der Absorber. Innenansicht mit Catt-Acoustic

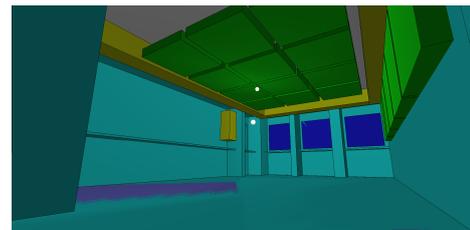


Abb. 4.4: Exaktes Simulationsmodell - nach Einbringen der Absorber. Innenansicht mit Catt-Acoustic

Zwei verschiedene Typen von porösen Absorbieren werden in das Modell eingebaut. Beide Absorbertypen bestehen aus Steinwolle. Gelb eingefärbt sind poröse Wandabsorber mit den Abmessungen $x=1\text{m}$, $y=0,4\text{m}$, $z=0,4\text{m}$ und einem Strömungswiderstand von $3k\text{Pas}/\text{m}^2$. Grün eingefärbt sind poröse Wandabsorber mit den Abmessungen $x=1\text{m}$, $y=1\text{m}$, $z=0,1\text{m}$. Ihr Strömungswiderstand beträgt $9k\text{Pas}/\text{m}^2$. [13]

Die Anordnung im Raum ist in Abbildung 4.2 und Abbildung 4.4 zu sehen. Besonderes Augenmerk wurde darauf gelegt, möglichst wenig Nutzfläche des Raumes mit Absorbieren zu belegen.

Daher ist ein Großteil des Materials an der Decke angebracht. Die Seitenwand (Abbildung 3.6) wurde freigelassen, um eventuelle weitere Bearbeitungen, die das modale Schallfeld betreffen, durchführen zu können.

Für beide Absorber wurden Absorptionsgrade aus der Literatur entnommen und an Catt-Acoustic übergeben. Es ist darauf zu achten, dass für die in gelb eingefärbten Absorber Absorptionsgrade übernommen wurden, die Flachabsorbern bei senkrechtem Schalleinfall entsprechen. Dies ist durch ihre Lage an den Kanten nur sehr bedingt verwendbar. Absorber, die an Kanten im Raum platziert wurden, verhalten sich deutlich anders als freistehend. [4]

Material	Anzahl	α					
		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Poröser Wandabsorber (grün)	18	0,40	0,78	0,93	0,95	0,99	0,99
Poröser Wandabsorber (gelb)	22	0,85	0,94	0,99	0,99	0,99	0,99

Abb. 4.5: Absorptionsgrade der Absorber [13]

4.2 Simulationsergebnisse

Die wichtigsten akustischen Eigenschaften eines Tonstudios zur Beurteilung der Akustik sind T_{30} und EDT . Für sie gibt es klare Richtwerte, in welchem Bereich sie liegen sollten, um eine für Musikaufnahmen ausreichende Qualität zu erreichen. Er liegt für beide Parameter bei etwa 0,3 Sekunden über alle Oktaven.

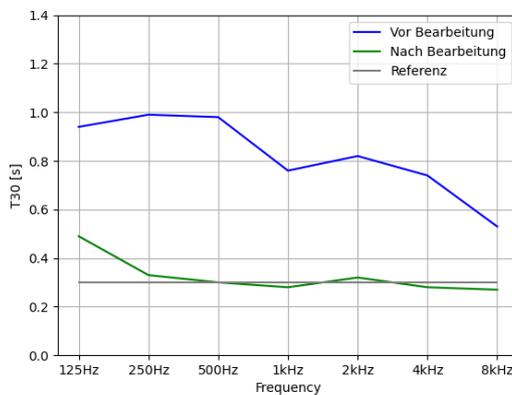


Abb. 4.6: Vergleich der T_{30} vor und nach Einbringen der Absorber

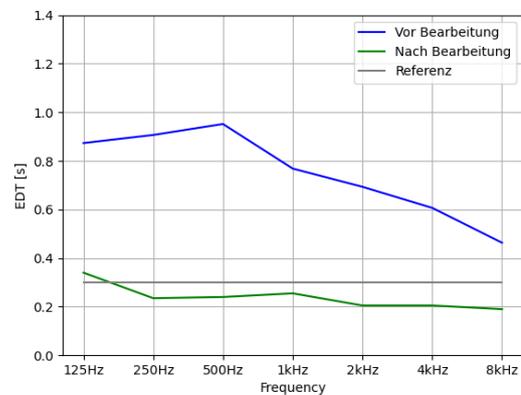


Abb. 4.7: Vergleich der EDT vor und nach Einbringen der Absorber

In Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 sind die Simulationsergebnisse vor und nach dem Einbau der Absorber im Modell dargestellt. Blau dargestellt sind die Simulationsergebnisse vor dem Einbau der Absorber, grün die Werte nach dem Einbau. Die graue Linie zeigt die Referenz-Nachhallzeit von 0,3 Sekunden. Die Simulationen wurden mit $\text{Scattering} = 12\%$ durchgeführt.

Die gewünschten Nachhallzeiten wurden durch den Einbau der Absorber erreicht. Es ist zu beachten, dass die modalen Eigenschaften des Raumes nicht berücksichtigt wurden und die Simulation die Realität nicht vollständig abbilden kann. Sie muss daher nach dem Einbau der Absorber durch eine Messung bestätigt und bei Abweichungen weiter verfeinert werden. Dies ist jedoch nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit.

5

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit war es, durch Messung und Simulation eines leeren Raumes eine geeignete Abschätzung der raumakustischen Parameter zu schaffen. Der Raum soll zukünftig als Aufnahme- und Abhörraum genutzt werden und muss daher nach dem Einbau von Absorbern die vorgegebenen Anforderungen erfüllen. Die Bewertung und Beurteilung erfolgte in mehreren Schritten.

Als erster Schritt wurde eine Raummessung nach ÖNORM EN ISO 3382-2 durchgeführt. Damit konnte eine erste Einschätzung des Raumes vorgenommen werden. Anschließend wurde untersucht, wie eine geeignete Simulation in der Software 'Catt-Acoustic' durchgeführt werden kann. Dabei wurden die Stellschrauben und Parameter in der Software untersucht und entsprechend eingestellt. Anschließend wurde das simulierte Modell mit der Messung verglichen und kalibriert.

Im letzten Kapitel wurde ein Vorschlag für die akustische Gestaltung des Studios in Catt-Acoustic vorgestellt, der den Anforderungen eines Tonstudios gerecht wird.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, dass diese Bewertung ausschließlich auf dem Prinzip der geometrischen Akustik beruht. Aus diesem Grund werden die modalen Eigenschaften des Raumes, die insbesondere im tieffrequenten Bereich eine wesentliche Rolle spielen, nicht berücksichtigt. Dies muss später bei der Einrichtung des Studios berücksichtigt werden. Es wird empfohlen, nach dem Einbau der Absorber eine erneute Messung des Raumes durchzuführen und, falls die gewünschten Ergebnisse nicht erreicht werden, die Simulation erneut mit diesen Ergebnissen zu vergleichen. Auf dieser Basis kann eine immer genauere Abschätzung vorgenommen werden. Dies wird im Rahmen des weiteren Ausbaus des Raumes erfolgen.