

Optimierung der Abhörsituation

für den kleinen Raum und das kleine Budget

Bachelorarbeit im Studiengang Audiovisuelle Medien SS2021

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelors of Engineering

Vorgelegt von Shahd Syoufi

Matrikel-Nr.: 35815

am 31.08.2021

Erstprüfer: Prof. Oliver Curdt

Zweitprüfer: Heiko Schulz

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Shahd Syoufi, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Optimierung der Abhörsituation – für den kleinen Raum und das kleine Budget“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn 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 ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§24. Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester)) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Stuttgart, 31.08.2021

Shahd Syoufi

Genderhinweis

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten sind dabei ausdrücklich stets eingeschlossen.

Abstract

Digital music production has revolutionized the possibilities for audio enthusiasts and producers around the world. Nowadays basically everyone can afford and acquire the necessary tools and knowledge to create or mix music or other kinds of audio content and the number of productions made at home continues to grow. Nevertheless, many home-studio producers who want to accomplish commercially-ready audio productions are troubled with one big problem – they are limited to their mostly small rooms that often fulfill multiple purposes and they lack the necessary knowledge about the acoustics of these small rooms. Many try to treat them with cheap materials without considering learning about the physics of acoustics first. Others just focus on investing in high quality hardware such as microphones or preamps. This implies that the importance of good room acoustics for the creation of high-quality audio content is often incredibly underestimated and knowledge about small rooms is hard to obtain. Although there is a sheer endless amount of literature about acoustics or how to build a professional studio from ground up, only a few sources deal with the special situation of small rooms and small budgets probably most producers face - especially in the beginning of their careers.

This work delivers the necessary knowledge about acoustics and how to treat problems with a small budget. It seeks to give an overview in how everyone can optimize their home-studios by using software to determine the problems and applying acoustic elements in an effective and pragmatic approach. A practical part in the end demonstrates how the author analyzed and treated her own sleeping room with different acoustic materials to achieve clear and precise sound at her mixing spot.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	1
Genderhinweis	1
Abstract	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	5
1 Einleitung	7
1.1 Motivation	7
1.2 Problemstellung	7
1.3 Zielsetzung	9
2 Akustische Grundlagen.....	10
2.1 Schallausbreitung und Grundbegriffe	10
2.2 Schallreflexion.....	11
2.2.1 Schallreflexion an ebenen Flächen.....	11
2.2.2 Schallreflexion an gekrümmten Flächen	13
2.2.3 Schallreflexion an unregelmäßig geformten Flächen (Diffusion).....	14
2.3 Schallbeugung.....	14
2.4 Schallabsorption	14
2.4.1 Absorptionskoeffizient α	15
2.4.2 Frequenzabhängigkeit der Schallabsorption.....	16
3 Messtechnische Grundlagen.....	18
3.1 Schalldruckpegel	18
3.2 Messsignale	19
3.2.1 Impuls.....	19
3.2.2 Rauschen.....	19
3.2.3 Sinussweep	20
4 Raumakustik der kleinen Räume	21
4.1 Das Schallfeld.....	21
4.2 Direktschall	22
4.3 Erste Reflexionen	22
4.4 Flatterechos	26
4.5 Nachhall?.....	26
4.5.1 Nachhallzeit vs. Abklingzeit.....	27
4.6 Raummoden.....	29
5 Maßnahmen zur Optimierung der Abhörposition	31
5.1 Saubere Stereoabbildung.....	31
5.2 Vermeidung von Raummoden	32

5.3	<i>Richtige Aufstellung der Monitore</i>	33
5.3.1	Ausrichtung	33
5.3.2	Entkopplung	34
5.3.3	Abstand zu den Raumbegrenzungen	35
6	Konzepte für die Raumgestaltung	37
6.1	<i>Live-End-Dead-End-Konzept (LEDE™)</i>	37
6.2	<i>Non-Environment-Konzept</i>	37
6.3	<i>Reflection-Free Zone</i>	38
6.4	<i>Controlled Image Design</i>	38
7	Maßnahmen zur Optimierung der Raumakustik	39
7.1	<i>Raumakustikmessungen</i>	39
7.1.1	Impulsantwort (IR) und Envelope-Time Curve (ETC)	39
7.1.2	Übertragungsfunktion	40
7.1.3	Wasserfalldiagramm	40
7.2	<i>Behandlung von Raummoden</i>	41
7.2.1	Bassfallen	42
7.2.2	Helmholtzresonatoren	42
7.3	<i>Behandlung der ersten Reflexionen</i>	44
7.3.1	Auswahl des passenden Konzepts	44
7.3.2	Auswahl passender Absorbermaterialien und -dicken	45
7.4	<i>Behandlung von Flatterechos / Diffusion</i>	46
7.5	<i>Einsatz von EQ</i>	46
8	Praktischer Teil	48
8.1	<i>Erfassung der Gegebenheiten</i>	48
8.2	<i>Auswahl der Abhörposition</i>	49
8.3	<i>Durchführung der raumakustischen Messungen</i>	50
8.3.1	Ausrüstung und Einstellungen der Messsoftware	50
8.3.2	Messergebnisse des Rohraums	52
8.3.3	Interpretation der Messergebnisse des Rohraums	53
8.4	<i>Selbstbau der Akustik-Absorber</i>	54
8.5	<i>Kalkulation des Budgets</i>	55
8.6	<i>Anordnung der Akustikpaneele</i>	56
8.7	<i>Ergebnisse und Diskussion</i>	57
9	Fazit	59
	Literaturverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER AUSBREITUNG EINER SCHALLWELLE IN LUFT ZU 15 AUF EINANDER FOLGENDEN ZEITPUNKTEN. (DICKREITER, ET. AL., 2014, S. 10)	10
Abb. 2: SCHALLREFLEXION AN EINER EBENEN FLÄCHE UND AN EINER RECHTWINKLIGEN ECKE. (DICKREITER, ET. AL., 2014, S. 18)...	12
Abb. 3: SCHALLREFLEXION ZWISCHEN ZWEI PARALLELEN WÄNDEN. (EVEREST & POHLMANN, 2015, S. 98)	12
Abb. 4: DIE VERSCHIEDENEN FÄLLE DER SCHALLREFLEXION AN EINER GEKRÜMMTEN FLÄCHE. (DICKREITER, ET. AL., 2014, S. 20-21)	13
Abb. 5: DIFFUSITÄT DURCH UNREGELMÄßIG GEFORMTE FLÄCHE. (FRIESECKE, 2014, S. 31)	14
Abb. 6: ABSORPTIONSKOEFFIZIENTEN EINES TEPPICHS IN TERZABSTÄNDEN (LINKS) UND OKTAVABSTÄNDEN (RECHTS). (FRIESECKE, 2014, S. 34)	17
Abb. 7: KAMMFILTER FÜR DREI UNTERSCHIEDLICHE ABSORPTIONSGRADE DER REFLEKTIERENDEN FLÄCHE IM FALL DER EBENEN WELLENAUSBREITUNG. DIE FREQUENZ IST AUF DIE FREQUENZ DER ERSTEN AUSLÖSCHUNG NORMIERT. (MAIER, 2008, S. 283)	24
Abb. 8: DRUCKVERTEILUNG IN STEHENDEN WELLEN ZWISCHEN ZWEI PARALLELEN WÄNDEN. (DICKREITER, ET. AL., 2014, S. 19) ...	29
Abb. 9: AXIALE MODEN 1. BIS 3. ORDNUNG. (FRIESECKE, 2014, S. 64)	30
Abb. 10: DAS STEREODREIECK (GLEICHSEITIGES DREIECK). (IZHAKI, 2008, S. 89)	31
Abb. 11: FREQUENZGANG AN EINEM ABHÖRPUNKT MITTIG ZWISCHEN ZWEI WÄNDEN. ERSTE RAUMMODE BEI 40HZ. (SENIOR, 2019, S. 23)	33
Abb. 12: FREQUENZGANG AN EINEM ABHÖRPUNKT 75CM HINTER DER MITTE. ERSTE RAUMMODE BEI 40HZ. (SENIOR, 2019, S. 23)	33
Abb. 13: ABHÖRRAUM MIT RFZ UND BREITBAND-DIFFUSOREN (COX & D'ANTONIO, 2017, S. 53)	38
Abb. 14: WASSERFALLDIAGRAMM UND EINE ZERLEGUNG IN DIE TERZBÄNDER (FRIESECKE, 2014, S. 888).....	41
Abb. 15: PRINZIPIALBAU EINES HELMHOLZRESONATORS (AHNERT & TENNHARDT, 2008, S. 238).....	43
Abb. 16: SKIZZE DES ROHRAUMS MIT ABHÖRPOSITION.....	49
Abb. 17: SCREENSHOT DER EINSTELLUNGEN IN REW	51
Abb. 18: SCREENSHOT DES MESSUNGSFENSTERS IN REW.....	51
Abb. 19: FREQUENZGANG DES ROHRAUMS	52
Abb. 20: IMPULSANTWORT DES ROHRAUMS	52
Abb. 21: WASSERFALLDIAGRAMM DES ROHRAUMS	52
Abb. 22: ANORDNUNG DER AKUSTIKPANELEE IM ABHÖRBEREICH	56
Abb. 23: FREQUENZGANG NACH ANORDNUNG ALLER AKUSTIKPANELEE (AUßER TISCHABSORBER).....	57
Abb. 24: IMPULSANTWORT NACH ANORDNUNG ALLER AKUSTIKPANELEE (AUßER TISCHABSORBER)	57
Abb. 25: DAS WASSERFALLDIAGRAMM NACH ANORDNUNG ALLER AKUSTIKPANELEE AUßER TISCHABSORBER.....	58
Abb. 26: FINALER FREQUENZGANG NACH EINSATZ ALLER AKUSTIKPANELEE.....	59

Tabellenverzeichnis

TAB. 1: ABSORPTIONSGRADE VERSCHIEDENER MATERIALIEN VON WANDOBERFLÄCHEN (DICKREITER, ET. AL., 2014, S. 24).....	16
TAB. 2: VERGLEICH ZWISCHEN WEIßEM UND ROSA RAUSCHEN.....	20
TAB. 3: KOSTENKALKULATION DER EINRICHTUNG DES GESAMTEN HOME-STUDIOS	55

1 Einleitung

1.1 Motivation

Während der COVID-19-Pandemie im Jahr 2020 wurde der Zugang zu den Studios und sonstigen Räumlichkeiten an meiner Hochschule stark eingeschränkt. Studierende mussten überwiegend von zuhause aus sogenannte Online-Semester absolvieren. Ich war damals sehr am Thema Musikmischung interessiert, konnte jedoch nicht in einer professionellen Studio-Umgebung arbeiten, sondern musste in meinem Schlafzimmer mischen. Dort hatte ich zwar Studio-Monitore, aber mein Zimmer war akustisch nicht optimiert. Dröhnen im Bass und dumpfe Mitten störten mich und so versuchte ich in einem ersten Schritt, den Klang mit einem Programm zur Raumoptimierung durch EQ zu verbessern. Anfangs war ich vom Ergebnis positiv überrascht – jedoch erfuhr ich bald darauf, dass solche Maßnahmen allein noch keine Lösung darstellen, sondern nur in Kombination mit einem akustisch optimierten Raum. Seitdem konnte ich meinen eigenen Mixing-Entscheidungen nicht mehr vertrauen. Deswegen nahm ich mir vor, mich in das Thema Raumakustik zu vertiefen, um meine Abhörsituation diesmal auf einer wissenschaftlichen Basis zu optimieren. Da viele Menschen insbesondere am Anfang ihrer Karrieren mit ähnlichen Fragen konfrontiert sind, möchte ich durch diese Arbeit meine Recherche und meine dabei erworbenen Erfahrungen und Schlussfolgerungen präsentieren. Dies schließt die Dokumentation der praktischen Umsetzung meines eigenen kostengünstigen und flexiblen Home-Studios mit ein.

1.2 Problemstellung

Die Zeit der Digitalisierung hat auch im Audibereich neue Türen geöffnet und Dinge ermöglicht, die sich Menschen davor nicht vorstellen konnten. So ist heutzutage nicht zuletzt die Studio-Ausrüstung kompakter und erschwinglicher denn je. Jeder Audio-Enthusiast ist heutzutage in der Lage, zuhause ein kleines Home-Studio einzurichten und dort Musik zu mischen.¹ Ein sehr relevanter - jedoch oft vernachlässigter - Aspekt dabei ist die Abhörsituation. Insbesondere wenn nur ein geringes Budget zur Verfügung steht, wird das meiste Geld in gute Studio-Monitore und sonstige Geräte investiert, obwohl die raumakustische Optimierung des Bereichs um die Monitore genauso wichtig ist, wie die Qualität der Monitore selbst.² Dies mag daran liegen, dass die akustische Behandlung eines Raumes einiges an Fachwissen erfordert und zudem Investitionen von Zeit und Geld mit sich bringt. Wenn man allerdings keinen Akustiker beauftragen und gleichzeitig professionelle

¹ Vgl. Alexander, 2011, S. 225.

² Vgl. Senior, 2019, S. 18.

Mischungen realisieren möchte, wird es unvermeidbar, sich mit der Physik der Raumakustik zu befassen.

Ein sehr verbreiteter Fehler in diesem Zusammenhang ist die beliebige Nutzung von Akustik-Schaumstoff. Ein typisches Beispiel hierfür ist das Überdämpfen des Home-Studios durch großflächige Bedeckung der Wände mit Noppenschaum. Noppenschaum ist nämlich kostengünstig und kann einfach mit einem Akustik-Kleber an der Wand angebracht werden. Sein Einsatz führt schnell zu einem direkten, meist positiv empfundenen, Einfluss auf den Klang des Raumes, und zwar klingt der Raum „trockener“. Diese Art von undurchdachten aber populären Akustikmaßnahmen nennt Friesecke „Pseudoakustik“.³ Sinnvolle Maßnahmen lassen sich hingegen nur treffen, wenn man sich in das Thema der Raumakustik etwas vertieft.

Akustische Phänomene in einem Raum entstehen durch die Interaktion von sich ausbreitenden Schallwellen mit den Raumbegrenzungen und sonstigen Objekten im Raum. Deshalb hängen sie sehr eng mit der Raumgestaltung und -größe zusammen (Siehe Kap. 4.1). Wenn nun beispielweise ein professioneller Akustiker einen Abhörraum wie z. B. eine Studioregie baut, plant er bereits im Voraus die Form und Größe des Raumes, um einen optimalen Höreindruck möglich zu machen. Die Einrichtung eines Studios in einem bestehenden Raum wie im häuslichen Bereich schließt die Möglichkeit zum Vorplanen allerdings oft aus. In diesem Fall stellt die vorgegebene - evtl. für die Akustik ungünstige - Raumgeometrie eine Hürde dar und es geht schnell hauptsächlich um die Behebung akustischer Probleme.⁴ Dies stellt sich allerdings besonders in kleinen Räumen häufig als komplizierte Angelegenheit heraus und lässt sich zudem schwer mit kleinem Budget lösen, da ihre Akustik u. a. von Raummoden dominiert ist, deren Behandlung große und teilweise kostspielige Absorber benötigt (Siehe Kap. 7.2). Die Verbesserung der Akustik in kleinen Räumen erfordert daher insbesondere im häuslichen Bereich nicht nur Fachwissen, sondern auch kreative Lösungen, die dem vorhandenen Platz und Budget angepasst sind.⁵

³ Vgl. Friesecke, 2013, S. 118.

⁴ Vgl. Ahnert & Tennhardt, 2008, S. 205

⁵ Vgl. Jones, 2008, S. 127.

1.3 Zielsetzung

Diese Arbeit richtet sich an alle Audio-Enthusiasten und Mixing-Ingenieure, die von zuhause aus und mit einem kleinen Budget wettbewerbsfähige Mischungen von hoher Qualität realisieren möchten. Ihnen soll ermöglicht werden, ihren Abhörplatz auf Basis des hier zusammengetragenen Wissens zu optimieren. So werden raumakustische Phänomene mit dem kleinen Raum in Bezug gesetzt und ihr Einfluss auf die Abhörsituation erklärt. Ausgehend von den Herausforderungen bei der Raumoptimierung werden pragmatische Lösungen präsentiert, um ohne hohe Kosten einen ausgewogenen Klang zu erreichen. Ziel hierbei ist nicht Perfektion, sondern das gegebenheitsbedingt bestmögliche Ergebnis. Im Folgenden sind einige Punkte aufgeführt, die einem besseren Verständnis dieser Arbeit dienen sollen:

- Bauakustische Themen, wie Schallemission und Lärminderung, gehören nicht zum Rahmen dieser Arbeit.
- Es wird davon ausgegangen, dass das Home-Studio sich in einem eher kleinen Raum befindet, dessen Volumen nicht größer als 50m^3 ist.
- Eine Umsetzung der vorgeschlagenen Lösungen wird im praktischen Teil dokumentiert und diskutiert.
- Die meisten Kapitel sind nur für rechteckige Räume relevant. Zu unregelmäßig geformten Räumen finden sich hier⁶ weiterführende Informationen
- Alle wichtigen Begriffe sind **Fett** gesetzt, wenn sie zum ersten Mal auftauchen. Ihre Definition befindet sich dann entweder direkt davor oder danach.

⁶ Jones, 2008, S. 133.

2 Akustische Grundlagen

2.1 Schallausbreitung und Grundbegriffe

Schall breitet sich in einem elastischen Medium (Luft, Wasser, Festkörper...) in Form von mechanischen Schwingungen aus und wirkt als Stimulus der schwingungsfähigen Teilchen des Ausbreitungsmediums. Wenn Schall von einem Lautsprecher ausgestrahlt wird, entsteht in unmittelbarer Nähe der Membran ein Druckimpuls, der die ersten betroffenen Luftmoleküle aus ihrer Ruhelage in die Ausbreitungsrichtung lenkt. Diese Luftmoleküle stoßen mit den benachbarten ruhenden Molekülen zusammen und geben ihre Energie an sie weiter. Aufgrund der elastischen Eigenschaften der Luft versuchen die Moleküle dann, in ihre Ruhelage zurückzukehren und bewegen sich in die Gegenrichtung, und zwar mit einer gewissen Auslenkung zum Ruhezustand. Diese Schwingbewegung der Teilchen wiederholt sich von vorne mit immer kleiner werdender Auslenkung, bis die Energie des ausgestrahlten Schalls komplett aufgebraucht bzw. in Wärmeenergie umgewandelt ist. Durch die Serie an Zusammenstößen der Luftmoleküle bewegt sich der Schall in Form einer Druckwelle fort (Abb. 1).⁷

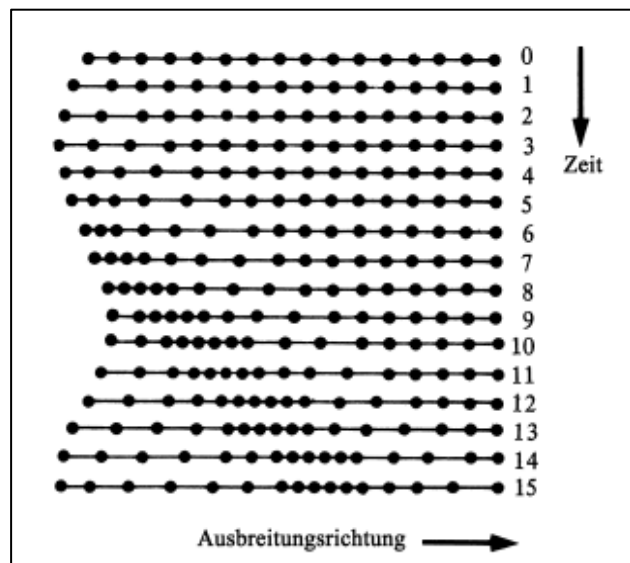


Abb. 1: Schematische Darstellung der Ausbreitung einer Schallwelle in Luft zu 15 aufeinander folgenden Zeitpunkten. (Dickreiter, et. al., 2014, S. 10)

Die momentane Geschwindigkeit, mit der die Teilchen um Ihre Ruhelage schwingen, ist die **Schallschnelle** v . Es wird hier der Ausdruck *Schnelle* statt *Geschwindigkeit* verwendet, um Verwechslungen mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle zu vermeiden. Der von der Schallwelle hervorgerufene Wechseldruck ist der **Schalldruck** p .⁸ Der Abstand zwischen zwei gleichen Schwingungszuständen, z. B. der größten Bewegungsgeschwindigkeit oder der größten Dichte der Moleküle, ist die **Wellenlänge** λ . Der zeitliche Abstand zwischen zwei gleichen Schwingungszuständen ist die **Periodendauer** T . Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde (Zeiteinheit) ist die **Frequenz** f .⁹

⁷ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 9f.

⁸ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 13.

⁹ vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 10.

2.2 Schallreflexion

Damit der Schall an einer Oberfläche reflektiert, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

- 1- die **Schallimpedanz** der reflektierenden Fläche ist anders als die der Luft.¹⁰
- 2- Der Durchmesser der reflektierenden Fläche ist mehrfach größer als die Wellenlänge der reflektierten Schallwelle.¹¹

Die **Schallkennimpedanz** Z_0 steht für den spezifischen Wellenwiderstand eines Mediums. Sie ist als das Verhältnis von Schalldruck zu Schallschnelle bzw. als das Produkt von Dichte und Schallgeschwindigkeit definiert:¹²

$$Z_0 = \frac{p}{v} = \rho \cdot c$$

Wobei:

- Z_0 : Schallkennimpedanz [N.s/m³]
- p : Schalldruck [Pa]
- v : Schallschnelle [m/s]
- ρ : Dichte [kg/m³]
- c : Schallgeschwindigkeit [m/s]

Diese Formel der Schallimpedanz ist die akustische Äquivalenz zum Ohm'schen Gesetz der Elektrotechnik, weil Z mit dem Ohm'schen Widerstand R , p mit der elektrischen Spannung U und v mit dem elektrischen Strom I vergleichbar sind.¹³ Sie gilt jedoch nur bei ebenen Wellen. Bei kugelförmigen Wellen wird sie komplexer. Die Bedingung der Impedanzänderung trifft bei allen harten Materialien zu.¹⁴ Wenn die zweite Bedingung aber gleichzeitig nicht zutrifft, kann die Schallwelle die Fläche umgehen (Siehe Kap. 2.3).

2.2.1 Schallreflexion an ebenen Flächen

Schallwellen verhalten sich beim Reflektieren genauso wie Lichtwellen. Wenn wir zur Vereinfachung eine Schallwelle als eine Bündelung vieler einzelner Schallstrahlen betrachten, dann ist bei jedem Strahl der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel. Ein Sonderfall ist Schallreflexion an einer rechtwinkligen Ecke. Gelangt ein Schallstrahl in eine 90°-Ecke, wie z.

¹⁰ Vgl. Friesecke, 2014, S. 29.

¹¹ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 18.

¹² Vgl. Kinsler, et al., 2000, S. 126.

¹³ Vgl. Sengpiel, 1993.

¹⁴ Vgl. Friesecke, 2014, S. 29.

B. in einem geschlossenen Raum, so wird er zweimal so reflektiert, dass er in die gleiche Richtung zurückgeworfen wird, aus der er gekommen ist (Abb. 2).¹⁵

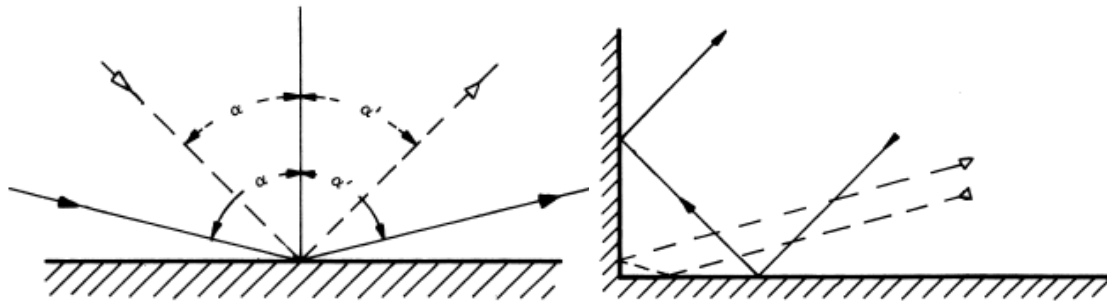


Abb. 2: Schallreflexion an einer ebenen Fläche und an einer rechtwinkligen Ecke. (Dickreiter, et. al., 2014, S. 18)

Wenn Schall zwischen zwei parallelen Flächen reflektiert, z. B. zwei Wänden eines Raumes, entstehen Reflexionen von Reflexionen. Man kann sich die Ausbreitung des reflektierten Schalls so vorstellen, als würde er von einer imaginären Schallquelle hinter der Wand ausgestrahlt werden. In Abb. 3 ist zu sehen, dass die Schallwelle beim Auftreffen auf die rechte Wand reflektiert wird, als würde sie aus der imaginären Quelle I_R kommen, die den gleichen Abstand zur Wand hat wie die echte Quelle. Sie gilt dann als eine Reflexion erster Ordnung. Das gleiche gilt bei der ersten Reflexion an der linken Wand und der imaginären Quelle I_L . Da die reflektierten Schallwellen mit einer gewissen Verzögerung eintreffen, wirkt die imaginäre Quelle der Reflexionen zweiter Ordnung (an der rechten und dann linken Wand oder umgekehrt) etwas entfernter. Das wären in Abb. 3 die Quellen I_{RL} und I_{LR} . Die Quellen I_{RLR} und I_{LRL} beziehen sich auf die Reflexionen dritter Ordnung.¹⁶ Schallreflexionen dieser Art verursachen diverse akustische Probleme wie Flatterechos und Raummoden, die in Kap. 4 noch genauer besprochen werden.

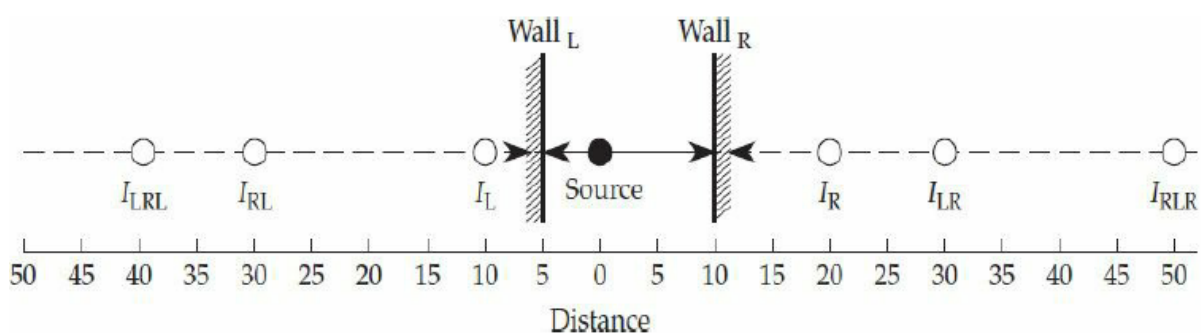


Abb. 3: Schallreflexion zwischen zwei parallelen Wänden. (Everest & Pohlmann, 2015, S. 98)

¹⁵ vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 18.

¹⁶ Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 98.

2.2.2 Schallreflexion an gekrümmten Flächen

Bei Schallreflexion an gekrümmten Flächen gilt auch Einfallswinkel = Ausfallswinkel, und zwar an den Tangenten der einzelnen Punkte der Fläche. Dies führt bei konvexen Flächen (nach außen gewölbt) immer zu einer Zerstreuung der gerichteten Schallwelle.¹⁷ Bei konkaven Flächen (nach innen gewölbt) hängt das Reflexionsmuster vom Abstand zwischen der Schallquelle und der reflektierenden Fläche d in Relativität zum Krümmungsradius r ab. Man kann zwischen 4 Fällen unterscheiden (Abb. 4):¹⁸

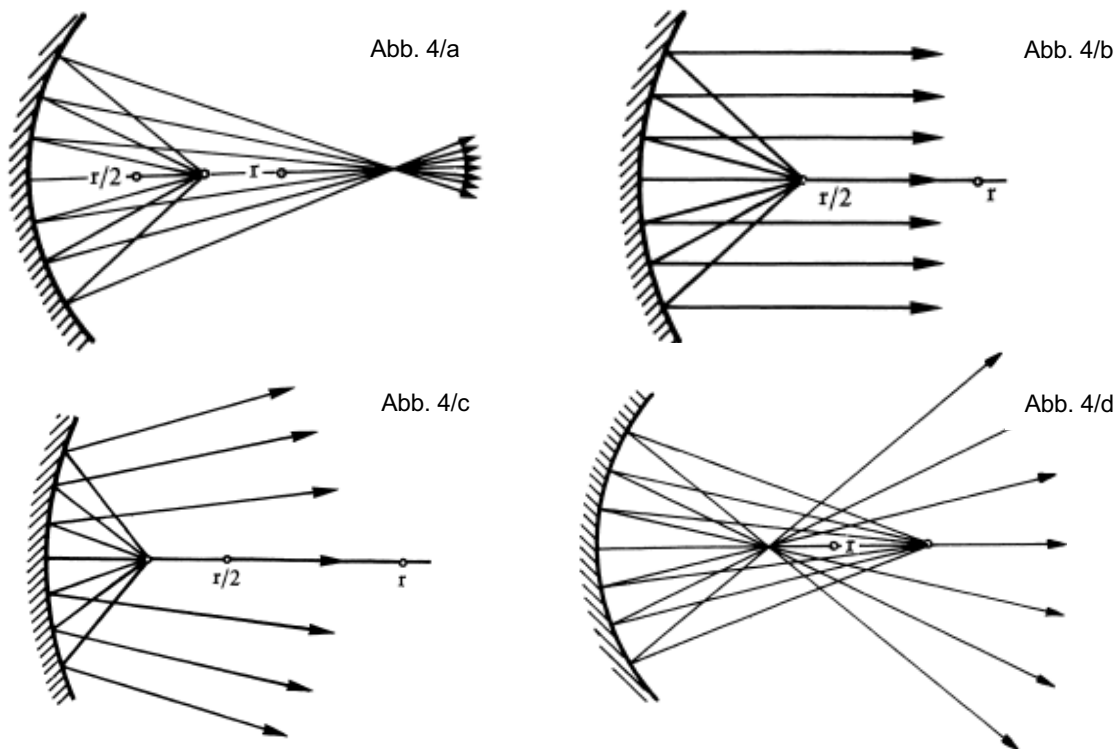


Abb. 4: Die verschiedenen Fälle der Schallreflexion an einer gekrümmten Fläche. (Dickreiter, et. al., 2014, S. 20-21)

- a) $d > r/2$: Die Schallstrahlen werden in einem Fokuspunkt außerhalb des Krümmungsradius gebündelt und danach zerstreut.
- b) $d = r/2$: Die Schallstrahlen verlaufen parallel zueinander.
- c) $d > r/2$: Die Schallstrahlen werden zerstreut.
- d) $d > r$: Die Schallstrahlen werden in einem Fokuspunkt innerhalb des Krümmungsradius gebündelt und danach stark zerstreut.

¹⁷ Vgl. Friesecke, 2014, S. 29.

¹⁸ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 19-21.

2.2.3 Schallreflexion an unregelmäßig geformten Flächen (Diffusion)

Trifft eine Schallwelle auf eine unregelmäßig geformte Fläche, so werden die Schallstrahlen in die unterschiedlichsten Richtungen zerstreut, sodass die Schallwelle diffus wird (Abb. 5). Diese Tatsache ist für die akustische Behandlung geschlossener Räumlichkeiten von großer Bedeutung und wird im Bau von Akustikpaneelen (Diffusoren) eingesetzt.¹⁹

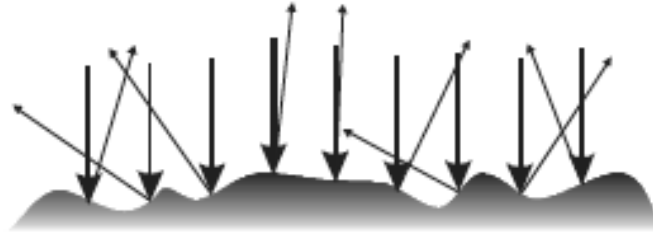


Abb. 5: Diffusität durch unregelmäßig geformte Fläche. (Friesecke, 2014, S. 31)

2.3 Schallbeugung

Ist der Durchmesser eines Hindernisses im Weg der Schallwelle in der Größenordnung der Wellenlänge oder kleiner, so beugt sich die Schallwelle und gelangt auf die andere Seite des Hindernisses. Wenn der Durchmesser um mehrere Wellenlängen größer ist als die Schallwelle, entsteht hinter dem Hindernis ein Bereich der Abschattung, der „Schallschatten“ genannt wird. Je größer die Ausdehnung des Hindernisses in Relativität zur Wellenlänge wird, desto größer wird der Schallschatten, bis die Schallwelle das Hindernis gar nicht mehr umgehen kann und stattdessen reflektiert wird. Bei zusammengesetzten Schallwellen mit verschiedenen Frequenzanteilen wird die Beugung frequenzabhängig, da die verschiedenen Teilfrequenzen unterschiedliche Wellenlängen besitzen. Tiefere Teilfrequenzen können sich um das Hindernis herum beugen, weil sie relativ größeren Wellenlängen entsprechen, während die höheren Teilfrequenzen am Hindernis reflektieren. Resultat ist ein dumpfer Klang hinter dem Hindernis.²⁰

2.4 Schallabsorption

Schallabsorption bedeutet prinzipiell die Umwandlung von Schallenergie bzw. der Schwingungsenergie der Luftteilchen in Wärmeenergie. Sie erfolgt entweder durch Luftreibung während der Ausbreitung der Schallwelle in der Luft - was nur für höhere Frequenzen signifikant ist - oder durch Reibung in einem absorbierenden Material.²¹

¹⁹ Vgl. Friesecke, 2014, S. 31.

²⁰ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 21f.

²¹ Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 183f.

2.4.1 Absorptionskoeffizient α

Die Fähigkeit eines Materials, Schall zu absorbieren, wird mit dem **Absorptionskoeffizienten** α angegeben. Das Absorptionsvermögen eines Materials ist vom Einfallswinkel des Schalls abhängig, daher wird der Absorptionskoeffizient öfters in einem Hallraum nach DIN52212²² gemessen, wo das Schallfeld diffus ist bzw. die Schallwellen aus allen möglichen Richtungen auf das gemessene Material treffen.²³ Allerdings wird der Absorptionsgrad auch nach DIN52215 in einem Impedanzrohr gemessen, wo der Schall ausschließlich senkrecht einfällt. Dieser Fall kommt in der Praxis kaum vor, allerdings sind die Kosten durch die kleinen Materialproben im Vergleich zur Hallraummessung viel niedriger.²⁴ Der Wert von α liegt im Bereich von 0 bis 1 und ist gleich dem Verhältnis von absorbierter Energie zu auftreffender Energie. Er kann auch in % angegeben werden. Somit bedeutet $\alpha = 1$, dass das Material total absorbierend ist (kein Schall wird reflektiert), und $\alpha = 0$, dass das Material total reflektierend ist (kein Schall wird absorbiert).²⁵

Das Absorptionsvermögen eines Materials hat die Einheit Sabin nach dem Wissenschaftler Wallace Clement Sabine (1868 - 1919), weil dieser mit der Hallraum-Methode die Absorptionsfähigkeit von Materialien bestimmte.²⁶ Sabine schlug vor, dass der Absorptionskoeffizient das Absorptionsvermögen einer Flächeneinheit (z. B. ein Quadratmeter) beschreibt. D.h., dass 1.0 Sabin für einen Quadratmeter Fläche mit totaler Absorption steht. Da der Schall durch ein offenes Fenster komplett nach außen dringt, bzw. gar nicht reflektiert wird, hat das Fenster quasi den Absorptionsgrad $\alpha = 1$. Also wird das Absorptionsvermögen einer bestimmten Fläche eines Materials als die äquivalente Fläche eines offenen Fensters beschrieben. Hat beispielsweise 1m² absorbierenden Materials die gleiche Absorptionsfähigkeit wie ein 0.4m² großes offenes Fenster, so hat sein Absorptionskoeffizient auch den Wert 0.4.²⁷ Im Allgemeinen ergibt sich das Absorptionsvermögen A einer Fläche durch das Produkt vom Absorptionskoeffizienten α und der Fläche S:²⁸

$$A = \alpha \cdot S$$

²² Vgl. Dickreiter, et al., S. 23.

²³ Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 184.

²⁴ Vgl. Fraunhofer LBF, 2017.

²⁵ Vgl. Dickreiter, et al., S. 23.

²⁶ Vgl. Ballou, 2008, S. 97.

²⁷ Vgl. Beranek, 1986, S. 301.

²⁸ vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 23.

Die gesamte Absorptionsfähigkeit verschiedener Materialien mit unterschiedlichen Flächen ist die Summe ihrer einzelnen Absorptionsvermögen:²⁹

$$A = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \alpha_3 \cdot S_3 + \dots$$

2.4.2 Frequenzabhängigkeit der Schallabsorption

Wie gut ein Material Schall absorbiert, hängt nicht nur vom Schalleinfallswinkel, sondern auch von der Frequenz ab. Deshalb werden die Werte des Absorptionskoeffizienten eines Materials für unterschiedliche Frequenzen in Oktavbereichen von 125Hz bis 4kHz gemessen und in einer Tabelle oder in Form eines Graphen angegeben.³⁰ Die folgende Tabelle Tab.1 ist ein Beispiel für die Absorptionsgrade verschiedener Wandoberflächen in Abhängigkeit von der Frequenz:

Material	Absorptionsgrade α bei verschiedenen Frequenzen					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Beton, unverputzt	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Putz auf Mauerwerk	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Teppich, mittlere Dicke	0,05	0,08	0,20	0,30	0,35	0,40
Akustikplatte 2 cm dick auf Wand aufgeklebt	0,05	0,15	0,55	0,90	1,0	1,0
Akustikplatte 2 cm dick mit 2 cm Wandabstand	0,10	0,20	0,85	1,0	1,0	1,0
Vorhänge	0,05	0,10	0,25	0,30	0,40	0,50

Tab. 1: Absorptionsgrade verschiedener Materialien von Wandoberflächen (Dickreiter, et. al., 2014, S. 24)

Eine präzisere Angabe des Absorptionsgrades in Terzbereichen (1/3-Oktave) ist durch Interpolation und Extrapolation der Werte der Oktavbereiche möglich.³¹ Die Graphen in Abb. 6 zeigen die Absorptionskoeffizienten eines Teppichs, einmal in Oktavabständen (links) und einmal in Terzabständen (rechts). Die Anordnung von Absorbern spielt bei der Frequenzabhängigkeit auch eine wesentliche Rolle. Ein Absorber ist z. B. dann am effektivsten, wenn er sich bei einem Schnellextraktum der Schallwelle befindet.³² In Kap. 7.3 werden diese Aspekte näher ausgeführt.

²⁹ vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 23.

³⁰ Vgl. Friesecke, 2014, S. 34.

³¹ Vgl. Friesecke, 2014, S. 34.

³² Vgl. Görne, 2008, S. 83.

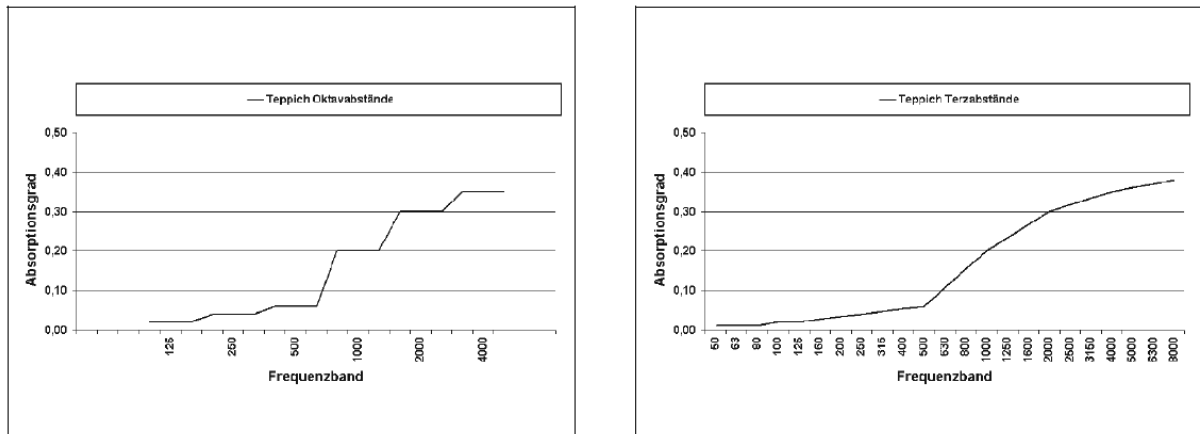


Abb. 6: Absorptionskoeffizienten eines Teppichs in Terzabständen (links) und Oktavabständen (rechts).
(Friehecke, 2014, S. 34)

3 Messtechnische Grundlagen

Raumakustikmessungen spielen eine wesentliche Rolle bei der Optimierung der Raumakustik. Ziel hierbei ist das Reflexionsmuster und das Abklingverhalten des Raumes zu erfassen, um später die passenden Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik zu ergreifen. Messtechnik jedoch ist ein eigenes wissenschaftliches Gebiet, das den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Daher werden im Folgenden ausgewählte Begriffe der akustischen Messtechnik erläutert, die für das Verständnis und die Durchführung der Messungen relevant sind. Ihre technische Ausführung wird normalerweise in der Bedienungsanleitung des gewählten Messsystems bzw. der Messsoftware beschrieben.³³

3.1 Schalldruckpegel

Wie schon in *Kap. 2.1* definiert ist der Schalldruck der Wechseldruck, der von einer Schallwelle während ihrer Ausbreitung in der Luft hervorgerufen wird. In der Audiotechnik wird der Schalldruck aber nicht in seiner physikalischen Einheit verwendet, sondern als die absolute Pegelgröße **Schalldruckpegel** (SPL) (engl.: Sound pressure Level).³⁴ Grund dafür ist die Anpassung an das menschliche Lautstärkeempfinden. Er wird durch das 20-fache Logarithmieren des Verhältnisses zwischen dem gemessenen Schalldruck p und dem Bezugswert $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa gewonnen.³⁵

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

Wobei: L_p : absoluter Schalldruckpegel [dB]
 p : Schalldruck [Pa]
 p_0 : Bezugsschalldruck = $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Die Einheit des Schalldruckpegels ist Dezibel (Kurz: dB) und wird bei Messungen in dB SPL gekennzeichnet.³⁶

³³ Vgl. Friesecke, 2013, S. 133.

³⁴ Vgl. Weinzierl, 2008, S. 28.

³⁵ vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 15.

³⁶ Vgl. Weinzierl, 2008, S. 29.

3.2 Messsignale

Messsysteme verwenden Messsignale, um Messungen durchzuführen. Je nach Messmethode eignen sich verschiedene Arten von Messsignalen, die jeweils Vor- und Nachteile mit sich bringen. Im Folgenden werden diese Signale erläutert.

3.2.1 Impuls

Ein **Impuls** ist ein sehr kurzes Audiosignal mit einem bekannten Frequenzspektrum, das als Messsignal verwendet werden kann. Idealerweise muss ein Impuls unendlich kurz sein und einen unendlich großen Frequenzbereich abdecken. So ein idealer Impuls existiert jedoch nur in der Theorie. In der Praxis versucht man stattdessen, einen Impuls zu generieren, der für das Messsystem ideal ist - d.h. so kurz wie möglich, allerdings nicht so kurz, dass er vom Messsystem nicht mehr erfasst werden kann. Dies gelingt, wenn die Länge des Impulses mit der Länge der Abtastfrequenz des Messsystems übereinstimmt:³⁷

$$t_{Imp} = \frac{1}{f_s}$$

Wobei: t_{Imp} : Länge des Impulses [s]

f_s : Abtastfrequenz des Messsystems in [Hz]

Der Vorteil dabei ist, dass das Frequenzspektrum ausreichend groß wird. Die höchste Frequenz f_{max} eines Impulses ist nämlich umso größer, je kürzer seine Länge ist:³⁸

$$f_{max} = \frac{1}{t_{Imp}}$$

3.2.2 Rauschen

Im Gegensatz zu einem Impuls ist **Rauschen** ein kontinuierliches Schallsignal mit zufälliger Verteilung von Frequenz, Phase und Amplitude.³⁹ Rauschsignale werden durch Zufallsprozesse generiert, ihr zeitlicher Verlauf lässt sich deshalb nur durch ihre mittlere spektrale Energieverteilung charakterisieren.⁴⁰ Es gibt besondere Formen von Rauschen, die - aufgrund ihrer bekannten statistischen Eigenschaften - häufig als Messsignale verwendet werden. Die gängigsten sind **Weißes Rauschen** und **Rosa Rauschen**.^{41 42}

³⁷ Vgl. Friesecke, 2014, S. 854f.

³⁸ Vgl. Friesecke, 2014, S. 855.

³⁹ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 3, 642.

⁴⁰ Vgl. Weinzierl, 2008, S. 12.

⁴¹ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 3.

⁴² Vgl. Weinzierl, 2008, S. 12f.

	Energieverteilung	Wahrnehmung	Anwendungsbereiche
Weißes Rauschen	Konstant über die gesamte Frequenz-Bandbreite	Leise in den Tiefen und laut in den Höhen, aufgrund der Eigenschaften des menschlichen Gehörs	Raumakustik- und Lautsprechermessungen
Rosa Rauschen	Abfall um 3 dB pro Frequenzverdopplung	Konstante Lautstärke im gesamten Frequenzbereich. Ähneln den Eigenschaften von Musik und Sprache	Lautsprechermessungen

Tab. 2: Vergleich zwischen weißem und rosa Rauschen

Weißes Rauschen ist in der Theorie zwar das ideale Messsignal, aber seine Zufälligkeit stellt in der Praxis einen Nachteil dar. Es erfordert nämlich sowohl längere Messzeiten, um seine statistische Konstanz erfassen zu können, als auch große Rechenleistung und Datenspeicher.⁴³ Daher wurden digitale Messverfahren entwickelt, wie die **MLS-Messung** (engl.: Maximum Length Sequence), die eine binäre Zahlenfolge benutzt und ein Pseudo-Rauschsignal erzeugt. Dieses erfüllt die Eigenschaften des idealen weißen Rauschens, ist jedoch gleichzeitig vom Messsystem vorhersagbar.⁴⁴ Außerdem erfordert das Pseudo-Rauschen viel weniger Rechenleistung als das analoge weiße Rauschen.⁴⁵

3.2.3 Sinussweep

Ein **Sinussweep** ist ein Sinussignal, das den zu messenden Frequenzbereich mit einer bestimmten Geschwindigkeit durchläuft. Für Akustikmessungen wird ein logarithmierter Sweep benutzt. Das impliziert, dass die Dauer bei jeder Frequenzverdopplung (z. B. von 100Hz auf 200Hz und von 2kHz auf 4kHz) gleichbleibt.⁴⁶ Ein Vorteil von Sweeps gegenüber Rauschsignalen ist die wesentlich kürzere Messzeit. Der Sweep muss nämlich für eine Messung nur einmal wiedergegeben werden. Dabei werden die längeren Nachhallzeiten im tiefen Frequenzbereich vollständig eingefangen, während der Sweep den Rest des Frequenzbereichs durchläuft. Eine kurze Wartezeit nach Ende des Sweeps genügt dann, um den viel kürzeren Ausklang der höheren Frequenzen zu erfassen.⁴⁷

⁴³ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 642.

⁴⁴ Vgl. Friesecke, 2013, S. 134.

⁴⁵ Vgl. Müller, 2008, S. 1103.

⁴⁶ Vgl. Friesecke, 2014, S. 890f.

⁴⁷ Vgl. Müller, 2008, S. 1114.

4 Raumakustik der kleinen Räume

Schall kann sich in einem Raum nicht endlos ungehindert ausbreiten, bis ihm seine Energie durch Luftreibung entzogen wird, sondern er wird sowohl von den Raumbegrenzungen als auch von den Objekten im Raum beeinflusst.⁴⁸ Dabei spielen Raumgröße und -form eine entscheidende Rolle. Da es sich beim Fokus dieser Arbeit um Wohnräume handelt, die maximal 50m³ groß sind, ist der Bezug auf den kleinen Raum bei der Betrachtung der Schallwellen notwendig. Wann aber gilt ein Raum als groß und wann als klein? Laut Szymanski gibt es im Bereich der Akustik keine definierten Dimensionen, um einen Raum als groß oder klein zu bezeichnen. Stattdessen werden solche Bezeichnungen abhängig von der Wellenlänge der betroffenen Schallwellen angegeben.⁴⁹ D. h. ein Raum mit den Abmessungen (3 x 5 x 2,5) m gilt als groß, wenn mittlere und hohe Frequenzen betrachtet werden; aber als klein, wenn tiefe Frequenzen unter 100 Hz im Fokus sind. Dementsprechend ereignen sich akustische Phänomene, die sich jeweils auf bestimmte Frequenzbereiche beziehen.

In den folgenden Abschnitten wird erklärt, was diese Phänomene sind, wie sie genau zustande kommen und welche Auswirkungen sie auf die Abhörsituation in kleinen Räumen haben.

4.1 Das Schallfeld

Ein **Schallfeld** ist der Bereich in einem elastischen Medium, in dem sich die Schallwellen ausbreiten und überlagern. Die zwei idealen Fälle eines Schallfelds sind das **Freifeld** und das **Diffusfeld**. In einem Freifeld herrscht nur das Direktsignal einer Schallquelle (Musikinstrument, Lautsprecher, ...) aus einer bestimmten Richtung vor, d. h., es gibt keine Reflexionen. Deshalb heißt es auch **Direktfeld**. Ein solches Schallfeld existiert nur in einem sog. reflexionsarmen Raum oder im Freien über gut absorbierendem Boden, wie z. B. Schnee. Das Diffusfeld besteht, ganz im Gegenteil zu einem Freifeld, nur aus Schallreflexionen, und zwar unter den Voraussetzungen, dass die Schallenergie überall homogen verteilt ist und es keine bestimmte Richtung der Schallausbreitung gibt. Diese Art Schallfeld entsteht, wenn Schallwellen in einem Raum so oft reflektieren und sich überlagern, bis das Direktsignal und die einzelnen Reflexionen und ihre Einfallsrichtungen nicht mehr erkennbar sind.⁵⁰ Die Raumakustik beschäftigt sich mit der Entwicklung des Schallfelds in einem Raum über die Zeit, und zwar vom Direkt- bis zum Diffusfeld. Der zeitliche Ablauf des Schallfelds hängt zum einen von der Form und Größe des Raumes, zum anderen von den Materialien der

⁴⁸ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 17.

⁴⁹ Vgl. Szymanski, 2008, S. 97.

⁵⁰ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 9 & 17.

Raubbegrenzungen und Objekte im Raum ab.⁵¹ In kleinen Räumen bildet sich kein Diffusfeld (Siehe Kap. 4.5).

Hinweis: Frei- und Diffusfeld sowie Nah- und Fernfeld dürfen nicht verwechselt werden. Nah- und Fernfeld sind nicht vom Raum abhängig, sondern nur von der Entfernung zur Schallquelle im Verhältnis zur ausgestrahlten Wellenlänge. Es gibt zwar einige Berührungspunkte, da z. B. in der Nähe einer Schallquelle eher der Direktschall vorherrscht und mit der Entfernung der Anteil an Diffusschall zunimmt, jedoch werden diese Begriffe für Schallquellen und Mikrofone verwendet und nicht zur Beschreibung von raumakustischen Phänomenen.⁵²

4.2 Direktschall

Die ersten Schallereignisse aus der Schallquelle, die das Ohr auf einem direkten Weg erreichen, machen den Direktschall aus. Dieser Anteil an Schall liefert ein klares Klangbild des wiedergegebenen Schallsignals und ist maßgeblich für die Lokalisation der Richtung, aus der der Schall kommt. Daher sollte er in einem Abhörraum überwiegen. Trifft der Direktschall auf Oberflächen in der Umgebung (Wände, Boden, Decke, Tisch...), so wird er teilweise reflektiert und erreicht den Hörer mit einer zeitlichen Verzögerung – diesen Schallanteil nennt man Reflexionen.⁵³

4.3 Erste Reflexionen

Auf den Direktschall folgen die ersten Reflexionen. Damit sind die ersten sechs Reflexionen von Wänden, Decke und Boden bzw. Arbeitstisch gemeint. Abhängig von der Größe der Verzögerung zum Direktschall haben die reflektierten Schallwellen unterschiedliche Wirkungen auf das Hörereignis:⁵⁴

- Reflexionen mit einer Verzögerung unter 2ms verursachen eine Verschiebung der Lokalisation der Schallquelle, und zwar in die Richtung des früher eintreffenden Signals.⁵⁵ D. h. beispielsweise, dass ein Signal von links, das etwas früher beim Ohr eintrifft, die wahrgenommene Stereomitte nach links verschiebt. Dieser Effekt heißt **Summenlokalisation**.⁵⁶

⁵¹ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 29.

⁵² Vgl. Görne, 2008, S. 36-38.

⁵³ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 29, 32f.

⁵⁴ Vgl. Friessecke, 2014, S. 139.

⁵⁵ Vgl. Friessecke, 2014, S. 139.

⁵⁶ Vgl. Dickreiter, et. al., 2014, S. 406.

- Bei Reflexionen mit einer Verzögerung zwischen 2ms und 30-100ms (signalabhängig) tritt der **Präzedenz-Effekt** (auch: **Gesetz der ersten Wellenfront**) auf. Die Schallquelle wird bei solchen Verzögerungen nur noch in der Richtung der zuerst eintreffenden Schallwelle verortet. D. h. entsprechend, dass eine Reflexion später als 2ms nach dem Direktsignal nicht mehr zur Lokalisation der Schallquelle beiträgt, selbst wenn die Reflexion um 10dB lauter ist als das Direktsignal (**Haas-Effekt**).^{57 58}
- Die Zeitverzögerung der ersten Reflexion hat außerdem einen Einfluss auf die empfundene Raumgröße. Je später sie eintrifft, desto größer erscheint der Raum und umgekehrt.⁵⁹
- Die Einfallsrichtung der ersten Reflexionen beeinflusst den Raumklang. Sind Reflexionen aus der Mitte (Deckenreflexion) ausgeprägter als Seitenreflexionen, so wirkt der Raum schmaler. Umgekehrt wirkt er breiter.⁶⁰
- Neben Lokalisationseffekten tritt bei Reflexionen mit einer Verzögerung zwischen 0,8 und 20ms ein weiterer klangfärbender Effekt auf, der als **Kammfiltereffekt** bezeichnet wird.⁶¹ Im Allgemeinen entsteht dieser Filtereffekt durch Interferenzen zwischen zwei identischen bzw. hinreichend ähnlichen Schallwellen mit einer bestimmten kleinen Laufzeitdifferenz zueinander. Es ergeben sich dabei Überhöhungen und Auslöschungen des Schalldrucks in Abhängigkeit von der Phasenlage der beiden Wellen. Im Extremfall löschen sie sich gegenseitig aus. Wenn sich beispielhaft zwei 1kHz-Sinuswellen mit einer Verzögerung von einer halben Wellenlänge zueinander (dies entspricht 180° Phasenverschiebung und 0,5ms Laufzeitdifferenz) überlagern, dann eliminieren sie sich gegenseitig.⁶² Laut Brunner sind Verzögerungen in der Größenordnung von 1ms entsprechend etwa 30cm Wegdifferenz besonders kritisch.⁶³ Im Home-Studio tritt dieses Phänomen z. B. bei Schallreflexionen am Tisch unter den Lautsprechern oder an den Seitenwänden auf und führt zu unerwünschten Klangverfärbungen bei der Wiedergabe von Musik und bei Tonaufnahmen. Deshalb müssen solche Reflexionen möglichst unterdrückt werden⁶⁴. Genauer gesagt soll ihr

⁵⁷ Vgl. Friesecke, 2014, S. 140.

⁵⁸ Vgl. Görne, 2008, S. 120.

⁵⁹ Vgl. Görne, 2008, S. 80.

⁶⁰ Vgl. Görne, 2008, S. 80.

⁶¹ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 33.

⁶² Vgl. Maier, 2008, S. 282.

⁶³ Vgl. Brunner, et al. 2007.

⁶⁴ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 33.

Pegel im Frequenzbereich zwischen 1kHz und 8kHz mindestens 10 dB unter dem des Direktschalls liegen.⁶⁵ Die resultierende kammfilterartige Übertragungsfunktion bei zwei gleichen Schallsignalen mit bekannter Wegdifferenz kann mithilfe der folgenden Formeln berechnet werden:

$$f = \frac{c}{2 \cdot d}$$

$$f = \frac{c}{d}$$

Wobei: f : die Frequenz
 c : die Schallgeschwindigkeit
 d : die Wegdifferenz

Die erste Formel beschreibt die erste Auslöschung im Frequenzgang und ergibt die Frequenz, bei der die Streckendifferenz d genau die Hälfte der Wellenlänge beträgt. Die zweite Formel beschreibt die erste Überhöhung und ergibt die Frequenz, bei der die Streckendifferenz und die Wellenlänge übereinstimmen. Weitere Auslöschungen folgen jeweils bei den ungeradzahigen Vielfachen der Frequenz der ersten Auslöschung und weitere Überhöhungen bei den geradzahigen Vielfachen.⁶⁶ Die Übertragungsfunktion sieht dann wie in Abb. 7 aus:

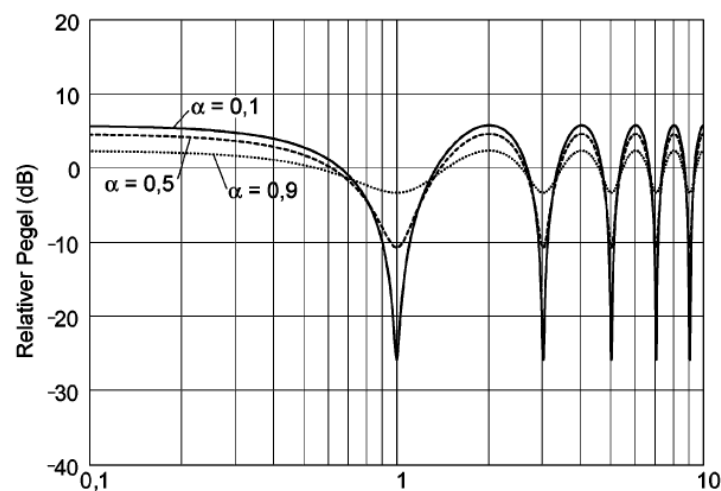


Abb. 7: Kammfilter für drei unterschiedliche Absorptionsgrade der reflektierenden Fläche im Fall der ebenen Wellenausbreitung. Die Frequenz ist auf die Frequenz der ersten Auslöschung normiert. (Maier, 2008, S. 283)

⁶⁵ Vgl. Maier, 2008, S. 296.

⁶⁶ Vgl. Maier, 2008, S. 282f.

- Spätere Einzelreflexionen zwischen 30 und 100ms werden als Echo wahrgenommen.⁶⁷
Zuerst gilt es jedoch, die tatsächliche Relevanz solcher Reflexionen für die Akustik kleiner Räume zu überprüfen. Das soll im Folgenden dargelegt werden:

Der mittlere Weg, den eine gegebene Schallwelle in einem Raum zwischen zwei Reflexionen zurücklegt, wird als die **mittlere freie Weglänge** (MFP) (engl.: mean free path) definiert⁶⁸ und mithilfe der folgenden Formel berechnet:

$$MFP = F \frac{V}{S}$$

Wobei: V : das Raumvolumen [m^3]
 S : die gesamte Innenfläche [m^2]
 F : eine raumformbezogene Konstante

Für Räume mit einfachen Formen (z. B. Quader) liegt der statistische Wert von F bei 4.⁶⁹ Als Beispiel dient ein relativ kleiner Raum mit den Dimensionen ($5 \times 4 \times 2,5$) m, dessen MFP berechnet werden soll:

$$\begin{aligned} V &= 5m \times 4m \times 2,5m = 50m^3 \\ S &= 2(5m \times 4m) + 2(5m \times 2,5m) + 2(4m \times 2,5m) = 85m^2 \\ \Rightarrow MFP &= \frac{4 \times 50m^3}{85m^2} = 2,35m \end{aligned}$$

Die Zeit, innerhalb derer die Schallwelle diesen Weg bei Schallgeschwindigkeit $c = 343m/s$ zurücklegt, beträgt:

$$t = \frac{MFP}{c} = \frac{2,35m}{343m/s} = 6,8 \times 10^{-3}s = 6,8ms$$

Laut Ballou ist im Allgemeinen davon auszugehen, dass eine Schallwelle in einem kleinen Raum durchschnittlich sechs Mal an den Grenzen reflektiert, bevor sie den größten Teil ihrer Energie verloren hat und so diffus wird, dass sie nicht mehr hörbar ist.⁷⁰ Für 6,8ms pro Reflexion ergibt sich so ein maximaler Wert von 40,8ms. Daraus lässt sich schließen, dass in kleinen Räumen keine ersten Reflexionen mit Verzögerungen dieser Größenordnung vorkommen und deshalb *keine* Echos entstehen.

⁶⁷ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 33.

⁶⁸ Vgl. Beranek, 1986, S. 298f.

⁶⁹ Vgl. Young, 1959, S. 918.

⁷⁰ Vgl. Ballou, 2008, S. 135.

4.4 Flatterechos

Flatterechos sind eine spezielle Form von Echo, die bei impulsartigem Schall⁷¹ in kleinen Räumen vorkommt und durch ihren metallischen Abklang erkennbar ist. Sie entstehen durch wiederholte Reflexionen einer Schallwelle zwischen zwei parallelen harten Grenzen (Wände, Fußboden, Decke) und hören sich für den Zuhörer wie eine sehr schnelle Folge von Echos an.⁷² Dies geschieht wie o. g. nur in kleineren Räumen, da die reflektierten Schallwellen aufgrund des geringen Abstands zwischen den Wänden so schnell aufeinanderfolgen, dass sie nicht mehr als getrennte Signale wahrgenommen werden. In größeren Räumen hingegen sind die Echos als einzelne Ereignisse identifizierbar, da das reflektierte Schallsignal später als 50ms nach dem Direktsignal beim Ohr eintrifft.⁷³

4.5 Nachhall?

Laut Sabine entsteht **Nachhall** (engl.: Reverberation) durch die kontinuierlichen Reflexionen der Schallwellen an den harten Grenzen eines geschlossenen Raumes. Dabei nimmt die Energie der Schallwellen allmählich ab, bis sie nicht mehr hörbar sind. Er betont, dass sich Nachhall auf das diffuse Schallfeld (Siehe *Kap. 4.1*) bezieht, in dem die Reflexionen nicht einzeln zu erkennen sind.⁷⁴ Diese Bedingung ist nur in großen Räumen mit wenig Absorption erfüllt.⁷⁵ In kleinen Räumen hingegen verhindern Raumresonanzen, insbesondere im tieferen Frequenzbereich, den Aufbau eines komplett diffusen Schallfelds. Dadurch kann eine Messung oder Berechnung der **Nachhallzeit** (engl.: Reverberation Time) keine richtige Auskunft über den Abklang des Raumes geben.⁷⁶ Für kleine Abhörräume, wie z. B. Regieräume und Home-Studios, muss das Raumverhalten in den Mitten und Tiefen auf eine andere Weise charakterisiert werden.⁷⁷ Dazu muss auf den Unterschied zwischen Nachhallzeit und **Abklingzeit** (engl.: Decay Time) genauer eingegangen werden, denn diese beiden Begriffe werden oft unzutreffend als Äquivalente verstanden.⁷⁸

⁷¹ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 19.

⁷² Vgl. Görne, 2008, S. 81.

⁷³ Vgl. Veit, 2012, S. 36f.

⁷⁴ Vgl. Sabine, 1923, S. 9.

⁷⁵ Vgl. Jones, 2008, S. 135.

⁷⁶ Vgl. Szymanski, 2008, S. 114.

⁷⁷ Vgl. Jones, 2008, S. 136.

⁷⁸ Vgl. Jones, 2008, S. 135.

4.5.1 Nachhallzeit vs. Abklingzeit

Im Laufe der Recherche für diese Arbeit kristallisierte sich immer weiter heraus, wie wichtig es ist, die Nachhallzeit in Bezug auf die Raumgröße zu diskutieren und sie von der Abklingzeit zu differenzieren. Es gibt nämlich viele Bücher und Videos im Internet, die für das kleine Home-Studio gedacht sind und eine Berechnung bzw. Messung der Nachhallzeit RT60 als einen entscheidenden Schritt bei der Optimierung der Raumakustik präsentieren. Dabei ignorieren sie die Tatsache, dass die Berechnung einer Nachhallzeit per Definition ein Diffusfeld erfordert, welches bei den Gegebenheiten des häuslichen Bereiches nicht existieren kann.

Wie Dickreiter Sabine zitiert, ist die Nachhallzeit die Zeit, innerhalb derer die Schallenergie nach Abschalten der Schallquelle auf ihren millionsten Teil abfällt. Dies entspricht einem Abfall des Schalldruckpegels um 60dB.⁷⁹ Ein diffuses Schallfeld kommt in seiner Definition nicht vor, auch nicht im weiteren Verlauf des Textes.⁸⁰ Friesecke hingegen erwähnt das Diffusfeld in seiner Definition:

„Die Nachhallzeit wird mit dem Wert RT60 angegeben [...] und gibt die Zeit in Sekunden an, in der der diffuse Nachhall nach Abschalten der Erregerschallquelle um 60dB abgeklungen ist.“⁸¹

Friesecke verwendet in den weiteren Abschnitten seines Buches, das an Home-Studio-Enthusiasten gerichtet ist⁸², die bekannten Formeln von Sabine und Eyring für die Berechnung von RT60 und schreibt, dass die Eyring'sche Formel für kleinere Räume anwendbar sei, allerdings ohne eine klare Beschreibung der Dimensionen dieser Räume.⁸³ Andere Quellen, die sich auf die Akustik der kleinen Räume spezialisiert haben wie beispielsweise Jones, schließen eine Berechnung bzw. Messung von RT60 in kleinen Räumen mangels eines diffusen Schallfelds aus.⁸⁴ Diese Beispiele sollen die Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Abklingverhaltens eines kleinen Raumes demonstrieren.

Früher in diesem Kapitel wurde definiert, dass die Größe eines Raumes stets in Relation zur Wellenlänge betrachtet werden muss. Daraus ergibt sich, dass das Problem mit der Nachhallzeitmessung erst ab einem bestimmten Frequenzbereich auftritt, und zwar ab dem, wo die Schallwellenlängen für die Dimensionen des Raumes verhältnismäßig groß werden. Ansonsten soll die RT60, auch in einem kleinen Raum, richtige Ergebnisse liefern. Das

⁷⁹ Vgl. Dickreiter, 2014, S. 35f.

⁸⁰ Vgl. Dickreiter, 2014, S. 35f.

⁸¹ Friesecke, 2013, S. 45.

⁸² Vgl. Friesecke, 2013, S. 7.

⁸³ Vgl. Friesecke, 2013, S. 46.

⁸⁴ Vgl. Jones, 2008, S. 136.

Problem bei der Verwendung der statistischen Verfahren zur Messung von Nachhallzeiten besteht also nur im tiefen Frequenzbereich.^{85 86} Der Entwickler der Messsoftware REW (Siehe Kap. 8.3) selbst rät von der Verwendung der RT60-Messung für tiefe Frequenzen in kleinen Räumen bis 50m³ ab.⁸⁷ Grund für die Ungenauigkeit der RT60-Messergebnisse ist, dass das Programm sie aus der IR des Raumes - genauer gesagt aus der ETC - mithilfe der Schroeder-Integral-Kurve herausrechnet. Dies funktioniert allerdings am besten in größeren Räumen, wo die Kurve am linearsten ist.^{88 89}

Die Raumgröße ist eigentlich nicht der einzige Faktor, der die RT60-Messung beeinflusst, sondern es müssen auch andere Kriterien erfüllt werden, damit eine Annahme der Diffusität zulässig wird. Erstens muss die Absorption im Raum gering und gleichmäßig verteilt sein, zweitens muss der Raum eine ungleichmäßige Form haben.⁹⁰ Hier wird klar, dass die Annahme eines diffusen Schallfelds im häuslichen Bereich eher nicht zutrifft, vor allem aufgrund diverser verteilter Möbelstücke, was zu ungleichmäßiger Verteilung der Absorption führt, und natürlich der typischen Rechteckform des Raumes. Aber was wäre denn die Alternative für den kleinen Raum?

*„In small, acoustically dead rooms the only frequencies that have any significant decay are those that are at or very near to the natural resonances of the room. This decay time is, strictly speaking, reverberation and should be treated as such.“*⁹¹

Dieses Zitat von Jones bedeutet, dass in absorptiven kleinen Räumen ausschließlich das Abklingen der Frequenzen, die Raumresonanzen anregen, signifikant ist (Siehe Kap. 4.6). Deshalb muss es hier auch als die Nachhallzeit betrachtet werden. Die Abklingzeit dieser Resonanzfrequenzen ist einfach die Zeitdauer, in der der SPL von einem Wert zu einem anderen abfällt, z. B. vom Wiedergabepegel bis zum Grundrauschen. Sie ist am besten aus dem Wasserfalldiagramm (Siehe Kap. 7.1.3) abzulesen. Abschließend lässt sich also feststellen - die bloße Erfassung des statistischen Abklingverhaltens des Raumes im Zeitbereich durch Messung der RT ist nicht der richtige Ansatz, sondern die detaillierte Untersuchung der einzelnen Reflexionen, da die Akustik der kleinen Räume von solchen Reflexionen dominiert ist.⁹²

⁸⁵ Vgl. Maier, 2008, S. 291.

⁸⁶ Vgl. Görne, 2008, S. 72.

⁸⁷ Vgl. Mulcahy, S. 120.

⁸⁸ Vgl. Brown, 2011.

⁸⁹ Vgl. Mulcahy, S. 120.

⁹⁰ Vgl. Blauert & Xiang, 2008, S. 173.

⁹¹ Jones, 2008, S. 137f.

⁹² Vgl. Szymanski, 2008, 114.

4.6 Raummoden

Die Anregung der Eigenresonanzen eines kleinen Raumes im Bassbereich verursacht ein ungünstiges Phänomen, das als **Raummoden** bezeichnet wird. Im Gegensatz zu Flatterechos (Siehe *Kap. 4.4*) entstehen Raummoden nur bei einem Dauerton. Wenn sich eine Schallwelle zwischen zwei parallelen Wänden im Raum ausbreitet und an den Wänden reflektiert, dann überlagert sie sich mit ihrer eigenen Reflexion. Diese Überlagerung erzeugt an bestimmten Punkten im Raum stehende Schalldruck-Maxima und -minima. Deshalb werden Raummoden auch **stehende Wellen** genannt. Voraussetzung dafür ist, dass zwischen die beiden reflektierenden Grenzen die Hälfte oder ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge passt.⁹³

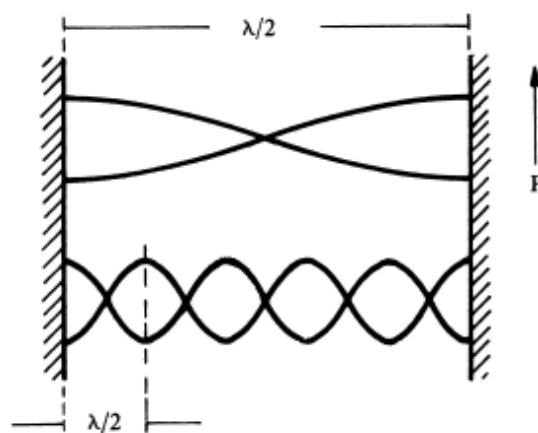


Abb. 8: Druckverteilung in stehenden Wellen zwischen zwei parallelen Wänden. (Dickreiter, et. al., 2014, S. 19)

Die tiefste Raummode entsteht also bei der Frequenz:

$$f = \frac{c}{2 \cdot d}$$

Die Formel entspricht der des Kammfilters (Siehe *Kap. 4.3*), nur mit dem Unterschied, dass d hier der Abstand zwischen den Reflexionsflächen ist. Weitere Raummoden entstehen bei ganzzahligen Vielfachen der tiefsten Frequenz. In einem Raum mit den Abmessungen (5 x 4 x 2,5) m tritt die tiefste stehende Welle zwischen der Vorder- und Rückwand bei 34,3Hz auf, da gilt:

$$f = \frac{343 \text{ m/s}}{2 \times 5 \text{ m}} = 34,3 \text{ Hz}$$

⁹³ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 18f.

In diesem Fall handelt es sich um eine axiale Raummode erster Ordnung. Sie hat zwei Schalldrucküberhöhungen an den Wänden und eine Auslöschung in der Mitte (Abb. 9). Die Raummode zweiter Ordnung liegt bei der doppelten Frequenz der Ersten (68,6Hz) und hat zwei Auslöschungen, jeweils bei einem Viertel des Abstands zwischen den Wänden. Die dritte Raummode liegt dann bei der dreifachen Frequenz der ersten Raummode usw. Raummoden, die zwischen vier Begrenzungsflächen entstehen, heißen tangential und die zwischen sechs oblique. Eine verallgemeinerte Formel zur Berechnung der Frequenzen von Raummoden beliebiger Art und Ordnung ist folgende:⁹⁴

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{B}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{H}\right)^2}$$

Wobei: f : Frequenz der Mode [Hz]

c : Schallgeschwindigkeit [m/s]

n_x : Ordnung der Mode (Raumlänge)

n_y : Ordnung der Mode (Raumbreite)

n_z : Ordnung der Mode (Raumhöhe)

L, B, H : Länge, Breite und Höhe des Raumes [m]

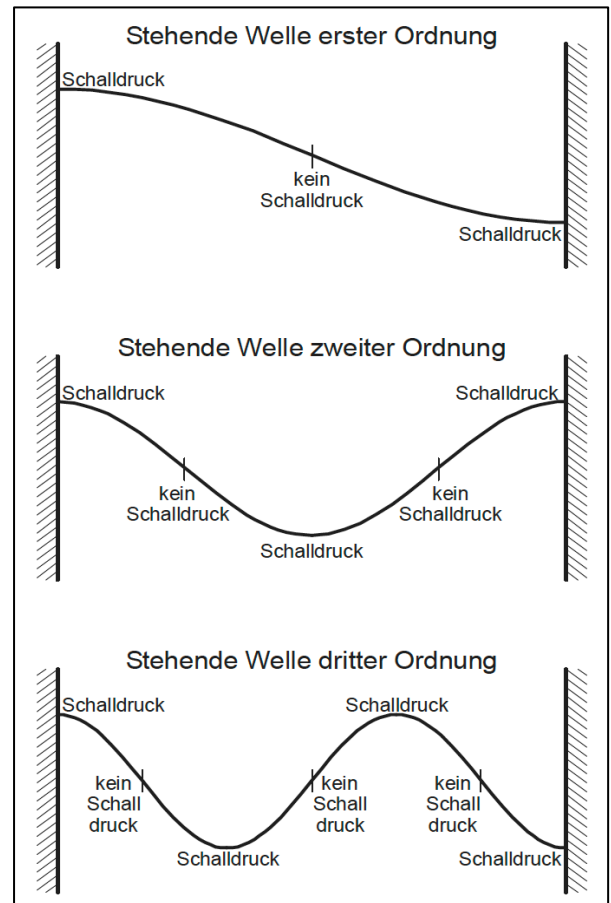


Abb. 9: Axiale Moden 1. Bis 3. Ordnung. (Frieesecke, 2014, S. 64)

Raummoden haben einen unausgewogenen Klang zur Folge und werden vom Hörer, der sich im Raum bewegt, als starke Schwankungen der Lautstärke in den betroffenen Frequenzen wahrgenommen.⁹⁵ Sie sind in kleinen Räumen besonders problematisch, da sie dort im kritischen mittleren Frequenzbereich zwischen 100 und 1000Hz auftreten.⁹⁶ Wenn die Möglichkeit besteht, den Raum vorzuplanen, sollte er so groß wie möglich gebaut werden; denn je größer die Dimensionen des Raumes sind, desto tiefer ist die Frequenz der tiefsten Raummode. In sehr großen Räumen wandern Raummoden in den nicht hörbaren Frequenzbereich.⁹⁷

⁹⁴ Vgl. Frieesecke, 2014, S. 64f.

⁹⁵ Vgl. Görne, 2008, S. 71.

⁹⁶ Vgl. Dickreiter, et. al., 2014, S. 50.

⁹⁷ Vgl. Görne, 2008, S. 71.

5 Maßnahmen zur Optimierung der Abhörposition

Die Abhörposition im Raum spielt eine entscheidende Rolle für die Qualität des abgehörten Schallsignals. Die richtige Auswahl der Abhörposition ist sogar der erste Schritt vor jeglichen Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik, weil die Anordnung der Akustikpaneele von ihr abhängt (siehe *Kap. 7.3*). Zu der Abhörposition gehört nicht nur der Abhörpunkt, sondern auch die Aufstellung der Monitore in Relation zur Raumgeometrie und -einrichtung. Vor allem die im Abhörbereich liegenden Objekte (Arbeitstisch, Bildschirm...) müssen in Betracht gezogen werden. Bei der Auswahl der Abhörposition geht es hauptsächlich um eine saubere Stereoabbildung, einen klaren Klang frei von Kammfiltereffekten sowie eine möglichst minimale Unausgewogenheit im Bassbereich. In den nächsten Abschnitten wird erläutert, wie diese Ziele realisiert werden können.

5.1 Saubere Stereoabbildung

Das wichtigste Kriterium für eine ausgewogene Stereowiedergabe ist die Symmetrie. Dabei ist nicht nur die Symmetrie der Monitore zueinander und zum Abhörpunkt gemeint, sondern auch zu den Raumbegrenzungen und Objekten in der Umgebung des Abhörbereiches. Asymmetrie könnte eine Verschiebung der gesamten Abbildung zur Folge haben (siehe *Summenlokalisation in Kap. 4.3*). Von daher ist die beste Einrichtung des Abhörbereiches, wenn die Monitore mit dem Abhörpunkt ein gleichseitiges Dreieck bilden, auf den Abhörpunkt ausgerichtet sind und gleiche Abstände zu den jeweiligen Seitenwänden, der Rückwand und sonstigen Oberflächen in der Umgebung aufweisen. Diese Aufstellung wird **Stereodreieck** genannt.⁹⁸ (*Abb. 10*).

Dabei ist wichtig zu beachten, dass der Abstand zwischen den Monitoren - auch **Stereobasis** genannt - bzw. zwischen Monitor und Hörer, einen Einfluss auf die Stabilität der Stereoabbildung hat. Ein kleinerer Abstand führt zu engerem Stereobild sowie zu stärkeren Phasendifferenzen zwischen dem rechten und linken Ohr und dadurch zu einer weniger stabilen Abbildung. Ein größerer Abstand führt zu

einem breiteren Stereobild, jedoch einer unstabilen Stereomitte. Außerdem besteht die Gefahr, dass der Anteil an Direktschall gegenüber dem des Diffusschalls am Abhörpunkt nicht

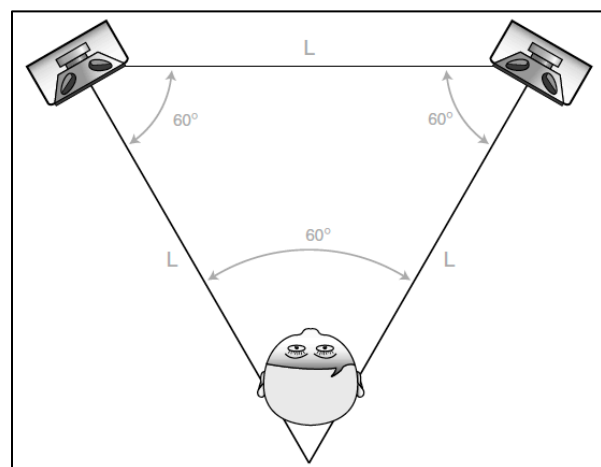


Abb. 10: Das Stereodreieck (gleichseitiges Dreieck). (Izhaki, 2008, S. 89)

⁹⁸ Vgl. Friesecke, 2013, S. 125f.

mehr überwiegt, je weiter weg der Hörer von den Monitoren sitzt. In einem Home-Studio ist es aus Platzgründen nicht immer möglich, das Stereodreieck einzuhalten. Das ist aber nicht schlimm, da diese Lösung nur ein empfohlener Standard ist, von dem man in geringem Maße abweichen kann. Laut Friesecke wird das Stereodreieck von vielen Toningenieuren in der Praxis ohnehin nicht bevorzugt⁹⁹. Der bestmögliche Sweetspot lässt sich auch durch Herumexperimentieren innerhalb des vorhandenen Platzes finden. Solange die Symmetrie erfüllt bleibt, kann man während der Wiedergabe eines bekannten Mixes den Kopf leicht nach vorne und nach hinten bewegen oder die Stereobasis etwas größer oder kleiner ziehen, bis der beste Klang erreicht wird.¹⁰⁰

5.2 Vermeidung von Raummoden

Wie bereits in *Kap. 4.6* erwähnt, sind die Tiefen und unteren Mitten in kleinen Räumen kritisch, da es aufgrund der Raumgeometrie zwingend zur Entstehung von Raummoden kommt. Sie beeinflussen unsere Beurteilung von Mischungen, entweder durch „zu viel Bass“ an einem Schalldruck-Maximum oder „zu wenig Bass“ an einem Schalldruck-Minimum.¹⁰¹ Außerdem beeinträchtigen sie die Fähigkeit der Lautsprecher, bestimmte Frequenzen abzustrahlen.¹⁰² Das Gute an Raummoden allerdings ist, dass sie sich an fixen Punkten im Raum befinden. Das bedeutet, dass es möglich ist, sie zu vermeiden und eine Abhörposition zu finden, an der ihre Auswirkungen am kleinsten sind. Raummoden lassen sich aus den Raumdimensionen berechnen (siehe *Kap. 4.6*). Eine andere Möglichkeit ist, sie herauszuhören, und zwar mithilfe eines Sinusgenerators. Dieser soll aufeinanderfolgende Sinustöne mit Frequenzen im kritischen Bereich zwischen 30Hz und 100Hz erzeugen. Währenddessen bewegt man sich im Raum und hört auf Ungleichmäßigkeiten des Pegels.¹⁰³ Für ein realistischeres Ergebnis kann statt des Sinustons auch ein Song, der für seinen gleichmäßigen Bassbereich bekannt ist, genutzt werden.¹⁰⁴

In dem Sinne ist es zu empfehlen, die Monitore mit dem Sweetspot nicht genau mittig zwischen zwei Raumbegrenzungen zu setzen, da sich dort die meisten Schalldruck-Maxima und -minima überlappen. Die Frequenz-Übertragungsfunktion für eine erste Raummode z. B. bei 40Hz sieht dort wie in *Abb. 11* aus. Durch eine kleine Verschiebung des Abhörpunktes von der Mitte nach vorne oder hinten ergibt sich ein viel ausgewogenerer Klang, weil sich dort weniger

⁹⁹ Vgl. Friesecke, 2014, S. 95.

¹⁰⁰ Vgl. Izhaki, 2008, S. 89f.

¹⁰¹ Vgl. Friesecke, 2013, S. 59.

¹⁰² Vgl. Izhaki, 2008, S. 88.

¹⁰³ Vgl. Friesecke, 2013, S. 142.

¹⁰⁴ Vgl. Senior, 2019, S. 24f.

Überhöhungen bzw. Auslöschungen befinden. Abb. 12 zeigt die Übertragungsfunktion nach einer Verschiebung des Abhörpunktes um 75cm nach hinten.¹⁰⁵

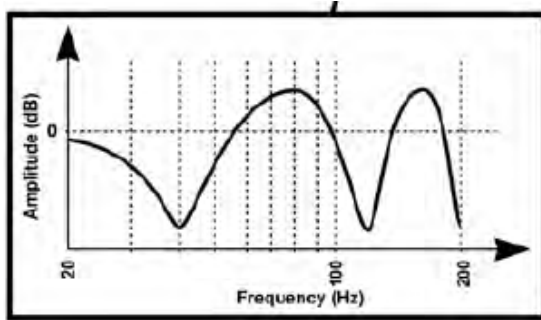


Abb. 11: Frequenzgang an einem Abhörpunkt mittig zwischen zwei Wänden. Erste Raummode bei 40Hz. (Senior, 2019, S. 23)

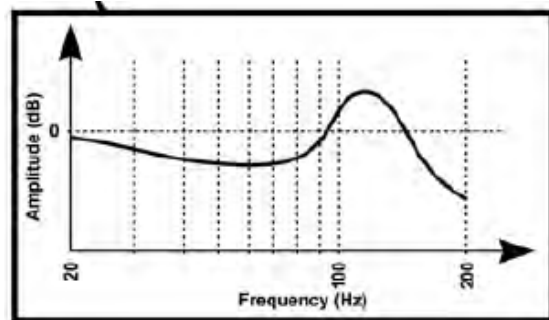


Abb. 12: Frequenzgang an einem Abhörpunkt 75cm hinter der Mitte. Erste Raummode bei 40Hz. (Senior, 2019, S. 23)

Leider geht diese einfache Maßnahme zulasten der Symmetrie und dadurch der Stereoabbildung, und zwar bei Abweichungen von der Mitte zwischen den Seitenwänden. Hier muss man einen Kompromiss eingehen und entscheiden, ob die Priorität beim Abhören eher auf einem korrekten Stereobild oder einer ausgewogenen Basswiedergabe liegen soll. Ist der Bass wichtiger, sollte die Abweichung von der Mitte so klein gehalten werden wie möglich.¹⁰⁶ Liegt die Priorität hingegen auf der Mitte, lohnt es sich zu prüfen, ob es die Mitte an der langen oder an der kurzen Wand des Raumes ist, die mehr Probleme im Bass verursacht. So setzt man die Abhörposition an die Wand, die für den Bassbereich am günstigsten ist und bewegt sich anschließend entlang der anderen Dimension nach vorne und hinten, bis der beste Klang erreicht ist. Das Drittel dieser Dimension wird als ideale Abhörposition empfohlen.¹⁰⁷

5.3 Richtige Aufstellung der Monitore

Es wird davon ausgegangen, dass Nahfeldmonitore eingesetzt werden, da sie am günstigsten sind und besser für den kleinen Raum geeignet sind (s. u.). Eine weitere Auseinandersetzung mit den Arten und technischen Daten der Lautsprecher erfolgt, wo notwendig.

5.3.1 Ausrichtung

Die Beschaffenheit der Monitore selbst kann eine Ursache für Kammfiltereffekte (Siehe Kap. 4.3) sein. In diesem Fall handelt es sich um **Mehrwegelautsprecher**. Insbesondere sind **Zweiwegesysteme** für diese Arbeit von Relevanz, da die meisten erschwinglichen Nahfeldmonitore für das Home-Studio zwei vertikal angeordnete Wege besitzen¹⁰⁸ – und zwar

¹⁰⁵ Vgl. Senior, 2019, S. 23-25.

¹⁰⁶ Vgl. Senior, 2019, S. 25.

¹⁰⁷ Vgl. Izhaki, 2008, S. 89.

¹⁰⁸ Vgl. Senior, 2019, S. 15.

einen **Hochtöner** für die Wiedergabe hoher Frequenzen und einen **Tief-/Mitteltöner** für die Wiedergabe sowohl mittlerer als auch tiefer Frequenzen. Diese Art von Monitoren besitzt einen kritischen **Cross-Over-Bereich** um die Übergangsfrequenz (zwischen 2000-5000Hz)¹⁰⁹, wo mehrere Frequenzen gleichzeitig von beiden Tönern wiedergegeben werden und sich überlappen. Diese Tatsache stellt kein Problem dar, solange die Frequenzen in diesem Bereich das Ohr gleichzeitig erreichen. Eine falsche Ausrichtung der Monitore auf der vertikalen Ebene führt jedoch zu einer Verzögerung zwischen den Signalen der beiden Membranen und dadurch zu kammfilterartigem Klang im Cross-Over-Bereich.¹¹⁰ Die korrekte Ausrichtung ergibt sich aus der Tatsache, dass hohe Frequenzen, im Gegensatz zu Tiefen, stark gerichtet sind. Deshalb sollte der Hochtöner auf einer Ebene mit den Ohren bzw. direkt zu den Ohren hin ausgerichtet sein.¹¹¹ Außerdem ist von einer liegenden Aufstellung der Monitore eher abzuraten, da eine horizontale Anordnung der unterschiedlichen Membranen zu Interferenzstörungen bei Kopfbewegungen auf der horizontalen Ebene führt.¹¹²

5.3.2 Entkopplung

Gegenstände in unmittelbarer Nähe der Monitore, wie der Arbeitstisch oder ggf. das Regal, auf dem sie stehen, schwingen mit dem abgestrahlten Schall mit. Die Interaktion zwischen den Monitoren und den mitschwingenden Körpern führt ebenfalls zu Kammfiltern. Dies betrifft insbesondere den tieferen Frequenzbereich. Um die Interaktion zu verhindern, muss der direkte Kontakt zwischen den Monitoren und den mitschwingenden Körpern vermieden werden, indem die Monitore entkoppelt werden.¹¹³ Die Entkopplung erfolgt beispielsweise durch das Einsetzen von Schaumstoff hoher Dichte zwischen den Monitoren und der darunterliegenden Fläche. Für ein optimales Ergebnis sollten die Monitore auf dafür vorgesehenen Ständern in ausreichendem Abstand zu eventuell mitschwingenden Gegenständen aufgestellt werden. Diese Ständer sollten eine hohe Trägheit aufweisen, damit die Monitorbox so wenig wie möglich mit dem Tieftöner schwingt. Um die Trägheit weiter zu erhöhen, können manche Ständer auch mit Sand gefüllt werden oder schwere Gegenstände wie Steinplatten zwischen Monitor und Ständer zum Einsatz kommen.¹¹⁴

¹⁰⁹ Vgl. Friecke, 2013, S. 131.

¹¹⁰ Vgl. Senior, 2019, S. 14f.

¹¹¹ Vgl. Izaki, 2008, S. 90.

¹¹² Vgl. Bernstein, 2019, S. 426.

¹¹³ Vgl. Owsinski, 2014.

¹¹⁴ Vgl. Senior, 2019, S. 10-12.

5.3.3 Abstand zu den Raumbegrenzungen

Die Interaktion des abgestrahlten Schalls mit den Raumbegrenzungen hinter und neben den Monitoren ist eine Quelle für Klangverfärbungen. Für das Verständnis dieses Problems muss bekannt sein, dass das Abstrahlverhalten eines Monitors u. a. von den Abmessungen der Monitor-Box abhängt. Frequenzen, deren Wellenlängen größer sind als der Durchmesser des Tieftöners, beugen sich und breiten sich kugelförmig aus. In anderen Worten strahlt der Monitor bis zu einer bestimmten Frequenz omnidirektional ab. Dadurch können mittlere sowie tiefere Frequenzen an die Vorderwand hinter den Monitoren gelangen und an ihr - genauso wie an den Seitenwänden - reflektieren.¹¹⁵ Die Überlagerung des Direktsignals mit seiner Reflexion führt zu einem Kammfiltereffekt. Wie schon in *Kap. 4.3* erläutert wurde, erfolgt die erste Auslöschung bei einer Verzögerung von einer halben Wellenlänge. Da die nach hinten abgestrahlte Schallwelle einen Teil der Strecke zweimal zurücklegt - vom Monitor zur Wand und zurück -, erfolgt hier die erste Auslöschung bei einem Abstand von einem Viertel der Wellenlänge zur Wand. Befindet sich die Front der Monitor-Box beispielsweise 70cm entfernt vor der Wand, so passiert die erste Auslöschung des Kammfilters bei 122,5Hz, denn die 70cm (= $\frac{1}{4}$ -Wellenlänge von 122,5Hz) werden zweimal zurückgelegt. Um eine Reflexion dieser Größenordnung in den Griff zu bekommen, wird eine sehr dicke Schicht an Absorbermaterial benötigt - Optimalerweise 70cm (siehe *Kap. 7.3.2*). Je weiter entfernt die Monitore von der Wand stehen, desto niedriger ist die betroffene Frequenz. Bei Verringerung des Abstands der Monitore zur Vorderwand wandert der Kammfilter in den höheren Frequenzbereich. Dort wird eine viel kleinere Absorbermaterialdicke benötigt, um den Kammfilter zu beseitigen.¹¹⁶ Daraus lässt sich schließen, dass eine nahe Aufstellung der Monitore an der Vorderwand für den kleinen Raum und das kleine Budget von Vorteil ist. Erstens, weil sie platzsparend ist und zweitens, weil weniger Kosten für Absorbermaterial entstehen. Dabei sind allerdings folgende Punkte zu beachten:

- Bei Monitoren mit einer hinteren Bassreflex-Öffnung muss eine Lücke zur Wand eingehalten werden, sonst kommt es durch die Strömung der Luft von der Wand in die Öffnung zurück zu mehr Verzerrungen im Bass.¹¹⁷
- Die Anordnung der Monitore in der Nähe einer Raumbegrenzung führt zur Verstärkung der Basswiedergabe, gefolgt von einem Einbruch. Dieses Phänomen ist als **Druckstau** oder im englischen als **Speaker Boundary Interference Response** (SBIR)

¹¹⁵ Vgl. Friesecke, 2013, S. 127.

¹¹⁶ Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 507.

¹¹⁷ Vgl. Senior, 2019, S. 22.

bekannt.¹¹⁸ Oben wurde erwähnt, dass sich durch die Aufstellung des Monitors nah an der Vorderwand Kammfilter in Richtung höherer Frequenzen verschieben. Doch was geschieht mit den tiefen Frequenzen? Dort kommt der konstruktive Interferenz-Effekt SBIR zustande. Aufgrund des kleinen Abstands zwischen Monitor und Wand im Vergleich zu den großen Wellenlängen im Bassbereich, werden die Phasenunterschiede zwischen Direktschall und Reflexion zu geringfügig, um Auslöschungen zu verursachen.¹¹⁹ Stattdessen werden die Wellen konstruktiv überlagert und es folgt eine Bassanhebung, und zwar an jeder Begrenzungsfläche um 6dB. D. h. +6dB an der Vorderwand, +12dB an einer Raumkante und +18dB in einer Raumecke.¹²⁰ Ein Nebeneffekt ist die stärkere Anregung der Raummoden.¹²¹ Daher ist sehr davon abzuraten, Lautsprecher an den Raumkanten bzw. in den Ecken aufzustellen, wenn keine Bassanhebung erwünscht ist. Sollen die Monitore aus Platzgründen nah an der Vorderwand aufgestellt werden, kann die 6dB-Anhebung mit einem EQ korrigiert werden (siehe *Kap. 7.5*).

- Die Abstände zur Vorder- und Seitenwand dürfen nicht gleich sein, sonst überlagern sich zwei Kammfilter bei der gleichen Frequenz. Dies führt zu noch stärkeren Verfärbungen des Klangs.¹²² Daher empfiehlt es sich, den Monitor so nah wie möglich an der Vorderwand, jedoch so weit wie möglich von der Seitenwand entfernt zu positionieren.

¹¹⁸ Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 537.

¹¹⁹ Vgl. Senior, 2019, S. 21.

¹²⁰ Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 537.

¹²¹ Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 507.

¹²² Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 538.

6 Konzepte für die Raumgestaltung

Nachdem die Abhörposition gewählt wurde, muss der Raum so gestaltet werden, dass die ersten Reflexionen im Abhörbereich möglichst eliminiert oder unterdrückt werden.¹²³ Aufgrund von Effekten wie Kammfiltern und Verschiebung der Lokalisation sind die ersten Reflexionen in einem Abhörraum nicht erwünscht. Sie verhindern eine objektive Beurteilung des ursprünglichen Schallsignals und stören das Stereobild. Über die Jahre wurden mehrere Konzepte entwickelt, um dieses Ziel zu erreichen. Einige verwenden das Prinzip der Schallabsorption, um die Reflexionen zu unterdrücken, andere das Prinzip der Schallreflexion, um sie umzuleiten.¹²⁴

6.1 Live-End-Dead-End-Konzept (LEDE™)

Nach diesem Konzept ist der vordere Teil des Raumes, wo der Abhörbereich sich befindet, absorptiv gestaltet, um erste Reflexionen zu unterdrücken. Die Monitore sind in eine absorptive Wand eingebaut, damit keine Reflexionen an der Vorderwand entstehen. Der Teil hinter dem Abhörbereich ist hingegen diffus gestaltet. Ziel dieses Konzepts ist, eine Abhörumgebung zu schaffen, die frei von Reflexionen ist und gleichzeitig einen quasi-diffusen Schallanteil zulässt. Dadurch wird ein natürlicher, nicht allzu trockener Klang im Raum erreicht und der störende Einfluss der frühen Reflexionen vermieden.¹²⁵

6.2 Non-Environment-Konzept

Im Gegenteil zu LEDE sind die Monitore in eine schallharte Wand eingebaut, auch der Boden ist reflektierend ausgeführt. Ansonsten sind alle restlichen Oberflächen im Raum hochabsorptiv gestaltet. Dadurch werden alle Reflexionen absorbiert und nur der Direktschall erreicht die Ohren. Die Reflexionen vom Boden werden vom Arbeitstisch unterbrochen. Ziel dieses Konzepts ist, eine Abhörumgebung zu schaffen, die von jeglichen Reflexionen frei ist, aber trotzdem durch die beiden schallharten Flächen Lautsprecherfront und Boden nicht komplett trocken wirkt.¹²⁶

¹²³ Vgl. Ballou, 2008, S. 141.

¹²⁴ Vgl. Ballou, 2008, S. 141.

¹²⁵ Vgl. Davis & Davis, 1980.

¹²⁶ Vgl. Newell, et. al., 1994.

6.3 Reflection-Free Zone

Reflection-free zone (RFZ) kam als eine Erweiterung des davor weit verbreiteten Konzepts LEDE™.¹²⁷ Es definiert eine zeitliche und räumliche reflexionsfreie Zone um den Abhörpunkt. D.h., es dürfen nach dem Direktschall binnen einer bestimmten Zeitdauer keine Reflexionen (mind. 20dB unter dem Direktschall) den Abhörbereich erreichen. Diese Zeitdauer wird **Initial Time Delay Gap** (ITDG) (Deutsch: Anfangszeitlücke) genannt und soll in kleinen Abhörräumen etwa 18ms betragen. Zur Realisierung der RFZ werden Monitore in eine evtl. absorptiv gestaltete Vorderwand eingebaut und die hintere Wand wird mit Breitband-Diffusoren versehen. Nach der ITDG erreichen die diffusen Reflexionen der Hinterwand den Abhörbereich und sorgen für einen natürlichen Klang.¹²⁸

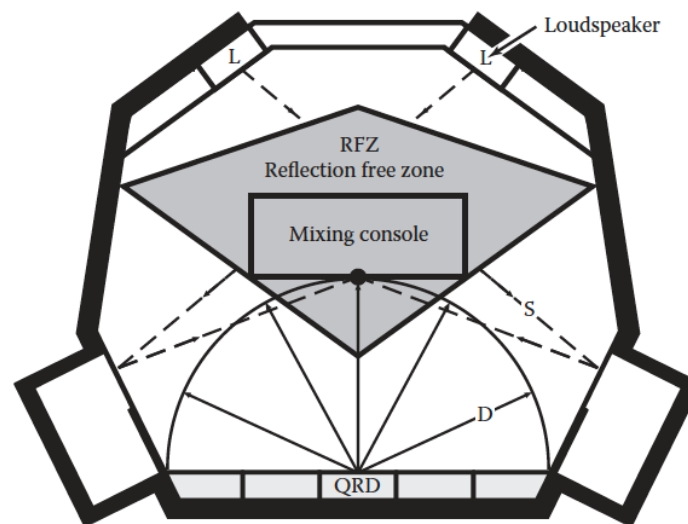


Abb. 13: Abhörraum mit RFZ und breitband-Diffusoren (Cox & D'Antonio, 2017, S. 53)

6.4 Controlled Image Design

Dieses Konzept wurde von Walker als eine Alternative für die absorptiven Lösungen. Seiner Untersuchungen zufolge werden erste Reflexionen durch Absorption im Besten Fall nur um den Bereich zwischen 5 und 17dB gedämpft. Außerdem führt die Unterdrückung der Reflexionen durch Absorption zu trockenen Abhörsituationen. Bei Controlled Image Design werden Reflexionen außerhalb den Abhörbereich mithilfe der Raumgeometrie und Reflektoren umgelenkt. Eine komplexere Gestaltung der Seitenwände lässt sogar eine freie Aufstellung der Monitore, statt sie in die Wand einzubauen, zu.¹²⁹

¹²⁷ Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 513.

¹²⁸ Vgl. Cox & D'Antonio, 2017, S. 51-53.

¹²⁹ Vgl. Walker, 1995.

7 Maßnahmen zur Optimierung der Raumakustik

Ist die optimale Abhörposition im Raum gesetzt, kann man mit dem nächsten Schritt loslegen, und zwar der Verbesserung der Raumakustik. Als allererstes müssen Raumakustikmessungen durchgeführt werden, um Reflexionen und Raummoden festzustellen. Anhand der Messergebnisse werden Akustikpaneele gezielt im Raum angeordnet.¹³⁰ Zwischendurch sollen Messungen wiederholt werden, um zu überprüfen, ob ein ausgewogenes Abklingverhalten erreicht wurde.¹³¹ In der Praxis kann zwischen zwei Fällen unterschieden werden. Interessiert man sich nur für den Abhörpunkt, dann reicht es auch nur dort einen ausgewogenen Klang zu erzielen. Möchte man den Raum auch für Aufnahmезwecken benutzen, so wird es notwendig, das Abklingverhalten im gesamten Raum zu betrachten. In dieser Arbeit geht es um Abhörräume, deshalb ist die Optimierung der Raumakustik nur im Abhörpunkt relevant.

7.1 Raumakustikmessungen

Die Erkenntnisse aus *Kap. 4* zeigen, dass die Messung der ersten Reflexionen und der Raummoden äußerst wichtig ist.¹³² Hierbei gibt es verschiedene Messsysteme und -verfahren, die jeweils eigene Vor- und Nachteile aufweisen (Siehe *Kap. 3.2*). Bei einem kleinen Budget ist die Auswahl der Messmethode auf die einer kostenlosen oder möglichst günstigen Messsoftware begrenzt. Welches Programm man benutzt, ist im Prinzip egal, denn alle Messmethoden führen zu den gleichen Ergebnissen.¹³³ Die Durchführung der Messung wird im praktischen Teil demonstriert. Vorab werden im Folgenden die wichtigsten Diagramme zur Interpretierung der Messergebnisse erklärt.

7.1.1 Impulsantwort (IR) und Envelope-Time Curve (ETC)

Die **Impulsantwort (IR)** (engl.: Impulse Response) beschreibt die Reaktion eines gemessenen Systems (Gerät oder Raum) auf einen Impuls. Allerdings hat das Messen mit einem Impulssignal einige Nachteile. So könnten sich Lautsprecher bei der Wiedergabe von Impulsen nicht-linear verhalten. Außerdem besitzt eine IR, die durch ein Impulssignal gemessen wurde, einen kleinen Signal-Rausch-Abstand (SNR) (engl.: Signal-to-noise ratio).¹³⁴ Eine IR wird daher bevorzugt anderweitig berechnet, und zwar mittels eines

¹³⁰ Vgl. Frießecke, 2014, S. 887.

¹³¹ Vgl. Maier, 2008, S. 298.

¹³² Vgl. Frießecke, 2013, S. 133.

¹³³ Vgl. Frießecke, 2014, S. 885.

¹³⁴ Vgl. Ballou, 2008, S. 1616.

Rauschsignals oder eines Sinussweeps, je nach Messmethode.¹³⁵ Mithilfe der IR lässt sich die Reaktion des gemessenen Systems auf ein beliebiges Eingangssignal im Zeitbereich beschreiben, und zwar durch Faltung des Signals mit der Impulsantwort des Systems.¹³⁶

Beim Messen eines Raumes zeigt die IR die Schallreflexionen über die Zeit, gibt allerdings keine Aussage über den Pegel dieser Reflexionen an. Dazu gibt es eine andere Anzeigeform der IR, die „**Energy-Time Curve**“ (**ETC**) genannt wird. Aus einer ETC kann man also sowohl den Zeitpunkt als auch den Pegel einer Reflexion ablesen.¹³⁷

7.1.2 Übertragungsfunktion

Während die Impulsantwort die Reaktion des Systems im Zeitbereich beschreibt, beschreibt die Übertragungsfunktion sie im Frequenzbereich. Beide können voneinander mithilfe der Fouriertransformation hergeleitet werden. Wenn man z. B. eine Messmethode verwendet, die die Impulsantwort eines Systems misst (Zeitbereich), kann daraus die Übertragungsfunktion errechnet werden (Frequenzbereich) und umgekehrt.¹³⁸

7.1.3 Wasserfalldiagramm

Ein Wasserfalldiagramm ist ein dreidimensionaler Graph, der bei der Untersuchung des Abklingverhaltens eines Raumes sehr effektiv ist. Die drei Dimensionen dieses Diagramms sind Pegel, Frequenz und Zeit. D. h., man kann damit den Ausklang des Raumes über die Zeit in Abhängigkeit von der Frequenz ablesen. Je nach gewünschter Funktion kann das Wasserfalldiagramm aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden. Möchte man z. B. einen Eindruck über die Raummoden oder allgemein über den Pegelabfall der einzelnen Frequenzen bekommen, so empfiehlt sich der schräge Blickwinkel aus Richtung der Zeitachse. Hier sieht das Diagramm wie ein Wasserfall aus, was ihm auch seinen Namen gab (*Abb. 14, links*). Interessiert man sich für die Nachhallzeit oder Abklingzeit, muss das Diagramm in Scheibchen zerschnitten werden (*Abb. 14, rechts*). Jede dieser Scheiben zeigt dann den Pegelabfall einer einzelnen Frequenz über die Zeit. Messsoftwares bieten für eine frequenzabhängige Betrachtung der Nachhallzeit meist verschiedene Möglichkeiten, das Wasserfalldiagramm zu zerlegen, z. B. in Terz- oder Oktavbereiche¹³⁹.

¹³⁵ Vgl. Friesecke, 2013, S. 134f.

¹³⁶ Vgl. Mulcahy, 2011, S. 12f.

¹³⁷ Vgl. Friesecke, 2013, S. 138.

¹³⁸ Vgl. Ballou, 2008, S. 1613.

¹³⁹ Vgl. Friesecke, 2014, S. 887.

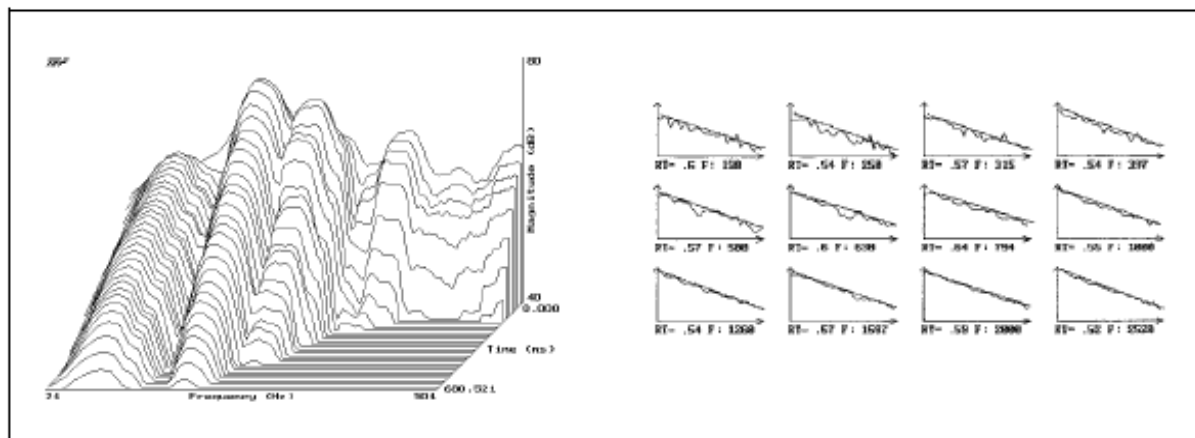


Abb. 14: Wasserfalldiagramm und eine Zerlegung in die Terzbänder (Friesecke, 2014, S. 888)

7.2 Behandlung von Raummoden

Raummoden sind ein komplexes Phänomen und ihre Behandlung ist platz- und kostenaufwändig. Daher werden sie im Home-Studio öfters von Musikern mit wenig Erfahrung und begrenztem Budget ignoriert.¹⁴⁰ Ein Aspekt der Komplexität von Raummoden beruht darauf, dass ein quaderförmiger Raum in der Regel sechs Grenzflächen hat, die alle an der Entstehung der Raummoden beteiligt sind. Es ist nämlich relativ einfach, die Raummoden zwischen zwei Wänden zu berechnen. Sobald allerdings die anderen zwei Wände, sowie der Boden und die Decke miteinbezogen werden, wird die Berechnung viel aufwändiger.¹⁴¹ (Siehe Kap. 4.6). Eine sehr gute Veranschaulichung dieses Problems bietet der Online-Raummoden-Rechner von „trikustik“ unter dem Link¹⁴². Aufgrund der entstehenden Probleme ist von Räumen mit parallelen Wänden und Dimensionen, die gleich bzw. Vielfache voneinander sind, abzusehen. So weisen beispielsweise quadratische oder gar kubische Räume die ungünstigsten Dimensionen auf. Häufig beschränkt nicht zuletzt ein kleines Budget schon bei der Wohnungssuche die Auswahl geeigneter Zimmer – der Einfluss auf die Raumgeometrie ist also oft sehr begrenzt. Lassen sich Raummoden nicht von vornherein vermeiden, müssen sie durch Absorption gedämpft werden. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten.

¹⁴⁰ Vgl. Senior, 2019, S. 22f.

¹⁴¹ Vgl. Ballou, 2008, S. 127.

¹⁴² <https://trikustik.at/raummoden-rechner/>

7.2.1 Bassfallen

Da Raummoden im Bassbereich stattfinden, wo die Längen der Schallwellen relativ groß sind, müssen für ihre Behandlung entsprechend große Absorber eingesetzt werden.¹⁴³ Ein poröser Absorber ist nämlich am wirksamsten, wenn er bei einem Schallschnellextraktum positioniert ist, und dieses befindet sich bei einem Viertel der Wellenlänge.¹⁴⁴ Für Raummoden unter 100Hz bedeutet dies eine Materialdicke im Absorber von ein bis vier Metern. Für den Bassbereich allgemein und insbesondere für Raummoden ist zu empfehlen, die Tiefenabsorber in den Ecken des Raumes zu platzieren, weil sich dort Druckstau aufbaut (Siehe Kap. 5.3.3). D. h., dass Tiefenabsorber dem Bass am effektivsten in den Ecken Energie entziehen können.¹⁴⁵ Außerdem werden dort Raummoden zwischen zwei bzw. drei Dimensionen gleichzeitig gedämpft. Solche Tiefenabsorber heißen dann Eckenabsorber oder Bassfallen und werden üblicherweise aus Mineralfaser, wie Glas- und Steinwolle, gebaut.¹⁴⁶ Auch in den Ecken müssen Bassfallen für Frequenzen unter 100Hz idealerweise ein bis vier Meter tief sein, was für das kleine Home-Studio sehr unpraktisch ist.¹⁴⁷ Allerdings zeigen auch schmalere Absorber eine deutliche Dämpfung unter 100Hz.¹⁴⁸ Bassfallen sind also zwar nicht die optimale Lösung für den kleinen Raum, sind aber durchaus von Nutzen. Um Kosten zu sparen, können Bassfallen selbst gebaut werden.¹⁴⁹

7.2.2 Helmholtzresonatoren

Effektiver als Bassfallen zur Dämpfung von Raummoden ist der Helmholtzresonator. Baulich ist er einfach eine Kiste mit einer oder mehreren kleinen Öffnungen.¹⁵⁰ Seine Funktionsweise beruht auf dem Feder-Masse-Prinzip. Die Luft in der Öffnung wirkt als mitschwingende Masse und die in der Kiste als akustische Feder.¹⁵¹ Bei Anregung seiner Eigenfrequenz entnimmt der Helmholtzresonator der Schallwelle einen großen Teil ihrer Energie durch Mitschwingen mit

¹⁴³ Vgl. Senior, 2019, S. 26f.

¹⁴⁴ Vgl. Görne, 2008, S. 83.

¹⁴⁵ Vgl. Klostermann, 2019.

¹⁴⁶ Vgl. Senior, 2019, S. 26.

¹⁴⁷ Vgl. Szymanski, 2008, S. 131.

¹⁴⁸ Vgl. Friesecke, 2014, S. 74f.

¹⁴⁹ Vgl. Senior, 2019, S. 27f.

¹⁵⁰ Vgl. Friesecke, 2013, S. 163.

¹⁵¹ Vgl. Görne, 2008, S. 58.

entgegengesetzter Phase.¹⁵² Daher arbeitet er schmalbandig¹⁵³ und kann gezielt eingesetzt die Möglichkeit, solche Resonanzabsorber selbst zu bauen.¹⁵⁴

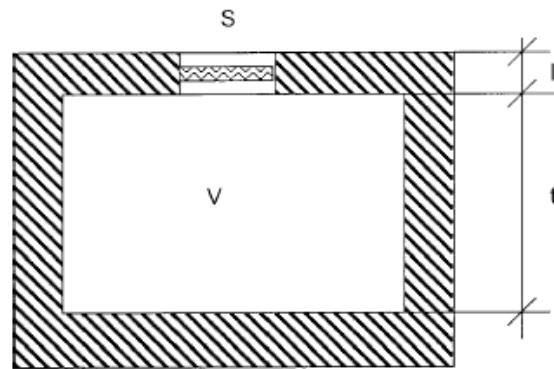


Abb. 15: Prinzipaufbau eines Helmholzresonators (Ahnert & Tennhardt, 2008, S. 238)

Die Resonanzfrequenz eines Helmholzresonators errechnet man mit der Formel:¹⁵⁵

$$f_R = 2\pi \sqrt{\frac{S}{V(l + 2\Delta l)}}$$

Wobei:	f_R :	Resonanzfrequenz des Helmholzresonators [Hz]
	S :	Querschnittsfläche des Resonators [m ²]
	V :	Resonatorvolumen [m ³]
	l :	Resonatorhalslänge [m]
	$2\Delta l$:	Mündungskorrektur [m]

¹⁵² Vgl. Friesecke, 2013, S. 163.

¹⁵³ Vgl. Dickreiter, et al., 2014, S. 23.

¹⁵⁴ Vgl. Friesecke, 2013, S. 163-171.

¹⁵⁵ Vgl. Ahnert & Tennhardt, 2008, S. 237.

7.3 Behandlung der ersten Reflexionen

7.3.1 Auswahl des passenden Konzepts

In *Kap. 6* wurden verschiedene Konzepte für die Raumgestaltung vorgestellt, die alle eine Reflexionspause nach dem Direktschall anstreben und dadurch eine objektive Beurteilung des Direktsignals ermöglichen. In dieser Arbeit wird das Konzept der RFZ (siehe *Kap. 6.3*) als Grundlage verwendet. Damit es sich aber für den kleinen Wohnraum und das kleine Budget eignet, müssen einige Änderungen vorgenommen werden:

- Anstatt dass sie in die Wand eingebaut werden, stehen die Monitore frei auf Monitorständern.
- Reflexionen an der Vorderwand werden durch Absorption unterdrückt.
- Die Hinterwand wird nur dann diffus gestaltet, wenn die Gegebenheiten des bestehenden Raumes dies zulassen (z. B. keine Fenster und Möbelstücke).

Außer der oben genannten Punkte ist RFZ am passendsten für diese Arbeit, da Akustikpaneele nur dort angebracht werden, wo eine Reflexion entsteht. Dies spart Kosten im Vergleich zu anderen Konzepten wie LEDE™, wo die vordere Hälfte des Raumes komplett absorbierend sein muss (siehe *Kap. 6.1*), oder wie Controlled Image Design, wo Reflexionen durch eine besondere Raumgeometrie umgeleitet werden (siehe *Kap. 6.4*).

Stellen, an denen Absorber angeordnet werden müssen, können am einfachsten mithilfe eines Spiegels identifiziert werden. Da sich Schall beim Reflektieren wie Lichtstrahlen verhält, entsteht eine erste Reflexion genau dort, wo man vom Abhörpunkt aus im Spiegel den Monitor sichten kann.¹⁵⁶ In kleinen Räumen betrifft dies nur mittlere und hohe Frequenzen, denn Reflexionsgesetze gelten nur für kleine Wellenlängen im Verhältnis zur Reflexionsfläche (Siehe *Kap. 2.3*). Die Reflexionspunkte an den Seitenwänden, der Vorderwand hinter den Monitoren und der Decke müssen anschließend mit Absorbern bedeckt werden.¹⁵⁷ Hierfür eignen sich besonders poröse Absorber wie Akustik-Schaumstoff und Mineralfaser wie Stein- oder Glaswolle.¹⁵⁸ Typischerweise wird eine Absorberdicke bis 15 cm verwendet. Um tiefere Frequenzen mit der gleichen Materialdicke einfangen zu können, bietet es sich an, eine Luft-Lücke zwischen Absorber und Wand zu lassen.¹⁵⁹

¹⁵⁶ Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 409.

¹⁵⁷ Vgl. Senior, 2019, S. 19f.

¹⁵⁸ Vgl. Everest & Pohlmann, 2015, S. 410.

¹⁵⁹ Vgl. Szymanski, 2008, S. 103-105.

7.3.2 Auswahl passender Absorbermaterialien und -dicken

Hilfreich bei der Auswahl des passenden porösen Absorbers und seiner Dicke ist die Kenngröße **spezifischer Strömungswiderstand** R_s . Er beschreibt die Durchlässigkeit des Absorbers der Luft entgegen und ist definiert als das Verhältnis der Druckdifferenz vor und hinter dem Absorber zum hindurchtretenden Volumenstrom der durchströmenden Luft:¹⁶⁰

$$R_s = \frac{\Delta p \cdot A}{q_v}$$

Wobei: R_s : spezifischer Strömungswiderstand [Pa.s/m]

A: Querschnittfläche der Materialprobe senkrecht zur Durchströmungsrichtung [m²]

Δp : Druckdifferenz [Pa]

q_v : durch das Material hindurchtretender Volumenstrom [m³/s]

Dieser Wert ist allerdings auf eine bestimmte Dicke einer Absorberplatte bezogen. Deshalb wird der **längenspezifische Strömungswiderstand** (LR_s) benutzt, um R_s für einen Absorber mit der Länge 1m ohne vorgegebene Dicke zu berechnen. Dieser Wert ist also nur Materialabhängig. Er ergibt sich durch Teilung von R_s durch die Dicke [m] des Absorbers und hat die Einheit Pa.s/m².¹⁶¹ Eine Tabelle mit den LR_s -Werten verschiedener Absorbermaterialien findet man hier¹⁶². Es ist darauf zu achten, dass ein hoher LR_s nicht gleich besseres Absorptionsvermögen bedeutet. Ein dicker Absorber mit zu hoher LR_s hindert den Schall so stark vom Eindringen, dass der Schall reflektiert wird, statt absorbiert. Deshalb sollte LR_s desto niedriger sein, je größer die Absorberdicke ist.¹⁶³ Um genau zu wissen, wie effektiv ein Absorber ist und in welchem Frequenzbereich, kann Mithilfe des LR_s das frequenzabhängige Absorptionsgrad (Siehe Kap. 2.4) berechnet werden.¹⁶⁴ Unter dem Link¹⁶⁵ ist ein Online-Rechner zur Berechnung des Absorptionskoeffizienten nach Eingabe von LR_s , Absorberdicke und Luft-Lücke.

Im praktischen Teil dieser Arbeit wird anhand der bisherigen Erkenntnisse über Absorber eine einfache und kostengünstige Bauweise und Anordnung der Absorberplatten demonstriert (Siehe Kap. 8.4).

¹⁶⁰ Vgl. Ahnert & Tennhardt, 2008, S. 233f.

¹⁶¹ Vgl. Daubner, 2017.

¹⁶² <https://www.iochenschulz.me/de/blog/steinwolle-glaswolle-hanf-absorber-material>

¹⁶³ Vgl. Fasold & Veres, 1998.

¹⁶⁴ Vgl. Allard & Champoux, 1992.

¹⁶⁵ <http://www.acousticmodelling.com/porous.php>

7.4 Behandlung von Flatterechos / Diffusion

Flatterechos (Siehe *Kap. 4.4*) kann man auf zwei Wege erkennen. Entweder subjektiv mit einem Impulsartigem Schallsignal, wie z. B. Händeklatschen, oder durch Messung der IR des Raumes. Flatterechos erscheinen in der IR als Peaks, später als 50ms zum Direktsignal.¹⁶⁶ Die beste Lösung gegen Flatterechos ist die Meidung von parallelen Wänden und reflektierenden Oberflächen. Schon beim Grundriss des Raumes, können schrägeingebaute Akustikmodule in den Wänden geplant werden. In einem bestehenden Raum muss mindestens eine der gegenüberliegenden Wände absorptiv oder diffus gestaltet werden. Somit werden Reflexionen an der behandelten Wand schon absorbiert oder zerstreut, bevor sie zurückgeworfen werden und an die parallele Wand gelangen.¹⁶⁷ Bei kleinen Räumen müssen Diffusoren allerdings mit Vorsicht benutzt werden. Der Hörer soll nämlich so weit wie möglich vom Diffusor sitzen, und zwar in seinem Diffusfeld, sonst kommt es zu Verfälschungen des abgehörten Schallsignals. Hierzu empfiehlt sich ein minimaler Abstand von 3m.¹⁶⁸ Deshalb sind absorptive Lösungen im kleinen Studio typischerweise vorteilhafter als Diffusion.¹⁶⁹ Flatterechos treten bei hohen Frequenzen auf, deshalb reicht für ihre Behandlung eine dünne Schicht von porösen Absorbern,¹⁷⁰ denn ihr Absorptionsgrad steigt mit der Frequenz¹⁷¹. Vorhandene Faserstoffe, wie Teppich und Vorhänge, erfüllen sogar schon diesen Zweck. Dabei muss darauf geachtet werden, keine großen Flächen mit solchen Materialien zu bedecken, sonst wird der Raum übergedämpft und er klingt dadurch zu trocken.¹⁷²

7.5 Einsatz von EQ

Der scheinbar einfachste Weg zur Korrektur der IR eines Raumes ist, einen Equalizer auf der Signalstrecke, und zwar direkt vor den Monitoren, einzusetzen. Dabei wird die Frequenz-Übertragungsfunktion der Monitore an einem bestimmten Punkt gemessen und dann mit einem EQ geglättet. Hierbei ist es jedoch unabdingbar zu wissen, wie genau der EQ einzusetzen ist, sonst bringt er mehr Nachteile als Vorteile.

- Ein Nachteil der Nutzung eines EQs ist, dass er sich nur auf den gemessenen Punkt bezieht. Wenn z.B. am Abhörpunkt gemessen wurde, dann verursachen schon

¹⁶⁶ Vgl. Görne, 2008, S. 81f.

¹⁶⁷ Vgl. Frießecke, 2013, S. 103f.

¹⁶⁸ Vgl. Cox & D'Antonio, 2017, S. 56.

¹⁶⁹ Vgl. Szymanski, 2008, S. 120.

¹⁷⁰ Vgl. Senior, 2019, S. 30.

¹⁷¹ Vgl. Görne, 2008, S. 83.

¹⁷² Vgl. Maier, 2008, S. 298.

kleine Bewegungen mit dem Kopf Abweichungen von der Linearität. Besonders betroffen hier sind höhere Frequenzen. Bewegt man sich im Raum, so hört man gar etwas völlig anderes als das korrigierte Signal.

- Starke Einbrüche lassen sich mithilfe von EQs nicht korrigieren. Als Beispiel nehmen wir eine Auslöschung bei 200Hz aufgrund einer Raummode. Eine Pegelanhebung bei 200Hz, um den Einbruch zu kompensieren, führt zu einer entsprechend stärkeren Reflexion, die wiederum eine Auslöschung an der gleichen Stelle verursacht. Außerdem können große Pegelanhebungen zu Übersteuerung führen.
- Durch Änderungen im Frequenzgang wird auch der Phasengang des bearbeiteten Signals beeinflusst. Aufgrund des Arbeitsprinzips des EQs hat man keinen Einfluss darauf, wie ein Eingriff auf den Phasengang wirkt. Deshalb entstehen durch viele schmalbandige Änderungen des Frequenzgangs unkontrollierbare Phasenprobleme, auch wenn der Frequenzgang linear aussieht. Die Folge ist eine unerwünschte Verfärbung des Klanges.
- Die Nutzung eines Messsignals mit einer niedrigen Auflösung stellt eine weitere Quelle für Probleme beim EQen dar. So könnte beispielsweise ein gemessener Einbruch von 6dB, der bei 100Hz zu liegen scheint, in Wirklichkeit 17dB bei 98Hz ausmachen. Solche Ungenauigkeiten der Anzeige des Frequenzgangs führen zu falschen Korrekturmaßnahmen und dadurch einem schlechteren Klangergebnis.

Die o.g. Nachteile bedeuten nicht, dass der Einsatz eines EQs ganz zu vermeiden ist, sondern dass er nur mit gewisser Vorsicht und maßvoll eingesetzt von Vorteil sein kann. Um eine gute Beweglichkeit um den Abhörpunkt zu ermöglichen, sollte der EQ nur in den Tiefen eingesetzt werden, und zwar ausschließlich zur Kompensation von Überhöhungen. Da Phasenprobleme eher beim Kompensieren von Einbrüchen stark auftreten, sollten Senkungen und starke Einbrüche möglichst durch raumakustische Maßnahmen behoben werden.^{173 174}

¹⁷³ Vgl. Senior, 2019, S. 27.

¹⁷⁴ Vgl. Mulcahy, 2011, S. 65-67.

8 Praktischer Teil

In diesem Kapitel wird das Wissen aus dem theoretischen Teil durch die Optimierung der Abhörsituation im Schlafzimmer der Autorin in die Praxis umgesetzt. Ziele des praktischen Teils sind das Belegen der Theorie an einem konkreten Fall sowie die Erprobung und Erläuterung von Lösungen für das kleine Budget, die zum Einsatz kommen können. Hierzu zählen beispielsweise die Interpretation von Messergebnissen oder Möglichkeiten zum Selbstbau akustischer Elemente. Zur Kalkulation des Budgets werden Kosten angegeben. Der praktische Teil baut also nicht nur auf den Theoretischen auf, sondern vervollständigt diesen um wichtige Aspekte. Daher sollten die beiden Teile als Einheit betrachtet werden. Nur so kann man sich mithilfe dieser Arbeit ein vollständiges Bild über die Optimierung der Abhörsituation im kleinen Raum verschaffen.

8.1 Erfassung der Gegebenheiten

Im ersten Schritt wird das Zimmer bemessen. Die Dimensionen sind (5,32 x 2,35 x 2,52) m. Der Raum ist in etwa so breit wie hoch und die Länge ist ungefähr das Zweifache der Höhe. Das ist leider ungünstig für Raummoden. Das Zimmer ist allerdings sehr hellhörig, was von Vorteil ist, da ein Teil der Bassenergie durch die Wände entfliehen kann, statt zu reflektieren. Dadurch verringert sich der Einfluss der Raummoden. Das Mobiliar ist über die gesamte Fläche des Zimmers so verteilt, dass es nicht genügend Platz für die Abhörposition gibt. Das Zimmer muss daher umgestaltet werden. Einige Möbelstücke, wie das Bett, sind allerdings verhältnismäßig groß und lassen sich nicht gut verschieben. Das Fenster befindet sich an der hinteren Wand unsymmetrisch zwischen den Seitenwänden. Die Zimmertür ist dünn und nicht schalldicht. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass das Zimmer sehr klein ist ($31,5\text{m}^3$) und keine Möglichkeiten für perfekte Symmetrie (wegen Fenster und Tür und Möbeln) bietet, sollte jedoch im Bassbereich, aufgrund der schlechten Schallisolation, nicht allzu problematisch sein.

Eine Berechnung der axialen Raummoden liefert folgende Ergebnisse:

- **In der Länge** (5,32m): Raummode erster Ordnung liegt bei 32Hz. D. h. die zweite bei 64Hz, die dritte bei 96Hz und die vierte bei 128Hz.
- **In der Breite** (2,35m): Raummode erster Ordnung liegt bei 73Hz und die zweite bei 146Hz.
- **In der Höhe** (2,52m): Raummode erster Ordnung liegt bei 68Hz und die zweite bei 136Hz.

8.2 Auswahl der Abhörposition

Die Auswahl der Abhörposition ist durch die Gegebenheiten des Zimmers eingeschränkt. Eine Aufstellung der Monitore an der langen Wand würde problematische ersten Reflexionen an der Wand direkt hinter dem Abhörpunkt verursachen, denn die Breite des Zimmers ist so gering, dass kein Platz zum Anbringen von Absorbern vorhanden ist. Außerdem würde der Abhörplatz den Weg von der Tür zum Bett blockieren. Also bleibt die Aufstellung der Monitore an der kurzen Wand. Da das Fenster nicht mittig ist, bietet diese Hälfte des Raumes keine Symmetrie. Somit fällt die Wahl auf die andere Hälfte des Zimmers. Dort befinden sich Möbelstücke (Schrank und Regal), die sich gut in den mittleren Bereich des Zimmer verschieben lassen. Nun gibt es eine Seite des Zimmers, die frei ist zum Einrichten des Home-Studios. Die endgültige Abhörposition wurde anhand der Kenntnisse in *Kap. 5* festgelegt. *Abb. 16* veranschaulicht die Abhörposition im Rohraum (unbehandelt):

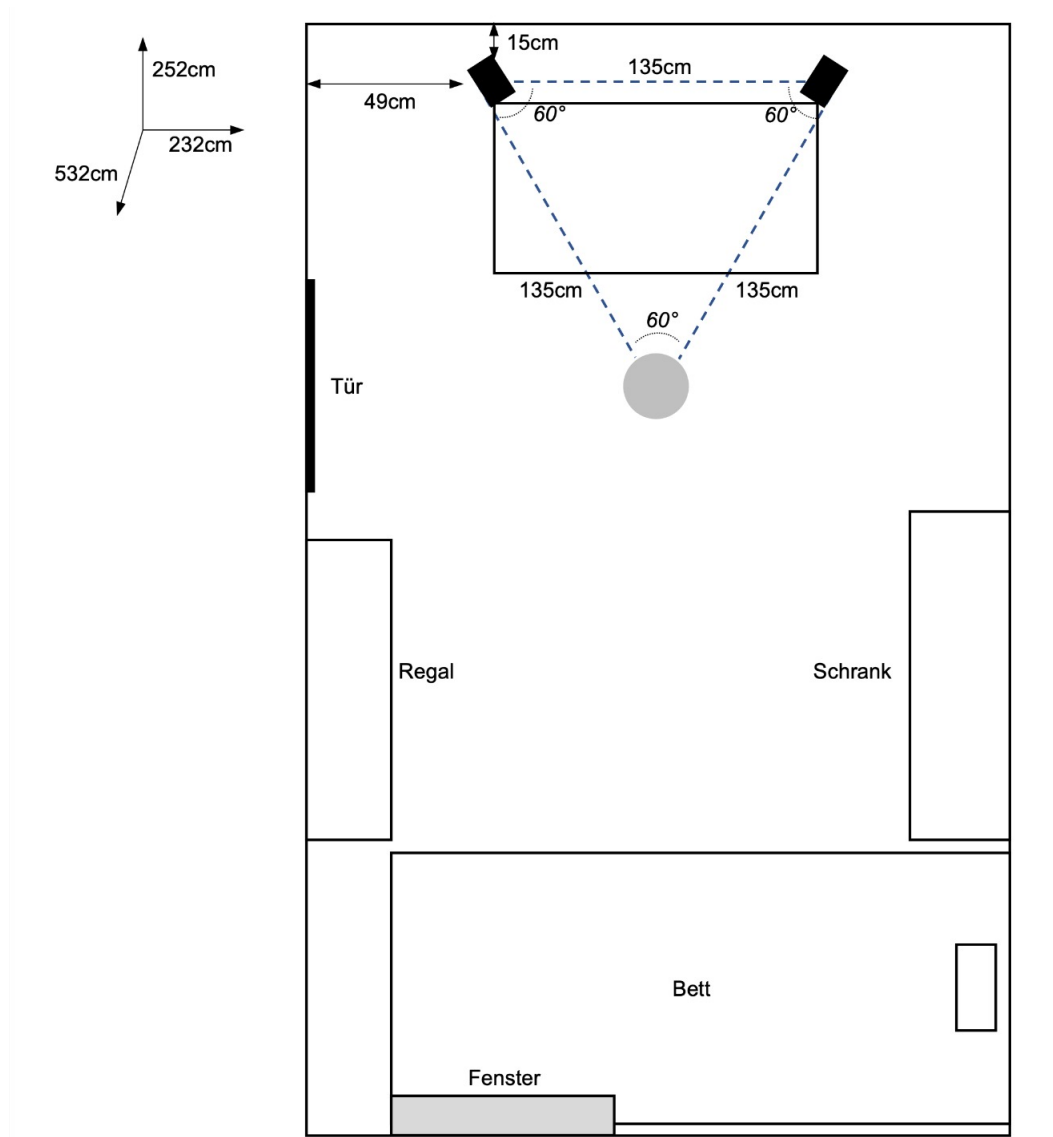


Abb. 16: Skizze des Rohraums mit Abhörposition

8.3 Durchführung der raumakustischen Messungen

8.3.1 Ausrüstung und Einstellungen der Messsoftware

Für die Messung wurde die Raumakustik-Messsoftware „Room EQ Wizard“ (Kurz: REW) benutzt, weil sie die gängigste kostenlose Messsoftware in dem Bereich darstellt. Bei der technischen Ausführung der Messungen wurde fast ausschließlich die Hilfe-Sektion im Menü des Programms bzw. auf der Webseite des Herstellers zur Orientierung genutzt. Sie gilt also als Hauptquelle für diesen Teil der Arbeit. Im Laufe dieses Kapitels werden einige Gegebenheiten des Programms erklärt, die für diese Arbeit von Relevanz sind. Es ist jedoch sehr zu empfehlen, sich selbst mit der Hilfe-Sektion zu befassen, wenn man noch ein tieferes Verständnis für die Messungen und Graphen erlangen möchte. Vor Beginn der Messung muss die notwendige Ausstattung besorgt werden. Zur Durchführung der Messung wird Folgendes benötigt:

- 1- Rechner mit Raumakustik-Messsoftware
- 2- Messmikrofon, typischerweise mit der Richtcharakteristik „Kugel“. Das bedeutet, dass das Mikrofon Schallsignale aus allen Richtungen gleich laut aufnimmt.
- 3- Mikrofonstativ zur Aufstellung des Mikrofons.
- 4- SPL-Meter (eine kostenlose mobile App geht auch).
- 5- Ein Lautsprecher zur Wiedergabe des Messsignals.
- 6- Audio-Interface mit Mikrofonvorverstärker und Phantomspeisung von 48V.
- 7- Kabel, um die ganze Hardware miteinander zu verbinden

Als erster Schritt muss in den Einstellungen von REW die Sample-Rate der Messung festgelegt werden. Die Inputs und Outputs des Interfaces müssen zudem gewählt werden. REW benutzt nach Wunsch den zweiten Input und Output des Interfaces als Zeit-Referenz. Dazu müssen Input und Output mit einem Kabel verbunden werden (Loopback). Mithilfe dieser Referenz bestimmt REW die Delay-Zeit, bis das Signal aus dem Lautsprecher das Mikrofon erreicht. *Abb. 17* zeigt die gewählten Einstellungen der Messungen in dieser Arbeit.

Im zweiten Schritt muss das Audio-Interface kalibriert werden. Hierzu wird von REW die Impulsantwort des Interfaces gemessen und als Mess-Datei gespeichert. Bei Durchführung von Messungen, kann REW diese Datei dann zur Eliminierung der Impulsantwort des Interfaces verwenden. Messmikrofone kommen normalerweise bereits vom Hersteller mit einer Kalibrier-Datei. Diese kann in REW zur Kalibrierung des Mikrofons geladen werden. Danach muss mithilfe eines eigenen SPL-Meters die Anzeige von REW kalibriert werden, indem ihre Werte beim Abspielen eines Rauschens aufeinander abgestimmt werden.

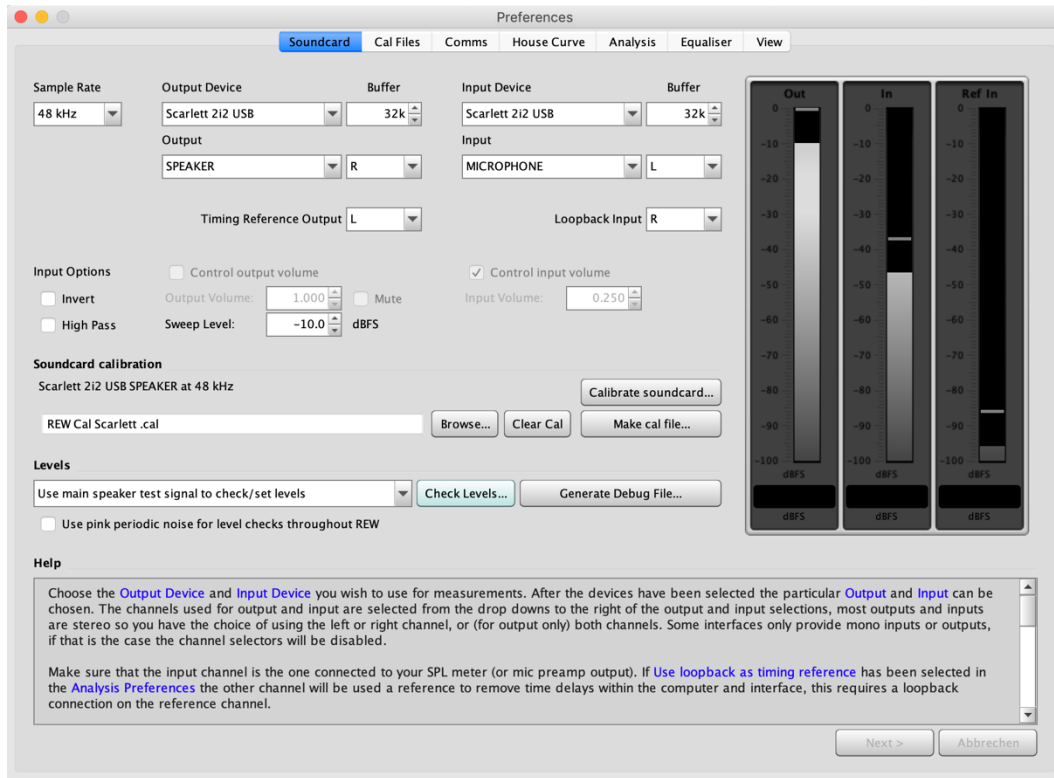


Abb. 17: Screenshot der Einstellungen in REW

Nachdem das Messmikrofon an Abhörpunkt gestellt wird, kann die Messung gestartet werden. REW verwendet ein für das Messsignal ein Sinussweep, deren Länge vom Nutzer einstellbar ist. Hierzu empfiehlt sich einen längeren Sweep zu benutzen, um einen möglichst großen Signal-Rausch-Abstand zu haben. Abb. 18 zeigt die Messeinstellungen.

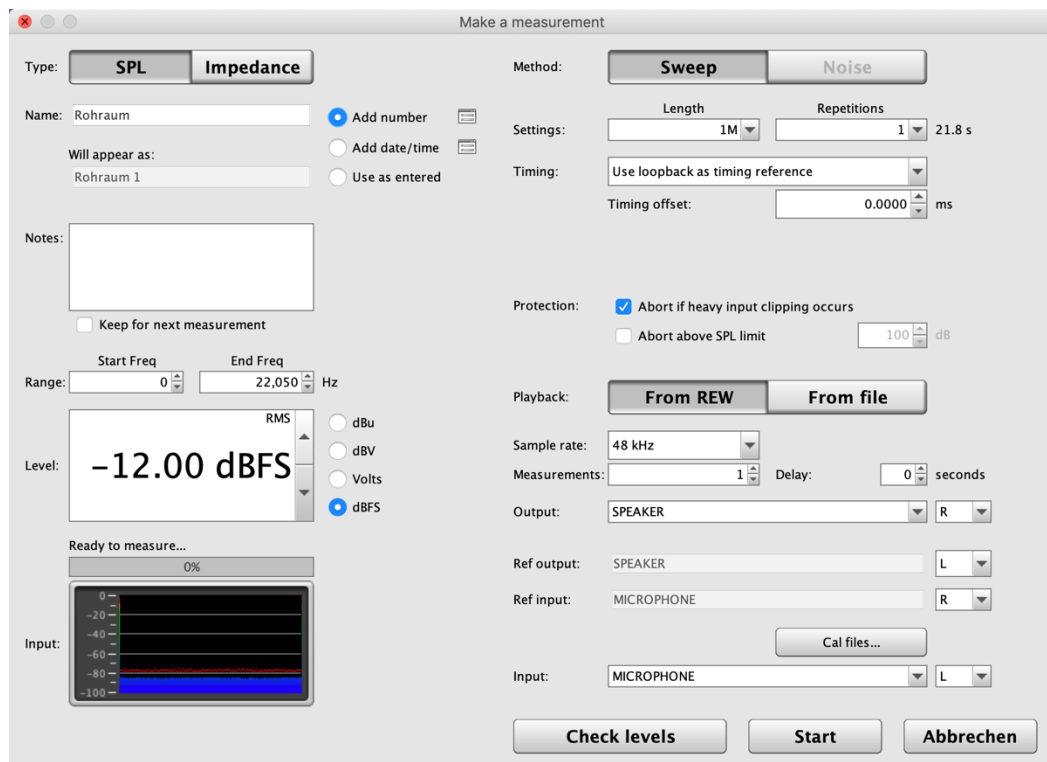


Abb. 18: Screenshot des Messungsfensters in REW

8.3.2 Messergebnisse des Rohraums

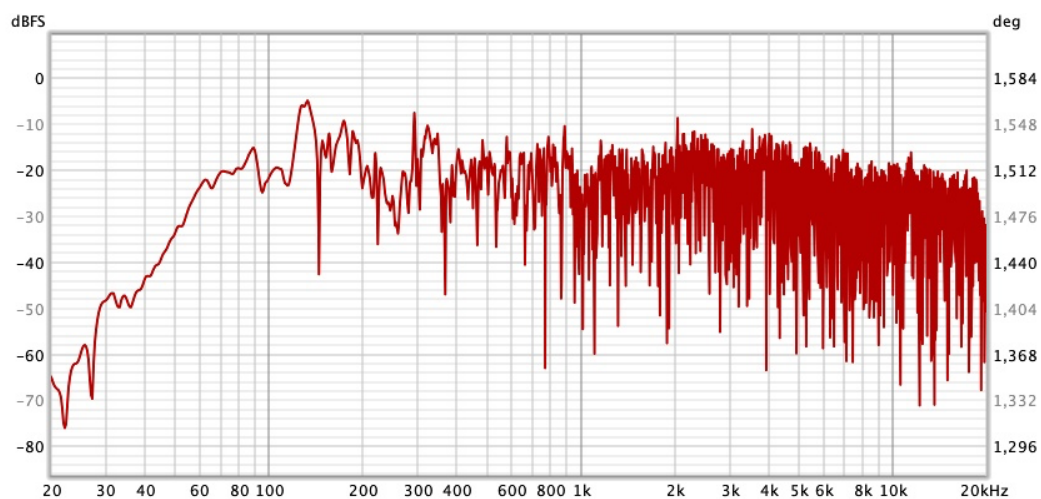


Abb. 19: Frequenzgang des Rohraums

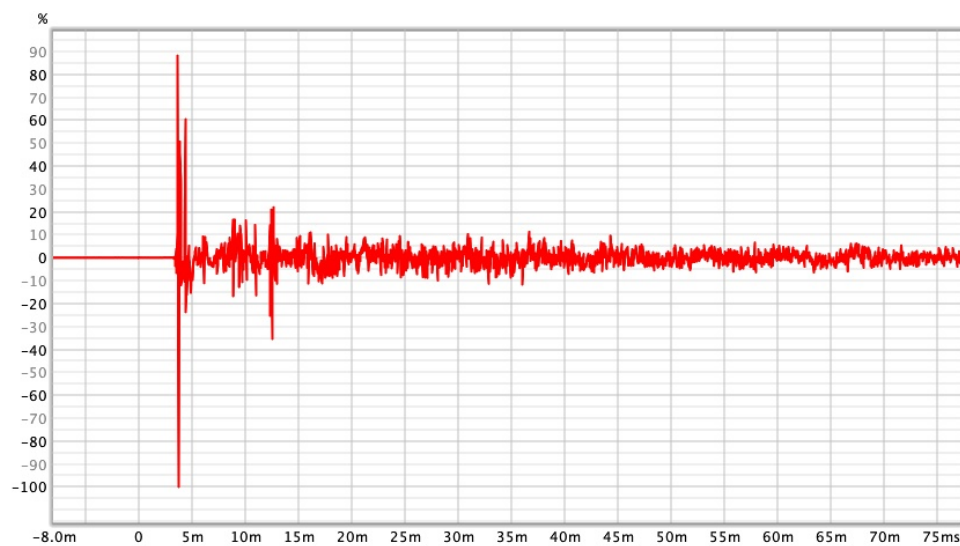


Abb. 20: Impulsantwort des Rohraums

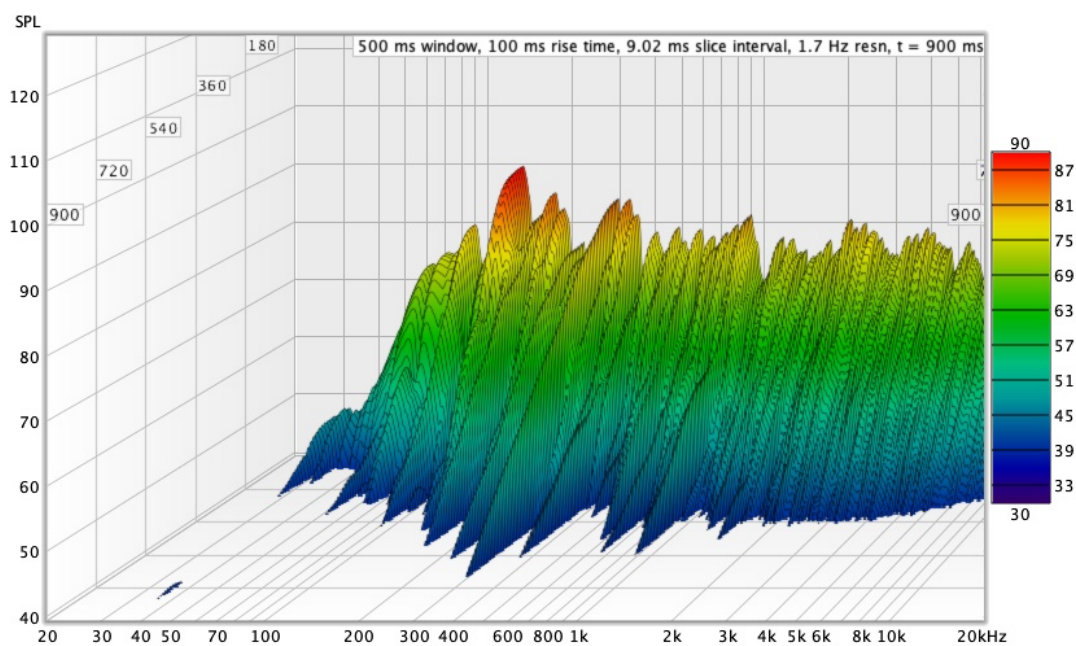


Abb. 21: Wasserfalldiagramm des Rohraums

8.3.3 Interpretation der Messergebnisse des Rohraums

Frequenzgang (Abb. 19): Der Frequenzgang des Raumes ist sehr weit von Linearität entfernt. Es lassen sich über den ganzen Frequenzbereich zahlreiche Überhöhungen, Senkungen und Einbrüche feststellen. Der Einfluss von Raummoden wird deutlich durch die Überhöhung bei ca. 129Hz. Dies ist die Frequenz der axialen Raummode erster Ordnung zwischen Vorder- und Rückwand. Die Auslöschung bei ca. 145Hz wird durch die axiale Raummode zweiter Ordnung zwischen den Seitenwänden verursacht. Die starke Senkung in den Mitten bei ca. 260Hz könnte eine Seiten- oder Vorderwandreflexion als Ursache haben. Durch Überlagerung der Effekte der unterschiedlichen ersten Reflexionen entstehen die kammfilterartigen Strukturen in den Höhen.

Impulsantwort (Abb. 20): in der Impulsantwort sind erste Reflexionen schon innerhalb weniger als 1ms nach dem Direktsignal zu erkennen. Sie könnten z. B. Tischreflexionen sein. Es ist darauf zu achten, dass das Direktsignal nicht bei 0ms kommt, sondern erst nach 3,7ms, weil das Signal so lange für den Weg vom Monitor zum Mikrofon braucht. Nach dieser ersten sehr starken Reflexion ist eine kleine Pause zu sehen, und darauf folgen mehrere ausgeprägte Reflexionen innerhalb der ersten 10ms. Diese können von Wänden und Decke stammen. In den nächsten Kapiteln wird versucht, diese Reflexionen möglichst zu unterdrücken und einen ITDG zu kreieren.

Wasserfalldiagramm (Abb. 21): Hier sind die längeren Abklingzeiten der Raummoden deutlich zu sehen. Besonders betroffen ist der Bereich vom Bass bis zu den oberen Mitten hin (ca. 90Hz - 900Hz). Der längste Abklang lässt sich zwar bei ca. 292Hz feststellen, allerdings sind die langen Abklingzeiten um die 100Hz am kritischsten, weil sie nur schwer mit Absorption im kleinen Raum zu verkürzen sind. Raummoden unter 90Hz sind nicht von Relevanz, weil der Monitor sie nicht stark genug anregen kann. Hinweis: Es wird nur die Abklingzeit bis 40SPL betrachtet, weil die Schwelle des Grundrauschens im Zimmer in etwa bei diesem Wert liegt. In den nächsten Kapiteln wird versucht, die Schwankungen der Abklingzeiten im Wasserfalldiagramm zu glätten, sodass der Raum über den ganzen Frequenzbereich möglichst gleichmäßig ausklingt.

8.4 Selbstbau der Akustik-Absorber

Um Kosten zu sparen, wurden die Seiten-, Vorderwand-, Decken- und Tischabsorber selbstgebaut. Hierfür kam Steinwolle mit einem α von 8000Pa.s/m² zum Einsatz, da sie günstig und effektiv für die Dämpfung von Mitten und Höhen ist. Für jeden Absorber wurden zwei Platten Steinwolle aufeinandergestapelt und wie ein Geschenk mit Malervlies umwickelt. Es wird empfohlen, Mineralfaser mit einer dünnen Schicht Folie und absorbierendem Stoff zu umwickeln, da ihre Fasern potenziell schädlich für die Atemwege sind. Beim Schneiden der Steinwolle wurden daher auch Handschuhe und eine Gesichtsmaske getragen. Mit der Spiegelmethode hat sich herausgestellt, dass ein Seitenabsorber genau zwischen Bassfalle und Kante der Zimmertür zur Absorption der Seitenreflexionen aus beiden Monitoren an der linken Wand ausreichend ist. Die Breite der Absorber entspricht der Breite der Steinwolle-Platten. Die Dicke des Absorbers ergibt sich aus der Dicke der zwei aufeinandergestapelten Platten. Im Sinne des Erhaltens der Symmetrie wurde der rechte Seitenabsorber genau gleich gebaut. Im Endeffekt haben die Seitenabsorber die Abmessungen (62 x 60 x 15) cm. Aus ästhetischen Gründen wurde das Malervlies mit einer Schicht Bühnenmolton bedeckt. Ähnlich wie die Seitenabsorber, wurde der Vorderwandabsorber mit den Abmessungen (100 x 60 x 15) cm gebaut. Somit überdeckt er die gesamte Lücke zwischen den Monitoren. Die Deckenabsorber wurden etwas kleiner gebaut (40 x 60 x 15) cm, damit sie einfach aufzuhängen sind. Aus Platzgründen bestehen die Tischabsorber aus nur einer Platte Steinwolle und sind (32 x 23 x 7,5) cm groß.

Um Reflexionen bis in einen möglichst tiefen Frequenzbereich zu unterdrücken, wurde bei allen Absorbern eine Lücke zur Wand gelassen. Bei den Seiten- und Vorderwandabsorbern beträgt sie 15cm. Dieser Abstand wurde auf einer einfachen Art realisiert, und zwar dienen zwei dünne Holzplatten aus dem Baumarkt zur Trennung des Absorbers von der Wand. Die Deckenabsorber hängen etwa 30cm tief von der Decke.

Das gesamte Home-Studio wurde flexibel gestaltet, indem alle Absorber, außer an der Vorderwand, mit Seilen aus Kunststoff und Haken an der Wand aufgehängt wurden. Aufgrund des Gewichts des Vorderwandabsorbers wurde dieser ausnahmsweise auf einem Keyboard-Ständer aufgestellt. Es wurde also nichts mit Klebstoff auf einer Wand angebracht. Dies kann im Falle eines Umzugs sehr hilfreich sein, denn Absorber können einfach abgenommen und im neuen Zimmer an den Wänden aufgehängt werden, ohne sie dabei zu beschädigen.

Alle anderen Absorber und Diffusoren wurden aus zeitlichen Gründen kostengünstig fertig gekauft. Das betrifft sechs Bassfallen aus dichtem Akustik-Schaumstoff, und vier (60 x 60 x 10) cm Diffusoren aus Styropor.

8.5 Kalkulation des Budgets

Durch die o. g. Kombination von gekauften und selbstgebaute Akustikpaneelen wurden einige Kosten reduziert und gleichzeitig etwas Arbeitszeit erspart. Je nachdem wie viel Budget und Zeit zur Verfügung stehen, kann das Verhältnis der selbstgebaute zu den fertig gekauften Akustikpaneelen variieren. Für diese Arbeit wurden ständig die kostengünstigsten Paneelen und Materialien mit ausreichender Leistung benutzt. Im Folgenden werden alle entstandenen Kosten aufgelistet:

Menge	Ware	Gesamtpreis in EUR
6 Stück	Bassfalle	89,40
4 Stück	Diffusor	70,80
1 Stück	Messmikrofon	30,00
2 Stück	Monitorstativ	103,98
6 x (100 x 62,5 x 8) cm	Steinwolle	14,25
1 x (1000 x 100) cm	Malervlies	12,00
3 x (300 x 100) cm	Bühnenmolton	28,70
4 Stück	Holzplatten	4,50
20 m	Schnur	10,00
divers	Haken, Dübeln, Klebeband...	ca. 20,00
Gesamtsumme:		383,63

Tab. 3: Kostenkalkulation der Einrichtung des gesamten Home-Studios

8.6 Anordnung der Akustikpaneele

Abb. 22 zeigt das Endergebnis des Studioaufbaus nach Anordnung aller Akustikpaneele im Abhörbereich. Diffusoren wurden in der hinteren Hälfte des Zimmers an den freien Flächen der Wände aufgehängt. Sie helfen gegen Flatterechos und versorgen den Raum mit einem neutralen diffusen Klang. Aufgrund der Erkenntnisse aus Kap. 7.4, kamen keine Diffusoren in der Nähe des Abhörpunktes zum Einsatz.



Abb. 22: Anordnung der Akustikpaneele im Abhörbereich

8.7 Ergebnisse und Diskussion

Nach jedem Einsatz eines neuen Absorbers wurde gemessen, um seine Wirkung zu überprüfen. Einzelne Messungen sind auf der beigefügten CD zu finden. Außerdem befinden sich auf der CD Bilder der Aufbauschnitte der Absorber. In diesem Kapitel werden nur die wichtigsten Ergebnisse präsentiert, interpretiert und diskutiert. Angefangen mit dem Endergebnis, sieht die letzte Messung nach Anordnung aller Absorber und Diffusoren so aus:

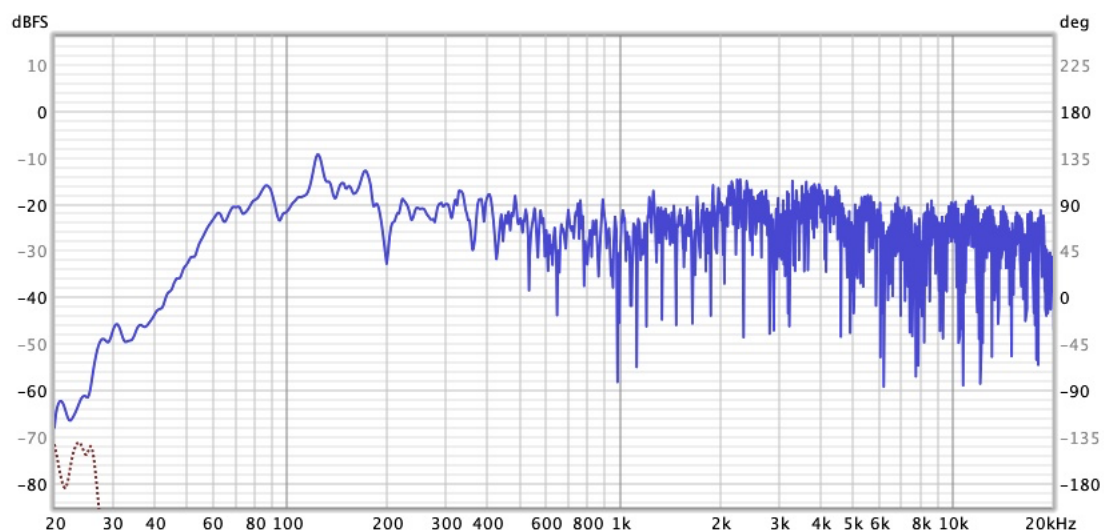


Abb. 23: Frequenzgang nach Anordnung aller Akustikpaneele (außer Tischabsorber)

Es ist zu sehen, dass der Frequenzgang trotz aller vorgenommenen Maßnahmen zwar viel besser aussieht als der Anfangszustand (*Abb. 19*), aber immer noch nicht linear genug. Einbrüche im Mittleren Bereich bis -10dB und Überhöhungen bis 10dB sind kritisch. Dies deutet darauf hin, dass der Einfluss von einigen Raummoden und Reflexionen nicht ganz vermieden wurde. Bei den Überhöhungen kann ein EQ helfen, aber bei Einbrüchen nicht. In den Höhen sind stark ausgeprägte Kammfilterstrukturen zu sehen. Um die Ursache zu finden,

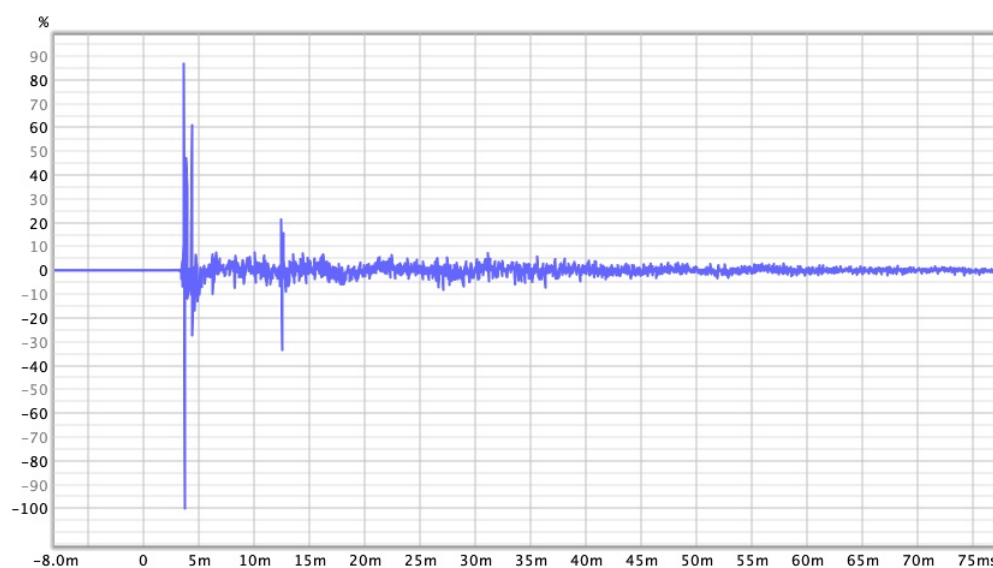


Abb. 24: Impulsantwort nach Anordnung aller Akustikpaneele (außer Tischabsorber)

hilft eine Beobachtung der Impulsantwort (*Abb. 24*). Hier sind zwei starke Reflexionen innerhalb der ersten 10ms nach dem Direktschall zu erkennen. Diese konnten also mit den bisherigen Maßnahmen nicht unterdrückt werden. Die besonders frühe Reflexion stammt vermutlich vom Tisch. Die Ursache der späteren Reflexionen ist noch nicht bekannt und muss daher verfolgt werden. Davor lohnt sich aber ein Blick auf das Wasserfalldiagramm (*Abb. 25*):

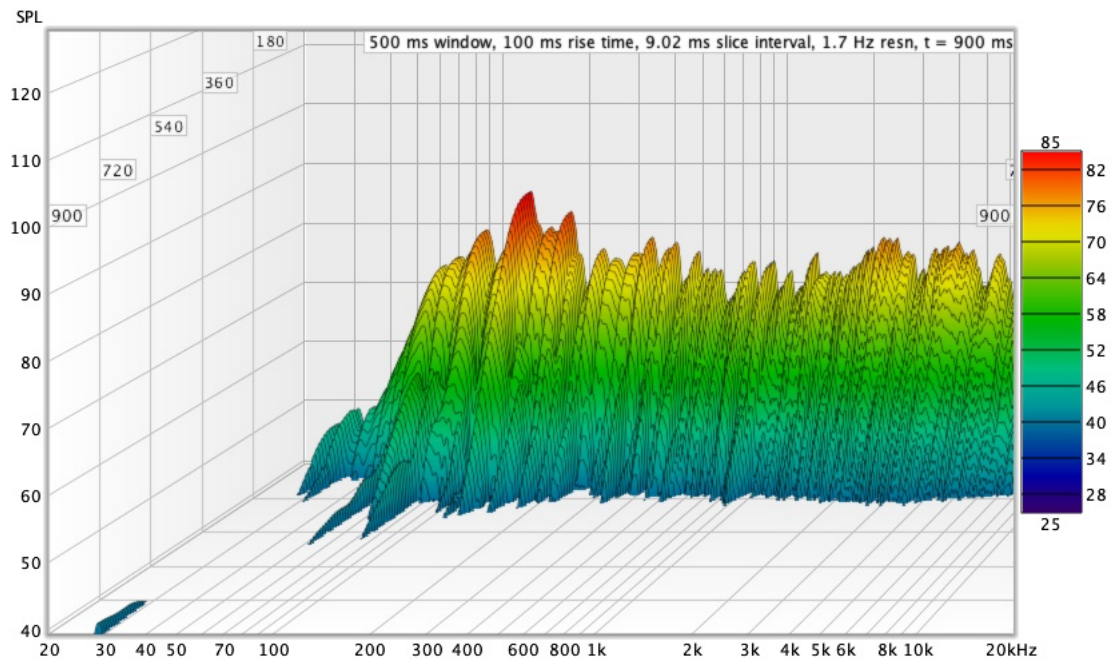


Abb. 25: Das Wasserfalldiagramm nach Anordnung aller Akustikpaneele außer Tischabsorber

Aus dem Wasserfalldiagramm lässt sich schließen, dass die Absorption durch Bassfallen im Bassbereich sehr gelungen ist. Die Abklingzeiten sehen beinahe linear aus, bis auf einige Raummoden unter 100Hz. Dröhnen im Bass, das durch die roten Spitzen gekennzeichnet ist, lässt sich allerdings nicht ganz vermeiden.

Im nächsten Schritt wurde die starke Reflexion von *Abb. 24* verfolgt. Sie kommt etwa 9ms nach dem Direktsignal. Dies entspricht einem Umweg von etwa 3m. Es wurde im Zimmer nach einer möglichen Oberfläche, an der diese Schallwelle reflektieren könnte, gesucht und die Oberfläche mit einem großen Tuch bedeckt. Nach mehreren Versuchen und Messungen wurde herausgefunden, dass die Reflexion aus der Ecke zwischen dem Schrank und der Wand gegenüber dem links platzierten Messlautsprecher kommt. Nach Bedeckung dieser Ecke war die Reflexion in der Impulsantwort verschwunden und der Kammfilter im Frequenzgang reduziert. Mit einem zusätzlichen Einsatz der Tischabsorber sah die Messung dann so aus (*Abb. 26*):

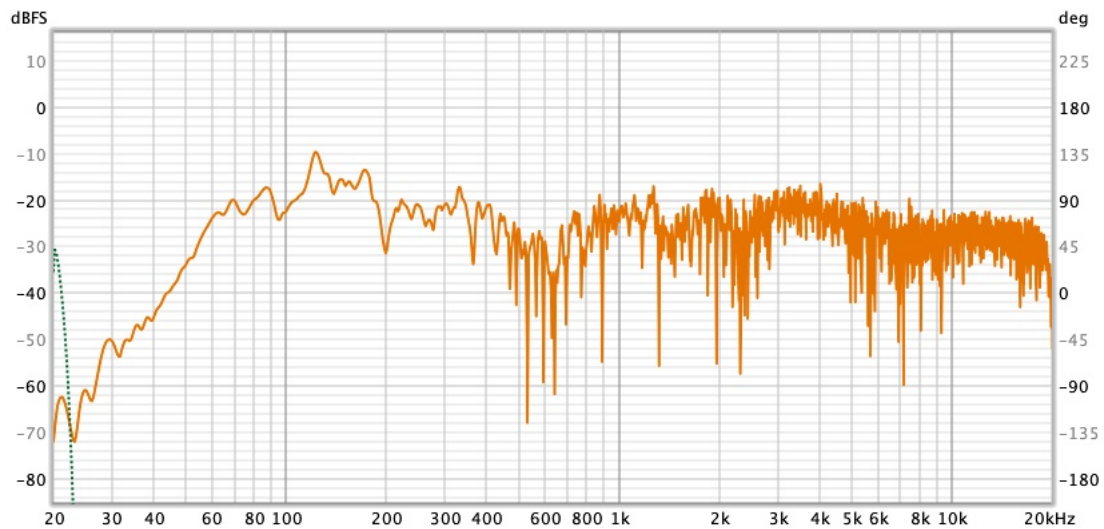


Abb. 26: finaler Frequenzgang nach Einsatz aller Akustikpaneele

Es ist klar zu sehen, wie die Kammfilterstrukturen im höheren Frequenzbereich im Vergleich zu Abb. 23 weniger geworden sind. Leider zeigt sich auch eine tiefere Senkung in den oberen Mitten (zwischen 500Hz und 900Hz). Auch weitere Einbrüche in diesem Bereich sind zu sehen. Die Quelle dieser Ungleichmäßigkeiten bleibt für den Moment unbekannt und bedarf weiterer Versuche. Das aktuelle Ergebnis ist also viel besser als der unbehandelte Raum, ist jedoch nicht ganz optimal.

9 Fazit

Abschließend lässt sich sagen, dass es in kleinen bestehenden Räumen und mit kleinem Budget eine große Herausforderung ist, eine optimale Abhörsituation zu kreieren. Wie sich auch im praktischen Teil zeigt, müssen zusätzlich zu den in der Theorie vorgeschlagenen Lösungen durch trial and error kreative Maßnahmen ergriffen werden, die genau auf die einzigartigen Gegebenheiten des Raumes und das darin befindliche Mobiliar abgestimmt sind. Trotzdem werden am Ende nicht zwangsläufig optimale Ergebnisse erreicht - Kompromisse müssen eingegangen werden. In dem Fall ist es vorteilhaft – ein Vorgehen, das ohnehin auch allgemein zu empfehlen ist - das Verhalten des Raumes gut kennenzulernen und dies beim Abhören zu berücksichtigen, anstatt erfolglos zu versuchen, einen perfekt ausgewogenen Klang zu erreichen.

Literaturverzeichnis

Ahnert, W. & Tennhardt, H. P., 2008. Raumakustik. In: S. Weinzierl, Hrsg. *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 182-263.

Alexander, U. C., 2011. *Mix Smart: Pro Audio Tips for Your Multitrack Mix*. New York und Milton: Elsevier Inc..

Allard, J. F. & Champoux, Y., 1992. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *J. Acoust. Soc. Am.*, Juni, 6(91), pp. 3346-3353.

Atal, B. S., Schroeder, M. R. & Sessler, G. M., 1965. *Subjective reverberation time and its relation to sound decay*. s.l., 5th International Congress on Acoustics, p. Paper G32.

Ballou, G. M., 2008. *Handbook for Sound Engineers*. Fourth Edition Hrsg. s.l.:Elsevier Inc..

Barron, M., 1995. Interpretation of Early Decay Times in Concert Auditoria. *ACUSTICA*, Volume 81, pp. 320-321.

Beranek, L. L., 1986. *Acoustics*. Second Edition Hrsg. Woodbury, New York: the Acoustical Society of America.

Bernstein, H., 2019. *Elektroakustik: Mikrofone, Klangstufen, Verstärker, Filterschaltungen und Lautsprecher*. 2. Auflage Hrsg. München: Springer Vieweg.

Blauert, J. & Xiang, N., 2008. *Acoustics for Engineers*. Berlin: Springer-Verlag.

Brown, P., 2011. *Reverberation Time vs. Decay Time*. [Online]
Available at: <https://www.prosoundtraining.com/2011/08/24/reverberation-time-vs-decay-time/>
[Zugriff am 03 August 2021].

Brunner, S., Maepel, H. J. & Weinzierl, S., 2007. *On the audibility of comb-filter distortions*. Vienna, 122th AES Convention, p. Preprint 7047.

Cox, T. J. & D'Antonio, P., 2017. *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. 3. Auflage Hrsg. s.l.:CRC Press.

Cremer, L. & Müller, H. A., 1978. *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*. 2. Auflage Hrsg. Stuttgart: S. Hirzel Verlag.

D'Antonio, P. & Konnert, J. H., 1984. *The RFZ/RPG Approach to Control Room Monitoring*. New York, Audio Engineering Society 76th Convention.

Daubner, B., 2017. *Poröse Absorber: Grundlagen der Schallabsorption*. [Online]
Available at: <https://www.heimkino-praxis.de/poroese-absorber/>
[Zugriff am 20 August 2021].

Davis, D. & Davis, C., 1980. The LEDE™ Concept for the Control of Acoustic and Psychoacoustic Parameters in Recording Control Rooms. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1 September, Issue 28/9, pp. 585-595.

Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W. & Wöhr, M., 2014. *Handbuch der Tonstudioteknik*. 8 Hrsg. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH.

Everest, F. A. & Pohlmann, K. C., 2015. *Master Handbook of Acoustics*, New York: McGraw-Hill Education.

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 2017. *Fraunhofer LBF*. [Online]

Available at: <https://2017.lbf-jahresbericht.de/leistungen/projektuebersicht/schwingungstechnik/bestimmung-der-schallabsorption-im-impedanzrohr/>
[Zugriff am 12 Juni 2021].

Friesecke, A., 2013. *Studio Akustik: Konzepte für besseren Klang*. 4. Auflage Hrsg. Bergkirchen: PPVMEDIEN GmbH.

Friesecke, A., 2014. *Die Audio-Enzyklopädie – Ein Nachschlagwerk für Tontechniker*. 2. Auflage Hrsg. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH.

Görne, T., 2008. *Tontechnik*. 2. Auflage Hrsg. s.l.:Carl Hanser.

Izhaki, R., 2008. *Mixing Audio – Concepts, Practices and Tools*. s.l.:Focal Press.

Jones, D., 2008. Small Room Acoustics. In: G. M. Ballou, Hrsg. *Handbook for Sound Engineers*. s.l.:Elsevier Inc., pp. 127-143.

Jordan, V. L., 1970. Acoustical criteria for auditoriums and their relation to model techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Issue 47, pp. 408-412.

Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. & Sandars, J. V., 2000. *Fundamentals of Acoustics*. Fourth Edition Hrsg. s.l.:John Wiley & Sons, Inc..

Klostermann, F., 2019. *Raumakustik-Workshop – No.1: Eckabsorber selber bauen*. [Online]

Available at: <https://www.bonedo.de/artikel/einzelansicht/raumakustik-workshop-no1-eckabsorber.html>
[Zugriff am August 2021].

Müller, S., 2008. Messtechnik. In: S. Weinzierl, Hrsg. *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 1087-1169.

Maier, P., 2008. Studioakustik. In: S. Weinzierl, Hrsg. *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 267-313.

Maier, P., 2018. Studioakustik: Die Nachhallzeit im Studio. *Sound & Recording*, 29 April.Issue 04/18.

Mulcahy, J., 2004-2018. *REW V5.19 Help*. [Online]

Available at: <https://www.roomeqwizard.com/REWhelp.pdf>
[Zugriff am 25 Juli 2021].

Newell, P., Holland, K. & Hidley, T., 1994. *Control Room Reverberation is Unwanted Noise*. s.l., Proceedings of the Institute of Acoustics, p. 365–373.

Owsinski, B., 2014. *The Mixing Engineer's Handbook*. 3. Auflage Hrsg. Boston: Course Technology PTR.

Sabine, W. C., 1923. *Collected Papers On Acoustics*. s.l.:Cambridge: Harvard University Press.

Schneider, M., 2008. Mikrofone. In: S. Weinzierl, Hrsg. *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 315-413.

Schulz, J., 2020. *Steinwolle, Glaswolle, Hanf – welches Material eignet sich am besten für Absorber?*. [Online]

Available at: <https://www.iochenschulz.me/de/blog/steinwolle-glaswolle-hanf-absorber-material>

[Zugriff am 20 August 2021].

Sengpiel, E., 1993. *Akustisches Äquivalent zum Ohmschen Gesetz*. [Online]

Available at: <http://www.sengpielaudio.com/AkustischesAequivalentOhm.pdf>

[Zugriff am 16 Juni 2021].

Senior, M., 2019. *Mixing Secrets for the Small Studio*. second Edition Hrsg. New York: Routledge.

Szymanki, J., 2008. Acoustical Treatmen for Indoor Areas. In: G. M. Ballou, Hrsg. *Handbook for Sound Engineers*. s.l.:Elsevier Inc., pp. 95-121.

Veit, I., 2012. Hallradius, Flatterechos. *TrockenBau Akustik*, 12, pp. 36-37.

Vorländer, L. & Bietze, H., 1994. Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time. *ACUSTICA*, p. 205.

Walker, R., 1995. *Controlled Image Design: The management of stereophonic image quality*, UK: BBC R&D.

Weinzierl, S., 2008. Grundlagen. In: S. Weinzierl, Hrsg. *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin: Springer, pp. 1-41.

Young, R. W., 1959. *Sabine Reverberation Equation and Sound Power Calculations*. California, Journal of the Acoustical Society of America, pp. 912-921.