

Toningenieur-Projekt

Absorber für variable Raumakustik

Verfasser:
Jan Matthias Kasim



Technische Universität Graz
Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation

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

Betreuer:
Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz Graf

Graz, im Juni 2012

Kurzfassung

Häufig wird bei raumakustischer Betrachtung eine hohe Flexibilität seitens der Anwendungszwecke gefordert. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, gibt es eine Vielzahl an technischen Hilfsmitteln, um vorhandene raumakustische Gegebenheiten an die jeweiligen Einsatzzwecke anzupassen. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Akustikelementes, welches rein durch mechanische Eingriffe eine Veränderung der Raumakustik erlaubt. Neben den grundlegenden theoretischen Betrachtungen werden die am Markt vorhandenen Prinzipien variabler Akustikelemente erörtert. Basierend auf Messergebnissen von bereits verbauten, variablen Absorbern und aus Impedanzrohrmessungen gewonnenen Erkenntnissen werden im Rahmen dieser Arbeit CAD-Pläne erstellt, die letztendlich in Zusammenarbeit mit der Firma concept-A GmbH mit Sitz in München umgesetzt werden. Das akustische Verhalten des entstandenen variablen Breitbandabsorbers wird mit Hilfe einer Kombination aus Impedanzrohrmessungen und Simulationen von mehrschichtigen Absorberaufbauten beschrieben.

Abstract

Often, room acoustic analysis requires a high flexibility on the part of the intended application. To meet these demands, there is a variety of assistive technology to adapt the existing room acoustic conditions for the respective applications. The aim of this work is to develop an acoustic element, which permits an alteration of the room acoustics by purely mechanical intervention. In addition to the basic theoretical considerations, the existing market principles of variable acoustic elements are discussed. Within the scope of this work, CAD plans will be created based on the measurement results of built-in variable absorbers and insights obtained from impedance tube measurements, which will be ultimately implemented in cooperation with the firm concept-A GmbH, in Munich. The acoustic behaviour of the developed variable Broadband absorber is described using a combination of impedance tube measurements and simulations of multi-layer absorber assemblies.

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei der Firma concept-A GmbH in München für die Zusammenarbeit beim Entstehen dieser Arbeit bedanken.

Hervorzuheben sind dabei mein Betreuer Herr Dipl.-Ing. Peter Maier, der mir in der ganzen Zeit mit fachkundlicher Erfahrung zur Seite gestanden ist, sowie Herr Dipl.-Ing. Kristoffer Wasserberg für seine Anregungen und Beihilfe. Nicht zu vergessen sind die netten Arbeitskollegen im Büro, welche mich mit Rat und Tat unterstützten.

Nicht unerwähnt bleiben soll mein Betreuer, Herr Dipl.-Ing. Dr .techn. Franz Graf seitens der Technischen Universität Graz, ohne dessen Zutun diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Ein weiteres Dankeschön gebührt Herrn Peter Klug vom Ordinariat München für die freundliche Zurverfügungstellung des Domchorprobensaaes der Karmelitenkirche in München.

Ebenso sei hier die unermüdliche Ausdauer und Hilfsbereitschaft von Herr Richard Walder von der Schreinerei Unterweger in Thal-Assling zu nennen. Ein großer Dank an dieser Stelle für die vielen konstruktiven Telefonate.

Zuletzt möchte ich mich bei Monika Frick für die tolle Unterstützung sowie zahlreiche Stunden des Korrekturlesens ganz herzlich bedanken.

Graz, im Juni 2012

Jan Kasim

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Akustische Grundlagen	3
2.1. Raumimpulsantwort	3
2.2. Nachhall	4
2.2.1. Nachhallzeit T nach SABINE	5
2.2.2. Nachhallzeit T nach EYRING	7
2.2.3. Nachhallzeit T nach MILLINGTON/SETTE	7
2.3. Schallabsorption	8
2.3.1. Poröser Absorber	9
2.3.2. Absorberparameter	9
2.3.3. Homogene Absorberschicht	15
2.3.4. Resonanzabsorber	18
2.4. Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Absorptionsgrades	20
2.4.1. Berechnung des Absorptionsgrades nach SABINE & DIN EN ISO 354	20
2.4.2. Berechnung des Absorptionsgrades nach EYRING	21
2.4.3. Berechnung des Absorptionsgrades nach MILLINGTON/SETTE . .	21
2.5. Messverfahren zur Bestimmung des Absorptionsgrades	22
2.5.1. Hallraum	22
2.5.2. Impedanzrohr	23
3. Veränderung der Absorptionseigenschaft von Bauteilen	26
3.1. Unterschiedliche Mechanismen	27
3.1.1. Vorhänge	27
3.1.2. Mobile Absorberelemente	27
3.1.3. Klappenelemente	29
3.1.4. Variable Resonanzabsorber	29
3.1.5. Rotierende Elemente	30
3.1.6. Absorber mit Lamellenkonstruktion	31
3.2. Anwendungsbeispiele in der Praxis	33
3.2.1. Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM)	33

3.2.2.	Planet Roc Studio - Funkhaus Berlin	34
3.2.3.	Jugendkirche München	34
3.2.4.	Domchorprobensaal - Karmelitenkirche München	37
4.	Untersuchung bestehender Elemente	39
4.1.	Messaufbau	39
4.2.	Messung der Nachhallzeit	42
4.2.1.	Auswertung der Messdaten	44
4.3.	Bestimmung des Absorptionsgrades	44
4.3.1.	Herleitung der Ausgangsnachhallzeit T_0	44
4.3.2.	Berechnung des Absorptionsgrades der Messergebnisse nach EYRING	46
5.	Modellentwurf - variabler Absorber	51
5.1.	Entwurf	51
5.2.	Berechnung mit AFMG SoundFlow	53
5.3.	Impedanzrohrmessung	55
5.3.1.	Messaufbau	56
5.3.2.	Ermittlung des Arbeitsfrequenzbereichs	57
5.3.3.	Einfluss der Lamellen auf den Absorptionsgrad	58
5.3.4.	Absorptionsgradmessung des finalen Aufbaus	59
5.4.	Interpretation der Messergebnisse	60
5.4.1.	Simulation des mehrschichtigen Absorberaufbaus	63
6.	Finaler Prototyp und Ausblick	67
6.1.	Finaler Prototyp	67
6.2.	Zusammenfassung & Ausblick	69
	Abbildungsverzeichnis	70
	Tabellenverzeichnis	73
	Abkürzungsverzeichnis	74
	Literaturverzeichnis	75
A.	Nachhallzeitmessung im Domchorprobensaal (DCPS)	77
A.1.	Lamellenstellungen	77
A.2.	Nachhallzeiten	79
B.	Messdaten und Auswertung im Domchorprobensaal	84

C. Simulierte Nachhallzeiten im Domchorprobensaal	105
D. Absorptionsgrade im Domchorprobensaal	107
D.1. Berechnete Absorptionsgrade	107
D.2. Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden	112
E. Berechnete Absorptionsgrade des Modellaufbaus	115
F. Impedanzrohr	117
F.1. Voruntersuchungen	117
F.1.1. Restabsorption	117
F.1.2. Übertragungsfunktion	119
F.2. Verwendete Messproben	120
F.2.1. Materialien	120
F.2.2. Lamellenkonstruktion	121
F.2.3. Messschablone - Miniaturmodell	122
F.3. Finaler Aufbau	123

Kapitel 1.

Einleitung

Räumlichkeiten werden bei raumakustischer Betrachtung hinsichtlich ihres Verwendungszweckes kategorisiert (Schauspielhäuser, Theater, klassische Konzertsäle, Studios...). Dabei unterscheidet man zwischen Räumen mit unveränderlicher und Räumen mit variabler Raumakustik.

Erstere werden bereits während des Planungsprozesses auf einen gewissen Anwendungszweck hin entworfen. Dies bietet den Vorteil, dass den vorher bekannten raumakustischen Bedürfnissen schon im Vorfeld Rechnung getragen werden kann. So erfordern musikalische Orchester- oder Chordarbietungen eine hallige, lebendige Atmosphäre; man spricht auch von „tragender Raumakustik“. Im Gegensatz dazu benötigen Sprachdarbietungen und die damit verbundene Sprachverständlichkeit deutlich „trockenere“ Übertragungseigenschaften und geringere Nachhallzeiten.

Aus wirtschaftlicher Sicht werden solche Bauvorhaben in der heutigen Zeit eher kritisch betrachtet und werden darum selten umgesetzt. Der Trend hat sich in den letzten Jahren immer mehr in Richtung Individualarchitektur entwickelt. So sollen aktuelle „Mehrzweckhallen“ aus raumakustischer Sicht einerseits die Bedürfnisse klassischer Konzerthäuser mit ihren wohl proportionierten Ausmaßen und damit verbundener lebendiger Raumakustik erfüllen, andererseits möchte man dem Publikum auch bei kleineren Bühnenbesetzungen und modernen Sprechtheatern ein akustisches Umfeld mit hoher Durchsichtigkeit und Sprachverständlichkeit bieten.

Aus diesem Konflikt heraus haben sich verschiedene Ansätze entwickelt, welche nach völlig unterschiedlichen Prinzipien arbeiten. Alle verfolgen dabei das selbe Ziel, nämlich die variable Gestaltung der Raumakustik, optimiert an die jeweiligen Anwendungsbedürfnisse.

Schon seit längerer Zeit gibt es Bemühungen, bei denen versucht wird, durch akustische Maßnahmen, d. h. z. B. durch Veränderungen der Absorptionseigenschaften diverser Oberflächen und Materialien sowie durch Nutzung variierbarer Raumvolumina, die akustischen Gegebenheiten an die vielseitigen Einsatzzwecke bestmöglich anzupassen.

Neben eben genannten Maßnahmen existieren mittlerweile auch zahlreiche elektrische Systeme, welche zur Manipulation der vorhandenen Raumakustik eingesetzt werden. So wird in diesem Fall z. B. das primäre Schallfeld des kompletten Raumes mit Mikrofonen aufgenommen, durchläuft anschließend eine Signalverarbeitung in der die gewünschten akustischen Parameter des künstlich zu erzeugenden Schallfeldes aufgeprägt werden und wird über eine Vielzahl von Lautsprechern dem Raum rückgeführt. Das künstlich erzeugte Sekundärfeld simuliert so z. B. einen größeren Raumeindruck durch entsprechende Nachhallzeitverlängerungen. Die Vor- und Nachteile beider Herangehensweisen seien dahingestellt und werden an dieser Stelle nicht untersucht.

In dieser Arbeit wird vorrangig auf das Prinzip der veränderbaren Absorptionseigenschaften von Bauteilen und Materialien eingegangen. So soll hier neben kurzer theoretischer Betrachtung der Wirkungsweise absorbierender Bauteile und deren Wechselwirkung mit dem Schallfeld ein Überblick über die am Markt vorhandenen Konzepte zur mechanischen variablen Gestaltung der Akustik aufgezeigt werden.

Ziel dieser Arbeit ist, basierend auf theoretischen Überlegungen und im Vorfeld durchgeführten Untersuchungen bereits eingesetzter variabler Akustikelemente, ein Akustikelement zu entwickeln, welches durch mechanische Veränderungen eine Veränderung der raumakustischen Eigenschaften gestattet. Außerdem soll der entstehende, theoretische Entwurf konstruktiv umgesetzt und dessen tatsächliche Wirkungsweise analysiert werden.

Kapitel 2.

Akustische Grundlagen

Das von einer Schallquelle abgestrahlte Schallfeld breitet sich im Raum wellenförmig aus, wobei an den Raumbegrenzungsflächen Reflexionen auftreten. Auf Grund der geometrischen Bedingungen existieren in dem sich aufbauenden Schallfeld unterschiedliche Energieverteilungen. Nahe den Grenzflächen herrscht ein eher von Reflexionen dominiertes Schallfeld. In der Nähe der Schallquelle sind hingegen die Bedingungen eines *freien* Schallfeldes gegeben. Abhängig von Raumgeometrie und -größe stellt sich nach einer gewissen Zeit eine energetische Gleichverteilung ein, die als *diffuse* Schallverteilung bezeichnet wird.

Um die Charakteristik von Schallfeldern beschreiben und verändern zu können, bedient man sich der, aus der Raumimpulsantwort gewonnenen Informationen [Wei08, S. 182 ff.].

2.1. Raumimpulsantwort

Betrachtet man einen Raum als lineares, zeitinvariantes System, so kann dieser im Zeitbereich vollkommen durch die Raumimpulsantwort beschrieben werden. Man erhält den zeitlichen Verlauf der Schalldruckverteilung im Raum und damit alle notwendigen Informationen zur Bestimmung raumakustischer Parameter. Methodisch erhält man diese etwa durch Computersimulationen oder durch Anregen des Schallfeldes mit Hilfe von Impulsschallquellen [Wei08, 186].

Der in Abbildung 2.1 beispielhaft dargestellte Verlauf beschreibt die am Hörerort ankommenden Reflexionen eines Raumes. Er gliedert sich in die drei Bereiche des Direktschalls, der unmittelbar darauf folgenden Anfangsreflexionen sowie des Nachhalls. Treten im Gegensatz zum üblichen, stetig fallenden Verlauf der Raumimpulsantwort Abweichungen auf, stellen diese ein Indiz für störende Reflexionen wie beispielsweise Echos dar [FV03, S. 135,149].

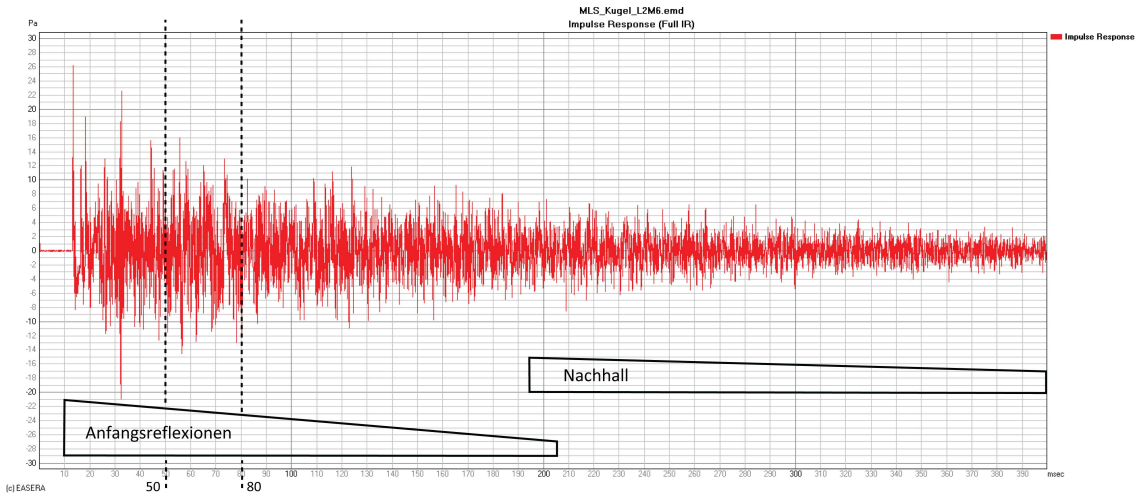


Abbildung 2.1.: Beispiel einer gemessenen Raumimpulsantwort

2.2. Nachhall

Eines der markantesten Kriterien zur Charakterisierung eines Raumes ist seine Halligkeit. Diese Eigenschaft wird durch die Dauer des „Nachhalls“ bzw. der Nachhallzeit T , die durch Abklingen eines Schallereignisses im Raum formuliert ist, beschrieben.

Seit den Forschungsarbeiten von *W. C. Sabine*, Mitte des 19. Jahrhunderts gilt sie als das am längsten bekannte raumakustische Merkmal und ist heute als Pauschalmaß für raumakustische Kriterien gültig [FV03, S. 135–143].

Ergebnis der *Sabineschen* Beobachtung ist, dass die Schallenergie im Raum unabhängig vom Anfangspegel innerhalb der selben Zeitspanne immer auf den gleichen Bruchteil ihres Anfangswertes sinkt. Die Energie fällt dabei auf einen millionsten Teil bzw. der Schalldruck auf einen tausendstel Teil ab [FV03, S. 136].

Die daraus resultierende Dynamik von 60 dB im Schalldruckpegel entspricht der Spanne, bei der das menschliche Ohr (unabhängig vom Anfangspegel) völlige Ruhe empfindet. Der gesamte hörbare Dynamikbereich von ca. 140 dB kann somit nur in 60 dB-Fenstern ausgewertet werden [GW06, S. 61–62], [CM78, S. 146 ff].

Bei mangelnder Dynamik eines Raumes kann das Schallsignal bereits vor vollendeter Analyse des 60 dB Abfalls unter den Grundgeräuschpegel wandern. Auf Grund dessen wird der Abfall von -5 dB auf -35 dB (T_{30}) gemessen und durch Multiplikation mit 2 auf -60 dB (T_{60}) extrapoliert (siehe Abb. 2.2). Durch entsprechende Berechnungen erhält man die ebenso allgemein gebräuchlichen Bezeichnungen der T_{10} (-5 dB auf -15 dB) und T_{20} (-5 dB auf -25 dB) [Wei08, S. 188].

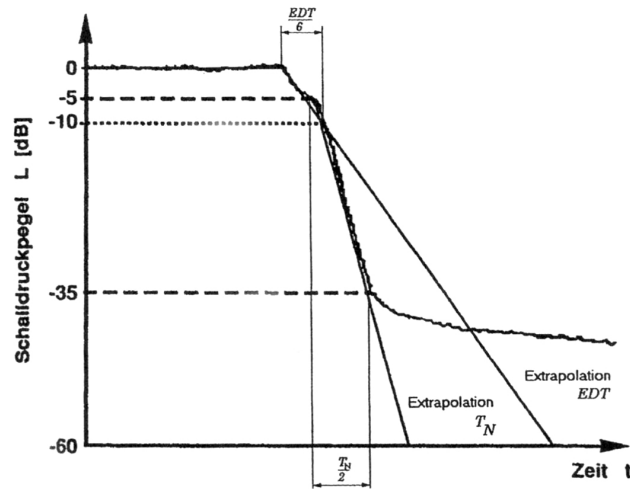


Abbildung 2.2.: Nachhallzeit T_N [FV03, S. 141]

2.2.1. Nachhallzeit T nach SABINE

Bei einer Betrachtung der Nachhallzeit T nach *Sabine* geht man von einer statistischen Gleichverteilung des Absorptionsvermögens der im Raum vorhandenen Oberflächen aus. Das Schallfeld wird als diffus angenommen, was eine energetische Gleichverteilung innerhalb des Schallfeldes an jedem Ort des Raumes fordert. Dabei spielt der Abstand zur Schallquelle (kugelförmig) eine wesentliche Rolle.

Während innerhalb eines bestimmten Radius der Direktschall dominiert, gibt es einen Übergangsbereich, ab welchem das Sekundärfeld (Hallfeld) stärker wahrzunehmen ist. Der Abstand zur Schallquelle, der den Gleichgewichtszustand dieser beider Felder beschreibt, nennt sich Hallradius und ist nach H. Kuttruff [HM94, S. 603] wie folgt definiert:

$$r_H = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T}} \quad [\text{m}], \quad (2.1)$$

wobei V [m^3] das Volumen des Raumes und T [s] dessen Nachhallzeit ist.

Die Annahme der Diffusität eines Raumes basiert darauf, dass alle Flächen mit verschiedenen Oberflächen gleichmäßig verteilt sind, wodurch sich keine Reflexionen zwischen diesen bilden können. Die Raumdimensionen werden in diesem Sinn im Verhältnis zur Wellenlänge als groß genug vorausgesetzt. Ist dies nicht der Fall, können bei kleineren geometrischen Abmessungen, sich an den Raumwänden reflektierende Anteile, insbesondere wenn diese in einem ungünstigen Verhältnis zur Wellenlänge stehen, zu einer Überlagerung bzw. Moden führen.

Schröder beschreibt die Grenze, die den Übergang zwischen Diffusfeld und Modalfeld bildet, folgendermaßen:

$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \quad [\text{Hz}]. \quad (2.2)$$

V [m³] stellt hierbei das Volumen des Raumes und T [s] dessen Nachhallzeit dar.

Während sich unterhalb der *Schröderfrequenz* ausbreitende Wellen aufgrund ihrer geometrischen Abmessung zu einem modalen Schallfeld ergeben, sind oberhalb dieser Frequenz Bedingungen, innerhalb derer man mit einem diffusen Schallfeld rechnen kann, gegeben [Wei08, S. 281 ff.].

Sind die zu Beginn genannten Voraussetzungen erfüllt, lässt sich die Nachhallzeit nach *SABINE* unter Annahme der Schallgeschwindigkeit $c_0 = 340$ [m/s] wie folgt annehmen [NK01]:

$$T = \frac{55,3}{c_0} \cdot \frac{V}{\bar{\alpha} \cdot S_{ges} + 4 \cdot m \cdot V} = 0,163 \cdot \frac{V}{A_{ges} + 4 \cdot m \cdot V}. \quad (2.3)$$

A_{ges} [m²] symbolisiert die äquivalente Absorptionsfläche des Raumes. Diese bildet die Summe aller Einzeloberflächen ab, welche den Absorptionsgrad von $\alpha = 1$ aufweisen. Sie ergibt sich für jede Teilfläche nach folgender Formel:

$$A_{ges} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad \implies \quad \bar{\alpha} = \frac{A_{ges}}{S_{ges}}. \quad (2.4)$$

Das Ergebnis entspricht dem mittleren Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ des Raumes.

Neben dem Raumvolumen V [m³] und der Raumboberfläche S_{ges} [m²] zählt somit der mittlere Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ zu den bestimmenden Parametern der Nachhallzeit. m [Np/m] berücksichtigt die Dissipation der Luft, welche jedoch erst bei sehr großen Räumen im hochfrequenten Bereich zum tragen kommt. Zu beachten ist, dass obige Formel nur bis zu Absorptionsgraden von etwa $\bar{\alpha} = 0,3$ verlässliche Werte liefert. Bei angenommener maximaler Absorption von $\bar{\alpha} = 1$ erhält man nach *Sabine*, anstatt der zu erwartenden Nachhallzeit von exakt $T = 0$, abweichende Werte ($T \neq 0$) [GW06, S. 64–65], [NK01].

2.2.2. Nachhallzeit T nach EYRING

Im Gegensatz zu *Sabine* basieren *Eyrings* Untersuchungen auf der Überlegung, dass sich ausbreitende Schallenergiepakete bei Reflexionen an Wänden oder anderen Reflexionsflächen, durch die dabei stattfindende Absorption, Energie abgeben. Bei jeder Berührung zwischen Schallstrahl und Oberfläche findet so ein Verlust statt, wodurch ein jeweils kleinerer Anteil der Schallenergie übrig bleibt [NK01].

Durch Korrektur von Unzulänglichkeiten der *Sabine'schen* Nachhallzeitgleichung bei Räumen mit hohen Absorptionsgraden, durch die Annahme einer exponentiell abfallenden Energiedichte, folgt für die Nachhallzeit nach *EYRING*:

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{-S_{ges} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})}. \quad (2.5)$$

2.2.3. Nachhallzeit T nach MILLINGTON/SETTE

Von den verschiedenen Methoden die Nachhallzeit zu errechnen, geht *Sabine* als einziger von einem kontinuierlichen Abfall aus. Die asymptotische Annäherung der Ergebnisse an 1, wie dies in den Verfahren nach *Eyring* und der eher ungebräuchlichen Art der Berechnung der Nachhallzeit nach *Millington/Sette* geschieht, ist in Fällen mit hohen Absorptionsgraden vorzuziehen. Die Unterschiede folgen aus der Annahme, dass die Nachhallzeit ein nicht kontinuierlicher Prozess ist und somit Absorption nur an reflektierenden Flächen, also nicht im ganzen Raum stattfindet, was die Absorptionseigenschaft in der Luft selbst vernachlässigt.

Während *Millington/Sette* keine Divergenz der Schallstrahlen annehmen, geht *Eyring* von einem komplett diffusen Schallfeld aus.

Die Nachhallzeitformel nach *MILLINGTON/SETTE*:

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{-\sum_i S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)}. \quad (2.6)$$

Folglich liefert der Ansatz von *Millington/Sette* genau dann exakte Resultate, wenn genau eine Fläche im Raum hochabsorbierend ist. Ist allerdings die Bedingung für ein diffuses Schallfeld (siehe Formel 2.2) erfüllt, so wird man, lässt man die Kanteneffekte (siehe Abschnitt 2.5.1) unberücksichtigt, mit dem Ansatz nach *Eyring* die besten Ergebnisse erzielen. Die Anwendung der Formel nach *Sabine* ist bevorzugt dann zu empfehlen, wenn es sich um sehr große Räume handelt, bei denen die Nachhallzeit auch durch Einbringen von Absorptionsmaterial weitgehend unbeeinflusst bleibt [Pow70, S. 644–647].

2.3. Schallabsorption

Unter Schallabsorption versteht man die Umwandlung von Schallenergie in Wärmeenergie beim Auftreffen der Schallwelle an einer Begrenzungsfläche [HM94, S. 454].

Der Absorptionsgrad α setzt sich aus dem Transmissionsgrad τ und dem Dissipationsgrad δ zusammen. τ gibt den Anteil der beim Durchwandern eines Widerstandes verloren gegangener Energie an. Der Dissipationsgrad hingegen beschreibt das Verhältnis aus auffallender und in Wärme umgewandelter Schallenergie.

Während der Absorptionsgrad die vom Material aufgenommene bzw. veränderte Energie beschreibt, gibt der Reflexionsgrad ϱ die von der Oberfläche zurückgeworfene Energie an. Beide Parameter ergänzen sich zusammen auf „1“ [CM78, S. 110]:

$$1 = \varrho + \alpha = \varrho + \delta + \tau. \quad (2.7)$$

Ist poröses Material vor einer starren Wand vorhanden, kann der Transmissionsgrad auf Grund von $\tau \ll \delta$ vernachlässigt werden. In diesem, in der Praxis am häufigsten auftretende Fall, lässt sich der Absorptionsgrad nach Formel 2.8 berechnen [CM76, S. 20,25]:

$$\delta = 1 - \varrho \implies \alpha = 1 - |\underline{r}|^2. \quad (2.8)$$

\underline{r} stellt dabei den komplexen Reflexionsfaktor dar, der sich bei senkrechtem Schalleinfall wie folgt ergibt [HM94, S. 485]:

$$\underline{r} = \frac{W_\infty - Z_0}{W_\infty + Z_0}. \quad (2.9)$$

Die Wandimpedanz W_∞ [Pa·s/m] beschreibt das Verhältnis von Schalldruck \underline{p} [Pa] zu wandnormaler Schallschnelle \underline{v} [m/s] an der Absorberoberfläche.

$Z_0 = \rho \cdot c$ [Pa·s/m] = [kg/m³] · [m/s] ist hierbei die Schallkennimpedanz.

Unter Berücksichtigung von schrägem Schalleinfall, werden zunächst die beiden Fälle des *lokalen* und des *lateralen* Absorbers unterschieden.

Erstere erlauben ausschließlich eine Ausbreitung der Schallwelle normal zur Absorberoberfläche. Hohe Strömungswiderstände innerhalb des Materials sowie eine Unterteilung des Materials durch Trennstege bewirken, dass die Wandimpedanz W_∞ von der Einfallrichtung der Schallwelle unabhängig ist. Allerdings wirkt sich der veränderte Auftrittswinkel auf den Feldwiderstand aus. Man erhält deshalb einen winkelabhängigen Reflexionsfaktor [HM94, S. 488]:

$$\underline{r}(\Theta) = \frac{W_\infty - \frac{Z_0}{\cos(\Theta)}}{W_\infty + \frac{Z_0}{\cos(\Theta)}} = \frac{W_\infty \cdot \cos(\Theta) - Z_0}{W_\infty \cdot \cos(\Theta) + Z_0}. \quad (2.10)$$

Für den Fall des *lateralen* Absorbers, bei dem zusätzlich parallele Ausbreitung der Schallwellen innerhalb des Absorbers stattfindet, muss auch die hinzukommende winkelabhängige Wandimpedanz berücksichtigt werden.

Werden jedoch Absorptionsgrade für alle Schalleinfallrichtungen benötigt, d. h. für diffusen Schalleinfall, so muss an dieser Stelle der sich aus den Formeln 2.8 & 2.10 ergebende winkelabhängige Absorptionsgrad nach Mechel [HM94, S. 491] wie folgt berechnet werden:

$$\alpha = 2 \cdot \int_0^{2\pi} \alpha(\Theta) \cdot \cos(\Theta) \cdot \sin(\Theta) d\Theta. \quad (2.11)$$

2.3.1. Poröser Absorber

Die häufigste Erscheinungsform in der Gruppe der Schallabsorber ist die des porösen Absorbers. Zur Verwendung kommt diese bei der individuellen Gestaltung der Raumakustik, z B. bei Konzert- oder Mehrzweckhallen, bei der Verminderung von Lärmpegeln (Werkstätten, Maschinenräume, Klimakanäle, Abgasanlagen) sowie bei der Schaffung von reflexionsarmen Messräumen.

Poröse Absorber werden grundsätzlich dem Typ des *lateralen* Absorbers zugeordnet, wobei diese durch Vereinfachungen auch durch das Modell des einfacheren, *lokalen* Absorbers beschrieben werden können.

Prinzipiell funktioniert die Schallabsorption bei beiden Materialaufbauten gleich. Während der Ausbreitung der Schallwelle im Inneren des Materials finden Reibungs- und Wärmeverluste statt. Voraussetzung dafür ist, dass die Poren des Materials (oder Teile davon) durchgehend sein müssen (Genauerer dazu folgt im Abschnitt 2.3.2).

Man unterscheidet strukturell zwischen Faserabsorbern, offenzelligen Schäumen und haufwerksporigen Absorbern wie Sandschüttungen, porösen Beton und Sintermetalle. Hervorzuheben sind dabei Faserabsorber (z. B. Mineralwolle) und Schäume (PU-Schäume und Melaminharzschäum). Geschlossenzellige Schäume verhalten sich im Gegensatz dazu nicht wie poröse Absorber. [Wes10, S. 49], [Mec95, S. 69].

2.3.2. Absorberparameter

Ziel der Absorbertheorie ist die Beschreibung der Ausbreitung einer Schallwelle innerhalb von porösem Absorbermaterial. Die beiden Hauptkomponenten dieser Theorie stellen die

Formeln für die komplexe Ausbreitungskonstante \underline{L}_A [1/m] und die der Absorberimpedanz \underline{Z}_A [Ns/m³] = [Pa·s/m] (siehe Abschnitt: 2.3.2) dar [HM94, S. 456].

Alle notwendigen Parameter zur Charakterisierung beider Merkmale werden anschließend kurz erläutert.

Absorberdichte (Raumgewicht)

Die Absorberdichte der jeweiligen Materialien ergibt sich aus dem Verhältnis von der Masse m_A [kg] zum vorherrschenden Volumen V_A [m³] eines Absorbers:

$$\rho_A = \frac{m_A}{V_A}. \quad (2.12)$$

In Tabelle 2.1 sind die beiden am häufigsten vorkommenden Materialien und deren *Dichten* aufgelistet.

Material	ρ_A [kg/m ³]	Ausgangsmaterial	ρ_M [kg/m ³]
Mineralfaser	15–200	Glas	2450
Schäume	15–50	Harz	1200

Tabelle 2.1.: Absorberdichten ρ_A und Materialdichten ρ_M [Wes10, S. 51]

Porosität

Unter *Porosität* versteht man das Verhältnis von Porenvolumen V_P [m³] (Volumen der eingeschlossenen Luft) zu Gesamtvolumen V_A [m³]. Sie ist die kennzeichnende Größe für die *Porigkeit* eines Materials.

$$\sigma = \frac{V_P}{V_A} = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_M}, \quad (2.13)$$

wobei ρ_M der Dichte des Materials entspricht, aus dem der Absorber hergestellt ist.

Tabelle 2.2 zeigt die verschiedenen Porositätsbereiche.

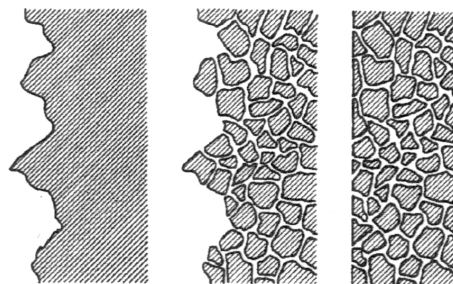
Material	σ von	σ bis
Mineralfaser	0,92	0,99
Schäume	0,95	0,995

Tabelle 2.2.: Porositätsbereiche verschiedener Materialien [Mec95, S. 103]

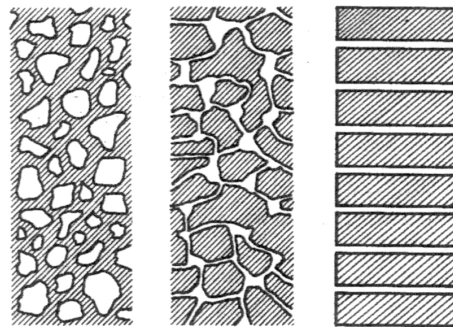
Allerdings liefert die Porosität keinerlei Aussagen über die akustischen Eigenschaften der Porigkeit.

Man unterscheidet *porige* Oberflächen von *rauen* Oberflächen. Abbildung 2.3a zeigt den wesentlichen Unterschied dieser beiden Eigenschaften. Das linke Teilbild zeigt einen Ausschnitt einer rauen Oberfläche eines in sich geschlossenen Materials. Da raue und poröse Materialien in der Praxis oft gemeinsam auftreten, wird porösen Absorbern die Eigenschaft zugeschrieben eine raue Oberfläche zu besitzen.

Das mittlere Bild zeigt diesen vermeintlichen Zusammenhang. Allerdings können die akustischen Eigenschaften eines Absorbers auch mit glatten Oberflächen erreicht werden, ohne dass sich seine Porosität ändert. Dies wird schematisiert im rechten Teilbild dargestellt [CM76, S. 105].



(a) Unterschied zwischen rauer und poriger Oberfläche



(b) Verschiedene Arten der Porigkeit

Abbildung 2.3.: Verschiedene Arten der Oberflächenbeschaffenheit und Porigkeit [CM76, S. 105]

Man unterscheidet außerdem zwischen *geschlossen-* und *offenporiger* Porosität. Während die geschlossene Porigkeit keinerlei akustische Wirksamkeit aufweist (siehe linkes Teilbild in Abbildung 2.3b), ist die offenporige Oberfläche sehr wohl für akustische Zwecke geeignet.

Die im Material miteinander verbundenen Poren und die damit zusammenhängende, große Oberfläche ermöglichen der auftreffenden Schallwelle das Eindringen. Im Inneren

findet dann durch Dissipation und Wärmeaustausch ein Energieentzug statt. In Abbildung 2.3b sind verschiedene Arten der Porigkeit abgebildet. Die rechts dargestellten Bohrungen stellen dabei eine vereinfachte Form des porösen Absorbers dar.

Strukturfaktor

Bildet man das Verhältnis von vorhandener Porosität σ zu akustisch wirksamer Porosität σ_a , lässt sich das akustisch wirksame Porenvolumen V_{aP} [m³] bestimmen: $\sigma_a = \frac{V_{aP}}{V_A}$. Man erhält den sogenannten Strukturfaktor χ :

$$\chi = \frac{\sigma}{\sigma_a} \quad (> 1) \quad (2.14)$$

Man unterscheidet des Weiteren die Porosität (σ), die alle Hohlräume beinhaltet, die zur Federung beitragen, von der akustisch wirksamen Porosität (σ_a), die lediglich die Volumina enthält, welche für die Beschleunigung der Luftmasse verantwortlich sind [Wes10, S. 54–55].

Für eine hohe Absorptionseigenschaft eines Materials benötigt man somit eine hohe Porosität ($\sigma \rightarrow 1$) sowie einen niedrigen Strukturfaktor ($\chi \rightarrow 1$). Ein hoher Strukturfaktor χ verschlechtert folglich die Absorptionseigenschaft eines Absorbers.

Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand Ξ oder auch Strömungsresistenz, zählt zu den wichtigsten Absorberparametern für poröse Materialien. Er beschreibt den Strömungswiderstand pro Längeneinheit der Absorberdicke und wird mittels Gleichströmung durch das Absorbermaterial gemessen [Mec95, S. 108].

Ursache des Strömungswiderstandes sind Reibungskräfte der Strömung, welche innerhalb der Strömungsgrenzschicht an den Porenwänden hervorgerufen werden.

Der längenbezogene Strömungswiderstand Ξ [Ns/m⁴] = [Pa·s/m²] für eine Gleichströmung durch eine Absorberschicht der Dicke d [m] wird dabei wie folgt definiert [CM78, S. 280]:

$$\Xi = \frac{\Delta p}{v \cdot d}. \quad (2.15)$$

Δp [Pa] stellt dabei die Druckdifferenz vor bzw. nach der Probe dar. v [m/s] entspricht der Strömungsgeschwindigkeit.

Abbildung 2.4 verdeutlicht zwei Strukturen mit jeweils der gleichen Porosität, wobei die rechte Abbildung einen höheren Strömungswiderstand als das linke Teilbild zeigt. Der Strömungswiderstand ist somit von der jeweiligen Geometrie der Absorberfasern und vom vorhandenen Porenvolumen abhängig [Wes10, S. 57].

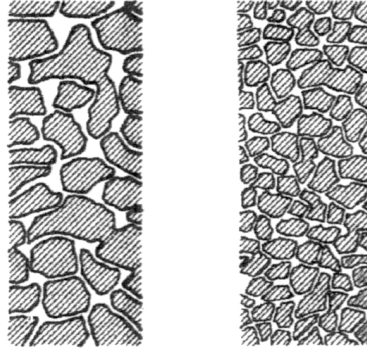


Abbildung 2.4.: Zwei Materialien gleicher Porosität aber mit verschiedenen Strömungswiderständen [CM76, S. 116]

Zusammenhängend betrachtet, verhält sich der Strömungswiderstand indirekt proportional zur Porosität eines Materials. Bei einer nicht vorhandenen Porosität von $\sigma = 0$ ergibt sich also eine unendlich hohe Strömungsresistenz.

In Tabelle 2.3 sind beispielhaft einige Kennwerte für die wichtigsten Materialien angegeben.

Material	Ξ_{min} [kPa·s/m ²]	Dichte	Ξ_{max} [kPa·s/m ²]	Dichte
Mineralwolle	6	50 [kg/m ³]	34	116 [kg/m ³]
PU-Weichschaum	5	25 [kg/m ³]	30	40 [kg/m ³]

Tabelle 2.3.: Strömungsresistenzen verschiedener Materialien [Wes10, S. 61]

Absorberimpedanz

Die Absorberimpedanz beschreibt die Anpassung eines Absorbers an den Schallkennwiderstand der Luft. Sie gibt somit an, welcher Widerstand auf die Schallwelle beim Eindringen in das Material wirkt. Der Welle selbst ist nur der Schallkennwiderstand Z_0 bekannt. Trifft diese auf einen neuen, unbekanntem Widerstand Z , wird ein Teil der Welle reflektiert.

Man erhält nach [HM94, S. 458] für die Absorberimpedanz:

$$\underline{Z}_A = \frac{Z_0}{\sigma_v} \cdot \sqrt{\frac{1 + j\frac{E}{E_0}}{\kappa + j\frac{E}{E_0}} \cdot \left(\chi - j\frac{\sigma_v}{2\pi E}\right)}. \quad (2.16)$$

Neben dem Adiabatenexponent κ , welcher üblicherweise mit 1,4 angenommen wird, führt Mechel die Absorbervariable E ein. Diese dimensionslose Größe erhält man aus $E = \frac{\rho_0 \cdot f}{\Xi}$ bzw. $E_0 = \frac{\rho_0 \cdot f_0}{\Xi}$, wobei f_0 der Relaxationsfrequenz entspricht. ρ_0 [kg/m³] symbolisiert die Luftdichte. Typische Werte für Mineralfasermaterialien liegen bei $E_0 = 0, 1$.

Der Wellenwiderstand des Absorbers passt sich mit steigenden Frequenzen dem der Luft an, wobei zu tiefen Frequenzen eine zunehmende Fehlanpassung herrscht und es zu frequenzabhängigen Absorptionsgraden kommt [Wes10, S. 68].

Komplexe Ausbreitungskonstante

Die Ausbreitungskonstante Γ dient zur Dimensionierung der benötigten Absorberdichte und beschreibt die Dämpfung der Schallwelle im Absorberinneren. Mechel beschreibt diese wie folgt [HM94, S. 458]:

$$\underline{\Gamma}_A = jk_0 \cdot \sqrt{\frac{\kappa + j\frac{E}{E_0}}{1 + j\frac{E}{E_0}} \cdot \left(\chi - j\frac{\sigma_v}{2\pi E}\right)}, \quad (2.17)$$

mit $k_0 = \frac{\omega}{c_0}$ [1/m] als Freifeld-Wellenzahl.

Das Dämpfungsmaß einer porösen Schicht steigt stetig mit der Frequenz an. Die Phasengeschwindigkeit im Absorbermaterial selbst ist dabei immer kleiner als die Schallgeschwindigkeit in der Luft, wobei sie sich zu hohen Frequenzen hin annähern.

Generell gilt, dass eine gute Impedanzanpassung dann erfolgt, wenn sich die Werte des Strukturfaktors χ und der Porosität σ an Eins annähern. Bei der Strömungsresistenz Ξ unterscheidet man den Fall einer guten Anpassung, d. h. Ξ muss klein sein, von dem einer hohen inneren Dämpfung, was im Gegensatz zum Ersteren ein hohes Ξ erfordert. Beide Fälle werden z. B. in keilförmigen Absorbern vereint. Am Anfang eines solchen Keils herrscht eine gute Anpassung an die Schallkennimpedanz Z_0 der Luft, sodass die Schallwelle sehr leicht in das Material eindringen kann. Umso weiter die Welle in das Material hineinwandert, desto stärker wird diese gedämpft [HM94, S. 459], [Wes10, S. 70 ff].

2.3.3. Homogene Absorberschicht

Basierend auf der Theorie verlustbehafteter elektrischer Leiter lassen sich die beiden frequenzabhängigen Materialparameter, die komplexe Ausbreitungskonstante und die Absorberimpedanz (siehe Abschnitt 2.3.2) herleiten. Mit Hilfe dieser Größen kann im Anschluss die Wandimpedanz und daraus der Reflektionsgrad (siehe Abschnitt 2.3) ermittelt werden, welcher letztendlich Aufschluss über den Absorptiongrad liefert.

Dabei wird die Absorberschicht als weitgehend homogene Schicht angenommen, in der Reibungsverluste entstehen können. Das transportierende Medium, in diesem Fall die Luft, durchwandert das Material und gibt währenddessen Energie in Form von Wärme an das sogenannte *Skelettmaterial* ab.

Alle folgenden Beschreibungen basieren auf *Mechel's* Theorie des homogenen Absorbers. Im Folgenden wird jedoch nicht auf die mögliche Wechselwirkung zwischen Skelettmaterial und Schallwelle eingegangen. Dieser zusätzliche, zur Absorption beitragende Effekt, tritt ohnehin nur bei sehr tiefen Frequenzen auf und wird aus Gründen der Vereinfachung unberücksichtigt bleiben [HM94, S. 457].

Unendliche Dicke

Spricht man von der sog. *unendlichen Dicke*, wird davon ausgegangen, dass eine eintreffende Schallwelle im Absorbermaterial verläuft. Da es bei diesem theoretischen Fall keine schallharte Begrenzung gibt und somit auch keine rücklaufende Welle entstehen kann, geht man hier von *senkrechttem Schalleinfall* aus. Die Wandimpedanz kann somit der Absorberimpedanz gleichgesetzt werden: $\underline{W}_\infty = \underline{Z}_A$.

Für den Absorptionsgrad ergibt sich nach [HM94, S. 485]:

$$\alpha_\infty = 1 - |r|^2 = 1 - \left| \frac{\underline{W}_\infty - Z_0}{\underline{W}_\infty + Z_0} \right|^2 = \frac{4 \cdot Z_0 \cdot \Re\{\underline{W}_\infty\}}{[\Re\{\underline{W}_\infty\} + Z_0]^2 + \Im^2\{\underline{W}_\infty\}}. \quad (2.18)$$

Für tiefer werdende Frequenzen erhält man durch die betragsmäßig wachsende Wandimpedanz eine zunehmende Fehlanpassung des Materials an die Schallkennimpedanz der Luft sowie kleinere Absorptionsgrade. Mit zunehmendem Strömungswiderstand verschlechtert sich die Absorption tiefer Frequenzen, da mit deren Anstieg eine verstärkte Reflexion tiefer Frequenzen an der Materialoberfläche einhergeht. [Wes10, S. 72, 73].

Beliebige Dicke

Bei endlichen, beliebigen Schichtdicken d [m] mit einer dahinterliegenden „starr“en Wand wird die Schallwelle daran reflektiert und durchwandert das Material erneut. Für diesen Fall erhält man die Wandimpedanz \underline{W}_d [Pa·s/m] wie folgt:

$$\underline{W}_d = \underline{Z}_A \cdot \coth(\underline{\Gamma}_A \cdot d). \quad (2.19)$$

Da das Absorptionsverhalten einerseits über die Dicke als auch andererseits über den Strömungswiderstand variierbar ist, sollte man für große Absorptionsgrade demnach die Materialstärken so groß wie möglich wählen, wobei der Strömungswiderstand klein genug sein sollte, um eine gesamtheitlich „gute“ Anpassung zu gewährleisten. D. h. dass bei vorgegebener Schichtdicke das Absorptionsvermögen durch geeignete Wahl verschiedener Materialien veränderbar ist. Kleine Strömungswiderstände optimieren dabei die Impedanzanpassung an die Luft. Große Strömungswiderstände hingegen bewirken, dass der an der Rückwand reflektierte Schall nicht wieder zur Absorberoberfläche zurückkehrt [HM94, S. 485, 486], [Wes10, S. 75].

Luftpolster zwischen Absorberschicht und starrer Wand

Da die Schallschnelle direkt an der Wand gegen Null tendiert und somit auch die Schnelle im Absorber bei wandnaher Montage sehr niedrige Werte aufweist, sinkt die Absorptionseigenschaft der verwendeten Absorberschicht. Durch die Zwischenschaltung eines Luftpolsters (siehe Abbildung 2.5) wandert der Absorber von der Wand in Richtung des Schnellextrahums weg.

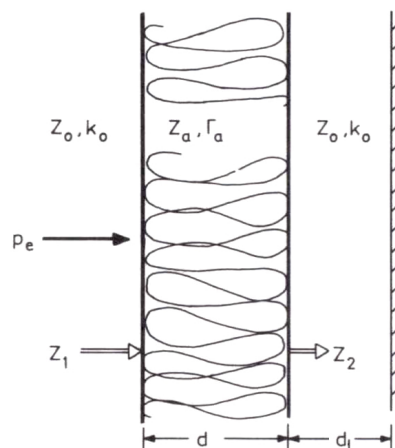


Abbildung 2.5.: Absorberschicht in Abstand d_l vor schallharter Wand [Mec89, S. 42]

Als Faustregel gilt, dass der Abstand der porösen Schicht etwa eine viertel Wellenlänge ($\frac{\lambda}{4}$) von der Wand betragen sollte, wodurch sich eine Verbesserung der Absorptionseigenschaften hin zu tiefen Frequenzen erreichen lässt [Wes10, S. 85], [HM94, S. 486].

Für die Berechnung der Wandimpedanz werden in einem Luftspalt d_l [m] zusätzlich zwei Schallwellen angesetzt. Dies sind eine einfallende und eine an der schallharten Rückwand reflektierte Welle, die zu einer Impedanzbelastung an der Rückseite der porösen Schicht führen.

Man erhält somit eine Erweiterung der Formel 2.19 für die Wandimpedanz nach [HM94, S. 486, 487] wie folgt:

$$\underline{W}_d = \underline{Z}_A \cdot \frac{-j \cdot Z_0 \cdot \cot(k_0 \cdot d_l) \cdot \cosh(\underline{\Gamma}_A \cdot d) + \underline{Z}_A \cdot \sinh(\underline{\Gamma}_A \cdot d)}{-j \cdot Z_0 \cdot \cot(k_0 \cdot d_l) \cdot \sinh(\underline{\Gamma}_A \cdot d) + \underline{Z}_A \cdot \cosh(\underline{\Gamma}_A \cdot d)}. \quad (2.20)$$

Schräger Schalleinfall auf Absorberschicht vor starrer Wand

In den bisherigen Kapiteln wird zumeist von senkrechtem Schalleinfall ausgegangen. Der Vollständigkeit halber sei hier noch der Fall des schrägen Schalleinfalls erwähnt (siehe auch Abschnitt 2.3).

Abbildung 2.6 veranschaulicht diesen Sachverhalt.

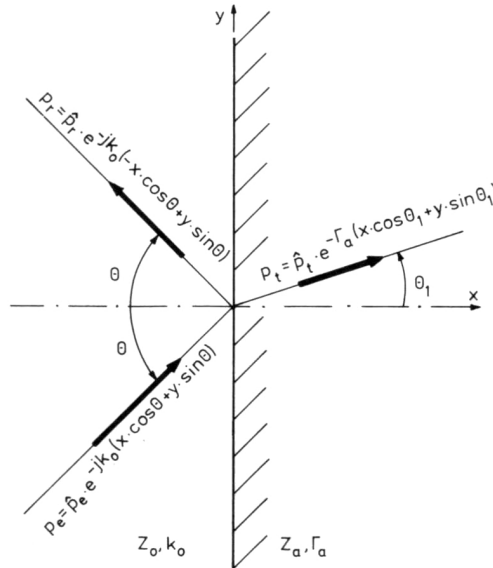


Abbildung 2.6.: Reflexion an der Oberfläche eines homogenen Absorbers [Mec89, S. 46]

Im Gegensatz zum senkrechten Schalleinfall tritt eine Abhängigkeit der Wandimpedanz \underline{W}_d vom Einfallswinkel Θ auf. Man erhält nach [HM94, S. 489] für die Wandimpedanz:

$$\underline{W}_d = \frac{\underline{Z}_A}{\cos(\Theta_1)} \cdot \coth(\underline{\Gamma}_A \cdot d \cdot \cos(\Theta_1)). \quad (2.21)$$

Neben eben genannten Sachverhalten gibt es weitere Faktoren, die einen zusätzlichen Einfluss auf die Absorberkennwerte haben. *F. P. Mechel* beschreibt in Band I [Mec89] und Band II [Mec95] unterschiedlich strukturierte Materialien, welche in diesem Kapitel nicht berücksichtigt werden. Weiterführend sind in Band III [Mec98] mögliche Absorberanordnungen, z. B. poröse Schichten bei schrägem Schalleinfall mit Luftspalt vor starrer Wand aufgeführt sowie die Unterschiede zwischen „lokal“ und „lateral“ wirksamen porösen Medien und Luftpolstern beschrieben.

2.3.4. Resonanzabsorber

Es folgt ein kurzer Auszug in dem die Wirkungsweise und das Funktionsprinzip von Resonanzabsorbern am Beispiel des Helmholtzabsorbers erläutert wird. Im Zuge dessen wird auf die charakteristischen Eigenschaften des darauf basierenden Schlitzplattenabsorbers eingegangen.

Helmholtzabsorber

Bestehend aus einem abgeschlossenen Volumen (Feder) und einem Resonatorhals mit darin befindlichem Luftpfropfen (Masse), lässt sich diese Anordnung als *Feder-Masse-System* bezeichnen.

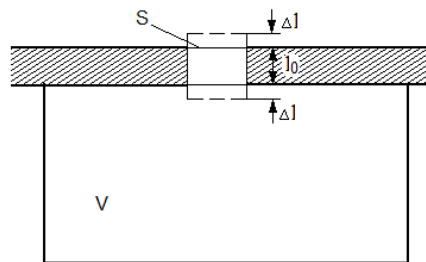


Abbildung 2.7.: Helmholtzresonator

Diese Art der Schallabsorber entzieht dem Schallfeld durch Interaktion zwischen der sich hin- und her bewegenden Luftmasse in der Resonatoröffnung und der dahinter liegenden

Feder Energie. Je nach Steifigkeit des Federvolumens, Variation der Länge des Resonatorhalses bzw. Wahl des Öffnungsdurchmessers, lässt sich der Resonator für die Absorption bestimmter Frequenzen abstimmen. Prinzipiell kann eine Erhöhung der Absorption hin zu tieferen Frequenzen sowie ein verstärkte Breitbandigkeit der vorhandenen Resonanzfrequenzen durch Einbringen von porösen Dämmmaterial im Hohlraum oder akustisch wirksamen Vliesen (vor oder hinter dem Schallloch) erreicht werden.

Ziel dieser Maßnahmen ist eine Optimierung des vorherrschenden, spezifischen Strömungswiderstandes [FV03, S. 87,88].

Schlitzplattenabsorber

Ein Schlitzplattenschwinger arbeitet, aufgrund der vorhandenen Luftmassen in den Schlitzen, in Verbindung mit dem dahinter liegenden Luftvolumen nach dem Prinzip des Helmholtzabsorbers.

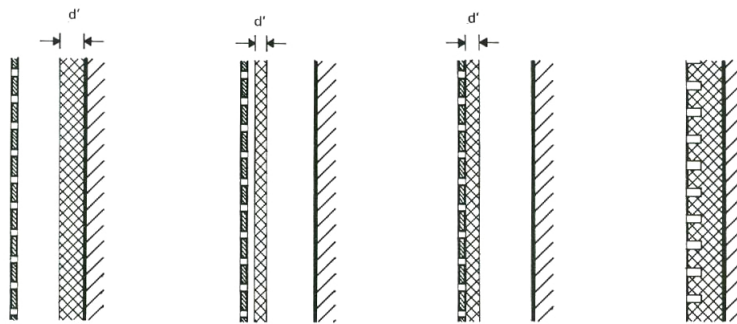


Abbildung 2.8.: Verschiedene Anordnungen der porösen Schicht hinter der Schlitzplatte [CM76, S. 163]

Abbildung 2.8 zeigt den schematischen Aufbau solcher Konstruktionen für verschiedene Anordnungen der porösen Absorberschicht. Im Gegensatz zum Einzelresonator sind bei Schlitz- oder auch Lochplattenabsorbern mehrere Luftvolumina an der akustischen Federwirkung beteiligt.

So lassen sich insbesondere Schlitzplattenabsorber für den mittel- bis tieffrequenten Einsatzzweck optimieren und bieten so bei gleicher Bautiefe im Vergleich zu normalen porösen Absorberschichten eine Erhöhung der Absorption welche um bis zu 2–4 Terzen tiefer reichen kann. Gerade in mittleren Frequenzbereich tritt dabei eine breitbandigere Wirkung auf [Fuc10, S. 66–72].

2.4. Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Absorptionsgrades

2.4.1. Berechnung des Absorptionsgrades nach SABINE & DIN EN ISO 354

Eine der gebräuchlichsten Formeln zur Bestimmung des Absorptionsgrades ist die Methode nach *Sabine*, welche zumindest in vereinfachter Form ebenso bei der im Anschluss beschriebenen Variante nach *DIN EN ISO 354* ihre Verwendung findet. In ihrer ursprünglichen Form (unter Vernachlässigung der Luftabsorption) ist diese gegeben durch:

$$\alpha_{s,S} = 0,163 \cdot \frac{V}{S_1} \left[\frac{1}{T_S} - \frac{1}{T_0} \left(1 - \frac{S_1}{S} \right) \right]. \quad (2.22)$$

$\alpha_{s,S}$ steht in diesem Fall für den Absorptionsgrad nach *Sabine*. Die Fläche des kompletten Raumes wird als S [m²] bezeichnet. V [m³] ist das Volumen des Raumes. Die im Faktor 0,163 enthaltene Schallgeschwindigkeit in Luft ist c [m/s]. Sie lässt sich in einem Temperaturbereich von 15°C bis 30°C wie folgt berechnen: $c = (331 + 0,6 \cdot t)$ [m/s], wobei t die Temperatur in °C darstellt. T_0 [s] entspricht der Nachhallzeit des leeren Raumes, T_S [s] der Nachhallzeit des Raumes nach Einbringen des Prüfobjektes und S_1 [m²] die vom Prüfobjekt verdeckte Fläche [DIN03, S. 13-14], [Pow70].

In Kapitel 2 (siehe Abschnitt: Messverfahren zur Bestimmung des Absorptionsgrades - Hallraum 2.5.1) ist eine konkrete Methode beschrieben, welche unter Verwendung einer vorangegangenen Nachhallzeitmessung im Hallraum sowie einer Messung nach dem Einbringen eines zu untersuchenden Gegenstandes die Möglichkeit bietet, den entsprechenden Absorptionsgrad zu berechnen.

Die für dieses Vorgehen erforderlichen Nachhallzeiten ergeben sich aus den arithmetischen Mittelwerten aller gemessenen Werte für jedes Frequenzband. Wird dabei die Dissipation der Luft vernachlässigt, welche sich wie bereits erwähnt nur in sehr großen Räumen und bei hohen Frequenzen auswirkt, kann man den Absorptionsgrad, auf Formel 2.22 basierend, wie folgt berechnen [DIN03, S. 13-14]:

$$\alpha_{s,N} = 55,3 \cdot \frac{V}{c \cdot S_1} \left(\frac{1}{T_S} \cdot \frac{1}{T_0} \right). \quad (2.23)$$

Der Index N steht in diesem Fall symbolisch für Norm. Im Allgemeinen ist der Absorptionsgrad des leeren Raumes α_0 bekannt, erhält man folgende Form:

$$\alpha_{s,S} = \alpha_{0,S} + 0,163 \cdot \frac{V}{S_1} \left(\frac{1}{T_S} - \frac{1}{T_0} \right), \quad \text{mit} \quad \alpha_{0,S} = 0,163 \cdot \frac{V}{S \cdot T_0}. \quad (2.24)$$

Bei der Berechnung des Absorptionsgrades ist zu beachten, dass der Ansatz nach *Sabine* (Formel 2.22) und die darauf basierende Formel nach *DIN EN ISO 354* (Formel 2.23) für Fälle mit sehr hohen Absorptionsgraden bzw. mit sehr kurzen Nachhallzeiten weniger zu empfehlen sind, da sie auch hier zu hohe Werte für α liefern. Im Extremfall der Nachhallzeit T_0 gleich Null strebt α_0 gegen Unendlich [Pow70].

2.4.2. Berechnung des Absorptionsgrades nach EYRING

Durch die Annahme, dass der Abfall der Nachhallzeit kein kontinuierlicher Prozess ist, versucht *Eyring* in seiner Formel für den Absorptionsgrad die Unzulänglichkeiten der *Sabine'schen* Gleichung zu kompensieren. Er erhält eine asymptotische Annäherung des Absorptionskoeffizienten an den Wert 1, formal ausgedrückt [Pow70]:

$$\alpha_{s,E} = \alpha_{0,E} + \frac{S}{S_1} \left[e^{\left(-\frac{0,163 \cdot V}{S \cdot T_0}\right)} - e^{\left(-\frac{0,163 \cdot V}{S \cdot T_S}\right)} \right], \quad \text{mit} \quad \alpha_{0,E} = 1 - e^{\left(-0,163 \cdot \frac{V}{S \cdot T_0}\right)}. \quad (2.25)$$

Entsprechend des Namensgebers ist auch hier der Absorptionsgrad des leeren Raumes α_0 mit Index E gekennzeichnet.

2.4.3. Berechnung des Absorptionsgrades nach MILLINGTON/SETTE

Ebenso wie bei *Eyring* basiert auch der Ansatz von *Millington/Sette* auf einer asymptotischen Annäherung der Absorption an der Wert „1“. Aufgrund unterschiedlicher Betrachtungen des Schallfeldes, *Eyring* geht von einem Diffusschallfeld aus, *Millington/Sette* betrachten den normalen Schalleinfall ohne jegliche Divergenz der Schallstrahlen, erhält man bei letzteren dann die gebräuchlichsten Ergebnisse, wenn genau eine hoch absorbierende Fläche im Raum vorhanden ist.

Der Absorptionsgrad berechnet sich damit nach *Millington/Sette* (mit Index MS) explizit nach folgender Formel [Pow70]:

$$\alpha_{s,MS} = 1 - (1 - \alpha_{0,MS}) \cdot e^{\left[-0,163 \cdot \frac{V}{S_1} \cdot \left(\frac{1}{T_S} - \frac{1}{T_0}\right)\right]}, \quad \text{mit} \quad \alpha_{0,MS} = 1 - e^{\left(-0,163 \cdot \frac{V}{S \cdot T_0}\right)}. \quad (2.26)$$

2.5. Messverfahren zur Bestimmung des Absorptionsgrades

In diesem Abschnitt wird kurz auf die gängigsten Messmethoden zur Bestimmung des Absorptionsgrades eingegangen sowie deren Vor- und Nachteile durchleuchtet. In Abschnitt 2.5.2 wird das Verfahren zur Ermittlung akustischer Materialparameter mit einem Impedanzrohr (IR) nach DIN EN ISO 10534 (2001) [DIN01a] beschrieben. Da sich die Absorptionseigenschaften verschiedener Materialien abhängig vom Schalleinfallswinkel ändern, sei hier auch das Hallraum-Verfahren nach DIN EN ISO 354 (2003) [DIN03] erläutert, welches auf einem diffusen Schallfeld basiert.

2.5.1. Hallraum

Die in Abschnitt 2.5.2 beschriebene Methode zur Ermittlung der Übertragungsfunktion arbeitet auf Basis des senkrechten Schalleinfalls. Möchte man den Absorptionsgrad bei diffusen Schallfeldern untersuchen, bedient man sich häufig dem „Hallraumverfahren“. Die dafür benötigten Anforderungen und die Durchführung sind in DIN EN ISO 354 [DIN03] beschrieben.

Ausgehend von einem nahezu diffusen Schallfeld wird die mittlere Nachhallzeit für den Zustand mit und ohne Prüfkörper bestimmt. Für die Ausbildung eines solchen Schallfeldes sollte das Raumvolumen mindestens 150 m^3 betragen, bei Neubauten sind sogar 200 m^3 vorgeschrieben. Ab einer Größe von 500 m^3 können bei der Messung der Schallabsorption bei höheren Frequenzen Ungenauigkeiten aufgrund der Dissipationseigenschaft der Luft auftreten.

Um auch bei tieferen Frequenzen die Raumeinflüsse zu minimieren, sollten für eine günstige Verteilung der Eigenfrequenzen jeweils zwei Raumabmessungen nicht im Verhältnis kleiner ganzen Zahlen zueinander stehen. Um die bestehende Diffusität zu erhöhen können zusätzlich Diffusoren eingebracht werden.

Das zu vermessende Prüfobjekt sollte eine Größe von ca. 10 m^2 bis 12 m^2 besitzen. Wird mit abgeschaltetem Rauschen gemessen, werden Mikrofone mit kugelförmiger Richtcharakteristik verwendet. Die Abstände untereinander sollten dabei mindestens $1,5\text{ m}$ betragen. Darüber hinaus ist eine Distanz von mindestens 2 m zur Schallquelle sowie 1 m zu den Raumbegrenzungsflächen einzuhalten. Ebenso wie die Schallempfänger muss auch die Schallquelle eine kugelförmige Richtcharakteristik aufweisen. Es sind Messungen mit mindestens drei Mikrofonpositionen sowie zwei Lautsprecherpositionen durchzuführen. Das breitbandige Anregungssignal muss lange genug sein, um eine Ausbildung stationärer Schalldruckpegel in jedem Frequenzband zu gewährleisten. Die Länge des Anregungssignal sollte mindestens halb so lang sein wie die abgeschätzte, erwartete Nachhallzeit.

Die äquivalente Absorptionsfläche A_T [m²] berechnet sich dabei nach *Sabine* wie folgt:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3 \cdot V \cdot \left(\frac{1}{c_2 \cdot T_2} - \frac{1}{c_1 \cdot T_1} \right) - 4 \cdot V \cdot (m_2 - m_1). \quad (2.27)$$

Dabei sind c_1 [m/s] und c_2 [m/s] die jeweiligen Schallgeschwindigkeiten bei den beiden Zuständen 1 (leerer Raum) und 2 (Raum mit Prüfobjekt). V [m³] das Volumen des leeren Raumes. T_1 [s] die Nachhallzeit des leeren Raumes, T_2 [s] die Nachhallzeit des Raumes nach Einbringen des Prüfobjektes und m_1 [Np/m] und m_2 [Np/m] die jeweiligen Luftabsorptionskoeffizienten.

Durch Division der äquivalenten Absorptionsfläche durch die Größe der Probenkörper, erhält man den Absorptionsgrad α_S zu:

$$\alpha_S = \frac{A_T}{S}, \quad (2.28)$$

wobei S [m²] die Fläche des Prüfobjektes darstellt.

Bei der anschließenden Berechnung des äquivalenten Absorptionsgrades kann es vereinzelt zu Werten von $\alpha > 1$ kommen. Dieser physikalisch unmögliche Wert rührt aus dem sogenannten *Kanteneffekt*. Dieser Effekt tritt im Speziellen beim Vorhandensein vieler einzelner Objekte auf. An den existierenden Kanten der verschiedenen Materialien treten Beugungseffekte auf, welche auch bei schallharter Ausführung der Kanten zu einem Druckstau in Ihrer Nähe führen. Es können sich daraus etwas zu große Absorptionsgrade errechnen [Mös10, S. 595].

Das Hallraumverfahren hat den Nachteil, dass es erst ab einer gewissen Probenoberfläche verlässliche Werte liefert, was meist einen sehr großen Kostenaufwand für die Messung mit sich bringt. Der oft sehr aufwändige Messaufbau und die Tatsache, dass ein Hallraum nicht immer zur Verfügung steht, sind dabei ebenso ein Thema.

2.5.2. Impedanzrohr

Man unterscheidet bei diesem Ansatz zwischen zwei Methoden zur Bestimmung von akustischen Materialparametern. Dies ist zum Einen die *Stehwellenmethode* nach [DIN01a] und zum Anderen die *Übertragungsfunktionsmethode* nach [DIN01b]. Beide Verfahren arbeiten mit einer eindimensionalen Schallwelle, die sich entlang eines Rohres hin zum interessierenden Material ausbreitet, um dort unter senkrechtem Einfallswinkel auf den Probenkörper aufzutreffen. Das in dieser Arbeit verwendete Verfahren arbeitet nach dem Prinzip der Übertragungsfunktionsmethode.

Methode mittels Übertragungsfunktion

Wie in Abbildung 2.9 dargestellt, speist ein an das Rohr angebrachter Lautsprecher ein breitbandiges Rauschen ein.

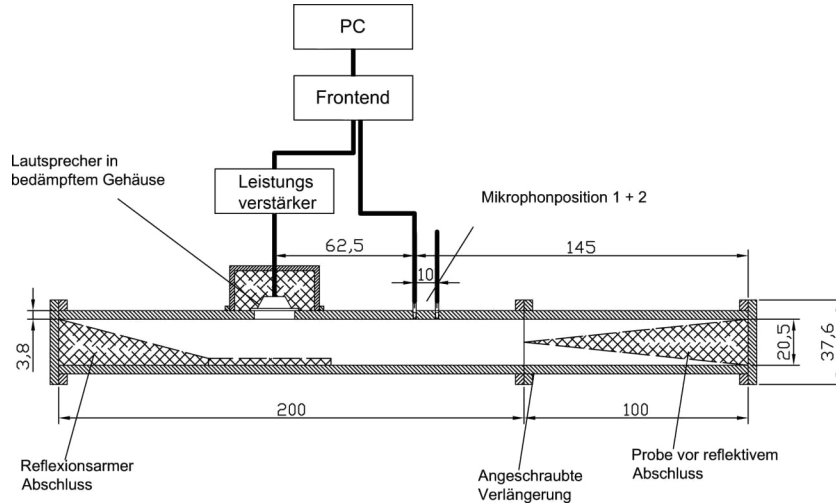


Abbildung 2.9.: Schematischer Aufbau eines Impedanzrohres

Die entstehende Schallwelle wandert bis zur am Rohrende eingebrachten Probenoberfläche und wird dort teilweise reflektiert. Aus der sich ergebenden hin- und rücklaufenden Welle entsteht ein ebenes Wellenfeld, welches an zwei bestimmten Positionen gemessen wird (wird deshalb auch oft *2-Mikrofon-Methode* genannt).

Die an diesen Messpositionen fix angebrachten Mikrofone zeichnen die dort vorherrschenden Schalldrücke auf. Rechnet man diese in komplexe Übertragungsfunktionen um, lassen sich der Reflexionsfaktor \underline{r} , der Absorptionsgrad α und die akustische Impedanz \underline{Z}_A bestimmen. Man erhält für die an den Mikrofonpositionen 1 und 2 ermittelten Schalldrücke:

$$\underline{p}_1 = \underline{p}_h(0) \cdot e^{jkx_1} + \underline{p}_r(0) \cdot e^{-jkx_1}, \quad (2.29)$$

$$\underline{p}_2 = \underline{p}_h(0) \cdot e^{jkx_2} + \underline{p}_r(0) \cdot e^{-jkx_2}, \quad (2.30)$$

wobei $k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0}$ [1/m] die Wellenzahl symbolisiert. Durch eine Fouriertransformation dieser Drücke sowie deren Division ergibt sich die Übertragungsfunktion $\underline{H}_{12} = \frac{\underline{p}_2(x,\omega)}{\underline{p}_1(x,\omega)}$.

Teilt man diese (\underline{H}_{12}) auf in die Anteile der hinlaufenden \underline{H}_h und rücklaufenden Welle \underline{H}_r , erhält man die Information über die räumliche Phase der Schalldruckwelle zu einem bestimmten Zeitpunkt t zwischen den beiden Messpunkten:

$$\underline{H}_h = \frac{\underline{p}_{2h}}{\underline{p}_{1h}} = e^{-jks}, \quad (2.31)$$

$$\underline{H}_r = \frac{\underline{p}_{2r}}{\underline{p}_{1r}} = e^{jks}, \quad (2.32)$$

wobei $s = x_1 - x_2$ [m] dem Abstand zwischen den beiden Mikrofonen entspricht. Die Übertragungsfunktion des gesamten Schallfeldes ergibt sich mit $\underline{p}_r = \underline{r} \cdot \underline{p}_h$ wie folgt:

$$\underline{H}_{12} = \frac{\underline{p}_h(0) \cdot e^{jkx_2} + \underline{r} \cdot \underline{p}_h(0) \cdot e^{-jkx_2}}{\underline{p}_h(0) \cdot e^{jkx_1} + \underline{r} \cdot \underline{p}_h(0) \cdot e^{-jkx_1}} = \frac{e^{jkx_2} + \underline{r} \cdot e^{-jkx_2}}{e^{jkx_1} + \underline{r} \cdot e^{-jkx_1}}. \quad (2.33)$$

Es ergibt sich daraus der komplexe Reflexionsfaktor \underline{r} zu:

$$\underline{r} = \frac{(\underline{H}_{12} - \underline{H}_h)}{(\underline{H}_r - \underline{H}_{12})} \cdot e^{j2kx_1}. \quad (2.34)$$

Setzt man nun für die Werte x_1 , s und k die sich aus der Messung ergebenden Werte ein, lässt sich der Reflexionsfaktor an der Probenoberfläche ($x = 0$) bestimmen [GW06, S. 192–195]. Der komplexe Reflexionsfaktor liefert außerdem die Basis für die weitere Berechnung des Absorptionsgrades α sowie der Absorberimpedanz \underline{Z}_A (siehe Abschnitt 2.3).

Die Ausführung des Rohres sollte so beschaffen sein, dass durch die Rohrwandungen keine Schallenergie austreten kann. Die vorherrschende Geometrie sowie die Abmessungen des Rohres selbst bestimmen dabei den Messbereich des Rohres. So wird die obere Grenzfrequenz vom Rohrdurchmesser d [m] festgelegt. Da sich ab einer gewissen Wellenlänge im Rohr Quermoden ausbilden und somit nicht mehr die Voraussetzung einer ebenen Welle erfüllt ist, sollte der Rohrdurchmesser $d < \frac{\lambda}{2}$ sein. Es ergibt sich die obere Grenzfrequenz zu:

$$f_o = \frac{c}{2 \cdot d}. \quad (2.35)$$

Bei der Dimensionierung des Rohres sind hinsichtlich des Durchmessers sowie der Rohrlänge einige Punkte zu beachten. Das Rohr sollte in der Länge die Ausbreitung einer kompletten Welle ermöglichen. Ebenfalls ist die Rohrwandung (rechteckig oder rund) so zu wählen dass diese massiv genug ausgeführt ist um Eigenschwingungen zu vermeiden.

Dabei begrenzt der Durchmesser des Rohres die Wahl des als Schallquelle dienenden Lautsprechers. Umso größer dieser ausgeführt ist, desto größer ist die Leistung mit der auch tiefe Frequenzen abgestrahlt werden können. Zur Vermeidung von Quermoden wird hingegen ein möglichst geringer Rohrdurchmesser verlangt. Hier muss je nach Anwendungsbereich eine Kompromisslösung gefunden werden. Für eine genaue Beschreibung des Messverfahrens sowie aller Dimensionierungsvorschriften sei hier auf die Norm [DIN01a] verwiesen.

Kapitel 3.

Veränderung der Absorptionseigenschaft von Bauteilen

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über die am Markt vorhandenen verschiedenen Konzepte der variablen Raumakustik geben. Es werden sowohl die verschiedenen Mechanismen und deren Vor- und Nachteile vorgestellt als auch deren Anwendung in realen Räumlichkeiten beschrieben. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Möglichkeit mittels passiver Elemente die Absorptionseigenschaften von Wänden oder Decken zu verändern.

Wird ein Raum hinsichtlich seiner akustischen Eigenschaften gezielt auf einen einzigen bestimmten Anwendungszweck entworfen bzw. optimiert, so spielt die Rolle der Variabilität seiner Raumakustik eine eher untergeordnete Rolle. Allerdings ist es in der Praxis gängiger einen Raum für mehrere Anwendungsgebiete zu nutzen. So ist man auf Grund wirtschaftlicher Aspekte oft auf eine Flexibilität akustischer Eigenschaften angewiesen.

Es existieren dabei voneinander grundsätzlich verschiedene Herangehensweisen. Man unterscheidet zum Einen die Möglichkeit die Raumakustik *passiv*, d. h. durch bewegliche Elemente zu beeinflussen und zum Anderen durch *aktive* Komponenten die vorherrschenden Gegebenheiten zu gestalten.

Eine weitere, wenn auch sehr kostenintensive Variante, stellt die Veränderung gegebener Raumvolumina dar. Durch motorisch bewegliche Elemente sowie dahinter liegende Hohlräume kann das vorhandene Raumvolumen per Knopfdruck vergrößert oder verkleinert werden, was letztendlich zu einer Verlängerung bzw. Verkürzung der Nachhallzeit führt.

Aufgrund der Tatsache, dass das in dieser Arbeit behandelte Bauteil zur Gruppe der „passiven“ Elemente gehört, wird anschließend nur auf die „passiven“ Varianten der variablen Raumakustik eingegangen.

3.1. Unterschiedliche Mechanismen

Zur individuellen Anpassung der raumakustischen Bedingungen bedient man sich einer breiten Palette von Möglichkeiten, welche erhebliche Unterschiede betreffend Materialaufwand, Installationsmaßnahmen und damit verbundenen Kosten aufweisen.

3.1.1. Vorhänge

Die simpelste Methode die Nachhallzeit eines Raumes zu beeinflussen, ist das Anbringen von Vorhängen. Der Vorhang kann entlang einer an der Decke befestigten Schiene zu- oder aufgezo-gen werden. In geschlossenem Zustand absorbiert dieser, abhängig von Materialstärke und Rüs-chung, hauptsächlich im mittleren bis hohen Frequenzbereich [FV03, S. 82].

Um die Absorptionseigenschaften dieser Anordnung hin zu tieferen Frequenzen zu erweitern, kann dieser in einem gewissen Abstand zur Wand montiert werden, sodass dieser für gewissen Frequenzen in deren Schnelleximum wandert (siehe Abschnitt 2.3.3). Wird der Vorhang geöffnet, fällt der Schall beispielsweise auf an der Wand montierte, kreisförmige, leicht diffus wirkende Reflexionsflächen [EP09, S. 278]. Die Raumakustik lässt sich so durch verhältnismäßig geringen Aufwand sehr schnell verändern und an die gewünschten Verhältnisse anpassen.

Der große Vorteil besteht eindeutig in der sehr kostengünstigen Konstruktion. Die schall-schluckende Wirkung hin zu tiefen Frequenzen ist jedoch stark eingeschränkt und lässt sich nur durch zusätzliche Maßnahmen, wie z. B. Resonanzabsorber oder Kantenabsorber, verbessern.

3.1.2. Mobile Absorberelemente

Durch portable Elemente lassen sich Hörer-, Aufnahme- oder Regieräume auf unterschiedlichste Art und Weise in ihrem akustischen Verhalten optimieren. Eine beispielhafte schematische Darstellung eines solchen Elements findet sich in Abbildung 3.1.

Bestehend aus einem Holzrahmen, der darin enthaltenen Glasfaserwolle sowie einer davor montierten Lochplatte mit Stoffbespannung fungiert ein Element in dieser Anordnung als Breitbandresonanzabsorber. Durch geeignete Wandmontageelemente können diese rasch in diversesten Räumlichkeiten an den Wänden auf- und wieder abgehängt werden.

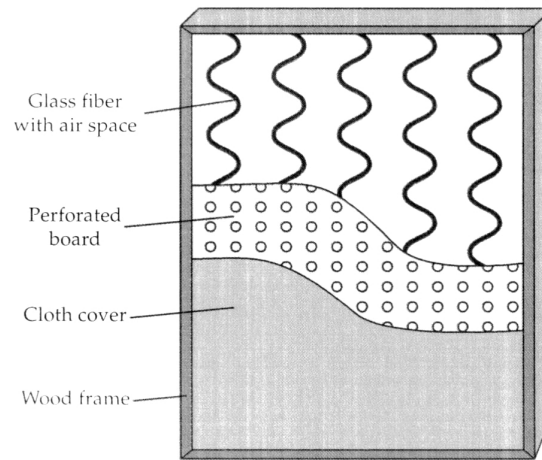


Abbildung 3.1.: Portables Absorberelement [EP09, S. 278]

Mobile Akustikstellwände

Der geläufigste Vertreter dieser Gattung stellen mobile Stellwände dar. Diese können je nach Ausführungsform und akustisch wirksamer Fläche sehr effektiv sein und ermöglichen dem Anwender ein breites Einsatzgebiet. Oft werden diese zur getrennten Aufnahme bestimmter Instrumente oder Gesangsaufnahmen verwendet. Eine mögliche Anordnung ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

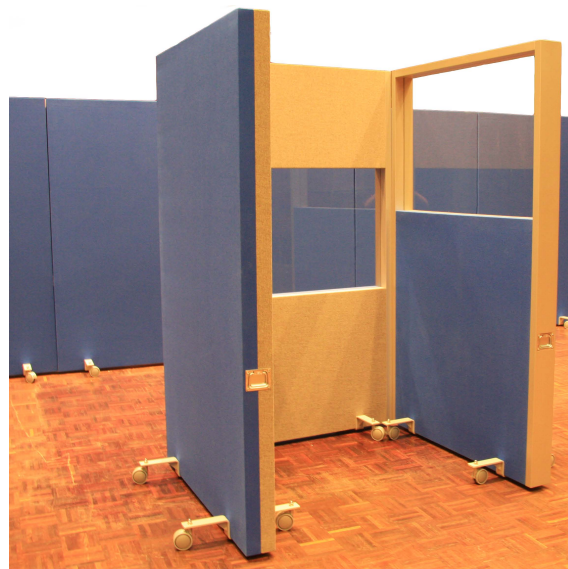


Abbildung 3.2.: Mobile Stellwände, concept-A GmbH

3.1.3. Klappenelemente

Eine recht kostenfreundliche Variante die Raumakustik z. B. eines Studios zu verändern, ist das Anbringen von zweiseitig beschichteten Platten, welche sich durch Gelenke in die gewünschte Position umklappen lassen. Dabei besteht die eine Seite aus einer absorbierenden Oberfläche, die andere hingegen arbeitet reflektierend. Durch passende Anordnung der verschiedenen Oberflächenstrukturen lässt sich somit entweder eine durchgehend absorbierende oder eine komplett reflektierende Oberfläche schaffen (siehe Abbildung 3.3).

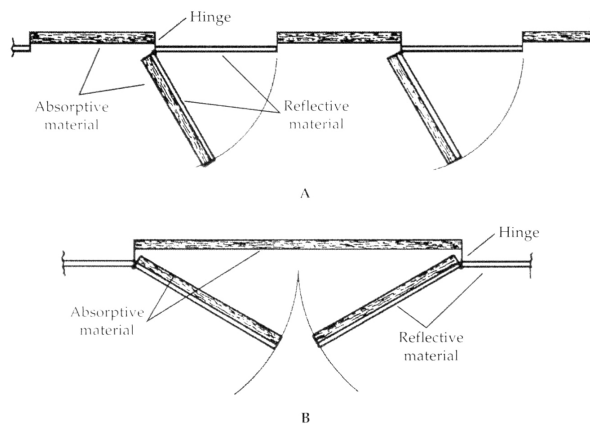


Abbildung 3.3.: Klappenelemente [EP09, S. 280]

Natürlich kann auch hier durch das Auf- und Zuklappen einzelner Elemente die Akustik je nach Anwendungszweck individuell variiert werden. Wie vorher beschrieben (Abschnitt 3.1.1), besteht hier ebenfalls die Möglichkeit durch Abstand zwischen Absorbermaterial und der Wand eine Verbesserung der Schluckeigenschaften hin zu tiefen Frequenzen zu erreichen.

3.1.4. Variable Resonanzabsorber

Variable Resonanzabsorber stellen eine Abwandlung der vorher beschriebenen Klappenelemente dar (siehe Abbildung 3.4). Man versteht darunter perforierte Platten, welche an einem Ende beweglich an der Wand befestigt sind. Sie ermöglichen die Veränderung des Luftvolumens, welches sich dahinter befindet. Justiert man die Platte in einem gewissen Abstand zur Wand, bildet sich durch das Vorhandensein von Luftpolstern in den Löchern sowie durch das Luftvolumen hinter der Platte ein „Feder-Masse-System“, welches die Absorptionseigenschaft maßgeblich beeinflusst.

Je nach Stellung lässt sich das Absorptionsmaximum im Frequenzbereich nach unten oder oben verschieben, wobei sich bei wandnaher Positionierung der Absorptionspeak hin

zu höheren Frequenzen verschiebt. Umgekehrt wird die Absorption für tiefere Frequenzen stärker, umso größer der Abstand zwischen Wand und perforierter Platte und somit das Luftpolster wird.

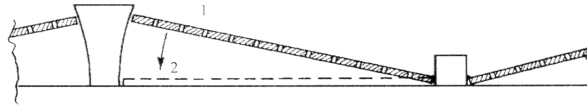


Abbildung 3.4.: Variable Resonanzabsorber [EP09, S. 283]

Eine Kombination der verschiedenen akustischen Wirkungsweisen ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Zur Verwendung kommen hier neben reflektierenden Flächen (R) und absorbierenden Materialien (A) auch perforierte Platten (S) zum Einsatz. Die spezielle Geometrie unterstützt, insbesondere bei Verwendung der schallharten Flächen, eine diffuse Streuung der Schallwellen. Diese Anordnung erlaubt durch unterschiedliche Stellungen der Elemente eine individuelle Anpassung der raumakustischen Eigenschaften auf den jeweiligen Einsatzzweck bezogen.

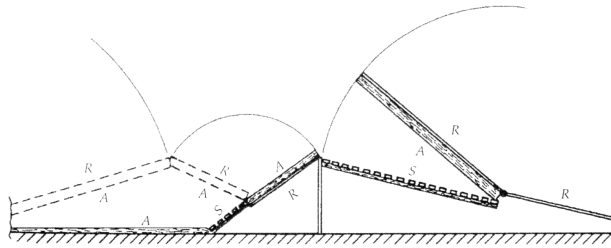


Abbildung 3.5.: Variable Akustikelemente in Klappausführung [EP09, S. 283]

3.1.5. Rotierende Elemente

Eine weitere Möglichkeit bieten rotierende Elemente. Die auf dem Markt erhältlichen Varianten unterscheiden sich dabei sowohl in Form und Größe als auch in der Ausführung. Das Prinzip ist dabei allerdings immer das selbe. Ein Körper, bestehend aus unterschiedlichen Oberflächenmaterialien, wird in den dafür vorgesehenen Hohlräumen in der Wand oder Decke installiert und ist oft, durch elektrische Motoren angetrieben, rotierbar.

In Abbildung 3.6a sind z. B. sich drehende Zylinderausschnitte zu sehen, welche auf einer Seite schallreflektierend ausgeführt sind und dadurch zugleich eine diffuse Wirkung

haben. Auf der anderen Seite besitzen diese absorbierende Materialien. Aufgrund der oft sehr ausladenden Abmessungen kommen solche Anordnungen meist in größeren Sälen oder in Mehrzweckräumen zur Anwendung.

Eine erweiterte Variante des oben beschriebenen Mechanismus' stellt der Triffusor (Abbildung 3.6b) dar, eine Kombination aus drei Prismen, die jeweils um die eigene Achse drehbar in die Wand eingelassen werden.

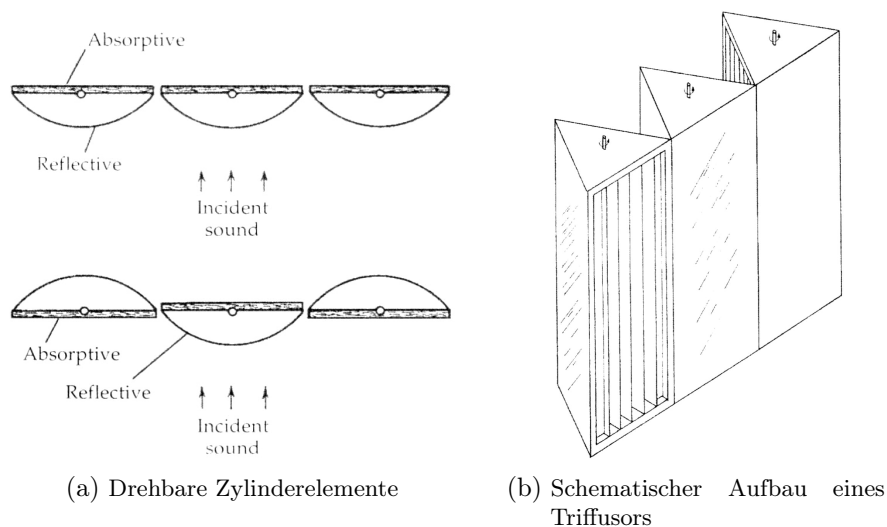


Abbildung 3.6.: Beispiele drehbarer Akustikelemente [EP09, S. 284, 285]

Jedes der drei einzelnen Elemente besitzt drei verschiedene Seiten mit unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten und damit auch unterschiedlicher Wirkung auf das Schallfeld. Eine Seite ist diffus ausgeführt, die zweite reflektierend und die dritte Seitenfläche besitzt absorbierende Eigenschaften.

3.1.6. Absorber mit Lamellenkonstruktion

Ähnlich wie bei Klappmechanismen kann man bei einem Element mit Lamellenkonstruktion (LK), gezeigt in Abbildung 3.7, aus einem Rahmen und darin eingebetteten schallabsorbierenden Materialien hinter einer schallharten, reflektierenden Jalousie, die absorbierende Fläche entweder komplett, nur teilweise oder garnicht verdecken. Werden die Lamellen geschlossen, wird mittel- und hochfrequent Schall reflektiert. Lediglich für tiefe Frequenzen ist der Absorber abhängig von der jeweiligen Bautiefe akustisch wirksam.

Umso mehr der Frontaufbau geöffnet wird, desto mehr akustisch wirksame Fläche wird für die ankommenden Schallwellen Preis gegeben. Der Absorber besitzt genau dann sein

Wirkungsmaximum, wenn alle Elemente komplett geöffnet sind.

Wenn alle Lamellen komplett geschlossen sind, muss ein weiterer Effekt berücksichtigt werden. Da in diesem Fall die Front einer Schlitzplatte ähnelt, tritt die Absorptionswirkung eines Schlitzplattenschwingers ein, wodurch sich die Schallabsorption von hohen und mittleren, hin zu tieferen Frequenzen verschiebt. Je nach Form der Lamellen kann für hohe Frequenzen eine leicht diffuse Wirkung auch bei geschlossenem Zustand erreicht werden.

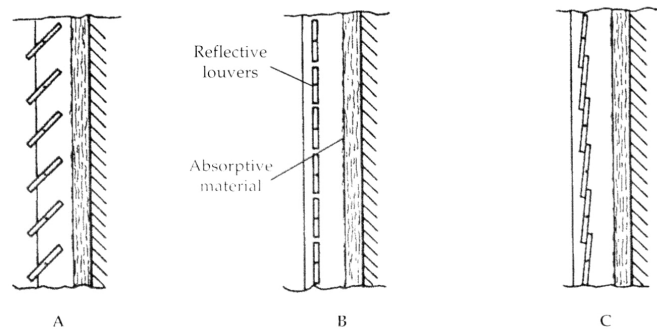


Abbildung 3.7.: Lamellenkonstruktion [EP09, S. 281]

Nachteil dieser Konstruktion ist der arbeits- und kostenintensive Aufbau. Nichts desto trotz ist hervorzuheben, dass dieses Prinzip durch nahezu stufenlos, zwischen offenem und geschlossenem Zustand variierbaren Lamellenfeldern eine weitestgehend uneingeschränkte Möglichkeit der raumakustischen Beeinflussung bietet.

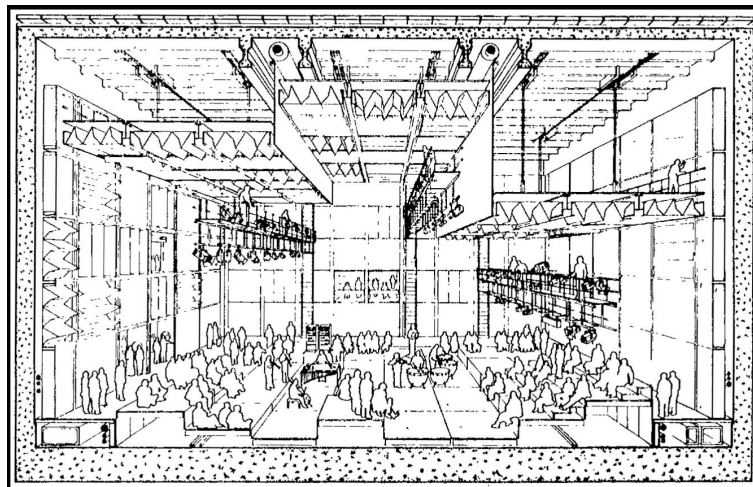
Weitere Ausführungen, insbesondere für die LK sowie für Installationen mittels Klapp-elementen sind in folgender Literatur [ES88, S. 143 ff.] zu finden. An dieser Stelle sei auf das Kapitel 7: „*Variable acoustics*“ in [New08, S. 212 ff.] verwiesen. Neben Anwendungsbeispielen sind auch hier verschiedene Prinzipien aufgeführt, die eine Variabilität der Raumakustik erlauben.

In der vorliegenden Arbeit wird dieser Mechanismus mit Lamellen in der Frontkonstruktion untersucht und ein Modell zur Veränderung der Absorptionseigenschaften entwickelt.

3.2. Anwendungsbeispiele in der Praxis

3.2.1. Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM)

Ein sehr bekanntes Beispiel bezüglich der Vielfältigkeit variabler Raumakustik ist das *Institut de Recherche et Coordination Acoustique / Musique (IRCAM)* in Paris (siehe Abbildung 3.8a). Die Einrichtung besitzt neben mehreren kleinen Aufnahmeräumen einen Hallraum sowie einen reflexionsarmen Raum.



(a) Espace de Projection



(b) geschlossener Zustand



(c) geöffneter Zustand

Abbildung 3.8.: Espace de Projection: Variable Raumakustik [Peu78]

Im Mehrzweckstudio, welches Platz für bis zu 400 Zuhörer bietet, kann die mittlere Nachhallzeit zwischen 0,8s und 4,5s verändert werden. Dies erreicht man durch drei voneinander getrennte, mechanisch verstellbare Deckensektionen, welche zusätzlich in der Höhe veränderbar sind.

Das Volumen variiert somit zwischen 1.200 m^3 und 5.000 m^3 [Peu78]. Zusätzlich dazu sind die Wand- und Deckenflächen mit rotierenden Wandelementen ausgekleidet, welche entweder reflektierend, absorbierend oder diffuse Wirkung auf das Schallfeld haben. Jedes Dreiersegment besitzt die Ausmaße von $2,33\text{ m} \times 2,33\text{ m}$ [B x H] und eine Tiefe von $0,63\text{ m}$.

3.2.2. Planet Roc Studio - Funkhaus Berlin

Das selbe Prinzip der Variabilität wurde bereits in den 50er Jahren im Hörspielsprecherstudio H1/2 im Funkhaus Berlin verbaut. 17 drehbare Säulen mit dreieckigem Grundriss, welche an den beiden Längssäulen des Raumes angeordnet sind sowie ein schwerer Vorhang erlauben eine Veränderung der Nachhallzeit von ca. $0,3\text{ s}$ bis $0,7\text{ s}$ im Frequenzbereich von etwa 500 Hz bis 5 kHz .

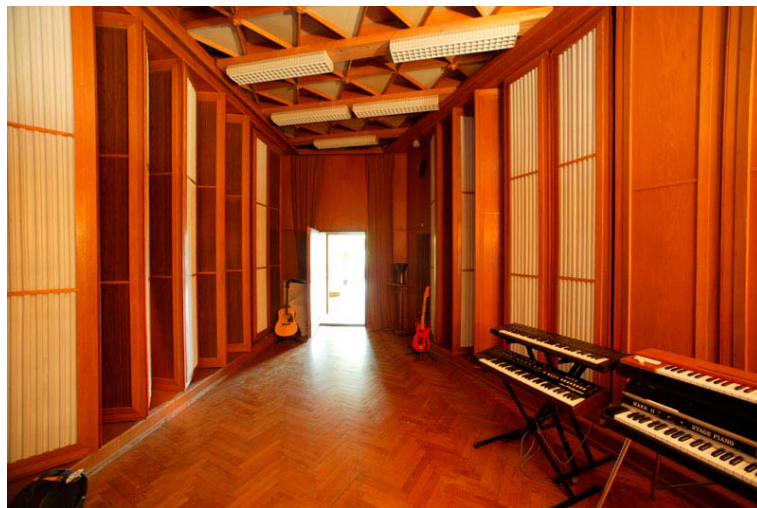


Abbildung 3.9.: Hörspielsprecherstudio H1/2 mit variabler Raumakustik [SH11]

Die prismenförmigen Körper besitzen unterschiedliche Materialaufbauten. Jede Seite wird für einen bestimmten Frequenzbereich optimiert, wobei jeweils eine Seite für Frequenzen unterhalb von 200 Hz , eine für mittlere Frequenzen von 500 Hz bis 2 kHz und eine für die Kombination von Mitten- und Höhenbereich ausgelegt ist ($500\text{ Hz} - 10\text{ kHz}$) [SH11].

3.2.3. Jugendkirche München

Die Jugendkirche in München-Haidhausen wurde im Rahmen aufwendiger Sanierungs- und Umbauarbeiten in eine Art „Mehrzweckkirche“ umgewandelt. Dabei war die Hauptaufgabe,

die bei Bestandsmessungen ermittelte Nachhallzeit von bis zu 9 s auf Werte zu senken, welche Musikaufführungen und Sprachdarbietungen, im Rahmen der üblichen Toleranzgrenzen (siehe [DIN04]), zulässt.

Neben zahlreichen Standardmaßnahmen wie großflächig gespannten Akustikmembranen, verschiedensten speziell abgestimmten Varianten von Plattenschwingern, ferner einer großen Anzahl von Breitbandabsorbern, wurde als variable Komponente ein Raffsystem mit Akustikvorhängen im Hauptschiff und in den beiden Seitenschiffen der Kirche installiert. Durch ein Touch-Pad gesteuert kann so die Nachhallzeit stark reduziert werden, dass trotz des gewaltigen Volumens Sprachveranstaltungen oder Konzerte mit ausreichender Sprachverständlichkeit und Durchsichtigkeit abgehalten werden können.

Als Ergebnis konnte die Nachhallzeit fast im kompletten Frequenzbereich auf die von der DIN 18041 [DIN04] geforderten Werte für Sprache und Musik verringert werden. In Abbildung 3.10 erkennt man deutlich, dass sich die Nachhallzeit durch Herunterlassen der Vorhänge ab ca. 160 Hz nahezu konstant um etwa 0,5 s reduzieren lässt.

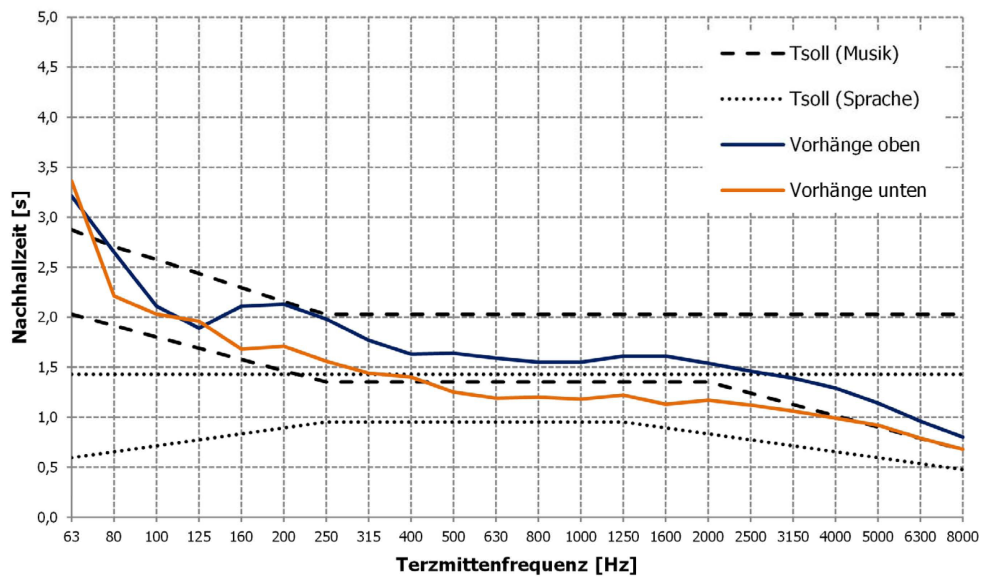


Abbildung 3.10.: Jugendkirche: Nachhallzeit beider Zustände und Toleranzfelder nach DIN 18041, concept-A GmbH

Der Verlauf wandert so ab 315 Hz in das Toleranzfeld für Sprache. Im tiefen Frequenzbereich weicht der Nachhallzeitverlauf allerdings von den Toleranzwerten ab. Zusätzliche Bedämpfungen für diese Frequenzen können Abhilfe schaffen, sind aber auf Grund verschie-



(a) Vorhänge unten



(b) Vorhänge oben

Abbildung 3.11.: Jugendkirche: Vorhänge, concept-A GmbH



Abbildung 3.12.: Jugendkirche: Seitenschiff - Vorhänge unten, concept-A GmbH

dener Bestimmungen bezüglich des Denkmalschutzes nicht möglich.

Die beiden Abbildungen 3.11a und 3.11b zeigen zwei mögliche Zustände der Akustikvorhänge. Im linken Teilbild sind alle Elemente oben und somit kaum akustisch wirksam hingegen im rechten Teilbild sind die Vorhänge fast komplett nach unten gefahren und bieten somit neben den beschriebenen akustischen Eigenschaften zusätzlich eine Verdunklung des Raumes. Abbildung 3.12 zeigt eines der beiden Seitenschiffe, welche ebenfalls durch fahrbare Vorhänge vom Hauptschiff optisch separiert werden können und durch diese Abtrennung zusätzlich zur Verringerung der Nachhallzeit beitragen.

3.2.4. Domchorprobensaal - Karmelitenkirche München

Das Prinzip des hier in der Arbeit entwickelten Elementes ist einem im Domchorprobensaal (DCPS) der Karmelitenkirche in München verbauten angelehnt. In einer Art Gewölbesaal, der dem ansässigen Domchor als Probensaal dient und für Gesangsunterricht und kleinere Kammermusikkonzerte verwendet wird, wurden unterschiedliche feste und variable Elemente installiert.

Der Raum besitzt auf beiden Stirnseiten einen vollflächigen Wandausbau. Zum Einsatz kommen hier, wie in Kapitel 3.1.6 beschrieben ist, zwei großflächig angeordnete Breitbandabsorber, die hinter mehreren, separat verstellbaren Lamellenfeldern angeordnet sind (siehe Abbildung 3.13). Die Nachhallzeit lässt sich auf diese Weise individuell für verschiedenste Einsatzzwecke variieren.



Abbildung 3.13.: Jalousie im DCPS, concept-A GmbH

Jedes Jalousiefeld, bestehend aus zehn Lamellen mit je 15 cm Breite, hat eine Ausdehnung von 1,5 m x 1,5 m [B x H]. Jede der insgesamt 200 Lamellen wurde, um störenden Reflexionen und Flatterechos zwischen den beiden Stirnseiten vorzubeugen, konvex ausgeführt, um ausreichende Diffusität des Schallfeldes auch in geschlossenem Zustand zu

gewährleisten. Die Felder der oberen Reihe besitzen auf Grund der Deckenwölbung eine dementsprechend angepasste Form und somit auch unterschiedliche Größen. Alles in allem ist der Raum so mit einer Fläche von gut 44 m^2 ausgestattet, die zur variablen Gestaltung der Raumakustik verwendet werden kann.

Damit auch tieffrequent ausreichend Absorption gewährleistet ist, wurden die Seitenkästen und wo möglich auch Sitzbänke mit absorbierenden Materialien ausgekleidet. Da die ursprüngliche Kuppelform des Saales eine stark bündelnde Richtwirkung und Fokussierung zur Raummitte hervorruft, wirkt dem ein diffus wirkendes Deckensegel entgegen (nicht auf den Abbildungen dargestellt).

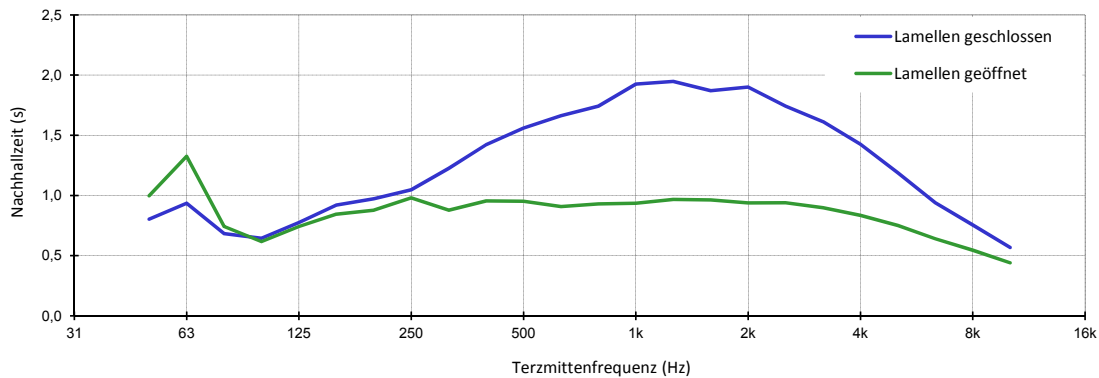


Abbildung 3.14.: Nachhallzeit im DCPS, concept-A GmbH

Abbildung 3.14 zeigt die Ergebnisse zweier Nachhallzeitmessungen. Die blaue Kurve (Legende: Lamellen geschlossen) entspricht der Nachhallzeit wenn alle Elemente geschlossen sind. Der grüne Verlauf (Legende: Lamellen geöffnet) ergibt sich bei komplett geschlossenen Fronten. Auf eine genauere Interpretation der Messergebnisse wird in Kapitel 4 eingegangen. Der maximal mögliche Unterschied beider Nachhallzeiten beträgt fast bis zu einer Sekunde im Bereich von 1 kHz bis 2 kHz.

Kapitel 4.

Untersuchung bestehender Elemente

Um einen Eindruck über die Wirkungsweise eines Schallabsorbers mit vorgesetzter Lamellenfront zu erhalten, wird im Rahmen dieser Arbeit eine bereits bestehende Konstruktion analysiert. Wie bereits im Abschnitt 3.1.6 und 3.2.4 erwähnt wird, ist im Domchorproben-saal der Karmelitenkirche in München das Prinzip der „Verstellbaren Jalousie“ umgesetzt. Je nach Stellung der einzelnen Lamellenfelder kann die akustisch wirksame Oberfläche vergrößert bzw. verkleinert werden, was eine Variation der Nachhallzeit ermöglicht.

Da die Untersuchung und die damit gewonnenen Erkenntnisse dieser Elemente als Basis für den in dieser Arbeit entwickelten variablen Absorber dienen, ist die Wirksamkeit sowie die möglichen auftretenden akustischen Effekte zwischen den Zuständen des geschlossenen Elementes und dem komplett geöffneten Element von außerordentlichem Interesse.

4.1. Messaufbau

Da der DCPS eine Art Gewölbedecke aufweist, ist die Berechnung des tatsächlichen Volumens erheblich erschwert. Aus diesem Grund wird als Grundlage für eine raumakustische Simulation des Raumes mit der Simulationssoftware AFMG EASE ein 3D-Modell des Raumes mit der Software Autodesk Inventor 2011 erstellt (siehe Abbildung 4.1).

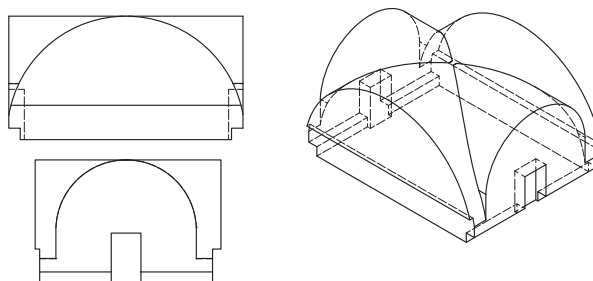


Abbildung 4.1.: Modell des Raumes (DCPS)

Aus der Konstruktion errechnet sich ein Volumen von $391,56 \text{ m}^3$ und eine Gesamtoberfläche von $341,03 \text{ m}^2$. Das in Kapitel 3.2.4 erwähnte Deckensegel konnte aus Gründen der technischen Vereinfachung nicht berücksichtigt werden.

In Abbildung 4.2 ist der Grundriss dieses Raumes dargestellt. Die beiden schraffierten Flächen stellen die Längsseiten des Raumes dar, deren Ausführung aus einer grossflächigen, ca. 1,5 m hohen Wandschrankkonstruktion besteht. Um den Einfluss dieser beiden reflektierenden Flächen auf das dazwischenliegende Schallfeld, beispielsweise durch möglicherweise entstehende Flatterechos zu verringern, wird die Höhe aller Mikrofonpositionen bewusst nicht auf 1,20 m, wie es die DIN 3382 fordert, positioniert, sondern alle Messungen mit einer Höhe von 2,40 m durchgeführt. Nur so kann das eigentlich interessierende Schallfeld zwischen den beiden Absorberfeldern untersucht werden.

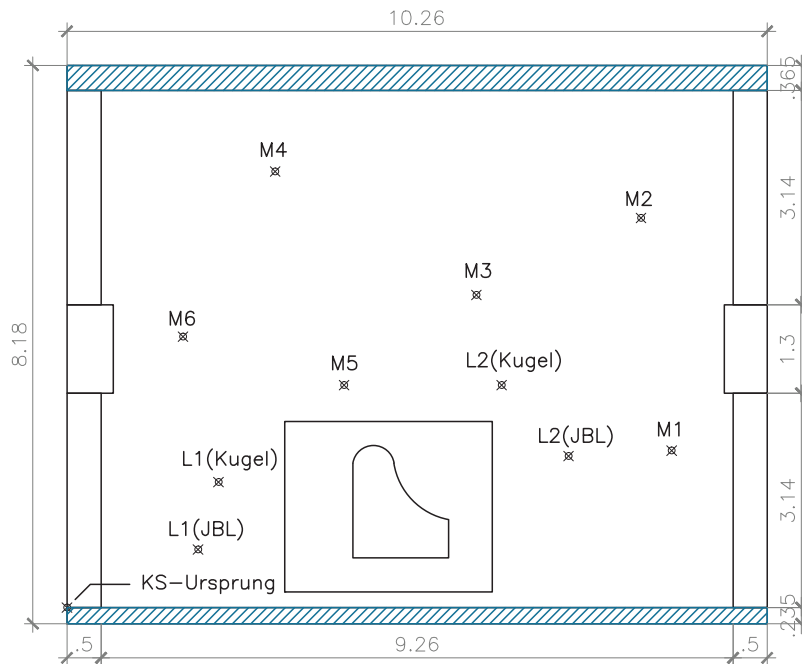


Abbildung 4.2.: Messpositionen im DCPS

	Mikrofonpositionen [m]						Lautsprecherpositionen [m]			
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	L1(Kugel)	L1(JBL)	L2(Kugel)	L2(JBL)
x	8,86	8,41	6,00	3,05	4,05	1,70	2,22	1,92	6,37	7,35
y	2,30	5,71	4,58	6,39	3,26	3,97	1,84	0,85	3,26	2,22
z	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,40	2,02	1,67	2,02	1,67

Tabelle 4.1.: Mikrofon- und Lautsprecherpositionen im DCPS

Die beiden gegenüberliegenden Absorberflächen sind gleich groß und bilden zusammen eine verstellbare Fläche von insgesamt $44,66 \text{ m}^2$. Die LK und der dahinterliegende Breitbandabsorber haben jeweils eine Bautiefe von ca. 20 cm. Das Absorbermaterial besteht aus einer Kombination aus Mineralfaserwolle (MFW) und offenporigem Schaumstoff (OPS). Jede der beiden Absorberflächen besteht aus insgesamt zehn Teilflächen, welche wiederum mit zehn jeweils 15 cm breiten Lamellen bestückt sind (siehe Abbildung 4.3). Dabei lassen sich diese zehn Teilflächen jeweils als Ganzes drehen.



Abbildung 4.3.: Komplettes Messsetup im DCPS

Der DIN 3382 [DIN00] ist ebenso zu entnehmen, dass besonders auf die Position der Mikrofone und der Schallquellen zu achten ist. Die Mikrofon- und Lautsprecherpositionen sind in Tabelle 4.1 auf ein eingeführtes Koordinatensystem (Ursprung: [KS-Ursprung] siehe Grafik 4.2 links unten) bezogen.

Um das komplette Schallfeld des Raumes zu erfassen, wurden die Messpositionen zufällig platziert, aber unter Berücksichtigung der von DIN 3382 [DIN00, S. 6] vorgeschriebenen Richtwerte. So wird einerseits der Mindestabstand der Mikrofonpositionen untereinander von einer halben Wellenlänge bzw. mindestens 2 m, die Abstände zu den nächstgelegenen, reflektierenden Oberflächen sowie zu den Seitenwänden und Fußböden von mindestens einer viertel Wellenlänge ($\sim 1 \text{ m}$) eingehalten. Da die Schallquellen im Raum dort positioniert werden, wo sich üblicherweise auch die Instrumentalisten bzw. Sänger befinden, können in einzelnen Fällen die Mindestwerte für die Abstände zwischen Quelle und Empfänger für die Positionen M1 und M3 nicht eingehalten werden.

Die jeweiligen Minimalabstände d_{min} [m] lassen sich, abhängig vom Volumen V [m³] des Raumes, einem Schätzwert der zu erwartenden Nachhallzeit T [s] und der Schallgeschwindigkeit c [m/s] wie folgt berechnen:

$$d_{min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}}. \quad (4.1)$$

4.2. Messung der Nachhallzeit

Die Nachhallzeitmessung wird in diesem Setup mit zwei verschiedenen Quellpositionen und sechs Empfängerpositionen durchgeführt. Um auch im tieffrequenten Bereich Aussagen über die Wirkungsweise der Akustikelemente treffen zu können, wird zusätzlich zum verwendeten Dodekaeder von Brüel & Kjær die komplette Messreihe mit einem Aktivlautsprecher vom Typ JBL EON15 G2 durchgeführt. Dieser verfügt, gerade bei tieferen Frequenzen, über mehr Leistung, sodass der Raum auch hier mit genug Energie angeregt werden kann. Es werden anschließend die Messreihen und deren Auswertungen beider Lautsprecher miteinander verglichen.

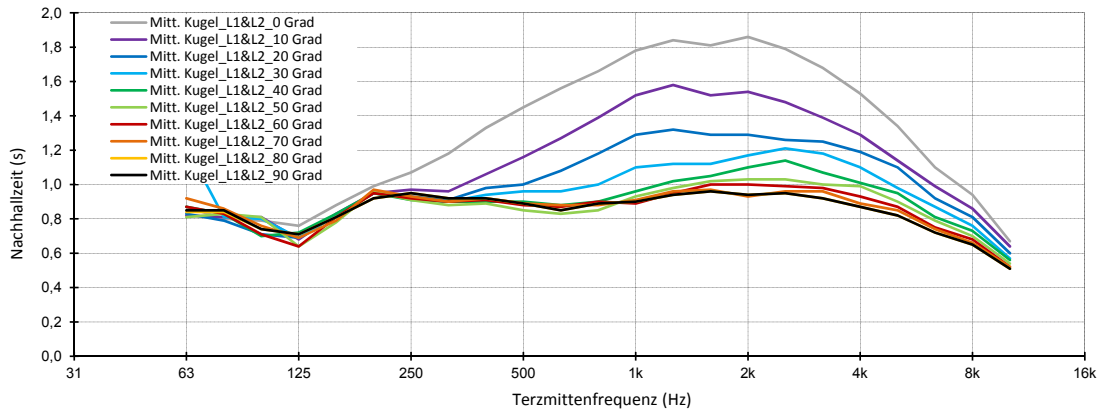
Für eine komplette Auflistung aller verwendeten Messinstrumente siehe Tabelle 4.2.

Lautsprecher 1	Brüel & Kjær Type 4292 Light OmniPower
Lautsprecher 2	JBL EON15 G2
Verstärker	Brüel & Kjær Type 2716-C
Mikrofon	Brüel & Kjær 4007
Audiointerface	RME Fireface 400
Messsoftware	AFMG EASERA
Messsignal	Max. Length Sequence (MLS), $d = 5,5$ s, $f_s = 48,0$ kHz

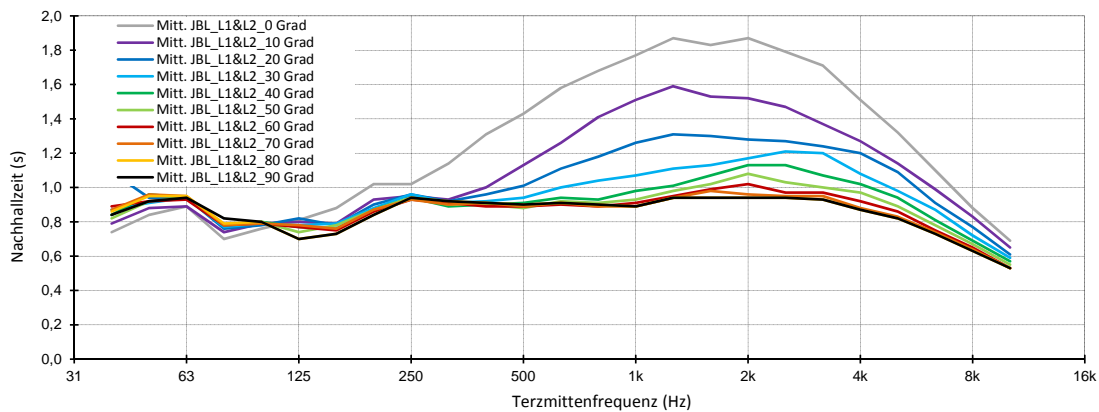
Tabelle 4.2.: Messequipment im DCPS

Um den Einfluss der Lamellenstellung auf die Nachhallzeit sowie den daraus ermittelten Absorptionsgrad zu bestimmen, kann mit Hilfe einer Schablone (siehe Abbildung im Anhang A.1) jedes Lamellenfeld in 10 Grad Schritten, beginnend vom geschlossenen Zustand (0 Grad), bis hin zum komplett geöffneten Zustand (90 Grad) eingestellt und vermessen werden. Es ergeben sich auf diesem Weg somit insgesamt zehn verschiedene Jalousiestellungen mit jeweils zwölf Messungen pro Lautsprecher (siehe Anhang A.2).

Die Nachhallzeit des Raumes, gemittelt über alle sechs Mikrofon- und beide Lautsprecherpositionen, ist in den Abbildungen 4.4a und 4.4b zu sehen. Erstere zeigt die Nachhallzeitmessung mit dem bereits erwähnten Kugellautsprecher (Kugel). Die zweite bildet



(a) Kugel



(b) JBL

Abbildung 4.4.: Nachhallzeit aller Zustände im DCPS

die Messergebnisse mit dem Aktivlautsprecher von JBL ab. Man erkennt, dass sich im Frequenzbereich von 125 Hz bis 8 kHz keine wesentlichen Unterschiede zwischen diesen beiden Lautsprechern bemerkbar machen. Da die Auswertung der Frequenzen unterhalb von 100 Hz seitens der Messsoftware EASERA begrenzt ist, kam hierfür ein firmeninternes MATLAB-Tool zum Einsatz. Dieses ermöglicht eine Berechnung der Terzmittenfrequenzen von 25 Hz bis 100 Hz. Auf diese Weise kann auch der Frequenzbereich ausgewertet werden, in dem der JBL-Lautsprecher im Gegensatz zur Kugel noch ausreichend Energie zur Verfügung stellt. Vergleicht man die Messdaten beider Lautsprecher in diesem Frequenzbereich (siehe Anhang B), so zeigt sich, dass beim Kugellautsprecher unterhalb von 63 Hz sehr viele „Messdatenausreißer“ vorhanden sind. Dahingegen war eine Auswertung der JBL-Daten noch für etwa zwei weitere Terzbänder möglich.

4.2.1. Auswertung der Messdaten

Um auch die Ausreißer im restlichen Frequenzbereich oberhalb von 63 Hz sichtbar zu machen, werden zuerst für jeden Messdurchgang Medianwerte und im Anschluss für jeden einzelnen Messwert seine prozentuale Abweichung vom zugehörigen Medianwert berechnet. Das Konfidenzintervall liegt im Bereich zwischen $+0.90$ und -0.90 . Liegen die Daten außerhalb dieses Bereichs, werden sie als Ausreißer deklariert. Die entsprechenden Werte werden in einem Excel-Sheet analysiert, farblich markiert und ausgeschlossen. Nach erfolgter Korrektur der Messdaten werden pro Messreihe alle Messpositionen arithmetisch gemittelt. Alle Ergebnisse sowie die berechneten Messfehler sind im Anhang B zu finden.

Beiden Grafiken ist zu entnehmen, dass durch gezieltes Einstellen der Lamellenfelder die Nachhallzeit beträchtlich beeinflusst wird. Im Bereich zwischen 1 kHz und 2 kHz sind Unterschiede von bis zu einer Sekunde möglich. Darunter und darüber fällt der maximal mögliche Unterschied auf 0,2 s bis 0,3 s im Bereich von 250 Hz bis 8 kHz ab. Im komplett geöffneten Zustand (90 Grad Stellung) wird ein sehr linearer Verlauf der Nachhallzeit erreicht. Ebenso lässt sich, wie erwartet, ein Anstieg der Nachhallzeit beim Schließen der Lamellen im Bereich von 40 Hz bis 125 Hz erkennen. Durch das näherungsweise Verhalten der geschlossenen Lamellenfelder, ähnlich dem eines Resonanzabsorbers (siehe Kapitel 3.1.4), wird im geschlossenen Zustand eine höhere Absorption im tieffrequenten Bereich erzielt, was letztendlich eine geringere Nachhallzeit zur Folge hat. Gegensätzliches Verhalten zeigt sich bei einer kompletten Öffnung der Jalousien. Der „Resonanzeffekt“ verschwindet, die Absorption sinkt und es folgt eine Erhöhung der Nachhallzeit von etwa 0,1 s bis 0,2 s im Bereich von 40 Hz und 100 Hz.

4.3. Bestimmung des Absorptionsgrades

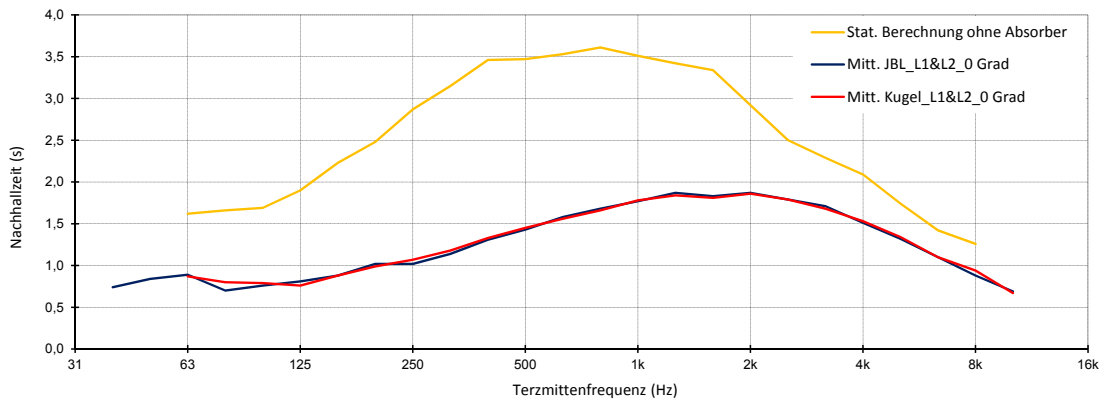
4.3.1. Herleitung der Ausgangsnachhallzeit T_0

Um Aussagen über die akustischen Eigenschaften eines Absorbers treffen zu können, ist die Kenntnis über dessen Absorptionsgrad notwendig. Besitzt man Informationen über das Raumvolumen, die äquivalente Absorptionsfläche des Raumes sowie die vorherrschende Nachhallzeit vor und nach dem Einbringen des Absorptionsmaterials, so lässt sich aus der ermittelten Nachhallzeit der Absorptionsgrad heraus rechnen.

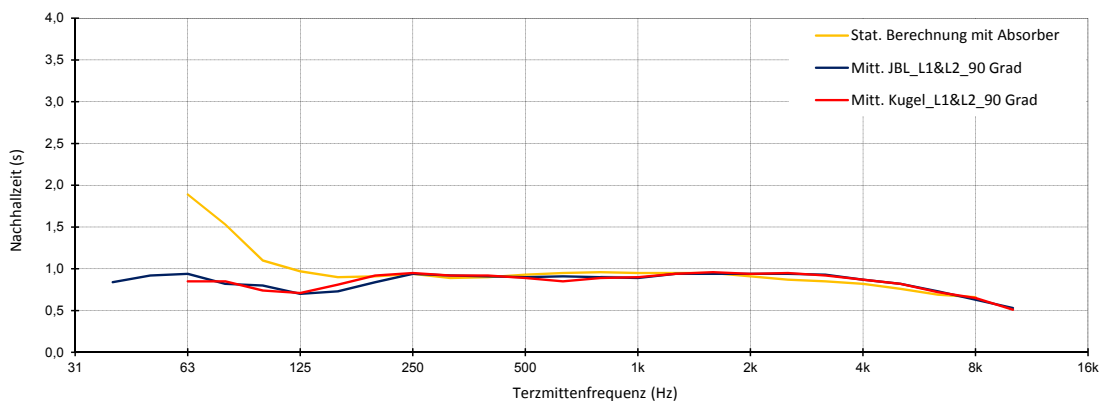
Die berechneten Absorptionsgrade sind wie zu erwarten mit relativ großen Unsicherheiten behaftet. Da leider keine Bestandsmessungen des Raumes komplett ohne Raumakustik vorhanden sind, wird für eine korrekte Berechnungsgrundlage des Ausgangszustandes T_0 (Zustand ohne Absorber), eine statistische Nachhallzeitberechnung sowie eine raumaku-

tische Simulation des Raumes zur weitestgehend realistischen Annäherung herangezogen. Dadurch kann nur eine grobe Aussage über den etwaigen Verlauf der zu erwartenden Absorptionsgrade der Elemente getroffen werden. Die verwendeten Materialien sowie deren Absorptionseigenschaften wurden, soweit es ging dem realen Raum angepasst.

Zum Einsatz kommen ein ebenso firmeninternes, auf Microsoft Excel basiertes, statistisches Berechnungsprogramm und AFMG EASE. Natürlich stellen die dargestellten Ergebnisse nur Richtwerte dar und sollen lediglich als Anhaltspunkt dafür dienen, wie sich die Absorptionseigenschaften solcher Konstruktionen verhalten und welche Veränderungen durch diese möglich sind.



(a) ohne Absorber



(b) mit Absorber

Abbildung 4.5.: Vergleich zwischen gemessener und berechneter Nachhallzeit im DCPS

In Abbildung 4.5a weicht die statistisch berechnete Nachhallzeit des Raumes stark von der gemessenen Nachhallzeit mit Stellung 0 Grad ab. Begründung dafür ist, dass bei der Berechnung das NICHT-Vorhandensein aller Absorber zugrunde gelegt wird, während bei

geschlossenem Zustand der Konstruktion die Bauteile immer noch im Raum vorhanden sind und eine energieentziehende Wirkung auf das Schallfeld haben. Zur Kontrolle wird derselbe Raum sowohl mit als auch ohne Absorberlemente gerechnet.

Um das Ergebnis der statistischen Berechnung zu überprüfen, wird ein Modell des Raumes mit EASE erstellt (siehe Abbildungen 4.6 & 4.7) und mit verschiedenen geometrischen Simulationsverfahren die Nachhallzeit bestimmt. Auch hier wird sowohl der Zustand des leeren Raumes als auch der mit Elementen ausgestattete Zustand berücksichtigt.

Die Ergebnisse für die Nachhallzeit im geöffneten Zustand sind sich ab ca. 250 Hz sehr ähnlich (siehe Abbildung 4.5b). Die leichten Abweichungen ab ca. 1,5 kHz können vernachlässigt werden, weil sie sich ohnehin nur gering auf die daraus resultierenden Ergebnisse auswirken. Zur besseren Vergleichbarkeit werden beide Grafiken mit der selben Y-Achsenkalierung versehen.

Diese Ergebnisse fungieren als ausreichend realistische Berechnungsgrundlage. Die auf dieser Grundlage basierenden herausgerechneten Absorptionsgrade entsprechen den Ausgangsvermutungen. Alle aufgeführten Absorptionsgrade beruhen letztendlich auf den aus der statistischen Simulation gewonnenen Nachhallzeiten für den Zustand, bei dem die Absorber nicht im Raum vorhanden sind. Die entsprechenden Werte sind tabellarisch im Anhang (siehe C.1) einzusehen. Es ist dort ebenso der Vergleich der verschiedenen Simulationsverfahren in grafischer Form dargestellt (siehe C.2).

4.3.2. Berechnung des Absorptionsgrades der Messergebnisse nach EYRING

Im Grundlagenkapitel 2.4.1 wurden bereits die unterschiedlichen Varianten zur Berechnung des Absorptionsgrades beschrieben. Exemplarisch ist eine Auswertung der Messdaten für die 90 Grad Stellung dargestellt (siehe Abbildungen 4.8a & 4.8b). Die dazugehörigen Berechnungsergebnisse sind in Form einer Tabelle im Anhang D.3 zu finden.

Im Allgemeinen erhält man unter Vernachlässigung von Luftabsorption und Kanteneffekten die besten Ergebnisse durch Anwendung der Eyring'schen Formel [Pow70]. Wie in der Theorie erwähnt, sieht man in den einzelnen Auswertungsergebnissen, grafisch in den Abbildungen 4.8a & 4.8b dargestellt, die charakteristischen Abweichungen der einzelnen Berechnungsmethoden.

Der Verlauf nach Norm und der Ansatz nach Eyring ähneln sich über den kompletten Frequenzbereich am ehesten, während die Ergebnisse für Millington/Sette durchweg niedrigere Absorptionsgrade liefern. Es ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse im Bereich von ca. 125 Hz bis 1 kHz physikalisch nicht realistisch sind. Da bei der Vermessung des DCPS

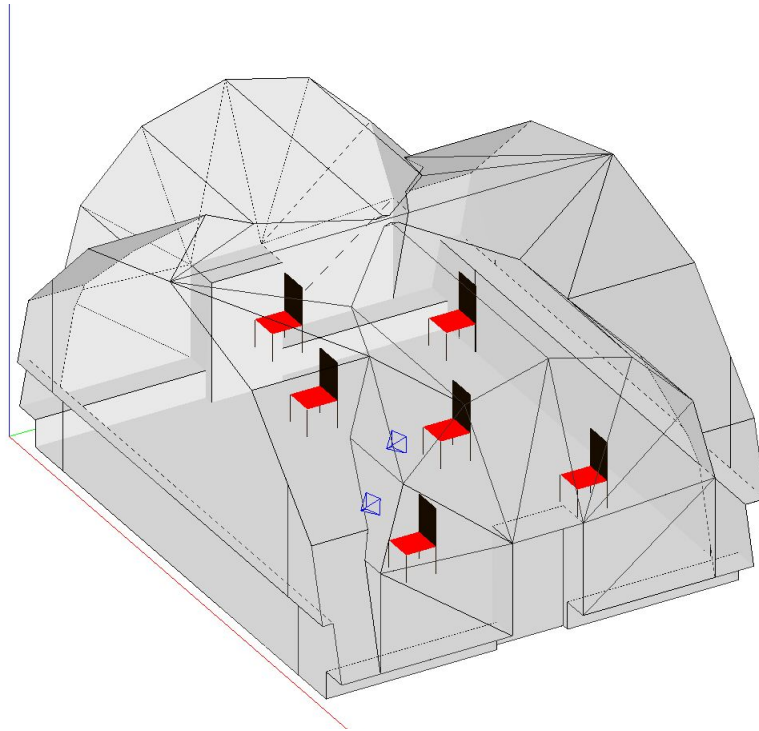


Abbildung 4.6.: Modell des Raumes (DCPS)

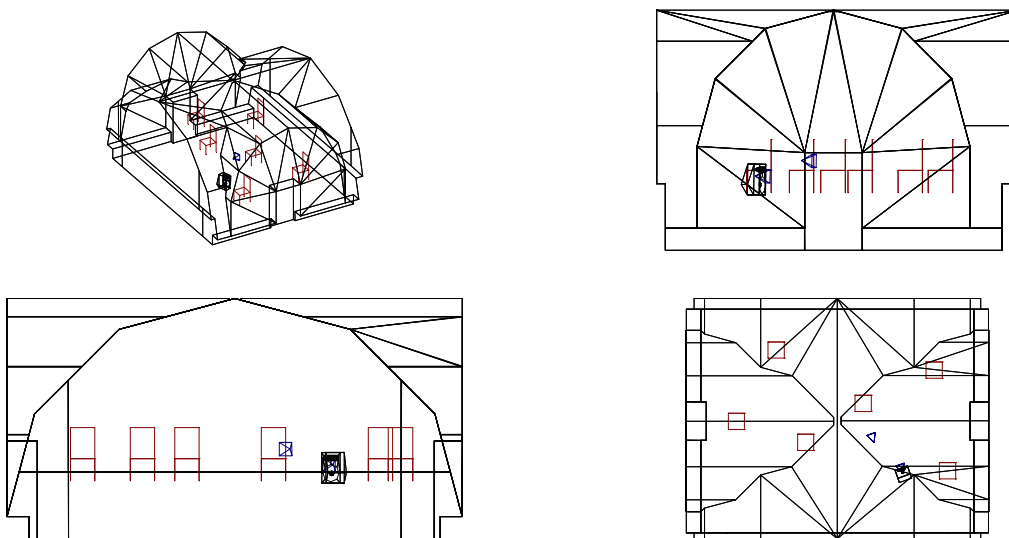
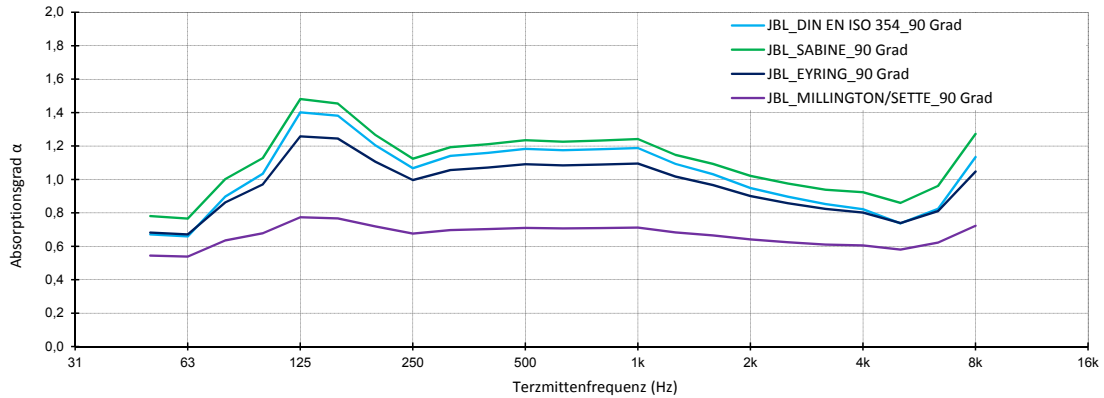
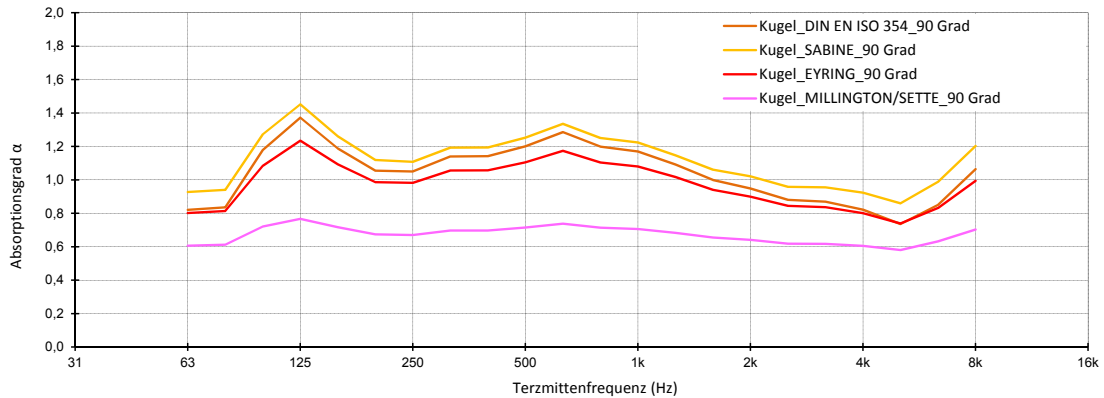


Abbildung 4.7.: Modell des Raumes (DCPS)



(a) JBL



(b) Kugel

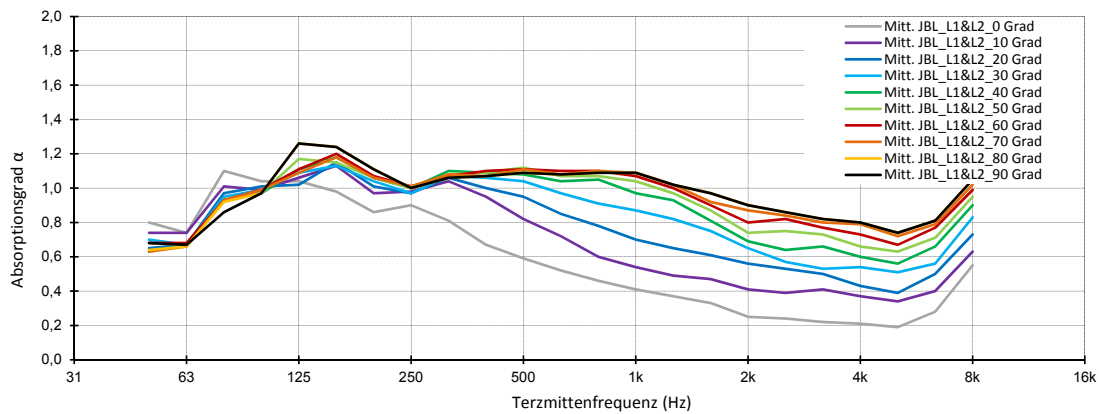
Abbildung 4.8.: Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden

weder mit sehr niedrigen Absorptionswerten gerechnet werden kann und es sich auch nicht um einen Raum mit nur einer hoch-absorbierenden Fläche handelt, werden alle folgenden Auswertungen ausschließlich mit der Formel nach Eyring durchgeführt.

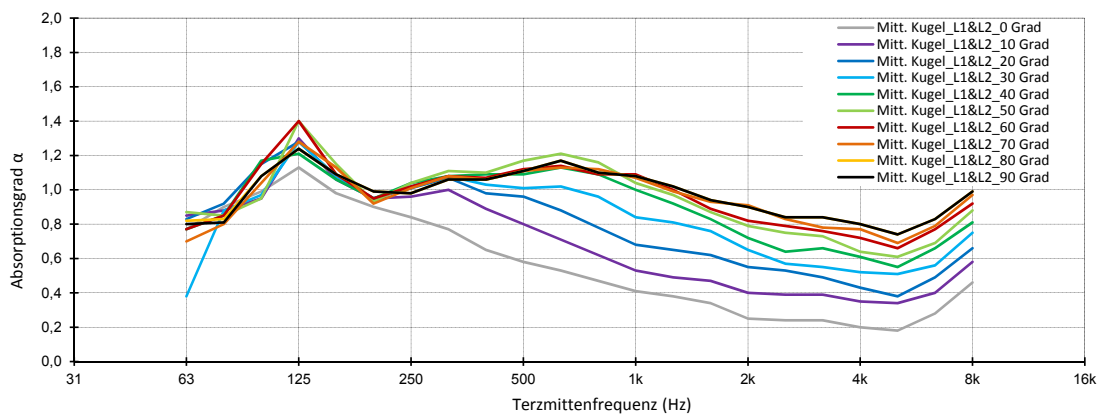
Die insgesamt recht hohen Werte rühren wahrscheinlich von den aus der Simulation des leeren Raumes entstandenen Ungenauigkeiten. Da sich bei der statistischen Berechnung der Nachhallzeit des Raumes für den Fall des NICHT-Vorhandenseins der beiden Absorberflächen auch schon leichte Abweichungen von der Realität sehr stark in der darauf basierenden Herausrechnung der Absorptionsgrade auswirken, darf diesen Werten keine zu hohe Aufmerksamkeit geschenkt werden.

In diesem Fall könnte dies eine evtl. zu hoch angesetzte Nachhallzeit im entsprechenden Frequenzbereich sein. Die gewonnenen Daten und der Verlauf der Ergebnisse über den Frequenzbereich sind hier dargestellt und dienen als Anhaltspunkt für den Entwurf des neuen Elementes (siehe Kapitel 5).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass trotz gewisser Messungenauigkeiten der Gesamtverlauf den Erwartungen entspricht. Bei allen Messungen ist eine deutliche Veränderung der Absorption hin zu hohen Frequenzen erkennbar. Die beiden Abbildungen 4.9a & 4.9b zeigen eine schrittweise Absenkung der Absorption, umso mehr die Lamellenkonstruktion vor den beiden Absorbern geschlossen wird. Zu Beginn fallen die Unterschiede zwischen den einzelnen 10 Grad Schritten noch sehr stark aus.



(a) JBL



(b) Kugel

Abbildung 4.9.: Berechneter Absorptionsgrad aller Zustände im DCPS

Dieser Effekt verringert sich, umso mehr die Lamellenfelder geöffnet werden, bis sich schließlich ein gleichmäßiger Verlauf über den kompletten Frequenzbereich einstellt. Auffällig ist die deutliche Zunahme der Absorption im tiefen Frequenzbereich knapp unterhalb von 125 Hz. Es sind durch dieses „resonanzähnliche Verhalten“, ähnlich dem eines Plattenschwingers, bei geschlossenem Zustand der Konstruktion Erhöhungen von bis zu $0,2\alpha$ möglich. Leider ist eine Auswertung noch tieferer Frequenzen seitens des Messsetups begrenzt.

Abhilfe könnte hier eine Messung mittels Subwoofer schaffen.

Im Ganzen betrachtet kann gesagt werden, dass durch Einsatz verschiedenster Simulationsverfahren die Arbeitsweise solcher Elemente untersucht werden und auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse eine Grundlage für den Entwurf eines nach diesem Prinzip arbeitenden Absorbers geschaffen werden kann.

Kapitel 5.

Modellentwurf - variabler Absorber

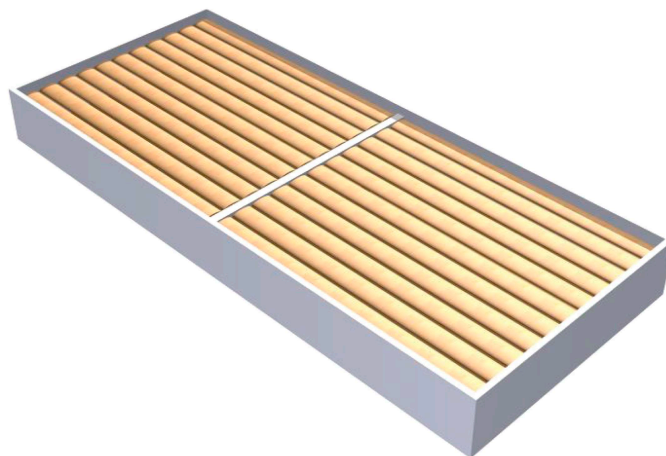
In diesem Kapitel wird der Entwicklungsprozess und Entwurf eines variablen Absorbers beschrieben. Dabei fließen in den Entwurf sowohl Erkenntnisse aus vorangegangenen Messungen bestehender Elemente als auch eine zuvor durchgeführte Simulation der letztendlich verwendeten Materialien ein. Zu diesem Zweck wird vorangehend der vorläufig geplante Aufbau des Absorbers mit allen in Frage kommenden Materialien sowie den entsprechenden Schichtdicken mit einem Simulationsmodell (AFMG SoundFlow) berechnet, bevor schlussendlich ein tatsächliches Querschnitt-Modell des finalen Elementes im Impedanzrohr vermessen und mit der Simulation verglichen wird.

5.1. Entwurf

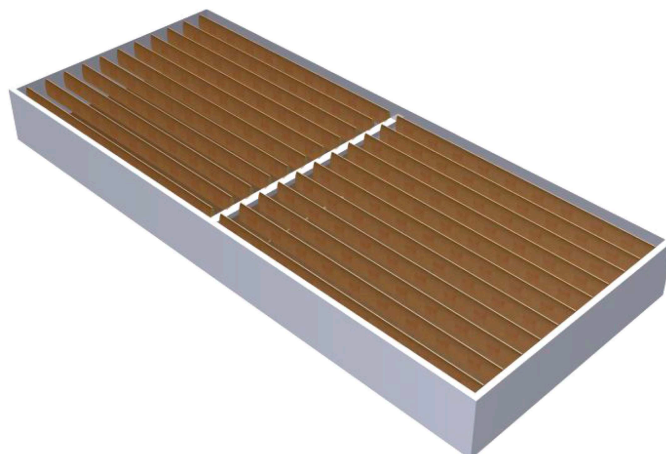
Ziel beim Bau dieses Absorbers mit variabler Absorptionseigenschaft ist es, das entstehende Element in die bereits vorhandene Produktpalette der Firma concept-A GmbH so weit wie möglich einzugliedern. Diese beinhaltet bereits ein breites Spektrum verschiedenster akustisch wirksamer Elemente. Zu den Hauptkomponenten zählen neben Breitbandabsorbern, Breitbandresonanzabsorbern und Resonanzabsorbern auch akustische Stellwände und Diffusoren.

Das in dieser Arbeit entwickelte Element wird deshalb und aus Gründen der vereinfachten Portabilität, auf ein Maß von 75 cm x 175 cm [B x H] angesetzt. Neben einer intuitiven Bedienbarkeit sollte auch eine spätere Kombination mit oben genannten Akustikelemente beispielsweise für vollflächige Ausbauten eines Raumes durchführbar sein. Zu diesem Zweck wird die Bautiefe auf insgesamt 18 cm begrenzt. Ein nicht unwesentlicher Teil der verfügbaren Bautiefe wird von der frontalen LK eingenommen.

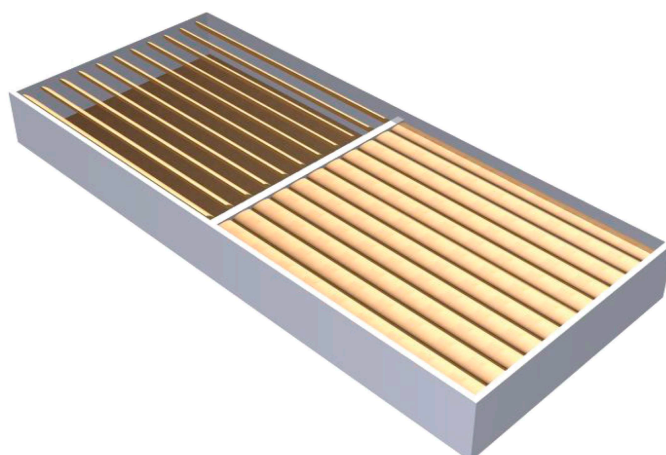
Sowohl aus akustischen als auch aus ästhetischen Gründen fällt die Wahl auf eine elypsenförmige Lamelle, welche neben einer deutlich hochwertigeren Anmutung als eine rechteckig geschnittene Lamelle auch den Vorteil hat, dass durch die abgerundete Oberfläche an-



(a) geschlossener Zustand, 0 Grad



(b) geöffneter Zustand, 90 Grad



(c) variierter Zustand, 135 Grad/0 Grad

Abbildung 5.1.: Modell des Absorbers

kommende Schallwellen leicht diffus reflektiert werden. Somit kann störenden Flatterechos, auch bei einem komplett geschlossenen Element entgegengewirkt werden. Aus den konstruktiven Rahmenbedingungen wird die Frontkonstruktion auf zwei Teilflächen aufgeteilt, welche sich unabhängig voneinander einstellen lassen. Jede der beiden Teilflächen besteht aus insgesamt elf Lamellen die untereinander mit einer Metallschiene verbunden sind, mit der eine Drehung des kompletten Feldes ermöglicht wird. Ein grafisches Modell des Absorbers ist in der Abbildung 5.1 dargestellt.

Das Element ist so konstruiert, dass im Zustand einer kompletten Öffnung beider Jalousien (siehe Abbildung 5.1b) alle Lamellen innerhalb des umlaufenden Gehäuserahmens noch leicht versenkt sind. Es ergibt sich dadurch eine plane Oberfläche, welche sich gut in großflächige oder akustisch voll ausgebaute Räume eingliedern lässt. An die Bedürfnisse der jeweiligen Nutzung angepasst, lassen sich die Felder untereinander beliebig einstellen. In Abbildung 5.1c ist die maximal mögliche Drehung der Lamellen von 135° abgebildet. Je nach Räumlichkeit und Ausrichtung des Elementes beim Einbau lassen sich so gezielt Reflexionen beeinflussen.

5.2. Berechnung mit AFMG SoundFlow

Bedingt durch die begrenzte Bautiefe und durch die Holzkonstruktion, bestehend aus den insgesamt 22 Lamellen und dem Querverbindungssteg, ist der noch verbleibende Platz für schallschluckende Materialien begrenzt. Mit Hilfe der Simulationssoftware AFMG SoundFlow werden die in Frage kommenden Kombinationen schallabsorbierender Materialien untersucht.

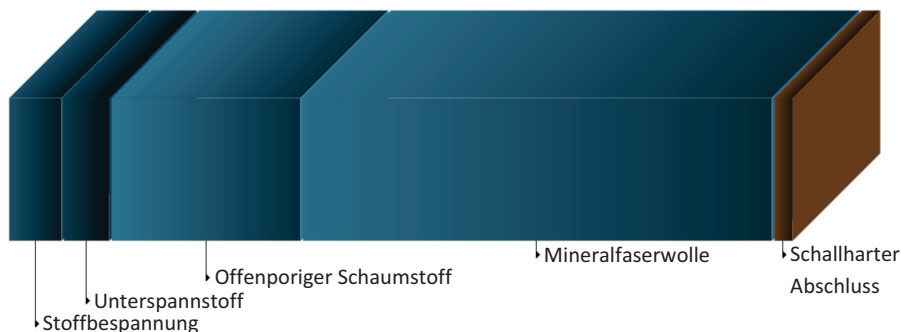
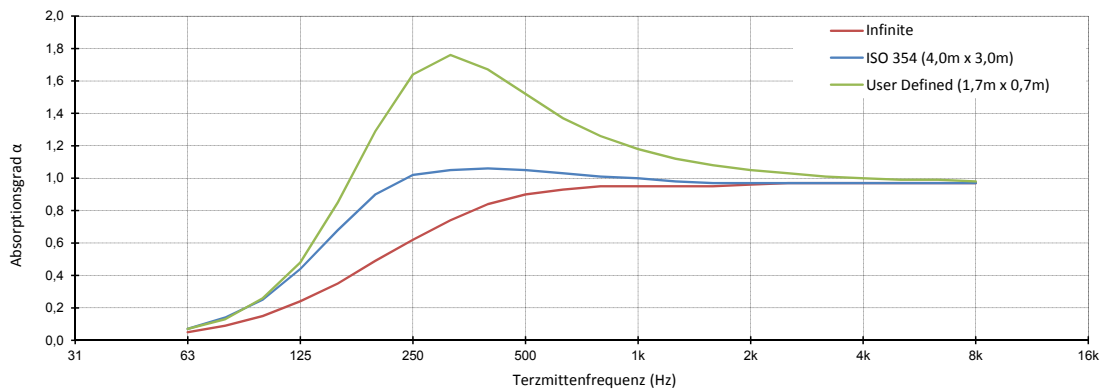


Abbildung 5.2.: Absorberaufbau

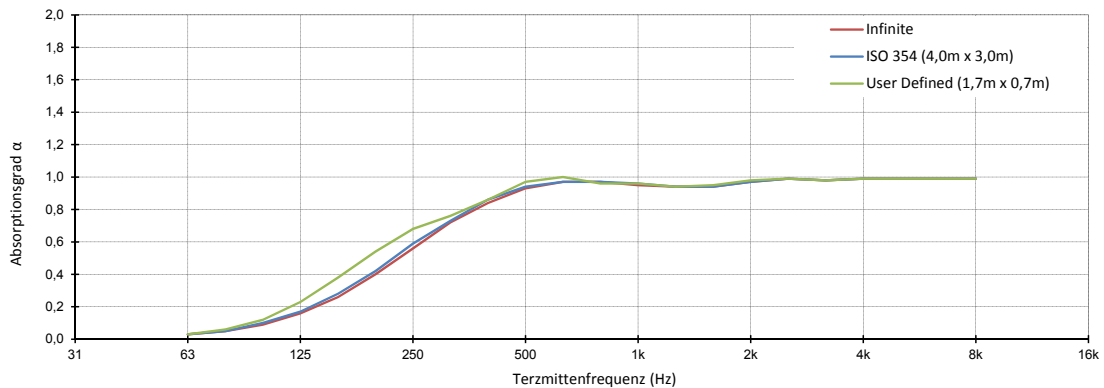
Nach Analyse mehrschichtiger Absorberaufbauten mit diversen Materialien und entsprechenden Materialparametern ergibt sich für das finale Element der in Abbildung 5.2 gezeig-

te Aufbau. Dieser besteht aus einem vierschichtigen Aufbau. Von hinten beginnend kommt zuerst ein Schicht aus MFW, gefolgt von OPS und einem darüber liegenden Unterspannstoff. Den Abschluss bildet ein akustisch transparenter Überspannstoff.

Das somit als Breitbandabsorber fungierende Element besitzt das in den Grafiken 5.3a & 5.3b gezeigte Absorptionsvermögen. Dabei ist zu beachten, dass für alle Berechnungen ein schallharter Abschluss angenommen wird.



(a) Diffusfeld



(b) Senkrechter Schalleinfall

Abbildung 5.3.: Simulation des Absorptionsgrades

Abbildung 5.3a beschreibt die Ergebnisse des Absorptionsgrades bei Simulation mit diffusum Schallfeld, Abbildung 5.3b hingegen mit senkrechtem Schalleinfall (0° Grad). Für beide Fälle werden hier die Ergebnisse der drei von AFMG SoundFlow zur Verfügung stehenden Berechnungsvarianten der berücksichtigten Fläche angegeben. Neben der Möglichkeit den Absorptionsgrad einer unendlich ausgedehnten Fläche zu berechnen, wird hier ebenfalls die nach DIN EN ISO 354 vorgeschlagene Fläche von ca. 12 m^2 im Hallraum

und die beim Absorbermodell tatsächlich existierende Fläche von 0,7 m x 1,7 m [B x H] verwendet (die Eingabe benutzerdefinierter Größen ist seitens der Software auf Dezimalwerte begrenzt). Resultat sind drei sehr unterschiedlich verlaufende Absorptionsgrade. Der bei der Diffusfeldberechnung auftretende, physikalisch viel zu hohe Wert bei benutzerdefinierter Eingabe der Materialgrößen ist den in Kapitel 2.5.1 bereits angesprochenen Kanteneffekten geschuldet.

Die in der Grafik 5.3b dargestellten Ergebnisse zeigen für alle drei Flächenbedingungen einen sehr ähnlichen Verlauf. Beginnend bei 125 Hz steigt der Absorptionsgrad stetig an, bis dieser sein Maximum bei ca. 500 Hz erreicht und konstant bleibt. Die Berechnungsergebnisse der gezeigten Verläufe sind vollständig in Form einer Tabelle im Anhang (siehe E.1a) zu finden.

Zu beachten ist, dass die dargestellten Absorptionsgrade ausschließlich für den Aufbau des Absorbers ohne LK gültig sind. Wie deren Einfluss berücksichtigt wird, ist in Kapitel 5.3.3 beschrieben.

5.3. Impedanzrohrmessung

Für die Untersuchung der Absorptionsgrade kommt ein in der Firma concept-A GmbH entwickeltes Impedanzrohr (IR) zum Einsatz. Neben dem Einfluss der Lamellendrehung auf den Absorptionsgrad soll das akustische Verhalten der verwendeten Materialien untersucht werden. Um die Stellung der Lamellen zu untersuchen wird ein Miniaturmodell der Jalousiekonstruktion gebaut, welches ebenso wie das Original eine Drehung der Lamellen in 10 Grad Schritten erlaubt.

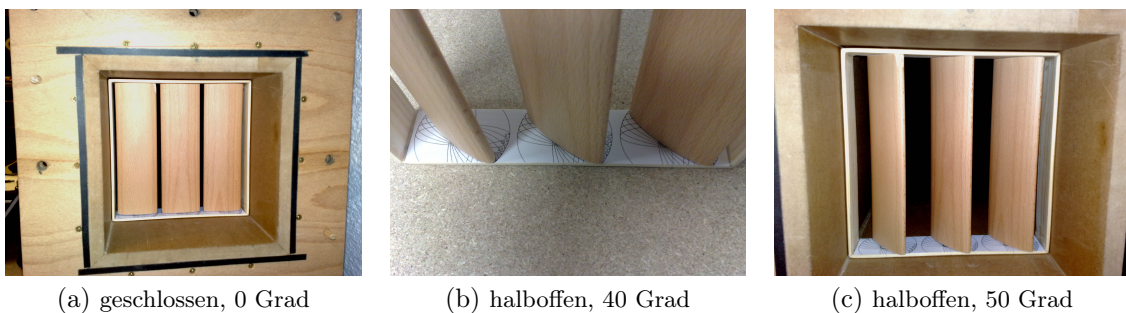


Abbildung 5.4.: Impedanzrohrmessung, Modell der Lamellenkonstruktion

In Abbildung 5.4 ist dieses Modell in einer beispielhaften Anordnung dargestellt. Die beiden Fotos (a) und (c) zeigen den Einsatz im IR. In der Darstellung (b) sind die möglichen Winkeleinstellungen für die später durchgeführte Messreihe veranschaulicht.

5.3.1. Messaufbau

Das Wandungsmaterial des Rohres besteht aus 38 mm starkem MDF, welches sich auf Grund seiner hohen Masse günstig im Bezug auf entstehende Resonanzen im Arbeitsfrequenzbereich auswirkt. Das Rohr, schematisch in Abbildung 5.5 dargestellt, besitzt eine Länge von 200 cm und bildet mit den Rohrwandungen von jeweils einer Breite von 20,5 cm einen quadratischen Querschnitt.

Der Abstand der Mikrofonpositionen beträgt 10 cm. Der von der Norm [DIN01b] geforderte Mindestabstand der dreifachen Längsabmessung zwischen Quelle und Empfänger von insgesamt 61,5 cm ist in diesem Fall durch den vorhandenen Abstand von 62,5 cm gegeben. Die Distanz von 45 cm zwischen der ersten Mikrofonposition und dem Rohrabschluss erfüllt ebenso die Anforderungen der Norm. Um entstehende Resonanzen der Luftsäule seitens der Schallquelle zu unterdrücken, ist die Rohrwandung auf der gegenüberliegenden Seite mit absorbierendem Material versehen. Störenden Reflexionen zwischen der Probenoberfläche und der gegenüberliegenden Rohrwandung soll ebenfalls durch schallweiches Auskleiden des Abschlusses vorgebeugt werden. Beiden Maßnahmen dienen der Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes (SNR).

Durch das Prüfobjekt selber verursachte Nahverzerrungen können bei zu geringem Abstand zwischen Messobjekt und dem naheliegendsten Mikrofon ebenso Störungen bewirken. Laut Norm wird hier ein Mindestabstand, abhängig je nach Art des Prüfobjektes vorgeschlagen. Auch im Fall der Vermessung der vollen Einbautiefe der akustisch relevanten Elemente des Absorbers, wird der geforderte Abstand einer Seitenlänge, in dem Fall 20,5 cm eingehalten. Um den Einfluss von Körperschall und jeglicher Anregung von Außen zu minimieren, ist das komplette Rohr auf Sylomerlager gebettet. Der komplette Messaufbau ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

Über das mit Firewire verkabelte Audiointerface wird das von EASERA erzeugte Anregungssignal mit dem Eingang des Leistungsverstärkers verbunden. Dieser speist das fest am Impedanzrohr fixierte, in einem gedämpften Gehäuse befindliche, Lautsprecherchassis. Als Schallempfänger dient ein Kondensator-Messmikrofon mit kugelförmiger Richtcharakteristik. Die bei dieser Messung verwendete Methode stellt die im Anhang B der Norm [DIN01b] der *Ein-Mikrofon-Methode* dar. Alle in der Signalkette befindlichen Geräte sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Die an den Mikrofonpositionen ermittelten, komplexen Schalldrücke werden mit der gleichen Software, EASERA erfasst und abgespeichert. Nach erfolgter Konvertierung in ein für das Computeralgebrasystem PTC Mathcad kompatibles Dateiformat werden die

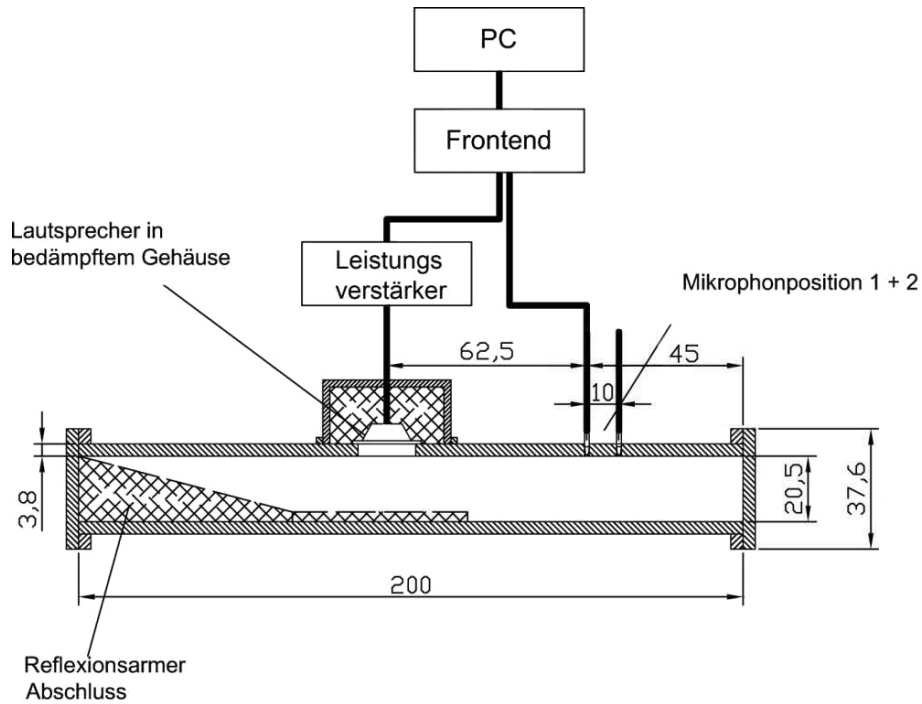


Abbildung 5.5.: Aufbau des Messsetups

Lautsprecher	mivoc XAW 180 HC
Verstärker	QSC Powerlight 1.8
Mikrofon	BEHRINGER ECM8000
Audiointerface	RME Fireface 400
Messsoftware	AFMG EASERA
Messsignal	Pink Max. Length Sequence (MLS), $d = 683$ ms, $f_s = 48,0$ kHz

Tabelle 5.1.: Messequipment

Daten importiert, ausgewertet und interpretiert (siehe Kapitel 5.4).

5.3.2. Ermittlung des Arbeitsfrequenzbereichs

Bedingt durch die geometrischen Abmessungen des Impedanzrohres ergibt sich mit Gleichung 2.35 eine obere Grenzfrequenz von ca. 839,47 Hz über der auf Grund sich bildender Moden innerhalb des Schallfeldes eine Auswertung der Messdaten nicht mehr möglich ist. Die ebenfalls durch den Mikrofonabstand gegebene Grenzfrequenz von 1548,83 Hz nach folgender Gleichung [DIN01b] ist somit zu vernachlässigen:

$$f_o < \frac{0,45 \cdot c_0}{s}, \quad (5.1)$$

wobei s [m] dem Abstand der Mikrofone zueinander entspricht. Die Schallgeschwindigkeit nach [DIN01b] berechnet sich auf folgendem Weg:

$$c_0 = 343,2 \cdot \sqrt{\frac{T}{293}} \text{ [m/s]}. \quad (5.2)$$

Mit der Temperatur T in Kelvin ergibt sich mit einer gemessenen Raumtemperatur von konstant 11°C und $K = C^\circ + 273,15$ zu $c_0 = 344,185$ [m/s]. Nach unten hin ist der auswertbare Bereich durch die Leistungsfähigkeit des Lautsprechers sowie die Schalldämmeigenschaften der Rohrwände bestimmt. Nach Analyse mehrerer Messergebnisse, sowohl mit als auch ohne Materialproben im Rohr, lassen sich ab etwa 60 Hz aufwärts verlässliche Aussagen über die Absorptionsgrade treffen.

Der Arbeitsfrequenzbereich ergibt sich also zu $\approx 60 \text{ Hz} < f < 839,47 \text{ Hz}$.

5.3.3. Einfluss der Lamellen auf den Absorptionsgrad

Um den Einfluss der Lamellen auf das akustische Verhalten des Absorbers mit einzubeziehen, wird mit einem eigens für das IR (siehe Kapitel 5.3, Abbildung 5.4) angefertigte Modell der Absorptionsgrad gemessen.

Nur so kann ein Eindruck über die akustische Wirksamkeit der Absorbermaterialien gewonnen werden, um so eine Aussage über das gebaute Akustikelement und dessen Einsatzbereich treffen zu können.

Damit die Unterschiede der verschiedenen Winkelstellungen erfasst werden können, wird das beschriebene Miniaturmodell ohne beigefügte Absorbermaterialien untersucht. Ein Auszug aus dieser Messung ist in Abbildung 5.6 zu sehen.

Wie zu erwarten ist bei geschlossenem Zustand (0 Grad Stellung) der höchste Absorptionsgrad von Werten bis ca. $0,3 \alpha$ vorzufinden. Bei stetig größer werdendem Öffnungswinkel senkt sich die Messkurve auf Nahezu den zuvor gemessenen Werten der Restabsorption des Rohres. Der Einfluss der komplett geöffneten Konstruktion (90 Grad Stellung) auf den Absorptionsgrad fällt relativ gering aus. Diese Betrachtung ist rein auf den Zustand des senkrechten Schalleinfallendes anwendbar. Aufgrund des eingeschränkten Frequenzbereiches sind hier leider keine Aussagen über das Verhalten bei hohen Frequenzen zu treffen.

Die dazugehörigen Absorptionsgradverläufe der Einzelmessungen sind im Anhang F.2.2 einsehbar.

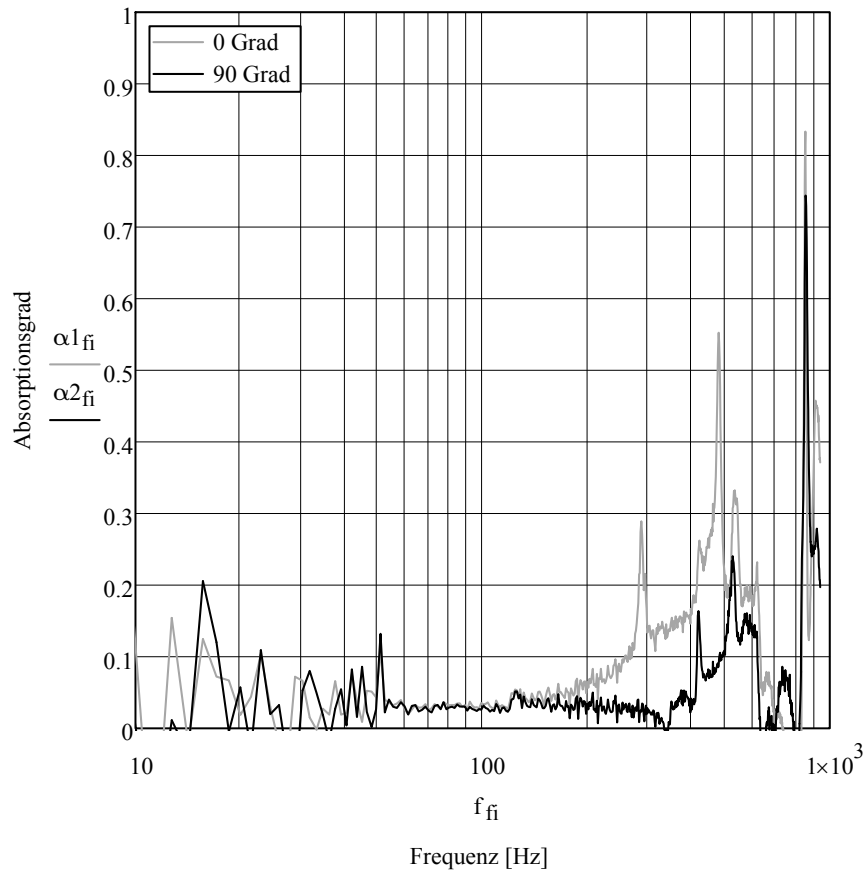


Abbildung 5.6.: Absorption der Lamellenkonstruktion im IR

5.3.4. Absorptionsgradmessung des finalen Aufbaus

Im Anschluss an die in Abschnitt 5.3.3 beschriebene Vermessung der LK werden von allen verwendeten Materialien sowohl Einzel- als auch Kombinationsmessungen durchgeführt. Die entsprechenden Messergebnisse sind im Anhang F.2 zu finden.

Bei Schichtung der beiden tatsächlich zum Einsatz kommenden Materialproben (OPS & MFW) ergibt sich der in Grafik 5.7 abgebildete Verlauf in blau (OPS und MFW). Zum Vergleich sind Kombinationsmessungen mit der LK zu sehen, welche die beiden Maximalzustände des Öffnungswinkels von 0 und 90 Grad darstellen. Ausgehend von etwa 60 Hz herrscht ein recht ähnlicher Verlauf der Absorptionsgradkurve bis hin zu 150 Hz vor. Für höher werdende Frequenzen ist ein deutlicher Anstieg der Absorption durch das Einbringen der Jalousiekonstruktion im Impedanzrohr ersichtlich. Während bei geöffnetem Zustand die Form der Messkurve einen ähnlichen Verlauf beschreibt wie bei alleiniger Messung der

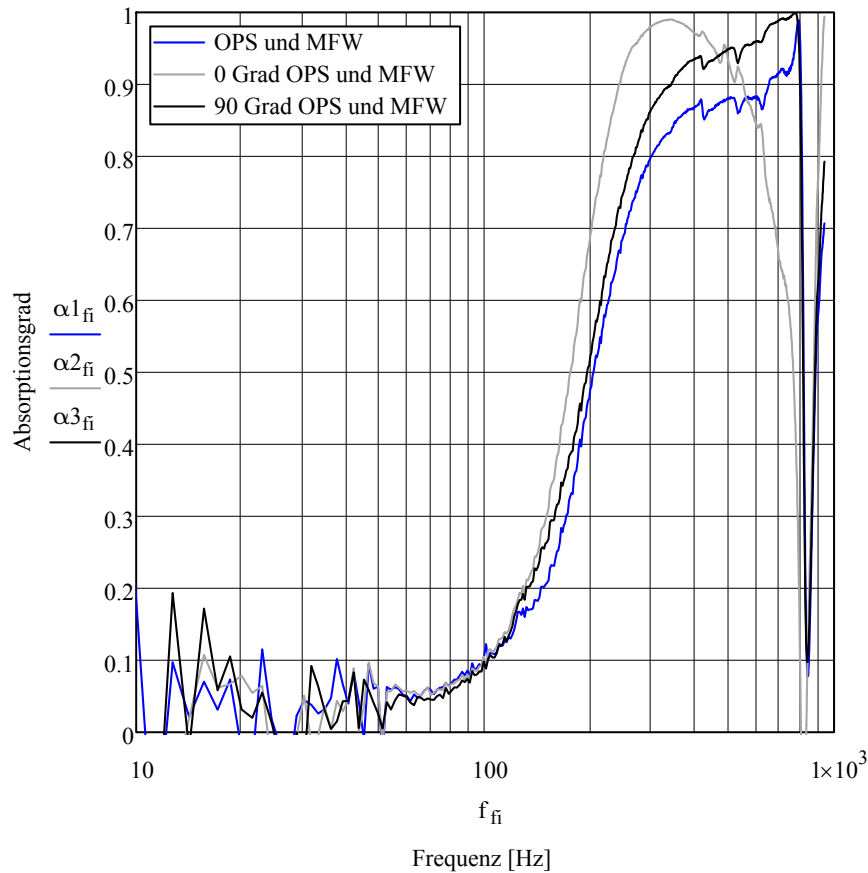


Abbildung 5.7.: Gemessene Absorptionsgrade - Einfluss der Lamellen (0 Grad & 90 Grad) im IR

beiden Materialproben (siehe Anhang F.2), weicht die Kurve für den geschlossenen Fall jedoch stark ab.

5.4. Interpretation der Messergebnisse

Durch schließen der LK scheint sich eine ähnlich dem Resonanzabsorber zuzuschreibende Charakteristik einzustellen (siehe Abbildung 5.8). Ausgehend von ca. 200 Hz gewinnt die Absorption, welche ihr Maximum bei knapp über 300 Hz besitzt, deutlich schneller an Einfluss gegenüber dem geöffneten Zustand. Die Spitze wandert dabei mit zunehmendem Öffnungswinkel in Richtung der Grenzfrequenz des Arbeitsbereiches. Aufgrund gegebener, geometrischer Bedingungen des Rohres lassen sich in diesem Fall keine Aussagen über den weiteren Verlauf der Kurven treffen. Insbesondere der Kurvenverlauf oberhalb von 800 Hz wäre bei geschlossenem Zustand des Modells dennoch interessant. Eine Möglichkeit, die obere Grenzfrequenz nach oben hin zu erweitern, wäre der Einsatz eines Impedanzrohres

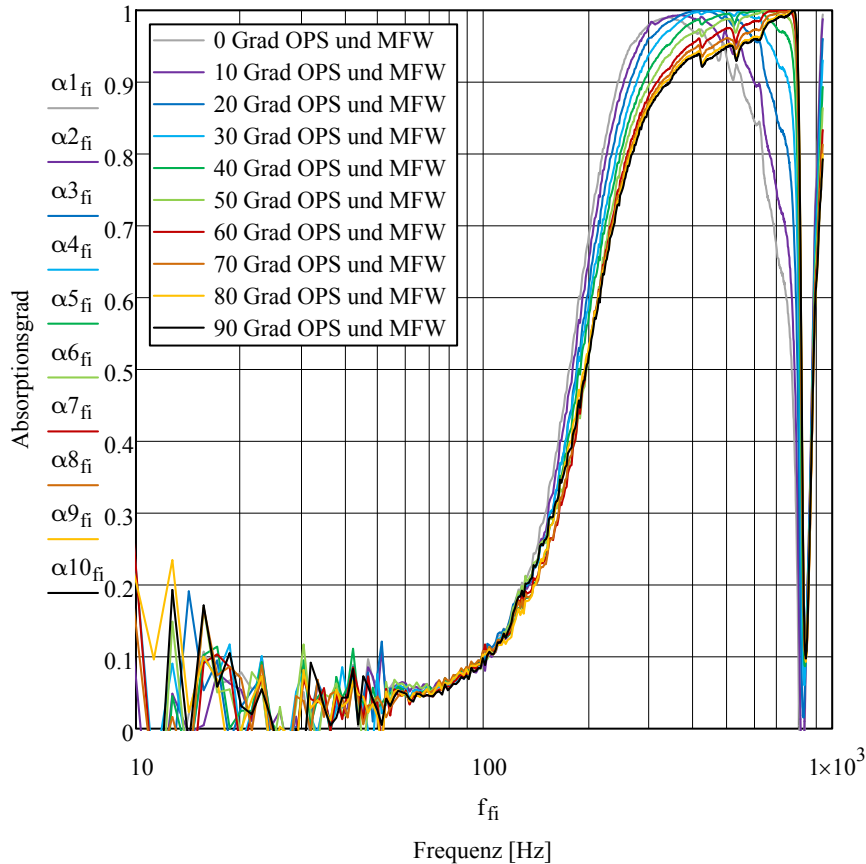


Abbildung 5.8.: Gemessene Absorptionsgrade des finalen Aufbaus - alle Zustände im IR

mit geringerem Rohrdurchmesser. Allerdings würde sich diese Maßnahme aufgrund geometrischer Gegebenheiten negativ auf den Einsatz des Miniaturmodells der LK auswirken.

Bei den ausgewerteten Absorptionsgraden in Abbildung 5.9 sind die zuvor berechneten Werte den gemessenen Daten gegenübergestellt. Vergleicht man die Ergebnisse der Berechnungen des Schichtenmodells (AFMG SoundFlow) mit den Messdaten der Impedanzrohrmessung, lässt sich ein sehr ähnlicher Verlauf feststellen. Obwohl sich die berechneten Verläufe ausschließlich auf die im Absorber vorkommenden Materialien beziehen, ohne eine vorgesetzte variable Front (LK) zu berücksichtigen, gleichen sich die berechneten Werte und die gemessenen sehr stark.

Die in Abbildung 5.9 mit Rauten versehenen Kurven entsprechen den aus der Messung erhaltenen Werte. Aufgrund des eingeschränkten Arbeitsfrequenzbereiches enden die hinzugefügten Absorptionsgrade bei 800 Hz.

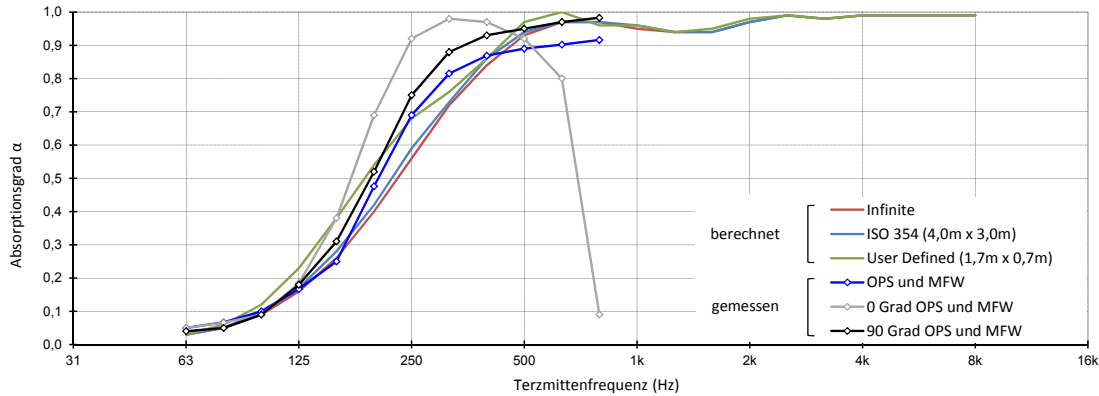


Abbildung 5.9.: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Absorptionsgraden

Eine Vervollständigung hin zu höheren Frequenzen kann nur durch eine Ergänzung der Messdaten durch die gerechneten Absorptionswerte erfolgen. Allerdings ist bei berechneten bzw. simulierten Ergebnissen immer ein gewisser Unsicherheitsfaktor gegeben.

Während sich die Verläufe der Messergebnisse bei geöffneter LK (schwarz) und der Messung ohne LK (blau) wie erwartet darbieten, sollte den Ergebnissen mit geschlossener Konstruktion (grau) besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Es zeigt sich (Abbildungen 5.7 & 5.8) eine Verschiebung der ersten Absorptionsmaxima hin zu tiefen Frequenzen, welche ihren tiefsten Wert bei 337,9 Hz aufweisen. Das Maximum verschiebt sich mit zunehmendem Öffnungswinkel bis hin zum Erreichen der Grenzfrequenz knapp oberhalb von 800 Hz. In Tabelle 5.2 sind die Frequenzen dieser Absorptionsmaxima aufgelistet.

Grad	f (Hz)	α
0° (geschlossen)	337,9	0,9904
10°	368,7	0,9933
20°	424,3	0,9999
30°	468,3	0,9991
40°	616,2	0,9998
50°	636,7	0,9996
60°	712,9	0,9997
70°	759,8	0,9998
80°	771,5	0,9999
90° (geöffnet)	773,0	0,9999

Tabelle 5.2.: Frequenzen der Absorptionsmaxima bei entsprechender Winkelstellung

5.4.1. Simulation des mehrschichtigen Absorberaufbaus

Eine mögliche Erklärung der beschriebenen Tatsache ist eine dem Schlitzplattenabsorber zuzuschreibende Charakteristik. Die Wirkungsweise von Schlitzplattenabsorbern kann mit dem Prinzip des Helmholtzabsorbers (siehe Abschnitt 2.3.4) beschrieben werden.

Um zu überprüfen, ob die LK tatsächlich ähnliche Eigenschaften wie eine Kombination aus Schlitzplatte mit dahinter liegendem Breitbandabsorber besitzt, wurde mit Hilfe der Software AFMG SoundFlow der selbe Schichtenaufbau nachgebildet, welcher bei der Impedanzrohrmessung vorzufinden war.

Verglichen mit Abbildung 2.8 in Abschnitt 2.3.4 entspricht die zur Anwendung gekommene Anordnung der Schichten im Prinzip dem des linken Teilbildes.

Der Aufbau, in Abbildung 5.10 zu sehen, gliedert sich von hinten beginnend wie folgt:

- Mineralfaserwolle
- offenporiger Schaumstoff
- Unterspannstoff
- Stoffbespannung
- Luft
- Lamellenkonstruktion

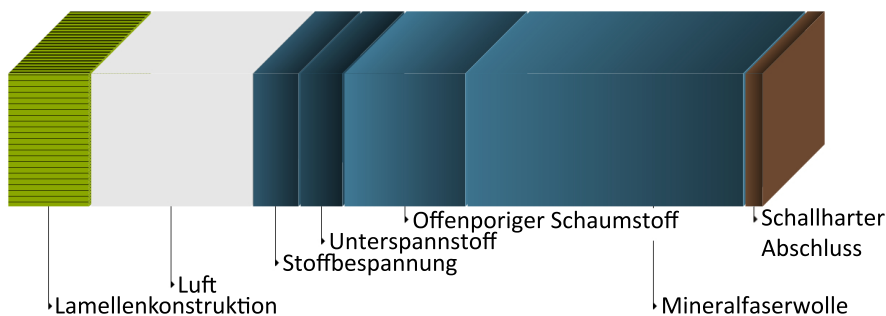


Abbildung 5.10.: Absorberaufbau im Impedanzrohr

Alle zur Berechnung notwendigen Materialparameter, wie der längenbezogene Strömungswiderstand Ξ , das Raumgewicht RG und die Schichtdicken d , wurden bei der Berechnung bestmöglich an die reale Messsituation angenähert. Die LK wurde dabei in Form einer

Schlitzplatte angenommen. Entsprechend jeder Winkelstellung in 10 Grad Abständen, verändert sich die Schlitzbreite zwischen den Lamellen. Diese, mit der Öffnung des Elementes wachsenden Werte, wurden ebenso wie die Materialdicke den CAD-Plänen der Konstruktion entnommen.

Tabelle 5.3 zeigt die Schlitzbreiten und die entsprechenden Perforationsverhältnisse bei konstant bleibendem Schlitzmittenabstand von $a = 65$ mm.

Grad	Schlitzbreite b [mm]	Perf.verh. $\sigma_P = \frac{b}{a}$ [%]
0° (geschlossen)	5	7,69
10°	6	9,23
20°	8,5	13,08
30°	12	18,46
40°	18	27,69
50°	25	38,46
60°	32	49,23
70°	40	61,54
80°	45	69,23
90° (geöffnet)	50	76,92

Tabelle 5.3.: Schlitzbreite b und Perforationsverhältnis σ_P bei entsprechender Winkelstellung

Nach erfolgter Korrektur der prozentualen Durchlässigkeit (Perforationsverhältnis) erhält man unter Berücksichtigung von senkrechtem Schalleinfall und schallhartem Abschluss, die in Abbildung 5.11 dargestellten theoretischen Absorptionsgrade für den Absorberaufbau.

Vergleicht man die simulierten Ergebnisse (siehe Abbildung 5.11) mit den tatsächlich gemessenen Werten in Abbildung 5.8, erkennt man eine starke Ähnlichkeit der Absorptionsgradverläufe. Sowohl bei den Mess- als auch bei den Simulationsergebnissen erkennt man im Fall der 0 Grad Stellung (entspricht dem geschlossenen Zustand der LK) einen schmalbandigen Absorptionsanstieg bei ca. 290 Hz. Auch die Tendenz der Resonanzverschiebung ist in beidem Fällen die selbe. Mit zunehmender Frequenz werden die Absorptionsgrade im Bereich um deren Maxima immer breitbandiger.

In Tabelle 5.4 sind die jeweiligen Absorptionsmaxima mit den entsprechenden Resonanzfrequenzen aufgelistet.

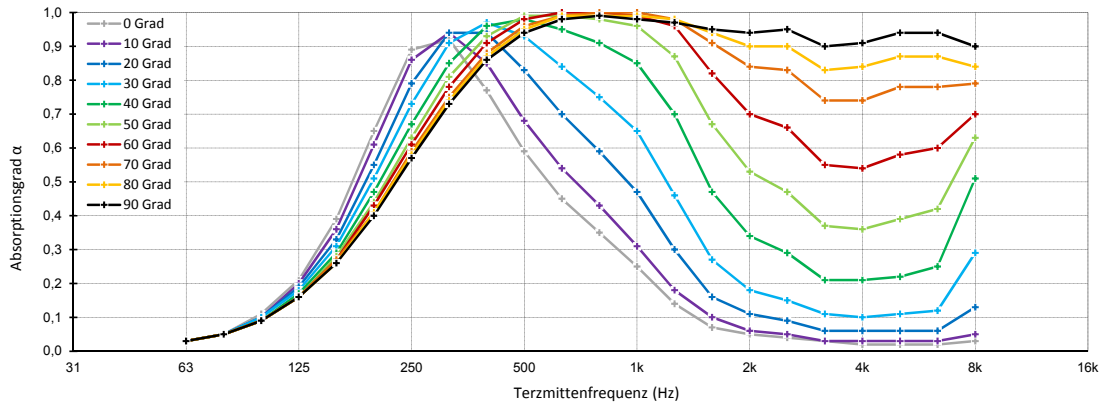


Abbildung 5.11.: Berechnete Absorptionsgrade des finalen Aufbaus - alle Zustände

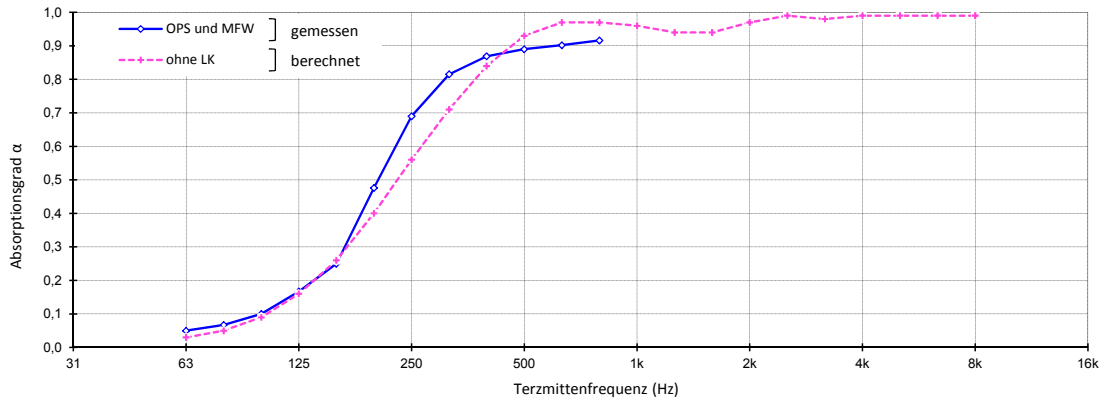
Grad	f (Hz)	α
0° (geschlossen)	290	0,950
10°	307	0,955
20°	355	0,964
30°	400	0,974
40°	475	0,985
50°	560	0,994
60°	650	0,999
70°	710	0,998
80°	750	0,994
90° (geöffnet)	800	0,988

Tabelle 5.4.: Berechnete Frequenzen der Absorptionsmaxima bei entsprechender Winkelstellung

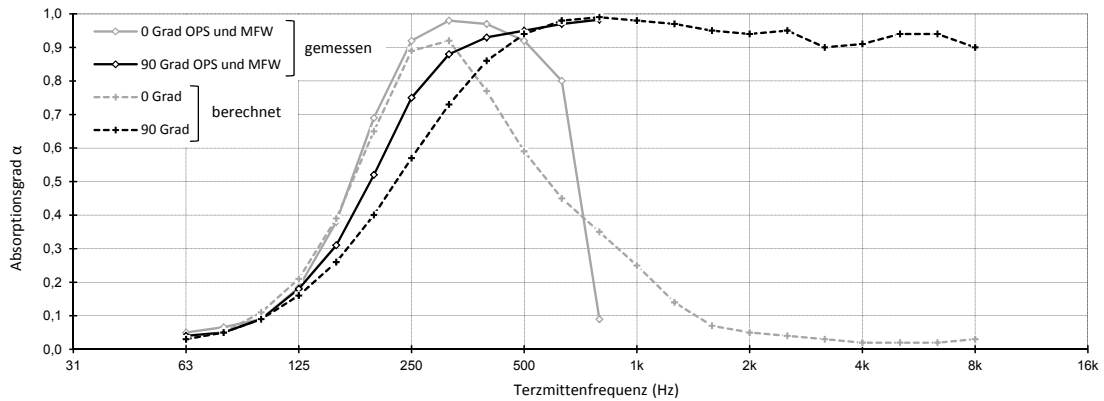
Nachfolgend sind einzelne Messauszüge mit den Ergebnissen aus der Simulation dargestellt. Neben einem Vergleich zwischen geschlossener und geöffneter Front (siehe Abb. 5.12b) zeigt das obere Teilbild den Vergleich ohne LK (siehe Abb. 5.12a).

Die berechneten Ergebnisse sind durch gestrichelte Linien dargestellt. Wie bereits erwähnt, endet der Messbereich bei etwa 800 Hz. Beide Vergleiche demonstrieren, dass die getroffene Annahme, dass das akustische Verhalten dem eines Schlitzplattenabsorbers ähnelt, zutreffend ist.

Da neben allen Materialparametern, welche zur korrekten Berechnung notwendig sind, auch die geometrischen Abschätzungen der Schlitzplatte (LK) leichten Ungenauigkeiten unterliegen, sind kleinere Abweichungen zwischen Mess- und Simulationsergebnissen unvermeidbar. So ist z. B. die Plattendicke konstant mit $d = 10$ mm angenommen, was der



(a) ohne LK



(b) geöffneter (90 Grad) und geschlossener (0 Grad) Zustand

Abbildung 5.12.: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Absorptionsgraden

Realität in Form von elyptenförmigen Lamellen mit einer maximalen Schichtdicke von $d = 15 \text{ mm}$ nur bedingt entspricht.

Da auch schon leichte Abweichungen bei den jeweiligen Strömungswiderständen, den einzelnen Rohdichten und den nur angenäherten Materialdicken der Schlitzplatte starke Auswirkungen auf die simulierten Absorptionsgrade haben, können im Vergleich zum akustischen Verhalten bei realer Anwendung des Absorbers geringe Unterschiede entstehen. Da insbesondere der Bereich oberhalb der Grenzfrequenz des Impedanzrohres nicht direkt gemessen werden kann, liefern die Ergebnisse aus den Berechnungen einen Ausblick, wie sich die einzelnen Winkelstellungen der Lamellenfelder auf den Absorptionsgrad über den kompletten Frequenzbereich auswirken.

Kapitel 6.

Finaler Prototyp und Ausblick

6.1. Finaler Prototyp

In diesem Kapitel wird der finale variable Breitbandabsorber beschrieben. In Abbildung 6.1 ist das Element mit beispielhaften Lamellenstellungen dargestellt. Die bei diesem Prototyp vorliegenden Abmessungen betragen 0,75 m x 1,75 m x 0,18 m [B x H x T]. Für Präsentationszwecke wurde eigens hierfür ein Sockel angefertigt, welcher dem Absorber einen sicheren Stand bietet.

Wie in der geplanten Ausführung des Modells als auch in der später folgenden Realisierung bestehen alle Lamellen aus Buche Echtholz. Der Rahmen wurde seidenmatt-weiss lackiert. Die Stoffbespannung des Absorbers ist in braun-schwarz gehalten.

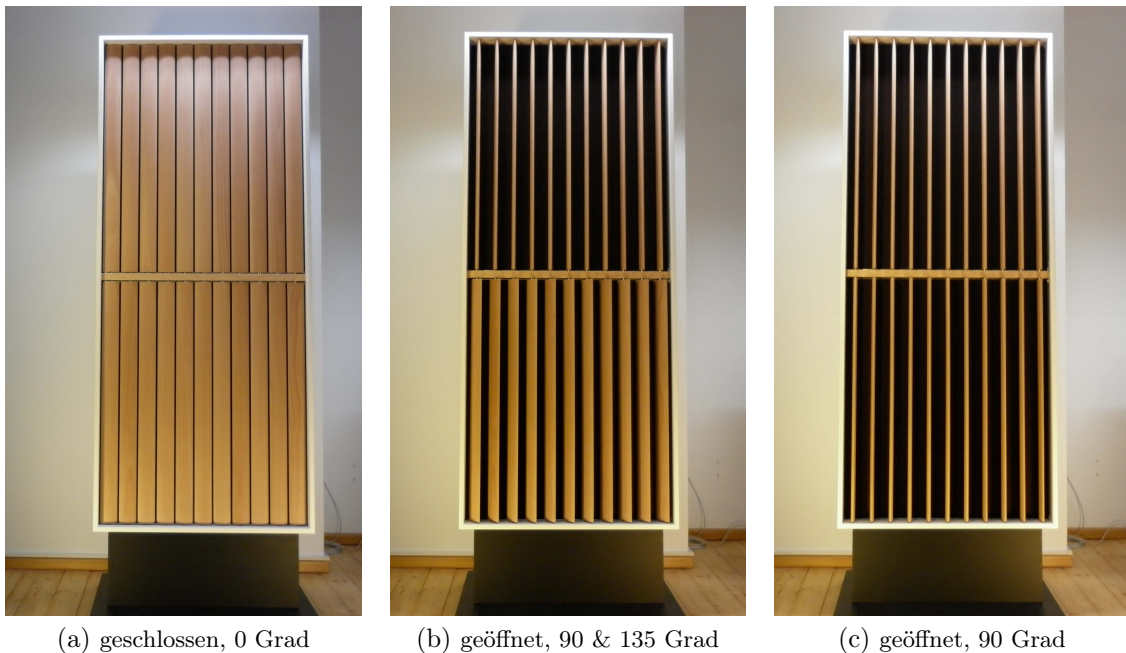
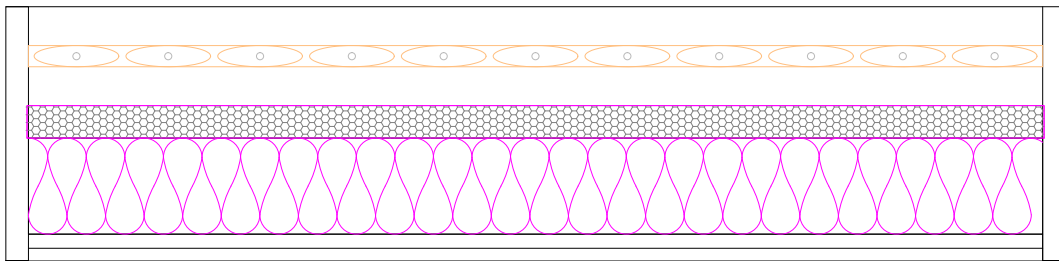


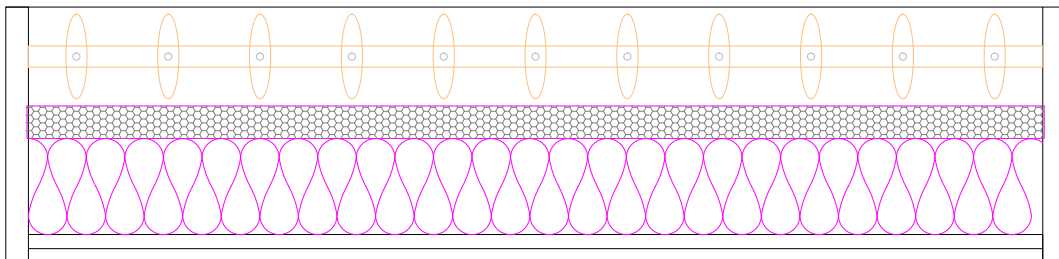
Abbildung 6.1.: Variabler Absorber

Der komplette Aufbau, der den Rahmen, die darin befindlichen Absorberschichten, die davor montierte LK sowie Stoffbespannungen und Lackierung beinhaltet, wurde eigens von einer Schreinerei angefertigt. Zu diesem Zweck wurde extra ein spezielles Messer hergestellt, um die elypsenförmigen Rundungen der Lamellen zu fräsen. Die Metallschienen, welche die Bewegung der beiden Felder als eine Einheit ermöglichen, wurden maßgenau mit einer CNC-Fräse zugeschnitten. Für alle Bauteile, Querschnitte und konstruktiven Details wurden aus diesem Grund CAD-Pläne mit AutoCAD erstellt.

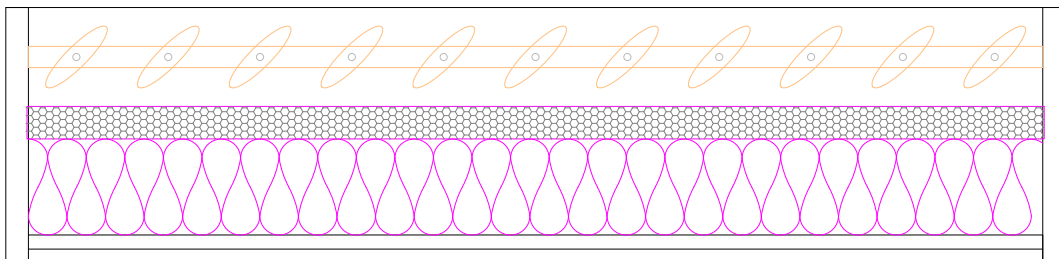
Abbildung 6.2 zeigt einen skizzenhaften Aufbau des Querschnittes mit unterschiedlichem Öffnungswinkel der Holzjalousie.



(a) Querschnitt, 0 Grad



(b) Querschnitt, 90 Grad



(c) Querschnitt, 135 Grad

Abbildung 6.2.: Skizzenhafte Darstellung des Querschnittes

6.2. Zusammenfassung & Ausblick

Bei der Interpretation der Messergebnisse sind auf Grund der zur Verfügung stehenden Bedingungen leider keine Aussagen möglich, die sich auf das Absorptionsvermögen über den kompletten Frequenzbereich beziehen. Allerdings lässt eine Kombination aus Messergebnissen der Impedanzrohrmessung und Berechnungsdaten aus der Simulation des Schichtenmodells den Verlauf der Absorptionsgradkurve des schlussendlich gebauten Absorbers vermuten.

Die in Kap. 2.5.1 erwähnte Methode zur Absorptionsgradmessung im Hallraum stellt hier die einzig sinnvolle Alternative zur Bestimmung der nicht exakt deutbaren akustischen Eigenschaften dar. Leider ist eine solche Messung und die damit benötigte Probenoberfläche im Rahmen dieser Arbeit aus Gründen des damit verbundenen zeitlichen und finanziellen Aufwandes schwer durchführbar, dennoch für eine exakte Bestimmung des akustischen Verhaltens, insbesondere bei Veränderung der Öffnungswinkel der Lamellen, unabdinglich.

Zusammenfassend kann aber dennoch gesagt werden, dass ausgehend von einer Kombination aus Messungen im Impedanzrohr sowie Simulationsergebnissen für den bestehenden Schichtenaufbau im Absorber, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Breitbandabsorber durch die Kombination mit den beiden vorgesezten, voneinander unabhängig bewegbaren Lamellenfeldern, sinnvoll als variables Raumakustikelement zur gezielten Beeinflussung und Variation der in Räumen anzutreffenden akustischen Gegebenheiten verwendet werden kann.

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Beispiel einer gemessenen Raumimpulsantwort	4
2.2.	Nachhallzeit T_N	5
2.3.	Verschiedene Arten der Oberflächenbeschaffenheit und Porigkeit	11
2.4.	Zwei Materialien gl. Porosität aber versch. Strömungswiderständen	13
2.5.	Absorberschicht in Abstand d_l vor schallharter Wand	16
2.6.	Reflexion an der Oberfläche eines homogenen Absorbers	17
2.7.	Helmholtzresonator	18
2.8.	Verschiedene Anordnungen der porösen Schicht hinter der Schlitzplatte	19
2.9.	Schematischer Aufbau eines Impedanzrohres	24
3.1.	Portables Absorberelement	28
3.2.	Mobile Stellwände	28
3.3.	Klappenelemente	29
3.4.	Variable Resonanzabsorber	30
3.5.	Variable Akustikelemente in Klappausführung	30
3.6.	Beispiele drehbarer Akustikelemente	31
3.7.	Lamellenkonstruktion	32
3.8.	Espace de Projection: Variable Raumakustik	33
3.9.	Hörspielsprecherstudio H1/2 mit variabler Raumakustik	34
3.10.	Jugendkirche: Nachhallzeit beider Zustände	35
3.11.	Jugendkirche: Vorhänge	36
3.12.	Jugendkirche: Seitenschiff - Vorhänge unten	36
3.13.	Jalousie im DCPS	37
3.14.	Nachhallzeit im DCPS	38
4.1.	Modell des Raumes (DCPS)	39
4.2.	Messpositionen im DCPS	40
4.3.	Komplettes Messsetup im DCPS	41
4.4.	Nachhallzeit aller Zustände im DCPS	43
4.5.	Vergleich zwischen gemessener und berechneter Nachhallzeit im DCPS	45
4.6.	Modell des Raumes (DCPS)	47

4.7.	Modell des Raumes (DCPS)	47
4.8.	Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden	48
4.9.	Berechneter Absorptionsgrad aller Zustände im DCPS	49
5.1.	Modell des Absorbers	52
5.2.	Absorberaufbau	53
5.3.	Simulation des Absorptionsgrades	54
5.4.	Impedanzrohrmessung, Modell der Lamellenkonstruktion	55
5.5.	Aufbau des Messsetups	57
5.6.	Absorption der Lamellenkonstruktion im IR	59
5.7.	Gemessene Absorptionsgrade - Einfluss der Lamellen (0 & 90 Grad) im IR .	60
5.8.	Gemessene Absorptionsgrade des finalen Aufbaus - alle Zustände im IR . .	61
5.9.	Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Absorptionsgraden	62
5.10.	Absorberaufbau im Impedanzrohr	63
5.11.	Berechnete Absorptionsgrade des finalen Aufbaus - alle Zustände	65
5.12.	Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Absorptionsgraden	66
6.1.	Variabler Absorber	67
6.2.	Skizzenhafte Darstellung des Querschnittes	68
A.1.	Messschablone	77
A.2.	Lamellenstellungen - alle Zustände im DCPS	78
A.3.	Nachhallzeit - alle Stellungen im DCPS	80
B.1.	Messdatenauswertung - alle Stellungen im DCPS	85
C.1.	Vergleich gemessener und simulierter Nachhallzeiten im DCPS	105
C.2.	Vergleich gemessener und simulierter/berechneter Nachhallzeiten im DCPS	106
D.1.	Berechnete Absorptionsgrade - alle Stellungen im DCPS	108
D.2.	Berechnete Absorptionsgrade nach Eyring - alle Zustände im DCPS	113
D.3.	Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden - 90 Grad Stellung . . .	114
E.1.	Berechnete Absorptionsgrade - Modellentwurf	116
F.1.	Restabsorption des Impedanzrohres	118
F.2.	Vergleich von leerem Rohr und mit Absorbermaterial	119
F.3.	Gemessene Absorptionsgrade der Materialien im IR	120
F.4.	Gemessene Absorptionsgrade der Lamellenkonstruktion - alle Zustände . . .	121
F.5.	Messprobe mit dazugehöriger Schablone	122
F.6.	Gemessene Absorptionsgrade des finalen Aufbaus - alle Zustände im IR . .	123

F.7. Gemessene Absorptionsgrade des finalen Aufbaus - alle Stellungen im IR . . 124

Tabellenverzeichnis

2.1. Absorberdichten ρ_A und Materialdichten ρ_M	10
2.2. Porositätsbereiche verschiedener Materialien	10
2.3. Strömungsresistanzen verschiedener Materialien	13
4.1. Mikrofon- und Lautsprecherpositionen im DCPS	40
4.2. Messequipment im DCPS	42
5.1. Messequipment	57
5.2. Frequenzen der Absorptionsmaxima bei entsprechender Winkelstellung . . .	62
5.3. Schlitzbreite b und Perforationsverhältnis σ_P bei entspr. Winkelstellung . .	64
5.4. Berechnete Frequenzen der Absorptionsmaxima bei entspr. Winkelstellung .	65

Abkürzungsverzeichnis

IR	Impedanzrohr
DCPS	Domchorprobensaal
Kugel	Kugellautsprecher von Brüel & Kjær
LK	Lamellenkonstruktion
MFW	Mineralfaserwolle
OPS	Offenporiger Schaumstoff

Literaturverzeichnis

- [CM76] CREMER, Lothar ; MÜLLER, Helmut A.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik - Band 2*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1976
- [CM78] CREMER, Lothar ; MÜLLER, Helmut A.: *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik - Band 1*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1978
- [DIN00] *DIN EN ISO 3382 - Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter*. 2000
- [DIN01a] *DIN EN ISO 10534 - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren, Teil 1: Verfahren mit Stehwellenverhältnis*. 2001
- [DIN01b] *DIN EN ISO 10534 - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren, Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion*. 2001
- [DIN03] *DIN EN ISO 354 - Messung der Schallabsorption in Hallräumen*. 2003
- [DIN04] *DIN 18041 - Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen*. 2004
- [EP09] EVEREST, F. A. ; POHLMANN, Ken C.: *Master Handbook of Acoustics - Fifth Edition*. McGraw-Hill Companies/TAB Electronics, 2009
- [ES88] EVEREST, F. A. ; SHEA, Mike: *How to Build a SMALL BUDGET RECORDING STUDIO From Scratch...with 12 Tested Designs*. Second Edition. TAB Books Inc., 1988
- [Fuc10] FUCHS, Helmut V.: *Schallabsorber und Schalldämpfer: Innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen. 3., wesentlich erweiterte und aktualisierte Auflage*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010
- [FV03] FASOLD, Wolfgang ; VERES, Eva: *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis: Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen*. Bd. 2. Verlag Bauwesen /Huss Med, 2003
- [GW06] GRABER, Gerhard ; WESELAK, Werner: *Raumakustik VO, Version 4.0*. TU Graz, SS 2006

- [HM94] HECKL, Manfred ; MÜLLER, Helmut A.: *Taschenbuch der Technischen Akustik, 2. Aufl.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1994
- [Krü96] KRÜGER, J.: Impedanzmessungen mit einer verbesserten 1-Mikrofon-FFT-Methode. In: *IBP-Mitteilung* 23 (1996), Nr. 293
- [Mec89] MECHEL, Fridolin P.: *Schallabsorber, Band I: Äußere Schallfelder / Wechselwirkungen.* S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1989
- [Mec95] MECHEL, Fridolin P.: *Schallabsorber, Band II: Innere Schallfelder / Strukturen.* S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1995
- [Mec98] MECHEL, Fridolin P.: *Schallabsorber, Band III: Anwendungen.* S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1998
- [Mös10] MÖSER, Michael: *Messtechnik der Akustik.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010
- [New08] NEWELL, Philip: *Recording Studio Design.* Second Edition. Focal Press, 2008
- [NK01] NEUBAUER, R. ; KOSTEK, B.: Prediction of the Reverberation Time in Rectangular Rooms with Non- Uniformly Distributed Absorption. In: *Archives of Acoustics* 26 (2001), Nr. 3
- [Peu78] PEUTZ, V.M.A.: The Variable Acoustics of the Espace de Projection of IRCAM (PARIS). In: *Audio Engineering Society Preprint, 59th Convention (1978)*, February 28.- March 3., Nr. 1310 (A-1). – S.C.I C. Peutz & Associés, Paris
- [Pow70] POWELL, John G.: Choosing a Formula for Calculating the Absorption Coefficient from Reverberation Chamber Measurements. In: *Journal of the Audio Engineering Society* 18 (1970), December, Nr. 6
- [SH11] STEINKE, Gerhard ; HERZOG, Gisela: *Der Raum ist das Kleid der Musik.* Mai 2011. – Musik-Aufnahmesäle und Hörspielstudios im Funkhaus Berlin-Nalepastraße sowie weitere Aufführungs- und Hörräume. Raumakustische Eigenschaften und Aufnahmetechnologische Bedingungen (mit einem Gastbeitrag von Peter Burkowitz)
- [Wei08] WEINZIERL, Stefan: *Handbuch der Audiotechnik.* Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
- [Wes10] WESELAKE, Werner: *Technische Akustik VO, Version 6.0.* TU Graz, SS2010

Anhang A.

Nachhallzeitmessung im Domchorprobensaal (DCPS)

A.1. Lamellenstellungen

Die in Abbildung A.1 dargestellte Messschablone dient der korrekten Einstellung der Lamellenfelder. Es sind zehn verschiedene Positionen in 10 Grad Schritten möglich.

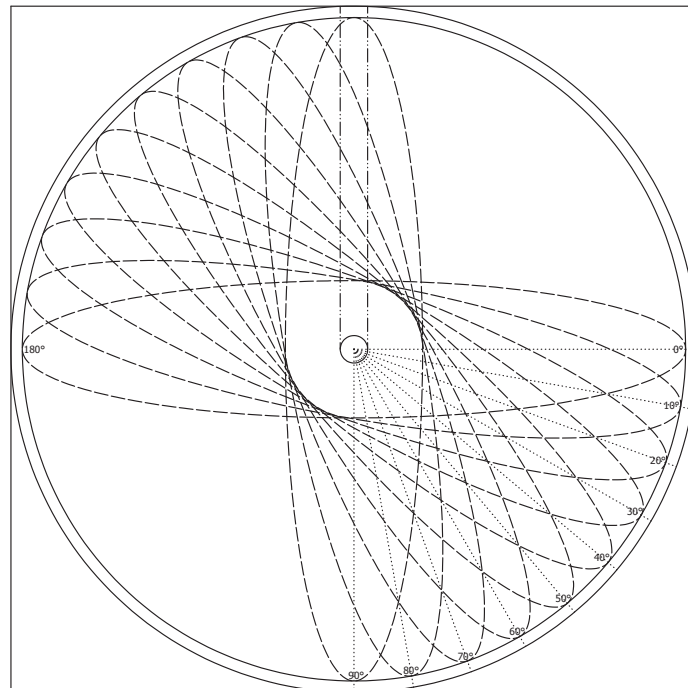


Abbildung A.1.: Messschablone (15 cm x 15 cm)

In Abbildung A.2 sind alle Zustände im Vergleich zueinander angeordnet. Man erkennt deutlich die immer größer werdende, akustisch wirksame Absorptionsfläche hin zu 90 Grad.



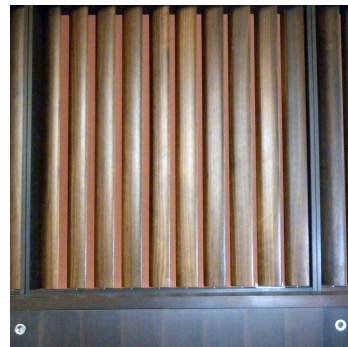
(a) 0 Grad



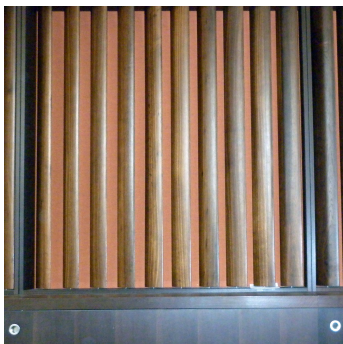
(b) 10 Grad



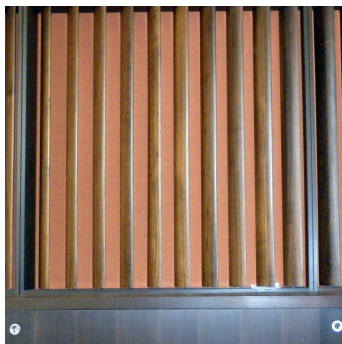
(c) 20 Grad



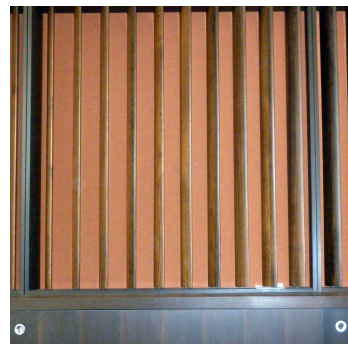
(d) 30 Grad



(e) 40 Grad



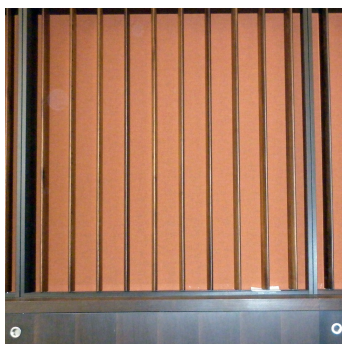
(f) 50 Grad



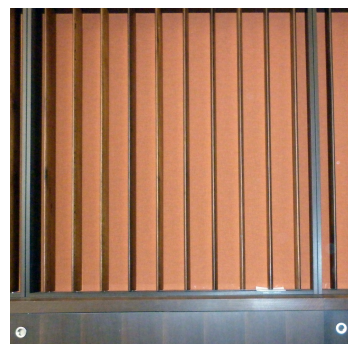
(g) 60 Grad



(h) 70 Grad



(i) 80 Grad



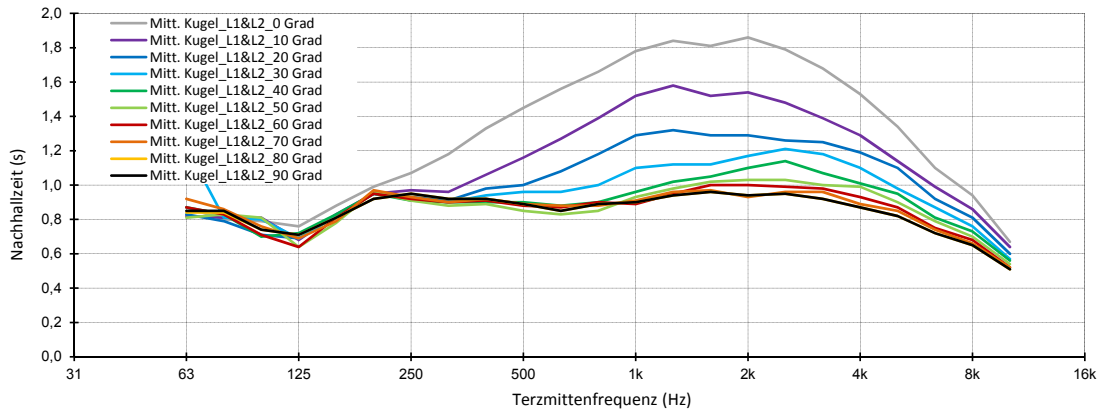
(j) 90 Grad

Abbildung A.2.: Lamellenstellungen - alle Zustände im DCPS

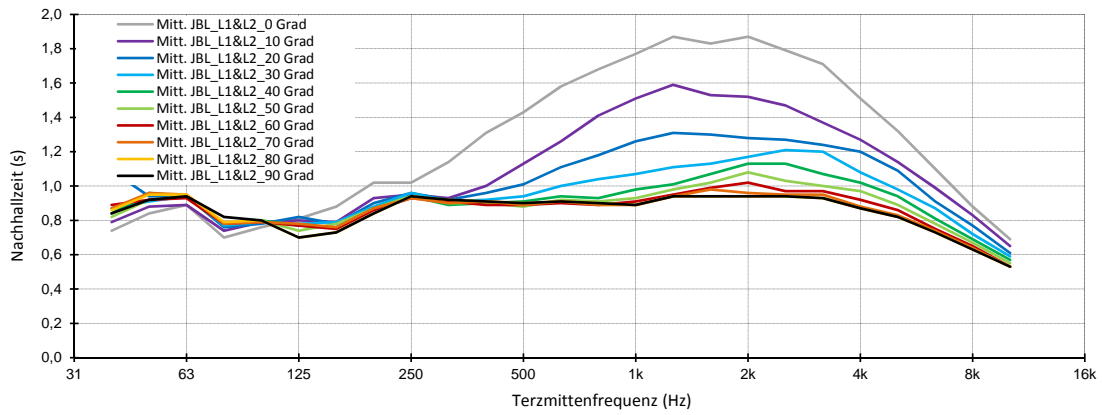
A.2. Nachhallzeiten

Nachfolgend sind für jede Winkelstellung der Lamellenkonstruktion von 0 Grad bis 90 Grad und für beide Lautsprecher die entsprechenden Nachhallzeiten aufgeführt.

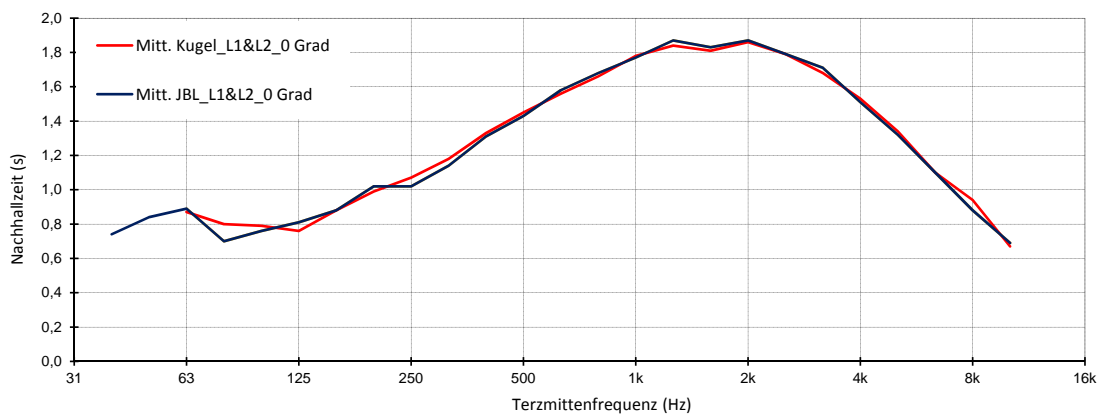
Es ist hier auch der Vergleich aller Ergebnisse für jede Schallquelle einzeln in einer Grafik (siehe Abbildungen A.3a & A.3b) dargestellt.



(a) alle Zustände - Kugel

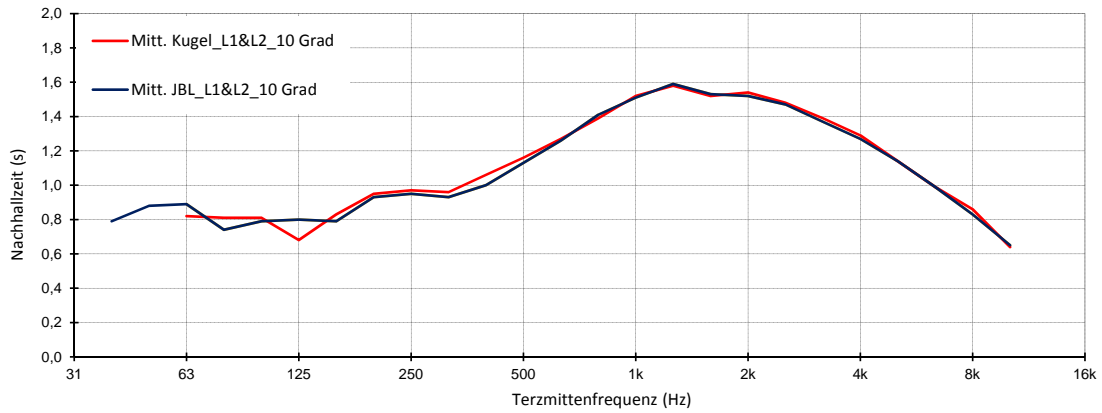


(b) alle Zustände - JBL

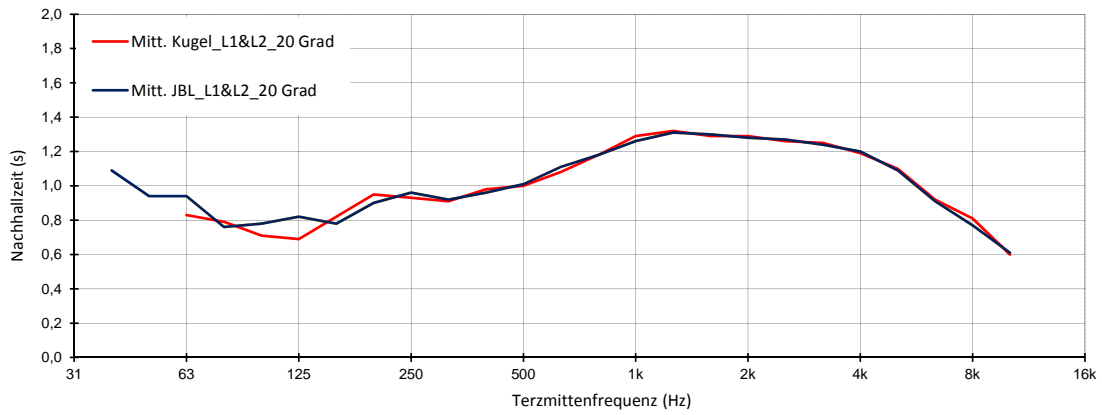


(c) 0 Grad Stellung

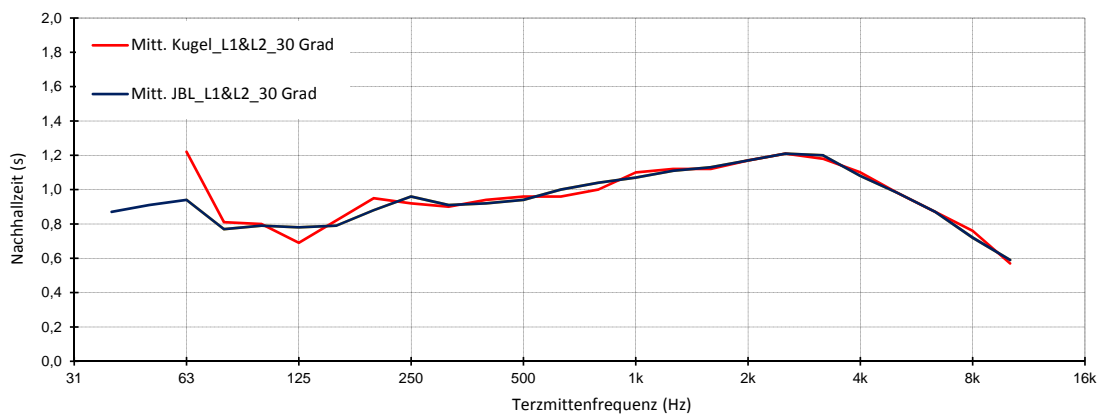
Abbildung A.3.: Nachhallzeit - alle Stellungen im DCPS



(d) 10 Grad Stellung

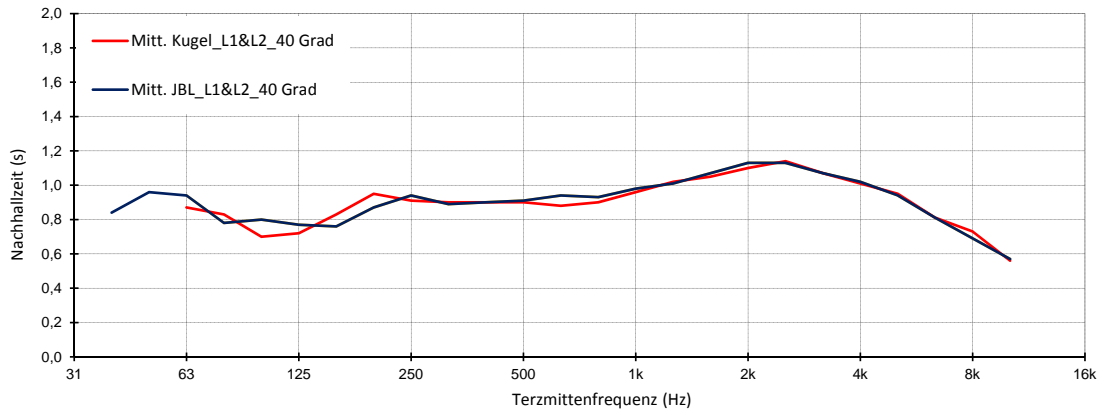


(e) 20 Grad Stellung

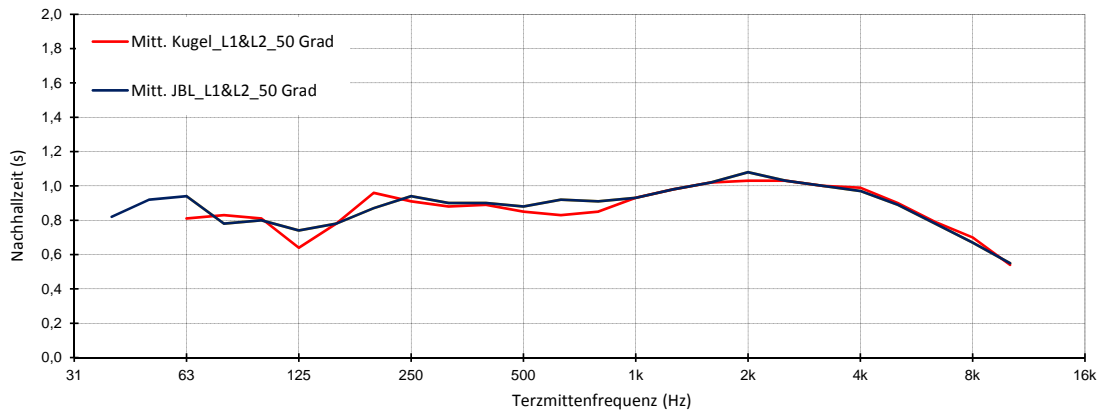


(f) 30 Grad Stellung

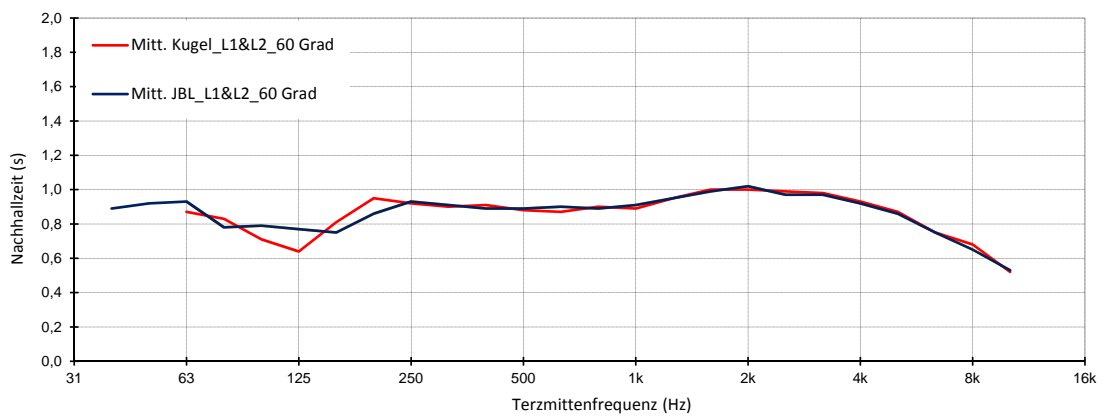
Nachhallzeit - alle Stellungen im DCPS



(g) 40 Grad Stellung

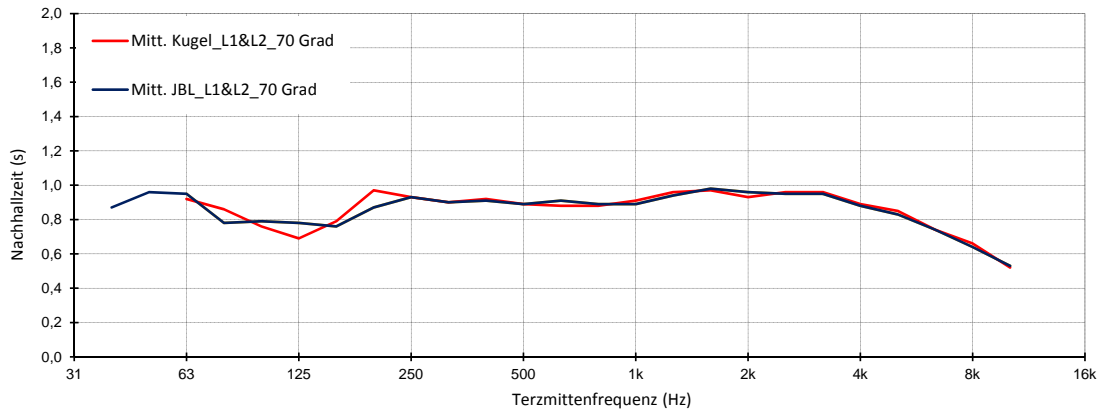


(h) 50 Grad Stellung

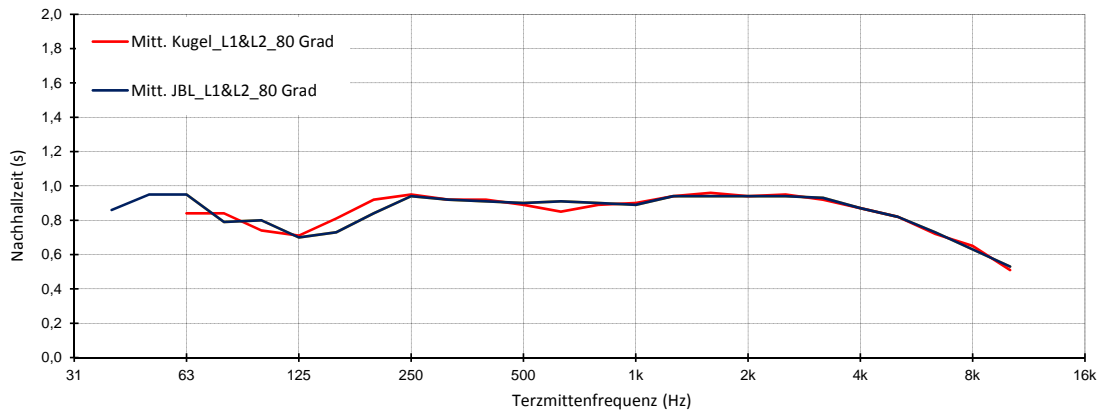


(i) 60 Grad Stellung

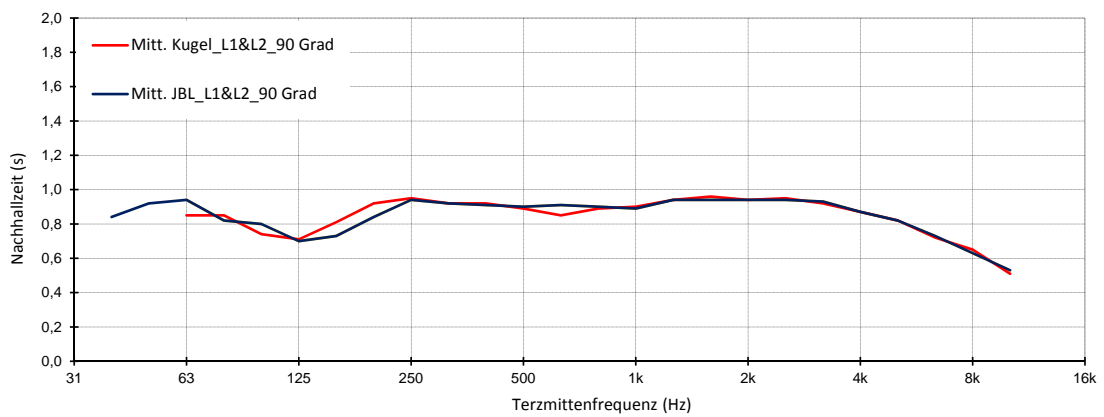
Nachhallzeit - alle Stellungen im DCPS



(j) 70 Grad Stellung



(k) 80 Grad Stellung



(l) 90 Grad Stellung

Nachhallzeit - alle Stellungen im DCPS

Anhang B.

Messdaten und Auswertung im Domchorprobensaal

Anschließend sind zu den im Anhang A.2 aufgelisteten Nachhallzeiten die dazugehörigen Messdaten (siehe Abb.: B.1) aufgelistet. Diese demonstrieren neben der Auswertung auch die entsprechenden Zahlenwerte der endgültigen Nachhallzeiten. Zu jeder der insgesamt zehn Messungen gehören jeweils zwei DIN A4 Seiten, auf denen die jeweiligen Messdaten zu finden sind.

Weiter werden durch eine Berechnung der Medianwerte für jede Messreihe die Messdatenausreißer ermittelt. Nach erfolgter Korrektur der Daten sind auf der zweiten dazugehörigen Seite die sich ergebenden Nachhallzeiten fett dargestellt.

Grad	Messdaten der einzelnen Mikrokompositionen für beide Lautsprecher und Berechnung der entsprechenden Medianwerte																																						
Grad	25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz												
M.S. Kugel L1M6.ernd	13.18	10.20	10.33	10.58	11.04	11.33	11.58	12.04	12.22	12.44	12.66	13.02	13.33	13.58	13.88	14.14	14.33	14.51	14.79	15.04	15.22	15.41	15.66	15.94	16.22	16.51	16.81	17.11	17.41	17.71	18.01	18.31	18.61	18.91	19.21				
M.S. Kugel L1M5.ernd	13.14	5.90	6.75	7.20	7.71	8.28	8.88	9.47	10.08	10.67	11.28	11.89	12.50	13.11	13.72	14.33	14.94	15.55	16.16	16.77	17.38	17.99	18.60	19.21	19.82	20.43	21.04	21.65	22.26	22.87	23.48	24.09	24.70	25.31					
M.S. Kugel L1M4.ernd	8.82	8.65	0.99	0.87	0.84	0.53	0.48	0.80	0.92	1.08	1.21	1.37	1.49	1.66	1.72	1.87	1.88	1.84	1.81	1.76	1.72	1.52	1.36	1.11	0.88	0.70	0.58	0.68	0.69	0.67	0.65	0.63	0.61	0.59	0.57				
M.S. Kugel L1M3.ernd	12.71	11.16	0.74	1.13	1.02	0.88	1.12	0.88	1.14	1.02	0.88	1.14	1.02	0.88	1.14	1.02	0.88	1.14	1.02	0.88	1.14	1.02	0.88	1.14	1.02	0.88	1.14	1.02	0.88	1.14	1.02	0.88	1.14	1.02	0.88	1.14			
M.S. Kugel L1M2.ernd	10.16	13.31	0.69	0.92	0.60	0.77	0.52	0.61	0.88	1.12	1.05	1.19	1.24	1.40	1.66	1.77	1.78	1.80	1.82	1.87	1.70	1.65	1.48	1.29	1.08	0.86	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69		
M.S. Kugel L1M1.ernd	20.33	13.20	0.80	0.91	0.79	0.76	0.56	0.80	0.84	1.06	1.10	1.32	1.39	1.53	1.71	1.81	1.83	1.81	1.84	1.75	1.50	1.35	1.11	0.88	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71			
Median JB.L. L1	12.93	10.93	0.78	0.89	0.77	0.68	0.80	0.84	1.02	1.04	1.05	1.14	1.33	1.44	1.62	1.69	1.77	1.88	1.83	1.87	1.72	1.52	1.35	1.10	0.88	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70			
M.S. Kugel L2M6.ernd	11.23	9.69	13.77	0.77	0.87	0.63	0.66	0.92	1.05	1.04	1.07	1.16	1.43	1.49	1.60	1.59	1.75	1.85	1.81	1.82	1.78	1.68	1.51	1.32	1.10	0.88	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68		
M.S. Kugel L2M5.ernd	13.45	1.06	0.59	0.73	0.76	0.63	0.62	0.73	0.85	0.95	1.04	1.12	1.21	1.30	1.41	1.53	1.70	1.75	1.83	1.79	1.67	1.84	1.85	1.64	1.46	1.29	1.07	0.89	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69		
M.S. Kugel L2M4.ernd	9.63	11.10	0.62	0.76	1.07	0.69	0.80	0.56	0.63	0.81	1.01	1.17	1.16	1.40	1.55	1.70	1.85	1.82	1.84	1.81	1.84	1.85	1.64	1.52	1.35	1.09	0.90	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70		
M.S. Kugel L2M3.ernd	12.69	11.95	0.85	0.98	0.88	0.69	0.81	0.83	0.94	1.07	1.11	1.31	1.44	1.51	1.58	1.75	1.85	1.85	1.88	1.84	1.74	1.52	1.30	1.11	0.87	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	
M.S. Kugel L2M2.ernd	13.85	15.61	0.51	0.71	0.81	0.73	0.77	0.98	0.90	0.96	1.04	1.13	1.31	1.45	1.48	1.68	1.80	1.91	1.87	1.88	1.78	1.76	1.53	1.31	1.13	0.87	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	
M.S. Kugel L2M1.ernd	9.42	17.95	0.88	0.96	0.92	0.64	0.53	0.82	0.82	0.88	0.95	1.10	1.29	1.41	1.61	1.72	1.81	1.85	1.86	1.86	1.81	1.72	1.50	1.31	1.11	0.88	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	
Median JB.L. L2	11.96	11.53	0.64	0.76	0.86	0.66	0.72	0.87	0.84	0.95	1.04	1.12	1.30	1.44	1.57	1.69	1.75	1.85	1.84	1.89	1.80	1.72	1.52	1.31	1.11	0.88	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	
Median JB.L. L1&L2	12.44	11.23	0.71	0.83	0.90	0.72	0.70	0.83	0.87	1.02	1.04	1.13	1.32	1.43	1.60	1.69	1.76	1.86	1.83	1.87	1.72	1.52	1.35	1.10	0.88	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	
M.S. Kugel L1M6.ernd	12.28	14.73	15.38	10.58	1.22	0.65	0.53	0.72	0.96	1.14	1.15	1.33	1.36	1.44	1.57	1.64	1.74	1.79	1.78	1.82	1.71	1.69	1.53	1.36	1.08	0.93	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	
M.S. Kugel L2M6.ernd	14.30	12.87	13.44	9.40	0.69	0.53	0.79	0.91	0.98	1.11	1.12	1.21	1.30	1.41	1.53	1.70	1.75	1.83	1.79	1.88	1.84	1.67	1.52	1.35	1.08	0.96	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	
M.S. Kugel L1M4.ernd	10.25	10.35	15.02	17.63	0.90	0.78	0.80	0.86	0.81	0.98	1.03	1.20	1.21	1.47	1.52	1.75	1.85	1.88	1.87	1.93	1.81	1.68	1.54	1.37	1.12	0.95	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	
M.S. Kugel L1M3.ernd	12.88	3.61	13.20	15.86	0.70	0.86	0.80	0.83	1.13	1.28	1.42	1.51	1.62	1.80	1.78	1.82	1.86	1.82	1.78	1.74	1.74	1.61	1.51	1.32	1.02	0.82	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
M.S. Kugel L1M2.ernd	11.97	17.76	11.63	9.94	0.95	0.72	0.52	0.82	0.87	0.94	1.07	1.18	1.38	1.40	1.50	1.68	1.71	1.85	1.83	1.81	1.81	1.70	1.57	1.31	1.03	0.83	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	
M.S. Kugel L1M1.ernd	12.57	11.21	13.87	14.04	0.92	0.74	0.58	0.88	0.82	0.94	1.10	1.19	1.38	1.40	1.54	1.68	1.80	1.84	1.82	1.86	1.79	1.68	1.54	1.38	1.03	0.83	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
M.S. Kugel L2M6.ernd	10.00	12.46	11.66	9.92	0.74	0.75	0.78	0.72	0.96	1.13	1.10	1.17	1.38	1.40	1.55	1.68	1.73	1.80	1.81	1.90	1.77	1.65	1.52	1.35	1.08	0.91	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	
M.S. Kugel L2M5.ernd	13.05	5.03	0.56	2.32	0.83	0.86	1.17	0.45	0.89	0.92	1.06	1.21	1.33	1.40	1.53	1.58	1.68	1.80	1.87	1.79	1.83	1.80	1.65	1.49	1.33	1.07	0.93	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
M.S. Kugel L2M4.ernd	6.09	10.09	11.91	8.05	1.12	1.15	0.36	0.93	0.95	1.04	1.04	1.16	1.36	1.65	1.57	1.60	1.66	1.79	1.83	1.86	1.88	1.80	1.73	1.58	1.30	1.07	0.93	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
M.S. Kugel L2M3.ernd	15.10	16.68	0.77	1.20	0.90	1.01	1.20	0.77	0.90	0.94	1.07	1.07	1.34	1.49	1.55	1.70	1.74	1.90	1.92	1.88	1.82	1.68	1.48	1.37	1.09	0.95	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
M.S. Kugel L2M2.ernd	17.11	22.76	13.38	2.43	0.65	0.86	0.90	0.77	0.85	1.17	1.18	1.19	1.33	1.46	1.51	1.70	1.74	1.92	1.93	1.83	1.75	1.68	1.48	1.30	1.11	0.95	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
M.S. Kugel L2M1.ernd	8.13	4.63	5.65	10.40	0.61	0.78	1.07	0.58	0.86	0.91	0.92	1.14	1.27	1.40	1.55	1.67	1.79	1.88	1.85	1.64	1.56	1.37	1.17	0.98	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	
Median Kugel L2	11.53	11.28	8.66	5.24	0.86	0.86	0.99	0.77	0.90	0.99	1.07	1.17	1.34	1.43	1.55	1.64	1.77	1.85	1.80	1.88	1.80	1.67	1.51	1.34	1.09	0.94	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
Median Kugel L1&L2	12.05	11.49	11.26	8.64	0.89	0.80	0.78	0.80	0.88	0.96	1.08	1.18	1.33	1.44	1.55	1.66	1.78	1.85	1.81	1.87	1.80	1.67	1.52	1.35	1.09	0.94	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67

(a) 0 Grad Stellung

Abbildung B.1.: Messdaten und Berechnung der Medianwerte jeder Messreihe im DCPS

Grad	25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz	
Messdaten mit markierten Ausreißerdaten	13.18	10.70	10.03	0.58	1.10	0.77	0.80	0.99	0.99	1.00	1.04	1.16	1.38	1.50	1.63	1.70	1.82	1.90	1.92	1.86	1.77	1.72	1.54	1.34	1.09	0.89	0.71	
Mittl.-JBL_L1	13.18	10.70	10.03	0.58	1.10	0.77	0.80	0.99	0.99	1.00	1.04	1.16	1.38	1.50	1.63	1.70	1.82	1.90	1.92	1.86	1.77	1.72	1.54	1.34	1.09	0.89	0.71	
Mittl.-JBL_L1&L2	12.38	10.87	0.74	0.84	0.85	0.85	0.91	0.74	0.76	0.80	0.91	1.10	1.04	1.15	1.33	1.49	1.68	1.78	1.87	1.82	1.86	1.78	1.71	1.52	1.32	1.10	0.88	0.67

Grad	25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz	
Korrigierte Messdaten ohne Ausreißer und Berechnung der entsprechenden arithmetischen Mittelwerte	13.18	10.70	10.03	0.58	1.10	0.77	0.80	0.99	0.99	1.00	1.04	1.16	1.38	1.50	1.63	1.70	1.82	1.90	1.92	1.86	1.77	1.72	1.54	1.34	1.09	0.89	0.71	
Mittl.-JBL_L1	13.18	10.70	10.03	0.58	1.10	0.77	0.80	0.99	0.99	1.00	1.04	1.16	1.38	1.50	1.63	1.70	1.82	1.90	1.92	1.86	1.77	1.72	1.54	1.34	1.09	0.89	0.71	
Mittl.-JBL_L1&L2	12.38	10.87	0.74	0.84	0.85	0.85	0.91	0.74	0.76	0.80	0.91	1.10	1.04	1.15	1.33	1.49	1.68	1.78	1.87	1.82	1.86	1.78	1.71	1.52	1.32	1.10	0.88	0.67

(b) 0 Grad Stellung

Messdatenausreißer und Berechnung des arithmetischen Mittelwertes jeder Messreihe im DCPS

10 Grad		25 Hz		50 Hz		100 Hz		150 Hz		200 Hz		250 Hz		315 Hz		400 Hz		500 Hz		630 Hz		800 Hz		1000 Hz	
Beschreibung	10 Hz	20 Hz	31.5 Hz	50 Hz	70 Hz	100 Hz	140 Hz	200 Hz	280 Hz	400 Hz	560 Hz	800 Hz	1120 Hz	1600 Hz	2240 Hz	3150 Hz	4480 Hz	6300 Hz	8800 Hz	12300 Hz	17000 Hz	23500 Hz	32500 Hz	44800 Hz	60500 Hz
MLS 10 JBL L1M6.emd	12.67	13.58	14.51	15.46	16.43	17.42	18.43	19.45	20.48	21.52	22.57	23.63	24.70	25.78	26.87	27.97	29.08	30.20	31.33	32.47	33.62	34.78	35.95	37.13	38.32
MLS 10 JBL L1M5.emd	12.67	13.58	14.51	15.46	16.43	17.42	18.43	19.45	20.48	21.52	22.57	23.63	24.70	25.78	26.87	27.97	29.08	30.20	31.33	32.47	33.62	34.78	35.95	37.13	38.32
MLS 10 JBL L1M4.emd	12.67	13.58	14.51	15.46	16.43	17.42	18.43	19.45	20.48	21.52	22.57	23.63	24.70	25.78	26.87	27.97	29.08	30.20	31.33	32.47	33.62	34.78	35.95	37.13	38.32
MLS 10 JBL L1M3.emd	12.67	13.58	14.51	15.46	16.43	17.42	18.43	19.45	20.48	21.52	22.57	23.63	24.70	25.78	26.87	27.97	29.08	30.20	31.33	32.47	33.62	34.78	35.95	37.13	38.32
MLS 10 JBL L1M2.emd	12.67	13.58	14.51	15.46	16.43	17.42	18.43	19.45	20.48	21.52	22.57	23.63	24.70	25.78	26.87	27.97	29.08	30.20	31.33	32.47	33.62	34.78	35.95	37.13	38.32
MLS 10 JBL L1M1.emd	12.67	13.58	14.51	15.46	16.43	17.42	18.43	19.45	20.48	21.52	22.57	23.63	24.70	25.78	26.87	27.97	29.08	30.20	31.33	32.47	33.62	34.78	35.95	37.13	38.32
Mittl. JBL_L1	12.98	13.79	14.63	15.49	16.37	17.26	18.16	19.07	19.99	20.92	21.86	22.81	23.77	24.74	25.72	26.70	27.69	28.68	29.68	30.68	31.68	32.68	33.68	34.68	35.68
MLS 10 JBL L2M6.emd	12.79	13.07	13.35	13.64	13.93	14.22	14.51	14.80	15.09	15.38	15.67	15.96	16.25	16.54	16.83	17.12	17.41	17.70	17.99	18.28	18.57	18.86	19.15	19.44	19.73
MLS 10 JBL L2M5.emd	12.79	13.07	13.35	13.64	13.93	14.22	14.51	14.80	15.09	15.38	15.67	15.96	16.25	16.54	16.83	17.12	17.41	17.70	17.99	18.28	18.57	18.86	19.15	19.44	19.73
MLS 10 JBL L2M4.emd	12.79	13.07	13.35	13.64	13.93	14.22	14.51	14.80	15.09	15.38	15.67	15.96	16.25	16.54	16.83	17.12	17.41	17.70	17.99	18.28	18.57	18.86	19.15	19.44	19.73
MLS 10 JBL L2M3.emd	12.79	13.07	13.35	13.64	13.93	14.22	14.51	14.80	15.09	15.38	15.67	15.96	16.25	16.54	16.83	17.12	17.41	17.70	17.99	18.28	18.57	18.86	19.15	19.44	19.73
MLS 10 JBL L2M2.emd	12.79	13.07	13.35	13.64	13.93	14.22	14.51	14.80	15.09	15.38	15.67	15.96	16.25	16.54	16.83	17.12	17.41	17.70	17.99	18.28	18.57	18.86	19.15	19.44	19.73
MLS 10 JBL L2M1.emd	12.79	13.07	13.35	13.64	13.93	14.22	14.51	14.80	15.09	15.38	15.67	15.96	16.25	16.54	16.83	17.12	17.41	17.70	17.99	18.28	18.57	18.86	19.15	19.44	19.73
Mittl. JBL_L2	13.77	14.58	15.39	16.20	17.01	17.82	18.63	19.44	20.25	21.06	21.87	22.68	23.49	24.30	25.11	25.92	26.73	27.54	28.35	29.16	29.97	30.78	31.59	32.40	33.21
Mittl. Kugel_L1&L2	13.77	14.58	15.39	16.20	17.01	17.82	18.63	19.44	20.25	21.06	21.87	22.68	23.49	24.30	25.11	25.92	26.73	27.54	28.35	29.16	29.97	30.78	31.59	32.40	

10 Grad		25 Hz		50 Hz		100 Hz		150 Hz		200 Hz		250 Hz		315 Hz		400 Hz		500 Hz		630 Hz		800 Hz		1000 Hz	
Beschreibung	10 Hz	20 Hz	31.5 Hz	50 Hz	70 Hz	100 Hz	140 Hz	200 Hz	280 Hz	400 Hz	560 Hz	800 Hz	1120 Hz	1600 Hz	2240 Hz	3150 Hz	4480 Hz	6300 Hz	8800 Hz	12300 Hz	17000 Hz	23500 Hz	32500 Hz	44800 Hz	60500 Hz
MLS 10 Kugel L1M6.emd	12.99	13.80	14.61	15.42	16.23	17.04	17.85	18.66	19.47	20.28	21.09	21.90	22.71	23.52	24.33	25.14	25.95	26.76	27.57	28.38	29.19	30.00	30.81	31.62	32.43
MLS 10 Kugel L1M5.emd	12.99	13.80	14.61	15.42	16.23	17.04	17.85	18.66	19.47	20.28	21.09	21.90	22.71	23.52	24.33	25.14	25.95	26.76	27.57	28.38	29.19	30.00	30.81	31.62	32.43
MLS 10 Kugel L1M4.emd	12.99	13.80	14.61	15.42	16.23	17.04	17.85	18.66	19.47	20.28	21.09	21.90	22.71	23.52	24.33	25.14	25.95	26.76	27.57	28.38	29.19	30.00	30.81	31.62	32.43
MLS 10 Kugel L1M3.emd	12.99	13.80	14.61	15.42	16.23	17.04	17.85	18.66	19.47	20.28	21.09	21.90	22.71	23.52	24.33	25.14	25.95	26.76	27.57	28.38	29.19	30.00	30.81	31.62	32.43
MLS 10 Kugel L1M2.emd	12.99	13.80	14.61	15.42	16.23	17.04	17.85	18.66	19.47	20.28	21.09	21.90	22.71	23.52	24.33	25.14	25.95	26.76	27.57	28.38	29.19	30.00	30.81	31.62	32.43
MLS 10 Kugel L1M1.emd	12.99	13.80	14.61	15.42	16.23	17.04	17.85	18.66	19.47	20.28	21.09	21.90	22.71	23.52	24.33	25.14	25.95	26.76	27.57	28.38	29.19	30.00	30.81	31.62	32.43
Mittl. Kugel_L1	13.29	14.10	14.91	15.72	16.53	17.34	18.15	18.96	19.77	20.58	21.39	22.20	23.01	23.82	24.63	25.44	26.25	27.06	27.87	28.68	29.49	30.30	31.11	31.92	32.73
Mittl. Kugel_L1&L2	13.29	14.10	14.91	15.72	16.53	17.34	18.15	18.96	19.77	20.58	21.39	22.20	23.01	23.82	24.63	25.44	26.25	27.06	27.87	28.68	29.49	30.30	31.11	31.92	32.73

(d) 10 Grad Stellung

Messdatenausreißer und Berechnung des arithmetischen Mittelwertes jeder Messreihe im DCPS

Messdaten der einzelnen Mikrofraktionen für beide Lautsprecher und Berechnung der entsprechenden Medianwerte

	25Hz	31Hz	38Hz	45Hz	50Hz	56Hz	63Hz	71Hz	80Hz	90Hz	100Hz	112Hz	125Hz	140Hz	160Hz	180Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz									
MLS 20_Kugel_L1M6.emd	0.00	0.05	0.03	0.26	18.64	-0.04	0.02	-0.06	0.10	0.15	0.06	0.08	0.04	-0.01	-0.06	-0.03	-0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	-0.02	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
MLS 20_Kugel_L1M5.emd	-0.14	-0.07	-0.01	-0.04	-0.18	-0.14	0.28	0.06	0.11	0.07	-0.06	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02	0.00	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
MLS 20_Kugel_L1M4.emd	0.00	-0.03	0.01	0.02	16.68	0.02	-0.02	0.27	-0.03	0.11	0.08	-0.03	-0.01	0.03	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
MLS 20_Kugel_L1M3.emd	-0.05	0.00	0.23	0.69	0.01	0.01	0.27	-0.01	-0.09	0.02	0.17	-0.07	0.20	0.07	-0.01	-0.02	-0.04	-0.01	0.02	-0.04	-0.01	0.02	-0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
MLS 20_Kugel_L1M2.emd	0.04	0.16	-0.01	-0.02	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15	0.10	-0.15		
MLS 20_Kugel_L1M1.emd	0.23	0.00	-0.05	-0.28	-0.11	-0.01	-0.01	-0.13	-0.16	0.02	-0.12	-0.10	0.08	0.02	-0.01	-0.01	0.08	0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02		
MLS 20_Kugel_L2M6.emd	0.10	0.03	0.08	0.10	0.06	0.03	0.25	0.03	0.08	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
MLS 20_Kugel_L2M5.emd	-0.34	-0.21	0.31	0.63	-0.05	-0.03	-0.14	0.06	-0.03	-0.03	-0.03	0.04	0.02	0.05	0.01	-0.12	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
MLS 20_Kugel_L2M4.emd	0.39	0.07	0.35	-0.82	-0.06	0.11	0.51	0.14	-0.05	-0.05	-0.14	0.04	0.04	0.02	0.05	0.01	0.06	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MLS 20_Kugel_L2M3.emd	-0.45	-0.03	0.01	0.70	5.30	0.11	-0.24	0.02	-0.06	0.07	0.04	0.02	-0.02	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
MLS 20_Kugel_L2M2.emd	-0.10	-0.04	-0.01	-0.10	0.06	-0.05	-0.23	0.02	-0.04	-0.04	-0.21	-0.02	-0.02	-0.10	-0.07	0.00	0.04	0.01	0.06	0.02	-0.03	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
MLS 20_Kugel_L2M1.emd	-0.10	-0.04	-0.01	-0.10	0.06	-0.05	-0.23	0.02	-0.04	-0.04	-0.21	-0.02	-0.02	-0.10	-0.07	0.00	0.04	0.01	0.06	0.02	-0.03	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	

Messdaten welche bereits im Voraus aus der Messdatenauswertung ausgeschlossen werden

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe enthalten

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Prozentuale Abweichung der einzelnen Messwerte vom Median zur Bestimmung der Ausreißerdaten

	25Hz	31Hz	38Hz	45Hz	50Hz	56Hz	63Hz	71Hz	80Hz	90Hz	100Hz	112Hz	125Hz	140Hz	160Hz	180Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz								
MLS 20_Kugel_L1M6.emd	-0.04	-0.05	-0.42	-0.36	0.17	0.13	0.03	0.10	-0.14	0.04	-0.01	0.02	0.04	-0.04	-0.03	-0.02	0.04	0.08	0.08	0.08	0.04	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
MLS 20_Kugel_L1M5.emd	-0.07	-0.29	-0.55	-0.33	0.13	0.03	0.10	-0.14	0.04	-0.01	0.02	0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	0.04	0.08	0.08	0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
MLS 20_Kugel_L1M4.emd	0.25	0.34	0.42	-0.03	-0.09	-0.45	-0.12	0.34	-0.02	-0.02	0.20	-0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MLS 20_Kugel_L1M3.emd	0.20	-0.14	-0.45	0.14	0.09	-0.03	0.55	-0.13	0.08	0.05	0.16	0.04	0.06	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
MLS 20_Kugel_L1M2.emd	-0.59	0.05	6.87	0.40	-0.37	-0.05	-0.13	-0.15	0.02	0.06	-0.01	-0.07	0.01	0.03	-0.03	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	
MLS 20_Kugel_L1M1.emd	0.04	0.34	5.74	-0.05	-0.19	0.04	-0.23	0.13	-0.07	0.06	-0.04	-0.04	-0.03	-0.02	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
MLS 20_Kugel_L2M6.emd	-0.03	0.00	-0.13	-0.08	0.12	0.06	-0.05	0.10	0.32	0.18	-0.01	-0.10	0.18	0.10	0.01	0.06	-0.05	-0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
MLS 20_Kugel_L2M5.emd	0.03	-0.21	-0.32	-0.14	-0.06	-0.23	-0.09	-0.16	-0.06	0.01	0.01	-0.03	-0.07	-0.03	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03
MLS 20_Kugel_L2M4.emd	0.08	0.00	0.13	-0.04	0.09	-0.06	0.05	-0.01	0.05	0.03	0.01	0.05	0.03	0.01	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
MLS 20_Kugel_L2M3.emd	0.02	-0.24	-0.27	0.13	-0.10	-0.18	0.41	-0.05	-0.01	-0.05	0.11	0.03	-0.01	-0.03	-0.05	0.01	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MLS 20_Kugel_L2M2.emd	-0.02	0.26	0.45	0.04	-0.02	0.36	0.19	0.13	0.05	0.04	-0.06	-0.07	0.02	0.03	0.04	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MLS 20_Kugel_L2M1.emd	-0.19	0.38	0.27	0.10	0.02	0.18	-0.25	0.02	0.01	-0.06	-0.04	0.03	-0.05	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MLS 20_Kugel_L1M6.emd	0.00	0.05	0.03	0.26	18.64	-0.04	0.02	-0.06	0.10	0.15	0.06	0.08	0.04	-0.01	-0.06	-0.03	-0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MLS 20_Kugel_L1M5.emd	-0.14	-0.07	-0.01	-0.04	-0.18	-0.14	0.28	0.06	0.11	0.07	-0.06	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02																										

Messdaten mit markierten Ausreißerdaten		25Hz	51Hz	101Hz	151Hz	201Hz	251Hz	301Hz	351Hz	401Hz	451Hz	501Hz	5500Hz	6000Hz	6500Hz	7000Hz	7500Hz	8000Hz	8500Hz	9000Hz	9500Hz	10000Hz						
MIS 20_Grad_Eilwanne	Beschreibung	13.03	10.72	1.04	0.64	1.19	0.93	0.79	0.93	0.93	0.93	0.93	1.07	1.21	1.31	1.37	1.41	1.33	1.30	1.24	1.19	1.08	0.91	0.77	0.61			
MIS 20_JBL_L1M6.emd	T30 U1/Frd Oct1 [6]	12.71	2.31	1.04	1.03	1.15	0.91	1.06	0.92	0.90	0.95	1.11	1.15	1.31	1.30	1.22	1.23	1.30	1.27	1.18	1.07	0.90	0.79	0.61	0.45			
MIS 20_JBL_L1M5.emd	T30 U1/Frd Oct1 [5]	16.99	15.03	2.53	0.97	0.92	0.48	0.62	1.07	0.77	0.89	1.13	1.22	1.27	1.33	1.29	1.27	1.23	1.27	1.23	1.11	0.92	0.78	0.63	0.48			
MIS 20_JBL_L1M4.emd	T30 U1/Frd Oct1 [4]	16.27	9.71	0.79	1.14	1.11	0.85	1.09	0.70	0.85	0.95	1.10	0.96	1.01	0.96	1.14	1.22	1.29	1.30	1.31	1.23	1.11	0.90	0.75	0.60			
MIS 20_JBL_L1M3.emd	T30 U1/Frd Oct1 [3]	5.60	11.75	14.04	1.41	0.64	0.83	0.61	0.68	0.80	0.96	0.94	0.86	0.96	1.02	1.07	1.13	1.26	1.27	1.23	1.19	1.08	0.92	0.75	0.64			
MIS 20_JBL_L1M2.emd	T30 U1/Frd Oct1 [2]	14.18	15.07	12.02	0.95	0.82	0.91	0.54	0.90	0.73	0.85	0.91	0.90	1.04	1.26	1.31	1.35	1.29	1.24	1.26	1.18	1.10	0.93	0.76	0.63			
MIS 20_JBL_L1M1.emd	T30 U1/Frd Oct1 [1]	13.13	10.77	5.20	1.02	0.97	0.82	0.79	0.83	0.78	0.90	0.99	0.93	1.10	1.18	1.22	1.33	1.32	1.28	1.25	1.20	1.09	0.91	0.77	0.62			
MIS 20_JBL_L2M6.emd	T30 U1/Frd Oct1 [6]	12.25	10.62	0.76	0.78	1.00	0.73	0.71	0.88	1.00	1.05	0.92	0.83	18.90	21.00	1.12	1.25	1.19	1.27	1.33	1.27	1.26	1.21	1.16	1.09	0.91	0.77	0.61
MIS 20_JBL_L2M5.emd	T30 U1/Frd Oct1 [5]	12.90	0.99	0.59	0.74	0.84	0.53	0.68	0.67	0.71	0.90	0.94	0.88	1.01	1.09	1.16	1.24	1.26	1.31	1.25	1.23	1.23	1.22	1.11	1.01	0.90	0.78	0.59
MIS 20_JBL_L2M4.emd	T30 U1/Frd Oct1 [4]	13.54	10.67	0.98	0.82	0.98	0.65	0.79	0.78	0.69	0.88	0.98	0.98	0.98	0.98	1.01	1.16	1.29	1.31	1.25	1.30	1.27	1.24	1.21	1.07	0.94	0.77	0.61
MIS 20_JBL_L2M3.emd	T30 U1/Frd Oct1 [3]	12.78	8.12	0.64	0.96	0.81	0.58	1.08	0.76	0.75	0.93	1.03	0.95	0.97	1.01	1.06	1.21	1.30	1.28	1.21	1.20	1.08	0.91	0.75	0.61	0.45		
MIS 20_JBL_L2M2.emd	T30 U1/Frd Oct1 [2]	12.37	13.37	1.26	0.88	0.94	0.89	0.90	0.79	0.93	0.92	0.87	0.86	0.99	1.08	1.15	1.17	1.27	1.30	1.28	1.29	1.26	1.28	1.20	1.08	0.89	0.78	0.63
MIS 20_JBL_L2M1.emd	T30 U1/Frd Oct1 [1]	10.17	14.72	1.10	0.84	0.92	0.84	0.88	0.76	0.86	0.94	0.95	0.93	1.10	1.13	1.21	1.27	1.31	1.28	1.29	1.26	1.26	1.23	1.11	0.93	0.77	0.62	
MIS 20_JBL_L1&L2	Mittl_JBL_L2	12.34	9.75	0.89	0.85	0.90	0.70	0.78	0.80	0.78	0.90	0.94	0.94	1.04	1.11	1.19	1.25	1.29	1.28	1.26	1.24	1.20	1.09	0.91	0.77	0.61		
MIS 20_Kugel_L1&L2	Mittl_JBL_L1&L2	12.73	10.28	0.94	0.78	0.78	0.80	0.78	0.82	0.78	0.86	0.96	0.92	1.04	1.11	1.18	1.28	1.31	1.28	1.28	1.24	1.20	1.09	0.91	0.77	0.61		
MIS 20_Kugel_L1M6.emd	T30 U1/Frd Oct1 [6]	12.91	15.12	14.06	15.18	16.84	0.76	0.67	0.71	0.88	1.06	0.95	1.00	1.07	1.13	1.21	1.28	1.33	1.32	1.28	1.25	1.20	1.09	0.91	0.77	0.61		
MIS 20_Kugel_L1M5.emd	T30 U1/Frd Oct1 [5]	11.07	13.39	13.48	11.53	11.48	0.84	0.71	0.81	0.89	0.96	0.95	0.94	1.01	1.06	1.12	1.18	1.27	1.29	1.28	1.26	1.21	1.17	1.09	0.91	0.79	0.62	
MIS 20_Kugel_L1M4.emd	T30 U1/Frd Oct1 [4]	12.94	13.85	13.78	12.36	15.18	0.80	0.64	0.97	0.78	1.02	0.97	0.94	0.93	0.97	1.12	1.24	1.32	1.33	1.27	1.29	1.25	1.26	1.20	1.11	0.90	0.81	0.63
MIS 20_Kugel_L1M3.emd	T30 U1/Frd Oct1 [3]	12.26	14.34	16.69	13.14	0.87	0.96	0.85	0.73	0.94	1.05	0.86	1.03	1.07	1.16	1.27	1.27	1.26	1.32	1.29	1.20	1.10	0.94	0.80	0.81	0.63		
MIS 20_Kugel_L1M2.emd	T30 U1/Frd Oct1 [2]	13.42	16.58	13.59	11.78	0.73	0.87	0.56	0.56	0.71	0.90	0.84	0.90	0.92	0.96	0.98	1.20	1.37	1.29	1.27	1.27	1.26	1.19	1.08	0.90	0.80	0.66	
MIS 20_Kugel_L1M1.emd	T30 U1/Frd Oct1 [1]	15.87	14.34	12.94	8.72	0.85	0.78	0.57	0.64	0.82	0.81	0.81	0.99	0.93	1.04	1.20	1.29	1.31	1.30	1.27	1.29	1.28	1.24	1.10	0.95	0.81	0.59	
MIS 20_Kugel_L2M6.emd	T30 U1/Frd Oct1 [6]	13.08	14.60	14.12	12.12	5.86	0.78	0.71	0.76	0.80	0.93	0.91	0.92	0.95	1.00	1.08	1.18	1.29	1.32	1.28	1.30	1.26	1.18	1.10	0.92	0.80	0.66	
MIS 20_Kugel_L2M5.emd	T30 U1/Frd Oct1 [5]	11.86	12.20	13.74	7.16	0.85	0.77	0.29	0.55	0.88	1.14	1.06	0.85	0.89	1.01	1.17	1.27	1.29	1.28	1.31	1.30	1.25	1.21	1.09	0.93	0.82	0.62	
MIS 20_Kugel_L2M4.emd	T30 U1/Frd Oct1 [4]	14.05	12.33	0.72	1.62	0.81	0.78	0.05	0.54	0.87	0.95	1.01	0.84	1.09	1.00	1.06	1.21	1.32	1.27	1.23	1.26	1.23	1.10	0.91	0.81	0.60		
MIS 20_Kugel_L2M3.emd	T30 U1/Frd Oct1 [3]	7.08	9.47	16.79	10.62	0.94	0.75	0.41	0.75	0.89	0.92	0.96	1.04	1.06	1.07	1.01	1.36	1.34	1.31	1.28	1.28	1.27	1.23	1.10	0.91	0.81	0.59	
MIS 20_Kugel_L2M2.emd	T30 U1/Frd Oct1 [2]	13.90	12.62	8.24	1.17	0.84	0.86	1.07	0.69	0.80	0.89	0.85	0.95	1.06	1.03	1.12	1.22	1.28	1.31	1.28	1.33	1.26	1.20	1.18	1.08	0.90	0.80	0.59
MIS 20_Kugel_L2M1.emd	T30 U1/Frd Oct1 [1]	5.87	11.67	12.59	11.05	5.51	0.86	0.88	0.59	0.79	1.00	1.02	0.93	1.00	1.01	1.12	1.20	1.29	1.34	1.26	1.20	1.23	1.17	1.13	0.92	0.79	0.58	
MIS 20_Kugel_L1&L2	Mittl_Kugel_L2	10.40	11.69	10.84	6.25	1.67	0.79	0.71	0.69	0.84	0.97	0.95	0.90	1.00	1.01	1.08	1.17	1.30	1.31	1.31	1.28	1.25	1.25	1.21	1.10	0.92	0.81	0.63
MIS 20_Kugel_L1&L2	Mittl_Kugel_L1&L2	11.74	13.15	12.48	9.18	3.76	0.79	0.71	0.69	0.82	0.95	0.93	0.91	0.98	1.00	1.08	1.18	1.29	1.32	1.29	1.29	1.26	1.25	1.19	1.10	0.92	0.81	0.63

Korrigierte Messdaten ohne Ausreißer und Berechnung der entsprechenden arithmetischen Mittelwerte		25Hz	51Hz	101Hz	151Hz	201Hz	251Hz	301Hz	351Hz	401Hz	451Hz	501Hz	5500Hz	6000Hz	6500Hz	7000Hz	7500Hz	8000Hz	8500Hz	9000Hz	9500Hz	10000Hz						
MIS 20_Grad_Eilwanne	Beschreibung	13.03	10.72	1.04	0.64	1.19	0.93	0.79	0.93	0.93	0.93	1.07	1.21	1.31	1.37	1.41	1.33	1.30	1.24	1.19	1.08	0.91	0.77	0.61				
MIS 20_JBL_L1M6.emd	T30 U1/Frd Oct1 [6]	12.71	2.31	1.04	1.03	1.15	0.91	1.06	0.92	0.90	0.95	1.11	1.15	1.31	1.30	1.22	1.23	1.30	1.27	1.18	1.07	0.90	0.79	0.61				
MIS 20_JBL_L1M5.emd	T30 U1/Frd Oct1 [5]	16.99	15.03	2.53	0.97	0.92	0.48	0.62	1.07	0.77	0.89	1.13	1.22	1.27	1.33	1.29	1.27	1.23	1.22	1.10	0.92	0.78	0.63	0.48				
MIS 20_JBL_L1M4.emd	T30 U1/Frd Oct1 [4]	16.27	9.71	0.79	1.14	1.11	0.85	1.09	0.70	0.85	0.95	1.10	0.96	1.01	0.96	1.14	1.22	1.29	1.30	1.31	1.23	1.11	0.90	0.75	0.60			
MIS 20_JBL_L1M3.emd	T30 U1/Frd Oct1 [3]	5.60	11.75	14.04	1.41	0.64	0.83	0.61	0.68	0.80	0.96	0.94	0.86	0.96	1.02	1.07	1.13	1.26	1.27	1.23	1.19	1.08	0.92	0.75	0.64			
MIS 20_JBL_L1M2.emd	T30 U1/Frd Oct1 [2]	14.18	15.07	12.02	0.95	0.82	0.91	0.54	0.90	0.73	0.85	0.91	0.90	1.04	1.04	1.26	1.31	1.35	1.29	1.24	1.26	1.18	1.10	0.93	0.76	0.60		
MIS 20_JBL_L1M1.emd	T30 U1/Frd Oct1 [1]	13.13	10.77	5.20	1.02	0.97	0.82	0.79	0.83	0.78	0.90	0.99	0.93	1.10	1.18	1.22	1.33	1.32	1.28	1.25	1.20	1.09	0.91	0.77	0.62			
MIS 20_JBL_L2M6.emd	T30 U1/Frd Oct1 [6]	12.25	10.62	0.76	0.78	1.00	0.73	0.71	0.88	1.00	1.05	0.92	0.83	18.90	21.00	1.12	1.25	1.19	1.27	1.33	1.27	1.26	1.21	1.16	1.09	0.91	0.77	0.61
MIS 20_JBL_L2M5.emd	T30 U1/Frd Oct1 [5]	12.90	0.99	0.59	0.74	0.84	0.53	0.68	0.67	0.71	0.90	0.94	0.88	0.91	1.01	1.06	1.16	1.24	1.26	1.31	1.25	1.23	1.23	1.11	1.01	0.90	0.78	0.59
MIS 20_JBL_L2M4.emd	T30 U1/Frd Oct1 [4]	13.54	10.67	0.98	0.82	0.98	0.65	0.79	0.78	0.69	0.88	0.98	0.98	0.98	0.98	1.01	1.16	1.29	1.31	1.25	1.30	1.27	1.24	1.21	1.07	0.94	0.77	0.61
MIS 20_JBL_L2M3.emd	T30 U1/Frd Oct1 [3]	12.78	8.12	0.64	0.96	0.81	0.58	1.08	0.76	0.75	0.93	1.03	0.95	0.97	1.01	1.06	1.21	1.30	1.28	1.								

Messdaten mit markierten Ausreißerdaten																												
30-Grad_Eiliane	25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz	
MLS_3D_JBL_L1M6.emd	13.22	11.46	1.04	0.62	1.17	0.88	0.76	0.68	0.68	0.92	0.90	0.96	0.98	1.09	1.12	1.13	1.12	1.18	1.24	1.18	1.24	1.21	1.19	1.09	1.00	0.88	0.73	0.58
MLS_3D_JBL_L1M5.emd	12.21	6.91	1.00	1.05	1.13	0.97	1.06	0.98	0.79	0.77	0.96	1.00	0.88	0.92	0.98	1.03	1.07	1.19	1.19	1.19	1.21	1.19	1.09	1.00	0.88	0.73	0.57	0.52
MLS_3D_JBL_L1M4.emd	9.43	11.12	1.44	0.99	1.01	0.50	0.62	1.06	0.88	0.86	1.10	0.90	0.96	1.05	1.05	1.03	1.09	1.08	1.13	1.17	1.18	1.16	1.10	0.98	0.84	0.70	0.59	0.54
MLS_3D_JBL_L1M3.emd	9.22	8.96	0.79	1.13	1.12	0.78	1.12	0.52	0.89	1.00	1.13	0.90	0.89	1.01	1.07	1.17	1.15	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
MLS_3D_JBL_L1M2.emd	10.59	13.74	0.84	1.11	0.65	0.86	0.60	0.60	0.78	0.85	0.92	0.82	0.87	0.94	1.02	1.03	1.10	1.14	1.16	1.18	1.16	1.18	1.08	0.98	0.87	0.72	0.60	0.60
MLS_3D_JBL_L1M1.emd	15.07	15.95	0.88	0.93	0.80	0.91	0.51	0.93	0.77	0.80	0.91	0.88	0.90	0.91	0.98	1.01	1.03	1.12	1.18	1.25	1.21	1.07	1.03	0.87	0.71	0.59	0.59	0.59
Mittl_JBL_L1	11.62	11.36	0.96	0.97	0.98	0.82	0.78	0.78	0.80	0.87	0.99	0.91	0.91	0.91	0.91	1.00	1.05	1.09	1.12	1.12	1.17	1.21	1.20	1.08	1.00	0.86	0.72	0.59
MLS_3D_JBL_L2M6.emd	11.70	10.73	0.66	0.78	1.02	0.72	0.68	1.00	1.05	0.90	0.84	0.81	0.87	1.05	1.03	1.08	1.08	1.13	1.16	1.24	1.20	1.20	1.09	0.98	0.84	0.71	0.61	0.61
MLS_3D_JBL_L2M5.emd	12.03	3.35	0.60	0.69	0.85	0.58	0.73	0.67	0.71	0.88	0.94	1.02	0.87	0.98	1.01	1.06	1.01	1.10	1.08	1.11	1.20	1.20	1.11	0.97	0.86	0.73	0.63	0.63
MLS_3D_JBL_L2M4.emd	10.49	9.91	0.95	0.82	1.02	0.67	0.74	0.75	0.96	0.98	0.98	0.93	0.91	0.92	1.00	1.01	1.15	1.16	1.20	1.19	1.08	1.00	0.87	0.75	0.58	0.58	0.58	0.58
MLS_3D_JBL_L2M3.emd	13.91	13.98	0.57	0.96	0.79	0.60	1.04	0.72	0.77	0.72	1.02	0.91	0.96	0.95	1.05	1.12	1.12	1.16	1.19	1.21	1.21	1.21	1.08	0.94	0.86	0.72	0.63	0.63
MLS_3D_JBL_L2M2.emd	14.73	11.00	0.82	0.96	0.84	1.01	0.87	0.88	0.76	0.91	0.87	0.82	1.00	0.99	1.04	1.01	1.05	1.08	1.11	1.17	1.19	1.17	1.10	0.96	0.87	0.73	0.58	0.58
MLS_3D_JBL_L2M1.emd	14.45	9.80	0.95	0.82	0.94	0.74	0.98	0.74	0.85	0.88	0.95	0.91	0.97	1.04	1.01	1.05	1.10	1.16	1.23	1.21	1.16	1.04	0.99	0.90	0.74	0.63	0.63	0.63
Mittl_JBL_L2	12.82	9.80	0.78	0.86	0.90	0.72	0.79	0.78	0.79	0.89	0.93	0.91	0.93	0.96	1.00	1.03	1.06	1.10	1.13	1.17	1.21	1.19	1.09	0.96	0.87	0.73	0.63	0.63
Mittl_Kugel_L1&L2	12.22	10.58	0.87	0.91	0.94	0.77	0.79	0.78	0.79	0.88	0.96	0.92	0.94	1.00	1.04	1.04	1.04	1.11	1.13	1.17	1.21	1.20	1.08	0.98	0.87	0.72	0.59	0.59
MLS_3D_Kugel_L1M6.emd	11.20	8.89	10.20	11.14	11.59	0.69	0.64	0.76	0.89	1.06	0.94	1.03	0.94	1.03	1.07	1.14	1.12	1.19	1.25	1.16	1.24	1.20	1.09	0.96	0.86	0.77	0.57	0.57
MLS_3D_Kugel_L1M5.emd	15.60	10.58	13.69	11.72	11.74	0.69	0.76	0.79	0.89	0.95	0.94	1.03	0.94	1.03	1.07	1.14	1.12	1.19	1.25	1.16	1.24	1.20	1.09	0.96	0.86	0.77	0.57	0.57
MLS_3D_Kugel_L1M4.emd	16.62	8.39	14.30	11.54	4.21	0.80	0.63	0.98	0.80	1.05	0.98	0.89	0.90	0.90	1.06	1.11	1.12	1.15	1.16	1.20	1.19	1.08	1.00	0.87	0.75	0.58	0.58	0.58
MLS_3D_Kugel_L1M3.emd	8.72	4.72	13.60	10.33	8.59	0.84	0.96	0.85	0.73	0.94	1.00	0.86	1.01	0.99	1.02	1.01	1.13	1.12	1.15	1.21	1.19	1.08	0.97	0.85	0.74	0.57	0.57	0.57
MLS_3D_Kugel_L1M2.emd	12.36	10.51	13.54	11.24	0.70	0.86	0.57	0.65	0.76	0.91	0.78	0.89	0.91	1.08	1.06	1.11	1.12	1.14	1.23	1.20	1.14	1.09	1.00	0.88	0.76	0.57	0.57	0.57
MLS_3D_Kugel_L1M1.emd	11.79	10.35	14.02	10.19	0.94	0.81	0.88	0.82	0.80	0.79	0.94	0.82	0.98	0.85	0.75	1.14	1.11	1.15	1.18	1.24	1.20	1.14	1.09	1.00	0.86	0.76	0.57	0.57
Mittl_Kugel_L1	12.68	8.91	13.23	11.03	4.45	0.78	0.69	0.82	0.82	0.94	0.89	0.90	0.91	0.95	0.96	0.98	1.10	1.12	1.17	1.22	1.18	1.09	0.98	0.86	0.75	0.57	0.57	
MLS_3D_Kugel_L2M6.emd	11.37	13.55	12.76	4.72	0.70	0.79	0.68	0.57	0.87	1.15	1.08	0.84	0.89	0.97	0.97	1.07	1.10	1.18	1.12	1.14	1.18	1.19	1.12	0.98	0.88	0.76	0.57	0.57
MLS_3D_Kugel_L2M5.emd	16.24	9.38	0.56	1.76	0.88	0.93	1.05	0.51	0.85	0.92	0.98	1.01	0.77	1.07	1.08	1.11	1.17	1.21	1.21	1.21	1.15	1.09	1.02	0.86	0.76	0.57	0.57	
MLS_3D_Kugel_L2M4.emd	10.84	12.07	14.09	2.90	0.80	0.73	0.97	0.46	0.89	0.94	1.02	0.93	1.01	1.03	0.88	1.04	1.12	1.11	1.16	1.16	1.27	1.19	1.11	0.97	0.87	0.75	0.58	0.58
MLS_3D_Kugel_L2M3.emd	4.96	10.51	11.87	12.59	6.49	0.92	1.09	0.67	0.75	0.87	0.82	0.94	0.96	0.96	0.94	1.02	1.11	1.12	1.09	1.19	1.23	1.21	1.09	0.99	0.88	0.76	0.57	0.57
MLS_3D_Kugel_L2M2.emd	12.17	9.76	9.86	3.56	0.67	0.90	0.88	0.57	0.79	0.99	1.01	0.88	0.95	0.90	1.01	1.04	1.14	1.16	1.13	1.18	1.18	1.20	1.07	0.98	0.87	0.78	0.56	0.56
MLS_3D_Kugel_L2M1.emd	12.25	11.81	9.72	3.79	0.91	0.81	0.63	0.80	0.80	0.89	0.81	0.94	0.92	0.94	1.06	1.06	1.06	1.09	1.09	1.15	1.21	1.20	1.18	0.96	0.87	0.75	0.57	0.57
Mittl_Kugel_L2	11.30	11.18	9.81	4.89	1.74	0.85	0.91	0.57	0.83	0.96	0.92	0.90	0.96	0.96	1.02	1.10	1.12	1.12	1.17	1.21	1.19	1.11	0.98	0.87	0.76	0.57	0.57	
Mittl_Kugel_L1&L2	11.99	10.04	11.52	7.96	3.10	0.81	0.80	0.69	0.82	0.95	0.92	0.90	0.94	0.96	1.00	1.10	1.12	1.12	1.17	1.21	1.17	1.18	1.10	0.98	0.87	0.76	0.57	0.57

Korrigierte Messdaten ohne Ausreißer und Berechnung der entsprechenden arithmetischen Mittelwerte																												
30-Grad_Eiliane	25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz	
MLS_3D_JBL_L1M6.emd	13.22	11.46	1.04	0.62	1.17	0.88	0.76	0.68	0.68	0.92	0.90	0.96	0.98	1.09	1.12	1.13	1.12	1.18	1.24	1.18	1.24	1.21	1.19	1.09	1.00	0.88	0.73	0.58
MLS_3D_JBL_L1M5.emd	12.21	6.91	1.00	1.05	1.13	0.97	1.06	0.98	0.79	0.77	0.96	1.00	0.88	0.92	0.98	1.03	1.07	1.19	1.19	1.21	1.19	1.09	1.00	0.88	0.73	0.57	0.52	
MLS_3D_JBL_L1M4.emd	9.43	11.12	1.44	0.99	1.01	0.50	0.62	1.06	0.88	0.86	1.10	0.90	0.96	1.05	1.05	1.03	1.09	1.08	1.13	1.17	1.18	1.16	1.10	0.98	0.84	0.70	0.59	
MLS_3D_JBL_L1M3.emd	9.22	8.96	0.79	1.13	1.12	0.78	1.12	0.52	0.89	1.00	1.13	0.90	0.90	1.01	1.07	1.17	1.15	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	
MLS_3D_JBL_L1M2.emd	10.59	13.74	0.84	1.11	0.65	0.86	0.60	0.60	0.78	0.85	0.92	0.82	0.87	0.94	1.02	1.03	1.10	1.14	1.16	1.18	1.16	1.18	1.08	0.98	0.87	0.72	0.60	
MLS_3D_JBL_L1M1.emd	15.07	15.95	0.88	0.93	0.80	0.91	0.51	0.93	0.77	0.80	0.91	0.88	0.90	0.91	0.98	1.01	1.03	1.10	1.12	1.18	1.25	1.21	1.07	1.03	0.87	0.71	0.59	
Mittl_JBL_L1	11.62	11.36	0.96	0.97	0.98	0.82	0.78	0.78	0.80	0.87	0.99	0.91	0.91	0.91	0.91	1.00	1.05	1.09	1.12	1.12	1.17	1.21	1.20	1.08	1.00	0.86	0.72	0.59
MLS_3D_JBL_L2M6.emd	11.70	10.73	0.66	0.78	1.02	0.72	0.68	1.00	1.05	0.90	0.84	0.81	0.87	1.05	1.03	1.08	1.08	1.13	1.16	1.24	1.20	1.20	1.09	0.98	0.84	0.71	0.61	
MLS_3D_JBL_L2M5.emd	12.03	3.35	0.60	0.69	0.85	0.58																						

Messdaten der einzelnen Mikropositionen für beide Lautsprecher und Berechnung der entsprechenden Medianwerte

	25Hz	50Hz	60Hz	80Hz	100Hz	125Hz	150Hz	180Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz			
M.S. 40_Kugel_L1M6.emd	11.91	12.05	11.77	12.05	11.88	12.01	11.76	11.99	12.04	11.90	12.00	11.78	11.96	12.01	11.81	12.00	11.93	11.95	12.00	11.94	12.00	11.95	12.00	11.95	12.00	11.95	12.00	11.95	
M.S. 40_Kugel_L1M5.emd	14.33	7.36	1.20	1.02	1.11	0.94	1.10	0.68	0.79	0.78	0.97	0.96	0.89	0.87	0.96	0.93	0.97	1.05	1.12	1.13	1.09	1.03	0.96	0.96	0.82	0.69	0.58	0.58	0.58
M.S. 40_Kugel_L1M4.emd	14.09	9.84	1.40	1.06	1.03	0.52	0.64	1.05	0.85	1.09	0.91	11.29	0.90	0.95	1.01	1.07	1.11	1.16	1.10	1.07	0.96	0.82	0.86	0.81	0.69	0.69	0.56	0.56	
M.S. 40_Kugel_L1M3.emd	10.69	8.70	0.88	1.15	1.14	0.85	1.12	0.51	0.80	1.00	1.09	0.92	0.94	1.05	1.01	0.93	1.00	1.09	1.01	0.99	1.01	0.92	0.82	0.82	0.70	0.57	0.57		
M.S. 40_Kugel_L1M2.emd	13.29	13.06	0.86	0.92	0.93	0.53	0.90	0.80	0.80	0.88	0.93	0.91	0.95	0.87	0.92	1.04	1.05	1.15	1.17	1.07	1.06	1.02	0.94	0.81	0.68	0.58	0.57		
M.S. 40_Kugel_L1M1.emd	12.60	10.94	0.97	1.04	1.07	0.88	0.70	0.79	0.78	0.80	0.88	0.93	0.91	0.91	0.96	0.93	1.00	1.03	1.12	1.13	1.09	1.02	0.95	0.82	0.69	0.57			
M.S. 40_Kugel_L2M6.emd	9.13	12.75	0.70	0.77	0.97	0.72	0.74	0.86	0.96	1.05	0.91	0.85	0.95	0.93	0.95	1.00	1.06	1.11	1.22	1.05	1.00	0.94	0.83	0.70	0.56	0.56			
M.S. 40_Kugel_L2M5.emd	15.30	2.92	0.59	0.76	0.85	0.58	0.73	0.65	0.68	0.88	0.80	0.80	0.81	0.88	0.93	0.89	0.90	0.99	1.04	1.13	1.05	1.01	0.96	0.82	0.69	0.57	0.56		
M.S. 40_Kugel_L2M4.emd	13.84	10.29	0.83	0.84	0.67	0.83	1.07	0.74	0.77	0.96	0.96	0.90	0.87	0.91	0.97	0.95	0.99	1.07	1.12	1.11	1.03	1.01	0.94	0.81	0.70	0.56	0.56		
M.S. 40_Kugel_L2M3.emd	12.69	4.21	0.63	0.96	0.83	0.81	0.60	0.97	0.74	0.72	0.82	0.89	0.88	0.91	0.92	0.90	0.95	1.05	1.16	1.13	1.09	1.00	0.92	0.80	0.68	0.56	0.56		
M.S. 40_Kugel_L2M2.emd	9.76	8.51	0.51	0.86	0.83	0.88	0.88	0.88	0.75	0.90	0.85	0.90	0.92	0.90	0.93	0.92	0.99	1.00	1.02	1.12	1.09	1.06	1.01	0.95	0.81	0.71	0.56		
M.S. 40_Kugel_L2M1.emd	15.98	11.68	0.87	0.92	0.86	0.56	0.80	0.74	0.83	0.89	0.95	0.88	0.92	0.99	0.97	0.99	1.00	1.02	1.12	1.09	1.06	1.01	0.95	0.81	0.71	0.56			
Median JBL L2	13.27	9.40	0.66	0.85	0.88	0.70	0.79	0.77	0.75	0.86	0.91	0.87	0.91	0.93	0.92	0.95	1.00	1.02	1.12	1.13	1.06	1.01	0.94	0.81	0.70	0.56			
Median JBL L1&L2	12.93	10.17	0.82	0.94	0.98	0.79	0.74	0.78	0.76	0.87	0.92	0.89	0.91	0.94	0.93	0.98	1.01	1.06	1.12	1.13	1.07	1.02	0.94	0.81	0.69	0.57			
M.S. 40_Kugel_L1M6.emd	15.49	10.41	14.85	12.79	9.95	0.76	0.70	0.72	0.88	1.09	0.95	0.98	0.94	0.89	0.87	1.00	0.97	1.00	1.03	1.12	1.14	1.06	1.01	0.95	0.81	0.73	0.55		
M.S. 40_Kugel_L1M5.emd	11.85	11.71	12.64	10.85	0.87	0.71	0.91	0.79	0.92	0.79	0.85	0.93	0.84	0.85	0.86	0.94	0.99	1.00	1.08	1.16	1.14	1.04	1.00	0.94	0.82	0.74	0.56		
M.S. 40_Kugel_L1M4.emd	11.75	12.62	15.42	13.59	1.15	0.84	0.83	0.97	0.81	1.06	0.97	0.89	0.89	0.97	0.83	0.76	1.00	1.01	1.05	0.94	1.16	1.10	1.01	0.92	0.83	0.74	0.56		
M.S. 40_Kugel_L1M3.emd	12.92	11.09	13.29	13.23	0.79	0.88	0.83	0.72	0.92	0.79	0.88	0.91	0.87	0.84	0.78	0.84	0.93	1.02	1.11	1.13	1.09	1.00	0.93	0.80	0.72	0.52			
M.S. 40_Kugel_L1M2.emd	13.78	17.41	14.06	10.97	0.80	0.81	0.82	0.82	0.82	0.79	0.92	0.84	0.85	0.84	0.85	0.94	1.01	1.07	1.13	1.19	1.09	1.01	0.95	0.81	0.73	0.52			
M.S. 40_Kugel_L1M1.emd	12.34	12.17	14.03	11.83	0.88	0.82	0.61	0.81	0.83	0.93	0.93	0.92	0.87	0.92	0.86	0.93	1.01	1.06	1.12	1.15	1.08	1.01	0.94	0.82	0.73	0.56			
M.S. 40_Kugel_L2M6.emd	6.94	6.90	13.70	6.48	0.73	0.70	0.59	0.60	0.92	1.15	1.06	22.74	0.88	0.94	0.92	0.96	1.04	1.06	1.16	1.07	1.06	1.01	0.94	0.81	0.73	0.55			
M.S. 40_Kugel_L2M5.emd	13.22	12.82	1.18	1.88	0.98	1.05	0.60	0.86	0.96	0.98	0.85	0.99	0.94	0.88	0.92	0.94	1.01	1.03	1.13	1.12	1.04	1.01	0.95	0.81	0.72	0.53			
M.S. 40_Kugel_L2M4.emd	6.14	11.97	21.45	15.69	1.11	0.77	0.40	0.74	0.89	0.95	1.01	0.94	1.03	1.02	0.91	0.99	1.04	0.98	1.10	1.15	1.14	1.02	1.00	0.94	0.82	0.72	0.56		
M.S. 40_Kugel_L2M3.emd	12.42	10.28	0.99	1.91	0.91	0.91	1.08	0.61	0.75	0.91	0.83	0.91	0.93	0.96	0.92	0.94	0.97	1.02	1.10	1.14	1.09	1.00	0.97	0.82	0.75	0.56			
M.S. 40_Kugel_L2M2.emd	10.41	14.17	14.69	6.64	0.70	0.89	0.89	0.66	0.77	0.99	0.99	0.89	0.92	0.82	0.97	0.95	1.03	1.10	1.03	1.10	1.15	1.10	1.03	0.96	0.82	0.75	0.55		
M.S. 40_Kugel_L2M1.emd	8.94	10.73	10.15	10.49	0.93	0.81	0.61	0.59	0.79	0.88	0.80	0.93	0.91	0.88	0.89	0.95	0.96	1.00	1.05	1.11	1.11	1.05	1.04	0.96	0.79	0.72	0.55		
Median Kugel_L2	9.67	11.35	11.93	6.56	0.82	0.85	0.75	0.61	0.83	0.96	0.90	0.92	0.93	0.91	0.94	0.92	0.95	1.00	1.04	1.12	1.13	1.06	1.01	0.96	0.82	0.73	0.55		
Median Kugel_L1&L2	11.00	11.76	12.98	9.19	0.90	0.84	0.68	0.71	0.83	0.93	0.95	0.92	0.90	0.88	0.92	0.97	1.01	1.05	1.12	1.14	1.07	1.01	0.95	0.82	0.73	0.55			

Messdaten welche bereits im Voraus aus der Messdatenauswertung ausgeschlossen werden

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe abweichten

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abwichen

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abwichen

Prozentuale Abweichung der einzelnen Messwerte vom Median zur Bestimmung der Ausreißerdaten

	25Hz	50Hz	60Hz	80Hz	100Hz	125Hz	150Hz	180Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz	
M.S. 40_Kugel_L1M6.emd	-0.05	0.10	0.00	-0.27	0.10	0.02	0.14	0.03	0.05	-0.04	-0.02	-0.03	0.01	0.04	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M.S. 40_Kugel_L1M5.emd	0.14	-0.33	-0.19	-0.02	0.04	0.07	-0.14	-0.02	-0.11	0.05	0.05	0.02	-0.04	-0.01	-0.02	-0.04	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
M.S. 40_Kugel_L1M4.emd	0.12	-0.10	0.44	0.02	-0.04	-0.41	-0.09	-0.33	-0.02	-0.03	-0.02	0.00	-11.41	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
M.S. 40_Kugel_L1M3.emd	-0.15	-0.21	-0.09	0.10	0.06	-0.03	0.60	-0.35	0.03	0.14	0.18	0.00	0.16	0.06	0.00	0.01	-0.04	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.03	-0.01	0.00	-0.01
M.S. 40_Kugel_L1M2.emd	-0.11	0.49	16.77	0.53	-0.38	-0.03	-0.11	-0.27	-0.10	0.04	-0.05	-0.08	-0.04	0.01	0.04	0.00	-0.05	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.01	0.01	
M.S. 40_Kugel_L1M1.emd	0.05	0.19	-0.12	-0.11	-0.24	0.06	-0.24	0.14	0.03	-0.09	-0.05	-0.05	-0.02	0.05	-0.09	-0.01	0.02	0.02	0.07	0.05	-0.05	-0.03	0.00	-0.01	-0.01	0.01	
M.S. 40_Kugel_L2M6.emd	-0.31	0.36	0.06	-0.09	-0.10	0.04	-0.06	0.12	0.28	0.23	0.01	-0.03	0.03	-0.07	0.03	0.01	0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.08	0.00	-0.01	0.00	0.02	0.01	0.00
M.S. 40_Kugel_L2M5.emd	0.15	-0.69	-0.11	-0.10	-0.04	-0.16	-0.07	-0.16	-0.09	0.03	-0.01	-0.08	-0.10	-0.03	0.01	-0.03	-0.05	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00
M.S. 40_Kugel_L2M4.emd	0.04	0.09	0.24	-0.01	0.11	-0.04	0.06	-0.04	0.00	-0.04	0.06	0.15	0.04	0.00	-0.04	0.00	-0.02	-0.01	0.02	0.04	0.04	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.00
M.S. 40_Kugel_L2M3.emd	-0.04	-0.55	-0.06	0.13	-0.08	-0.13	0.36	-0.04	0.03	-0.11	0.06	0.03	-0.04	0.00	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	0.00	-0.01	-0.02	0.00	0.00
M.S. 40_Kugel_L2M2.emd	-0.26	-0.09	-0.23	0.01	-0.06	0.40	0.12	0.14	0.00	0.05	-0.06	-0.09	-0.10	0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.04	0					

Messdaten mit markierten Ausreißerdaten																									
40-Grad_Eilwaene	25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	8000Hz	10000Hz								
MLS 400_JBL_L1M6.emd	14,91	12,05	1,07	0,65	1,18	0,90	0,76	0,90	0,67	0,90	0,27	0,91	0,89	0,93	0,97	1,05	1,11	1,13	1,10	1,03	0,95	0,81	0,69	0,56	
MLS 400_JBL_L1M5.emd	14,33	7,36	1,07	1,02	1,11	0,94	1,10	0,68	0,79	0,78	0,27	0,96	0,89	0,96	0,96	1,01	1,04	1,12	1,13	1,09	1,03	0,96	0,82	0,68	0,58
MLS 400_JBL_L1M4.emd	14,09	9,84	1,40	1,06	1,13	0,52	0,64	1,05	0,76	0,85	1,09	0,91	1,12	0,90	0,95	1,01	1,07	1,11	1,16	1,10	1,07	0,96	0,81	0,69	0,56
MLS 400_JBL_L1M3.emd	10,69	8,70	0,88	1,15	1,14	0,85	1,12	0,51	0,80	1,09	0,92	0,94	1,05	1,01	0,93	1,00	1,07	1,11	1,07	1,10	1,07	0,92	0,82	0,69	0,56
MLS 400_JBL_L1M2.emd	11,17	16,30	17,31	1,59	0,67	0,85	0,62	0,90	0,80	0,80	0,88	0,84	0,87	0,91	0,99	0,92	1,08	1,12	1,14	1,15	1,09	1,01	0,94	0,82	0,70
MLS 400_JBL_L1M1.emd	13,29	13,06	0,86	0,92	0,93	0,52	0,90	0,80	0,80	0,88	0,86	0,93	0,95	0,87	0,92	1,04	1,05	1,15	1,17	1,07	1,06	1,02	0,94	0,81	0,68
Mittl_JBL_L1	12,58	11,22	3,72	1,06	0,99	0,83	0,80	0,77	0,75	0,87	0,96	0,90	2,63	0,93	0,95	0,94	1,01	1,02	1,09	1,13	1,09	1,03	0,95	0,82	0,69
MLS 400_JBL_L2M6.emd	9,13	12,75	0,70	0,77	0,97	0,72	0,74	0,65	0,96	1,05	0,91	0,84	0,93	0,85	0,95	0,93	1,00	1,06	1,11	1,22	1,05	1,00	0,94	0,83	0,70
MLS 400_JBL_L2M5.emd	15,30	2,92	0,50	0,76	0,85	0,58	0,73	0,65	0,68	0,80	0,90	0,81	0,88	0,93	0,89	0,90	0,99	1,04	1,11	1,13	1,05	1,01	0,96	0,82	0,69
MLS 400_JBL_L2M4.emd	13,84	10,29	0,83	0,84	0,98	0,67	0,85	0,74	0,75	0,82	0,96	1,00	0,94	0,91	0,95	1,01	1,03	1,14	1,18	1,10	1,01	0,95	0,81	0,70	0,56
MLS 400_JBL_L2M3.emd	12,69	4,21	0,53	0,96	0,81	0,67	1,07	0,77	0,76	0,96	0,90	0,87	0,91	0,97	0,95	0,99	1,07	1,12	1,11	1,11	1,03	1,01	0,94	0,80	0,68
MLS 400_JBL_L2M2.emd	9,76	8,51	0,51	0,86	0,83	0,98	0,88	0,88	0,74	0,90	0,85	0,79	1,00	0,93	0,92	0,90	0,94	0,99	1,05	1,16	1,13	1,09	1,00	0,92	0,80
MLS 400_JBL_L2M1.emd	15,98	11,68	0,87	0,82	0,86	0,98	0,78	0,74	0,83	0,89	0,89	0,88	0,92	0,97	0,99	1,00	1,02	1,12	1,12	1,09	1,06	1,01	0,95	0,81	0,71
Mittl_JBL_L2	12,78	8,39	0,69	0,85	0,89	0,73	0,80	0,78	0,78	0,87	0,91	0,88	0,91	0,90	0,93	0,95	1,00	1,05	1,13	1,14	1,06	1,01	0,94	0,81	0,70
Mittl_Kugel_L1&L2	12,68	9,81	2,20	0,95	0,94	0,78	0,80	0,81	0,82	0,94	0,88	1,77	0,94	0,88	0,93	0,95	1,02	1,13	1,13	1,07	1,02	0,94	0,81	0,69	0,57
MLS 400_Kugel_L1M6.emd	15,49	10,41	14,85	12,79	0,94	0,76	0,70	0,88	1,09	0,95	0,98	0,94	0,89	0,87	1,00	0,97	1,00	1,03	1,12	1,14	1,06	1,01	0,95	0,81	0,73
MLS 400_Kugel_L1M5.emd	11,85	11,71	12,64	10,85	0,87	0,71	0,71	0,92	0,79	0,92	0,96	0,93	0,84	0,89	0,86	0,94	0,99	1,00	1,08	1,16	1,14	1,04	1,00	0,94	0,82
MLS 400_Kugel_L1M4.emd	11,75	12,62	15,42	13,59	1,15	0,84	0,63	0,97	0,81	1,06	0,97	0,90	0,89	0,97	0,85	0,76	1,00	1,01	1,05	0,84	1,16	1,10	1,01	0,92	0,74
MLS 400_Kugel_L1M3.emd	12,82	11,09	13,99	13,25	0,79	0,89	0,65	0,55	0,83	0,72	0,92	0,99	0,86	0,91	0,95	0,78	0,84	0,78	1,07	1,00	1,11	1,07	1,00	0,94	0,80
MLS 400_Kugel_L1M2.emd	11,71	15,91	11,60	10,45	0,72	0,89	0,69	0,65	0,75	0,90	0,88	0,81	0,73	0,65	0,79	0,65	0,92	1,03	1,09	1,10	1,15	1,08	1,01	0,93	0,81
MLS 400_Kugel_L1M1.emd	13,78	17,41	14,06	10,87	0,90	0,81	0,54	0,88	0,84	0,79	0,78	0,94	0,85	0,98	0,94	0,94	1,01	1,07	1,12	1,19	1,09	1,01	0,95	0,82	0,73
Mittl_Kugel_L1	12,90	13,19	13,76	11,97	0,90	0,81	0,64	0,81	0,82	0,93	0,87	0,90	0,86	0,87	0,84	0,86	0,93	1,02	1,05	1,08	1,16	1,07	1,01	0,94	0,82
MLS 400_Kugel_L2M6.emd	6,94	6,90	13,70	6,48	0,73	0,79	0,59	0,60	0,92	1,15	1,06	22,74	0,88	0,94	0,92	0,96	0,99	1,04	1,06	1,16	1,07	1,06	1,01	0,94	0,80
MLS 400_Kugel_L2M5.emd	13,22	12,82	1,18	1,88	0,98	0,98	1,05	0,60	0,86	0,96	0,98	0,85	0,99	0,94	0,88	0,92	0,94	1,01	1,03	1,13	1,12	1,04	1,01	0,95	0,81
MLS 400_Kugel_L2M4.emd	6,14	11,97	21,45	15,69	10,11	0,77	0,40	0,74	0,89	0,95	1,01	0,94	1,03	1,02	0,91	0,99	1,04	0,98	1,10	1,15	1,14	1,02	1,00	0,94	0,82
MLS 400_Kugel_L2M3.emd	12,42	10,28	0,99	1,91	0,91	1,08	0,61	0,75	0,91	0,83	0,93	0,93	0,96	0,92	0,94	0,97	0,97	1,02	1,10	1,14	1,09	1,00	0,97	0,82	0,75
MLS 400_Kugel_L2M2.emd	10,41	14,17	14,69	6,64	0,70	0,89	0,89	0,66	0,77	0,99	0,99	0,89	0,92	0,82	0,97	0,95	1,03	1,10	1,03	1,10	1,15	1,03	0,96	0,82	0,73
MLS 400_Kugel_L2M1.emd	8,94	10,73	10,15	10,49	0,93	0,81	0,63	0,59	0,79	0,88	0,80	0,90	0,93	0,91	0,88	0,89	0,95	1,00	1,05	1,11	1,11	1,05	1,04	0,96	0,79
Mittl_Kugel_L2	9,68	11,15	10,36	7,18	2,39	0,86	0,77	0,63	0,83	0,92	0,95	4,54	0,90	0,90	0,92	0,95	0,99	1,02	1,05	1,13	1,12	1,06	1,02	0,95	0,81
Mittl_Kugel_L1&L2	11,29	12,17	12,06	9,57	1,64	0,83	0,76	0,83	0,95	0,91	0,92	0,90	0,88	0,90	0,88	0,90	0,96	1,02	1,05	1,10	1,14	1,07	1,01	0,95	0,81

Korrigierte Messdaten ohne Ausreißer und Berechnung der entsprechenden arithmetischen Mittelwerte																								
40-Grad_Eilwaene	25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	8000Hz	10000Hz							
MLS 400_JBL_L1M6.emd	14,91	12,05	1,07	0,65	1,18	0,90	0,76	0,90	0,67	0,90	0,27	0,91	0,89	0,93	0,97	1,05	1,11	1,13	1,10	1,03	0,95	0,81	0,69	0,56
MLS 400_JBL_L1M5.emd	14,33	7,36	1,07	1,02	1,11	0,94	1,10	0,68	0,79	0,78	0,27	0,96	0,89	0,96	0,96	1,01	1,04	1,12	1,13	1,09	1,03	0,96	0,82	0,68
MLS 400_JBL_L1M4.emd	14,09	9,84	1,40	1,06	1,13	0,52	0,64	1,05	0,76	0,85	1,09	0,91	1,12	0,90	0,95	1,01	1,07	1,11	1,16	1,10	1,07	0,96	0,81	0,69
MLS 400_JBL_L1M3.emd	10,69	8,70	0,88	1,15	1,14	0,85	1,12	0,51	0,80	1,09	0,92	0,94	1,05	1,01	0,93	1,00	1,07	1,11	1,16	1,10	1,07	0,92	0,82	0,69
MLS 400_JBL_L1M2.emd	11,17	16,30	17,31	1,59	0,67	0,85	0,62	0,90	0,80	0,80	0,88	0,84	0,87	0,91	0,99	0,92	1,08	1,12	1,14	1,15	1,09	1,01	0,94	0,82
MLS 400_JBL_L1M1.emd	13,29	13,06	0,86	0,92	0,93	0,52	0,90	0,80	0,80	0,88	0,86	0,93	0,95	0,87	0,92	1,04	1,05	1,15	1,17	1,07	1,06	1,02	0,94	0,81
Mittl_JBL_L1	12,58	11,22	1,00	1,06	0,99	0,83	0,80	0,77	0,75	0,87	0,96	0,90	0,90	0,93	0,95	0,94	1,01	1,02	1,09	1,13	1,09	1,03	0,95	0,82
MLS 400_JBL_L2M6.emd	9,13	12,75	0,70	0,77	0,97	0,72	0,74	0,65	0,96	1,05	0,91	0,84	0,93	0,85	0,95	0,93	1,00	1,06	1,11	1,22	1,05	1,00	0,94	0,83
MLS 400_JBL_L2M5.emd	15,30	2,92	0,59	0,76	0,85	0,58	0,73	0,65	0,68	0,88	0,90	0,80	0,81	0,88	0,93	0,89	0,90	0,99	1,04	1,11	1,13	1,05	1,01	0,96
MLS 400_JBL_L2M4.emd	13,84	10,29	0,83	0,84	0,98	0,67	0,83	0,74	0,75	0,82	0,96	1,00	0,94	0,91	0,95	1,01	1,03	1,14	1,18	1,10	1,01	0,95	0,81	0,70
MLS 400_JBL_L2M3.emd	12,69	4,21	0,53	0,96	0,81	0,67	1,07	0,77	0,76	0,96	0,90	0,87	0,91	0,91	0,97	0,95	0,99	1,07	1,12	1,11	1,03	1,01	0,94	0,80
MLS 400_JBL_L2M2.emd	9,76	8,51	0,51	0,86	0,83	0,98	0,88	0,88	0,75	0,90	0,85	0,79	1,00	0,93	0,92	0,90	0,94	0,99	1,05	1,16	1,13	1,09	1,00	0,92
MLS 400_JBL_L2M1.emd	15,98	11,68	0,87	0,82	0,86	0,98	0,78	0,74	0,83	0,89	0,89	0,88	0,92	0,97	0,99	1,00	1,02	1,12	1,12	1,09	1,06	1,01	0,95	0,81
Mittl_JBL_L2	12,78	8,39	0,69	0,85	0,89</																			

Messdaten der einzelnen Mikrofonpositionen für beide Lautsprecher und Berechnung der entsprechenden Medianwerte

ES-Grad	Bühnenszene	25Hz	50Hz	75Hz	100Hz	125Hz	150Hz	175Hz	200Hz	250Hz	300Hz	350Hz	400Hz	500Hz	600Hz	700Hz	800Hz	900Hz	1000Hz	1250Hz	1500Hz	1800Hz	2000Hz	2500Hz	3000Hz	3500Hz	4000Hz	5000Hz	6000Hz	8000Hz	10000Hz									
ES-Grad	Bühnenszene	Beschreibung	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]							
		MLS 50_JBL_L1M5.emd	12.39	13.42	11.05	10.63	11.81	10.91	10.74	10.91	10.64	10.94	10.54	10.56	10.44	1.01	1.01	1.00	0.96	0.88	0.79	0.68	0.57	0.54	0.53	0.52	0.51	0.50	0.49	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43					
		MLS 50_JBL_L1M6.emd	15.13	13.73	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81			
		MLS 50_JBL_L1M7.emd	13.79	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81	13.81		
		MLS 50_JBL_L1M8.emd	11.10	10.92	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60	10.60		
		MLS 50_JBL_L1M9.emd	13.33	12.98	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	12.86	
		MLS 50_JBL_L1M10.emd	14.44	12.51	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70	12.70		
		MLS 50_JBL_L1M11.emd	14.74	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	12.04	
		MLS 50_JBL_L1M12.emd	15.12	3.73	0.63	0.97	0.80	0.69	1.07	0.71	0.78	0.75	0.97	0.92	0.86	0.85	0.87	0.83	0.85	0.88	0.85	0.92	0.97	1.04	1.12	1.03	1.03	1.03	1.03	0.99	0.96	0.87	0.79	0.67	0.56	0.54	0.54	0.54		
		MLS 50_JBL_L1M13.emd	15.16	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	12.95	
		MLS 50_JBL_L1M14.emd	11.63	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	
		MLS 50_JBL_L1M15.emd	14.59	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	12.72	
		MLS 50_JBL_L1M16.emd	13.73	11.00	0.75	0.97	0.98	0.79	0.74	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77		
MLS 50_Kugel_L1M6.emd	15.94	12.82	14.85	9.37	15.99	0.83	0.71	0.72	0.87	1.08	0.96	0.92	0.89	0.88	0.95	0.97	0.98	1.00	1.06	1.04	1.06	1.03	1.06	1.03	0.98	0.88	0.79	0.68	0.57	0.46	0.35	0.24	0.13	0.02	0.00	0.00				
MLS 50_Kugel_L1M7.emd	16.63	12.63	14.28	15.65	0.76	0.70	0.87	0.78	0.88	0.83	0.88	0.94	0.87	0.87	0.90	0.92	0.93	0.94	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	0.98	0.96	0.89	0.81	0.71	0.61	0.51	0.41	0.31	0.21	0.11	0.01	0.00				
MLS 50_Kugel_L1M8.emd	12.19	16.07	12.69	9.82	4.31	0.82	0.84	0.81	1.10	0.97	0.88	0.89	0.85	0.74	0.96	0.93	0.94	1.00	1.03	1.01	1.06	1.08	1.08	0.98	0.98	0.80	0.68	0.58	0.48	0.38	0.28	0.18	0.08	0.00	0.00	0.00				
MLS 50_Kugel_L1M9.emd	12.17	13.24	10.99	6.99	0.83	0.88	0.96	0.80	0.72	0.82	0.78	0.78	0.74	0.91	0.97	0.96	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	0.98	0.98	0.80	0.68	0.58	0.48	0.38	0.28	0.18	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00			
MLS 50_Kugel_L1M10.emd	14.06	11.36	14.83	12.65	0.95	0.83	0.92	0.76	0.85	0.79	0.85	0.82	0.81	0.82	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83		
MLS 50_Kugel_L1M11.emd	13.13	13.03	13.30	10.36	0.89	0.83	0.88	0.73	0.81	0.93	0.92	0.88	0.88	0.73	0.82	0.88	0.86	0.73	0.82	0.88	0.86	0.73	0.82	0.88	0.86	0.73	0.82	0.88	0.86	0.73	0.82	0.88	0.86	0.73	0.82	0.88	0.86	0.73	0.82	0.88
MLS 50_Kugel_L1M12.emd	8.76	12.86	12.09	1.30	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69		
MLS 50_Kugel_L1M13.emd	10.68	13.32	0.61	1.21	0.89	0.99	1.06	0.54	0.82	0.80	1.00	0.83	0.96	0.85	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	
MLS 50_Kugel_L1M14.emd	4.77	11.62	13.79	8.83	0.85	0.76	0.66	0.47	0.69	0.97	0.95	0.91	0.99	0.97	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	
MLS 50_Kugel_L1M15.emd	13.68	15.40	5.31	1.20	0.87	0.90	1.08	0.61	0.72	0.92	0.85	0.94	0.92	0.85	0.94	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94		
MLS 50_Kugel_L1M16.emd	14.29	17.26	13.31	6.33	0.68	0.86	0.89	0.56	0.73	0.95	0.94	0.92	0.96	0.82	0.91	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94		
MLS 50_Kugel_L1M17.emd	12.18	18.13	11.38	7.50	0.89	0.82	0.80	0.53	0.77	0.87	0.83	0.92	0.89	0.87	0.85	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90		
MLS 50_Kugel_L1M18.emd	11.43	14.36	11.74	4.02	0.86	0.84	0.85	0.55	0.75	0.84	0.85	0.94	0.92	0.94	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	
MLS 50_Kugel_L1M19.emd	12.28	13.70	12.36	7.19	0.87	0.84	0.76	0.65	0.78	0.93	0.93	0.93	0.90	0.91	0.88	0.82	0.89	0.93	0.97	1.02	1.08	1.03	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99		

Messdaten welche bereits im Voraus aus der Messdatenauswertung ausgeschlossen werden

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe abweichten

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichten

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichten

Prozentuale Abweichung der einzelnen Messwerte vom Median zur Bestimmung der Ausreißerdaten

ES-Grad	Bühnenszene	25Hz	50Hz	75Hz	100Hz	125Hz	150Hz	175Hz	200Hz	250Hz	300Hz	350Hz	400Hz	500Hz	600Hz	700Hz	800Hz	900Hz	1000Hz	1250Hz	1500Hz	1800Hz	2000Hz	2500Hz	3000Hz	3500Hz	4000Hz	5000Hz	6000Hz	8000Hz	10000Hz
ES-Grad	Bühnenszene	Beschreibung	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/3rd Oct.) [S]	30 (1/																									

Messdaten der einzelnen Mikrofonpositionen für beide Lautsprecher und Berechnung der entsprechenden Medianwerte

60-Grad_Ebene	25Hz	31Hz	39Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz	
MAS 60_JBL_L1M6.enn	12.98	10.24	1.10	0.70	1.14	0.91	0.71	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90	0.92	0.90
MAS 60_JBL_L1M5.enn	9.48	10.10	1.18	1.21	1.10	0.90	1.10	0.67	0.79	0.92	1.00	0.93	0.86	0.92	0.86	0.92	0.86	0.92	0.86	0.92	1.02	0.96	0.88	0.92	0.88	0.76	0.65	0.53
MAS 60_JBL_L1M4.enn	19.76	12.04	1.15	0.90	0.92	1.00	0.90	0.92	1.00	0.80	0.83	1.00	0.97	0.88	0.93	0.90	0.87	0.92	0.93	1.02	0.94	0.97	0.97	0.95	0.88	0.76	0.66	0.54
MAS 60_JBL_L1M3.enn	12.15	8.43	0.81	1.09	1.08	0.88	1.08	0.70	0.82	1.01	1.06	0.91	0.89	0.85	0.88	0.88	0.91	0.97	1.00	1.02	0.94	0.97	0.95	0.91	0.89	0.78	0.66	0.54
MAS 60_JBL_L1M2.enn	15.69	10.80	1.37	1.21	0.73	0.87	0.62	0.62	0.76	0.78	0.86	0.84	0.94	0.88	0.95	0.94	0.96	0.99	0.98	1.04	0.97	0.95	0.91	0.86	0.75	0.64	0.54	
MAS 60_JBL_L1M1.enn	9.67	2.01	0.89	0.95	0.85	0.93	0.53	1.00	0.75	0.83	0.83	0.93	0.92	0.89	0.87	0.91	0.91	0.93	0.98	1.01	1.05	1.01	0.94	0.92	0.87	0.76	0.65	0.54
Median_JBL_L1	12.32	10.17	1.13	1.03	1.00	0.89	0.68	0.80	0.78	0.83	0.93	0.92	0.89	0.88	0.91	0.89	0.94	0.98	1.00	1.03	0.97	0.97	0.92	0.87	0.76	0.65	0.54	
MMS 60_JBL_L2M6.enn	13.72	11.21	10.17	0.72	0.88	0.77	2.07	0.90	0.92	0.97	0.91	0.89	0.90	0.87	0.83	0.84	0.88	0.85	0.96	0.99	0.94	0.98	0.91	0.84	0.74	0.66	0.55	
MMS 60_JBL_L2M5.enn	10.76	3.53	0.60	0.66	0.83	0.56	0.71	0.41	0.68	0.86	0.91	0.84	0.77	0.92	0.90	0.89	0.92	0.96	1.03	1.02	0.98	0.99	0.90	0.83	0.76	0.65	0.54	
MMS 60_JBL_L2M4.enn	11.63	12.63	0.86	0.74	0.95	0.67	0.82	0.55	0.74	0.94	0.97	0.83	0.80	0.88	0.85	0.88	0.95	1.00	1.03	0.98	0.99	0.92	0.84	0.73	0.66	0.55		
MMS 60_JBL_L2M3.enn	10.93	4.98	0.96	0.95	0.92	1.04	0.70	0.75	0.74	0.94	0.96	0.86	0.88	0.90	0.90	0.90	0.90	0.98	1.02	0.92	0.91	0.97	0.90	0.85	0.73	0.64	0.51	
MMS 60_JBL_L2M2.enn	12.61	11.54	0.61	0.86	0.91	0.96	0.87	0.85	0.84	0.81	0.80	0.87	0.91	0.86	0.91	0.86	0.90	0.98	0.98	1.00	0.92	0.92	0.98	0.94	0.86	0.75	0.63	0.51
MMS 60_JBL_L2M1.enn	13.47	13.47	1.08	1.01	0.95	0.85	0.78	0.56	0.84	0.91	0.93	0.90	0.91	0.87	0.85	0.89	0.95	0.99	1.01	1.01	1.01	0.96	0.90	0.86	0.76	0.65	0.51	
Median_JBL_L2	12.12	11.38	0.76	0.80	0.89	0.72	0.85	0.74	0.73	0.86	0.91	0.91	0.90	0.89	0.91	0.90	0.98	0.93	0.99	1.02	0.98	0.99	0.91	0.85	0.75	0.65	0.53	
Median_JBL_L1&L2	12.32	10.77	0.94	0.92	0.95	0.81	0.78	0.77	0.75	0.84	0.92	0.92	0.89	0.89	0.90	0.89	0.94	0.95	0.99	1.02	0.97	0.97	0.92	0.87	0.76	0.65	0.53	
MMS 60_Kugel_L1M6.enn	15.27	13.15	13.23	13.08	1.07	0.74	0.59	0.65	0.87	1.08	1.00	1.01	0.96	0.87	0.84	0.88	0.93	0.93	0.98	0.99	1.00	0.97	0.93	0.87	0.77	0.69	0.52	
MMS 60_Kugel_L1M5.enn	17.47	14.77	11.62	12.24	0.68	0.69	0.83	0.79	0.89	0.95	0.85	0.92	0.88	0.84	0.85	0.90	0.91	0.92	0.99	1.00	0.96	0.99	0.95	0.86	0.78	0.68	0.53	
MMS 60_Kugel_L1M4.enn	11.52	10.34	14.34	11.58	1.17	0.82	0.80	0.99	0.83	1.11	0.94	0.88	0.95	0.93	0.95	0.95	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00	0.97	0.91	0.86	0.75	0.69	0.51	
MMS 60_Kugel_L1M3.enn	16.30	14.96	11.73	11.73	0.74	0.84	0.78	0.84	0.78	0.93	0.97	0.89	0.87	0.84	0.87	0.90	0.93	0.98	0.98	1.00	0.98	0.99	0.93	0.88	0.74	0.68	0.52	
MMS 60_Kugel_L1M2.enn	16.53	15.03	13.08	13.06	0.95	0.84	0.48	0.83	0.83	0.96	0.92	0.88	0.86	0.83	0.87	0.91	0.94	0.94	0.94	1.00	0.95	0.93	0.91	0.85	0.72	0.70	0.53	
MMS 60_Kugel_L1M1.enn	13.45	14.25	13.26	11.95	0.87	0.88	0.68	0.72	0.83	0.87	0.90	0.86	0.88	0.86	0.88	0.92	0.92	0.95	0.99	0.99	1.00	0.97	0.93	0.87	0.75	0.69	0.53	
MMS 60_Kugel_L2M6.enn	9.87	5.80	14.38	9.99	0.70	0.83	0.70	0.58	0.84	1.16	1.07	0.86	0.91	0.89	0.89	0.92	0.91	0.91	0.99	1.06	1.02	0.96	0.97	0.95	0.86	0.73	0.64	0.50
MMS 60_Kugel_L2M5.enn	14.17	8.46	0.71	2.06	0.93	0.95	1.00	0.57	0.82	0.92	1.00	0.87	0.97	0.94	0.85	0.86	0.88	0.93	0.96	0.98	1.00	0.96	0.91	0.83	0.74	0.68	0.52	
MMS 60_Kugel_L2M4.enn	16.90	14.42	9.82	7.41	0.76	0.76	0.26	0.43	0.91	1.00	0.96	0.91	0.97	0.93	0.90	0.94	0.90	0.98	0.99	0.97	1.00	0.99	0.90	0.88	0.76	0.67	0.52	
MMS 60_Kugel_L2M3.enn	9.86	10.72	0.76	1.10	0.95	0.93	1.08	0.62	0.72	0.93	0.85	0.95	0.95	0.87	0.89	0.90	0.92	0.94	0.96	1.01	1.01	0.98	1.00	0.95	0.85	0.75	0.67	0.52
MMS 60_Kugel_L2M2.enn	10.88	16.07	15.78	2.42	0.74	0.87	0.94	0.68	0.68	0.76	0.93	0.96	0.89	0.95	0.92	0.93	0.92	0.98	1.03	1.01	0.96	1.01	0.95	0.85	0.76	0.69	0.55	
MMS 60_Kugel_L2M1.enn	16.29	10.95	11.82	11.32	0.99	0.80	0.54	0.57	0.77	0.86	0.84	0.93	0.87	0.84	0.84	0.89	0.89	0.92	0.99	1.00	0.98	0.99	0.94	0.85	0.75	0.68	0.54	
Median_Kugel_L2	12.53	10.84	10.82	4.92	0.85	0.80	0.82	0.58	0.80	0.93	0.96	0.90	0.93	0.90	0.91	0.93	0.97	1.00	1.01	0.98	0.99	0.94	0.85	0.75	0.68	0.52		
Median_Kugel_L1&L2	12.99	12.79	12.10	8.43	0.86	0.84	0.71	0.65	0.81	0.90	0.93	0.90	0.91	0.88	0.87	0.90	0.91	0.96	0.99	1.00	0.99	0.98	0.94	0.86	0.75	0.68	0.52	

Messdaten welche bereits im Voraus aus der Messdatenauswertung ausgeschlossen werden

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe abweichen

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Prozentuale Abweichung der einzelnen Messwerte vom Median zur Bestimmung der Ausreißerdaten

60-Grad_Ebene	25Hz	31Hz	39Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz	
MAS 60_JBL_L1M6.enn	0.09	0.01	-0.03	-0.14	-0.10	-0.12	-0.10	0.12	-0.08	0.03	-0.02	0.00	0.02	0.10	0.04	-0.06	-0.05	-0.02	0.02	0.00	-0.02	0.02	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.02	
MAS 60_JBL_L1M5.enn	-0.24	-0.01	0.04	-0.18	-0.10	0.01	0.08	0.01	-0.03	0.01	-0.03	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	
MAS 60_JBL_L1M4.enn	0.58	0.18	0.03	-0.06	-0.08	-0.42	-0.68	-0.31	0.03	0.01	0.17	0.05	-0.01	0.06	-0.01	-0.02	0.04	-0.03	-0.03	0.00	-0.03	0.00	-0.03	0.00	-0.03	0.00	0.02	0.02
MAS 60_JBL_L1M3.enn	-0.03	-0.17	-0.28	-0.06	0.08	-0.01	-0.60	-0.11	0.06	0.22	0.14	-0.01	0.01	-0.03	-0.03	-0.01	-0.03	-0.01	-0.01	-0.03	-0.03	0.00	-0.01	0.03	0.03	0.02	0.00	
MAS 60_JBL_L1M2.enn	0.25	0.06	11.18	0.17	-0.27	-0.03	-0.08	-0.23	-0.02	-0.05	-0.08	-0.09	0.06	0.00	0.04	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	-0.01	-0.02	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	0.00
MAS 60_JBL_L1M1.enn	0.23	-0.80	-0.21	-0.07	-0.15	0.04	-0.21	0.31	-0.03	-0.02	-0.09	-0.10	0.07	0.01	-0.04	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	-0.03	0.00	0.01	-0.01	0.00	
MMS 60_JBL_L2M6.enn	0.13	-0.01	12.36	-0.10	-0.02	0.07	1.45	0.22	0.27	0.13	0.00	-0.02	0.00	-0.02	-0.07	-0.05	-0.01	-0.08	-0.03	-0.02	-0.04	0.00	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.02	0.05
MMS 60_JBL_L2M5.enn	-0.11	-0.69	-0.22	-0.18	-0.07	-0.22	-0.16	-0.45	-0.06	0.01	0.00	-0.08	-0.14	0.03	0.01	-0.01	-0.04	0.04	0.04	0.00	0.01	-0.01	-0.02	0.02	0.00	0.00	0.03	
MMS 60_JBL_L2M4.enn	-0.04	0.11	0.13	-0.07	0.06	-0.07	-0.03	-0.26	-0.01	0.04	0.07	0.13	0.00	0.11	-0.07	0.01	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	-0.02	0.02	0.00	0.05	
MMS 60_JBL_L2M3.enn	-0.10	-0.56	-0.13	-0.15	-0.10	-0.18	0.23	-0																				

Messdaten mit markierten Ausreißerdaten																													
60-Grad_Eiliane	25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz		
M15 60- JBL L1M6.emd	9.87	10.24	1.10	1.10	1.10	0.91	0.73	0.90	0.70	0.92	0.92	0.86	0.95	0.98	0.93	0.88	0.93	0.98	0.92	0.95	1.00	0.98	0.99	0.92	0.86	0.76	0.63	0.53	
M15 60- JBL L1M5.emd	12.88	10.24	1.10	1.10	1.10	0.91	0.73	0.90	0.70	0.92	0.92	0.86	0.95	0.98	0.93	0.88	0.93	0.98	0.92	0.95	1.00	0.98	0.99	0.92	0.86	0.76	0.63	0.53	
M15 60- JBL L1M4.emd	9.48	10.10	1.18	1.21	1.10	0.90	0.92	1.00	0.93	0.86	0.97	1.02	0.99	1.02	0.96	0.98	0.92	0.86	0.97	1.02	0.99	1.02	0.96	0.98	0.92	0.86	0.76	0.66	0.54
M15 60- JBL L1M3.emd	19.76	12.04	1.16	1.16	0.96	0.92	0.52	0.62	1.05	0.80	0.83	1.09	0.97	0.88	0.93	0.90	0.87	0.94	0.96	1.03	1.03	0.94	0.97	0.95	0.89	0.78	0.66	0.54	
M15 60- JBL L1M2.emd	12.15	8.43	0.81	1.09	1.08	0.88	1.08	0.70	0.82	1.01	1.06	0.91	0.88	0.88	0.91	0.97	1.00	1.02	0.94	0.97	1.01	1.05	0.91	0.89	0.78	0.66	0.54		
M15 60- JBL L1M1.emd	15.69	10.80	13.71	1.21	1.73	0.87	0.62	0.62	0.76	0.78	0.86	0.84	0.94	0.88	0.95	0.90	0.96	0.99	0.98	1.04	1.05	1.01	0.94	0.92	0.87	0.76	0.64	0.54	
Mitt.-JBL_L1	9.67	2.01	0.89	0.95	0.85	0.93	0.53	0.53	0.50	0.75	0.85	0.84	0.95	0.91	0.90	0.88	0.87	0.91	0.93	0.98	1.01	1.01	0.94	0.92	0.87	0.76	0.65	0.55	
Mitt.-JBL_L1	13.27	8.94	3.14	1.02	0.97	0.83	0.78	0.83	0.77	0.86	0.77	0.86	0.95	0.91	0.90	0.88	0.91	0.90	0.94	0.97	0.99	1.03	0.97	0.97	0.92	0.87	0.76	0.65	0.54
M15 60- JBL L2M6.emd	13.72	11.21	10.17	0.72	0.88	0.77	2.07	0.50	0.92	0.92	0.91	0.89	0.90	0.87	0.83	0.84	0.88	0.93	0.98	0.95	0.96	0.99	0.94	0.98	0.91	0.84	0.74	0.66	0.54
M15 60- JBL L2M5.emd	10.76	3.53	0.60	0.66	0.83	0.56	0.71	0.41	0.68	0.86	0.91	0.84	0.77	0.92	0.90	0.88	0.85	0.90	0.91	0.92	1.02	1.02	0.98	0.99	0.90	0.83	0.76	0.65	0.54
M15 60- JBL L2M4.emd	11.63	12.63	0.86	0.74	0.95	0.67	1.04	0.90	0.97	0.89	0.97	1.03	0.90	0.99	0.83	0.89	0.88	0.90	0.98	1.00	1.03	1.03	0.98	0.99	0.92	0.84	0.73	0.66	0.51
M15 60- JBL L2M3.emd	10.93	4.98	0.66	0.92	0.81	0.60	1.04	0.70	0.75	0.74	0.94	0.96	0.85	0.86	0.88	0.90	0.90	0.90	0.98	1.00	1.00	0.99	0.97	0.90	0.85	0.73	0.64	0.51	
M15 60- JBL L2M2.emd	12.61	11.94	0.61	0.86	0.91	0.96	0.87	0.85	0.73	0.85	0.84	0.81	1.00	0.87	0.91	0.86	0.90	0.89	0.89	0.98	1.02	1.02	0.98	0.94	0.86	0.75	0.63	0.51	
M15 60- JBL L2M1.emd	13.47	13.47	1.08	1.01	0.95	0.85	0.55	0.78	0.56	0.84	0.91	0.93	0.90	0.91	0.97	0.95	0.89	0.95	1.01	1.01	1.01	1.01	0.96	0.90	0.86	0.75	0.65	0.53	
Mitt.-JBL_L2	12.19	9.46	0.76	0.82	0.89	0.78	1.01	0.70	0.73	0.86	0.92	0.82	0.91	0.89	0.90	0.89	0.88	0.92	0.99	1.01	1.01	0.97	0.98	0.91	0.85	0.75	0.65	0.53	
Mitt.-JBL_L2	12.73	9.25	0.84	0.82	0.89	0.78	0.83	0.82	0.79	0.92	0.92	0.84	0.93	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
Mitt.-JBL_L1&L2	13.76	14.04	14.63	11.99	0.90	0.79	0.68	0.71	0.82	0.78	0.90	0.91	0.88	0.87	0.89	0.88	0.87	0.91	0.95	1.00	0.99	0.99	0.97	0.93	0.87	0.76	0.69	0.52	
M15 60- Kugel L1M6.emd	9.87	5.20	14.38	9.99	0.83	0.70	0.58	0.84	1.16	1.07	0.86	0.91	0.89	0.91	0.85	0.86	0.88	0.93	0.92	0.95	1.02	0.96	0.97	0.95	0.85	0.73	0.64	0.50	
M15 60- Kugel L1M5.emd	14.17	8.46	0.71	2.06	0.93	0.95	1.00	0.87	0.97	0.94	0.85	0.86	0.88	0.88	0.93	0.96	0.98	1.00	0.96	0.98	1.00	0.96	0.91	0.85	0.81	0.74	0.68	0.52	
M15 60- Kugel L1M4.emd	16.90	14.42	9.82	7.41	0.76	0.76	0.26	0.43	0.91	1.00	0.96	0.91	0.97	0.93	0.90	0.94	0.90	0.98	0.99	0.97	1.00	0.98	0.99	0.90	0.88	0.76	0.67	0.52	
M15 60- Kugel L1M3.emd	9.86	10.72	0.76	1.10	0.95	0.93	1.08	0.62	0.72	0.91	0.85	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.96	1.01	1.01	0.98	1.00	0.93	0.85	0.85	0.75	0.67	0.52		
M15 60- Kugel L1M2.emd	10.88	16.07	15.78	2.42	0.74	0.87	0.94	0.68	0.76	0.93	0.96	0.84	0.93	0.92	0.98	1.03	1.01	0.96	1.01	0.96	1.01	0.95	0.95	0.91	0.85	0.76	0.69	0.55	
M15 60- Kugel L1M1.emd	16.29	10.95	11.82	11.82	0.99	0.80	0.54	0.57	0.77	0.86	0.84	0.84	0.89	0.89	0.92	0.99	1.00	0.98	0.99	1.00	0.98	0.99	0.96	0.85	0.75	0.68	0.54		
Mitt.-Kugel_L2	13.00	11.07	8.88	5.72	0.68	0.80	0.86	0.75	0.68	0.80	0.96	0.92	0.90	0.94	0.88	0.88	0.91	0.91	0.96	1.01	1.00	0.98	0.99	0.93	0.86	0.75	0.67	0.52	
Mitt.-Kugel_L1&L2	13.38	12.55	11.75	8.85	0.87	0.83	0.71	0.64	0.81	0.82	0.92	0.90	0.91	0.88	0.87	0.90	0.89	0.90	0.91	0.96	1.00	1.00	0.98	0.93	0.87	0.76	0.68	0.52	

Korrigierte Messdaten ohne Ausreißer und Berechnung der entsprechenden arithmetischen Mittelwerte																													
60-Grad_Eiliane	25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz		
M15 60- JBL L1M6.emd	12.88	10.24	1.10	0.70	1.14	0.91	0.73	0.90	0.70	0.92	0.92	0.86	0.95	0.98	0.93	0.88	0.93	0.98	0.92	0.95	1.00	0.98	0.99	0.92	0.86	0.76	0.63	0.53	
M15 60- JBL L1M5.emd	9.48	10.10	1.18	1.21	1.10	0.90	0.92	1.00	0.93	0.86	0.97	1.02	0.99	1.02	0.96	0.98	0.92	0.86	0.97	1.02	0.99	1.02	0.96	0.98	0.92	0.86	0.76	0.65	0.53
M15 60- JBL L1M4.emd	19.76	12.04	1.16	1.16	0.96	0.92	0.52	0.62	1.05	0.80	0.83	1.09	0.97	0.88	0.93	0.90	0.87	0.94	0.96	1.03	1.03	0.94	0.97	0.95	0.89	0.78	0.66	0.53	
M15 60- JBL L1M3.emd	12.15	8.43	0.81	1.09	1.08	0.88	1.08	0.70	0.82	1.01	1.06	0.91	0.89	0.88	0.91	0.97	1.00	1.02	0.94	0.97	1.01	0.98	1.00	0.93	0.85	0.75	0.67	0.52	
M15 60- JBL L1M2.emd	15.69	10.80	13.71	1.21	1.73	0.87	0.62	0.62	0.76	0.78	0.86	0.84	0.94	0.88	0.95	0.90	0.96	0.99	0.98	1.04	1.05	1.01	0.94	0.92	0.87	0.76	0.64	0.54	
M15 60- JBL L1M1.emd	9.67	2.01	0.89	0.95	0.85	0.93	0.53	0.53	0.50	0.75	0.85	0.84	0.95	0.91	0.90	0.88	0.87	0.91	0.93	0.98	1.01	1.05	0.91	0.86	0.75	0.65	0.55		
Mitt.-JBL_L1	13.27	8.94	1.02	1.02	1.02	0.83	0.78	0.83	0.77	0.86	0.95	0.95	0.91	0.90	0.94	0.90	0.90	0.94	0.97	0.97	0.99	1.03	0.97	0.97	0.92	0.87	0.76	0.65	0.54
M15 60- JBL L2M6.emd	13.72	11.21	10.17	0.72	0.88	0.77	0.50	0.92	0.92	0.91	0.89	0.90	0.87	0.83	0.84	0.88	0.93	0.98	0.95	0.96	0.99	0.94	0.98	0.91	0.84	0.74	0.66	0.55	
M15 60- JBL L2M5.emd	10.76	3.53	0.60	0.66	0.83	0.56	0.71	0.41	0.68	0.86	0.91	0.84	0.77	0.92	0.90	0.88	0.85	0.90	0.91	0.92	1.02	1.02	0.98	0.99	0.90	0.83	0.76	0.65	0.54
M15 60- JBL L2M4.emd	11.63	12.63	0.86	0.74	0.95	0.67	1.04	0.90	0.97	0.89	0.97	1.03	0.90	0.99	0.83	0.89	0.88	0.95	1.00	1.03	1.03	0.98	0.99	0.92	0.84	0.73	0.66	0.54	
M15 60- JBL L2M3.emd	10.93	4.98	0.66	0.92	0.81	0.60	1.04	0.70	0.75	0.74	0.94	0.96	0.85	0.86	0.88	0.90	0.90	0.90	0.98	1.00	1.00	0.99	0.97	0.90	0.85	0.73	0.64	0.51	
M15 60- JBL L2M2.emd	12.61	11.94	0.61	0.86	0.91	0.96	0.87	0.85	0.73	0.85	0.84	0.81	1.00	0.87	0.91	0.86	0.90	0.89	0.89	0.98	1.02	1.02	0.98	0.94	0.86	0.75	0.63	0.51	
M15 60- JBL L2M1.emd	13.47	13.47	1.08	1.01	0.95	0.85	0.55	0.78	0.56	0.84	0.91	0.93	0.90	0.91	0.97	0.95	0.89	0.95											

Messdaten mit markierten Ausreißerdaten

70-Grad_Eiliane	25Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz		
MLS 70 JBL LM16.emd	14.03	13.43	4.31	0.93	0.88	0.65	0.69	0.92	0.86	0.94	0.86	0.88	0.92	0.97	0.91	0.96	0.94	0.93	0.95	0.95	0.97	0.88	0.87	0.74	0.65	0.53	
MLS 70 JBL LM16.emd	16.09	14.93	3.21	0.82	1.22	1.14	0.89	1.09	0.66	0.62	0.94	0.96	0.92	0.91	0.88	0.96	0.94	0.93	0.92	0.93	0.92	0.81	0.74	0.63	0.54	0.52	
MLS 70 JBL LM16.emd	14.69	14.98	1.40	1.01	0.93	0.55	0.61	1.06	0.74	1.04	0.99	0.93	0.92	0.91	0.89	0.92	0.93	0.93	0.95	0.97	0.87	0.83	0.73	0.64	0.53	0.52	
MLS 70 JBL LM16.emd	14.68	13.75	1.84	1.16	1.17	0.85	1.15	0.70	0.88	1.01	1.04	0.98	0.90	0.82	0.92	0.87	0.89	0.96	0.98	0.93	0.95	0.92	0.88	0.74	0.65	0.53	
MLS 70 JBL LM16.emd	19.31	15.67	0.76	1.31	1.07	0.87	0.76	0.86	0.89	0.95	0.95	0.88	0.91	0.95	0.92	0.92	0.98	0.95	0.92	0.98	0.88	0.82	0.74	0.65	0.53	0.53	
MLS 70 JBL LM16.emd	10.98	12.58	0.90	0.96	0.87	0.92	0.54	1.00	0.77	0.80	0.85	0.83	0.91	0.92	0.88	0.90	0.91	0.92	0.95	0.98	0.94	0.89	0.85	0.75	0.65	0.53	
Mittl. JBL_L1	15.10	12.25	1.51	1.10	1.01	0.83	0.78	0.83	0.77	0.87	0.94	0.91	0.90	0.92	0.90	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.89	0.84	0.74	0.64	0.53	
MLS 70 JBL LM16.emd	12.47	13.31	0.71	0.73	0.89	0.75	0.73	0.86	0.92	1.01	0.90	0.89	0.95	0.86	0.88	0.89	0.93	0.97	0.93	0.94	0.94	0.91	0.88	0.85	0.75	0.63	0.53
MLS 70 JBL LM16.emd	16.53	2.16	0.61	0.67	0.71	0.73	0.66	0.62	0.66	0.62	0.93	0.82	0.85	0.87	0.82	0.86	0.97	1.00	0.94	0.94	0.91	0.87	0.84	0.75	0.63	0.52	
MLS 70 JBL LM16.emd	12.43	11.34	0.94	0.79	0.97	0.66	0.81	0.91	0.98	1.04	0.92	0.97	0.98	0.95	0.98	0.95	0.98	0.99	0.97	0.96	0.94	0.88	0.83	0.73	0.63	0.52	
MLS 70 JBL LM16.emd	10.35	11.32	0.93	0.82	0.69	1.10	0.71	0.79	0.75	0.95	0.94	0.87	0.88	0.92	0.95	0.97	0.98	0.94	0.95	0.98	0.82	0.73	0.62	0.53	0.53	0.53	
MLS 70 JBL LM16.emd	15.29	12.86	0.79	0.83	0.90	0.98	0.88	0.87	0.73	0.85	0.85	0.79	0.98	0.87	0.89	0.88	0.86	0.95	0.94	0.95	0.96	0.86	0.83	0.71	0.64	0.52	
MLS 70 JBL LM16.emd	12.39	13.34	1.05	1.02	0.97	0.83	0.88	0.76	0.72	0.84	0.90	0.93	0.88	0.87	0.94	0.86	0.83	0.93	1.00	0.99	0.95	0.90	0.82	0.75	0.64	0.52	
Mittl. JBL_L2	13.24	9.06	0.79	0.83	0.89	0.73	0.80	0.73	0.78	0.86	0.92	0.90	0.91	0.88	0.88	0.88	0.93	0.98	0.96	0.95	0.95	0.87	0.83	0.74	0.65	0.52	
Mittl. JBL_L2	14.17	10.65	0.91	0.95	0.89	0.78	0.78	0.78	0.78	0.82	0.93	0.91	0.89	0.89	0.89	0.88	0.93	0.98	0.96	0.95	0.95	0.87	0.83	0.74	0.64	0.52	
Mittl. Kugel_L1&L2	14.17	10.65	0.87	0.96	0.95	0.78	0.79	0.76	0.87	0.93	0.90	0.91	0.89	0.91	0.89	0.89	0.93	0.98	0.96	0.95	0.95	0.87	0.83	0.74	0.64	0.52	
MLS 70 Kugel LM16.emd	17.99	14.77	12.67	14.10	0.89	0.72	0.60	0.72	0.86	1.09	0.99	1.00	0.94	0.87	0.93	0.94	0.93	0.97	0.93	0.93	0.91	0.88	0.85	0.75	0.63	0.53	
MLS 70 Kugel LM16.emd	14.33	11.53	12.01	12.81	0.70	0.72	0.85	0.78	0.88	0.78	0.87	0.93	0.91	0.88	0.86	0.87	0.91	0.95	0.96	0.98	0.95	0.88	0.85	0.75	0.63	0.53	
MLS 70 Kugel LM16.emd	11.12	13.66	12.08	11.95	0.61	0.91	0.73	1.11	0.96	0.86	0.91	0.93	0.90	0.90	0.90	0.92	0.95	1.01	0.98	1.01	0.96	0.88	0.84	0.75	0.66	0.51	
MLS 70 Kugel LM16.emd	16.33	11.87	14.21	15.45	0.89	0.85	0.55	0.68	0.76	0.35	0.99	0.89	0.89	0.80	0.80	0.86	0.96	0.97	1.01	0.96	0.93	0.91	0.83	0.73	0.66	0.53	
MLS 70 Kugel LM16.emd	11.07	10.89	10.66	6.37	0.66	0.83	0.59	0.59	0.88	0.83	0.78	0.88	0.82	0.87	0.96	0.96	0.92	0.97	0.94	0.94	0.98	0.99	0.88	0.83	0.74	0.66	0.53
MLS 70 Kugel LM16.emd	12.21	14.10	14.92	12.81	0.91	0.83	0.48	0.82	0.79	0.81	0.88	0.85	0.89	0.88	0.89	0.97	0.90	0.97	0.92	0.92	0.99	0.96	0.91	0.91	0.75	0.70	0.54
Mittl. Kugel_L1	13.84	12.80	12.76	12.25	1.59	0.80	0.61	0.75	0.77	0.79	0.90	0.91	0.89	0.89	0.87	0.89	0.92	0.95	0.96	0.97	0.98	0.95	0.89	0.84	0.74	0.67	0.53
MLS 70 Kugel LM16.emd	8.75	15.92	14.38	9.40	1.27	0.87	0.67	0.65	0.86	1.20	1.06	0.94	0.92	0.72	0.93	0.95	0.95	0.93	0.94	0.97	0.97	0.90	0.83	0.71	0.66	0.53	
MLS 70 Kugel LM16.emd	13.55	8.20	0.63	2.26	1.12	1.00	1.07	0.85	0.99	1.01	0.82	1.01	0.93	0.89	0.83	0.90	0.98	0.98	0.95	0.96	0.96	0.98	0.89	0.84	0.74	0.66	0.51
MLS 70 Kugel LM16.emd	9.90	10.73	10.12	15.50	12.28	1.07	0.74	0.91	1.01	0.99	0.93	0.98	0.94	0.87	0.97	0.90	1.00	0.98	0.96	0.96	0.94	0.88	0.83	0.75	0.66	0.53	
MLS 70 Kugel LM16.emd	5.52	9.74	12.82	13.31	5.29	1.08	1.12	0.94	0.85	0.95	0.92	0.87	0.98	0.91	0.90	0.97	0.95	0.92	0.93	0.92	0.90	0.86	0.73	0.66	0.52	0.52	
MLS 70 Kugel LM16.emd	9.91	12.62	8.32	1.98	0.71	0.91	0.89	0.69	0.73	0.96	0.97	0.95	0.96	0.82	0.94	0.90	0.98	1.00	0.99	0.95	0.96	0.88	0.85	0.76	0.65	0.52	
MLS 70 Kugel LM16.emd	12.10	11.59	14.15	8.68	1.02	0.90	0.80	0.55	0.78	0.87	0.94	0.91	0.90	0.87	0.86	0.84	0.95	0.97	0.95	0.92	0.97	0.92	0.90	0.72	0.68	0.51	
Mittl. Kugel_L2	9.96	11.47	10.10	8.52	3.69	0.92	0.77	0.63	0.81	1.00	0.95	0.90	0.95	0.89	0.87	0.89	0.97	0.97	0.98	0.94	0.96	0.90	0.85	0.74	0.66	0.52	
Mittl. Kugel_L1&L2	11.90	12.14	11.43	10.38	2.60	0.86	0.69	0.79	0.93	0.90	0.92	0.90	0.92	0.88	0.88	0.91	0.96	0.97	0.93	0.96	0.96	0.89	0.85	0.74	0.66	0.52	

Korrigierte Messdaten ohne Ausreißer und Berechnung der entsprechenden arithmetischen Mittelwerte

70-Grad_Eiliane	25Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz		
MLS 70 JBL LM16.emd	16.89	13.43	0.93	0.93	1.15	0.88	0.65	0.91	0.86	0.94	0.86	0.88	0.92	0.97	0.91	0.96	0.94	0.93	0.95	0.95	0.97	0.88	0.87	0.74	0.65	0.53	
MLS 70 JBL LM16.emd	14.69	14.98	1.40	1.01	0.93	0.55	0.61	1.06	0.82	1.04	0.99	0.93	0.92	0.91	0.88	0.96	0.94	0.93	0.92	0.93	0.92	0.81	0.74	0.63	0.54	0.52	
MLS 70 JBL LM16.emd	14.68	13.75	0.84	1.16	1.17	0.85	1.15	0.70	0.88	1.01	1.04	0.98	0.90	0.82	0.92	0.87	0.89	0.96	0.98	0.93	0.95	0.92	0.88	0.73	0.64	0.52	
MLS 70 JBL LM16.emd	19.31	15.67	0.76	1.31	1.07	0.87	0.61	0.62	0.70	0.79	0.86	0.89	0.95	0.95	0.88	0.91	0.95	1.00	0.98	0.95	0.92	0.88	0.82	0.74	0.65	0.53	
MLS 70 JBL LM16.emd	10.98	12.58	0.90	0.96	0.87	0.92	0.54	1.00	0.77	0.80	0.85	0.83	0.91	0.92	0.88	0.90	0.91	0.92	0.95	0.98	0.94	0.89	0.85	0.75	0.65	0.53	
Mittl. JBL_L1	15.10	12.25	1.51	1.10	1.01	0.83	0.78	0.83	0.77	0.87	0.94	0.91	0.90	0.92	0.90	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.89	0.84	0.74	0.64	0.53	
MLS 70 JBL LM16.emd	12.47	13.31	0.71	0.73	0.89	0.75	0.73	0.86	0.92	1.01	0.90	0.89	0.95	0.86	0.88	0.89	0.93	0.97	0.93	0.93	0.93	0.91	0.88	0.85	0.75	0.63	0.53
MLS 70 JBL LM16.emd	16.53	2.16	0.61	0.67	0.71	0.73	0.66	0.62	0.66	0.62	0.93	0.82	0.85	0.87	0.82	0.86	0.97	1.00	0.94	0.94	0.91	0.87	0.84	0.75	0.63	0.52	
MLS 70 JBL LM16.emd	12.43	11.34	0.94	0.79	0.97	0.66	0.81	0.91	0.98	1.04	0.92	0.97	0.98	0.95	0.98	0.95	0.98	0.99	0.97	0.96	0.94	0.88	0.83	0.73	0.63	0.52	
MLS 70 JBL LM16.emd	10.35	11.32	0.93	0.82	0.69	1.10	0.71	0.79	0.75	0.95	0.94	0.87	0.88	0.92	0.95	0.97	0.98	0.94	0.95	0.98	0.82	0.73	0.62	0.53	0.53	0.53	
MLS 70 JBL LM16.emd	15.29	12.86	0.79	0.83	0.90	0.98	0.88	0.87	0.73	0.85	0.85	0.79	0.98	0.87	0.89	0.88	0.86	0.95	0.94	0.95	0.96	0.86	0.83	0.71	0.64	0.52	
MLS 70 JBL LM16.emd	12.39	13.34	1.05	1.02	0.97	0.83	0.88	0.76	0.72	0.84	0.90	0.93	0.88	0.87	0.94	0.86	0.83	0.93	1.00	0.99	0.95	0.90	0.82	0.75	0.64	0.52	
Mittl. JBL_L2	13.24	9.06	0.79	0.83	0.89	0.73	0.80	0.73	0.78	0.86	0.92	0.90	0.91	0.88	0.88	0.88	0.93	0.98	0.96	0.95	0.95	0.87	0.83	0.74	0.65	0.52	
Mittl. JBL_L2	14.17	10.65	0.87	0.96	0.95	0.78	0.79	0.76	0.87	0.93	0.90	0.91	0.89	0.91	0.89	0.89	0.93	0.98	0.96	0.95	0.95	0.87	0.83	0.74	0.64	0.52	
Mittl. Kugel_L1&L2	14.17	10.65	0.87	0.96	0.95	0.78	0.79	0.76	0.87	0.93	0.90	0.91	0.89	0.91	0.89	0.89	0.93	0.98	0.96	0.95	0.95						

Messdaten der einzelnen Mikrofonpositionen für beide Lautsprecher und Berechnung der entsprechenden Medianwerte

80-Grad_Ebene	25Hz	31Hz	40Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz	
M.S. 80_JBL_L1M6.emd	0.39	0.17	0.30	0.34	0.49	0.67	0.91	1.10	1.24	1.07	0.98	0.87	0.83	0.89	0.90	0.94	0.95	0.90	0.94	0.95	0.90	0.94	0.89	0.85	0.78	0.72	0.64	0.51
M.S. 80_JBL_L1M5.emd	0.10	0.02	-0.16	-0.24	-0.20	-0.08	0.46	0.14	-0.15	-0.08	-0.03	-0.03	-0.06	-0.01	-0.06	0.01	-0.05	0.03	0.00	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M.S. 80_JBL_L1M4.emd	0.10	-0.02	-0.16	-0.24	-0.26	0.05	-0.12	0.13	-0.06	0.28	0.08	0.05	0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
M.S. 80_JBL_L1M3.emd	-0.10	-0.09	0.21	-0.52	-0.06	-0.02	0.54	-0.04	-0.04	0.07	0.12	0.04	0.05	0.02	-0.14	-0.08	-0.04	-0.01	0.04	0.01	-0.02	-0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00
M.S. 80_JBL_L1M2.emd	0.10	0.12	0.02	-0.54	-0.20	0.02	-0.06	-0.35	-0.13	0.01	-0.07	0.03	0.08	0.04	0.04	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M.S. 80_JBL_L1M1.emd	-0.10	0.08	-0.02	0.40	0.06	-0.17	0.04	-0.13	0.04	-0.02	-0.08	-0.01	-0.01	0.08	0.09	-0.05	0.00	0.00	0.04	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
M.S. 80_Kugel_L1M6.emd	0.06	0.51	0.15	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
M.S. 80_Kugel_L1M5.emd	0.06	0.37	0.45	0.61	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
M.S. 80_Kugel_L1M4.emd	-0.04	0.00	0.05	-0.24	-0.05	-0.13	-0.12	0.10	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
M.S. 80_Kugel_L1M3.emd	0.19	-0.19	0.39	-0.49	-0.05	0.11	0.35	-0.11	0.01	-0.10	0.04	-0.05	-0.01	-0.02	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
M.S. 80_Kugel_L1M2.emd	0.33	0.07	0.16	0.34	-0.15	-0.03	0.08	0.05	-0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
M.S. 80_Kugel_L1M1.emd	0.06	0.00	-0.05	4.76	0.17	-0.08	-0.31	0.00	-0.02	-0.09	-0.12	0.09	-0.01	-0.02	-0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

Messdaten welche bereits im Voraus aus der Messdatenauswertung ausgeschlossen werden

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe enthalten

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe enthalten

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe enthalten

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe enthalten

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe enthalten

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe enthalten

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichen

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe enthalten

(a) 80 Grad Stellung

Messdaten und Berechnung der Medianwerte jeder Messreihe im DCPS

Messdaten der einzelnen Mikrofonpositionen für beide Lautsprecher und Berechnung der entsprechenden Medianwerte

90-Grad_Ebene	25Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz		
MLS_90_JBL_L1M6.emd	13.76	3.43	1.05	0.85	1.15	0.94	0.71	0.94	0.96	0.83	0.96	0.97	0.90	0.92	0.85	0.97	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.87	0.87	0.81	0.71	0.62	0.53
MLS_90_JBL_L1M5.emd	11.98	14.42	13.70	3.60	1.11	0.89	1.11	0.89	0.93	0.88	0.87	0.88	0.87	0.94	0.93	0.96	0.97	0.92	0.89	0.93	0.90	0.78	0.90	0.84	0.73	0.65	0.54
MLS_90_JBL_L1M4.emd	13.54	10.10	12.31	0.94	0.90	0.62	0.67	0.80	0.82	1.10	0.98	0.89	0.93	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92	0.94	0.91	0.88	0.84	0.84	0.73	0.65	0.52	
MLS_90_JBL_L1M3.emd	14.68	2.10	0.79	1.12	0.86	1.15	0.90	0.87	0.98	1.05	0.88	0.90	0.91	0.89	0.90	0.98	0.99	0.94	0.94	0.95	0.95	0.89	0.82	0.72	0.65	0.51	
MLS_90_JBL_L1M2.emd	11.08	16.12	0.61	1.19	0.73	0.87	0.62	0.67	0.67	0.49	0.83	0.87	0.96	0.88	0.97	0.93	0.93	0.91	0.96	0.95	0.85	0.80	0.72	0.65	0.51		
MLS_90_JBL_L1M1.emd	11.52	7.54	0.94	0.96	0.88	0.95	0.59	0.83	0.80	0.89	0.91	0.89	0.90	0.95	0.92	0.92	0.96	0.99	0.94	0.95	0.95	0.86	0.82	0.72	0.63	0.54	
Median_JBL_L1	12.61	8.82	1.04	1.00	0.88	0.77	0.71	0.78	0.84	0.94	0.93	0.92	0.93	0.93	0.92	0.92	0.93	0.94	0.94	0.94	0.88	0.82	0.72	0.63	0.54		
MLS_90_JBL_L2M6.emd	11.28	12.26	0.74	0.77	0.99	0.88	0.77	0.82	0.33	1.01	0.85	0.93	0.93	0.84	0.88	0.87	0.88	0.89	0.89	0.91	0.97	0.92	0.86	0.80	0.72	0.63	0.52
MLS_90_JBL_L2M5.emd	13.35	0.89	0.61	0.73	0.86	0.63	0.74	0.77	0.70	0.75	0.95	0.91	0.82	0.81	0.91	0.86	0.94	0.93	0.92	0.93	0.93	0.91	0.87	0.81	0.74	0.62	0.53
MLS_90_JBL_L2M4.emd	17.07	12.36	0.88	0.84	1.01	0.75	0.49	0.71	1.00	1.04	0.89	1.07	0.88	0.84	0.84	0.91	0.91	0.91	0.93	0.92	0.93	0.96	0.87	0.81	0.71	0.62	0.54
MLS_90_JBL_L2M3.emd	13.15	6.07	0.65	0.96	0.78	0.64	1.13	0.75	0.79	0.77	1.00	0.93	0.89	0.90	0.90	0.84	0.92	0.95	0.93	0.92	0.96	0.93	0.87	0.79	0.70	0.62	0.51
MLS_90_JBL_L2M2.emd	13.65	14.28	0.64	0.72	0.80	0.80	0.88	0.78	0.82	0.81	0.87	1.03	0.94	0.91	0.90	0.88	0.90	0.93	0.91	0.94	0.91	0.93	0.87	0.86	0.74	0.62	0.54
MLS_90_JBL_L2M1.emd	14.31	9.64	0.99	0.91	0.90	0.86	0.60	0.71	0.70	0.81	0.92	0.89	0.91	0.84	0.94	0.95	0.94	0.96	0.92	0.96	0.92	0.96	0.90	0.80	0.62	0.53	
Median_JBL_L2	13.50	10.95	0.70	0.80	0.88	0.80	0.76	0.75	0.74	0.82	0.94	0.93	0.91	0.91	0.88	0.87	0.91	0.93	0.93	0.93	0.95	0.91	0.87	0.81	0.73	0.62	0.53
Median_JBL_L1&L2	13.06	9.88	0.85	0.92	0.94	0.84	0.74	0.77	0.78	0.84	0.93	0.92	0.90	0.88	0.91	0.90	0.93	0.93	0.93	0.93	0.95	0.91	0.87	0.81	0.73	0.63	0.53
MLS_90_Kugel_L1M6.emd	15.27	13.64	16.45	12.65	0.88	0.76	0.67	0.69	0.87	1.10	1.04	1.07	0.98	0.87	0.83	0.89	0.90	0.94	0.95	0.90	0.94	0.89	0.85	0.78	0.72	0.64	0.50
MLS_90_Kugel_L1M5.emd	11.35	12.24	10.87	12.04	5.76	0.73	0.93	0.78	0.91	0.74	0.94	0.88	0.85	0.84	0.82	0.83	0.91	0.88	1.00	0.95	0.94	0.93	0.88	0.81	0.74	0.64	0.51
MLS_90_Kugel_L1M4.emd	11.71	12.30	16.63	13.19	1.04	0.84	0.58	0.68	0.75	1.12	0.98	0.86	0.89	0.90	0.81	0.88	0.95	1.00	0.97	0.96	0.91	0.83	0.82	0.71	0.66	0.52	
MLS_90_Kugel_L1M3.emd	12.72	10.31	12.63	8.53	1.74	0.82	0.98	0.78	0.72	0.82	1.02	0.84	0.83	0.83	0.71	0.81	0.87	0.92	0.95	0.93	0.93	0.88	0.82	0.73	0.63	0.51	
MLS_90_Kugel_L1M2.emd	15.12	11.46	14.56	12.30	0.80	0.82	0.55	0.63	0.51	0.94	0.90	0.82	0.82	0.82	0.62	0.73	0.82	0.93	0.92	0.92	0.88	0.83	0.74	0.68	0.51		
MLS_90_Kugel_L1M1.emd	15.32	12.24	13.27	14.21	0.88	0.82	0.64	0.78	0.80	0.88	0.92	0.91	0.88	0.88	0.82	0.91	0.93	0.93	0.93	0.93	0.95	0.94	0.88	0.82	0.72	0.65	0.51
Median_Kugel_L1	13.79	9.34	11.83	2.76	0.74	0.91	0.75	0.64	0.85	1.15	1.06	0.88	0.94	0.96	0.88	0.89	0.92	0.97	0.93	0.93	0.98	0.95	0.85	0.80	0.72	0.64	0.51
MLS_90_Kugel_L2M6.emd	14.18	11.23	0.71	6.79	0.95	1.04	1.00	0.61	0.83	0.90	0.99	0.82	0.96	0.88	0.89	0.88	0.90	0.92	0.96	0.94	0.96	0.92	0.86	0.81	0.72	0.66	0.48
MLS_90_Kugel_L2M5.emd	12.53	17.67	14.09	5.42	0.86	0.76	0.26	0.74	0.89	0.97	1.04	0.93	0.98	1.00	0.84	0.88	1.01	0.94	0.91	0.96	0.90	0.83	0.81	0.72	0.66	0.51	
MLS_90_Kugel_L2M4.emd	16.05	17.73	0.69	1.13	0.80	0.95	1.10	0.62	0.72	0.92	0.92	0.98	0.90	0.81	0.88	0.86	0.94	0.94	0.97	0.95	0.92	0.89	0.83	0.73	0.66	0.50	
MLS_90_Kugel_L2M3.emd	10.13	9.80	13.96	2.84	0.71	0.86	0.88	0.67	0.77	0.94	0.98	0.88	0.95	0.80	0.95	0.94	0.90	0.95	0.93	0.92	0.93	0.89	0.85	0.70	0.65	0.51	
MLS_90_Kugel_L2M2.emd	15.42	17.13	11.28	9.09	0.94	0.92	0.56	0.64	0.79	0.85	0.87	0.99	0.94	0.85	0.84	0.92	0.87	0.96	0.94	0.96	0.95	0.91	0.88	0.85	0.73	0.65	0.52
MLS_90_Kugel_L2M1.emd	13.99	14.43	11.56	4.13	0.83	0.91	0.82	0.64	0.81	0.80	0.95	0.91	0.95	0.89	0.88	0.89	0.95	0.94	0.96	0.94	0.96	0.92	0.87	0.82	0.72	0.66	0.51
Median_Kugel_L2	14.65	13.34	12.56	8.15	0.86	0.87	0.73	0.71	0.81	0.80	0.95	0.91	0.91	0.88	0.88	0.90	0.94	0.96	0.94	0.95	0.92	0.87	0.82	0.72	0.66	0.51	
Median_Kugel_L1&L2	14.65	13.34	12.56	8.15	0.86	0.87	0.73	0.71	0.81	0.80	0.95	0.91	0.91	0.88	0.88	0.90	0.94	0.96	0.94	0.95	0.92	0.87	0.82	0.72	0.66	0.51	

Messdaten welche bereits im Voraus aus der Messdatenauswertung ausgeschlossen werden

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte beider Positionen enthalten

Messdaten welche jeweils gemittelte Werte der entsprechenden Messreihe abweichend

Messdaten welche um mehr als 90% vom Median einer Messreihe abweichend

Prozentuale Abweichung der einzelnen Messwerte vom Median zur Bestimmung der Ausreißerdaten

90-Grad_Ebene	25Hz	50Hz	63Hz	80Hz	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz	
MLS_90_JBL_L1M6.emd	-0.09	-0.61	0.06	-0.18	0.15	0.03	0.07	0.40	0.13	0.11	-0.05	0.06	-0.02	0.01	-0.01	0.01	-0.03	0.01	-0.05	-0.01	-0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.01
MLS_90_JBL_L1M5.emd	-0.07	0.64	12.71	2.46	1.11	0.32	-0.66	0.90	-0.02	-0.05	0.19	0.08	0.01	-0.01	0.02	-0.02	-0.03	0.00	0.00	0.01	-0.03	0.01	-0.03	0.01	-0.03	0.01
MLS_90_JBL_L1M4.emd	0.07	0.15	0.23	-0.10	-0.11	-0.32	-0.07	0.00	-0.02	-0.05	0.13	0.14	0.08	0.02	0.01	-0.02	-0.03	0.02	0.01	-0.02	0.01	0.00	0.01	-0.02	0.01	0.00
MLS_90_JBL_L1M3.emd	0.16	-0.26	-0.21	0.08	-0.11	-0.03	0.72	-0.25	0.07	0.13	0.14	0.04	0.08	0.02	0.05	-0.02	-0.03	-0.04	0.08	-0.02	0.02	0.01	-0.03	-0.02	0.00	0.03
MLS_90_JBL_L1M2.emd	-0.12	0.83	-0.39	0.14	-0.27	-0.02	-0.07	0.00	-0.18	-0.43	-0.10	-0.04	0.08	-0.02	0.05	-0.02	-0.03	-0.04	0.08	-0.02	0.02	0.01	-0.03	-0.02	0.00	0.03
MLS_90_JBL_L1M1.emd	0.09	-0.15	-0.05	-0.08	-0.12	0.08	-0.21	-0.12	0.02	-0.08	-0.04	-0.15	-0.02	-0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	-0.02	0.01	0.01	-0.02	0.01	-0.03	0.03
MLS_90_JBL_L2M6.emd	-0.16	0.12	0.06	-0.05	0.13	0.09	0.01	0.09	-0.55	0.24	-0.09	0.00	0.02	-0.02	-0.02	0.01	-0.02	-0.04	0.07	0.02	0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02
MLS_90_JBL_L2M5.emd	-0.01	-0.92	-0.13	-0.10	-0.02	-0.22	-0.03	-0.11	-0.05	0.03	0.02	0.02	0.00	-0.06	-0.09	0.03	-0.01	0.04	0.00	-0.01	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MLS_90_JBL_L2M4.emd	0.26	0.13	0.26	0.05	-0.15	-0.07	-0.01	-0.35	0.05	0.09	0.08	0.12	-0.02	0.23	-0.01	-0.05	-0.02	0.01	-0.02	0.01	-0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.02
MLS_90_JBL_L2M3.emd	-0.03	-0.45	-0.06	0.19	-0.11	-0.21	0.49	0.00	0.07	-0.06	0.07	0.00	-0.02	0.03	0.01	-0.05	0.06	0.05	0.00	-0.01	0.00	-0.02	-0.02	-0.04	0.00	-0.04</

Anhang C.

Simulierte Nachhallzeiten im Domchorprobensaal

In den Abbildungen sind die schlussendlich zum Einsatz gekommenen, raumakustischen Simulationsergebnisse abgebildet. Abbildung C.1 zeigt den Vergleich zwischen der tatsächlich existierenden Nachhallzeit des Zustandes in der 90 Grad Stellung.

Dem gegenübergestellt ist das Ergebnis der statistischen Berechnung mit Excel und die Nachhallzeiten, welche mit der Simulationssoftware EASE ermittelt wurden. Für eine bessere Vergleichbarkeit wird hier die Skalierung der Y-Achse geändert. Die entsprechenden Zahlenwerte sind in der Tabelle C.2 dargestellt.

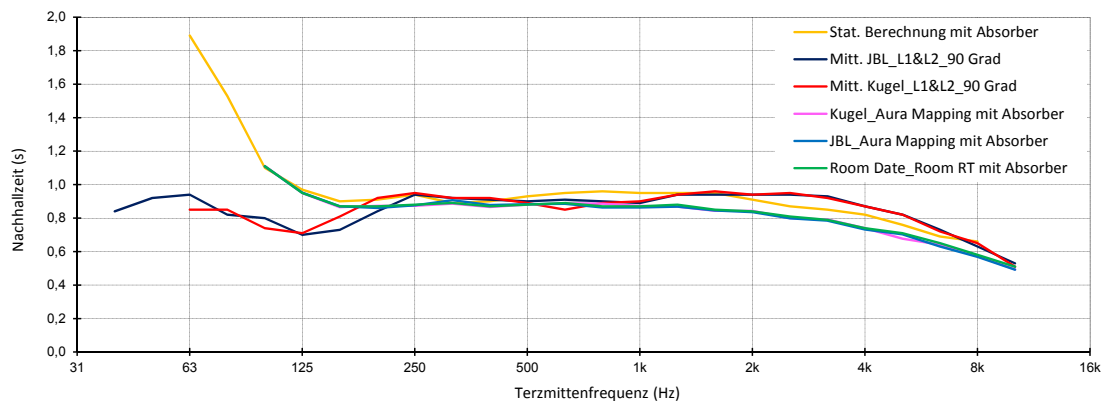


Abbildung C.1.: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Nachhallzeiten im DCPS

90 Grad Filename	Beschreibung																V: 394,56 m³											
Stat. Berechnung mit Absorber	T_0 mit Absorber																S: 341,03 m³											
Mitt. JBL_L3&L2_90 Grad	T30 (1/3rd Oct.) [5]																											
Mitt. Kugel_L3&L2_90 Grad	T30 (1/3rd Oct.) [5]																											
31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	
			1,89	1,53	1,10	0,97	0,90	0,91	0,94	0,89	0,90	0,93	0,95	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,91	0,87	0,85	0,82	0,76	0,69	0,66			
		0,84	0,92	0,94	0,82	0,80	0,70	0,73	0,84	0,94	0,92	0,91	0,90	0,91	0,90	0,89	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,87	0,82	0,73	0,63	0,53	
				0,85	0,85	0,74	0,71	0,81	0,92	0,95	0,92	0,89	0,85	0,89	0,89	0,90	0,94	0,96	0,94	0,95	0,92	0,87	0,82	0,72	0,65	0,51		
0 Grad Filename	Beschreibung																V: 409,42 m³											
Stat. Berechnung ohne Absorber	T_0 ohne Absorber																S: 341,03 m³											
Mitt. JBL_L3&L2_0 Grad	T30 (1/3rd Oct.) [5]																											
Mitt. Kugel_L3&L2_0 Grad	T30 (1/3rd Oct.) [5]																											
31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	
			1,62	1,66	1,69	1,90	2,23	2,48	2,87	3,15	3,46	3,47	3,53	3,61	3,51	3,42	3,34	2,92	2,50	2,29	2,09	1,74	1,42	1,26				
	0,74	0,84	0,89	0,70	0,76	0,81	0,88	1,02	1,02	1,14	1,31	1,43	1,58	1,68	1,77	1,87	1,83	1,87	1,79	1,71	1,51	1,32	1,10	0,88	0,69			
			0,87	0,80	0,79	0,76	0,88	0,99	1,07	1,18	1,33	1,45	1,56	1,66	1,78	1,84	1,81	1,86	1,79	1,68	1,53	1,34	1,10	0,94	0,67			
90 Grad Filename	Beschreibung																V: 384,66 m³											
Kugel_Aura Mapping mit Absorber	T30 (1/3rd Oct.) [5]																S: 336,03 m³											
JBL_Aura Mapping mit Absorber	T30 (1/3rd Oct.) [5]																											
Room Date_Room RT mit Absorber	T30 (1/3rd Oct.) [5]																											
31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	
					1,11	0,95	0,87	0,87	0,87	0,89	0,87	0,88	0,89	0,89	0,87	0,87	0,84	0,84	0,80	0,79	0,74	0,68	0,64	0,57	0,49			
					1,11	0,95	0,87	0,86	0,88	0,89	0,86	0,88	0,89	0,86	0,86	0,87	0,85	0,84	0,80	0,79	0,73	0,70	0,63	0,57	0,49			
					1,11	0,95	0,87	0,87	0,87	0,88	0,89	0,87	0,88	0,89	0,87	0,87	0,88	0,85	0,84	0,81	0,79	0,74	0,71	0,65	0,58	0,51		

Abbildung C.2.: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten/berechneten Nachhallzeiten im DCPS

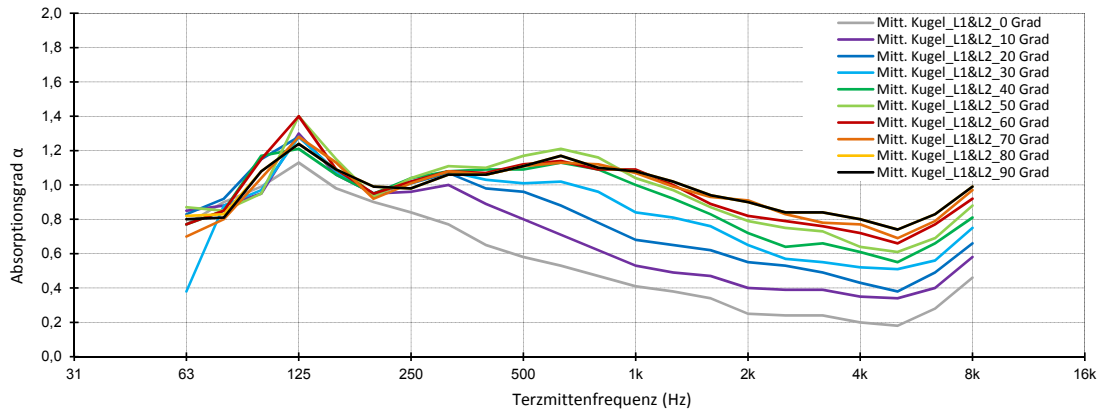
Anhang D.

Absorptionsgrade im Domchorprobensaal

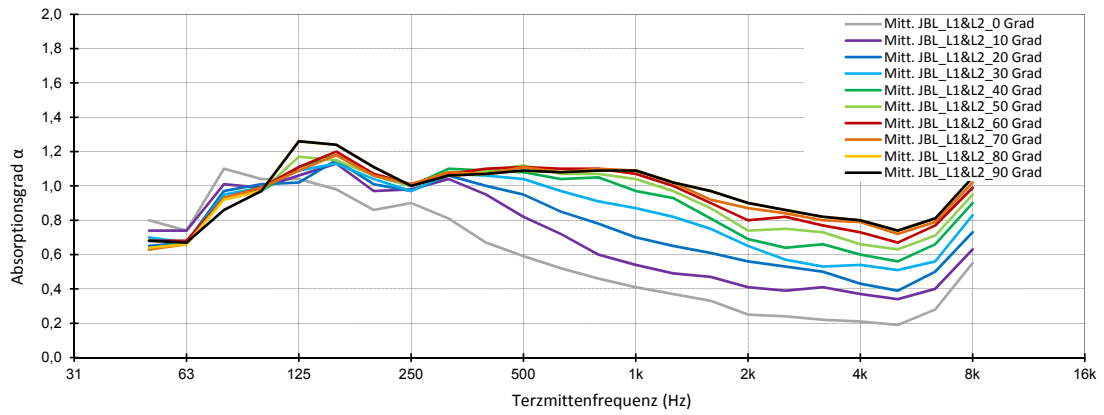
D.1. Berechnete Absorptionsgrade

Die folgenden Abbildungen zeigen die aus den gemessenen Nachhallzeiten und der simulierten Nachhallzeit des leeren Raumes errechneten Absorptionsgrade für jede der zehn verschiedenen Lamellenstellungen.

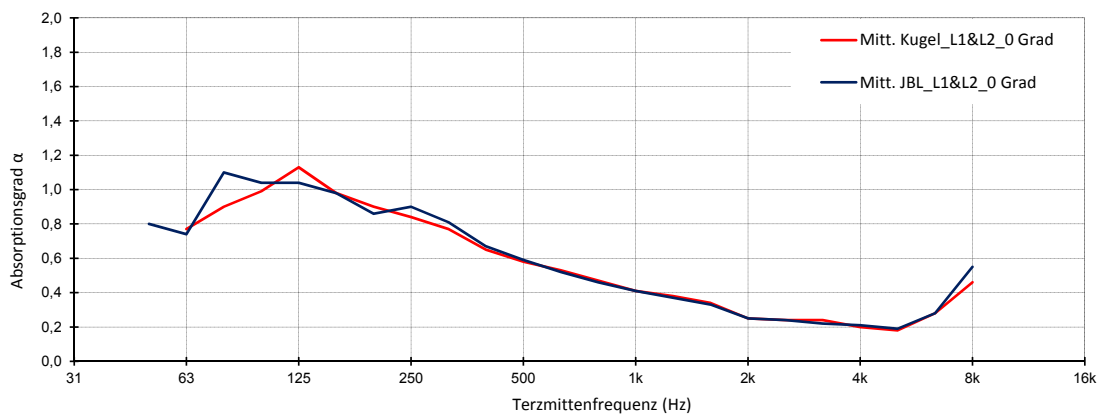
Berechnungsgrundlage liefert dabei die umgestellte Formel nach *Eyring*. Ebenso wie bei der Demonstration der Nachhallzeiten ist hier aus Gründen der Vollständigkeit noch einmal der Vergleich aller Ergebnisse in einer Grafik für beide Messlautsprecher separat dargestellt (siehe D.1a & D.1b).



(a) alle Zustände - Kugel

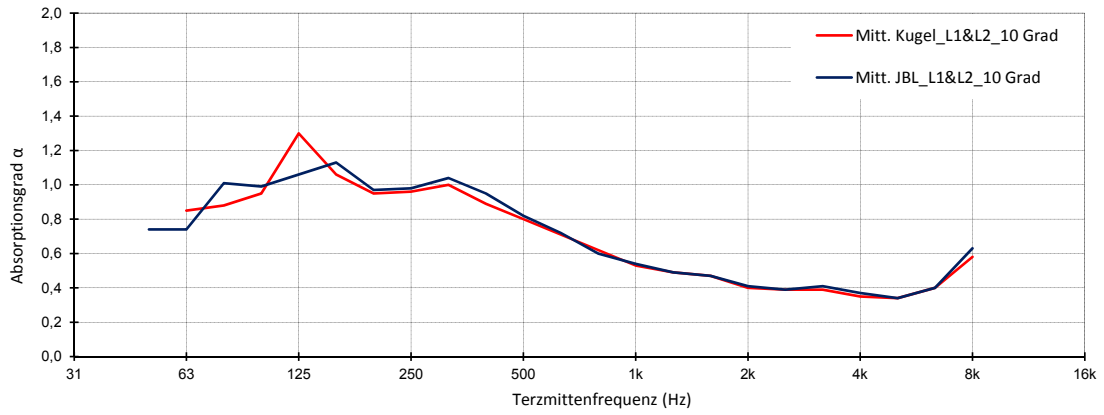


(b) alle Zustände - JBL

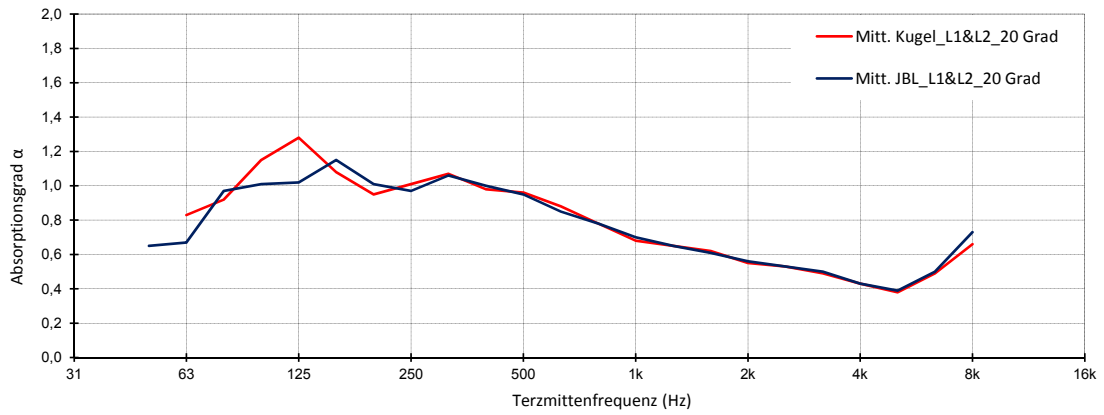


(c) 0 Grad Stellung

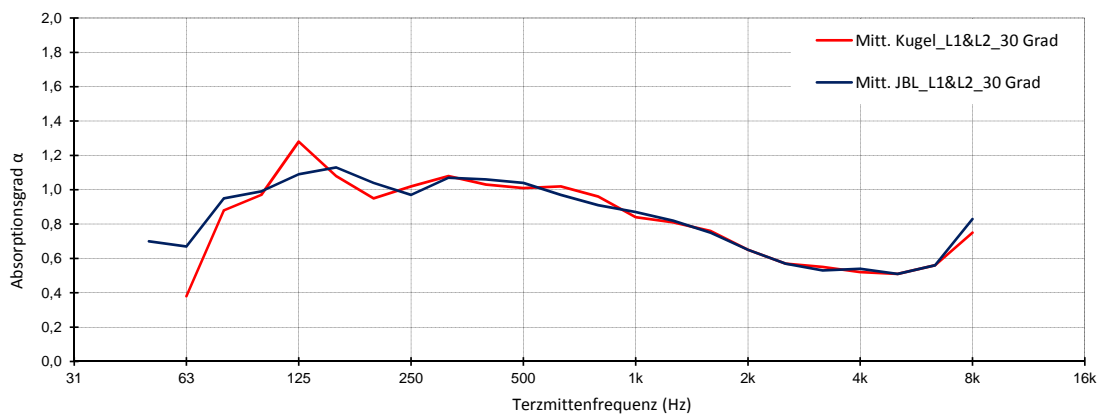
Abbildung D.1.: Berechnete Absorptionsgrade - alle Stellungen im DCPS



(d) 10 Grad Stellung

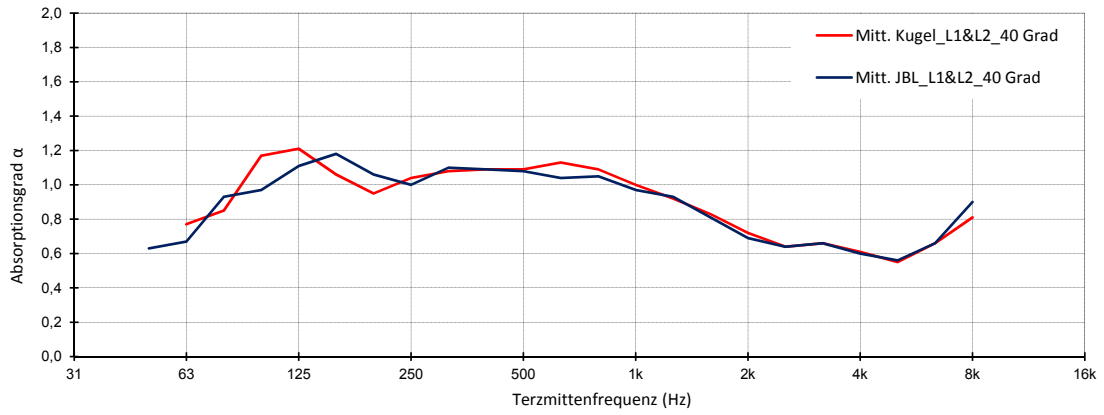


(e) 20 Grad Stellung

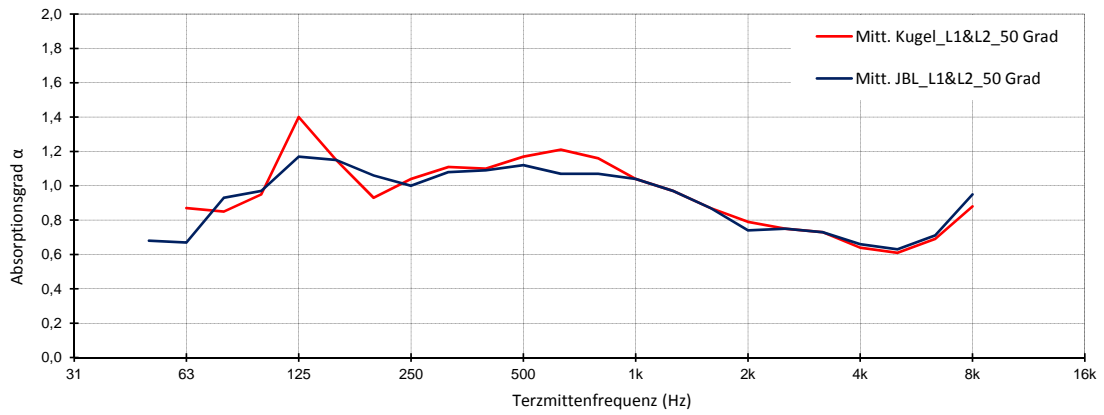


(f) 30 Grad Stellung

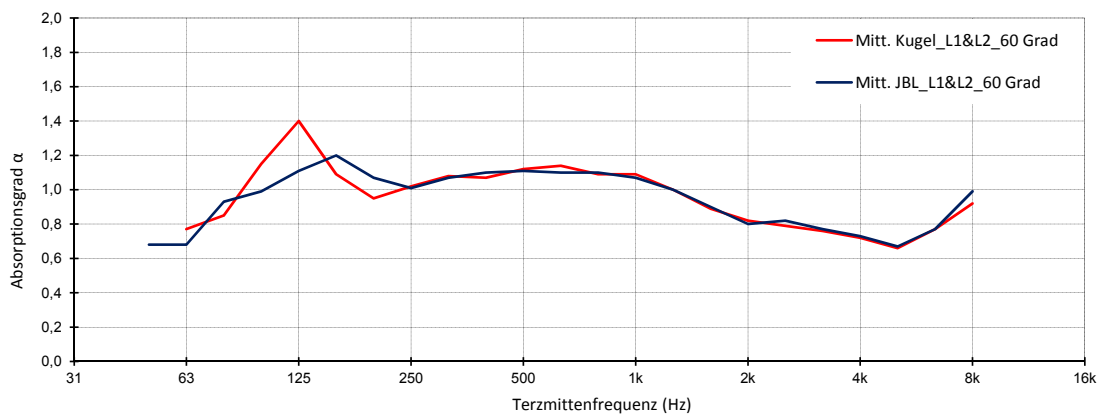
Berechnete Absorptionsgrade - alle Stellungen im DCPS



(g) 40 Grad Stellung

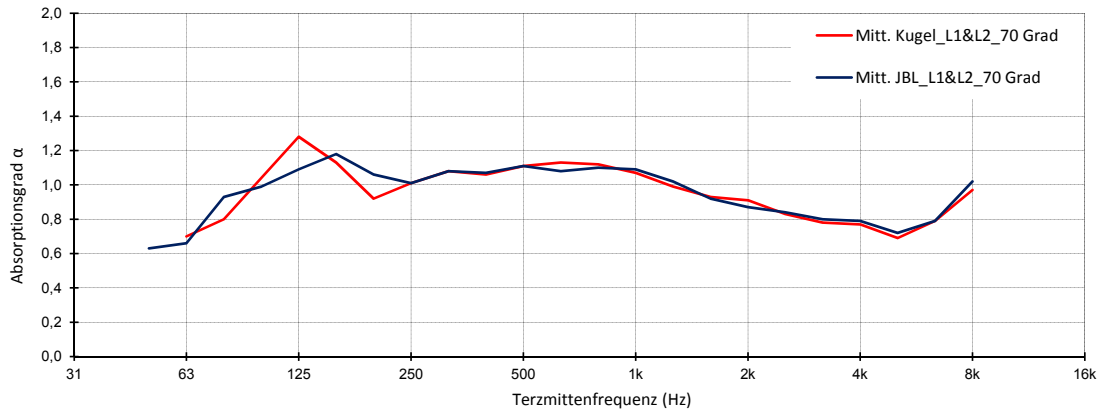


(h) 50 Grad Stellung

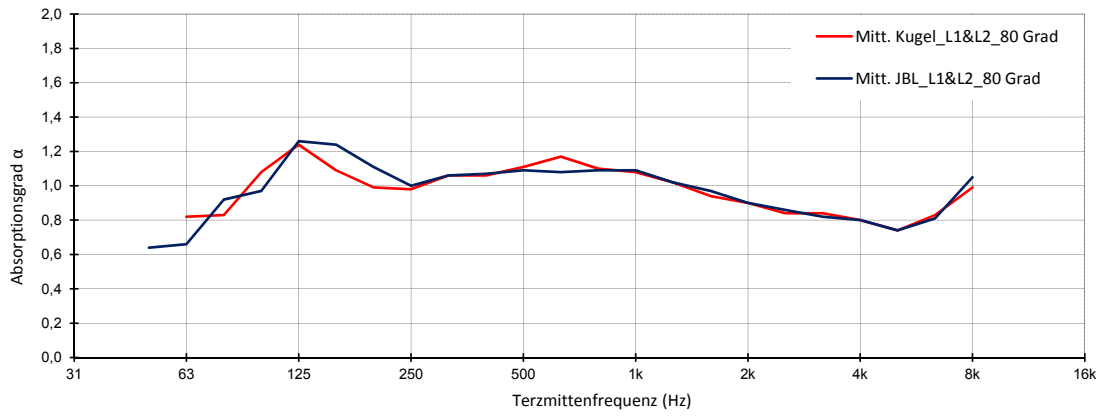


(i) 60 Grad Stellung

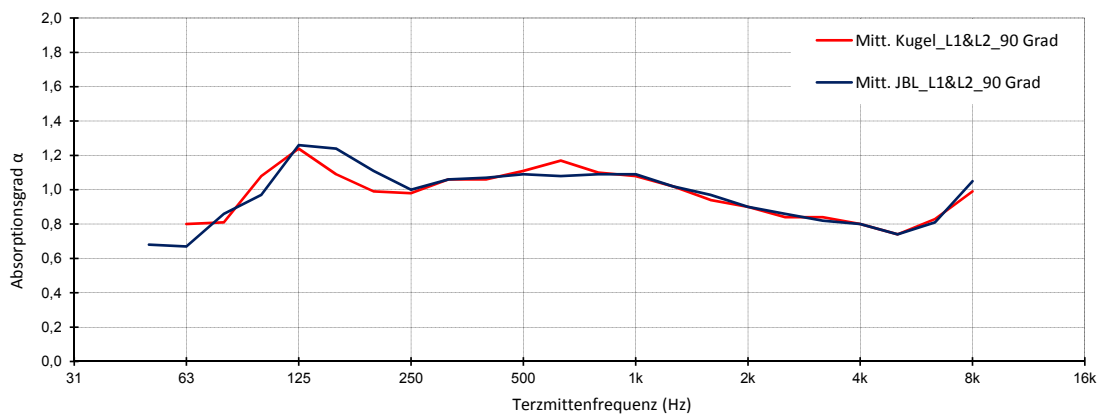
Berechnete Absorptionsgrade - alle Stellungen im DCPS



(j) 70 Grad Stellung



(k) 80 Grad Stellung



(l) 90 Grad Stellung

Berechnete Absorptionsgrade - alle Stellungen im DCPS

D.2. Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden

Alle hier gezeigten Ergebnisse (*DIN EN ISO 354, Sabine, Eyring & Millington/Sette*) sind für alle zehn Winkelstellungen durchgeführt worden.

Die Ergebnisse nach Eyring sind in Tabelle D.2 zu finden. Exemplarisch ist eine Auswertung der Messdaten für die 90 Grad Stellung (D.3) dargestellt.

Alle Zustände	Filename	Beschr.
	JBL_EYRING_0 Grad	α E
	Kugel_EYRING_0 Grad	α E
	JBL_EYRING_10 Grad	α E
	Kugel_EYRING_10 Grad	α E
	JBL_EYRING_20 Grad	α E
	Kugel_EYRING_20 Grad	α E
	JBL_EYRING_30 Grad	α E
	Kugel_EYRING_30 Grad	α E
	JBL_EYRING_40 Grad	α E
	Kugel_EYRING_40 Grad	α E
	JBL_EYRING_50 Grad	α E
	Kugel_EYRING_50 Grad	α E
	JBL_EYRING_60 Grad	α E
	Kugel_EYRING_60 Grad	α E
	JBL_EYRING_70 Grad	α E
	Kugel_EYRING_70 Grad	α E
	JBL_EYRING_80 Grad	α E
	Kugel_EYRING_80 Grad	α E
	JBL_EYRING_90 Grad	α E
	Kugel_EYRING_90 Grad	α E

31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	6.3k	8k	10k	12.5k	16k
			0.80	0.74	0.71	0.90	0.99	1.13	0.98	0.90	0.84	0.77	0.65	0.58	0.53	0.47	0.41	0.38	0.34	0.25	0.24	0.24	0.20	0.18	0.28	0.46	
		0.74	0.74	1.01	0.99	1.06	1.13	0.97	0.98	1.04	0.95	0.82	0.72	0.60	0.54	0.49	0.47	0.41	0.37	0.33	0.25	0.24	0.22	0.21	0.19	0.28	0.55
		0.85	0.88	0.95	1.30	1.06	1.30	1.06	0.95	0.96	1.00	0.89	0.80	0.71	0.62	0.53	0.49	0.47	0.40	0.39	0.31	0.35	0.34	0.40	0.40	0.58	
		0.65	0.67	0.97	1.01	1.02	1.15	1.01	0.97	1.06	1.00	0.95	0.85	0.78	0.70	0.65	0.61	0.56	0.53	0.50	0.43	0.39	0.43	0.38	0.49	0.66	
		0.83	0.92	1.15	1.28	1.08	1.28	1.08	0.95	1.01	1.07	0.98	0.88	0.78	0.68	0.65	0.62	0.55	0.53	0.49	0.43	0.38	0.49	0.66			
		0.70	0.67	0.95	0.99	1.09	1.13	1.04	0.97	1.07	1.06	1.04	0.97	0.91	0.87	0.82	0.75	0.65	0.57	0.53	0.54	0.51	0.56	0.83			
		0.38	0.88	0.97	1.28	1.08	0.95	1.02	1.08	1.03	1.01	1.02	0.96	0.84	0.81	0.76	0.65	0.57	0.55	0.52	0.51	0.56	0.75				
		0.63	0.67	0.93	0.97	1.11	1.18	1.06	1.00	1.10	1.09	1.08	1.04	1.05	0.97	0.93	0.81	0.69	0.64	0.66	0.60	0.60	0.56	0.66	0.90		
		0.77	0.85	1.17	1.21	1.06	0.95	1.04	1.08	1.09	1.09	1.09	1.13	1.09	1.00	0.92	0.83	0.72	0.64	0.66	0.61	0.55	0.66	0.81			
		0.68	0.67	0.93	0.97	1.17	1.15	1.06	1.00	1.08	1.09	1.12	1.07	1.07	1.04	0.97	0.87	0.74	0.75	0.73	0.66	0.63	0.71	0.95			
		0.87	0.85	0.95	1.40	1.15	0.93	1.04	1.11	1.10	1.10	1.17	1.21	1.16	1.04	0.97	0.87	0.79	0.75	0.73	0.64	0.61	0.69	0.88			
		0.68	0.68	0.93	0.99	1.11	1.20	1.07	1.01	1.07	1.10	1.11	1.10	1.10	1.07	1.00	0.90	0.80	0.82	0.77	0.73	0.67	0.73	0.67	0.77	0.99	
		0.77	0.85	1.15	1.40	1.09	0.95	1.02	1.08	1.07	1.12	1.14	1.09	1.09	1.09	1.00	0.89	0.82	0.79	0.76	0.72	0.66	0.77	0.92			
		0.63	0.66	0.93	0.99	1.09	1.18	1.06	1.01	1.08	1.07	1.11	1.08	1.10	1.09	1.02	0.92	0.87	0.84	0.80	0.79	0.72	0.79	1.02			
		0.70	0.80	1.04	1.28	1.13	0.92	1.01	1.08	1.06	1.11	1.13	1.12	1.07	1.07	0.99	0.93	0.91	0.83	0.78	0.77	0.69	0.79	0.97			
		0.64	0.66	0.92	0.97	1.24	1.11	1.00	1.06	1.07	1.09	1.08	1.09	1.09	1.08	1.02	0.97	0.90	0.86	0.82	0.80	0.74	0.81	1.05			
		0.82	0.83	1.08	1.24	1.09	0.99	0.98	1.06	1.11	1.17	1.10	1.08	1.12	1.10	1.08	1.02	0.94	0.90	0.84	0.84	0.80	0.74	0.83	0.99		
		0.68	0.67	0.86	0.97	1.26	1.24	1.11	1.00	1.06	1.07	1.09	1.08	1.09	1.08	1.02	0.97	0.90	0.86	0.82	0.80	0.74	0.81	1.05			
		0.80	0.81	1.08	1.24	1.09	0.99	0.98	1.06	1.11	1.17	1.10	1.08	1.12	1.10	1.08	1.02	0.94	0.90	0.84	0.84	0.80	0.74	0.83	0.99		

Abbildung D.2.: Ergebnisse der berechneten Absorptionsgrade nach Eyring - alle Zustände im DCPS

90 Grad Filename	Beschr.																																																																																																																																																																																																																																							
Stat. Berechn. des leeren Raumes	I	O															Abs.grad des leeren Raumes	α	O															Mitt. JBL L1&L2 90 Grad	T	S															Mitt. Kugel L1&L2 90 Grad	T	S															90 Grad Filename	Beschr.																JBL DIN EN ISO 354 90 Grad	α	N															Kugel DIN EN ISO 354 90 Grad	α	N															JBL SABINE 90 Grad	α	S															Kugel SABINE 90 Grad	α	S															JBL EYRING 90 Grad	α	E															Kugel EYRING 90 Grad	α	E															JBL MILLINGTON/SETTE 90 Grad	α	MS															Kugel MILLINGTON/SETTE 90 Grad	α	MS															Volumen Donchortprobensaal	V	391,57	[m ³]	Absorberfläche (22,33m ² /Seite)	S_1	44,66	[m ²]	komplette Oberfläche im Raum	S	341,03	[m ²]
Abs.grad des leeren Raumes	α	O																																																																																																																																																																																																																																						
Mitt. JBL L1&L2 90 Grad	T	S																																																																																																																																																																																																																																						
Mitt. Kugel L1&L2 90 Grad	T	S																																																																																																																																																																																																																																						
90 Grad Filename	Beschr.																																																																																																																																																																																																																																							
JBL DIN EN ISO 354 90 Grad	α	N																																																																																																																																																																																																																																						
Kugel DIN EN ISO 354 90 Grad	α	N																																																																																																																																																																																																																																						
JBL SABINE 90 Grad	α	S																																																																																																																																																																																																																																						
Kugel SABINE 90 Grad	α	S																																																																																																																																																																																																																																						
JBL EYRING 90 Grad	α	E																																																																																																																																																																																																																																						
Kugel EYRING 90 Grad	α	E																																																																																																																																																																																																																																						
JBL MILLINGTON/SETTE 90 Grad	α	MS																																																																																																																																																																																																																																						
Kugel MILLINGTON/SETTE 90 Grad	α	MS																																																																																																																																																																																																																																						
Volumen Donchortprobensaal	V	391,57	[m ³]																																																																																																																																																																																																																																					
Absorberfläche (22,33m ² /Seite)	S_1	44,66	[m ²]																																																																																																																																																																																																																																					
komplette Oberfläche im Raum	S	341,03	[m ²]																																																																																																																																																																																																																																					

31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	
		1,62	1,66	1,69	1,90	2,23	2,48	2,87	3,15	3,46	3,47	3,53	3,61	3,51	3,42	3,34	2,92	2,50	2,29	2,09	1,74	1,42	1,26	1,26				
		0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,14			
		0,84	0,92	0,94	0,82	0,80	0,70	0,73	0,84	0,94	0,92	0,91	0,90	0,91	0,90	0,89	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,87	0,82	0,73	0,63	0,53		
						0,85	0,85	0,74	0,71	0,81	0,92	0,92	0,89	0,85	0,89	0,90	0,94	0,96	0,94	0,95	0,92	0,87	0,82	0,72	0,65	0,51		
31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	
		0,67	0,66	0,90	1,03	1,40	1,38	1,20	1,07	1,14	1,16	1,18	1,17	1,18	1,19	1,09	1,03	0,95	0,90	0,85	0,82	0,74	0,82	1,13				
		0,82	0,84	1,18	1,37	1,19	1,06	1,05	1,14	1,14	1,20	1,29	1,20	1,17	1,09	1,00	0,95	0,88	0,87	0,82	0,74	0,85	1,06					
		0,78	0,71	1,00	1,13	1,48	1,45	1,27	1,12	1,19	1,21	1,23	1,23	1,23	1,24	1,15	1,09	1,02	0,97	0,94	0,92	0,86	0,96	1,27				
				0,93	0,94	1,27	1,45	1,26	1,12	1,11	1,19	1,19	1,25	1,34	1,25	1,22	1,15	1,06	1,02	0,96	0,92	0,86	0,99	1,20				
		0,68	0,67	0,86	0,97	1,26	1,24	1,11	1,00	1,06	1,07	1,09	1,08	1,09	1,09	1,02	0,97	0,90	0,86	0,82	0,80	0,74	0,81	1,05				
				0,80	0,81	1,08	1,24	1,09	0,99	0,98	1,06	1,11	1,17	1,10	1,08	1,02	0,94	0,90	0,84	0,84	0,80	0,74	0,83	0,99				
		0,54	0,54	0,64	0,68	0,77	0,72	0,68	0,70	0,70	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,68	0,67	0,64	0,62	0,61	0,61	0,58	0,62	0,72				
		0,61	0,61	0,72	0,77	0,72	0,67	0,67	0,70	0,70	0,71	0,71	0,74	0,71	0,71	0,68	0,65	0,64	0,62	0,62	0,62	0,61	0,58	0,63	0,70			

Abbildung D.3.: Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmethoden - 90 Grad Stellung im DCPS

Anhang E.

Berechnete Absorptionsgrade des Modellaufbaus

Abbildung E.1a offenbart die Ergebnisse der berechneten Absorptionsgrade für das in AFMG SoundFlow verwendete Schichtenmodell der Absorbermaterialien.

Im Gegensatz dazu enthält Abbildung E.1b sämtliche berechneten Absorptionsgrade für den final zum Einsatz kommenden Schichtaufbau des Absorbers, bestehend aus den beiden Schichten (MFW & OPS), Unterspannstoff, Stoffbespannung und die Kombination aus Luftpolster mit davor liegender LK für alle Winkelstellungen.

Diffuse Field		Beschr.	31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	
Infinite		α																													
ISO 354 (4,0m x 3,0m)		α	0,05	0,09	0,15	0,24	0,35	0,49	0,62	0,74	0,84	0,90	0,93	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	
User Defined (1,7m x 0,7m)		α	0,07	0,14	0,25	0,44	0,68	0,90	1,02	1,05	1,06	1,05	1,03	1,01	1,00	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	1,08	1,05	1,03	1,01	1,00	0,99	0,99	0,98	0,97	0,97	

Unidirectional (Angle = 0°)		Beschr.	31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	
Infinite		α																													
ISO 354 (4,0m x 3,0m)		α	0,03	0,05	0,10	0,17	0,28	0,42	0,59	0,73	0,86	0,94	0,97	0,97	0,96	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,97	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	
User Defined (1,7m x 0,7m)		α	0,03	0,06	0,12	0,23	0,38	0,54	0,68	0,76	0,86	0,97	1,00	0,96	0,96	0,94	0,95	0,96	0,96	0,94	0,95	0,98	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	

(a) Berechneter Absorptionsgrad - Modellentwurf

SoundFlow		Beschr.	31	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k	6,3k	8k	10k	12,5k	16k	
0 Grad		α																													
10 Grad		α	0,03	0,05	0,10	0,20	0,36	0,61	0,86	0,94	0,85	0,68	0,54	0,43	0,31	0,18	0,10	0,06	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
20 Grad		α	0,03	0,05	0,10	0,19	0,33	0,55	0,79	0,94	0,94	0,83	0,70	0,59	0,47	0,30	0,16	0,11	0,09	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	
30 Grad		α	0,03	0,05	0,10	0,18	0,31	0,51	0,73	0,91	0,97	0,93	0,84	0,75	0,65	0,46	0,27	0,18	0,15	0,11	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	
40 Grad		α	0,03	0,05	0,09	0,17	0,29	0,47	0,67	0,85	0,96	0,98	0,95	0,91	0,85	0,70	0,47	0,34	0,29	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	
50 Grad		α	0,03	0,05	0,09	0,16	0,28	0,44	0,63	0,81	0,93	0,99	0,99	0,98	0,96	0,87	0,67	0,53	0,47	0,37	0,36	0,37	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	
60 Grad		α	0,03	0,05	0,09	0,16	0,27	0,43	0,61	0,78	0,91	0,98	1,00	1,00	0,99	0,96	0,82	0,70	0,66	0,55	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	
70 Grad		α	0,03	0,05	0,09	0,16	0,27	0,41	0,59	0,75	0,88	0,96	0,99	1,00	1,00	0,98	0,91	0,84	0,83	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	
80 Grad		α	0,03	0,05	0,09	0,16	0,26	0,41	0,58	0,74	0,87	0,95	0,99	0,99	0,98	0,94	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	
90 Grad		α	0,03	0,05	0,09	0,16	0,26	0,40	0,57	0,73	0,86	0,94	0,98	0,99	0,98	0,97	0,95	0,94	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	
ohne LK		α	0,03	0,05	0,09	0,16	0,26	0,40	0,56	0,71	0,84	0,93	0,97	0,97	0,96	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	

(b) Berechneter Absorptionsgrad des finalen Aufbaus mit LK - alle Zustände

Abbildung E.1.1.: Berechnete Absorptionsgrade - Modellentwurf

Anhang F.

Impedanzrohr

F.1. Voruntersuchungen

F.1.1. Restabsorption

Um den Einfluss des Rohres auf die Absorptionseigenschaften zu untersuchen und die Genauigkeit der auf den Messungen basierenden Aussagen zu erhöhen, kann zusätzlich die Restabsorption ermittelt werden. Bei realer Anwendung tritt eine Absorption seitens der Rohrmaterialien auf, die sich aufgrund von nicht ideal schallharten Wänden, inneren Reibungsverlusten durch zur Wand abfallenden Schallschnellen, sowie einem stattfindenden Wärmeaustausch an den Rohrwänden ergibt [Krü96].

Abbildung F.1 zeigt die Restabsorption im Impedanzrohr. Die in der Legende aufgeführten Werte entsprechen den jeweiligen Signalpegeln. Ersterer war der Ausgangspegel der Messsoftware, letzterer die am Fireface eingestellte Mikrofonvorverstärkung.

Es zeigt sich ein recht konstanter, niedriger Absorptionsgrad deutlich unter $0,1 \alpha$, mit sich erhöhender Tendenz hin zu hohen Frequenzen. Ab ca. 830 Hz steigt der Absorptionsgrad sprunghaft an. Wie bereits im Abschnitt 5.3.2 erwähnt findet hier aufgrund unzureichender Größenverhältnisse zwischen den Rohrabmessungen und in diesem Frequenzbereich bestehenden Wellenlängen eine Ausbreitung des Schallfeldes nicht mehr nur in Längsrichtung statt. Das somit entstehende, von Moden geprägte Schallfeld verursacht den drastischen Anstieg der Absorption.

Gezeigter Verlauf der Restabsorption lässt auf einen auswertbaren Bereich zwischen 60 Hz und 800 Hz schließen. Auffällig sind die beiden Absorptionspeaks bei ungefähr 420 Hz und 520 Hz. Die Ursache der beiden Ausreißer kann auch nach umfangreichen Voruntersuchungen nicht ausgemacht werden.

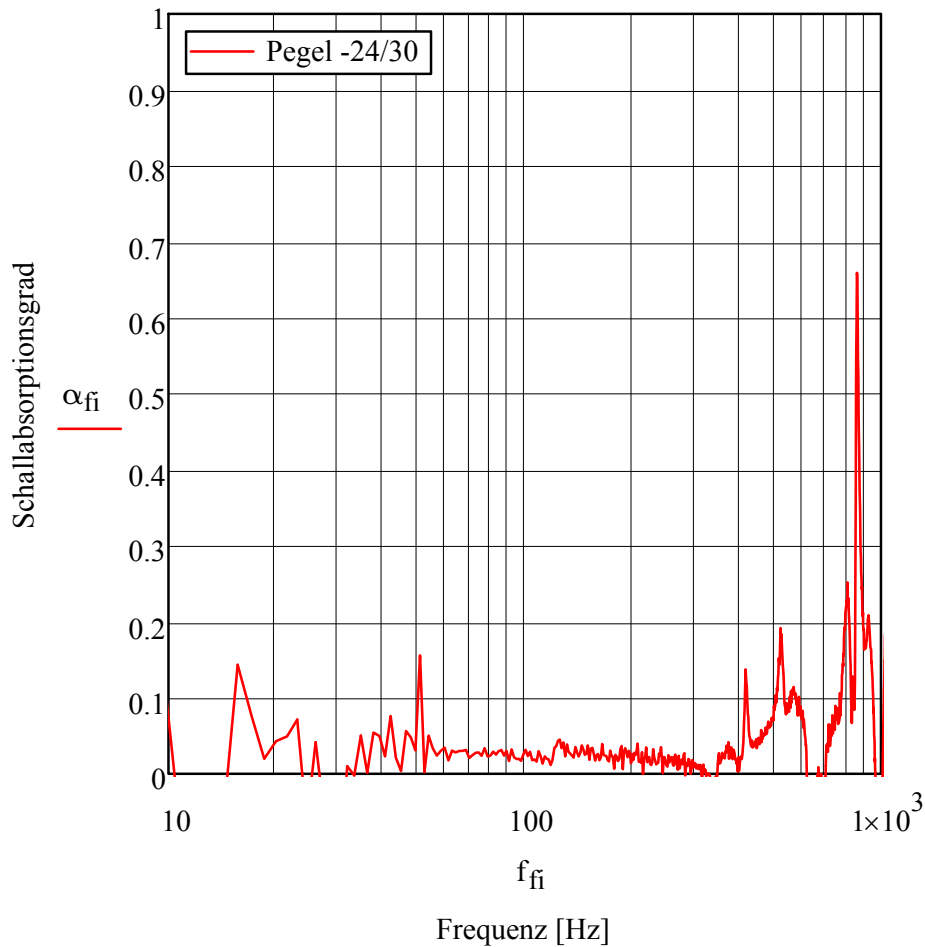


Abbildung F.1.: Restabsorption des Impedanzrohres

Um Erklärungen für diese Unregelmäßigkeiten zu finden sind neben möglichen Einflüssen wie Verspannungen im Gehäuse durch evtl. nicht sachgemäße Verschraubung der Rohrab-schlüsse, etwaige Undichtigkeiten des Rohres selbst oder Einflüssen des Lautsprecherchassis etliche Messungen mit unterschiedlichsten Materialien vorgenommen und untersucht worden. Auch das Auswechseln, sowie unterschiedlichste Fixierungsoptionen des Lautsprechers liefert keine Erklärung.

Aus diesem Grund werden die beiden Peaks, wenn auch bei späterer Absorptionsgrad-auswertung nicht stark ins Gewicht fallend, ständiger Begleiter dieser Messreihe sein.

F.1.2. Übertragungsfunktion

Abbildung F.2 legt die im Rohr existierenden Pegelverläufe bei einer Messung im leeren Rohr und bei einer beispielhaften Messung mit Absorptionsmaterial offen. Die rote Kurve (RA) zeigt den Zustand des leeren Rohres.

Ab einer Frequenz von ca. 830 Hz herrschen starke Schalldruckpegelmaxima- und -minima, woraus sich ablesen lässt, dass der berechnete Wert der oberen Grenzfrequenz mit der Messung übereinstimmt.

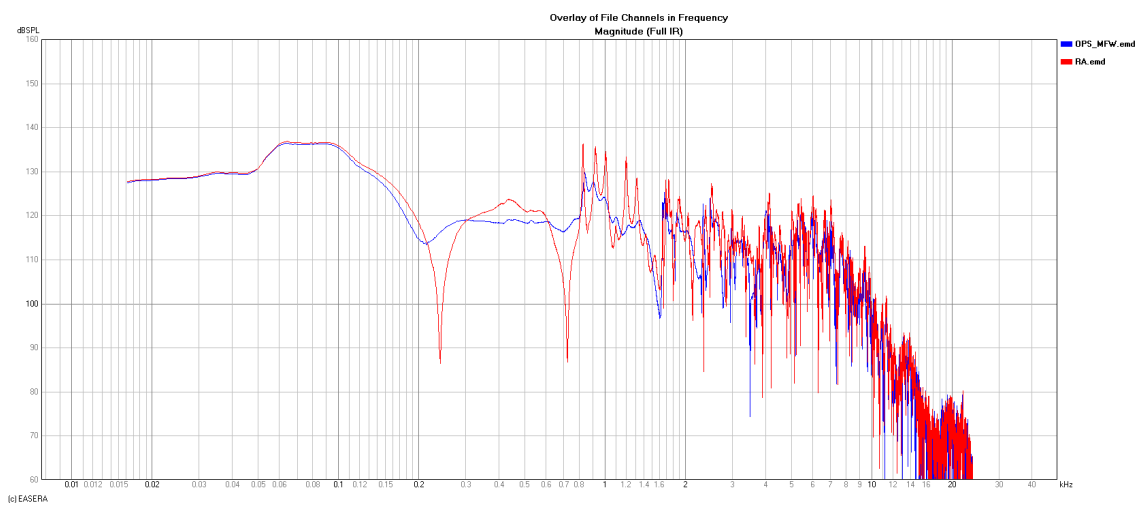


Abbildung F.2.: Vergleich zwischen leerem Rohr und mit Absorbermaterial

Durch Überlagerungen der hin- und rücklaufenden Wellen zeigen sich ergebende Maxima und Minima am Mikrofonort einen schallharten Abschluss an. Bei Einbringen von absorbierendem Material ist eine durchgängige Erniedrigung des Pegels im IR ersichtlich (blaue Kurve, OPS_MFW). Dies ist auf die stattfindende Absorption am nun schallweichen Abschluss zurückzuführen. Auch die beiden Senken bei ca. 240 Hz und 720 Hz verschwinden fast zur Gänze.

F.2. Verwendete Messproben

F.2.1. Materialien

Nachstehend sind die erzielten Absorptionsgrade der verwendeten Materialien dargestellt. In türkis zu sehen der OPS. Die braune Kurve zeigt das Ergebnis der MFW. Als Kombination einer hintereinander liegenden Schicht beider Materialien erhält man die blaue Kurve (OPS und MFW).

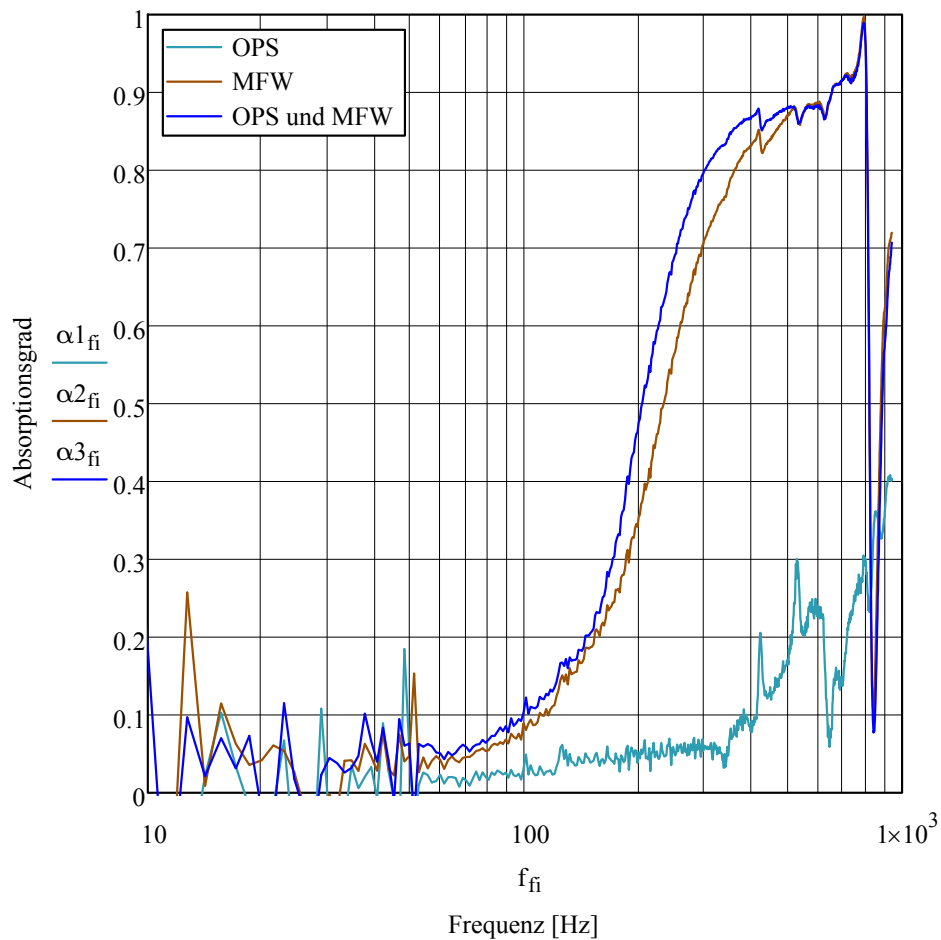


Abbildung F.3.: Gemessene Absorptionsgrade der Materialien im IR

Wie bereits erwartet zeigt sich ein für poröse Materialien charakteristischer Verlauf ab ca. 60 Hz aufwärts. Dieser bricht beim Erreichen der Grenzfrequenz ab. Die Kombination beider Materialien zusammen ergibt ab 400 Hz einen Absorptionsgrad von nahezu 0,9.

F.2.2. Lamellenkonstruktion

In Abbildung F.4 sind die Absorptionsgrade des Jalousiemodells im IR in 10 Grad Schritten angegeben. Absorbierendes Material bleibt in dieser Messung unberücksichtigt.

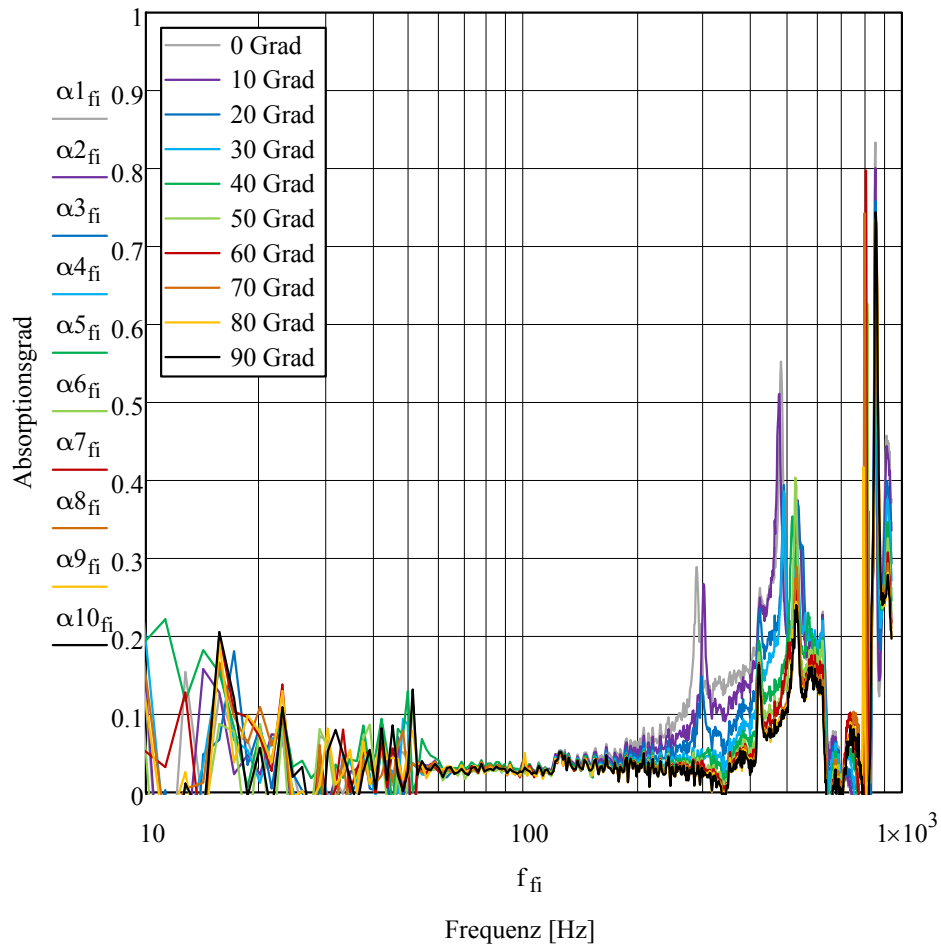
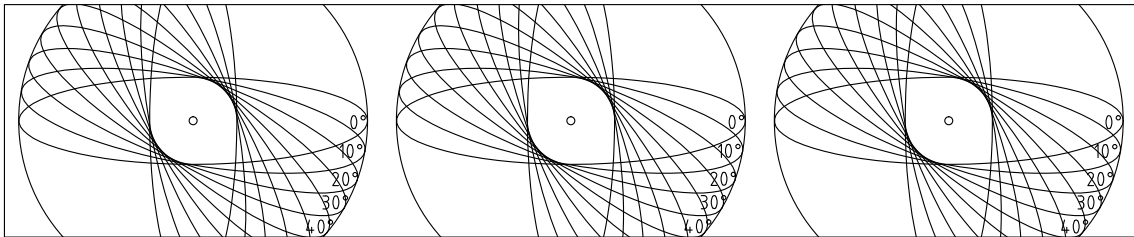


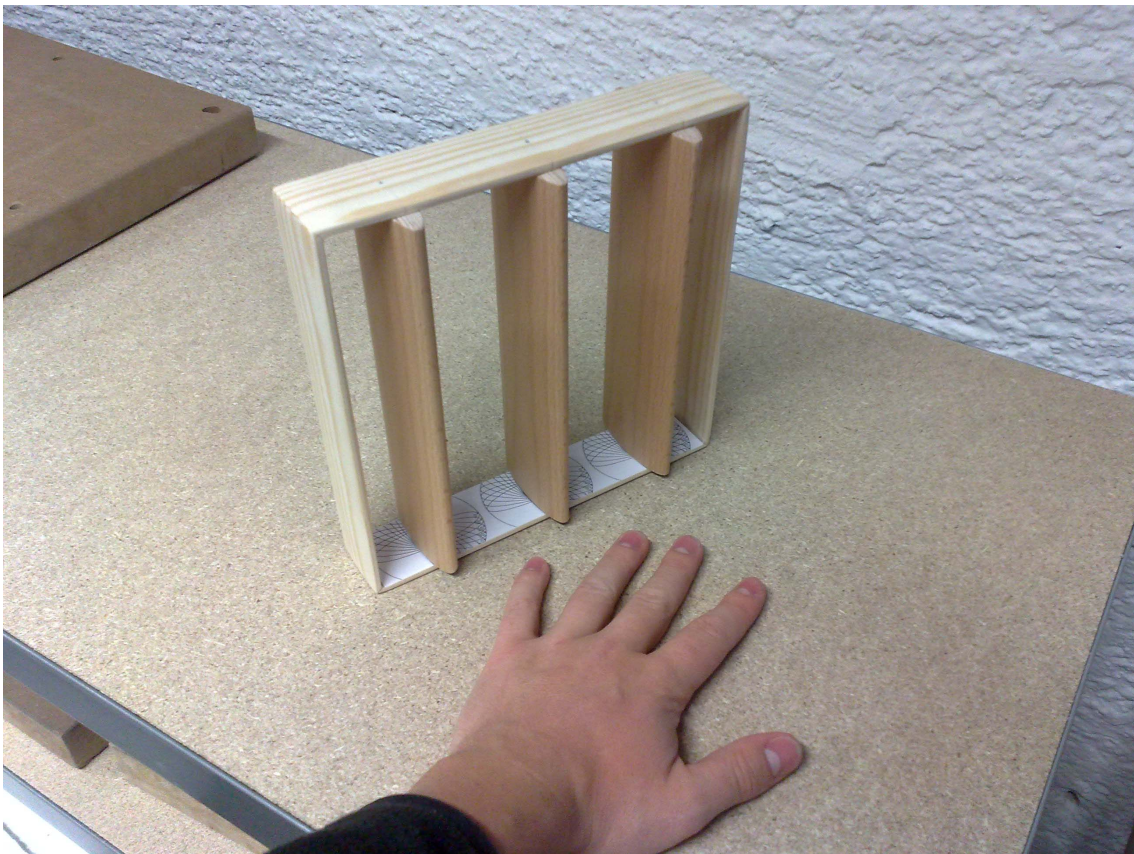
Abbildung F.4.: Gemessene Absorptionsgrade der Lamellenkonstruktion - alle Zustände im IR

F.2.3. Messschablone - Miniaturmodell

Nachfolgende modifizierte Schablone dient der korrekten Einstellung der Lamellen des Miniaturmodells zur Impedanzrohrmessung. In Abbildung F.5b ist zum besseren Größenvergleich nochmals das Modell mit den Abmessungen 20,5 cm x 20,5 cm [B x H] dargestellt.



(a) Messschablone



(b) Miniaturmodell der LK

Abbildung F.5.: Messprobe mit dazugehöriger Schablone

F.3. Finaler Aufbau

In den Abbildungen F.6 & F.7 sind die gemessenen Absorptionsgrade des finalen Aufbaus aufgelistet. Neben den einzelnen Darstellungen aller zehn Winkeleinstellungen ist aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit eine Darstellung vorhanden, die alle Messergebnisse beinhaltet.

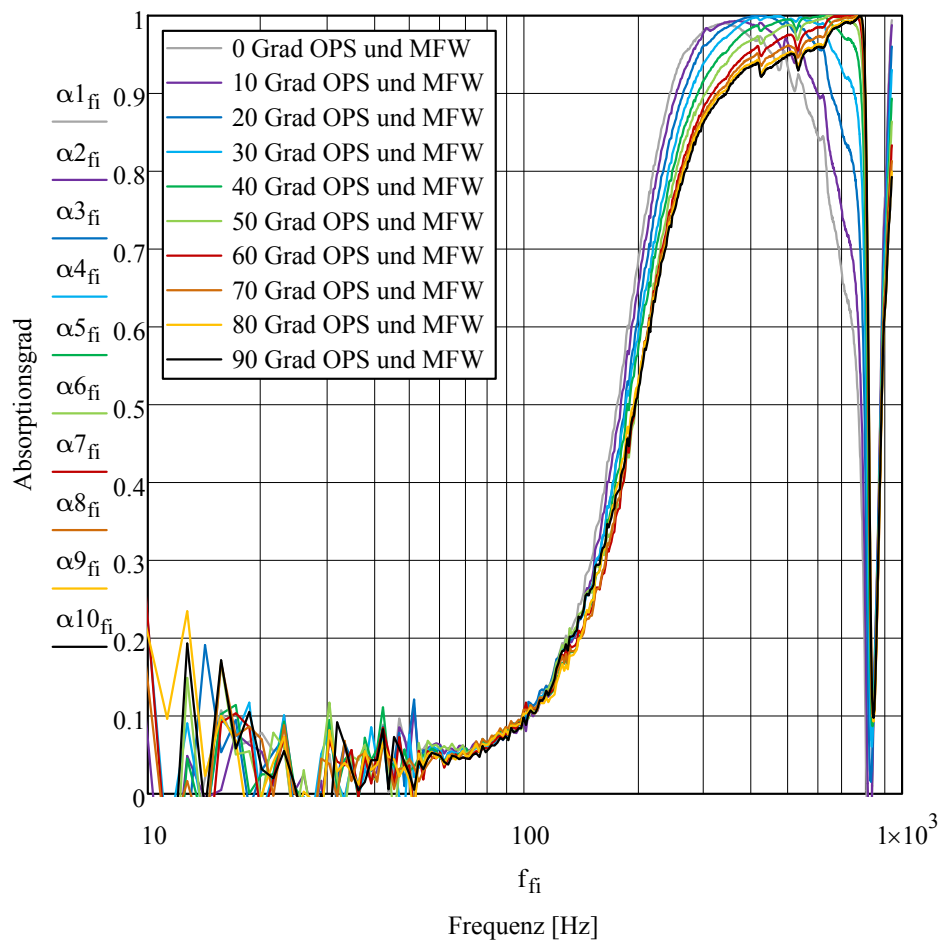
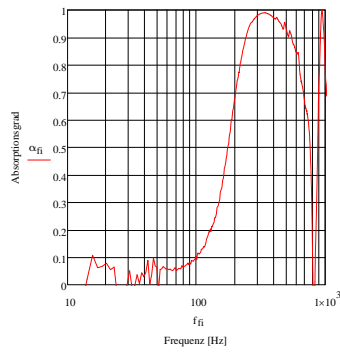
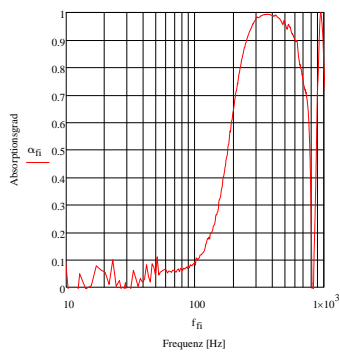


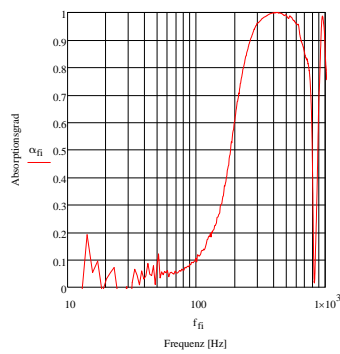
Abbildung F.6.: Gemessene Absorptionsgrade des finalen Aufbaus - alle Zustände im IR



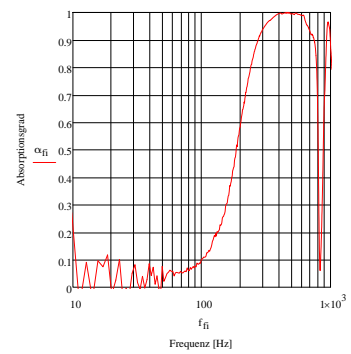
(a) 0 Grad



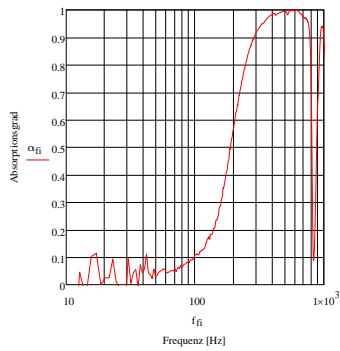
(b) 10 Grad



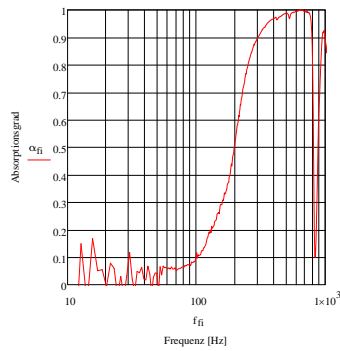
(c) 20 Grad



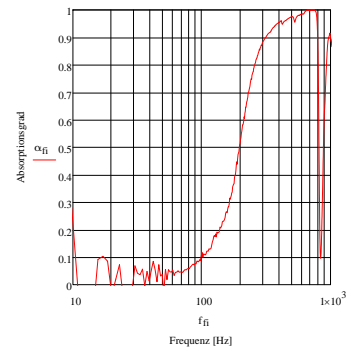
(d) 30 Grad



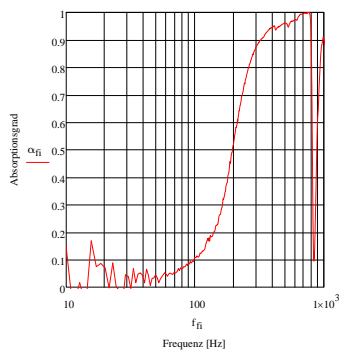
(e) 40 Grad



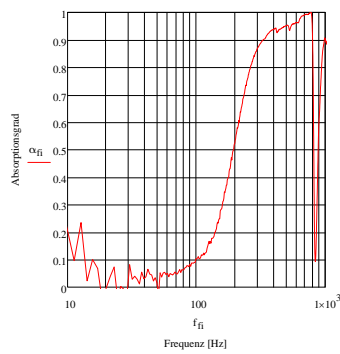
(f) 50 Grad



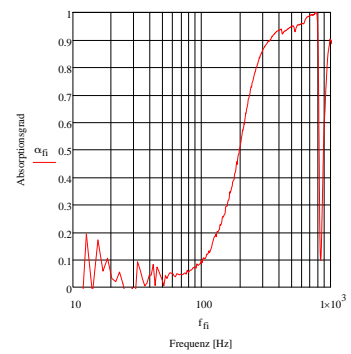
(g) 60 Grad



(h) 70 Grad



(i) 80 Grad



(j) 90 Grad

Abbildung F.7.: Gemessene Absorptionsgrade des finalen Aufbaus - alle Stellungen im IR