

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr

**Linus Staubach**

**Einordnung von Methoden zur  
Bewertung der Qualität diffu-  
ser Schallfelder basierend auf  
Messungen im Modellmaßstab**

**2023**

---

**BACHELORARBEIT**

---

**Einordnung von Methoden zur  
Bewertung der Qualität diffu-  
ser Schallfelder basierend auf  
Messungen im Modellmaßstab**

Autor/in:  
**Herr Linus Staubach**

Studiengang:  
**Media and Acoustical Engineering**

Seminargruppe:  
**MG19wC-B**

Erstprüfer:  
**Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt**

Zweitprüfer:  
**Dr.-Ing. Andreas Meier**

Einreichung:  
Dresden, 09.05.2023

# **BACHELOR THESIS**

---

## **Classification of methods for assessing the quality of dif- fuse sound fields based on model-scale measurements**

author:

**Mr. Linus Staubach**

course of studies:

**Media and Acoustical Engineering**

seminar group:

**MG19wC-B**

first examiner:

**Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt**

second examiner:

**Dr.-Ing. Andreas Meier**

submission:

Dresden, 09.05.2023

---

## **Bibliografische Angaben**

Staubach, Linus:

Einordnung von Methoden zur Bewertung der Qualität diffuser Schallfelder basierend auf Messungen im Modellmaßstab

Classification of methods for assessing the quality of diffuse sound fields based on model-scale measurements

53 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,  
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2023

## **Abstract**

Eine Grundlage für viele akustische Herleitungen bietet das diffuse Schallfeld. Es gibt die Möglichkeit, die Schallausbreitung in einem Raum idealisiert und einfach darzustellen. Anwendungen finden sich beispielsweise bei der Bestimmung von Schallabsorptionsgraden oder Schalleistungen im Hallraum wieder. Für eine hohe Messgenauigkeit muss dabei eine ausreichende Diffusität des Schallfeldes vorhanden sein. Um das zu erreichen, wird optimalerweise bereits in der Planungsphase von Hallräumen eine geeignete Konstruktion erarbeitet.

In Normwerken finden sich bereits Verfahren, die diffuse Schallfelder für Prüfanwendungen qualifizieren sollen. Diese Arbeit befasst sich mit alternativen Methoden, diffuse Schallfelder in statischen Raumzuständen zu qualifizieren. Sie werden in einem Modellhallraum im Modellmaßstab 1:10 geprüft und anschließend auf ihre Praktikabilität und Genauigkeit untersucht

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Formelverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>X</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>2</b>
2.1 Der Hallraum.....	2
2.2 Diffuses Schallfeld.....	3
2.2.1 Schallausbreitung im Raum .....	3
2.2.2 Diffusoren .....	7
2.2.3 Ansätze zur Bestimmung von Diffusität.....	8
2.3 Modellmesstechnik.....	11
2.4 Die Impulsantwort .....	12
2.4.1 Methoden zur Bestimmung der Nachhallzeit.....	13
2.4.2 Berechnung von schalldruckpegel- und schallenergieäquivalenten Größen.....	16
<b>3. Messaufbau und -durchführung</b> .....	<b>17</b>
3.1 Messaufbau .....	17
3.1.1 Hallraum .....	17
3.1.2 Messtechnik.....	20
3.1.3 Absorberelemente .....	21
3.2 Prüfung der Diffusität nach ISO 354 .....	23
3.2.1 Normverfahren.....	23
3.2.2 Der Messreihe angepasstes Verfahren.....	25
3.3 Messparameter .....	25
3.3.1 Degree of Time Series Fluctuation.....	25
3.3.2 Standardabweichung der räumlich verteilten Nachhallzeiten .....	27

---

3.3.3	Standardabweichung der räumlich verteilten Schallenergien .....	29
<b>4.</b>	<b>Ergebnisdiskussion.....</b>	<b>31</b>
4.1	Messergebnisse .....	31
4.1.1	Degree of Time Series Fluctuation.....	31
4.1.2	Standardabweichung der räumlich verteilten Nachhallzeiten .....	34
4.1.3	Standardabweichung der räumlich verteilten Schallenergien .....	42
4.2	Fehlerbetrachtungen .....	47
<b>5.</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>52</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
	<b>Anlagen.....</b>	<b>V</b>
Anhang A	MATLAB-Berechnungsskripte zur Messreihenauswertung.....	V
Anhang B	Konstruktionsmaße des Hallraummodells .....	XX
Anhang C	Messbedingungen.....	XXII
Anhang D	Strömungswiderstände der Absorbermaterialien .....	XXV
Anhang E	Bilder.....	XXVII
	<b>Eigenständigkeitserklärung .....</b>	<b>XXXI</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
$A$	Abklingrate	-
$A_{\text{eq}}$	Äquivalente Absorptionsfläche	$[\text{m}^2]$
$A_{\text{T}}$	Äquivalente Absorptionsfläche des Prüfkörpers bei der Absorptionsgradbestimmung im Hallraumverfahren	$[\text{m}^2]$
$A(t)$	Momentane Abklingrate	-
$A_1; A_2$	Äquivalente Absorptionsfläche des prüfkörperunbesetzten und -besetzten Hallraumes	$[\text{m}^2]$
$B$	Halbwertsbreite von Moden	$[\text{Hz}]$
$C_{\text{ref}}$	Beliebig gewählte Referenzkonstante zur Pegelbildung	-
$c; c_1; c_2; c'$	Schallgeschwindigkeit (allgemein; im prüfkörperunbesetzten Hallraum; im prüfkörperbesetzten Hallraum; im Modellmaßstab)	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$
DTF	Degree of Time Series Fluctuation	-
$d$	Kleinste Länge eines Diffusorelementes	$[\text{m}]$
EDC	Energy Decay Curve	-
$E_i; E_0; \bar{E}$	Schallenergie (am Punkt $i$ ; an einem beliebigen Punkt; räumliches Mittel)	$[\text{Pa}^2\text{s}]$
$E_s(t)$	Schröder rückwärtsintegrierte Form der Impulsantwort	-
$e$	Eulersche Zahl	-
$f; f'$	Frequenz (allgemein; im Modellmaßstab)	$[\text{Hz}]$
$f_a$	Abtastfrequenz	$[\text{Hz}]$
$f_{g,o}$	Obere Grenzfrequenz der Messmikrofone	$[\text{Hz}]$
$f_{\text{klein,h,diffus}};$ $f_{\text{groß,h,diffus}}$	Durch die Höhe des kleinen und großen Diffusors bedingte untere Wirkfrequenz dessen diffundierender Wirkung	$[\text{Hz}]$
$f_{\text{klein,d,diffus}};$ $f_{\text{groß,d,diffus}}$	Durch den Durchmesser des kleinen und großen Diffusors bedingte untere Wirkfrequenz dessen diffundierender Wirkung	$[\text{Hz}]$
$f_{l,m,n}$	Eigenfrequenz eines dreidimensionalen Raumes mit den Modenordnungen der drei Dimensionen $l, m$ und $n$	$[\text{Hz}]$
$f_m$	Mittenfrequenz eines Frequenzbandes	$[\text{Hz}]$
$f_{n_x}$	Resonanzfrequenz eines eindimensionalen Systems	$[\text{Hz}]$
$f_s$	Schröderfrequenz	$[\text{Hz}]$
$f_{s,Z0}; f_{s,Z18}$	Schröderfrequenz der Diffusorbelegungszustände „Z0“ und „Z18“	$[\text{Hz}]$
$g(t)$	Hallkorrigierte Impulsantwort	-
$h; h_{\text{min}}$	Relative Luftfeuchte (allgemein; Mindestwert während Hallraummessungen)	$[\%]$

$h(t)$	Hallkorrigierte, normalisierte Impulsantwort	-
$I; \vec{I}; \bar{I}$	Schallintensität (allgemein; vektoriell; räumliches Mittel)	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
ICP	Integrated Circuit Piezoelectric	-
IEPE	Integrated Electronics Piezo Electric	-
$I_\varepsilon$	Durch eine Wand reflektierte Schallintensität	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$I_\rho$	Auf eine Wand einfallende Schallintensität	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
$k$	Schwellenwert bei der Bestimmung des Degree of Time Series Fluctuation	-
LTI	Linear Time-Invariant	-
$L_0$	Aus einer Impulsantwort errechneter Raumpegel	[dB]
$L_1$	Erster Pegel, der die erste Zeitgrenze $t_1$ der Nachhallzeitbestimmungsgrenzen bestimmt	[dB]
$L_2$	Zweiter Pegel, der die zweite Zeitgrenze $t_2$ der Nachhallzeitbestimmungsgrenzen bestimmt	[dB]
$l, l'$	Länge (im Originalmaßstab; im Modellmaßstab)	[m]
$\ell, m, n$	Modenordnungen der Raummoden eines dreidimensionalen Raumes	-
$l_x$	Länge eines eindimensionalen Systems	[m]
$l_x; l_y; l_z$	Raummaße eines quaderförmigen Raumes	[m]
MADI	Multi Channel Audio Digital Interface	-
$m; m_1; m_2$	Luftabsorptionskoeffizient (allgemein; im prüfkörperunbesetzten Hallraum; im prüfkörperbesetzten Hallraum)	$\left[\frac{1}{m}\right]$
$n$	Anzahl an Sende- und Mikrofonpositionen	-
$n_x$	Modenordnung eines eindimensionalen Systems	-
$P$	Schallleistung	[W]
$\tilde{p}$	Effektivwert des Schalldrucks	[Pa]
$\tilde{p}_e$	Druckamplitude des auf eine Fläche einfallenden Schalls	[Pa]
$\tilde{p}_r$	Druckamplitude des von einer Fläche reflektierten Schalls	[Pa]
$p(t)$	Impulsantwort	-
$R(k)$	Energetische Summe aller schwellenwertüberschreitenden Energiespitzen der hallkorrigierten, normalisierten Impulsantwort	-
$R_{\text{total}}$	Gesamtenergie der hallkorrigierten, normalisierten Impulsantwort	-
RWTH	Rhein-Westfälische Technische Hochschule	-
$r_H$	Hallradius	[m]
$S$	Fläche	$[m^2]$
$s$	Skalierungsfaktor für Modellmessungen	-



$T; T_i; \bar{T}$	Nachhallzeit (allgemein; am Punkt $i$ ; räumliches Mittel)	[s]
$T_1; T_2$	Nachhallzeiten des prüfkörperunbesetzten und -besetzten Hallraumes	[s]
T15; T20; T30	Nachhallzeit, bestimmt durch 15 dB-, 20 dB- oder 30 dB-Intervalle	[s]
$t$	Zeit	[s]
$t_x$	Beliebig gewählter Zeitpunkt der EDC	[s]
$t_0$	Abschaltzeitpunkt des Rauschens bei der Nachhallzeitbestimmung	[s]
$t_1; t_2$	Bestimmungszeitgrenzen bei der Nachhallzeitbestimmung	[s]
$V$	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
$\tilde{v}$	Effektivwert der Schallschnelle	$\left[\frac{m}{s}\right]$
$W_0$	Signalleistung eines Ausgangssignals	[W]
$w; w_r$	Schallenergiedichte (allgemein; räumliches Mittel)	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$
XLR	Steckverbindungstyp (External, Live, Return)	-
Z	Diffusorzustand (Anzahl an eingebauten Diffusoren)	-
$z(k)$	„fluctuation decay curve“	-
$\alpha$	Absorptionsgrad	-
$\alpha_L$	Luftdämpfungskoeffizient	$\left[\frac{dB}{m}\right]$
$\alpha_s$	Schallabsorptionsgrad eines Prüfkörpers	-
$\vartheta$	Temperatur	[°C]
$\lambda; \lambda'$	Wellenlänge (allgemein; im Modellmaßstab)	[m]
$\rho$	Reflexionsgrad	-
$\sigma_E$	Absolute Standardabweichung der Schallenergie	[Pa <sup>2</sup> s]
$\sigma_{E,relativ}$	Relative Standardabweichung der Schallenergie	-
$\sigma_T$	Absolute Standardabweichung der Nachhallzeit	[s]
$\sigma_{T,absolut,klein,Z1}$ $\sigma_{T,absolut,klein,Z7}$	Absolute Standardabweichung der Nachhallzeit bei kleiner Absorberbelegung im Diffusorbelegungszustand Z1 und Z7	[s]
$\sigma_{T,relativ}$	Relative Standardabweichung der Nachhallzeit	-
$\sigma_{T,relativ,klein,Z1}$ $\sigma_{T,relativ,klein,Z7}$	Relative Standardabweichung der Nachhallzeit bei kleiner Absorberbelegung im Diffusorbelegungszustand Z1 und Z7	-
$\sigma_{T,relativ,leer}$	Relative Standardabweichung der Nachhallzeit des leeren Hallraumes	-

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hallräume mit Diffusorpaneelen (links) (Müller-BBM Acoustic Solutions GmbH), rotierendem Diffusor (mitte) (Vorländer, 2015) und Volumenkörperdiffusoren (rechts).....	7
Abbildung 2: Schallstreuung an einer Wand bei verschiedenen eintreffenden Wellenlängen im Verhältnis zur Größe von Wandelementen: a) $d \ll \lambda$ , b) $d \approx \lambda$ , c) $d \gg \lambda$ (Kuttruff, 2017) .....	8
Abbildung 3: Reflektogramm einer beispielhaften Impulsantwort eines Büroraumes ...	12
Abbildung 4: Pegel-Zeit-Verlauf bei der Bestimmung der Nachhallzeit mit beispielhaften Pegel- und Zeitbereichen .....	14
Abbildung 5: Errechnung der hallkorrigierten Impulsantwort (c) aus der quadrierten Impulsantwort (a) und dem Energieabfall (b) (Hanyu, 2014).....	15
Abbildung 6: Schnittdarstellung des im Versuchsaufbau verwendeten Modellhallraumes .....	17
Abbildung 7: Mini-Dodekaederlautsprecher auf einem kleinen Drahtstativ und 1/4-Zoll Messmikrofon mit Deckenaufhängung.....	18
Abbildung 8: Kugelsegmentdiffusoren in großer Ausführung aus Beton (links) und kleiner Ausführung aus lackiertem Buchenholz (rechts) mit formschlüssiger Befestigung.....	19
Abbildung 9: Messaufbau mit Messlaptop, Messinterfaces, den unmontierten Streukörpern und dem Modellhallraum.....	21
Abbildung 10: Absorberbelegungen während der Messreihe: a) leerer Hallraum; b) kleiner Basotectabsorber; c) kleiner Polyesterfaserabsorber; d) großer Polyesterfaserabsorber .....	22
Abbildung 11: Degree of Time Series Fluctuation (DTF) in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen .....	32
Abbildung 12: Oktavbandgefilterter Degree of Time Series Fluctuation (DTF) in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungen in Frequenzbändern der Mittenfrequenzen 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz.....	33
Abbildung 13: Räumlicher Mittelwert der Nachhallzeit T20 in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen .....	35
Abbildung 14: Absolute Standardabweichung der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen .....	36
Abbildung 15: Relative Standardabweichung der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen .....	38

---

Abbildung 16: Oktavbandgefilterte relative Standardabweichung der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungen in Frequenzbändern der Mittenfrequenzen 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz.....	40
Abbildung 17: Räumlicher Mittelwert der Schallenergie in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen .....	42
Abbildung 18: Absolute Standardabweichung der Schallenergie in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen .....	43
Abbildung 19: Relative Standardabweichung der Schallenergie in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen .....	45
Abbildung 20: Oktavbandgefilterte relative Standardabweichung der Schallenergie in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungen in Frequenzbändern der Mittenfrequenzen 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz.....	46
Abbildung 21: Abweichungen der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und des Luftdrucks während der Messreihe in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl .....	49
Abbildung 22: Luftdämpfungskoeffizient $\alpha$ nach ISO 3913-1 in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl in den Einzelfrequenzen 0,5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz und 16 kHz .....	50

## Formelverzeichnis

(2.2.1.1): Intensität .....	3
(2.2.1.2): Schallabsorptionsgrad.....	4
(2.2.1.3): Eigenfrequenzen eines eindimensionalen Systems.....	4
(2.2.1.4): Eigenfrequenzen eines dreidimensionalen Raumes.....	4
(2.2.1.5): Schröderfrequenz.....	5
(2.2.1.6): Schallenergiedichte eines diffusen Schallfeldes .....	6
(2.2.1.7): Hallradius eines diffusen Schallfeldes .....	6
(2.2.3.1): Skalierungsfaktor bei Modellmessungen mit Zusammenhang zu Wellenlängen und Maßen zwischen Original- und Modellmaßstab .....	11
(2.2.3.2): Frequenztransformation im Modellmaßstab .....	11
(2.4.1.1): Schröder-rückwärtsintegrierte Form der Impulsantwort .....	14
(2.4.1.2): Nachhallzeit, bestimmt aus der Abklingrate.....	15
(2.4.2.1): Örtliches Schalldruckpegeläquivalent aus der Impulsantwort .....	16
(2.4.2.2): Örtliches Schalldruckäquivalent bzw. Schallenergie aus der Impulsantwort .....	16
(3.2.1.1): Schallabsorptionsgrad eines Prüfobjektes.....	23
(3.2.1.2): Äquivalente Absorptionsfläche eines Raumes.....	24
(3.2.1.3): Äquivalente Absorptionsfläche eines Prüfobjektes in einem Raum.....	24
(3.2.1.4): Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Temperatur.....	24
(3.2.1.5): Luftabsorptionskoeffizient.....	24
(3.3.1.1): Hallkorrigierte Impulsantwort.....	26
(3.3.1.2): Hallkorrigierte, durch die Abklingrate normalisierte Impulsantwort.....	26
(3.3.1.3): Hallkorrigierte, durch die momentane Abklingrate normalisierte Impulsantwort .....	26
(3.3.1.4): Energetische Summe aller schwellenwertüberschreitenden Energiespitzen der hallkorrigierten, normalisierten Impulsantwort.....	27
(3.3.1.5): Gesamtenergie der hallkorrigierten, normalisierten Impulsantwort .....	27
(3.3.1.6): „fluctuation decay curve“ .....	27
(3.3.2.1): Räumlich gemittelte Nachhallzeit .....	28
(3.3.2.2): Absolute Standardabweichung der Nachhallzeit.....	28
(3.3.2.3): Relative Standardabweichung der Nachhallzeit.....	29

---

(3.3.3.1): Räumlich gemittelte Schallenergie .....	30
(3.3.3.2): Absolute Standardabweichung der Schallenergie .....	30
(3.3.3.3): Relative Standardabweichung der Schallenergie .....	30

---

## **Vorwort**

Ich möchte mich ausdrücklich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich während der Bearbeitungszeit unterstützt haben. Ein weiterer besonderer Dank gilt meinem Betreuer und Zweitprüfer Dr.-Ing. Andreas Meier, sowie dem Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübel und weiteren Personen für den spannenden fachlichen Austausch. Ebenso möchte ich mich bei der Firma Müller-BBM Building Solutions GmbH bedanken, die mir die für die Arbeit benötigten Mittel zur Verfügung gestellt hat.

# 1. Einleitung

Bei akustischer Anregung eines Raumes breitet sich Schall in bestimmten Mustern aus. Es kombinieren sich dabei einige Phänomene, die durch die Beschaffenheit des Raumes ausgelöst werden. Eines davon ist das diffuse Schallfeld, was sich beispielsweise in Hallräumen nach ISO 354 (DIN EN ISO 354, 2003) wiederfinden lässt. Die Räume dienen zur Bestimmung akustischer Parameter von Objekten wie beispielsweise deren Absorptionseigenschaften oder Schallleistungspegel. Da den Verfahren theoretisch idealisierte Schallsituationen zugrunde liegen, entstehen bei nicht idealen Prüfbedingungen Messabweichungen. Gerade bei diffusen Schallfeldern gestaltet sich die reale Umsetzung schwierig. Dennoch werden mit speziellen Raumkonfigurationen und schallstreuenden Elementen hinreichend genaue Bedingungen geschaffen. Bei der Planung und Konstruktion von Hallräumen ist es somit vorteilhaft, bereits im Vorfeld Aussagen über die Prüfgenauigkeit treffen zu können. Ziel ist dabei nicht nur die Präzision bei der Messwertbestimmung, sondern auch eine Vergleichbarkeit zwischen Prüfinstituten.

In der internationalen Norm zur Bestimmung von Absorptionsgraden mittels Hallräumen ISO 354 (DIN EN ISO 354, 2003) ist ein Verfahren zur Prüfung der Diffusität beschrieben. Es bietet Hilfe bei der Konstruktion von Hallräumen und gibt einen Ansatz, die Konstruktion für Prüfzwecke zu validieren. Darüber hinaus gibt es bereits einige weitere Konzepte, diffuse Schallfelder zu analysieren. Diese Arbeit betrachtet drei alternative Ansätze, die Auskunft über die Qualität diffuser Schallfelder geben sollen. Der Fokus liegt dabei auf Methoden, die Analysen in statischen Raumzuständen ermöglichen. Sie werden im Modellmaßstab 1:10 an einer beispielhaften Auslegung eines Hallraumes getestet und miteinander verglichen. Eine anschließende Einordnung gibt einen Überblick über die Qualität, Genauigkeit und Praktikabilität der Messmethoden.

## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1 Der Hallraum

Hallräume sind spezielle Räume, die es ermöglichen, Absorptionsgrade von Materialien oder Schalleistungen von Objekten zu bestimmen. Ihr Hauptmerkmal ist eine möglichst homogene Verteilung der Schallenergie im Innenraum, die auch als diffuses Schallfeld bezeichnet wird. Dafür sorgen Diffusoren, Objekte mit gekrümmten Oberflächen, die den Schall streuen und im Raum verteilen sollen. So ist zum Beispiel bei der Bestimmung von Absorptionsgraden nach dem Hallraumprüfverfahren der ISO 354 (DIN EN ISO 354, 2003) eine gleichmäßige Umhüllung eines Prüfobjektes durch Schall gewährleistet. Das ist deshalb wichtig, da jedes Oberflächenteil des Prüfobjektes in gleichen Teilen in die Bestimmung eingehen soll.

In Hallräumen ist nicht nur die Bestimmung von Schallabsorptionsgraden, sondern auch die Messung von Schalleistungen (DIN EN ISO 3741, 2011) oder Streugraden (ISO 17497-1, 2004) von Objekten möglich. Beide Methoden nutzen die homogene Verteilung der Schallenergie. Ebenso werden Hallräume in Prüfständen zur Messung der Schalldämmung von Bauteilen, wie z.B. Wänden, verwendet (DIN EN ISO 10140-1, 2021). Wie in der Normreihe beschrieben, wird von einem Senderraum, in dem eine Schallquelle steht, die Schalldämmung durch ein Bauteil zu einem Empfangsraum gemessen. Sowohl der Senderraum als auch der Empfangsraum müssen dabei eine ausreichende Streuung bzw. Diffusität aufweisen. Nur so ist es möglich, dass die in dem Verfahren einzeln gemessenen und anschließend räumlich gemittelten Schalldruckpegel möglichst geringe Abweichungen voneinander haben (DIN EN ISO 10140-5, 2021).

Meist werden Hallräume in bereits vorhandenen Rechteckräumen realisiert. Je nach Prüfanwendung umfassen sie Volumen zwischen  $150 \text{ m}^3$  und  $500 \text{ m}^3$  (DIN EN ISO 354, 2003), wobei Abweichungen davon möglich sind (DIN EN ISO 3741, 2011). Zur Nutzung ist es in quaderförmigen Räumen notwendig, schallstreuende Fläche einzubringen, damit eine ausreichende Diffusität des Schallfeldes gewährleistet ist. Auch eine Konstruktion als schiefwinkliger Raum ist möglich. Hier ist schon im unbesetzten Rohzustand von einer hohen Diffusität auszugehen. Ist sie dennoch nicht ausreichend, sind ebenso Diffusorelemente notwendig (Schulz, 1971). Die dritte Konstruktionsmethode ist die Hallkabine. In Bezug auf Hallraumanwendungen nimmt sie den geringsten Platz in Anspruch. Hierbei handelt es sich um verkleinerte Hallräume mit deutlich geringeren Volumen von beispielsweise  $6,35 \text{ m}^3$  (Mommertz, Fichtel, & Schröder, 2005), die meist mobil aufstellbar sind. Vorteilhaft bei ihnen ist, dass die Prüfkörper kleiner gebaut werden können,



sodass die Kosten für z.B. Materialproben bei Absorptionsprüfungen geringer ausfallen. Sie werden häufig mit schiefwinkligen Wänden und Decken konstruiert, sodass keine Diffusoren mehr eingebracht werden müssen. Hallkabinen besitzen die gleichen Wirkprinzipien wie reguläre Hallräume, wobei der für Messungen relevante Frequenzbereich eine höhere untere Grenzfrequenz besitzt. Dennoch ist die Methode bewährt und führt zu Ergebnissen, die denen der großen Hallräumen entsprechen (Mommertz, Fichtel, & Schröder, 2005).

## 2.2 Diffuses Schallfeld

### 2.2.1 Schallausbreitung im Raum

Wird Schall von einer Punkt- oder Kugelquelle in eine freie Umgebung abgestrahlt, kann er sich kugelförmig von seinem Mittelpunkt mit der Schallgeschwindigkeit  $c$  ausbreiten. Dabei besitzt der Schall an jedem Punkt eine definierte Ausbreitungsrichtung, dessen Richtung und Stärke mit der Intensität beschrieben werden kann. Sie ist als die Energie definiert, die eine bestimmte Fläche pro Zeitintervall passiert. Ist der Abstand zur Punktquelle groß genug, gleicht die Schallausbreitung einer ebenen Welle, was akustische Phänomene zunächst vereinfacht. Sie beschreibt eine Schallausbreitung, bei der sich alle Schallenergien parallel zueinander fortbewegen. Tritt der Schall lotrecht durch eine Fläche hindurch, kann die Intensität  $\vec{I}$  mit

$$\vec{I} = \frac{dP}{d\vec{S}} = \tilde{p}\vec{v}, \quad (2.2.1.1)$$

der Schallleistung  $P$  und dem Flächenelement  $d\vec{S}$  oder den Effektivwerten des Schalldrucks  $\tilde{p}$  und der Schallschnelle  $\vec{v}$  beschrieben werden. Die Intensität ist dabei eine richtungsabhängige Größe und kann negative Werte annehmen, wenn Schall rückseitig einfällt. Vereinfachend wird im Weiteren auf eine Vektorschreibweise der Intensität verzichtet.

Breitet sich die ebene Schallwelle lotrecht in Richtung einer unendlich großen, nicht gekrümmten Begrenzungsfläche aus, wird sie in die entgegengesetzte Richtung reflektiert. Abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit wird dabei die komplette einfallende Schallenergie oder nur ein Teil davon reflektiert. Daraus ist nun die Bildung eines Verhältnisses von reflektierten und einfallenden Schallintensitäten  $I_\rho$  und  $I_\varepsilon$  und Schalldruckeffektivwerten  $\tilde{p}_r$  und  $\tilde{p}_e$  möglich. Es wird als Reflexionsgrad  $\rho$  bezeichnet. Der Verlust,

der bei teilweiser Reflektion auftritt, wird als Schallabsorptionsgrad  $\alpha$  bezeichnet. Er ist definiert durch

$$\alpha = 1 - \rho = 1 - \frac{I_\rho}{I_\varepsilon} = 1 - \frac{\tilde{p}_r^2}{\tilde{p}_e^2}. \quad (2.2.1.2)$$

Nicht nur Reflexionen an Flächen können dabei zu Energieverlusten führen. Auch das Ausbreitungsmedium, beispielsweise Luft, besitzt eine Dämpfung, die frequenzabhängig die Ausbreitung des Schalls abschwächen kann. Die Zusammenhänge und Einflüsse werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch näher erläutert (vgl. Abschnitt 3.2.1, sowie Abschnitt 4.2).

In den nächsten Betrachtungen wird eine zweite, ebenso unendlich große, nicht gekrümmte Begrenzungsfläche parallel zur bereits bestehenden Fläche eingebracht. Zur Vereinfachung wird dabei nur die Reflexion zwischen schallharten Flächen betrachtet. Sie beschreibt die vollständige Reflexion einfallender Schallanteile. Das bedeutet einen Schallabsorptionsgrad  $\alpha = 0$ . Wenn nun an beiden Flächen der Schall reflektiert wird, entstehen sogenannte stehende Wellen. Sie sind durch Schalldruck-, bzw. Schnellenmaxima und -minima charakterisiert, die in definiertem Abstand zu den schallharten Begrenzungen stehen. Bei parallelen Wänden entstehen sie jedoch nur dann, wenn die Wellenlänge der angeregten Frequenz ein Vielfaches des Wandabstandes ist. Eindimensionale Resonanzfrequenzen  $f_{n_x}$  können mit der Schallgeschwindigkeit  $c$ , dem Abstand zwischen den Begrenzungsflächen  $l_x$  und der Modenordnung  $n_x$  berechnet werden. Die Modenordnung beschreibt die Ordnung der harmonischen Obertöne, wobei  $n_x = 1$  die Grundfrequenz darstellt

$$f_{n_x} = \frac{c n_x}{2 l_x} \text{ mit } n_x = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2.1.3)$$

Die sogenannten Moden, Eigen- oder Resonanzfrequenzen treten in quaderförmigen Räumen zwischen allen drei parallelen Wandpaaren auf, sodass Formel (2.2.1.3) in allen drei Ausbreitungsrichtungen eines Raumes mit den Raummaßen  $l_x$ ,  $l_y$  und  $l_z$  als

$$f_{l,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left[\left(\frac{\ell}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{l_z}\right)^2\right]} \text{ mit } \{\ell, m, n\} = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2.1.4)$$

geschrieben werden kann. Die Parameter  $\ell$ ,  $m$  und  $n$  geben die Modenordnung an, während  $l_x$ ,  $l_y$  und  $l_z$  die Raummaße bezeichnen. Dabei ist die Beschreibung aller räumlich bedingten Resonanzfrequenzen, die in einem Raum auftreten können, enthalten.

Verlässt die Grundform des Raumes die Quaderform und es werden Objekte oder gekrümmte Flächen eingebracht, entstehen komplexere Moden, die sich auch zwischen mehreren reflektierenden Flächen ausbilden können. Sie sind mit händischen Methoden nur noch schwer berechenbar, können aber durch Simulationsverfahren ermittelt werden (Henn, Sinambari, & Fallen, 2008).

Die Definition eines modendominierten Raumzustandes trifft jedoch nur im niederfrequenten Frequenzbereich zu. Ab einem höheren Frequenzbereich gilt die Schallausbreitung im Raum als stochastisch. Das bedeutet, dass die Schallausbreitung nicht mehr mit Raummoden beschrieben werden kann, sondern der Schall mit einer Dichteverteilung mit der Schallenergiedichte  $w$  definiert ist. Ebenfalls können die Schallausbreitung und Reflexionen ab dieser Frequenz als geometrisch bzw. strahlenförmig angesehen werden. Manfred Schröder definiert dazu näherungsweise eine Übergangsfrequenz, bei der die Halbwertsbreite  $B$  der Moden eines bestimmten Frequenzbereiches um das Dreifache größer als dessen Frequenzabstand  $\Delta f$  zwischen den Moden ist. Die Halbwertsbreite einer Mode ist in dessen Frequenzspektrum erkennbar. Ausgehend von ihrer Hauptfrequenz bei der Spitzenamplitude ist die Halbwertsbreite durch den Frequenzabstand zwischen den beiden angrenzenden  $-3$  dB -Punkten definiert. Anhand einer Näherungsformel kann die Schröderfrequenz  $f_s$  mit dem Raumvolumen  $V$  und dessen Nachhallzeit  $T$ , die in Abschnitt 2.4.1 näher erläutert wird, errechnet werden (Long, 2006)

$$f_s \sim 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}. \quad (2.2.1.5)$$

Der oberhalb der Schröderfrequenz auch „diffuses Schallfeld“ genannte Zustand ist eine ideelle Betrachtung und ist Grundlage einiger akustischer Überlegungen. In verschiedenen Literaturen existieren dafür mehrere unterschiedliche Definitionen (De Carvalho, Gomes, & Sant'Ana, 2022). Konsens gibt es aber dennoch, der sich in den Definitionen von Kuttruff und Long widerspiegelt. So setzt Kuttruff die Eigenschaften diffuser Schallfelder mit der gleichmäßigen und isotropen Verteilung der Schallenergie in einem Raum gleich. Daraus resultiert eine mittlere räumliche Intensität  $\bar{I} = 0$  (Kuttruff, 2017, S. 104, 217). Long beschreibt es ebenfalls als eine Schallsituation, bei der eine gleiche Schallenergiedichte an allen Punkten im Raum herrscht, die impliziert, dass Schall mit gleicher Wahrscheinlichkeit aus jeder Richtung einfallen kann (Long, 2006, S. 298).

Die Isotropie wird oftmals als fundamentalere Definition betrachtet, da nur durch sie eine Homogenität, also eine Gleichverteilung der Schallenergie, entstehen kann. Theoretische Beschreibungen der Isotropie sind dabei aus verschiedenen Betrachtungsweisen möglich. Einerseits kann die Intensität eines diffusen Schallfeldes durch den gleichmäßig

wahrscheinlichen, sphärischen Schalleinfall beschrieben werden. Unter diesen Umständen gilt für die mittlere räumliche Intensität vereinfacht  $\bar{I} = 0$  (Kuttruff, 2017). Andererseits ist die Beschreibung des diffusen Schalleinfalls an einer Begrenzungsfläche möglich. Die Intensität bildet sich dabei aus einem gleichmäßig wahrscheinlichen halbkugelförmigen Schalleinfall (Long, 2006). Beide Betrachtungen bieten Ansätze, die Definition der Diffusität eines Raumes für verschiedene Bedingungen und Anwendungen zu formulieren.

Unabhängig von den verschiedenen Definitionen resultieren aus den Überlegungen eines diffusen Schallfeldes dieselben Formeln. Wird beispielsweise ein vollständig diffuser Raum angenommen, in dem eine äquivalente Absorptionsfläche  $A_{\text{eq}}$  enthalten ist und eine Schalleistung  $P$  eingebracht wird, ergibt sich im diffusen Schallfeld die mittlere Schallenergiedichte  $w_r$

$$w_r = \frac{4P}{cA_{\text{eq}}}. \quad (2.2.1.6)$$

Sie gibt an, wieviel Schallenergie in einem definierten Volumen vorhanden ist. Im Realen ist das aber nicht an allen Punkten im Raum der Fall. Um die raumanregende Quelle herum ist eine höhere Schallenergiedichte zu beobachten. Dabei kombinieren sich die Gesetze der Schallausbreitung im Freien und dem diffusen Schallfeld. Je größer der Abstand zur Quelle ist, desto schwächer wird die Schallenergiedichte der Schallquelle und desto stärker überwiegt die Schallenergiedichte des diffusen Schallfeldes. Der Abstand von der Quelle, bei dem beide Energiedichten gleich groß sind, wird Hallradius  $r_H$  genannt

$$r_H = \sqrt{\frac{A_{\text{eq}}}{16\pi}}. \quad (2.2.1.7)$$

Er bildet sich mit der Näherungsformel (2.2.1.7) aus der äquivalenten Schallabsorptionsfläche  $A_{\text{eq}}$ . Eine weitere Abweichung von realen Räumen zur idealen Definition eines diffusen Schallfeldes stellt eine Drucküberhöhung an Raumbegrenzungsflächen dar. Sie wird durch Reflexion ausgelöst (Kuttruff, 2017) (Waterhouse, 1955). Damit einhergehend ist die Definition  $\bar{I} = 0$  eines diffusen Schallfeldes nicht mehr gegeben. Je weiter die Intensität in der Mitte des Raumes betrachtet wird, desto eher stimmt die Definition wieder (Long, 2006). Aufgrund des begrenzten Umfangs der Arbeit wird dieses Phänomen im Detail nicht näher erläutert.

## 2.2.2 Diffusoren

In Hallräumen können, wie in Abschnitt 2.1 bereits erwähnt, schallstreuende Elemente eingebracht werden. Sie sind im Folgenden als „Diffusoren“, „Diffusorelemente“ oder „Streukörper“ bezeichnet. Ihre Aufgabe ist es, die im Raum herrschende Schallenergie gleichmäßig zu verteilen, damit ein möglichst optimales diffuses Schallfeld gewährleistet ist. Dabei ist ein Grundziel bei der Anwendung in Hallräumen, dass existierende Moden unterbrochen bzw. verändert werden. Es entstehen neue Modenkombinationen, durch die eine höhere Modendichte pro Frequenzbereich erreicht wird.



Abbildung 1: Hallräume mit Diffusorpaneelen (links) (Müller-BBM Acoustic Solutions GmbH), rotierendem Diffusor (mitte) (Vorländer, 2015) und Volumenkörperdiffusoren (rechts)

Die Konstruktion der Diffusorelemente ist in einigen Varianten möglich, die zwar Unterschiede in deren Wirksamkeit aufweisen aber dennoch zu ausreichenden Diffusitäten führen (Nolan, Vercammen, & Jeong, 2015). In Normwerken, wie beispielsweise der ISO 354, ist die Auslegung mit hängenden Diffusorpaneelen beschrieben (DIN EN ISO 354, 2003). Sie sind strukturell stark bedämpfte, unregelmäßig gekrümmte Platten, die in willkürlichen Konfigurationen von der Decke gehängt sind (vgl. Abbildung 1, links). In ihrer Anwendung treten jedoch Probleme auf. Bei zu großen oder ungünstig platzierten Elementen herrscht die Gefahr, dass sich zwischen Wand- bzw. Deckenfläche ein akustisch abgeschotteter Bereich befindet. Das führt zu kleineren effektiven Raumvolumina, die Messabweichungen hervorrufen können (Vercammen M. L., 2010). Eine weitere Möglichkeit der Diffusorgestaltung sind rotierende Elemente, die durch zeitlich veränderliche Oberflächenorientierungen den Schall streuen (vgl. Abbildung 1, mitte). Sie können bei aktuellen Messverfahren mit der Korrelationsmesstechnik jedoch nicht verwendet werden, da die Ermittlung eindeutiger Raumimpulsantworten durch fehlende Zeitinvarianz nicht mehr möglich ist. Eine Lösung für die beiden genannten Probleme stellt die Auslegung mit Volumenkörpern dar. Das sind Körper, die entweder frei im Raum hängen oder an den Raumbegrenzungsflächen angebracht sind (vgl. Abbildung 1, rechts). Die Auslegung ist dabei in diversen Formen möglich. Um eine effektive Diffusion zu erhalten,

müssen Volumendiffusoren eine Mindestdiefe der halben Wellenlänge der zu beeinflussenden Modenfrequenz besitzen und an drei Raumflächen angebracht sein, denen jeweils eine unbesetzte Fläche gegenübersteht (Cox & D'Antonio, 2005). Sie stellen ein geeignetes Mittel dar, in Hallräumen ausreichende Diffusitäten zu schaffen (Lautenbach & Vercammen, 2010).

Die Wirkprinzipien aller Diffusoren sind jedoch gleich. Trifft Schall auf sie auf, soll er möglichst ungerichtet wieder reflektiert werden. Für eine geometrische Reflexion muss der Streukörper aus der Schalleinfallrichtung eine Mindestgröße besitzen, die der Wellenlänge des eintreffenden Schalls gleichkommt. Sind die beiden Maße ungefähr gleich lang, wird der Schall streuend reflektiert. Ist das Element kleiner als die Wellenlänge, besitzt es keine reflektierende oder streuende Wirkung und der Schall tritt ungehindert an ihm vorbei. Befinden sich die gekrümmten Elemente dabei an einer Wand, wirkt die Grundfläche der Wand als reflektierende Grundform. Die Wirkprinzipien sind in Abbildung 2 vereinfacht dargestellt.

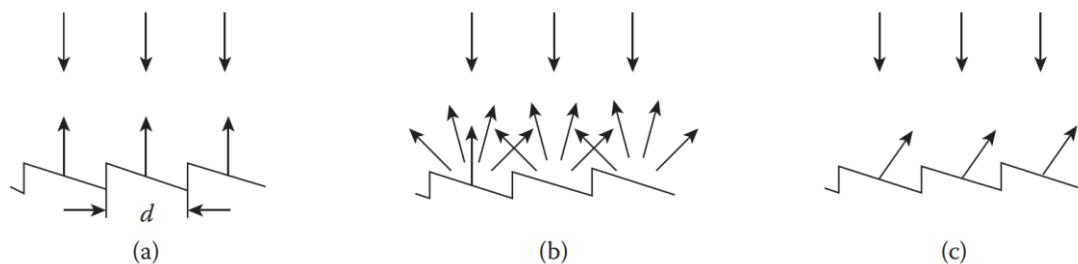


Abbildung 2: Schallstreuung an einer Wand bei verschiedenen eintreffenden Wellenlängen im Verhältnis zur Größe von Wandelementen: a)  $d \ll \lambda$ , b)  $d \approx \lambda$ , c)  $d \gg \lambda$  (Kuttruff, 2017)

Wie viel diffus wirkende Fläche benötigt wird, damit ein Raum eine hinreichende Diffusität aufweist, hängt von der Grundform und den Abmessungen des Raumes ab. Anzahl und Positionen der Diffusoren müssen dafür mit Messmethoden, die diffuse Schallfelder qualifizieren, bestimmt werden.

### 2.2.3 Ansätze zur Bestimmung von Diffusität

Die Qualifizierung bzw. Beurteilung von diffusen Schallfeldern beschäftigt die Wissenschaft schon lange. Dabei wurden sowohl theoretische Überlegungen als auch Messverfahren entwickelt. In einer der ersten Forschungsarbeiten aus dem Jahr 1951 betrachten Sommersville und Ward die Streuung verschieden geformter Elemente anhand einer quasi-zweidimensionalen Modellmessung. Hierbei kamen sowohl Frequenzanalysen als auch optische Impulsantwortanalysen zum Einsatz (Sommersville & Ward, 1951). Obwohl keine Auswirkungen in dreidimensionalen Räumen getestet wurden, enthält die Publikation dennoch Ansätze für heutige Verfahren. Durch die Motivation,

raumakustische Messungen möglichst reproduzierbar zu gestalten, entwickelte Manfred Schröder ab 1954 einen theoretischen Ansatz für die Definitionsgrenzen diffuser Schallfelder (Schröder, 1954). Die Schröderfrequenz gibt an, ab welchem Frequenzbereich das Schallfeld als diffus mit geometrischen Schallausbreitungseigenschaften und nicht mehr als modendominiert angesehen werden kann. Im späteren Verlauf seiner Forschungen korrigierte Schröder seine bisher entwickelte Näherungsformel (Schröder & Kuttruff, 1962), die in dieser Form bis heute Verwendung findet (siehe Formel (2.2.1.5)).

Mit ebenfalls theoretischen Methoden entwickelte Davy im Jahr 1979 eine Formel, die die Varianz von Nachhallzeiten bzw. Abklingkurven beschreibt (Davy, Dunn, & Dubont, 1979). Dabei unterscheidet er in die räumliche Varianz, den Abweichungen zwischen örtlich verteilten Abklingverhalten, und der Ensemblevarianz, den Abweichungen zwischen mehreren Messungen an einem Punkt. Er führte dazu außerdem einen Korrekturfaktor für tiefe Frequenzen ein, um größere Frequenzbereiche beschreiben zu können (Davy J. L., 1988). Das Verfahren wird bis heute verfolgt, sodass zur Evaluation diffuser Schallfelder beispielsweise das Verhältnis zwischen gemessener und theoretischer Standardabweichung der Nachhallzeit herangezogen wird (Vercammen & Lautenbach, 2013). Eine weitere, darauf basierende Anwendung findet sich in Normwerken, wie der ASTM C243-17 wieder (ASTM C423-17, 2017).

Parallel zu den Abweichungen der Nachhallzeiten wurden Untersuchungen zur direkten Bestimmung der Homogenität im Raum angestellt. Dadurch, dass in theoretischen Definitionen diffuser Schallfelder die Homogenität durch die gleichmäßige Schallenergie-dichteverteilung und somit Schalldruckverteilung beschrieben ist, kam die Motivation, die Verteilung direkt zu analysieren. So veröffentlichte Bodlund ein theoretisches Modell zur statistischen Beschreibung des Schalldrucks in Diffusfeldsituationen (Bodlund, 1976). Auch dieser Ansatz wird in heutigen Forschungsarbeiten berücksichtigt (Davy J. L., 2017). Im amerikanischen Normwerk zur Bestimmung der Bauteildämpfung ist ebenfalls eine daran orientierte Methode beschrieben (ASTM E 90-09, 2016). Infolgedessen wurde anschließend eine Messmethode entwickelt, die die direkte Schalldruckverteilung auf der Oberfläche eines zu prüfenden Trennbauteils misst. Es werden dabei jedoch nur die Auswirkungen eines diffusen Schallfeldes auf eine Raumbegrenzung untersucht. Anhand eines Mikrofonarrays vor der betreffenden Fläche werden Schalldrücke bestimmt, die anschließend auf ihre Abweichungen zueinander untersucht werden (Chazot, Robin, Guyader, & Atalla, 2016). Zusätzlich zu den oben genannten Methoden gab es Bestrebungen, die Diffusität mit Korrelationsmethoden zu qualifizieren. So sollen Abweichungen zwischen zwei oder mehreren Positionen mit definiertem Abstand zueinander im Raum analysiert werden. Weil sie aber nicht direkt die Qualität diffuser Schallfelder

anzeigen, wurden bisher kaum weitere Untersuchungen dazu angestellt (Jacobsen & Roisin, 2000).

Da sich die Messtechnik und Messverfahren stetig verbessern, existieren heutzutage rechenintensivere und komplexere Qualifizierungsmethoden. Zhang unterscheidet sie dabei in drei übergeordnete Kategorien, wie oder durch welche Eigenschaft das diffuse Schallfeld analysiert wird: die Homogenität, die Isotropie und indirekte Methoden (Zhang & Lee, 2021). Die soeben erläuterten Verfahren betrachten dabei die Homogenität des diffusen Schallfeldes. Messmethoden der zweiten Kategorie, die die Isotropie analysieren, sind mit deutlich mehr Messaufwand behaftet. Die Messaufbauten reichen dabei von Mikrofon-Arrays (Nolan, Fernandez-Grande, Brunskog, & Jeong, 2018) bis hin zu automatisierten Messrobotern (Nolan, Berzborn, & Efen, 2020). Die letzte Kategorie zur Evaluation diffuser Schallfelder bilden indirekte Messmethoden. Bei ihnen werden alternative Ansätze entwickelt, die keine direkten Eigenschaften des diffusen Schallfeldes messen, sondern die Auswirkungen auf Messwerte und -verfahren beschreiben. Häufig werden dazu Methoden herangezogen, die aus Impulsantworten berechenbar sind. Dazu zählen der „Sound Field Diffusion Coefficient (SFDC)“ (Biondo, et al., 2015) oder der „Degree of Time Series Fluctuation“ (Hanyu, Hoshi, & Nakakita, 2018) (Hanyu, 2014). Die Krümmung der Abklingkurven bei der Nachhallzeitbestimmung (Späh, Zhou, Busse, & Goecke, 2022) ist ebenfalls als indirekte Methode aufzuführen. Bei ihr werden zwei aufeinanderfolgende  $-15$  dB - Bestimmungsintervalle bei der Nachhallzeitbestimmung verglichen. Das Verfahren zur „Prüfung der Diffusität“ in Anhang A der ISO 354 (DIN EN ISO 354, 2003) ist ebenfalls keine direkte Analyse der Diffusfeldeigenschaften, sondern berücksichtigt ausschließlich Änderungen des Schallabsorptionsgrades. Es wird in Abschnitt 3.2.1 dieser Arbeit näher erläutert.

Die soeben genannten Messmethoden sind nur ein Ausschnitt dessen, was bereits in diesem Gebiet untersucht wurde. Allein die hohe Zahl an Messmethoden zeigt, dass die Qualifikation diffuser Schallfelder sich bislang schwierig gestaltet. Das führt dazu, dass stetig neue Ansätze entwickelt werden, um Normverfahren, die die Eigenschaften diffuser Schallfelder nutzen, präziser zu gestalten. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit gibt es beispielsweise Kritik am Verfahren zur „Prüfung der Diffusität“ aus Anhang A der ISO 354 (DIN EN ISO 354, 2003). Zweifel bestehen dort am Zusammenhang zwischen dem höchsten gemessenen Absorptionsgrad eines Prüfkörpers und der daraus resultierenden optimalen Diffusität. Laut kritischen Stimmen sei ein hoher Absorptionsgrad mit nicht diffusen Schallfeldern genauso erreichbar. Daraus resultieren Bestrebungen, das Qualifizierungsverfahren für Hallräume zu optimieren und zusätzliche Verfahren zu entwickeln (Vercammen M. L., 2010) (Vercammen M., 2019) (Scrosati, et al., 2020).



## 2.3 Modellmesstechnik

Bevor sich Simulationsverfahren, wie beispielsweise Raytracing, zur Nachbildung akustischer Begebenheiten durchgesetzt und zu der heutigen Genauigkeit entwickelt haben, war die Modellmesstechnik eine übliche Methode bei der raumakustischen Planung. Bis heute werden jedoch akustisch komplexe Räume im Modellmaßstab nachgebildet und ausgemessen. Sie bieten Planungssicherheit, da Wellenphänomene wie beispielsweise Biegung, Beugung oder Brechung teils besser als in numerischen Methoden reproduziert werden. Außerdem geben sie einen visuellen und haptischen Eindruck des Raumes. Letztendlich kommen Modellmessungen dennoch nur bei aufwändigeren und größeren Projekten zum Einsatz, da Modellnachbildungen deutlich kosten- und zeitintensiver als Computermodellierungen sind. Zusätzlich dazu sind heutige numerische Methoden sehr ausgereift und können akustische Gegebenheiten nahezu problemlos reproduzieren. Änderungen der Raumgeometrie und der Oberflächen sind ebenfalls leichter umzusetzen.

Das Grundprinzip der Modellmesstechnik sind Längen-, Zeit- und Frequenztransformationen mit dem Maßstabsfaktor. Dabei gilt, dass alle Maße des Originalraumes  $l$  sowie alle Maße des Modells  $l'$  im gleichen Verhältnis zu den jeweils korrespondierenden Wellenlängen  $\lambda$  und  $\lambda'$  stehen müssen. Modell- und Originalparameter, wie beispielsweise die Abmessungen, Wellenlängen und Frequenzen, skalieren sich dabei um denselben Skalierungsfaktor  $s$

$$s = \frac{l}{l'} = \frac{\lambda}{\lambda'}. \quad (2.2.3.1)$$

Um zeitrichtige Analysen im Modellmaßstab erstellen zu können, muss sich der Schall möglichst maßstabsgetreu ausbreiten. Die Schallausbreitung und Eigenfrequenzen im Modellraum sind dabei maßgeblich von der Schallgeschwindigkeit  $c'$  abhängig. Deswegen werden gemessene Frequenzen und Frequenzbereiche zusätzlich mit dem Verhältnis aus Schallgeschwindigkeit im Modell  $c'$  und im Original  $c$  transformiert

$$s = \frac{c' f}{c f'}. \quad (2.2.3.2)$$

Wegen der Frequenztransformation ist zur exakten akustischen Nachbildung die Auswahl der Oberflächenmaterialien essenziell. Reale Absorber wie z.B. poröse Absorber können daher nicht einfach skaliert werden, sondern müssen entweder experimentell erarbeitet oder neu berechnet werden. Auch die Messtechnik muss für den Anwendungs- bzw. Frequenzbereich geeignet sein (Kuttruff, 2017) (Tennhardt, 1974).

Bei Modellmessverfahren ist zu berücksichtigen, dass die Luftabsorption zu höheren Frequenzen ansteigt. Sie führt zu Messfehlern, die gegebenenfalls durch Korrekturterme berichtigt werden müssen. In speziellen Anwendungen werden die Modelle unter Umständen deshalb mit Gasen wie z.B. Helium gefüllt, die geringere Luftdämpfungen besitzen und somit die Schallausbreitung unter realen Umständen besser reproduzieren. Bei dem hier verwendeten Messaufbau ist das zum Beispiel aber durch die vielen Raumänderungen während der Messreihe, dem hohen Aufwand und den Kosten unpraktikabel. Somit bleibt der Raum mit Luft gefüllt, sodass die Schallgeschwindigkeit sowohl im Modell als auch im Originalmaßstab identisch ist ( $c' = c$ ). In der Norm ISO 9613-1 ist dazu die Schalldämpfung bei Ausbreitung im Freien in Luft erläutert. Sie ist abhängig von der relativen Luftfeuchte, der Temperatur und dem Luftdruck und gibt einen Dämpfungskoeffizienten  $\alpha$ , der im Folgenden als  $\alpha_L$  bezeichnet wird, in [dB/m] an (ISO 9613-1, 1993).

## 2.4 Die Impulsantwort

Zur akustischen Beschreibung eines Pfades von Sende- zu Empfangsposition in einem Raum dienen Impulsantworten. Sie zeigen das zeitliche Abklingverhalten eines Raumes an, wenn ein Dirac-Stoß, ein zeitlich unendlich schmaler und energetisch unendlich großer Impuls, in ihn eingebracht wird. Dabei besteht eine Raumimpulsantwort immer aus mehreren Zeitabschnitten, die in Abbildung 3 beispielhaft dargestellt sind. Ihr Verlauf zeigt den Direktschall, die frühen Reflexionen und den Nachhall des angeregten Raumes an. Direktschall und frühe Reflexionen charakterisieren sich dabei als meist schmale, einzelne Impulse und der Nachhall als eher stochastische Aneinanderreihung kleiner werdender, zeitlich dichter Impulse. Das ist anhand eines Reflektogramms, einer quadrierten Impulsantwort, gut erkennbar.

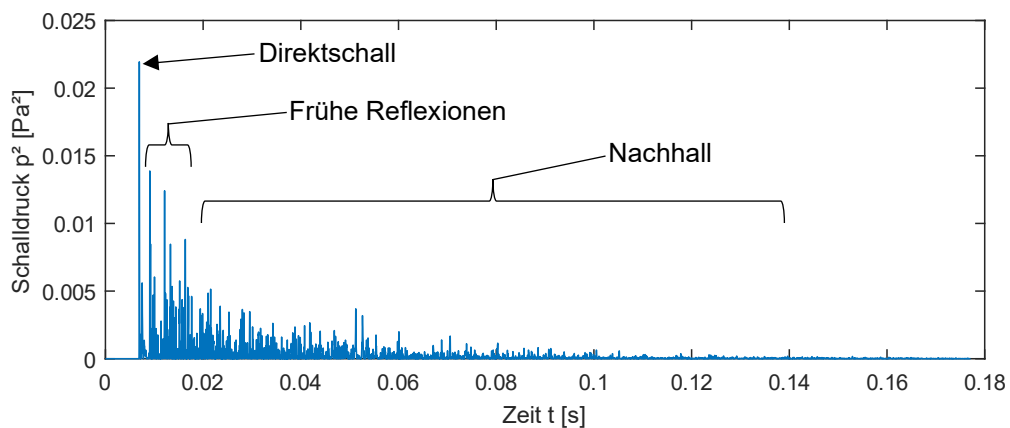


Abbildung 3: Reflektogramm einer beispielhaften Impulsantwort eines Büroraumes

Der Begriff Impulsantwort kommt dabei aus der Systemtheorie. Die Beschreibung jedes linearen und zeitinvarianten Systems, auch LTI-System genannt, ist mit einer Impulsantwort möglich. Sie ist dessen Übertragungsfunktion, die die Änderung und zeitliche Reaktion auf ein eingehendes Signal beschreibt.

Soll eine Impulsantwort eines Systems bestimmt werden, so müssen Eingangs- und Ausgangssignal bzw. Anregungs- und Gesamtsignal aufgenommen werden. Bei Messungen kann das Anregungssignal zwar in der Theorie mit einem frei wählbaren Signal erfolgen, jedoch ist es in der Praxis unpraktikabel. Sinnvoll ist die Verwendung eines Gleitsinus, der auch Sinus-Sweep genannt wird. Es ist ein harmonisches Signal, was über einen bestimmten Zeitbereich  $\Delta t$  entweder linear oder, wie in der Praxis üblich, logarithmisch frequenzmoduliert wird. Dabei werden die untere und obere Grenzfrequenz fest definiert. Die Amplitude des Sweeps ist in seinem Frequenzverlauf ebenfalls variabel. Seine spektrale Leistungsdichte besitzt in der Regel eine  $1/f$ -Abhängigkeit, die auch als „rosa“ Spektralverlauf bezeichnet wird. Tiefe Frequenzanteile eines Raumes können so besser angeregt werden, um größere Signal-Rausch-Abstände zu erzielen. Durch Kreuzkorrelation der Systemantwort mit dessen Eingangssignal kann nun die Impulsantwort errechnet werden. Die Ermittlung ihrer Zeitgrenzen ist dabei wichtig, um die Verzögerung bei der Luftschallausbreitung im Raum zu kompensieren. Signalanteile vor der Impulsantwort sind Verzerrungen des Messsystems, die nicht in die Impulsantwort einfließen sollen und irrelevant für daraus errechnete Parameter sind (Kuttruff, 2017).

Impulsantworten sind vielseitig einsetzbar. Sie sind Grundlage vieler akustischer Parameter, die Räume und Höreindrücke beschreiben sollen. Mit ihnen können außerdem akustische Raumeindrücke mit beliebigen Eingangssignalen nachgebildet werden. Das Verfahren wird Auralisation genannt.

#### **2.4.1 Methoden zur Bestimmung der Nachhallzeit**

Grundlegende Betrachtungen und Planungen eines Raumes können durch die Nachhallzeit angestellt werden. Subjektiv betrachtet trägt sie zum Halligkeitseindruck eines Raumes bei. In der Theorie wird sie durch die Zeit definiert, in der die mittlere Schallenergie eines statisch angeregten Raumes nach Abschalten des Anregungssignals auf ein Millionstel, also um 60 dB abgeklungen ist.

Das einfachste Prinzip zur Bestimmung der Nachhallzeit ist das Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen. Hier wird ein stochastisches Rauschsignal in einen Raum eingespielt, was nach statischem Anregen des Raumes im Zeitpunkt  $t_0$  abgeschaltet wird. Dabei wird der Schalldruckpegelverlauf aufgezeichnet, dessen Grundgröße, der Schalldruck, proportional zur Schallenergie ist. Ein veranschaulichendes Beispiel dazu ist in

Abbildung 4 angegeben. Am Pegel-Zeit-Verlauf ist nach dem Abschaltzeitpunkt  $t_0$  ein Pegelabfall zu erkennen, der ab einer gewissen Zeit in Grundrauschen übergeht. Zeitpunkt  $t_1$  kennzeichnet den Punkt, der 5 dB unter dem Schalldruckpegel während der statischen Anregung liegt. Zeitpunkt  $t_2$  ist ein frei gewählter Punkt, der die Dauer eines Pegelabfalls von meist 15 dB, 20 dB oder 30 dB zum Pegel bei  $t_1$  repräsentiert. Er darf jedoch nicht im vom Grundrauschen dominierten, bereits abflachenden Teil des Pegelabfalls liegen. Am Pegelabfall zwischen  $t_1$  und  $t_2$  kann nun eine mittlere Gerade eingezeichnet werden. Daran ist die Zeitspanne abzulesen, die äquivalent für einen 60 dB-Abfall ist. Das ist die Nachhallzeit  $T$  (Fasold, Sonntag, & Winkler, 1987).

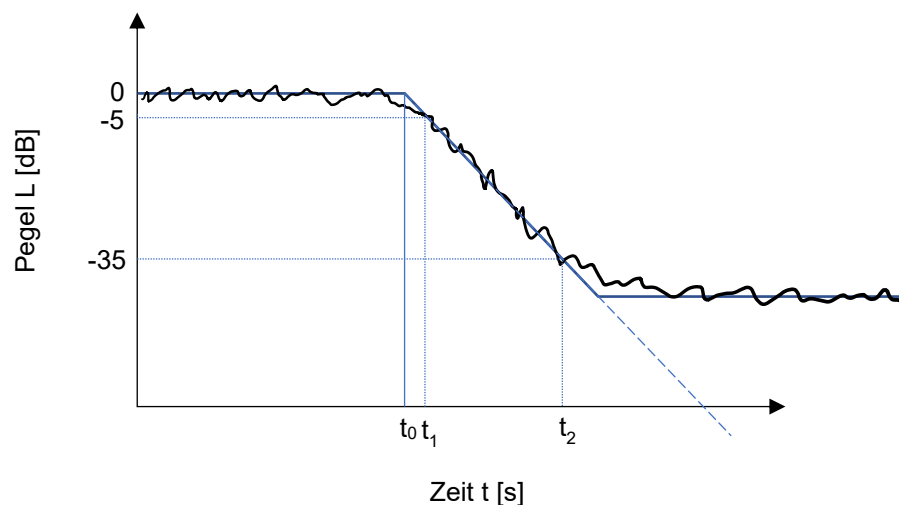


Abbildung 4: Pegel-Zeit-Verlauf bei der Bestimmung der Nachhallzeit mit beispielhaften Pegel- und Zeitbereichen

In heutigen Messverfahren wird die Nachhallzeit meist über die Impulsantwort bestimmt. Der Schalldruck- bzw. Energieabfall ist hier über die Schröder-Rückwärtsintegration der Impulsantwort  $E_s(t)$  definiert. Sie wird auch Energy Decay Curve, kurz EDC, genannt. Als Integrationszeitraum wird dabei die Gesamtlänge der Impulsantwort  $t$  zum Zeitpunkt des vollständig angeregten Raumes  $\infty$  verwendet

$$E_s(t) = \int_t^{\infty} p^2(t) dt . \quad (2.4.1.1)$$

Der für die Auswertung erforderliche Pegelverlauf wird mit dem zehnfachen dekadischen Logarithmus der EDC errechnet.

Zur Berechnung der Nachhallzeit wird zunächst der Punkt ermittelt, der 5 dB unter dem Anfangspegel liegt. Daraufhin wird über ein frei definierbares Pegelintervall im

abklingenden Pegelverlauf eine lineare Regressionsgerade gebildet. Üblicherweise werden hier Bereiche von 15 dB, 20 dB oder 30 dB verwendet, die als T15, T20 und T30 bezeichnet werden. Mit der Steigung der Regressionsgeraden kann die Abklingzeit des betrachteten Intervalls nun, wie bei der Methode mit abgeschaltetem Rauschen, auf ein Zeitintervall eines 60 dB - Abfalls interpoliert werden (Kuttruff, 2017).

Eine numerische Umsetzung dieses Verfahrens ist in Anhang A3 als Funktion „RT\_Regression.m“ beigelegt. Sie wurde in MATLAB implementiert und dient in der hier verwendeten Messauswertung als Vergleichsmethode.

Die Nachhallzeit kann jedoch auch mit alternativen Methoden berechnet werden. Dabei kommt die hallkorrigierte Impulsantwort zum Einsatz, um über die Abklingrate eine Nachhallzeit zu errechnen. Die hallkorrigierte Impulsantwort ist eine quadrierte Impulsantwort  $p^2(t)$ , die durch ihre Energy Decay Curve (siehe Formel (2.4.1.1)) normalisiert wird. Zur grafischen Darstellung des Verfahrens ist die Berechnung der hallkorrigierten Impulsantwort in Abbildung 5 schematisch erläutert.

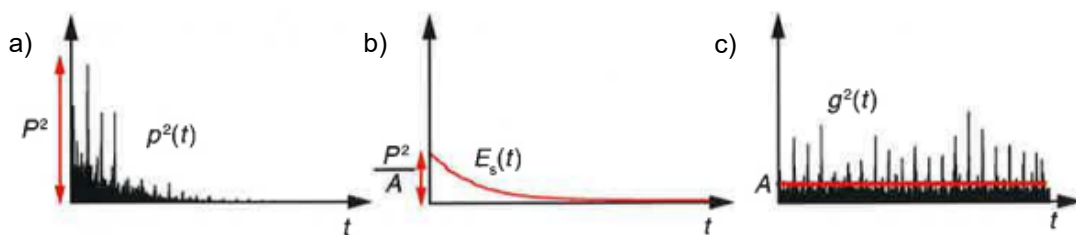


Abbildung 5: Errechnung der hallkorrigierten Impulsantwort (c) aus der quadrierten Impulsantwort (a) und dem Energieabfall (b) (Hanyu, 2014)

Äquivalent zu den vorherigen Methoden wird nun ein Zeitintervall der hallkorrigierten Impulsantwort betrachtet, was einem definierten Pegelabfall entspricht. Anschließend kann durch Mittelwertbildung des Betrachtungsintervalls die Abklingrate  $A$  bestimmt werden, die Auskunft über den abgefallenen Pegel in einer Sekunde gibt. Die Nachhallzeit ist nun mit

$$T = \frac{6}{\log_{10}(e)} \frac{1}{A} \approx \frac{13,82}{A} \quad (2.4.1.2)$$

ableitbar (Hanyu, 2014). Auch diese MATLAB-Funktion ist in Anhang A4 als „RT\_Hanyu\_DCIR.m“ der Arbeit beigelegt.

## 2.4.2 Berechnung von schalldruckpegel- und schallenergieäquivalenten Größen

Impulsantworten stellen zusätzlich zum Abklingverhalten eines Raumes die zeitlichen Energieeinflüsse an einer Position nach einer Raumanregung dar. Da bei einer konstanten Anregung an jedem Zeitpunkt die zugehörige Impulsantwort einer Sende- Empfangskombination vollständig enthalten ist, ist deren Gesamtenergie proportional zum Schalldruck.

Ein Verfahren zur Berechnung des örtlichen Schalldruckpegels aus einer Impulsantwort ist in der DIN EN ISO 18233 beschrieben. Darin wird die Impulsantwort  $p(t)$  zunächst quadriert und integriert. Als Integrationszeitraum wird dabei die Gesamtzeit  $t$  der Impulsantwort bis zum Zeitpunkt des vollständig angeregten Raumes  $\infty$  herangezogen. Grundrauschen und zeitliche Einflüsse auf die errechnete Größe werden vorerst vernachlässigt. Der Term wird mit der Konstante  $W_0$ , die die Anregungssignalleistung beschreibt, und einem willkürlich gewählten Bezugswert zur Pegelberechnung  $C_{\text{ref}}$  verrechnet. Der zehnfache dekadische Logarithmus des beschriebenen Terms ist anschließend der von der Anregungsamplitude abhängige, örtliche Raumpegel (DIN EN ISO 18233, 2006)

$$L_0 = 10 \lg \left[ \frac{W_0}{C_{\text{ref}}} \int_t^{\infty} p^2(t) dt \right] \text{ dB} . \quad (2.4.2.1)$$

Pegel sind als logarithmierte Größen im Verhältnis zu einem Bezugswert definiert. Wird bei Formel (2.4.2.1) nun auf die Logarithmierung und den Bezugswert  $C_{\text{ref}}$  verzichtet, ergibt sich daraus eine schalldruckäquivalente Größe. Aufgrund der Quadrierung und zeitlich begrenzten Integration der Impulsantwort resultiert eine örtliche Schallenergie  $E_0$

$$E_0 = W_0 \int_t^{\infty} p^2(t) dt . \quad (2.4.2.2)$$

In diskretisierten Anwendungen wird die Integration über eine Aufsummierung der Abtastwerte realisiert. Bei der Auswertung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messreihe ist dies mit der MATLAB-eigenen Funktion „sum()“ implementiert. Sie ist direkt im Auswertungscode (siehe Anhang A1 und A2) eingearbeitet, weshalb für die Berechnung der Schallenergie keine separate Funktion existiert.

### 3. Messaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau dient in dieser Messreihe dazu, Parameter zur Beschreibung von Diffusität im Verlauf einer Diffusionsänderung zu messen. Dazu orientiert sie sich an dem in der ISO 354 beschriebenen Verfahren zur „Prüfung der Diffusität“ und dessen Messanforderungen. Im Folgenden sind die Rahmenbedingungen und Methoden der Messreihe erläutert.

#### 3.1 Messaufbau

##### 3.1.1 Hallraum

Das Grundgerüst des Versuchsaufbaus bietet ein Modellhallraum (vgl. Abbildung 6), dessen Abmessungen maßstabsgetreue Abbildungen des neu geplanten Hallraumes für das Institut für Hörtechnik und Akustik der RWTH Aachen sind. Er wurde von Dr. Andreas Meier (Firma Müller-BBM Building Solutions GmbH) konzeptioniert und durch eine Praktikumsarbeit erbaut (Staubach, 2022).

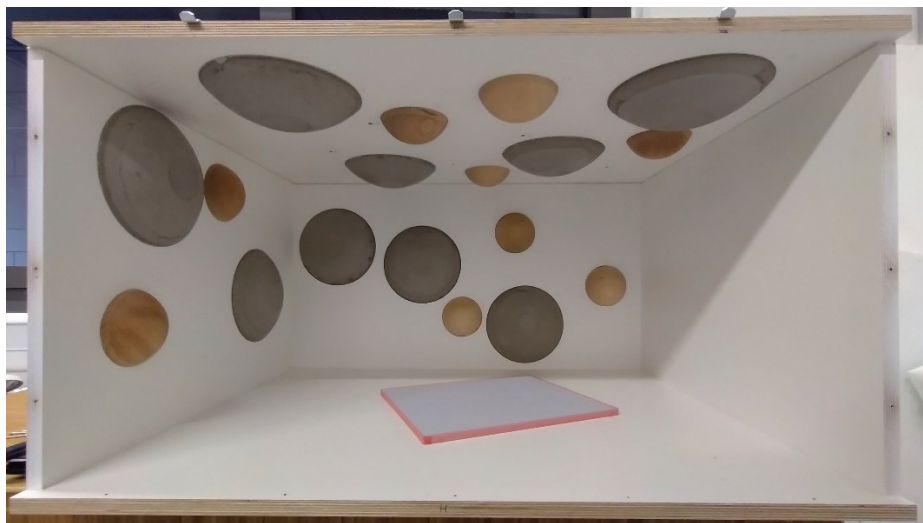
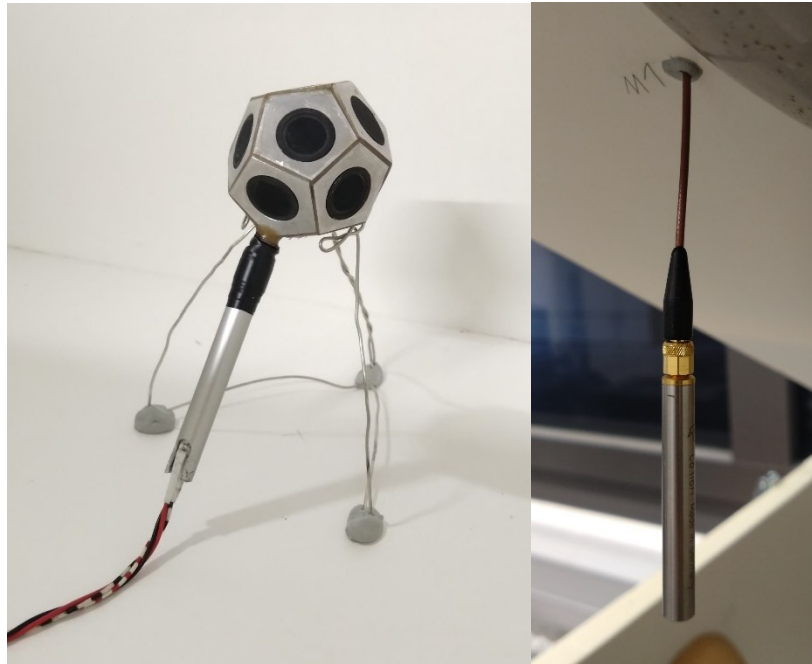


Abbildung 6: Schnittdarstellung des im Versuchsaufbau verwendeten Modellhallraumes

Damit die Modellnachbildung des Raumes Verwindungssteifigkeit und Stabilität bekommt, sind die Raumbegrenzungsflächen aus 19 mm dicken Multiplex-Mehrschichtplatten aufgebaut. Eine Oberflächenbeschichtung aus Melaminharz gibt den Flächen die benötigten akustisch reflektierenden Eigenschaften. Im Innenraum spannt sich dabei ein Volumen von rund  $0,318 \text{ m}^3$  auf, mit den Maßen 0,941 m Länge, 0,675 m Breite und 0,5 m Höhe. Da der Raum für homogene Messbedingungen luftdicht verschlossen sein muss, sind die Kantenstöße mit Maleracryl abgedichtet. Überstehende Reste in den Fugen

wurden entfernt. Ein Zugang zum Innenraum ist über die Deckfläche konstruiert. Sie ist mit 10 Kistenverschlüssen verschließbar und mit Schaumstoff-Dichtband abgedichtet. Das Kabel des Mini-Dodekaederlautsprechers wird dabei durch einen kleinen Ausschnitt im Dichtband nach außen geführt. Es entsteht dabei eine für den Luftaustausch vernachlässigbar kleine Öffnung. Die Mikrofone hängen durch Löcher von der Deckfläche, wobei die überschüssigen Lochflächen mit Karosseriedichtband abgedichtet sind. Damit werden sie in ihrer Position gehalten (siehe Abbildung 7).



*Abbildung 7: Mini-Dodekaederlautsprecher auf einem kleinen Drahtstativ und 1/4-Zoll Messmikrofon mit Deckenaufhängung*

Das Hallraummodell wird mit Diffusoren ausgekleidet, anhand derer ein möglichst homogenes Schallfeld entstehen soll. Sie reflektieren den eintreffenden Schall und streuen ihn durch eine ungleichmäßige Oberfläche in verschiedene Richtung. In diesem Fall sind die Streukörper bzw. Diffusoren in Form von Kugelsegmenten realisiert (siehe Abbildung 8). Um den Bau zu vereinfachen, bestehen die großen Streukörper aus Beton und die kleinen Streukörper aus Buchenholz. Durch die Gussform bedingt, besitzt der große Streukörper eine flache Stelle auf der Stirnseite und kleine, oberflächliche Löcher durch Bläschenbildungen während des Gusses. Dabei wird davon ausgegangen, dass sie sich in nicht relevantem Maße auf die akustischen Eigenschaften des Körpers auswirken. Die Buchenholzsegmente sind mit Klarlack behandelt, sodass keine ungewollten Absorptionen an deren Oberflächen auftreten. Die Befestigung an den Raumbegrenzungsflächen ist mit Gewindeeinsätzen in den Streukörpern realisiert. Hier kommen sowohl Hutmuttern mit einbetonierten Trägerplatten bei den großen Streukörpern als auch Gewindedübel aus Messing bei den kleinen Streukörpern zum Einsatz. Beide



Konstruktionen sind in Anhang E grafisch dargestellt. Vor ihrer Montage wird ein dünnes Band der Karosseriedichtmasse „RB IX“ der Firma „Teroson“ auf den Rand der Streukörper aufgebracht, was einen luftdichten Anschluss garantiert. Beim Festschrauben der Streukörper verteilt sich die Masse gleichmäßig um den Rand und kann formschlüssig abgetrennt werden. Dieser Schritt ist wichtig, da sonst Resonanzeffekte in Schlitzen oder Hohlräumen das Schallfeld bzw. das Abklingverhalten verfälschen könnten. Die Befestigungspositionen und Maße der Diffusorelemente sind in Anhang B2 und B3 beigelegt. Mit den Maßen und den theoretischen Überlegungen zur Wirkung von Diffusoren aus Abschnitt 2.2.2 ergibt sich eine akustische Wirksamkeit durch ihre Höhe (Abstand der Montagefläche zur Kugelsegmentspitze) ab den Frequenzen  $f_{\text{klein,h,diffus}} \approx 4764$  Hz und  $f_{\text{groß,h,diffus}} \approx 4133$  Hz. Wird ihr Durchmesser als Hauptkriterium zur Diffusionswirksamkeit verwendet, verringern sich die unteren Grenzfrequenzen auf  $f_{\text{klein,d,diffus}} \approx 3118$  Hz und  $f_{\text{groß,d,diffus}} \approx 1633$  Hz.



Abbildung 8: Kugelsegmentdiffusoren in großer Ausführung aus Beton (links) und kleiner Ausführung aus lackiertem Buchenholz (rechts) mit formschlüssiger Befestigung

Während der Messung ist das Hallraummodell an jeder Ecke auf gelbem Sylomer® „SR 11“ gelagert. Dadurch wird er akustisch von der darunter liegenden Werkbank entkoppelt. Bei anfänglichen Testmessungen ohne elastische Lagerung wurden Stabilisierungsbleche an der Werkbank durch den Sinus-Sweep zum Schwingen angeregt, was bei der Messung als Messabweichung erkennbar war. Diese Effekte sind nun so weit minimiert, dass davon ausgegangen werden kann, dass sie in den Messwerten kaum zu Abweichungen führen.

Weitere detaillierte Bilder zum Aufbau des Modellhallraumes sind in Anhang E dieser Arbeit beigelegt.

### 3.1.2 Messtechnik

Bei der Messung wurde mit insgesamt sechs Mikrofon- und zwei Lautsprecherpositionen gemessen. Sie sind in Anhang C1 und C2 angegeben. Es kamen sechs ¼“ Mikrofone zur Verwendung, die durch ihre geringe Größe einen irrelevanten Einfluss auf die Schallausbreitung im Raum haben. Sie werden von der Firma „Microtech Gefell“ hergestellt und sind als Modell „M370“ bezeichnet. Der Hersteller gibt einen Messfrequenzbereich von 20 Hz – 20 kHz an. Sie besitzen in dem genannten Frequenzbereich eine omnidirektionale Aufnahmecharakteristik und werden mit Konstantstrom (auch als IEPE, ICP etc. bezeichnet) betrieben. Ihre Microdot-Steckverbinder und das niedrige Gewicht ermöglichen es, auf Stative zu verzichten und die Mikrofone mit Kabeln von der Deckfläche zu hängen. Dort sind sie mit Karosseriedichtmasse befestigt, um einerseits eine gleichbleibende Position zu gewährleisten, aber auch die benötigten Bohrungen luftdicht zu verschließen. Ein von der Firma „Müller-BBM“ eigens hergestelltes IEPE-Speisegerät versorgt die Mikrofone mit dem benötigten Konstantstrom.

Zur Anregung des Raumes dient ein Mini-Dodekaederlautsprecher, der eine nahezu omnidirektionale Abstrahlcharakteristik besitzt. Er hat einen Durchmesser von ca. 5 cm und ist im Raum mit zwei aus Draht konstruierten Lautsprecherständern positioniert. Das Anregungssignal bekommt er durch einen „Apart MB-150“ Lautsprecherverstärker, der durch Bananenstecker angeschlossen ist. Der Frequenzgang der Anregungstechnik ist zwar nicht bekannt, ist aber dadurch, dass in dieser Messreihe ausschließlich vergleichende Messungen gemacht werden, vernachlässigbar.

Sowohl Verstärker als auch Konstantstromspeisung sind via XLR-Steckverbinder mit dem Messsystem verbunden. Dabei werden die eingehenden Mikrofonsignale vom Analog-Digitalwandler „Micstasy“ der Firma „RME“ digitalisiert und über das digitale Audioprotokoll MAD1 an das Audiointerface „Fireface UFX+“ der Firma „RME“ übermittelt. Über das Interface erhält der Lautsprecherverstärker sein Ausgangssignal. Bei der Messung wurde eine Abtastrate von  $f_a = 96$  kHz mit einer Bitrate von 24 Bit verwendet.

Die Messsoftware ist eine Eigenentwicklung der Firma „Müller-BBM“. Das Programm „m|venue“ ist ein akustisches Mess- und Auswertungstool hauptsächlich für Veranstaltungs- und Kulturräume. Da aber alle intern berechneten Parameter auf exportierbaren Impulsantworten beruhen, ist die Software universell einsetzbar. Es ist aber auch für Modellmessungen optimiert, da der messbare Frequenzbereich verschoben und die Frequenz- und Zeitskalierung direkt in der Auswertung berücksichtigt werden kann. Letzteres kam bei dieser Messung nicht zur Anwendung, da die Impulsantworten nach der Messung exportiert und mit der matrixbasierten Rechensoftware MATLAB

weitergerechnet wurden. Das dort verwendete Berechnungsskript ist eigens entwickelt und ist mit allen verwendeten Funktionen in Anhang A beigelegt.

Die Klimadaten wurden mit einem „Greisinger GFTB 200“ Hygro-/Thermo-/Barometer ermittelt. Das geschah je vor und nach einer Messung eines Diffusorbelegungszustandes, wobei dessen jeweiliges Mittel die Klimabedingung während eines Messzustandes repräsentiert. Die Kalibrierungen der Mikrofone erfolgte mit dem Brüel & Kjaer Type 4231 mit der Kalibrierfrequenz 1000 Hz und einem Referenzschalldruck von 94 dB. Alle während der Messreihe aufgezeichneten Daten sind in Anhang C1 und C5 angegeben.

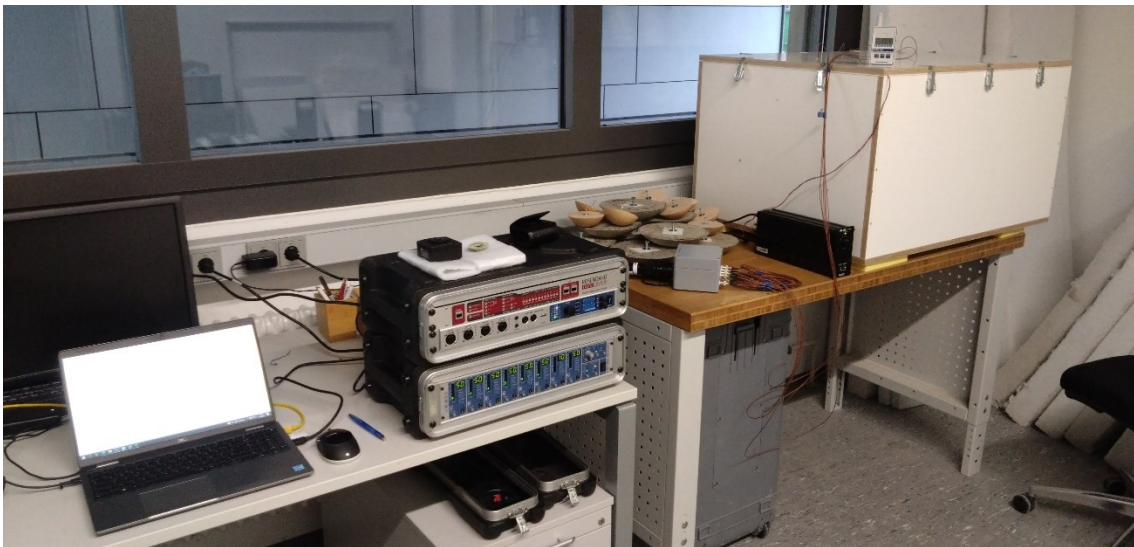


Abbildung 9: Messaufbau mit Messlaptop, Messinterfaces, den unmontierten Streukörpern und dem Modellhallraum

### 3.1.3 Absorberelemente

Im Rahmen einer Prüfung der Diffusität in einem Hallraum nach ISO 354 wird ein Prüfkörper, in diesem Fall ein absorbierendes Element, benötigt. Er muss bestimmte Anforderungen erfüllen, damit er für die Auslegungsmessung geeignet ist. In dieser Messreihe werden dieselben Absorber verwendet, um den Einfluss von Absorption auf eine Diffusitätsänderung im Raum zu analysieren. Sie dienen nicht nur zur Qualifizierung von Absorptionsgradmessungen im Hallraum, sondern beeinflussen auch das diffuse Schallfeld. In der Fläche des Absorbers im Hallraum geschieht keine bzw. eine abgeschwächte Reflexion des auftreffenden Schalls. Somit entsteht ein Energiefluss in Richtung des Absorbers, der sowohl die Homogenität als auch die Isotropie des diffusen Schallfeldes stört (Jeong, 2016).

Der Aufbau gestaltet sich nach den Richtlinien aus Abschnitt 6.2 der ISO 354. Im Originalmaßstab ist dazu eine Fläche zwischen  $10 \text{ m}^2$  und  $12 \text{ m}^2$  zu wählen, wobei das

Längenverhältnis von Länge und Breite zwischen 0,7 und 1 zu beachten ist. Für Räume mit einem Volumen von über  $200 \text{ m}^3$  kann der obere Flächengrenzwert durch einen Korrekturterm erweitert werden. Die Dicke muss zwischen 5 cm und 10 cm betragen und die Kanten müssen über ihre komplette Höhe verschlossen sein. Beim gesamten Aufbau und der Materialbeschaffung sind Absorptionsgrade in einem Frequenzbereich von 500 Hz bis 4000 Hz von mehr als  $\alpha > 0,9$  anzustreben (DIN EN ISO 354, 2003).

Alle soeben genannten Anforderungen wurden für diese Messreihe in den Modellmaßstab 1:10 überführt. Das bedeutet eine Verkleinerung der Maße durch den Faktor 10 und eine Erhöhung der Messfrequenzen um ebenfalls den Faktor 10. Es wurden zwei Absorber mit diesen Anforderungen gebaut, die aus Basotect und Polyesterfaser bestehen. Die Strömungswiderstände der beiden Materialien sind in Anhang D dieser Arbeit beigelegt. Zusätzlich zu den zwei als „klein“ bezeichneten Absorbern wurde ein flächenmäßig rund dreifach größerer Absorber erbaut. Der „große“ Absorber besteht ebenfalls aus Polyesterfaser. Mit ihm soll untersucht werden, ob sich eine steigende Gesamtabsorption auf die Diffusität eines (Hall-)Raumes bzw. auf die untersuchten Parameter auswirkt. Alle Kanten der Absorber wurden zusätzlich mit steifem, ca. 1 cm breiten Klebeband umrahmt. Exakte Maße der Elemente sind Anhang B4 zu entnehmen.

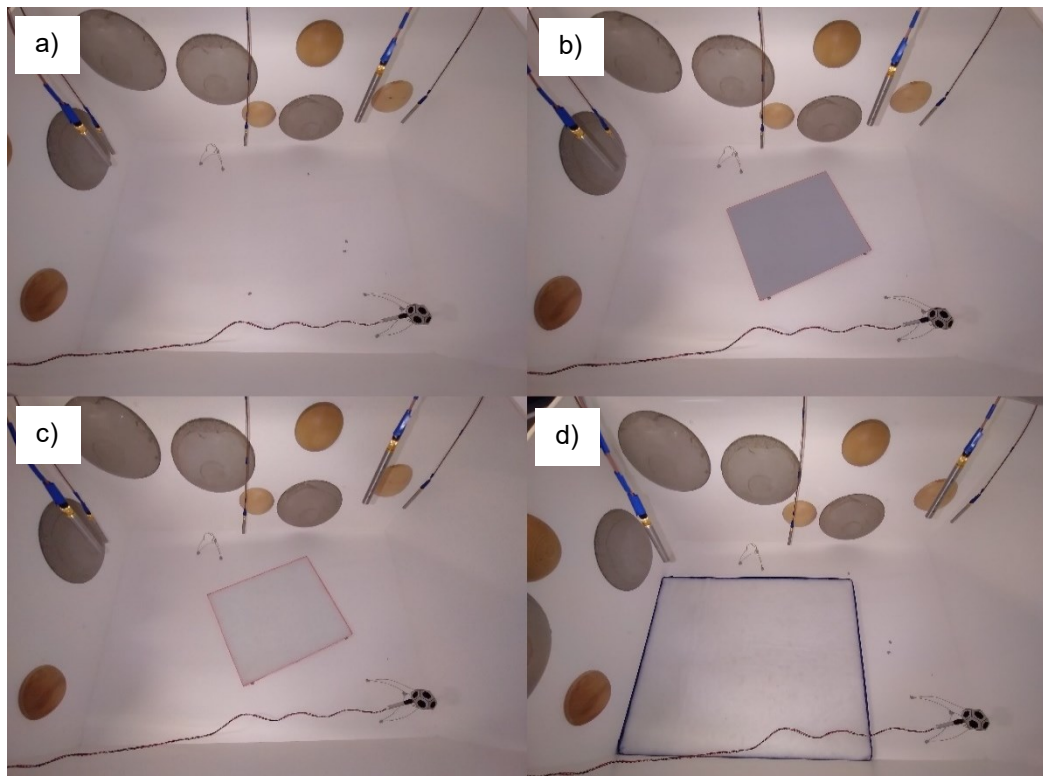


Abbildung 10: Absorberbelegungen während der Messreihe: a) leerer Hallraum; b) kleiner Basotectabsorber; c) kleiner Polyesterfaserabsorber; d) großer Polyesterfaserabsorber

Bei der Position im Raum ist laut ISO 354 darauf zu achten, dass keine Kante parallel zu den Raumbegrenzungsflächen angeordnet ist. Ebenfalls muss der Abstand zu den Wänden mindestens einen Meter betragen (DIN EN ISO 354, 2003). Die beiden Belegungen mit den kleinen Absorbern folgen den normativen Anforderungen. Bei der Positionierung des großen Absorbers wurde darauf einerseits aus Platzgründen und andererseits aus Versuchsgründen verzichtet. Er ist bei Messungen in einer Ecke positioniert und berührt dabei zwei Außenwände, um eventuelle Einflüsse von Absorption in Kanten oder Ecken zu analysieren. Für alle Absorberpositionen sind in Anhang C3 die Eckpositionen angegeben. Die einschließlich dem leeren Hallraum insgesamt vier Absorberbelegungen sind ebenfalls in Abbildung 10 dargestellt.

## 3.2 Prüfung der Diffusität nach ISO 354

Aktuelle normierte Verfahren zur Qualifizierung von Hallräumen sind in der internationalen Norm zur Bestimmung von Absorption im Hallraum ISO 354 in Anhang A und der Norm zur Bestimmung von Schalleistungen im Hallraum ISO 3741 beschrieben. Ziel beider Verfahren ist es, Messungen in Hallräumen möglichst präzise zu gestalten, um die durch abweichende Diffusitäten herbeigeführten Messabweichungen (Kim & Jeon, 2019) und Abweichungen zwischen Prüfinstituten (Scrosati, et al., 2020) möglichst gering zu halten. Während in der ISO 3741 nur Kontrollverfahren eines Raumzustandes beschrieben sind, gibt die ISO 354 eine Versuchsbeschreibung an, mit der Hallräume ausgelegt werden können. Ziel ist dabei, einen optimalen Belegungszustand mit schallstreuenden Diffusoren zu ermitteln, der für die darin beschriebenen Messanwendungen geeignet ist (DIN EN ISO 354, 2003) (DIN EN ISO 3741, 2011).

### 3.2.1 Normverfahren

Während des Verfahrens zur Prüfung der Diffusität werden in den leeren Hallraum sukzessive Diffusorelemente eingebracht. Nach Einbringen eines Elements wird jeweils der gemittelte Schallabsorptionsgrad  $\alpha_s$  eines porösen Prüfabsorbers im Frequenzbereich von 500 Hz bis 4000 Hz bestimmt. Er ergibt sich aus dem Verhältnis von äquivalenter Absorptionsfläche  $A_T$  zur vom Prüfobjekt bedeckten Fläche  $S$

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S}. \quad (3.2.1.1)$$

Die äquivalente Absorptionsfläche  $A_T$  errechnet sich aus der Differenz der äquivalenten Absorptionsfläche des prüfkörperbesetzten Raumes  $A_2$  und der äquivalenten Absorptionsfläche des prüfkörperunbesetzten Raumes  $A_1$ . Anhand der Nachhallzeit  $T$ , dem

Raumvolumen  $V$ , der Schallgeschwindigkeit  $c$  und dem Luftabsorptionskoeffizienten  $m$  ist die äquivalente Absorptionsfläche  $A_{\text{eq}}$  eines Raumes in beliebigem Zustand berechenbar

$$A_{\text{eq}} = 55,3 \frac{V}{c T} - 4 V m . \quad (3.2.1.2)$$

Damit ergibt sich die äquivalente Absorptionsfläche des Prüfkörpers  $A_T$  mit

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3 V \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4 V (m_2 - m_1) . \quad (3.2.1.3)$$

Die Schallgeschwindigkeit  $c$  errechnet sich dabei aus der Lufttemperatur  $\vartheta$  des Messzeitpunktes

$$c = \left( 331 + 0,6 \frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} \right) \frac{\text{m}}{\text{s}} . \quad (3.2.1.4)$$

Zur Korrektur der Luftdämpfung wird der Luftabsorptionskoeffizient  $m$  herangezogen. Dabei fließt der Luftdämpfungskoeffizient  $\alpha_L$ , der in der ISO 9613-1 erläutert wird, mit in die Berechnung ein (ISO 9613-1, 1993)

$$m = \frac{\alpha_L}{10 \lg(e)} . \quad (3.2.1.5)$$

Sind nun für alle Diffusorzustände die Schallabsorptionsgrade des Prüfkörpers bestimmt, können sie im Verlauf der Diffusoranzahl oder -fläche dargestellt werden. Laut Norm nähert der Schallabsorptionsgrad sich mit zunehmender Diffusoranzahl einem Maximum an, ab dem der Wert annähernd konstant bleibt. Die optimale Anzahl an Diffusoren ist ab dem Punkt erreicht, ab dem keine Änderungen mehr erkennbar sind. Als Richtwert der diffusen Fläche spricht die Norm dabei von ca. 15 % – 25 % der gesamten Raumboberfläche. Die Werte beziehen sich auf rotierende Diffusoren und Plattendiffusoren, die in unregelmäßiger Form im Raum positioniert sind (DIN EN ISO 354, 2003).

Für den in dieser Untersuchung verwendeten Modellhallraum wurde das Verfahren bereits in einer vorherigen Messreihe angewandt. Dort brachten sechs eingebrachte Diffusoren eine ausreichende Diffusität. An drei Wänden, denen jeweils eine unbesetzte Wand gegenübersteht, sind hier je zwei Diffusoren angebracht. Sowohl Deck- als auch lange Seitenfläche sind mit großen Streukörpern bestückt. Auf der kleinen Stirnfläche befinden sich ein großer und ein kleiner Streukörper. Der Anteil diffuser Fläche zum Gesamtflächenanteil beträgt dabei 16 % (Staubach, 2022).

### 3.2.2 Der Messreihe angepasstes Verfahren

In dieser Arbeit orientiert sich die Messreihe zur Qualifizierung von Parametern zur Beschreibung von Diffusion an dem soeben in Abschnitt 3.2.1 erläuterten Messverfahren. Hierfür werden vom diffusorunbesetzten Hallraum ausgehend sukzessive Diffusorelemente eingebracht und je Besetzungszustand zwölf Raumimpulsantworten ermittelt. In Anhang E ist für einen optischen Eindruck eine Bildreihe des Diffusorbelegungsverlaufes beigelegt. Die Reihenfolge und Positionen der Diffusoren sind dabei schon im Vorhinein festgelegt. Auf allen belegten Flächen soll dabei im kompletten Messverlauf der Anteil diffuser Fläche möglichst gleichbleibend ansteigen. In Anhang C4 ist dafür pro Diffusorzustand sowohl der diffuse Flächenanteil an der Gesamtfläche als auch an den jeweils belegten Einzelflächen tabellarisch angegeben. Die Überlegung dabei ist, dass Raummoden, die sich zwischen den drei parallelen Wandpaaren ausbilden, in gleichen Anteilen verändert werden. Alle weiteren Bedingungen und Messaufbauten des Normverfahrens sind unverändert in die Messreihe übernommen worden.

In bisherigen Untersuchungen wurde bereits festgestellt, dass Absorberelemente, die in einen Hallraum eingebacht werden, keinen positiven Einfluss auf das diffuse Schallfeld haben (Jeong, 2016). Das wird durch die ungleichmäßige Verteilung von Absorption verursacht, durch die ein direktonaler Energiefluss in Richtung des absorbierenden Elementes entsteht. Dadurch ist die Isotropie, die ausschlaggebend für ein diffuses Schallfeld ist, verletzt. Deshalb ist es in dieser Messreihe zusätzlich zur Diffusoränderung interessant, welchen Einfluss verschieden große Absorptionsflächen auf die untersuchten Messparameter haben. Deswegen kamen in jedem der Diffusorzustände vier Absorberbelegungen zum Einsatz. Sie bestehen aus dem unbesetzten Hallraum und drei jeweils mit einem Absorber aus Abschnitt 3.1.3 besetzten Hallraum.

## 3.3 Messparameter

Um im Modellmaßstab ohne aufwändige Mikrofonaufbauten messen zu können, wurde in dieser Arbeit der Fokus auf monaural aufgenommene Parameter gesetzt. Es kommen drei Parameter zum Einsatz, die jeweils aus Impulsantworten errechnet werden können. Die Grundlagen sind bereits in Abschnitt 2.4 näher erläutert. Alle drei Parameter beruhen auf verschiedenen Grundprinzipien eines diffusen Schallfeldes (siehe Abschnitt 2.2).

### 3.3.1 Degree of Time Series Fluctuation

Der „Degree of Time Series Fluctuation“, im weiteren Verlauf auch als „DTF“ bezeichnet, ist ein Messparameter, der sich aus der Impulsantwort berechnen lässt und laut Hanyu

einen Grad der Diffusität eines Schallfeldes anzeigen soll. Er betrachtet das Abklingverhalten eines vorherig angeregten Raumes mit dem Fokus auf dessen kurzzeitige Energieeinflüsse. Fallen dabei die am Mikrofon ankommenden Energien in gleichmäßigeren Amplituden ein, so ist das Schallfeld als diffuser anzusehen. Die Bestimmung erfolgt dabei an mehreren Punkten im Raum.

Zur Berechnung wird zunächst die Impulsantwort  $p(t)$  quadriert und durch seine Schröder-rückwärtsintegrierte Form  $E_s(t)$ , der EDC (siehe Formel (2.4.1.1)) normalisiert

$$g^2(t) = \frac{p^2(t)}{E_s(t)}. \quad (3.3.1.1)$$

Es ergibt sich nun eine quadrierte, sogenannte hallkorrigierte Impulsantwort  $g(t)^2$ , in der nur die temporären Fluktuationen einer Impulsantwort vorhanden sind. Der Energieabfall ist dabei eliminiert. Anschließend wird nur der Zeitraum betrachtet, der auch zur Bestimmung der Nachhallzeit herangezogen wird. Der Zeitbereich  $[t_1, t_2]$  erstreckt sich auf der logarithmierten EDC vom Zeitpunkt  $t_1$  bei  $L_1 = -5$  dB bis zu  $t_2$  bei  $L_2 = -x - 5$  dB, wobei die Variable  $x$  frei wählbar ist. In den meisten Fällen wird für  $x$  ein Pegelabfall von 15 dB, 20 dB oder 30 dB herangezogen (vgl. Abschnitt 2.4.1).

Der nächste Berechnungsschritt des DTF ist eine weitere Normalisierung. Dabei gibt es zwei Methoden, die jeweils unterschiedliche Präzisionen bei der Bestimmung aufweisen sollen. Bei der ersten Methode wird der betrachtete Zeitraum der hallkorrigierten Impulsantwort  $g(t)$  durch die Wurzel seines quadrierten Mittelwertes  $\overline{g^2(t)}$  normalisiert. Der Mittelwert entspricht dabei der Abklingrate  $A$  (Hanyu, 2014)

$$h(t) = \frac{g(t)}{\sqrt{\overline{g^2(t)}}} = \frac{g(t)}{\sqrt{A}}. \quad (3.3.1.2)$$

Bei der zweiten Methode wird zunächst eine zeitabhängige, momentane Abklingrate  $A(t)$  des Betrachtungszeitraumes ermittelt. Sie errechnet sich aus dem Gradienten vom  $-5$  dB und  $5$  dB -Punkt jedes Punktes  $t_x$  in der EDC. Im Anschluss wird sie ebenfalls zur Normalisierung der hallkorrigierten Impulsantwort  $g(t)$  verwendet

$$h(t) = \frac{g(t)}{\sqrt{A(t)}}. \quad (3.3.1.3)$$

Als nun hallkorrigierte, normalisierte Impulsantwort  $h(t)$  bezeichnet, kann anschließend unabhängig von der Normalisierungsmethode der Degree of Time Series Fluctuation



errechnet werden. Zunächst werden sowohl die Energiespitzen  $R(k)$ , deren Spitzenwerte einen variablen Schwellenwert  $k$  übersteigen, als auch die Gesamtenergie  $R_{\text{total}}$  der hallkorrigierten, normalisierten Impulsantwort berechnet. Die Integrationsgrenzen  $t_1$  und  $t_2$  beziehen sich dabei jeweils auf das bereits erläuterte Betrachtungsintervall

$$R(k) = \int_{t_1}^{t_2} h^2(t) \geq k \, dt ; \quad (3.3.1.4)$$

$$R_{\text{total}} = \int_{t_1}^{t_2} h^2(t) \, dt . \quad (3.3.1.5)$$

Aus dem Verhältnis der beiden Energien zueinander ist die Bildung der „fluctuation decay curve“  $z(k)$  möglich

$$z(k) = \frac{R(k)}{R_{\text{total}}} . \quad (3.3.1.6)$$

Der Punkt, an dem  $z(k) = 0,01$  gilt, gibt den Schwellenwert  $k$  an, der den DTF beschreibt. Der Wert sagt also aus, wie prägnant die stärksten 1 % der einfallenden Energiespitzen im Verhältnis zum Gesamtsignal ausfallen. Das Ergebnis des Parameters ist einheitslos (Hanyu, Hoshi, & Nakakita, 2018).

Die numerische Umsetzung in MATLAB erfolgte mit zwei eigens geschriebenen Funktionen „DTF\_Hanyu\_alt.m“ und „DTF\_Hanyu\_neu\_test.m“, die die beiden Rechenmethoden repräsentieren. Sie sind in Anhang A5 und A6 beigelegt.

### 3.3.2 Standardabweichung der räumlich verteilten Nachhallzeiten

Sowohl die räumlich gemittelten als auch die örtlich verteilt bestimmten Nachhallzeiten sind stark abhängig von der Diffusität im Raum. Der Theorie der Schröderfrequenz (siehe Formel (2.2.1.5)) zufolge ist dafür einerseits die Modendichte im Raum verantwortlich. Bei zunehmender Diffusion und dadurch resultierender Diffusität werden neue Moden gebildet, die die Modendichte des Gesamtraumes durch eine Verringerung ihres Frequenzabstandes zueinander erhöhen. Zusätzlich dazu kann mit eingebrachter Absorption die Halbwertsbreite der einzelnen Moden verringert werden. Beides resultiert in einer sinkenden Schröderfrequenz und demzufolge auch der Nachhallzeit. Die räumliche Unregelmäßigkeit entsteht dabei durch ungleichmäßige Dämpfungen von Moden und örtlich unterschiedlichen Modendichten. Ein weiterer Einflussfaktor im Hallraum ist die ungleichmäßige Verteilung der Absorptionsfläche. Übliche Näherungsformeln zur

Nachhallzeitbestimmung gehen von einer Gleichverteilung der Gesamtabsorptionsfläche aus. Die punktuelle Beeinflussung eines Raumes durch ein einzelnes Absorberobjekt führt daher zu Abweichungen der Formeln. Dennoch wird mit steigender Diffusität der Einfluss punktuell eingebrachter Absorption auf das Gesamtabklingverhalten homogener (Kuttruff, 2017). Die Abweichungen zwischen den räumlich verteilten Nachhallzeiten war bereits Gegenstand bisheriger Untersuchungen (vgl. Abschnitt 2.2.3). Auch wenn in den Verfahren oft die Standardabweichung nur als Zwischengröße dient, ist sie Grundlage für deren Betrachtungen. Sie ist daher relevant für die Qualifizierung von Diffusität und wird in dieser Messreihe betrachtet.

Zur Berechnung werden zunächst Impulsantworten an verschiedenen Stellen im Raum ermittelt. Daraus können anschließend mit den in Abschnitt 2.4.1 erläuterten Verfahren die Nachhallzeiten bestimmt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass der Analysebereich ausschließlich im Abklingbereich der Impulsantwort liegt und das Grundrauschen somit nicht einbezogen wird. Mit den räumlich verteilten Impulsantworten  $T_i$  ist es nun möglich die gemittelte Nachhallzeit  $\bar{T}$  mit Kenntnis der Anzahl an Sende- und Mikrofonpositionen  $n$  zu berechnen

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i. \quad (3.3.2.1)$$

Anschließend ist mit  $\bar{T}$  und  $T_i$  die Berechnung der absoluten Standardabweichung  $\sigma_T$  möglich

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}. \quad (3.3.2.2)$$

Die absolute Standardabweichung ist ein Maß dafür, dass 68% der ermittelten Werte  $T_i$  im Bereich von  $\bar{T} \pm \sigma_T$  liegen. Sie kann auch als Streubreite bezeichnet werden. Sie besitzt die Maßeinheit der Ausgangsgröße. In diesem Fall also Sekunden [s].

In einigen Betrachtungen ist es sinnvoll, die Abweichungen anteilig darzustellen. Die relative Standardabweichung  $\sigma_{T,\text{relativ}}$  berechnet sich dabei aus der absoluten Standardabweichung  $\sigma_T$  und dem räumlichen Mittelwert  $\bar{T}$ . Das ist beispielsweise dann hilfreich, wenn die Ausgangswerte mehrerer Messreihen, in diesem Fall die Nachhallzeiten der vier Absorberbelegungen, bereits große Unterschiede aufweisen, sie aber dennoch miteinander verglichen werden sollen

$$\sigma_{T,\text{relativ}} = \frac{\sigma_T}{\bar{T}}. \quad (3.3.2.3)$$

Die Berechnung dieses Parameters ist im Auswertungsskript mit den MATLAB-eigenen Funktionen für den Mittelwert „*mean()*“ und für die absolute Standardabweichung „*std()*“ implementiert (siehe Anhang A1 und A2).

### 3.3.3 Standardabweichung der räumlich verteilten Schallenergien

Die letzte grundlegende Theorie, die in dieser Messreihe untersucht werden soll, ist die räumliche Gleichverteilung der Schallenergiedichte. Auf ihr beruhen bereits einige Hallraumqualifikationsmethoden. In der Norm zur Bestimmung von Bauteildämpfungen von Wandbauteilen in Prüfständen ASTM E90-09 ist beispielsweise ein Verfahren beschrieben, das die Qualifizierung des gesamten Prüfstandes und somit der aneinandergeschlossenen Hallräume erläutert. Dort werden sowohl im Sende- als auch im Empfangsraum örtlich verteilte Schalldruckpegel ermittelt. Die Anregung erfolgt dabei nur über den Senderaum, während beide Räume durch ein Referenzbauteil getrennt sind. Zusätzlich dazu sind im Empfangsraum die äquivalenten Absorptionsflächen an jeder Mikrofonposition zu bestimmen. Aus den Standardabweichungen der drei Parameter kann nun ein Konfidenzintervall berechnet werden. Zur Qualifizierung des Prüfaufbaus sind Grenzwerte festgelegt, die bei Nutzung nicht überschritten werden dürfen (ASTM E 90-09, 2016). Auch wenn die Messreihe Prüfstände für Wandbauteile mit Sende- und Empfangsraum qualifiziert, wurde die Methode bereits für alleinstehende Hallräume verwendet (Bradley, Müller-Trapet, Adelgren, & Vorländer, 2014). Ein weiteres Verfahren, bei dem die Standardabweichung der Schalldruckpegel verwendet wird, ist in Anhang C und D der DIN EN ISO 3741 zu finden. Bei der Qualifizierung des Hallraumes kommt sowohl für Schallleistungsmessungen von Breitbandgeräuschen als auch von tonalen Komponenten das gleiche Verfahren zum Einsatz. Aus den räumlich verteilten Schalldruckpegeln wird eine Standardabweichung ermittelt, die in Prüfscenarien frequenzabhängige Grenzwerte nicht überschreiten darf (DIN EN ISO 3741, 2011).

Alle Verfahren beruhen auf dem Grundprinzip des im Raum gleichmäßig verteilten Schalldrucks. In dieser Untersuchung liegt der Fokus darauf, grundlegende Eigenschaften des diffusen Schallfeldes zu betrachten. Deshalb wird statt dem Schalldruckpegel die zum Schalldruck proportionale Größe, die Schallenergie, verwendet. Außerdem wird auf die Logarithmierung verzichtet, da ausschließlich die Grundgröße betrachtet werden soll.

Zunächst wird die örtliche Schallenergie  $E_i$  aus den Impulsantworten der  $n$  Sende- und Mikrofonpositionen anhand Formel (2.4.2.2) bestimmt. Dabei wird bei der Berechnung

$W_0 = 1$  definiert, da die Schalleistung des Mini-Dodekaederlautsprechers nicht bekannt ist. Daraus ist es nun möglich, den räumlichen Mittelwert  $\bar{E}$  zu bilden

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i. \quad (3.3.3.1)$$

Anschließend kann die räumlich verteilte absolute Standardabweichung  $\sigma_E$  berechnet werden

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}. \quad (3.3.3.2)$$

Sie wird in  $[\text{Pa}^2\text{s}]$  angegeben.

Wie bei der Standardabweichung der Nachhallzeit aus Abschnitt 3.3.2 kann es sinnvoll sein, die relative Standardabweichung  $\sigma_{E,\text{relativ}}$  zu betrachten. Sie wird aus dem Verhältnis von absoluter Standardabweichung  $\sigma_E$  zum Mittelwert  $\bar{E}$  errechnet

$$\sigma_{E,\text{relativ}} = \frac{\sigma_E}{\bar{E}}. \quad (3.3.3.3)$$

Die Berechnung dieses Parameters wurde ebenfalls mit den MATLAB-eigenen Funktionen für den Mittelwert „*mean()*“ und der absoluten Standardabweichung „*std()*“ in das Auswertungsskript implementiert (siehe Anhang A1 und A2).

## 4. Ergebnisdiskussion

Die Auswertung der drei Parameter erfolgt zunächst im gesamten Frequenzbereich von 315 Hz bis 31,5 kHz. Um anschließend Frequenzabhängigkeiten überprüfen zu können, sind die Parameter ebenfalls in Oktavbändern analysiert dargestellt. Die Oktavbänder von 1 kHz – 8 kHz wurden so gewählt, dass der Bereich um die Schröderfrequenz des Hallraumes abgedeckt ist. Sie verändert sich im Verlauf der Diffusorfläche von  $f_{s,Z0} \approx 3970$  Hz bis  $f_{s,Z18} \approx 2970$  Hz, wodurch eine frequenzmäßige Verdichtung der Raummoden stattfinden soll. Dafür ist rechnerisch die Nachhallzeit aus Abbildung 13 verantwortlich. Somit können sowohl modendominierte als auch diffuse Frequenzbereiche mit den Parametern analysiert werden.

Im bereits durchgeführten Verfahren zur Prüfung der Diffusität in Anhang A der ISO 354 wurde der ausreichende Diffusitätszustand bei sechs eingebrachten Diffusoren erreicht. Dabei war erkennbar, dass sich der dort gemessene Absorptionsgrad im Verlauf der Diffusoreinbringungen ab diesem Punkt an einen nahezu konstanten Wert annähert (Staubach, 2022). Somit ist in dieser Auswertung mit einer Diffusitätsänderung in den ersten sieben Diffusorbelegungszuständen zu rechnen. Vom erstem, mit keinem Diffusor besetzten Zustand bis zum mit sechs Diffusoren belegten Zustand. Es gilt daher zu testen, ob die hier analysierten Parameter ebenfalls Änderungen bis zum genannten Diffusorzustand anzeigen und ob sie eventuell noch spätere Diffusitätssteigerungen beweisen.

### 4.1 Messergebnisse

#### 4.1.1 Degree of Time Series Fluctuation

In der Theorie des Degree of Time Series Fluctuation (DTF) sollte sich im Verlauf einer Diffusitätsänderung eine deutliche Änderung abzeichnen. Das wurde bereits anhand simulativen Untersuchungen (Hanyu, 2014) gezeigt. Auf diese Messreihe überführt, sollte der DTF wie im Prüfverfahren der Diffusität der ISO 354 anfangs eine große Änderung aufweisen, die ab einem Scheitelpunkt in ein nahezu konstanten Wertebereich übergeht. Hier ist mit einer Verringerung des Wertes zu rechnen, da ein sinkender DTF eine höhere Diffusität zeigen soll.

## Gesamtspektrumanalyse

In der Praxis weichen die Messergebnisse jedoch von den erhofften Ergebnissen ab. Dazu ist in Abbildung 11 der räumlich gemittelte Verlauf des DTF in Abhängigkeit der Diffusoranzahl dargestellt.

Dabei wird zwischen den vier Absorberbelegungen unterschieden. In keiner der vier Zustände ist eine Änderung erkennbar, die relevant für diese Betrachtung wäre. Alle Verläufe bewegen sich in einem Wertebereich von ca.  $10 < DTF < 12$ , wobei die darin vorhandenen Änderungen keinem bestimmten Muster folgen. Auch im Vergleich zu den Klimabedingungen, die in 4.2 erläutert werden, sind keine Zusammenhänge ersichtlich. Rein aus den Ergebnissen des DTF ließe sich die Vermutung aufstellen, dass der Hallraum im leeren Ursprungszustand bereits eine ausreichende Diffusität aufweist. Das steht aber in keinem Konsens zum bisherig durchgeführten Verfahren zur Prüfung der Diffusität nach ISO 354, bei dem der leere Hallraum eine große Abweichung zum optimalen Diffusitätszustand zeigt (Staubach, 2022).

**Degree of Time Series Fluctuation (DTF) mit zunehmender Diffusoroberfläche**

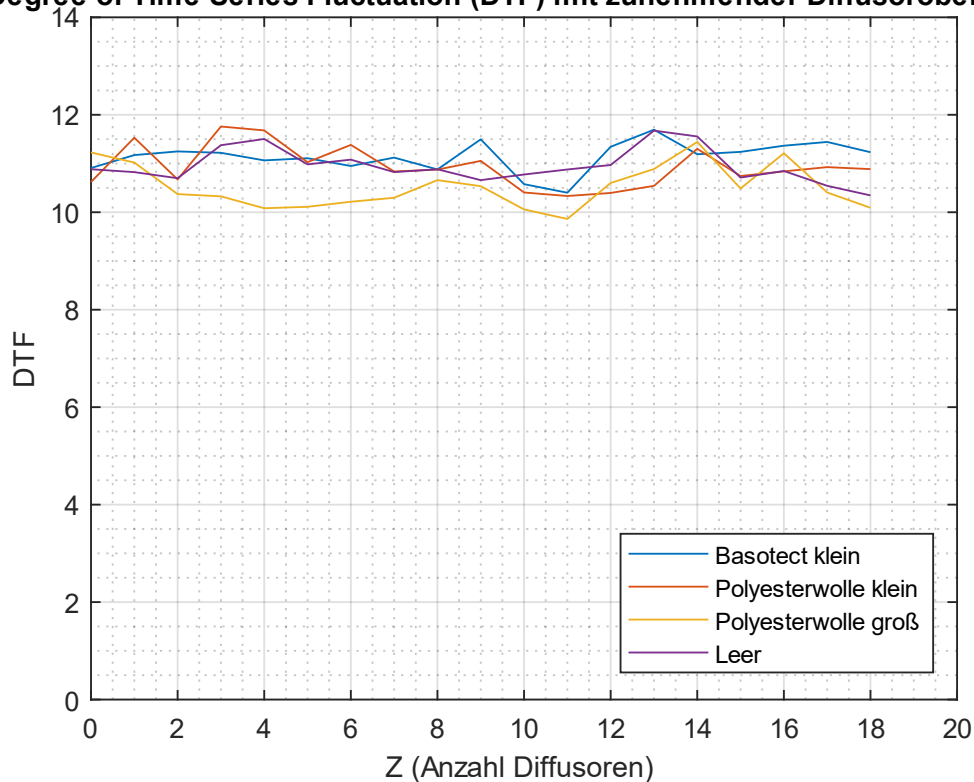


Abbildung 11: Degree of Time Series Fluctuation (DTF) in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen

## Oktavbandanalyse

Zusätzlich zu den Auswertungen im gesamten Frequenzspektrum von 315 Hz bis 31,5 kHz wurden die Impulsantworten oktavbandgefiltert und im Verlauf der Diffusoränderung in Abbildung 12 dargestellt. So sind Analysen frequenzabhängiger Zusammenhänge möglich. Der Betrachtungsbereich umfasst vier Oktaven mit den Mittenfrequenzen von 1 kHz bis 8 kHz. In jedem Oktavband sind außerdem alle vier Absorberbelegungen enthalten. Dennoch zeigen sich auch hier keine Ergebnisse, die die Aussagefähigkeit des Parameters bekräftigen. Im Verlauf der Diffusorzunahme sind keinerlei Änderungen vorhanden, aus denen eine Diffusitätsverbesserung oder -verschlechterung herleitbar wäre. Eine leichte Frequenzabhängigkeit ist zwar erkennbar, dennoch liegt die Vermutung nahe, dass sie unabhängig von der Diffusität auftritt. Grund dafür ist die bereits fehlende Änderung des DTF in den ersten Diffusorbelegungs Zuständen. Einzig die Abweichungen zwischen den Absorberbelegungen verkleinern sich mit zunehmender Messfrequenz. Sie sind aber so gering, dass daraus keine relevanten Schlüsse herleitbar sind.

### Oktavbandgefilterter Degree of Time Series Fluctuation (DTF) mit zunehmender Diffusoroberfläche

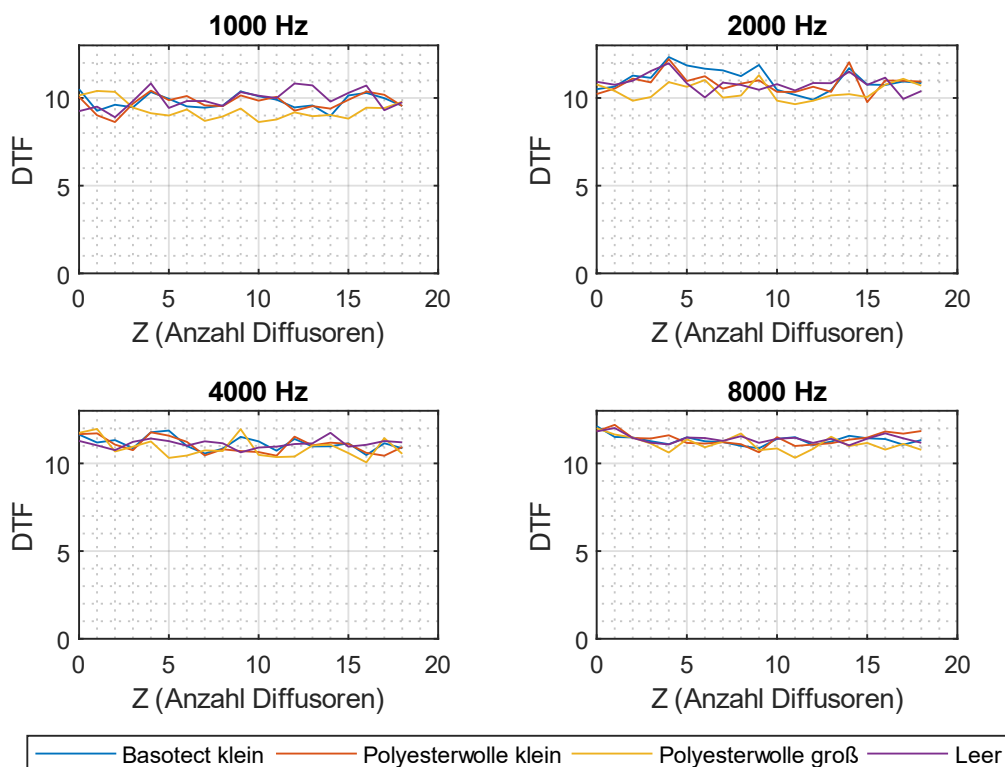


Abbildung 12: Oktavbandgefilterter Degree of Time Series Fluctuation (DTF) in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungen in Frequenzbändern der Mittenfrequenzen 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz

## Einordnung

Somit ist festzuhalten, dass der Parameter für diesen Versuchsaufbau ungeeignet ist. Es ist daher ebenfalls zweifelhaft, ob der Parameter tatsächlich feine Strukturen einer Diffusitätsänderung aufzeichnen kann oder ob er nur für größere Energiefluktuationen geeignet ist. Des Weiteren gilt es zu untersuchen, ob die Verteilung und Stärke kurzzeitiger Energieeinfüsse überhaupt ein Indikator für (fehlende) Diffusität ist oder ob dafür eher größere, langanhaltendere Energieeinfüsse verantwortlich sind. Dazu gehören beispielsweise Nichtlinearitäten im Abklingverhaltens eines Raumes. Um die Zusammenhänge zwischen DTF und Schallfeldern näher zu untersuchen, ist es für weitere Analysen zunächst sinnvoll, Wertebereiche mehrerer Räume mit unterschiedlichen Einrichtungszuständen miteinander zu vergleichen.

Wie in Abschnitt 2.2.3 erwähnt, gibt es bereits Parameter zur Diffusitätsqualifikation, die die Linearität des Abklingverhaltens analysieren. Um das auch in die Bestimmung des DTF einzubeziehen, ist es überlegenswert, bei der Berechnung der hallkorrigierten Impulsantwort statt durch die EDC, durch eine ideale Abklingkurve zu normalisieren. Somit wären alle Abweichungen zum idealen Energieabfall in der hallkorrigierten Impulsantwort enthalten. Dennoch sind durch die Schwellenwert-Berechnungsmethode Energiespitzen maßgeblich für den DTF verantwortlich, die, wie soeben analysiert, in keinem Zusammenhang mit der Diffusität eines Raumes stehen.

### 4.1.2 Standardabweichung der räumlich verteilten Nachhallzeiten

#### Gesamtspektrumanalyse der Nachhallzeit

Um zunächst die Nachhallzeit im Hallraum einordnen zu können, ist der räumliche Durchschnitt im Verlauf der Diffusoränderung und mit den vier Absorberzuständen dargestellt. Zu beachten ist, dass die Werte die rohen Messdaten aus der Modellmessung repräsentieren und nicht in den Realmaßstab überführt worden sind. Sie sind also im Vergleich zum realen Raum um den Maßstabsfaktor 10 niedriger. Bei der Ermittlung der Nachhallzeiten kam die Berechnungsmethode nach Hanyu (2014) mit einem Analysebereich des Pegelabfalls von 20 dB zum Einsatz. Die Zeit wurde anschließend auf eine Abklingzeit eines Abklingbereiches von 60 dB interpoliert. In Wertevergleichen mit anderen Bestimmungsmethoden (vgl. Abschnitt 2.4.1) wurde die Validität der Berechnungsmethode bekräftigt. Mit den gemessenen Impulsantworten waren dabei vernachlässigbar geringe Abweichungen zwischen den Methoden zu erkennen. Außerdem kam es der Verarbeitung der gemessenen Datenmenge zugute, da die Nachhallzeit mit diesem Verfahren schneller berechenbar ist.



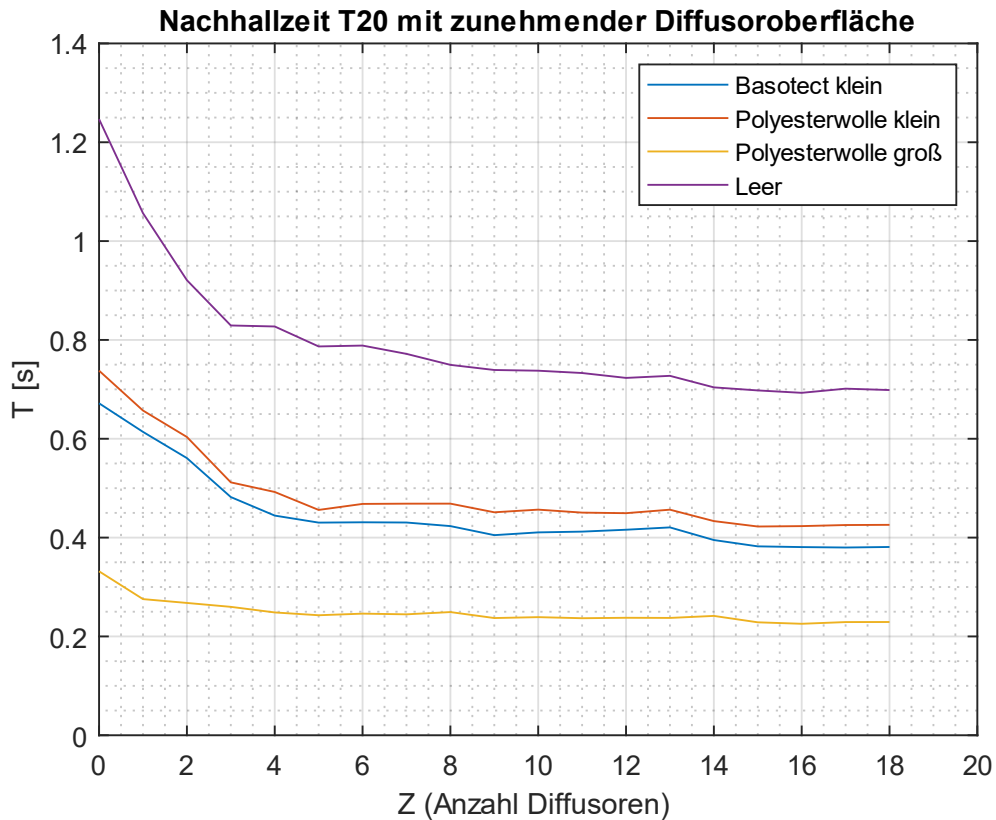


Abbildung 13: Räumlicher Mittelwert der Nachhallzeit T20 in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen

Zunächst wird der Diffusorverlauf betrachtet. Alle Nachhallzeiten der vier Absorberbelegungen sinken bis ca. zum sechsten Zustand ab, wobei die Werte sich danach nur geringfügig ändern bzw. absinken. Das ist mit den theoretischen Überlegungen aus Abschnitt 2.2.1 vergleichbar, da eine Diffusitätssteigerung einer Verlagerung der im Raum herrschenden Schallenergie von dominanten Raummoden zu mehreren, frequenzmäßig dichter aneinander liegenden Raummoden gleichkommt. Weil in starken und dominanten Raummoden mehr Energie erhalten bleiben kann, fällt dadurch die Nachhallzeit länger aus. Der leichte Abfall der Nachhallzeit ab dem sechsten Diffusorzustand ist einerseits mit dem Raumvolumen und andererseits mit der Gesamtabsorptionsfläche erklärbar (siehe Formel (3.2.1.2)). Wird ein Diffusorelement in den Hallraum eingebaut, verkleinert sich dessen Volumen. Ebenso entsteht durch die gekrümmte Oberfläche eine höhere Gesamtoberfläche im Raum, die eventuell in einer leicht veränderten Gesamtabsorption resultieren kann. Leichte Absorptionen durch die Diffusoren sind dabei nicht ausschließbar. Aufgrund beider Einflüsse reduziert sich dabei die Nachhallzeit. Da eine starke Änderung der Nachhallzeit nach dem sechsten Diffusorzustand nicht mehr erkennbar ist, kann davon ausgegangen werden, dass die soeben erläuterten Phänomene dort einer Diffusitätsänderung überwiegen.

Zwischen den Absorberbelegungen sind deutliche Unterschiede erkennbar. Mit steigender Absorption im Gesamtraum sinkt die Nachhallzeit. Das kann ebenfalls mit Formel (3.2.1.2) veranschaulicht werden. Steigt die äquivalente Absorptionsfläche eines Raumes, wie in diesem Fall mit verschiedenen eingebrachten Absorbern, sinkt dessen Nachhallzeit ab.

### Gesamtspektrumanalyse der absoluten Standardabweichung der Nachhallzeit

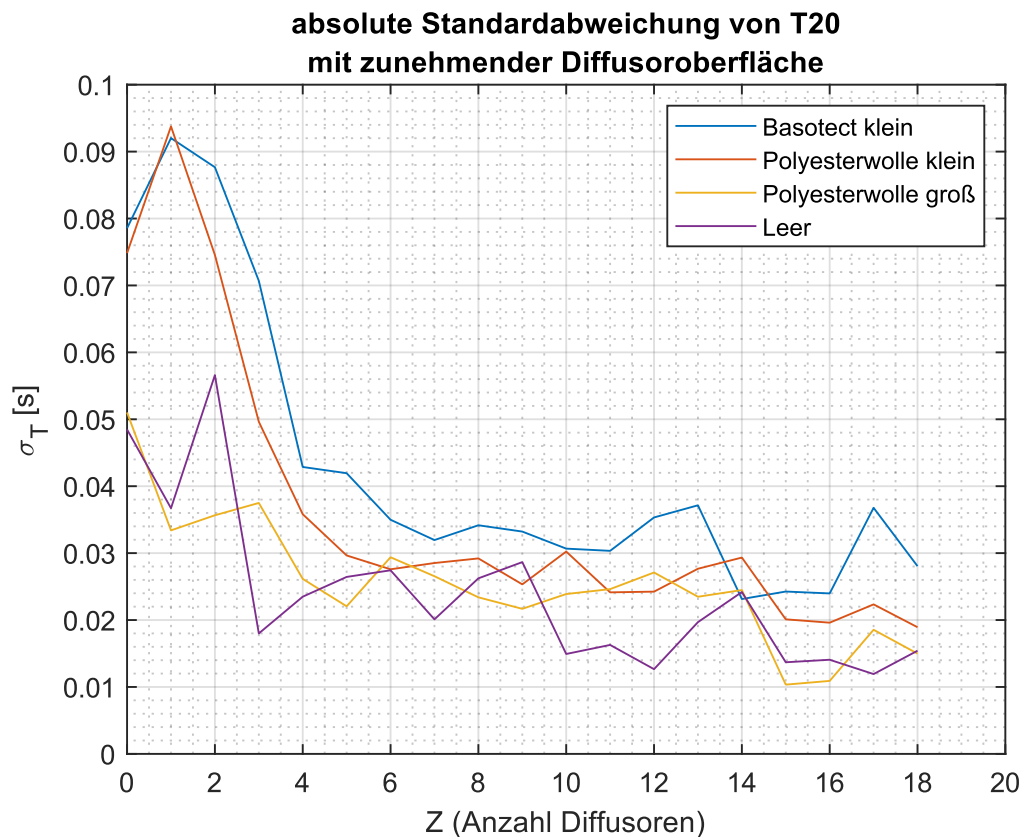


Abbildung 14: Absolute Standardabweichung der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen

Die Standardabweichung der räumlich verteilt bestimmten Nachhallzeiten soll durch geringere Werte eine höhere Diffusität anzeigen. In ihrer absoluten Betrachtung zeigt sie in diesen Messungen im Vergleich zu den Verläufen des DTF aus Abschnitt 4.1.1 deutliche Annäherungen an den erhofften Verlauf. Das ist durch Abbildung 14 vor allem in den Absorberbelegungen der beiden normgerecht ausgelegten Absorbern, dem Basotectabsorber und dem kleinen Polyesterfaserabsorber erkennbar. In den ersten Diffusorzuständen fällt die absolute Standardabweichung hier vom Spitzenwert  $\sigma_{T,absolut,klein,Z1} \approx 0,9$  s um rund zwei Drittel auf  $\sigma_{T,absolut,klein,Z7} \approx 0,3$  s ab. Dennoch fällt sie nicht von Anfang an, sondern ab dem ersten eingebrachten Diffusorelement. Im

Vergleich zum restlichen Verlauf könnte das einerseits auf äußere Einflüsse zurückführbar sein. Andererseits könnte eine tatsächliche Diffusitätsverschlechterung wegen eines ungünstig platzierten Diffusors dafür verantwortlich sein. Das ist jedoch im Vergleich zu den Verläufen des leeren und dem mit dem großen Polyesterfaserabsorber belegten Hallraum strittig. Die Schwankungen in den restlichen Zuständen ab Z7 sind dagegen als Messabweichungen interpretierbar, da keine relevanten Änderungen erkennbar sind. Auffällig ist hier jedoch, dass der mit dem großen Polyesterfaserabsorber belegte Zustand sich kaum vom leeren Hallraum unterscheidet. Dadurch, dass die im leeren Hallraum gemittelten Nachhallzeiten höher ausfallen, fallen dessen absolute Standardabweichungen geringer ins Gewicht. Vergleichende Analysen der Absorberbelegungsstände sind demnach durch die Darstellung der relativen Standardabweichung sinnvoller. Dennoch bestätigt sich die Theorie des Parameters, dass ungleichmäßig eingebrachte Absorption eine größere Standardabweichung der Nachhallzeit zufolge hat. Das ist vor allem bei den beiden kleinen Absorberelementen zu sehen.

### **Gesamtspektrumanalyse der relativen Standardabweichung der Nachhallzeit**

Um anteilige Abweichungen im Bezug zur Ausgangsgröße darzustellen, wurde die relative Standardabweichung aus Abschnitt 3.3.2 für die Nachhallzeit bestimmt. Sie ist in Abbildung 15 dargestellt.

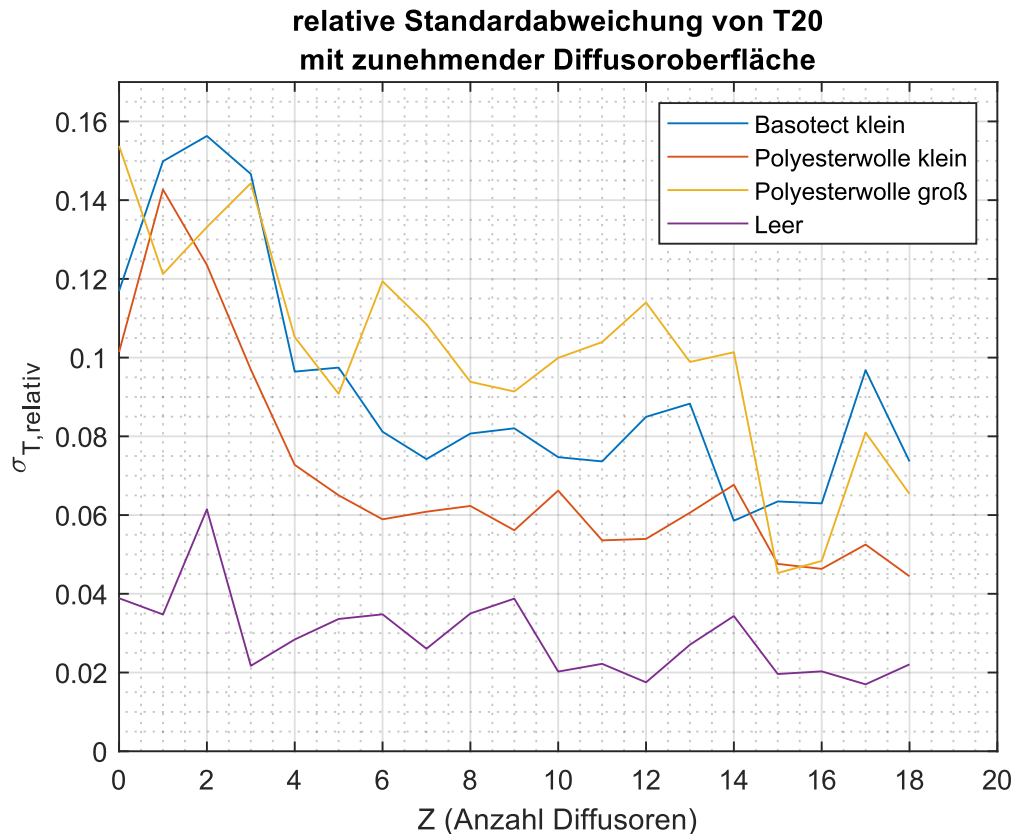


Abbildung 15: Relative Standardabweichung der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen

Auch bei der Betrachtung der relativen Standardabweichung ist die Verringerung eines Wertes einer Diffusitätssteigerung im Raum gleichzusetzen. Die beiden Diffusionsverläufe der kleinen, normgerecht ausgelegten Absorber ähneln dabei erneut dem optimalen Verlauf. Sie weisen im Vergleich zur absoluten Standardabweichung eine geringere ausgeprägte Absenkung in den ersten sechs Diffusorzuständen auf. Die ungefähre Halbierung der Anfangswerte von  $\sigma_{T,relativ,klein,Z1} \approx 0,15$  auf  $\sigma_{T,relativ,klein,Z7} \approx 0,07$  zeigt dennoch eine aussagefähige Verbesserung der Diffusität an. Der unbesetzte Hallraum verändert sich jedoch kaum. Es ist zwar eine leicht sinkende Tendenz erkennbar, aber auch hier überwiegen Messabweichungen. Ähnlich ist der Verlauf des großen Polyesterfaserabsorberzustandes zu interpretieren. Er sinkt zwar mit steigender Diffusoranzahl ab, es ist aber kein Scheitelpunkt zu erkennen. Seine mehr als Halbierung der relativen Standardabweichung von  $Z = 14$  zu  $Z = 15$  gleicht einer Temperaturschwankung während der Messreihe (vgl. Abbildung 21). Bei anderen Absorberbelegungen sind aber keine Auswirkungen in diesem Muster zu beobachten. Deswegen ist Zusammenhang also auszuschließen.

Gegensätzlich zu Abbildung 14 sind in Abbildung 15 deutliche Unterschiede zwischen den Absorberbelegungen zu sehen. Dabei liegt der unbesetzte, leere Hallraum in einem

niedrigen Wertebereich von ca.  $0,02 < \sigma_{T,\text{relativ,leer}} < 0,06$ , was grundsätzlich eine hohe Diffusität anzeigt. Die restlichen drei Absorberbelegungen zeigen größere relative Standardabweichungen, je größer die eingebrachten Absorberflächen sind. Für diese Unterschiede ist rechnerisch betrachtet die reine Nachhallzeit verantwortlich (vgl. Formel (3.3.2.3)). Sie weist als einziger Parameter bei der Berechnung der relativen Standardabweichung nach dem siebten Zustand Unterschiede zwischen den Absorberbelegungen auf. Die Schröderfrequenz (siehe Formel (2.2.1.5)) besagt jedoch, dass mit steigender Nachhallzeit der frequenzmäßige Anteil des diffusen Schallfeldes auf das Gesamtschallfeld kleiner wird. Somit müsste der leere Hallraum weniger diffus sein als der absorberbesetzte Raum. In die relative Standardabweichung überführt, müsste der leere Hallraum daher höhere Werte besitzen als die restlichen drei Absorberbelegungen. Das steht im Disput mit den in Abbildung 15 dargestellten Werten. Bei der Ergebnisdiskussion spielt ebenfalls die Gleichverteilung der Absorptionsflächen eine Rolle. Formel (3.2.1.2) zur Bestimmung der äquivalenten Absorptionsfläche eines Hallraumes geht von einer homogenen Verteilung der Gesamtabsorption aus. Gibt es dabei Unregelmäßigkeiten, ist der Zusammenhang zwischen Absorptionsfläche und Nachhallzeiten nicht vollständig gegeben und es kann zu Messabweichungen kommen. In diffusen Schallfeldern wird der Einfluss punktuell eingebrachter absorbierender Fläche auf das räumliche Abklingverhalten homogener. Die Standardabweichung der räumlichen Nachhallzeiten muss sich also entweder mit Zunahme der Diffusität oder mit homogenerer Verteilung der Gesamtabsorption verringern. Das bekräftigt die Betrachtung der relativen Standardabweichung der Nachhallzeit als Qualifikationsparameter für Diffusität.

## Oktavbandanalyse der relativen Standardabweichung der Nachhallzeit

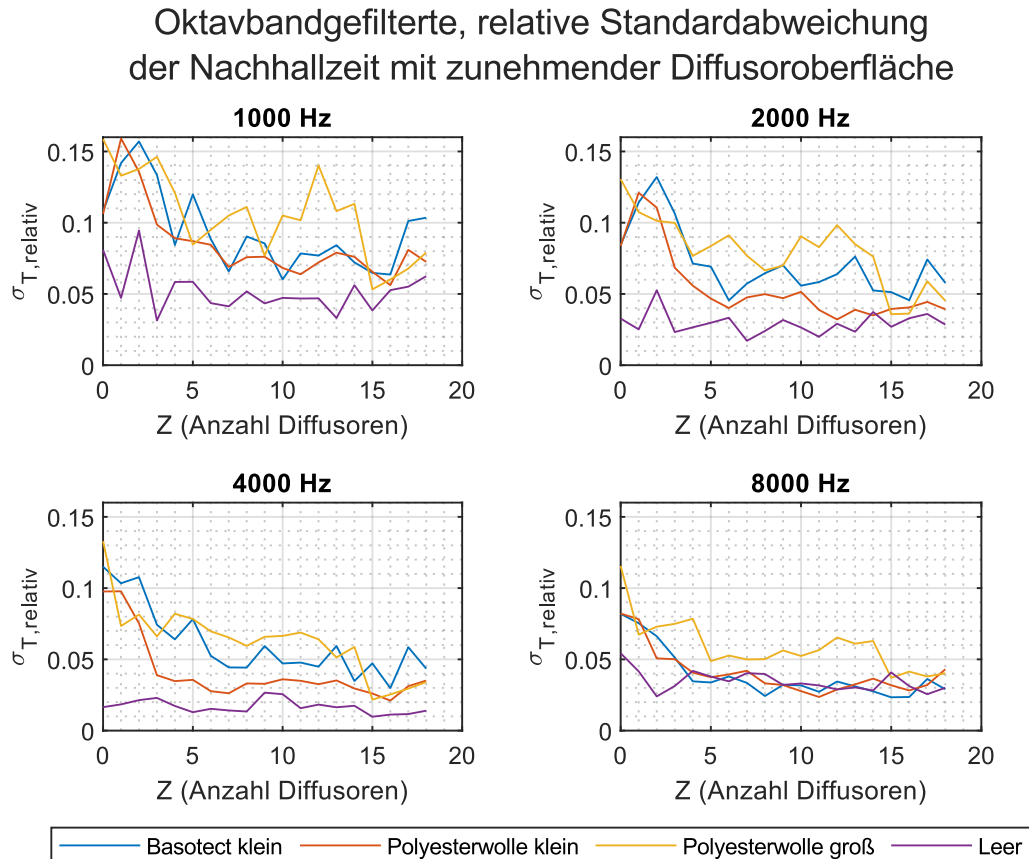


Abbildung 16: Oktavbandgefilterte relative Standardabweichung der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungen in Frequenzbändern der Mittenfrequenzen 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz

In Abbildung 16 sind die relativen Standardabweichungen der Nachhallzeit in vier Oktavbändern dargestellt, um einen groben Überblick über die Frequenzabhängigkeit des Parameters zu geben. Mit der Zunahme des analysierten Frequenzbereiches sinkt die relative Standardabweichung im Durchschnitt ab. Würde die absolute Standardabweichung zwischen örtlichen Nachhallzeiten keine Frequenzabhängigkeit besitzen, müsste die relative Standardabweichung allein aufgrund der Luftdämpfung und der dadurch sinkenden Nachhallzeit mit zunehmender Frequenz steigen (vgl. Formel (3.3.2.3) und Abschnitt 4.2). Da das nicht der Fall ist, überwiegt rechnerisch die Änderung der absoluten Standardabweichung der Änderung der Nachhallzeit. Mit zunehmender Messfrequenz erhöht sich daher die räumliche Homogenität der Nachhallzeit. Das bekräftigt zunächst den Einfluss von Diffusion auf die theoretische Definition einer Grenzfrequenz zwischen modendominiertem Raum und einem diffusen Schallfeld (vgl. Ansatz der Schröderfrequenz, Abschnitt 2.2.1). Auch wenn die absolute Standardabweichung bei der Berechnung der relativen Standardabweichung der Nachhallzeit überwiegt, bestätigt sich hier

wiederum erneut ein Widerspruch zu der Schröderfrequenz (siehe Formel (2.2.1.5)). Zunehmender Absorptionsfläche geht ein Abnehmen der Nachhallzeit einher, was ebenfalls in einem Absinken der Schröderfrequenz resultiert. Somit müssten verbesserte Diffusitäten bei größeren eingebrachten Absorbern bereits ab tieferen Frequenzen beobachtbar sein. Das spiegelt sich jedoch nicht in den relativen Standardabweichungen wider, deren Anstieg zu tieferen Frequenzen hin und bei größer werdenden Absorptionsflächen eine Verschlechterung der Diffusität anzeigt.

Missverständliche Benennungen und Definitionen akustischer Situationen sind die Ursache der Diskrepanzen zwischen Messergebnissen und der Schröderfrequenz. Laut Jeong (2016) sollte der höherfrequente, nicht mehr modale Zustand eines Schallfeldes in drei Begriffsdefinitionen unterteilt werden: in die Diffusität, die Mischung und die Ergodizität. Die Diffusität bezeichnet dabei die exakte Umsetzung der theoretischen Überlegungen aus Abschnitt 2.2.1. Die Mischung gilt als Zustand, ab dem keine Merkmale des initialen Anregungszustandes eines Systems nachvollziehbar sind, wodurch Absorption irrelevant für eine ausreichende Mischung ist. Die Ergodizität beschreibt, dass während einer zeitlichen Entwicklung alle theoretisch von dem System erwarteten Phänomene gemittelt eingetreten werden. Alle drei Definitionen bauen aufeinander auf, sodass zur Erfüllung des diffusen Schallfeldes sowohl Mischung als auch Ergodizität vorhanden sein müssen. Genauso muss zur vollständigen Mischung die Definition eines ergodischen Systems erfüllt sein (Zhang & Lee, 2021). Für die Schröderfrequenz bedeutet das, dass sie nicht den Zusammenhang zur Diffusität, sondern zur Mischung beschreibt.

Die Erkenntnisse aus den frequenzabhängigen Verläufen in Abhängigkeit von der Anzahl an Diffusorelementen bleiben ähnlich zu den über den kompletten Frequenzbereich bestimmten Verläufen. Verringerungen in den ersten sechs Diffusorzuständen bleiben anteilig ungefähr gleich. Auch der Scheitelpunkt, ab dem sich die Diffusität nicht mehr verändern soll, bleibt ungefähr am selben Diffusorzustand wie in der Gesamtanalyse. Zu tiefen Frequenzen hin ließe sich zwar eine längere Diffusitätsänderung erahnen, sie wird aber von Messabweichungen überschattet. Lediglich die Messabweichung verringert sich mit zunehmendem Frequenzband.

### **Einordnung des Parameters**

Über den Parameter der Standardabweichung der Nachhallzeit ließe sich diskutieren, ob er, statt Aussagen über die direkte Diffusität zu treffen, eher den störenden Einfluss punktuell eingebrachter Absorptionsfläche auf das diffuse Schallfeld betrachtet. Das würde bedeuten, dass bei niedrigerer Standardabweichung der Nachhallzeit der Einfluss inhomogen verteilter Absorptionsfläche auf das Schallfeld ganzheitlicher wird. In der Kategorisierung der Qualifizierungsmethoden für Diffusität nach Zhang & Lee (2021) wäre

somit die Standardabweichung der Nachhallzeit keine direkte Messmethode für diffuse Schallfelder. Sie ist, statt Auskunft über die Homogenität zu geben, als indirekte Diffusivitätsmessmethode einzuordnen.

### 4.1.3 Standardabweichung der räumlich verteilten Schallenergien

#### Gesamtspektrumanalyse der Schallenergie

Um zunächst einen Überblick über die gemittelte Schallenergie während der Messung zu geben, sind in Abbildung 17 die räumlich gemittelten Schallenergien der vier absorberbelegten Hallraumzustände abgebildet.

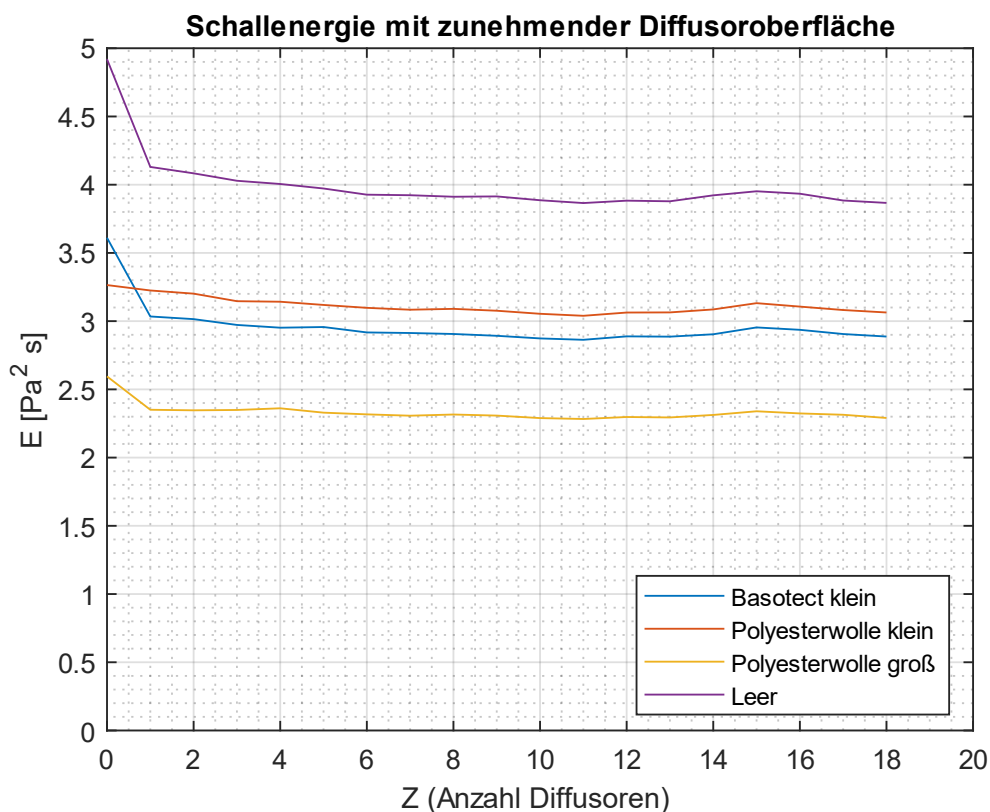


Abbildung 17: Räumlicher Mittelwert der Schallenergie in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen

Bis auf einen deutlich überhöhten Schallenergiepegel in Zustand 0, also dem mit keinem Diffusor belegten Hallraumzustand, sind keine starken, auffälligen Schwankungen bei allen Absorberzuständen zu beobachten. Da der mit dem kleinen Polyesterfaserabsorber belegte Hallraum keine anfängliche Änderung anzeigt, können bei den anderen Absorberbelegungen äußere Einflüsse dafür gesorgt haben. Lediglich zwischen den Absorberbelegungen sind deutliche Unterschiede erkennbar. Sie stehen in Abhängigkeit zu den Nachhallzeiten, weshalb sich die Differenzen zwischen den Absorberbelegungen



in Abbildung 13 und Abbildung 17 ähneln. Unter anderem durch die in dieser Messreihe verwendete Methode zur Schallenergiebestimmung hängt die Schallenergie direkt mit der Nachhallzeit zusammen. Impulsantworten mit längeren Nachhallzeiten besitzen höhere Gesamtenergien, da mehr nachklingende Schallanteile enthalten sind.

### Gesamtspektrumanalyse der absoluten Standardabweichung der Schallenergie

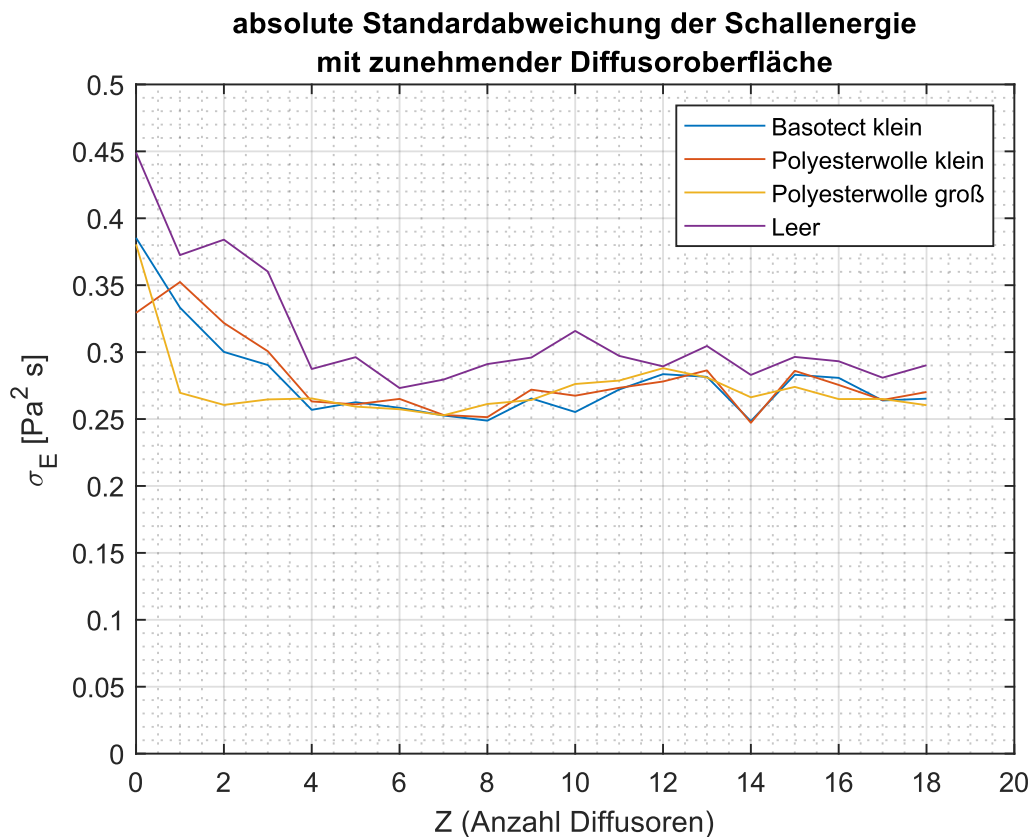


Abbildung 18: Absolute Standardabweichung der Schallenergie in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen

Die absoluten Standardabweichungen der Schallenergien decken sich mit den Vermutungen, wie sich eine Diffusions- und Diffusitätssteigerung bei der Auslegung eines Hallraumes in Messparametern widerspiegeln könnte. Bis in etwa zum sechsten Diffusorzustand sinken alle Messwertverläufe grob betrachtet ab und gehen anschließend in einen nahezu unveränderlichen Zustand über. Mit einer niedrigeren Standardabweichung geht eine höhere Diffusität im Hallraum einher, da das Kriterium der Homogenität stärker erfüllt ist. Lediglich ein leichter (Wieder-)Anstieg ab dem sechsten Zustand weicht davon ab. Verantwortlich dafür können entweder Temperaturschwankungen oder leichte Verschlechterungen der Diffusion im Raum sein. Sie können durch ungeschickte Platzierung der Diffusoren hervorgerufen worden sein, die optimale Modenbeeinflussungen

wieder etwas verhindern. Im Vergleich zur Standardabweichung der Nachhallzeit sind dazu aber keine Gemeinsamkeiten in den Messwerten festzustellen.

Im Gegensatz zu den absoluten Standardabweichungen der Nachhallzeit aus Abbildung 14 besitzt der unbesetzte Hallraum die größten absoluten Standardabweichungen der Schallenergien. Alle drei weiteren absorberbesetzten Zustände liegen unter dessen Werten. In der Theorie des Parameters wäre also ein Hallraum mit eingebrachter Absorption diffuser als ohne Absorption. Das widerspricht in Teilen jedoch den Grundprinzipien eines diffusen Schallfeldes aus Abschnitt 2.2 und bisherigen Forschungsergebnissen. Dort wird über mangelnde Diffusität nach Einbringen von Prüfkörpern, also Absorption, geschrieben (Jeong, 2016). Den anfangs niedrigsten Wertebereich der absoluten Standardabweichung weist der Belegungszustand des Hallraumes mit dem großen Polyesterfaserabsorber auf. Dies ist der einzige Absorptionsbelegungszustand, in dem kaum eine Änderung im Verlauf der Diffusoränderung zu sehen ist. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Größe der Absorptionsfläche keinen punktuellen Einfluss mehr auf das Schallfeld hat, sondern den Raum nahezu gleichmäßig dämpft. Rund die Hälfte der Grundfläche ist in diesem Raumzustand vom Absorber bedeckt und der Großteil der Mikrofonpositionen befinden sich über der Absorptionsfläche.

## Gesamtspektrumanalyse der relativen Standardabweichung der Schallenergie

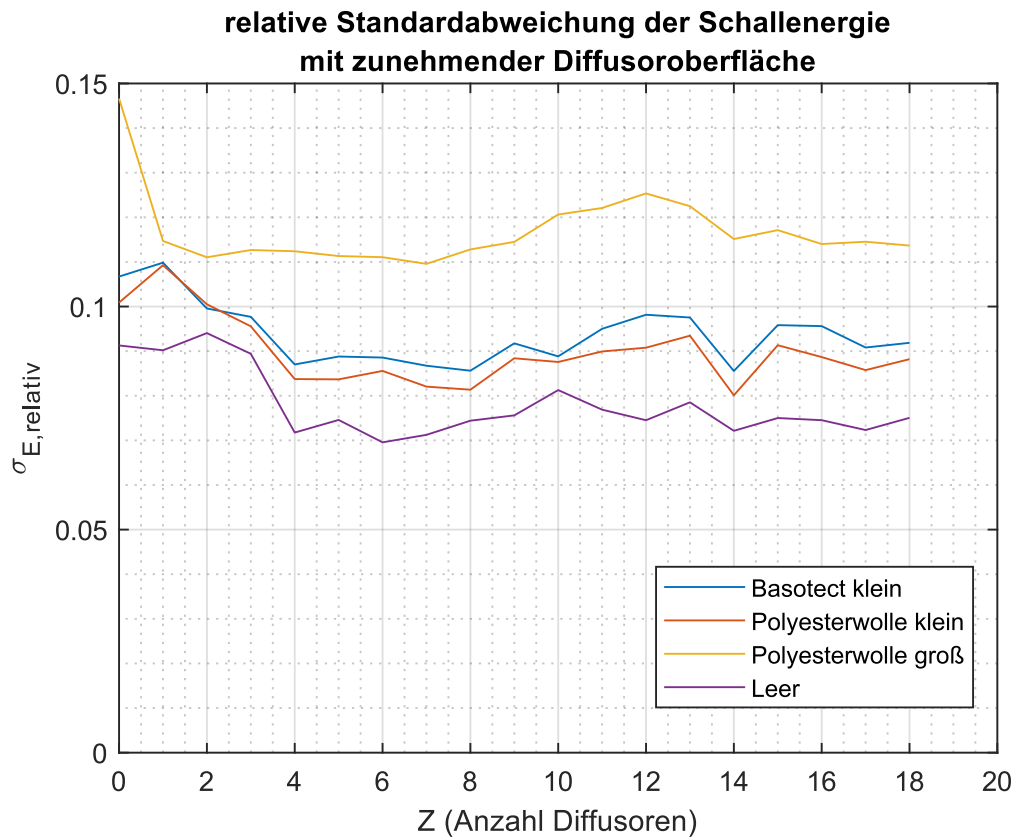


Abbildung 19: Relative Standardabweichung der Schallenergie in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungszuständen

Wie bereits bei der Standardabweichung der Nachhallzeit wurde auch hier die relative Standardabweichung der Schallenergie bestimmt. Sie ist in Abbildung 19 dargestellt und zeigt wiederum durch geringere Werte eine höhere Diffusität des Raumes an. Im Gegensatz zu Abbildung 18 zeigen sich nun zwischen den Absorberbelegungen bessere Übereinstimmungen mit bisherigen Untersuchungen. Der leere Hallraum ohne Absorber besitzt somit eine höhere Diffusität als die absorberbesetzten Hallraumzustände. Die Verläufe in Abhängigkeit der Diffusoren flachen jedoch im Vergleich zur absoluten Standardabweichung der Schallenergien ab. In den ersten fünf Diffusorzuständen ist zwar eine Verringerung der Standardabweichung erkennbar, dennoch ist sie so gering, dass daraus kaum relevante Schlüsse gezogen werden können. Das ist gerade im Hinblick auf den erneuten Anstieg ab dem achten Diffusorzustand, dessen Maximalwerte rund den Mittelwert der Anfangswerte betragen, der Fall.

## Oktavbandanalyse der relativen Standardabweichung der Schallenergie

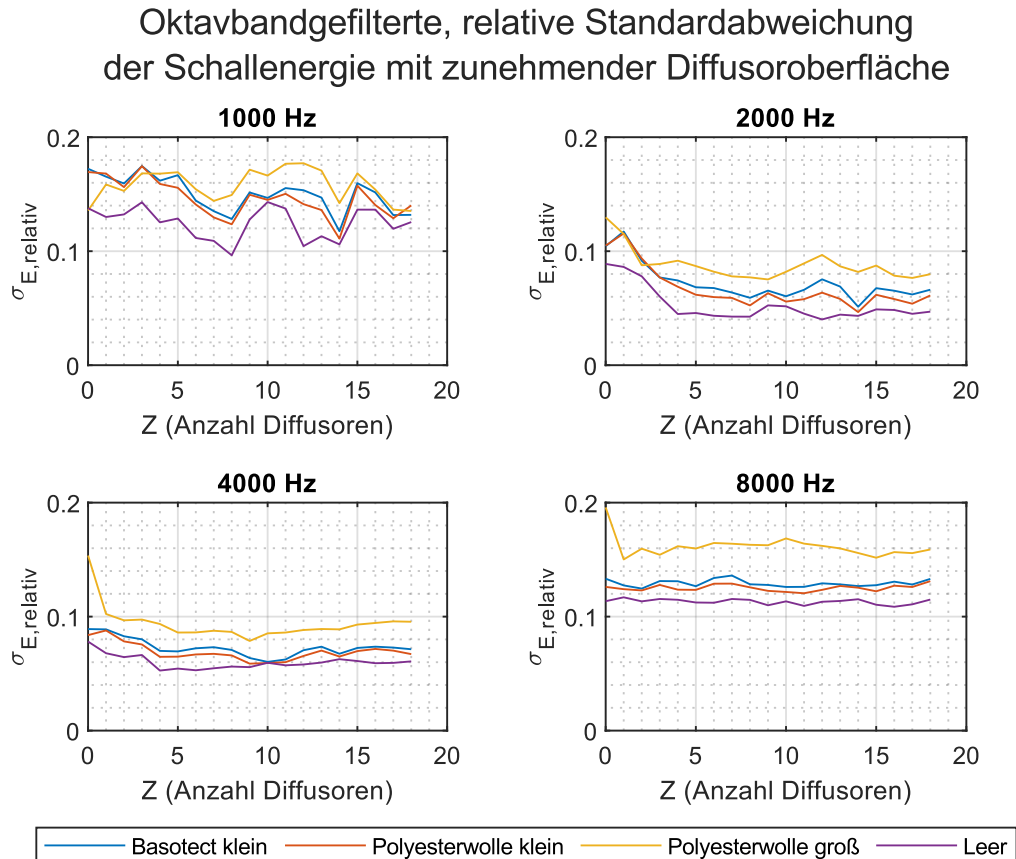


Abbildung 20: Oktavbandgefilterte relative Standardabweichung der Schallenergie in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl mit vier verschiedenen Absorberbelegungen in Frequenzbändern der Mittenfrequenzen 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz

Bei der relativen Standardabweichung der Schallenergie wurde ebenfalls eine Oktavdarstellung in vier Oktaven errechnet. Sie ist in Abbildung 20 geplottet. Abhängigkeiten zu den Frequenzbändern sind darin erkennbar. Die relativen Standardabweichungen der Schallenergien sind im Bereich von 2 kHz – 4 kHz niedriger als in den angrenzenden Oktavbändern. Nicht jedes Oktavband zeigt dabei eine Diffusitätsverbesserung im Verlauf der Diffusoranzahl an. Die beiden eindeutigen Frequenzbänder sind die der Mittenfrequenzen 2 kHz und 4 kHz. Die zwei weiteren Oktavbänder zeigen dahingegen entweder keinerlei Änderung, wie das 8 kHz-Band, oder starke Schwankungen, wie das 1 kHz-Band, durch die keinerlei Aussagen zur Diffusitätsänderung getroffen werden können. In der oktaweisen Betrachtung der relativen Standardabweichung der Schallenergie lassen sich also Frequenzabhängigkeiten des Parameters erkennen. Dennoch sind keine näheren Erkenntnisse zur Qualität des Messparameters erkennbar.

Allgemein lässt sich bei den relativen Standardabweichungen der Schallenergien feststellen, dass die räumliche Konfiguration der Absorption im Testraum einen deutlichen Einfluss auf den Parameter hat. Bei Betrachtung der Diffusorverläufe der beiden kleinen Absorberbelegungen ist zu beobachten, dass sie bei allen Abweichungen in nahezu identischem Verhältnis bleiben. Weil sie an derselben Position lagen und leicht unterschiedliche Absorptionen aufweisen, ist diese Vermutung plausibel.

### **Einordnung des Parameters**

Die relative und absolute Standardabweichung der Schallenergie bzw. des Schalldruckes ist ein geeignetes Mittel, um Diffusität zu qualifizieren. Dabei ist die absolute Standardabweichung empfindlicher auf Diffusionsänderungen. Die relative Standardabweichung zeigt zwar geringere Empfindlichkeiten auf, kann aber dennoch frequenzabhängig Schlüsse zur Diffusität geben. Ebenfalls berücksichtigt die relative Standardabweichung laut Messergebnissen die in den Raum eingebrachte Absorption.

Um beide Varianten des Parameters für Diffusionsqualifikationen praktikabel zu gestalten, müssen zunächst Erfahrungswerte in mehreren Hallräumen gesammelt werden. Dabei sollten zusätzlich mehrere Messverfahren auf ihre Präzision miteinander verglichen werden. Zu nennen sind hier beispielsweise Schalldruckpegelmessungen mit gemittelttem Rauschen. Im Nachhinein können Wertebereiche für die Standardabweichungen definiert werden, die Auskunft über einen Grad der Diffusion geben.

## **4.2 Fehlerbetrachtungen**

Sowohl in der Messreihe als auch in der Auswertung können Fehler aufgetreten sein, die die Genauigkeit der Messwerte beeinträchtigen. Ursachen und Effekte auf die soeben betrachteten Messwerte sollen in diesem Kapitel dargelegt werden.

### **Grundgeräuschpegel**

Bei der Bestimmung der Schallenergie und der Nachhallzeit wurde jeweils darauf verzichtet, das Grundrauschen herauszurechnen. Ursache dafür war die begrenzte Bearbeitungszeit dieser Arbeit. Bei der Nachhallzeit wurde dennoch darauf geachtet, dass die Analysebereiche im reinen Abklingbereich liegen und somit der Einfluss weitestgehend eliminiert ist. Bei der Schallenergie wurde hingegen angenommen, dass das Grundrauschen nur einen Bruchteil der Gesamtenergie ausmacht und damit ebenfalls kaum Auswirkungen auf die daraus berechneten Parameter hat.

## Klimabedingungen

Ein weiterer großer Einflussfaktor auf die Messgenauigkeit sind die Klimabedingungen während der Messreihe. Schon kleine Abweichungen der Temperatur, der Luftfeuchte oder des Luftdrucks haben Auswirkungen auf das Dämpfungsverhalten der Luft im Frequenzbereich der Modellmessung. Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, gibt es für Absorptionsgradmessungen nach ISO 354 einen Korrekturterm, der die Außeneinwirkungen bei der Auswertung herausrechnet (DIN EN ISO 354, 2003) (ISO 9613-1, 1993). Ähnliche Ansätze gibt es mit der Nachhallzeit, da sie von der Gesamtabsorption im Raum, also der Summe aus Luftdämpfung und Absorption an Objekten bzw. Raumbegrenzungsflächen, abhängig ist. Inwiefern solche Korrekturen sinnvoll sind, ist von Fall zu Fall unterschiedlich. In vergleichenden Messungen, wie auch in dieser Messreihe, ist die Korrektur jedoch sinnvoll, da exakt gleiche Klimabedingungen zwischen zeitlich versetzten Messungen kaum zu erzielen sind. Bei Messungen, die einen einzelnen Raumzustand repräsentieren sollen, muss die Luftdämpfung mit einbezogen werden. Nur so wird der real existierende Zustand dokumentiert. Korrekturansätze sind bereits in Literaturen beschrieben worden (Hidaka, Yano, & Tachibana, 1988) (Kuttruff, 2017) (Prawda, Schlecht, & Välimäki, 2022). Mangels Zeit wurden die Korrekturansätze in diese Messreihe noch nicht eingearbeitet und als Optimierungsansatz für die Parameter verglichen.

Auch in dieser Messreihe sind im Verlauf der Messung einige Schwankungen der Luftbedingungen zu erkennen. Ebenfalls ist die relative Luftfeuchte geringfügig geringer als in der ISO 354 gefordert. Sie bewegt sich in einem Bereich von  $26\% < h < 36\%$ , anstatt den mindestens geforderten  $h_{\min} = 30\%$  (DIN EN ISO 354, 2003). Zur Korrektur stand während der Messung kein Luftbefeuchter zur Verfügung, der die damit zusammenhängend hohe Luftdämpfung hätte ausgleichen können. Bei der Messwertbetrachtung muss also dieser Einfluss berücksichtigt werden.

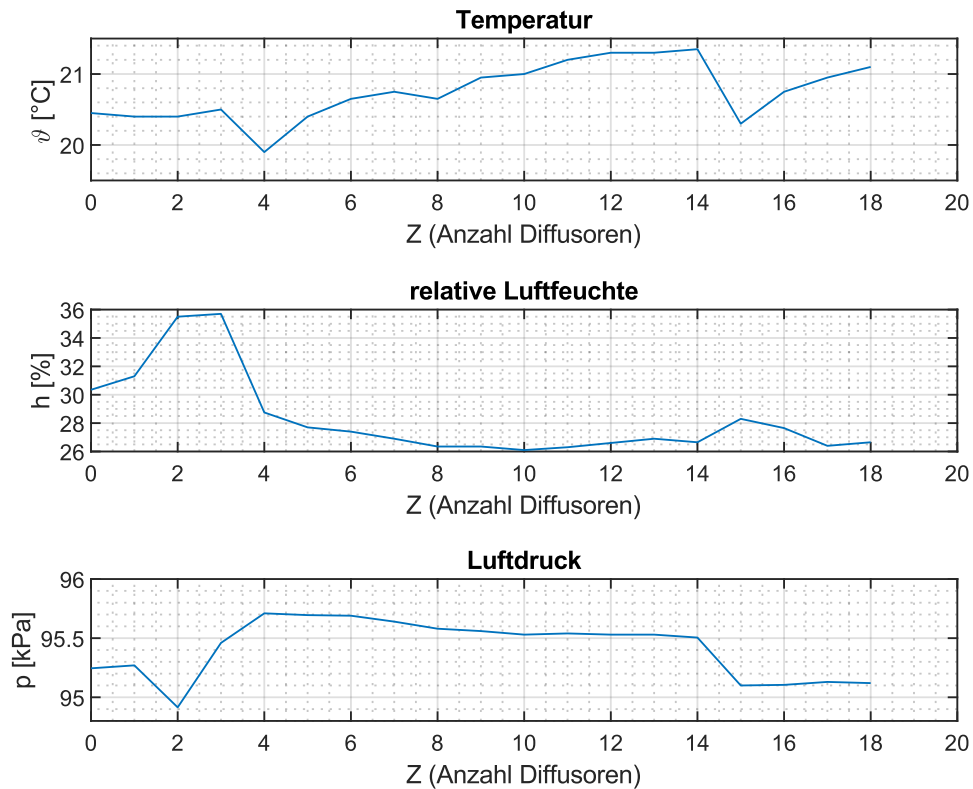


Abbildung 21: Abweichungen der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und des Luftdrucks während der Messreihe in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl

Aus allen drei während der Messung bestimmten Luftparametern (siehe Abbildung 21) ist die Errechnung der frequenzabhängigen Luftabsorption  $\alpha_L$  nach ISO 9613-1 (1993) möglich. Für den Messverlauf ist sie in Abbildung 22 exemplarisch für sechs Einzelfrequenzen im Oktavabstand angegeben. Die Luftdämpfung ist dabei in den höheren Frequenzen um ein Vielfaches höher als in niedrigen Frequenzbereichen. Bei Modellmessungen mit einem höher skalierten Frequenzbereich ist also der Einfluss der Luftdämpfung deutlich in den Messergebnissen, insbesondere der Nachhallzeit, zu sehen.

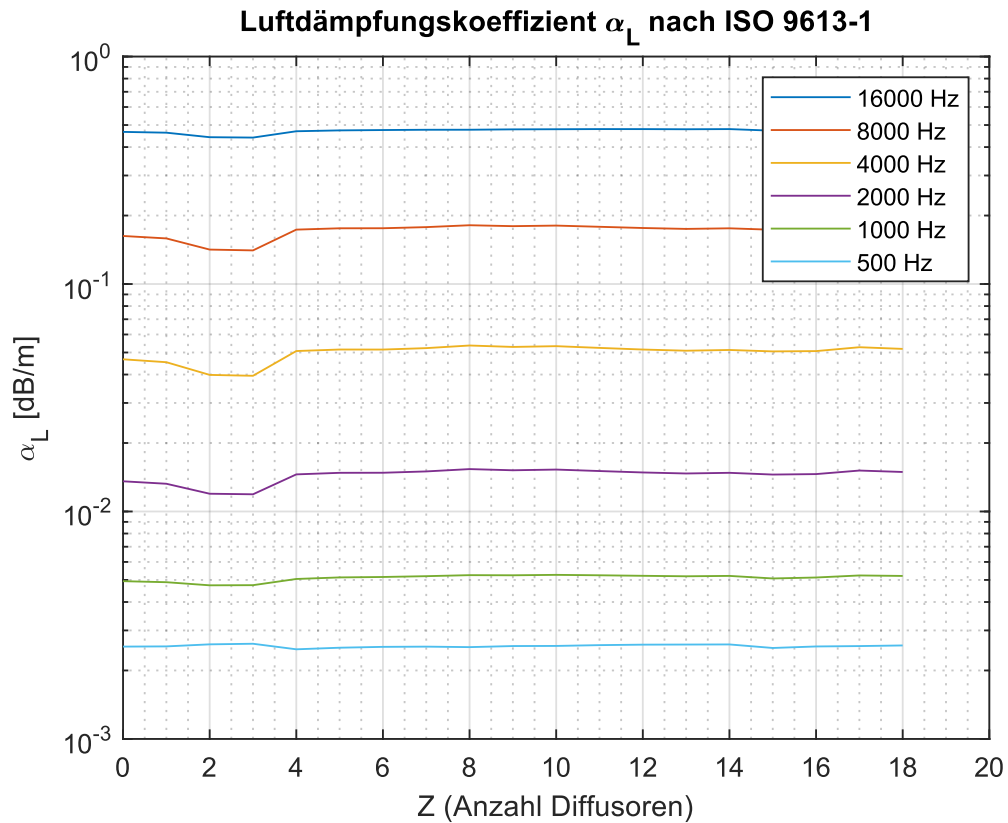


Abbildung 22: Luftdämpfungskoeffizient  $\alpha$  nach ISO 3913-1 in Abhängigkeit von der Diffusoranzahl in den Einzelfrequenzen 0,5 kHz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz und 16 kHz

## Nebengeräusche

Weitere Einflussfaktoren, die die Anregung des Modellhallraumes verfälscht haben können, sind Schwingungen der Werkbank unter dem Modell oder Außengeräusche. Da aber bei den Messungen auf leise Messbedingungen geachtet wurde und der Hallraum auf elastischen Gummielementen, die in Abschnitt 3.1.1 bereits erläutert wurden, gelagert ist, ist deren Einfluss vernachlässigbar. Das war bei Betrachtung der EDCs bereits während der Messreihe erkennbar. Hier ist die Bestimmung der Nachhallzeiten über einen Pegelabfall von mehr als 20 dB problemlos möglich gewesen, ohne dass der Grundgeräuschpegel Einfluss auf dessen Messwert hat.



## Messtechnik

Ein weiterer Einfluss ist durch die Mikrofongrenzfrequenzen diskutabel. Alle verwendeten Mikrofone besitzen nur eine obere Grenzfrequenz von  $f_{g,o} = 20$  kHz. Darüber ist die Linearität des Frequenzverlaufes nicht mehr vom Hersteller garantiert. Auch wenn in den Auswertungen ein Kompromiss zwischen oberer Grenzfrequenz und möglichst großem Betrachtungsintervall getroffen wurde, ist ein Einfluss nicht vollständig auszuschließen. Dennoch wird er bei breitbandigen Analysen des gesamten Frequenzspektrums gering ausfallen, da das Betrachtungsintervall im oberen Frequenzbereich im Verhältnis zur oberen Grenzfrequenz der Mikrofone nur um eine Terz erweitert wurde. Bei schmalbandigen Auswertungen, wie beispielsweise in Oktaven oder Terzen, ist der Einfluss bei Frequenzbändern unterhalb von 20 kHz auszuschließen, da der betreffende Frequenzbereich herausgefiltert wird.

## Konstruktionsabweichungen des Modells

Unregelmäßigkeiten im Raumaufbau könnten ebenfalls die Messreihe verfälschen. Dazu zählen kleine Öffnungen, wie z.B. die der Kabeldurchführung des Dodekaederlautsprechers oder konstruktionsbedingte Abweichungen von den ursprünglichen Bauplänen. Dabei haben lediglich Abweichungen bei den Diffusorelementen einen Einfluss auf den Messverlauf. Konstruktionsabweichungen des Grundraumes und der eingebauten Messtechnik verfälschen hingegen den gesamten Messaufbau. Sie sind aber wegen der vergleichenden Betrachtung mehrerer Raumzustände zweitrangig und spiegeln sich nur in den Absolutwerten der Parameter wider. Die baulich bedingten Abweichungen an den Streukörpern wurden in vorherigen Untersuchungen (Staubach, 2022) bereits betrachtet, wobei die Bläschenbildung an der Oberfläche vernachlässigbare Einflüsse auf die Schallausbreitung im Raum hat. Die Flachstelle an den großen Diffusoren ist relevanter bei der Schallbeeinflussung, stellt aber dennoch kein Problem dar. Ziel dieser Messreihe ist vor allem eine Diffusionsänderung, die mit den Elementen ausreichend erreicht wird.

## 5. Fazit

Anhand einer Auslegungsmessung eines Hallraumes wurden drei Parameter zur Qualifizierung diffuser Schallfelder getestet. Die Messreihe orientiert sich dabei am Verfahren zur Prüfung der Diffusität aus Anhang A der ISO 354 (DIN EN ISO 354, 2003). Alle Messungen wurden in den Modellmaßstab 1:10 überführt. Bei der Auswertung lag der Fokus darauf, wie stark sich die Parameter mit sukzessiv eingebrachten diffusen Oberflächen verhalten. Die anfängliche Flächenänderung ist dabei einer Diffusitätsänderung im Hallraum gleichzusetzen.

Mit zunehmender diffuser Fläche zeigt der Degree of Time Series Fluctuation keinerlei Änderungen. Das ist sowohl im gesamten Frequenzbereich als auch in den untersuchten Oktavbändern der Fall. Daraus lässt sich schließen, dass die kurzzeitigen Fluktuationen eines Raumabklingverhaltens und damit auch der DTF kein geeigneter Indikator sind, um Diffusität zu qualifizieren. Diskutabel ist, ob die Berechnungsmethode in ihrer jetzigen Form unter Einbezug weiterer bzw. veränderter Berechnungsansätze verbessert werden kann. Trotzdem ist durch die beim DTF angewandte Schwellenwert-Analyse-methode die anschließende Plausibilität zweifelhaft, da dennoch der Fokus auf den Energiespitzen der Impulsantwort liegt.

Sowohl die absolute als auch die relative räumliche Standardabweichung der Nachhallzeit zeigt nur nach Einbringen von Absorptionsflächen aussagefähige Ergebnisse zur Qualität von Diffusität an. Dabei sollte die Absorption möglichst punktuell und ungleichmäßig verteilt im Raum platziert sein. Es ist also fraglich, ob der Parameter tatsächlich Auskunft über die Diffusität gibt oder ob nur die Auswirkungen punktuell eingebrachter Absorptionsflächen auf das diffuse Schallfeld bzw. das Gesamtabklingverhalten angezeigt werden. Die Kategorisierung als direktes Verfahren zur Qualifikation diffuser Schallfelder nach Zhang & Lee (2021) ist dadurch hinfällig. Sinnvoller ist die Kategorisierung als indirektes Qualifikationsverfahren. Um für die Standardabweichung der Nachhallzeit dennoch Grenzwerte für ausreichende Diffusität bei Absorberbelegung im Hallraum zu definieren, ist es notwendig zunächst vergleichende Messungen in realen Räumen durchzuführen.

Durch die Messergebnisse der relativen Standardabweichung als Qualifikationsparameter für Diffusität entsteht ein Disput zur Definition der Schröderfrequenz. Grund dafür ist das Verhalten des Parameters auf Einbringen von Absorption. Das ist die Folge oft missverständlich verwendeter Definitionen. Die Schröderfrequenz sollte dabei nicht als Grenzfrequenz von modendominiertem Bereich zum diffusen Schallfeld herangezogen

werden, sondern als Grenzfrequenz zum Schallfeld mit ausreichender „Mischung“ dienen.

Die absolute räumliche Standardabweichung der Schallenergie und somit auch des Schalldrucks zeigt unabhängig von der eingebrachten Absorption eine Änderung bei zunehmender Diffusorfläche. In dieser Messreihe ist sie somit der zuverlässigste Parameter. Da das diffuse Schallfeld unter anderem durch die Homogenität des Schalldruckes in einem Raum definiert ist, gibt der Parameter direkt die Qualität diffuser Schallfelder an. Die relative Standardabweichung der Schallenergien kann dagegen nur in vereinzelt Frequenzbändern Auskunft über Diffusität geben. Für weitere Forschungsarbeiten ist es dennoch wichtig, zunächst vergleichende Messungen in verschiedenen Hallräumen durchzuführen. Zusätzlich müssen Bestimmungsmethoden des Schalldrucks bzw. der Schallenergie miteinander zu verglichen werden, damit anschließend die Definition von Wertebereichen für einen Grad der Diffusität möglich ist. Dennoch bleibt die Standardabweichung der Schallenergie bzw. des Schalldrucks grundlegend eine geeignete Methode, um diffuse Schallfelder zu qualifizieren.

Für die Planung des Hallraumes resultiert aus der vorliegenden Messreihe die Bestätigung der bisherig ermittelten Diffusorbelegung durch das Verfahren zur Prüfung der Diffusität der ISO 354 (DIN EN ISO 354, 2003). Dort wurde bei sechs eingebrachten Diffusorelementen die für die beabsichtigte Nutzung erforderliche Diffusität erzielt. Das entspricht einem Diffusflächenanteil von 16 % an der Gesamtraumoberfläche. Bei Betrachtung der in dieser Messreihe bestimmten Parameter zeigten sich nach diesem Diffusorbelegungszustand keinerlei aussagefähige Änderungen. Das bedeutet, dass bei weiterem Einbringen von Diffusorelementen mit keiner relevanten Diffusitätsverbesserung zu rechnen ist. Dass trotzdem Verbesserungen auftreten können, ist aber nicht vollständig ausschließbar, da die Empfindlichkeiten für Diffusitätsänderungen der bisher analysierten Parameter nicht bekannt sind.

Im Rahmen der Entwicklung und Validierung von Parametern zur Qualifikation von Diffusität ist es wichtig, die Verfahren in möglichst vielen Testumgebungen zu prüfen. Um Forschenden die Möglichkeit zu bieten während ihrer Entwicklung Forschungsstände zu prüfen, ist es hilfreich, bereits untersuchte Prüfräume, Versuchsaufbauten und Daten frei zugänglich zu machen. Ansätze zur Umsetzung und Rahmenbedingungen wurden bereits durch Jeong, Nolan & Balint (2018) diskutiert. Deshalb werden die Messdaten und Rahmenbedingungen des Messaufbaus der in dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihe in dem Git-Repository „Modellhallraum“ unter [„https://github.com/StauLi/Modellhallraum.git“](https://github.com/StauLi/Modellhallraum.git) für weitere Untersuchungen bereitgestellt. Enthalten sind alle Impulsantworten, Maße und Details des Versuchsaufbaus, sowie die Auswertungsskripte mit MATLAB.

---

## Literaturverzeichnis

- ASTM C423-17. (2017). *Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM E 90-09. (2016). *Standard Test Method for Laboratory Measurement of Airborne Sound Transmission Loss of Building Partitions and Elements*. West Conshocken, PA: ASTM International.
- Biondo, A., Arouxet, M., Vazquez, S., Vazquez, J., Heinze, G., & Saavedra, A. (2015). Sound Field Diffusion Coefficient: Development & Definitions. *Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration*. Florenz.
- Bodlund, K. (1976). Statistical characteristics of some standard reverberant sound field measurements. *The Journal of sound and Vibration*, S. 539-557.
- 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 Acoustic Society of America*, Vol. 135, Nr. 4, (S. 1898-1906).
- Chazot, J.-D., Robin, O., Guyader, J.-L., & Atalla, N. (2016). Diffuse Acoustic Field Produced in Reverberant Rooms: A Boundary Diffuse Field Index. *Acta Acoustica united with Acoustica*, Vol. 102, S. 503-516.
- Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2005). *Acoustic Absorbers ad Diffusers - Theory, design and application, 1, Auflage*. New York: Spon Press.
- Davy, J. L. (1988). The Variance of Decay Rates at Low Frequencies. *Applied Acoustics*, Vol. 23, S. 63-79.
- Davy, J. L. (2017). The spatial variability of random noise un a reverberant space. *Proceedings of the 24. International Conference on Sound and Vibration*, (S. 1-8). London.
- Davy, J. L., Dunn, I. P., & Dubont, P. (1979). The Variance of Decay Rates in Reverberation Rooms. *Acoustica*, Vol. 43, No. 1, S. 12-25.
- De Carvalho, A. C., Gomes, M. H., & Sant'Ana, L. H. (2022). The diffuse sound field according to literature: similarities and differences. *Proceedings of FIA, Congresso Iberoamericano de Acústica, Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica - Sobrac* . Florianópolis, SC, Brasil.
- DIN EN ISO 10140-1. (2021). *Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 1: Anwendungsregeln für bestimmte Produkte*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

- DIN EN ISO 10140-5. (2021). *Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 18233. (2006). *Akustik - Anwendung neuer Messverfahren in der Bau- und Raumakustik*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 354. (2003). *Akustik-Messung der Schallabsorption in Hallräumen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 3741. (2011). *Akustik - Bestimmung der Schalleistungs- und Energiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Fasold, W., Sonntag, E., & Winkler, H. (1987). *Bau- und Raumakustik, 1. Auflage*. Berlin: Verlag für Bauwesen.
- Hanyu, T. (2014). Analysis Method for Estimating Diffuseness of Sound Fields by Using Decay-Cancelled Impulse Response. *Building Acoustics*, S. 125-134.
- 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. *Proceedings of Euronoise 2018*, (S. 2011-2018). Kreta.
- Henn, H., Sinambari, G. R., & Fallen, M. (2008). *Ingenieurakustik - Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele, 4. Auflage*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Hidaka, Y., Yano, H., & Tachibana, H. (1988). Correction for the effect of atmospheric sound absorption on the sound absorption coefficients of materials in a reverberation room. *The Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol. 9, Nr. 5, (S. 217-223).
- ISO 17497-1. (2004). *Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*. ISO International Organisation for Standardization.
- ISO 9613-1. (Juni 1993). *Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 1: Berechnung der Schallabsorption durch die Luft*. ISO Internationale Organisation für Normung.
- Jacobsen, F., & Roisin, T. (2000). The coherence of reverberant sound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 108, Nr. 1, S. 204-210.
- Jeong, C.-H. (2016). Diffuse sound field: challenges and misconceptions. *Proceedings of Inter-Noise 2016*, (S. 1015-1021). Hamburg.

- Jeong, C.-H., Nolan, M., & Balint, J. (2018). Difficulties in comparing diffuse sound field measures and data/code sharing for future collaboration. *Proceedings of EuroNoise*, (S. 1997-2004). Kreta.
- Kim, K. H., & Jeon, J. Y. (11 2019). Effect of Diffusion Conditions on Absorption Performance of Materials Evaluated in Reverberation Chamber. *sustainability*. Abgerufen am 4. Mai 2023 von sustainability: <https://doi.org/10.3390/su11236651>
- Kuttruff, H. (2017). *Room Acoustics, 6. Auflage*. Boca Raton, London, New York: CRC Press.
- Lautenbach, M., & Vercammen, M. (2010). *Volume Diffusers in the Reverberation Room*. Sidney: International Congress on Acoustics (ICA).
- Long, M. (2006). *Architectural Acoustics, 1. Auflage*. Burlington, USA: Elsevier Academic Press.
- Mommertz, E., Fichtel, C., & Schröder, E. (2005). Untersuchungen zur Messung der Schallabsorption in einer Hallkabinen. *Proceedings of DAGA 2005*, (S. 681-682). München.
- Müller-BBM Acoustic Solutions GmbH. (kein Datum). Abgerufen am 6. Mai 2023 von <https://msystems.mbbm-aso.com/de/schallabsorption-hallraum/>
- Nolan, M., Berzborn, M., & Efen, F.-G. (2020). Isotropy in decaying reverberant sound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 148, Nr. 2, S. 1077-1088.
- Nolan, M., Fernandez-Grande, E., Brunskog, J., & Jeong, C.-H. (2018). A wavenumber approach to quantifying the isotropy of the sound field in reverberant spaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 143, Nr. 4, S. 2514-2526.
- Nolan, M., Vercammen, M., & Jeong, C.-H. (2015). Effects of Different Diffuser Types on the Diffusivity in reverberation Chambers. *Proceedings of EuroNoise*, (S. 191-196). Maastricht.
- Prawda, K., Schlecht, S. J., & Välimäki, V. (August 2022). Calibrating the Sabine and Eyring formulas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 152, No. 2, S. 1158-1169.
- Schröder, M. R. (1954). Die Statistischen Parameter der Frequenzkurven von großen Räumen. *Acta Acoustica united with Acoustica*, Vol. 4, No. 5, 594-600.
- Schröder, M. R., & Kuttruff, K. H. (1962). On Frequency Response Curves in Rooms. Comparison of Experimental, Theoretical, and Monte Carlo Results for the Average Frequency Spacing between Maxima. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 34, Nr. 1, S. 76-80. doi:10.1121/1.1909022

- Schulz, T. J. (1971). Diffusion in Reverberation Rooms. *The Journal of Sound and Vibration*, Vol. 16, Nr. 1, S. 17-28.
- Scrosati, C., Martellotta, F., Pompoli, F., Schiavi, A., Prato, A., D'Orazio, D., . . . Di Filippo, S. (2020). Towards more reliable measurements of sound absorption coefficient in reverberation rooms: An Inter-Laboratory Test. *Applied Acoustics*, Nr. 165.
- Sommerville, T., & Ward, F. L. (1951). Investigation of Sound Diffusion in Rooms by Means of a Model. *Acta Acoustica*, Vol. 1, Nr. 1, (S. 40-48).
- Späh, M., Zhou, X., Busse, T., & Goecke, D. (2022). Messung der Schallabsorption von möglichen Referenzabsorbern. *Proceedings of DAGA 2022*. Stuttgart.
- Staubach, L. (2022). Bau und Auslegung eines Hallraumes im Modellmaßstab 1:10 nach DIN EN ISO 354. *Praktikumsbericht*. Mittweida: Hochschule Mittweida - University of Applied Sciences.
- Tennhardt, H.-P. (1974). *Modellmesstechnik nach dem Impulsschalltest-Verfahren für Raumakustik und Lärmschutz im Städtebau*. Berlin: Bauakademie der DDR, Zentralinstitut Einheitssystem Bau (ZESB), Sonderheft.
- Vercammen, M. (2019). On the revision of ISO 354, measurement of the sound absorption in the reverberation room. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, (S. 3991-3997). Aachen.
- Vercammen, M. L. (2010). Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354. *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010*. Melbourne.
- Vercammen, M., & Lautenbach, M. (2013). Can we use the standard deviation of the reverberation chamber to describe diffusion in a reverberation chamber? *Proceedings of AIA-DAGA*, (S. 2071-2074). Meran.
- Vorländer, M. (2015). Akustische Messtechnik. In G. Müller, & M. Möser, *Taschenbuch der Technischen Akustik, 1. Auflage*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Waterhouse, R. V. (March 1955). Interference Patterns in Reverberant Sound Fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 27, Nr. 2, S. S. 247-258.
- Zhang, S., & Lee, J. (November 2021). Diffuseness Quantification in a Reverberation Chamber and its Variation with Fine-Resolution Measurements. *Buildings*.

# Anlagen

## Anhang A MATLAB-Berechnungsskripte zur Messreihenauswertung

### A1. Auswertung im gesamten Frequenzspektrum

## Messskript zur Qualifizierung von Diffusitätsmessparametern (Gesamtspektrum) (2022/23)

Autor: Linus Staubach Erstellungsdatum: Dezember 2022 Version: V6.1, Analyse des gesamten Frequenzbereiches

### Contents

- [Erläuterung](#)
- [Variablendeklaration](#)
- [Ergebnisvariableninitialisierung](#)
- [Berechnung](#)

### Erläuterung

Dieses Messskript zur Qualifizierung von Diffusitätsparametern wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit erstellt. Es dient dazu, drei Parameter auf ihre Aussagefähigkeit im Zusammenhang mit Diffusitätsänderungen zu qualifizieren. Dabei werden der Degree of Time Series Fluctuation (DTF), die Standardabweichung der Nachhallzeit und die Standardabweichung der Schallenergie betrachtet. Ebenfalls wurden mehrere Varianten der Parameter berücksichtigt. In diesem Skript findet die Auswertung im gesamten Frequenzbereich der aufgenommenen Impulsantworten statt.

### Variablendeklaration

```
clear all
close all

Z = 18;           %Zustand (Diffusoranzahl)
C = 1; Ca = 1;   %C: Raumzustand; Ca: Anfangsraumzustand (Absorberbelegung)
S = 2;           %Lautsprecherpositionen
R = 6;           %Mikrofonpositionen

Ab = 20;         %Analysebereich in dB
Sw = 25;        %Schrittweite des DTF-Thresholds

DTFvX = 0;       %Berechnungsvariante DTF (0=aus; 1=alt(schneller, evtl. ungenauer); 2=neu)
TvX = 0;         %Berechnungsvariante T (0=aus; 1=Regression; 2=aus dcIR; 3=aus A(t) (nur mit DTFvX=2 berechenbar))
KlKorrVX = 0;    %Klimakorrektur T (0=aus; 1=an) (nicht implementiert)
AvX = 0;         %Aeq (0=aus; 1=an)

load('Klimadaten.mat')

V = 0.318;       %Volumen des diffusorunbesetzten Raumes
```



```

fs = 96000;      %Samplingfrequenz

%Grenzfrequenzen der Filterung der Impulsantwort
OGF = 31500;    %Obere Grenzfrequenz [Hz]
UGF = 315;     %Untere Grenzfrequenz [Hz]

```

## Ergebnisvariableninitialisierung

```

DTF_ges = zeros((R*S*(C-Ca+1))+2,Z);

T_ges = zeros((R*S*(C-Ca+1))+3,Z);

p_ges = zeros((R*S*(C-Ca+1))+3,Z);

A_ges = zeros(3,Z);

[b,a] = butter(1,[UGF OGF]/(fs/2),'bandpass');

```

## Berechnung

```

for x1 = 0:Z                                %Anfang der Zustandsschleife der Diffusoren
    for x2 = Ca:C                            %Anfang der Raumzustandsschleife
        for x3 = 1:S                        %Anfang der Lautsprecherpositionsschleife
            for x4 = 1:R                    %Anfang der Mikrofonpositionsschleife

%[Impulsantwort,fs] = audioread('cls1r3_ir_1.wav');
[lisi, Impulsantwort, fs] = MBBMwavread(append("C:\...\Impulsantworten\Z",num2str(x1),"_roh\c",num2str(x2),"s",num2str(x3),"r",num2str(x4),"_ir.wav"));
Impulsantwort = rot90(Impulsantwort,3)*lisi.peakAmplitude;

%Filterung
Impulsantwort = filter(b,a,Impulsantwort);

i=1;
                                %Berechnung des Analysebereichs
EDC = flipud(cumsum(flipud(Impulsantwort.^2)));
EDC2 = 20*log10(sqrt(EDC)/(2*10^(-5)));
L_5dB = find(EDC2 < max(EDC2)-5,1);
L_vardB = find(EDC2 < max(EDC2)-5-Ab,1);

switch DTFvX                        %DTF-Variantenbestimmung
    case 0
        DTF = 0;
    case 1
        % Berechnung des DTF mittels hallkorrigierter Impulsantwort (Hanyu
2014)
        DTF = DTF_Hanyu_alt(Impulsantwort,L_5dB,L_vardB,Sw);
    case 2
        % Alternative Berechnung des DTF (Hanyu 2018)
        [DTF,A_t] = DTF_Hanyu_neu_test(Impulsantwort,L_5dB,L_vardB,Sw);

end

switch TvX                            %Nachhallzeitvariantenbestimmung
    case 0

```

```

    T = 0;
    case 1
        % Nachhallzeitberechnung mittels Regression
        [T,Reg,Fehler] = RT_Regression(Impulsantwort,fs,L_5dB,L_vardB);

    case 2
        % Nachhallzeitberechnung aus der hallkorrigierten Impulsantwort
        (nach Hanyu 2014)
        T = RT_Hanyu_DCIR(Impulsantwort,L_5dB,L_vardB,fs);

    case 3
        % Alternative Nachhallzeitbestimmung (mittels Hanyu 2018)
        T = 13.82/(mean(A_t)*fs);
end

%Platzhalter für Tests zur Klimakorrektur der Nachhallzeit
switch KlKorrVX
    case 1
        c = 331+0.6*((Klimadaten(x1+1,1)+Klimadaten(x1+1,4))/2);
        alpha = Luftdaempfung((Klimadaten(x1+1,1)+Klimada-
ten(x1+1,4))/2,(Klimadaten(x1+1,2)+Klimadaten(x1+1,5))/2,(Klimada-
ten(x1+1,3)+Klimadaten(x1+1,6))/2,1000);
        m = alpha/(10*log10(exp(1)));
        %T = ...
    case 0
        T = T;
    end
%TEST ende

% Schallenergieberechnung aus der Impulsantwort
p = sqrt(sum(Impulsantwort.^2));

% Ergebnisstrukturierung
DTF_ges(x4+((x3-1)*(C-Ca+1)*R)+((x2-Ca)*R),x1+1,i) = DTF;
T_ges(x4+((x3-1)*(C-Ca+1)*R)+((x2-Ca)*R),x1+1,i) = T;
p_ges(x4+((x3-1)*(C-Ca+1)*R)+((x2-Ca)*R),x1+1,i) = p;

    end %Ende der Mikrofonpositionsschleife
end %Ende der Lautsprecherpositionsschleife
end %Ende der Raumzustandsschleife

i2 = 1;

%Ergebnisstrukturierung
DTF_ges(((C-Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2) = mean(DTF_ges(1:(C-
Ca+1)*S*R,x1+1,i2));
T_ges(((C-Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2) = mean(T_ges(1:(C-Ca+1)*S*R,x1+1,i2));
T_ges(((C-Ca+1)*S*R)+3,x1+1,i2) = std(T_ges(1:(C-
Ca+1)*S*R,x1+1,i2))/T_ges(((C-Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2);
p_ges(((C-Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2) = mean(p_ges(1:(C-Ca+1)*S*R,x1+1,i2));
p_ges(((C-Ca+1)*S*R)+3,x1+1,i2) = std(p_ges(1:(C-
Ca+1)*S*R,x1+1,i2))/p_ges(((C-Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2);

switch AvX %Testweise Berechnung von Aeq
    case 0
        A = 0;
    case 1 && (TvX ~= 0)
        c = 331+0.6*((Klimadaten(x1+1,1)+Klimadaten(x1+1,4))/2);
        alpha = Luftdaempfung((Klimadaten(x1+1,1)+Klimada-
ten(x1+1,4))/2,(Klimadaten(x1+1,2)+Klimadaten(x1+1,5))/2,(Klimada-
ten(x1+1,3)+Klimadaten(x1+1,6))/2,1000);
        m = alpha/(10*log10(exp(1)));
        A = 55.3*(VolModellhallraum(x1)/(c*T_ges(((C-
Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2)))-4*VolModellhallraum(x1)*m;
        A_ges(i2,x1+1) = A;
    end
end

```

```
end                                     %Ende der Zustandsschleife der Diffusoren

                                     %Plotten der vorläufigen Ergebnisse

figure(1)
plot(0:18,DTF_ges(14,:));xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)'); yla-
bel('DTF');title('Degree of Time Fluctuation (DTF) mit zunehmender Diffusor-
oberfläche');axis([0,20,0,12.5]);grid on; grid minor
figure(2)
plot(0:18,T_ges(14,:));xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)'); ylabel('T
[s]');title('Nachhallzeit mit zunehmender Diffusoroberflä-
che');axis([0,20,0,0.7])
figure(3)
plot(0:18,T_ges(15,:));xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)'); ylabel('\sig-
ma');title('rel. Standardabweichung von T20 mit zunehmender Diffusoroberflä-
che');axis([0,20,0.0,0.7])
figure(4)
plot(0:18,p_ges(14,:));xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)'); ylabel('E [Pa
s²]');title('Schallenergie mit zunehmender Diffusoroberfläche');
figure(5)
plot(0:18,p_ges(15,:));xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)'); ylabel('\sig-
ma');title('rel. Standardabweichung der Schallenergie mit zunehmender Dif-
fusoroberfläche');axis([0,20,0.0,3])
figure(6)
fschroeder = 2000*sqrt(T_ges(14,:)/VolModellhallraum(1:18));
plot(0:18,fschroeder);xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)'); yla-
bel('f_S_c_h_r_o_e_d_e_r [Hz]');title('Schröderfrequenz mit zunehmender Dif-
fusoroberfläche');

%Weitere Plots wurden mit einem seperaten Skript erstellt.
```

## A2. Auswertung in Frequenzbandgefilterten Impulsantworten

# Messskript zur Qualifizierung von Diffusitätsmessparametern (in Terz-/Oktavbändern) (2022/23)

Autor: Linus Staubach Erstellungsdatum: Dezember 2022 Version: V6.2, Analyse in Oktav- bzw. Terzbändern

## Contents

- [Erläuterung](#)
- [Variablendeklaration](#)
- [Ergebnisvariableninitialisierung](#)
- [Berechnung](#)

## Erläuterung

Dieses Messskript zur Qualifizierung von Diffusitätsparametern wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit erstellt. Es dient dazu, drei Parameter auf ihre Aussagefähigkeit im Zusammenhang mit Diffusitätsänderungen zu qualifizieren. Dabei werden der Degree of Time Series Fluctuation (DTF), die Standardabweichung der Nachhallzeit und die Standardabweichung der Schallenergie betrachtet. Ebenfalls wurden mehrere Varianten der Parameter berücksichtigt. In diesem Skript findet die Auswertung Oktav- bzw. Terzbandgefiltert der aufgenommenen Impulsantworten statt.

## Variablendeklaration

```
clear all
close all

Z = 18;           %Zustand (Diffusoranzahl)
C = 1; Ca = 1;   %C: Raumzustand; Ca: Anfangsraumzustand (Absorberbelegung)
S = 2;           %Lautsprecherpositionen
R = 6;           %Mikrofonpositionen

Ab = 20;         %Analysebereich in dB
Sw = 25;        %Schrittweite des DTF-Thresholds

DTFvX = 0;       %Berechnungsvariante DTF (0=aus; 1=alt(schneller, evtl. ungenauer); 2=neu)
TvX = 0;         %Berechnungsvariante T (0=aus; 1=Regression; 2=aus dcIR; 3=aus A(t) (nur mit DTFvX=2 berechenbar))
KlKorrVX = 0;    %Klimakorrektur T (0=aus; 1=an) (nicht implementiert)
AvX = 0;         %Aeq (0=aus; 1=an)

load('Klimadaten.mat')

V = 0.318;       %Volumen des diffusorunbesetzten Raumes

%Mittenfrequenzen der Oktav- bzw. Terzanalyse
OGF = 4000;      %Obere Mittenfrequenz der Frequenzbandanalyse [Hz]
UGF = 1000;     %Untere Mittenfrequenz der Frequenzbandanalyse [Hz]
```

## Ergebnisvariableninitialisierung

```
DTF_ges = zeros((R*S*(C-Ca+1))+2,Z);
```

```
T_ges = zeros((R*S*(C-Ca+1))+3,Z);
```

```
p_ges = zeros((R*S*(C-Ca+1))+3,Z);
```

```
A_ges = zeros(3,Z);
```

## Berechnung

```
for x1 = 0:Z                                %Anfang der Zustandsschleife der Diffusoren
    for x2 = Ca:C                            %Anfang der Raumzustandsschleife
        for x3 = 1:S                        %Anfang der Lautsprecherpositionsschleife
            for x4 = 1:R                    %Anfang der Mikrofonpositionsschleife

%[Impulsantwort,fs] = audioread('cls1r3_ir_1.wav');
[lisi, Impulsantwort, fs] = MBBMwavread(append("C:\...\Impulsantworten\."Z",num2str(x1), "_roh\c",num2str(x2), "s",num2str(x3), "r",num2str(x4), "_ir.wav"));
Impulsantwort = rot90(Impulsantwort,3)*lisi.peakAmplitude;

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

i=1;
while i < (size(FilterImpulsantworten,2)+1) %Anfang gefilterter Auswertung

    FilterImpulsantwortEinzel = squeeze(FilterImpulsantworten(:,i,:));

                                %Berechnung des Analysebereichs
    EDC = flipud(cumsum(flipud(FilterImpulsantwortEinzel.^2)));
    EDC2 = 20*log10(sqrt(EDC)/(2*10^(-5)));
    L_5dB = find(EDC2 < max(EDC2)-5,1);
    L_vardB = find(EDC2 < max(EDC2)-5-Ab,1);

    switch DTFvX                    %DTF-Variantenbestimmung
        case 0
            DTF = 0;
        case 1
            % Berechnung des DTF mittels hallkorrigierter Impulsantwort (Hanyu
2014)
            DTF = DTF_Hanyu_alt(FilterImpulsantwortEinzel,L_5dB,L_vardB,Sw);

        case 2
            % Alternative Berechnung des DTF (Hanyu 2018)
            [DTF,A_t] = DTF_Hanyu_neu_test(FilterImpulsantwortEinzel,L_5dB,L_vardB,Sw);

    end

    switch TvX                        %Nachhallzeitvariantenbestimmung
        case 0
            T = 0;
        case 1
            % Nachhallzeitberechnung mittels Regression
            [T,Reg,Fehler] = RT_Regression(FilterImpulsantwortEinzel,fs,L_5dB,L_vardB);

        case 2
            % Nachhallzeitberechnung aus der hallkorrigierten Impulsantwort
(nach Hanyu 2014)
            T = RT_Hanyu_DCIR(FilterImpulsantwortEinzel,L_5dB,L_vardB,fs);
```

```

    case 3
        % Alternative Nachhallzeitbestimmung (mittels Hanyu 2018)
        T = 13.82/(mean(A_t)*fs);
    end

    %Platzhalter für Tests zur Klimakorrektur der Nachhallzeit
    switch KlKorrVX
        case 1
            c = 331+0.6*((Klimadaten(x1+1,1)+Klimadaten(x1+1,4))/2);
            alpha = Luftdaempfung((Klimadaten(x1+1,1)+Klimada-
ten(x1+1,4))/2,(Klimadaten(x1+1,2)+Klimadaten(x1+1,5))/2,(Klimada-
ten(x1+1,3)+Klimadaten(x1+1,6))/2,Mittelfrequenzen(:,i)));
            m = alpha/(10*log10(exp(1)));
            %T = ...
        case 0
            T = T;
        end
    %TEST ende

    % Schallenergieberechnung aus der Impulsantwort
    p = sqrt(sum(FilterImpulsantwortEinzel.^2));

    % Ergebnisstrukturierung
    DTF_ges(x4+((x3-1)*(C-Ca+1)*R)+((x2-Ca)*R),x1+1,i) = DTF;
    T_ges(x4+((x3-1)*(C-Ca+1)*R)+((x2-Ca)*R),x1+1,i) = T;
    p_ges(x4+((x3-1)*(C-Ca+1)*R)+((x2-Ca)*R),x1+1,i) = p;

    i = i+1;
end
    end %Ende der Mikrofonpositionsschleife
    end %Ende der Lautsprecherpositionsschleife
end %Ende der Raumzustandsschleife

for i2 = 1:i-1 %Ergebnisstrukturierung, gefiltert
    DTF_ges(((C-Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2) = mean(DTF_ges(1:(C-
Ca+1)*S*R,x1+1,i2));
    T_ges(((C-Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2) = mean(T_ges(1:(C-Ca+1)*S*R,x1+1,i2));
    T_ges(((C-Ca+1)*S*R)+3,x1+1,i2) = std(T_ges(1:(C-
Ca+1)*S*R,x1+1,i2))/T_ges(((C-Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2);
    p_ges(((C-Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2) = mean(p_ges(1:(C-Ca+1)*S*R,x1+1,i2));
    p_ges(((C-Ca+1)*S*R)+3,x1+1,i2) = std(p_ges(1:(C-
Ca+1)*S*R,x1+1,i2))/p_ges(((C-Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2);

    switch AvX %Testweise Berechnung von Aeq
        case 0
            A = 0;
        case 1 && (TvX ~= 0)
            c = 331+0.6*((Klimadaten(x1+1,1)+Klimadaten(x1+1,4))/2);
            alpha = Luftdaempfung((Klimadaten(x1+1,1)+Klimada-
ten(x1+1,4))/2,(Klimadaten(x1+1,2)+Klimadaten(x1+1,5))/2,(Klimada-
ten(x1+1,3)+Klimadaten(x1+1,6))/2,Mittelfrequenzen(:,i2)));
            m = alpha/(10*log10(exp(1)));
            A = 55.3*(VolModellhallraum(x1)/(c*T_ges(((C-
Ca+1)*S*R)+2,x1+1,i2)))-4*VolModellhallraum(x1)*m;
            A_ges(i2,x1+1) = A;
        end
    end
end %Ende der Zustandsschleife der Diffusoren

%Plotten der vorläufigen Ergebnisse
figure(1)
plot(0:18,DTF_ges(14, :, 1),0:18,DTF_ges(14, :, 2),0:18,DTF_ges(14, :, 3),0:18,DTF_g
es(14, :, 4));xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)');legend('1000 Hz','2000 Hz','4000

```

```
Hz', '8000 Hz');ylabel('DTF');title('Degree of Time Fluctuation (DTF) mit zu-  
nehmender Diffusoroberfläche');axis([0,20,0,12.5]);grid on; grid minor  
figure(2)  
plot(0:18,T_ges(14,:,1),0:18,T_ges(14,:,2),0:18,T_ges(14,:,3),0:18,T_ges(14,:,  
4));xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)');legend('1000 Hz','2000 Hz','4000 Hz','8000  
Hz'); ylabel('T [s]');title('Nachhallzeit mit zunehmender Diffusoroberflä-  
che');axis([0,20,0,1.5]);grid on; grid minor  
figure(3)  
plot(0:18,T_ges(15,:,1),0:18,T_ges(15,:,2),0:18,T_ges(15,:,3),0:18,T_ges(15,:,  
4));xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)');legend('1000 Hz','2000 Hz','4000 Hz','8000  
Hz'); ylabel('\sigma');title('rel. Standardabweichung von T20 mit zunehmender  
Diffusoroberfläche');axis([0,20,0.0,0.12]);grid on; grid minor  
figure(4)  
plot(0:18,p_ges(14,:,1),0:18,p_ges(14,:,2),0:18,p_ges(14,:,3),0:18,p_ges(14,:,  
4));xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)');legend('1000 Hz','2000 Hz','4000 Hz','8000  
Hz'); ylabel('E [Pa s²]');title('Schallenergie mit zunehmender Diffusorober-  
fläche');grid on; grid minor  
figure(5)  
plot(0:18,p_ges(15,:,1),0:18,p_ges(15,:,2),0:18,p_ges(15,:,3),0:18,p_ges(15,:,  
4));xlabel('Z (Anzahl Diffusoren)');legend('1000 Hz','2000 Hz','4000 Hz','8000  
Hz'); ylabel('\sigma ');title('rel. Standardabweichung der Schallenergie mit  
zunehmender Diffusoroberfläche');axis([0,20,0.0,0.16]);grid on; grid minor  
  
%Weitere Plots wurden mit einem separaten Skript erstellt.
```

### A3. Funktion zur Berechnung der Nachhallzeit; Variante 1, Regression:

## Contents

- [Zusammenfassung](#)
- [Nähere Beschreibung](#)
- [Berechnung](#)

```
function [T,Reg,Fehler] = RT_Regression(Impulsantwort,fs,L_5dB,L_var dB)
```

## Zusammenfassung

Nachhallzeitbestimmung mittels linearer Regression Autor: Linus Staubach; Version 1; Erstellung 2022

## Nähere Beschreibung

Syntax:

```
[T,Reg,Fehler] = RT_Regression(Impulsantwort,fs,L_5dB,L_var dB)
```

Input:

Impulsantwort zu Analysierende Impulsantwort;  
fs Samplingfrequenz [Hz];  
L\_5dB Anfang Analysebereich [Sample];  
L\_var dB Ende Analysebereich [Sample]

Output:

T Nachhallzeit [s];  
Reg Regressionsgerade;  
Fehler Standardabweichung während der Nachhallzeitbestimmung [Sample]

## Berechnung

```
EDC2 = 20*log10(sqrt(flipud(cumsum(flipud(Impulsantwort.^2)))/(2*10^(-5))));  
  
EDC3 = rot90(EDC2);  
  
L_zeit = 0:(1/fs):(length(EDC2)-1)/fs;  
  
[p,S] = polyfit(L_zeit(:,L_5dB:L_var dB),EDC3(:,L_5dB:L_var dB),1);  
  
linreg = p(2)+L_zeit'.*p(1);  
  
T = (60/abs(p(1)));  
  
[Reg,Fehler] = polyval(p,L_zeit,S);  
  
end
```



## A4. Funktion zur Berechnung der Nachhallzeit; Variante 2, hallkorrigierte Impulsantwort:

### Contents

- [Zusammenfassung](#)
- [Nähere Beschreibung](#)
- [Berechnung](#)

```
function [T] = RT_Hanyu_DCIR(Impulsantwort,L_5dB,L_vardB,fs)
```

### Zusammenfassung

Nachhallzeitbestimmung mittels der hallkorrigierten Impulsantwort nach Hanyu 2014 Autor: Linus Staubach; Version 1; Erstellung 2022

### Nähere Beschreibung

Syntax:

```
[T] = RT_Hanyu_DCIR(Impulsantwort,L_5dB,L_vardB,fs)
```

Input:

Impulsantwort	zu Analysierende Impulsantwort;
L_5dB	Anfang Analysebereich [Sample];
L_vardB	Ende Analysebereich [Sample];
fs	Samplingfrequenz [Hz]

Output:

T	Nachhallzeit [s]
---	------------------

### Berechnung

```
g_t2_T = (Impulsantwort.^2)./(flipud(cumsum(flipud(Impulsantwort.^2))));  
  
g_t2_T = g_t2_T([L_5dB:L_vardB],:);  
  
T = 13.82/(mean(g_t2_T)*fs);  
  
end
```

## A5. Funktion zur Berechnung des Degree of Time Series Fluctuation; Variante 1:

### Contents

- [Zusammenfassung](#)
- [Nähere Beschreibung](#)
- [Berechnung](#)

```
function [DTF] = DTF_Hanyu_alt(Impulsantwort,L_5dB,L_vardB,Sw)
```

### Zusammenfassung

Berechnung des DTF (degree of time fluctuation) nach Hanyu 2014 Autor: Linus Staubach; Version 1; Erstellung 2022

### Nähere Beschreibung

Syntax:

```
[DTF] = DTF_Hanyu_alt(Impulsantwort,L_5dB,L_vardB,Sw)
```

Input:

Impulsantwort zu Analysierende Impulsantwort;  
L\_5dB Anfang Analysebereich [Sample];  
L\_vardB Ende Analysebereich [Sample];  
Sw Schrittweite der Schwellenwertberechnung (verändert die Berechnungspräzision)

Output:

DTF Degree of Time Series Fluctuation [dB/m]

### Berechnung

```
g_t = Impulsantwort./sqrt(flipud(cumsum(flipud(Impulsantwort.^2))));  
  
g_t_ber = g_t([L_5dB:L_vardB],:);  
  
h_t = (1./sqrt(mean(g_t_ber.^2))).*g_t_ber;  
  
R_total = sum(h_t.^2);  
  
z_k = zeros(Sw,1);  
  
for tr = 1:Sw  
    z_k(tr,:) = sum(h_t(h_t.^2 > ((max(h_t.^2)*tr)/Sw)).^2)./R_total;  
end  
DTF = (length(z_k(z_k >= 0.01))/Sw)*max(h_t.^2);  
end
```

## A6. Funktion zur Berechnung des Degree of Time Series Fluctuation; Variante 2:

### Contents

- [Zusammenfassung](#)
- [Nähere Beschreibung](#)
- [Berechnung](#)

```
function [DTF, A_t] = DTF_Hanyu_neu_test(Impulsantwort,L_5dB,L_var dB,Sw)
```

### Zusammenfassung

Berechnung des DTF (degree of time fluctuation) nach Hanyu 2018 Autor: Linus Staubach; Version 2; Erstellung 2022

### Nähere Beschreibung

Syntax:

```
[DTF, A_t] = DTF_Hanyu_neu_test(Impulsantwort,L_5dB,L_var dB,Sw)
```

Input:

Impulsantwort zu Analysierende Impulsantwort;  
 L\_5dB Anfang Analysebereich [Sample];  
 L\_var dB Ende Analysebereich [Sample];  
 Sw Schrittweite der Schwellenwertberechnung (verändert die Berechnungspräzision)

Output:

DTF Degree of Time Series Fluctuation [dB/m];  
 A\_t Momentane Abklingrate

### Berechnung

```

g_t = Impulsantwort./sqrt(flipud(cumsum(flipud(Impulsantwort.^2))));

g_t_ber = g_t([L_5dB:L_var dB],:);

EDC2 = 20*log10(sqrt(flipud(cumsum(flipud(Impulsantwort.^2)))/(2*10^(-5))));

A_t = zeros(L_var dB-L_5dB+1,1);

%           for t2 = L_5dB:L_var dB
%           A_t(t2-L_5dB+1) = (log(10))/(find(EDC2 < (EDC2(t2)-5),1)-find(EDC2 < (EDC2(t2)+5),1));
%           end
%----- Optimierte Version -----
for t2 = 1:(L_var dB-L_5dB+1)
    %A_t(t2) = log(10)/(find(EDC2 <= (EDC2(t2)-10),1)-t2);
    A_t(t2) = log(10)/(length(EDC2(EDC2 >= (EDC2(t2)-10),1))-t2);
end
%-----
h_tv2 = (g_t_ber./sqrt(A_t));
h_t2v2 = h_tv2.^2;
R_total2 = sum(h_t2v2);

z_k2 = zeros(Sw,1);

```

```
        for tr2 = 1:Sw
            z_k2(tr2,:) = sum(h_t2v2(h_t2v2 >
(max((h_t2v2)*(tr2/Sw)))))./R_total2;
        end
        DTF = (length(z_k2(z_k2 >= 0.01))/Sw)*max(h_t2v2);
end
```

*Published with MATLAB® R2021a*

## A7. Funktion zur Berechnung der Luftdämpfung nach ISO 9613-1:

### Contents

- [Zusammenfassung](#)
- [Nähere Beschreibung](#)
- [Berechnung](#)

```
function [alpha] = Luftdaempfung(Temp, H, pa, f)
```

### Zusammenfassung

Berechnet die Dämpfung von Schall bei der Ausbreitung im Freien nach ISO 9613-1. Autor: Linus Staubach; Version 1; Erstellung 2022

### Nähere Beschreibung

Syntax:

[alpha] = Luftdaempfung(Temp, H, pa, f)

Input:

Temp	Lufttemperatur [°C];
H	relative Luftfeuchte [%];
pa	Luftdruck [kPa];
f	Betrachtungsfrequenz [Hz]

Output:

alpha	Luftdämpfung alpha [dB/m]
-------	---------------------------

### Berechnung

```
T = Temp+273.15;      % [K]
pr = 101.325;        % [kPa]
T0 = 293.15;        % [K]

h = (H.*10.^(-6.8346.*((273.16./T).^1.261)+4.6151))./(pa./pr);

fro = (pa./pr).*(24+(4.04.*h.*(10^4).*((0.02+h)./(0.391+h))));
frn = (pa./pr).*((T./T0).^(-0.5)).*(9+280.*h.*exp(-4.17.*((T./T0).^(-1/3))-1));

alpha = 8.686.*(f.^2).*((1.84.*(10.^(-11)).*((pa./pr).^(-1)).*((T./T0).^0.5))+((T./T0).^(-5/2)).*(0.01275.*(exp(-2239.1./T)).*((fro+((f.^2)./fro)).^(-1))+0.1068.*(exp(-3352./T)).*((frn+((f.^2)./frn)).^(-1))));
end
```

## A8. Funktion zur Berechnung des Raumvolumens in verschiedenen Diffusorzuständen:

### Contents

- [Zusammenfassung](#)
- [Nähere Beschreibung](#)
- [Berechnung](#)

```
function [Volumen] = VolModellhallraum(Zustand)
```

### Zusammenfassung

Berechnet das Volumen des Modellhallraumes pro Diffusorbelegungszustand Autor: Linus Staubach; Version 1; Erstellung 2022

### Nähere Beschreibung

Syntax:

[Volumen] = VolModellhallraum(Zustand)

Input:

Zustand            Belegungszustand mit Diffusorelementen;

Output:

Volumen            Volumen des Modellhallraumes [m<sup>3</sup>];

### Berechnung

```
VolAnfang = 0.3175875;

VolK1 = 0.00019563;

VolGr = 0.00083148;

ZustandsVerlauf = [2,2,2,2,1,1,1,1,2,2,1,2,1,2,2,1,1,1];

if Zustand ==0
    Volumen = VolAnfang;
else
    VKorr = 0;
    for i = 1:Zustand
        switch ZustandsVerlauf(i)
            case 1
                VKorr = VKorr + VolK1;
            case 2
                VKorr = VKorr + VolGr;
        end
    end
    Volumen = VolAnfang-VKorr;
end
end
```

## Anhang B Konstruktionsmaße des Hallraummodells

### B1. Grundhallraum (Innenraum)

Beschreibung	Bezeichnung	Wert [m]
Länge	l	0,941
Breite	b	0,675
Höhe	h	0,5

### B2. Maße der Diffusorelemente

Beschreibung	Bezeichnung [Einheit]	Diffusortyp	
		„klein“	„groß“
Durchmesser Montagefläche	$d_M$ [cm]	11	21
Durchmesser Flachstelle	$d_F$ [cm]	-	6,8
Durchmesser Kugel	$d_K$ [cm]	12	28
Höhe Kugelsegment	$h_K$ [cm]	3,6	4,15
Volumen Kugelsegment	$V_K$ [cm <sup>3</sup> ]	195,6	831,5
Montagefläche	$A_M$ [cm <sup>2</sup> ]	95	347
Gekrümmte, diffuse Fläche	$A_d$ [cm <sup>2</sup> ]	135,8	410,5

**B3. Positionen der Diffusorelemente**

Belegte Fläche	Diffusortyp	Positionsbezeichnung	X [cm]	Y [cm]
Stirnfläche	„klein“	P1	13,0	17,0
		P2	34,2	40,6
	„groß“	P3	17,5	39,3
		P4	50,5	22,0
Längsfläche	„klein“	P5	45,9	14,2
		P6	60,0	36,7
		P7	84,8	22,5
	„groß“	P8	12,1	33,2
		P9	35,0	28,2
		P10	62,8	12,0
Deckfläche	„klein“	P11	39,2	21,7
		P12	52,2	55,2
		P13	55,3	12,2
		P14	83,2	31,6
	„groß“	P15	22,2	11,8
		P16	29,6	50,8
		P17	65,1	40,1
		P18	78,8	12,7

**B4. Absorbermaße**

Absorbertyp	Maße			
	Bezeichnung	x [cm]	y [cm]	z [cm]
„klein“		30	36	1
„groß“		51	64	1



## Anhang C Messbedingungen

### C1. Mikrofonpositionen

Positi- ons-Nr.	Maße			Mo- dell	Serien- nummer	Interner Kalbrierpegel vor der Messreihe [dB]	Interner Kalbrierpegel nach der Messreihe [dB]
	Be- zeich- nung	x [cm]	y [cm]				
1	13,1	17,35	12	M370	1882	-11,47	-11,46
2	21,55	40,7	28,5	M370	1884	-11,23	-11,2
3	33,4	25,4	20	M370	1879	-10,18	-10,18
4	46,2	50,4	35,5	M370	1881	-8,75	-8,76
5	59,85	31,4	15	M370	1878	-10,87	-10,87
6	81,9	53,2	27	M370	1880	-12,92	-12,84

### C2. Lautsprecherpositionen

Positions-Nr.	Maße			
	Bezeichnung	x [cm]	y [cm]	z [cm]
1		30	52	9
2		82,5	10	17

### C3. Absorberpositionen

Eckpunkt	Bezeichnung [Einheit]	Absorbertyp		Bezeichnung [Einheit]	Absorbertyp	
		„klein“	„groß“		„klein“	„groß“
1	X <sub>1</sub> [cm]	41,9	0	Y <sub>1</sub> [cm]	14	0
2	X <sub>2</sub> [cm]	74,6	0	Y <sub>2</sub> [cm]	28,1	51
3	X <sub>3</sub> [cm]	62,7	64	Y <sub>3</sub> [cm]	56,6	51
4	X <sub>4</sub> [cm]	29,9	64	Y <sub>4</sub> [cm]	40,9	0

**C4. Diffusorbelegungsverlauf**

Zustand Z	Eingebrachter Diffusortyp	Eingebrachter Diffusor	Anteil diffuser Fläche [%]			
			Stirn- seite	Längs- seite	Deckflä- che	Gesamt- raum
0	-	-	0	0	0	0
1	„groß“	P17			6,3	1,4
2	„groß“	P9				2,8
3	„groß“	P3	11,9	8,6	12,68	4,2
4	„groß“	P15				5,6
5	„klein“	P7				6,1
6	„klein“	P1	15,7	11,35	14,7	6,6
7	„klein“	P13				7,0
8	„klein“	P5				7,5
9	„groß“	P16				8,8
10	„groß“	P10				10,2
11	„klein“	P12	27	14	20,7	10,7
12	„groß“	P8				12,0
13	„klein“	P14				12,5
14	„groß“	P4	30,2	30,2	24,6	13,8
15	„groß“	P18				15,2
16	„klein“	P6				15,6
17	„klein“	P2	30,5	32,7	30,5	16,0
18	„klein“	P11				16,5

**C5. Klimabedingungen**

Zu- stand Z	Messung vor dem Diffusor- zustand			Messung nach dem Diffusor- zustand		
	Tempera- tur [°C]	Relative Luft- feuchte [%]	Luftdruck [kPa]	Tempera- tur [°C]	Relative Luft- feuchte [%]	Luftdruck [kPa]
0	20,5	29,9	95,24	20,4	30,8	95,25
1	20,4	31,3	95,27	20,4	31,3	95,27
2	20,3	35,5	95,4	20,5	35,5	94,43
3	20,5	35,7	95,46	20,5	35,7	95,46
4	19,8	29	95,71	20	28,5	95,71
5	20,3	27,9	95,69	20,5	27,5	95,7
6	20,5	27,6	95,7	20,8	27,2	95,68
7	20,6	27,1	95,65	20,9	26,7	95,63
8	20,5	26,6	95,59	20,8	26,1	95,57
9	20,9	26,4	95,56	21	26,3	95,56

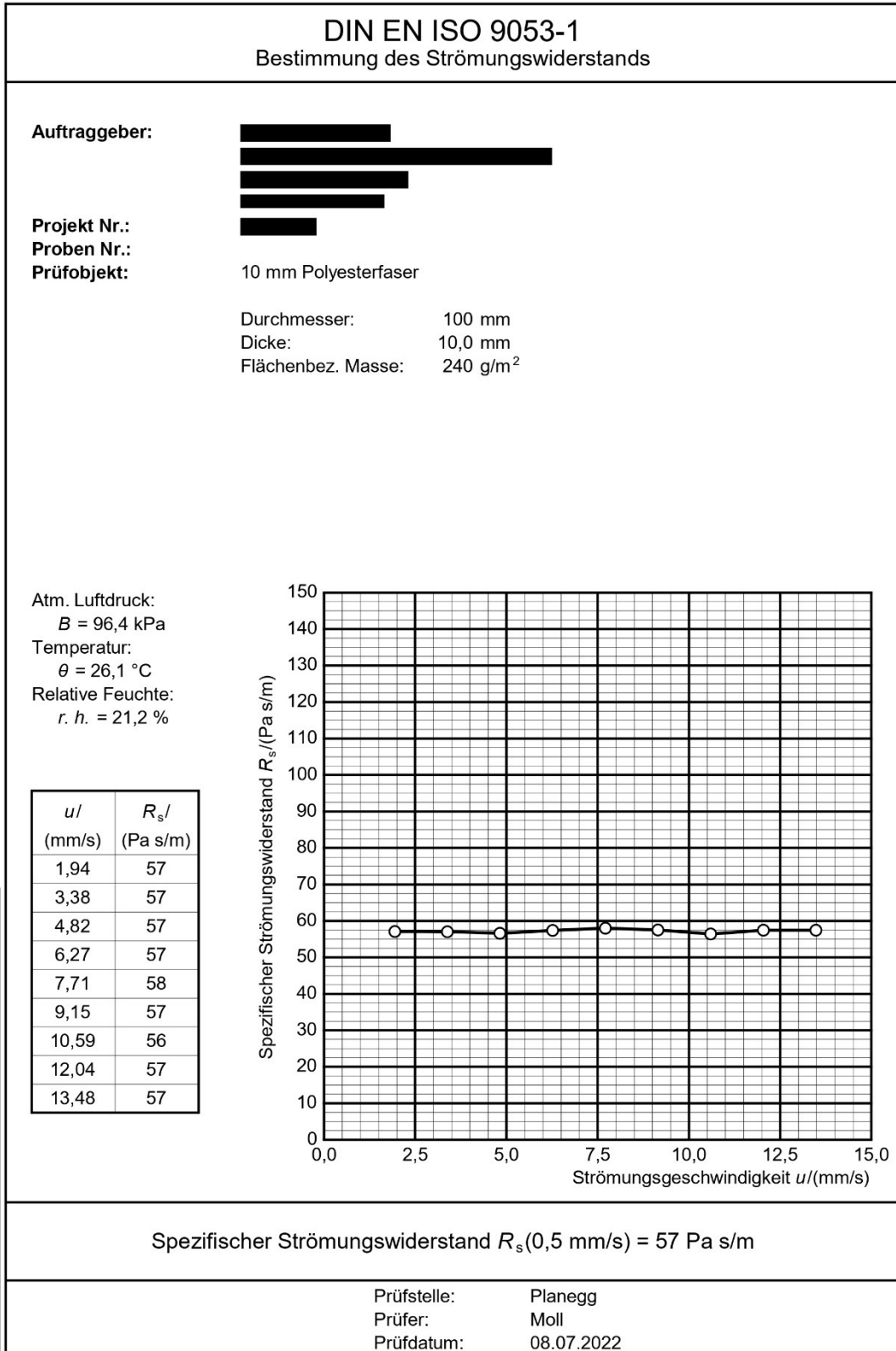
Zu- stand Z	Messung vor dem Diffusor- zustand			Messung nach dem Diffusor- zustand		
	Tempera- tur [°C]	Relative Luft- feuchte [%]	Luftdruck [kPa]	Tempera- tur [°C]	Relative Luft- feuchte [%]	Luftdruck [kPa]
10	21	26,1	95,53	21	26,1	95,53
11	21,1	26,4	95,55	21,3	26,2	95,53
12	21,3	26,6	95,53	21,3	26,6	95,53
13	21,3	26,9	95,53	21,3	26,9	95,53
14	21,4	26,6	95,51	21,3	26,7	95,5
15	20	29	95,11	20,6	27,6	95,09
16	20,7	27,8	95,1	20,8	27,5	95,11
17	20,9	26,4	95,13	21	26,4	95,13
18	21,1	26,6	95,14	21,1	26,7	95,1

## C6. Messzeiten

Zustand Z	Datum	Uhrzeit
0	11.01.2023	15:57
1	11.01.2023	15:57
2	11.01.2023	18:09
3	11.01.2023	18:10
4	12.01.2023	10:15
5	12.01.2023	10:54
6	12.01.2023	11:21
7	12.01.2023	12:00
8	12.01.2023	13:27
9	12.01.2023	14:10
10	12.01.2023	14:57
11	12.01.2023	17:33
12	12.01.2023	18:50
13	12.01.2023	19:35
14	12.01.2023	19:04
15	13.01.2023	10:50
16	13.01.2023	10:51
17	13.01.2023	10:53
18	13.01.2023	11:24

# Anhang D Strömungswiderstände der Absorbermaterialien

## D1 Polyesterfaser



## D2 Basotect

## DIN EN ISO 9053-1

### Bestimmung des Strömungswiderstands

Auftraggeber:



Projekt Nr.:



Proben Nr.:

Prüfobjekt:

10 mm Basotect

Durchmesser: 100 mm  
 Dicke: 10,0 mm  
 Flächenbez. Masse: 81,7 g/m<sup>2</sup>

Atm. Luftdruck:

 $B = 96,4$  kPa

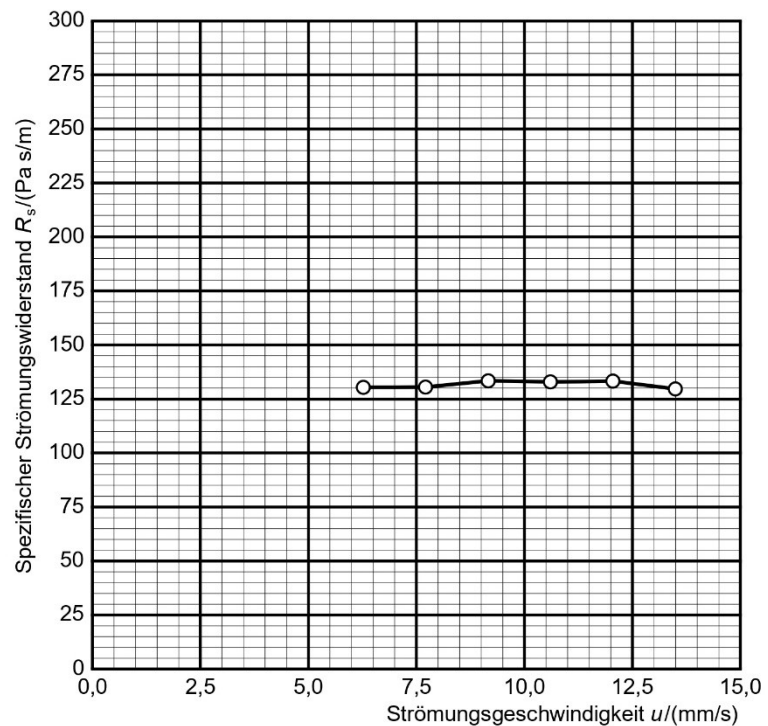
Temperatur:

 $\theta = 26,3$  °C

Relative Feuchte:

 $r. h. = 12,3$  %

$u/$ (mm/s)	$R_s/$ (Pa s/m)
6,27	130
7,71	131
9,16	133
10,60	133
12,05	133
13,49	130



Spezifischer Strömungswiderstand  $R_s(0,5$  mm/s) = 134 Pa s/m

Prüfstelle: Planegg  
 Prüfer: Moll  
 Prüfdatum: 08.07.2022

## Anhang E Bilder

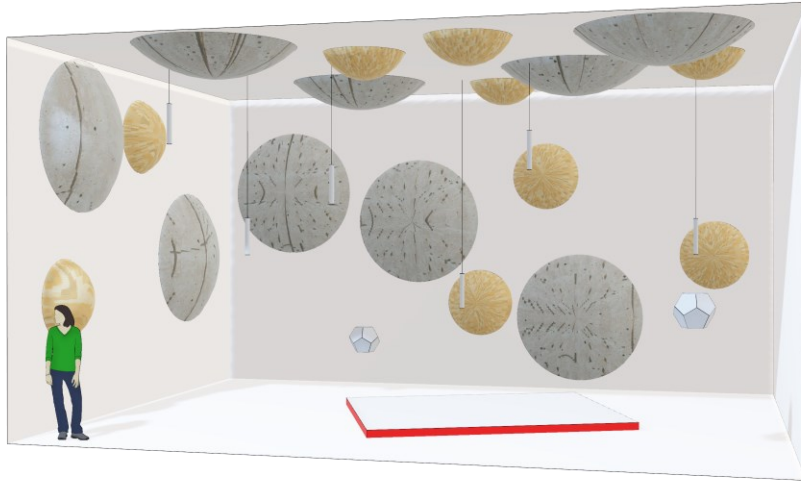


Bild 1: 3D-Schnittmodell des für diese Messreihe als Referenz dienenden Originalhallraumes

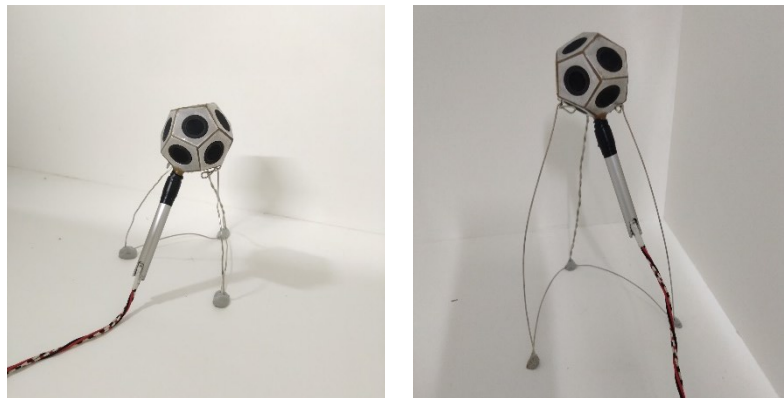


Bild 2: Dodekaederständer klein (links) und groß (rechts)

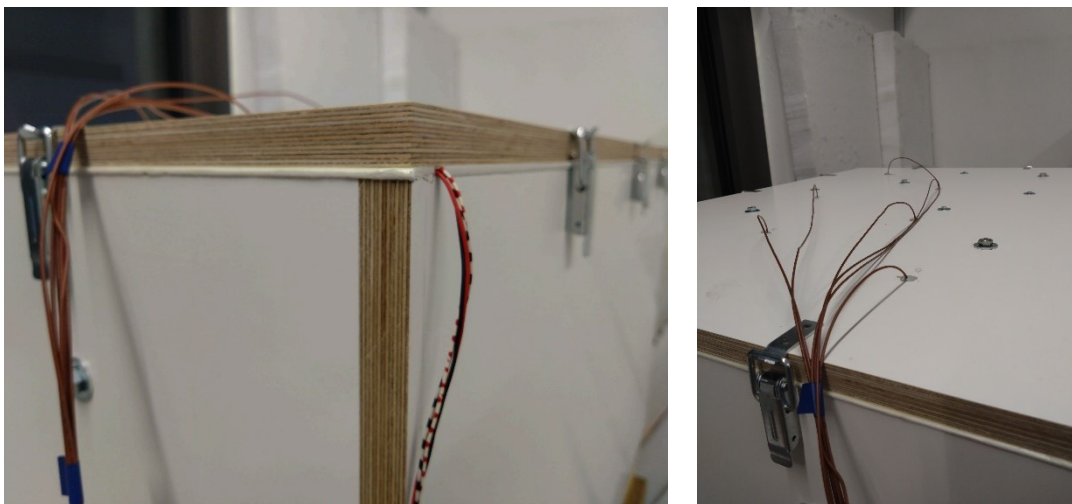
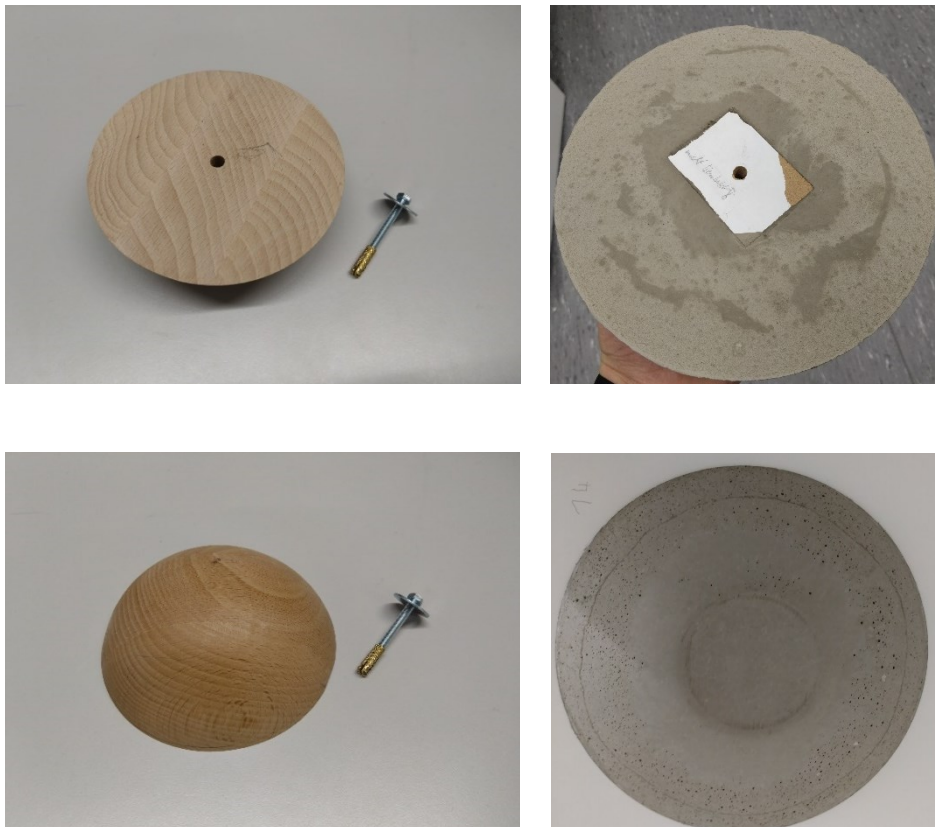


Bild 3: Detailaufnahmen der Kabeldurchführungen



*Bild 4: Kantenbegrenzung der Absorberelemente, exemplarisch am großen Polyesterfaserabsorber*



*Bild 5: Beispielhafter Aufbau der Diffusorelemente, „klein“ (links) und „groß“ (rechts)*



Z0



Z1



Z2



Z3



Z4



Z5



Z6



Z7



Z8



Z9



Z10



Z11



Z12



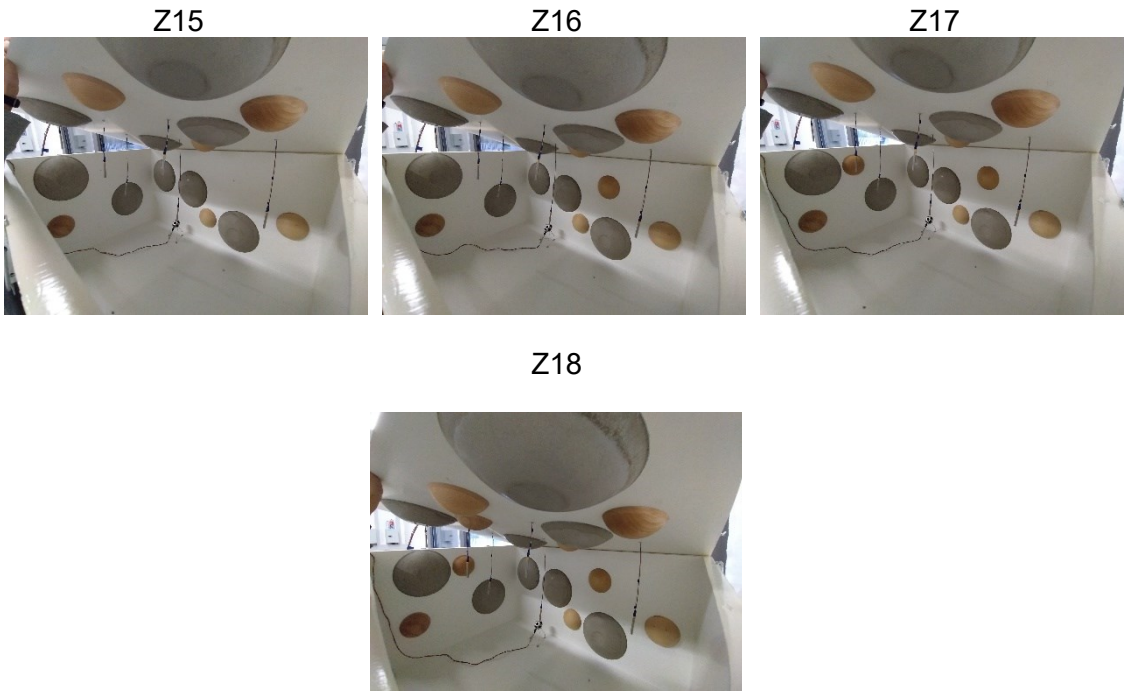
Z13



Z14







*Bild 6: Bildreihe des Diffusorbelegungsverlaufes*

## 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.

---

Ort, Datum

Vorname, Nachname