
MASTERARBEIT

im Studiengang Ingenieurakustik

Herr
Ruben Bahner

Einordnung von ausgewählten Kriterien zur Bewertung der Diffusität eines Schallfeldes in einer nicht normgerechten Halle

Eine Untersuchung anhand drei ausgewählter Kriterien zur Bewertung der Diffusität eines Schallfeldes

MASTERARBEIT

Einordnung von ausgewählten Kriterien zur Bewertung der Diffusität eines Schallfeldes in einer nicht normgerechten Hallkabine

Eine Untersuchung anhand drei ausgewählter Kriterien zur Bewertung der Diffusität eines Schallfeldes

Autor:
Herr Ruben Bahner

Studiengang:
Ingenieurakustik

Seminargruppe:
IA 18

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali

Einreichung:
Mittweida, 04.12.2023

MASTER THESIS

Classification of selected criteria for evaluating the diffuseness of a sound field in a non-standard reverberation booth

An investigation based on three selected criteria to evaluate the diffuseness of a sound field

author:
Mr. Ruben Bahner

course of studies:
Ingenieurakustik

seminar group:
IA 18

first examiner:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

second examiner:
Prof. Dr.-Ing. Stefan Sentpali

submission:
Mittweida, 04.12.2023

Bibliografische Angaben

Nachname, Vorname: Bahner, Ruben

Einordnung von ausgewählten Kriterien zur Bewertung der Diffusität eines Schallfeldes in einer nicht normgerechten Hallkabine

Classification of selected criteria for evaluating the diffuseness of a sound field in a non-standard reverberation booth

139 Seiten, Hochschule München / Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Flugzeugtechnik / Medien

Masterarbeit, 2023

Abstract

Nach aktuellem Stand der Technik werden Schallabsorptionseigenschaften von Prüfobjekten in speziellen Laborräumen messtechnisch nach DIN EN ISO 354 oder ASTM C423 ermittelt. Diese speziellen Laborräume, auch Hallräume genannt, müssen Voraussetzungen erfüllen, damit ein aussagekräftiges, vergleichbares Ergebnis zustande kommt. Eine dieser Voraussetzungen ist das Vorhandensein eines diffusen Schallfeldes. In dieser Arbeit werden drei Kriterien zur Beurteilung der Diffusität in einer nicht normgerechten Hallkabine untersucht. Ein Kriterium ist aus der amerikanischen Norm ASTM C423, das Zweite aus der amerikanischen Norm ASTM E90 und das Dritte ist eine nicht genormte Größe Degree of Time Series Fluctuation. Dafür werden Messdaten in insgesamt neun verschiedenen Situationen erhoben und mittels MATLAB ausgewertet. Abschließend findet eine Einordnung hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit zur Qualität des diffusen Schallfeldes statt.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|--------------|
| Abkürzungsverzeichnis | VII |
| Abbildungsverzeichnis | X |
| Tabellenverzeichnis | XIII |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Theoretische Grundlagen..... | 3 |
| 2.1 Schallausbreitung im Raum | 3 |
| 2.2 Diffuses Schallfeld..... | 10 |
| 2.3 Der Hallraum..... | 14 |
| 2.4 Auswahl der Kriterien..... | 16 |
| 2.5 Kriterium der ASTM C423 | 19 |
| 2.6 Kriterium der ASTM E90 | 26 |
| 2.7 Das Kriterium Degree of Time Series Fluctuation..... | 34 |
| 3 Messaufbau und Messmethoden | 39 |
| 3.1 Messaufbau | 39 |
| 3.1.1 Verwendete Prüfobjekte..... | 39 |
| 3.1.2 Die Hallkabine..... | 41 |
| 3.1.3 Festlegungen zum Messplan | 46 |
| 3.1.4 Verwendete Messausrüstung..... | 53 |
| 3.2 Ablauf und Methoden der Messungen..... | 54 |
| 4 Umsetzung in MATLAB und anschließende Ergebnisdiskussion | 61 |
| 4.1 Relative Standardabweichung s_{rel} | 62 |
| 4.2 Totales Konfidenzintervall Cl_{tot} | 69 |
| 4.3 Degree of Time Series Fluctuation DTF | 75 |
| 4.4 Fehlerbetrachtungen | 81 |
| 5 Zusammenfassung und Ausblick | 85 |
| Literaturverzeichnis | XI |
| Danksagung..... | XV |
| Anlagen..... | XVI |
| Anlage A.1 - Messdaten | XVII |
| Anlage A.2 - MATLAB-Skripte | XVIII |

| | |
|---|--------------|
| Anlage A.3 - Berechnungsergebnisse s_{rel}..... | XLI |
| Anlage A.4 - Berechnungsergebnisse $C_{l_{tot}}$..... | XLII |
| Anlage A.5 - Berechnungsergebnisse DTF..... | XLIII |
| Anlage A.6 - Datenblatt Messmikrofon | XLIV |
| Eigenständigkeitserklärung | XLIX |

Abkürzungsverzeichnis

Solange im Text nicht anders beschrieben, sind die hier aufgeführten Abkürzungen und Symbole in folgender Bedeutung verwendet wurden:

| Abkürzung | Bezeichnung |
|------------------|---|
| $p(t)$ | Schalldruck in Abhängigkeit der Zeit t |
| $v(t)$ | Schallschnelle in Abhängigkeit der Zeit t |
| ρ | Rohdichte oder Reflexionsgrad (Gleichung (6) und (7)) |
| c | Schallgeschwindigkeit |
| p_{res} | Resultierender Schalldruck |
| L_{res} | Resultierender Schalldruckpegel |
| $L_p(r)$ | Entfernungsabhängiger Schalldruckpegel |
| L_i | Schalldruckpegel an Position i |
| L_S | Schalldruckpegel Senderraum |
| L_E | Schalldruckpegel Empfangsraum |
| I | Schallintensität |
| I_e | Einfallende Schallintensität |
| I_p | Reflektierte Schallintensität |
| \bar{I} | Mittlere Schallintensität |
| P | Schalleistung |
| S | Fläche oder Gesamte Oberfläche des Raumes (Gleichung (13)) |
| r | Abstand zwischen zwei Punkten |
| φ | Polarwinkel Phi |
| ϑ | Polarwinkel Theta |
| \tilde{p}^2 | Effektives Schalldruckquadrat |
| Γ | Richtwirkungsfaktor |
| Ω | Raumwinkel |
| L_w | Schalleistungspegel |
| D_c | Richtwirkungskorrektur |

| | |
|----------------------|---|
| D_{Ω} | Raumwinkelmaß |
| A_{div} | Minderung durch sphärische Divergenz |
| A_{atm} | Dämpfung durch Luftabsorption |
| α | Absorptionsgrad |
| $\bar{\alpha}$ | Mittlerer Absorptionsgrad |
| f_{n_x} | Eindimensionale Eigenfrequenz |
| f_{n_x, n_y, n_z} | Dreidimensionale Eigenfrequenz |
| n_x, n_y, n_z | Modenzahl in Dimension x, y, z |
| l_x, l_y, l_z | Abstand zwischen Wänden in Dimension x, y, z |
| f_{gr} | Schröderfrequenz |
| T | Nachhallzeit |
| T_{60} | Nachhallzeit für einen Abfall von 60 dB |
| V | Volumen |
| w | Schallenergiedichte |
| w_d | Schallenergiedichte im diffusen Schallfeld |
| w_f | Schallenergiedichte im direkten Schallfeld in Abstand r |
| \bar{n} | Mittlere Anzahl an Reflektionen eines Schallstrahls im Raum |
| l_v | Freie, mittlere Weglänge |
| $E(t)$ | Energie zum Zeitpunkt t |
| E_0 | Energie zum Zeitpunkt $t = 0$ |
| m | Luftdämpfungskonstante nach ISO 9613 |
| A_{eq}, A_r | Äquivalente Schallabsorptionsfläche |
| d | Decay Rate |
| d' | Decay Rate ohne Luftabsorption |
| d_{air} | Decay Rate durch Luftabsorption |
| r_h | Hallradius |
| NRC | Noise Reduction Coefficient |
| SAA | Sound Absorption Average |
| ΔT | Temperaturschwankung |
| RH | Luftfeuchte |
| ΔRH | Schwankung der Luftfeuchte |
| ms | Millisekunden |
| Δt_i | Integrationszeit |
| Δt_o | Ausgabezeit |

| | |
|-------------------|--|
| (L_i) | Mittelung von Schalldruckpegeln am i -ten Punkt des N -ten Abklingverlaufs |
| L_{ij} | Schalldruckpegel am i -ten Punkt des j -ten Abklingverlaufs |
| L_1 | Erster Datenpunkt des Scharmittels |
| M | Anzahl Datenpunkte zwischen L_1 und $L_{1-25\text{dB}}$ |
| s_{rel} | Relative Standardabweichung nach ASTM C423 |
| s_M | Standardabweichung leerer Hallraum |
| s_S | Standardabweichung Hallraum mit Prüfobjekt |
| TL | Transmission loss |
| τ | Verhältnis abgestrahlter zu eintreffender Schallenergie |
| CI_{tot} | Totales Konfidenzintervall nach ASTM E90 |
| ΔL_S | Räumliches 95%-Konfidenzintervall des Schalldruckpegels im Senderraum |
| ΔL_E | Räumliches 95%-Konfidenzintervall des Schalldruckpegels im Empfangsraum |
| Δd_E | Räumliches 95%-Konfidenzintervall der Decay Rate im Empfangsraum |
| e | Genauigkeit des 95%-Konfidenzintervalls in dB |
| DTF | Degree of Time Series Fluctuation |
| $SFDC$ | Sound Field Diffusion Coefficient |
| EDC | Energy Decay Curve |
| "k" | Prüfobjekt Situation k, kein Prüfobjekt in der Hallkabine |
| "e" | Prüfobjekt Situation e, 1 cm Prüfobjekt in der Hallkabine |
| "f" | Prüfobjekt Situation f, 5 cm Prüfobjekt in der Hallkabine |
| "L1" | Lautsprecherposition 1, links neben Eingangstür |
| "L2" | Lautsprecherposition 2, an Rückwand rechts |
| "L3" | Ansteuerung beider Positionen "L1" und "L2" |
| XML | Extensible Markup Language |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1 - links Schallausbreitung in geschlossenen Räumen, rechts Schallpegel in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schallquelle, Quelle: (Sinambari & Sentpali, 2014)..... | 4 |
| Abbildung 2 - Schallausbreitung in einem freien Schallfeld von einer Punktschallquelle, Quelle (Gruhl & Kurze, 2006) | 6 |
| Abbildung 3 - Quaderraum mit Abmessungen l_x, l_y, l_z , Quelle: (Sinambari & Sentpali, 2014)..... | 9 |
| Abbildung 4 - Definition der Nachhallzeit T , Quelle (Kuttruff & Mommertz, 2004) | 13 |
| Abbildung 5 - schematische Darstellung eines Hallraums, links Schnittansicht, rechts Grundriss, Quelle (Sinambari & Sentpali, 2014) | 16 |
| Abbildung 6 - beispielhafter Verlauf eines Abklingverlaufs einer Messung | 20 |
| Abbildung 7 - beispielhafte Darstellung eines Scharmittels..... | 22 |
| Abbildung 8 - Schema zum Ablauf der Messung der Decay Rate d , a: Messgerät misst direkt nach Abschalten der Quelle, b: Messgerät misst nach 100-300 ms nach Abschalten der Schallquelle, Quelle (E33 Committee, 2022)..... | 23 |
| Abbildung 9 - einfallende und abgestrahlte Schallenergie an einer Trennwand, Quelle (Schirmer & Hübelt, 2023) | 27 |
| Abbildung 10 - Prinzip-Skizze Messung ΔTL_1 und ΔTL_2 | 30 |
| Abbildung 11 - gezoomter Ausschnitt einer Raumimpulsantwort $p(t)$ | 35 |
| Abbildung 12 - beispielhafte Darstellung der EDC $ES(t)$ (orange) und quadrierten Impulsantwort $p^2(t)$ (blau)..... | 36 |
| Abbildung 13 - Darstellung der Findung des Schwellenwerts k , Quelle (Hanyu et al., 2018)..... | 38 |
| Abbildung 14 – Darstellung des Schwellenwert k für den DTF, Quelle (Hanyu et al., 2018)..... | 38 |
| Abbildung 15 - Prüfobjekte, links 50 mm Micropor Platte, rechts 10 mm Micropor Platte, Rohmaß 1 m · 0,5 m | 39 |
| Abbildung 16 – Ansicht der Hallkabine mit Prüfobjekt..... | 40 |
| Abbildung 17 - Ansicht der Hallkabine von vorn | 41 |
| Abbildung 18 - isometrische Ansicht des Innenraums der Hallkabine, links von links oben, rechts von rechts oben | 42 |
| Abbildung 19 - Schematische Darstellung des Hallkabinen-Innenraums ohne Diffusoren..... | 42 |
| Abbildung 20 - links Hohlraum mit Abstandsmarkierungen, rechts Holzleisten als Auflager für Luke mit Markierungen A und B, oben Vorderseite, unten Rückseite | 44 |
| Abbildung 21 - Prinzip-Skizze des Aufbaus einer Hohlraum-Seitenwand | 45 |
| Abbildung 22 - Grundriss des Hallraums, blau Mikrofonpositionen in XY-Ebene | 48 |
| Abbildung 23 - Schnittansicht des Hallraums, blau Mikrofonpositionen in Z-Ebene | 49 |
| Abbildung 24 - Zuordnung der Mikrofonpositionen des XY-Mikrofonrasters | 50 |
| Abbildung 25 - Ansicht Lautsprecherposition L1 | 51 |
| Abbildung 26 - Ansicht Lautsprecherposition L2..... | 51 |
| Abbildung 27 - Baumdiagramm und Ordnerstruktur der gewonnenen Messergebnisse | 52 |
| Abbildung 28 - Kodierung der zu speichernden Messdaten..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 29 - Messschema Impulsantwort mit Audiointerface Babyface Pro FS und Room EQ Wizard | 54 |
| Abbildung 30 – zeitlicher Verlauf des Sinus Sweep Signals, Quelle (Vorländer, 2004)..... | 55 |
| Abbildung 31 - Messschema Nachhallzeit und Schalldruckpegel mit Sinus Soundbook und Sinus Samurai | 57 |
| Abbildung 32 - Frequenzspektrum weißes und rosa Rauschen, Quelle (Ahnert & Feistel, 2010) | 57 |
| Abbildung 33 - Ansicht Messaufbau mit gelb markierten Mikrofonpositionen in der XY-Ebene..... | 58 |
| Abbildung 34 - Einstellungsfenster für Nachhallzeitmessungen mit Sinus Samurai | 59 |
| Abbildung 35 - Verlauf einer Nachhallzeitmessung einer Position in Samurai | 60 |
| Abbildung 36 - schematischer Aufbau einer XML-Datei zur Auswertung von T | 63 |
| Abbildung 37 - Ermittlung Start- und Endpunkt Analysebereich der Decay Rate | 64 |
| Abbildung 38 - Ergebnisse srel für Prüfanordnung "k" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3 | 65 |
| Abbildung 39 - Ergebnisse srel für Prüfanordnung "e" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3 | 65 |
| Abbildung 40 - Ergebnisse srel für Prüfanordnung "f" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3 | 66 |
| Abbildung 41 - Ergebnisse srel für die Lautsprecheranordnung L1 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f" | 67 |
| Abbildung 42 - Ergebnisse srel für die Lautsprecheranordnung L2 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f" | 67 |
| Abbildung 43 - Ergebnisse srel für die Lautsprecheranordnung L3 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f" | 68 |
| Abbildung 44 - Ergebnisse CI _{tot} für Prüfanordnung "k" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3 | 70 |
| Abbildung 45 - Ergebnisse CI _{tot} für Prüfanordnung "e" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3 | 71 |
| Abbildung 46 - Ergebnisse CI _{tot} für Prüfanordnung "f" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3 | 71 |
| Abbildung 47 - Ergebnisse CI _{tot} für die Lautsprecheranordnung L1 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f" | 73 |
| Abbildung 48 - Ergebnisse CI _{tot} für die Lautsprecheranordnung L2 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f" | 74 |
| Abbildung 49 - Ergebnisse CI _{tot} für die Lautsprecheranordnung L3 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f" | 74 |
| Abbildung 50 - Beispiele für gefilterte Impulsantworten, x-Achse gibt Sampleanzahl wieder, y-Achse die Amplitude | 76 |
| Abbildung 51 - Ergebnisse DTF für Prüfanordnung "k" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3 | 77 |
| Abbildung 52 - Ergebnisse DTF für Prüfanordnung "e" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3 | 78 |
| Abbildung 53 - Ergebnisse DTF für Prüfanordnung "f" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3 | 78 |
| Abbildung 54 - Ergebnisse DTF für die Lautsprecheranordnung L1 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f" | 79 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 55 - Ergebnisse DTF für die Lautsprecheranordnung L2 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f" | 80 |
| Abbildung 56 - Ergebnisse DTF für die Lautsprecheranordnung L3 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f" | 80 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1 - Darstellung der Kriterien zur Diffusität-Bewertung nach Quelle (Zhang & Lee, 2021) und Auswahl für die vorliegende Arbeit..... | 17 |
| Tabelle 2 - Anforderungen an die Testräume, Quelle (E33 Committee, 2022)..... | 21 |
| Tabelle 3 - maximale relative Werte für die Standardabweichung der Decay Rate im leeren Raum und für Prüfobjektpositionen, Quelle: (E33 Committee, 2022) | 26 |
| Tabelle 4 - Beispielwerte für a , Quelle (Georgii, 2015) und (Schulz, 2023)..... | 29 |
| Tabelle 5 - Grenzwerte für ΔTL nach ASTM E90, A2.6.1 (E33 Committee, 2016) | 29 |
| Tabelle 6 - Anforderungen an die Testräume, Quelle (E33 Committee, 2016)..... | 31 |
| Tabelle 7 - Konfidenzgrenzen nach Beranek 1971 (Beranek, 1971)..... | 33 |
| Tabelle 8 - Schallabsorptionsgrade der Prüfobjekte nach Quelle (schaumstofflager.de, 2023a) und (schaumstofflager.de, 2023b) | 40 |
| Tabelle 9 - Entfernungen zwischen zwei Punkten zu Abbildung 19 | 43 |
| Tabelle 10 - Lage Abstandshölzer zur jeweiligen Prüfsituation | 46 |
| Tabelle 11 – Berechnung des Skalierungsfaktors anhand des Volumenverhältnisses..... | 47 |
| Tabelle 12 - Skalierte Maße gemäß ASTM C423 und ASTM E90 | 47 |
| Tabelle 13 - Definition der Parameter zu Abbildung 28..... | 53 |
| Tabelle 14 - mögliche Parameter zur Definition der Nachhallzeitmessung in Sinus Samurai..... | 58 |
| Tabelle 15 - genutzte Messparameter zur Nachhallzeitmessung in Sinus Samurai | 59 |
| Tabelle 16 - Schrödergrenzfrequenzen und Hallradien der drei Belegungszustände... | 61 |
| Tabelle 17 - Überschreitungen von C_{Itot} | 72 |
| Tabelle 18 - aus der Mittelung ausgeschlossene Messungen aufgrund fehlerhafter Daten | 82 |
| Tabelle 19 - Anordnungen mit zu hohem Hintergrundgeräuschpegel für eine Auswertung nach ASTM C423 | 83 |

1 Einleitung

Diffuse Schallfelder sind ein wichtiges Kriterium im Bereich von akustischen Messungen. Die Notwendigkeit diffuser Schallfelder findet sich wieder in internationalen und nationalen Messnormen wie den deutschen Normen DIN EN ISO 354 und DIN EN ISO 10140 oder den amerikanischen Normen ASTM C423 und ASTM E90. Die DIN EN ISO 354, letzter Stand Dezember 2003 und die ASTM C423, letzter Stand Mai 2023 beschäftigen sich beide mit der Messung der Schallabsorption in einem speziellen Laborraum, auch Hallraum genannt. Die DIN EN ISO 10140, letzter Stand September 2021 und die ASTM E90, letzter Stand September 2016, beschäftigen sich mit bauakustischen Messungen in speziellen Prüfständen. In allen genannten Normen ist das diffuse Schallfeld Voraussetzung. Aber wie definiert sich ein diffuses Schallfeld? Was sind die Anforderungen, die an ein diffuses Schallfeld gestellt werden können? Und woran kann man beurteilen, ob ein Schallfeld ausreichend diffus ist, um gesuchte Parameter messtechnisch zu bestimmen?

Damit haben sich Zhang und Lee (Zhang & Lee, 2021) in ihrem Artikel beschäftigt und mehrere Kriterien zur Beurteilung eines diffusen Schallfeldes in einem Hallraum anhand der Kategorien

1. Homogenität,
2. Isotropie und
3. indirekte Methoden

aufgezeigt. Alle dort genannten Kriterien legen einen Parameter zur Beurteilung der Diffusität im Rahmen der Kategorie dar.

Ziel dieser Arbeit ist es, drei dieser Kriterien messtechnisch in einer nicht normgerechten Hallkabine mit einfachen Mitteln zu erfassen. Dafür werden die Kriterien für drei unterschiedliche Prüfobjekte und drei unterschiedliche Lautsprecheranordnungen, also insgesamt neun verschiedene Prüfobjekt-Lautsprecher-Kombinationen, und einem definierten Mikrofonraster ermittelt. Weiter werden MATLAB Skripte zur Auswertung und Berechnung der Messergebnisse erstellt. Danach sollen die berechneten Kriterien hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit zur Beurteilung der Diffusität eines Schallfeldes eingeordnet werden. Es sollen Vor- und Nachteile des jeweiligen Parameters ausgearbeitet werden. Es wird erwartet, dass die Kriterien oberhalb der Schröderfrequenz eingehalten werden und unterhalb nicht, was sich durch Überschreitungen der Grenzwerte bzw. höhere Berechnungswerte ausdrückt.

Zuerst werden dazu die theoretischen Grundlagen, die zum Verständnis und zur Untersuchung des Themas notwendig sind, beschrieben. Dann folgt die Beschreibung des Messaufbaus, bestehend aus den Prüfobjekten, der Hallkabine, Festlegungen zum Messplan und der Messausrüstung, sowie die Methoden, nach denen die Messungen durchgeführt werden. Anschließend wird grob beschrieben, wie die Auswertung der Kriterien in MATLAB umgesetzt wird und welche Ergebnisse dabei zustande gekommen sind. Abschließend werden die gefundenen Ergebnisse zusammengefasst, ein Fazit gebildet und ein Ausblick für fortführende Arbeiten gegeben. Im folgenden Kapitel beginnt die theoretische Einführung in die Thematik.

2 Theoretische Grundlagen

Der theoretische Teil dieser wissenschaftlichen Arbeit umfasst Teilbereiche der raumakustischen Grundlagen, die zur Behandlung dieses spezifischen Sachgebiets dienen. Zuerst wird die Ausbreitung von Schallwellen im freien Feld und in einem geschlossenen Raum thematisiert. Weiter wird eine bestimmte Art des Schallfeldes, das diffuse Schallfeld, näher erläutert und betrachtet. Als Drittes werden Funktionen des Hallraums, seine Merkmale und seine möglichen Bauformen charakterisiert. Weiter folgt die theoretische Beschreibung der drei verwendeten Größen zur Ermittlung der Qualität eines diffusen Schallfeldes.

2.1 Schallausbreitung im Raum

Um zu verstehen, wie die Schallausbreitung in einem Raum stattfindet, ist es notwendig, vorher zu klären, wie sich der Schall in einem freien Feld ausbreiten kann. Dafür werden zuerst Voraussetzungen definiert.

Folgende Voraussetzungen und Gegebenheiten werden nachfolgend durch Müller, Möser und Schreiber ((G. Müller & Möser, 2004); (Schreiber, 2004)) erläutert:

Linearität

Das Schallfeld gilt als linear, wenn sich Wellen überlagern, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen, also nach dem sogenannten Superpositionsprinzip agieren (G. Müller & Möser, 2004).

Annähernd ebene Schallwellen

Von ebenen Schallwellen kann ausgegangen werden, wenn sich Schalldruck und Schallschnelle in Phase befinden (Schreiber, 2004). Befinden sich Schalldruck und Schallschnelle in Phase, so gilt folgender Zusammenhang zwischen dem Schalldruck $p(t)$ und der Schallschnelle $v(t)$ (Schreiber, 2004):

$$p(t) = \rho c \cdot v(t) \quad (1)$$

ρc ist hier die Schallimpedanz des Mediums. Die Schallschnelle ist die Geschwindigkeit, mit der die Moleküle eines Mediums um ihre Ruhelage schwingen (Schulz, 2023). Der Schalldruck ist ein Wechseldruck, der sich dem atmosphärischen Gleichdruck überlagert (Schulz, 2023). Das sich Schallschnelle und Schalldruck nicht in Phase befinden, ist nur

im Nahfeld gegeben (Schreiber, 2004). Dadurch ist das Nahfeld auch charakterisiert, dass sich Schalldruck und -schnelle nicht in Phase befinden (Schulz, 2023).

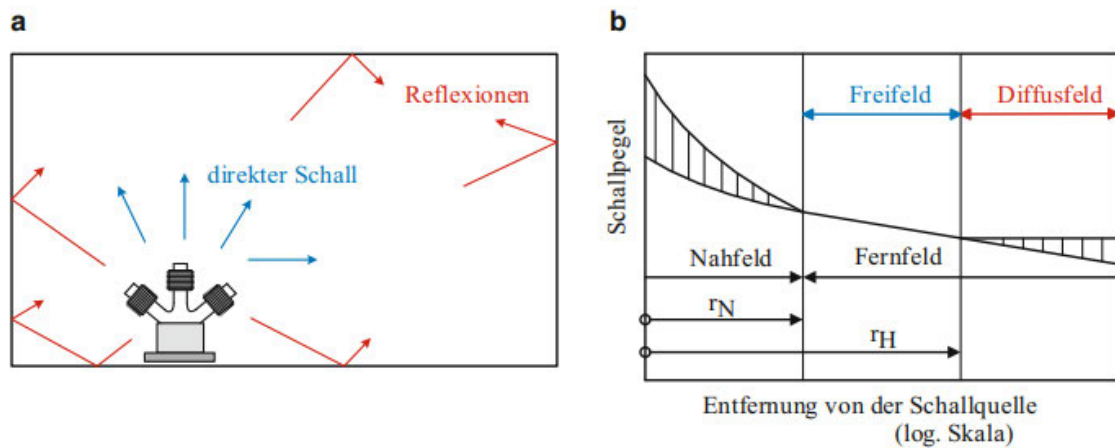


Abbildung 1 - links Schallausbreitung in geschlossenen Räumen, rechts Schallpegel in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schallquelle, Quelle: (Sinambari & Sentpali, 2014)

Inkohärenz der Schallquellen

Schallquellen werden als inkohärent angesehen (Schreiber, 2004). Eine Schallquelle ist z.B. ein technisches Gerät, wie ein Lautsprecher oder eine Straße (Schulz, 2023). Ein inkohärentes Schallsignal ist ein Signal, welches aus zwei oder mehr nicht zusammenhängenden, frequenzbandunabhängigen Signalen besteht (G. Müller & Möser, 2004). Bei einer Inkohärenz gilt für den resultierenden Schalldruck aus den Schalldruckeffektivquadraten für die Überlagerungen von mehreren Schallwellen i und dem resultierenden Schalldruckpegel L_{res} (Schreiber, 2004) folgendes:

$$\tilde{p}_{res} = \sqrt{\sum \tilde{p}_i^2} \quad (2)$$

$$L_{res} = 10 \lg \sum 10^{\frac{L_i}{10} \text{ dB}}$$

„Diese Voraussetzung ist bei breitbandigen Geräuschen und im zeitlichen Mittel fast immer erfüllt.“ (Schreiber, 2004)

Dauergeräusche

Im Abschnitt von Schreiber, Seite 193 (Schreiber, 2004) wird dies wie folgt beschrieben:

„(d) Dauergeräusche: Es wird von Leistungsbetrachtungen und von zeitlichen Mittelwerten des Schalldruckquadrates ausgegangen. Die daraus abgeleiteten

Zusammenhänge gelten deshalb nur für stationäre Zustände und nicht für einmalige kurze Schallereignisse (Impulse). Für Schallquellen mit zeitlich schwankenden Schalleistungspegeln und zeitlich unregelmäßig verteilten Impulsen (z.B. Schießlärm) gelten sie im zeitlichen Mittel.“ (Schreiber, 2004)

Punktschallquellen

Von Punktschallquellen kann dann ausgegangen werden, wenn die Ausdehnung der Schallquelle klein im Verhältnis des Abstands Emissionsort – Immissionsort ist (Schreiber, 2004). Die Ausdehnung sollte „[...] aber noch nicht so groß [sein], dass mehrere Ausbreitungswege über Reflexionen an Raumbegrenzungsflächen und Streukörpern oder auch Absorption und Inhomogenitäten der Luft zu berücksichtigen sind, [...]“ (Hübelt & Probst, 2023).

Mit der Vereinfachung, dass eine Schallwelle, als ebene Welle, auf eine senkrecht zur Welle stehende Fläche trifft, ist es möglich, die Intensität I zu ermitteln. Je weiter der Abstand von der Schallquelle ist, umso größer ist die Fläche, auf der sich die Schalleistung P verteilt (Schreiber, 2004). Die Intensität I ist die Leistung P , die durch eine definierte Fläche S dringt. Auf eine infinitesimal kleine Fläche betrachtet, ergibt sich folgende Beziehung zwischen den Beträgen der Leistung P und der Fläche S (Schreiber, 2004)

$$I = \frac{dP}{dS} \quad (3)$$

mit I in $\frac{W}{m^2}$. Die Intensität ist eine richtungsabhängige Größe. Sie kann negative Werte annehmen, wenn mehr Schalleistung von außen als von innen auf die betrachtete Fläche einfällt.

Fortfolgende Erläuterungen basieren auf den Werken von Gruhl und Kurze sowie Hübelt und Probst ((Gruhl & Kurze, 2006), (Hübelt & Probst, 2023)). Angenommen werden eine Schallquelle als Kugelstrahler mit einer definierten Schalleistung P und ein Schallempfänger, z.B. in Form eines Mikrofons oder des menschlichen Ohrs, definiert. Der Kugelstrahler „pulsiert“ (G. Müller & Möser, 2004) als Schallquelle Schallenergie (kugelförmig) gleichmäßig in alle Richtungen. Der Ort der Schallquelle wird nachfolgend als Emissionsort, der Ort des Schallempfängers hingegen als Immissionsort bezeichnet. Der Emissionsort liegt in den Koordinaten (x_0, y_0, z_0) , der Schallempfänger in den Koordinaten (x, y, z) . Diese beiden Koordinaten sind in einem Abstand r voneinander entfernt. Durch den Abstand r und die beiden Polarwinkel φ und ϑ kann eine Beziehung zwischen diesen beiden Punkten hergestellt werden.

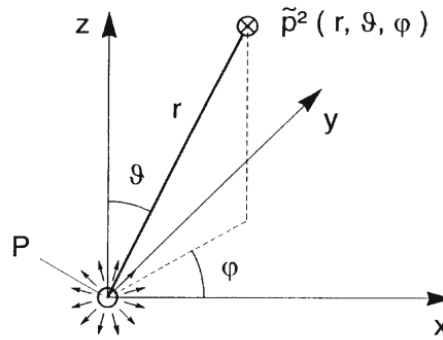


Abbildung 2 - Schallausbreitung in einem freien Schallfeld von einer Punktschallquelle, Quelle (Gruhl & Kurze, 2006)

Am Immissionsort (im Fernfeld (Hübelt & Probst, 2023)) lässt sich nun mit folgender Gleichung der quadratische Effektivwert des Schalldrucks nach Hübelt und Probst (Hübelt & Probst, 2023) berechnen.

$$\tilde{p}^2(x, y, z) = \frac{P \rho c \Gamma^2 4\pi}{4\pi r^2 \Omega} \quad (4)$$

Darin sind (Gruhl & Kurze, 2006):

- \tilde{p}^2 Effektivwert des Schalldruckquadrats in Pa
- P Schalleistung in W und Nm/s
- ρc Schallkennimpedanz $Z_0 = 413 \text{ Ns/m}^3$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Γ Richtwirkungsfaktor
- Ω Raumwinkel, bei ungerichteter Abstrahlung in freies Schallfeld $\Omega = 4\pi$ (Vollraum)
- r Abstand Emissionsort – Immissionsort in m

Der Richtwirkungsfaktor Γ gibt die „[...] verstärkte oder verminderte Schallabstrahlung in Richtung auf einen Punkt mit den Polarwinkeln $[\varphi]$ und $[\vartheta]$ im Vergleich zu einer ungerichtet strahlenden Quelle gleicher Schalleistung [...]“ an. „[...] Für reale technische Schallquellen ist er meistens so wenig bekannt, dass auf seine rechnerische Berücksichtigung verzichtet wird.[...]“ (Hübelt & Probst, 2023).

In Pegelschreibweise erhält man aus Gleichung (1) unter Vernachlässigung des Richtwirkungsfaktors, also für eine ungerichtete Schallquelle, folgende Gleichung (Hübelt & Probst, 2023):

$$L_p(r) = L_W + D_C - A_{\text{Div}} - A_{\text{atm}} \quad (5)$$

Darin sind ((Gruhl & Kurze, 2006) und (Hübelt & Probst, 2023)):

- $L_p(r)$ entfernungsabhängiger Schalldruckpegel,
 $L_p = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$ dB mit $p_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ Pa
- L_W Schalleistungspegel in dB, $L_W = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right)$ dB
mit $P_0 = 10^{-12}$ W
- r Abstand in m
- D_C Richtwirkungskorrektur $D_C = D_\Omega + D_\Gamma$,
wobei D_Γ vernachlässigt wird
- D_Ω Raumwinkelmaß, $D_\Omega = 10 \lg\left(\frac{4\pi}{\Omega}\right)$ dB
- A_{div} Minderung durch sphärische Divergenz, bezogen auf
eine Kugel mit Oberfläche 1 m^2 ,
 $A_{\text{div}} = 20 \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + 10 \cdot \lg(4\pi)$ dB
- A_{atm} Dämpfung durch Luftabsorption

Die Dämpfung durch die Luftabsorption wird hier nicht näher betrachtet. Unter Kapitel 2.5 wird die Luftabsorption für das jeweilige Kriterium erläutert.

Diese freie Schallausbreitung wird nun durch Umfassungsflächen eingedämmt. Die Schallausbreitung der Wellen findet nun nicht mehr ins Unendliche statt, sondern sie wird durch Wände, Fußböden, Decken begrenzt. Die Umfassungsflächen können die Energie dabei entweder reflektieren oder absorbieren. Das Verhältnis von einfallender Schallintensität I_e zu ausfallender (reflektierter) Schallintensität I_p nennt sich Reflexionsgrad ρ (Sinambari & Sentpali, 2014), S.288.

$$\frac{I_p}{I_e} = \rho = 1 - \alpha \quad (6)$$

Das Verhältnis zwischen der einfallenden Schallintensität I_e und absorbiertes Schallintensität I_α nennt sich Absorptionsgrad α (Sinambari & Sentpali, 2014), S. 288.

$$\frac{I_\alpha}{I_e} = \alpha = 1 - \rho \quad (7)$$

Stehen sich zwei Wände parallel gegenüber und weisen eine geringe Schallabsorption α , also eine hohe Schallreflexion ρ , auf, kann zwischen den beiden Wänden die Schallenergie hin und her reflektiert werden, ohne, dass diese stark absinkt. Es bilden sich sogenannte Stehwellen zwischen den beiden Wänden aus (Sinambari & Sentpali, 2014), S.283. Die Frequenz (auch Eigenfrequenz) der Stehwelle lässt sich aus der Wellengleichung herleiten und wird dabei durch den Abstand der Wände zueinander und der Schallgeschwindigkeit nach Sinambari und Sentpali (Sinambari & Sentpali, 2014) folgend definiert:

$$f_{n_x} = \frac{c}{2} \frac{n_x}{l_x} \text{ mit } n_x = 1,2,3 \dots \quad (8)$$

Darin sind

- f_{n_x} Eindimensionale Eigenfrequenz in Hz
- c Schallgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- n_x Modenzahl der Dimension x
- l_x Abstand der Wände in m

Auf eine Herleitung der Eigenfrequenzen durch die Wellengleichung wird aus Umfangsgründen verzichtet. Diese kann z.B. in Sinambari und Sentpali (Sinambari & Sentpali, 2014), Kapitel 8.1 nachgeschlagen werden.

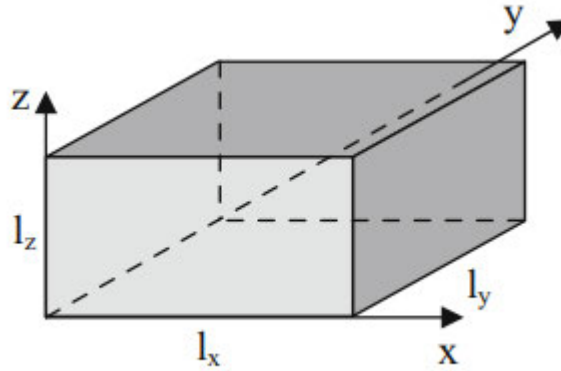


Abbildung 3 - Quaderraum mit Abmessungen l_x, l_y, l_z , Quelle: (Sinambari & Sentpali, 2014)

Diese Eigenfrequenzen können sich ebenfalls in Räumen zwischen mehr als zwei Wänden ausbilden (Sinambari & Sentpali, 2014). Für quaderförmige Räume gibt Sinambari und Sentpali (Sinambari & Sentpali, 2014) folgende Gleichung an:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}; \text{ mit } n_x, n_y, n_z = 1, 2, 3 \dots \quad (9)$$

Darin sind:

- f_{n_x, n_y, n_z} dreidimensionale Eigenfrequenz in Hz
- c Schallgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- n_x, n_y, n_z Modenzahlen der Dimensionen x, y, z
- l_x, l_y, l_z Abstände der Wände in l_x, l_y, l_z -Orientierung in m

Je mehr die Frequenz steigt, umso dichter überlagern sich die Eigenfrequenzen der verschiedenen Begrenzungsflächen (Hübelt & Probst, 2023). Die Schrödergrenzfrequenz gibt dabei die Grenzfrequenz an, ab der davon ausgegangen werden kann, dass sich ausreichend Raummoden überlagern, um ein diffuses Schallfeld auszubilden (Hübelt & Probst, 2023). Die Grenzfrequenz berechnet sich wie folgt:

$$f_{\text{gr}} \approx 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} \text{ in Hz} \quad (10)$$

T ist die Nachhallzeit im Raum in [s] und V das Volumen des Raumes in [m^3].

Oberhalb der Grenzfrequenz kann das Schallfeld als diffus und nicht mehr als moden-dominiert angesehen werden (Hübelt & Probst, 2023). Nachfolgend werden die Eigenschaften des diffusen Schallfeldes näher erläutert.

2.2 Diffuses Schallfeld

Für das diffuse Schallfeld gibt es in ausgewählter Literatur überwiegend drei verschiedene Definitionen.

Als Erstes beschreibt zum Beispiel Sinambari und Sentpali auf Seite 287 ein diffuses Schallfeld so,

„[...] dass in jedem Punkt im Mittel aus allen Raumrichtungen gleich viel Schallenergie einfällt. Dabei sollten keine festen Phasenbeziehungen zwischen den Anteilen bestehen. Die Energiedichte des Feldes ist konstant, die Intensitäten I_φ der einzelnen Strahlungsrichtungen überlagern sich zur räumlich konstanten Intensität I_D des diffusen Schallfeldes.“ (Sinambari & Sentpali, 2014).

Als Zweites definiert Kuttruff und Mommertz, Seite 336 das diffuse Schallfeld derart,

„[...] dass im statistischen Mittel in jedem Raumpunkt aus allen Richtungen sekundlich gleich viel Energie eintrifft. [...]“ (Kuttruff & Mommertz, 2004).

Die Definition eines diffusen Schallfeldes ist auch in einer amerikanischen Norm ASTM C634 festgehalten. Sie besagt, dass die Schallintensität zu jeder Zeit in alle Richtungen und an jedem räumlichen Punkt gleich ist (E33 Committee, 2021).

Kuttruff bezieht sich in seinem Buch Room Acoustics (Kuttruff, 2016), Seite 90, auf die mittlere Intensität, die aus der integrierten richtungsabhängigen Intensität ermittelt wird.

$$I(\varphi, \vartheta) = \int_0^{\infty} I_t(\varphi, \vartheta) dt \quad (11)$$

Er sagt, wenn $I(\varphi, \vartheta)$ unabhängig von den Polarwinkeln φ und ϑ ist, gilt das stationäre Schallfeld als diffus bzw. isotrop.

Diese Quellen gehen also von einem Punkt aus, welcher energetisch betrachtet die gleiche mittlere Intensität besitzt und in den von allen Richtungen gleichmäßig Schallenergie eintrifft.

Als Drittes gilt im Buch *Formulas of Acoustics* (Mechel, 2008) ein Schallfeld als diffus, wenn im Durchschnitt über ein Zeitintervall die vektorielle Schallintensität an jedem Punkt im Schallfeld mit konstanter Auslenkung in alle Richtungen omnidirektional ist.

In Buch *Acoustics* (Beranek, 1993) auf Seite 298, beschreibt er das diffuse Schallfeld so, dass an jedem Ort im Raum sich die Schallwellen in alle Richtungen ausbreiten.

Die deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. hat in der DEGA-Empfehlung 101 ebenfalls eine Definition zum diffusen Schallfeld angegeben, die folgende Aussage liefert:

„Ein Schallfeld in einem Raum heißt „diffus“, wenn sich der Schall in alle Richtungen gleichmäßig ohne Vorzugsrichtung ausbreitet (isotrop). Folge eines ideal isotropen diffusen Schallfeldes ist dessen Homogenität, d.h. Konstanz der Schallenergiedichte im Raum.“ (Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2006)

Diese Quellen betrachten eher die konstante Ausbreitung von Schallenergie im Schallfeld.

Konsens haben diese ausgewählten Quellen alle darin, dass das diffuse Schallfeld als isotrop bezeichnet wird und an jedem Punkt eine konstante Intensität herrscht, die im Mittel $\bar{I} = 0$ beträgt. T.J. Schultz hat unter anderem diese drei Ansichten in seinem wissenschaftlichen Artikel *Diffusion in Reverberation Rooms* (Schultz, 1971) ebenfalls benannt.

Die Nachhallzeit T

Oberhalb der Schröderfrequenz ist von einer statistischen Veränderung des Schallfeldes auszugehen (Kuttruff & Mommertz, 2004). Die stationäre Schallenergiedichte w im diffusen Schallfeld kann als konstant angenommen werden (Kuttruff & Mommertz, 2004).

Auf jedes Umfassungsbauteil soll pro Zeit- und Flächeneinheit die Energie

$$B = \frac{c}{4} w \quad (12)$$

eintreffen (Kuttruff & Mommertz, 2004). Daraus ist ableitbar, dass im Mittel jeder Schallstrahl \bar{n} -mal an jeder Raumfläche reflektiert wird (Kuttruff & Mommertz, 2004).

$$\bar{n} = \frac{cS}{4V} \quad (13)$$

Das entspricht (ohne die Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit c) dem Reziproken der freien, mittleren Weglänge l_V (Hübelt & Probst, 2023).

$$l_V = \frac{4V}{S} \quad (14)$$

In beiden Formeln (14) und (15) ist V das Volumen und S die gesamte Oberfläche des Raumes. Die freie, mittlere Weglänge l_V stellt die mittlere Entfernung „[...] zwischen zwei Reflexionen eines Schallstrahls an den Wänden dar. [...]“ (Hübelt & Probst, 2023).

Die Energie, die durch den Schallstrahl transportiert wird, verringert sich nach jeder Reflexion um den Reflexionsfaktor ρ . Nach der Zeit t bzw. \bar{n} Reflexionen und mit der Anfangsenergie E_0 nach einem Impuls oder dem Abschalten einer Schallquelle zum Zeitpunkt $t = 0$ ergibt sich die Gleichung (15) der Schallenergie $E(t)$ im Raum (Kuttruff & Mommertz, 2004).

$$E(t) = E_0 (1 - \alpha)^{\bar{n}t} = E_0 \exp \left[\frac{cSt}{4V} \ln(1 - \alpha) \right] \text{ für } t > 0 \quad (15)$$

Die Zeit t , in der die Energie $E(t)$ auf einen Millionstel der Anfangsenergie E_0 gefallen ist, wird als **Nachhallzeit T** definiert (Kuttruff & Mommertz, 2004). Durch Einsetzen der Schallgeschwindigkeit c bei 20°C und unter Einbeziehung der Luftdämpfung mit Luftdämpfungskonstante m ergibt sich die Nachhallzeit nach Eyring (Kuttruff & Mommertz, 2004) folgendermaßen:

$$T = \left(0,163 \frac{\text{s}}{\text{m}} \right) \frac{V}{4mV - S \cdot \ln(1 - \alpha)} \quad (16)$$

Vereinfacht lässt sich das Schallabsorptionsvermögen des Raumes mithilfe der Nachhallzeit T und den Ausführungen von W.C. Sabine ermitteln.

Die vereinfachte Form nach Sabine, die für $\bar{\alpha} < 0,2$ gültig ist (Kuttruff & Mommertz, 2004), lautet:

$$T = \left(0,163 \frac{\text{s}}{\text{m}} \right) \frac{V}{\bar{\alpha}S + 4mV} = \left(0,163 \frac{\text{s}}{\text{m}} \right) \frac{V}{A_{\text{eq}} + 4mV} \quad (17)$$

Der mittlere Schallabsorptionsgrad setzt sich aus den einzelnen Schallabsorptionsgraden α zusammen, welcher jedes Bauteil oder jeder Gegenstand aufgrund seiner Struktur oder Geometrie besitzt. Wird α mit der dazugehörigen Fläche S multipliziert, so ergibt sich der äquivalente Schallabsorptionsgrad A_{eq} . Die Schallenergiedichte des diffusen Schallfeldes ist abhängig davon, wieviel Absorptionsvermögen im Raum vorhanden ist (Sinambari & Sentpali, 2014).

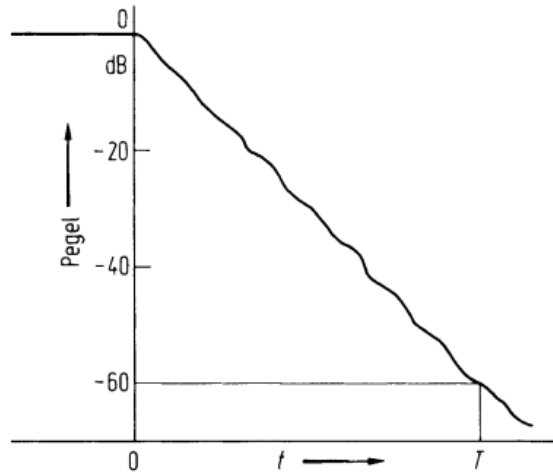


Abbildung 4 - Definition der Nachhallzeit T , Quelle (Kuttruff & Mommertz, 2004)

Die Decay Rate d

Nach ASTM 634 ist die Decay Rate beschrieben als die Rate des Abfalls des Schalldruckpegels nach Abschalten einer Schallquelle (E33 Committee, 2021). Sie ist nach J. L. Davy (Davy, 1988) definiert als

$$d = \frac{60 \text{ dB}}{T_{60}} \text{ in } \frac{\text{dB}}{\text{s}} \quad (18)$$

Sie findet unter anderem ihre Anwendung in amerikanischen Normen, wie der ASTM E2235, der ASTM E90, oder auch der ASTM C423.

Der Hallradius

Wie in Abbildung 1 zu sehen, stellt sich das diffuse Schallfeld erst ab einer bestimmten Entfernung zu einer Schallquelle mit Schalleistung P ein. Die Grenze zwischen Freifeld und Diffusfeld wird als Hallradius r_h bezeichnet. Er ist definiert als der Radius, an dem die Schallenergiedichte des diffusen Schallfeldes w_d und die Schallenergiedichte des Freifeldes w_f gleich groß sind (Hübelt & Probst, 2023).

Im Diffusfeld ist nach Müller und Möser die stationäre Energiedichte w_d definiert als:

$$w_d = \frac{4P}{\bar{\alpha}Sc} \text{ für } \bar{\alpha} \ll 1 \quad (19)$$

- $\bar{\alpha}$ mittlerer Schallabsorptionsgrad des Raumes
 $\bar{\alpha} = \sum_i \frac{\alpha_i S_i}{S_{\text{ges}}}$ nach Quelle (Hübelt & Probst, 2023)
- P Schalleistung einer Schallquelle
- S Raumbofläche in m^2
- c Schallgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Geht man davon aus, dass die Schallquelle mit Schalleistung P kugelförmig in ein freies Schallfeld ohne Berücksichtigung anderer Dämpfungen, wie zum Beispiel die Dämpfung durch Luftabsorption, abstrahlt, so erhält man analog zu Gleichung (4) folgende Vereinfachung (Sinambari & Sentpali, 2014):

$$w_f = \frac{P}{4\pi cr^2} \quad (20)$$

Durch Gleichsetzen und Umstellen der Gleichungen (12) und (13) nach r ergibt sich schlussendlich die Formel für den Hallradius r_h :

$$\frac{4P}{\bar{\alpha}Sc} = \frac{P}{4\pi cr^2} \quad (21)$$

$$r_h = \sqrt{\frac{\bar{\alpha}S}{16\pi}} = \sqrt{\frac{A_{\text{eq}}}{16\pi}} \text{ in m}$$

Der Hallradius ist also abhängig von T bzw. der äquivalenten Schallabsorptionsfläche A_{eq} des Raumes.

2.3 Der Hallraum

Der Hallraum ist ein Laborraum, in dem zum Beispiel messtechnisch Materialeigenschaften, wie der Schallabsorptionsgrad ((DIN e.V., 2003) und (E33 Committee, 2023)) oder der Schalleistungspegel einer Maschine (DIN e.V., 2011) ermittelt werden kann. Idealerweise sind seine Umfassungsbauteile aus schwerem Material, wie Stahlbeton oder schwerem Mauerwerk, welche zusätzlich durch Anstriche versiegelt sind (Sinambari & Sentpali, 2014). Ziel des Hallraums ist es, in ihm ein möglichst diffuses Schallfeld und

somit homogene und isotrope Bedingungen zu erzeugen, was durch eine gleichmäßige Verteilung der Schallabsorption auf Wandflächen und stark reflektierenden Wänden erzeugt wird (Vorländer, 2004). Im Hallraum werden teilweise Nachhallzeiten im unbelegten Zustand von tieffrequent zehn Sekunden bis hochfrequent noch eine Sekunde erreicht (Vorländer, 2004).

Da es direkt an den Umfassungsbauteilen zu Druckerhöhungen kommt und dort das diffuse Schallfeld gestört ist, werden in den Normen ASTM C423 und DIN EN ISO 354 Mindestabstände von Mikrofonpositionen zu den Umfassungsflächen definiert, damit im gewollten diffusen Schallfeld gemessen werden kann.

Um dem Phänomen von Stehwellen bzw. Eigenfrequenzen entgegenzuwirken, werden Wände und Decke häufig nicht parallel zueinander eingebaut sowie zusätzlich schallreflektierende Elemente, auch Diffusoren genannt, in den Raum eingebracht. Diese Diffusoren bestehen aus stark schallreflektierenden Materialien und weisen häufig gewölbte oder unregelmäßige Formen auf, um den Schall in alle Richtungen zu reflektieren (Sinambari & Sentpali, 2014). Wie viele Diffusoren in den Hallraum eingebracht werden sollen, damit ein ausreichend diffuses Schallfeld entsteht, ist z.B. als Verfahren in DIN EN ISO 354 dargelegt. Nach dem Verfahren von DIN EN ISO 354 werden bei Schallabsorptionsmessungen nach und nach Diffusorelemente eingebracht und nach jeder Messung der Schallabsorptionsgrad α bestimmt (DIN e.V., 2003). Mit jeder Messung soll α steigen (DIN e.V., 2003). Ab einer bestimmten Anzahl an eingebrachten Diffusoren steigt α nicht mehr an. Die Anzahl an Diffusoren, ab der der Schallabsorptionsgrad α nicht mehr steigt, gilt als optimale Anzahl an Diffusoren für eine ausreichende Diffusität des Hallraums (DIN e.V., 2003). Weitere Verfahren zur Bestimmung der Diffusität eines Hallraumes werden im folgenden Kapitel aufgezeigt.

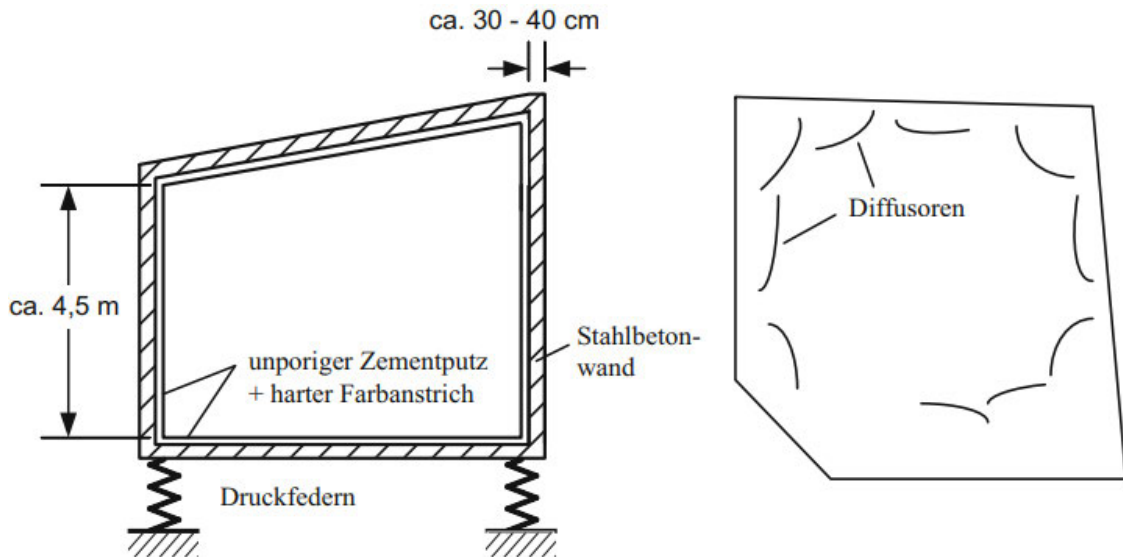


Abbildung 5 - schematische Darstellung eines Hallraums, links Schnittansicht, rechts Grundriss, Quelle (Sinambari & Sentpali, 2014)

2.4 Auswahl der Kriterien

Für diese wissenschaftliche Arbeit wurden die Kriterien zur Beurteilung der Diffusität dahingehend ausgewählt, dass die Umsetzung der Messungen bzw. der Auswertung mit einfachen Methoden durchführbar und replizierbar ist. Shuying Zhang hat dabei in seiner Ausarbeitung *Diffuseness Quantification in a Reverberation Chamber and Its Variation with Fine-Resolution Measurements* (Zhang & Lee, 2021) 14 Kriterien vorgeschlagen, zu denen Untersuchungen angestellt wurden, um das diffuse Schallfeld qualitativ und quantitativ zu bewerten. Er unterteilt die Kriterien in Kategorien, in denen die zu untersuchenden Merkmale des diffusen Schallfeldes beschrieben werden, zuerst die Homogenität, die Isotropie und als drittes indirekte Beurteilungsmethoden. Für jedes Merkmal (Metrics) gibt er verschiedene Untersuchungsmethoden an, welche in folgender Abbildung aufgelistet sind (Zhang & Lee, 2021).

Tabelle 1 - Darstellung der Kriterien zur Diffusität-Bewertung nach Quelle (Zhang & Lee, 2021) und Auswahl für die vorliegende Arbeit

Table 1. Proposed methods for quantifying diffuse conditions of a reverberation room.

| Category | Metrics | Reference | Measurement | Description | | |
|-----------------|--|---------------------------------|--|---|--|--|
| Homogeneity | The relative standard deviation of decay rate | ASTM C423-17 [1] | Decay rates or SPLs in multiple locations using fixed microphones or moving microphones. | Lower values of deviations across the sound field indicate higher diffuseness. | | |
| | Total Confidence Interval | ASTM E90-09 [19] | | | | |
| | The spatial standard deviation of the reverberation time | Bartel & Magrab [11], Davy [29] | | | | |
| | Spatial Uniformity | Wang et al. [13] | | | | |
| Isotropy | The diffuseness estimate | Lokki [25] | Using spherical microphone arrays to analyze the direction of energy flow. | The isotropic sound energy from all directions means high diffuseness. | | |
| | Directional Diffusivity | Gover et al. [26] | | | | |
| | The spherical harmonic covariance matrix | Epain & Jin [27] | | | | |
| | Wavenumber spectrum | Nolan et al. [16] | | | | |
| Indirect method | Number of peaks | Jeon et al. [23] | Analyzing the details of the impulse response. | Less fluctuation of impulse response in the early decay means higher diffuseness. | | |
| | Kurtosis | Jeong [15] | | | | |
| | Mixing time | Prislan [26] | | | | |
| | Degree of time fluctuation | Hanyu et al. [14,21] | | | | |
| | Maximum absorption coefficient | ISO 354:2003 [2] | | | Measuring the sound absorption coefficient with an increasing number of diffuser panels. | The optimum diffuse configuration is achieved when it produces the maximum absorption. |
| | Reference absorber | Scrosati et al. [6] | | | Comparing the equivalent absorption area of the reference absorber with a minimum value. | The absorption correction factor can be used to quantify the reverberation chamber. |

Nachfolgend findet sich zu jedem Kriterium (Metric) in Tabelle 1 von oben nach unten eine Begründung über die Wahl bzw. Abwahl.

Die relative Standardabweichung nach ASTM C423 wurde für diese wissenschaftliche Arbeit gewählt. Sie wurde gewählt, da die Ermittlung der notwendigen Messdaten, Decay Rate und Schalldruckpegel, mit einfachen Mitteln in der Hallkabine möglich waren.

Das totale Konfidenzintervall nach ASTM E90 wurde für diese wissenschaftliche Arbeit ebenfalls gewählt. Die Begründung ist dieselbe wie bei der relativen Standardabweichung.

Die räumliche Standardabweichung der Nachhallzeit wurde nicht gewählt. Aus den Messdaten ist es möglich, dieses Kriterium zu untersuchen. Da das Kriterium ebenfalls die Homogenität eines Schallfeldes untersucht und schon zwei Kriterien die Homogenität untersuchen, fand eine andere Schwerpunktsetzung statt.

Die räumliche Gleichverteilung wurde nicht gewählt. Eine Vergleichbarkeit mit der Quelle (Wang et al., 2020) war nicht möglich, da Wang et al. das Kriterium für Frequenzbänder

< 100 Hz untersucht hat, was nicht im Untersuchungsgebiet der Hallkabine für diese wissenschaftliche Arbeit liegt.

Alle Kriterien zur Untersuchung der Isotropie wurden nicht gewählt, da mit ihnen ein aufwändiges Messverfahren mit sphärischen Mikrofonarrays einhergeht, die im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Verfügung standen.

Das Kriterium Anzahl von Peaks wurde nicht gewählt. Jeon et al. untersuchte dieses Kriterium in Konzerthallen hinsichtlich der Streuung von Wänden (Jeon et al., 2015). Eine Vergleichbarkeit zwischen der Hallkabine und zwei Konzerthallen sieht der Verfasser als nicht gegeben, weshalb von der Auswahl abgesehen wurde.

Die Untersuchung der Kurtosis wurde nicht gewählt. Aus den Messdaten, speziell der Impulsantwort, ist es möglich, dieses Kriterium zu untersuchen. Jedoch wurde der Umfang dieser Arbeit auf drei Kriterien begrenzt, weshalb der Schwerpunkt auf ein anderes Kriterium fällt.

Das Kriterium Mixing Time wurde nicht gewählt. Auch hier sind umfangreiche Messungen mit sphärischen Mikrofonarrays notwendig, weshalb von einer Auswahl, wie bei den Isotropieuntersuchungen, abzusehen ist.

Der Degree of Time Series Fluctuation wurde für diese wissenschaftliche Arbeit gewählt, da sie mit einfachen Messungen einer Impulsantwort auswertbar ist.

Das Kriterium des maximalen Schallabsorptionsgrads nach DIN EN ISO 354 wurde für diese wissenschaftliche Arbeit nicht ausgewählt. Aufgrund der Größe des Hallraums war es nicht möglich, Diffusoren in die Hallkabine einzubringen. Außerdem standen keine zusätzlichen Diffusoren zur Verfügung. Es befanden sich schon fest installierte Diffusoren in der Kabine, welche nicht ausgebaut werden konnten.

Folgende Kriterien wurden schlussendlich für den Untersuchungsumfang ausgewählt:

- Relative Standardabweichung s_{rel} der ASTM C423
- Totales Konfidenzintervall CI_{tot} der ASTM E90
- Degree of Time Series Fluctuation DTF

Die theoretischen Gegebenheiten zu diesen Kriterien sind in den folgenden Kapiteln 2.5, 2.6 und 2.7 beschrieben.

2.5 Kriterium der ASTM C423

Die ASTM C423 ist eine amerikanische Norm, mit der in einem Hallraum die Schallabsorption A mittels der Decay Rate d gemessen und berechnet wird. Die aktuelle Version der Norm ist im Mai 2023 erschienen, die Norm, welche im vorliegenden Dokument zur Untersuchung gedient hat, ist im Februar 2022 erschienen. Da die Änderung der Norm von 2022 zu 2023 (nähere Beschreibung losgelöste Prüfobjekte) für diese Arbeit keine Relevanz hat, wurde darauf verzichtet, während der Durchführung der Arbeit auf die neuere Version zu wechseln.

Die Norm hat sich zur Aufgabe gesetzt, das Absorptionsvermögen von Oberflächen, Gegenständen, Möbeln oder Ähnlichem messtechnisch zu ermitteln und zu berechnen. Gebündelt wird dieses Absorptionsvermögen im frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrad **Noise Reduction Coefficient**, kurz **NRC** (E33 Committee, 2022), angegeben. Mittelt man den NRC der zwölf Terzbänder von 200 Hz bis 2500 Hz, so nennt man diese Mittelung **Sound Absorption Average**, kurz **SAA** (E33 Committee, 2022). Die Messungen finden dabei in einem speziell konstruierten Raum, dem Hallraum, statt. Dieser Raum ist darauf ausgelegt, eine möglichst lange Nachhallzeit zu haben, was durch schallreflektierende Begrenzungsflächen und massige, schwere Wände erbracht werden kann.

Die ASTM C423 beschreibt das Testverfahren folgendermaßen (siehe (E33 Committee, 2022), 4.1):

Im Raum wird ein Signal erzeugt mit mindestens der Länge, die geschätzt notwendig ist, dass ein 20dB-Abfall im entsprechenden Band erreicht wird. Das Signal sollte ein konstantes Niveau erreichen. Danach wird die Schallquelle ausgeschaltet, sodass im Raum die Schallenergie absinkt. Der Auswertebereich wird mittels einer in den gemessenen und aufgenommenen Schalldruckabfall eingezeichneten Geraden bestimmt und aus der Geraden die Decay Rate d .

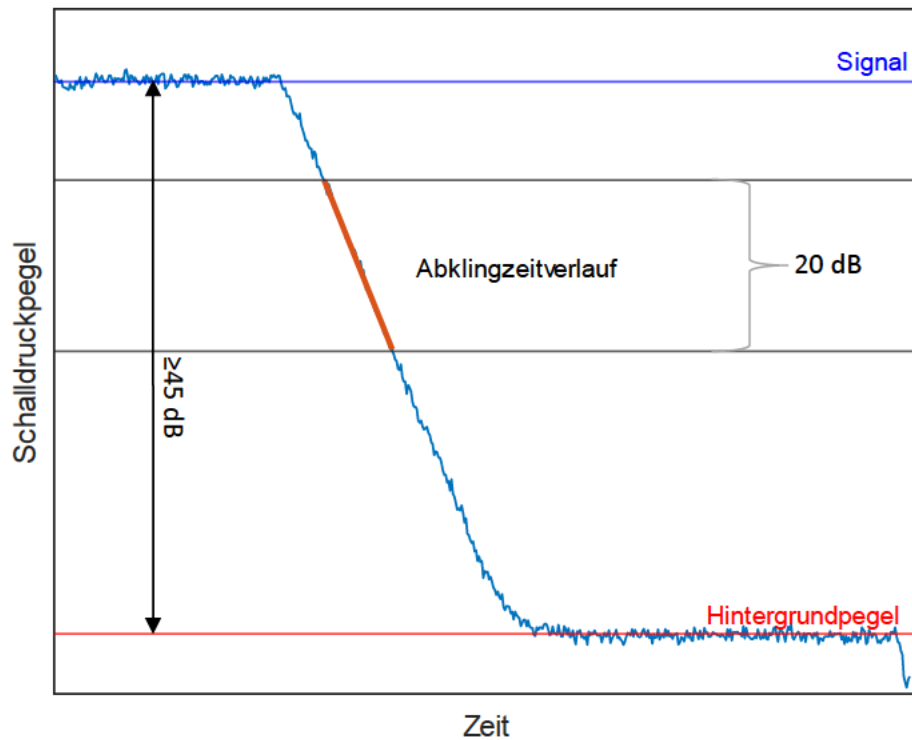


Abbildung 6 - beispielhafter Verlauf eines Abklingverlaufs einer Messung

Die Schallabsorptionsfläche A wird anschließend mit der Sabine-Formel nach (17), dem Volumen V und der Schallgeschwindigkeit c mit Gleichung

$$A = 0,9210 \frac{Vd}{c} \text{ in m}^2 \quad (22)$$

berechnet. Um diese Formel anzuwenden, wird nach ASTM C423 davon ausgegangen, dass das Schallfeld diffus ist und vor, während und nach der Messung keine zusätzliche Energie in den Raum bzw. in die Messung eingebracht wird, sondern ausschließlich dem ausgeschalteten Signal der Decay Rate entspricht.

Nach ASTM C423 werden folgende Anforderungen an die Testräume gestellt:

Tabelle 2 - Anforderungen an die Testräume, Quelle (E33 Committee, 2022)

| Anforderungsgröße | Wert | |
|---|--|-------------|
| Minimales Raumvolumen V | $\geq 125 \text{ m}^3$ | |
| Maximaler Schallabsorptionsgrad im Prüfraum ohne Prüfobjekt | $250 \text{ Hz} \geq f \leq 2500 \text{ Hz}$ | $\leq 0,05$ |
| | $f < 250 \text{ Hz}$ | $\leq 0,10$ |
| | $f > 2500 \text{ Hz}$ | |
| Temperatur | ≥ 10 mit $\Delta T \leq 5^\circ \text{ C}$ | |
| Luftfeuchte RH | $\geq 40 \%$ mit $\Delta RH \pm 5 \%$ | |
| Prüfobjektgröße | $\geq 60 \text{ ft}^2$ | |
| Frequenztestbereich | 100 Hz – 5000 Hz | |
| Testsignal | Zufälliges Rauschen | |
| Lautsprecheranzahl | ≥ 1 | |
| Mikrofonpositionsanzahl | ≥ 5 | |
| Anforderungen an Mikrofonpositionen | Abstand zw. Mikrofonen $\geq 1,5 \text{ m}$ Abstand zu Prüfobjekt $\geq 0,75 \text{ m}$ | |
| Anzahl gemessene Abklingvorgänge | ≥ 50 (10 pro Mikrofonposition) | |

Die Bestimmung der Abklingraten werden in ASTM C423 wie folgt beschrieben:

Das Testobjekt wird in den Raum eingebracht und direkt flach auf den Boden gelegt. Anschließend findet die Erzeugung des Signals statt, bis hin zum Erreichen eines kontinuierlichen Signals. Danach wird es abgeschaltet. Circa 100 ms bis 300 ms nach dem Abschalten beginnt der Messvorgang. Zum Messvorgang werden die Messpunkte L_i

während eines 25 dB-Abfalls aller Δt_i Sekunden aufgezeichnet, wie in Abbildung 8 zu sehen. Die Integrationszeit Δt_i und die Ausgabezeit Δt_o (Indizes vom Verfasser hinzugefügt, i = Integration, o = output) des Schallpegelmessers sollen zur Messung kleiner als 50 ms betragen. Ausgabezeit und Integrationszeit müssen nicht gleich sein (E33 Committee, 2022) 3.3.1. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis an allen Mikrofonpositionen die notwendigen Messungen durchgeführt wurden. Anschließend werden die Abklingkurven mittels einer Ensemble-Mittelung (auch „Scharmittel“, (DIN e.V., 2003)) zu einem gemittelten Abklingverlauf zusammengerechnet.

$$(L_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N L_{ij} \quad (23)$$

Darin sind:

- (L_i) Mittelung der Schalldruckpegel, gemessen am i -ten Punkt der N Abklingverläufe in dB
- N Anzahl der Abklingverläufe
- L_{ij} Schalldruckpegel am i -ten Punkt während des j -ten Abklingverlaufs in dB

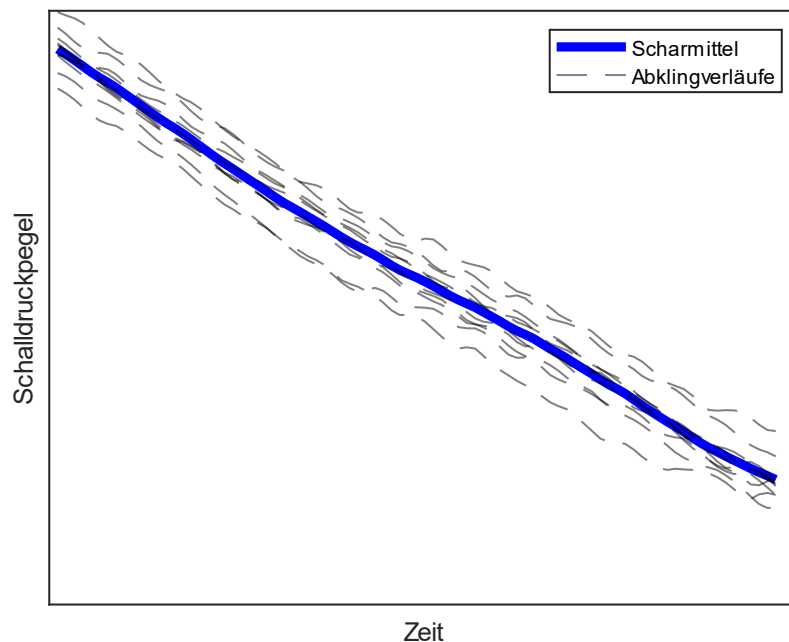


Abbildung 7 - beispielhafte Darstellung eines Scharmittels

Der erste Datenpunkt L_1 aus dem Scharmittel, der zur Berechnung angesetzt wird, ist der Punkt, der nach 100 ms bis 300 ms nach Abschalten des Signals gewählt wird. Das Ende des Auswertebereichs ist nach einem 25 dB -Abfall erreicht. Die Anzahl der Datenpunkte zwischen L_1 und $L_{1-25\text{dB}}$ werden als Variable M festgehalten.

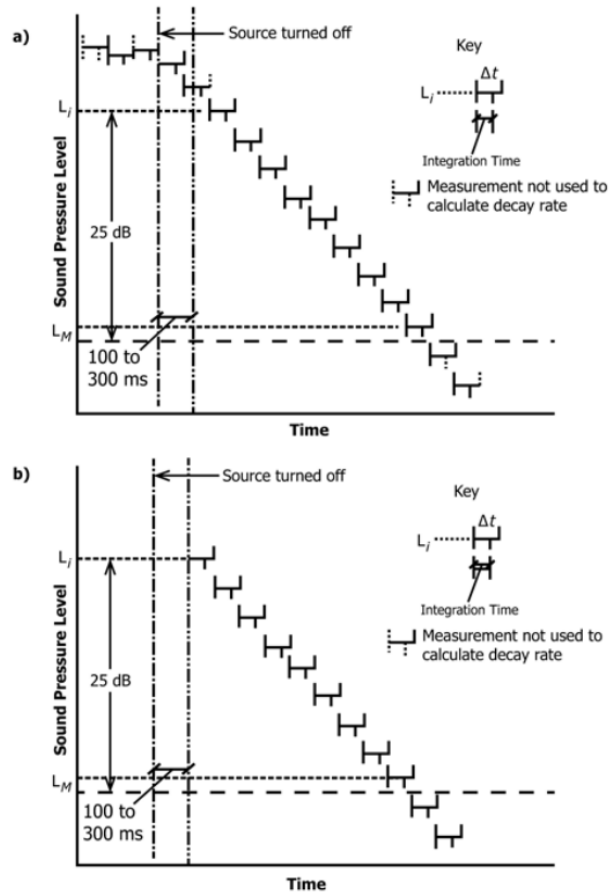


Abbildung 8 - Schema zum Ablauf der Messung der Decay Rate d , a: Messgerät misst direkt nach Abschalten der Quelle, b: Messgerät misst nach 100 – 300 ms nach Abschalten der Schallquelle, Quelle (E33 Committee, 2022)

Nun kann die Decay Rate d' nach folgender Gleichung gemäß ASTM C423 berechnet werden:

$$d' = \frac{6}{M(M^2 - 1)\Delta t} \left[(M + 1) \sum_{i=1}^M (L_i) - 2 \sum_{i=1}^M i(L_i) \right] \text{ in } \frac{\text{dB}}{\text{s}} \quad (24)$$

Abschließend findet im Terzband 1000 Hz und höher eine Luftabsorptionskorrektur mit der Decay Rate durch die Luft d_{air} statt. d_{air} wird berechnet aus

$$d_{\text{air}} = m' \cdot c \text{ in } \frac{\text{dB}}{\text{s}} \quad (25)$$

- m' Dämpfungskoeffizient in dB/m nach ANSI S1.26
- c Schallgeschwindigkeit nach ASTM C423

Aus d' und d_{air} ergibt sich final die Decay Rate d .

$$d = d' - d_{\text{air}} \text{ in } \frac{\text{dB}}{\text{s}} \quad (26)$$

Die ASTM C423 legt in ihrem Anhang A3 ein Verfahren zur Qualifizierung von Schallfeldern im Hallraum dar. Das Verfahren beruht auf der Berechnung einer relativen Standardabweichung s_{rel} der Decay Rate d für den leeren Hallraum sowie für den Hallraum mit Prüfobjekt in verschiedenen Positionen (E33 Committee, 2022). Diese Werte können mit den Grenzwerten der Tabelle A3.1 der ASTM C423 verglichen werden und bieten so ein Maß zur Beurteilung über die Qualität des diffusen Schallfeldes.

Anstelle von zehn Abklingvorgängen sollen hier 20 Abklingvorgänge gemessen werden. An jeder der mindestens fünf Mikrofonposition wird anschließend die Decay Rate d nach Gleichung (25) und (26) berechnet. Aus den einzelnen Decay Rates lassen sich nun die Standardabweichungen wie folgt ermitteln. Die Standardabweichung für den leeren Hallraum wird mit der Gleichung

$$s_M = \sqrt{\left(\frac{1}{N_M - 1} \sum_{i=1}^{N_M} (d_{Mi} - (d_M))^2 \right)} \quad (27)$$

und für den Hallraum mit mindestens drei Prüfobjektanordnungen (E33 Committee, 2022) mit der Gleichung

$$s_S = \sqrt{\left(\frac{1}{N_S - 1} \sum_{i=1}^{N_S} (d_i - (d_S))^2 \right)} \quad (28)$$

berechnet.

Dabei sind

- s_M Standardabweichung der Decay Rate über alle Mikrofonpositionen
- N_M Anzahl der Mikrofonpositionen
- d_{Mi} Decay Rate an i-ter Mikrofonposition
- (d_M) Mittelung der Decay Rate aller Mikrofonpositionen
- s_S Standardabweichung der Decay Rate bei allen Prüfobjektpositionen
- N_S Anzahl der Prüfobjektpositionen
- d_i Decay Rate an i-ter Prüfobjektposition
- (d_S) Mittelung der Decay Rate aller Prüfobjektpositionen

Die relativen Standardabweichungen $\frac{s_M}{(d_M)}$ und $\frac{s_S}{(d_S)}$ können nun mit den Anforderungen der Tabelle A3.1 verglichen werden.

Tabelle 3 - maximale relative Werte für die Standardabweichung der Decay Rate im leeren Raum und für Prüfobjektpositionen, Quelle: (E33 Committee, 2022)

| Oktavbandfrequenz, in Hz | $\max \frac{s_M}{(d_M)}$ | $\max \frac{s_S}{(d_S)}$ |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 100 | 0,11 | 0,07 |
| 125 | 0,07 | 0,04 |
| 160 | 0,04 | 0,04 |
| 200 | 0,03 | 0,04 |
| 250 | 0,03 | 0,03 |
| 315 | 0,03 | 0,03 |
| 400 | 0,03 | 0,03 |
| 500 | 0,02 | 0,02 |
| 630 | 0,02 | 0,02 |
| 800 | 0,02 | 0,02 |
| 1000 | 0,02 | 0,02 |
| 1250 | 0,02 | 0,02 |
| 1600 | 0,02 | 0,02 |
| 2000 | 0,02 | 0,02 |
| 2500 | 0,02 | 0,02 |
| 3150 | 0,02 | 0,02 |
| 4000 | 0,02 | 0,02 |
| 5000 | 0,02 | 0,02 |

2.6 Kriterium der ASTM E90

Die ASTM E90 ist eine amerikanische Norm, welche die Messaufgabe innehat, die Luftschalldämmung von Bauteilen und Elementen unter Laborbedingungen festzustellen. Die aktuelle Version der Norm ist September 2016 erschienen.

Zur Ermittlung der Luftschalldämmung wird das zu betrachtende Bauteil (z.B. eine Wand aus Mauerwerk) zwischen zwei direkt aneinandergrenzende Messräume eingebaut. Ein Raum dient als Senderraum, der zweite Raum als Empfangsraum. Im Senderraum wird mithilfe eines Lautsprechersystems ein zufälliges Rauschsignal erzeugt. In beiden Räumen wird anschließend der Schalldruckpegel L_S und L_E gemessen. Die Differenz aus diesen beiden Schalldruckpegeln wird als **Transmission Loss** (kurz „TL“) bezeichnet.

Dieser ist definiert als

$$TL = 10 \lg \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (29)$$

Nach Schirmer, Hübelt 2023, S. 213, Gleichung (5.2) (Schirmer & Hübelt, 2023) ist τ definiert als das Verhältnis zwischen abgestrahlter Schallenergie (P_2) und eintreffender Schallenergie (P_1) eines Trennbauteils.

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} \quad (30)$$

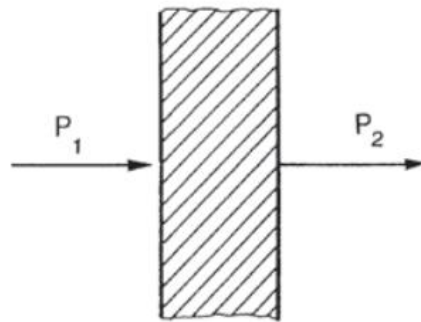


Abbildung 9 - einfallende und abgestrahlte Schallenergie an einer Trennwand, Quelle (Schirmer & Hübelt, 2023)

Der TL-Wert gibt die Schalldämmqualität des Trennbauteils an. Da die Schalldämmung abhängig ist vom Schallabsorptionsvermögen des Empfangsraumes, wird im Empfangsraum zusätzlich die Nachhallzeit bzw. die Decay Rate gemessen und dessen Einfluss mittels äquivalenter Schallabsorptionsfläche A_r rechnerisch entfernt. Ebenso wird die Fläche des Trennbauteils S berücksichtigt. ASTM E90 gibt für den TL final folgende Gleichung an:

$$TL = L_S - L_R + 10 \lg \left(\frac{S}{A_r} \right) \text{ dB} \quad (31)$$

Eine Messung unter Laborbedingungen bedeutet, dass ausschließlich die Schalldämmung des Trennbauteils ermittelt wird. Die Längsschalldämmung flankierender Wände, Decken usw. ist in Laboratorien häufig bekannt und kann dementsprechend rechnerisch berücksichtigt werden.

Die ASTM E90 legt in ihrem Anhang A.2 ein Verfahren zur Qualifizierung von Schallfeldern in den beiden Messräumen dar (E33 Committee, 2016).

Das Verfahren beruht auf der Ermittlung einer Größe **Total Confidence Interval**, kurz CI_{tot} , welches ein Bewertungsmaß der räumlichen Schwankungen des Schalldruckpegels und der Decay rate darstellt. Das Verfahren sieht Messungen entweder mit stationären Mikrofonen oder einem, sich bewegendem, Mikrofon vor. In vorliegender Arbeit wird die Variante mit stationären Mikrofonpositionen genutzt, weshalb auf die andere genannte Verfahrensweise nicht näher eingegangen wird. In Sende- und Empfangsraum werden an mindestens fünf Mikrofonpositionen der mittlere Schalldruckpegel \bar{L} und die Decay Rate d gemessen. Die Schalldruckpegel werden nach den Bestimmungen der Norm ASTM E90 gemessen, die Decay Rate nach den Bestimmungen der ASTM E2235 (E33 Committee, 2020). Die ASTM E2235 gibt ein Verfahren zur messtechnischen Bestimmung der Decay Rate zur Nutzung für Schalldämmmessungen an (E33 Committee, 2020). In vorliegender Arbeit wurden die Decay Rates nach ASTM C423 statt nach ASTM E2235 ermittelt. Die nach ASTM C423 verwendeten Decay Rates werden nicht für Schalldämmmessungen genutzt, sondern für Hallräume. Nach ASTM C423 werden mehr Abklingkurven gemessen (≥ 50) als nach ASTM E2235 (≥ 15) sowie eine Korrektur der Luftdämpfung (d_{air}) durchgeführt. Für Schalldämmung und Decay Rate wird die räumliche Standardabweichung s mit einem Faktor a zu dem dazugehörigen 95%-Vertrauensintervall ΔX berechnet. X steht hier sowohl für den Schalldruckpegel L als auch für die Decay Rate d und wird jeweils separat berechnet. Der Mittelwert des Schalldruckpegels \bar{L} wird energetisch ermittelt mit folgender Gleichung nach ASTM E90:

$$\bar{L} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10} \text{ dB}} \right] \quad (32)$$

Das Vertrauensintervall ΔX ermittelt sich wie folgt:

$$\Delta X = a \cdot s \quad (33)$$

$$s(f) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [X_i(f) - \bar{X}(f)]^2} \quad (34)$$

Faktor a berücksichtigt die statistische Unsicherheit für eine t-Verteilung mit n Freiheitsgraden für einen Vertrauensbereich von beidseitig 95%. Werte für t können aus den

Verteilungstabellen aus der Literatur (Georgii, 2015) entnommen werden. Als Freiheitsgrad n gilt hier die Anzahl der räumlich voneinander unabhängigen Mikrofonpositionen. α kann wie folgt ermittelt werden:

$$\alpha = \frac{t_{(n-1)}}{\sqrt{n}} \quad (35)$$

Mit Gleichung (35) lassen sich nun folgende Werte für α (Tabelle 3, Zeile 3) berechnen:

Tabelle 4 - Beispielwerte für α , Quelle (Georgii, 2015) und (Schulz, 2023)

| | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| $t_{n-1;0,975,einseitig}$ | 3,1824 | 2,7764 | 2,2622 | 2,086 | 2,0262 | 2,0244 | 2,0227 |
| n | 4 | 5 | 10 | 21 | 38 | 39 | 40 |
| $\frac{t_{n-1;0,975}}{\sqrt{n}} = \alpha$ | 1,59 | 1,24 | 0,72 | 0,455 | 0,329 | 0,324 | 0,320 |

Die 95%-Vertrauensintervalle ΔX für Schalldruckpegel im Senderraum, im Empfangsraum und für die Decay Rate werden abschließend aufaddiert und mit den Grenzwerten aus ASTM E90, Abschnitt A2.6.1 verglichen.

Tabelle 5 - Grenzwerte für ΔTL nach ASTM E90, A2.6.1 (E33 Committee, 2016)

| Terz-Mittenfrequenz in Hz | Konfidenzintervall ΔTL in dB |
|---------------------------|---|
| 80 | 6 |
| 100 | 4 |
| 125, 160 | 3 |
| 200, 250 | 2 |
| 315 - 4000 | 1 |

Da das Verfahren für zwei Räume entwickelt wurde, soll das 95%-Vertrauensintervall für jeweils eine Messung in die eine Richtung (ΔTL_1) und eine Messung in die andere Richtung (ΔTL_2) durchgeführt werden.

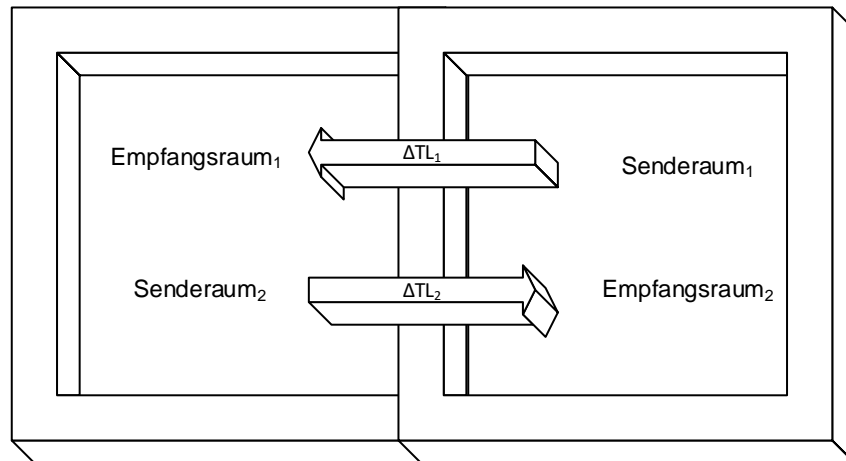


Abbildung 10 - Prinzip-Skizze Messung ΔTL_1 und ΔTL_2

Nachfolgend wird nur von einer Messungsrichtung ΔTL_1 ausgegangen. Für eine Richtung berechnet sich das Intervall wie folgt:

$$(\Delta TL)^2 = (\Delta L_S)^2 + (\Delta L_E)^2 + 18,86 \cdot (\Delta d_E/d_E)^2 \quad (36)^1$$

$$\Delta TL = \sqrt{(\Delta L_S)^2 + (\Delta L_E)^2 + 18,86 \cdot (\Delta d_E/d_E)^2} \quad (37)$$

In vorliegender Arbeit wird nur ein Raum betrachtet, wodurch folgende Beziehung angenommen wird:

$$\Delta L_S = \Delta L_E = \Delta L \quad (38)$$

Entgegen den Festlegungen aus z.B. Bradley, Müller-Trapet et. al. (Bradley et al., 2014), das 95%-Vertrauensintervall für den zweiten Raum (ΔL_E) auf 0 zu setzen, wird in vorliegender Arbeit das 95%-Vertrauensintervall für die Schalldruckpegel wie folgt behandelt:

$$\Delta TL = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta L)^2 + 18,86 \cdot \left(\frac{\Delta d_E}{d_E}\right)^2} = \sqrt{2 \cdot (\Delta L)^2 + 18,86 \cdot \left(\frac{\Delta d_E}{d_E}\right)^2} \quad (39)$$

Dadurch ist es nicht notwendig, die Grenzwerte aus Tabelle 5 anzupassen. Im Nachfolgenden wird ΔTL generell als das totale Konfidenzintervall CI_{tot} bezeichnet.

¹ Statt $18,9 \cdot (\Delta A_E/A_E)^2$ als letzten Term ist es laut ASTM E90 A2.5.10 möglich, diesen mit $18,86 \cdot (\Delta d_E/d_E)^2$ zu substituieren (E33 Committee (2016))

Nach ASTM E90 werden folgende Anforderungen an die Testräume gestellt:

Tabelle 6 - Anforderungen an die Testräume, Quelle (E33 Committee, 2016)

| Anforderungsgröße | Wert | |
|---------------------------------------|--|-----------------------------------|
| Minimales Raumvolumen | $\geq 80 \text{ m}^3$ | |
| Mindestabsorption A im Empfangsraum | $\frac{2000}{V^{\frac{1}{3}}} \geq f > 2000 \text{ Hz}$ | $< A = \frac{V^{\frac{2}{3}}}{3}$ |
| | $f < \frac{2000}{V^{\frac{1}{3}}}$ | $< 3 \cdot A = V^{\frac{2}{3}}$ |
| Temperatur | $22 \pm 5 \text{ }^\circ \text{C}$ | |
| Luftfeuchte RH | $\geq 30 \%$ | |
| Abweichungen während der Messung | $\Delta T < 3\%$ $\Delta RH < 3\%$ | |
| Testsignal | Zufälliges Rauschen | |
| Lautsprecheranzahl | ≥ 1 | |
| Mikrofonpositionsanzahl | ≥ 6 | |
| Anforderungen an Mikrofonpositionen | Abstand zu schallharten Flächen $\geq 1 \text{ m}$ Abstand zw. Mikrofonen $\geq 1,5 \text{ m}$ Abstand zur Schallquelle $\geq 2 \text{ m}$ | |

Die Mittelungszeit T , die gebraucht wird, um mit einem 95%-Konfidenzintervall in jedem relevanten Frequenzbereich mit Terz-Mittenfrequenz f_0 die Schätzung des Schalldruckpegels mit einer Genauigkeit e von $\pm 0,5$ dB zu erhalten, ist nach ASTM E90, Gleichung A2.1 wie folgt definiert:

$$T = \frac{310}{f_0 e^2} \text{ in s} \quad (40)$$

Für die Herleitung der Gleichung (40) wird in ASTM E90 auf die Literatur von Beranek 1971, S.115 (Beranek, 1971) verwiesen, welche nachfolgend zusammengefasst dargestellt wird.

Folgende Werte/Gleichungen (41), (42), (43), und (44) sind nach Beranek 1971 (Beranek, 1971) definiert:

$$n = 2B_n T \quad (41)$$

- n Anzahl der Freiheitsgrade
- $B_n T$ "Zeit-Bandbreite-Produkt" Produkt aus Bandbreite B_n und Zeit T

$$y_{\text{rms}}^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (42)$$

Gleichung (42) ist in Beranek, 1971 folgend beschrieben:

„The chi-square distribution is the distribution of the function “(42)” where the x_i are Gaussian random variables and where the average value of x_i^2 is 1. For a set of x_i , which are statistically independent (which we assume in a true psd estimation) the mean value $y_{\text{rms}}^2 = n$.“ (Beranek, 1971)

$$\text{Confidence Limits} = 10 \cdot \lg \frac{\overline{y_{\text{rms}}^2}}{y_{\text{rms}}^2} \quad (43)$$

Laut Beranek, 1971 hat Blackman 1965 (Blackman, 1965), Seite 150 folgende Annäherungsgleichung zur Ermittlung der Konfidenzgrenzen gegeben:

$$10 \cdot \lg \frac{\overline{y_{\text{rms}}^2}}{y_{\text{rms}}^2} \approx G \left(\frac{2}{3n-1} \pm \frac{1}{\sqrt{n-1}} \right) \quad (44)$$

- G Wert für Konfidenzgrenzen nach Tabelle 7

Nach Beranek, 1971, Tabelle 5.3 (Beranek, 1971) sind für G folgende Werte angegeben:

Tabelle 7 - Konfidenzgrenzen nach Beranek 1971 (Beranek, 1971)

| Konfidenzgrenzen, % | G |
|---------------------|------|
| 68 | 6,1 |
| 80 | 7,8 |
| 90 | 10,0 |
| 96 | 12,6 |
| 98 | 14,3 |

Als Folge aus ASTM E90 und Beranek, 1971 lässt sich für e Gleichung (45) schließen:

$$10 \cdot \lg \frac{\overline{y^2_{\text{rms}}}}{y^2_{\text{rms}}} = e \quad (45)$$

Aus einer Probe mit Gleichung (44) und $G = 10$ (90%) ist bekannt, dass für Konfidenzgrenzen von $e \pm 0,5$ dB die Anzahl der Freiheitsgrade $n > 300$ und bei $G = 12,6$ (96%) $n > 500$ sein muss. Laut Beranek, 1971 dominiert der letzte Term bei $n \geq 100$ (Beranek, 1971). Dies ist im vorliegenden Fall also gegeben. Der erste Term der Gleichung wird demzufolge mit 0 angesetzt und aus Gleichung (45) und (44) ergibt sich:

$$e \approx G \left(\frac{1}{\sqrt{n-1}} \right) \quad (46)$$

Nach Umstellen von Gleichung (46) nach n , Einsetzen von Gleichung (41) in n und Umstellen nach T ergibt sich folgende Gleichung:

$$T = \frac{\left(\frac{G}{e}\right)^2 + 1}{2B_n} \quad (47)$$

Die ASTM E90 sieht eine Terzbandbewertung vor (Vgl. ASTM E90, A2.3). Nach und Böhmer, E. et al 2018, S.69 lässt sich die -3 dB-Bandbreite mit der Mittenfrequenz f_0 wie folgt berechnen (Böhmer et al., 2018):

$$B_n = \frac{f_0}{Q} \quad (48)$$

- Q Gütefaktor, bei Terzband $Q = 4,318$ nach Sengpiel 2017 (Sengpiel, 2017)

Mit Einsetzen von Gleichung (48) in (47) und anschließenden Vereinfachungen folgt:

$$T = \frac{\left(\frac{G^2}{e^2} + 1\right)}{\frac{2f_0}{Q}} = \frac{\left(\frac{G^2}{e^2} + 1\right)}{\frac{2f_0}{4,318}} = \frac{\left(\frac{G^2}{e^2} + 1\right)}{\frac{f_0}{2,159}} = \frac{\left(\frac{G^2}{e^2} + 1\right) \cdot 2,159}{f_0} \quad (49)$$

Der Zähler wird ausmultipliziert und der zweite Term im Zähler mit $1 \left(\frac{e^2}{e^2}\right)$ erweitert.

$$T = \frac{\left(\frac{G^2 \cdot 2,159}{e^2} + 2,159\right)}{f_0} = \frac{\left(\frac{G^2 \cdot 2,159}{e^2} + \frac{2,159 \cdot e^2}{e^2}\right)}{f_0} \quad (50)$$

Daraus folgt:

$$T = \frac{\left((G^2 + e^2) \cdot 2,159\right)}{f_0 e^2} \quad (51)$$

Durch Einsetzen von $G \approx 12$, was vom Verfasser als Schätzung für eine 95%-Konfidenzgrenze angesetzt wird, und $e = 0,5$ im Zähler wird Gleichung (57) vereinfacht zu

$$T = \frac{311}{f_0 e^2} \quad (52)$$

Diese Formel kommt nah an Gleichung (40) heran. Bei abweichendem e muss der Zähler dementsprechend angepasst werden, sodass wieder ein vereinfachter Wert für den Zähler errechenbar ist. Dies ist zu empfehlen, auch, wenn der Einfluss von e entsprechend gering ist ($G^2 \gg e^2$).

2.7 Das Kriterium Degree of Time Series Fluctuation

Eine weitere Methode zur Bewertung der Diffusität eines Schallfeldes ist der „Degree of Time Series Fluctuation“, kurz **DTF**. Beim DTF werden die zeitlich variierenden Energiespitzen einer Impulsantwort, die durch die von den Raumbegrenzungsflächen reflektierten Energieanteile in der Impulsantwort als Amplitudensprünge zu erkennen sind, zur restlichen Impulsantwort ins Verhältnis gestellt. Der Energieabfall der Impulsantwort wird herausgerechnet, sodass ausschließlich die zeitlichen Schwankungen in die Berechnung einfließen. Die zeitlichen Schwankungen werden anschließend normalisiert, um sie zwischen verschiedenen Schallfeldern vergleichen zu können. Der Schwellenwert, ab

dem ein bestimmtes Verhältnis zwischen den Spitzen der Impulsantwort und der gesamten Impulsantwort eintritt, ist nach Hanyu 2018 (Hanyu et al., 2018) als DTF definiert.

Nachfolgend wird erläutert, wie sich der DTF gemäß Hanyu 2018 (Hanyu et al., 2018) aus der Impulsantwort folgend berechnen lässt.

Als Berechnungsgrundlage dient eine in der Hallkabine ermittelte Raumimpulsantwort $p(t)$, wie in Abbildung 11 zu sehen. Die Raumimpulsantwort wird gemessen, indem zum Beispiel ein kurzer Schall-Impuls (sogenannter Dirac-Impuls, nicht näher beschrieben) oder ein Sweep ausgesendet wird und mit Mikrofonen die „Antwort“ des Raumes aufgezeichnet wird. Der Sweep wird in Kapitel 3.24.3 näher beschrieben.

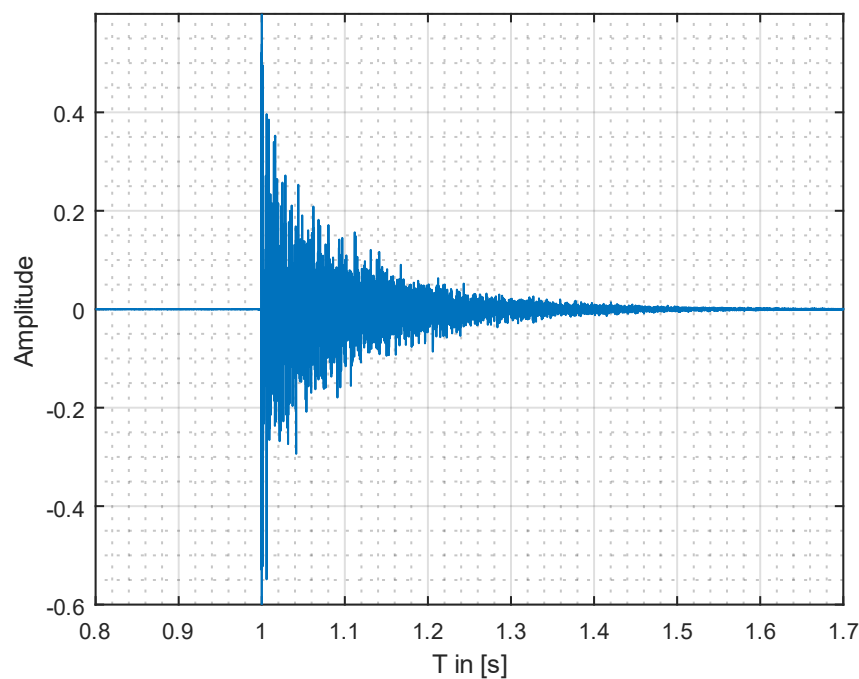


Abbildung 11 - gezoomter Ausschnitt einer Raumimpulsantwort $p(t)$

Aus $p(t)$ wird die Energy Decay Curve (kurz EDC) $E_S(t)$ mittels Schröder-Rückwärtsintegration wie folgt berechnet:

$$E_S(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau \quad (53)$$

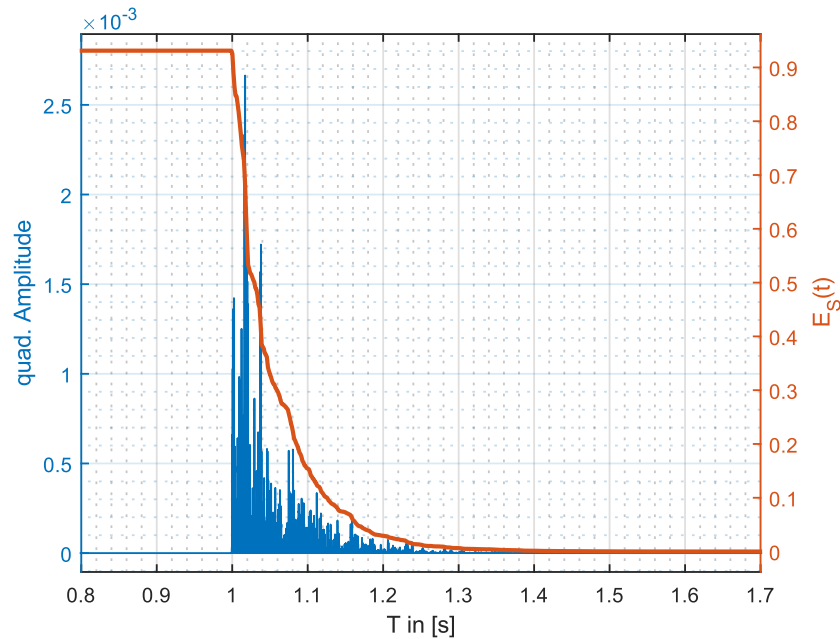


Abbildung 12 - beispielhafte Darstellung der EDC $E_S(t)$ (orange) und quadrierten Impulsantwort $p^2(t)$ (blau)

Aus der EDC und der Impulsantwort $p(t)$ wird die energieelose Impulsantwort $g(t)$ mit folgender Gleichung berechnet:

$$g(t) = \frac{p(t)}{\sqrt{E_S(t)}} \quad (54)$$

Mit $g^2(t)$ werden nur die zeitlichen Schwankungen in der Impulsantwort dargestellt, ohne den Energieabfall durch die EDC. Nach Hanyu 2014 entspricht die gemittelte, quadrierte, energieelose Impulsantwort $\overline{g^2(t)}$ der Decay Rate A (Hanyu, 2014).

$$\overline{g^2(t)} \cong A \quad (55)$$

Mittels dieser Logik ist es möglich, folgende Verbindung zwischen der Nachhallzeit T und Gleichung (55) zu erlangen. Die Nachhallzeit ermittelt sich nach Hanyu 2014, S. 12 (Hanyu, 2014) wie folgt:

$$-60 = 10 \lg[e^{-AT}] \quad (56)$$

Durch Umstellen von Gleichung (56) nach T und dem Einsetzen von Gleichung (55) lässt sich die Nachhallzeit nach Gleichung (57) ermitteln.

$$T \cong \frac{6}{\lg(e)} \cdot \frac{1}{A} = \frac{13,82}{A} = \frac{13,82}{g^2(t)} \quad (57)$$

Zwei verschiedene Schallfelder können durch $g^2(t)$ nicht miteinander verglichen werden, da diese Größe von der Nachhallzeit abhängig ist (Hanyu, 2014). Um eine Vergleichbarkeit zu schaffen, muss $g^2(t)$ normalisiert werden. Hanyu setzt das um zu folgender Gleichung (Hanyu et al., 2018):

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{g^2(t)}} \cdot g(t) \quad (58)$$

Die normalisierte, energielose Impulsantwort steht nun für $h(t)$. Durch diese Normalisierung ist $\overline{h^2(t)}$ immer eins, wodurch sich nun Schallfelder mit unterschiedlichen Nachhallzeiten untereinander vergleichen lassen. $h^2(t)$ gibt die zeitlichen Schwankungen einer relativen Größe an. Bei kleinen, zeitlichen Schwankungen der reflektierten Schallenergie befindet sich $h^2(t)$ nahe eins.

In Hanyu 2018 werden nun drei Größen eingeführt, $z(k)$, R_{total} und $R(k)$ (Hanyu et al., 2018). Diese sind wie folgt definiert:

$$z(k) = \frac{R(k)}{R_{total}} \quad (59)$$

$$R(k) = \int_{t_1}^{t_2} h^2(t) \geq k \, dt \quad (60)$$

$$R_{total} = \int_{t_1}^{t_2} h^2(t) \, dt \quad (61)$$

$R(k)$ integriert $h^2(t)$ nur in den Bereichen, die über dem Schwellenwert k liegen. In Abbildung 13 sind das also nur die grau hinterlegten Flächen. R_{total} integriert $h^2(t)$ über den gesamten Betrachtungszeitraum t_1 bis t_2 .

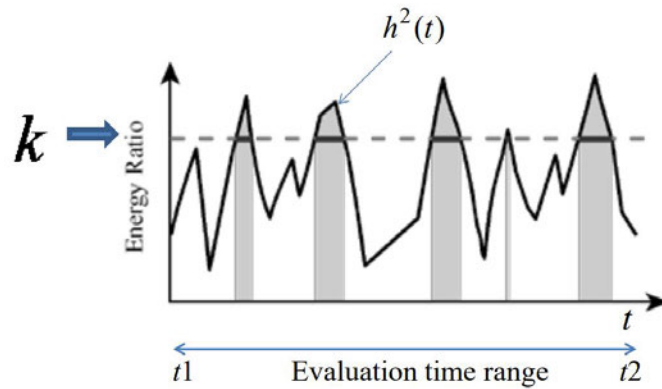


Abbildung 13 - Darstellung der Findung des Schwellenwerts k , Quelle (Hanyu et al., 2018)

$z(k)$ gibt bei Schwellenwert k das Verhältnis zwischen $R(k)$ und R_{total} an. Der Wert, an dem das Verhältnis $z(k) = 0,01 = 1\%$ beträgt, wird nach Hanyu 2018 als „**Degree of Time Series Fluctuation**“ (**DTF**) (Hanyu et al., 2018) oder nach Bidondo 2015 auch „**Sound Field Diffusion Coefficient**“ (**SFDC**) bezeichnet (Bidondo et al., 2015). Im weiteren Verlauf der Arbeit wird diese Größe als DTF benannt. Eine steile Kurve hat einen kleineren DTF zufolge, eine flache Kurve einen höheren DTF. Je kleiner der Schwellenwert k ist, umso höher ist die Diffusität des Schallfeldes (Hanyu et al., 2018).

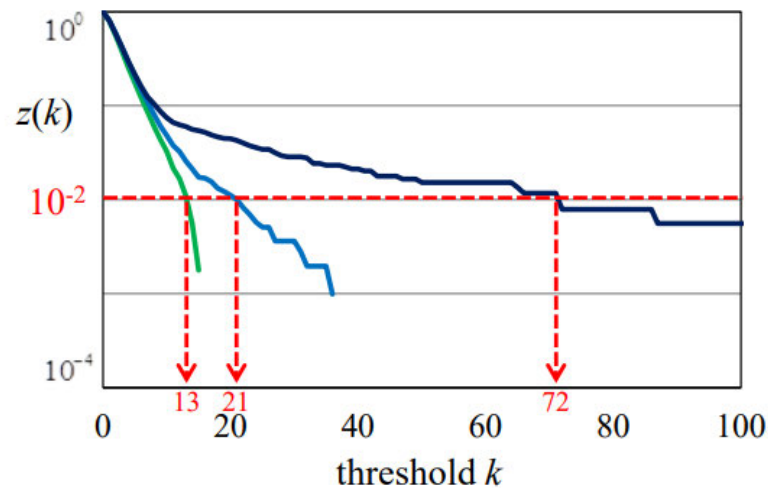


Abbildung 14 – Darstellung des Schwellenwert k für den DTF, Quelle (Hanyu et al., 2018)

3 Messaufbau und Messmethoden

Im folgenden Kapitel werden die zur Messung verwendeten Aufbauten sowie die Vorgehensweise und der Ablauf der Messungen beschrieben.

3.1 Messaufbau

Der Messaufbau wird unterteilt in die verwendeten Prüfobjekte, die Beschreibung der Hallkabine, Festlegungen zum Messplan und die zur Verfügung gestandene und benutzte Messausrüstung.

3.1.1 Verwendete Prüfobjekte

Als Prüfobjekte wurden zwei unterschiedlich dicke Schaumstoffe des Typs Micropor verwendet. Es besteht aus einem offenzelligen, geschäumten Schaumstoff aus Polyurethan.

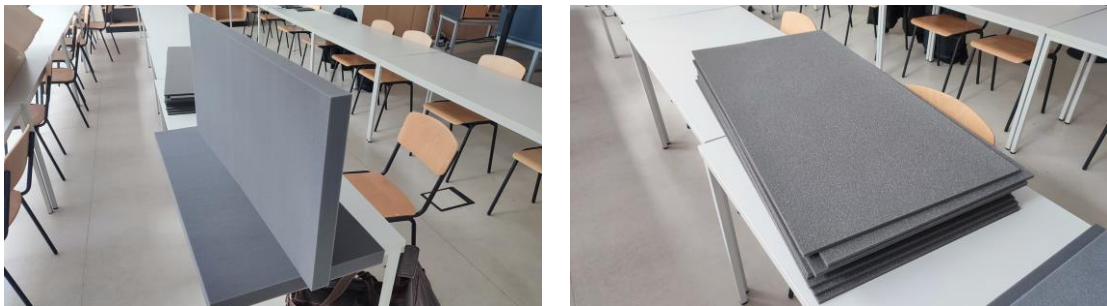


Abbildung 15 - Prüfobjekte, links 50 mm Micropor Platte, rechts 10 mm Micropor Platte, Rohmaß
1 m · 0,5 m

Die Schallabsorptionsgrade α der Schaumstoffe sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8 - Schallabsorptionsgrade der Prüfobjekte nach Quelle (schaumstofflager.de, 2023a) und (schaumstofflager.de, 2023b)

| Frequenz in Hz | Schallabsorptionsgrad α Prüfobjekt 1 cm | Schallabsorptionsgrad α Prüfobjekt 5 cm |
|-------------------|---|---|
| 100 | 0,09 | 0,21 |
| 125 | 0,14 | 0,30 |
| 160 | 0,18 | 0,42 |
| 200 | 0,22 | 0,54 |
| 315 | 0,33 | 0,88 |
| 400 | 0,37 | 1,00 |
| 500 | 0,43 | 1,00 |
| 630 | 0,50 | 1,00 |
| 800 | 0,57 | 1,00 |
| 1000 | 0,65 | 1,00 |
| 1250 | 0,75 | 1,00 |
| 1600 | 0,85 | 1,00 |

Für die Messungen wurden die Prüfobjekte von schaumstofflager.de bestellt und auf die Größe der Bodenluke der Hallkabine so zurechtgeschnitten, dass die Öffnung (1,27 m · 0,865 m) vollständig mit dem Prüfobjekt ausgefüllt war.



Abbildung 16 – Ansicht der Hallkabine mit Prüfobjekt

Insgesamt sind für die geplanten Messungen im Rahmen dieser Arbeit drei Situationen geplant worden. In Situation 1 ist kein Prüfobjekt in der Hallkabine verbaut. Situation 1 wird mit „k“ abgekürzt. In Situation 2 ist das Prüfobjekt mit zehn Millimeter Stärke verbaut, Situation 2 wird mit „e“ abgekürzt wird. In Situation 3 ist das Prüfobjekt mit 50 mm Stärke verbaut, Situation 3 wird mit „f“ abgekürzt wird. Die Bedeutung der Abkürzungen wird in Abschnitt 3.1.3 näher erläutert.

3.1.2 Die Hallkabine

Die Hallkabine befindet sich in den Hochschulräumen der Hochschule Mittweida. In Abbildung 17 ist eine Frontansicht der Hallkabine zu sehen.



Abbildung 17 - Ansicht der Hallkabine von vorn

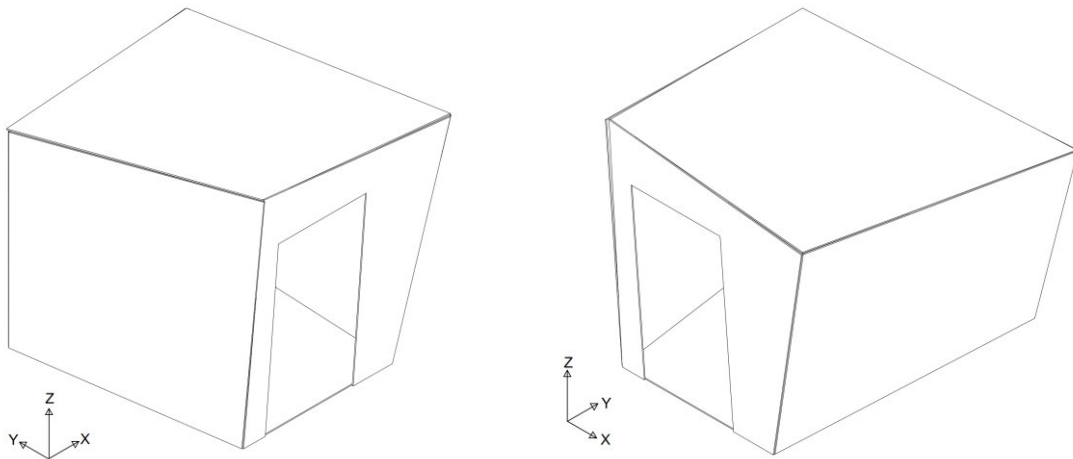


Abbildung 18 - isometrische Ansicht des Innenraums der Hallkabine, links von links oben, rechts von rechts oben

Die Hallkabinenwände, der Boden und die Decke bestehen aus 35 mm dicken Spanholzplatten, welche beidseitig mit einer weißen Farbbeschichtung überzogen sind. Die Umfassungsflächen sind durch Flachmetall-Elemente miteinander verbunden. Das lichte Volumen der Hallkabine ohne Diffusoren oder Einbauten beträgt $V \approx 9,1405 \text{ m}^3$. Eine schematische Darstellung des Innenraums der Hallkabine ist in Abbildung 19 dargestellt.

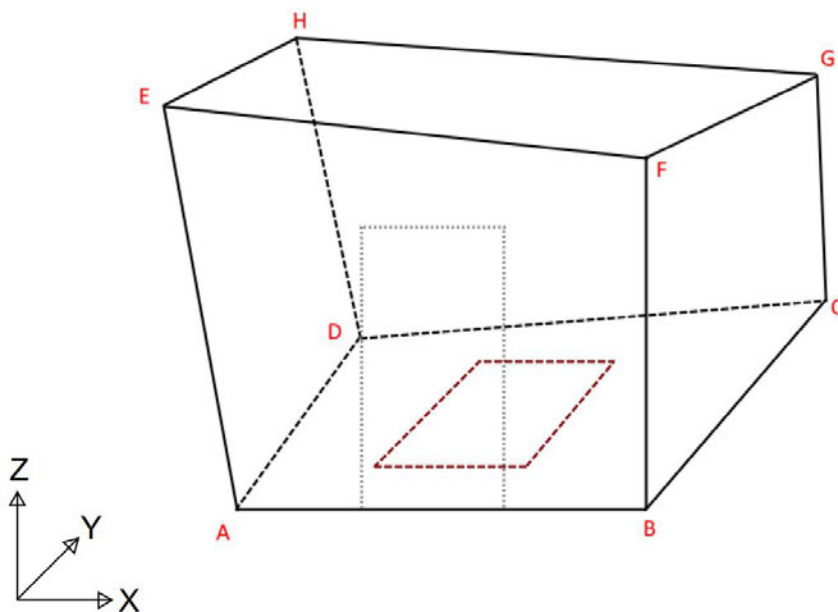


Abbildung 19 - Schematische Darstellung des Hallkabinen-Innenraums ohne Diffusoren

Die roten Buchstaben A bis H beschreiben jeweils einen Eckpunkt des Raumes. Grau in Punktlinien dargestellt ist die Eingangstür. Das braune, in Strichlinien illustrierte Rechteck auf dem Boden soll die Bodenluke mit den Maßen $1,27\text{ m} \cdot 0,865\text{ m}$ für den Einbau von Prüfobjekten veranschaulichen. In Tabelle 9 sind die Abstände zwischen den Eckpunkten aufgelistet.

Tabelle 9 - Entfernungen zwischen zwei Punkten zu Abbildung 19

| Beschreibung der Gerade | Länge in m |
|-------------------------|------------|
| A - B | 1,54 |
| B - C | 2,53 |
| C - D | 2,01 |
| D - A | 2,13 |
| E - F | 1,96 |
| F - G | 2,80 |
| G - H | 2,40 |
| H - E | 2,36 |
| A - E | 2,30 |
| B - F | 2,12 |
| C - G | 1,66 |
| D - H | 1,93 |

An der Decke des Hallraums ist ein Diffusor in Form einer elfeckigen Pyramide aus dreieckigen Seitenflächen eingebaut. Abbildung 25 zeigt diese als bildliche Darstellung. Die Pyramide besteht aus beschichteten Pressspanplatten. Ihre Höhe beträgt $\approx 590\text{ mm}$. Die außenliegenden Grundkanten besitzen eine Länge von $\approx 210\text{ mm}$. Die Seitenkanten haben eine Länge von $\approx 660\text{ mm}$. Die Länge von einer Grundkante zum Mittelpunkt der Pyramide (= Radius) entspricht $\approx 295\text{ mm}$, wodurch sich ein Volumen des Körpers von $\approx 0,067\text{ m}^3$ errechnen lässt.

An den Seiten- und Deckenflächen sind neun Diffusoren, ebenfalls in Form von Pyramiden, angebaut (siehe Abbildung 25). Die Diffusoren haben vier Seitenflächen und eine rechteckige Grundfläche. Zwei Grundkanten sind 625 mm und zwei Grundkanten 890 mm lang. Die Höhe der Pyramide beträgt $\approx 94\text{ mm}$. Dadurch ergibt sich das Volumen eines Diffusors zu $\approx 0,0178\text{ m}^3$.

Im Fußboden der Kabine befindet sich eine Luke, aus dem gleichen Material wie die Wände, die sich herausnehmen lässt. Unterhalb der Luke ist ein Hohlraum. Durch Abstandshölzer, in denen auf der Rückseite Bolzen eingebracht wurden, ist es möglich,

verschiedene Höhen durch die Wahl der Ober- und Unterseite zu wählen, wodurch sich die Luke mittels einem bestimmten Rastermaß in der Höhe verstellen lässt.



Abbildung 20 - links Hohlraum mit Abstandsmarkierungen, rechts Holzleisten als Auflager für Luke mit Markierungen A und B, oben Vorderseite, unten Rückseite

Das Rastermaß ist auf allen vier Seiten des Hohlraums gleich. In Abbildung 21 ist schematisch eine Seitenwand der Luke dargestellt. In der Seitenwand befinden sich kleine Löcher, die als Halterungen für die Bolzen dienen. Die Löcher sind durchnummeriert von -2 bis 20. Die blaue Linie stellt dabei die Ebene null dar. Weitere Markierungen sind in Schritten von fünf Punkten zu finden. Der Abstand von Oberkante bis zum 1. Loch in Ebene -2 beträgt 25 mm. Der Abstand zwischen den Löchern beträgt jeweils 15 mm. Das Abstandsholz hat eine Höhe von 33 mm. Der Bolzen ist in einem Abstand von rund 12 mm von der Unterkante in die Rückseite eingebracht. Durch Wenden des Holzes sind zwei unterschiedliche Höhen einstellbar. Liegt die Seite A oben, sind 21 mm von Lochmitte bis Oberkante Abstandsholz gegeben, liegt die Seite B oben, sind 12 mm Abstand gegeben.

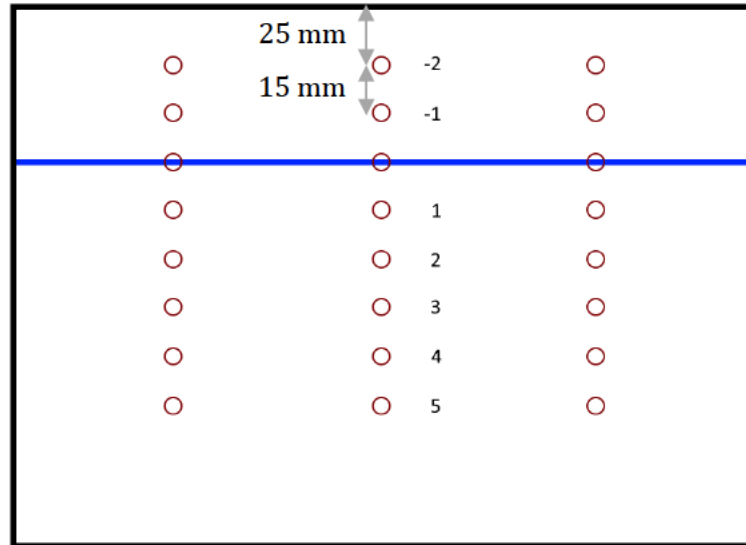


Abbildung 21 - Prinzip-Skizze des Aufbaus einer Hohlraum-Seitenwand

Dadurch ist es nun möglich, verschieden hohe Prüfobjekte so einzubauen, dass diese bündig mit der Fußbodenoberfläche abschließen. Dafür wurde vom Hersteller der Hallkabine eine Tabelle mitgeliefert, die die Positionen und die Oberseite A oder B der Holzleisten in dem Raster angeben. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden einmal eine 10 mm und eine 50 mm dicke Schaumstoffplatte genutzt. Um das Prüfobjekt bündig mit der Oberkante des Fußbodens einzubauen, war es notwendig, eine zusätzliche Erhöhung von 5 mm einzubringen. Dies wurde durch vier Stück 5 mm dicke Schraubenmuttern erreicht.

Die Wahl der Lager ist in Tabelle 10 dargestellt:

Tabelle 10 - Lage Abstandshölzer zur jeweiligen Prüfsituation

| Prüfobjekt | Beschreibung der Positionen der Hölzer |
|------------------|---|
| Kein Prüfobjekt | Ebene 0, A oben Luke fußbodenbündig |
| 10 mm Prüfobjekt | Ebene 1, A oben zzgl. 5 mm Unterlage |
| 50 mm Prüfobjekt | Ebene 3, B oben zzgl. 5 mm Unterlage |

3.1.3 Festlegungen zum Messplan

Aus dem Konsens der drei zu untersuchenden Größen und den Anforderungen, die die Richtlinien, Untersuchungen und Normen mit sich bringen, wurde ein Messplan erstellt.

Da der vorhandene Hallraum kleiner ist, als er nach Norm sein sollte, ist es notwendig, durch die Norm definierte Abstände, also Längenmaße, zu skalieren. In vorliegender Arbeit wurden nur die Abstände zwischen Mikrofonpositionen untereinander, zwischen den Mikrofonpositionen zu Raumumfassungsflächen und der Lautsprecherpositionen skaliert. Eine Skalierung der zu untersuchenden Frequenzen fand nicht statt, da die Hallkabine für orientierende Messungen genutzt werden soll. Dadurch kann eine Einschätzung vorgenommen werden, wo die Messergebnisse des Prüfobjekts liegen, bevor sie zu einem Prüflabor geht, welches nach DIN EN ISO 354 Messungen durchgeführt werden (Keil, 2022). Demzufolge wurde der zu untersuchende Frequenzbereich auf 100 Hz bis 5000 Hz festgelegt. Für die Abstände der Mikrofonpositionen untereinander und zu den Umfassungsflächen wurde ein Skalierungsfaktor folgendermaßen berechnet.

Der Skalierungsfaktor wurde über das Verhältnis der Volumina zwischen dem empfohlenen Volumen von ASTM C423 und der Hallkabine gebildet. Als Volumen eines Hallraums wurde der nach ASTM C423 empfohlene Wert von $V = 200 \text{ m}^3$ angesetzt. Das Volumen der Hallkabine wurde messtechnisch vor Ort bestimmt. Die Volumina wurden ins Verhältnis gesetzt. Aus dem Volumenverhältnis lassen sich durch Wurzelziehen das Verhältnis zwischen Flächen und zwischen Längen ermitteln.

Tabelle 11 – Berechnung des Skalierungsfaktors anhand des Volumenverhältnisses

| Dimension | Skalierungsfaktor s |
|-----------|--|
| Volumen | $s_{\text{Volumen}} = \frac{200}{9,1405} = 21,88$ |
| Fläche | $s_{\text{Flaeche}} = (\sqrt[3]{s_{\text{Volumen}}})^2 = 7,8223$ |
| Länge | $s_{\text{Laenge}} = \sqrt[3]{s_{\text{Volumen}}} = 2,797 \approx 2,8$ |

Dadurch erhält man folgende Maßangaben in Tabelle 12. In ASTM C423 ist bei stationären Mikrofonpositionen kein Maß für den Abstand zwischen einer Mikrofonposition und den Umfassungsflächen gegeben. Für ein bewegtes Mikrofon soll der Abstand zwischen Mikrofon und Umfassungsflächen $> 0,75$ m betragen. Demzufolge kann man daraus schlussfolgern, dass $> 0,75$ m auch für stationäre Mikrofonpositionen angenommen werden können. In DIN EN ISO 354 ist als Mindestwert für den Abstand zwischen Mikrofon und Umfassungsfläche $> 1,0$ m angegeben (DIN e.V., 2003)

Tabelle 12 - Skalierte Maße gemäß ASTM C423 und ASTM E90

| Situation | Maß nach ASTM C423 | Maß nach ASTM E90 | Skaliertes Maß |
|--|--|-------------------|--|
| Mikrofon – Mikrofon | $> 1,5$ m | $> 1,5$ m | $> 0,54$ m = 540 mm |
| Mikrofon – Prüfobjekt | $> 0,75$ m | - | $> 0,27$ m = 270 mm |
| Mikrofon – Umfassungsfläche (DIN e.V., 2003) | $> 1,00$ m | $> 1,00$ m | $> 0,36$ m = 360 mm |
| Mikrofon – Schallquelle | - | $> 2,00$ m | $> 0,72$ m = 720 mm |
| Fläche Prüfobjekt | $> 5,57$ m ² – 6,69 m ² | | $> 0,71$ m ² – 0,86 m ² |

Die Bodenluke des Hallraums hat eine Größe von $\sim 1,09 \text{ m}^2$, was oberhalb der skalierten empfohlenen Fläche der ASTM C423 liegt, diese liegt bei skaliert $0,86 \text{ m}^2$. Da es keine Begrenzung nach oben gibt, ist es zulässig, die Fläche von $1,09 \text{ m}^2$ zu nutzen (E33 Committee, 2022).

Die Mikrofonpositionen wurden in einem XYZ-Koordinatensystem eingeordnet. Der nachfolgende Grundriss (Abbildung 22) zeigt die Einordnung der Mikrofonpositionen auf einer XY-Ebene.

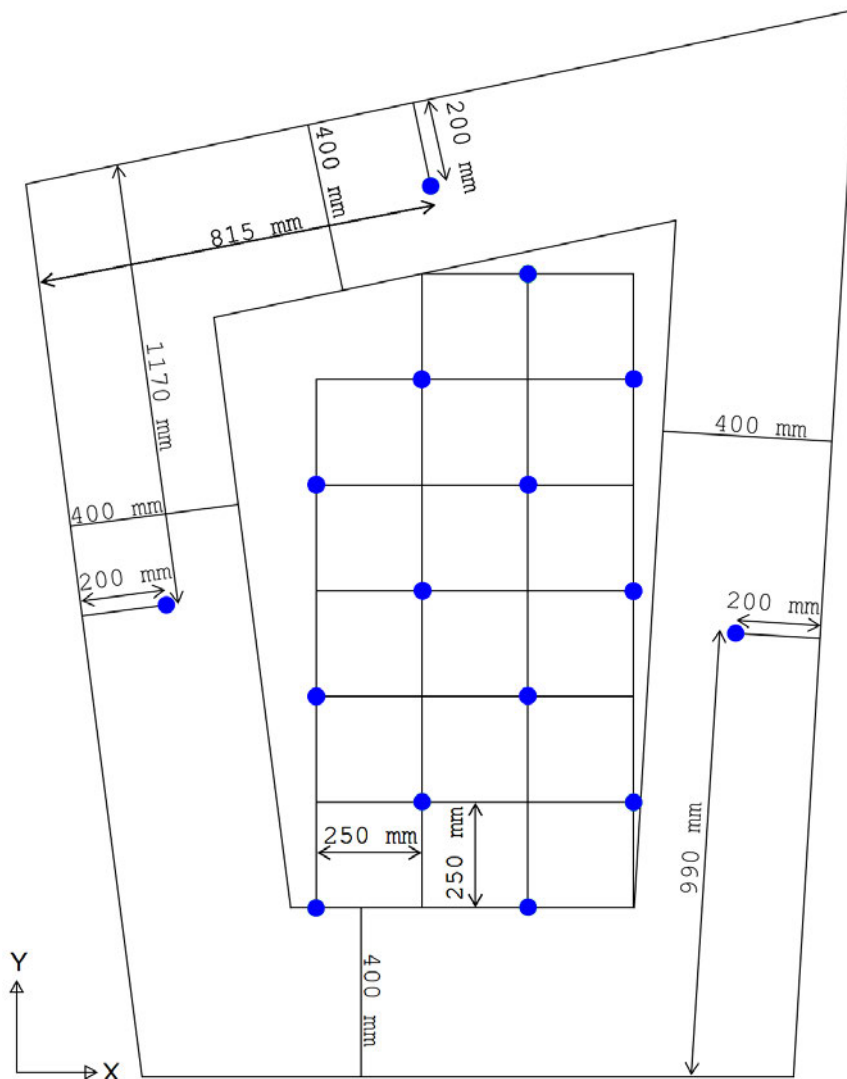


Abbildung 22 - Grundriss des Hallraums, blau Mikrofonpositionen in XY-Ebene

Von den Außenkanten des Grundrisses wurde in einem Abstand von 400 mm ein „inneres“ Viereck abgesteckt, in dem sich die Hauptanzahl der Mikrofonpositionen befinden. Diese haben untereinander mindestens einen Abstand von $\sqrt{2} \cdot 250 \text{ mm} \approx 353 \text{ mm}$. Dieser Abstand ist geringer als der in Tabelle 12 genannte Abstand zwischen Mikrofonen. In diesem Viereck wird, analog zu einem Hallraum, angenommen, dass dort

überwiegend ein diffuses Schallfeld herrscht. Die blauen Punkte in Abbildung 22 stellen hier die genutzten Positionen dar. Drei Positionen liegen bei ca. 200 mm Abstand zu den Außenkanten, um die Ergebnisse des Vierecks mit den abweichenden drei Positionen zu vergleichen. Aus Zeitgründen wurde von einer Auswertung dieser Positionen jedoch abgesehen. In Z-Ebene verlaufen drei Ebenen übereinander. Die Messpunkte in z-Richtung sind jeweils 500 mm von der Bodenfläche bzw. voneinander entfernt.

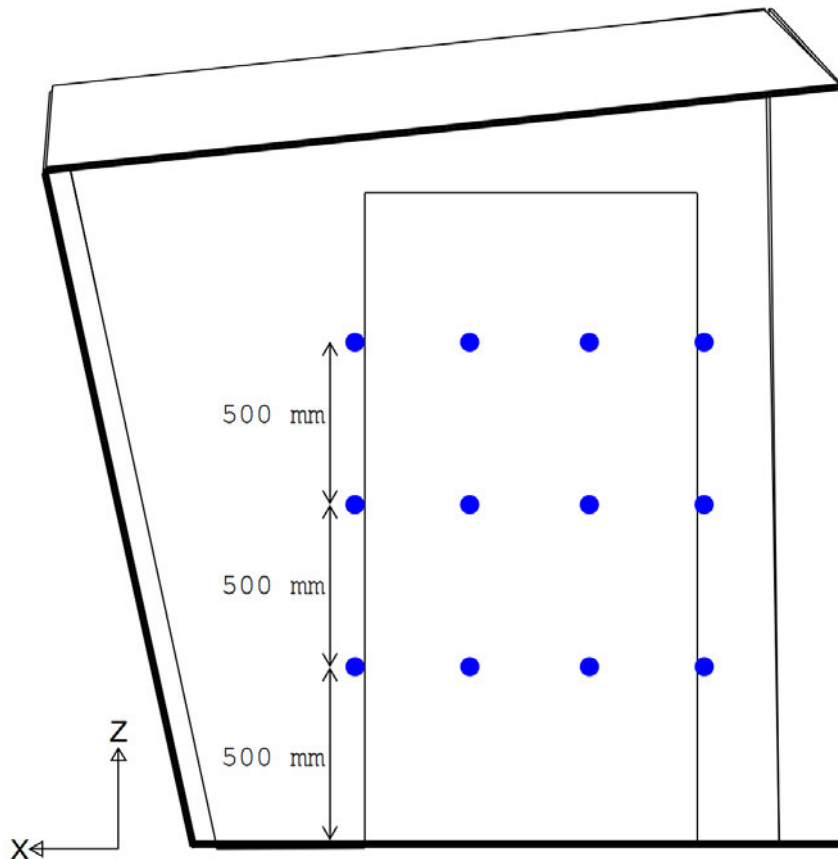


Abbildung 23 - Schnittansicht des Hallraums, blau Mikrofonpositionen in Z-Ebene

Zur Nummerierung der Mikrofonpositionen wurde ein XYZ-Raster erstellt. In Abbildung 24 ist die Beschriftung für die XY-Ebene dargestellt. In Z-Richtung verläuft die Nummerierung von 0 bis 2, wobei 0 die unterste und 2 die oberste Ebene ist. Insgesamt sind somit 48 Mikrofonpositionen definiert.

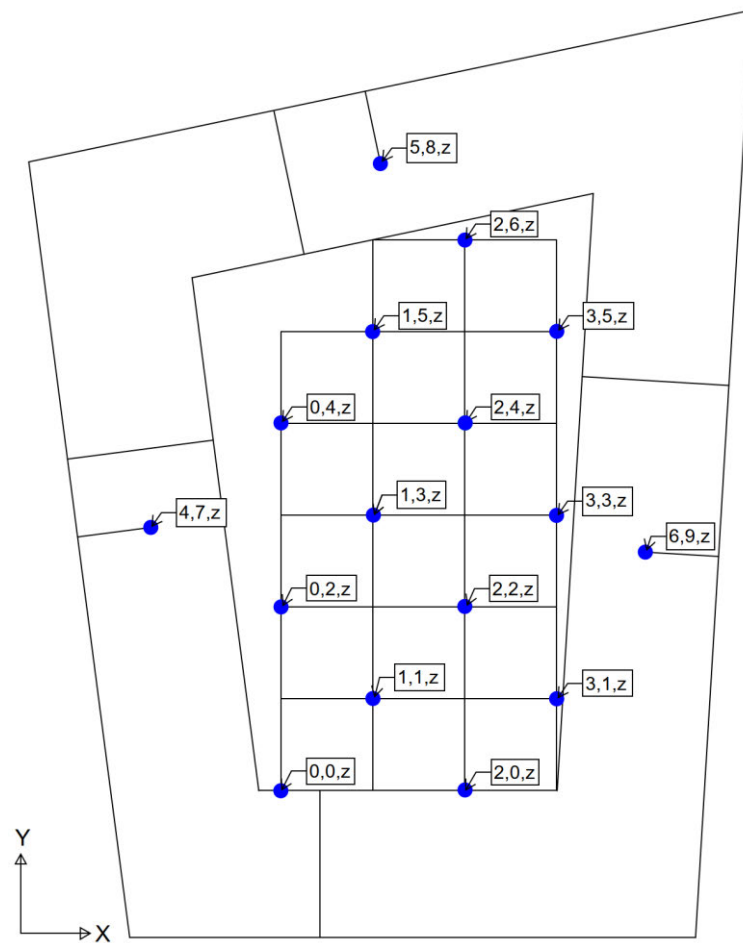


Abbildung 24 - Zuordnung der Mikrofonpositionen des XY-Mikrofonrasters

In der Hallkabine sind zwei Lautsprecher fest installiert. Ein Lautsprecher befindet sich an der Rückseite und ein Lautsprecher an der Frontseite der Hallkabine. Der Lautsprecher an der Frontseite der Hallkabine wird fortlaufend als „L1“, der Lautsprecher an der Rückseite der Hallkabine als „L2“ bezeichnet. Wenn beide Lautsprecher gleichzeitig ein Signal ausgeben, wird diese Situation als „L3“ bezeichnet. L1 ist in rund $h \approx 850$ mm Höhe angebracht, L2 in rund $h \approx 1900$ mm Höhe.



Abbildung 25 - Ansicht Lautsprecherposition L1

L2 weicht von dieser Anforderung ab und strahlt direkt in den Raum ab, wie in Abbildung 26 zu sehen.

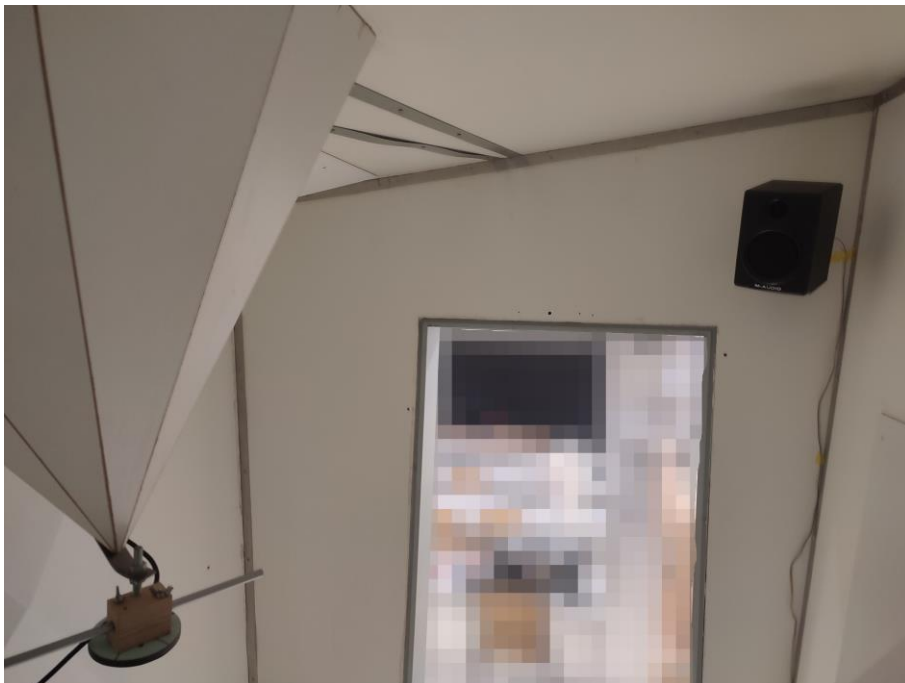


Abbildung 26 - Ansicht Lautsprecherposition L2

Aus Mikrofon-, Lautsprecher- und Prüfobjektkombinationen ergibt sich folgendes Baum-Diagramm, welches die verschiedenen Parameter für jede Situation beschreibt:

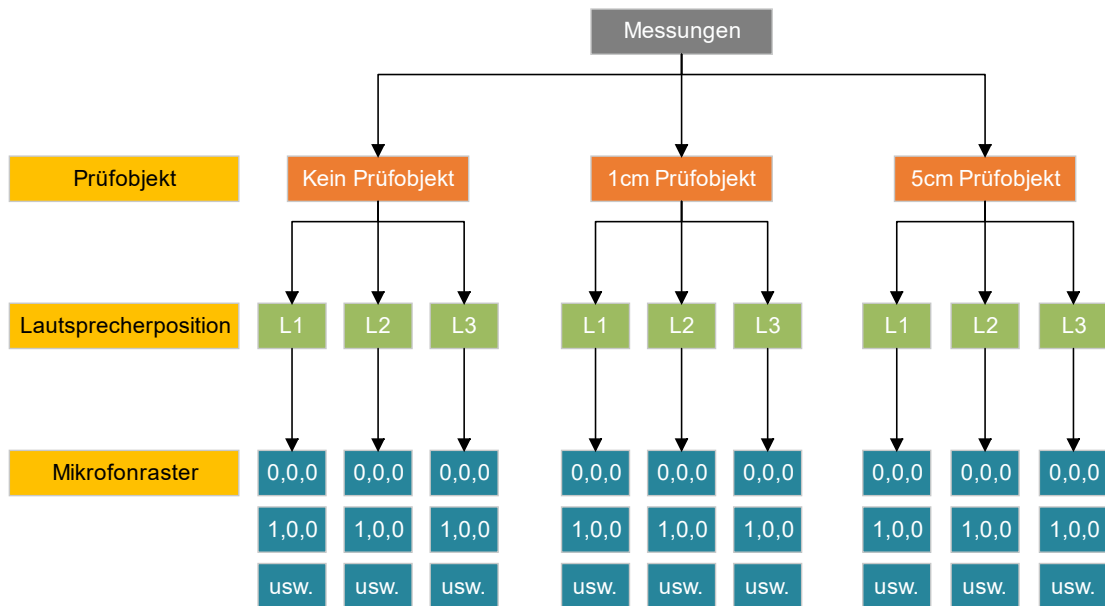


Abbildung 27 - Baumdiagramm und Ordnerstruktur der gewonnenen Messergebnisse

Um die Messergebnisse effizient mit MATLAB auszuwerten, wurde ein Kodierungssystem zur Speicherung der Messdaten erstellt. Das System hat dabei folgenden Aufbau:

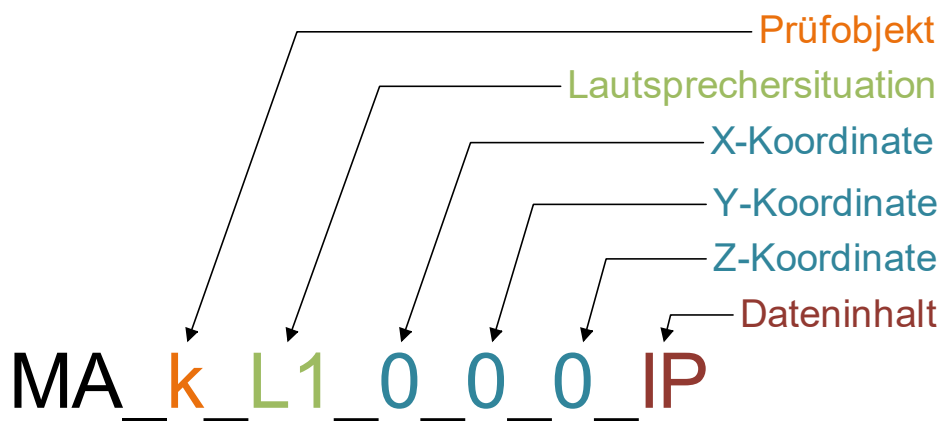


Abbildung 28 - Kodierung der zu speichernden Messdaten

Die Parameter können folgende Werte aus Tabelle 13 annehmen:

Tabelle 13 - Definition der Parameter zu Abbildung 28

| Kodierung | Beschreibung der Kodierung |
|------------------------------|---|
| Prüfobjekt | |
| k | Kein Prüfobjekt |
| e | 1 cm Prüfobjekt |
| f | 5 cm Prüfobjekt |
| Lautsprechersituation | |
| L1 | Ansteuerung Lautsprechersituation L1 (Rückwand) |
| L2 | Ansteuerung Lautsprechersituation L2 (vordere Wand) |
| L3 | Ansteuerung Lautsprechersituation L3 (beide Lautsprecher) |
| Koordinaten | |
| X | 0 ... 6 |
| Y | 0 ... 9 |
| Z | 0 ... 2 |
| Datenformat | |
| IP | Impulsantwort |
| D | Rohdaten Abklingzeitverlauf |
| T | Schargemittelter Nachhallzeitverlauf durch Sinus Samurai |
| SPL | Schalldruckpegelverlauf |

3.1.4 Verwendete Messausrüstung

Als Lautsprechertypen wurden die Studio-Lautsprecher „Studiophile AV 40“ der Firma M-Audio verwendet. Bei den Lautsprechern handelt es sich um zwei gerichtete Lautsprecher mit einem 4“ Tief- und Mitteltöner, einem 1“ Hochtöner und einer Bass-Reflex-Öffnung (M-Audio, 2023). Laut ASTM C423 sollen die Lautsprecher in die triedrischen Raumecken zeigen (E33 Committee, 2022). L1 zeigt nicht direkt in die Raumecke, ist aber auf eine Raumumfassungsfläche gerichtet, siehe Abbildung 25. L2 zeigt direkt in die Hallkabine hinein.

Als Messmikrofone wurden zwei ¼-Zoll Elektret-Mikrofone mit BNC-Anschluss von Microtech Gefell mit der Bezeichnung „MG 365“ verwendet, welche mit Mikrofonständern in der Hallkabine aufgestellt wurden. Die Mikrofone sind nach DIN EN 60651 bzw. IEC 61672 der Klasse 1 zuzuordnen (Datenblatt in Anhang A.6).

Zur Messung der Raumimpulsantworten wurde ein digitales Audiointerface der Firma RME namens „Babyface Pro FS“ als Ein- und Ausgang genutzt. Das Audiointerface ist über ein Micro-USB-Kabel mit einem Laptop, auf dem die Software „Room EQ Wizard“ genutzt wird, verbunden worden. Die Mikrofone wurden über die zwei XLR-Eingänge gesteuert. Die Ansteuerung der Lautsprecher fand über den Chinch-Ausgang des Audio-Interfaces statt. Als Signal wurde ein Sinus-Sweep verwendet (siehe Abbildung 30). Ein detailliertes Mess-Schema dazu ist in Abbildung 29 zu finden.

Zur Messung von Schalldruckpegel, Nachhallzeit und Abklingzeitverläufen wurde das, von der Hochschule zur Verfügung gestellte, System von Sinus Messtechnik „Sinus Soundbook MK 2“ verwendet. Als Signalgenerator stand der NTi Minirator MR-PRO zur Verfügung. Als Signal wurde ein rosa Rauschen verwendet. Ein detailliertes Mess-Schema dazu ist in Abbildung 31 zu finden.

Das verwendete Modell des Kalibrators lautet Cirrus CR:513A und ist ein Kalibrator der Klasse 1L nach IEC942-1988.

3.2 Ablauf und Methoden der Messungen

Um die unter Kapitel 2.4 ausgewählten Parameter zu untersuchen, ist es notwendig, die Impulsantwort des Hallraumes, einen Schalldruckpegelverlauf sowie die Nachhallzeit messtechnisch zu bestimmen. Die Schemen in Abbildung 29 und Abbildung 31 zeigen dazu die gewählten Messaufbauten.

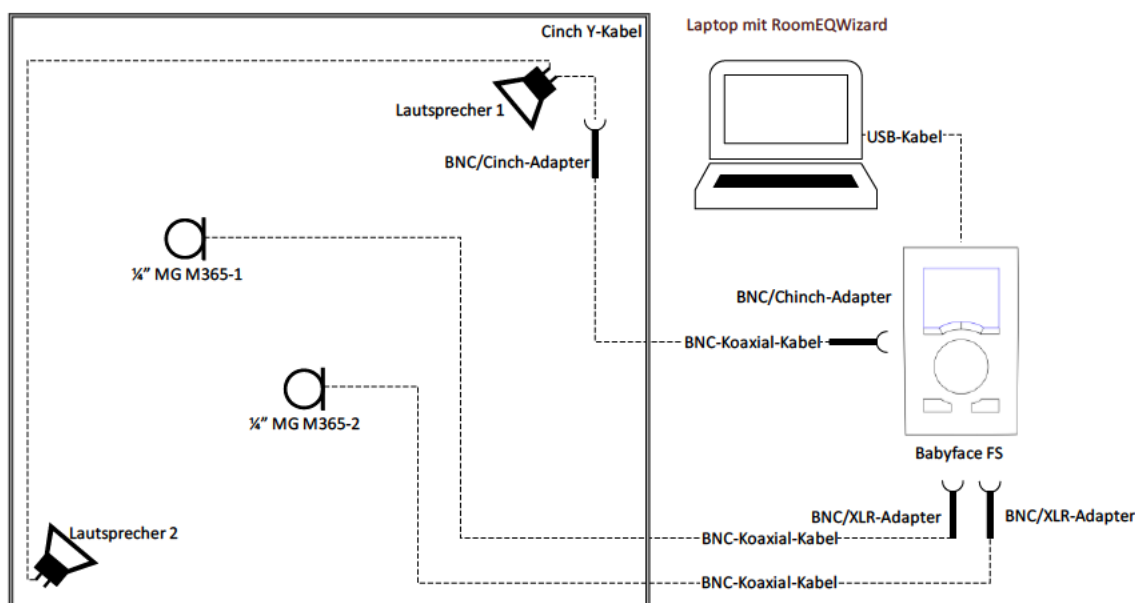


Abbildung 29 - Messschema Impulsantwort mit Audiointerface Babyface Pro FS und Room EQ Wizard

Impulsantwort

Zur Messung der Impulsantwort wurde das hochschuleigene Audio-Interface Baby-face Pro FS in Verbindung mit der freien Software Room EQ Wizard genutzt. Vor jeder Messung fand eine Kalibrierung der Mikrofone in der Software statt.

Als Messsignal wurde ein Gleitsinus, auch Sweep genannt, verwendet. Der Sweep ist nach Ahnert und Feistel „[...] ein fortlaufendes Sinussignal $s(t)$, dessen Frequenz sich mit der Zeit [...]“ verändert (Ahnert & Feistel, 2010).

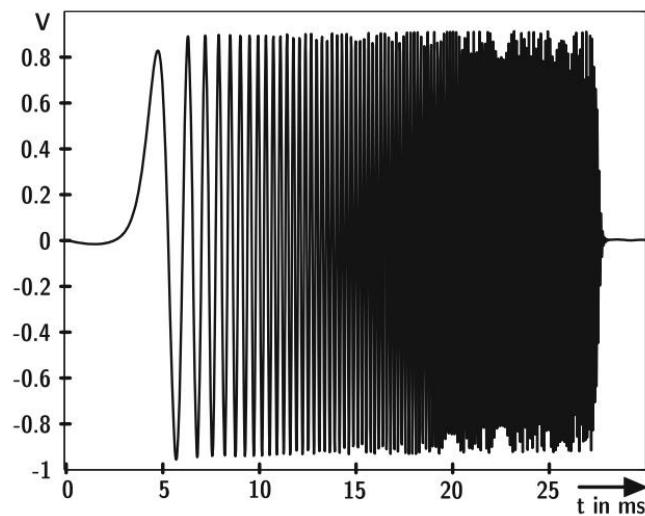


Abbildung 30 – zeitlicher Verlauf des Sinus Sweep Signals, Quelle (Ahnert & Feistel, 2010)

Speziell wurde ein logarithmischer Sweep verwendet. Der logarithmische Sweep hat ein rosa Spektrum, was bedeutet, dass die Amplitude pro Oktave um 3 dB sinkt (S. Müller & Massarani, 2001). Die Frequenz des Sweeps steigt um einen festen Anteil pro Oktave je Zeiteinheit an (ebd.).

$$\frac{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}{T_2 - T_1} = \text{konstant} \quad (62)$$

Im Prinzip geht das bekannte Eingangssignal in ein lineares, zeitinvariantes (LTI)-System ein, aus diesem dann das Ausgangssignal aufgenommen wird.

Das Ausgangssignal $a(t)$ ist das Faltungsprodukt aus der Übertragungsfunktion des Raumes $h(t)$ und dem Eingangssignal $e(t)$ (Ahnert & Feistel, 2010).

$$a(t) = h(t) \otimes e(t) \quad (63)$$

Mittels einer Fourier-Analyse ist es möglich, das Zeitsignal in seine einzelnen, spektralen Komponenten aufzuteilen und den Anteil jeder Frequenz zu ermitteln, welches durch folgende Gleichung

$$\tilde{A}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j\omega t} dt \quad (64)$$

möglich ist (Ahnert & Feistel, 2010).

Übertragen auf den Frequenzbereich lässt sich die Formel direkt nach der Übertragungsfunktion $H(\omega)$ auflösen (Ahnert & Feistel, 2010).

$$H(\omega) = \frac{E(\omega)}{A(\omega)} \quad (65)$$

$h(t)$ ist also die Raumimpulsantwort im zeitlichen Bereich mit dem dazugehörige Frequenzspektrum $H(\omega)$.

Für die Messpositionen, bestehend aus den verschiedenen Kombinationen aus ausgewähltem Prüfobjekt, Lautsprecher und Mikrofonposition, wurden schließlich die Impulsantworten bestimmt. Insgesamt wurden pro Messposition vier Sweeps zwischen 20 Hz und 20 kHz mit einer Abtastrate von 44100 Hz gemessen und zur Mittelung verwendet. Die Abtastrate gibt an, wie viele Messwerte pro Sekunde digital aufgezeichnet werden (Vorländer, 2004). Die Impulsantworten weisen alle eine Länge von 2,97 s auf, übertragen auf digitale Abtastwerte ergibt das eine Länge von 131072 einzelnen Abtastwerten.

Rosa Rauschen

Für die Messung der Nachhallzeit T und den Schalldruckpegelverlauf wurde ein zweites Messsystem verwendet, Sinus Samurai.

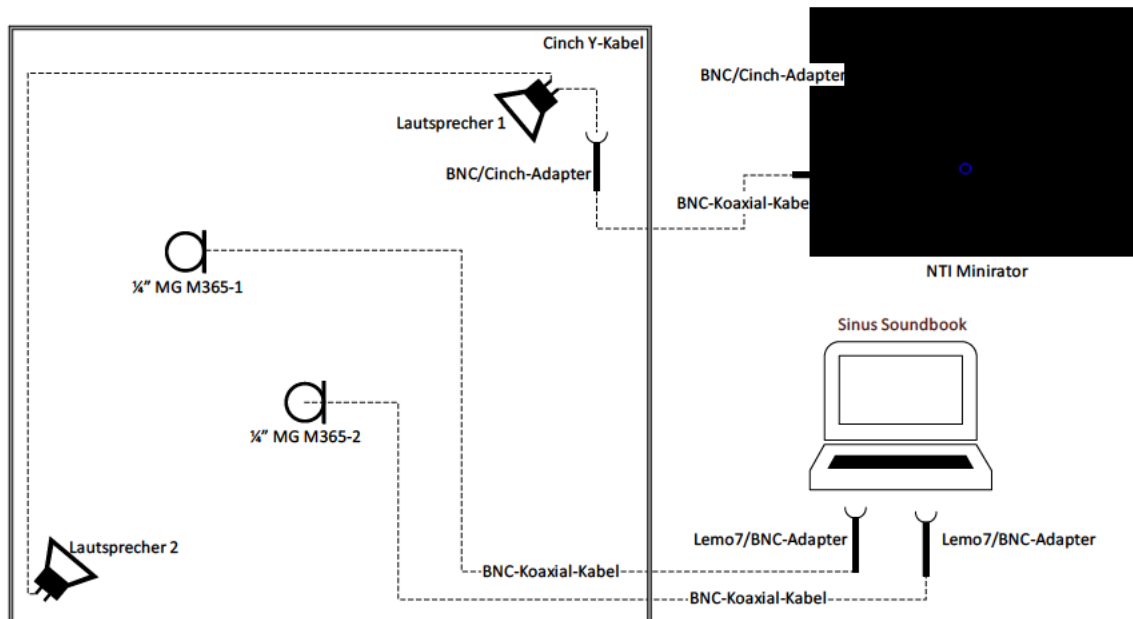


Abbildung 31 - Messschema Nachhallzeit und Schalldruckpegel mit Sinus Soundbook und Sinus Samurai

Als Signalquelle wurde der Signalgenerator NTI Minirator MR2 genutzt, welcher ein rosa Rauschen ausgegeben hat. Als rosa Rauschen kann ein stochastisches, nicht durch eine Funktion beschreibbares, Signal beschrieben werden, dessen Energiedichte pro steigende Oktave um 3 dB absinkt (Ahnert & Feistel, 2010).

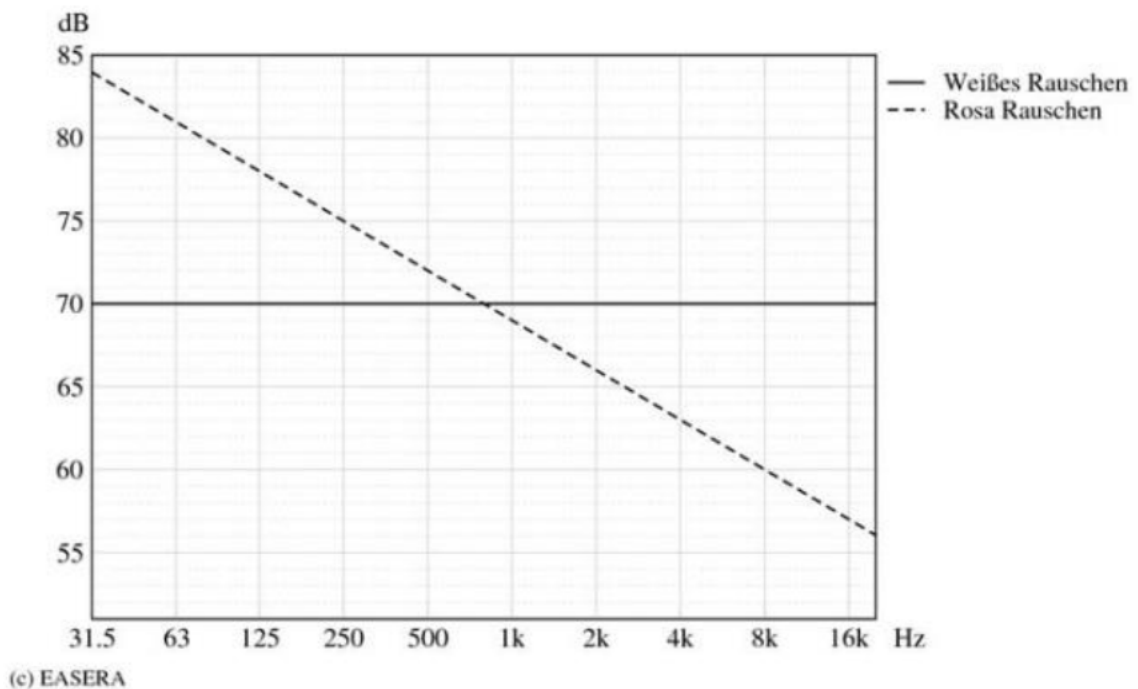


Abbildung 32 - Frequenzspektrum weißes und rosa Rauschen, Quelle (Ahnert & Feistel, 2010)

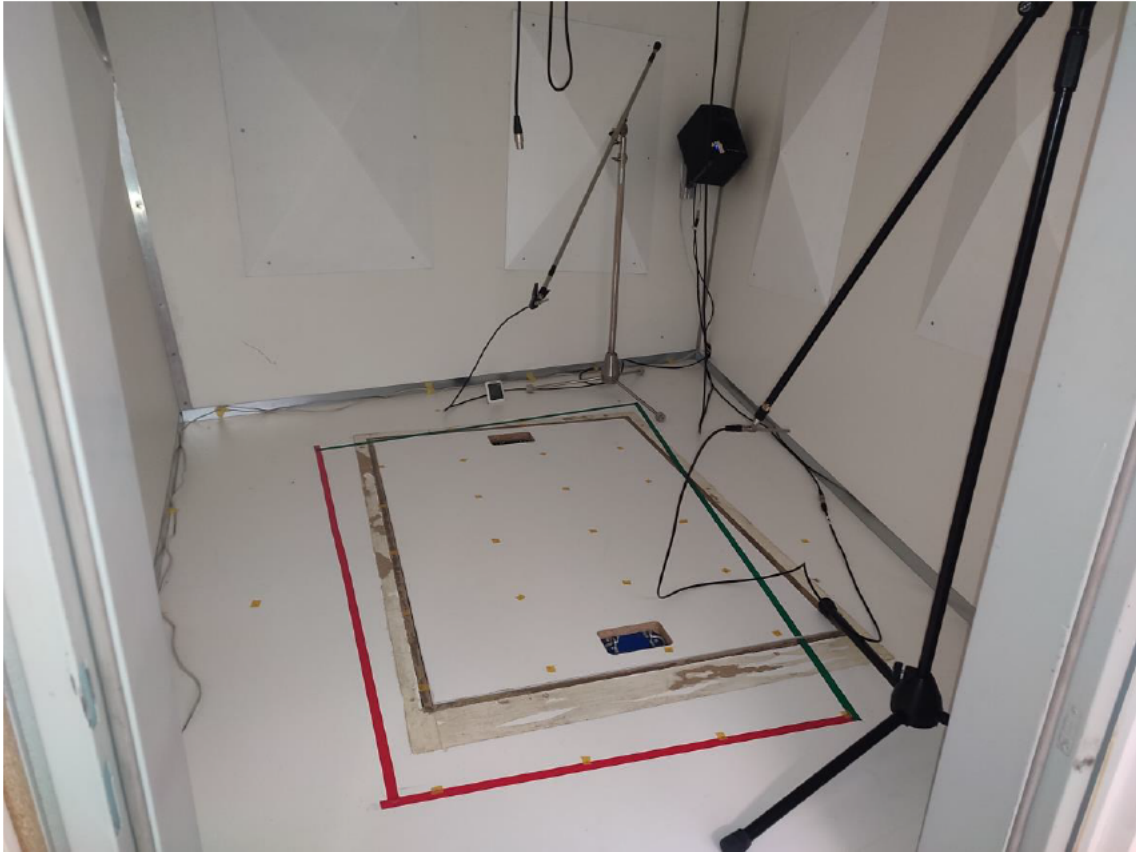


Abbildung 33 - Ansicht Messaufbau mit gelb markierten Mikrofonpositionen in der XY-Ebene

Im Programm Sinus Samurai kann man bestimmte Messsetups auswählen, unter anderem das Messsetup der Nachhallzeit T . Dabei sind die Parameter (Quelle Samurai Manual) definierbar.

Tabelle 14 - mögliche Parameter zur Definition der Nachhallzeitmessung in Sinus Samurai

| Parameter | Einstellung |
|------------------------|--|
| Signaltyp | Abgeschaltetes Rauschen oder Sweep |
| Oktavband | Oktav- oder Terzband |
| Bereich | zu untersuchender Frequenzbereich |
| Anzahl Positionen | Anzahl Mikrofonpositionen |
| Quellpositionen | Anzahl Lautsprecherpositionen |
| Mittelung pro Position | Anzahl der zu mittelnden Messungen je Messstelle |
| Ungefähre Länge | erwartete längste Nachhallzeit in allen Bändern |
| Mittelungsmodus | Methode zur Glättung |
| Triggerschwelle | bezogen auf 3,15 kHz, Start/Synchronisationspunkt der Messesequenz |

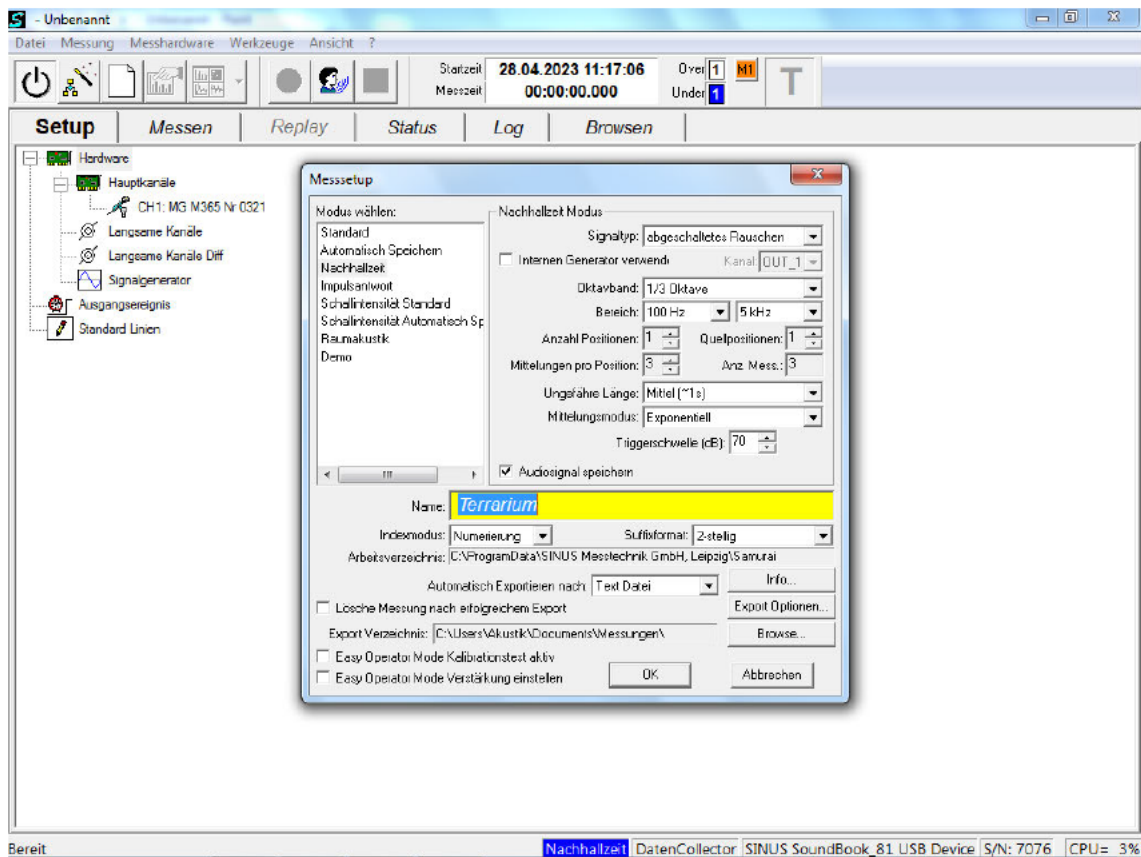


Abbildung 34 - Einstellungsfenster für Nachhallzeitmessungen mit Sinus Samurai

Folgende Einstellungen wurden für die Messungen verwendet:

Tabelle 15 - genutzte Messparameter zur Nachhallzeitmessung in Sinus Samurai

| Parameter | Einstellung |
|------------------------|-------------------------|
| Signaltyp | Abgeschaltetes Rauschen |
| Oktavband | Terzband |
| Bereich | 100 Hz bis 5000 Hz |
| Anzahl Positionen | 2 |
| Quellpositionen | 1 |
| Mittelung pro Position | 1 |
| Ungfähige Länge | Mittel (≈ 1 s) |
| Mittelungsmodus | Exponentiell |
| Triggerschwelle | 65 dB |

Anschließend wurden die Messungen gestartet und durchgeführt. Ein typischer Verlauf einer Messung ist in Abbildung 35 zu finden.

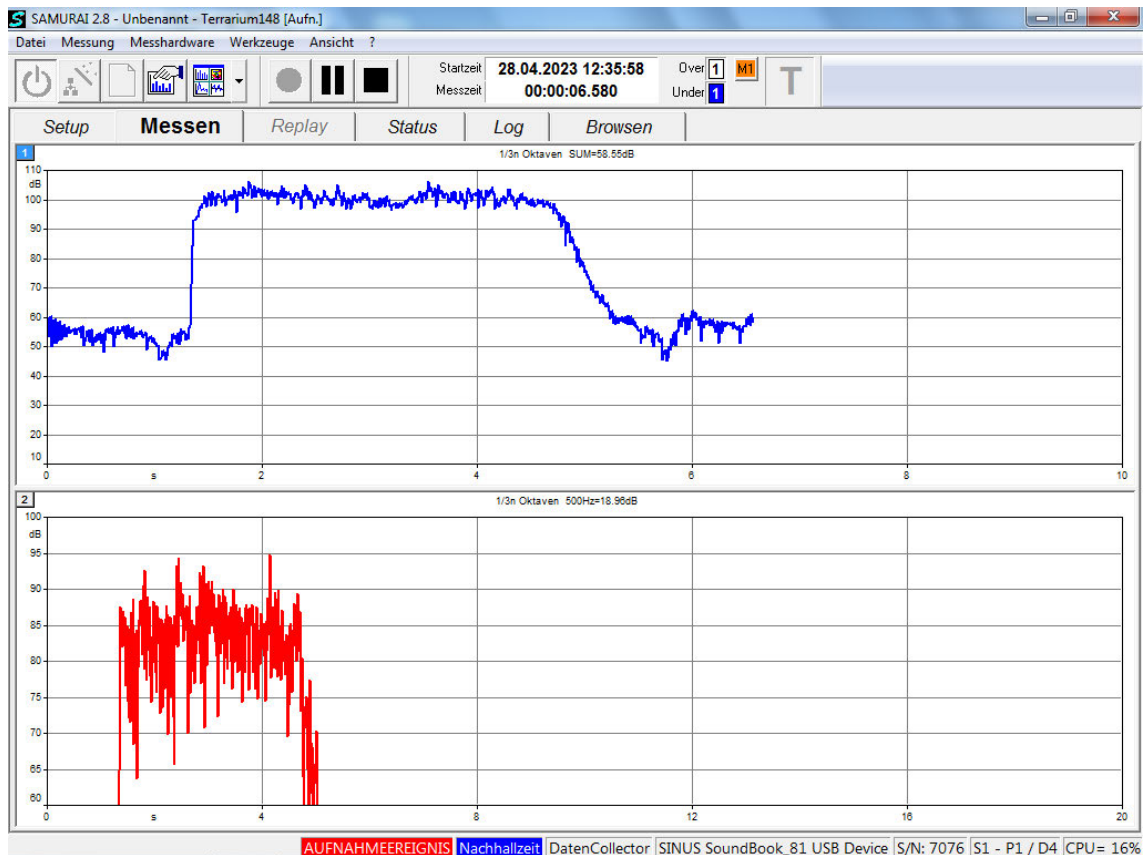


Abbildung 35 - Verlauf einer Nachhallzeitmessung einer Position in Samurai

Das Rauschsignal wurde manuell mit dem Minirator gestartet und gestoppt. Nach einem gemessenen Verlauf hat das Programm Samurai automatisch eine neue Messung gestartet, das Rauschsignal wurde gestartet und gestoppt. Dieser Ablauf wiederholte sich von selbst. Die Ergebnisse der Messung wurden sowohl als jeweils einzelne Abklingverläufe in einer XML-Datei als auch als zusammenhängende Messung in einer Excel-Datei gespeichert. Das Programm Samurai hat außerdem eine Ensemble-Mittelung der einzelnen Abklingverläufe pro Position durchgeführt, welche zur weiteren Auswertung genutzt wurden (Ensemble-Mittelung, siehe Abbildung 7).

Die Aufzeichnung der Schalldruckpegelverläufe in der Hallkabine fand mit Sinus Samurai mit einem zweiten Setup statt. Im Prinzip wurden Schalldruckpegelverläufe über eine Dauer von zehn Sekunden in den Terzbändern von 20 Hz bis 20000 kHz aufgezeichnet. Vor jeder Messung wurde das Rauschsignal mit dem Minirator gestartet, die Messung mit Samurai durchgeführt und danach wieder gestoppt. Anschließend wurden die Messdaten in einer Excel-Datei gespeichert. Die Aufzeichnung der Schalldruckpegelverläufe fand mithilfe der Frequenzbewertung A statt, was bedeutet, dass die Schalldruckpegelverläufe die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Gehörs angepasst wurden (Schulz, 2023). Aus den so gewonnenen Messdaten kann nun eine Auswertung der gewählten Kriterien unter Verwendung des Programms MATLAB stattfinden.

4 Umsetzung in MATLAB und anschließende Ergebnisdiskussion

Im folgenden Kapitel werden nun die Ergebnisse, die durch die Messungen erhoben wurden, analysiert, durch erarbeitete MATLAB-Programme ausgewertet und in Bezug auf die Bewertung der Diffusität eines Schallfeldes eingeordnet. Weiter wird im Kapitel eine Fehlerbetrachtung durchgeführt. Dafür ist es sinnvoll, oberhalb der Schröderfrequenz die Ergebnisse zu analysieren. Die Schröderfrequenz ändert sich jeweils mit den in den Prüfraum eingebrachten Absorbern, da diese die Nachhallzeit T beeinflussen. Die Nachhallzeit wurde aus dem Verfahren der Raumimpulsantwort mit den Gleichungen zur Nachhallzeitbestimmung aus Kapitel 2.7 berechnet. Die Schröderfrequenzen nehmen folgende Werte an:

Tabelle 16 - Schrödergrenzfrequenzen und Hallradien der drei Belegungszustände

| Prüfobjekt | Mittlere Nachhallzeit T (von 100 Hz bis 5000 Hz) | Schröderfrequenz f_{gr} nach (10) mit $V = 9,1405 \text{ m}^3$ | Hallradius nach (21) mit A_{eq} nach (17) |
|-----------------|--|--|---|
| Kein Prüfobjekt | 0,82 s | 599,45 Hz \approx 600 Hz | 0,190 m |
| 1 cm Prüfobjekt | 0,69 s | 549,38 Hz \approx 550 Hz | 0,207 m |
| 5 cm Prüfobjekt | 0,55 s | 491,41 Hz \approx 490 Hz | 0,232 m |

Die Ergebnisse wurden dennoch in den Terzbändern der ASTM C423 und ASTM E90 von 100 Hz bis 5000 Hz ermittelt und ausgegeben. In den folgenden Diagrammen ist die Schröderfrequenz bei \approx 500 Hz durch eine vertikale, schwarze Gerade eingetragen. Zu erwarten ist dabei, dass oberhalb der Grenzfrequenzen sich ein diffuses Schallfeld einstellt und die Ergebnisse homogen verlaufen und unterhalb der Grenzfrequenz die Ergebnisse aufgrund von Moden schwanken, die Grenzwerte sogar überschreitet. Zu jedem Kriterium wurden Ergebnisse und Graphen der verschiedenen Prüfobjekt – Lautsprecherkombinationen ermittelt und miteinander verglichen.

Welche Messungen aus der Mittelung ausgeschlossen wurden, wird später in 4.4 Fehlerbetrachtungen dargelegt.

4.1 Relative Standardabweichung s_{rel}

Das erste Kriterium ist die relative Standardabweichung s_{rel} der Decay Rate d . Die Berechnung wurde nach dem Vorgehen in 2.5 in MATLAB umgesetzt. Das Programm setzt sich aus einem Hauptprogramm und einem Unterprogramm zusammen. Im Hauptprogramm „main_decayrate.m“ werden grundlegende Parameter wie die Lautsprecher – Prüfobjektkombination festgelegt und Laufvariablen definiert. Diese Parameter fließen dann in die Unterprogramme ein. Die Berechnung erfolgt in for-Schleifen für die jeweilige Lautsprecher – Prüfobjektkombination. Nach dieser Berechnung werden die Ergebnisse geplottet.

Das Unterprogramm „decay_rate_final_v2.m“ berechnet die Decay Rate d . Zu Beginn des Programms werden Variablen definiert, die Samplingzeit $dt = \frac{1}{160}$ s, der Analysebereich $Ab = 25$ dB, das Volumen der Hallkabinen $V = 9,1405$ m³, die betrachteten Terzbänder von 100 Hz bis 5000 Hz, die X-, Y- und Z-Koordinaten, Laufvariablen n und m sowie der Anfangswert der Luftabsorption $d_{\text{air}} = 0$. Über eine Switch-Funktion wird der jeweils gebrauchte Ordner gemäß Struktur in Abbildung 27 über den Befehl `cd()` bei jedem Durchlauf angesteuert. Anschließend startet die Ermittlung der Decay Rate an der Position XYZ. Mittels for-Schleifen erfolgt der nächste Durchlauf für alle verfügbaren Mikrofonpositionen. Zuerst erstellt das Programm die Namenskodierung aus den eingegebenen Parametern. Anschließend prüft das Programm, ob die Datei im jeweiligen Ordner verfügbar ist. Ist dies der Fall, fährt das Programm fort (if-Prüfung). Als nächsten Schritt liest das Programm die XML-Datei (Aufbau siehe Abbildung 36) mit dem vorher kodierten Namen ein. Pro Position wurden zehn Messungen des Abklingverlaufs durchgeführt.

```

-<pos1>
<meascount>10</meascount>
-<meas1>
  Messung 1
  <sourcename>Messung 1</sourcename>
  <deltatime>0.00625</deltatime>
  <disabled>0</disabled>
  -<bin1>
    +<rted></rted>
    +<rt15></rt15>
    +<rt20></rt20>
    +<rt30></rt30>
    +<rtManual></rtManual>
    <manualedit>0</manualedit>
    <noisefloor>26.3035</noisefloor>
    <stopslopeindex>297</stopslopeindex>
    -<decay>
      80.9578,80.4864,80.5452,80.793,81.1871,82.1481,82.7967,
    </decay>
  </bin1>
  +<bin2></bin2>
  +<bin3></bin3>
  +<bin4></bin4>
  +<bin5></bin5>
  +<bin6></bin6>
  +<bin7></bin7>
  +<bin8></bin8>
  +<bin9></bin9>
  +<bin10></bin10>
  +<bin11></bin11>
  +<bin12></bin12>
  +<bin13></bin13>
  +<bin14></bin14>
  +<bin15></bin15>
  +<bin16></bin16>
  +<bin17></bin17>
  +<bin18></bin18>
  </meas1>
-<meas2>

```

Abbildung 36 - schematischer Aufbau einer XML-Datei zur Auswertung von T

Diese zehn Messungen sind in dieser XML-Datei als einzelne Verläufe unter den Reitern „meas1“ bis „meas10“ geordnet. In den einzelnen Messungen befinden sich verschiedene „bins“ oder Behälter. Insgesamt gibt es 18 verschiedene Behälter, wobei diese die Terzfrequenzen von 100 Hz bis 5000 Hz beschreiben. In den Behältern befinden sich Angaben zu den Parametern Name, der Variable dt , verschiedene Angaben zu den von Samurai berechneten Nachhallzeiten rt . Außerdem sind dort ermittelte Hintergrundpegel in „noisefloor“, den für diese Auswertung genutzten Decay-Verlauf und weitere Parameter zur Auswertung zu finden. Aus diesen zehn Messungen wurde von Samurai eine Ensemble-Mittelung durchgeführt, dessen Ergebnisse in „posslopeavg“ als quasi elfte Messung gespeichert sind. In der Mittelung befinden sich ebenfalls die 18 Behälter mit den genannten Parametern. Der Abklingverlauf aus „posslopeavg“ jedes Behälters jeder Frequenz wurde aus den eingelesenen Daten in eine separate Variable „d_all“ gespeichert und danach in eine verwertbare Datenform, ein Array, umgewandelt. Das Array ist so mit seinen Daten noch nicht auswertbar. Es musste ein Bereich ausgewählt werden, der den Anforderungen der ASTM C423 entsprach (vgl. Abbildung 6). Um den Startwert zu finden, wurden aus den ersten 50 Werten der Mittelwert gebildet und geprüft, ab welchem Punkt das Signal um 5 dB abgefallen ist. Mittels der MATLAB-Funktion `find()` wurde Start- und Endpunkt des zu analysierenden Bereichs gefunden.

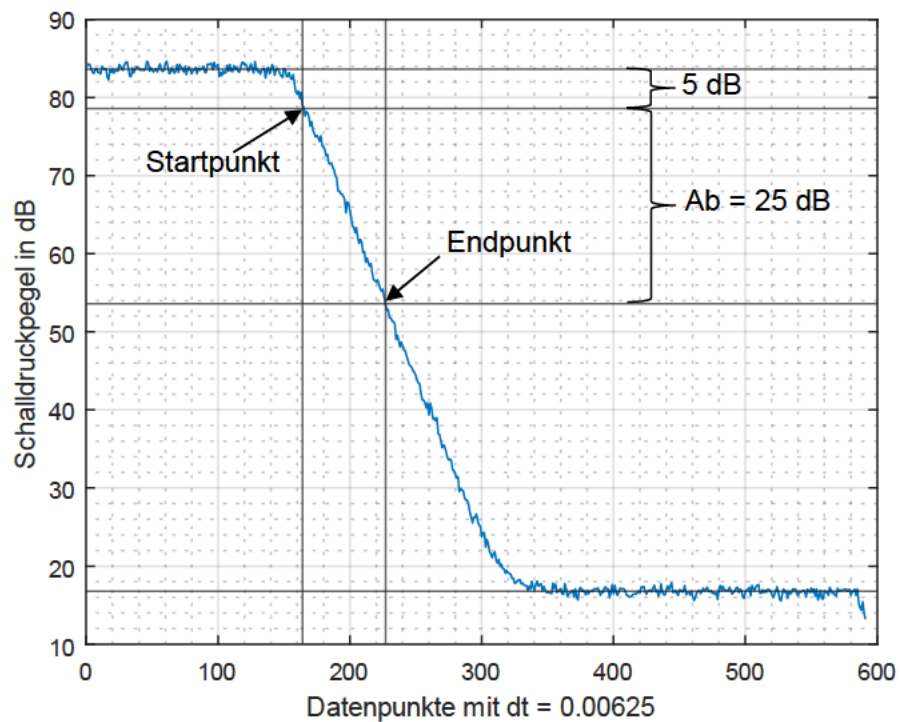
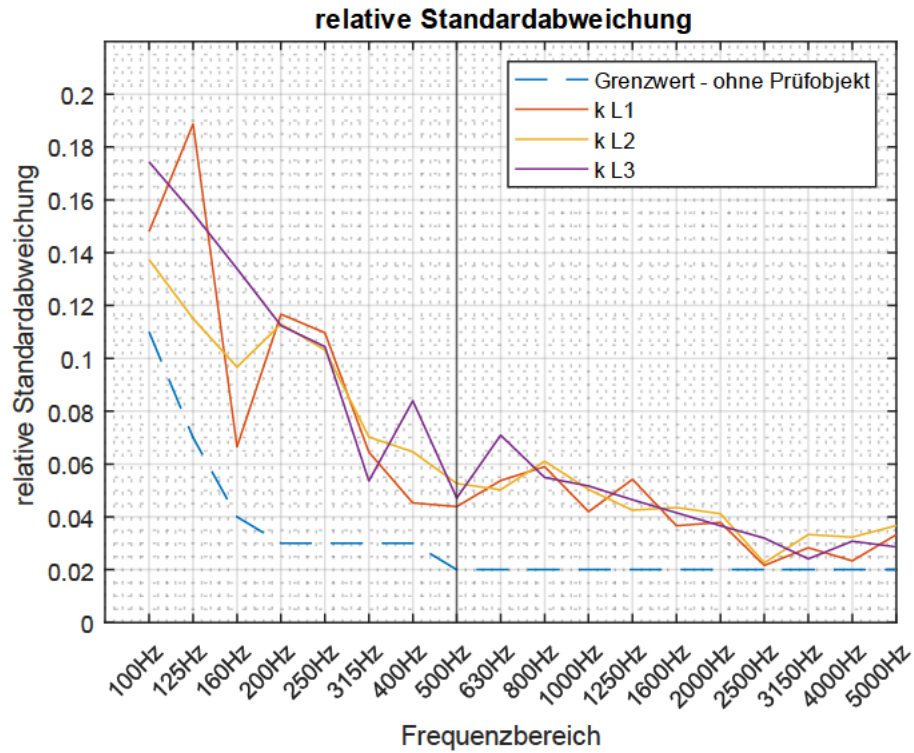
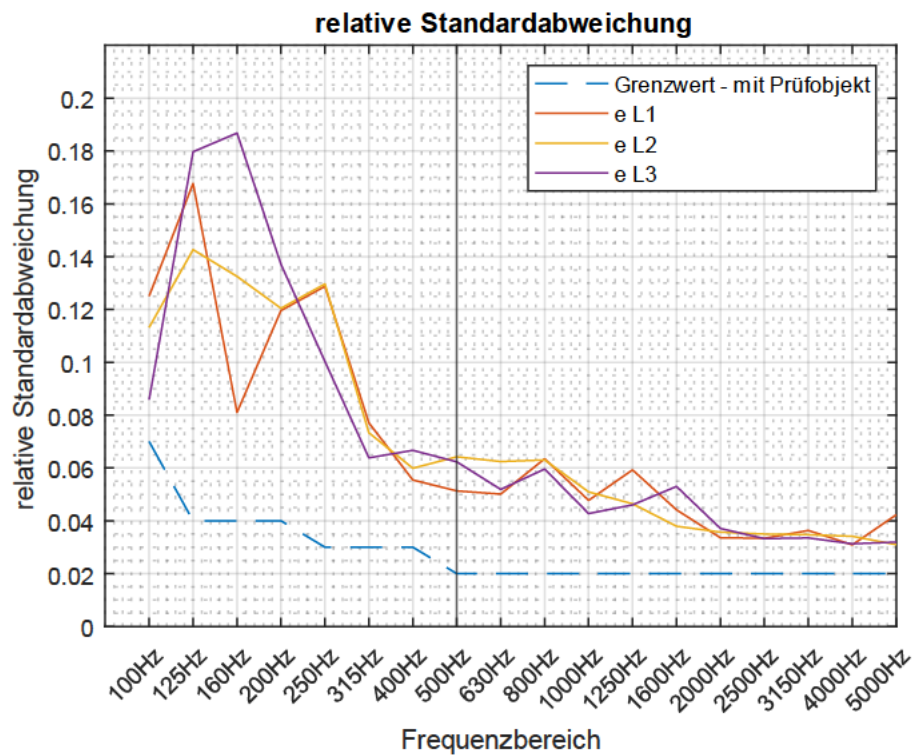


Abbildung 37 - Ermittlung Start- und Endpunkt Analysebereich der Decay Rate

Mit Start- und Endpunkt wurde der Analysebereich aus dem Array in eine neue Variable „decay“ geschrieben. Mithilfe der Anzahl an Abtastwerten berechnet sich die Variable M . Nun ist es möglich, die Decay Rate d' gemäß Gleichung (24) zu berechnen. Abschließend erfolgt eine Luftkorrektur im Unter-Unterprogramm „athmos_abs_v1.m“ nach ISO 9613-1 statt. Die Korrektur zur Luftabsorption findet entgegen der Beschreibung in 2.5 für alle Terzbänder von 100 Hz bis 5000 Hz statt anstelle nur oberhalb von 1000 Hz. Final berechnet das Unterprogramm die relative Standardabweichung $\frac{s_M}{(d_M)}$ bzw. $\frac{s_S}{(d_S)}$ und gibt diese an das Hauptprogramm zurück. Im Hauptprogramm werden diese pro Mikrofonposition gespeichert und nach allen Berechnungsdurchläufen geplottet. Nachfolgend sind die geplotteten Diagramme dargestellt.

Abbildung 38 - Ergebnisse s_{rel} für Prüfanordnung "k" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3Abbildung 39 - Ergebnisse s_{rel} für Prüfanordnung "e" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3

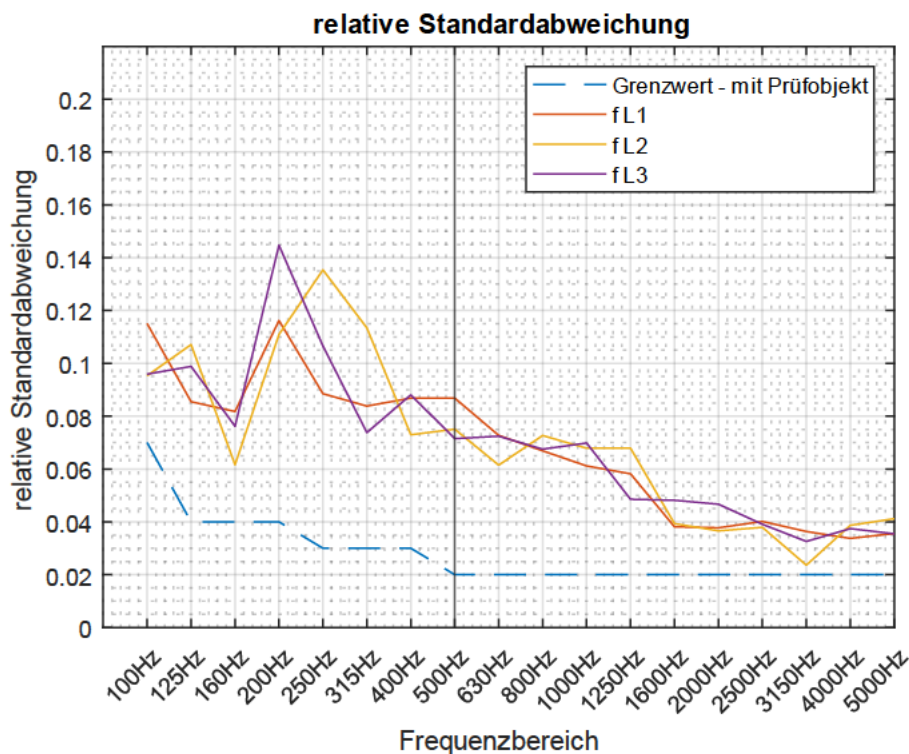


Abbildung 40 - Ergebnisse s_{rel} für Prüfanordnung "f" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3

Abbildung 38 bis Abbildung 40 zeigen den Einfluss der verschiedenen Lautsprecheranordnungen auf das Mess- und Berechnungsergebnis. Alle Berechnungsergebnisse liegen in jedem Terzband oberhalb der Grenzwerte, sowohl für die Hallkabine in leerem Zustand als auch im belegten Zustand. Oberhalb der Schröderfrequenz von ≈ 500 Hz sind keine signifikanten, nennenswerten Abweichungen der Ergebnisse zu erkennen. Daraus ist zu schließen, dass die Lautsprecheranordnung keinen Einfluss auf das Messergebnis und damit die Homogenität und Diffusität der Hallkabine aufzeigt.

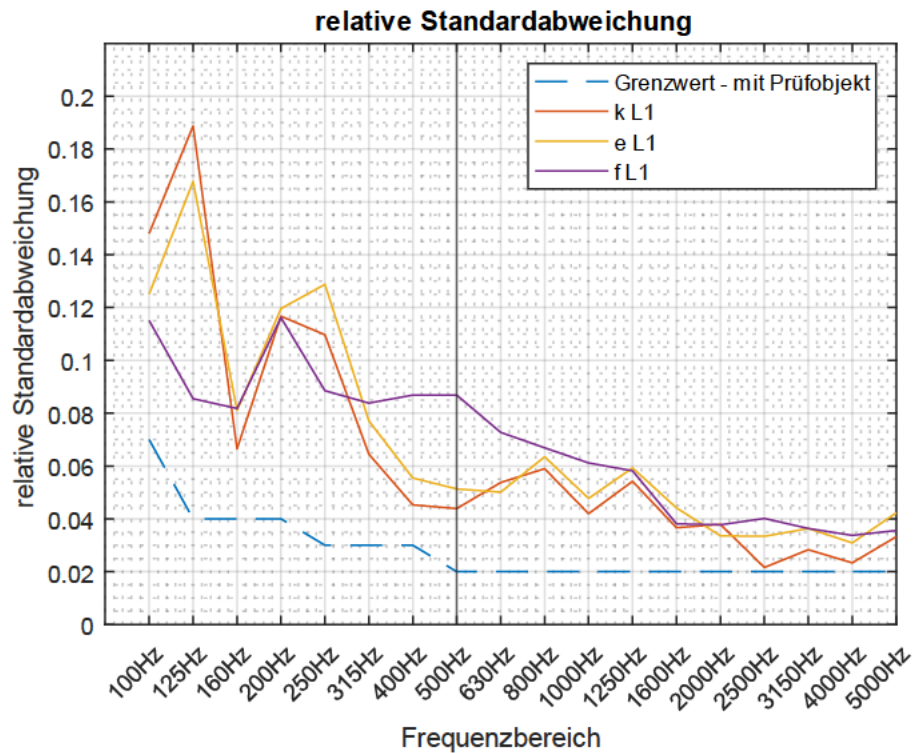


Abbildung 41 - Ergebnisse s_{rel} für die Lautsprecheranordnung L1 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f"

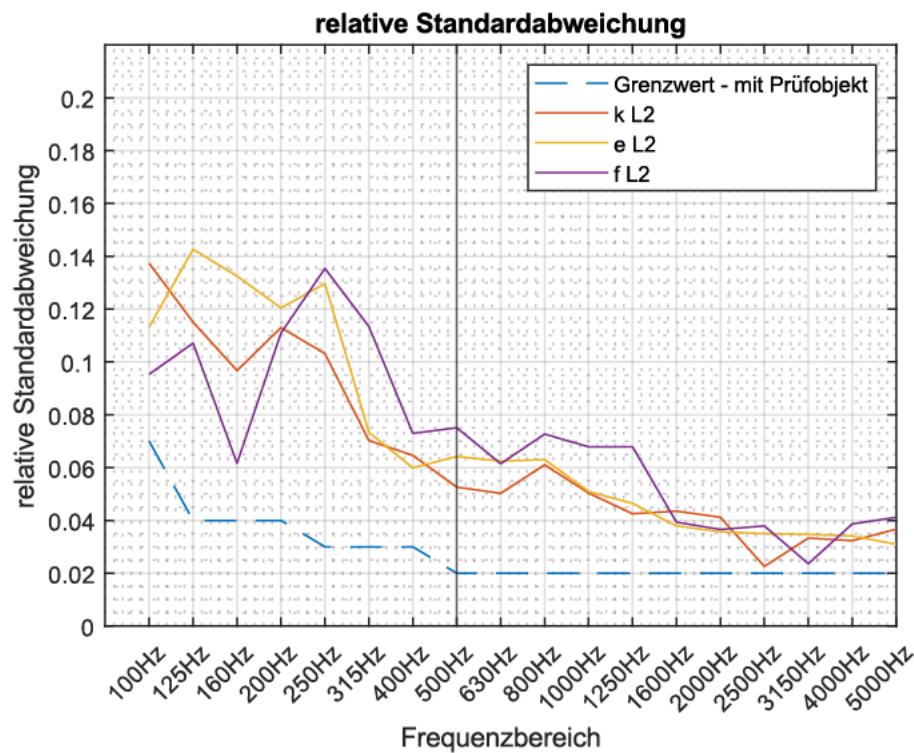


Abbildung 42 - Ergebnisse s_{rel} für die Lautsprecheranordnung L2 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f"

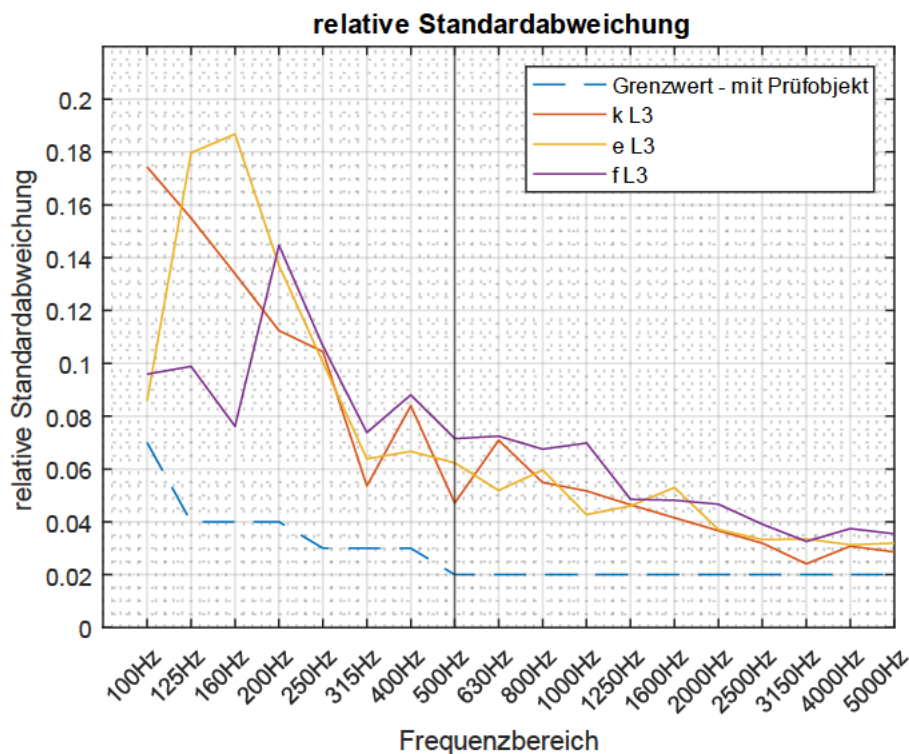


Abbildung 43 - Ergebnisse s_{rel} für die Lautsprecheranordnung L3 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f"

Abbildung 41 bis Abbildung 43 zeigen den Einfluss des Prüfobjekts bei fest definierter Lautsprecherposition. In Abbildung 41 liegt zwischen 500 Hz und 1250 Hz der Berechnungswert der Prüfobjektanordnung „f“ oberhalb der beiden anderen Prüfobjektanordnungen. Über 1250 Hz gleicht sich die relative Standardabweichung jedoch wieder an den Verlauf der beiden anderen Graphen an. In allen drei Abbildungen ist der Verlauf des Graphen von Anordnung „k“ bis auf einzelne Ausnahmen in den Frequenzbändern oberhalb der Schröderfrequenz am niedrigsten. Der Graph der Anordnung „f“ verläuft mit einigen Ausnahmen, mit einigen Ausnahmen (Bsp. Abbildung 42, 3150 Hz) im Gegensatz zu den anderen in einem höheren Bereich. In Abbildung 41 und Abbildung 43 ist bei Anordnung „e“ erkennbar, dass ab rund 1600 Hz der Graph oberhalb der Anordnung „k“ liegt, unterhalb bis zur Grenzfrequenz verlaufen sie ähnlich. In Abbildung 42 ist dieser Trend nicht so deutlich erkennbar.

Einordnung:

Es ist festzuhalten, dass die Grenzwerte der ASTM C423 in allen Situationen und Anordnungen nicht erfüllt wurden. In den Frequenzbändern > 2500 Hz ist die Abweichung zum Grenzwert maximal 2%, steigt jedoch mit sinkenden Frequenzen an. Dies qualifiziert den Raum also nicht, um als Laborraum für Messungen des Schallabsorptionsgrades nach ASTM C423 zu agieren.

Positiv am Kriterium ist, dass ein fester Grenzwert definiert ist, ab dem der Laborraum als ausreichend diffus gilt, um als Laborraum nach ASTM C423 genutzt werden zu können. Es gibt demzufolge eine klare Grenze für einen Zustand im Raum, die zur Ausrichtung und Orientierung dient. Ein weiterer Vorteil für das Kriterium ist, dass sich damit der Einfluss von punktuell eingebrachten Prüfobjekten erkennen lässt. Generell zeigt sich der Trend, dass sich durch eingebrachte Prüfobjekte die relative Standardabweichung ändert. Daraus lässt sich schließen, dass eine Beurteilung der Änderung der Diffusität bzw. Homogenität durch Einbringen von Prüfobjekten und auch die Prüfung auf generelle räumliche Diffusität im Raum gut mit dieser Methode untersuchbar ist. Durch die Messergebnisse konnte festgestellt werden, dass die Messergebnisse durch unterschiedliche Lautsprecheranordnungen keinen signifikanten Änderungen unterliegen.

4.2 Totales Konfidenzintervall CI_{tot}

Das totale Konfidenzintervall CI_{tot} wurde nach dem Vorgehen in 2.6 in MATLAB umgesetzt. Das gesamte MATLAB-Programm ist dazu im Anhang zu finden. Es besteht aus insgesamt drei Programmen, die sich aus dem Hauptprogramm und zwei Unterprogrammen zusammensetzen.

Im Hauptprogramm „main_CItot_v2.m“ werden ebenfalls grundlegende Parameter wie die Lautsprecher – Prüfobjektkombination festgelegt und Laufvariablen definiert. Diese Parameter fließen dann in die Unterprogramme ein. Die Berechnung erfolgt in for-Schleifen für die jeweilige Lautsprecher – Prüfobjektkombination. Nach ausgeführter Berechnung werden die Ergebnisse geplottet.

Das erste Unterprogramm „CItot_v1.m“ ermittelt zuerst einen energetischen, räumlichen Mittelwert der Schalldruckpegel aus allen, für die Messung ausgewählten, Mikrofonpositionen mit Gleichung (32). Als zweites wird die Standardabweichung aus diesen Positionen mittels Gleichung (34) berechnet und in der Variable „s_f_L“ gespeichert.

Das zweite Unterprogramm „decay_rate_final_v2.m“ ermittelt die Decay Rate d analog wie in 4.1 beschrieben und gibt die frequenzabhängigen Decay Rates in der Variable „d_output“ aus. Im Hauptprogramm wird aus „d_output“ die Standardabweichung mittels der MATLAB-internen Funktion $std()$ berechnet und in der Variable „s_f_d“ gespeichert.

Anschließend wird der Faktor a mit $n = 21$ angenommenen Mikrofonpositionen mit Gleichung (35) und ΔL sowie Δd separat mittels Gleichung (33) berechnet. Entgegen der Anzahl an Mikrofonpositionen in Abbildung 24 wurden nur die Mikrofonpositionen in X-Ebene 0 und 2 sowie in Y-Ebene 0, 2, 4 und 6 genutzt. In der Z-Ebene fanden alle

Positionen Verwendung. Die Einschränkungen kommen aus den Gegebenheiten der ASTM E90, Anhang A2.6, welche besagt, dass die Mikrofonpositionen bestimmte Mindestabstände aufweisen müssen. Die gewählte Anzahl stellt also die Obergrenze der möglichen Mikrofonpositionen in dem verwendeten Raster dar. Abschließend erfolgt die Berechnung des totalen Konfidenzintervalls nach Gleichung (39). Die Ergebnisse der Berechnung sind in nachfolgenden Grafiken dargestellt.

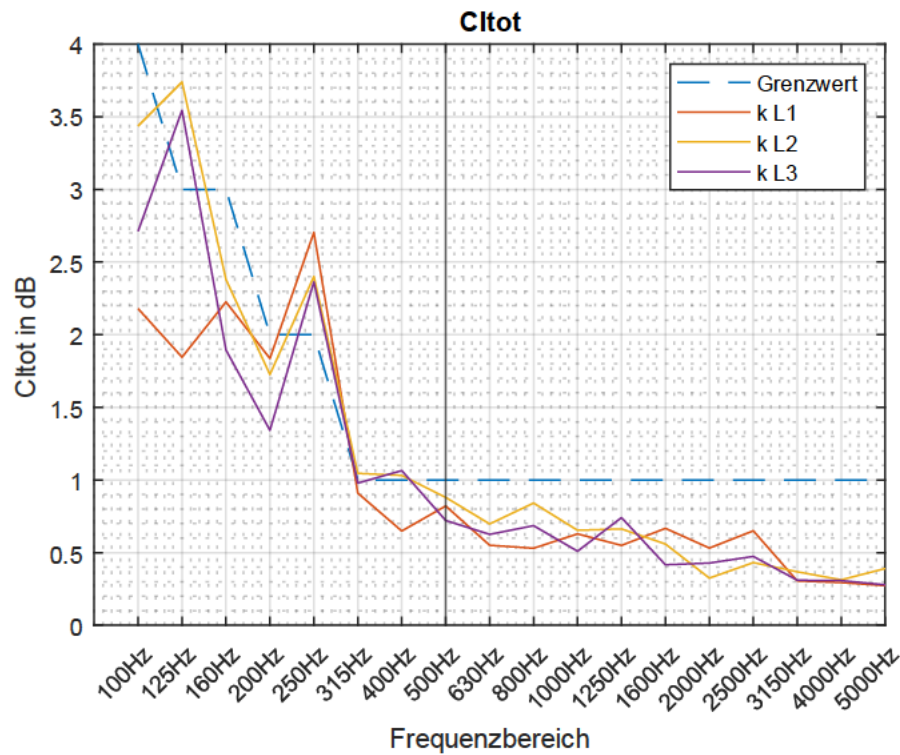
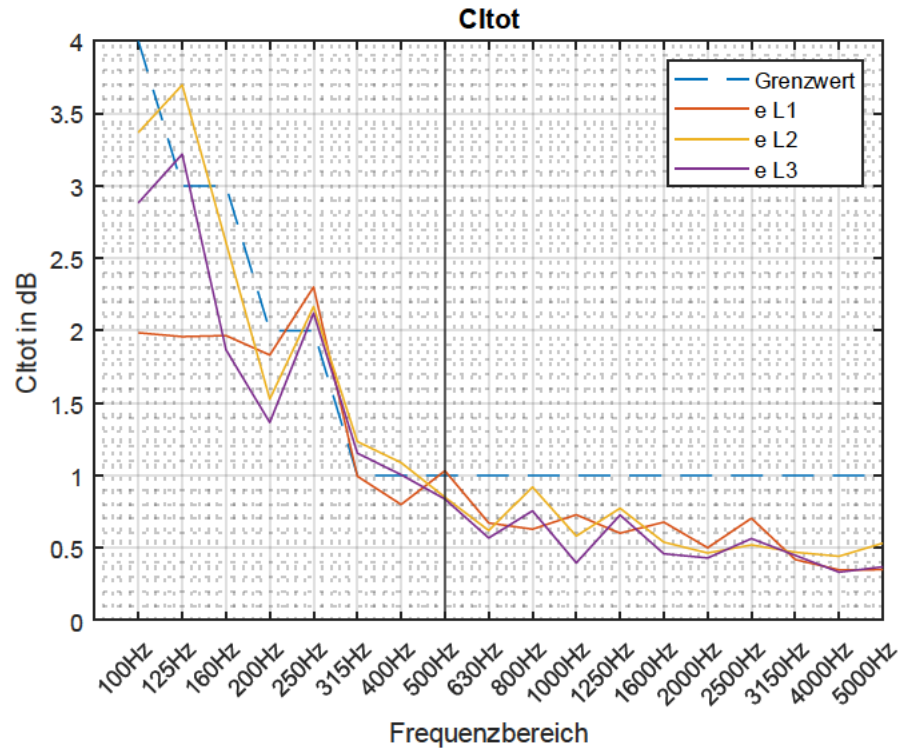
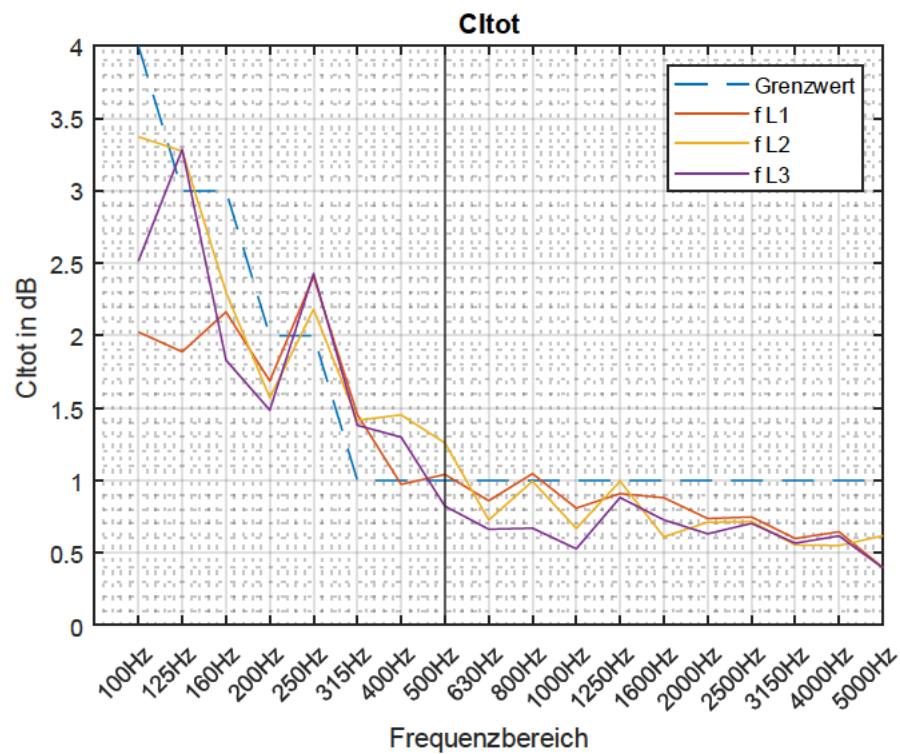


Abbildung 44 - Ergebnisse CI_{tot} für Prüfanordnung "k" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3

Abbildung 45 - Ergebnisse CI_{tot} für Prüfanzordnung "e" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3Abbildung 46 - Ergebnisse CI_{tot} für Prüfanzordnung "f" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3

In Abbildung 44 bis Abbildung 46 ist der Einfluss der verschiedenen Lautsprecheranordnungen dargestellt. Es wird in zwei Bereiche unterschieden. Einmal oberhalb der Schröderfrequenz und einmal unterhalb. Unterhalb der Schröderfrequenz ist kein diffuses Schallfeld zu erwarten. Die Berechnungsergebnisse bestätigen dies auch durch die Überschreitungen zwischen 250 Hz und 315 Hz. Oberhalb der Schröderfrequenz von ≈ 500 Hz liegen die Messergebnisse unterhalb des Grenzwertes bis auf die Überschreitungen in folgender Tabelle 17.

Tabelle 17 - Überschreitungen von CI_{tot}

| Prüfobjektanordnung | Lautsprecheranordnung | Frequenzband in Hz | Überschreitung in dB |
|---------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|
| e | L1 | 500 | 0,03 |
| f | L1 | 500 | 0,04 |
| f | L1 | 800 | 0,04 |
| f | L2 | 500 | 0,25 |

Die Überschreitung von CI_{tot} bei der Prüfobjektanordnung „f“, Lautsprecheranordnung L2, Frequenzband 500 Hz kommt durch die Mikrofonposition 0 0 2. Diese Mikrofonposition liegt direkt vor der Lautsprecherposition L2. Unter Vernachlässigung dieser Mikrofonposition ist die Überschreitung von CI_{tot} bei nur noch 0,06 dB und befindet sich somit in ähnlichen Größen wie die anderen Abweichungen. Da der Lautsprecher gerichtet in den Raum strahlt, ist davon auszugehen, dass die Mikrofonposition vom Direktschall des Lautsprechers beeinflusst ist. Eine genauere Untersuchung dazu ist aus zeittechnischen Gründen nicht erfolgt.

Ansonsten gibt es zwischen den verschiedenen Lautsprecheranordnungen, wie bei der relativen Standardabweichung, keine nennenswerten Abweichungen.

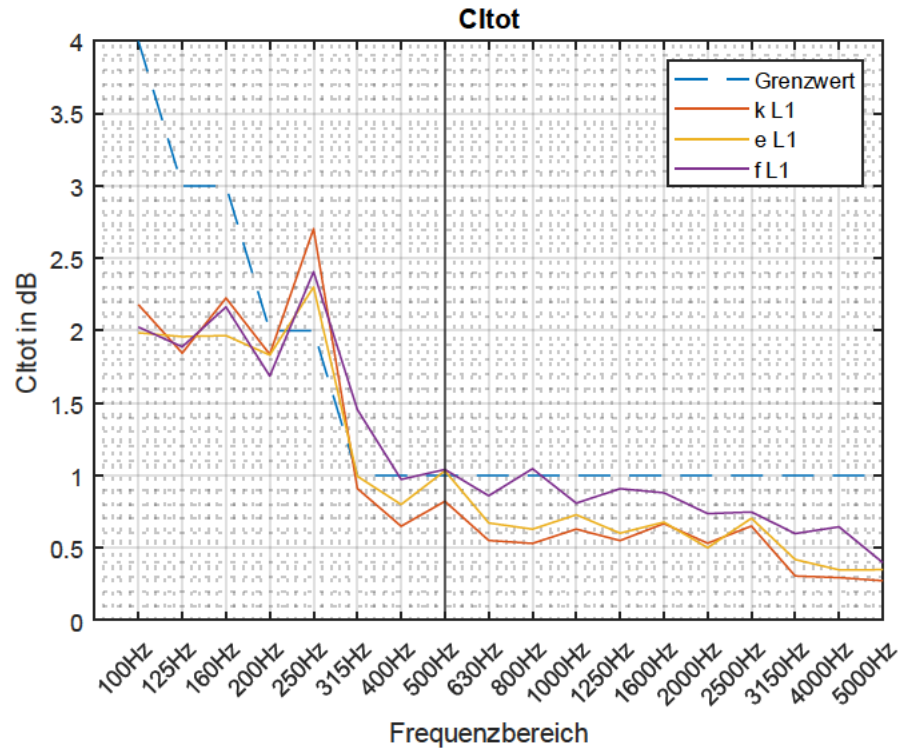


Abbildung 47 - Ergebnisse CI_{tot} für die Lautsprecheranordnung L1 mit den Prüfobjektanordnungen „k“, „e“ und „f“

In Abbildung 47 bis Abbildung 49 ist der Einfluss der verschiedenen Prüfobjektanordnungen dargestellt. Unterhalb der Schröderfrequenz sind dieselben Erkenntnisse wie beim Vergleich der Lautsprecherpositionen gegeben. Oberhalb der Schröderfrequenz ist ein Trend erkennbar. Der Wert CI_{tot} ist mit der Prüfobjektanordnung „f“ am höchsten, an zweiter Stelle liegt „e“ und am niedrigsten ist er bei „k“. Daraus zeigt sich eine Tendenz, dass je mehr Absorptionsfläche durch das Prüfobjekt in die Hallkabine lokal eingebracht wird, umso inhomogener und weniger diffus ist das Schallfeld.

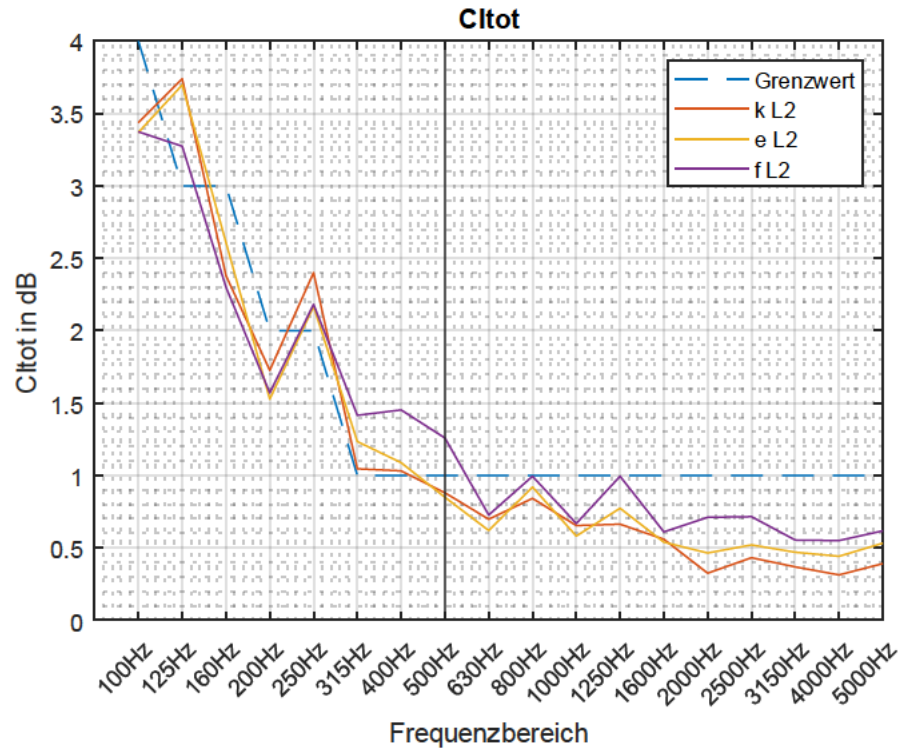


Abbildung 48 - Ergebnisse CI_{tot} für die Lautsprecheranordnung L2 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f"

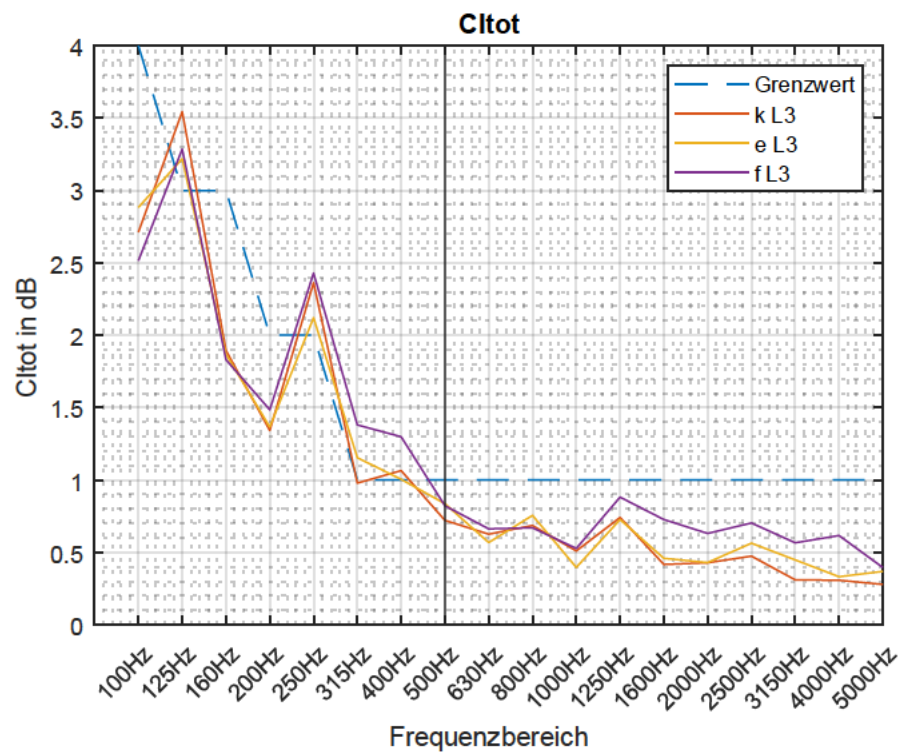


Abbildung 49 - Ergebnisse CI_{tot} für die Lautsprecheranordnung L3 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f"

Einordnung:

Positiv bei dem Kriterium CI_{tot} ist, dass es auch hier eine Grenze in Form der Grenzwerte gibt, ab der gesagt werden kann, dass das Schallfeld ausreichend diffus ist, um Bauakustik-Messungen gemäß ASTM E90 durchzuführen. Außerdem ist der Einfluss von punktuell eingebrachten Absorptionsmaßnahmen aus den Berechnungsergebnissen ablesbar und dadurch eine qualifizierte Aussage über die Diffusität bei unterschiedlichen Bedingungen machbar. Anhand der vielen Mikrofonpositionen ist es möglich, Inhomogenitäten in der Hallkabine bzw. auch allgemein im Hallraum relativ genau festzustellen, speziell in der untersuchten, nicht normierten Hallkabine ist dafür jedoch eine hohe Anzahl an Mikrofonpositionen notwendig. Diese inhomogenen Bereiche können direkt aus den Messergebnissen herausgefunden und gezielte, diffusitätssteigernde Maßnahmen durchgeführt werden.

Zu kritisieren ist, dass das bloße Erreichen des Grenzwerts dadurch erzielt werden kann, indem die Anzahl der Mikrofonpositionen im Raum erhöht wird. Diese Kritik wird jedoch begrenzt, da die ASTM E90 die maximale Anzahl an Positionen im Raum durch die in Anhang A2.2 gegebenen Mindestabstände zwischen Mikrofonen untereinander, zu Wänden und zur Schallquelle limitiert. Dadurch ist es nicht möglich, mehr Mikrofonpositionen einzubringen, um das Kriterium zu erfüllen.

An sich ist CI_{tot} also ebenfalls ein gutes Maß, um lokale Unterschiede von Absorptionsgraden festzustellen. Außerdem kann man mit dem Kriterium feststellen, ab welchem Wert ein Raum als ausreichend diffus bezeichnet werden kann.

4.3 Degree of Time Series Fluctuation DTF

Der Degree of Time Series Fluctuation wurde nach dem Vorgehen nach 2.7 in MATLAB umgesetzt. Das DTF-Kriterium ist als einzige der drei Methoden nicht normativ festgehalten. Viele Anregungen und das Vorgehen der Berechnung und Auswertung des DTF sowie die Programmierung in MATLAB basieren auf der Bachelorarbeit von Linus Staubach (Staubach, 2023), welcher sich mit ähnlichen Fragen der Diffusität in Modell-Hallräumen beschäftigt hat und dem alle Anerkennung dazu gebührt.

Das MATLAB-Programm besteht aus einem Hauptprogramm und zwei Unterprogrammen.

Das Hauptprogramm „`dtf_main.m`“ fragt zu Beginn die gewünschte Lautsprecher-Prüfobjekt-Kombination ab, definiert die Variablen Auswertebereich $Ab = 20$ dB, die

Abtastfrequenz $F_s = 44100$ Hz, X-, Y- und Z-Koordinaten, obere Terzfrequenz $OGF = 6000$ Hz und untere Terzfrequenz $UGF = 100$ Hz, in dem die Analyse stattfinden soll. Zudem initialisiert es Start und Endpunkt des Auswertebereichs. Eine Variableninitialisierung hilft MATLAB zur schnelleren Berechnung. Über Switch-Funktionen wird der entsprechende Ordner gemäß Auswahl von Lautsprecher-Prüfobjektkombination ausgewählt und angesteuert. Anschließend startet der Berechnungsvorgang mit for-Schleifen für jede Mikrofonposition. Zuerst wird geprüft, ob Daten für die Mikrofonposition vorhanden sind. Wird dies bestätigt, werden sie in eine Variable „Impulsantwort“ eingelesen und zu einem Array umgeformt. Des Weiteren werden Variablen „Impulsantwort_gedreht“, „Erg_int“ und „Erg_int2“ initialisiert. Diese sind für spätere Berechnungsschritte notwendig. Als Nächstes fand das Filtern der Impulsantworten in Terzbändern statt. Zur Filterung wurde die Funktion „octaveFilterBank“ der Audio Toolbox von MATLAB genutzt, welche eine Terzfilterbank zwischen UGF und OGF mit Abtastrate F_s erstellt. Die Filterbänke wurden anschließend auf die Impulsantworten angewendet und die Mittenfrequenzen mit „getCenterFrequencies“ ermittelt.

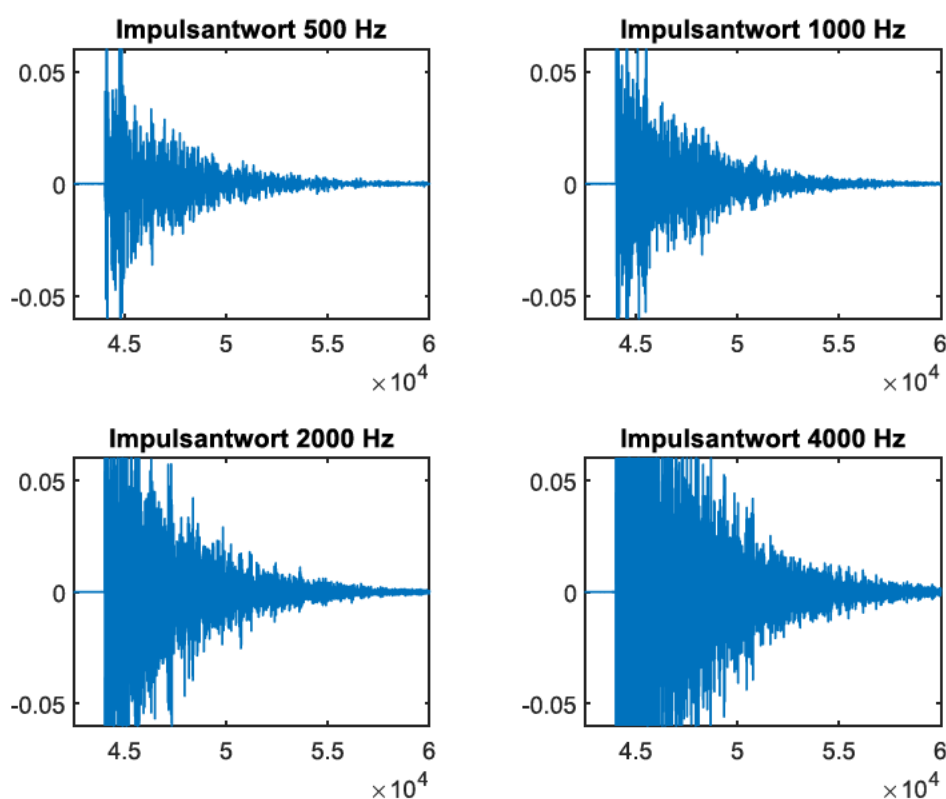


Abbildung 50 - Beispiele für gefilterte Impulsantworten, x-Achse gibt Sampleanzahl wieder, y-Achse die Amplitude

Für jedes Frequenzband fand anschließend die Analyse statt. Die Impulsantworten sind mittels der MATLAB-Funktion „flipud“ umgedreht und anschließend quadriert worden. In der Variable „Erg_int“ wurde die Early Decay Curve gemäß Gleichung (53) ermittelt.

„Erg_int2“ ist die Pegeldarstellung von „Erg_int“ und dient zur Bestimmung des Start- und Endpunkts des Analysebereichs. Anschließend wurden diese Variablen in das Unterprogramm „dtf_dtf_v2.m“ übergeben.

Im Unterprogramm „dtf_dtf_v2.m“ werden zwei weitere Variablen definiert, $auflösung = 100$ und $z(k)$, welches ebenfalls initialisiert wird. Die Variable $auflösung$ definiert den maximalen Grenzwert, wie in Abbildung 14 liegt dieser bei 100. Anschließend wird, mittels for-Schleife frequenzabhängig, die Impulsantwort quadriert und der Energieanteil der EDC ausdividiert. Nach dem Wurzelziehen erfolgt die Bestimmung von $g(t)$ gemäß Gleichung (54). Anschließend wird Start- und Endpunkt des Analysebereichs in $g(t)$ festgelegt und unter Verwendung der Gleichung (58) $h(t)$ ermittelt. Weiter berechnet sich R_{total} gemäß Gleichung (61). Anschließend wird $z(k)$ bestimmt. Eine for-Schleife „scannt“ durch $z(k)$ mit $\frac{1}{auflösung} \cdot \max(h(t)^2)$ bis $\frac{auflösung}{auflösung} \cdot \max(h(t)^2)$ und speichert diese Werte in die Variable „z_k“. Final sucht die Funktion „DTF“ in „z_k“ die Position, ab der $z(k) \geq 0,01$ ist und speichert diese als DTF ab.

Nach der Berechnung der einzelnen positionsabhängigen DTF wurde im Hauptprogramm aus allen ein räumlicher Mittelwert gebildet und dieser anschließend geplottet. Die geplotteten Diagramme sind in folgenden Abbildungen zu sehen. Abbildung 51 bis Abbildung 53 zeigen den Einfluss der drei verschiedenen Lautsprecheranordnungen. Alle Graphen weisen einen ähnlichen Verlauf auf.

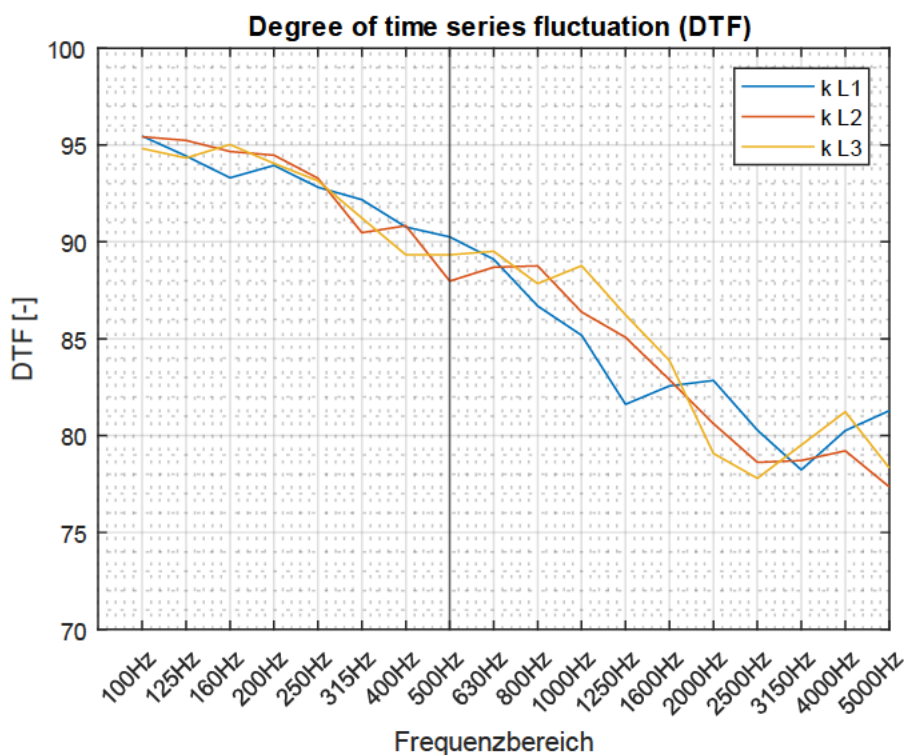


Abbildung 51 - Ergebnisse DTF für Prüfanordnung "k" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3

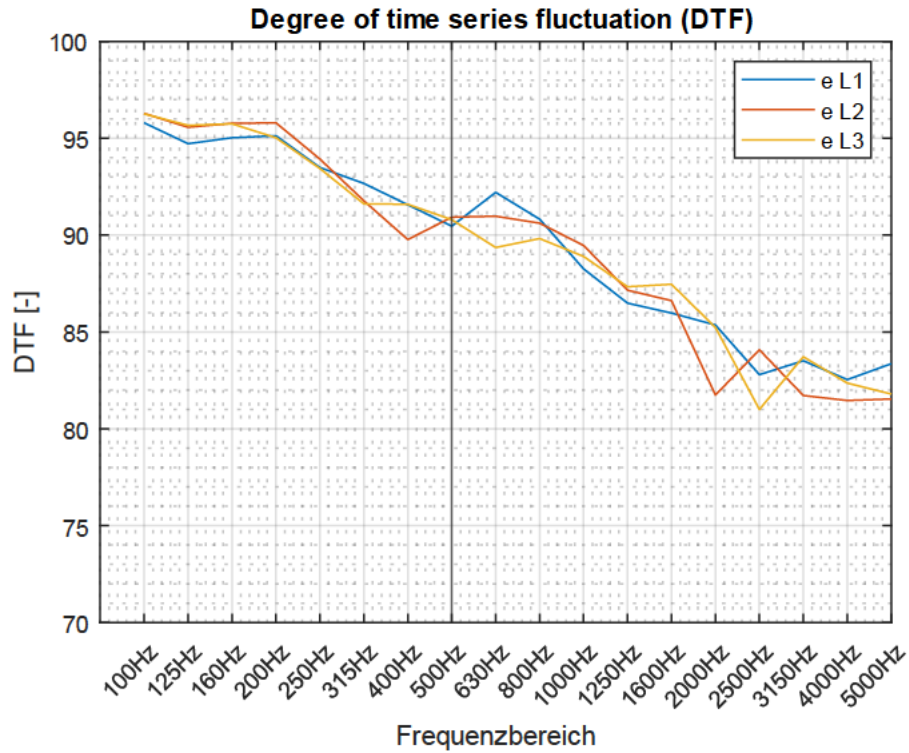


Abbildung 52 - Ergebnisse DTF für Prüfanordnung "e" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3

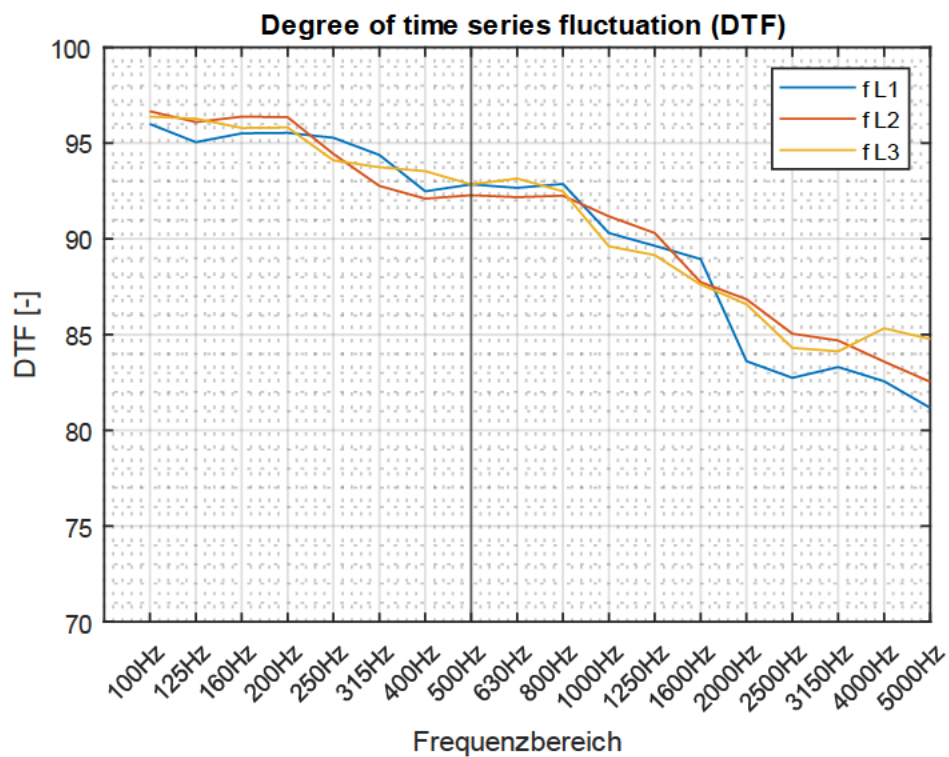


Abbildung 53 - Ergebnisse DTF für Prüfanordnung "f" mit den Lautsprecheranordnungen L1 - L3

Sie starten bei 100 Hz bei rund 95, sinken bis zur Schröderfrequenz ≈ 500 Hz zwischen 90 und 95 ab und sinken bis 5000 Hz weiter ab bis unter 80. Ansonsten weisen die Graphen keine nennenswerten Auffälligkeiten oder nennenswerte Unterschiede zwischen den Lautsprecherpositionen auf.

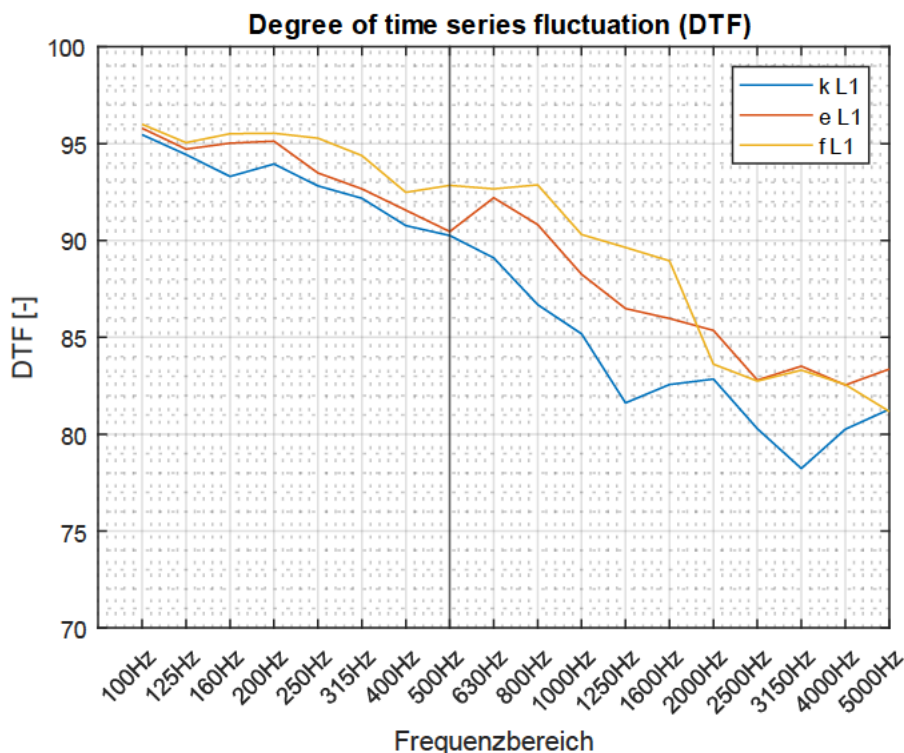


Abbildung 54 - Ergebnisse DTF für die Lautsprecheranordnung L1 mit den Prüfobjektanordnungen „k“, „e“ und „f“

Abbildung 54 bis Abbildung 56 stellt den Einfluss zwischen den verschiedenen Prüfobjektanordnungen dar. Eine Tendenz besteht dahin, dass die Prüfanordnung „k“ die niedrigsten Werte aufweist, gefolgt von Prüfanordnung „e“ und zuletzt Prüfanordnung „f“. Daraus lässt sich schließen, dass bei Prüfanordnung „k“ geringere Fluktuationen in der Impulsantwort auftreten als bei Prüfanordnung „f“, und dadurch eine höhere, räumliche Diffusität herrscht. Ansonsten zeigen sich keine auffälligen Abweichungen zwischen den einzelnen Prüfobjektanordnungen.

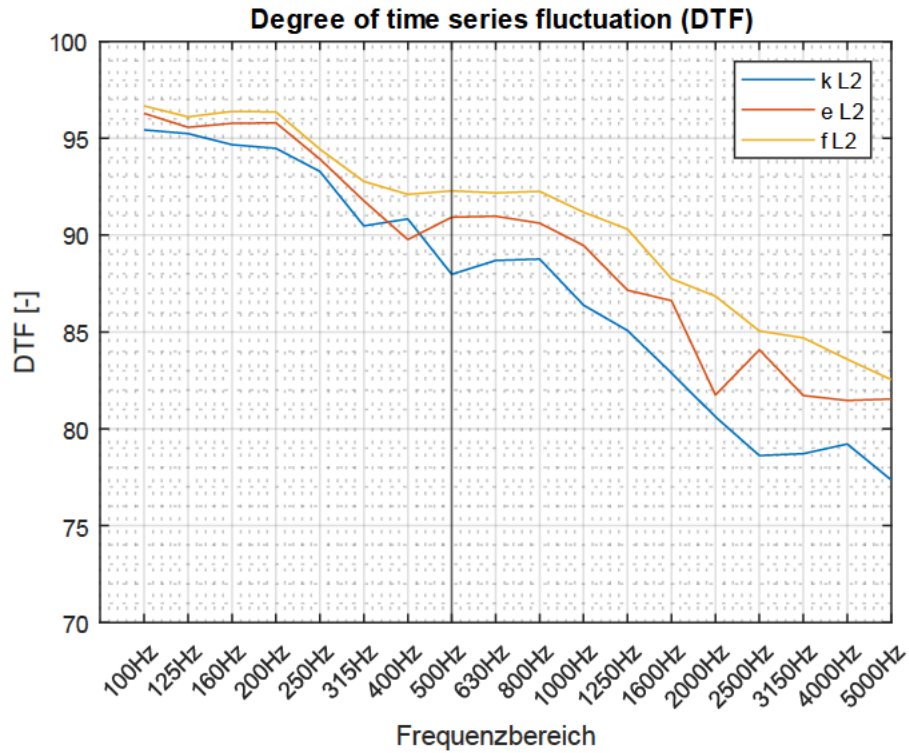


Abbildung 55 - Ergebnisse DTF für die Lautsprecheranordnung L2 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f"

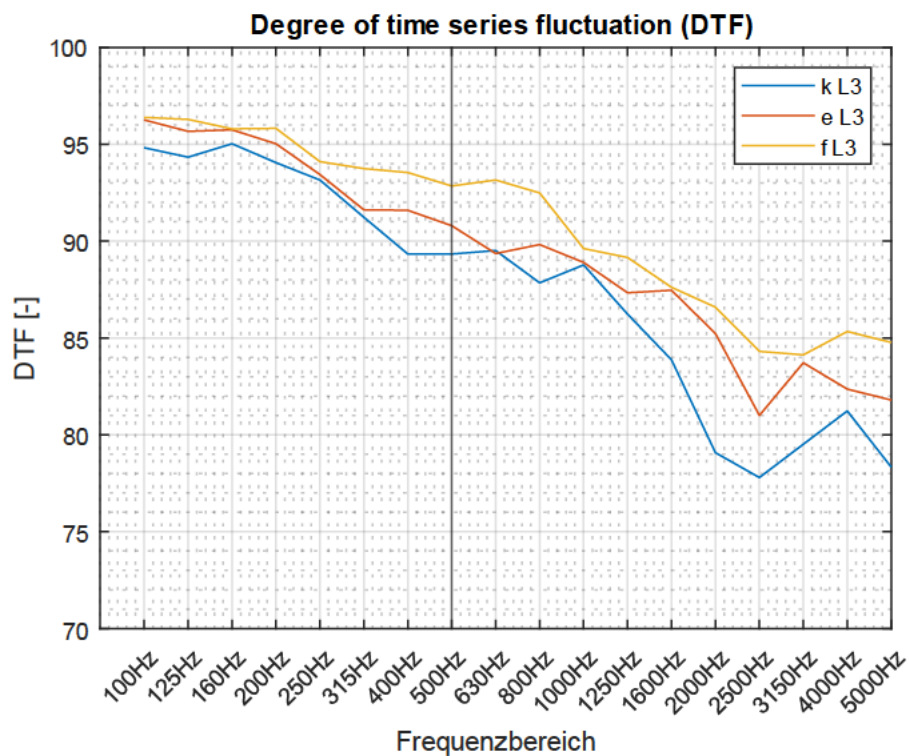


Abbildung 56 - Ergebnisse DTF für die Lautsprecheranordnung L3 mit den Prüfobjektanordnungen "k", "e" und "f"

Einordnung:

Je niedriger der DTF-Wert, umso höher soll die Diffusität eines Schallfeldes sein. Die gewonnenen Messdaten erfüllen diese Erwartung. Außerdem ist es möglich, anhand der Messergebnisse den Einfluss von punktuell eingebrachten Schallabsorbern herauszulesen. Diese Aussage hat der DTF mit den beiden anderen Kriterien gemeinsam.

Bei dem DTF-Kriterium erhält man zwar den Schwellenwert, der angibt, ab wann das Verhältnis $z(k) = 1\%$ erreicht sind, jedoch gibt es keine Skala oder Richtwerte dafür, die aussagen, ab welchem Wert von einer ausreichenden oder guten Diffusität ausgegangen werden kann. Wobei es schwer erscheint, solche harten Grenzwerte zu definieren, da deren Anwendungsgebiet variiert. Für z.B. eine Hallkabine oder einen Laborraum ist es von Vorteil, dass der Raum durch eine hohe Diffusität gekennzeichnet ist, demzufolge sollte der Grenzwert relativ niedrig sein. Für praktischere Messverfahren kann der Grenzwert geringer ausfallen.

4.4 Fehlerbetrachtungen

Sowohl während der Messungen als auch bei der Auswertung kann es zu Fehlern kommen. Die hier beschriebenen Fehler geben systematische Fehler an. Im Allgemeinen sind folgende Fehler aufgetreten, welche in diesem Kapitel näher erläutert werden.

Allgemeine Fehler

Während der Messungen des Schalldruckpegels kam es zu fehlerhaften Aufnahmen, die etwas mit der Empfindlichkeit der Messmikrofone zu tun hatte. Dadurch kamen in Frequenzbändern ab ca. 4000 Hz konstant hohe Schalldruckpegel von teilweise über 150 dB mit Abweichungen $< 0,1$ dB zustande. Diese Positionen wurden von vornherein aus der Mittelung ausgeschlossen. Außerdem gab es bei der Nachhallzeit T , speziell der Ensemble-Mittelung durch Samurai, Fehler in der Mittelung und dadurch Abklingverläufe mit waagrecht verlaufenden Ebenen im Bereich des Early Decays. Diese ausgeschlossenen Messpositionen sind in folgender Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18 - aus der Mittelung ausgeschlossene Messungen aufgrund fehlerhafter Daten

| Ausschluss wegen fehlerhaftem | Prüfobjektanordnung | Lautsprecheranordnung | Mikrofonposition X Y Z |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| SPL | e | L1 | 0 0 1 |
| SPL | e | L2 | 0 0 1 |
| SPL | k | L1 | 2 2 0 |
| SPL | k | L2 | 2 2 0 |
| SPL | k | L3 | 2 2 0 |
| SPL | k | L3 | 2 2 1 |
| T | k | L2 | 0 0 0 |
| T | f | L2 | 1 3 1 |
| T | e | L3 | 0 0 2 |

Weiter sind die klimatischen Gegebenheiten während der Messung dokumentiert wurden. Da kein Hygrometer während der Messung zur Verfügung stand, wurden die Daten des Luftdrucks im Nachhinein bei www.kachelmannwetter.de für die Messtage festgehalten. Es wurde der Luftdruck Meereshöhe QNH verwendet. Die Temperatur lag während aller Messungen zwischen 22 °C und 24 °C, die relative Luftfeuchte zwischen 31 % und 34 % und der Luftdruck zwischen 100,5 kPa und 102,2 kPa. Die Tabelle ist als separates Dokument im Verzeichnis zu finden. Die Luftfeuchte weicht von den Mindestangaben der ASTM C423 (> 40 %) ab. Die Luftfeuchte wurde mittels Luftbefeuchter die Luftfeuchte über 30 % gehalten.

Zur Berechnung der Schalldämpfung durch die Luftabsorption wurde, statt wie in ASTM C423 die Norm ANSI S1.26 angegeben, die ISO 9613-1 von 1993 verwendet. Mit ihr ist es ebenfalls möglich, den Absorptionskoeffizienten α in $\frac{\text{dB}}{\text{m}}$ zu errechnen. Da die ANSI S1.26 dem Verfasser nicht durch die Hochschule zugänglich und nur käuflich zu erwerben war, wurde auf die Nutzung dieser speziellen Norm verzichtet.

Konstruktionsbedingte Fehler stellen sich durch die Zugänglichkeit der Hallkabine dar. In der Hallkabine befinden sich Ausfräsungen zum Durchführen von Kabeln usw., welche das Messergebnis verfälschen können. Ebenso befindet sich eine Eingangstür in der Kabine, welche durch Dichtungen zwar fest abgedichtet ist, jedoch Raum für Abweichungen gibt. Weiter bildet die Luke, mit ihrem dahinter liegendem Hohlraum, einen Helmholtzresonator. Die Luke passt zwar relativ passgenau in die Öffnung, kleine Luftschlitze sind aber dennoch vorhanden und schließen einen Einfluss nicht aus. Durch das Einbauen des Prüfobjekts ändert sich das Volumen des Hohlraumes und dadurch der Einfluss der Luke.

Fehler speziell zur ASTM C423

Weiter sind bei bestimmten Nachhallzeitpositionen die Hintergrundpegel zu hoch, um eine normgerechte Auswertung nach ASTM C423 durchzuführen. Die Auswertung wurde dennoch auch für diese Positionen durchgeführt. Dies betrifft folgende Positionen:

Tabelle 19 - Anordnungen mit zu hohem Hintergrundgeräuschpegel für eine Auswertung nach ASTM C423

| Prüfobjektanordnung | Lautsprecheranordnung | Mikrofonposition X Y Z |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|
| e | L1 | 0 0 0 |
| e | L1 | 1 1 0 |
| e | L1 | 1 1 2 |
| e | L1 | 3 1 0 |
| e | L1 | 3 5 0 |
| e | L3 | 1 5 2 |
| e | L3 | 3 5 2 |

Weiter wurden statt der geforderten 20 Abklingraten nur zehn Abklingraten gemessen, um den Messaufwand zu minimieren.

Zur Auswertung von s_{rel} mit Prüfobjekt in der Hallkabine sind mindestens drei Messungen mit verschiedenen Prüfobjektpositionen durchzuführen, die sich nur zu einem bestimmten Grad überlappen. In vorliegender Arbeit wurde, anders als in ASTM C423 beschrieben, nur eine Prüfobjektanordnung genutzt, da das Prüfobjekt in die vorhandene Luke eingebaut wurde und bei unterschiedlichen Anordnungen des Prüfobjekts sich unterschiedliche Situationen ergeben hätten.

Der Start des Auswertebereichs soll nach ASTM C423 nach 100 ms bis 300 ms gewählt werden. Der Startpunkt wurde aber so gewählt, dass er der Punkt ist, nachdem der Schalldruckpegel im Raum nach Abschalten des Signalgenerators um 5 dB abgesunken ist. Dadurch kommen teilweise kürzere Zeiten als die mindestens geforderten 100 ms zustande.

Fehler speziell zur ASTM E90

Aus der Messdauer, wie sie in Gleichung (40) beschrieben ist, ergibt sich für das Terzband 100 Hz eine Messdauer von 12,4 s. Die tatsächliche Messdauer lag bei zehn Sekunden, weshalb diese hier unterhalb der Anforderung liegt. Da das Terzband 100 Hz jedoch weit unterhalb der Schröderfrequenz liegt und nicht direkt Teil der Auswertung ist, wurde von einer Verlängerung der Messzeit abgesehen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, drei Kriterien zur Bewertung der Diffusität messtechnisch in einer nicht normgerechten Hallkabine zur Messung des Schallabsorptionsgrades mit einfachen Mitteln zu erfassen, auszuwerten und einzuordnen. Dafür musste zu Beginn analysiert werden, welche Randbedingungen des Raumes vorhanden waren. Es sollte eingegrenzt werden, welche Lautsprecher-situationen und Prüfobjektsituationen genutzt werden sollen. Es wurden drei Lautsprecher-situationen und drei Prüfobjektanordnungen festgelegt. Um ein entsprechendes Mikrofonraster nutzen zu können, musste sich überlegt werden, inwiefern sich die normierten Mindestabstände auf einen kleineren Raum skalieren lassen. Mithilfe dieser Skalierung konnten die Mindestabstände skaliert werden und ein Mikrofonraster erstellt werden. Frequenzen unterlagen keiner Skalierung. Danach wurde getestet, welche Messverfahren sich für die Ermittlung der Kriterien am besten eignen. Die Entscheidung fiel darauf, die Impulsantwort der Kabine mithilfe eines Sweep-Signals und die Nachhallzeit und den Schalldruckpegel mittels eines rosa Rauschens aufzunehmen. Die Speicherung der gewonnenen Messdaten fand mit einer vordefinierten Kodierung zur besseren Auswertung statt. Um die Messdaten auszuwerten, wurden entsprechende MATLAB-Skripte für das jeweilige Kriterium erarbeitet. Mithilfe der MATLAB-Skripte war es möglich, jede einzelne Lautsprecher-Prüfobjekt-Kombination anzusprechen und räumliche Mittelwerte mit den Mikrofonpositionen zu erstellen. Aus den Ergebnissen entstanden Plot-Diagramme zur Auswertung.

Als Erstes wurde das Kriterium relative Standardabweichung s_{rel} der ASTM C423 bearbeitet und ausgewertet. Zuerst ergab sich die Erkenntnis, dass die gewonnenen Messergebnisse in keinem Frequenzband die Grenzwerte der Norm erfüllen. Demzufolge ist der Raum nicht als Laborraum nach ASTM C423 geeignet. Dabei wurde festgestellt, dass unterschiedliche Lautsprecheranordnungen keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis aufzeigen. Punktuell eingebrachte Prüfobjekte beeinflussen das Messergebnis hingegen schon, was sich an den gestaffelten Verläufen zeigt. Positiv am Kriterium ist, dass es einen festen Grenzwert gibt, an dem sich orientieren lässt, ob der Hallraum ausreichend diffus ist oder ob weitere Maßnahmen (z.B. Einbringen von zusätzlichen Diffusoren) für den Raum notwendig sind. Er ist auch für Räume, die nicht im normativen Bereich liegen, anwendbar. s_{rel} ist also ein gutes Maß, um die Homogenität des diffusen Schallfeldes (Zhang & Lee, 2021) zu bewerten.

Als Zweites wurde das Kriterium totales Konfidenzintervall CI_{tot} der ASTM E90 untersucht und ausgewertet. Es zeigte sich, dass in der nicht normgerechten Hallkabine oberhalb der Schröderfrequenz die Berechnungsergebnisse innerhalb der Grenzwerte liegen, bis auf die Ausnahmen in Tabelle 17. Die ersten drei Überschreitungen der Tabelle 17 liegen zwischen 0,03 dB bis 0,04 dB. Diese Überschreitungen lassen sich auf

Abweichungen der Schalldruckpegel zwischen den Mikrofonpositionen zurückführen und können als geringe Überschreitungen eingestuft werden. Die vierte Überschreitung bei Lautsprecherposition „L2“, Prüfobjektposition „f“ und 500 Hz beträgt 0,25 dB, welche auf die Mikrofonposition 0 0 2 zurückzuführen ist. Ohne diese Mikrofonposition beträgt die Abweichung 0,06 dB und liegt damit in ähnlichen Größen wie die anderen Abweichungen. Ansonsten wurde festgestellt, dass es ebenfalls zwischen den verschiedenen Lautsprecheranordnungen keine weiteren nennenswerten Abweichungen untereinander gibt und die Lautsprecheranordnung keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die Abstrahlrichtung von gerichteten Lautsprechern sollte jedoch auf die Umfassungsflächen fallen und nicht in den Raum hinein. Wie bei der relativen Standardabweichung wurde in den Ergebnissen ebenfalls der Einfluss von punktuell eingebrachten Schallabsorptionsflächen ersichtlich. Ebenfalls positiv am Kriterium ist, dass es einen Grenzwert gibt zur Orientierung gibt. Im Gegensatz zum Verfahren der ASTM C423 ist es hier aber nicht direkt erforderlich, Diffusoren in die Prüfräume einzubringen, sondern es ist möglich, durch eine höhere Anzahl an Mikrofonpositionen die Grenzwerte zu erreichen. Die Obergrenze an Mikrofonpositionen ist durch Mindestabstände zwischen den Positionen in der ASTM E90 begrenzt, sodass es nicht möglich ist, sich den Raum nur mithilfe einer steigenden Anzahl an Mikrofonpositionen als nach ASTM E90 erfüllt zu messen. CI_{tot} ist also auch ein gutes Maß, um die Homogenität des diffusen Schallfeldes (Zhang & Lee, 2021) zu bewerten.

Als drittes Kriterium wurde die DTF nach Hanyu et al. (Hanyu et al., 2018) ermittelt. Dieses wird als einziges der drei Kriterien als indirekte Methode zur Bewertung der Diffusität nach (Zhang & Lee, 2021) eingeordnet. Da es hier keinen Grenzwert gibt, war es nicht möglich, direkte Abgrenzungen zwischen einem diffusen und nicht diffusen Schallfeld zu treffen. Es wurde herausgefunden, dass die Messergebnisse von niedrigen zu hohen Frequenzbändern einen Abfall des DTF-Wertes aufweisen, was bedeutet, dass Spitzen in den normalisierten Impulsantworten in niedrigen Frequenzbändern häufiger auftreten als in höheren Frequenzbändern. Zwischen den Lautsprecherpositionen gab es keine nennenswerten Auffälligkeiten, alle Graphen haben einen ähnlichen Verlauf. Bei den Prüfobjektanordnungen fiel auf, dass die Ergebnisse von Prüfanordnung „k“ die niedrigsten Werte aufweisen, die der Prüfanordnung „f“ am höchsten und die der Prüfanordnung „e“ zwischen den beiden anderen liegen. Daraus ergab sich, dass in der Impulsantwort mit Prüfanordnung „k“ geringere Fluktuationen sind als in Prüfanordnung „f“. Deshalb ist das Schallfeld bei Prüfanordnung „k“ als diffuser einzuschätzen, was im Vergleich mit den beiden anderen Kriterien übereinstimmt.

Die Erwartungen aus der Einleitung, der Einhaltung der Grenzwerte, wurden in nur einem der drei Kriterien, nämlich CI_{tot} , erfüllt. s_{rel} erfüllt diese Erwartung nicht. Der DTF kann dieser Erwartung nicht gerecht werden, da kein Grenzwert existiert. Die Erwartung, dass oberhalb der Schröderfrequenz die Werte der Kriterien geringer sind, wurde bei

allen drei Kriterien erfüllt. Nach der Einschätzung des Verfassers ist die relative Standardabweichung s_{rel} für die Hallkabine am repräsentativsten, da die ASTM C423 sich genau mit dem Arbeitsthema befasst. Das Kriterium CI_{tot} nach ASTM E90 zielt auf Laborräume für die messtechnische Ermittlung von Schalldämmqualitäten von Bauteilen ab, also auf eine andere Materialgröße. Deshalb sollte sie nicht unbedingt zur Beurteilung des diffusen Schallfeldes einer Hallkabine herangezogen werden. Das Kriterium DTF eignet sich nicht, um das Schallfeld in einer Hallkabine qualitativ zu bewerten. Es gibt keinen Grenzwert, an dem sich orientiert werden kann, um zu sagen, dass das Schallfeld ausreichend diffus oder nicht diffus ist. Es dient lediglich dazu, Auswirkungen bei Änderungen des Schallfeldes sichtbar zu machen.

In folgenden Arbeiten kann daher versucht werden, Grenzwerte für den DTF zu definieren, um eine qualifizierte Aussage über die Diffusität des betrachteten Raums zu geben. Außerdem sollte eine einheitliche Definition des Schwellenwertes erfolgen. In dieser wissenschaftlichen Arbeit wurde der Schwellenwert wie in Hanyu et al. (Hanyu et al., 2018) gewählt, nämlich maximal 100 und minimal 1. Bei höheren Auflösungen, z.B. als Maximalwert 1000, ergäben sich Schwellenwerte von > 900 . Darum ist es ratsam, diesen Wert zu normalisieren. Für Bauakustikmessungen ist eine Prüfung der Diffusität ebenfalls sinnvoll, jedoch sind die Gegebenheiten in diesen praktischen Räumen (z.B. Wohnräume, Büroräume, Klassenzimmer oder ähnliche) häufig anders als in speziell labororientiert konstruierten Räumen. Zum Beispiel kann man Grenzwerte für bestimmte Szenarien erstellen, die je nach Sensibilität der Daten einen höheren oder niedrigeren Grenzwert aufweisen. In der Messpraxis stellen sich dadurch jedoch mehrere Fragen. Zum einen ist für so eine Messung zwischen Aufwand und Nutzen eines solchen Prozesses abzuschätzen. Zum anderen stellt sich die Frage, wie vor einer Bauakustikmessung in situ geprüft werden soll, ob dieser Grenzwert vorhanden ist. Eine weitere Prüfung verlängert die Messdauer und gibt eventuell auch eine falsche Sicherheit hinsichtlich des Messergebnisses. Für weitere Arbeiten oder Aufgaben empfiehlt es sich, zu prüfen, welche und im welchen Maße Unterschiede in den Messergebnissen entstehen und ob diese so gravierend sind, dass eine zusätzliche Prüfung vorher sinnvoll ist. Außerdem scheint es zweckdienlich, die Abweichungen zwischen den verschiedenen Messergebnissen genau zu untersuchen, um genauere Aussagen über die Messergebnisse und deren kleine Unterschiede untereinander treffen zu können.

Literaturverzeichnis

- Ahnert, W. & Feistel, S. (2010). Einmessung und Verifizierung raumakustischer Gegebenheiten und von Beschallungsanlagen. In M. Möser (Hrsg.), *Messtechnik der Akustik* (S. 115–183). Springer Berlin Heidelberg.
- Beranek, L. L. (Hrsg.). (1971). *Noise and vibration control*.
- Beranek, L. L. (1993). *Acoustics* [Nachdr.]. American Inst. of Physics.
- Bidondo, A., Arouxet, M., Vazquez, S., Vazquez Torre, J., Heinze, G. & Saavedra, A. (2015). *SOUND FIELD DIFFUSION COEFFICIENT: DEVELOPMENT & DEFINITIONS*.
- Blackman, R. B. (1965). *Linear Data-smoothing and Prediction in Theory and Practice*. Addison-Wesley series in electrical engineering. Addison-Wesley Publishing Company. <https://books.google.de/books?id=rehQAAAAMAAJ>
- Böhmer, E., Ehrhardt, D. & Oberschelp, W. (2018). *Elemente der angewandten Elektronik*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2114-0>
- Bradley, D. T., Müller-Trapet, M., Adelgren, J. & Vorländer, M. (2014). Effect of boundary diffusers in a reverberation chamber: Standardized diffuse field quantifiers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(4), 1898–1906. <https://doi.org/10.1121/1.4866291>
- Davy, J. L. (1988). The variance of decay rates at low frequencies. *Applied Acoustics*, 23(1), 63–79. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(88\)90081-3](https://doi.org/10.1016/0003-682X(88)90081-3)
- Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (2006). *Akustische Wellen und Felder*, S. 1–90. https://www.dega-akustik.de/fileadmin/dega-akustik.de/publikationen/DEGA_Empfehlung_101.pdf
- DIN e.V. (2003). *DIN EN ISO 354:2003-12: Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen (ISO_354:2003); Deutsche Fassung EN_ISO_354:2003*. Beuth Verlag GmbH.
- DIN e.V. (2011). *DIN EN ISO 3741:2011-01: Akustik_ - Bestimmung der Schalleis- tungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen_ - Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse_1 (ISO_3741:2010); Deutsche Fassung EN_ISO_3741:2010*. Beuth Verlag GmbH.
- E33 Committee (2016). *ASTM E90 - Test Method for Laboratory Measurement of Air- borne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements*. ASTM International.
- E33 Committee (2020). *ASTM E2235 - Test Method for Determination of Decay Rates for Use in Sound Insulation Test Methods*. ASTM International.

- E33 Committee (2021). *ASTM C634 - Terminology Relating to Building and Environmental Acoustics*. ASTM International.
- E33 Committee (2022). *ASTM C423 - Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*. ASTM International.
- E33 Committee (2023). *ASTM C423 - Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*. ASTM International.
- Georgii, H.-O. (2015). *Stochastik*. DE GRUYTER.
<https://doi.org/10.1515/9783110359701>
- Gruhl, S. & Kurze, U. (2006). Schallausbreitung und Schallschutz in Räumen. In W. Schirmer (Hrsg.), *VDI-Buch. Technischer Lärmschutz: Grundlagen und praktische Maßnahmen zum Schutz vor Lärm und Schwingungen von Maschinen* (S. 382–423). Springer.
- Hanyu, T. (2014). Analysis Method for Estimating Diffuseness of Sound Fields by Using Decay-Cancelled Impulse Response. *Building Acoustics*, 21(2), 125–133.
<https://doi.org/10.1260/1351-010X.21.2.125>
- Hanyu, T., Hoshi, K. & Nakakita, T. (2018). *Assessment of sound diffusion in rooms for both time and frequency domain by using a decay-cancelled impulse response*.
https://www.euronoise2018.eu/docs/papers/338_euronoise2018.pdf
- Hübelt, J. & Probst, W. (2023). Schallausbreitung und Schallschutz in Räumen. In W. Schirmer & J. Hübelt (Hrsg.), *Technischer Lärmschutz* (S. 313–377). Springer Berlin Heidelberg.
- Jeon, J. Y., Jang, H. S., Kim, Y. H. & Vorländer, M. (2015). Influence of wall scattering on the early fine structures of measured room impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(3), 1108–1116.
<https://doi.org/10.1121/1.4913773>
- Keil, U. (2022). *Präsentation Hallbox*. Keil GmbH.
- Kuttruff, H. (2016). *Room acoustics, sixth edition*. Apple Academic Press Inc.
- Kuttruff, H. & Mommertz, E. (2004). Raumakustik. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik* (S. 331–362). Springer Berlin Heidelberg.
- M-Audio. (2023, 1. Dezember). *Produktwebsite Studiophile AV 40 (pan)*. <https://m-audio.com/products/view/studiophile-av-40>
- Mechel, F. P. (2008). Room Acoustics. In F. P. Mechel (Hrsg.), *Formulas of acoustics* (2nd ed., S. 873–940). Springer.

- Müller, G. & Möser, M. (2004). Grundlagen. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik* (S. 1–24). Springer Berlin Heidelberg.
- Müller, S. & Massarani, P. (2001). Transfer-Function Measurement with Sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49(6), 443–471. <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10189>
- schaumstofflager.de. (2023a, 1. Dezember). *Hochwertiger Planer Schaumstoff Micro-Por 100 x 50 x 1cm anthrazit - Schallschutzplatte*. <https://www.schaumstofflager.de/akustikschaumstoff/laermschutz/hochwertiger-planer-schaumstoff-micropor-100-x-50-x-1cm-anthrazit-schallschutzplatte.html>
- schaumstofflager.de. (2023b, 1. Dezember). *Hochwertiger Planer Schaumstoff Micro-Por 100 x 50 x 5cm anthrazit - Schallschutzplatten*. <https://www.schaumstofflager.de/akustikschaumstoff/laermschutz/hochwertiger-planer-schaumstoff-100-x-50-x-5cm-anthrazit.html>
- Schirmer, W. & Hübel, J. (2023). Luftschalldämmung. In W. Schirmer & J. Hübel (Hrsg.), *Technischer Lärmschutz* (S. 211–248). Springer Berlin Heidelberg.
- Schreiber, L. (2004). Schallausbreitung im Freien. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik* (S. 193–204). Springer Berlin Heidelberg.
- Schultz, T. J. (1971). Diffusion in reverberation rooms. *Journal of Sound and Vibration*, 16(1), 17–28. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90392-0](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90392-0)
- Schulz, D. (2023). Größen und Messverfahren zur Kennzeichnung von Geräuschen und Geräuschquellen. In W. Schirmer & J. Hübel (Hrsg.), *Technischer Lärmschutz* (S. 23–88). Springer Berlin Heidelberg.
- Sengpiel, E. (2017, 12. Februar). *Q-Faktor Guetefaktor Q nach Bandbreite in Oktaven N dB/okt umrechnen Bandpass Band Pass Filter Umrechnung Berechnung Abfall -3 dB Abfall Guete B und N Oktavbreite Terzbreite Oktave Terz Breite Bandpass Filter EQ Equalizer Mastering Flankensteilheit Filterguete Grenzfrequenz - sengpielaudio Sengpiel Berlin*. sengpielaudio. <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-bandbreite.htm>
- Sinambari, G. R. & Sentpali, S. (2014). *Ingenieurakustik*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05072-6>
- Staubach, L. (2023). *Einordnung von Methoden zur Bewertung diffuser Schallfelder basierend auf Messungen im Modellmaßstab*. RIS.
- Vorländer, M. (2004). Akustische Messtechnik. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Taschenbuch der Technischen Akustik* (S. 25–57). Springer Berlin Heidelberg.
- Wang, S., Zhong, J., Qiu, X. & Burnett, I. (2020). A note on using panel diffusers to improve sound field diffusivity in reverberation rooms below 100 Hz. *Applied Acoustics*, 169, 107471. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107471>

Zhang, S. & Lee, J. (2021). Diffuseness Quantification in a Reverberation Chamber and Its Variation with Fine-Resolution Measurements. *Buildings*, 11(11), 519. <https://doi.org/10.3390/buildings11110519>

Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bedanken bei:

- Meinem Betreuer Herr Prof. Dr.-Ing. Hübelt, welcher mir während der gesamten Arbeitszeit stets konstruktive und gute Ratschläge gegeben hat,
- Allen Betreuern des Laborraums und der Hallkabine,
- Allen Personen, mit denen ich während dieser Arbeit zusammenarbeiten durfte und die mich unterstützt haben, sei es hinsichtlich der Findung einer Aufgabe in der Hallkabine oder der Ausarbeitung der Größe Degree of Time Series Fluctuation oder der fleißigen Durchführung der umfangreichenden Messungen,
- Und meiner Familie, Angehörigen und Freunden, welche mich während der Zeit unterstützt haben.

Anlagen

Nachfolgend ist eine Übersicht der Anlagen zu finden.

Anlage A.1 - Messdaten

Anlage A.2 - MATLAB-Skripte

Anlage A.3 - Berechnungsergebnisse s_{rel}

Anlage A.4 - Berechnungsergebnisse CI_{tot}

Anlage A.5 - Berechnungsergebnisse DTF

Anlage A.6 - Datenblatt Messmikrofon

Anlage A.1 - Messdaten

Die für die Gewinnung der Berechnungsergebnisse aufgenommenen Messdaten hängen dieser Arbeit aufgrund ihres Umfangs nur in digitaler Form an. Sie sind in einer ZIP-Datei „Messdaten.zip“ zu finden. Als erstes sind dort die gewonnenen Temperatur- und Luftfeuchte-Daten in der Datei „Temperatur_und_Luftfeuchte.xlsx“ zu finden. Weiter befinden sich drei Unterordner, „keinpruef“, „pruef1cm“ und „pruef5cm“ im Ordner Messdaten. In jedem dieser Ordner sind drei weitere Unterordner „L1“, „L2“ und „L3“. Darin befinden sich die gewonnenen Messdaten für jede einzelne Prüfobjekt-Lautsprecherkombination in den unter Abbildung 28 und Tabelle 13 genannten Kodierungen.

Es gilt zu beachten, dass die Messdaten extrahiert rund 3 Gigabyte an Speicherplatz benötigen.

Anlage A.2 - MATLAB-Skripte

In folgender Anlage sind die MATLAB-Skripte, die zur Auswertung der gewonnenen Messdaten erstellt wurden, dargestellt. Als Erstes werden die Skripte der relativen Standardabweichung s_{rel} dargestellt, darauf folgen die Skripte des totalen Konfidenzintervalls CI_{tot} und zuletzt die der DTF. Nachfolgend sind die jeweils verwendeten Programme pro Kriterium aufgelistet. Die Programme `decay_rate_finalv2.m` für s_{rel} und CI_{tot} unterscheiden sich so, dass die Mikrofonpositionen unterschiedlich sind. Um die Programme nutzen zu können, ist es notwendig, in den Programmen den Pfad zur Ansteuerung der Messdaten manuell auf den eigenen Speicherpfad der Messdaten zu ändern.

Relative Standardabweichung s_{rel}

`main_decayrate.m`

`decay_rate_finalv2.m`

`athmos_abs_v1.m`

Totales Konfidenzintervall CI_{tot}

`main_Cltot_v2.m`

`Cltot_v1.m`

`decay_rate_finalv2.m`

`athmos_abs_v1.m`

Degree of Time Series Fluctuation DTF

`dtf_main.m`

`dtf_dtf_v2.m`

`T_dtf_v1.m`

Die Skripte sind im Anhang nur als Darstellung abgebildet. In der Ordnerstruktur dieser Arbeit sind sie als MATLAB-Skript in einer ZIP-Datei „MATLAB.zip“ pro Kriterium im Format *.m* abgelegt.

MATLAB-Programme zur Berechnung der relativen Standardabweichung s_{rel}

- `main_decayrate.m`

01.12.23 19:12 C:\Users\Ruben\Docume...\main_decayrate.m 1 of 2

```

%% Hauptprogramm zur Berechnung der Standardabweichung der decayrate
% * Autor: Ruben Bahner
% * Stand: 01.12.2023
%

%% Variablendefinition, Abfrage der Lautsprecher - Prüfobjekt - Kombination
w = 1;
u = 2;
Speaker = ["L1" "L2" "L3"];
pruefe = ["k" "e" "f"];
Legende(1,1) = "Grenzwert - mit Prüfobjekt";

%% Alternative Abfrage der Lautsprecher - Prüfobjekt - Kombination
%Speaker = "Lautsprecherposition L1, L2, L3? ";

%Lx = input(Speaker);

%prf = "Prüfobjekt k, e, f? ";

%Px = input(prf);

%% Start der Berechnungsschleife

for q = 1:length(Speaker)

    for m = 1:length(pruefe)
        clearvars -except stdalle w u Speaker pruefe q m Legende % löscht alle
        Variablen außer die hier Genannten
        Px = pruefe(m);
        Lx = Speaker(q);
        cd C:\Users\Ruben\Documents\Masterarbeit\Arbeitsordner\Matlab
        Scripts\rel_std_decayrate\

        decay_rate_finalv2

        fprintf('%s %s fertig \n',Lx,Px);

        stdalle(w,:)=a;
        Legende(u,1)=append(Px," ",Lx);
        w = w+1;
        u = u+1;
    end
end

%abs = 0.9210 * (V*decayrate/c);
%disp(abs);
%fprintf('Ausgewerte Messungen: %1.0f \n',length(output));

%% Plotten
Frequenzen = {"100Hz","125Hz","160Hz","200Hz","250Hz","315Hz","400Hz","500Hz","
630Hz","800Hz","1000Hz","1250Hz","1600Hz","2000Hz","2500Hz","3150Hz","4000Hz","
5000Hz"};
limits_leer = [0.11 0.07 0.04 0.03 0.03 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];

```

01.12.23 19:12 C:\Users\Ruben\Docume...\main decayrate.m 2 of 2

```
limits_mit = [0.07 0.04 0.04 0.04 0.03 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];
plot(1:18,limits_mit,"--",1:18,stdalle)
ylim([0 0.22])
xticks([1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18]);
xticklabels(Frequenzen);
ylabel("relative Standardabweichung");
xlabel("Frequenzbereich");
title("relative Standardabweichung");
legend(Legende')
grid on, grid minor;
```

- **decay_rate_finalv2.m**

01.12.23 19:14 C:\Users\Ruben\Do...\decay_rate_finalv2.m 1 of 3

```
%% Nebenprogramm Ermittlung decay rate & rel. Std-Abweichung nach ASTM C423
% * Autor: Ruben Bahner
% * Stand: 01.12.2023
%
format shortG

dt = 1/160;           %Samplingfrequenz dt
Ab = 25;             %Analysebereich in dB
V = 9.1405;          % Volumen des Hallraums
Frequenzen = [100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000];
x = 0:3;
y = 0:6;
z = 0:2;
n = 1;
m = 1;
dair = 0;
%{
Struktur der XML-Datei einlesen
liest Nachhallzeiten aus Hauptmittelung aus,
test ist der Strukturname
readsruct ist der Befehl zum Auslesen einer Struktur
append fügt einzelne Strings zu einem String zusammen
%}

%Ordnerstruktur anwählen

switch Lx
    case "L1"
        spk = "L1";
    case "L2"
        spk = "L2";
    case "L3"
        spk = "L3";
end
switch Px
    case "e"
        pruef = "pruef1cm";
    case "k"
        pruef = "keinpruef";
    case "f"
        pruef = "pruef5cm";
end

pfad = append("C:\Users\Ruben\Documents\Masterarbeit\Uebergabe_230816\Messungen\",
pruef, "\", spk);

cd (pfad)

%% Berechnung
for x3 = 1:length(x) %for-Schleife x
    for x4 = 1:length(y) %for-Schleife y
        for x5 = 1:length(z) %for-Schleife z

            name = (append("MA_", Px, "_", Lx, "_", num2str(x(x3)), "_", num2str(y(x4))
```


01.12.23 19:14 C:\Users\Ruben\Do...\decay rate finalv2.m 2 of 3

```
(x4), "_", num2str(z(x5)), "_T.xml");

    if isfile(name) == 1           %prüft, ob es die Datei gibt
        xml = readstruct(name);

        d_alle = [xml.posslopeavg.bin1.decay,xml.posslopeavg.bin2.
decay,xml.posslopeavg.bin3.decay,xml.posslopeavg.bin4.decay,xml.posslopeavg.bin5.
decay,xml.posslopeavg.bin6.decay,xml.posslopeavg.bin7.decay,xml.posslopeavg.bin8.
decay,xml.posslopeavg.bin9.decay,xml.posslopeavg.bin10.decay,xml.posslopeavg.bin11.
decay,xml.posslopeavg.bin12.decay,xml.posslopeavg.bin13.decay,xml.posslopeavg.bin14.
decay,xml.posslopeavg.bin15.decay,xml.posslopeavg.bin16.decay,xml.posslopeavg.bin17.
decay,xml.posslopeavg.bin18.decay];
        d_noisefloor = [xml.posslopeavg.bin1.noisefloor,xml.
posslopeavg.bin2.noisefloor,xml.posslopeavg.bin3.noisefloor,xml.posslopeavg.bin4.
noisefloor,xml.posslopeavg.bin5.noisefloor,xml.posslopeavg.bin6.noisefloor,xml.
posslopeavg.bin7.noisefloor,xml.posslopeavg.bin8.noisefloor,xml.posslopeavg.bin9.
noisefloor,xml.posslopeavg.bin10.noisefloor,xml.posslopeavg.bin11.noisefloor,xml.
posslopeavg.bin12.noisefloor,xml.posslopeavg.bin13.noisefloor,xml.posslopeavg.bin14.
noisefloor,xml.posslopeavg.bin15.noisefloor,xml.posslopeavg.bin16.noisefloor,xml.
posslopeavg.bin17.noisefloor,xml.posslopeavg.bin18.noisefloor];

        %scant den String decayalle, gibt den Wert als Floating-point
number aus (%f), delimiter nimmt Kommas als Trennsymbol an und löscht diese
        for c1 = 1:length(d_alle)           %Schleife, die
Abklingzeitverläufe jeder Frequenz in decayzelle(n) schreibt
            d_zelle(c1) = textscan(d_alle(c1),'%f','delimiter',' ');
        end

        %For-Schleife decayrate frequenzabhängig
        %diese in d(f1) und T in T(f1)

        for f1 = 1:length(d_zelle)

            d_array = cell2mat(d_zelle(f1)); %schreibt Zelle in Array
um, Werte 1 - 18 sind Frequenzen 100 - 5000 Hz

            Mittelwert = mean(d_array(1:50,1)); %Mittelwert der ersten
50 Werte aus A

            L_1 = find(d_array < Mittelwert-5); %findet Positionen in
A, die kleiner als 5 dB des Mittelwertes sind und
            L_1 = L_1(1); %wählt erste Position aus

            L_end = find(d_array < d_array(L_1)-Ab); %findet
Positionen in A, die 25 dB (Analysebereich) unter L_1 liegen und wählt erste Position
aus
            L_end = L_end(1);

            if d_array(L_end) < d_noisefloor(f1)+15 %Test, ob
Hintergrundpegel niedrig genug ist
                fprintf ('Hintergrundpegel bei %s %1.0f zu hoch',
append(num2str(x(x3)), "_", num2str(y(x4)), "_", num2str(z(x5))), f1)
                end %Ende Test Hintergrundpegel
            decay = d_array(L_1:L_end); %schreibe decay in neues Array
```

01.12.23 19:14 C:\Users\Ruben\Do...\decay rate finalv2.m 3 of 3

```

M = length(decay); %ermittelt M = Anzahl der Punkte zw.
L_1 & L_end

i = 1:M; %Erzeuge Array mit Länge M zur Ermittlung i * Li
i = i';
iLi = i .* decay; %Berechnung i .* Li

decayrate = (6/(M*(M^2-1)*dt)) * ((M+1) * sum(decay)) -
2 * sum(iLi)); %Berechnung decayrate mittels Gl. (5) ASTM C423-22

d(f1) = decayrate;
end %Ende For-Schleife Berechnung einzelne Frequenz

%Output: frequenzbezogene decay-rate d(x) als 1x18-double

% Berechnung d - dair
athmos_abs_v1 %Berechnung der Athmosphärendämpfung
d = d - dair; %Abzug der Dämpfung durch die Atmosphäre
d_output(n,:) = d; %speichert d(1,18) in die Tabelle output(n,
18)

n = n+1; %inkrementiert n für beliebige Anzahl an Zeilen
end %Ende If-Namesprüfung
end %Ende for-Schleife z
end %Ende for-Schleife y
end %Ende for-Schleife x

%% for-Schleife berechnet für alle Frequenzen die relative Standardabweichung nach
C423

for k = 1:18
    a(:,k) = std(d_output(:,k),1)/mean(d_output(:,k));
end

disp ('Berechnung Standardabweichung decayrate abgeschlossen');
```

- **athmos_abs_v1.m**

01.12.23 18:51 C:\Users\Ruben\Documen...\athmos_abs_v1.m 1 of 2

```
%% Berechnung der Temperaturkonstante m
% Autor: Ruben Bahner
% Stand: 01.12.2023
clear Spk
clear temp
clear alpha
clear dair

%% Parameterdefinition Lautsprecher, Prüfobjekt, x , y , z

%x = 2;
%y = 0;
%z = 0;
%Lx = "L3";
%Px = "e";
pr = 101.325; % [kPa]
T0 = 293.15; % [K]
Frequenzen = [100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600,
2000, 2500, 3150, 4000, 5000]; %Frequenzen

%% Daten einlesen

klima = readtable("Temperatur_und_Luftfeuchte.xlsx", "DataRange", "C4:J504");
klima.Properties.VariableNames = ["Pruefobjekt", "Lautsprecher", "x", "y", "z",
"Temperatur", "Luftfeuchte", "Luftdruck"];

%% Daten umformatieren für weitere Nutzung

klima.Pruefobjekt = cell2mat(klima.Pruefobjekt);

Lautsprecherpos = klima.Lautsprecher;
Lautsprecherposarray = cell2mat(Lautsprecherpos);

for j = 1:height(Lautsprecherposarray)
    Spk(j) = string(append(Lautsprecherposarray(j,1), Lautsprecherposarray(j,2)));
end

Spk = Spk';

klima.Lautsprecher = Spk;

%% Suchen der Parameter für die gewählte Prüfobjekt - Lautsprecher - Mikrofonposition

for kek = 1:height(klima.Lautsprecher)
    if klima.Pruefobjekt(kek) == Px & klima.Lautsprecher(kek) == Lx & klima.x(kek) ==
x(x3) & klima.y(kek) == y(x4) & klima.z(kek) == z(x5)
        Zeile = kek;
    end
end

Test = exist('Zeile'); % schaut, ob Zeile vorhanden ist, nein = keine Daten, ja =
Daten vorhanden

if Test == 1 % prüft, ob Test 1 oder 0 ist, wenn 1,
```

01.12.23 18:51 C:\Users\Ruben\Documen...\athmos abs v1.m 2 of 2

```

dann Auslesen der Daten
    temp = table2array(klima(Zeile,6)); % Temperatur
    RH = table2array(klima(Zeile,7)); % Luftfeuchte
    pa = table2array(klima(Zeile,8)); % Luftdruck;
end

if Test == 0
    dair = 0;
end

%% Berechnung der Luftdämpfungskonstante alpha nach ISO 9613-1
if Test == 1
    T = 273.15+temp; % [K]
    c = 331.5+0.6*(temp);
    h = (RH.*(10^(-6.8346*((273.16)/(T)).^1.261)+4.6151)))/(pa./pr);

    fro = (pa./pr)*(24+(4.04.*(10^(4)).*h.*(0.02+h)/(0.391+h)));
    frn = (pa./pr)*(1/(sqrt(T/T0)).*(9+280.*h.*exp(-4.17.*(1/(nthroot((T/T0),3))
-1)))));

%Berechnet alle alpha für alle 18 Frequenzen für die gewählte XYZ-Position

    for fr = 1:length(Frequenzen)
        alpha(fr,1) = 8.686.*(Frequenzen(fr).^2).*((1.84.*(10.^(-11)).*(1/(pa./pr)).*
(sqrt(T./T0)))+(1/(sqrt((T./T0)^5))).*(0.01275.*(exp(-2239.1./T)).*((fro+((Frequenzen
(fr).^2)./fro)).^-1)+(0.1068.*(exp(-3352./T)).*(1/(frn+((Frequenzen(fr).^2).
/frn))))));
    end

    alpha = alpha';

    dair = alpha .*c; %frequenzabhängige decay-rate durch Luftabsorption
end

```

MATLAB-Programme zur Berechnung des totalen Konfidenzintervalls CI_{tot}

- main_CItot_v2.m

01.12.23 18:55 C:\Users\Ruben\Documen...\main CItot v2.m 1 of 2

```

%% Hauptprogramm zur Berechnung des totalen Konfidenzintervalls CItot
% * Autor: Ruben Bahner
% * Stand: 01.12.2023
%

%% Definition der gewünschten Lautsprecher - Prüfobjekt - Kombination
Speaker = ["L1" "L2" "L3"];
pruefe = ["k" "e" "f"];
w = 1;
u = 2;
Legende(1,1) = "Grenzwert";

%% Start der Berechnung

for q = 1:length(Speaker)

    for m = 1:length(pruefe)
        clearvars -except CItotalle w u Speaker pruefe q m Legende % löscht alle
        Variablen außer die hier Genannten
        Lx = Speaker(q);
        Px = pruefe(m);
        disp(append ("Berechnung ", Lx, " ", Px, " Start"))
        cd 'C:\Users\Ruben\Documents\Masterarbeit\Arbeitsordner\Matlab Scripts\CItot\'

        CItot_v1; %Ausführen des Berechnungsprogramms zur Ermittlung der
        Standardabweichung des SPL

        cd 'C:\Users\Ruben\Documents\Masterarbeit\Arbeitsordner\Matlab Scripts\CItot\'

        decay_rate_finalv2; % Ausführen des Berechnungsprogramms zur Ermittlung der
        decayrate

        s_f_d = std(d_output,1);
        s_f_d = s_f_d * 0.455;
        %multipliziert Standardabweichung decay rate mit a aus Tabelle A2.1 ASTM E90
        % a = 0,324 bei n = 38, t-Verteilung, siehe technischer Lärmschutz 2023, S. 69
        % a = 0,320 bei n = 40, t-Verteilung, siehe technischer Lärmschutz 2023, S. 69
        s_f_L = s_f_L * 0.455;
        %multipliziert Standardabweichung SPL mit a aus Tabelle A2.1 ASTM E90
        % a = 0,324 bei n = 38, t-Verteilung, siehe technischer Lärmschutz 2023, S. 69
        % a = 0,320 bei n = 40, t-Verteilung, siehe technischer Lärmschutz 2023, S. 69

        %Anwenden der abgeänderten Gleichung A2.5 zur Berechnung von CItot
        s_f_L = 2 * (s_f_L.^2);
        s_f_d = 18.86 * ((s_f_d./mean(d_output)).^2); % Substituierte Formel d
        statt A nach ASTM E90 A2.5.10
        CItot = sqrt(s_f_L+s_f_d); % Berechnung des totalen Konfidenzintervalls
        CItotalle(w,:)=CItot; % speichern des CItot für Lx Px xyz-Kombi
        Legende(u,1)=append(Px, " ", Lx); %speichert Lx Px in Legende
        w = w+1;
        u = u+1;
        disp(append ("Berechnung ", Lx, " ", Px, " Ende"))
    end
end
end

```

01.12.23 18:55 C:\Users\Ruben\Documen...\main CITot v2.m 2 of 2

```
%% Plotten
Frequenzen = {"100Hz", "125Hz", "160Hz", "200Hz", "250Hz", "315Hz", "400Hz", "500Hz", "↙
630Hz", "800Hz", "1000Hz", "1250Hz", "1600Hz", "2000Hz", "2500Hz", "3150Hz", "4000Hz", "↙
5000Hz"};
limits = [4 3 3 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1];
plot(1:18, limits, "--", 1:18, Citotalle);
title("CITot");
hfig.Name = "CITot";
grid on, grid minor;
legend('Legende');
xticks([1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18]);
xticklabels(Frequenzen);
yticks(0:0.5:4);
ylim ([0 4]);
ylabel("CITot in dB");
xlabel("Frequenzbereich");
```

- **Cltot_v1.m**

01.12.23 18:56 C:\Users\Ruben\Documents\Ma...\Cltot v1.m 1 of 2

```

%% Nebenprogramm zur Berechnung des totalen Konfidenzintervalls Cltot - Ermittlung
Standardabweichung des SPL
% * Autor: Ruben Bahner
% * Stand: 01.12.2023
%

%% Variablendefinition & Auswahl der Prüfobjekt - Lautsprecherkombination
dt = 0.02; % Auflösung der SPL-Messung
n = 1; % Variablendefinition
x = [0 2]; % x-Koordinatendefinition
y = [0 2 4 6]; % y-Koordinatendefinition
z = 0:2; % z-Koordinatendefinition

switch Lx
    case "L1"
        spk = "L1";
    case "L2"
        spk = "L2";
    case "L3"
        spk = "L3";
end

switch Px
    case "e"
        pruef = "pruef1cm";
    case "k"
        pruef = "keinpruef";
    case "f"
        pruef = "pruef5cm";
end

pfad = append("C:\Users\Ruben\Documents\Masterarbeit\Uebergabe_230816\Messungen\",
pruef, "\", spk);

cd (pfad)
anzahl = height(ls ("*SPL*")); % Gibt Anzahl an Daten im Ordner wider, welche *SPL* im
Namen haben
%% Start Berechnungsschleife frequenzabhängiger Mittelwert SPL an jeder
Mikrofonposition
for x3 = 1:length(x) %for-Schleife x
    for x4 = 1:length(y) %for-Schleife y
        for x5 = 1:length(z) %for-Schleife z
            name = (append("MA_", Px, "_", Lx, "_", num2str(x(x3)), "_", num2str(y(x4)), "_",
num2str(z(x5)), "_SPL.xls")); % Namensdefinition

            if isfile(name) == 1 %Namensprüfung

                A = readtable(name, "Sheet", 2, "DataRange", "I3:Z502"); %Einlesen der SPL
von 100 - 5000 Hz
                B = table2array(A); %Umschreiben Tabelle in ein Array
                for e = 1:18
                    L_m(:, e) = 10*log10(sum(10.^(B(:, e)./10))/length(B(:, e))); %
Energetischer Mittelwert einer einzelnen Position aus 10s-Messung nach E90 GL. (A2.2)
                end
            end
        end
    end
end

```

01.12.23 18:56 C:\Users\Ruben\Documents\Ma...\Citot v1.m 2 of 2

```
L_m_all_pos(n,:) = L_m; %Übertragen der Positionen in extra Array
Koordinaten(n,:) = (append("x",num2str(x3-1),"y",num2str(x4-1),"z",num2str(x5-1)));
    n = n+1;
    %else disp (append (name, ' nicht vorhanden')); % Ausgabe, falls
Namensprüfung falsch ausgibt
end
end
end

%% Berechnungsschleife frequenzabhängiger Mittelwert SPL aus allen Mikrofonpositionen
for e = 1:18
    L_quer(:,e) = 10*log10(sum(10.^(L_m_all_pos(:,e)./10))/length(L_m_all_pos(:,e)));
    %energetischer Mittelwert des gesamten Raumes aus allen Mikrofonpositionen nach ASTM
    E90
end

%% Berechnungsschleife frequenzabhängige Standardabweichung nach ASTM E90 (A2.3)
for h = 1:18
    s_f_L(:,h) = sqrt((sum((L_m_all_pos(:,h)-(L_quer(1,h)).^2))*(1/(height
(L_m_all_pos)-1)))); % Standardabweichung nach ASTM E90
end
L_m_all_pos = L_m_all_pos';
disp('s_f_L Berechnung abgeschlossen')
```


- **decay_rate_finalv2.m**

01.12.23 18:55 C:\Users\Ruben\Do...\decay_rate_finalv2.m 1 of 3

```
%% Nebenprogramm Ermittlung decay rate & rel. Std-Abweichung nach ASTM C423
% * Autor: Ruben Bahner
% * Stand: 01.12.2023
%

format shortG

dt = 1/160;           %Samplingfrequenz dt
Ab = 25;             %Analysebereich in dB
V = 9.1405;          % Volumen des Hallraums
%c = 20.047*sqrt(273.15+24); % Schallgeschwindigkeit
Frequenzen = [100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600,
2000, 2500, 3150, 4000, 5000];
x = [0 2];
y = [0 2 4 6];
z = 0:2;
n = 1;
m = 1;
dair = 0;
%{
Struktur der XML-Datei einlesen
liest Nachhallzeiten aus Hauptmittelung aus,
test ist der Strukturname
readsruct ist der Befehl zum Auslesen einer Struktur
append fügt einzelne Strings zu einem String zusammen
%}

%Ordnerstruktur anwählen

switch Lx
    case "L1"
        spk = "L1";
    case "L2"
        spk = "L2";
    case "L3"
        spk = "L3";
end
switch Px
    case "e"
        pruef = "pruef1cm";
    case "k"
        pruef = "keinpruef";
    case "f"
        pruef = "pruef5cm";
end

pfad = append("C:\Users\Ruben\Documents\Masterarbeit\Uebergabe_230816\Messungen\",
pruef, "\", spk);

cd (pfad)

%% Berechnung
for x3 = 1:length(x) %for-Schleife x
    for x4 = 1:length(y) %for-Schleife y
        for x5 = 1:length(z) %for-Schleife z
```

01.12.23 18:55 C:\Users\Ruben\Do...\decay rate finalv2.m 2 of 3

```

name = (append("MA_", Px, "_", Lx, "_", num2str(x(x3)), "_", num2str(y(x4)), "_", num2str(z(x5)), "_T.xml"));

if isfile(name) == 1           %prüft, ob es die Datei gibt
    xml = readstruct(name);

    d_alle = [xml.posslopeavg.bin1.decay,xml.posslopeavg.bin2.
decay,xml.posslopeavg.bin3.decay,xml.posslopeavg.bin4.decay,xml.posslopeavg.bin5.
decay,xml.posslopeavg.bin6.decay,xml.posslopeavg.bin7.decay,xml.posslopeavg.bin8.
decay,xml.posslopeavg.bin9.decay,xml.posslopeavg.bin10.decay,xml.posslopeavg.bin11.
decay,xml.posslopeavg.bin12.decay,xml.posslopeavg.bin13.decay,xml.posslopeavg.bin14.
decay,xml.posslopeavg.bin15.decay,xml.posslopeavg.bin16.decay,xml.posslopeavg.bin17.
decay,xml.posslopeavg.bin18.decay];

    d_noisefloor = [xml.posslopeavg.bin1.noisefloor,xml.
posslopeavg.bin2.noisefloor,xml.posslopeavg.bin3.noisefloor,xml.posslopeavg.bin4.
noisefloor,xml.posslopeavg.bin5.noisefloor,xml.posslopeavg.bin6.noisefloor,xml.
posslopeavg.bin7.noisefloor,xml.posslopeavg.bin8.noisefloor,xml.posslopeavg.bin9.
noisefloor,xml.posslopeavg.bin10.noisefloor,xml.posslopeavg.bin11.noisefloor,xml.
posslopeavg.bin12.noisefloor,xml.posslopeavg.bin13.noisefloor,xml.posslopeavg.bin14.
noisefloor,xml.posslopeavg.bin15.noisefloor,xml.posslopeavg.bin16.noisefloor,xml.
posslopeavg.bin17.noisefloor,xml.posslopeavg.bin18.noisefloor];

    %scant den String decayalle, gibt den Wert als Floating-point
number aus (%f), delimiter nimmt Kommas als Trennsymbol an und löscht diese
for c1 = 1:length(d_alle)     %Schleife, die
Abklingzeitverläufe jeder Frequenz in decayzelle(n) schreibt
    d_zelle(c1) = textscan(d_alle(c1),'%f','delimiter',' ');
end

    %For-Schleife decayrate drequenzabhängig

for f1 = 1:length(d_zelle)

    d_array = cell2mat(d_zelle(f1)); %schreibt Zelle in Array
um, Werte 1 - 18 sind Frequenzen 100 - 5000 Hz

    Mittelwert = mean(d_array(1:50,1)); %Mittelwert der ersten
50 Werte aus A

    L_1 = find(d_array < Mittelwert-5); %findet Positionen in
A, die kleiner als 5 dB des Mittelwertes sind und
    L_1 = L_1(1); %wählt erste Position aus

    L_end = find(d_array < d_array(L_1)-Ab); %findet
Positionen in A, die 25 dB (Analysebereich) unter L_1 liegen und wählt erste Position
aus
    L_end = L_end(1);

    if d_array(L_end) < d_noisefloor(f1)+10 %Test, ob
Hintergrundpegel niedrig genug ist
        fprintf ('Hintergrundpegel bei %s %1.0f zu hoch',
append(num2str(x(x3)), "_", num2str(y(x4)), "_", num2str(z(x5))), f1)
        end % Ende Test Hintergrundgeräuschpegel
    decay = d_array(L_1:L_end); %schreibe decay in neues Array

```

01.12.23 18:55 C:\Users\Ruben\Do...\decay rate finalv2.m 3 of 3

```

M = length(decay); %ermittelt M = Anzahl der Punkte zw.
L_1 & L_end

i = 1:M; %Erzeuge Array mit Länge M zur Ermittlung i * Li
i = i';
iLi = i .* decay; %Berechnung i .* Li

decayrate = (6/(M*((M^2)-1)*dt)) * ((M+1) * sum(decay)) -
2 * sum(iLi); %Berechnung decayrate mittels Gl. (5) ASTM C423-22

d(f1) = decayrate;

end %Ende For-Schleife Berechnung einzelne Frequenz

%% Output: frequenzbezogene decay-rate d(x) als 1x18-double

% Berechnung d - dair
athmos_abs_v1 %Berechnung der
Athmosphärendämpfung d = d - dair; %Abzug der Dämpfung durch die
Athmosphäre d_output(n,:) = d; %speichert d(1,18) in die Tabelle
output(n,18) n = n+1; %inkrementiert n für beliebige
Anzahl an Zeilen end %Ende If-Namesprüfung
end %Ende for-Schleife z
end %Ende for-Schleife y
end %Ende for-Schleife x

disp (append("d", " ", Lx, " ", Px, " abgeschlossen"));

%% for-Schleife berechnet für alle Frequenzen die relative Standardabweichung nach
C423

for k = 1:18
a(:,k) = std(d_output(:,k),1)/mean(d_output(:,k));
end

%disp ('Berechnung Standardabweichung decayrate abgeschlossen');

```

- **athmos_abs_v1.m**

01.12.23 18:51 C:\Users\Ruben\Documen...\athmos_abs_v1.m 1 of 2

```
%% Berechnung der Temperaturkonstante m
% Autor: Ruben Bahner
% Stand: 01.12.2023
clear Spk
clear temp
clear alpha
clear dair

%% Parameterdefinition Lautsprecher, Prüfobjekt, x , y , z

%x = 2;
%y = 0;
%z = 0;
%Lx = "L3";
%Px = "e";
pr = 101.325; % [kPa]
T0 = 293.15; % [K]
Frequenzen = [100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600,
2000, 2500, 3150, 4000, 5000]; %Frequenzen

%% Daten einlesen

klima = readtable("Temperatur_und_Luftfeuchte.xlsx", "DataRange", "C4:J504");
klima.Properties.VariableNames = ["Pruefobjekt", "Lautsprecher", "x", "y", "z",
"Temperatur", "Luftfeuchte", "Luftdruck"];

%% Daten umformatieren für weitere Nutzung

klima.Pruefobjekt = cell2mat(klima.Pruefobjekt);

Lautsprecherpos = klima.Lautsprecher;
Lautsprecherposarray = cell2mat(Lautsprecherpos);

for j = 1:height(Lautsprecherposarray)
    Spk(j) = string(append(Lautsprecherposarray(j,1), Lautsprecherposarray(j,2)));
end

Spk = Spk';

klima.Lautsprecher = Spk;

%% Suchen der Parameter für die gewählte Prüfobjekt - Lautsprecher - Mikrofonposition

for kek = 1:height(klima.Lautsprecher)
    if klima.Pruefobjekt(kek) == Px & klima.Lautsprecher(kek) == Lx & klima.x(kek) ==
x(x3) & klima.y(kek) == y(x4) & klima.z(kek) == z(x5)
        Zeile = kek;
    end
end

Test = exist('Zeile'); % schaut, ob Zeile vorhanden ist, nein = keine Daten, ja =
Daten vorhanden

if Test == 1 % prüft, ob Test 1 oder 0 ist, wenn 1,
```

01.12.23 18:51 C:\Users\Ruben\Documen...\athmos abs v1.m 2 of 2

```

dann Auslesen der Daten
    temp = table2array(klima(Zeile,6)); % Temperatur
    RH = table2array(klima(Zeile,7)); % Luftfeuchte
    pa = table2array(klima(Zeile,8)); % Luftdruck;
end

if Test == 0
    dair = 0;
end

%% Berechnung der Luftdämpfungskonstante alpha nach ISO 9613-1
if Test == 1
    T = 273.15+temp; % [K]
    c = 331.5+0.6*(temp);
    h = (RH.*(10^(-6.8346*((273.16)/(T)).^1.261)+4.6151)))/(pa./pr);

    fro = (pa./pr)*(24+(4.04.*(10^(4)).*h.*((0.02+h)/(0.391+h))));
    frn = (pa./pr)*(1/(sqrt(T/T0)).*(9+280.*h.*exp(-4.17.*(1/(nthroot((T/T0),3))
-1)))));

%Berechnet alle alpha für alle 18 Frequenzen für die gewählte XYZ-Position

    for fr = 1:length(Frequenzen)
        alpha(fr,1) = 8.686.*(Frequenzen(fr).^2).*((1.84.*(10.^(-11)).*(1/(pa./pr)).*
(sqrt(T./T0)))+(1/(sqrt((T./T0)^5))).*(0.01275.*(exp(-2239.1./T)).*((fro+((Frequenzen
(fr).^2)./fro)).^-1)+(0.1068.*(exp(-3352./T)).*(1/(frn+((Frequenzen(fr).^2).
/frn))))));
    end

    alpha = alpha';

    dair = alpha .*c; %frequenzabhängige decay-rate durch Luftabsorption
end

```

MATLAB-Programme zur Berechnung des Degree of Time Series Fluctuation• **dtf_main.m**

01.12.23 16:10 C:\Users\Ruben\Documents\Ma...\dtf main.m 1 of 3

```
%% Hauptprogramm zur Berechnung des Degree of time Series Fluctuation (DTF) nach Hanyu
2014
% * Autor: Ruben Bahner
% * Stand: 01.12.2023
%
tic %Anfang Zeitmessung

%% Abfrage gewünschte Lautsprecher - Prüfobjekt - Kombination
Speaker = "Lautsprecherposition L1, L2, L3? ";

Lx = input(Speaker);

prf = "Prüfobjekt k, e, f? ";

Px = input(prf);

%% Variablendefinition

switch Lx
    case "L1"
        spk = "L1";
    case "L2"
        spk = "L2";
    case "L3"
        spk = "L3";
end

switch Px
    case "e"
        pruef = "pruef1cm";
    case "k"
        pruef = "keinpruef";
    case "f"
        pruef = "pruef5cm";
end

Ab = 20;           % Auswertebereich
Fs = 44100;       % Samplingfrequenz
x = 0:3;          % x-Koordinatendefinition
y = 0:6;          % y-Koordinatendefinition
z = 0:2;          % z-Koordinatendefinition
n = 1;            % Definition Variable zum hochzählen
L_5dB = zeros(1,18); % Beginn des Auswertebereichs
L_end = zeros(1,18); % Ende des Auswertebereichs
OGF = 6000;       % Obere Mittenfrequenz der Frequenzbandanalyse [Hz]
UGF = 100;        % Untere Mittenfrequenz der Frequenzbandanalyse [Hz]

pfad = append("C:\Users\Ruben\Documents\Masterarbeit\Uebergabe_230816\Messungen\");
pruef, "\", spk);

cd (pfad)

%% Start des Berechnungsvorgangs

for x3 = 1:length(x) %for-Schleife x
```

01.12.23 16:10 C:\Users\Ruben\Documents\Ma...\dtf main.m 2 of 3

```

    for x4 = 1:length(y)    %for-Schleife y
        for x5 = 1:length(z)    %for-Schleife z

name = (append("MA_",Px,"_",Lx,"_",num2str(x(x3)),"_",num2str(y(x4)),"_",num2str(z
(x5)),"_IP.txt"));

        if isfile(name) == 1                %prüfen, ob Datei aus
(name) vorhanden

            Impulsantwort = readtable(name,'VariableNamingRule','preserve');
            Impulsantwort = table2array(Impulsantwort);

%% Berechnung

%Variableninitialisierung

            Impulsantwort_gedreht = zeros(length(Impulsantwort),18);
            Erg_int = zeros(length(Impulsantwort),18);
            Erg_int2 = zeros(length(Impulsantwort),18);

%Filterung (zur Oktav-/Terzfilterung '1 octave' oder '1/3 octave' eingeben)
            octFiltBank = octaveFilterBank('1/3 octave','FrequencyRange',[UGF,
OGF],'SampleRate',Fs);
            FilterImpulsantworten = octFiltBank(Impulsantwort);
            Mittenfrequenzen = getCenterFrequencies(octFiltBank);

%Ermittlung Anfang & Ende Impulsantwort

            for r = 1:18
                Impulsantwort_gedreht(:,r) = flipud(FilterImpulsantworten(:,r));
% Drehen der Impulsantwort
                Erg_int(:,r)=flipud(cumsum(Impulsantwort_gedreht(:,r).^2));
% Berechnung Energieabfallkurve Es
                Erg_int2(:,r)=(20*log10(Erg_int(:,r)/(2*10^-5)));
% Darstellung Energieabfallkurve in Pegeln
                L_5dB(:,r) = find(Erg_int2(:,r) < max(Erg_int2(:,r))-5,1);
% Anfang Analysebereich mit -5 dB finden
                L_end(:,r) = find(Erg_int2(:,r) < max(Erg_int2(:,r))-5-Ab,1);
% Ende Analysebereich mit -5 dB & -Analysebereich finden
                end

                dtf_dtf_v2
% Berechnung der DTF in separatem Programm

                DTF_all(:,n) = DTF(:,1);
                Koordinaten(n,:) = (append("x",num2str(x3-1),"y",num2str(x4-1),"z",
num2str(x5-1)));
                n = n+1;

            end %Ende If-Namensprüfung
        end    %Ende z-Schleife
    end        %Ende y-Schleife
end            %Ende x-Schleife

```

01.12.23 16:10 C:\Users\Ruben\Documents\Ma...\dtf main.m 3 of 3

```
%% Mittelung aller DTF pro Frequenz
for k = 1:18
    DTF_mittel(k,:) = mean(DTF_all(k,:));
end

toc %Ende Zeitmessung
display('fertig');

%% Plotten
Frequenzen = {"100Hz","125Hz","160Hz","200Hz","250Hz","315Hz","400Hz","500Hz","↙
630Hz","800Hz","1000Hz","1250Hz","1600Hz","2000Hz","2500Hz","3150Hz","4000Hz","↙
5000Hz"};
xaxis = 1:18;
plot(xaxis,DTF_mittel);
title ("Degree of time series fluctuation (DTF)");
%legend (Koordinaten,'Orientation','vertical','NumColumns', 2);
%legend ("k L1", "e L1", "f L1",'Orientation','vertical','NumColumns', 1);
%legend ("k L1 - Mittelwert Pos. x4 y7", "k L1 - Mittelwert Pos. x5 y8", "k L1 -↙
Mittelwert Pos. x6 y9","k L1 - Mittelwert↙
normgerecht",'Orientation','vertical','NumColumns', 1,'Location','southeast');
%legend ("k L2 - Mittelwert Pos. x4 y7", "k L2 - Mittelwert Pos. x5 y8", "k L2 -↙
Mittelwert Pos. x6 y9","k L2 - Mittelwert↙
normgerecht",'Orientation','vertical','NumColumns', 1,'Location','southeast');
lgd.Layout.Tile = 'east';
grid on, grid minor;
xticks([1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18]);
xticklabels(Frequenzen);
ylim ([50 100]); %bei DTF_mittel
%ylim ([3 22]); %bei DTF_all
ylabel("DTF [-]");
xlabel("Frequenzbereich");
%}
```


- **dtf_dtf_v2.m**

01.12.23 16:11 C:\Users\Ruben\Documents\...\dtf dtf v2.m 1 of 1

```

%% Berechnungsprogramm zur Ermittlung der DTF aus den gefilterten Impulsantworten nach
Hanyu 2014
% * Autor: Ruben Bahner
% * Stand: 01.12.2023
%
%% Variableninitialisierung
aufloesung = 100;
z_k = zeros(aufloesung,1);

%% For-Schleife zur frequenzabhängigen Berechnung der DTF
for freq = 1:width(FilterImpulsantworten)

    g2_t_quad = FilterImpulsantworten(:,freq).^2;           %quadrierte Impulsantwort

    g2_t = g2_t_quad./(Erg_int(:,freq));                   %quadrierte Impulsantwort
    durch Energieabfallkurve Es = Nachhallzeitkorrigierte Impulsantwort

    g_t = sqrt(g2_t);                                     %Quadrieren der
    nachhallzeitkorrigierten Impulsantwort

    g_t = g_t(L_5dB(freq):L_end(freq));                   %Festlegen von Anfang und Ende
    der nachhallzeitkorrigierten Impulsantwort

    h_t = g_t./(sqrt(mean(g_t.^2)));                      %Berechnung der normalisierten
    nachhallzeitkorrigierten Impulsantwort

    R_total = sum(h_t.^2);                                % Berechnung Integral Rtotal
    mit t1 = L_5dB & t2 = L_end

    % Beschreibung Funktionsweise for-schleife tr
    % for-Schleife "scannt" durch R(k)/R_total durch mit (1/x)*max(h_t.^2) bis (x/x)*max
    (h_t.^2)
    %

    for tr = 1:aufloesung
        z_k(tr,:) = sum(h_t(h_t.^2 > ((max(h_t.^2)*tr)/aufloesung)).^2)./R_total;
    end

    % Beschreibung Funktionsweise DTF-Funktion
    % Funktion sucht die Anzahl der Positionen der Werte, bei denen z_k >= 0.01 ist,
    % dividiert sie durch die maximale Anzahl und multipliziert sie mit dem
    % höchsten Wert in h_t.^2, je höher die Auflösung, umso genauer das
    % Ergebnis

    DTF(freq,:) = (length(z_k(z_k >= 0.01)));

end

```

- **T_dtf_v1.m**

01.12.23 16:11 C:\Users\Ruben\Documents\Ma...\T_dtf_v1.m 1 of 1

```
%% Berechnung der Nachhallzeit nach Hanyu 2014
% * Autor: Ruben Bahner
% * Stand: 29.09.2023
%
%% Variableninitialisierung
T = zeros(18,1);

%% frequenzabhängige Berechnung der Nachhallzeit
for s = 1:18

    g2_t_quad = FilterImpulsantworten(:,s).^2;           %quadrierte Impulsantwort

    g2_t = g2_t_quad./(Erg_int(:,s));                   %quadrierte Impulsantwort durch
    Energieabfallkurve Es = Nachhallzeitkorrigierte Impulsantwort

    g2_t = g2_t(L_5dB(s):L_end(s),:);                   %Festlegen von Anfang und Ende der
    nachhallzeitkorrigierten Impulsantwort

    T(s,1) = 13.82/(mean(g2_t)*Fs);                     %Berechnung der Nachhallzeit

end
```

Anlage A.3 - Berechnungsergebnisse s_{rel}

In folgender Tabelle sind die Berechnungsergebnisse der MATLAB-Skripte dargestellt, welche in den Diagrammen in Kapitel 4.1 genutzt wurden. Die Tabelle gibt die relative Standardabweichung s_{rel} für das Terzband zwischen 100 Hz bis 5000 Hz für jede Lautsprecher-Prüfobjekt-Kombination, gemittelt über alle gewählten Mikrofonpositionen, an.

| Fre- quenz | L1 k | L1 e | L1 f | L2 k | L2 e | L2 f | L3 k | L3 e | L3 f |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 100 Hz | 0,148 | 0,125 | 0,115 | 0,137 | 0,113 | 0,095 | 0,174 | 0,086 | 0,096 |
| 125 Hz | 0,189 | 0,168 | 0,085 | 0,115 | 0,143 | 0,107 | 0,155 | 0,180 | 0,099 |
| 160 Hz | 0,066 | 0,081 | 0,082 | 0,097 | 0,133 | 0,062 | 0,134 | 0,187 | 0,076 |
| 200 Hz | 0,117 | 0,120 | 0,116 | 0,113 | 0,120 | 0,111 | 0,112 | 0,137 | 0,145 |
| 250 Hz | 0,110 | 0,129 | 0,089 | 0,103 | 0,130 | 0,135 | 0,104 | 0,100 | 0,107 |
| 315 Hz | 0,064 | 0,077 | 0,084 | 0,070 | 0,073 | 0,113 | 0,054 | 0,064 | 0,074 |
| 400 Hz | 0,045 | 0,055 | 0,087 | 0,065 | 0,060 | 0,073 | 0,084 | 0,067 | 0,088 |
| 500 Hz | 0,044 | 0,051 | 0,087 | 0,053 | 0,064 | 0,075 | 0,047 | 0,062 | 0,072 |
| 630 Hz | 0,054 | 0,050 | 0,073 | 0,050 | 0,062 | 0,061 | 0,071 | 0,052 | 0,072 |
| 800 Hz | 0,059 | 0,063 | 0,067 | 0,061 | 0,063 | 0,073 | 0,055 | 0,060 | 0,068 |
| 1000 Hz | 0,042 | 0,048 | 0,061 | 0,050 | 0,051 | 0,068 | 0,052 | 0,043 | 0,070 |
| 1250 Hz | 0,054 | 0,059 | 0,058 | 0,043 | 0,046 | 0,068 | 0,046 | 0,046 | 0,049 |
| 1600 Hz | 0,037 | 0,044 | 0,038 | 0,044 | 0,038 | 0,039 | 0,042 | 0,053 | 0,048 |
| 2000 Hz | 0,038 | 0,034 | 0,038 | 0,041 | 0,036 | 0,037 | 0,037 | 0,037 | 0,047 |
| 2500 Hz | 0,022 | 0,033 | 0,040 | 0,023 | 0,035 | 0,038 | 0,032 | 0,033 | 0,039 |
| 3150 Hz | 0,028 | 0,036 | 0,036 | 0,033 | 0,035 | 0,024 | 0,024 | 0,034 | 0,033 |
| 4000 Hz | 0,023 | 0,031 | 0,034 | 0,032 | 0,034 | 0,039 | 0,031 | 0,031 | 0,037 |
| 5000 Hz | 0,033 | 0,042 | 0,036 | 0,037 | 0,031 | 0,041 | 0,029 | 0,032 | 0,035 |

Anlage A.4 - Berechnungsergebnisse CI_{tot}

In folgender Tabelle sind die Berechnungsergebnisse der MATLAB-Skripte dargestellt, welche in den Diagrammen in Kapitel 4.2 genutzt wurden. Die Tabelle gibt Das totale Konfidenzintervall CI_{tot} für das Terzband zwischen 100 Hz bis 5000 Hz für jede Lautsprecher-Prüfobjekt-Kombination, gemittelt über alle gewählten Mikrofonpositionen, an.

| Fre- quenz | L1 k | L1 e | L1 f | L2 k | L2 e | L2 f | L3 k | L3 e | L3 f |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 100 Hz | 1,584 | 1,581 | 1,666 | 2,240 | 2,250 | 2,225 | 1,987 | 2,072 | 1,940 |
| 125 Hz | 1,546 | 1,874 | 1,599 | 2,523 | 2,493 | 2,455 | 2,360 | 2,256 | 2,238 |
| 160 Hz | 2,180 | 2,034 | 2,018 | 1,917 | 1,992 | 1,704 | 1,490 | 1,414 | 1,364 |
| 200 Hz | 1,151 | 1,106 | 1,036 | 1,379 | 1,333 | 1,433 | 1,050 | 0,923 | 1,004 |
| 250 Hz | 1,910 | 1,674 | 1,769 | 1,549 | 1,516 | 1,479 | 1,827 | 1,615 | 1,783 |
| 315 Hz | 0,764 | 0,758 | 0,967 | 0,699 | 0,810 | 0,886 | 0,783 | 0,876 | 0,965 |
| 400 Hz | 0,497 | 0,623 | 0,657 | 0,726 | 0,812 | 0,926 | 0,770 | 0,800 | 0,843 |
| 500 Hz | 0,618 | 0,775 | 0,670 | 0,653 | 0,599 | 0,843 | 0,531 | 0,563 | 0,525 |
| 630 Hz | 0,500 | 0,459 | 0,644 | 0,416 | 0,467 | 0,602 | 0,436 | 0,405 | 0,581 |
| 800 Hz | 0,461 | 0,469 | 0,775 | 0,514 | 0,566 | 0,776 | 0,438 | 0,503 | 0,617 |
| 1000 Hz | 0,420 | 0,489 | 0,543 | 0,418 | 0,462 | 0,534 | 0,415 | 0,383 | 0,433 |
| 1250 Hz | 0,410 | 0,439 | 0,710 | 0,494 | 0,443 | 0,594 | 0,491 | 0,431 | 0,538 |
| 1600 Hz | 0,419 | 0,418 | 0,547 | 0,342 | 0,381 | 0,414 | 0,293 | 0,350 | 0,453 |
| 2000 Hz | 0,343 | 0,357 | 0,486 | 0,233 | 0,294 | 0,420 | 0,267 | 0,288 | 0,476 |
| 2500 Hz | 0,443 | 0,454 | 0,481 | 0,349 | 0,393 | 0,462 | 0,347 | 0,386 | 0,456 |
| 3150 Hz | 0,253 | 0,289 | 0,366 | 0,276 | 0,340 | 0,444 | 0,237 | 0,295 | 0,362 |
| 4000 Hz | 0,259 | 0,256 | 0,396 | 0,247 | 0,323 | 0,379 | 0,209 | 0,236 | 0,390 |
| 5000 Hz | 0,234 | 0,321 | 0,298 | 0,266 | 0,341 | 0,423 | 0,238 | 0,307 | 0,292 |

Anlage A.5 - Berechnungsergebnisse DTF

In folgender Tabelle sind die Berechnungsergebnisse der MATLAB-Skripte dargestellt, welche in den Diagrammen in Kapitel 4.3 genutzt wurden. Die Tabelle gibt den jeweiligen Wert DTF für das Terzband zwischen 100 Hz bis 5000 Hz für jede Lautsprecher-Prüfobjekt-Kombination, gemittelt über alle gewählten Mikrofonpositionen, an.

| Fre- quenz | L1 k | L1 e | L1 f | L2 k | L2 e | L2 f | L3 k | L3 e | L3 f |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 100 Hz | 95,46 | 95,79 | 96,00 | 95,43 | 96,28 | 96,67 | 94,82 | 96,26 | 96,38 |
| 125 Hz | 94,44 | 94,72 | 95,05 | 95,24 | 95,56 | 96,10 | 94,33 | 95,67 | 96,28 |
| 160 Hz | 93,31 | 95,03 | 95,51 | 94,67 | 95,77 | 96,38 | 95,03 | 95,74 | 95,79 |
| 200 Hz | 93,95 | 95,13 | 95,54 | 94,48 | 95,79 | 96,36 | 94,05 | 95,03 | 95,82 |
| 250 Hz | 92,82 | 93,49 | 95,28 | 93,29 | 93,92 | 94,44 | 93,15 | 93,44 | 94,10 |
| 315 Hz | 92,18 | 92,67 | 94,38 | 90,48 | 91,77 | 92,77 | 91,23 | 91,62 | 93,74 |
| 400 Hz | 90,77 | 91,56 | 92,49 | 90,83 | 89,77 | 92,10 | 89,33 | 91,59 | 93,54 |
| 500 Hz | 90,26 | 90,46 | 92,85 | 87,98 | 90,92 | 92,28 | 89,33 | 90,79 | 92,85 |
| 630 Hz | 89,10 | 92,21 | 92,67 | 88,69 | 90,97 | 92,18 | 89,51 | 89,36 | 93,15 |
| 800 Hz | 86,69 | 90,82 | 92,87 | 88,76 | 90,62 | 92,26 | 87,85 | 89,82 | 92,49 |
| 1000 Hz | 85,18 | 88,26 | 90,31 | 86,38 | 89,46 | 91,18 | 88,77 | 88,90 | 89,62 |
| 1250 Hz | 81,62 | 86,49 | 89,64 | 85,07 | 87,15 | 90,31 | 86,23 | 87,33 | 89,15 |
| 1600 Hz | 82,56 | 85,97 | 88,95 | 82,88 | 86,62 | 87,74 | 83,87 | 87,46 | 87,62 |
| 2000 Hz | 82,85 | 85,36 | 83,62 | 80,62 | 81,74 | 86,85 | 79,08 | 85,23 | 86,59 |
| 2500 Hz | 80,28 | 82,79 | 82,74 | 78,62 | 84,08 | 85,05 | 77,79 | 81,00 | 84,31 |
| 3150 Hz | 78,23 | 83,51 | 83,31 | 78,71 | 81,72 | 84,69 | 79,51 | 83,72 | 84,13 |
| 4000 Hz | 80,26 | 82,54 | 82,56 | 79,21 | 81,46 | 83,59 | 81,23 | 82,36 | 85,33 |
| 5000 Hz | 81,28 | 83,36 | 81,18 | 77,36 | 81,54 | 82,54 | 78,33 | 81,79 | 84,77 |

Anlage A.6 - Datenblatt Messmikrofon

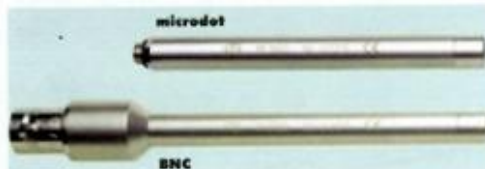


SEIT 1928 KONDENSATORMIKROFONE
FÜR STUDIO - UND MESSTECHNIK

MICROTECH GEFELL 

M 360 /
1/4" ELEKTRET-MESSMIKROFON Klasse 1 DIN EN 60 651
Konstantstromgespeist

M 365
unselektiert, Konstantstromgespeist



Mit dem stromgespeisten 1/4" Elektret-Messmikrofon M 360 wird ein durch seinen günstigen Preis bestehender Sensor mit den Standards moderner Vielkanalmesstechnik angeboten. Als typische Anwendungen kommen Array-Anordnungen und Hüllflächenmessverfahren, z.B. in der Kraftfahrzeugakustik, in Betracht.

Frequenzbereich 20 Hz ... 20 kHz, Freifeld

Schalldruckpegel von 35 dB ... 130 dB

Die Klasse 1-Tauglichkeit*, die mit 12,5 mV/Pa außerordentlich hohe Empfindlichkeit in dieser Kategorie und der 7 mm Standarddurchmesser gelten als besondere Vorzüge und sind vergleichbar mit konventionellen Kondensatormessmikrofonen.

Elektretkapsel und Vorverstärkerschaltung bilden in einem zylindrischen Metallgehäuse eine untrennbare Einheit.

Der elektrische Anschluss des Messmikrofones erfolgt über eine 10-32 microdot- oder BNC Flanschdose. Das Mikrofon kann mit dem Pistonfon 5002 sowie gebräuchlichen Schalldruckkalibratoren unter Verwendung eines 1/4" Adapters unter Beachtung von Korrekturwerten einpunkt- und breitbandkalibriert werden.

Mit dem 10-32 microdot- oder BNC Stecker findet das Messmikrofon direkt an üblichen stromgespeisten Messkanälen Verwendung z.B. *ICP® und *Delta Tron®. Als optionales Zubehör werden der in seiner konischen Form auf das Schallfeld abgestimmte Mikrofonhalter MH 64 für Ø 7 mm oder 1/2", kundenspezifische Halteelemente mit mehreren Freiheitsgraden und ein erweiterbares 3x4 Mikrofon-Array MA 300 geliefert. Das Mikrofon kann mit dem Windschutz W 3 bestückt werden.

Optisch sticht der Sensor durch seine mattvernickelte und lasergravierte Oberfläche hervor.

*registrierte Markenzeichen: ICP® PCB Piezotronics Inc. / Delta Tron® Brüel & Kjaer

LIEFERUMFANG

| | |
|---|------------------------------------|
| Messmikrofon M 360 /M365 im Holzetui L x B x H 127 x 87 x 55 mm | |
| mit Microdot-Stecker | Best.Nr. 311125 |
| mit BNC-Stecker | Best.Nr. 311126(M360)/311136(M365) |

ZUBEHÖR, optional

| | |
|--|-----------------|
| Mikrofonhalter MH 64 Ø 7,0 mm | Best.Nr. 302335 |
| Mikrofonhalter MH 64 1/2" | Best.Nr. 302332 |
| Windschutz | Best.Nr. 302330 |
| MA 300-Set Array mit 12 Stück M 360 335 x 265 mm | Best.Nr. 313010 |

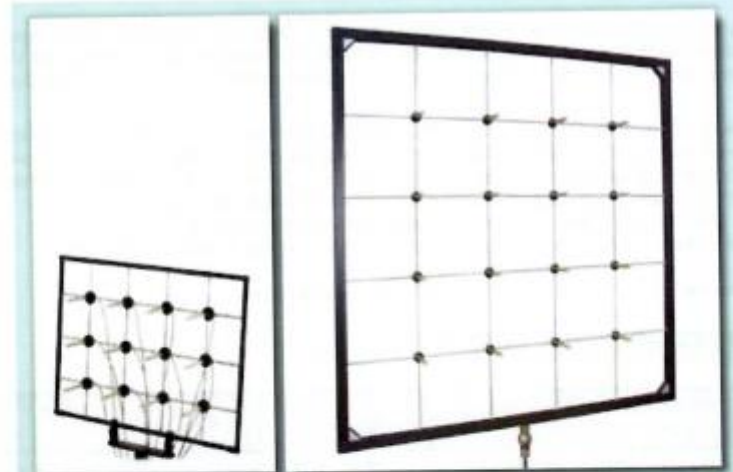
SEIT 1928 KONDENSATORMIKROFONE FÜR STUDIO - UND MESSTECHNIK
MICROTECH GEFELL 

| | | | |
|---|--------------------------|---------------------|-----------------|
| MA 300 | Array für 12 Mikrofone | 335 x 265 mm | Best.Nr. 303010 |
| MF 97 Metallfuß, | | Ø 180 mm für MA 300 | Best.Nr. 202323 |
| MA 301-Set | Array mit 16 Stück M 360 | 770 x 770 mm | Best.Nr. 313011 |
| MA 301 | Array für 16 Mikrofone | 770 x 770 mm | Best.Nr. 303011 |
| Kundenspezifische Halteelemente auf Anfrage | | | |



M 360 mit MH 64 Ø 7mm

M 360 mit MH 64 1/2"



MA 300-Set Array mit 12 Stück M 360

MA 301-Set Array mit 16 Stück M 360

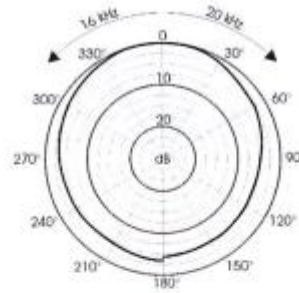
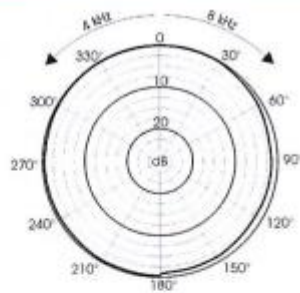
TECHNISCHE DATEN CE Zertifikat

| | |
|--|---|
| Elektret-Messmikrofon | M 360 |
| Wandlertyp | Elektret-Druckempfänger |
| Charakteristik | Kugel |
| Frequenzbereich des Freifeldübertragungsmaßes M360 | 20 Hz ... 20 kHz*; Klasse 1 DIN EN 60 651 |
| Übertragungsfaktor | 12,5 mV/Pa |

SEIT 1928 KONDENSATORMIKROFONE FÜR STUDIO - UND MESSTECHNIK
MICROTECH GEFELL 

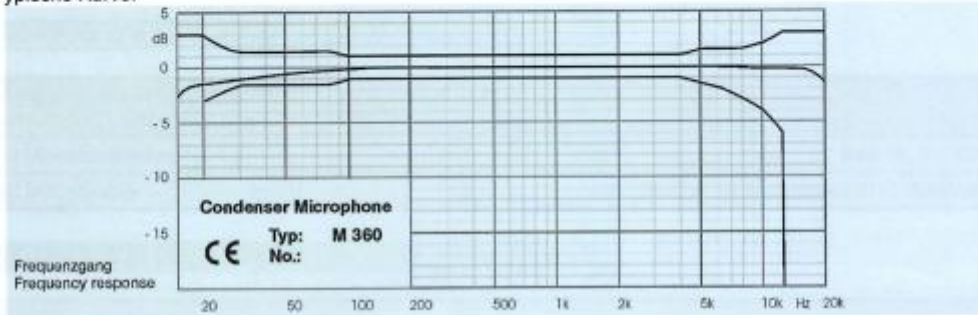
| | |
|---|----------------------|
| Grenzschalldruckpegel für 1% Klirrfaktor bei 1 kHz | 130 dB |
| Ersatzgeräuschpegel DIN EN 60 651 | 35 dB A |
| Betriebsstrom | 2 ... 10 mA |
| Empfohlene Leerlaufspannung des Speisegerätes | 24 ... 30 V DC |
| Arbeitstemperaturbereich | -10 °C ... +50 °C |
| Lagertemperaturbereich | -20 °C ... +70 °C |
| Steckverbinder | 10-32 Microdot / BNC |
| Durchmesser | 7 / 12,7 mm |
| Länge | 72 / 96 mm |
| Gewicht | 9 / 21 g |
| *nach unten erweiterter Frequenzbereich auf Anfrage | |

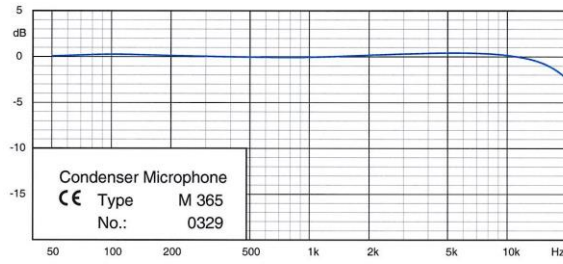
POLARDIAGRAMME



FREQUENZGANG

Typische Kurve:





Calibration Chart


Sensitivity S : -36.0 dB re 1V/Pa
 equivalent to : 15.9 mV/Pa

Calibration Conditions

Ambient Static Pressure : 94.9 kPa
 Ambient Temperature : 23 °C
 Relative Humidity : 50 %

— Zero Degree Incidence

Date : 19.11.2010

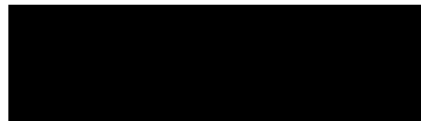
Signature : 

MICROTECH GEFELL GMBH 

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Chemnitz, 03.12.2023



Ort, Datum

Vorname Nachname