Hochschule der Medien

Sommersemester 2017

Studiengang Audiovisuelle Medien

Optimierung der Abhörsituation in einem Projektstudio

Bachelorarbeit

Vorgelegt von

Lennart Bloch

Matrikelnummer: 27500

Eingereicht am

02.08.2017

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Prof. Jens-Helge Hergesell

Zusammenfassung

Die Abhörsituation einer Tonregie wird im Allgemeinen durch die Eigenschaften und die Aufstellung der verwendeten Lautsprecher sowie durch die Raumakustik, bezogen auf die Abhörposition, beschrieben.
Durch die Digitalisierung der Audiotechnik und den damit verbundenen geringeren Preisen für Hard- und Software kann man heutzutage schon mit einem geringen Budget ein Projektstudio realisieren. Oft wird dabei die Raumakustik vernachlässigt. Diese ist jedoch hinsichtlich der objektiven Beurteilung des Audiomaterials von enormer Bedeutung.
Diese Arbeit beschäftigt sich damit, wie ein Raum, der nicht als Tonregie geplant wurde, ohne bauliche Maßnahmen so optimiert werden kann, dass eine objektive Beurteilung des Audiomaterials möglich ist. Anhand von Messungen werden die verschiedenen Maßnahmen zur Raumoptimierung verglichen.

Abstract

Generally, the listening conditions of a control room are described as the characteristics and the placement of the loudspeaker, as well as the room acoustics based on the mixing position.
Due to the digitization of audio technology and the associated lower prices for hardware and software, you can nowadays realize a project studio with low-budget. Often room acoustics are neglected. However, this is of enormous importance reagarding the objective assessment of audio material.
This thesis deals with options for a room, which was not planned as a control room, being optimized without structural measures in order to make an objective assessment of the audio material possible.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	6
2. Akustik	7
2.1. Physikalische Grundlagen	7
2.1.1. Das Schallfeld	7
2.1.2. Schalldruck und Schallschnelle	9
2.1.3. Schallgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge	10
2.1.4. Wellenarten	11
2.1.4.1. Die ebene Welle	11
2.1.4.2. Die Kugelwelle	12
2.1.4.3. Nah- und Fernfeld	12
2.1.5. Schalldruckpegel	13
2.1.6. Interferenz	14
2.1.7. Reflexion, Transmission, Dissipation	14
2.2. Psychoakustik	16
2.2.1. Objektive Lautstärke	16
2.2.1.1. Lautstärke und Lautheit	16
2.2.1.2. Frequenzbewerteter Schallpegel	18
2.2.1.3. Spektrale Lautheitssummation	19
2.2.1.4. Zeitbewerteter Schallpegel	20
2.2.2. Binaurales Hören	20
2.2.3. Gesetz der ersten Wellenfront	21
3. Raumakustik	22
3.1. Geometrische Raumakustik	23
3.1.1. Reflexionsgesetz	23
3.1.2. Spiegelschallquellen	25
3.1.3. Frühe Reflexionen	26
3.2. Statistische Raumakustik	27
3.2.1. Äquivalente Absorptionsfläche	27
3.2.2. Nachhallzeit T	28
3.2.3. Direktfeld, Diffusfeld, Hallradius	28
3.3. Wellentheoretische Raumakustik	30
3.3.1. Kammfilter-Effekt	30
3.3.2. Raummoden	31

3.4. Raumakustische Grenzfrequenzen 34
3.5. Raumakustische Kriterien 35
3.5.1. Nachhallzeit 36
3.5.2. Bonello-Kriterium 36
3.5.3. Initial Time Delay Gap 37
3.5.4. Betriebsschallpegelkurve 38
3.5.5. Direktsignal 38
3.6. Raumimpulsantwort und Übertragungsfunktion 39
4. Raumakustische Optimierung 42
4.1. Abhör- und Lautsprecherposition 42
4.2. Akustikmodule 44
4.2.1. Poröse Absorber 44
4.2.2. Resonanzabsorber 46
4.2.2.1. Plattenresonator 47
4.2.2.2. Helmholtzresonatoren 48
4.2.3. Diffusoren 49
4.2.3.1. Maximalfolgediffusor 50
4.2.3.2. Quadratic Residue Diffursor (QRD) 50
4.2.4. Aktive Schallabsorber 51
4.3. Digitale Raumentzerrung 52
5. Projektbeispiel: Optimierung der Abhörsituation in einem Projektstudio 53
5.1. Zielsetzung 53
5.2. Ausgangsituation 54
5.2.1. Berechnungen 54
5.2.1.1. Äquivalente Absorptionsfläche 54
5.2.1.2. Nachhallzeit 55
5.2.1.3. Raumeigenmoden 55
5.2.2. Messungen 56
5.3. Raumakustische Optimierung 59
5.3.1. Akustikmodule 60
5.3.2. Digitale Raumentzerrung 63
5.3.3. Ergebnisse 64
6. Fazit 66

1 Einleitung

Anfang der 1970er Jahre kam der erste 16-Spur-Rekorder auf den Markt. Die Geräte waren sehr kostspielig weshalb sie sich zu Beginn nur wenige große Studios leisten konnten. Mit der Digitalisierung der Tontechnik kam jedoch der bedeutende Wandel - Musik aufnehmen war und ist nicht mehr nur den großen Studios vorenthalten. Heutzutage kann inzwischen jeder, der einen Laptop und ein kleines Interface besitzt, Mehrspuraufnahmen machen - und das mit Equipment für unter 1000 €. Für ein Wochenende im Studio mit Engineer und Producer ist man vergleichsweise dieselbe Summe los. Warum also nicht selbst Musik aufnehmen und mischen?
Sogenannte Home-Studios gibt es heutzutage überall: In Wohnzimmern, Kellern, Dachböden und auch WG-Zimmer von Studenten. Das Problem ist, dass diese Räume in ihrer normalen Alltagsfunktion nicht dafür geeignet sind, Aufnahmen objektiv beurteilen zu können. Im Gegensatz dazu kann eine Tonregie diese Bedingung jedoch erfüllen. Sie ist von Grund auf nur darauf ausgelegt, eine unverfälschte Wiedergabe des Tonsignals zu ermöglichen.

Die nachträgliche Optimierung der Abhörsituation in einem Alltagsraum ist dennoch möglich. Diese Arbeit liefert im zweiten Kapitel die physikalischen und psychoakustischen Grundlagen, die für das Verständnis der Raumakustik notwendig sind. Im dritten Kapitel werden verschiedene Modelle zur Schallfeldbeschreibung sowie raumakustischen Kriterien beschrieben. Darüber hinaus werden im darauffolgenden Kapitel verschiedene Möglichkeiten zur Raumoptimierung erläutert. Um die Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen zu untersuchen, wird die Optimierung eines akustisch unbehandelten Raumes vorgenommen. Die Ergebnisse werden im fünften Kapitel dargestellt.

2 Akustik

„Der Begriff Schall bezeichnet hörbare mechanische Schwingungen, Wellen und Felder eines elastischen Mediums. Die Akustik ist die Wissenschaft, die sich mit diesen Phänomenen befasst, aber nicht nur auf den Bereich des Hörbaren beschränkt ist.“[1]

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Das Schallfeld

Schall kann als die mechanische Schwingung eines elastischen Mediums beschrieben werden. Durch eine äußere Kraft in Schwingung versetzte Moleküle pendeln, nach der Krafteinwirkung, aufgrund ihrer Elastizitäts- und Trägheitskräfte periodisch um ihre ursprüngliche Ruhelage.[2] Das heißt, im Schallfeld findet keine Bewegung des Mediums statt, sondern nur eine Schwingung der lokalen Materieteilchen um ihre Ruhelage. Die konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit, mit der sich eine Schwingung ausbreitet, hängt von den Eigenschaften des Mediums ab.[3] Für diese Arbeit und die Raumakustik allgemein ist fast ausschließlich die Ausbreitung von Schallwellen in der Luft, also Luftschall, von Bedeutung. Schallwellen können sich aber auch in festen Körpern wie Holz oder Metall ausbreiten, dann spricht man von Körperschall.[4]

In der Luft, welche als unendlich ausgedehntes gasförmiges Medium betrachtet werden kann, pflanzt sich eine örtlich begrenzte und zeitlich veränderliche Störung des Gleichgewichts in Längswellen fort.[5] Die longitudinalen Kompressionswellen erzeugen entlang der Ausbreitungsrichtung der Schwingung kleine Druckschwankungen um den atmosphärischen Ruhewert.[6] Das menschliche Ohr kann diese Druckschwankungen als Schall wahrnehmen.[7]

---

[1] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, De Gruyter Saur, Berlin, Boston 2014, S. 1
[2] I. VEIT, *Technische Akustik*, Vogel, Würzburg 2005, S. 25
[3] S. WEINZIERL, *Grundlagen*, in S. WEINZIERL (Hg.), *Handbuch der Audiotechnik*, Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 19
[4] C. NOCKE, *Raumakustik im Alltag: Hören - Planen - Verstehen.*, Fraunhofer IRB Verlag, 2017, S. 13
[5] G. R. SINAMBARI – S. SENTPALI, *Ingenieurakustik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden 2014, S. 5
[6] S. WEINZIERL, *Grundlagen*, S. 19
[7] G. R. SINAMBARI – S. SENTPALI, *Ingenieurakustik*, S. 5

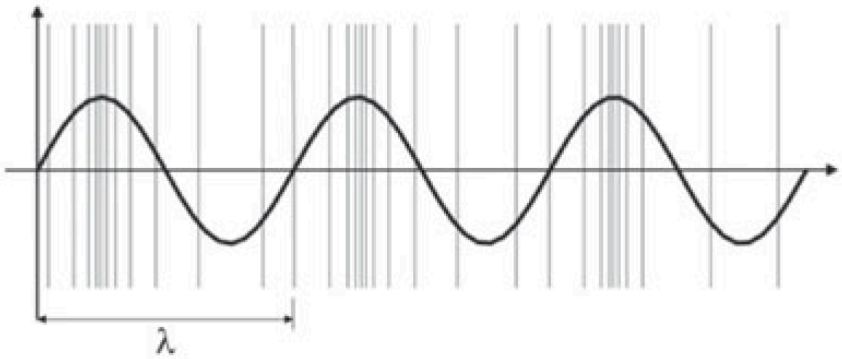


Abb. 1: Darstellung einer Longitudinalwelle mit Druckdifferenzen des Mediums

Diese Schallwellen liegen im Hörbereich, wenn sie eine Frequenz zwischen $16\ Hz$ und $16\ kHz$ haben. In diesem Bereich spricht man von Hörschall. Frequenzen unter $16\ Hz$ fallen in den Bereich des Infraschalls. Frequenzen zwischen $16\ kHz$ und $10^9\ Hz$ gehören zum Ultraschall und alles über $10^9\ Hz$ ist Hyperschall. Hörbarer Schall wird im eigentlichen Sinn Schall genannt.[8] Mit Hilfe von Schallquellen oder Schallsendern lässt sich Schall erzeugen. Wird ein fester Körper in Schwingung versetzt, strahlt er den primär entstandenen Körperschall in die Luft ab.[9] Wird beispielsweise ein Luftmolekül durch eine Lautsprechermembran angeregt, so löst dieses Molekül eine Kettenreaktion aus, bei der benachbarte Luftmoleküle durch elastische Stöße in Schwingung versetzt werden. Am Ende dieser Übertragungskette steht unser Trommelfell, welches die mechanischen Impulse in Nervenimpulse umwandelt und somit eine Hörempfindung hervorruft.[10] Als Schallfeld bezeichnet man die Gesamtheit der von einer Quelle abgestrahlten Wellen.[11]

[8] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 1
[9] I. VEIT, *Technische Akustik*, S. 25
[10] S. WEINZIERL, *Grundlagen*, S. 18
[11] T. GÖRNE, *Tontechnik*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2011, S. 11

2.1.2 Schalldruck und Schallschnelle

Die durch den Schall ausgelösten Schwankungen der Zustandsgrößen von Druck p und die Geschwindigkeit der Materieteilchen $\vec{v}$ des Mediums sind gegenüber ihren Ruhewerten p_0 und v_o meistens sehr klein. Die Abweichung von p zu p_0 ist der Schalldruck und die Abweichung von $\vec{v}$ zu v_0 die Schallschnelle.[12]

Den durch eine Schallschwingung ausgelösten Druckunterschied zum atmosphärischen Gleichdruck nennt man Schalldruck. Er verändert sich periodisch mit der Frequenz der Schwingung und wird in der Einheit Pascal $[Pa]$ angegeben.[13] Der Schalldruck wird, wenn nicht anders angegeben, immer als Effektivwert des Wechselschalldrucks bezeichnet.[14] Der Effektivwert, der sich über den quadratischen Mittelwert des Schwingungsverlaufs berechnet, ist im Englischen unter der Bezeichnung RMS bekannt.[15] Der bei $1000\,Hz$ geringste wahrzunehmende Schalldruckwert liegt bei $2 * 10^{-5}\,Pa$. Der Schalldruck, der als Schmerzgrenze gilt, liegt bei $1{,}5 * 10^{2}\,Pa$.[16]

Die Schallschnelle $\vec{v}$ ist, im Gegensatz zum Schalldruck, vom Menschen nicht wahrnehmbar.[17] Sie beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich die Luftteilchen nach einem Schallereignis um ihre eigene Ruhelage bewegen.[18] Mit nur $0{,}25\ \frac{mm}{s}$ bewegen sich Luftteilchen bei einem Schalldruck von $0{,}1\ Pa$ in der Luft. Die Schallschnelle wird ebenfalls als Effektivwert angegeben, ist jedoch keine ungerichtete skalare Feldgröße wie der Schalldruck, sondern eine vektorielle Größe, die neben einem Zahlenwert auch noch durch eine Richtungsangabe definiert wird.[19]

In einem Schallfeld mit ebenen Wellen sind Schalldruck und Schallschnelle proportional zueinander. Dieser mathematische Zusammenhang wird mit Hilfe der Formel zur Schallkennimpedanz der Luft Z_0 hergestellt. Das bedeutet, dass eine Abschwächung der nicht hörbaren Schallschnelle zu der gleichen Abschwächung des hörbaren Schalldrucks führt. Wichtig ist diese Proportionalität in Bezug auf poröse Absorber (4.2.1), da diese die Schallschnelle verringern.

---

[12] R. LERCH – G. SESSLER – D. WOLF, *Technische Akustik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2009, S. 7
[13] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 13
[14] S. WEINZIERL, *Grundlagen*, S. 20
[15] A. FRIESECKE, *Studio Akustik: Konzepte für besseren Klang*, PPV Medien, Bergkirchen 2012, S. 13
[16] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 13
[17] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 13
[18] S. WEINZIERL, *Grundlagen*, S. 21
[19] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 13

2.1.3 Schallgeschwindigkeit, Frequenz und Wellenlänge

Die Geschwindigkeit, mit der sich Schallwellen in einem Medium ausbreiten, nennt man Schallausbreitungsgeschwindigkeit oder Schallgeschwindigkeit c. Mit welcher Geschwindigkeit sich der Schall fortpflanzt, ist in erster Linie abhängig von dem Medium. In der Luft breitet er sich mit ca. $343\ \frac{m}{s}$ aus.[20] Dort ändert sich die Schallgeschwindigkeit außerdem noch in Abhängigkeit zur Temperatur. Beträgt sie bei $10\ °C$ noch etwa $338\ \frac{m}{s}$, so bewegt sich Schall bei $30\ °C$ schon mit einer Geschwindigkeit von ca. $350\ \frac{m}{s}$. Man kann also davon ausgehen, dass die Schallgeschwindigkeit pro $1°C$ um $0{,}6\ \frac{m}{s}$ zunimmt.[21] Die temperaturabhängige Änderung der Schallgeschwindigkeit kann in Bezug auf die Raumakustik vernachlässigt werden. Es sei denn, es sollen sehr große Räume mit den entsprechend großen Volumina berechnet werden.[22]

Zu einem bestimmten Zeitpunkt treten bei der Ausbreitung einer Schallwelle in einem Medium immer wieder dieselben Schwingungszustände, also beispielsweise der größte Schalldruck oder die größte Schallschnelle mit dem gleichen Abstand in Ausbreitungsrichtung auf. Diesen Abstand nennt man Wellenlänge λ. Aus dem zeitlichen Abstand zweier gleicher Schwingungszustände lässt sich zudem die Dauer einer Schwingungsbewegung bestimmen: Die sogenannte Periodendauer T.[23] Die Frequenz f bezeichnet die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde. Die physikalische Einheit der Frequenz ist Hertz.

Der für die Raumakustik wichtige Zusammenhang zwischen der Frequenz f in $[Hz]$, der Wellenlänge λ in $[m]$ und der Schallgeschwindigkeit c in $\left[\frac{m}{s}\right]$ kann mit der Formel (1) dargestellt werden.[24]

$$c = \lambda * f \qquad (1)$$

[20] C. Nocke, *Raumakustik im Alltag*, S. 18
[21] M. Dickreiter – V. Dittel – W. Hoeg – M. Wöhr, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 10
[22] C. Nocke, *Raumakustik im Alltag*, S. 18
[23] M. Dickreiter – V. Dittel – W. Hoeg – M. Wöhr, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 10
[24] C. Nocke, *Raumakustik im Alltag*, S. 21

Da sich der Schall mit einer festen Geschwindigkeit durch ein Medium bewegt, ergibt sich ein immer kürzerer Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten mit gleichen Schwingungszuständen, je höher die Frequenz der Schwingung ist.[25]
Die Wellenlängen des hörbaren Schalls von $16\ Hz$ bis $16000\ Hz$ entsprechen also Schallwellenlängen von $21\ m$ bis $2{,}1\ cm$.[26]

2.1.4 Wellenarten

Bei Punktschallquellen breiten sich die Schallwellen in der Luft geradlinig in alle Richtungen aus. Das heißt, die Punkte mit gleicher Phase liegen alle im gleichen Abstand auf einer konzentrischen Kugelfläche um die Schallquelle. Man spricht hier von einer Kugelwelle. Je weiter sich dieser Abstand vergrößert, desto mehr nähern sich die gekrümmten Flächenelemente an ebene Flächenelemente an. Daraus resultiert: Kugelwellen nehmen mit zunehmender Entfernung die akustischen Eigenschaften von ebenen Wellen an.[27]

2.1.4.1 Die ebene Welle

Eine ebene Welle ist eine eindimensionale Welle, das heißt der Schall breitet sich mit parallelen Wellenfronten aus.[28] In ihrem Schallfeld sind Schalldruck und Schallschnelle in Phase.[29] Ihre Schallintensität ist theoretisch in jeder Entfernung gleich, da sie sich aus dem Produkt von Schnelle und Druck berechnet.[30] Viele Berechnungen in der Akustik gehen der Einfachheit wegen von ebenen Wellen aus. Man kann davon ausgehen, dass sich eine Kugelwelle ab einer Entfernung von $\frac{\lambda}{3}$ zu 90% an eine ebene Welle angenähert hat. Bei einer durchschnittlichen Studio-Abhöre entspricht das bei der tiefsten Frequenz einem Abstand von $2 - 3\ m$.[31]

---

[25] S. WEINZIERL, *Grundlagen*, S. 23
[26] S. WEINZIERL, *Grundlagen*, S. 24
[27] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 12 f.
[28] C. NOCKE, *Raumakustik im Alltag*, S. 15
[29] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 11
[30] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 31, 35
[31] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 15

2.1.4.2 Die Kugelwelle

Anders als bei ebenen Wellen verteilt sich die Schallenergie bei Kugelwellen mit zunehmendem Abstand auf immer größere konzentrische Kugelflächen um die Schallquelle. Das Abstandsgesetz besagt, dass der Schalldruck aufgrund seiner quadratischen Proportionalität zur Schallintensität, bei einer Abstandsverdopplung auf seinen halben Wert sinkt.[32]

Da es sich bei der Feldimpedanz der Kugelwelle, im Gegensatz zur Feldimpedanz der ebenen Welle, um eine komplexe Größe handelt, fallen die Orte des maximalen Schalldrucks nicht mit den Orten der maximalen Teilchengeschwindigkeit zusammen.[33] Das heißt in Abhängigkeit von der Frequenz und dem Abstand zur Schallquelle sind Druck und Schnelle bei Kugelwellen gegeneinander in der Phase versetzt.[34]

Erst wenn sich in größerer Entfernung die Feldimpedanz der Kugelwelle der Feldimpedanz der ebenen Welle angeglichen hat, kann der phasenverschobene Teil der Schallschnelle vernachlässigt werden. Diesen Bereich nennt man Fernfeld.[35]

2.1.4.3 Nah- und Fernfeld

Nah- und Fernfeld sind sogenannte quellenbezogenen Feldbeschreibungen. Das bedeutet, sie beschreiben ausschließlich das Verhalten von Schallwellen die von Schallquellen ausgehen. Im Gegensatz dazu gibt es noch raumbezogenen Feldbeschreibungen, wie Direktfeld und Diffusfeld (Kapitel 3.2.1), welche in Abhängigkeit des Raum berechnet werden müssen. Das Fernfeld bezeichnet den Normalfall der Schallausbreitung, auf dessen Grundlage alle bisher beschriebenen Gesetzmäßigkeiten der Schallausbreitung beruhen. Im Gegensatz dazu sind im Nahfeld Schalldruck und Schallschnelle nicht proportional und nicht in Phase. Über die Wellenlänge lässt sich grob abschätzen, wie weit ausgedehnt das Nahfeld ist: Ist die Wellenlänge größer als die Entfernung des Hörers zur Schallquelle, befindet er sich im Nahfeld. Ist die Wellenlänge kleiner, so befindet er sich im Fernfeld.[36]

---

[32] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 36
[33] S. WEINZIERL, *Grundlagen*, S. 35
[34] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 13
[35] S. WEINZIERL, *Grundlagen*, S. 35
[36] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 37 ff.

2.1.5 Schalldruckpegel

Gustav Theodor Fechner beobachtete, dass Menschen keine absoluten Sinnesreize, sondern Reizverhältnisse, wie zum Beispiel die Reizverdoppelung oder –halbierung, als konstant empfinden. Das nach ihm benannte Fechner'sche Gesetz besagt, dass durch die Logarithmierung des Verhältnisses zweier Reize die Sinneswahrnehmung des Menschen näherungsweise nachgebildet werden kann.[37]

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, umfasst das menschlichen Gehör Schalldrücke im Bereich von $2 * 10^{-5}\ Pa$ bis $1{,}5 * 10^{2}\ Pa$. Um dieses sehr große physikalische Intervall, welches ca. 7 Zehnerpotenzen überdeckt, wahrnehmbar zu machen, nutzt das Ohr das Gesetz der relativen Empfindungsänderung.[38] Durch die Einführung einer logarithmierten Größe zur Kennzeichnung von Schalldrücken erreicht man einerseits eine übersichtlichere Handhabung der großen Unterschiede im Schalldruck und andererseits ein Pegelmaß, welches dem menschlichen Lautstärkeempfinden besser entspricht.[39]

Im Allgemeinen ist der Pegel L dimensionslos und wird in Dezibel $[dB]$ angegeben. Er kann entweder als der 10-fache Logarithmus des Verhältnisses zweier Leistungsgrößen (Leistung und Intensität) oder als der 20-fache Logarithmus des Verhältnisses zweier Feldgrößen (Druck und Schnelle), sofern deren Quadrate der Leistung proportional sind, definiert sein.[40]

In der Akustik wird häufig mit dem absoluten Schalldruckpegel L_P (kurz: Schallpegel) gearbeitet:

$$L_P = 20 * \log \frac{p}{p_0} \qquad (2)$$

Er entspricht dem 20-fach logarithmiertem Verhältnisses des Schalldrucks zu dem definierten Bezugsschalldruck p_0, welcher in etwa der menschlichen Hörschwelle entspricht.[41] $0\ dB$ entsprechen somit einem gerade noch wahrnehmbaren Schallereignis. Durch den Vorfaktor 20 entspricht $1\ dB$ der Unterschiedsschwelle zweier Drücke. Man empfindet also zwei Schalle, die sich um $1\ dB$ unterscheiden, als gerade so unterschiedlich laut.[42]

---

[37] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 32
[38] M. MÖSER, *Wahrnehmung von Schall*, in *Technische Akustik*, Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 6
[39] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 15
[40] G. R. SINAMBARI – S. SENTPALI, *Ingenieurakustik*, S. 70
[41] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 15
[42] M. MÖSER, *Technische Akustik*, S. 7

2.1.6 Interferenz

Der Begriff Interferenz stammt von dem französischen Physiker **A. J. Fresnel**. Er fand heraus, dass sich mit Hilfe der Phasenlage erklären lässt, warum zwei Wellen sich gegenseitig auslöschen oder verstärken können.

Damit es zu einer konstruktiven Interferenz kommt, müssen zwei Wellen die gleiche Phasenlage haben. Die resultierende Welle hat dann eine Amplitude, die im Vergleich zur Amplitude der Ursprungswelle doppelt so groß ist. Bei der destruktiven Interferenz sind die Wellen in ihrer Phase um $180°$ zueinander gedreht. Daraus resultiert im Idealfall eine vollständige Auslöschung der Wellen.[43]

Der Kammfilter-Effekt (Kapitel 3.3.2) und Raummoden (Kapitel 3.3.1) sind Interferenzerscheinungen und spielen in der Raumakustik eine wichtige Rolle. Interferenzen können jedoch, wie in Kapitel 4.2.4 „Aktive Schallabsorber“ beschrieben, auch zur Raumoptimierung genutzt werden.

2.1.7 Reflexion, Transmission, Dissipation

Schall wird, wenn sein Ausbreitungsmedium begrenzt ist oder es sich sprunghaft ändert, reflektiert. Jedoch wird nicht die gesamte Schallenergie zurückgeworfen (Reflexion). Ein Teil der Energie wird in der Grenzfläche in Wärme umgewandelt (Dissipation) und ein weiterer Teil tritt durch sie hindurch (Transmission). Als Absorption bezeichnet man in der Raumakustik die nicht reflektierte Schallenergie, also die Summe der Energie aus Transmission und Dissipation. Wie viel Energie durch die Grenzfläche absorbiert wird, hängt von der Art des Baustoffes ab und wird mit dem Schallabsorptionsgrad α kennzeichnet.[44]

Bei der Reflexion von Schallwellen müssen zwei Fälle unterschieden werden: die schallharte und die schallweiche Reflexion. In der Raumakustik betrachtet man größtenteils die schallharte Reflexion. Sie entsteht, wenn eine Schallwelle auf eine Wand trifft, das Ausbreitungsmedium also begrenzt ist. Jede schallharte Reflexion erzeugt an der Wand einen sogenannten Druckstau. Dabei verdoppelt sich auf der Wand

[43] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 47.f

[44] W. AHNERT – H.-P. TENNHARDT, *Raumakustik*, in S. WEINZIERL (Hg.), *Handbuch der Audiotechnik*, Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 185.f

der Schalldruck der Schallwelle aufgrund der phasengleichen Überlagerung von hin- und rücklaufender Welle. Es entsteht eine stehende Welle. Dadurch steigt der Schallpegel vor einer Wand um $+6\ dB$, in einer Raumkante $+12\ dB$ und in einem Raumwinkel um $+18\ dB$. Bei kleinen Wellenlängen verschwindet die stehende Welle aufgrund der Divergenz der Schallwelle. Bei großen Wellenlängen hingegen können sich stehende Wellen im gesamten Raum ausbilden (Kapitel 3.3.1).[45]

Im Abstand einer viertel Wellenlänge vor der Wand haben die hin- und rücklaufenden Wellen eine Wegdifferenz, die einer halben Wellenlänge entspricht, also eine Phasendifferenz von 180°. An diesem Ort kommt es daher aufgrund von Auslöschung zu einem Schalldruckminimum. Die Schallschnelle ist auf der Wand null, da die Luftmoleküle in ihrer Ausbreitungsrichtung durch die Wand begrenzt sind. Dabei erfährt die Schallschnelle eine Phasenverschiebung um 180°. Das führt zu einer Umkehr der Verhältnisse von Schalldruck und Schallschnelle. Im Gegensatz zur ebenen Welle sind sie nun um $90°$ in der Phase verschoben, was dazu führt, dass im Schalldruckmaximum ein Schnelleminimum und im Schalldruckminimum ein Schnellemaximum herrscht.[46]

[45] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 43–46
[46] P. MAIER, *Studioakustik*, in S. WEINZIERL (Hg.), *Handbuch der Audiotechnik*, Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 283.f

2.2 Psychoakustik

Die Wahrnehmung von akustischen Reizen wird in der wissenschaftlichen Disziplin der Psychoakustik untersucht. Sie kann aufgrund ihres interdisziplinären Charakters jedoch vielen Wissenschaften, je nach Schwerpunkt, zugeordnet werden. Für diese Arbeit von Bedeutung sind jedoch nur die für die Audiotechnik relevanten Hörphänomene.[47]

2.2.1 Objektive Lautstärke

Um einen Vergleich der Lautstärke verschiedener Schallereignisse zu ermöglichen, wurden objektive Messverfahren entwickelt. Im Optimalfall sollten die Ergebnisse mit der subjektiven Lautstärkewahrnehmung übereinstimmen.[48] Dafür müssen die Faktoren Schalldruckpegel, Frequenz, Bandbreite und Dauer des Schallereignisses berücksichtigt werden.[49]

2.2.1.1 Lautstärke und Lautheit

Ein Schallereignis, das einen konstanten Pegel hat, wird bei unterschiedlichen Frequenzen als nicht gleich laut empfunden. Um das subjektive frequenzabhängige Schallempfinden zu berücksichtigen und damit eine Möglichkeit zur objektiven Bewertung der Lautstärke eines schmalbandigen Schallereignisses zu erreichen, wurde eine psychologische Kenngröße eingeführt: Der Lautstärkepegel L_S mit der Einheit $phon$.[50] Mit Hilfe der Kurven gleicher Lautstärke lassen sich für alle Frequenzen zwischen $20\,Hz$ und $20\,kHz$, die als gleich laut wahrgenommen werden, die Schalldruckpegel ablesen. Die Skalen für den Schalldruckpegel $[dB]$ und den Lautstärkepegel $[phon]$ stimmen bei $1000\,Hz$ überein.[51]

---

[47] W. ELLERMEIER – J. HELLBRÜCK, *Hören – Psychoakustik – Audiologie*, in S. WEINZIERL (Hg.), *Handbuch der Audiotechnik*, Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 52
[48] G. R. SINAMBARI – S. SENTPALI, *Ingenieurakustik*, S. 193
[49] C. MASCHKE – H. FASTL, *Schallwirkungen beim Menschen*, in G. MÜLLER – M. MÖSER (Hgg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik*, Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 6
[50] R. LERCH – G. SESSLER – D. WOLF, *Technische Akustik*, S. 194
[51] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 120

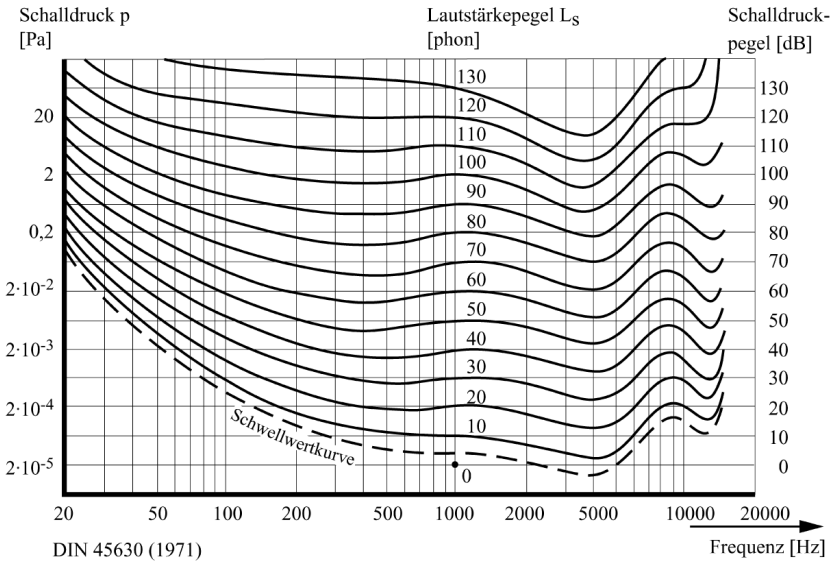


Abb. 2: Kurven gleicher Lautstärke

Um breitbandige Geräusche zu vergleichen, wird auf die Lautheit S mit der Einheit $sone$ zurückgegriffen.[52] Sie legt die Lautheit eines $1\,kHz$-Tons mit $40\,dB$ auf der Lautheitsskala mit dem Wert $1\,sone$ fest. Weiter definiert sie die Verdoppelung einer Lautstärke oberhalb von 40 $phon$ mit einer Erhöhung des Schallpegels um $10\,dB$. Folglich ist die Lautheit eines $1\,kHz$-Tons mit $50\,dB$ gleich $2\,sone$, usw.[53] Jedoch ist diese Theorie von **S. S. Stevens** der doppelten Lautheit durch eine Pegeldifferenz von $+10\,dB$ umstritten. **R. Warren** kommt nach Untersuchungen mit mehr als 3000 Versuchspersonen zu dem Schluss, dass bereits eine Pegeldifferenz von $+6\,dB$, also einer Schalldruckverdoppelung, zu einer subjektiven Verdoppelung der Lautheit führt. Der Psychologe **J. Neuhoff** wiederum geht davon aus, dass die empfundene Lautheit mit der Richtung der Pegeländerung zusammenhängt: Bei gleicher Pegeldifferenz wird eine Lautheitsänderung von leise nach laut als stärker wahrgenommen, als eine Lautheitsänderung von laut nach leise.[54]

[52] *Ebd.*, S. 121
[53] W. ELLERMEIER – J. HELLBRÜCK, *Hören – Psychoakustik – Audiologie*, S. 59
[54] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 122,123

2.2.1.2 Frequenzbewerteter Schallpegel

Das Gehör nimmt Schalldrücke in Abhängigkeit ihrer Frequenz unterschiedlich wahr. Deshalb wurden für Schallpegelmessungen sogenannte bewertete Schallpegel eingeführt. Je nachdem, wie laut das zu messende Signal ist, wird ein entsprechender Filter ($A/B/C/D/Z$) der Messung zugrunde gelegt. Der $dB(A)$-Wert wird mit Hilfe des für kleine Pegel genormten A-Filters gemessen.[55] Seine Filterkurve stellt ungefähr die Umkehrung der Kurve gleicher Lautstärke mit einem Pegelwert von $30\ dB$ bei $1\ kHz$ dar.[56] Die B- und C-Filter entsprechen in etwa den inversen 80 und $100\ phon$ Kurven, werden in der Praxis aber kaum benutzt.[57] Ähnlich verhält es sich mit dem D-Filter, welcher früher für die Bewertung von Fluglärm benutzt wurde. Nach wie vor aktuell ist jedoch der Z-Filter, welcher eine lineare Filterkurve hat und somit für keine Bewertung steht.[58]

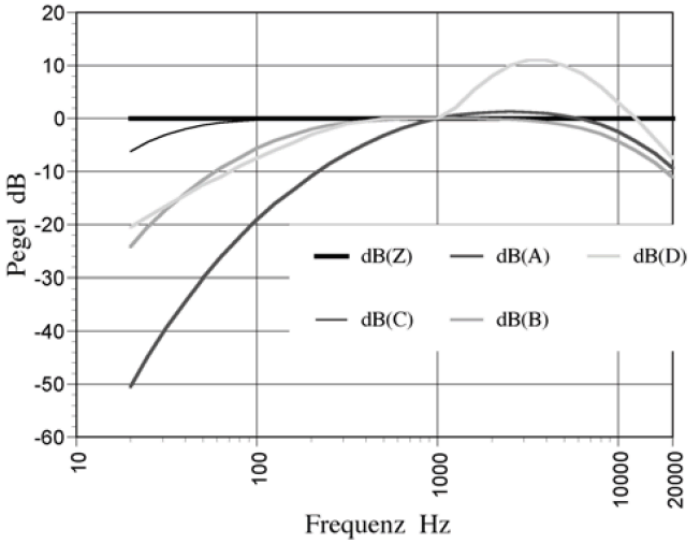


Abb. 3: Frequenzbewertete Schalldruckpegel

[55] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 15
[56] M. MÖSER, *Wahrnehmung von Schall*, S. 11
[57] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 34
[58] M. MÖSER (Hg.), *Messtechnik der Akustik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2010, S. 57

2.2.1.3 Spektrale Lautheitssummation

Da es sowohl bei frequenzbewerteten Pegeln als auch bei Lautstärkepegeln in $phon$ zu erheblichen Abweichungen von der subjektiv wahrgenommenen Lautstärke kommt, muss diese noch von weiteren Faktoren abhängen. Ein Faktor ist die Bandbreite des Schallereignisses.[59] Denn Schallereignisse, deren Schallanteile innerhalb eines bestimmten Frequenzintervalls liegen, verhalten sich in der Lautheit anders als Schallereignisse, deren Schallanteile in unterschiedlichen Frequenzintervallen liegen.[60] Nach einem Vorschlag von **E. Zwicker** wird, um eine genauere objektive Lautstärkemessung zu ermöglichen, dafür der Bereich des Hörschalls in 24 Frequenzintervalle aufgeteilt, die sogenannten Frequenzgruppen.[61] Diese haben für Frequenzen unterhalb von $500\,Hz$ eine absolute Bandbreite von ungefähr $100\,Hz$. Oberhalb von $500\,Hz$ haben sie eine relativ konstante Bandbreite, die in etwa der Breite einer großen Terz entspricht.[62]

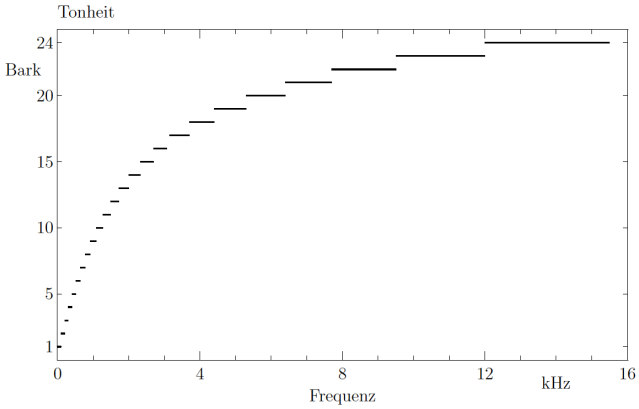


Abb. 4: Zusammenhang zwischen Tonheit und Frequenz

Man kann davon ausgehen, dass sich bei Schallereignissen innerhalb einer Frequenzgruppe die Schallintensitäten verdoppeln. Wohingegen sich bei Schallereignissen, die über die Frequenzgruppengrenzen reichen, die Lautheiten addieren.[63] Bei gleicher Lautheit kann ein Sinuston so um mehr als $15\,dB$ mehr Schallpegel aufweisen als ein Rosa Rauschen.[64]

---

[59] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 123
[60] M. MÖSER (Hg.), *Messtechnik der Akustik*, S. 603.f
[61] R. LERCH – G. SESSLER – D. WOLF, *Technische Akustik*, S. 198
[62] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 123
[63] W. ELLERMEIER – J. HELLBRÜCK, *Hören – Psychoakustik – Audiologie*, S. 61
[64] C. MASCHKE – H. FASTL, *Schallwirkungen beim Menschen*, in G. MÜLLER – M. MÖSER (Hgg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik*, Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 7

2.2.1.4 Zeitbewerteter Schallpegel

Für die Bestimmung der Kurven gleicher Lautstärke wurden Signale genutzt, die eine relativ lange Dauer haben. Jedoch spielt die Dauer der Schalleinwirkung eine große Rolle in Bezug auf die empfundene Lautstärke. In dem Bereich bis $200\ ms$ gilt: Eine Erhöhung der Schalldauer um den Faktor 10 bewirkt eine Lautstärkezunahme entsprechend einer Pegelerhöhung um $10\ dB$. Bei Schallereignissen, die länger dauern als $200\ ms$, bleibt die Lautheit konstant.[65]

2.2.2 Binaurales Hören

Binaurales Hören ermöglicht die Ortung von Schallquellen durch Pegel- und Laufzeitdifferenzen der beiden Ohrsignale. Dabei kann bereits eine Abweichung von der Mittelebene des Kopfes um $3°$ wahrgenommen werden.[66] Beim Richtungshören in der Horizontalebene kommen zwei Prinzipien zur Geltung: Die Ortung durch Pegeldifferenzen und die Ortung durch Laufzeitdifferenzen. Für Frequenzen unterhalb von $500\ Hz$ wird die Schallquelle mit Hilfe der Laufzeitdifferenz der beiden Ohrsignale berechnet, da sich Schallwellen aufgrund der kleinen Größe des Kopfes im Vergleich zur Wellenlänge um den Kopf beugen und es nur minimale Pegeldifferenzen gibt. Über $500\ Hz$ gibt es Abschattungseffekte, und der Pegelunterschied zwischen beiden Ohrsignalen kann bei $10\ kHz$ auf bis zu $30\ dB$ ansteigen.[67] Es wird angenommen, dass reine Töne unter $100\ Hz$ kaum noch ortbar sind.[68]

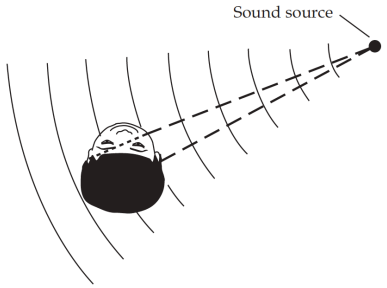


Abb. 5 Binaurales Hören – Everest, S.59

[65] W. ELLERMEIER – J. HELLBRÜCK, *Hören – Psychoakustik – Audiologie*, S. 60.f
[66] R. LERCH – G. SESSLER – D. WOLF, *Technische Akustik*, S. 206
[67] C. RÖMER, *Schall und Raum : eine kleine Einführung in die Welt der Akustik*, VDE-Verl., Berlin; Offenbach 1994, S. 41
[68] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 127

Befinden sich Schallquellen auf der vertikalen Medianebene, so kommt an beiden Ohren dasselbe Signal an. Um dennoch eine Ortung von oben oder hinten zu ermöglichen, lernt der Mensch die durch die besondere Form der Ohrmuscheln erzeugte frequenzabhängige Abschattung je nach Erhebungswinkel zu interpretieren und ihr eine Richtung zuzuordnen. Diese Klangfarbenunterschiede werden ebenfalls für die Entfernungsbestimmung von Schallquellen genutzt. Denn hohe Frequenzen werden in der Luft stärker bedämpft als tiefe. Zusätzlich dazu beinhalten Geräusche weiter entfernter Schallquellen häufig einen größeren räumlichen Schallanteil.[69]

2.2.3 Gesetz der ersten Wellenfront

Obwohl in einem geschlossenen Raum der Hörer von einer Vielzahl von Schallreflexionen getroffen wird, ist eine Ortung der Schallquelle möglich. Das Gesetz der ersten Wellenfront (engl. precedence effect) von **L. Cremer** besagt, dass eine Schallquelle stets aus der Richtung geortet wird, aus der die erste Wellenfront den Kopf erreicht.

Wird einer Versuchsperson über zwei Lautsprecher ein kohärentes Schallsignal präsentiert, dann wird es als Phantomschallquelle in der Mitte der Lautsprecher geortet. Haben die Signale eine Laufzeitdifferenz τ, die innerhalb der interauralen Grenzen liegt ($\tau \leq 0{,}6\ ms$), wird das Signal als seitlich verschoben wahrgenommen. Bei sehr großen Verzögerungszeiten wird das zweite Signal als Echo wahrgenommen. Die Grenze der Echoschwelle ist abhängig vom relativen Pegel des zweiten Signals, von der Signalform und von der Akustik des Raumes, in dem gehört wird. Wird die Verzögerung des zweiten Signals relativ klein gewählt, kann dieses um bis zu $10\ dB$ angehoben werden, ohne dass ein Echo hörbar wird (Haas-Effekt).[70]

[69] C. RÖMER, *Schall und Raum*, S. 42
[70] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 128

3 Raumakustik

L. Cremer etablierte mit seinem zweibändigen Werk *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik* die Aufteilung der Raumakustik in drei Gebiete: die statistische, die geometrische und die wellentheoretische Raumakustik. Jedes Gebiet nutzt eine andere Vorstellung des Schalls, um damit verschiedene Phänomene der Raumakustik zu beschreiben.[71]

Das jüngste Gebiet, die wellentheoretische Raumakustik, beschreibt Schall mit Hilfe des Wellenmodells. Theoretisch ließe sich damit eine vollständige Beschreibung des Wellenfeldes über den gesamten Frequenzbereich erreichen. Jedoch ist die Berechnung komplexerer Räume so aufwändig, dass es sich nur für einfache Fälle umsetzen lässt. Für die raumakustische Planung kommt das Wellenmodell daher nur im Bereich tiefer Frequenzen, wie zum Beispiel der Berechnung von stehenden Wellen, zum Einsatz.

Einfache und praxisnahe Gesetze liefert die statistische Raumakustik. Das diffuse Schallfeld, das eine gleichmäßige Energieverteilung des Schalls im Raum voraussetzt, ist die Grundlage für die Berechnung der Nachhallzeit und des Hallradius.

Die geometrische Raumakustik beschreibt Schall als einen Strahl, der wie das Licht in der geometrischen Optik betrachtet werden kann. Damit lassen sich Phänomene wie Echobildung und Schallbrennpunkte erklären. Außerdem lässt sich mit ihrer Hilfe das für den Raumeindruck wichtige Muster der frühen Reflexionen vorhersagen.[72]

Jedoch stößt dieses Modell an seine Grenzen, sobald die Wellenlänge im Verhältnis zu den Raum- und Hindernisabmessungen groß ist. Effekte wie Schallbeugung und Schallstreuung können damit nicht beschrieben werden, und es muss auf das komplexere Wellenmodel zurückgegriffen werden.[73]

Es macht aus raumakustischer und physikalischer Sicht also Sinn, das Verhalten verschiedener Frequenzen im Raum im Verhältnis der Wellenlänge zur Raumgröße zu betrachten.[74]

---

[71] L. CREMER – H. A. MÜLLER, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd.1, Geometrische Raumakustik, Statistische Raumakustik, Psychologische Raumakustik*, Hirzel, Stuttgart 1978, S. 13
[72] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 77
[73] L. CREMER – H. A. MÜLLER, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd.1*, S. 13
[74] C. Nocke, Raumakustik im Alltag, S. 49

3.1 Geometrische Raumakustik

Sind die Schallwellenlängen klein gegen die Dimension der Ausbreitungshindernisse, so lässt sich die Schallausbreitung in Räumen anhand des Modells der Schallstrahlen, die Normale der Wellenfront einer ebenen Welle in Ausbreitungsrichtung, beschreiben. Diese Darstellung der Schallausbreitung ist die Geometrische Akustik.[75]

3.1.1 Reflexionsgesetz

Trifft ein Schallstrahl auf eine Wand, dann folgt der Schall bei der Reflexion denselben Regeln wie das Licht: Einfallswinkel ist gleich Reflexionswinkel ($\theta_i = \theta_r$). Der reflektierte Schallstrahl verhält sich wie der Schallstrahl einer imaginären Schallquelle, die sich im selben Abstand hinter der Wand wie die eigentlich Schallquelle vor der Wand befindet.[76] Das ist für die raumakustische Gestaltung von großer Bedeutung, da es durch die Ausrichtung der reflektierenden Fläche möglich ist, Schall in eine bestimmte Richtung zu lenken.

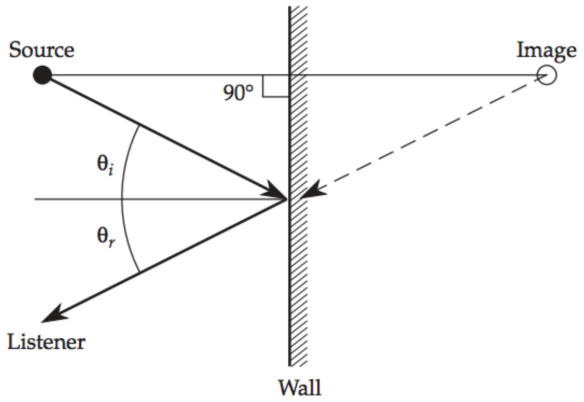


Abb. 6: Reflexionsgesetz

[75] R. LERCH – G. SESSLER – D. WOLF, *Technische Akustik*, S. 55
[76] F. A. EVEREST, *The master handbook of acoustics*, McGraw-Hill, New York, 2015, S. 97

An rechtwinkligen Ecken wird der Schallstrahl zwei Mal reflektiert und kehrt dann parallel zum einfallenden Schall zurück.[77]

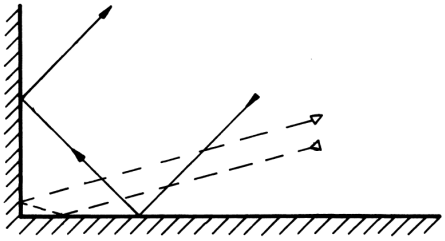


Abb. 7: Reflexion an einer rechtwinkligen Ecke

Bei strukturierten Begrenzungsflächen kann man, je nach Verhältnis der Linearabmessung b zur Schallwellenlänge λ, drei Arten der Reflexion unterscheiden[78]:

Abb. 8: 1. Die geometrische Reflexion, für $b < \lambda$:

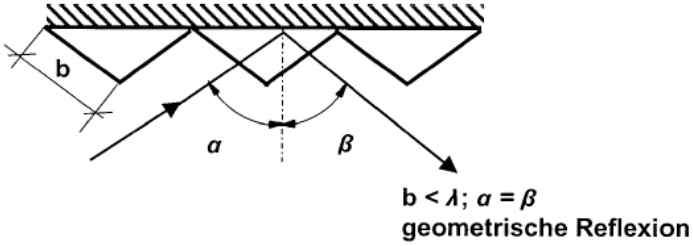


Abb. 9: 2. Die gerichtete Reflexion, für $b > \lambda$:

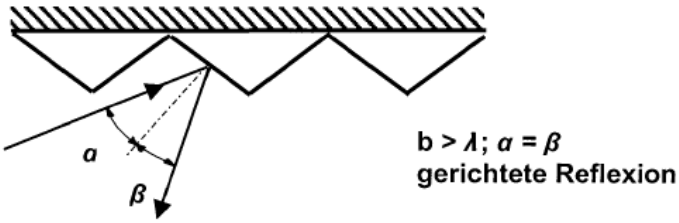
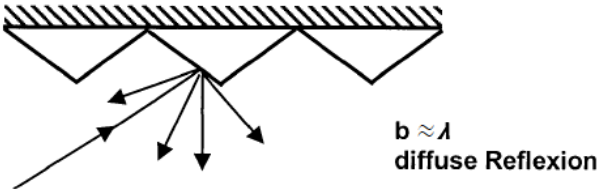


Abb. 10: 3. Die diffuse Reflexion, für $b \approx \lambda$



[77] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 18
[78] W. AHNERT – H.-P. TENNHARDT, *Raumakustik*, S. 227

3.1.2 Spiegelschallquellen

Trifft ein Schallstrahl auf zwei Wände, dann gibt es mehrfache Reflexionen. Das heißt, jede imaginäre Schallquelle 1. Ordnung (I_L) erzeugt hinter der zweiten, weiter entfernten, Wand eine weitere imaginäre Schallquelle 2. Ordnung (I_{LR}), und so weiter. Vernachlässigt man nun die Wände, kann für jede imaginäre Schallquelle die Zeitdifferenz berechnet werden, mit der der Schall, aufgrund seines zurückgelegten Weges, an der Hörposition ankommt. Ein reflektierter Schallstrahl, der nach der Echoschwelle auftritt, wird wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, als Echo wahrgenommen.[79]

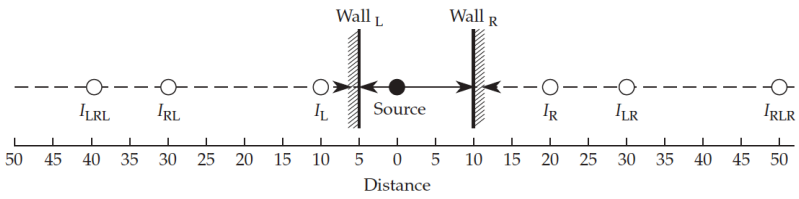


Abb. 11: Spiegelschallquellen

Zwischen parallelen Wänden tritt bei einem impulsartigen Schallereignis ein sogenanntes Flatterecho auf. Je nachdem, wie groß der Abstand zwischen den reflektierenden Wänden ist, nimmt der Hörer das Echo unterschiedlich war. Bei Wandabständen über $8\,m$ nimmt man die einzelnen Echos war, bei kleineren Wandabständen ein Klangecho, das eine vom Wandabstand und der Hörposition abhängige Tonhöhe hat.[80]

Das Schallfeld eines idealen Rechteckraums lässt sich mit Hilfe des Spiegelquellenmodells berechnen. Dabei werden sowohl Wände als auch Decke und Boden durch ein dreidimensionales Netz aus Spiegelquellen ersetzt und eine Kugelschale mit einem bestimmten Radius um die Ursprungsquelle gelegt. Alle imaginären Schallquellen, die sich nun innerhalb der Kugelschale befinden, tragen zum Schallfeld im Raum bei. Der Radius entspricht der Strecke, die der Schall in der zu betrachtenden Zeit zurücklegt. Bei komplexeren Räumen und längerer Betrachtungsdauer wird das Spiegelquellenmodell jedoch schnell sehr komplex.[81]

---

[79] F. A. EVEREST, *The master handbook of acoustics*, S. 97
[80] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 19
[81] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 88

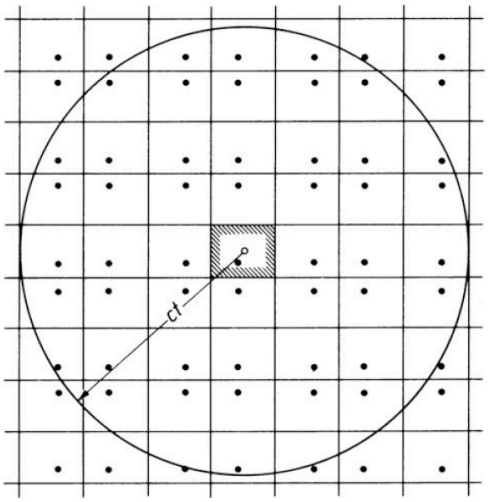


Abb. 12: Spiegelschallquellen eines Rechteckraumes

3.1.3 Frühe Reflexionen

Der Klangeindruck eines Raumes wird zu einem großen Teil durch die ersten Reflexionen, die nach dem Direktschall beim Hörer eintreffen, beeinflusst. Diese frühen Reflexionen (engl. early reflections) von Boden, Decke und Wänden tragen zur Wahrnehmung der Raumgröße, des Raumeindrucks und des Raumklanges bei. Je länger der zeitliche Abstand zwischen Direktschall und der ersten Reflexion, desto größer scheint der Raum. Diffuse frühe Reflexionen lassen den Raum neutral klingen, wohingegen scharfe spiegelnde Reflexionen zu einem charakteristischen Raumklang führen. Durch die Betrachtung der Oberflächenmaterialien kann eine erste Einschätzung über das Reflexionsmuster gemacht werden. So wird Schall an harten glatten Flächen spiegelnd und an strukturierten Flächen diffus reflektiert. Außerdem verändern absorbierende Oberflächen den Frequenzgang der Reflexion. Höhenabsorber reflektieren ein dumpfes, volles und Tiefenabsorber ein helles, dünnes Signal.[82]

[82] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 88.f

3.2 Statistische Raumakustik

Die statistische Raumakustik beruht auf den Arbeiten von **W. C. Sabine**, der Ende des 19. Jahrhunderts den Zusammenhang zwischen Raumvolumen, äquivalenter Absorptionsfläche und Nachhallzeit erforschte.

3.2.1 Äquivalente Absorptionsfläche

Unter der vereinfachten Annahme, dass alle Energie, die nicht reflektiert wird, absorbiert wird, errechnet sich der Absorptionsgrad α durch das Verhältnis von reflektierter Energie E_R in Joule $[J]$ zu auftreffender Energie E_0 in $[J]$.

$$\alpha = 1 - \frac{E_R}{E_0} \tag{3}$$

Der Absorptionsgrad ist 1, wenn die Schallenergie zu $100\,\%$ geschluckt wird und 0, wenn die gesamte Energie reflektiert wird.

Das Absorptionsvermögen A einer bestimmten Fläche, auch die äquivalente Absorptionsfläche genannt, ist das Produkt aus dem Absorptionsgrad α und der Fläche S. Um die Nachhallzeit für einen Raum mit unterschiedlichen Absorptionsvermögen zu berechnen, wird jede Teilfläche S_i mit dem jeweiligen Absorptionsgrad α_i multipliziert und anschließend addiert.[83]

$$A = \sum_i S_i \alpha_i \tag{4}$$

[83] *Ebd.*, S. 82.ff

3.2.2 Nachhallzeit T

Die Nachhallzeit T oder T_{60} ist die älteste raumakustische Größe und beschreibt die Zeit, die nach dem Beenden eines Schallereignisses vergeht, bis der Schalldruck auf ein Tausendstel sinkt, also der Pegel um $60\,dB$ abgefallen ist.[84] Mit Hilfe der empirisch gefundenen Sabineschen Nachhallformel lässt sich T berechnen.[85]

$$T = 0{,}163 * \frac{V}{A} \tag{5}$$

Der amerikanische Physiker **C. F. Eyring** untermauerte **Sabines** Formel theoretisch. Sie beinhaltet zusätzliche Faktoren wie die Raumtemperatur und die Luftdämpfungskonstante, die bei der Betrachtung kleiner Räume jedoch vernachlässigt werden können.[86]

Oft lässt es ein zu lauter Störgeräuschpegel nicht zu, die Dynamik von $60\,dB$ zu erreichen. Aus dem Abklingverlauf zwischen $-5\,dB$ und $-35\,dB$ unter dem Anfangspegel kann jedoch die Steigung entnommen werden und daraus auf die Zeit für Pegelabfall um $60\,dB$ extrapoliert werden. Diese extrapolierte Zeit nennt sich Nachhallzeit T_{30}.[87]

3.2.3 Direktfeld, Diffusfeld, Hallradius

Eine Schallquelle strahlt in einem Raum annähernd strahlenförmig aus und erzeugt, je nach Raumgröße, innerhalb einer Sekunde mehrere Tausend Reflexionen. Das Schallfeld des direkt abgestrahlten Schalls nennt man freies Schallfeld oder Direktfeld. Laut dem Abstandsgesetz (Kapitel 2.1.4.2) sinkt der Direktschallpegel bei einer Abstandsverdoppelung auf seinen halben Wert. Das diffuse Schallfeld oder Diffusfeld dagegen hat einen annähernd konstanten, ortsunabhängigen Schalldruckpegel. Der Hallradius r_H begrenzt das Gebiet um die Schallquelle, in der der Direktschall

[84] W. AHNERT – H.-P. TENNHARDT, *Raumakustik*, S. 188
[85] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 36
[86] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 83.ff
[87] H. V. FUCHS, *Raum-Akustik und Lärm-Minderung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2017, S. 175

dominiert.[88] Die Pegeldifferenz von Direkt- und Diffusschall ist der sogenannte Hallabstand. Er beträgt im Abstand des Hallradius $0\ dB$.[89] Mit Hilfe der äquivalenten Schallabsorptionsfläche A lässt sich der Hallradius r_H berechnen:[90]

$$r_H = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \approx 0{,}141\sqrt{A} \qquad (6)$$

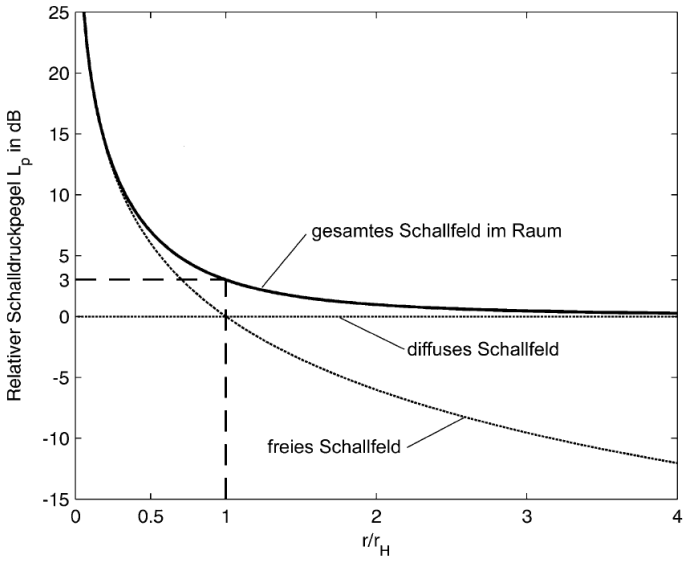


Abb. 13: Schalldruckpegel im Raum in Abhängigkeit von der Entfernung r zur Schallquelle

In der statistischen Raumakustik wird ausschließlich das Diffusfeld einer Schallquelle im Raum betrachtet, da hier sowohl die örtlichen Schallpegel als auch die Ausbreitungsrichtungen statistisch verteilt sind und man von einer räumlich konstanten Energiedichte ausgehen kann. Dabei spielt die Form des Raumes keine Rolle. Lediglich das Raumvolumen und die Wandflächen mit einem bestimmten Absorptionsgrad α werden für die Voraussagen über die Nachhallzeit benötigt.[91]

[88] W. AHNERT – H.-P. TENNHARDT, *Raumakustik*, S. 182
[89] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 40,42
[90] W. AHNERT – H.-P. TENNHARDT, *Raumakustik*, S. 183
[91] R. LERCH – G. SESSLER – D. WOLF, *Technische Akustik*, S. 226

3.3 Wellentheoretische Raumakustik

Akustische Phänomene können mit Hilfe der Wellentheorie erklärt werden, wenn die betrachteten Wellenlängen groß gegen die geometrischen Dimensionen des Raumes sind oder das Phänomen im Abstand weniger Wellenlängen zu einer Begrenzungsfläche auftritt. Die in diesem Zusammenhang wichtigsten akustischen Phänomene sind der Kammfiltereffekt und die Ausbildung stehender Wellen im Raum.[92]

3.3.1 Kammfilter-Effekt

Wie in Kapitel 2.1.7 beschrieben, kann es bei der Überlagerung von Schallwellen in Abhängigkeit der Phasenlage zu konstruktiven und destruktiven Interferenzen kommen. Diese Interferenzen sind die Grundlage für den Kammfilter-Effekt. Er tritt auf, wenn sich an einem bestimmten Ort im Raum zwei ähnliche Schallwellen mit einer Wegdifferenz d überlagern. Die Phasenlage der beiden Wellen ist frequenzabhängig. Daraus resultiert eine Auslöschung der Frequenzen, die um $180°$ phasenverschoben sind und ein Einbruch in der Übertragungsfunktion.
Die Frequenz des ersten Einbruchs kann mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit c_0 und der Wegdifferenz d berechnet werden.

$$f = \frac{c_0}{2*d} \tag{7}$$

Wird die Frequenz verdoppelt, entspricht die Wegdifferenz d der Wellenlänge, und die beiden Wellen haben dieselbe Phasenlage. Es kommt zu einer konstruktiven Interferenz bei der Frequenz $2f$.
Für höhere Frequenzen gilt: Bei allen ungeradzahligen Vielfachen kommt es zu weiteren Auslöschungen und bei allen geradzahligen Vielfachen zu Überhöhungen. Die daraus resultierende charakteristische Form der Übertragungsfunktion wird Kammfilter genannt.

[92] P. MAIER, *Studioakustik*, in S. WEINZIERL (Hg.), *Handbuch der Audiotechnik*, Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 282

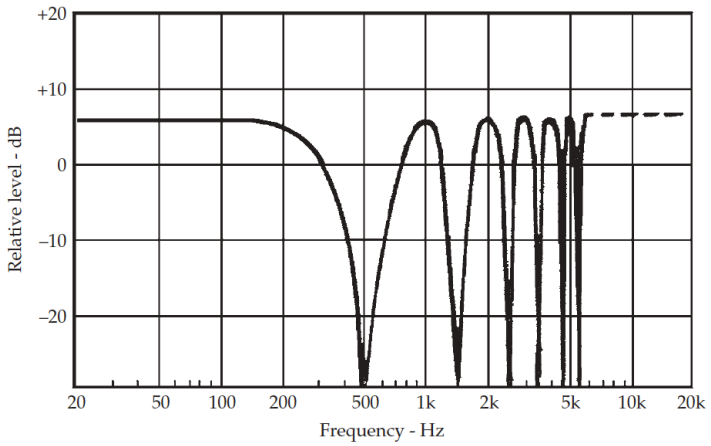


Abb. 14: Kammfilter-Effekt

In der Raumakustik treten Kammfilter-Effekte vor allem bei der Überlagerung von Direktschall und reflektiertem Schall auf. Dabei gibt es verschieden lange Wegdifferenzen, wie beispielsweise die erste Reflexion von der Tisch- oder Mischpultoberfläche oder die erste Reflexion der Rückwand. Die Effekte sind schon bei einer reflektierten Welle, deren Schalldruck $20\,dB$ unter dem der ersten Welle liegt, hörbar.[93]

3.3.2 Raummoden

Sobald die Wellenlänge einer Frequenz gegen die Strukturen eines Raumes groß ist, vereinfacht sich der Raum zu einem regelmäßigen, schallhart begrenzten Volumen. Bei der schallharten Reflexion bildet sich, wie in Kapitel 2.1.8 beschrieben, eine stehende Welle aus einfallender und reflektierter Welle.[94]

Stimmt ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge mit den Raumabmessungen überein, dann fällt die rücklaufende Schallwelle nach einer erneuten Reflexion wieder gleichphasig auf die ursprüngliche Welle zurück, und es bildet sich eine sogenannte Raummode.[95] Diese Resonanz führt zu einer ortsfesten Schalldruckverteilung, die man als deutliche Laustärkeunterschiede im Raum wahrnimmt.[96]

---

[93] *Ebd.*.f
[94] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 77
[95] P. MAIER, *Studioakustik*, S. 284
[96] C. RÖMER, *Schall und Raum*, S. 82

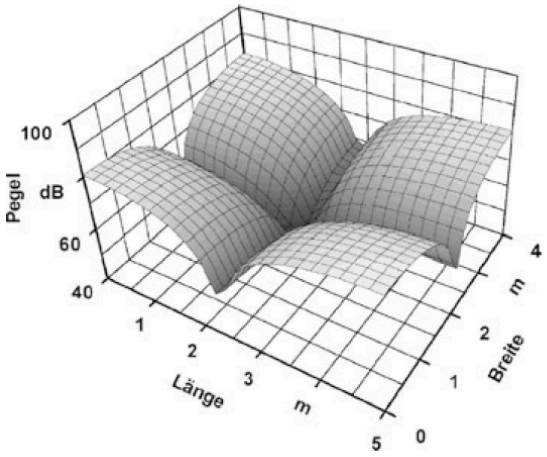


Abb. 15: Pegelverteilung der Mode (1,1,0) bei 55Hz, 1,3m über dem Boden

Die Moden werden je nachdem in welcher Richtung sie auftreten drei Arten zugeordnet:

- Axiale Moden reflektieren zwischen zwei Begrenzungsflächen
- Tangentiale Moden reflektieren zwischen vier Begrenzungsflächen
- Oblique Moden reflektieren zwischen sechs Begrenzungsflächen[97]

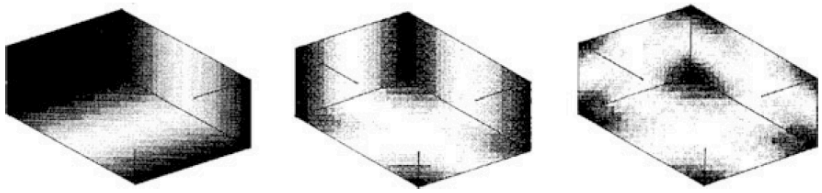


Abb. 16: dreidimensionale Darstellung der niedrigsten axialen (1/0/0), tangentialen (1/1/0) und obliquen (1/1/1) Moden im Rechteckraum

Die Frequenzen, bei denen Raummoden zwischen zwei Wänden auftreten, werden als die Eigenfrequenzen f_n eines Raumes bezeichnet und können mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit c_o, dem Abstand d zwischen den Wänden und der Ordnung n berechnet werden.

$$f_n = \frac{c_0 * n}{2 * d} \qquad (8)$$

[97] F. A. EVEREST, *The master handbook of acoustics*, S. 228

Zur Berechnung aller Moden $f_{n_x/n_y/n_z}$ in einem quaderförmigen Raum werden die Abmessungen l_x, l_y und l_z des Raumes sowie die Ordnungen der Moden n_x, n_y und n_z in den jeweiligen Richtungen benötigt. Mit Hilfe der 1896 von **Lord Rayleigh** beschriebenen Formel lassen sich auch tangentiale und oblique Moden berechnen.

$$f_{n_x/n_y/n_z} = \frac{c_0}{2} * \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \qquad (9)$$

Die Ergebnisse können als Eigenfrequenzverteilung oder Eigenfrequenzdichte dargestellt (Kapitel 3.4.4) werden[98]:

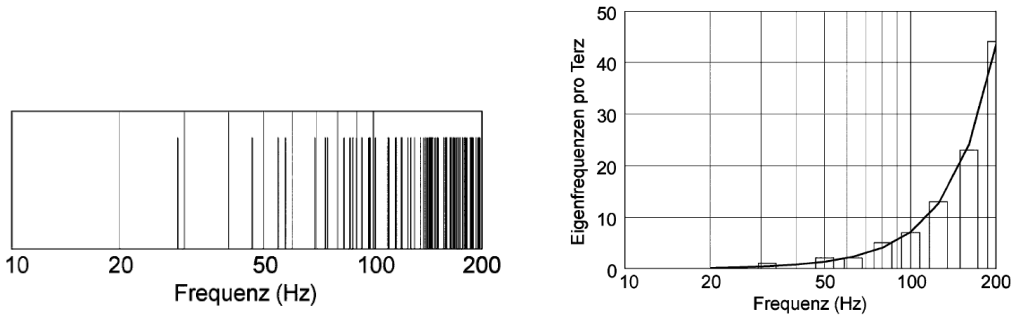


Abb. 17: Eigenfrequenzverteilung und Eigenfrequenzdichte

Da die Dichte der Eigenfrequenzen quadratisch mit der Frequenz wächst, steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich ab einer bestimmten Frequenz Raummoden aufgrund ihrer Phasenlage gegenseitig in ihrer Wirkung aufheben. Das hat zur Folge, dass die Übertragungsfunktion mit steigender Frequenz geebnet wird. Da der Schalldruck dieser Frequenzen überall im Raum annähernd gleich ist, spricht man hier von einem Diffusfeld.[99]

[98] P. MAIER, *Studioakustik*, S. 283.f, 288
[99] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 79

3.4 Raumakustische Grenzfrequenzen

Das Frequenzspektrum wird zur akustischen Beurteilung von kleineren Räumen in vier Bereiche aufgeteilt[100]

Die erste Grenzfrequenz und tiefste in einem Raum vorkommende Resonanz f_1 lässt sich mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit c_0 und der längsten Raumabmessung l_x berechnen:[101]

$$f_1 = \frac{c_0}{2 * l_x} \tag{10}$$

Unterhalb dieser Frequenz im 1. Bereich wird Schalldruck nach dem Druckkammerprinzip erzeugt. Das heißt, es wird ein Wechseldruck durch die periodische Komprimierung eines geschlossenen Volumens erzeugt.

Im 2. Bereich, also bis zur zweiten Grenzfrequenz f_2, die auch als Schröder-Frequenz, nach **M. R. Schröder**, oder Großraumfrequenz bekannt ist, wird das Schallfeld durch Raummoden dominiert. Das sogenannte Modalfeld lässt sich mit Hilfe der wellentheoretischen Raumakustik beschreiben. Die Schröder-Frequenz gilt als Grenze zwischen Modalfeld und Diffusfeld. Sie kann mit der Nachhallzeit T und dem Raumvolumen V berechnet werden:[102]

$$f_2 = 2000\sqrt{\frac{T}{V}} \tag{11}$$

Der 3. Bereich gilt als Übergangsbereich zwischen dem 2. Bereich, in dem das Schallfeld wellentheoretisch beschrieben wird, und dem 4. Bereich, in dem das Schallfeld durch die geometrische Raumakustik beschrieben wird. Dieser Bereich ist oft schwierig zu beschreiben, da die Wellenlänge der betrachteten Frequenzen weder zur wellentheoretischen noch zur geometrischen Betrachtung von Schallfeldern passen.

[100] F. A. EVEREST, *The master handbook of acoustics*, S. 229
[101] H. V. FUCHS, *Raum-Akustik und Lärm-Minderung*, S. 11
[102] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 80.f

Ab der Grenzfrequenz f_3 kann Schall als Strahl verstanden werden, und die geometrische Raumakustik wird zur Betrachtung herangezogen. Die Grenze berechnet sich aus der vierfachen Schröder-Frequenz:[103]

$$f_3 = 4 * f_2 \tag{12}$$

Raum	x in m	y in m	z in m	Eigenfrequen-zen in Hz	Soll-Nachhall-zeit in s	Grenzfrequenz in Hz
Sprecherkabine	1,2	1,8	2,4	71, 119, 143, …	0,20	393
Einzelbüro	2,5	4,0	2,5	69, 81, 97, …	0,38	246
Klassenraum	9,2	5,6	3,0	19, 36, 37, …	0,53	117
Konzertsaal	49	19	18	4, 7, 10, …	1,97	22

Abb. 18: Beispiele für die unterste Eigenfrequenz und Schröder-Frequenz diverser Räume

3.5 Raumakustische Kriterien

Jeder Raum hat, je nachdem zu welchem Zweck er dient, unterschiedliche Anforderungen an die Raumakustik. Im Gegensatz zu großen Konzertsälen, bei denen es auf einen schönen Raumklang ankommt, sollen Tonregieräume eine neutrale und zuverlässige Beurteilung des wiedergegebenen Signals gewährleisten.[104]

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen bestimmte Kriterien erfüllt werden. Dazu zählen neben den objektiven Qualitätskriterien wie Nachhallzeit und Eigenfrequenzdichte auch subjektive Kriterien wie Hörsamkeit oder Raumeindruck.[105]

Die subjektive Beurteilung der Raumakustik beruht auf dem Ohr als Kontrollorgan und verlangt daher eine gute Schulung und langjährige Erfahrung des Akustikers. Die objektive Beurteilung hingegen kann mit Hilfe messtechnischer Prüfmethoden durchgeführt werden.[106]

---

[103] F. A. EVEREST, *The master handbook of acoustics*, S. 229.f
[104] P. MAIER, *Studioakustik*, S. 295
[105] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 31.f
[106] C. RÖMER, *Schall und Raum*, S. 85.f

3.5.1 Nachallzeit

Die Nachhallzeit T (Kapitel 3.2.2) und ihre Frequenzabhängigkeit ist das erste Qualitätskriterium der Raumakustik und steht stets im Vordergrund.[107] Die am häufigsten verwendete Messgröße in der Raumakustik wird oftmals nicht nur als einzelner Wert gemessen, sondern als Frequenzkurve mit mehreren Messpunkten. Es hat sich bewährt, die Messpunkte im Oktav- oder Terzabstand zu ermitteln.[108]
In den Terzbändern von $200\ Hz$ bis $4\ kHz$ sollte der arithmetische Mittelwert T_m der Nachhallzeiten in Abhängigkeit des Raumvolumens V zwischen $0{,}2s$ und $0{,}4$s liegen.

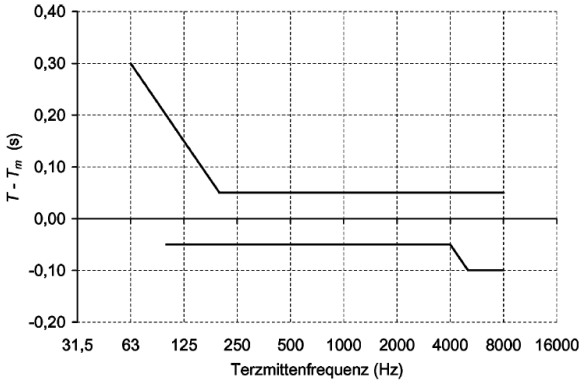


Abb. 19: Toleranzgrenzen für die Nachhallzeit von Regieräumen gemäß SSF-01.1

Es wird zudem ein in seiner Frequenzabhängigkeit gleichmäßiger Verlauf vorausgesetzt, und der Abklingverlauf des Nachhalls sollte geradlinig und frei von einzelnen Reflexionen und Flatterechos sein.[109]

3.5.2 Bonello-Kriterium

Die Abmessungen eines Raumes lassen sich bei der nachträglichen raumakustischen Optimierung nur unter großem Aufwand verändern. Daher ist es wichtig bei der Auswahl des Raumes ein Kriterium zu kennen, welches die Raumproportionen in Bezug auf die Verteilung von stehenden Wellen untersucht. Genau das macht das Bonello-Kriterium.

[107] H. V. FUCHS, *Raum-Akustik und Lärm-Minderung*, S. 174
[108] C. RÖMER, *Schall und Raum*, S. 88
[109] P. MAIER, *Studioakustik*, S. 296

Das Bonello-Kriterium besagt, dass bei einer guten Verteilung der Raumresonanzen in aufeinander folgenden Terzbändern die Anzahl der stehenden Wellen steigen oder mindestens gleich bleiben muss. Dieses Kriterium lässt sich mit Hilfe der grafischen Darstellung der Eigenfrequenzdichte (Kapitel 3.3.2) einfach überprüfen. Solange die Kurve steigt oder stagniert, nimmt die Anzahl der Moden zu beziehungsweise bleibt gleich.[110]

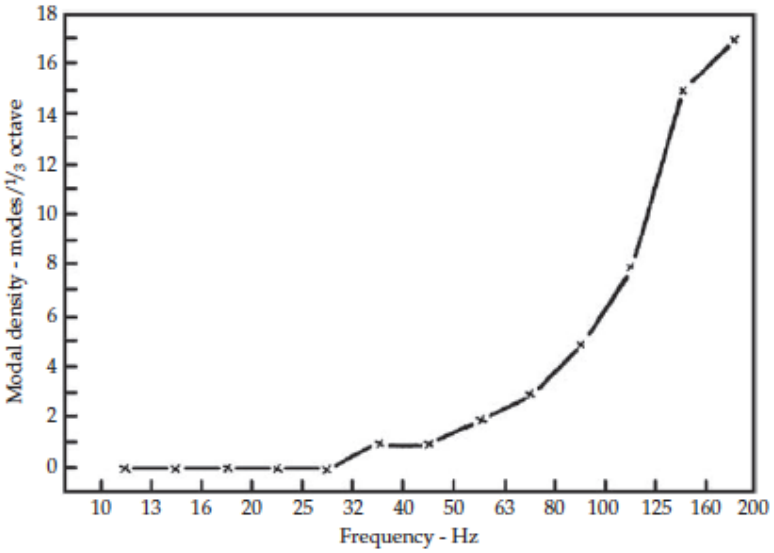


Abb. 20: Anzahl der Moden in Terzbändern zur Überprüfung des Bonello-Kriteriums

3.5.3 Initial Time Delay Gap

Das Initial Time Delay Gap (ITDG) ist der zeitliche Abstand zwischen dem beim Hörer eintreffenden Direktschall und der ersten Reflexion. Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, beeinflussen diese Reflexionen stark die Raumwahrnehmung. Treffen die frühen Reflexionen mit einer großen Verzögerung beim Hörer ein, dann ist das ITDG lang und der Raum wirkt groß.[111] Ist das ITDG zu kurz, verschlechtert sich die Lokalisation der Phantomschallquelle und die Abbildungstreue der Abhöre. Daher sollten das ITDG mindestens $10\,ms$ lang sein und die Raumantwort in dieser Zeit $20\,dB$ leiser als das Direktsignal sein.[112]

[110] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 58
[111] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 88
[112] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 98

3.5.4 Betriebsschallpegelkurve

Die Betriebsschallpegelkurve, also der Amplitudenfrequenzgang des Schallpegels, gilt als Maß für die gleichmäßige Übertragung aller Frequenzen. Um sie zu ermitteln, wird am Abhörpunkt das Schalldruckpegelspektrum mit Hilfe von Rosa Rauschen gemessen.[113] Sie wird im Wesentlichen durch die Qualität des Direktschalls geprägt.[114]

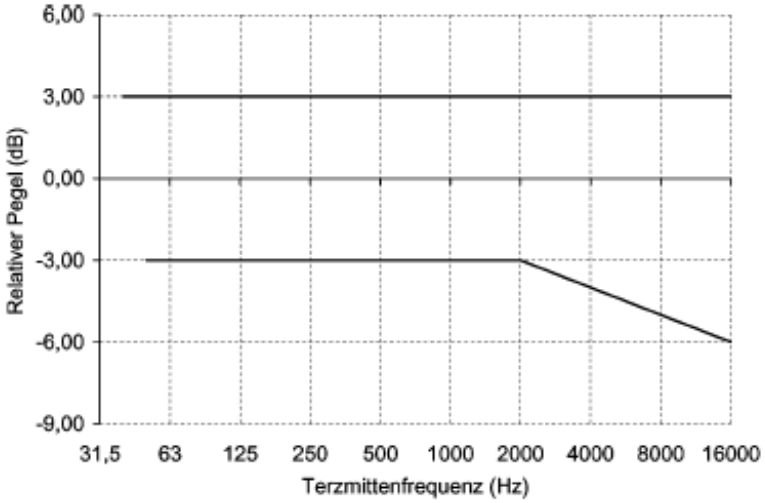


Abb. 21: Toleranzgrenzen für die Betriebsschallpegelkurve gemäß SSF-01.1

3.5.5 Das Direktsignal

Der Raum hat keinen Einfluss auf das Direktsignal, da dieses direkt vom Lautsprecher zum Hörer abgestrahlt wird. Es ist daher auch kein raumakustisches, sondern ein elektroakustisches Kriterium und wird durch die Eigenschaften des Lautsprechers bestimmt.[115] Da außerhalb des Hallradius jedoch der Diffusschall dominiert, ist darauf zu achten, dass der Hörer ausreichend mit Direktschall versorgt wird. Sein Anteil sollte dabei so groß sein, dass er ein klares Klangbild im Vordergrund des Diffusschalls erzeugen kann.[116]

[113] P. MAIER, *Studioakustik*, S. 297
[114] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 1324
[115] P. MAIER, *Studioakustik*, S. 295.f
[116] M. DICKREITER – V. DITTEL – W. HOEG – M. WÖHR, *Handbuch der Tonstudiotechnik*, S. 32.f

3.6 Raum-Impulsantwort und Übertragungsfunktion

Wird ein Eingangssignal durch einen Überträger auf ein Ausgangssignal abgebildet, dann bezeichnet man ihn als System. Die auftretenden Veränderungen im Frequenzgang und in der Phase des Signals werden in solchen Systemen mit Hilfe der sogenannten Übertragungsfunktion beschrieben, die Wirkung im Zeitbereich hingegen mit der Impulsantwort. Zur Ermittlung der Übertragungsfunktion wird einem System ein infinitesimal kurzer Impuls zugeführt. Das am Ausgang gemessene Antwortsignal ist dann die Impulsantwort. Mit Hilfe der Fourier-Transformation erhält man wiederum die Übertragungsfunktion[117]

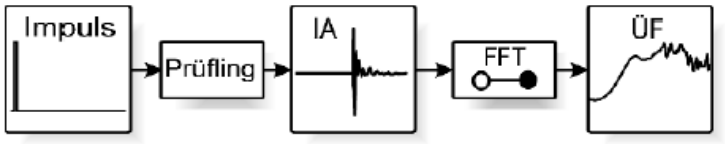


Abb. 22: Grundsätzlicher Aufbau zur Messung der Impulsantwort und der Übertragungsfunktion

Das bedeutet, in der Raumakustik kann man die akustische Übertragungskette eines Raumes als System betrachten. Die Wirkung dieses Systems besteht im Wesentlichen aus

- Der Zeitverschiebung durch akustische Laufzeit
- Der frequenzabhängigen Dämpfung durch Absorption
- Dem Nachhall durch die Addition von Schallrückwürfen

Akustische Systeme sind linear und zeitinvariant. Sie können daher vollständig durch die Impulsantwort und ihre Übertragungsfunktion beschrieben werden.[118]

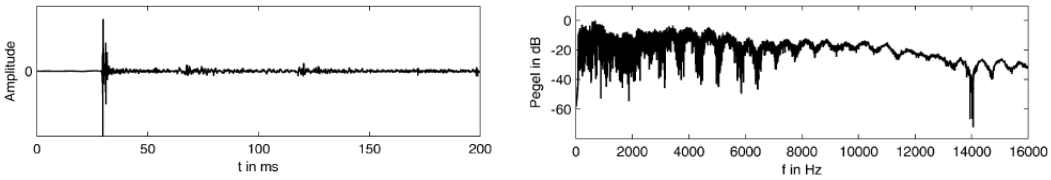


Abb. 23. Impulsantwort eines Raumes und die dazugehörige Übertragungsfunktion

[117] H. KUTTRUFF, *Akustik*, Hirzel, Stuttgart; Leipzig 2004, S. 29
[118] S. WEINZIERL, *Grundlagen*, S. 14.ff

Die Impulsantwort eines realen Raumes ist quasi ein akustischer Fingerabdruck. Mit ihr lässt sich die Nachhallzeit bestimmen, ebenso wie die für die Raumakustik so wichtigen frühen Reflexionen.[119]

Wird die Impulsantwort quadriert und logarithmiert, erhält man eine Energy Time Curve (ETC). Im Gegensatz zur Impulsantwort lässt sich hier einfach der Pegel des Direktsignals und der frühen Reflexionen ablesen.[120]

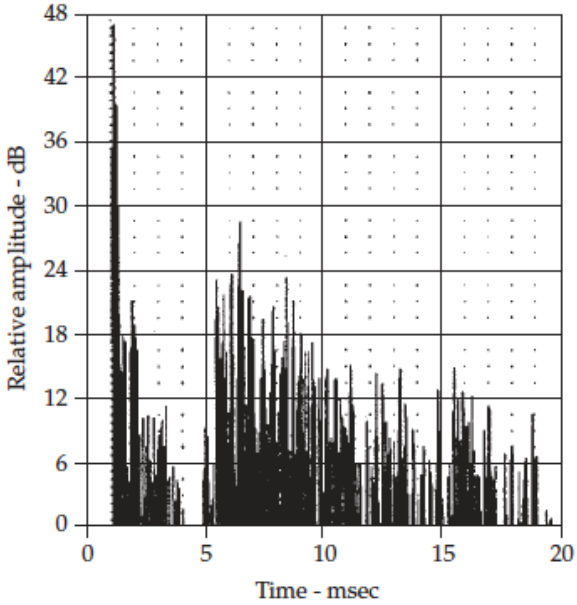


Abb. 24: Energy Time Curve

Um die frequenzabhängige Nachhallzeit eines Raumes zu beurteilen, empfiehlt sich ein Zerfallsspektrum, auch Wasserfalldiagramm genannt. Es handelt sich hierbei um eine dreidimensionale grafische Darstellung mit Angaben zu Pegel, Frequenz und Zeit. Durch die Fourier-Transformation bestimmter Zeitfenster der Impulsantwort werden Frequenzgänge berechnet, die anschließend auf einer Zeitachse aufgetragen werden. Dadurch lassen sich nachschwingende Frequenzen beziehungsweise Raummoden leicht identifizieren, da sie als Ausläufer im Ausschwingverhalten hervortreten.

Eine ähnliche Darstellung bietet das Spektrogramm. Jedoch hat es nur zwei Dimensionen. Die dritte, in diesem Fall der Pegel, wird durch einen Farbcode definiert.[121]

---

[119] H. KUTTRUFF, *Akustik*, S. 255
[120] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 135
[121] A. GOERTZ, *Lautsprecher*, in S. WEINZIERL (Hg.), *Handbuch der Audiotechnik* (*VDI-Buch*), Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 477

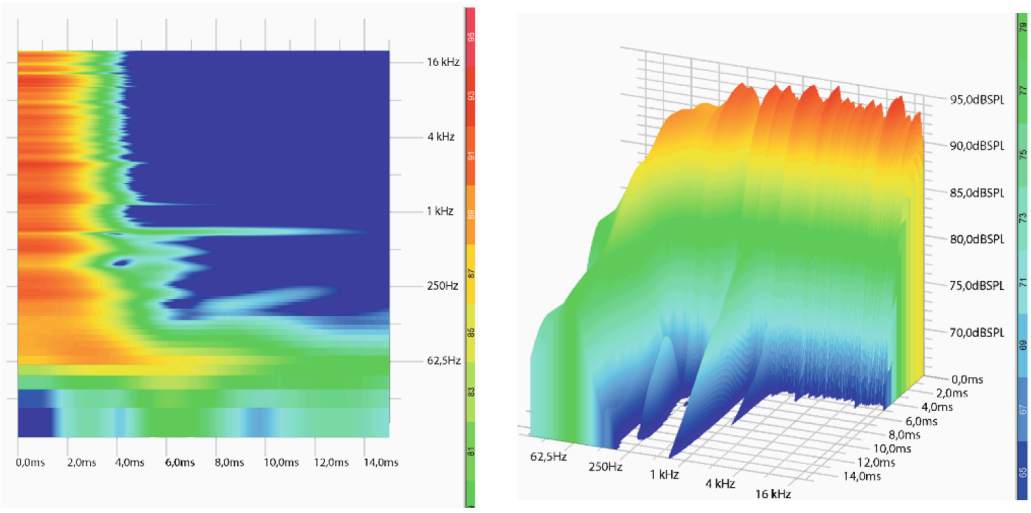


Abb. 25: Links: Spektrogramm als zweidimensionale Darstellung;

Rechts: Zerfallsspektrum in dreidimensionaler Darstellung

4 Raumakustische Optimierung

Die in Kapitel 3.5 geforderten Anforderungen an eine Tonregie lassen sich mit Hilfe verschiedener Maßnahmen erfüllen. Soll ein Raum, der für einen anderen Zweck gebaut wurde, nachträglich raumakustisch optimiert werden, muss auf bestimmte Gegebenheiten reagiert werden. Beispielsweise lässt sich die Primärstruktur (Raumform) kaum noch und die Sekundärstruktur (Beschaffenheit der Oberflächen) nur mit erheblichem Aufwand verändern. Viele Ziele können jedoch trotzdem durch den geschickten Einsatz von Akustikmodulen wie Absorber und Resonatoren und der richtigen Abhörposition erreicht werden.

4.1 Abhör- und Lautsprecherposition

Bei Stereoabhören werden zwischen den beiden Lautsprechern Hörereignisse in Form von Phantomschallquellen ausgebildet. Jedoch leidet bei einer zu breiten Stereobasis b die Lokalisationsschärfe und bei einer zu kurzen Stereobasis die Stereo-Hörfläche. Deshalb wurde in den 1960er Jahren ein Öffnungswinkel δ von $60°$ als Kompromiss definiert. Als Folge bilden die Lautsprecher und der Abhörpunkt ein gleichseitiges Dreieck.[122]

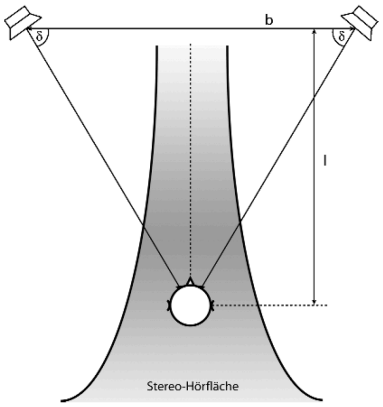


Abb. 26: Zweikanalstereofone Wiedergabeanordnung nach DIN 15996

[122] K. M. SLAVIK – S. WEINZIERL, *Wiedergabeverfahren*, in S. WEINZIERL (Hg.), *Handbuch der Audiotechnik* (*VDI-Buch*), Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 612

Es ist des Weiteren wichtig, auf eine symmetrische Aufstellung der Lautsprecher im Raum zu achten. Das heißt, beide Lautsprecher müssen im selben Abstand zur Wand und zu den Seitenwänden stehen. Andernfalls kann es durch unsymmetrische frühe Reflexionen zu einer Verschiebung der Stereoabbildung kommen. Außerdem sollte der Raum in seiner Ausstattung weitestgehend symmetrisch sein. Eine Seite, die stark reflektiert und eine Seite, die absorbiert, führen ebenfalls zu einer Verschlechterung der Abhörbedingung.[123]

Der Abstand der Lautsprecher zur Rückwand ist ein heikles Thema und erfordert genaue Betrachtung. Die meisten Lautsprecher sind als Druckwandler konzipiert und erzielen daher die maximale Anregung des Schallfeldes in den Druckmaxima und die minimale Anregung in den Druckminima der Raummoden.[124] Dasselbe gilt für die Hörposition. Befindet sich diese in einem Druckmaximum, wird die Raummode als Dröhnen wahrgenommen, im Druckminimum wird die Frequenz hingegen nur sehr schwach oder gar nicht gehört. Um einen geeigneten Hörplatz zu finden, empfiehlt es sich, jeweils die drei ersten axialen Moden zwischen den Begrenzungsflächen in einen Raumplan einzuzeichen.[125]

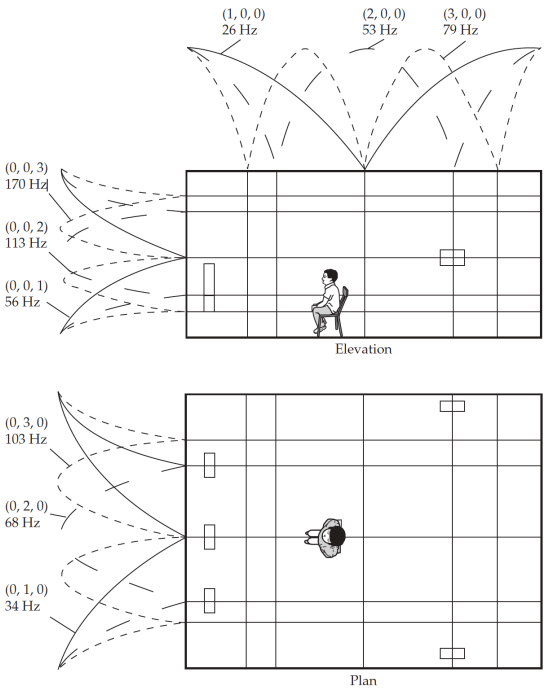


Abb. 27: Druckverteilung der ersten drei axialen Moden

[123] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 121.f
[124] P. MAIER, *Studioakustik*, S. 285
[125] F. A. EVEREST, *The master handbook of acoustics*, S. 332

Da der Schall ab einer bestimmten, von den Gehäuseabmessungen des Lautsprechers abhängigen Frequenz auch nach hinten abgestrahlt wird, kommt es aufgrund der Reflexion an der Wand und der dadurch entstehenden Überlagerung der Wellen am Abhörplatz zu einem Kammfiltereffekt (Kapitel 3.3.1). Durch eine Absorption oder Umleiten der Reflexionen an der Wand kann dem Kammfilter entgegengewirkt werden.[126]

4.2 Akustikmodule

Geeignete Hilfsmittel zur Optimierung der Raumakustik, insbesondere zur Regulierung der Nachhallzeit und zur Lenkung beziehungsweise Streuung von Reflexionen, werden unter dem Begriff Akustikmodule zusammengefasst.[127] Schallabsorber werden, je nach ihrer frequenzspezifischen Wirkung, in folgende Bereiche unterteilt: Tiefenabsorber, Mittenabsorber, Höhenabsorber und Breitbandabsorber. Der frequenzabhängige Schallabsorptionsgrad α beschreibt die Wirkung eines Schallabsorbers.[128]

4.2.1 Poröse Absorber

Die einfachste Möglichkeit, Schall zu absorbieren, erfolgt durch sogenannte poröse Absorber. Sie bestehen aus einem porösen Material und wirken mit ihrem Strömungswiderstand der Luftteilchenbewegung, also der Schallschnelle, entgegen. Im Absorber wird die Schallenergie dissipativ, also durch Reibung, in Wärme umgewandelt. Es ist jedoch zu beachten, dass der Strömungswiderstand keinen direkten Einfluss auf den Schalldruck nehmen kann. Daher ist eine Positionierung der Absorber nur im Bereich des Schallschnellemaximums sinnvoll.[129]

Der spezifische Strömungswiderstand R_S $\left[\frac{Pa*s}{m}\right]$ poröser Absorber dient zur Kennzeichnung des Schallabsorptionsvermögens. Er bezeichnet das Verhältnis der

[126] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 122.ff
[127] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 90
[128] W. AHNERT – H.-P. TENNHARDT, *Raumakustik*, S. 233
[129] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 140

Druckdifferenz vor und hinter einer Materialschicht zur Geschwindigkeit der durchströmenden Luft. Da der spezifische Strömungswiderstand mit zunehmender Dicke wächst, wird als Materialkenngröße der längenbezogene Strömungswiderstand r $\left[\frac{Pa*s}{m^2}\right]$ angegeben. Er ist nur abhängig vom Material, nicht aber von der Dicke.[130]

Wird ein poröser Absorber mit einem sehr geringen spezifischen Strömungswiderstand vor einer schallharten Wand angebracht, werden die auftreffenden Schallanteile fast ungehindert an der Rückwand reflektiert. Bei einem sehr großen Strömungswiderstand wird der Schall daran gehindert, in das Material einzutreten und wird bereits an dessen Oberfläche reflektiert. Der optimale spezifische Strömungswiderstand poröser Absorber sollte daher zwischen $1000\,\frac{Pa*s}{m}$ und $3000\,\frac{Pa*s}{m}$ liegen.

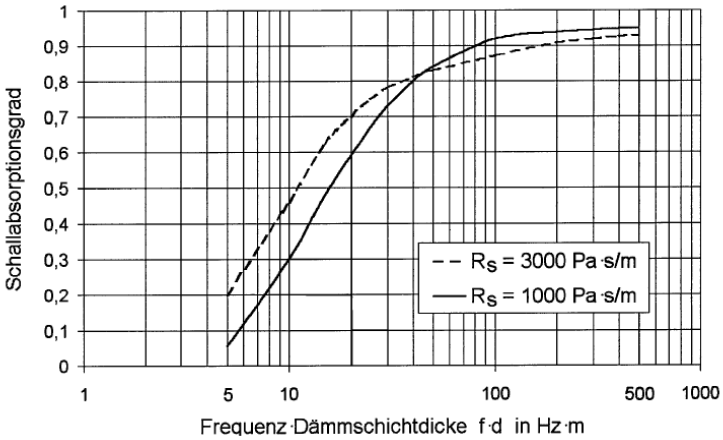


Abb. 28: Schallabsorptionsgrad poröser Materialien vor schallharter Wand in Abhängigkeit von Frequenz und Dämmschichtdicke

Abb. 28 stellt den theoretischen Verlauf des Schallabsorptionsgrades α eines porösen Materials im Bereich des optimalen spezifischen Strömungswiderstandes R_S in Abhängigkeit vom Produkt aus der Frequenz f und der Dämmstoffdicke d dar. Man sieht, dass sich die untere Grenze des optimalen spezifischen Strömungswiderstands für die Absorption von hohen - und die obere Grenze für die Absorption von tiefen Frequenzen eignen. Außerdem wird deutlich, dass für hohe Absorptionsgrade bei tiefen Frequenzen sehr große Schichtdicken erforderlich sind. Soll beispielsweise für $100\ Hz$

[130] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 140

ein Absorptionsgrad von $\alpha \geq 0{,}8$ erreicht werden, dann muss die Dämmstoffdicke laut Abb. 28 bereits $0{,}4\ m$ betragen.[131]

Wie in Kapitel 2.1.7 beschrieben, entsteht bei jeder Reflexion auf der Wand ein Schalldruckmaximum. Das bedeutet, im Abstand von $\lambda/4$ vor der Wand befindet sich das Schnellemaximum und daher die optimale Position für einen porösen Absorber.[132] Die Wirkung von porösem Material dicht vor der Wand ist zu vernachlässigen. Daher kann der Raum zwischen Wand und Absorber frei gelassen werden. Das spart Kosten und ist genauso effektiv wie ein zweiter Absorber, der gleich dick ist wie Absorber plus Luftspalt.[133]

Typische Materialien für poröse Absorber sind Mineral- und Steinwollen sowie offenporige Schaumstoffe. Aus gesundheitlichen oder gestalterischen Gründen verbergen sie sich häufig hinter einer Deckschicht. Diese sollte die akustische Wirkung jedoch nicht beeinflussen. Besonders eignen sich hierfür luftdurchlässige Stoffe.[134]

4.2.2 Resonanzabsorber

Da poröse Absorber für die Absorption tiefer Frequenzen nicht geeignet sind, werden stattdessen Resonanzabsorber in Form von Platten-, Helmholtz- und Röhrenrresonatoren verwendet. Sie beruhen alle auf einem Masse-Feder-System, das auf eine bestimmte Frequenz abgestimmt werden kann.[135] Zur Berechnung der Eigenfrequenz eines Masse-Feder-Systems wird folgende Formel verwendet:

$$f_{res} = \frac{1}{2*\pi*\sqrt{m*C}} \qquad (13)$$

Die einzigen Faktoren die also Einfluss auf die Eigenfrequenz haben sind die Masse m in $[kg]$ und die Nachgiebigkeit der Feder C in $\left[\frac{m}{N}\right]$.[136]

[131] W. AHNERT – H.-P. TENNHARDT, *Raumakustik*, S. 234.f
[132] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 91
[133] F. A. EVEREST, *The master handbook of acoustics*, S. 191
[134] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 145.f
[135] P. D. G. V. HÖFKER, *Raumakustik*, in W. WILLEMS (Hg.), *Lehrbuch der Bauphysik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 448
[136] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 157

Das Masse-Feder-System wird durch das Schallfeld zum Schwingen angeregt. Dadurch entzieht der Resonanzabsorber dem Schallfeld Energie, welche dann wiederum durch Eigendämpfung des Materials in Wärme umgewandelt wird.[137] Im Gegensatz zu porösen Absorbern haben Resonanzabsorber die größte Wirkung im Schalldruckmaximum.[138]

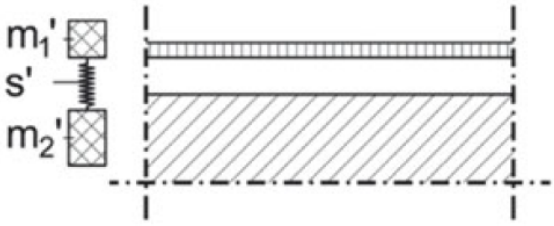


Abb. 29: Willems, S.448 Plattenresonator und Masse-Feder-System

4.2.2.1 Plattenresonatoren

Wenn Frequenzen im Bereich von $100\ Hz$ bis $400\ Hz$ eine zu lange Nachhallzeit haben, klingt ein Raum schnell dumpf. Eine Möglichkeit, diesen Frequenzbereich in den Griff zu bekommen, sind Plattenresonatoren, die einfachste Bauform der Resonanzabsorber.[139] Eine schwingende Platte mit der flächenbezogenen Masse m' in $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ wird auf einen luftdichten Rahmen mit der Tiefe d_L in $[cm]$ befestigt. Das eingeschlossene Luftpolster dient in diesem Resonanzsystem als Feder. Die Resonanzfrequenz f_{res} berechnet man näherungsweise mit der Formel:

$$f_{res} \approx \frac{600}{\sqrt{m * d_L}} \tag{14}$$

Aus der Formel wird ersichtlich, dass bei einer Vergrößerung des Wandabstands oder der flächenbezogenen Masse die Resonanzfrequenz sinkt.[140]
Durch die Hohlraumbedämpfung eines Plattenresonators lässt sich sein schmalbandige Wirkung vergrößern. Durch die Vergrößerung des Widerstands verkleinert sich jedoch der Wirkungsgrad. In der Praxis werden die Plattenresonatoren mit der größeren

[137] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 92
[138] A. FRIESECKE, *Die Audio-Enzyklopädie: ein Nachschlagewerk für Tontechniker*, Walter de Gruyter, 2007, S. 77
[139] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 148
[140] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 93

Wirkungsbreite häufig bevorzugt.[141] Werden diese auf die Eigenfrequenzen des Raumes abgestimmt, lassen sich damit stehende Wellen wirkungsvoll bedämpfen.[142]

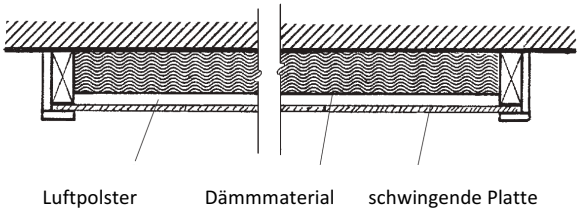


Abb. 30: Hohlraumbedämpfter Plattenresonator

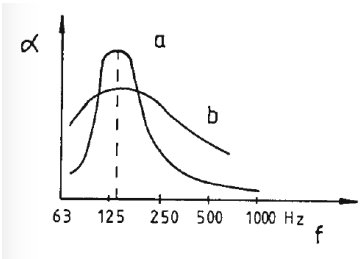


Abb. 31: Absorptionsgrades eines Plattenresonators
a: ohne Hohlraummbedämpfung
b: mit Hohlraumbedämpfung

4.2.2.2 Helmholtzresonator

Ein weiterer Resonanzabsorber ist der sogenannte Helmholtzresonator. In seiner einfachsten Form ist er eine geschlossene Kiste mit einer Öffnung. Im Gegensatz zum Plattenresonator wird jedoch nicht eine Platte in Schwingung gebracht, sondern die Luftmasse in der Öffnung der Kiste. Als Feder dient die angekoppelte Luftmasse in der Kiste.[143] Die Vorteile gegenüber einem Plattenresonator sind die nachträglich veränderbare Resonanzfrequenz sowie die Möglichkeit, bereits vorhandene bauliche Hohlräume zur akustischen Optimierung eines Raumes nutzen zu können.[144]
Zur Berechnung der Eigenfrequenz f_{res} des Helmholtzresonators benötigt man die Gesamtoberfläche aller Öffnungen S in $[m^2]$, das Volumen der Luftmasse in der Kiste V in $[m^3]$, die Tunneltiefe d in $[m]$ und die Mündungskorrektur k.

$$f_{res} = \frac{c}{2*\pi} * \sqrt{\frac{S}{V*(d+k)}} \qquad (15)$$

[141] G. R. SINAMBARI – S. SENTPALI, *Ingenieurakustik*, S. 307
[142] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 93
[143] P. D. G. V. HÖFKER, *Raumakustik*, S. 450
[144] W. AHNERT – H.-P. TENNHARDT, *Raumakustik*, S. 237

Die Mündungskorrektur ist notwendig, da sich im Resonanzfall nicht nur die Luft im Tunnel bewegt, sondern auch die Luft vor und hinter der Tunnelöffnung. Für einen beidseitig geflanschten Tunnel beträgt $k = 1{,}23 * r$; für einen einseitig geflanschten ist $k = 1{,}46 * r$ und für einen nicht geflanschten ist $k = 1{,}7 * r$. [145]
Auch der Helmholtzresonator lässt sich in seiner Wirkung durch eine Dämpfung verändern. Neben der wie beim Plattenresonator eingesetzten Hohlraumbedämpfung bietet sich hier zudem die Bespannung der Öffnungen mit einem Faser-Tuch an.[146]

Eine weitere Form der Helmholtzresonatoren sind Loch- und Schlitzplattenresonatoren. Diese Resonatoren haben einen ähnlichen Aufbau wie Plattenresonatoren, jedoch wird die schwingende Platte durch eine gelochte Platte oder mehrere Platten mit einem definierten Abstand zueinander ersetzt. Die Resonanzfrequenzen berechnen sich wie beim Helmholtzresonator.[147]

4.2.3 Diffusor

Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, tragen frühe Reflexionen erheblich zum Raumeindruck bei. Um eine objektive Beurteilung zu ermöglichen, sollten diese daher umgelenkt, absorbiert oder diffus reflektiert werden. Möchte man die Nachhallzeit in einem Raum durch zusätzliche poröse Absorber nicht weiter verkürzen, können durch den Einsatz von Diffusoren solche störenden Reflexionen gestreut werden. Schallstreuung findet immer statt, sobald sich die Struktur im Größenverhältnis der Wellenlänge befindet (siehe Kapitel 3.1.1). Außerdem wird durch die Streuung des Schalls ein homogeneres diffuses Schallfeld erzeugt.
Das akustische Prinzip der im folgenden beschriebenen Diffusoren ist die Reflexion mit Phasenverschiebung. Sie tritt auf, wenn eine Schallwelle in eine Vertiefung trifft, deren Tiefe ein Viertel der Wellenlänge ist. Daraus resultiert eine Verschiebung um $\lambda/2$ zu der an der Oberfläche reflektierten Welle. Winkelabhängige Interferenzen führen in Folge dessen zur Streuung der Schallwelle.[148]

[145] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 158.f
[146] H. V. FUCHS, *Raum-Akustik und Lärm-Minderung*, S. 71
[147] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 150–154
[148] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 95

4.2.3.1 Maximalfolgendiffusor

Grundsätzlich sollte bei der Konstruktion eines Diffusors auf geometrische Regelmäßigkeiten verzichtet werden, da es ansonsten zu einer tonalen Verfärbung im reflektiertem Schall kommen kann. Bei Maximalfolgendiffusoren beruht die Anordnung der Streuelemente daher auf einer binären Pseudo-Zufallszahlenfolge. Diese sogenannte Maximalfolge lässt sich einfach berechnen und setzt sich aus einer Folge positiver und negativer Werte zusammen.[149]

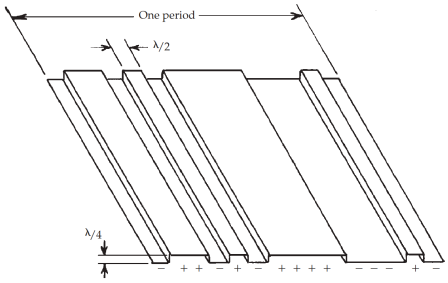


Abb. 32: schematischer Aufbau eines Maximalfolgendiffusors

4.2.3.2 Quadratic Residue Diffusor (QRD)

Der Nachteil der Maximalfolgen-Diffusoren ist ihre geringe Bandbreite. Sie ist darauf zurückzuführen, dass der Diffusor aufgrund seiner Strukturtiefe nur für eine Wellenlänge funktionieren kann.[150]

Beim Quadratic Residue Diffusor, auch Schröder-Diffusor genannt, wird durch verschiedene Strukturtiefen eine schallstreuende Wirkung über einen großen Frequenzbereich erreicht.

Ein QRD wird mit einer Modulo Rechnung berechnet:

$$d = n^2 * mod\ p \qquad (16)$$

Unter d versteht man hier den Tiefenfaktor des Diffusorbodens. Die Anzahl der Fächer wird über p gewählt und muss einer Primzahl entsprechen.

[149] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 171
[150] F. A. EVEREST, *The master handbook of acoustics*, S. 258.f

Das folgende Beispiel zeigt einer QRD der mit der Primzahl 17 berechnet wurde:

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
d	0	1	4	9	16	8	2	15	13	13	15	2	8	16	9	4	1	0

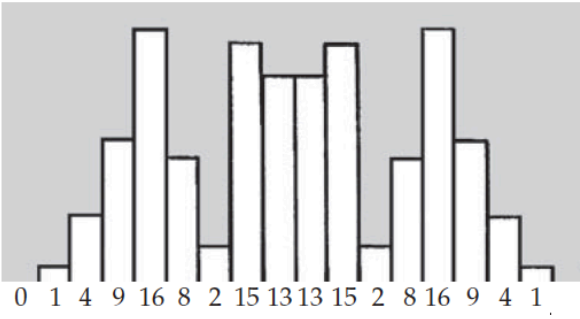


Abb. 33: Schematischer Aufbau eines QRD mit Tiefenfaktor d

Soll der QRD bis zu einer bestimmten unteren Grenzfrequenz f_{min} arbeiten, dann kann die benötigte absolute Tiefe t_{max} des Diffusors berechnet werden[151]:

$$t_{max} = \frac{d_{max} * c}{2 * p * f_{min}} \tag{17}$$

4.2.4 Aktive Schallabsorber

Eine weitere Möglichkeit um gegen störende Schallanteile vorzugehen sind aktive Schallabsorber. Lange Zeit wurde diese als Antischallmaßnahme beschriebene Technik ausschließlich in der Industrie zur Bekämpfung von Anlagenlärm und in Kopfhörern für Hubschrauberpiloten zur Reduzierung der Außengeräusche genutzt. Ihr Vorteil gegenüber normalen Absorbern oder Resonatoren ist ihr geringes Bauvolumen. Vor allem für die Behandlung tieffrequenter Probleme in kleinen Räumen ist der Unterschied des Bauvolumens zwischen einem aktiven Absorber und einem porösen Absorber enorm.[152]

Die einfachste Form der aktiven Schallfeldbeeinflussung ist die Erweiterung der Abhöre um einen zusätzlichen Lautsprecher. Dieser erzeugt ein gegenphasiges Signal, das am

[151] A. FRIESECKE, *Studio Akustik*, S. 173–181
[152] H. V. FUCHS, *Raum-Akustik und Lärm-Minderung*, S. 106.f

Abhörpunkt die nichtlinearen Schallanteile kompensiert. Das funktioniert - bedingt durch ihre physikalische Wirkungsweise - jedoch nur im tieffrequenten Bereich. Verfügt die Abhöre bereits über einen Subwoofer, wird ein zweiter an der Rückwand der Studios installiert. Das Subwoofer-Signal wird dann um die entsprechende Laufzeit verzögert und in der Phase gedreht. Infolgedessen neutralisieren sich das an der Rückwand reflektierte Direktsignal und das Kompensationssignal.[153]

4.3 Digitale Raumentzerrung

Bei der digitalen Raumentzerrung wird mit Hilfe eines Equalizers eine Korrektur an der Übertragungsfunktion vorgenommen. Das kann notwendig sein, wenn die angestrebte Linearität der Betriebsschallpegelkurve und der Übertragungsfunktion nicht durch raumakustische Optimierung erreichbar ist. Beispielsweise in einem kleinen Raum, der keinen Platz für große Absorber bietet und die Position der Lautsprecher nicht veränderbar ist.

Durch den Einsatz von herkömmlichen digitalen IIR-Equalizern kann zwar die Amplitude der Übertragungsfunktion verändert werden, gleichzeitig verändert sich dadurch jedoch auch die Phase der Übertragungsfunktion und damit die Gruppenlaufzeit. Um diese ungünstige Beeinflussung des zeitlichen Verhaltens zu vermeiden, sollte ein FIR-Filter benutzt werden. Dieser Filter-Typ lässt eine unabhängige Veränderung der Amplitude zu ohne die Phase zu verändern.

Die meisten Effekte, die zu einer Verformung der Übertragungsfunktion führen, sind ortsabhängig. Das heißt, eine Entzerrung der Übertragungsfunktion an der Abhörposition kann zu einer unkontrollierten Veränderung der Übertragungsfunktion im restlichen Raum führen. Daher sollte die Entzerrung auf Basis einer räumlich gemittelten Übertragungsfunktion stattfinden.

Die Entzerrung der Übertragungsfunktion in Regieräumen kann grundsätzlich eine Ergänzung zu bereits vorgenommenen Maßnahmen sein, diese jedoch nicht ersetzen.[154]

---

[153] P. MAIER, *Studioakustik*, S. 306.f
[154] *Ebd.*, S. 307.f

5 Projektbeispiel: Optimierung der Abhörsituation in einem Projektstudio

Die im Laufe dieser Arbeit besprochenen Themen zur raumakustischen Optimierung sollen nun anhand eines praktischen Beispiels umgesetzt werden. Die zu optimierende Tonregie befindet sich im Gebäude des WIR-Projekt e.V. in Gauselfingen. Das Gebäude ist eine ehemalige Textilfabrik, die 1911 von **Jeremias Conrad Mayer** erbaut wurde und 1985 zum WIR-Projekt umgebaut wurde. Das Projektstudio befindet sich im Erdgeschoss und verfügt über einen Aufnahmeraum mit ca. $30\ m^2$ und eine Tonregie mit $26{,}3\ m^2$.

5.1 Zielsetzung

Das Ziel ist es den Raum so zu optimieren, dass eine objektive Beurteilung des Audiomaterials möglich ist. Dabei dient die Empfehlung für die Praxis SSF-01.1 des Surround Sound Forums in den Bereichen Nachhallzeit, Betriebsschallpegelkurve und Anfangsreflexionen als Leitfaden. Zur Einhaltung bestimmter Toleranzwerte werden Akustikmodule geplant und installiert. Des Weiteren soll eine möglichst optimale Abhör- und Lautsprecherposition gefunden werden.

5.2 Ausgangssituation

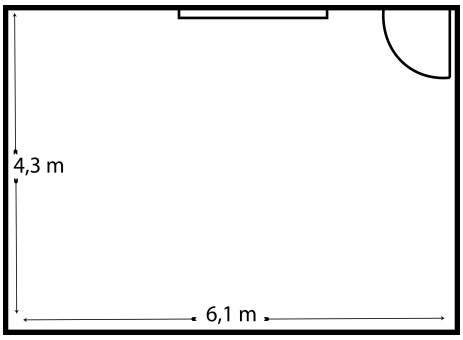


Abb. 34: Tonregie Grundriss

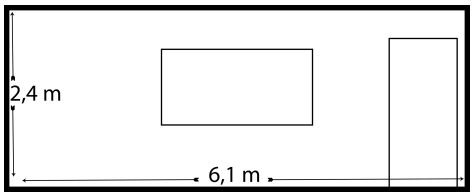


Abb. 35: Tonregie Seitenansicht

Die Tonregie hat ein Gesamtvolumen von $62{,}6\,m^2$ und eine Gesamtoberfläche von $102{,}38\,m^2$. Der Boden ist mit trittschallgedämmten Laminat ausgelegt, die Wände wurden mit Rauhspund und die Decke mit Pressspan verkleidet. Außerdem befindet sich in dem Raum ein $2\,m^2$ großes Fenster und eine $1{,}8\,m^2$ große Türe.

5.2.1 Berechnungen

Zunächst werden verschiedene raumakustische Größen theoretisch berechnet und anschließend mit den Messergebnissen verglichen. Die Daten für den Absorptionsgrad α stammen aus **Andreas Frieseckes** Buch „Studio Akustik – Konzepte für besseren Klang“ (S.38).

5.2.1.1 Äquivalenten Absorptionsfläche

Mit Hilfe der Formel zur Berechnung der Äquivalenten Absorptionsfläche A (Kapitel 3.2.1) lässt sich für jede Teilfläche der Tonregie das Absorptionsvermögen berechnen:

Fläche	**Material**	**Größe in m^2**	**mittlerer Absorptionsgrad α**	**Absorptionsvermögen A**
Boden	Laminat	26,23	0,04	1,05
Decke	Pressspan	26,23	0,14	3,67
Wände	Rauhspund	47,08	0,14	6,59
Türe	Holz	1,8	0,06	0,12
Fenster	Glas	2	0,04	0,08
Gesamt				**11,51**

5.2.1.2 Nachhallzeit

Mit dem gesamten Absorptionsvermögen und dem Volumen des Raums lässt sich die Nachhallzeit des unbehandelten Raums mit der Sabineschen Nachhallformel (Kapitel 3.2.2) berechnen:

$$\boldsymbol{T} = 0{,}163 * \frac{62{,}6\ m^3}{11{,}51} = \mathbf{0{,}87}\ \boldsymbol{s}$$

5.2.1.3 Raumeigenmoden

Die Raumeigenmoden berechnen sich über die Raumabmessungen (Kapitel 3.3.2). *Abb. 36* zeigt die Eigenfrequenzverteilung der Tonregie. Eine ausführliche Tabelle befindet sich im Anhang dieser Arbeit:

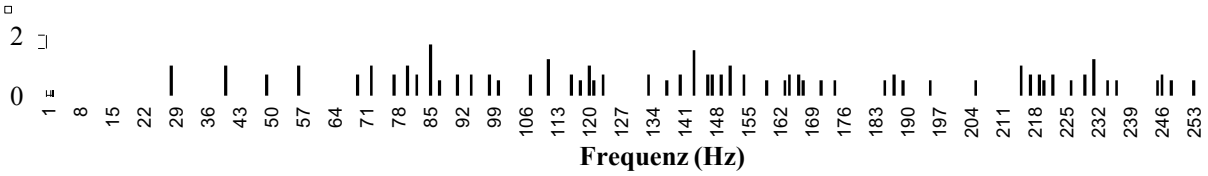


Abb. 36: Eigenfrequenzverteilung (berechnet)

Das Bonello-Kriterium (Kapitel 3.5.2) weist keine Einbrüche auf. Daraus kann auf eine gute Verteilung der Raumresonanzen im Raum geschlossen werden.

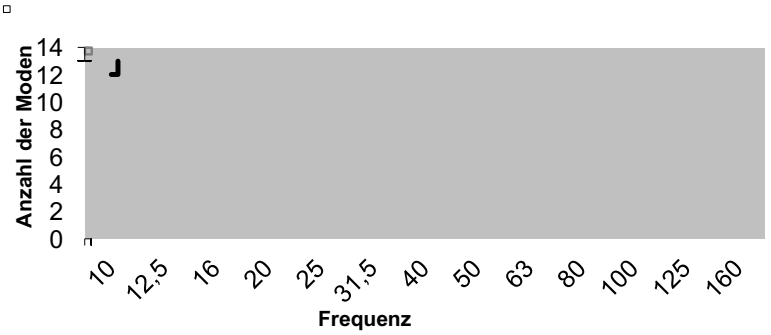


Abb. 37: Bonello-Kriterium

5.2.2 Messungen

Durch die Berechnung der Raumeigenmoden und der Nachhallzeit bekommt man einen ersten Eindruck der Raumakustik. Man kann mit diesen Daten einschätzen, ob es möglich ist und wie viel Aufwand es macht, den Raum akustisch zu optimieren. Es ist jedoch schwer nur durch Berechnungen Aussagen über das tatsächliche Verhalten des Schalls im Raum zu treffen. Deshalb sollte vor der Optimierung auf jeden Fall eine Messung stattfinden.

Das folgende Equipment wurde zur Durchführung der Messungen benutzt:

Raumakustik-Software:	Room EQ Wizard
Mess-Mikrofon:	Sonarworks – XREF20
Abhör-Lautsprecher:	FAR – D6W80
Interface und Preamp:	AVID 11Rack

Die Messungen werden zu Beginn im unbehandelten Raum nach jeder akustischen Optimierung und zum Schluss in der voll eingerichteten Tonregie durchgeführt. Die Lautsprecher werden zuerst einzeln und anschließend zusammen gemessen. Nach Festlegung der Abhörposition wird die Position des Mess-Mikrofons nicht mehr verändert.

Abb. 38: Ausgangsituation - Lautsprecherposition

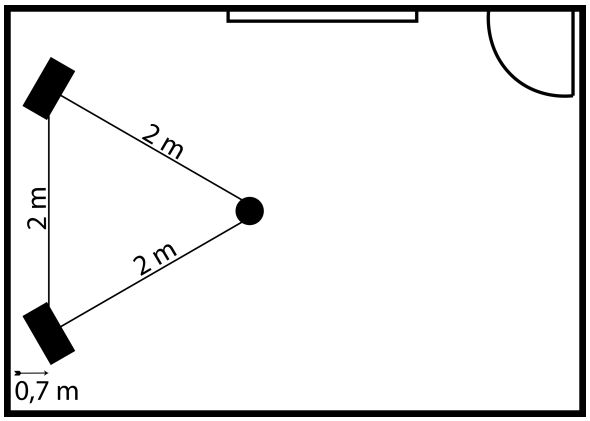


Abb. 39: Messaufbau Grundriss

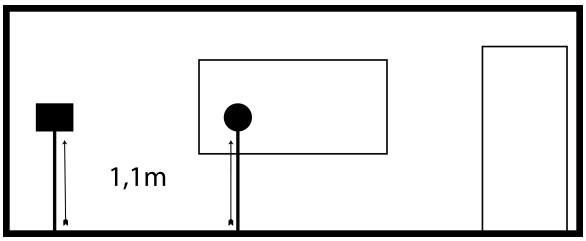


Abb. 40: Messaufbau Seitenansicht

Anhand der Messergebnisse lässt sich jeder Optimierungsschritt nachvollziehen. Alle Maßnahmen lassen sich so bewerten und vergleichen. Um verschiedene raumakustische Kriterien beurteilen zu können, wird das Ergebnis der Messung mit verschiedenen grafischen Kurven dargestellt:

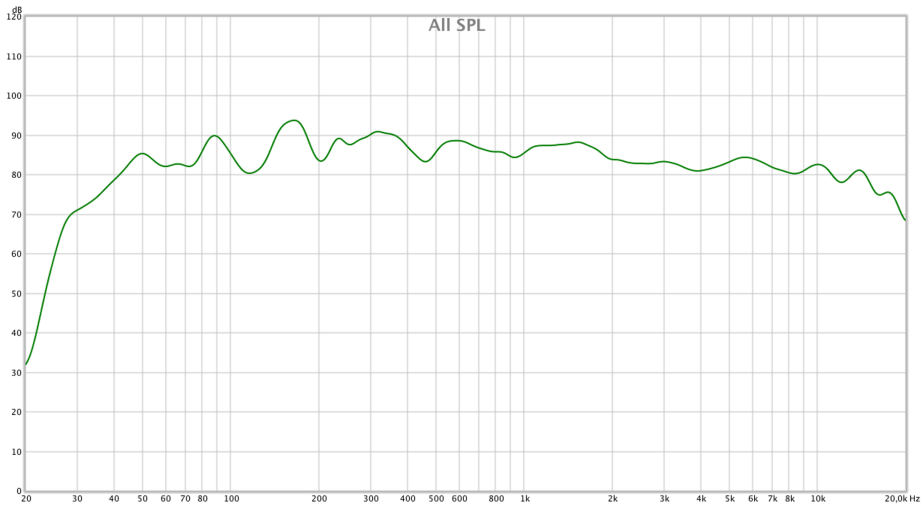


Abb. 41: Betriebsschallpegelkurve (Ausgangssituation)

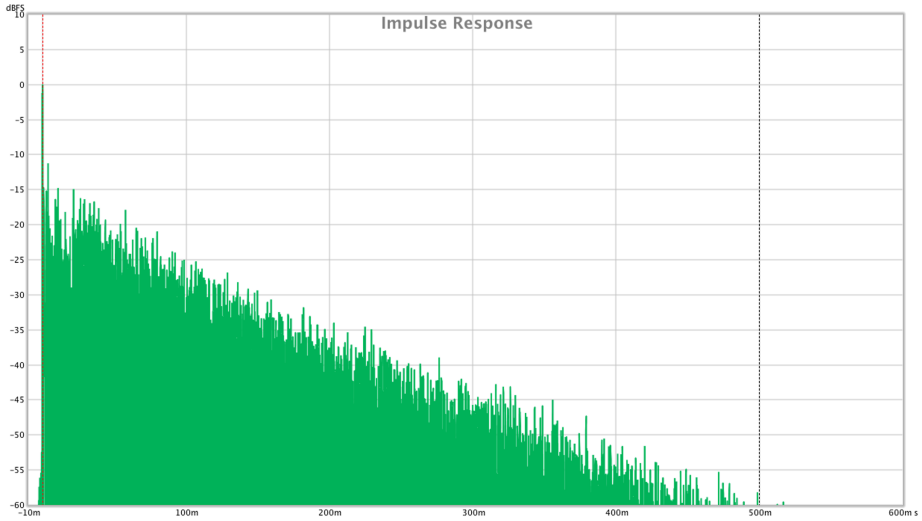


Abb. 42: Raumimpulsantwort (Ausgangssituation)

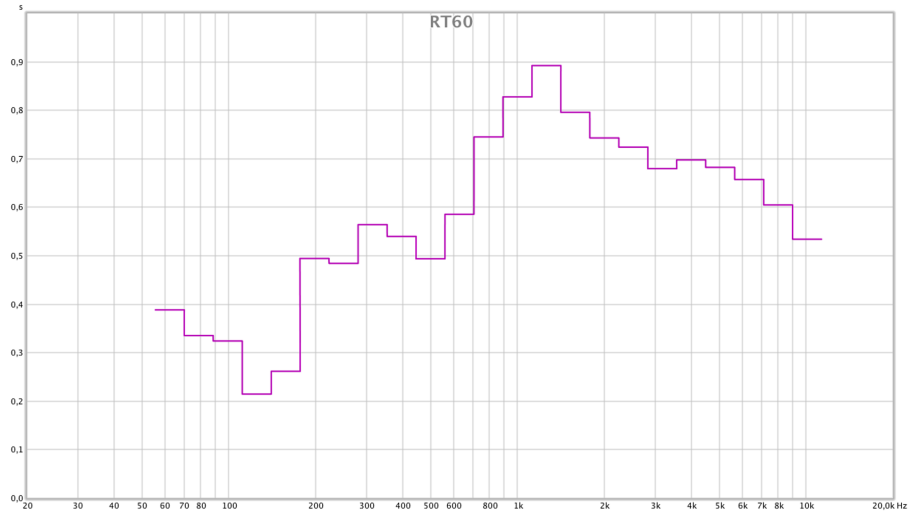


Abb. 43: Nachhallzeit-Kurve (Ausgangssituation)

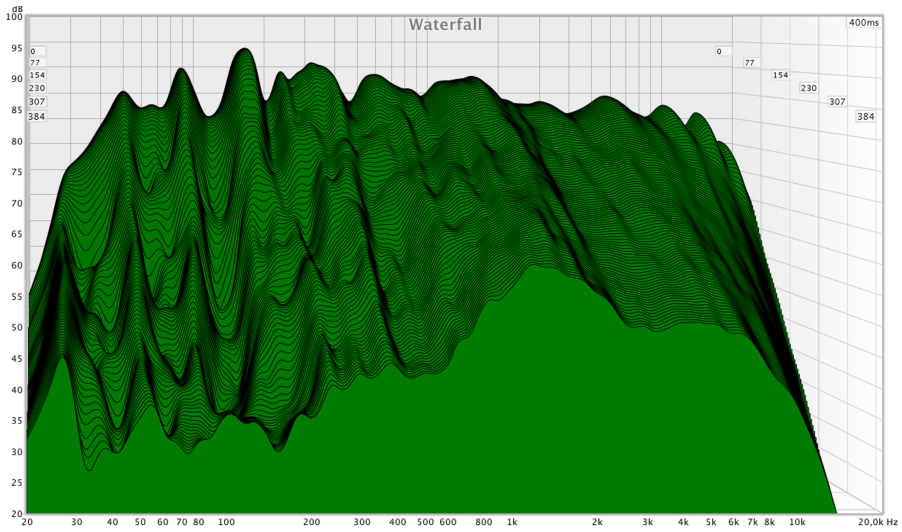


Abb. 44: Wasserfalldiagramm (Ausgangssituation)

5.3 Raumakustische Optimierung

Die akustischen Maßnahmen zur Optimierung der Abhörsituation werden basierend auf der ersten Messung, den berechneten Raummoden und den theoretischen Grundlagen der Schallfeldausbreitung geplant:

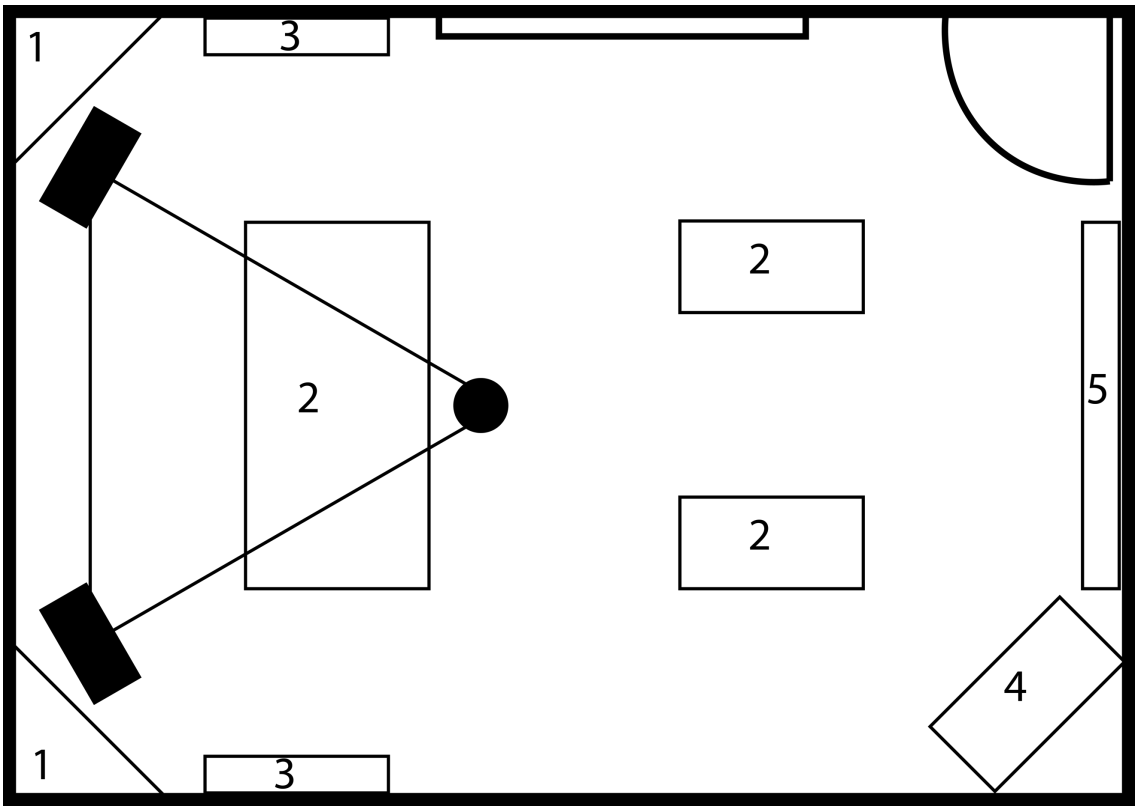


Abb. 45: Planungsskizze

Die Planung der raumakustischen Optimierung stützt auf dem LEDE-Prinzip (Live End / Dead End). Dabei wird durch Absorber im der Bereich der Lautsprecher eine reflexionsfreie Zone an der Abhörposition geschaffen und der hintere Bereich der Regie wird diffus reflektierend ausgelegt. Bassfallen und ein Helmholtzresonator unterdrücken außerdem Raumresonanzen. Das Ziel ist es, ein möglichst großes Initial Time Delay Gap sowie einen neutralen Diffusschall zu schaffen.[155]

[155] T. GÖRNE, *Tontechnik*, S. 108.f

5.3.1 Akustikmodule

1: Bassfallen

Abb. 46: Bassfallen

2: Deckenabsorber

Abb. 47: Deckenabsorber

Abb. 48: Deckenabsorber

3: Breitbandabsorber

Abb. 49: Breitbandabsorber

4: Helmholtzresonator

Der Helmholtzresonator **5** wurde auf $86\,\mathrm{Hz}$, die Frequenz der Raummode (3/0/0) gestimmt. Bei einem Volumen von $0{,}26\,m^2$, einer Plattentiefe von $0{,}5\,cm$, einer Tunnelöffnung von $5\,cm$ und einer Mündungskorrektur von $1{,}23$ ergeben sich 10 Tunnelöffnungen.

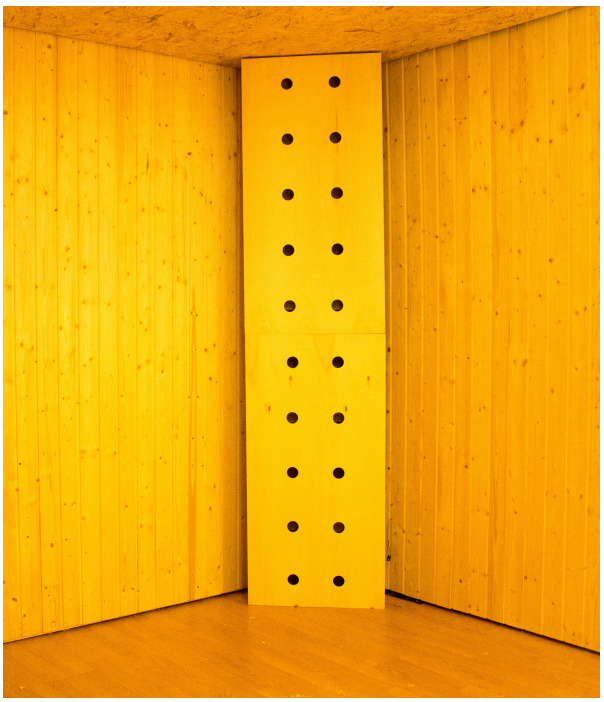


Abb. 50: Helmholtzresonator

5: Quadratic Residue Diffusor

Abb. 51: Quadratic Residue Diffusor

Um Reflexionen an der Rückwand diffus zu streuen, wird ein Quadratic Residue Diffusor angebracht. Mit Hilfe der Software QRDude lassen sich verschiedene QRD-Modelle berechnen:

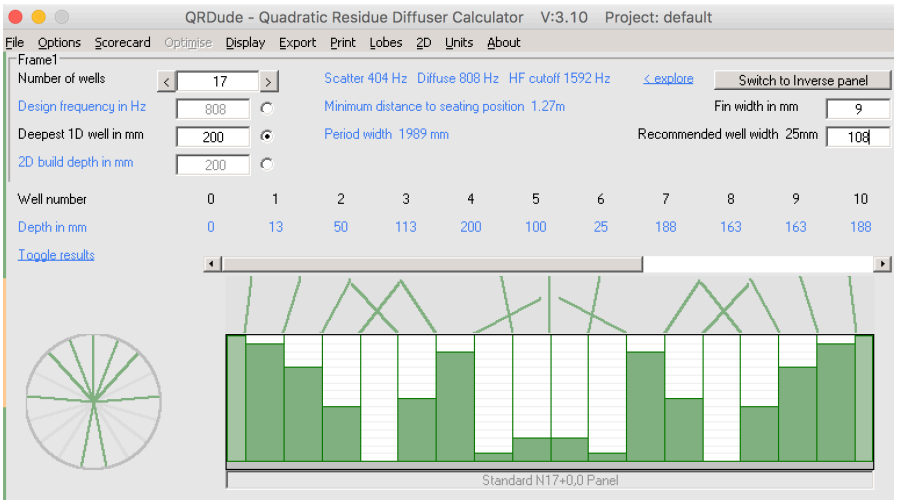


Abb. 52: QRDude Software Interface

5.3.2 Digitale Raumentzerrung

Zusätzlich zu der Optimierung durch Akustikmodule wird der Raum digital entzerrt. Die Software Sonarworks Reference 3 verfügt über einen eigenen Messablauf bei dem an 24 verschiedenen Stellen im Raum gemessen wird. Das Ergebnis ist eine Korrekturkurve, die als Plug-In in den Abhörweg eingespeist wird. Der Equalizer arbeitet mit linear-phasigen Filtern und ermöglicht so eine Amplitudenkorrektur ohne die Gruppenlaufzeit des Signals zu verändern.

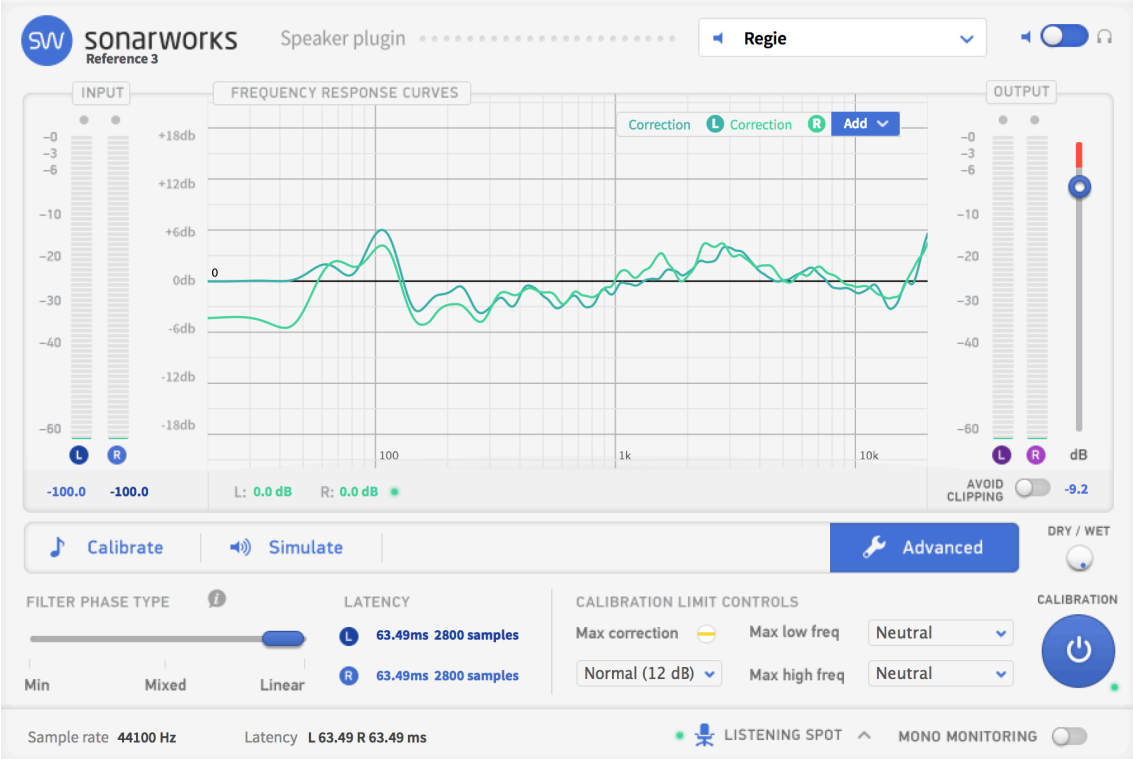


Abb. 53: Sonarworks Reference 3 Interface

5.3.3 Ergebnisse

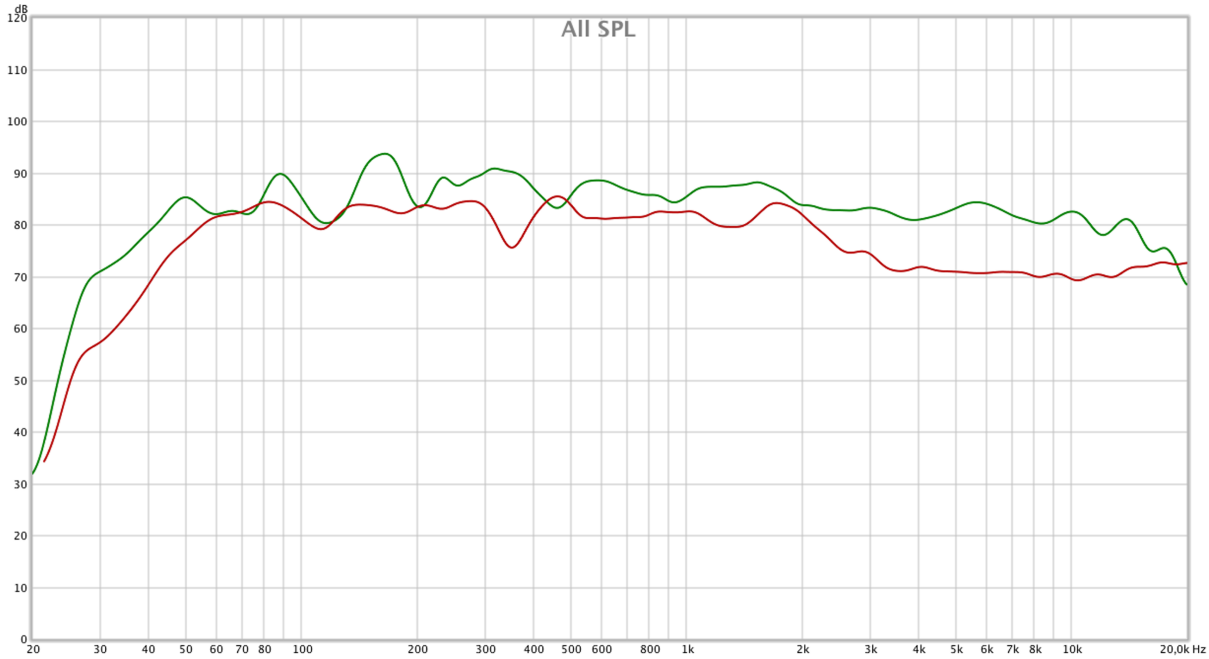


Abb. 54: Betriebsschallpegel vor (grün) und nach (rot) der raumakustischen Optimierung

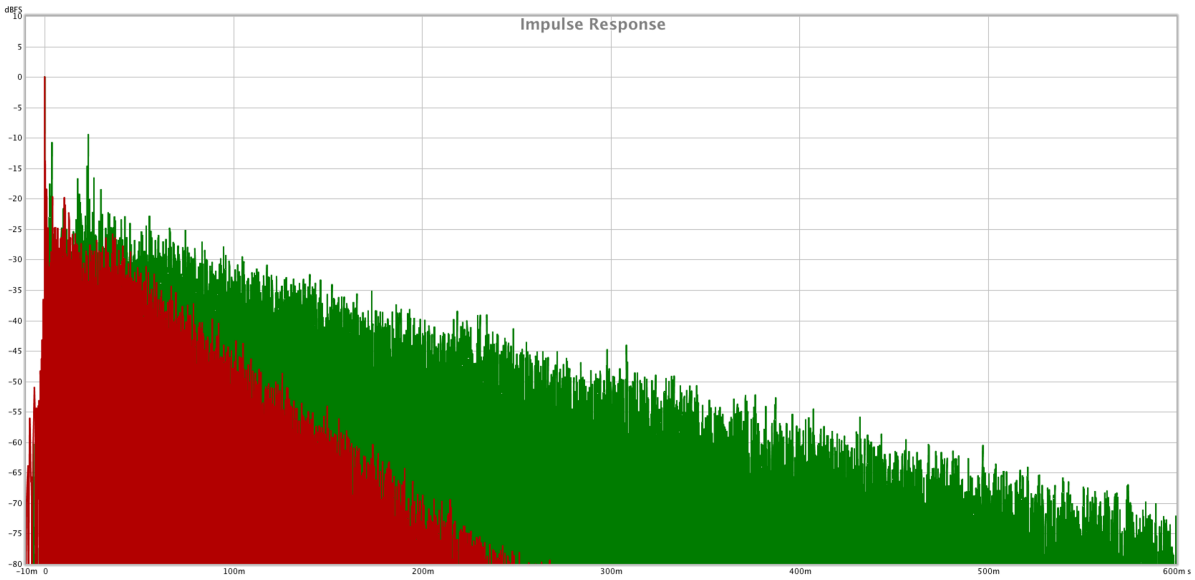


Abb. 55: Impulsantwort vor (grün) und nach (rot) der raumakustischen Optimierung

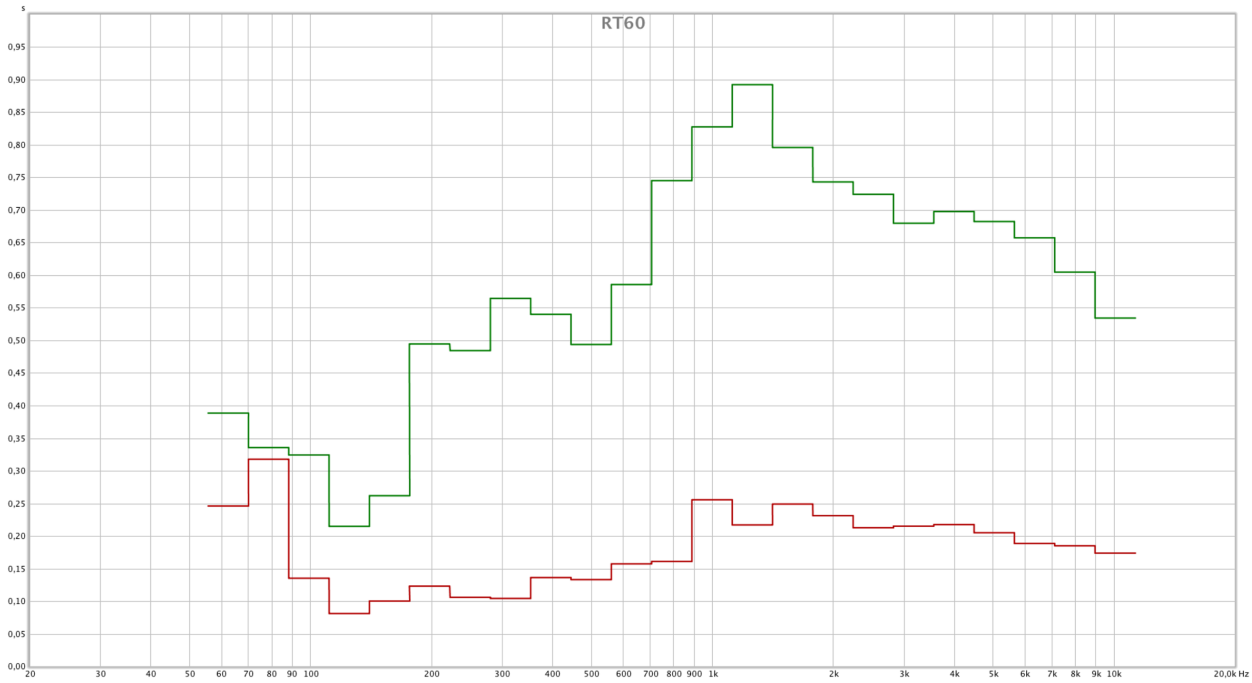


Abb. 56: Nachhallzeit T vor (grün) und nach (rot) der raumakustischen Optimierung

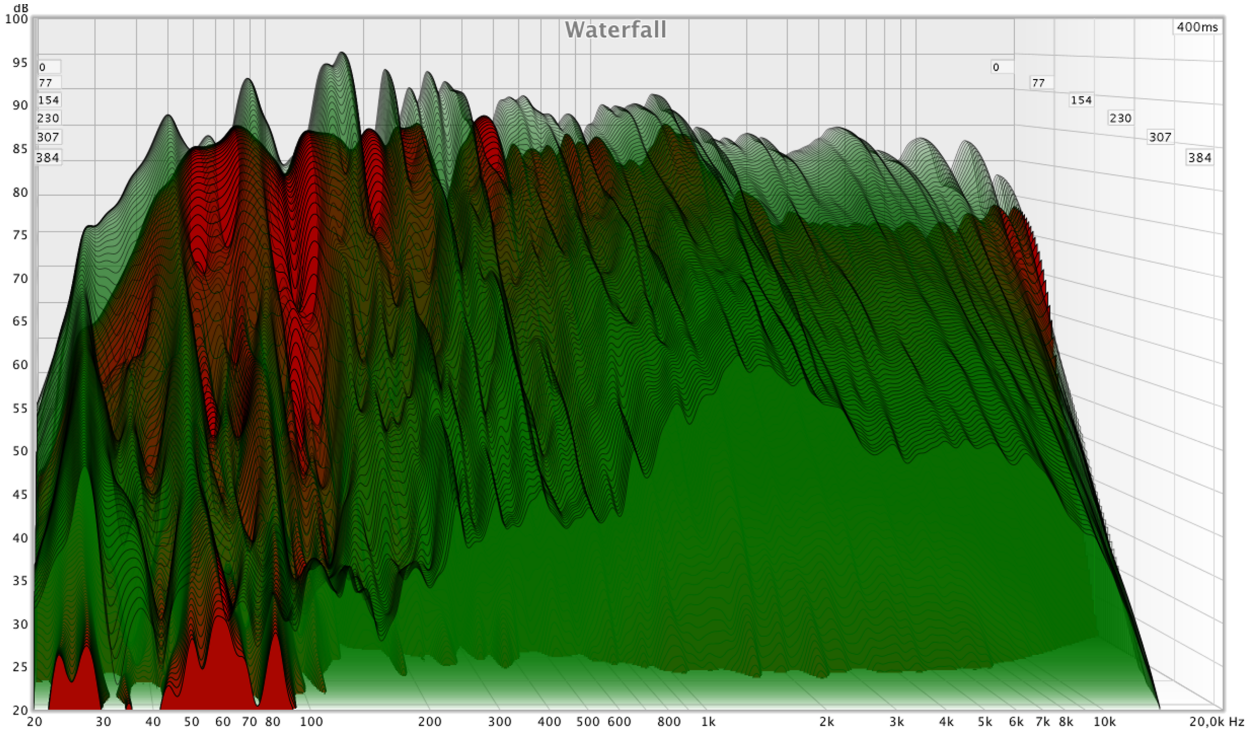


Abb. 57: Wasserfalldiagramm vor (grün) und nach (rot) der raumakustischen Optimierung

6 Fazit

In dieser Arbeit wurde gezeigt, welche raumakustischen Kriterien für eine objektive Beurteilung von Audiosignalen in einer Tonregie erfüllt werden müssen und wie diese umgesetzt werden können.

Abb. 54 zeigt den Betriebsschallpegel vor und nach der Optimierung. Es ist deutlich zu sehen, dass der Frequenzgang allgemein geglättet wurde und einzelne Peaks, wie beispielsweise bei $180\ Hz$, verschwunden sind. Lediglich bei $350\ Hz$ gibt es noch eine Absenkung um ca. $5\ dB$. Dieser Einbruch könnte mit dem Kammfilter zusammenhängen, der bei einem Wandabstand von $0{,}5\ m$ entsteht. Die restlichen Abweichungen befinden sich innerhalb der Toleranzgrenzen der SSF-01 und auch das Absinken der Frequenzen ab $2\ kHz$ stimmt mit dieser Empfehlung überein.

Die sehr flache und ungleichmäßige Abfall Impulsantwort vor der Optimierung in Abb. 55 lässt auf eine zu lange Nachhallzeit schließen. Der Diffusschallpegel braucht mehr als $600\ ms$ um abzuklingen. Außerdem sieht man im Bereich von $30\ ms$ überaus starke frühe Reflexionen, die die Lokalisationsschärfe verschlechtern und einen ungewollten Raumeindruck hinterlassen. Im Gegensatz dazu bildet die Impulsantwort nach der Optimierung einen großen Initial Time Delay Gap und einen gleichmäßigen Abfall des Diffusschallpegels.

Abb. 56 zeigt die Nachhallzeit der einzelnen Terzbänder vor und nach der Optimierung. Man sieht, dass die Nachhallzeit fast über das gesamte Frequenzspektrum gleichmäßig abgesenkt werden konnte. Lediglich im Bereich von $70\ Hz$ bis $90\ Hz$ konnte nur eine schwache Verbesserung erzielt werden. Zur Überprüfung der Toleranzgrenzen der SSF-01 wird das arithmetische Mittel der Nachhallzeiten gebildet. Da es $0{,}229\ s$ beträgt, befinden sich alle Abweichungen innerhalb der Toleranzgrenzen.

Das in Abb. 57 gezeigt Wasserfalldiagramm spiegelt die vorherigen Aussagen wieder. Der Betriebsschallpegel sowie die Nachhallzeit weisen nach der Optimierung einen deutlich gleichmäßigeren Verlauf. Jedoch ist auch hier ein Problem bei tiefen Frequenzen zwischen $40\ Hz$ und $90\ Hz$ erkennbar.

Mit Hilfe der theoretischen Grundlagen zur Schallausbreitung und den verschiedenen Maßnahmen zur raumakustischen Optimierung konnte ein Konzept erstellt werden, das den Toleranzen der SSF-01 entspricht. Es wurde gezeigt, dass ein Raum, der nicht als Tonregie geplant wurde, nachträglich so optimiert werden kann, dass er eine objektive Beurteilung von Audiosignalen möglich macht.

Die Toleranzen der SSF-01 stellen jedoch nur eine Mindestanforderung dar. Die Tonregie weist nach wie vor Probleme im tieffrequenten Bereich auf. Diese zu beheben erfordert viel größere Mengen an absorbierendem Material und/oder zusätzliche Resonatoren. Eine weitere Möglichkeit um diesen Frequenzbereich zu beeinflussen wäre der Einsatz von aktiven Absorbern.

Anhang

Inhalt der Anhangs-CD:

- Bachelor-Arbeit als PDF
- Messprotokoll
- Messergebnisse
- Tabelle der berechneten Raummoden
- Bilder

Literaturverzeichnis

Ahnert, W. – Tennhardt, H.-P., *Raumakustik*, in S. Weinzierl (Hg.), *Handbuch der Audiotechnik* (*VDI-Buch*), Springer: Berlin/Heidelberg, 2008, S. 181–266

Cox, T. J. – D'Antonio, P., *Acoustic absorbers and diffusers : theory, design and application*, Taylor & Francis Ltd: London, 2009

Cremer, L. – Müller, H. A., *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd.1, Geometrische Raumakustik, Statistische Raumakustik, Psychologische Raumakustik*, Hirzel: Stuttgart, 1978

Dickreiter, M. – Dittel, V. – Hoeg, W. – Wöhr, M., *Handbuch der Tonstudiotechnik*, De Gruyter Saur: Berlin/Boston, 2014

Ellermeier, W. – Hellbrück, J., *Hören – Psychoakustik – Audiologie*, in S. Weinzierl (Hg.), *Handbuch der Audiotechnik*, Springer: Berlin/Heidelberg, 2008, S. 41–85

Everest, F. A., *The master handbook of acoustics*, McGraw-Hill: New York, 2015

Friesecke, A., *Die Audio-Enzyklopädie: ein Nachschlagewerk für Tontechniker*, Walter de Gruyter: Berlin/Boston, 2007

Friesecke, A., *Studio Akustik: Konzepte für besseren Klang*, PPV Medien: Bergkirchen März, 2012

Fuchs, H., *Schallabsorber und Schalldämpfer*, Springer: Berlin/Heidelberg, 2010

Fuchs, H. V., *Raum-Akustik und Lärm-Minderung*, Springer: Berlin/Heidelberg, 2017

Görne, T., *Tontechnik*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG: München, 2011

Görne, T., *Tontechnik: Hören, Schallwandler, Impulsantwort und Faltung, digitale Signale, Mehrkanaltechnik, tontechnische Praxis*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG: München, 2014

Höfker, P. D. G. V., *Einführung in die Akustik*, in W. Willems (Hg.), *Lehrbuch der Bauphysik*, Springer Fachmedien: Wiesbaden, 2013, S. 423–439

Höfker, P. D. G. V., *Raumakustik*, in W. Willems (Hg.), *Lehrbuch der Bauphysik*, Springer Fachmedien: Wiesbaden, 2013, S. 440–470

Kuttruff, H., *Akustik*, Hirzel: Stuttgart/Leipzig, 2004

Lerch, R. – Sessler, G. – Wolf, D., *Technische Akustik*, Springer: Berlin/Heidelberg, 2009

Maschke, D.-I. C. – Jakob, D.-I. A., *Psychoakustische Messtechnik*, in M. Möser (Hg.), *Messtechnik der Akustik*, Springer: Berlin/Heidelberg, 2009, S. 599–642

Meyer, J., *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*, PPV Medien: Bergkirchen, 2015

Möser, M. (Hg.), *Messtechnik der Akustik*, Springer: Berlin/Heidelberg, 2010

Müller, G. – Möser, M. (Hgg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik*, Springer: Berlin/Heidelberg, 2016

Nocke, C., *Raumakustik im Alltag: Hören - Planen - Verstehen.*, Fraunhofer IRB Verlag: Stuttgart, 2017

Römer, C., *Schall und Raum: eine kleine Einführung in die Welt der Akustik*, VDE-Verlag: Berlin/Offenbach, 1994

Sinambari, G. R. – Sentpali, S., *Ingenieurakustik*, Springer Fachmedien: Wiesbaden, 2014

Veit, I., *Technische Akustik*, Vogel: Würzburg, 2005

Weinzierl, S. (Hg.), *Handbuch der Audiotechnik*, Springer: Berlin/Heidelberg, 2008

Willems, W. M. (Hg.), *Lehrbuch der Bauphysik - Schall - Wärme - Feuchte - Licht | Wolfgang M Willems* | Springer: Berlin/Heidelberg, 2012.

Abbildungenverzeichnis

1.	Longitudinalwelle mit Druckdifferenzen des Mediums	Willems, S.423
2.	Kurven gleicher Lautstärke	Dickreiter, S.121
3.	Frequenzbewertete Schalldruckpegel	Möser, S.58
4.	Zusammenhang zwischen Tonheit und Frequenz	Lerch, S.199
5.	Binaurales Hören	Everest, S.59
6.	Spiegleschallquelle	Everest, S.98
7.	Reflexion an einer rechtwinkligen Ecke	Dickreiter, S.18
8.	1. Die geometrische Reflexion, für $b < \lambda$:	Weinzierl, S.227
9.	2. Die gerichtete Reflexion, für $b > \lambda$:	Weinzierl, S.227
10.	Die diffuse Reflexion, für $b \approx \lambda$	Weinzierl, S.227
11.	Spiegelschallquellen	Everest, S. 98
12.	Spiegelschallquellen eines Rechteckraumes	Möser, S.234
13.	Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schallquelle	Weinzierl, S.184
14.	Kammfiltereffekt	Everest, S.142
15.	Pegelverteilung der Mode (1,1,0)	Fuchs, S.10
16.	Dreidimensionale Darstellung der niedrigsten Moden im Rechteckraum	Fuchs, S.11
17.	Eigenfrequenzverteilung und Eigenfrequenzdichte	Weinzierl, S.288
18.	Beispiele für die unterste Grenzfrequenz und Schröder-Frequenz	Willems, S. 439
19.	Toleranzgrenzen für die Nachhallzeit von Regieräumen	Weinzierl, S.296
20.	Anzahl der Moden in Terzbänder zur Überprüfung des Bonello-Kriteriums	Everest, S.250
21.	Toleranzgrenzen für die Betriebsschallpegelkurve	Weinzierl, S.297
22.	Aufbau zur Messung der Impulsantwort und der Übertragungsfunktion	Weinzierl, S.1094
23.	Impulsantwort eines Raumes und die dazugehörige Übertragungsfunktion	Weinzierl, S.18
24.	Energy Time Curve	Everest, S.374
25.	Spektrogramm und Zerfallsspektrum	Weinzierl, S.478
26.	Zweikanalstereofone Wiedergabeanordnung nach DIN 15996	Weinzierl, S.611
27.	Druckverteilung der ersten drei axialen Moden	Everest, S.334
28.	Schallabsorptionsgrad poröser Materialien	Weinzierl, S.235
29.	Modell eines Masse-Feder-System und äquivalenter Plattenresonator	Willems, S.448
30.	Hohlraumbedämpfter Plattenresonator	Everest, S.204
31.	Frequenzgang des Absorptionsgrades eines Plattenresonators	Sinambari, S.307
32.	Schematischer Aufbau eines Maximalfolgendiffusors	Everest, S.258
33.	Schematischer Aufbau eines QRD	Everest, S.260
34.	Tonregie Grundriss	eigene Grafik
35.	Tonregie Seitenansicht	eigene Grafik
36.	Eigenfrequenzverteilung (berechnet)	eigene Grafik
37.	Bonelle Kriterium (berechnet)	eigene Grafik
38.	Ausgangssituation – Lautsprecherposition	eigenes Foto
39.	Messaufbau Grundriss	eigene Grafik
40.	Messaufbau Seitenansicht	eigene Grafik
41.	Betriebsschallpegelkurve (Ausgangssituation)	eigene Grafik
42.	Raumimpulsanwort (Ausgangssituation)	eigene Grafik
43.	Nachhallzeit-Kurve (Ausgangssituation)	eigene Grafik
44.	Wasserfalldiagramm (Ausgangssituation)	eigene Grafik
45.	Planungsskizze Grundriss	eigene Grafik
46.	Bassfallen	eigenes Foto
47.	Deckenabsorber	eigenes Foto
48.	Deckenabsorber	eigenes Foto

49.	Breitbandabsorber	eigenes Foto
50.	Helmholtzresonator	eigenes Foto
51.	Quadratic Residue Diffusor	eigenes Foto
52.	QRDude Software Interface	eigenes Foto
53.	Sonarworks Reference 3 Interface	eigenes Foto
54.	Betriebsschallpegelkurve vor und nach der Optimierung	eigene Grafik
55.	Impulsantwort vor und nach der Optimierung	eigene Grafik
56.	Nachhallzeit vor und nach der Optimierung	eigene Grafik
57.	Wasserfalldiagramm vor und nach der Optimierung	eigene Grafik

Formelverzeichnis

1.	Schallgeschwindigkeit	Nocke, S.21
2.	Schalldruckpegel	Dickreiter, S.15
3.	Absorptionsgrad	Görne, S.82
4.	Äquivalente Absorptionsfläche	Görne, S.84
5.	Nachhallzeit	Dickreiter, S.36
6.	Hallradius	Weinzierl, S.183
7.	Frequenz	Weinzierl, S.282
8.	Eigenfrequenz	Weinzierl, S.284
9.	Berechnung aller Moden	Weinzierl, S.284
10.	1. Grenzfrequenz	Fuchs, S.11
11.	2. Grenzfrequenz	Görne, S.80
12.	3. Grenzfrequenz	Everest, S.229
13.	Resonanzfrequenz eines Masse-Feder-Systems	Friesecke, S.157
14.	Resonanzfrequenz eines Plattenresonators	Görne, S.93
15.	Resonanzfrequenz eines Helmholtzresonators	Friesecke, S.159
16.	Tiefenfaktor eines Diffusorbodens	Friesecke, S.173
17.	Untere Grenzfrequenz eines QRD	Friesecke, S.175

Formelzeichen

f	Frequenz	Hz
p	Druck	Pa
p_0	Bezugsschalldruck	Pa
$\vec{v}$	Schallschnelle	$\frac{m}{s}$
v_0	Bezugsschallschnelle	$\frac{m}{s}$
Z_0	Schallkennimpedanz der Luft	$N * \frac{s}{m^3}$
c	Schallgeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
λ	Wellenlänge	m
T	Periodendauer	s
L_P	Schalldruckpegel	dB
α	Schallabsorptionsgrad	
L_S	Lautstärkepegel	$phon$

S	Lautheit	$sone$
τ	Laufzeitdifferenz	s
θ_i	Einfallswinkel	$\circ$
θ_r	Reflexionswinkel	$\circ$
b	Linearabmessung	m
E_R	reflektierte Energie	J
E_0	auftreffende Energie	E_R
A	Absorptionsvermögen	
S	Fläche	m^2
T	Nachhallzeit	s
V	Volumen	m^3
r_H	Hallradius	m
d	Abstand	m
f_n	Eigenfrequenz	Hz
n	Ordnung	
l	Raumabmessung	m
f_1	1. Grenzfrequenz	Hz
f_2	Schröder-Frequenz	Hz
f_3	3. Grenzfrequenz	Hz
T_m	arithmetischer Mittelwert von T	s
δ	Öffnungswinkel	$\circ$
R_S	spezifischer Strömungswiderstand	$\frac{Pa*s}{m}$
r	längenbezogener Strömungswiderstand	$\frac{Pa*s}{m^2}$
f_{res}	Resonanzfrequenz Masse-Feder-System	Hz
m	Masse	kg
C	Nachgiebigkeit der Feder	$\frac{m}{N}$
d	Dämmstoffdicke	m
m'	flächenbezogene Masse	$\frac{kg}{m^2}$
d_L	Rahmentiefe	cm
S	Gesamtoberfläche aller Öffnungen	m^2
k	Mündungskorrektur	
r	Tunnel-Radius	m^2
d	Tiefenfaktor eines QRD	
p	Anzahl der Fächer eines QRD	
f_{min}	Untere Grenzfrequenz eines QRD	Hz
t_{max}	absolute Tiefe eines QRD	m

Eidesstattliche Versicherung

Name: Bloch	Vorname: Lennart
Matrikel-Nr.: 27500	Studiengang: AM7

Hiermit versichere ich, Lennart Bloch, an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel Optimierung der Abhörsituation in einem Projektstudio selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinne nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und prüfungsrechtlichen Folgen (§ 26 Abs. 2 Bachelor-SPO bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der Hochschule der Medien Stuttgart) sowie die strafrechtlichen Folgen (siehe unten) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Auszug aus dem Strafgesetzbuch (StGB)

§ 156 StGB Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer von einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Ort, Datum	Unterschrift