

Die vorliegende Arbeit wurde eingereicht beim:
DLR – Institut für Solarforschung, Lehrstuhl für solare Komponenten

Experimentelle Untersuchung zur Weiterentwicklung eines akustischen Verfahrens zur Leckagedetektion in Gebäudehüllen

Masterarbeit

präsentiert von:

Simeon Reksztat

379819

Name des 1. Prüfers:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Hoffschmidt

Name des 2. Prüfers:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Pitz-Paal

Wissenschaftlicher
Berater:

Dr. Björn Schiricke

Köln, 18.09.2025

Abstract

Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Weiterentwicklung eines akustischen Verfahrens zur Leakedetektion in Gebäudehüllen. Leckagen verursachen einen erheblichen zusätzlichen Energiebedarf und stellen eine zentrale Einflussgröße für die Energieeffizienz im Gebäudesektor dar. Während sich konventionelle Verfahren wie Differenzdruckmessungen etabliert haben, befindet sich die akustische Leakedetektion noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein speziell konzipierter Luftdichtheitsprüfstand optimiert, um das Verfahren systematisch zu untersuchen und weiterzuentwickeln. Ein Schwerpunkt dieser Untersuchung lag auf der umfassenden Schalldämmung des Prüfstands, wodurch Störgeräusche signifikant reduziert werden konnten. Zusätzlich wurden auch die Prüfkörper gezielt mit schalldämmendem Material ausgestattet, um Körperschallübertragungen zu minimieren. Beide Maßnahmen führten zu verbesserten akustischen Bedingungen, unter denen die Verfahrensgrenzen systematisch ermittelt werden konnten. Im Rahmen einer Parameterstudie gelang es dadurch sowohl kleinere Durchgangsöffnungen als auch Leckagen mit längeren und komplexeren Kanalstrukturen zuverlässig zu detektieren. Darüber hinaus wurde der Einfluss verschiedener Frequenzbereiche nach einer festgelegten Methodik untersucht. Ein Frequenzbereich zwischen 10 und 20 kHz erweist sich für viele Szenarien als geeignet. Ultraschallmessungen im Bereich von etwa 30 bis 40 kHz ermöglichen zwar eine Detektion kleinster Leckagen, weisen jedoch eine hohe Sensitivität gegenüber Messparametern auf. Sowohl Strömungsparameter als auch akustische Kennwerte zeigen eine Abhängigkeit von Lochdurchmesser und Pfadlänge. Die kombinierte Betrachtung dieser Parameter erlaubt eine grobe Abschätzung von Lochdurchmesser und Pfadlänge, liefert jedoch keine verlässlichen quantitativen Aussagen zu den einzelnen Parametern. Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, dass die akustische Leakedetektion ein hohes Potenzial besitzt, konventionelle Differenzdruckverfahren nach weiterer Forschung und Optimierung sinnvoll zu ergänzen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	IX
Formelzeichen und Abkürzungen	X
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Luftdichtheit.....	3
2.1.1 Einfluss der Luftdichtheit auf die Gebäudequalität	3
2.1.2 Typische Infiltrationspfade.....	5
2.1.3 Rechtliche und normative Vorgaben	7
2.2 Grundlagen der Akustik.....	7
2.2.1 Akustische Kenngrößen.....	8
2.2.2 Schallentstehung und -ausbreitung	9
2.2.3 Wellenarten.....	10
2.2.4 Spektralbereiche	12
2.2.5 Schmalband- und Breitbandsignale	12
2.2.6 Deterministische und stochastische Signale	14
2.3 Messmethoden der Leckagedetektion in Gebäuden.....	15
2.3.1 Differenzdruck-Messverfahren	15
2.3.2 Methoden zur Leckageortung.....	17
2.3.3 Akustisches Messverfahren	19
3 Prüfstand und Messmethodik.....	22
3.1 Luftdichtheitsprüfstand ATLAS.....	22
3.1.1 Schalldämmung des Prüfstandes	23
3.1.2 Umsetzung von Leckagen.....	25
3.2 Messkonfiguration am Prüfstand.....	34
3.2.1 Eingesetzte akustische Messgeräte und -systeme.....	34
3.2.2 Micro Leakage Meter	37
3.2.3 Power-Beamforming	37
3.3 Umformung zur Linearisierung der Strömungsgleichung	40
4 Ergebnisse	42
4.1 Auswahl des Exponenten für das Power-Beamforming	42
4.2 Auswirkungen der Schalldämmung auf Messergebnisse	46
4.3 Verfahrensgrenzen der verschiedenen Prüfkörper (nach Schalldämmung des Prüfstandes)	48

4.4	Ultraschall	57
4.5	Einfluss von unterschiedlichen Frequenzen für die Detektion verschiedener Leckagearten.....	60
4.6	Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Leckagegeometrie, Strömungsparametern und akustischer Detektierbarkeit.....	72
5	Schlussfolgerung und Ausblick.....	78
A	Anhang	81
	Anhang 1: Strömungsparameter verschiedener Prüfkörper	81
	Anhang 2: Begründung der Wahl des Dynamikbereichs bei der Auswertung der Messungen am Prüfkörper <i>Z-Kanal</i>	83
	Literaturverzeichnis.....	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Luftdruckunterschiede verursacht durch (a) Wind, (b) Kamineffekt und (c) Haustechnik (geringfügig modifiziert aus: Allen & Iano, 2014)	4
Abbildung 2-2: Typische Leckagewege in der Gebäudehülle (modifiziert aus: Prignon et al., 2021; Schild & Willems, 2022)	5
Abbildung 2-3: Wellenbild einer Longitudinalwelle (aus: Lerch et al., 2009)	11
Abbildung 2-4: Wellenbild (a) und Polarisationswinkel (b) einer Transversalwelle (aus: Lerch et al., 2009)	11
Abbildung 2-5: <i>Blower-Door</i> -Messsystem	16
Abbildung 2-6: Thermografisches Abbild einer Leckage unter einer Balkontür (aus: Taylor et al., 2013)	18
Abbildung 2-7: Leckageortung mit Räucherstäbchen (aus: Kölsch, 2022)	18
Abbildung 2-8: Wirkung der Wellenlänge auf den Durchgang durch Materialien und Öffnungen (geringfügig modifiziert aus: Holstein et al., 2020)	20
Abbildung 2-9: Schematische Darstellung des D&S-Beamformings im Zeitbereich. 1: Die Schallwellen zweier Quellen (rot und blau) treffen mit unterschiedlichen Laufzeiten auf das Mikrofonarray. 2: Dadurch entstehen Phasenunterschiede zwischen den Signalen, die sich aus der relativen Geometrie und der Schallgeschwindigkeit berechnen lassen. 3: Durch Verzögerung (Δ) der Eingangssignale werden die Anteile der fokussierten Quelle (rot) zur Deckung gebracht, während die Anteile der zweiten Quelle (blau) phasenverschoben bleiben. 4: Nach Summation und Mittelung der Kanäle ergibt sich das Beamformingsignal $f_{BF}(\mathbf{x}, t)$, in dem die gewünschte Quelle verstärkt und weitere Geräuschquellen unterdrückt werden (geringfügig modifiziert aus: gfai tech GmbH, o. A, o. J. d, Zugriff am 25.08.2025)	21
Abbildung 3-1: Prüfstand ATLAS mit erforderlicher Messtechnik: Micro Leakage Meter (links), Lautsprecher (innen) und Mikrofonarray (rechts)	22
Abbildung 3-2: Prüfstand vor der Schalldämmung von innen mit Blickrichtung nach vorne	23
Abbildung 3-3: Schallisolierter Prüfstand von innen mit Blickrichtung nach vorne (links) und Blickrichtung nach hinten bei geöffneter Tür (rechts)	24
Abbildung 3-4: Gesamtansicht des Prüfkörpers <i>Spanplatte</i> mit markiertem Leckagebereich (oben). Vergrößerter Ausschnitt zur Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung unterschiedlich großer Löcher bei konstantem Abstand r (unten)	26
Abbildung 3-5: Prüfkörper <i>Labyrinth</i>	27

Abbildung 3-6: Vergrößerte Ansicht zweier Pfade des Prüfkörpers <i>Labyrinth</i> mit eingezeichnetem Strömungsweg. Pfad: 5-4r1d-5 (oben). Pfad: 3-5l2u-7 (unten)	28
Abbildung 3-7: Prüfkörper <i>Sandwich</i> mit offenen und geschlossenen Leckagen	29
Abbildung 3-8: Vergrößerte Ansicht des vierten Quadranten des Prüfkörpers <i>Sandwich</i> (links). Seitenansicht mit eingezeichnetem Strömungspfad (rechts). Pfad: S7-S7-p3-t24- S7-p0-t24	30
Abbildung 3-9: Schematische Darstellung des Prüfkörpers <i>Z-Kanal</i> . Ansicht von vorne (oben). Ansicht von oben nach der Verschraubung (unten) (geringfügig modifiziert aus: Pernpeintner & Diel, 2025).....	31
Abbildung 3-10: Prüfkörper <i>Z-Kanal</i> . 6,5 mm Platte mit Durchgangsbohrungen nach der Verschraubung (oben). 15 mm Platte mit gefrästen Pfaden vor der Verschraubung (unten). Die Schrauben und der Randbereich sind luftdicht mit Klebeband abgedichtet.....	33
Abbildung 3-11: Optisches Bild eines Staubsaugers (oben links). Beamforming-Karte (oben rechts). Akustische Karte (unten). Der Dynamikbereich der akustischen Karte ist rechts durch eine Farbskala dargestellt (aus: gfai tech GmbH, o. A., o. J. c, Zugriff am 22.07.2025).....	35
Abbildung 3-12: <i>SONAPHONE T</i> in Kombination mit der <i>SONOSPHERE</i> im inneren des Prüfstandes.....	36
Abbildung 3-13: PSF mit Beamforming-Ansatz (geringfügig modifiziert aus: gfai tech GmbH, o. A., o. J. b, Zugriff am 01.09.2025).....	38
Abbildung 3-14: Regressionsgerade aus vier experimentell bestimmten Messswerten. Lochdurchmesser: 8 mm. Pfadlänge: 250 mm.....	41
Abbildung 4-1: Vergleich der Exponenten für das PBF. Leckage: 2 mm Durchgangsloch (mit rotem Pfeil markiert), Störgeräusche sind durch rote Kreise hervorgehoben. Prüfkörper: <i>Spanplatte</i> . Oben links: <i>Standard</i> . Oben rechts: <i>Funktional</i> mit $\nu = 4$. Mitte links: <i>Funktional</i> mit $\nu = 16$. Mitte rechts: <i>Funktional</i> mit $\nu = 32$. Unten links: <i>Asymptotisch</i> . Unten rechts: <i>Adaptiv</i> . Frequenzbereich: 17,78 – 22,39 kHz. Dynamik: 1 dB (visualisiert durch Farbskala).....	43
Abbildung 4-2: Vergleich der PBF-Methoden. Leckage: 1,5 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: <i>Spanplatte</i> . Oben links: <i>Standard</i> . Oben rechts: <i>Funktionales</i> mit $\nu = 4$. Unten: <i>Funktionales</i> mit $\nu = 16$. Frequenzbereich: 29,3 – 40 kHz. Dynamik: 0,9 dB	45
Abbildung 4-3: Akustische Karte nach der Dämmung des Prüfstandes. Leckage: 1,5 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: <i>Spanplatte</i> . Frequenzbereich: 29,3 – 40 kHz. Dynamik: 0,9 dB.....	46

Abbildung 4-4: Akustische Karte des Prüfkörpers <i>Labyrinth</i> vor der Dämmung des Prüfstandes. Pfad: 5-4r1d-5. Frequenzbereich: 15,8 – 18,5 kHz. Dynamik: 1,5 dB.....	47
Abbildung 4-5: Akustische Karte des Prüfkörpers <i>Labyrinth</i> nach der Dämmung des Prüfstandes. Pfad: 5-4r1d-5. Frequenzbereich: 15,8 – 18,5 kHz. Dynamik: 1,5 dB	48
Abbildung 4-6: Akustische Karte des Prüfkörpers <i>Labyrinth</i> nach der Dämmung des Prüfstandes. Pfad: 3-2d5l4u-7. Frequenzbereich: 15,5 – 24 kHz. Dynamik: 0,3 dB	49
Abbildung 4-7: Akustische Karte des Prüfkörpers <i>Labyrinth</i> nach der Dämmung des Prüfstandes. Pfad: 3-2l1u3l1u-7. Frequenzbereich: 15,5 – 18,5 kHz. Dynamik: 1 dB	50
Abbildung 4-8: Skizze zur Veranschaulichung der Schallübertragung durch den Prüfkörper <i>Labyrinth</i> . Während der Schall anteilig über den Leckagepfad übertragen wird, stellt die Körperschalltransmission durch den Prüfkörper die dominierende Übertragungsform dar. Die rot dargestellte Wellenlinie symbolisiert den Körperschall.	51
Abbildung 4-9: Akustische Karte des Prüfkörpers <i>Labyrinth</i> nach der Dämmung des Prüfstandes, Prüfkörper selbst ist nicht gedämmt. Schallübertragung durch Körperschall. Pfad: 3-6d4l2u1r2u2l4u-7. Frequenzbereich: 10,9 – 12,6 kHz. Dynamik: 0,1 dB.....	52
Abbildung 4-10: Skizze zur Veranschaulichung der Schallübertragung durch den Prüfkörper <i>Sandwich</i> . Der Schall wird teilweise über den Leckagepfad übertragen, jedoch stellt die Körperschalltransmission über die mittlere Ebene des Prüfkörpers die dominierende Übertragungsform dar. Die rot dargestellten Wellenlinien symbolisieren den Körperschall.	53
Abbildung 4-11: Akustische Karte des Prüfkörpers <i>Sandwich</i> im offenen (oben) sowie im abgeklebten Zustand (unten). Pfad: S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24. Frequenzbereich: 8 – 11,5 kHz. Dynamik: 1 dB	54
Abbildung 4-12: Akustische Karte des Prüfkörpers <i>Sandwich</i> im offenen (oben links) sowie im abgeklebten Zustand (unten links) mit Fixierelementen. Seitenansicht mit eingezeichnetem Strömungspfad im offenen (oben rechts) sowie im abgeklebten Zustand (unten rechts). Pfad: S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24. Frequenzbereich: 7,5 – 45 kHz (oben), 9,8 – 10,6 kHz (unten). Dynamik: 3 dB (oben), 0,2 dB (unten)	55

Abbildung 4-13: Akustische Karte des Prüfkörpers <i>Sandwich</i> (links). Seitenansicht mit eingezeichnetem Strömungspfad (rechts). Pfad: S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24-S7-p1-t21. Frequenzbereich: 15,75 – 23,25 kHz. Dynamik: 0,1 dB.....	56
Abbildung 4-14: Akustische Karte des Prüfkörpers <i>Sandwich</i> (links). Seitenansicht mit eingezeichnetem Strömungspfad (rechts). Pfad: S3-S3-p3-t24-S3-p0-t24. Frequenzbereich: 7,5 – 45 kHz. Dynamik: 1 dB	57
Abbildung 4-15: Akustische Karte einer Ultraschallmessung. Leckage: 3,3 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: <i>Spanplatte</i> . Frequenz: 40 kHz. Dynamik: 2 dB	58
Abbildung 4-16: Akustische Karte einer Ultraschallmessung. Leckage: 2 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: <i>Spanplatte</i> . Frequenz: 40 kHz. Dynamik: 2 dB	59
Abbildung 4-17: Akustische Karte einer Ultraschallmessung bei einer Verschiebung der akustischen Kamera um 45° zum Prüfkörper. Leckage: 2 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: <i>Spanplatte</i> . Frequenz: 40 kHz. Dynamik: 5 dB	60
Abbildung 4-18: Kleinster FB mit SG, bei dem die Leckage erstmals erkennbar ist. In der Auswertung mit einem <i>Dreieck</i> markiert. Prüfkörper: <i>Z-Kanal</i> . Leckage: 6 mm. Pfadlänge: 60 mm.....	62
Abbildung 4-19: Kleinster FB ohne SG, bei dem die Leckage eindeutig identifiziert werden kann. In der Auswertung mit einem <i>Kreis</i> markiert. Prüfkörper: <i>Z-Kanal</i> . Leckage: 6 mm. Pfadlänge: 60 mm	63
Abbildung 4-20: Größter FB ohne SG, bei dem die Leckage eindeutig identifiziert werden kann. In der Auswertung mit einem <i>Viereck</i> markiert. Prüfkörper: <i>Z-Kanal</i> . Leckage: 6 mm. Pfadlänge: 60 mm	64
Abbildung 4-21: Größter FB mit SG, bei dem die Leckage zuletzt noch erkennbar ist. In der Auswertung mit einem <i>Stern</i> markiert. Prüfkörper: <i>Z-Kanal</i> . Leckage: 6 mm. Pfadlänge: 60 mm.....	65
Abbildung 4-22: Beispielhafte Auswertung der 6 mm Leckage mit Pfadlänge 60 mm. Darstellung der FB mit und ohne SG sowie der zugehörigen Symbole. Das Symbol <i>Stern</i> ist hier vom Symbol <i>Viereck</i> überlagert.	66
Abbildung 4-23: Ermittelte untere Frequenzgrenze und zugehöriger Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Lochdurchmesser: 3 mm. Obere Frequenzgrenze: 45 kHz. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,5 dB (grauer Hintergrund)	68
Abbildung 4-24: Ermittelte untere Frequenzgrenze und zugehöriger Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Lochdurchmesser: 4 mm. Obere	

Frequenzgrenze: 45 kHz. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,5 dB (grauer Hintergrund)	69
Abbildung 4-25: Ermittelte untere Frequenzgrenze und zugehöriger Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Lochdurchmesser: 6 mm. Obere Frequenzgrenze: 45 kHz. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,1 dB (grauer Hintergrund)	69
Abbildung 4-26: Ermittelte untere Frequenzgrenze und zugehöriger Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Lochdurchmesser: 8 mm. Obere Frequenzgrenze: 45 kHz. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,3 dB (grauer Hintergrund)	70
Abbildung 4-27: Vergleich der ermittelten FB ohne SG für alle vier Lochdurchmesser in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Dynamik: 1 dB	71
Abbildung 4-28: <i>C</i> -Werte der unterschiedlichen Pfadlängen (PL) über die Lochdurchmesser (LD) 4 und 8 mm. PL bei 4 mm: 20, 70 und 150 mm. PL bei 8 mm: 20, 250 und 450 mm	73
Abbildung 4-29: <i>n</i> -Werte der unterschiedlichen PL für die LD 4 und 8 mm	74
Abbildung 4-30: Frequenzbereiche ohne SG und zugehörige Schalldruckpegel über den <i>C</i> -Wert für LD 4 und 8 mm. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,5 dB (grauer Hintergrund, oben), 0,3 dB (grauer Hintergrund, unten)	75
Abbildung 4-31: Frequenzbereiche ohne SG und zugehörige Schalldruckpegel über den <i>n</i> -Wert für LD 4 und 8 mm. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,5 dB (grauer Hintergrund, oben), 0,3 dB (grauer Hintergrund, unten)	76
Abbildung 4-32: <i>n</i> -Werte der unterschiedlichen PL über die LD 4 und 8 mm. PL bei 4 mm: 20, 70 und 150 mm. PL bei 8 mm: 20, 250 und 450 mm	77
Abbildung A-1: Ermittelte untere Frequenzgrenze und zugehöriger Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Lochdurchmesser: 4 mm. Obere Frequenzgrenze: 45 kHz. Dynamik: 0,3 dB	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Typische Referenzwerte für Schalldruck und Schalldruckpegel mit Beispielen (Möser, 2015)	9
Tabelle 2-2: Wellenlängen bei verschiedenen Frequenzen mit Angabe des entsprechenden Spektralbereiches	12
Tabelle 3-1: Verwendete Messinstrumente und Messeinstellungen.....	36
Tabelle 3-2: PBF-Methode mit dem jeweiligen Exponenten.....	39
Tabelle 3-3: Logarithmierte Messwerte Δp und Q . Lochdurchmesser: 8 mm. Pfadlänge: 250 mm.....	41
Tabelle 4-1: Vergleich der Exponenten für das PBF. Leckage: 2 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: <i>Spanplatte</i> . Frequenzbereich: 17,78 – 22,39 kHz. Dynamik: 1 dB	44
Tabelle 4-2: Vergleich der Exponenten für das PBF. Leckage: 2 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: <i>Spanplatte</i> . Ultraschall-Frequenzbereich: 20 – 40 kHz.....	44
Tabelle A-1: q_{50} -Werte der Prüfkörper <i>Labyrinth</i> und <i>Sandwich</i>	81
Tabelle A-2: q_{50} -Werte des Prüfkörpers <i>Z-Kanal</i> bis zu einer Pfadlänge von 250 mm.....	81
Tabelle A-3: Logarithmierte Messwerte Δp und Q sowie berechnete Werte für n und C für verschiedene Lochdurchmesser und Pfadlängen.....	83

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbole	Einheit	Bezeichnung
a	-	Signal-Amplitude
$\vec{A}$	m^2	Gleichsinnig durchströmte gerichtete Fläche
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
c_p	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Spezifische Wärmekapazität
C	$\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{Pa}^n)$	Strömungskoeffizient
$\vec{d}$	-	Verschiebungsvektor
f	$1/\text{s}$	Frequenz
f_1	$1/\text{s}$	Anfangsfrequenz
f_2	$1/\text{s}$	Endfrequenz
f_m	$1/\text{s}$	Mittenfrequenz
f_o	$1/\text{s}$	Obere Grenzfrequenz
f_u	$1/\text{s}$	Untere Grenzfrequenz
Δf	$1/\text{s}$	Bandbreite
$\vec{I}$	W/m^2	Schallintensität
I_0	W/m^2	Referenz-Schallintensität
L	dB	Schalldruckpegel
$\dot{m}$	kg/s	Luftmassenstrom
M	-	Anzahl der Mikrofone
n	-	Druckexponent
p	Pa	Schalldruck
p_0	Pa	Referenz-Schalldruck
p_R	Pa	gemessener Referenz-Schalldruck
Δp	Pa	Druckdifferenz
q	m^3/s	Schallfluss
Q	m^3/s	Luftstrom
$\dot{Q}_{inf}$	W	Infiltrationswärmestrom
t_{sweep}	s	Feste Zeitdauer
T_i	K	Innentemperatur
T_o	K	Außentemperatur
$\vec{v}$	m/s	Schallschnelle
w_i	-	Projektionskoeffizienten
θ_0	-	Start-Phasenwinkel

λ	m	Wellenlänge
λ_i	-	Eigenwerte der KSM
ρ	-	Normierungsfaktor

Abkürzungen

ATLAS

D&S

DLR

EnEV

FB

FFT

FLiB e. V.

GEG

IR

KSM

LD

MLM

PBF

PL

PSF

SG

Beschreibung

Adaptable Testing Laboratory for Air Sealing

Delay-and-Sum

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Energiesparverordnung

Frequenzbereich

Fast-Fourier-Transformation

Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V.

Gebäudeenergiegesetz

Infrarot

Kreuzspektralmatrix

Lochdurchmesser

Micro Leakage Meter

Power-Beamforming

Pfadlänge

Punktspreizfunktion

Störgeräusche

1 Einleitung

Unkontrollierter Luftaustausch durch Leckagen in der Gebäudehülle erhöhen den Energiebedarf von Gebäuden erheblich. Daher ist die gezielte Lokalisierung und Bewertung von Leckagen ein zentraler Aspekt zur Verbesserung der Energieeffizienz im Gebäudesektor.

Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, den Gebäudebestand bis 2045 nahezu klimaneutral zu gestalten (BBSR, o. A., 2024, Zugriff am 17.09.2025). Dies soll durch eine deutliche Reduktion des Energiebedarfs und eine überwiegende Versorgung mit erneuerbaren Energien erreicht werden. Vorgesehen ist dabei eine Verringerung des Primärenergiebedarfs um etwa 80 % im Vergleich zum Jahr 2008 (Bürger et al., 2019). Nach Angaben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (ehemals: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) entfällt rund ein Drittel des gesamten Energieverbrauchs in Deutschland auf die Beheizung von Gebäuden und die Warmwasserversorgung. Um diese Werte signifikant zu senken, sind umfassende Sanierungsmaßnahmen sowie die Entwicklung effizienter Energieversorgungssysteme für Neu- und Bestandsgebäude erforderlich (Bundeswirtschaftsministerium, o. A., 2024, Zugriff am 10.09.2025). Auf europäischer Ebene wird der Gebäudesektor ebenfalls als zentraler Ansatzpunkt für Klimaschutz und Energieeffizienz hervorgehoben. Rund 40% des Endenergieverbrauchs der Europäischen Union entfallen auf Gebäude, wobei 75% der Gebäude als energieineffizient gelten (Eur-Lex, o. A., 2024, Zugriff am 10.09.2025).

Luftundichtigkeiten haben einen erheblichen Einfluss auf den Heizenergiebedarf. Das Eindringen kalter Luft kann 25 – 50 % der Heizlast eines Gebäudes verursachen (Younes et al., 2012). Eine wirksame Senkung des Energieverbrauchs erfordert nicht nur die Reduzierung des unkontrollierten Lufteintritts von außen, sondern ebenso die Minimierung des Verlusts klimatisierter Innenluft durch Leckagen in der Gebäudehülle (Jones et al., 2015). Zur Detektion solcher Leckagen werden derzeit meist etablierte Differenzdruck-Messverfahren, häufig in Kombination mit der Infrarot-Thermografie, eingesetzt. Ergänzend werden akustische Messmethoden erforscht, die sich derzeit noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein innovativer Ansatz untersucht, der auf der Leckagedetektion mittels Mikrofonarray in Kombination mit einem Beamforming-Verfahren basiert. Erste Feldversuche mit dieser Methode wurden bereits von Schiricke et al. (2024) durchgeführt, während Diel et al. (2024) grundlegende Untersuchungen an dem in dieser Arbeit verwendeten Prüfstand vornahmen (Diel et al., 2024; Schiricke et al., 2024).

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Hauptkapitel. Nach der Einleitung wird im zweiten Kapitel der Stand der Technik dargestellt und auf theoretische Grundlagen eingegangen. Hierzu zählen die Bedeutung der Luftdichtheit für die Gebäudequalität, typische Infiltrationspfade und rechtliche sowie normative Rahmenbedingungen. Anschließend folgt eine Darstellung grundlegender akustischer Prinzipien, einschließlich der Definition zentraler Kenngrößen, der Mechanismen der Schallentstehung und -ausbreitung, verschiedener Wellenarten und Spektralbereiche sowie der Eigenschaften von Schmalband-, Breitband-, deterministischen und stochastischen Signalen. Den Abschluss des zweiten Kapitels bilden die Methoden zur Leckagedetektion, wobei sowohl gängige Differenzdruckverfahren als auch akustische Messmethoden vorgestellt werden. Kapitel drei beschreibt den Prüfstand sowie die angewandte Messmethodik. Neben einer detaillierten Darstellung des Luftdichtheitsprüfstandes ATLAS und der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Schalldämmung des Prüfstandes werden die Umsetzung von Leckagen, die eingesetzten akustischen Messgeräte und Systeme sowie die Messkonfiguration erläutert. Darüber hinaus wird die Vorgehensweise zur Linearisierung der Strömungsgleichung beschrieben, welche die Grundlage für eine in Kapitel vier durchgeführte Messreihe bildet. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen werden in Kapitel vier präsentiert und analysiert. Behandelt werden dabei die Auswahl des Exponenten für das Power-Beamforming, die Auswirkungen der Schalldämmung des Prüfstandes auf die Messergebnisse, die Verfahrensgrenzen unterschiedlicher Prüfkörper sowie ergänzende Ultraschallmessungen. Darüber hinaus erfolgt eine systematische Untersuchung des Einflusses verschiedener Frequenzen auf die Detektion unterschiedlicher Kanallängen eines in dieser Arbeit hergestellten Prüfkörpers. Hierbei wurde besonderes Augenmerk auf eine reproduzierbare Messmethodik gelegt. Abschließend erfolgt eine Analyse der Zusammenhänge zwischen Leakagegeometrie, Strömungsparametern und der akustischen Detektierbarkeit. In Kapitel fünf werden die zentralen Erkenntnisse zusammengefasst, die Aussagekraft der angewandten Methoden bewertet und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen der akustischen Leckagedetektion gegeben.

2 Stand der Technik

Im folgenden Unterkapitel werden die Grundlagen der Luftdichtheit von Gebäuden thematisiert. Dabei stehen insbesondere der Einfluss der Luftdurchlässigkeit auf die Gebäudequalität und Energieeffizienz sowie typische Infiltrationspfade im Fokus. Darüber hinaus werden relevante rechtliche und normative Vorgaben erläutert. Im Unterkapitel 2.2 werden die physikalischen Grundlagen der Akustik behandelt. Dazu zählen zentrale akustische Kenngrößen, die Mechanismen der Schallentstehung und -ausbreitung, verschiedene Wellenarten sowie Spektralbereiche und charakteristische akustische Signalformen. Im Unterkapitel 2.3 werden verschiedene Messverfahren zur Leckagedetektion in Gebäuden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten näher erläutert.

2.1 Luftdichtheit

Zunächst wird der Einfluss der Luftdichtheit auf die Gebäudehülle und Energieeffizienz betrachtet. Danach werden typische Infiltrationspfade durch die Gebäudehülle benannt. Abschließend werden rechtliche und normative Vorgaben zur Vermeidung und Reduzierung der Infiltrationen vorgestellt.

2.1.1 Einfluss der Luftdichtheit auf die Gebäudequalität

Ungewollter Luftaustausch durch die Gebäudehülle kann auf verschiedenen Wegen stattfinden und so den Energieverbrauch des Gebäudes erhöhen. Potenzielle Leckagen befinden sich sowohl in der Gebäudewand, dem Gebäudeboden, dem Dach als auch in gebäudetechnischen Anlagen wie Lüftungsanlagen und Abluftventilatoren. Luftdruckunterschiede, die den Luftaustausch durch solche Leckagen verstärken können, können durch Wind, den Kamineffekt und über die Haustechnik entstehen (siehe Abbildung 2-1). Der Kamineffekt beschreibt ein physikalisches Phänomen, bei dem in hohen Gebäuden Luft unten einströmt und oben austritt (Allen & Iano, 2014). Dieser durch Temperaturunterschiede verursachte vertikale Luftstrom verstärkt den Luftaustausch über vorhandene Leckagen der Gebäudehülle und kann insbesondere im Winter zu einer erhöhten Exfiltration führen (Mijorski & Cammelli, 2016). Neben dem erhöhten Energieverbrauch durch Leckagen in der Gebäudehülle können mit der einströmenden Luft auch Schadstoffe ungefiltert ins Gebäudeinnere transportiert werden. Zudem kann Wasserdampf in gedämmte Wände und Dächer eindringen, wodurch das Risiko von Feuchteschäden und Schimmelpilzbefall steigt (Allen & Iano, 2014).

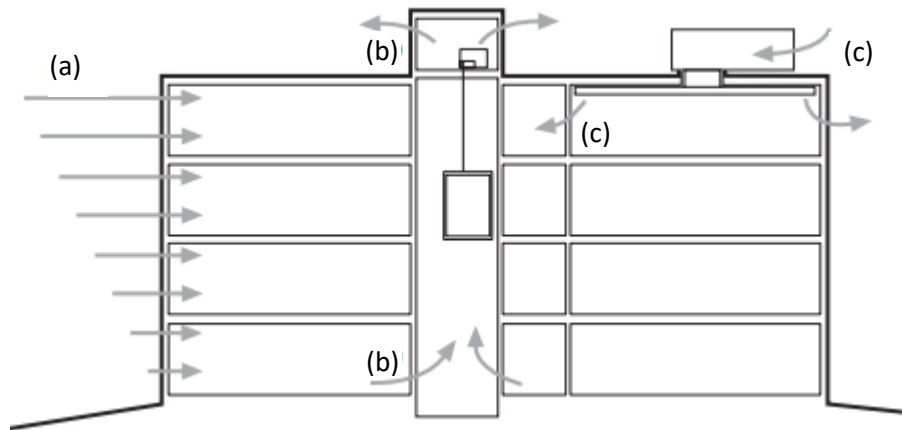


Abbildung 2-1: Luftdruckunterschiede verursacht durch (a) Wind, (b) Kamineffekt und (c) Haustechnik (geringfügig modifiziert aus: Allen & Iano, 2014)

Bei der Berechnung von Wärmeverlusten spielt die Infiltration eine große Rolle. Der Luftaustausch über die Gebäudehülle ergibt einen Wärmestrom, der abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit der eindringenden Luft und der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft ist. Der Infiltrationswärmestrom kann mit folgender Gleichung berechnet werden (Younes et al., 2012):

$$\dot{Q}_{inf} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_i - T_o) \quad (2.1)$$

$\dot{Q}_{inf}$: Infiltrationswärmestrom [W]

$\dot{m}$: Luftmassenstrom [kg/s]

c_p : spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

T_i : Innentemperatur [K]

T_o : Außentemperatur [K]

Des Weiteren kann zwischen diffuser und konzentrierter Infiltration unterschieden werden. Kleine Risse und Wege innerhalb der Gebäudehülle, bei denen die Luft über mehrere Meter durch die Wand strömt, gehören zur diffusiven Infiltration. Dagegen werden kleine Öffnungen und Risse im Bereich von Türen und Fenstern als konzentrierte Infiltration bezeichnet (Younes et al., 2012).

Darüber hinaus können Leckagen in primäre, sekundäre und tertiäre Leckagen eingeteilt werden (FLiB e. V., o. A., 2018, Zugriff am 30.07.2025):

- Primäre Leckagen liegen in der Bauteilschicht, die als luftdichte Ebene vorgesehen ist.

- Sekundäre Leckagen befinden sich in einer davorliegenden, raumseitigen Schicht. Beispielsweise an Durchdringungen von Gipskartonverkleidungen wie bei Steckdosen.
- Tertiäre Leckagen treten auf der dem Raum abgewandten Seite des Bauteils auf.

2.1.2 Typische Infiltrationspfade

In Gebäuden können verschiedene Arten von Leckagen Ursache für eine Luftundichtigkeit sein. In Abbildung 2-2 sind mögliche Leckagewege in der Gebäudehülle dargestellt.

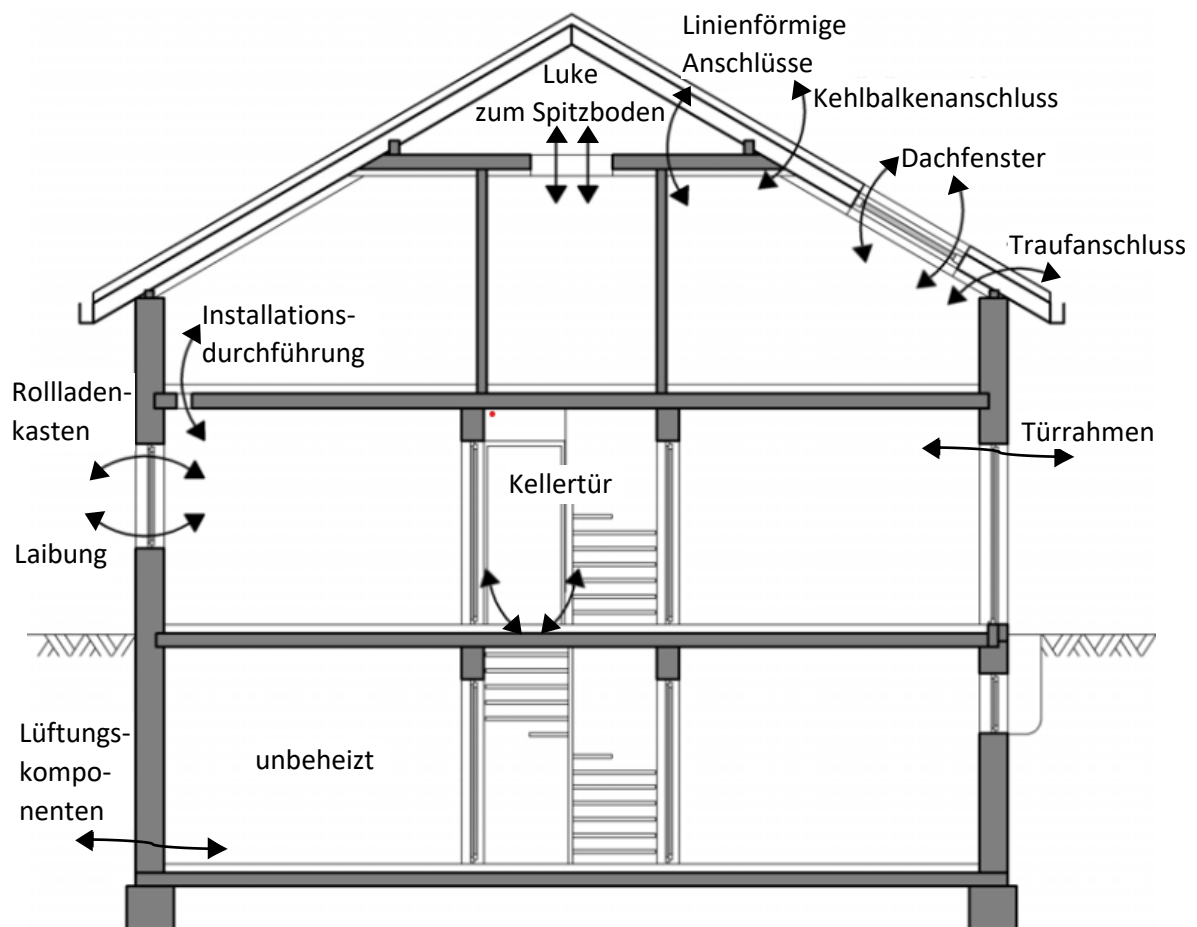


Abbildung 2-2: Typische Leckagewege in der Gebäudehülle (modifiziert aus: Prignon et al., 2021; Schild & Willems, 2022)

Der Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (FLiB e. V.) führte im Jahr 2015 eine bundesweite Umfrage unter rund 1500 Sachverständigen für Bauschäden und Dachdeckerhandwerk sowie 500 Messdienstleistern durch. Ziel war die systematische Erfassung von Ursachen und Erscheinungsformen von Luft-Leckagen in Gebäuden, einschließlich ihrer Häufigkeit und potenziellen Schadensfolgen. Dabei wurde zwischen zwei Szenarien differenziert: Leckagen ohne nachweisbare Gebäudeschäden und Leckagen, die zu konkreten Bauschäden führten (Vogel et al., 2017). Die Ergebnisse zeigen, dass sich typische undichte Stellen in vier Hauptgruppen einteilen lassen (Rolfsmeier et al., 2015; Vogel et al., 2017):

- **Allgemeine handwerkliche Mängel**
- **Durchdringungen:**
 - Dachflächenfenster
 - Bodeneinschubtreppen
 - Rollladenkästen
 - Rauchgasleitung, Kamin
 - Steckdosen, Schalter
 - Kabeldurchführungen, Kabelbündel
 - Rohre
 - Briefkastenschlitz
 - Katzenklappe
- **Übergänge zwischen Bauteilen:**
 - Vorsatzschalen, unverputztes Mauerwerk
 - Anschlüsse Folien
 - Fenster, Fensterbänke, Türen
 - Dach/Wand bzw. Decke/Wand
 - Kellertürschwelle
- **In Bauteilebene:**
 - Systemdächer, Aufsperrdämmung
 - Beschädigungen
 - Verklebung Folien
 - Fehlende Luftdichtheitsschicht
 - Folienstoß/Folienfalte
 - Folienlöcher durch Tackerklammern
 - Leerrohr

Eine Pressemitteilung des FLiB e. V. von 2024 bestätigte diese Einteilung und hob hervor, dass alle vier Gruppen weiterhin die größten Einflussfaktoren auf die Luftdichtheit von Gebäuden darstellen. Besonders relevant sind dabei fehlerhafte Folienverklebungen in der Bauteilebene, Undichtigkeiten an Durchdringungen, nicht verputztes Mauerwerk und andere kritische Übergänge zwischen Bauteilen, z. B. an Fenstern und Türen, sowie allgemeine handwerkliche Mängel, da Nacharbeiten deutlich aufwendiger sind, als Leckagen von vornherein zu vermeiden (FLiB e. V., o. A., 2024, Zugriff am 05.08.2025).

2.1.3 Rechtliche und normative Vorgaben

Für die Luftdichtheit von Gebäuden existieren in Deutschland verschiedene gesetzliche und normative Vorgaben, wobei das Gebäudeenergiegesetz (GEG), die DIN EN ISO 9972 und die DIN 4108-7 zu den wichtigsten zählen.

Das GEG ersetzt seit dem 1. November 2020 die zuvor geltende Energiesparverordnung (EnEV) (Schild & Willems, 2022). Es legt Anforderungen an die energetische Qualität von Gebäuden fest einschließlich konkreter Vorgaben zur Luftdichtheit der Gebäudehülle. In § 13 ist geregelt, dass die wärmeübertragende Umfassungsfläche eines Gebäudes dauerhaft luftundurchlässig auszuführen ist, wobei gleichzeitig der erforderliche Mindestluftwechsel sichergestellt werden muss (GEG, o. A., 2020/16. Oktober 2023, Zugriff am 05.08.2025).

Der Mindestluftwechsel bezeichnet die Luftmenge, die pro Stunde mindestens in einem Raum oder Gebäude ausgetauscht werden muss, um eine ausreichende Frischluftzufuhr für die anwesenden Personen sicherzustellen, Feuchtigkeit sowie Schad- und Geruchsstoffe abzuführen und so Schimmelbildung sowie Bauschäden zu vermeiden. Die erforderliche Luftwechselrate hängt von der Größe der Wohneinheit, der Feuchteproduktion, der Nutzung und den Eigenschaften der Gebäudehülle ab und liegt in der Regel zwischen 0,4 und 1,0 h⁻¹ (Maas, 2022).

Die DIN EN ISO 9972 beschreibt das standardisierte Prüfverfahren zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden. Sie definiert die Messbedingungen, wie die Druckdifferenz von 50 Pa zwischen Innen- und Außenbereich und dient der quantitativen Ermittlung von Luftleckagen. Für die Einhaltung gesetzlicher Anforderungen dürfen die Leckageraten bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten, die im GEG festgelegt sind und für Gebäude ohne raumluftechnische Anlagen 3,0 h⁻¹ und für Gebäude mit raumluftechnischen Anlagen 1,5 h⁻¹ betragen (GEG, o. A., 2020/16. Oktober 2023, Zugriff am 05.08.2025).

Die DIN 4108-7 ergänzt diese Anforderungen um Hinweise für die Planung und fachgerechte Ausführung einer luftdichten Gebäudehülle. Dazu zählen unter anderem die Abdichtung von Stößen, Anschlüssen und Durchdringungen, um Luftleckagen wirksam zu vermeiden (Schild & Willems, 2022).

2.2 Grundlagen der Akustik

Im folgenden Unterkapitel werden zunächst zentrale akustische Kenngrößen behandelt. Anschließend folgen Erläuterungen zur Schallentstehung und -ausbreitung sowie zu den verschiedenen Wellenarten und Spektralbereichen. Abschließend werden Schmalband- und Breitbandsignale sowie deterministische und stochastische Signale näher betrachtet.

2.2.1 Akustische Kenngrößen

Zur Beschreibung akustischer Phänomene ist das Verständnis grundlegender physikalischer Größen erforderlich. Die Schallschnelle wird dabei als vektorielle Größe $\vec{v}$ dargestellt und gibt die Geschwindigkeit an, mit der sich Gasmoleküle um ihre Ruhelage bewegen. Der Schalldruck p ist eine skalare Größe. Gemeinsam charakterisieren diese Schallfeldgrößen die Ausbreitung des Schalls in Luft (Schulz, 2023). Aus dem Skalarprodukt der Schallschnelle und einer gleichsinnig durchströmten gerichteten Fläche ergibt sich der Schallfluss q . Mathematisch lässt sich der Schallfluss daher durch folgende Beziehung beschreiben (Lerch et al., 2009):

$$q = \vec{v} \cdot \vec{A} \quad (2.2)$$

q : Schallfluss [m^3/s]

$\vec{v}$: Schallschnelle [m/s]

$\vec{A}$: gleichsinnig durchströmte gerichtete Fläche [m^2]

Die Schallenergie, die an einem bestimmten Ort im Schallfeld pro Zeiteinheit und pro Flächeneinheit durch die Schallschnelle transportiert wird, lässt sich durch die folgende Gleichung für die Schallintensität $\vec{I}$ beschreiben (Lerch et al., 2009; Schulz, 2023):

$$\vec{I} = p \cdot \vec{v} \quad (2.3)$$

$\vec{I}$: Schallintensität [W/m^2]

p : Schalldruck [Pa]

Wird die Schallintensität über die Flächenelemente einer geschlossenen, die Quelle umgebenden Fläche integriert, so ergibt sich daraus die Schallleistung P .

Da Schallfeldgrößen in der Praxis eine sehr hohe Dynamik aufweisen, erfolgt die Beschreibung von Schallereignissen national wie international üblicherweise über den logarithmischen Pegel L . Der Schalldruckpegel ist durch folgende Beziehung definiert (Lerch et al., 2009; Möser, 2015):

$$L = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{|\vec{I}|}{I_0}\right) \quad (2.4)$$

L : Schalldruckpegel [dB]

p_0 : Referenz-Schalldruck [Pa]

I_0 : Referenz-Schallintensität [W/m^2]

Dabei entsprechen die Referenzwerte p_0 mit $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ und I_0 mit $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ näherungsweise der Hörschwelle des menschlichen Gehörs. Ein Schalldruckpegel von 0 dB kennzeichnet somit den Schall, der gerade noch wahrgenommen werden kann. Zur Veranschaulichung verschiedener Schalldruckpegel zeigt Tabelle 2-1 typische Referenzwerte für Schalldruck und den zugehörigen Schalldruckpegel, ergänzt durch ausgewählte Geräuschquellen.

Tabelle 2-1: Typische Referenzwerte für Schalldruck und Schalldruckpegel mit Beispielen (Möser, 2015)

Schalldruck p [Pa]	Schalldruckpegel L [dB]	Situation/Beschreibung
$2 \cdot 10^{-5}$	0	Hörschwelle
$2 \cdot 10^{-4}$	20	Wald bei wenig Wind
$2 \cdot 10^{-3}$	40	Bibliothek
$2 \cdot 10^{-2}$	60	Büro
$2 \cdot 10^{-1}$	80	Dicht befahrende Straße
$2 \cdot 10^0$	100	Presslufthammer, Sirene
$2 \cdot 10^1$	120	Start von Düsenflugzeugen
$2 \cdot 10^2$	140	Schmerzgrenze

2.2.2 Schallentstehung und -ausbreitung

Schall entsteht durch Schwingungen von Körpern, die die umgebende Luft oder andere Medien in Bewegung versetzen. Schwingungen und Wellen, die in Festkörpern wie Platten, Wänden oder Gebäuden auftreten, werden als Körperschall bezeichnet. Dabei wird die Luftschallabstrahlung durch die Bewegung der Körperoberflächen verursacht (Hübelt, 2023; Möser, 2015).

Schall breitet sich wellenförmig mit der Schallgeschwindigkeit c aus. Unter der Annahme eines idealen Gases beträgt die Schallgeschwindigkeit in Luft etwa 343 m/s (Pierce, 2014). Die zugehörige Wellenlänge λ kann in Abhängigkeit von der Frequenz f durch die folgende Beziehung beschrieben werden:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.5)$$

λ : Wellenlänge [m]

c : Schallgeschwindigkeit [m/s]

f : Frequenz [1/s]

Schallvorgänge lassen sich in den meisten Fällen als adiabatische Prozesse modellieren. Unter dieser Bedingung hängt die Schallgeschwindigkeit c ausschließlich von der Art des Gases und der Temperatur ab. Bei ebenen, fortschreitenden Wellen bleibt das Verhältnis zwischen dem Schalldruck p und der Schallschnelle v konstant. Stehende Wellen entstehen durch die Überlagerung zweier fortschreitender Wellen gleicher Amplitude mit entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung. Dies kann sowohl durch Reflexionen an Grenzflächen als auch durch Interferenz mehrerer Schallquellen verursacht werden. Bei unvollständiger Reflexion setzt sich das resultierende Schallfeld aus einer Kombination von fortschreitenden und stehenden Komponenten zusammen. Darüber hinaus können Resonanzen auftreten, wenn die im gasgefüllten Volumen vorhandene Schallenergie weder durch innere Verluste dissipiert noch nach außen abgeführt wird (Möser, 2015).

2.2.3 Wellenarten

Schallwellen lassen sich grundsätzlich in zwei Wellenarten unterteilen: Longitudinalwellen und Transversalwellen.

Longitudinalwellen, auch als Dilatations- oder Dichte-Wellen bezeichnet, sind durch ein wirbelfreies Verschiebungsfeld charakterisiert. Mathematisch wird dies durch die Bedingung

$$\operatorname{rot} \vec{d} = 0 \quad (2.6)$$

$\vec{d}$: Verschiebungsvektor

dargestellt. Ein wesentliches Merkmal der Longitudinalwelle ist, dass die Teilchenschwingung in Richtung der Wellenausbreitung erfolgt, während alle Schubspannungen entfallen. In Abbildung 2-3 ist das Wellenbild einer ebenen Longitudinalwelle dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Bewegung der Teilchen stets in Ausbreitungsrichtung der Wellen erfolgt (Lerch et al., 2009).

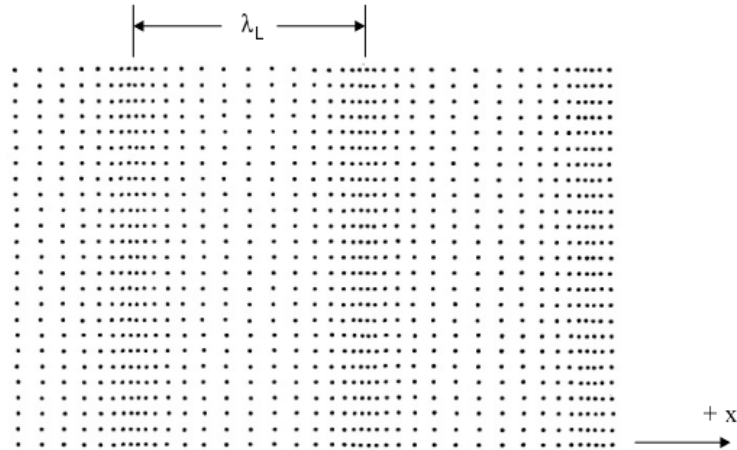


Abbildung 2-3: Wellenbild einer Longitudinalwelle (aus: Lerch et al., 2009)

In Gasen wird der Schall ausschließlich durch Longitudinalwellen transportiert (Möser, 2015).

Transversalwellen, auch als Schub- oder Scher-Wellen bezeichnet, sind durch ein quellenfreies Verschiebungsfeld gekennzeichnet. Mathematisch wird dies durch die Divergenzfreiheit des Verschiebungsvektors $\vec{d}$ beschrieben, welche durch die Bedingung

$$\operatorname{div} \vec{d} = 0 \quad (2.7)$$

ausgedrückt wird. In Abbildung 2-4 sind das Wellenbild sowie der Polarisationswinkel einer Transversalwelle dargestellt. Diese Wellenart ist dadurch charakterisiert, dass die Teilchenbewegung senkrecht zur Richtung der Wellenausbreitung erfolgt. Während sich die Welle in x-Richtung ausbreitet, schwingen die Teilchen in y- und z-Richtungen mit den jeweiligen Auslenkungen v bzw. w (Lerch et al., 2009).

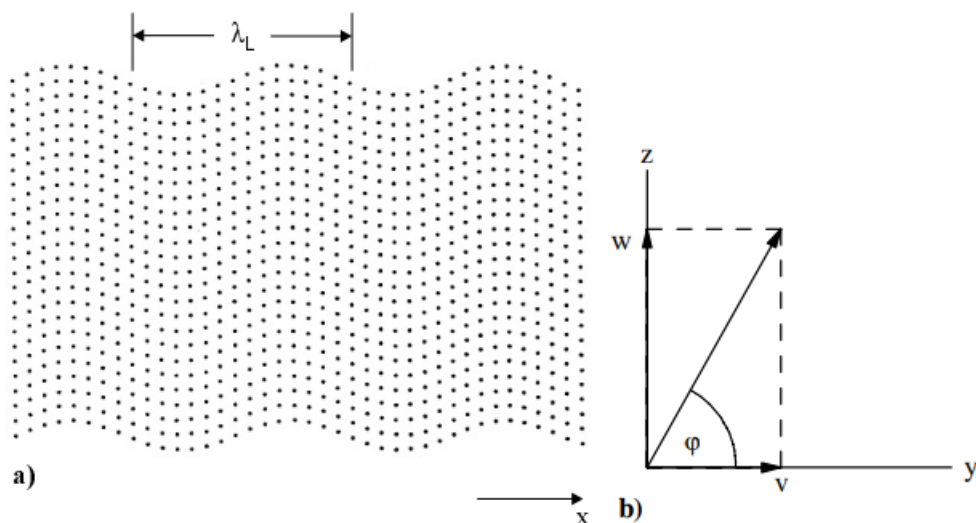


Abbildung 2-4: Wellenbild (a) und Polarisationswinkel (b) einer Transversalwelle (aus: Lerch et al., 2009)

Für den Körperschall sind insbesondere die transversalen BiegeWellen von Bedeutung (Möser, 2015).

2.2.4 Spektralbereiche

Das physikalische Maß für die Klangfarbe ist die Frequenz f . Diese gibt die Anzahl der Perioden pro Sekunde an. Dabei können unterschiedliche Frequenzbereiche in verschiedene Spektralbereiche unterteilt werden. Der von Menschen hörbare Schall umfasst den Bereich von 20 Hz – 20 kHz, wobei die größte Empfindlichkeit etwa im Bereich von 3 – 4 kHz liegt (Rossing, 2014). Frequenzen unterhalb des menschlich hörbaren Bereichs gehören zum Infraschall. In der Luft spielt dieser Bereich eine eher untergeordnete Rolle, ist jedoch besonders bei Schwingungen in festen Materialien von Bedeutung. Der Bereich oberhalb des menschlichen Hörvermögens wird als Ultraschall bezeichnet und kommt in verschiedensten technischen Anwendungen zum Einsatz (Möser, 2015).

Unter Verwendung von Gleichung (2.5) und der Annahme, dass die Schallgeschwindigkeit in Luft 343 m/s beträgt, sind in Tabelle 2-2 beispielhafte Wellenlängen für verschiedene Frequenzen mit dem entsprechendem Spektralbereich angegeben.

Tabelle 2-2: Wellenlängen bei verschiedenen Frequenzen mit Angabe des entsprechenden Spektralbereiches

Frequenz f [Hz]	Wellenlänge λ [cm]	Spektralbereich
5	6860	Infraschall
20	1715	Grenze Infraschall/Hörbarer Schall
3000-4000	11,43-8,58	Spitzenempfindlichkeit (Hörbarer Schall)
20000	1,72	Grenze Hörbarer Schall/Ultraschall
50000	0,69	Ultraschall

Wie der Tabelle 2-2 zu entnehmen ist, liegt der Wellenlängenbereich im Bereich des hörbaren Schalls bei ca. 1715 – 1,72 cm, wobei die Wellenlänge bei der Spitzenempfindlichkeit von 3000 Hz etwa 11,43 cm beträgt.

2.2.5 Schmalband- und Breitbandsignale

In vielen akustischen Anwendungen ist eine hohe spektrale Auflösung nicht erforderlich. Breitbandsignale wie weißes Rauschen werden häufig in der Raum- und Gebäudeakustik eingesetzt, da dort die genaue spektrale Struktur des Signals eine untergeordnete Rolle spielt. Stattdessen stehen reproduzierbare Messergebnisse im Vordergrund, die sich durch eine

Analyse in breiteren Frequenzbändern erzielen lassen. Feinstrukturen innerhalb großer Frequenzbereiche liefern dabei nur begrenzten Mehrwert, da sie durch zufällige Schwankungen beeinflusst werden und zwischen Messungen stark variieren können. Demgegenüber erfordern bestimmte Szenarien, insbesondere bei der Analyse von Schmalbandsignalen, eine deutlich höhere Frequenzauflösung (Möser, 2015).

Um breitbandige Frequenzanteile gezielt erfassen zu können, werden Filter eingesetzt, welche das Signal in geeignete Teilbänder zerlegen. Dabei werden obere und untere Grenzfrequenzen für jedes Teilband definiert. Die konstante absolute Bandbreite Δf eines Teilbands entspricht der Differenz zwischen der oberen und unteren Grenzfrequenz und kann nach folgender Gleichung berechnet werden (Hübelt, 2023):

$$\Delta f = f_o - f_u \quad (2.8)$$

Δf : Bandbreite [1/s]

f_o : Obere Grenzfrequenz [1/s]

f_u : Untere Grenzfrequenz [1/s]

In der Akustik kommen überwiegend Filter mit konstanter relativer Bandbreite zum Einsatz, bei denen die Bandbreite proportional zur Mittenfrequenz ist und sich daher mit steigender Mittenfrequenz vergrößert. Mathematisch kann die Mittenfrequenz mit folgender Gleichung beschrieben werden (Möser, 2015):

$$f_m = \sqrt{f_o \cdot f_u} \quad (2.9)$$

f_m : Mittenfrequenz [1/s]

Die wichtigsten Filter von konstant relativer Breite sind der Oktavfilter und der Terzfilter. Dabei kann der Zusammenhang zwischen der oberen Durchlassgrenze, der unteren Durchlassgrenze und der Mittenfrequenz bei Terzfiltern folgendermaßen definiert werden (Möser, 2015):

$$f_o = \sqrt[3]{2} \cdot f_u \quad (2.10)$$

$$f_m = \sqrt[6]{2} \cdot f_u \quad (2.11)$$

Terzbänder werden auch als Drittel-Oktaven bezeichnet, da jeweils drei benachbarte, sich nicht überlappende Terzen gemeinsam eine Oktave abdecken.

2.2.6 Deterministische und stochastische Signale

Zwei wichtige Signale in der Messtechnik sind der lineare Sweep sowie das weiße Rauschen. Ein **linearer Sweep** ist ein deterministisches Signal, dessen Frequenzinhalt sich über eine feste Dauer t_{sweep} hinweg linear von einer Anfangsfrequenz f_1 zu einer Endfrequenz f_2 über das Intervall $0 \leq t \leq t_{\text{sweep}}$ ansteigt oder abfällt. Die entsprechende zeitabhängige Frequenzfunktion lautet (Aldridge, 1992):

$$f(t) = f_1 + \frac{f_2 - f_1}{t_{\text{sweep}}} \cdot t \quad (2.12)$$

f_1 : Anfangsfrequenz [1/s]

f_2 : Endfrequenz [1/s]

t_{sweep} : Feste Zeitdauer [s]

Die Phase ergibt sich durch Integration der Frequenzfunktion und weist daher einen quadratischen Verlauf auf. Daraus ergibt sich das Sweep-Signal (Aldridge, 1992):

$$s(t) = a \cdot \cos \left(\theta_0 + 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t + \pi \cdot \frac{f_2 - f_1}{t_{\text{sweep}}} t^2 \right) \quad (2.13)$$

a : Signal-Amplitude

θ_0 : Start-Phasenwinkel

Lineare Sweeps enthalten demzufolge sämtliche Frequenzen, jedoch in zeitlich geordneter Form, da das Frequenzspektrum sequentiell durchlaufen wird.

Weißes Rauschen ist ein stochastisches Signal, das als Folge unkorrelierter Zufallsvariablen mit konstantem Mittelwert und Varianz modelliert wird (Hassani et al., 2025). Charakteristisch für weißes Rauschen ist eine gleichmäßig über das Spektrum verteilte Energie, also eine flache spektrale Verteilung über das gesamte Frequenzband. Dieses Verhalten wird häufig mit weißem Licht verglichen, das ebenfalls alle sichtbaren Wellenlängen gleichmäßig enthält. Im Gegensatz dazu weist rosa Rauschen eine höhere Energiedichte im niederfrequenten Bereich auf (Everest, 2001). Die spektrale Abnahme folgt dabei einer charakteristischen Neigung von -3 dB pro Oktave. Diese Eigenschaft kann beispielsweise bei Messungen mit Terzbandfiltern nützlich sein, da so tieffrequente Komponenten stärker gewichtet werden (Everest, 2001; Vorländer, 2017).

Folglich enthält weißes Rauschen sämtliche Frequenzen mit gleicher Energieverteilung, ist jedoch zeitlich unstrukturiert und zeichnet sich durch ein breitbandiges Spektrum aus (Everest, 2001; Vorländer, 2017).

2.3 Messmethoden der Leckagedetektion in Gebäuden

Im folgenden Unterkapitel werden verschiedene Verfahren zur Messung und Ortung von Luftundichtigkeiten in der Gebäudehülle vorgestellt. Dabei wird sich zunächst das Differenzdruck-Messverfahren angeschaut, wobei insbesondere der etablierte *Blower-Door-Test* im Fokus steht. Anschließend werden ausgewählte Methoden zur Lokalisierung von Leckagen behandelt, die häufig ergänzend zum *Blower-Door-Test* eingesetzt werden. Zuletzt wird das akustische Messverfahren vorgestellt.

2.3.1 Differenzdruck-Messverfahren

Ein etabliertes Messverfahren zur Überprüfung der Luftdichtheit von Gebäuden ist das Differenzdruck-Messverfahren, auch bekannt als *Blower-Door-Test*. Dabei wird die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle bestimmt, indem der Volumenstrom der durchströmenden Luft in Abhängigkeit zum über der Gebäudehülle erzeugten Druck gemessen wird (DIN EN ISO 9972, 1996/15. August 2015). In den meisten Fällen lässt sich die Beziehung zwischen Luftstrom und Druckdifferenz durch ein Potenzgesetz der folgenden Form beschreiben (Hult & Sherman, 2014; I. S. Walker et al., 2013):

$$Q = C \cdot \Delta p^n \quad (2.14)$$

Q : Luftstrom [m^3/s]

C : Strömungskoeffizient [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa}^n)$]

n : Druckexponent

Δp : Druckdifferenz [Pa]

Der Strömungskoeffizient C dient zur Charakterisierung des gesamten Leckagevolumens, während der Druckexponent n Rückschlüsse auf die Form der Leckage zulässt (Iain S. Walker et al., 1998). Typischerweise liegt der Exponent zwischen 0,5 und 1. Werte, die näher bei 0,5 liegen, weisen auf turbulente Strömungen hin, bei denen die Leckageöffnung relativ groß, der Leckagepfad jedoch kurz ist. Werte, die näher bei 1 liegen, sprechen für überwiegende Reibungsverluste, laminare Strömungen und längere Leckagewege (Sherman et al., 2004).

Eine häufig verwendete Kennzahl zur Bewertung der Luftdichtheit von Gebäuden ist der q_{50} – Wert. Er beschreibt den Luftvolumenstrom, der bei einer Druckdifferenz von ± 50 Pa über die Gebäudehülle gemessen wird (DIN EN ISO 9972, o. A., 1996/15. August 2015, Zugriff am 05.08.2025). Der gewählte Druckunterschied ist ausreichend gering, um mit einem *Blower-Door-Test* in den meisten Gebäuden zuverlässige Messergebnisse zu erzielen, zugleich jedoch hoch genug, um weitgehend unabhängig von äußeren Witterungseinflüssen zu sein (I. S. Walker et al., 2013). Der gemessene Wert des Luftvolumenstroms ermöglicht eine quantitative Einschätzung der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle.

Der *Blower-Door-Test* basiert auf dem Einsatz eines luftdicht bespannten Rahmens, der in eine Türöffnung eingesetzt und an der Türzarge fixiert wird. In eine Öffnung des Rahmens ist ein stufenlos regelbarer Ventilator mit kalibrierter Durchflusssdüse integriert, über den die erforderliche Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenraum erzeugt wird (siehe Abbildung 2-5). Die Druckdifferenz wird durch die Anpassung der Ventilatordrehzahl und die damit verbundene Steuerung des Volumenstroms geregelt (Schild & Willems, 2022).



Abbildung 2-5: *Blower-Door-Messsystem*

Zu den Nachteilen des *Blower-Door-Tests* zählt insbesondere die Anfälligkeit gegenüber äußeren Umwelteinflüssen wie Wind oder Temperaturunterschiede. Darüber hinaus erfordert die Durchführung eine aufwendige Abdichtung sämtlicher Öffnungen, etwa Lüftungsauslässe oder Kaminschächte, um eine kontrollierte Druckbeaufschlagung des Gebäudes zu ermöglichen (Raman et al., 2014). Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass der *Blower-Door-Test* primäre Leckagen, welche sich innerhalb der luftdichten Ebene befinden, nicht direkt erfassen kann. Während des Tests lässt sich der Luftstrom an den sekundären Leckagen feststellen, die raumseitig auftreten und damit indirekt auf die eigentliche Undichtigkeit hinweisen (FLiB e. V., o. A., 2018, Zugriff am 30.07.2025). Der *Blower-Door-Test* erlaubt daher eine quantitative Bestimmung des Luftwechsels, jedoch keine präzise räumliche Lokalisierung von Leckagestellen (Hult et al., 2013). Aus diesem Grund werden in der Praxis häufig ergänzende Verfahren eingesetzt, wie beispielsweise thermografische Messungen.

2.3.2 Methoden zur Leckageortung

Zu den weiterführenden Verfahren im Rahmen des *Blower-Door-Tests* zählen insbesondere Thermografieaufnahmen, der Einsatz von Thermoanemometern und die Visualisierung von Luftströmen mithilfe von Rauch, beispielsweise durch Räucherstäbchen oder einen Nebelerzeuger. Akustische Methoden befinden sich dagegen noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium und sind bislang nicht als Standardverfahren etabliert.

Bei der Durchführung von Unterdruck-Messungen eignet sich die Anwendung eines Thermoanemometers oder die Infrarot(IR)-Thermografie, um Leckagen aufzuspüren. Durch eindringende Außenluft entstehen lokale Temperaturunterschiede, die sich mit einer Wärmebildkamera sichtbar machen lassen (Schild & Willems, 2022). Die einströmende kalte/warme Luft führt zur Abkühlung/Erwärmung angrenzender Oberflächen, was sich nach einer gewissen Einwirkzeit als thermische Anomalie darstellt und von innen erfasst werden kann. Für zuverlässige Messergebnisse ist ein ausreichender Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenluft erforderlich, idealerweise im Bereich von mindestens 10 – 20 K, was den Einsatz auf wenige Monate im Jahr beschränkt (Kalamees, 2007). Ein praktisches Beispiel für die Darstellung einer Leckage mittels IR-Thermografie wird in Abbildung 2-6 am Beispiel einer Balkontür gezeigt. Dort markieren dunklere Bereiche die kühleren Zonen, die durch den kalten Luftstrom infolge der Leckage verursacht werden (Taylor et al., 2013).

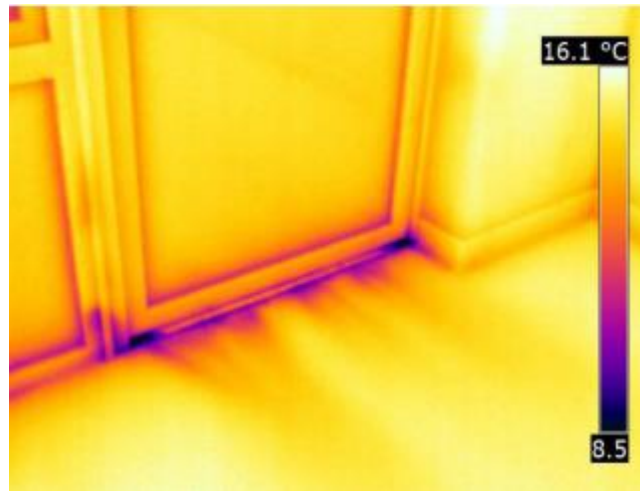


Abbildung 2-6: Thermografisches Abbild einer Leckage unter einer Balkontür (aus: Taylor et al., 2013)

Bei der Durchführung von Überdruck-Messungen kann ein Nebelerzeuger im Innenraum eingesetzt werden. Der erzeugte Nebel strömt durch vorhandene Leckagen nach außen und macht diese an der Gebäudehülle visuell erkennbar (Schild & Willems, 2022). In Abbildung 2-7 ist die Durchführung der Leckageortung mit Räucherstäbchen dargestellt.



Abbildung 2-7: Leckageortung mit Räucherstäbchen (aus: Kölsch, 2022)

Der Einsatz von Rauch- oder Nebelgeneratoren eignet sich nicht nur zur direkten Visualisierung von Luftströmungen, sondern kann auch ergänzend zur Interpretation von IR-Aufnahmen herangezogen werden, da sich durchströmende Luftbewegungen mit thermischen Anomalien überlagern und damit eindeutiger zuordnen lassen (Kalamees, 2007).

Der FLiB e. V. führte im Jahr 2013 einen Workshop zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden nach DIN EN 13829 durch. Ziel war die Bewertung realer und künstlich erzeugter Leckagen bei einem Unterdruck von 50 Pa. Im Rahmen des Workshops wurden verschiedene

Leckagesituationen untersucht, darunter beispielsweise eine Steckdose, ein Rollladenkastengurt oder die Schließfuge eines Fensters. Zur Leckageortung kamen verschiedene Hilfsmittel zum Einsatz: Rund 70 % der Teilnehmenden nutzten ihre Hand zur Detektion von Luftströmen, etwa 60 % ein Thermoanemometer, 40 % eine Thermografiekamera. Weitere 10 % arbeiteten mit Rauch oder Nebel, während 5 % Vogelfedern verwendeten. Die eingesetzten Hilfsmittel wurden dabei entweder einzeln oder in Kombination genutzt. Für die Durchführung der Messungen in einem Einfamilienhaus oder einer Doppelhaushälfte benötigten die Teilnehmenden zwischen 30 und 90 Minuten (Rolfmeier et al., 2015).

All diese Verfahren erfordern Erfahrung bei der Leckagesuche und sind fehleranfällig. Zudem sind sie zeitaufwendig, da jede potenzielle Schwachstelle einzeln geprüft werden muss und nicht sichergestellt werden kann, dass alle Leckagen identifiziert werden.

2.3.3 Akustisches Messverfahren

Ein weiteres Messverfahren zur Überprüfung der Luftdichtheit in Gebäuden ist das akustische Messverfahren. Dabei wird angenommen, dass sich Schallwellen entlang derselben Leckagepfade wie Luftströme ausbreiten (Diel et al., 2024; Raman et al., 2014). Im Gegensatz zur Thermografie, bei der ein Temperaturgradient erforderlich ist und dem *Blower-Door-Test*, der auf einem Druckgefälle basiert, benötigen akustische Methoden keine derartigen physikalischen Gradienten (Holstein et al., 2020). Da die akustische Methode diesen Einschränkungen konventioneller Verfahren nicht unterliegt, bietet sie ein hohes Potenzial, sich als effizientes und modernes Instrument zur Leckagedetektion zu erweisen (Raman et al., 2014).

Zur Grundausstattung zählen ein Schallsender sowie ein entsprechendes Empfängersystem (z.B. Mikrofone oder Sensoren). Die Positionierung der Komponenten ist flexibel. Der Schallsender kann sich innerhalb des Gebäudes befinden und die Mikrofone außen, oder umgekehrt, ohne dass dies die Messergebnisse wesentlich beeinflusst. Zum Einsatz kommt zumeist ein breites Frequenzspektrum, das sowohl den hörbaren Bereich als auch den Ultraschallbereich umfasst. Diese Bandbreite bietet die Flexibilität, das Verfahren an unterschiedliche Materialien, Leckagegrößen und Umweltbedingungen anzupassen (Holstein et al., 2020).

Die Wirksamkeit der akustischen Ausbreitung durch Bauteile und Öffnungen hängt wesentlich von der Wellenlänge des eingesetzten Signals ab (siehe Abbildung 2-8). Diese beeinflusst die Transmission durch Materialien sowie die Fähigkeit, sich entlang freier Wege auszubreiten. Dabei treten physikalische Effekte wie Absorption, Beugung an Kanten und Interferenzen auf,

die gemeinsam das Ausmaß, die Richtung und die Intensität der Schallausbreitung bestimmen (Holstein et al., 2020).

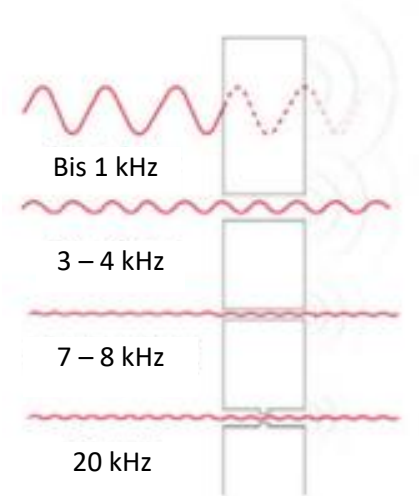


Abbildung 2-8: Wirkung der Wellenlänge auf den Durchgang durch Materialien und Öffnungen (geringfügig modifiziert aus: Holstein et al., 2020)

Für die akustische Quelllokalisierung mit Mikrofonarrays ist das sogenannte Beamforming ein etabliertes Verfahren. Es lässt sich als räumlich selektiver Schallempfänger beschreiben und liefert auch bei einer begrenzten Anzahl von Sensoren zuverlässige Ergebnisse (Puhle, 2021). Während das Array eine räumliche Abtastung des Schallfeldes ermöglicht, führt der Beamforming-Algorithmus eine gerichtete räumliche Filterung durch. Dadurch wird es möglich, die Verteilung von Schallquellen in einer bestimmten Entfernung zur Anordnung abzubilden und dominante Schallquellen zuverlässig zu lokalisieren (Chiariotti et al., 2019).

Das grundlegende Konzept des Beamformings ist auf den Delay-and-Sum(D&S)-Algorithmus im Zeitbereich zurückzuführen (Chiariotti et al., 2019). Dabei treffen die Schallwellen einer Quelle mit unterschiedlichen Laufzeiten auf die Mikrofone des Arrays, wodurch phasenverschobene Signale aufgezeichnet werden. Durch rechnerische Verzögerung der Eingangssignale lassen sich diese Phasen- bzw. Laufzeitunterschiede kompensieren, sodass sich die Signalanteile der betrachteten Quelle konstruktiv überlagern, während Anteile anderer Quellen nicht deckungsgleich sind. Im Anschluss werden die verzögerten Signale summiert und gemittelt, wodurch ein gerichteter Ausgangswert für den jeweiligen Kontrollpunkt entsteht. Auf diese Weise wird die gewünschte Quelle verstärkt, während weitere Geräuschquellen unterdrückt werden (gfai tech GmbH, o. A., o. J. d, Zugriff am 25.08.2025).

In Abbildung 2-9 ist dieses Funktionsprinzip schematisch dargestellt. Neben der Ausführung im Zeitbereich kann der D&S-Algorithmus auch im Frequenzbereich durchgeführt werden.

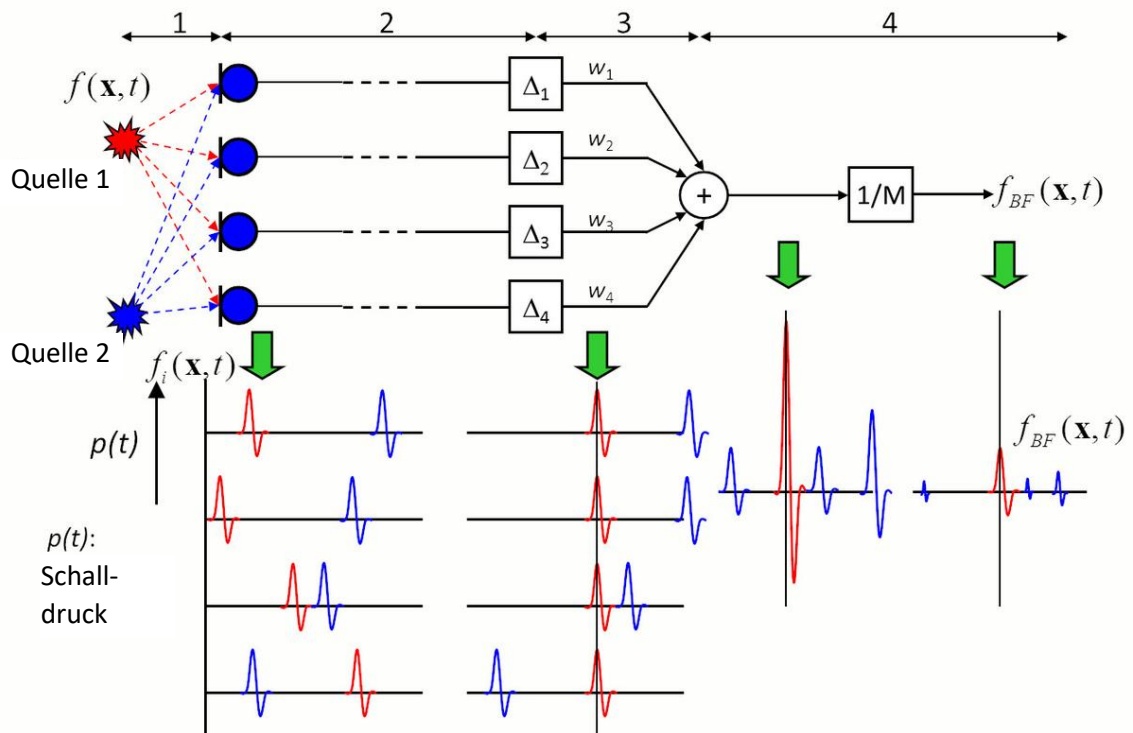


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung des D&S-Beamformings im Zeitbereich.

1: Die Schallwellen zweier Quellen (rot und blau) treffen mit unterschiedlichen Laufzeiten auf das Mikrofonarray. **2:** Dadurch entstehen Phasenunterschiede zwischen den Signalen, die sich aus der relativen Geometrie und der Schallgeschwindigkeit berechnen lassen. **3:** Durch Verzögerung (Δ) der Eingangssignale werden die Anteile der fokussierten Quelle (rot) zur Deckung gebracht, während die Anteile der zweiten Quelle (blau) phasenverschoben bleiben. **4:** Nach Summation und Mittelung der Kanäle ergibt sich das Beamformingsignal $f_{BF}(\mathbf{x}, t)$, in dem die gewünschte Quelle verstärkt und weitere Geräuschquellen unterdrückt werden (geringfügig modifiziert aus: gfaitech GmbH, o. A, o. J. d, Zugriff am 25.08.2025).

3 Prüfstand und Messmethodik

Das folgende Kapitel liefert eine Übersicht über den Versuchsaufbau sowie die Methodik zur Leakedetektion mittels akustischer Signale. Zunächst wird der schallgedämmte Luftdichtheitsprüfstand ATLAS beschrieben, einschließlich der darin integrierten Systeme zur gezielten Erzeugung und Variation von Leckagen. Anschließend erfolgt die Darstellung der experimentellen Messkonfigurationen, einschließlich der akustischen Sensorik, der eingesetzten Schallquelle, der Datenerfassungssysteme sowie der Signalverarbeitung mittels Power Beamforming. Abschließend wird die Umformung zur Linearisierung der Strömungsgleichung vorgestellt, die als Grundlage für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Strömungsparametern und akustischen Messergebnissen in Kapitel 4.6 dient.

3.1 Luftdichtheitsprüfstand ATLAS

Der Luftdichtheitsprüfstand *Adaptable Testing Laboratory for Air Sealing* (ATLAS) befindet sich am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln. Dieser bildet die Grundlage der vorliegenden Arbeit und ist in Abbildung 3-1 dargestellt.



Abbildung 3-1: Prüfstand ATLAS mit erforderlicher Messtechnik: Micro Leakage Meter (links), Lautsprecher (innen) und Mikrofonarray (rechts)

Der Prüfstand hat ein Gewicht von 500 kg und misst 2 m in der Breite, 2,5 m in der Höhe und 3 m in der Länge. Er ist auf Rollen montiert, um eine einfache Handhabung zu ermöglichen. An

der Rückseite des Prüfstands befindet sich eine Adapterplatte, die die Montage eines Messlüfters gestattet. Dafür wird der Minneapolis *DuctBlaster* eingesetzt, der über ein Schlauchsystem mit der Adapterplatte und dem *Minneapolis Micro Leakage Meter* (MLM) System verbunden ist. Am vorderen Teil des Prüfstandes können verschiedene Prüfkörper eingesetzt werden. Zum einen in den Maßen 85 x 85 cm und zum anderen in den Maßen 170 x 170 cm. Hilfreich ist hier der Schnellspannermechanismus, wodurch die Prüfkörper mit geringem Aufwand gewechselt werden können. Außerdem verfügt der Prüfstand über eine Eingangstür, die ebenfalls mit Schnellspannern ausgestattet ist und ausschließlich von außen geöffnet werden kann. Als Sicherheitsmaßnahme ist ein Notausgang vorhanden, der im Notfall mithilfe eines innen angebrachten Nothammers genutzt werden kann.

3.1.1 Schalldämmung des Prüfstandes

Um Leckagen verschiedenster Größen simulieren und messen zu können, ist es von Bedeutung, relevante Störfaktoren zu minimieren. Ein wesentlicher Störfaktor ist die Vibration des Prüfstands, die durch die Schallwellen des Lautsprechers verursacht wird. In Abbildung 3-2 ist der Prüfstand in seiner ersten konstruktiven Ausführung von innen dargestellt.



Abbildung 3-2: Prüfstand vor der Schalldämmung von innen mit Blickrichtung nach vorne

Die akustische Kamera erfasst den Körperschall des Prüfstands und berücksichtigt ihn in der Auswertung als Schallquelle. Dadurch lassen sich schwächere akustische Signale von kleineren Leckagen nicht mehr eindeutig von den Vibrationen des Prüfstands unterscheiden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Erhöhung der Sensitivität des Prüfstands der gesamte Prüfstand zur Schalldämmung mit Verbundschaumstoff verklebt (siehe Abbildung 3-3). Zudem wurde die Notausstiegstür schallisoliert, indem ein mit Verbundschaumstoff beklebtes Brett davor geklemmt wurde, ohne dabei sicherheitsrelevante Funktionen einzuschränken. Darüber hinaus ist auch die Innenseite der Eingangstür mit Schaumstoff zur zusätzlichen Schalldämmung versehen.



Abbildung 3-3: Schallisolierter Prüfstand von innen mit Blickrichtung nach vorne (links) und Blickrichtung nach hinten bei geöffneter Tür (rechts)

Laut Herstellerangaben eignen sich Verbundschaumstoffe mit einer besonders hohen Rohdichte von 120 kg/m^3 für die Schall- und Lärmdämmung. Durch das Hinzufügen von Bitumenfolie in Verbindung mit einer weiteren Lage Verbundschaumstoff lässt sich der Schallschutz bei entsprechender Anforderung weiter erhöhen. Alternativ kann auch die Schichtdicke des Verbundschaumstoffs erhöht werden, um eine intensivere Schalldämmung zu erreichen (schaumstofflager.de, o. A., o. J., Zugriff am 25.08.2025).

Zur Reduzierung der Bodenreflexionen wurde der Bereich vor dem Prüfstand mit *Basotect*®-Schaumstoff ausgekleidet, der aufgrund seiner Dichte von 9 kg/m^3 eine wirksame

Schalldämpfung bietet (schaumstofflager.de, o. A., o. J., Zugriff am 25.08.2025). Um rückseitige Schallreflexionen zu vermeiden, wurde hinter der Kamera eine Halterung angebracht, an der *Basotect*[®]-Schaumstoff befestigt ist. Dadurch soll verhindert werden, dass rücklaufender Schall von hinten auf das Mikrofonarray trifft.

3.1.2 Umsetzung von Leckagen

Wie zuvor erwähnt, können am vorderen Teil des Prüfstandes verschiedene Prüfkörper in zwei unterschiedlichen Größen eingesetzt werden. In der vorliegenden Untersuchung kommen ausschließlich Prüfkörper mit einer Abmessung von 85 x 85 cm zum Einsatz.

Spanplatte

Für die Untersuchung von einfachen Leckagen mit variierenden Geometrien eignet sich eine 12 mm dicke *Spanplatte*. Diese ermöglicht das präzise Einbringen von Bohrungen in unterschiedlichen Durchmessern und Winkeln. Darüber hinaus können die Öffnungen mit verschiedenen Materialien gefüllt werden, um unterschiedliche Leckagebedingungen zu simulieren. Die *Spanplatte* erlaubt zudem die Anordnung gleich- oder unterschiedlich großer Öffnungen in variablen Abständen, was eine Untersuchung der Auflösung und Differenzierungsfähigkeit des Systems ermöglicht. Auch die Darstellung von Schlitzen in variierenden Breiten und Längen lässt sich problemlos realisieren. In Abbildung 3-4 sind die *Spanplatte* mit vollständig geöffneten Leckagen und ein vergrößerter Ausschnitt einzelner Leckageöffnungen dargestellt. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt die Austrittsöffnungen im Detail, die zur Untersuchung des gegenseitigen Einflusses unterschiedlich großer Löcher bei konstantem Abstand zueinander verwendet werden. Nicht benötigte Leckagen lassen sich durch luftdichtes Klebeband verschließen.

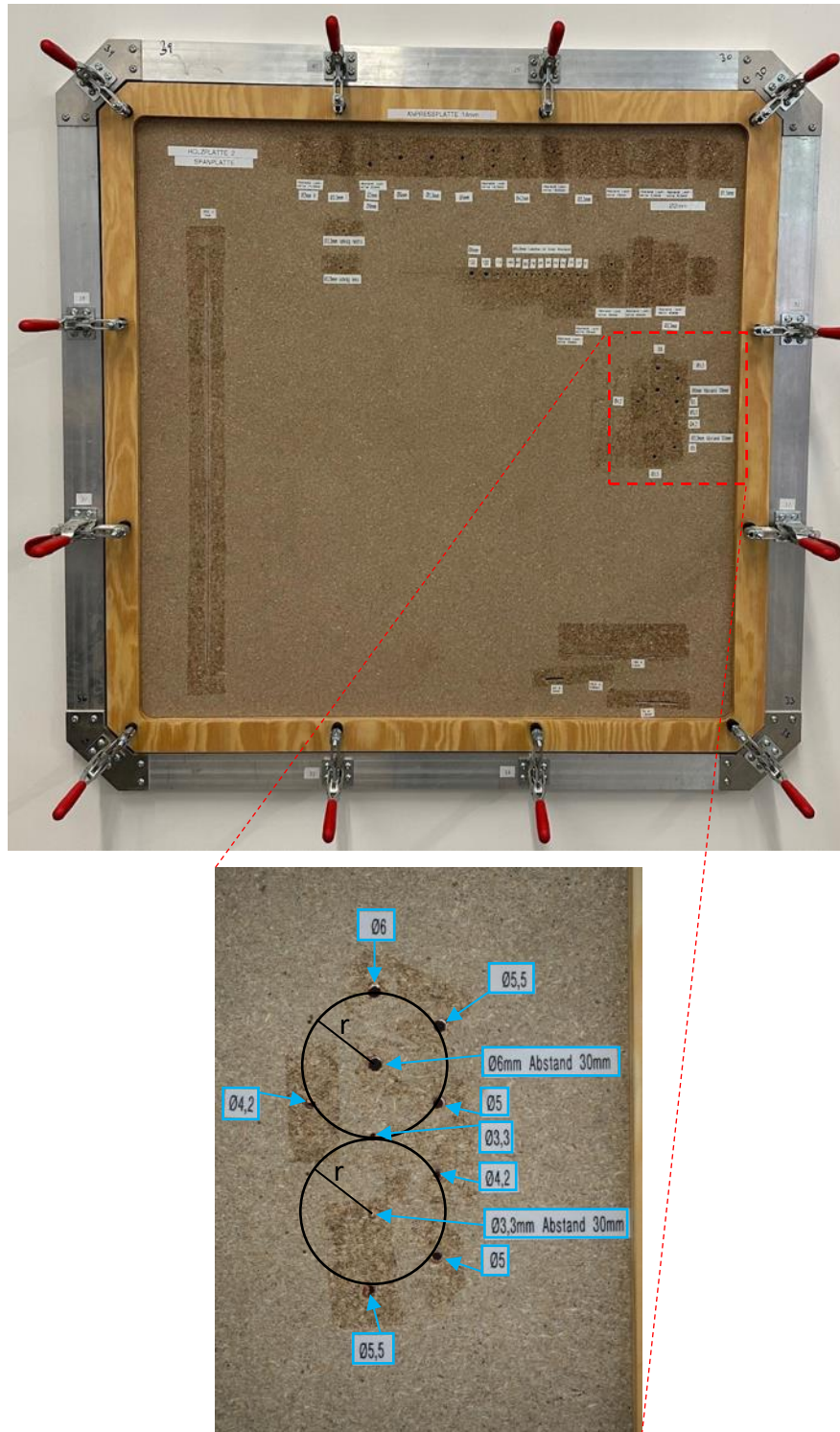


Abbildung 3-4: Gesamtansicht des Prüfkörpers *Spanplatte* mit markiertem Leckagebereich (oben). Vergrößerter Ausschnitt zur Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung unterschiedlich großer Löcher bei konstantem Abstand r (unten)

Labyrinth

Zur Darstellung komplexerer Strömungspfade eignet sich ein sogenannter *Labyrinth*-Prüfkörper (siehe Abbildung 3-5). Dieser besteht aus einer Holzplatte, in die ein Raster von 15×15 Kacheln

gefräst ist. Mithilfe von Gummidichtungen können auf dieser Kachelstruktur Strömungspfade mit variabler Länge und unterschiedlicher Verwinkelung konstruiert werden. Die Leckageöffnung befindet sich in der Holzplatte und verläuft mittig durch die darüberliegende Kachel. Anschließend wird eine Plexiglasscheibe aufgesetzt, die eine Öffnung enthält, welche mittig über einer ausgewählten Kachel liegt und so den Leakageaustritt zur Umgebung ermöglicht. Durch verschiedene Bohrungen in diversen Kacheln und der Plexiglasscheibe können die Durchmesser der Ein- und Austrittsöffnungen variiert werden. Zudem können durch die unterschiedlichen Anordnungen der Dichtungen verschiedene Leakagepfade realisiert werden. Die Höhe der Leakagekanäle beträgt etwa 7,5 mm und entspricht der Höhe der Gummidichtungen.

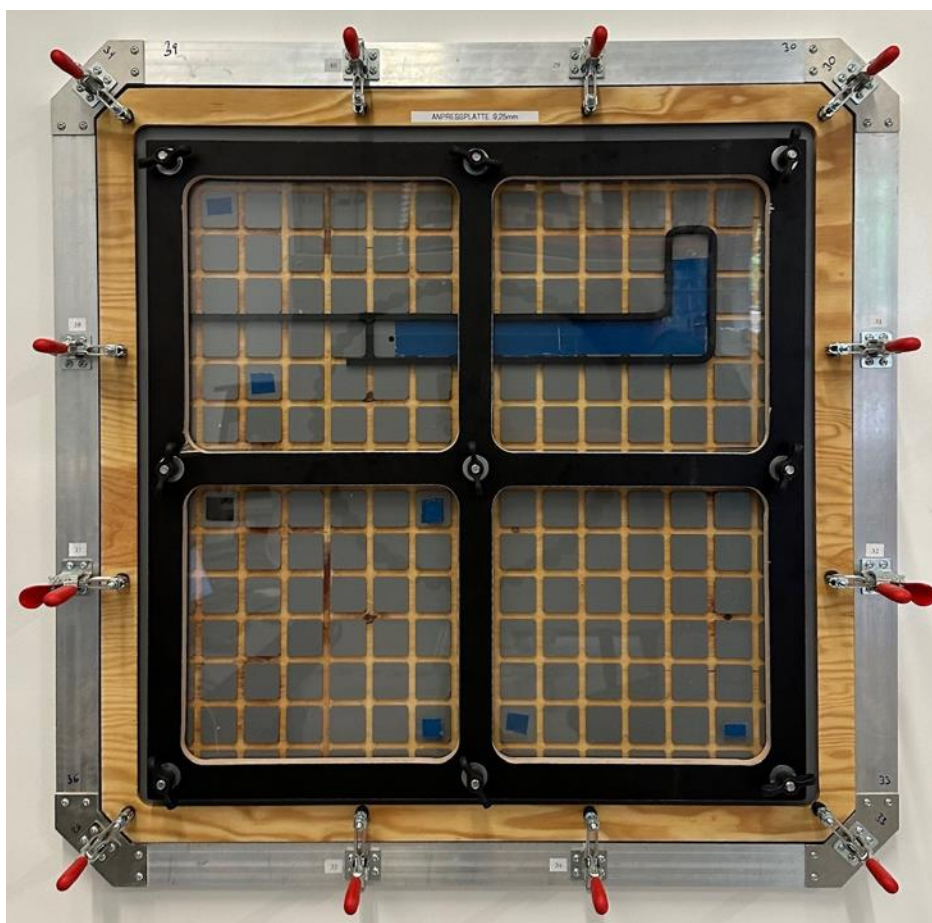


Abbildung 3-5: Prüfkörper *Labyrinth*

Zur Vereinfachung der schriftlichen Darstellung wurde eine Nomenklatur eingeführt, die auch im Folgenden verwendet wird. Diese beginnt mit dem Durchmesser der Einlassöffnung in Millimetern, gefolgt von der Beschreibung des Pfades sowie dem Durchmesser der Auslassöffnung in Millimetern. Der Pfad selbst wird durch die Anzahl und Richtung der durchquerten Kacheln zwischen Ein- und Austrittsöffnung definiert. Zur Beschreibung des Pfades wurden folgende Abkürzungen eingeführt:

- **u** steht für *up* (oben)
- **r** für *right* (rechts)
- **d** für *down* (unten)
- **l** für *left* (links)

Zwei Beispiele hierfür sind die Bezeichnungen **5-4r1d-5** und **3-5l2u-7**, welche in Abbildung 3-6 dargestellt sind.

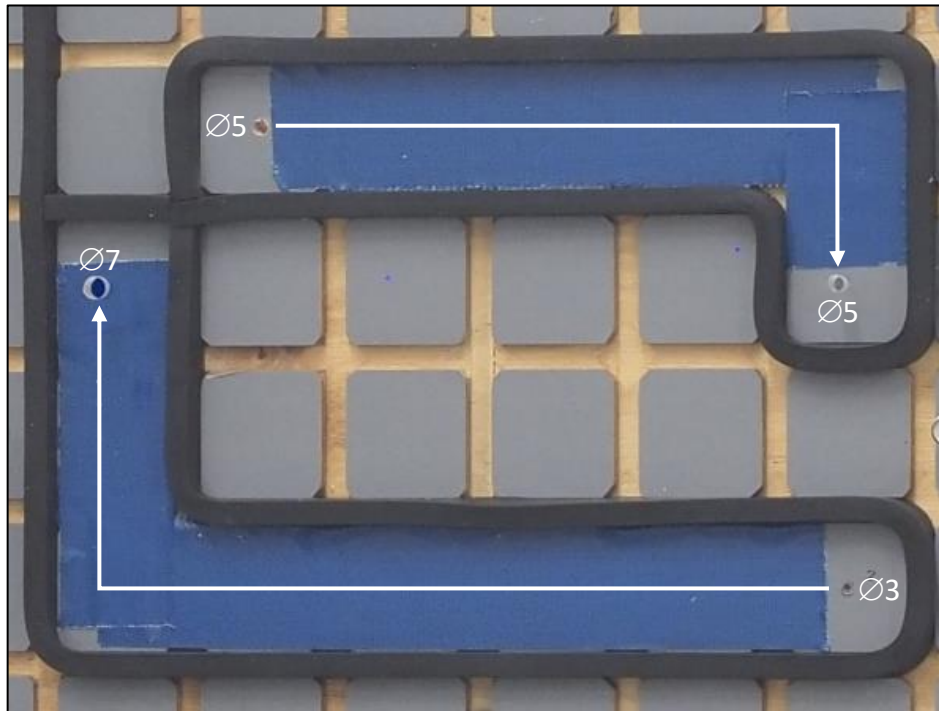


Abbildung 3-6: Vergrößerte Ansicht zweier Pfade des Prüfkörpers *Labyrinth* mit eingezeichnetem Strömungsweg. Pfad: 5-4r1d-5 (oben). Pfad: 3-5l2u-7 (unten)

Die Kacheln entlang des Strömungspfades werden mit Klebeband abgedeckt, da so mögliche Störungen durch Zwischenräume ausgeschlossen werden. Nicht genutzte Eintritts- und Austrittsöffnungen können ebenfalls luftdicht mit Klebeband verschlossen werden.

Sandwich

Eine weitere Möglichkeit, komplexe Leckagepfade darzustellen, bietet der sogenannte *Sandwich*-Prüfkörper. Dieser Versuchsaufbau ermöglicht die Untersuchung von Leckagen in Kombination mit Hohlräumen über mehrere Schichten. Die erste Schicht besteht aus einer Holzplatte, während alle weiteren Schichten aus transparenten Plexiglasscheiben gefertigt sind. Zwischen den Schichten lassen sich mithilfe von Abstandshaltern Hohlräume mit unterschiedlichen Höhen realisieren. In Abbildung 3-7 ist der *Sandwich*-Prüfkörper dargestellt, bei dem einige Leckagen verschlossen und andere offen belassen wurden.

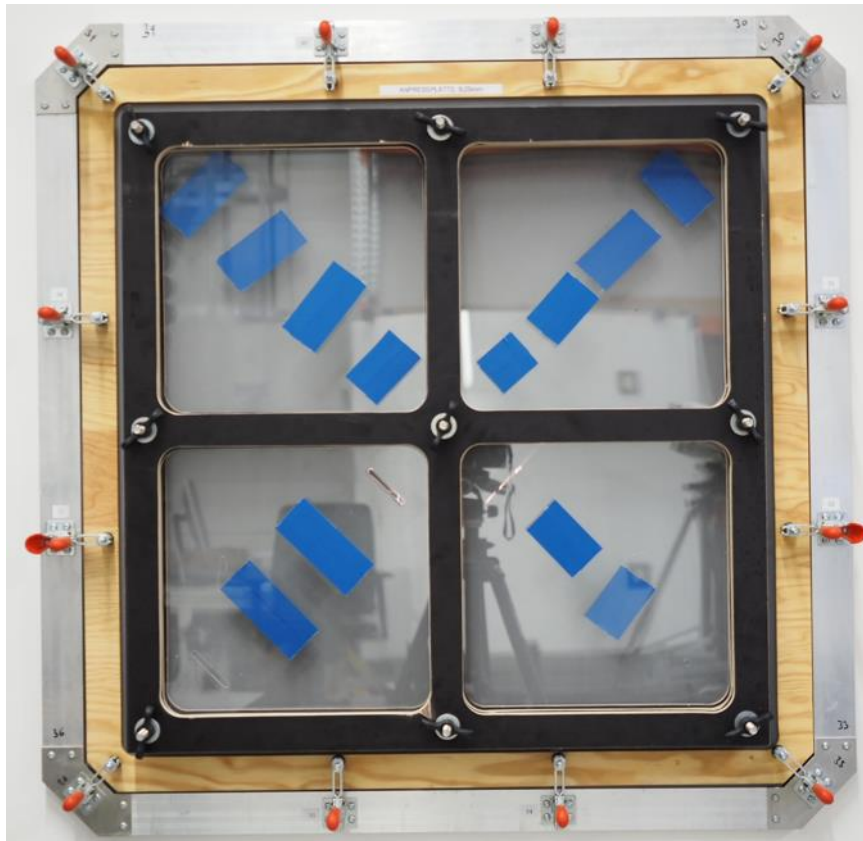


Abbildung 3-7: Prüfkörper *Sandwich* mit offenen und geschlossenen Leckagen

Jede Schicht ist in vier Quadranten unterteilt, die jeweils unterschiedliche Leckagearten repräsentieren.

- **Quadrant 1 (Q1)** enthält Bohrungen mit einem Durchmesser von 3 mm,
- **Q2** Bohrungen mit einem Durchmesser von 7 mm,
- **Q3** besteht aus Schlitzten mit einer Breite von 3 mm und einer Länge von 60 mm,
- **Q4** enthält Schlitzte mit einer Breite von 7 mm bei gleicher Länge.

Durch die freie Kombinierbarkeit der Leckagen in verschiedenen Schichten lassen sich vielfältige, definierte Strömungspfade erzeugen. Um eine klare und standardisierte schriftliche Beschreibung dieser Konfigurationen zu ermöglichen, wurde folgende Nomenklatur eingeführt:

- **S** steht für *Slot* (Schlitz),
- **H** für *Hole* (Loch),
- **p** für *Position* (Position),
- **t** für *Thickness* (Abstand zwischen den Schichten in mm)

Zur Definition des Strömungspfads werden die Leckagepositionen in vier Stufen (p0 bis p3) eingeteilt, wobei p0 stets die Eintrittsöffnung darstellt. Die übrigen Positionen folgen jeweils in einem Abstand von 10 cm. Der Abstand zwischen den einzelnen Schichten kann durch den

Einsatz von Gummidichtungen unterschiedlicher Dicke sowie durch zusätzliche Abstandshalter flexibel variiert werden.

Für die schriftliche Beschreibung der Konfigurationen gilt die allgemeine Form $I - O - P - T$ für einlagige und $I_1 - O_1 - P_1 - T_1 - O_2 - P_2 - T_2 - O_3 - P_3 - T_3$ usw. für mehrlagige Anordnungen, wobei **I** das *Inlet* (Einlass), **O** das *Outlet* (Auslass), **P** die *Position* (Position) und **T** die *Thickness* (Schichttiefe) beschreibt. In Abbildung 3-8 sind sowohl eine vergrößerte Darstellung als auch eine Seitenansicht des Pfades dargestellt, entsprechend der Nomenklatur **S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24**.

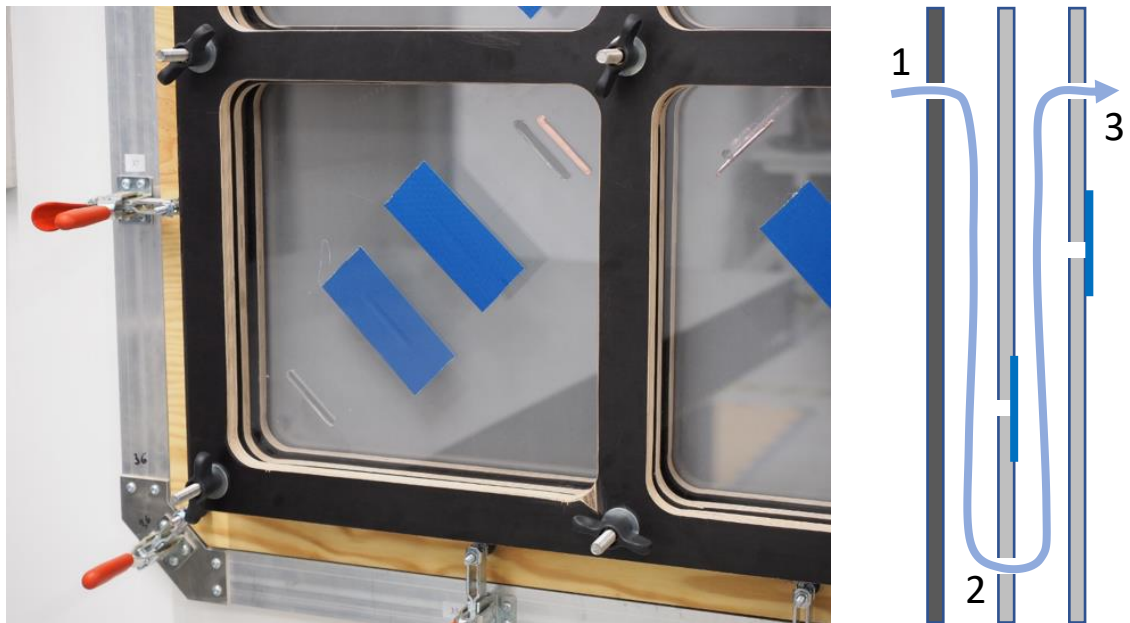


Abbildung 3-8: Vergrößerte Ansicht des vierten Quadranten des Prüfkörpers *Sandwich* (links). Seitenansicht mit eingezeichnetem Strömungspfad (rechts). Pfad: S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24

Nicht genutzte Leckagen in den anderen Quadranten werden luftdicht mit Klebeband verschlossen, um unerwünschte Strömungseinflüsse zu vermeiden.

Z-Kanal

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Pfadlängen bei Leckagen wurde zunächst der in Abbildung 3-9 dargestellte *Z-Kanal*-Prüfkörper eingesetzt. Dieses aus einer mitteldichten Faserplatte gefertigte Modell ermöglicht die Analyse von Strömungskanälen mit Lochdurchmessern zwischen 3 und 8 mm sowie Pfadlängen zwischen 32 und 512 mm. Die Pfadlängen folgen dabei einer geometrischen Folge mit Verdopplungsfaktor 2, sodass für jeden Lochdurchmesser fünf definierte Kanalpfade verfügbar sind. Der Prüfkörper besteht aus zwei miteinander verschraubten Platten unterschiedlicher Dicke, wobei eine Platte ausschließlich die Durchgangsbohrungen und die andere die gefrästen Kanäle enthält.

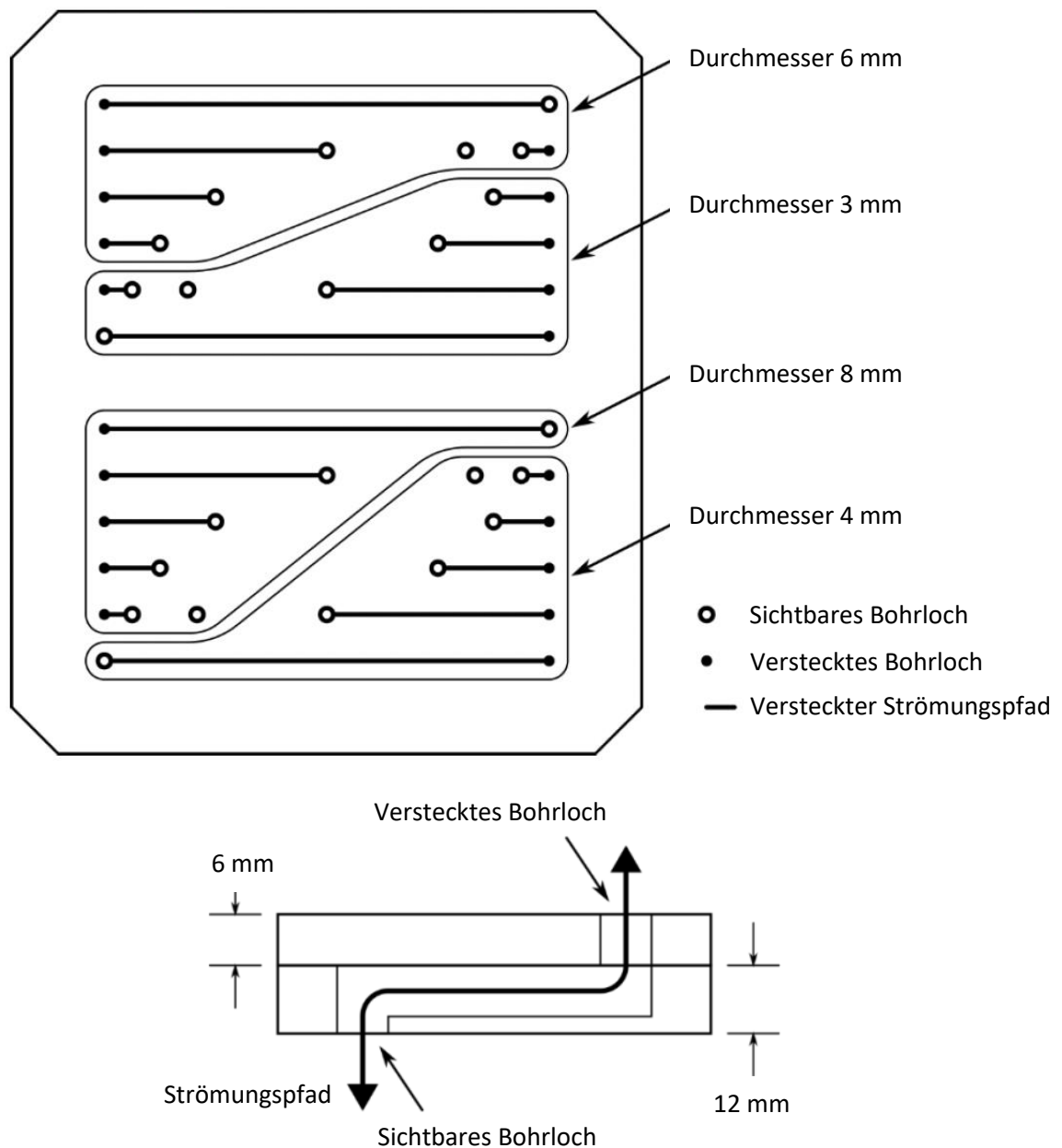


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung des Prüfkörpers Z-Kanal. Ansicht von vorne (oben). Ansicht von oben nach der Verschraubung (unten) (geringfügig modifiziert aus: Pernpeintner & Diel, 2025)

Da mit diesem Aufbau ausschließlich große Pfadlängensprünge untersucht werden konnten, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuer Prüfkörper entwickelt, der kürzere Pfadlängen in feineren Abstufungen ermöglicht. Dieser Prüfkörper besteht aus einer Birkenmultiplexsperrholzplatte und verfügt über insgesamt 62 Kanäle mit variierenden Längen und Querschnittsgrößen sowie vier Durchgangsbohrungen mit unterschiedlichen Durchmessern (siehe Abbildung 3-10). Die Kanäle und Bohrlöcher wurden mithilfe einer Oberfräse gefertigt.

Ein Teil der Kanäle weist einen quadratischen Querschnitt auf, der in den Endbereichen in einen kreisförmigen Querschnitt mit definiertem Durchmesser übergeht:

- 3 mm Bohrdurchmesser: Pfadlängen von 10 bis 150 mm, zunächst in 10-mm-Schritten bis 100 mm, anschließend in 50-mm-Schritten.
- 4 mm Bohrdurchmesser: Pfadlängen von 10 bis 250 mm, zunächst in 10-mm-Schritten bis 100 mm, anschließend in 50-mm-Schritten.
- 6 und 8 mm Bohrdurchmesser: Pfadlängen von 10 bis 450 mm, zunächst in 10-mm-Schritten bis 100 mm, anschließend in 50-mm-Schritten bis 250 mm und schließlich in 100-mm-Schritten bis 450 mm.

Darüber hinaus wurden Kanäle mit variierender Breite hergestellt:

- 3 mm Bohrdurchmesser, 30 mm Pfadlänge: Breiten von 6 und 9 mm
- 4 mm Bohrdurchmesser, 40 mm Pfadlänge: Breiten von 8 und 12 mm
- 6 mm Bohrdurchmesser, 60 mm Pfadlänge: Breiten von 3 und 9 mm
- 8 mm Bohrdurchmesser, 80 mm Pfadlänge: Breiten von 4 und 12 mm

Die dem Mikrofonarray zugewandte Platte besitzt eine Dicke von 6,5 mm. Die rückseitige Platte ist 15 mm dick und enthält die gefrästen Nuten der Kanäle. Nicht genutzte Strömungspfade können durch Abkleben luftdicht verschlossen werden.

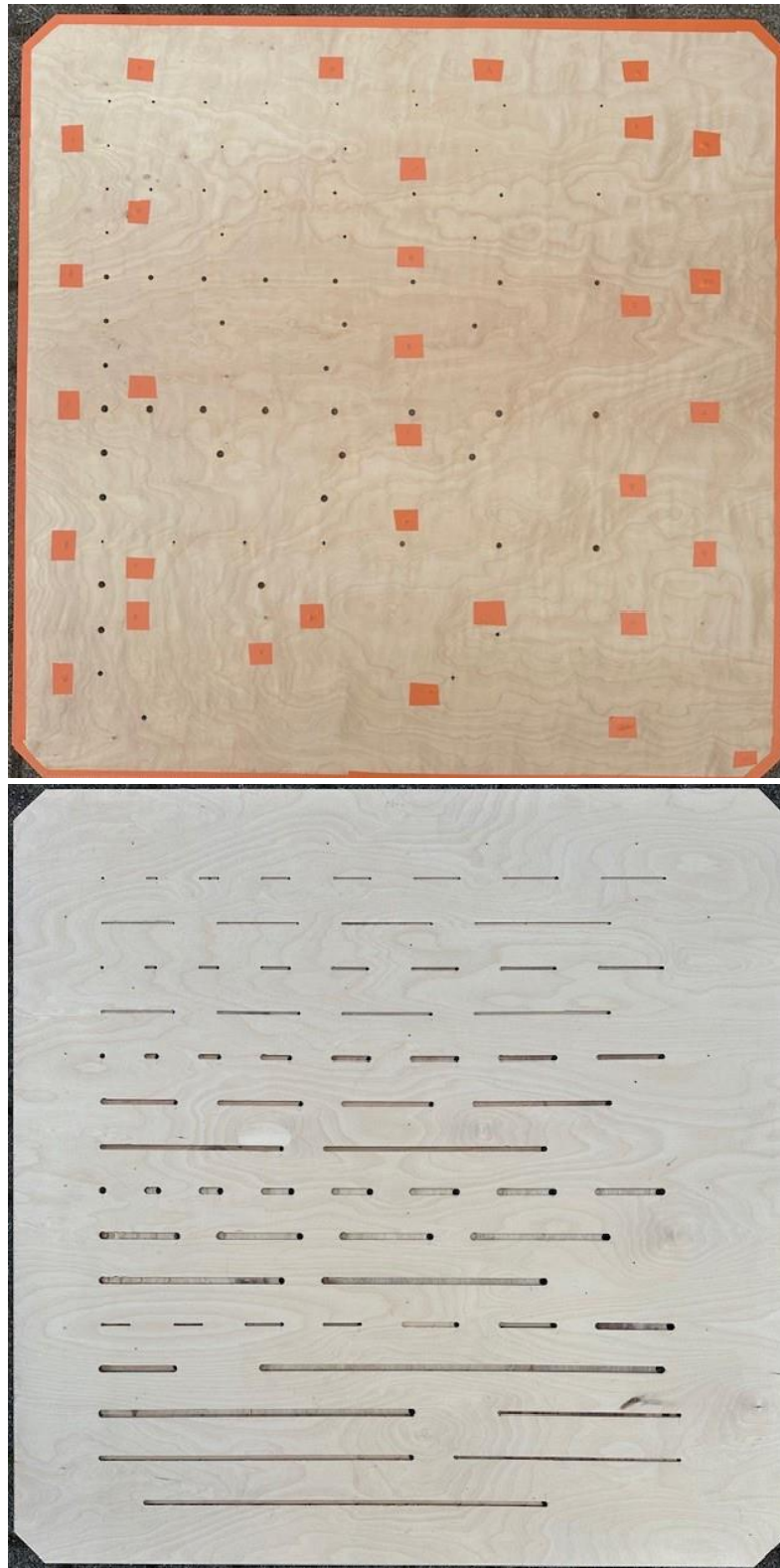


Abbildung 3-10: Prüfkörper Z-Kanal. 6,5 mm Platte mit Durchgangsbohrungen nach der Verschraubung (oben). 15 mm Platte mit gefrästen Pfaden vor der Verschraubung (unten). Die Schrauben und der Randbereich sind luftdicht mit Klebeband abgedichtet.

3.2 Messkonfiguration am Prüfstand

In diesem Unterkapitel werden die Messkonfigurationen am Prüfstand beschrieben. Zunächst werden die eingesetzten akustischen Messgeräte und -systeme vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Erläuterung des Power-Beamformings, bevor das System zur Bestimmung des Luftvolumenstroms im Prüfstand dargestellt wird.

3.2.1 Eingesetzte akustische Messgeräte und -systeme

Wie in Abbildung 3-1 zu sehen ist, befindet sich im Inneren des Prüfstands ein Dodekaeder-Lautsprecher vom Typ *Qohm* der Firma *Qsources*. Dieser ist mit einem *Yamaha*-Verstärker *R-S202/R-S202D* verbunden und emittiert Schall omnidirektional in einem Frequenzbereich von 50 Hz – 35 kHz¹ in die Umgebung ab. Zur Erweiterung des Frequenzbereichs in höhere Lagen wurden zusätzlich Hochtöner vom Typ *Ultrasonic Omnidirectional Dynamic Speaker Vifa* der Firma *Avisoft Bioacoustics* auf dem Dodekaeder montiert, die Schall im Bereich von 15 – 120 kHz abstrahlen². Dabei spielt die Position der Lautsprecher im Prüfstand auf das Messergebnis keine entscheidende Rolle, weswegen diese in der Mitte des Prüfstandes positioniert sind (Diel et al., 2024).

Die akustische Kamera mit kreisförmigem Mikrofonarray wird in Kombination mit einem Datenrekorder und der Auswertesoftware *NoiseImage* eingesetzt. Das in dieser Arbeit verwendete Mikrofonarray trägt die Bezeichnung *Akustische Kamera Array Ring48 AC Pro* und wird von der *gfai tech GmbH* hergestellt. Mit diesem System können Schallquellen orts-, zeit-, und frequenzselektiv geortet und analysiert werden. Der Datenrekorder *mcdRec* von der *gfai tech GmbH* ermöglicht die Verarbeitung der vom Mikrofonarray erhobenen Daten bei hohen Abtastfrequenzen und gleichzeitig hoher Kanalzahl. In dieser Untersuchung kommt das Ring-Array mit 48 Mikrofonen zum Einsatz. Zur Analyse der akustischen Daten wird die Software *NoiseImage* verwendet, die mittels Beamforming (siehe Kapitel 3.2.2) orts aufgelöst die Schalldruckpegel für einen betrachteten Frequenzbereich berechnet. Dadurch lässt sich der detektierte Schall als akustische Karte darstellen (Döbler, o. J., Zugriff am 28.05.2025).

Die akustische Karte entsteht durch die Überlagerung der Beamforming-Ergebnisse mit einem optischen Bild und ermöglicht so die Lokalisierung potenzieller Schallquellen. Für sich allein

¹ Der nutzbare Frequenzbereich wurde messtechnisch bis 35 kHz ermittelt. Laut Herstellerangabe liegt die obere Einsatzfrequenz bei 16 kHz.

² Die Hochtöner sind während der Durchführung der Untersuchungen zu einem unbestimmten Zeitpunkt ausgefallen. In den Kapiteln 4.1 bis 4.3 könnten Messungen daher teilweise ohne funktionierende Hochtöner erfolgt sein, da der genaue Zeitpunkt des Defekts nicht festgestellt werden konnte. In den übrigen Kapiteln des Ergebnisteils wurde der Schall ausschließlich über den Dodekaeder-Lautsprecher emittiert.

liefern weder die Beamformingkarte noch das optische Bild ausreichend Informationen. In Kombination jedoch zeigt die akustische Karte die Bereiche, an denen Schall abgestrahlt wird (gfai tech GmbH, o. A., o. J. c, Zugriff am 22.07.2025). Ein Beispiel anhand eines Staubsaugers für das 16 kHz-Terzband mit einem Dynamikbereich von 8,5 dB ist in Abbildung 3-11 dargestellt.

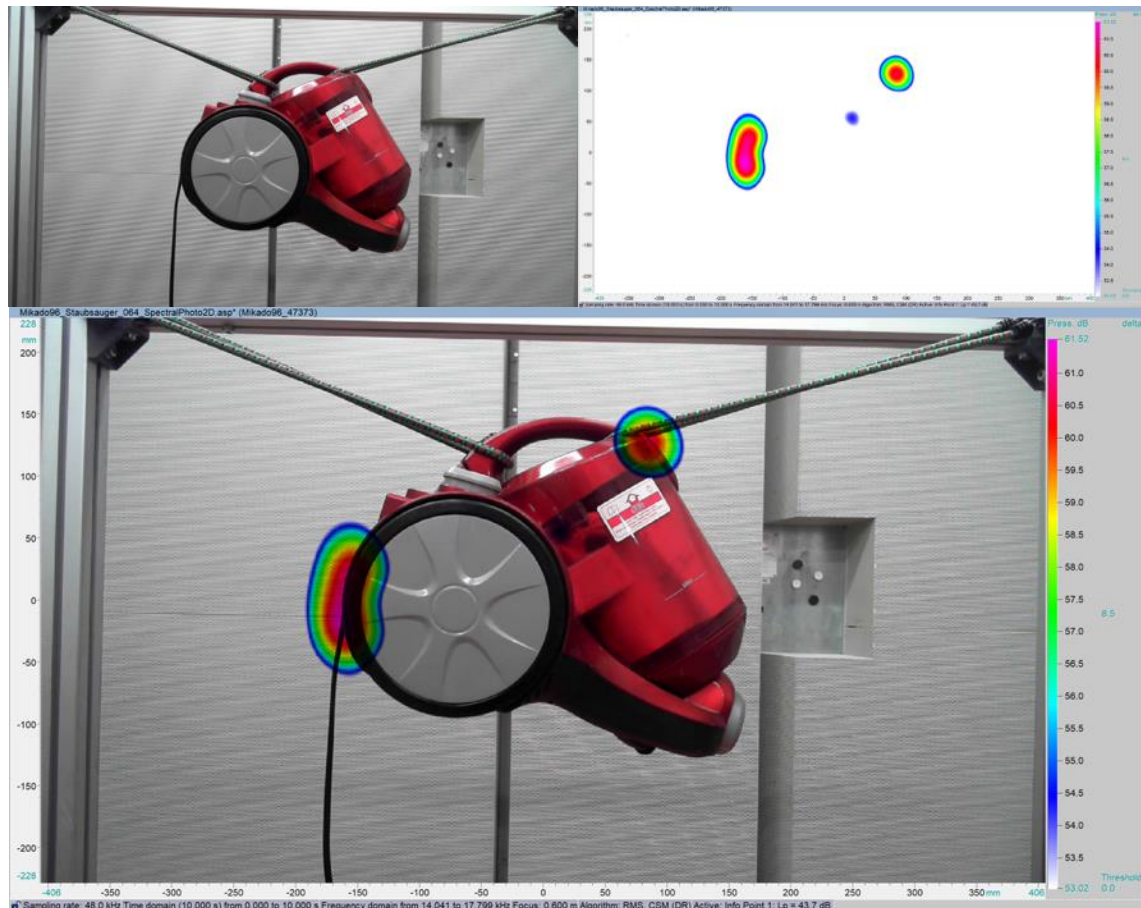


Abbildung 3-11: Optisches Bild eines Staubsaugers (oben links). Beamforming-Karte (oben rechts). Akustische Karte (unten). Der Dynamikbereich der akustischen Karte ist rechts durch eine Farbskala dargestellt (aus: gfai tech GmbH, o. A., o. J. c, Zugriff am 22.07.2025).

Zur Untersuchung der Effektivität der Leckagedetektion im Ultraschallbereich bei 40 kHz wird in dieser Arbeit das *SONAPHONE T* in Kombination mit der *SONOSPHERE* der *SONOTEC GmbH* eingesetzt (siehe Abbildung 3-12). Die *SONOSPHERE* ermöglicht die Abstrahlung einer Frequenz von 40 kHz bei einem Schalldruckpegel von bis zu 120 dB.



Abbildung 3-12: *SONAPHONE T* in Kombination mit der *SONOSPHERE* im inneren des Prüfstandes

Eine Übersicht der verwendeten Messinstrumente bzw. verwendeten Messeinstellungen kann aus Tabelle 3-1 entnommen werden.

Tabelle 3-1: Verwendete Messinstrumente und Messeinstellungen

Verwendetes Messgerät/Verwendetes Messsystem	Verwendete Messeinstellung
Dodekaeder-Lautsprecher <i>Qohm</i> mit Hochtönern <i>Ultrasonic Omnidirectional Dynamic Speaker Vifa</i>	Signal: Weißes Rauschen
	Verstärker: <i>Yamaha R-S202/R-S202D</i>
	Position im Prüfstand: mittig
	Höhe: 100 cm
<i>SONAPHONE T</i> in Kombination mit der <i>SONOSPHERE</i>	Frequenz: 40 kHz
	Schalldruckpegel: 120 dB
<i>Akustische Kamera Array Ring48 AC Pro</i>	Abstand zum Prüfkörper: 1,5 m
	Winkel zum Prüfkörper: 90°
Prüfkörper	<i>Spanplatte</i>

	<i>Labyrinth</i>
	<i>Sandwich</i>
	<i>Z-Kanal</i>
<i>NoiselImage</i>	Power-Beamforming-Parameter: <i>Standard</i>
	FFT-Parameter: <i>von Hann</i>
	Blocklänge: 2048

Für die Fast-Fourier-Transformation (FFT) wird in dieser Arbeit *von Hann* sowie die Blocklänge zu 2048 gewählt, weil bei höheren Blocklängen in Kombination mit *von Hann* der erste Impuls stärker gedämpft wird, wodurch die Lokalisierung einzelner Schallquellen unter Umständen beeinträchtigt wird (gfai tech GmbH, o. A., o. J. a, Zugriff am 28.05.2025). Als Schallquelle kommt weißes Rauschen zum Einsatz, da es ein breites Frequenzspektrum abdeckt. Die Entscheidung zugunsten des *Standard*-Power-Beamforming-Parameters wird in den Kapiteln 3.2.3 und 4.1 ausführlich erläutert.

3.2.2 Micro Leakage Meter

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, ist der Minneapolis *DuctBlaster* mit dem *Minneapolis Micro Leakage Meter* (MLM) verbunden, um präzise Messungen der Luftleckage im Prüfstand durchzuführen. Durch den Austausch der Blende können unterschiedliche Luftvolumenströme bei variierenden Druckdifferenzen gemessen werden. Der Differenzdruck wird dabei mit dem Druckmessgerät *DG-1000* erfasst. So ermöglicht beispielsweise eine Blende mit einem Durchmesser von 4 mm die Messung von Luftvolumenströmen im Bereich von 0,17 – 0,83 m³/h bei einer Druckdifferenz von 80 Pa (Diel et al., 2024). Insgesamt sind Messungen bei Luftvolumenströmen von bis zu 78,5 m³/h möglich. Bei der Messung von Zuluftkanälen wird ein Überdruck erzeugt, während bei der Messung von Abluftkanälen ein Unterdruck aufgebaut wird (BlowerDoor GmbH, o. A., o. J., Zugriff am 30.08.2025).

Die Messungen werden mit der *TecLog*-Software ausgewertet, die den gesamten Messverlauf dokumentiert. Mit dieser Software kann die gewünschte Druckdifferenz konstant gehalten und der Luftvolumenstrom bei dieser Differenz präzise erfasst werden.

3.2.3 Power-Beamforming

Für die Auswertung der lokalisierten Schallquellen stehen in *NoiselImage* verschiedene frequenzbasierte Beamforming-Methoden zur Verfügung. Dabei werden unter anderem *Standard*-, *funktionales*, *asymptotisches* und *adaptives* Power-Beamforming (PBF) berücksichtigt. Ein zentrales Element dieser Methoden ist die Eigenwertzerlegung der

Kreuzspektralmatrix (KSM) (Dougherty, 2014; Puhle, 2021). Mithilfe einer Eigenwertzerlegung kann diese Matrix in charakteristische Anteile zerlegt werden, die die dominanten Strukturen des Schallfeldes beschreiben (Dougherty, 2014).

Ein zentrales Hilfsmittel zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Arrays ist die Punktspreizfunktion (PSF). Sie beschreibt, wie eine punktförmige Schallquelle im Beamforming-Ergebnis abgebildet wird und bestimmt unmittelbar die räumliche Auflösung und den Dynamikbereich der Methode. Die PSF legt damit fest, wie scharf die Hauptkeule fokussiert und wie stark unerwünschte Nebenkeulen auftreten (Dougherty, 2014). Damit ist die Gestalt von Haupt- und Nebenkeulen von zentraler Bedeutung für die Aussagekraft der akustischen Visualisierungen. Die Hauptkeule entspricht dem Bereich des globalen Maximums, während Nebenkeulen kleinere, seitlich auftretende Maxima darstellen, welche fälschlicherweise Signale suggerieren können (siehe Abbildung 3-13). Weitere relevante Parameter sind die Hauptkeulenbreite und die Dynamik. Die Hauptkeulenbreite, definiert als die Breite des Maximums bei einem Pegel von 3 dB unter dem Spitzenwert, gibt Aufschluss darüber, ab welchem minimalen Abstand benachbarte Quellen noch zuverlässig getrennt dargestellt werden können. Die Dynamik bezeichnet das Verhältnis des Schalldruckpegels der Hauptkeule zu jenem der stärksten Nebenkeule (gfai tech GmbH, o. A., o. J. b, Zugriff am 01.09.2025).

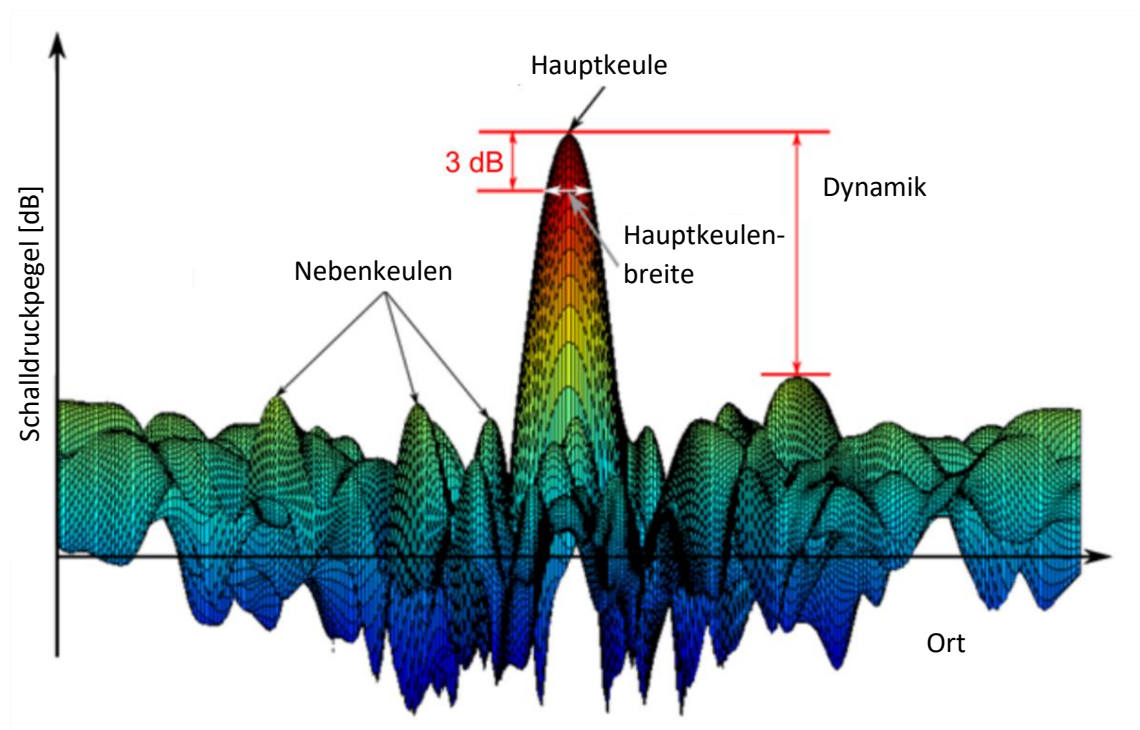


Abbildung 3-13: PSF mit Beamforming-Ansatz (geringfügig modifiziert aus: gfai tech GmbH, o. A., o. J. b, Zugriff am 01.09.2025)

Beim PBF wird ein mathematisches Mittel über die Eigenwerte der KSM gebildet. Die Wahl des Exponenten p definiert dabei verschiedene Varianten des Verfahrens, die sich hinsichtlich der Auflösung sowie der Unterdrückung von Störgeräuschen und Scheinquellen unterscheiden. Eine Verringerung des Exponenten p führt in der Regel zu einer stärkeren Fokussierung der Hauptkeulen bei gleichzeitig erhöhter Unterdrückung von Nebenkeulen. Allgemein lässt sich das Ergebnis des PBF am Ort g durch folgende Gleichung darstellen (Puhle, 2021):

$$b_p(g) = \rho(g) \left[\sum_{i=1}^M w_i(g) \cdot \lambda_i^p \right]^{\frac{1}{p}}, p \in \mathbb{R}, p \neq 0 \quad (3.1)$$

ρ : Normierungsfaktor

M : Anzahl der Mikrofone

w_i : Projektionskoeffizienten

λ_i : Eigenwerte der KSM

Zur Übersicht sind die Werte der Exponenten für die jeweilige Beamforming-Methode in Tabelle 3-2 dargestellt.

Tabelle 3-2: PBF-Methode mit dem jeweiligen Exponenten

PBF-Methode	Exponent p
<i>Standard</i>	1
<i>Funktional</i>	$\frac{1}{\nu}$ mit $\nu = 2, 4, 8, 16, 32$
<i>Asymptotisch</i>	0
<i>Adaptiv</i>	-1

Wird der Exponent p von seinem *Standard*-Wert 1 zu kleineren Werten hin verändert, lassen sich in den resultierenden akustischen Karten sowohl eine Reduktion von Nebenkeulen als auch eine deutlichere Fokussierung der Hauptkeulen beobachten. Allerdings besteht insbesondere bei negativem Exponenten ($p < 0$) die Gefahr, dass bereits geringe Berechnungsfehler zu erheblichen Ungenauigkeiten und numerischer Instabilität führen. Eine weitere Reduktion des Exponenten $p < -1$ ist zwar theoretisch möglich, jedoch praktisch aufgrund der zunehmenden Instabilität kaum anwendbar. Auch eine Erhöhung des Exponenten über $p > 1$ ist prinzipiell zulässig, führt jedoch zu einer nochmals reduzierten Auflösung und einem geringeren Dynamikumfang im Vergleich zum *Standard*-Beamforming (Puhle, 2021).

Für ein tieferes Verständnis der Thematik Beamforming wird auf die Arbeiten von Chiariotti (2019), Dougherty (2014) und Puhle (2021) verwiesen.

In der vorliegenden Arbeit kommt das *Standard*-PBF zum Einsatz, da auf diese Weise die zuverlässigsten Ergebnisse bei der Lokalisierung von Leckagen erzielt wurden (siehe Kapitel 4.1). Darüber hinaus werden im Rahmen dieser Arbeit alle detektierten akustischen Signale, die nicht der gesuchten Leckagequelle entsprechen, einheitlich als Störgeräusche bezeichnet. Dies umfasst tatsächlich vorhandene Störquellen, als auch Artefakte des Beamforming-Verfahrens (Scheinquellen) sowie zufälliges Rauschen. Eine weitere Differenzierung dieser Geräuscharten ist aufgrund der Komplexität der akustischen Signale nicht ohne weiteres möglich und wird daher in der vorliegenden Untersuchung nicht näher behandelt.

3.3 Umformung zur Linearisierung der Strömungsgleichung

Wie in Gleichung (2.14) dargestellt, lässt sich das Strömungsverhalten an Leckagen durch das Potenzgesetz beschreiben, welches die Abhängigkeit des Volumenstroms von der Druckdifferenz durch $Q = C \cdot \Delta p^n$ definiert. Zur experimentellen Bestimmung der geometrieabhängigen Parameter C und n wird diese Gleichung durch Anwendung des dekadischen Logarithmus in eine lineare Form überführt:

$$\log(Q) = \log(C \cdot \Delta p^n) = \log(C) + n \cdot \log(\Delta p) \quad (3.2)$$

Diese Gleichung entspricht formal einer linearen Beziehung der Form:

$$y = a + b \cdot x \quad (3.3)$$

Für jede untersuchte Versuchskonfiguration, bestehend aus unterschiedlichen Lochdurchmessern und Pfadlängen im *Z-Kanal*-Prüfkörper, wurden jeweils vier Messwerte für Δp und Q ermittelt. Die Auswertung erfolgte in folgenden Schritten:

1. Logarithmieren der Messwerte
2. Durchführen einer linearen Regressionsanalyse auf Basis der logarithmischen Werten
3. Bestimmung des Exponenten n aus der Regressionssteigung
4. Berechnung des Strömungskoeffizienten C über $C = 10^a$, wobei a den y - Achsenabschnitt der Regressionsgeraden beschreibt

Im Folgenden wird dieser Vorgang exemplarisch anhand der Konfiguration mit einem Lochdurchmesser von 8 mm und einer Pfadlänge von 250 mm dargestellt. Die experimentell ermittelten Werte durch das MLM und der *TecLog*-Software sowie deren logarithmierte Formen sind in Tabelle 3-3 aufgeführt.

Tabelle 3-3: Logarithmierte Messwerte Δp und Q . Lochdurchmesser: 8 mm. Pfadlänge: 250 mm

Δp [Pa]	Q [m ³ /s]	$\log(\Delta p)$	$\log(Q)$
25,09	0,586	1,4	-0,232
50,18	0,983	1,701	-0,007
74,84	1,25	1,874	0,097
99,96	1,493	2	0,174

Die Regressionsanalyse erfolgt mit $\log(\Delta p)$ als x - Wert und $\log(Q)$ als y - Wert. In Abbildung 3-14 ist die Regressionsgerade dargestellt. Aus der Steigung ergibt sich der Exponent n zu 0,677.

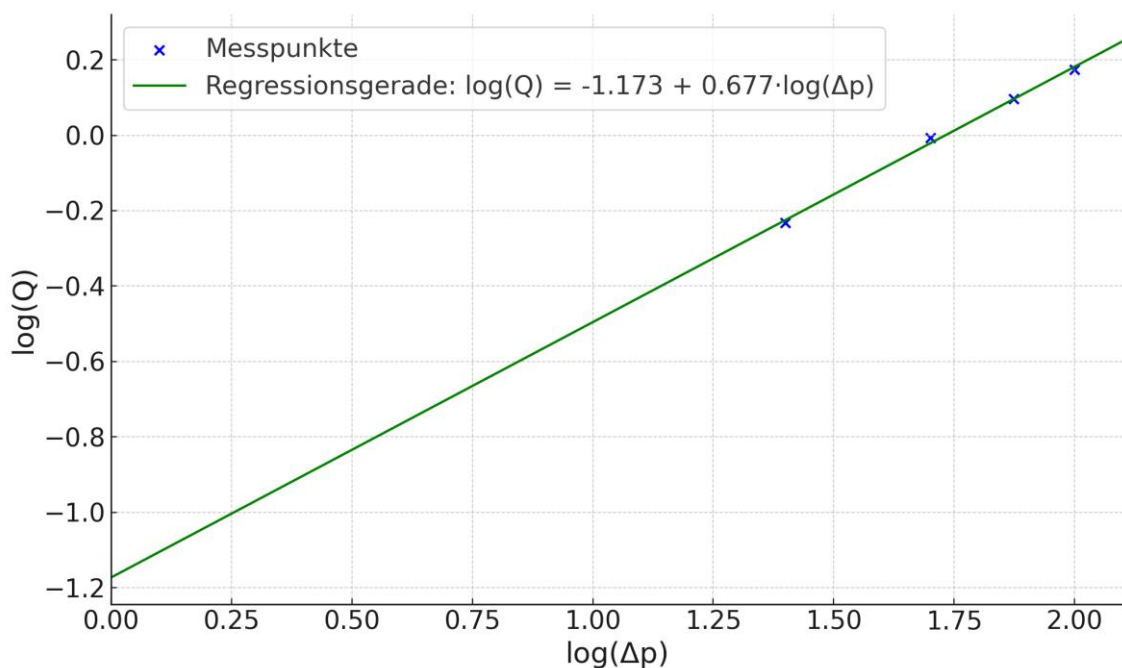


Abbildung 3-14: Regressionsgerade aus vier experimentell bestimmten Messwerten. Lochdurchmesser: 8 mm. Pfadlänge: 250 mm

Aus dem y – Achsenabschnitt der Regressionsgeraden ergibt sich a zu -1,173. Daraus lässt sich der Strömungskoeffizient C gemäß der in Schritt 4 beschriebenen Beziehung zu 0,0671 berechnen. Somit ergibt sich für diese Leckagegeometrie die spezifische Strömungsgleichung:

$$Q = 0,0671 \cdot \Delta p^{0,677} \quad (3.4)$$

Eine Untersuchung von Jayarathne (2023) zeigt, dass sowohl C als auch n stark von der Geometrie der Leckage, den Messbedingungen sowie der Strömungsrichtung abhängen (Jayarathne, 2023). In Kapitel 4.6 wird untersucht, ob sich durch die Kombination der ermittelten Strömungsparameter mit akustischen Messdaten Rückschlüsse auf die Leckagegeometrie ziehen lassen.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird zunächst die Auswahl des Exponenten für das Power-Beamforming ausführlich erläutert. Darauf folgt die Analyse der Auswirkungen der Schalldämmung des Prüfstands auf die Messergebnisse sowie die Darstellung der veränderten Verfahrensgrenzen verschiedener Prüfkörper. Zudem werden die Ergebnisse der Untersuchungen im Ultraschallbereich vorgestellt. Weiterhin wird der Einfluss unterschiedlicher Frequenzen auf die Detektion verschiedener Leckagearten quantitativ untersucht. Abschließend wird geprüft, ob ein Zusammenhang zwischen Leckagegeometrie, Strömungsparametern und akustischer Detektierbarkeit besteht.

4.1 Auswahl des Exponenten für das Power-Beamforming

Um auszuwählen, welcher Exponent für das PBF für die Auswertung der vorliegenden Untersuchung am besten geeignet ist, wird die *Spanplatte* mit einem 2 mm großen Durchgangsloch näher betrachtet. Bei einem Frequenzbereich unter 17 kHz ist die 2 mm große Leckage bei keinem der Exponenten für das PBF erkennbar. Daher wird im Folgenden das Terzband im Bereich von 17,78 – 22,39 kHz sowie der Ultraschallbereich von 20 -40 kHz analysiert. In Abbildung 4-1 ist die Auswertung des Terzbandes mit dem *Standard*-PBF, dem *funktionalen* PBF mit den Parametern $p = 1/v = 1/4, 1/8, 1/16, 1/32$ sowie dem *asymptotischen* und *adaptiven* PBF bei einer Dynamik von $\Delta = 1$ dB dargestellt. Der Dynamikbereich ist für jede Messung mithilfe einer Farbskala visualisiert, wobei der maximale Schalldruckpegel in dB oben und der minimale Schalldruckpegel in dB unten angegeben ist.

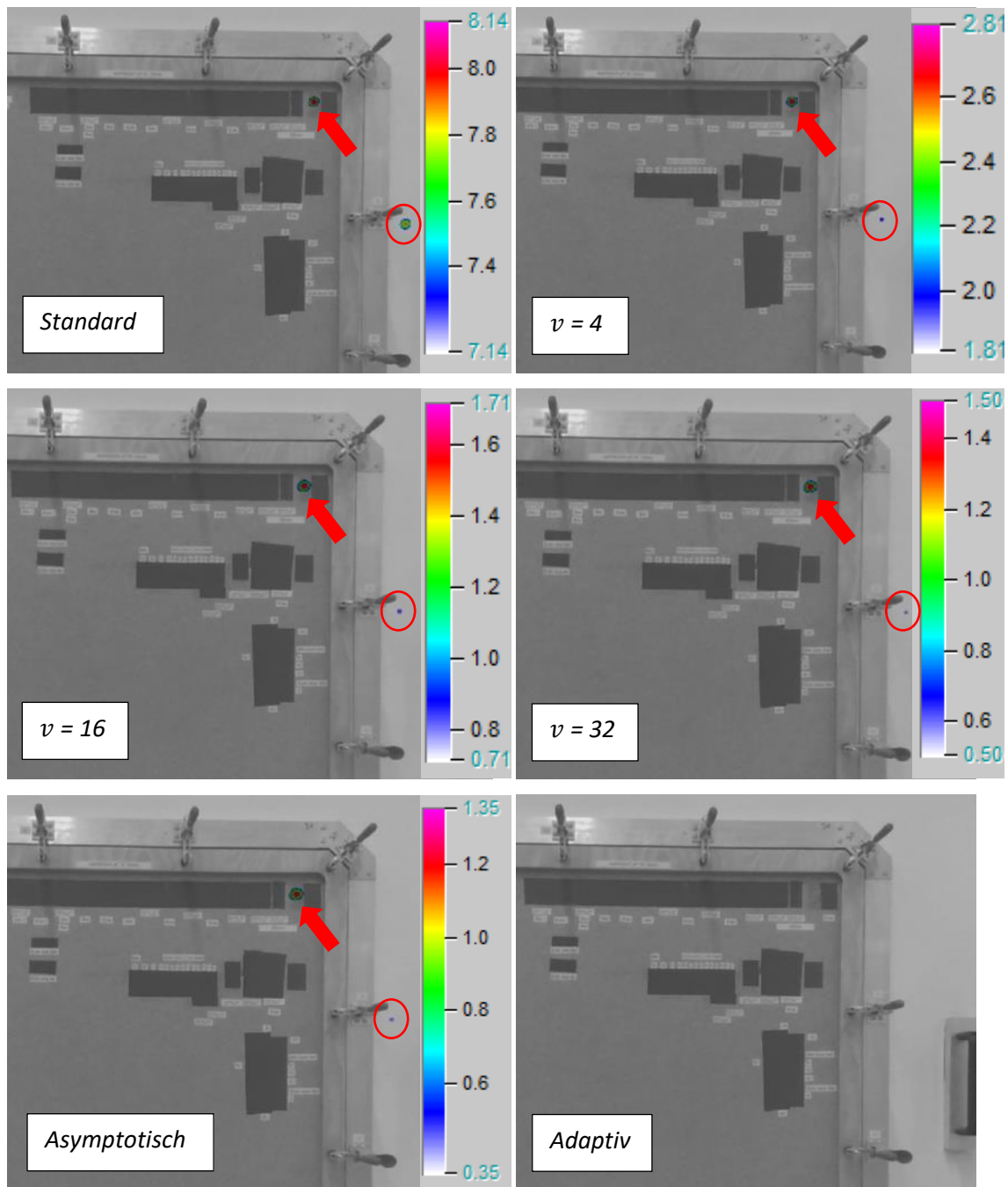


Abbildung 4-1: Vergleich der Exponenten für das PBF. Leckage: 2 mm Durchgangsloch (mit rotem Pfeil markiert), Störgeräusche sind durch rote Kreise hervorgehoben. Prüfkörper: *Spanplatte*. Oben links: *Standard*. Oben rechts: *Funktional* mit $v = 4$. Mitte links: *Funktional* mit $v = 16$. Mitte rechts: *Funktional* mit $v = 32$. Unten links: *Asymptotisch*. Unten rechts: *Adaptiv*. Frequenzbereich: 17,78 – 22,39 kHz. Dynamik: 1 dB (visualisiert durch Farbskala)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Störgeräusche beim *Standard*-PBF am stärksten ausgeprägt sind und sich beim *funktionalen* PBF verringern. Bei der Auswertung mit dem *adaptiven* PBF lässt sich jedoch feststellen, dass sowohl die Störgeräusche als auch die Leckage nicht detektiert werden können.

In Tabelle 4-1 sind zur Übersicht die verschiedenen Exponenten für das PBF zusammen mit dem maximalen Schalldruckpegel dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass der Schalldruckpegel des erfassten Signals mit der Änderung der Exponenten für das PBF vom *Standard* bis zum *asymptotischen* abnimmt.

Tabelle 4-1: Vergleich der Exponenten für das PBF. Leckage: 2 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: *Spanplatte*. Frequenzbereich: 17,78 – 22,39 kHz. Dynamik: 1 dB

Exponenten für das PBF	Maximaler Schalldruckpegel [dB]
<i>Standard</i>	8,14
<i>Funktional mit $v = 4$</i>	2,81
<i>Funktional mit $v = 16$</i>	1,71
<i>Funktional mit $v = 32$</i>	1,5
<i>Asymptotisch</i>	1,35
<i>Adaptiv</i>	-

Auch im Ultraschallbereich kann die Leckage mit den verschiedenen Exponenten für das PBF detektiert werden. In Tabelle 4-2 werden die Exponenten für das PBF im Frequenzbereich von 20 – 40 kHz verglichen. Die Dynamik wurde so gewählt, dass sie maximal ist, ohne zusätzliche Störgeräusche auf dem Prüfkörper oder Prüfstand. Die Leckage lässt sich in jeder Auswertung eindeutig identifizieren, wobei der Schalldruckpegel und die Dynamik beim *Standard*-PBF mit 8,9 dB, bzw. 1,6 dB auch hier am höchsten sind. Im Ultraschallbereich lässt sich im Gegensatz zum vorher untersuchten Bereich auch mit dem *adaptivem* PBF die Leckage detektieren.

Tabelle 4-2: Vergleich der Exponenten für das PBF. Leckage: 2 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: *Spanplatte*. Ultraschall-Frequenzbereich: 20 – 40 kHz

PBF	Dynamik Δ [dB]	Maximaler Schalldruckpegel [dB]
<i>Standard</i>	1,6	8,9
<i>Funktional mit $v = 4$</i>	1,1	5,51
<i>Funktional mit $v = 16$</i>	0,9	4,8
<i>Funktional mit $v = 32$</i>	0,9	4,62
<i>Asymptotisch</i>	0,8	4,53
<i>Adaptiv</i>	0,6	1,13

Vergleicht man den Frequenzbereich des untersuchten Terzbandes mit dem Frequenzbereich im Ultraschall, kann festgestellt werden, dass der maximale Schalldruckpegel im

Ultraschallbereich für jeden Exponenten des PBF höher ist als im Frequenzbereich des Terzbandes.

Die Untersuchung des 1,5 mm großen Durchgangsloches bestätigen den Eindruck, dass die Änderung vom *Standard*-PBF auf das *funktionale*, *asymptotische* oder *adaptive* PBF dazu führt, dass Leckagen schlechter oder gar nicht mehr detektierbar sind. In Abbildung 4-2 ist die Auswertung der 1,5 mm großen Durchgangsleckage mit dem *Standard*-PBF sowie dem *funktionalen* PBF mit $\nu = 4$ und $\nu = 16$ bei einer Ultraschall-Frequenzbereich von 29,3 – 40 kHz und einer Dynamik von 0,9 dB dargestellt.

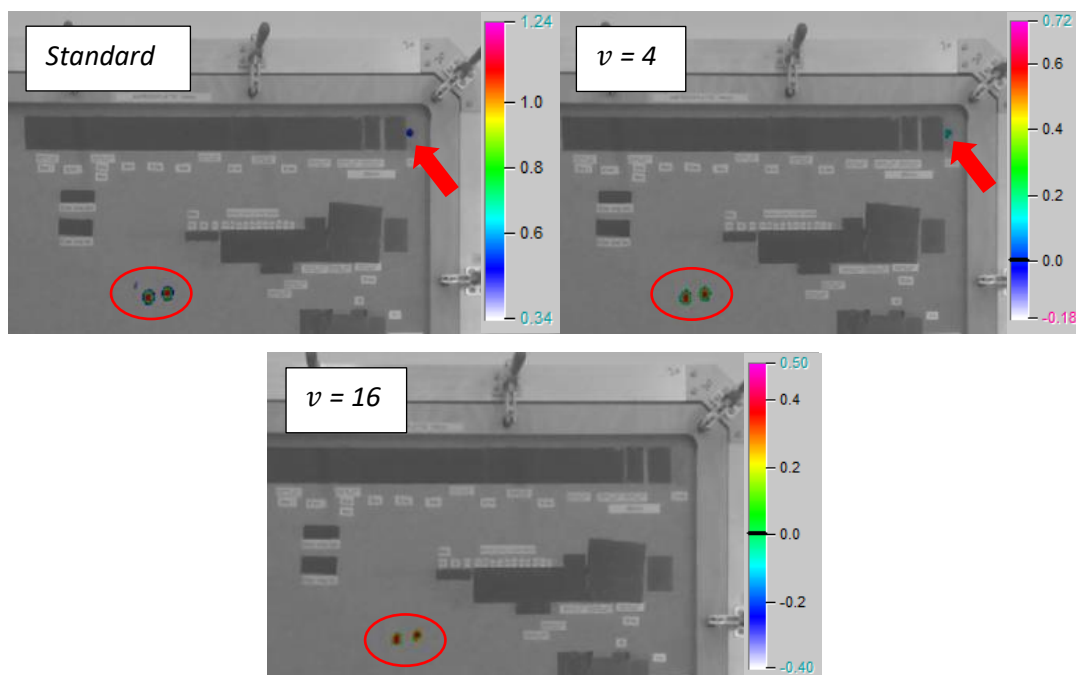


Abbildung 4-2: Vergleich der PBF-Methoden. Leckage: 1,5 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: *Spanplatte*. Oben links: *Standard*. Oben rechts: *Funktionales* mit $\nu = 4$. Unten: *Funktionales* mit $\nu = 16$. Frequenzbereich: 29,3 – 40 kHz. Dynamik: 0,9 dB

Die Leckage ist bei der Auswahl des *funktionalen* PBF mit $\nu = 16$ nicht mehr erkennbar. Dies gilt auch für höhere Werte von ν sowie für das *asymptotische* und *adaptive* PBF, bei denen die Leckage ebenfalls nicht detektiert werden kann. Beim *Standard*-PBF wird das Signal des Lautsprechers als stärkstes Signal erkannt, während die Leckage als Signal mit einem geringeren Schalldruckpegel abgebildet wird.

Mit zunehmendem Wert von ν beim *funktionalen* PBF wird das Signal der Leckage zunehmend unterdrückt, bis es schließlich nicht mehr detektierbar ist. In vielen Fällen erscheint die Leckage nicht als Signal mit dem höchsten Schalldruckpegel. Durch die Anwendung des *funktionalen*, *asymptotischen* oder *adaptiven* PBF kann das Signal derart reduziert werden, dass es im Ergebnis nicht mehr als relevante Schallquelle erfasst wird.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit das *Standard-PBF* verwendet, da es die zuverlässige Detektion von Leckagen auch bei vergleichsweise schwachen Signalen ermöglicht.

4.2 Auswirkungen der Schalldämmung auf Messergebnisse

Im folgenden Unterkapitel werden die Auswirkungen der im Rahmen dieser Arbeit realisierten Schalldämmung des Prüfstandes (siehe Abschnitt 3.1.1) auf die Leckagedetektion anhand verschiedener Prüfkörper und Messbeispiele untersucht.

Spanplatte

Vor der Schalldämmung des Prüfstandes lag die Nachweisgrenze bei einer Lochgröße von 2 mm. Dadurch konnten kleinere Leckagen aufgrund der hohen Schalltransmission des Prüfstandes nicht zuverlässig erkannt oder von Störgeräuschen unterschieden werden. Nach der Dämmung gelingt es hingegen, selbst 1,5 mm große Leckagen im Ultraschallbereich bei einer Frequenz von 29,3 – 40 kHz eindeutig zu detektieren. Wie in Abbildung 4-3 ersichtlich ist, tritt auch in der Mitte des Prüfkörpers ein gewisses Maß an Störgeräuschen auf, die durch den Lautsprecher verursacht werden.

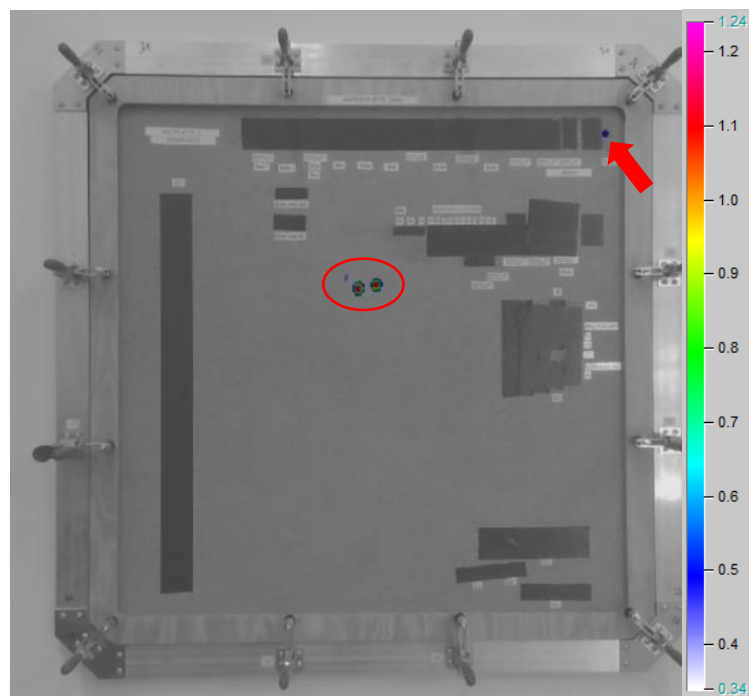


Abbildung 4-3: Akustische Karte nach der Dämmung des Prüfstandes. Leckage: 1,5 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: *Spanplatte*. Frequenzbereich: 29,3 – 40 kHz. Dynamik: 0,9 dB

Trotz der verbleibenden Störgeräusche lässt sich die Leckage klar identifizieren.

Labyrinth

Eine Messung mit dem Prüfkörper *Labyrinth* vor der Schalldämmung des Prüfstandes wird in Abbildung 4-4 gezeigt, bei der der Schall dem Strömungspfad 5-4r1d-5 (siehe Abschnitt 3.1.2) folgt. Zwar kann die akustische Kamera diese Leckage grundsätzlich erfassen, jedoch ist eine eindeutige Lokalisierung aufgrund der hohen Umgebungsgeräusche nicht möglich. Die Störgeräusche werden von der Kamera teilweise stärker als die eigentliche Leckage detektiert. Eine eindeutige Identifikation der Leckage ist unter diesen Bedingungen nicht möglich.

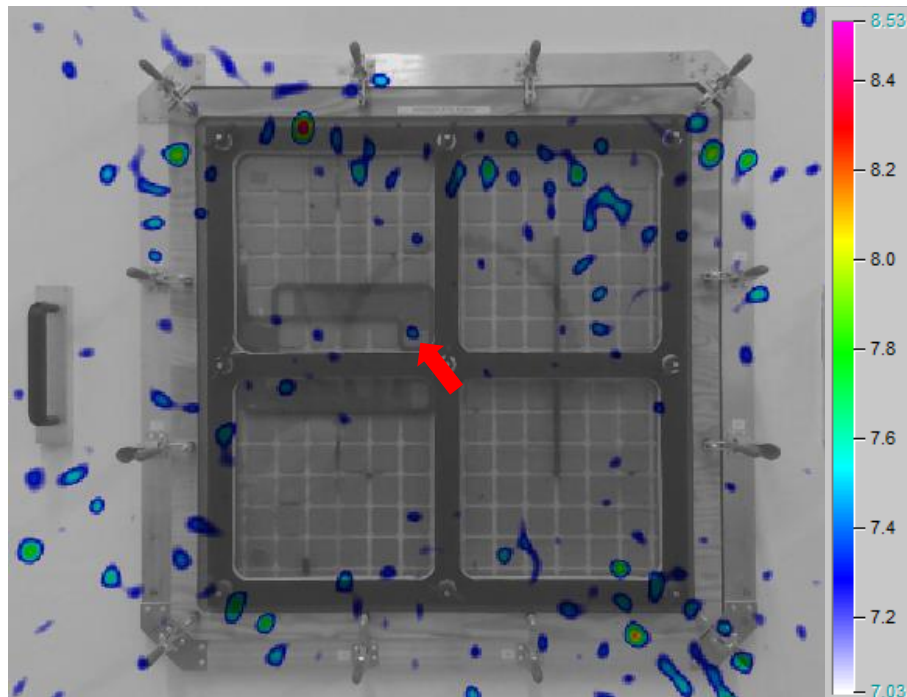


Abbildung 4-4: Akustische Karte des Prüfkörpers *Labyrinth* vor der Dämmung des Prüfstandes. Pfad: 5-4r1d-5. Frequenzbereich: 15,8 – 18,5 kHz. Dynamik: 1,5 dB

Die Messung wurde unter identischen Versuchsbedingungen nach der Schalldämmung des Prüfstandes erneut durchgeführt. Wie in Abbildung 4-5 zu erkennen ist, kann die Leckage nun eindeutig lokalisiert werden, da keinerlei störende Hintergrundgeräusche mehr den Schall, der durch die Leckage tritt, überlagert.

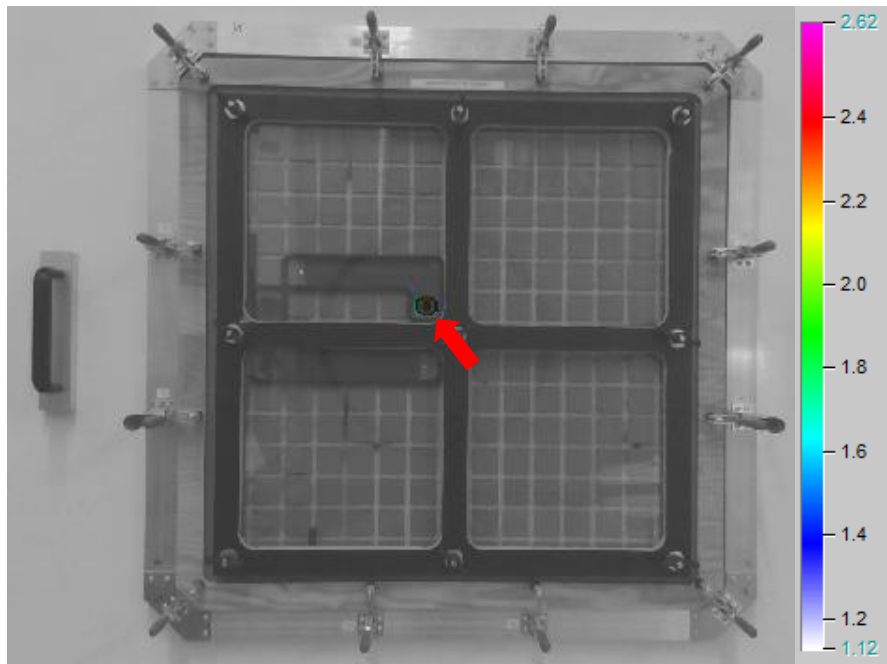


Abbildung 4-5: Akustische Karte des Prüfkörpers *Labyrinth* nach der Dämmung des Prüfstandes. Pfad: 5-4r1d-5. Frequenzbereich: 15,8 – 18,5 kHz. Dynamik: 1,5 dB

Sandwich

Für den Prüfkörper *Sandwich* liegen keine Messdaten für den Vorher-Nachher-Vergleich vor, da dieser Prüfkörper vor der Installation der Schalldämmung nicht ausreichend untersucht wurde.

Aus den Beobachtungen lässt sich ableiten, dass der ungedämmte Prüfstand selbst als Schallquelle fungiert, indem er über Körperschall unerwünschte Geräusche emittiert und somit die Leckagedetektion erheblich beeinträchtigt oder vollständig verhindert. Durch die nachträgliche Schalldämmung konnte im Rahmen dieser Arbeit die Sensitivität des gesamten Versuchsaufbaus so weit erhöht werden, dass zuvor unerkannte Leckagen detektierbar gemacht und auch solche mit komplexeren Pfadverläufen (siehe Kapitel 4.3) und kleineren Öffnungen zuverlässig lokalisiert werden können.

4.3 Verfahrensgrenzen der verschiedenen Prüfkörper (nach Schalldämmung des Prüfstandes)

Im folgenden Unterkapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit realisierte Schalldämmung des Prüfstandes (siehe Abschnitt 3.1.1) bedingten Verfahrensgrenzen der Prüfkörper untersucht. Dabei wird gezeigt, dass die Schalldämmung nun auch die Analyse komplexerer Leckagepfade bei gleichzeitiger eindeutiger Lokalisierung der Leckage ermöglicht. In vielen Messungen wurde zusätzlich der entsprechende q_{50} -Wert ermittelt. Die zugehörigen Werte sind in Tabelle A-1 im Anhang aufgeführt.

Spanplatte

Wie in Kapitel 4.2 dargestellt, konnte durch die Installation der Schalldämmung die Verfahrensgrenze für die Detektion kleiner Leckagen im Prüfkörper *Spanplatte* von einem Lochdurchmesser von 2 auf 1,5 mm reduziert werden.

Labyrinth

Ein exemplarischer Fall für den Prüfkörper *Labyrinth* mit dem Strömungspfad 3-2d5l4u-7 ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

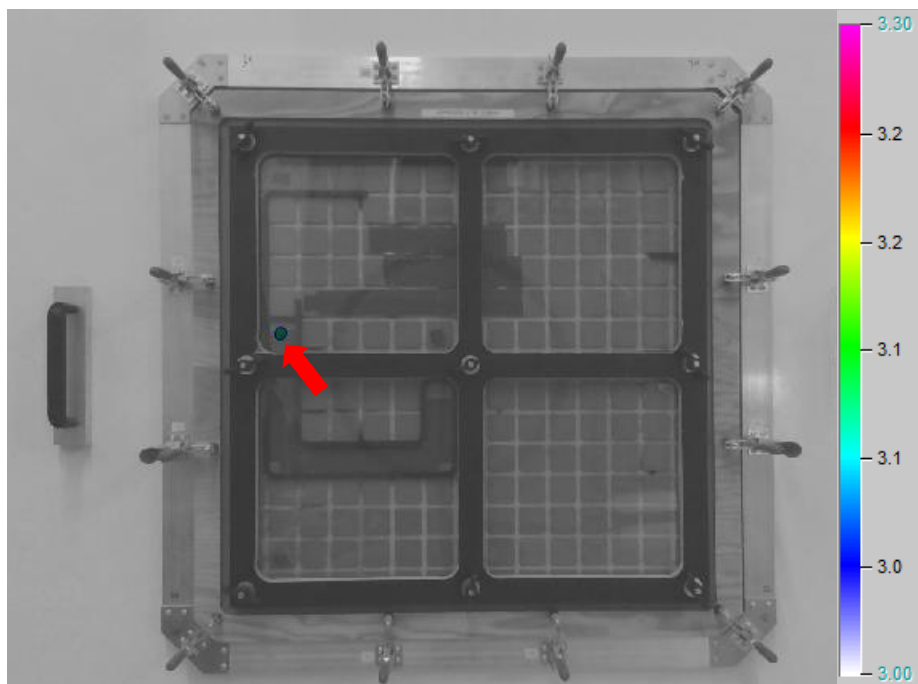


Abbildung 4-6: Akustische Karte des Prüfkörpers *Labyrinth* nach der Dämmung des Prüfstandes. Pfad: 3-2d5l4u-7. Frequenzbereich: 15,5 – 24 kHz. Dynamik: 0,3 dB

Dabei handelt es sich zugleich um den längsten eindeutig detektierbaren Leckagepfad in dieser Konfiguration. Eine weitere Verlängerung des Pfades, beispielsweise auf 3-3d5l5u-7, führt dazu, dass die Leckage nicht mehr zweifelsfrei detektiert werden kann.

Neben der erfolgreichen Detektion der Leckage aus Abbildung 4-6 lässt sich auch eine Variante mit drei statt zwei Richtungsänderungen realisieren. In Abbildung 4-7 ist der Strömungspfad 3-2l1u3l1u-7 dargestellt.

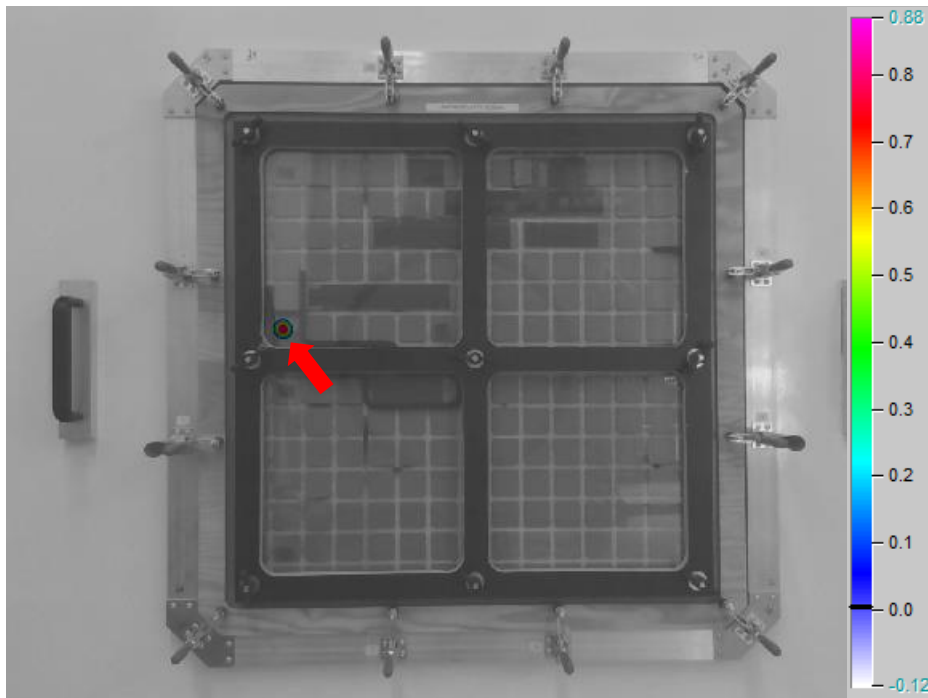


Abbildung 4-7: Akustische Karte des Prüfkörpers *Labyrinth* nach der Dämmung des Prüfstandes. Pfad: 3-2l1u3l1u-7. Frequenzbereich: 15,5 – 18,5 kHz. Dynamik: 1 dB

Wird die Anzahl der Richtungsänderungen auf vier erhöht, ist eine eindeutige Leakedetektion in dieser Konfiguration mit einem Eingangsloch von 3 mm Durchmesser und einem Ausgangsloch von 7 mm Durchmesser nicht mehr möglich.

Da neben dem Prüfstand auch der Prüfkörper selbst Körperschall überträgt, wurde in den zuvor beschriebenen Messungen am Prüfkörper *Labyrinth* schalldämmendes Material von innen angebracht, um diesen Effekt zu minimieren und die Störungen zu eliminieren.

Ohne diese zusätzliche Schalldämmung verliert die Pfadlänge der Leckage ihren Einfluss auf das Messergebnis. Ursache hierfür ist die Übertragung von Körperschall durch den Prüfkörper, der von der akustischen Kamera direkt an der Austrittsöffnung als dominierende Schallquelle erfasst wird (siehe Abbildung 4-8).

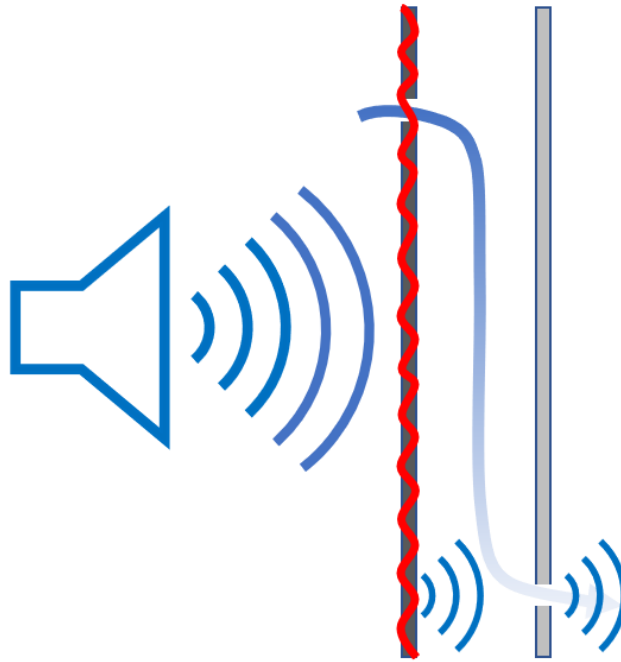


Abbildung 4-8: Skizze zur Veranschaulichung der Schallübertragung durch den Prüfkörper *Labyrinth*. Während der Schall anteilig über den Leckagepfad übertragen wird, stellt die Körperschalltransmission durch den Prüfkörper die dominierende Übertragungsform dar. Die rot dargestellte Wellenlinie symbolisiert den Körperschall.

Ein Beispiel für dieses Phänomen bei einem langen und mehrfach abgewinkelten Strömungspfad ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Um den Einfluss von Körperschall und Schalldämmung systematisch zu untersuchen, wurde der Prüfkörper für vier Messungen unterschiedlich vorbereitet:

1. Offenes Eingangsloch, Prüfkörper nicht gedämmt: Die Leckage war eindeutig detektierbar (siehe Abbildung 4-9).
2. Abgeklebtes Eingangsloch, Prüfkörper nicht gedämmt: Das Signal der Leckage war weiterhin erkennbar, was auf die Körperschallübertragung zurückgeführt werden kann.
3. Abgeklebtes Eingangsloch, Prüfkörper von innen schallgedämmt: Die Leckage war nicht mehr detektierbar, da die innenseitige Dämmung den Körperschall effektiv unterdrückt.
4. Offenes Eingangsloch, Prüfkörper von innen schallgedämmt: Auch bei geöffnetem Eingangsloch konnte das Signal nicht detektiert werden, was bestätigt, dass die Schalldämmung die Erkennung über Körperschall verhindert und die Leckage über den untersuchten Pfad nicht detektierbar ist.

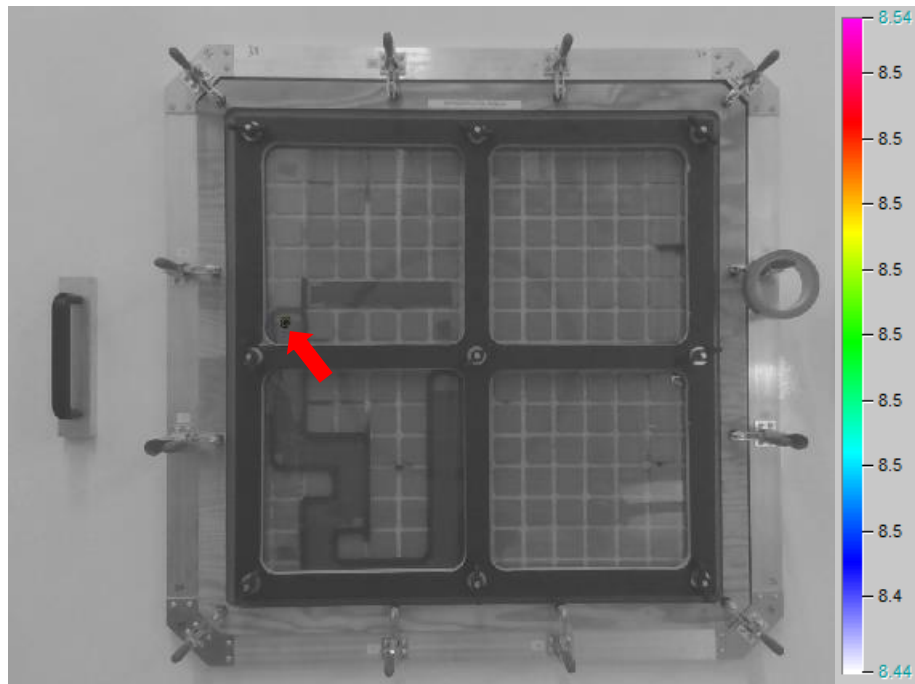


Abbildung 4-9: Akustische Karte des Prüfkörpers *Labyrinth* nach der Dämmung des Prüfstandes, Prüfkörper selbst ist nicht gedämmt. Schallübertragung durch Körperschall. Pfad: 3-6d4l2u1r2u2l4u-7. Frequenzbereich: 10,9 – 12,6 kHz. Dynamik: 0,1 dB

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Körperschallübertragung durch den Prüfkörper selbst einen kritischen Einflussfaktor darstellt. Durch die innenseitige Dämmung des Prüfkörpers kann der in Abbildung 4-8 beschriebene Störeinfluss des Körperschall eliminiert und damit eine valide, reproduzierbare und störungsfreie Leckagedetektion gewährleistet werden.

Sandwich

Auch beim Prüfkörper *Sandwich* stellt die Körperschallübertragung durch den Prüfkörper ein störendes Element dar (siehe Abbildung 4-10).

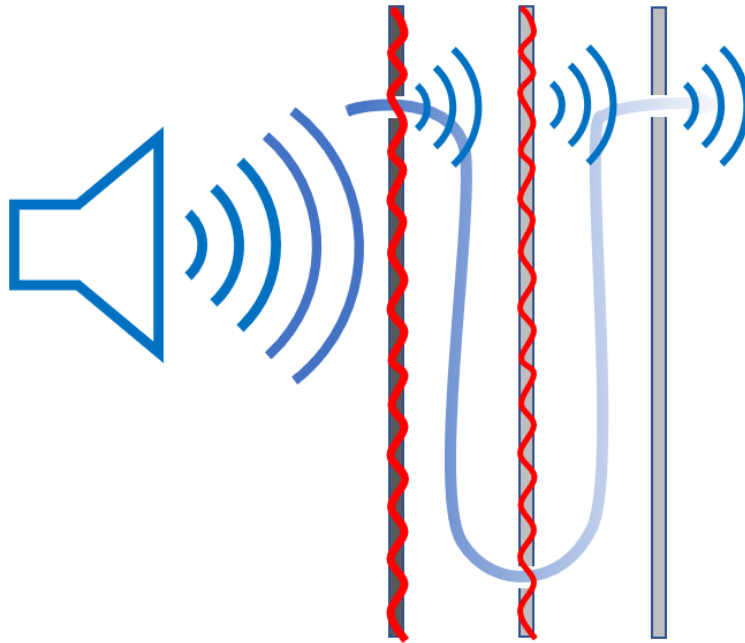


Abbildung 4-10: Skizze zur Veranschaulichung der Schallübertragung durch den Prüfkörper *Sandwich*. Der Schall wird teilweise über den Leckagepfad übertragen, jedoch stellt die Körperschalltransmission über die mittlere Ebene des Prüfkörpers die dominierende Übertragungsform dar. Die rot dargestellten Wellenlinien symbolisieren den Körperschall.

Abbildung 4-11 zeigt den aus drei Ebenen bestehenden Strömungspfad S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24 sowohl im offenen Zustand als auch mit abgeklebter Öffnung S7 in der zweiten Ebene. Trotz der Abdichtung ergibt sich in beiden Fällen nahezu identische akustische Karten. Dies verdeutlicht, dass die Leckage im abgeklebten Zustand nicht über den eigentlichen Strömungspfad detektiert wird, sondern den über den Prüfkörper weitergeleiteten Körperschall.

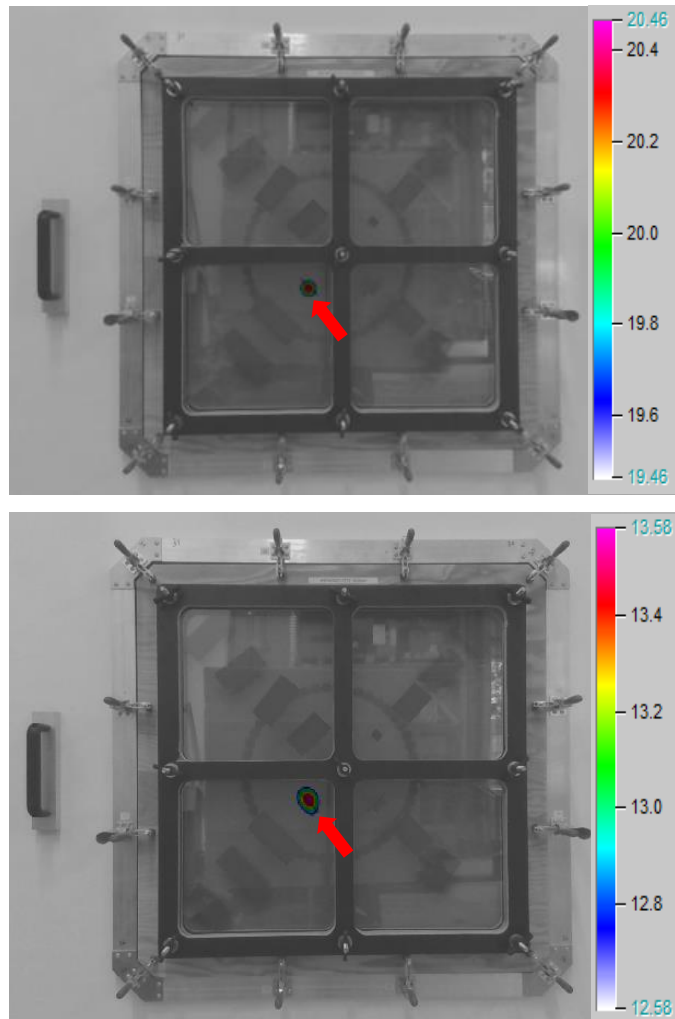


Abbildung 4-11: Akustische Karte des Prüfkörpers *Sandwich* im offenen (oben) sowie im abgeklebten Zustand (unten). Pfad: S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24. Frequenzbereich: 8 – 11,5 kHz. Dynamik: 1 dB

Um die Störeffekte durch den Körperschall zu minimieren, eignet sich das Schalldämmungsmaterial als Fixierelemente zwischen den Ebenen. Dadurch wird die erste Plexiglasscheibe fixiert und transmittiert weniger Körperschall auf die zweite Plexiglasscheibe. Das Dämmungsmaterial wurde so positioniert, dass der Schallweg möglichst wenig beeinträchtigt wird.

In Abbildung 4-12 werden die Messungen im offenen und abgeklebten Zustand der mittleren Ebene dargestellt. Es zeigt sich, dass die Leckage in beiden Zuständen eindeutig detektierbar ist, wobei Unterschiede in der Deutlichkeit des Signals, des Frequenzbereichs und der Dynamik auftreten. Im geschlossenen Zustand ist der detektierbare Frequenzbereich deutlich kleiner als im offenen Zustand. Trotz der Fixierelemente wird die Körperschallübertragung im geschlossenen Zustand nicht vollständig unterdrückt. Der Vergleich mit dem offenen Zustand verdeutlicht jedoch, dass die Signalüberlagerung reduziert wird, sodass das über den

Leckagepfad übertragende Signal klarer, über einen größeren Frequenzbereich, mit höherem Schalldruckpegel und größerer Dynamik detektiert werden kann. Wird der Dynamikbereich im abgeklebten Zustand erhöht, werden Störgeräusche sichtbar. Die beiden Skizzen in Abbildung 4-12 zeigen zusätzlich, dass bei offener Leckage sowohl der Strömungspfad als auch die Körperschalltransmission zur Detektion des Signals beitragen, während im geschlossenen Zustand ausschließlich Körperschall für die Detektion der Leckage verantwortlich ist.

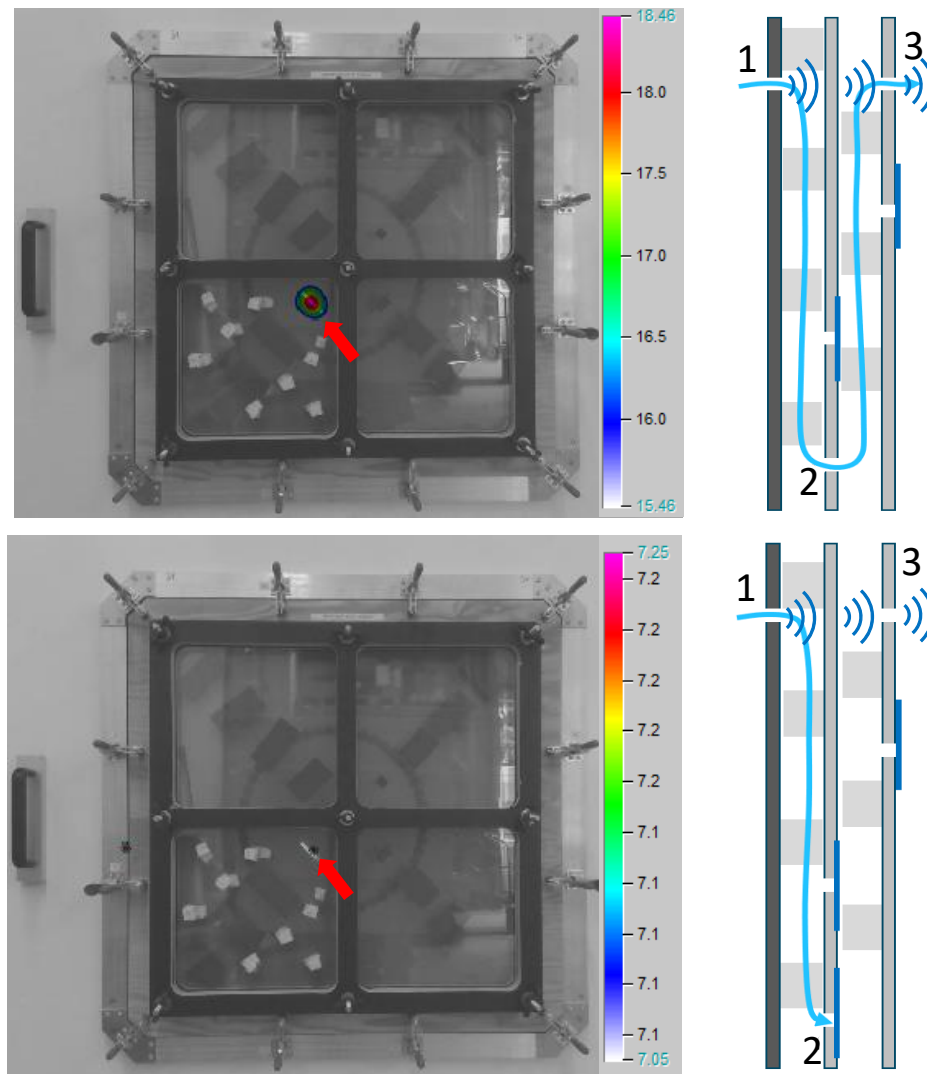


Abbildung 4-12: Akustische Karte des Prüfkörpers *Sandwich* im offenen (oben links) sowie im abgeklebten Zustand (unten links) mit Fixierelementen. Seitenansicht mit eingezeichnetem Strömungspfad im offenen (oben rechts) sowie im abgeklebten Zustand (unten rechts). Pfad: S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24. Frequenzbereich: 7,5 – 45 kHz (oben), 9,8 – 10,6 kHz (unten). Dynamik: 3 dB (oben), 0,2 dB (unten)

Wird anstelle der Leckageöffnung in der ersten Plexiglasscheibe die Eingangsöffnung luftdicht verschlossen, ist kein Signal an der Ausgangsöffnung zu erkennen. Demnach ist nicht der gesamte Prüfkörper, sondern nur die erste Plexiglasscheibe für den Körperschall verantwortlich.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Körperschall durch das Auftreffen des Schalls auf die erste Plexiglasscheibe angeregt wird (siehe Abbildung 4-10).

Wird der Leckagepfad um eine weitere Ebene erweitert, spielt die Position der Leckage in dieser Ebene eine große Rolle für die Erkennbarkeit eines Signals. Befindet sich die Leckage an den Positionen p3, p2 oder p1, ist kein Signal erkennbar. Wie in Abbildung 4-13 dargestellt, ist die Leckage jedoch auf der Position p0 detektierbar. Folglich stellt der abgebildete Pfad den längstmöglichen Leckageweg innerhalb dieses Prüfkörpers bei Schlitzdimensionen von 7 mm Breite und 60 mm Länge sowie Schichtabständen von 24 mm bzw. 21 mm bei einer Konfiguration aus vier Schichten dar.

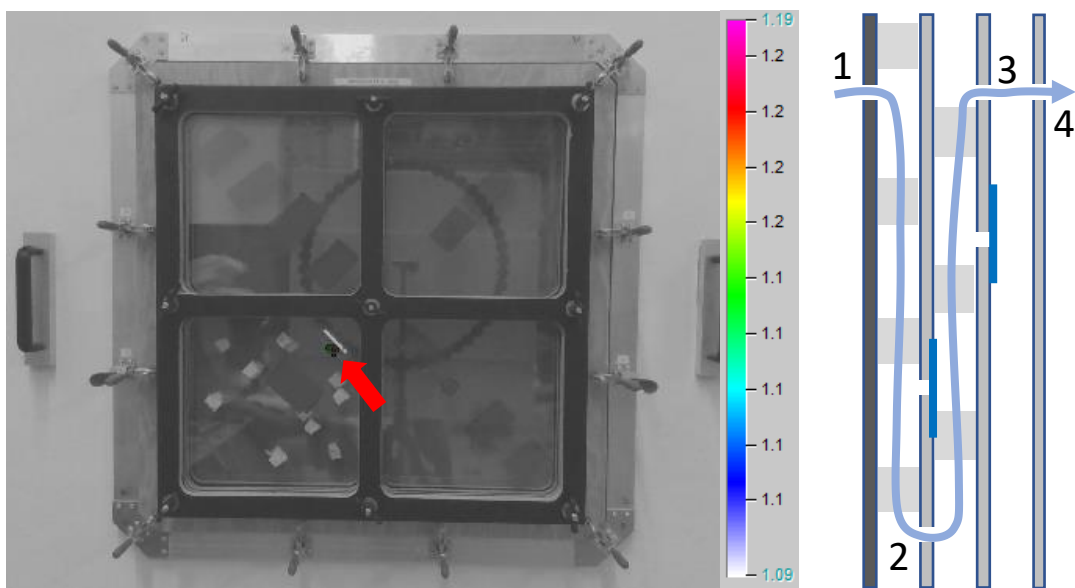


Abbildung 4-13: Akustische Karte des Prüfkörpers *Sandwich* (links). Seitenansicht mit eingezeichnetem Strömungspfad (rechts). Pfad: S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24-S7-p1-t21. Frequenzbereich: 15,75 – 23,25 kHz. Dynamik: 0,1 dB

In einem weiteren Versuchsaufbau des Prüfkörpers *Sandwich* wurden Leckagepfade mit 3 mm breiten Schlitten realisiert. Wie in Abbildung 4-12 wird der gleiche Pfad in Abbildung 4-14 dargestellt, jedoch mit einer Schlitzbreite von 3 statt 7 mm. Dabei benötigt diese Messung keine Fixierungselemente zwischen den Ebenen, da bei einer abgeklebten Leckage in der mittleren Ebene kein Signal erkennbar ist. Dies deutet darauf hin, dass durch die Verringerung des Eingangsschlitzes nicht mehr genügend Schall auf die erste Plexiglasscheibe gelangt, um Körperschall anzuregen, der von der akustischen Kamera als Signal erfasst wird. Wie in Abbildung 4-14 dargestellt, ist die Leckage auch mit 3 mm breiten Schlitten eindeutig erkennbar. Eine Untersuchung mit vier Ebenen wurde nicht durchgeführt, da bereits die Reduktion der Schlitzbreite von 7 auf 3 mm in Abbildung 4-13 in der vierten Ebene keine Detektion des Signals mehr zuließ.

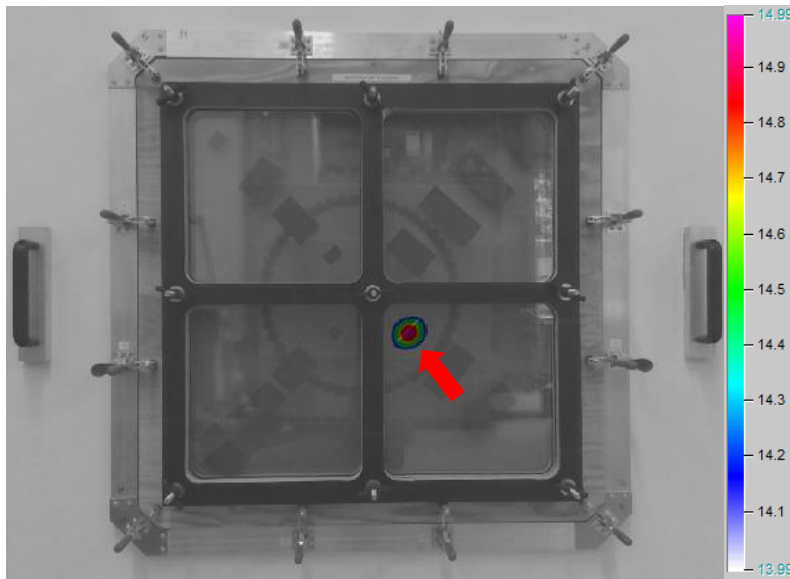


Abbildung 4-14: Akustische Karte des Prüfkörpers *Sandwich* (links). Seitenansicht mit eingezeichnetem Strömungspfad (rechts). Pfad: S3-S3-p3-t24-S3-p0-t24. Frequenzbereich: 7,5 – 45 kHz. Dynamik: 1 dB

Vor der Schalldämmung des Prüfstandes war der Pfad S7-S7-p2-t24-S7-p0-t24 der längste gemessene Leckagepfad, der eine eindeutige Leckage erkennen ließ. Demnach können durch die Schalldämmung sowohl längere Leckagewege als auch Pfade mit kleineren Eingangs-, Durchgangs- und Austrittsleckagen eindeutig detektiert werden. Des Weiteren ist es möglich, Leckagen mit vier Ebenen zu erkennen.

4.4 Ultraschall

Zur Durchführung von Ultraschallmessungen im hohen Frequenzbereich wurde das *SONAPHONE T* in Kombination mit der *SONOSPHERE* eingesetzt, welche bei einer Frequenz von 40 kHz einen Schalldruckpegel von 120 dB abstrahlt.

In dieser Untersuchung wurden auf dem Prüfkörper *Spanplatte* gezielt die Durchgangslöcher untersucht. Dabei variierten sowohl die Position der akustischen Kamera außerhalb des Prüfstandes als auch der Abstand der *SONOSPHERE* im inneren des Prüfstandes zum Prüfkörper. Die Höhe der *SONOSPHERE* wurde stets so eingestellt, dass sie der Höhe der untersuchten Leckage entsprach. Nicht untersuchte Leckagen wurden mit luftdichtem Klebeband verschlossen.

Befand sich die akustische Kamera in der Standardposition mit einem Abstand von 1,5 m und die *SONOSPHERE* in einem Abstand von 90 cm zur Prüfkörperoberfläche, konnte die 3,3 mm Leckage eindeutig detektiert werden (siehe Abbildung 4-15).

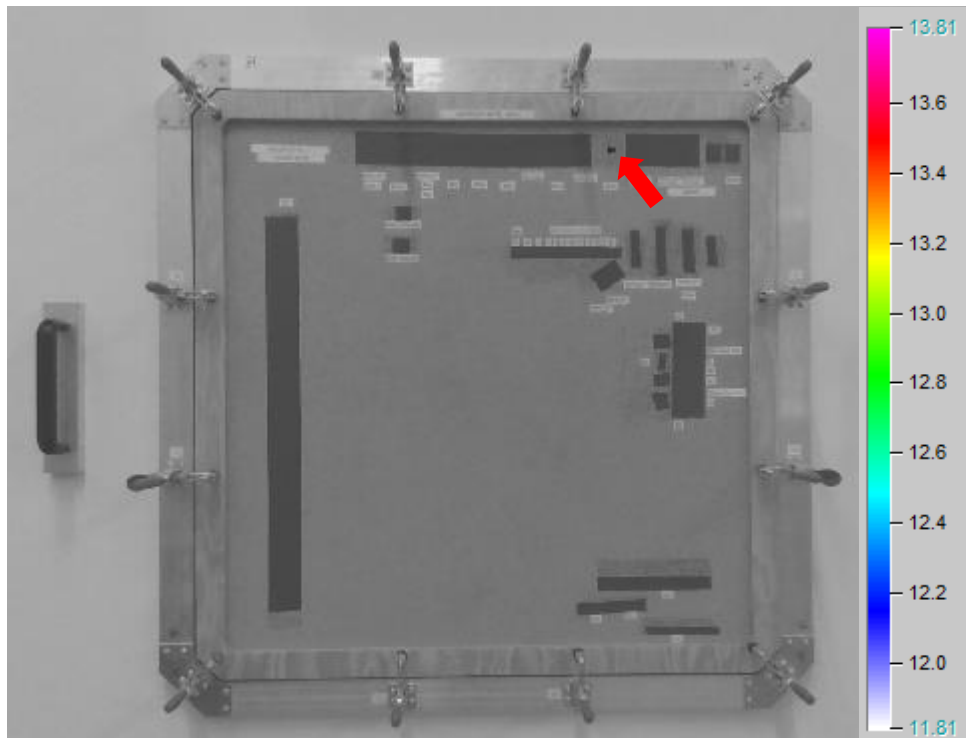


Abbildung 4-15: Akustische Karte einer Ultraschallmessung. Leckage: 3,3 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: *Spanplatte*. Frequenz: 40 kHz. Dynamik: 2 dB

Bei identischem Versuchsaufbau war die 2 mm Leckage hingegen nicht erkennbar. Auch eine Verringerung des Abstandes der *SONOSPHERE* zur Leckage auf 40 cm führte zu keiner eindeutigen Detektion. Erst bei einer Positionierung der *SONOSPHERE* unmittelbar vor der Leckage konnte diese klar identifiziert werden (siehe Abbildung 4-16).

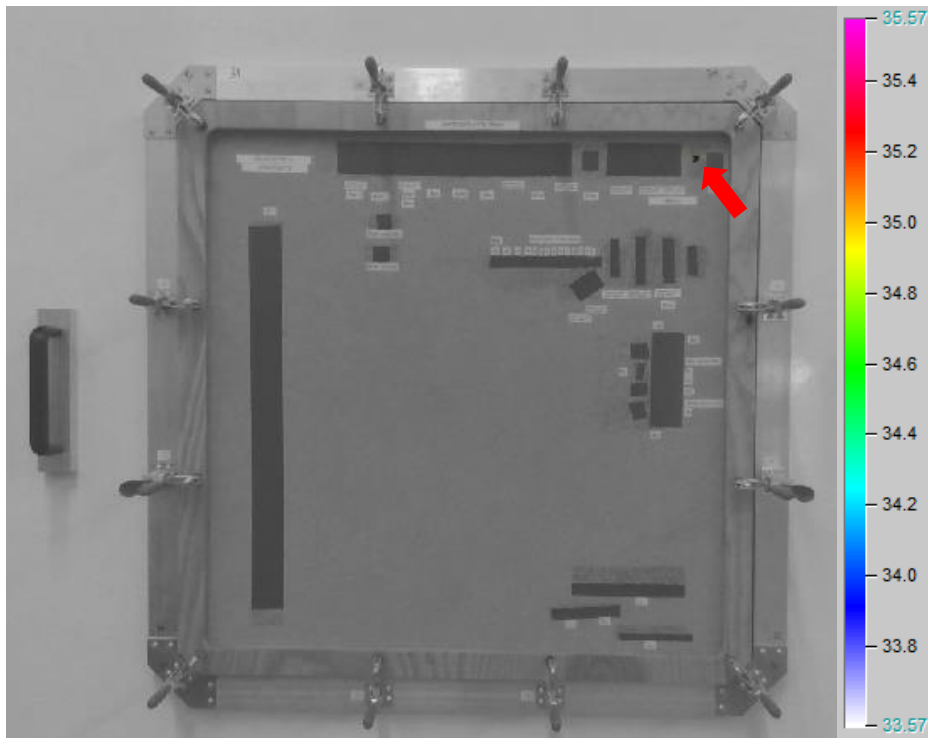


Abbildung 4-16: Akustische Karte einer Ultraschallmessung. Leckage: 2 mm Durchgangsloch. Prüfkörper: *Spanplatte*. Frequenz: 40 kHz. Dynamik: 2 dB

In einem weiteren Versuch wurde der Einfluss der Position der akustischen Kamera untersucht. Dafür wurde die *SONOSPHERE* wieder in 40 cm Entfernung zur Leckage positioniert, während die Kamera auf einem Radius von 1,5 m um 45° nach links verschoben wurde. Unter diesen Bedingungen gelang eine klare Detektion der 2 mm-Leckage (siehe Abbildung 4-17).

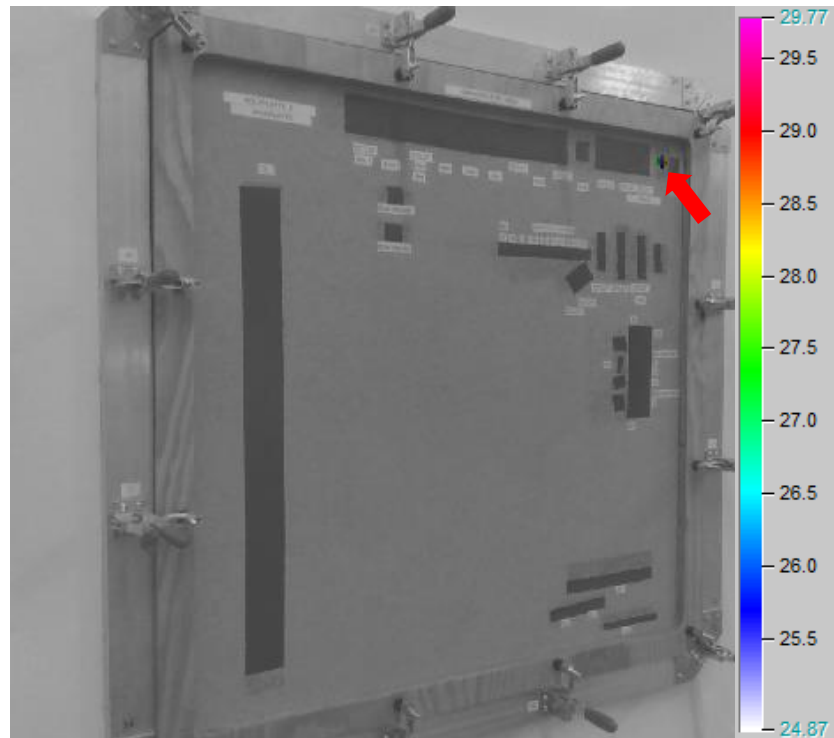


Abbildung 4-17: Akustische Karte einer Ultraschallmessung bei einer Verschiebung der akustischen Kamera um 45° zum Prüfkörper. Leckage: 2 mm Durchgangsloch.
Prüfkörper: *Spanplatte*. Frequenz: 40 kHz. Dynamik: 5 dB

Eine zu einem späteren Zeitpunkt unter identischen Bedingungen durchgeführte Wiederholungsmessung erbrachte jedoch kein detektierbares Signal. Beim Vergleich der beiden Messungen konnte kein Fehler gefunden werden, der diesen Unterschied hätte erklären können. Damit erwiesen sich die in Abbildung 4-17 dargestellten Konfigurationen als nicht reproduzierbar. Dieses deutet im Ergebnis darauf hin, dass Ultraschallmessungen eine hohe Empfindlichkeit gegenüber den gewählten Messparametern aufweisen und eine äußerst präzise Einstellung aller Parameter erfordern, um konsistente Resultate zu erzielen. Es zeigt auch, dass die Untersuchung der akustischen Leckagedetektion im Ultraschallbereich noch Potential für weitere Forschungen bietet.

4.5 Einfluss von unterschiedlichen Frequenzen für die Detektion verschiedener Leckagearten

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Frequenzen auf die Detektion der verschiedenen Kanallängen des in dieser Arbeit hergestellten *Z-Kanal*-Prüfkörpers (siehe Kapitel 3.1.2) wurde jeder Leckagepfad mit quadratischem Querschnitt für alle vier Lochdurchmesser akustisch vermessen und nach einem definierten Verfahren ausgewertet. Dabei wurde besonderen Wert auf eine reproduzierbare Messmethodik gelegt, um

sicherzustellen, dass die gewonnenen Daten sowohl zwischen den unterschiedlichen Pfadlängen als auch zwischen den verschiedenen Lochgrößen vergleichbar sind.

Um diese Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde für alle Messungen die obere Grenze des betrachteten Frequenzbereichs auf 45 kHz festgelegt, da oberhalb dieses Wertes keine Signale mehr detektiert werden konnten. Zudem sind die Diagramme in dieser Form für zukünftige Untersuchungen mit dem *SONAPHONE T* in Kombination mit der *SONOSPHERE* erweiterbar. Die untere Frequenzgrenze des analysierten Spektrums wurde hingegen abhängig vom jeweiligen Auswerteschritt angepasst, um sowohl schwache Signale als auch Störgeräusche adäquat zu berücksichtigen:

1. Kleinsten Frequenzbereich (FB) mit Störgeräuschen (SG) (Symbol ▲)

Für die Bestimmung des kleinsten detektierbaren FB unter Einbeziehung von SG wird die untere Frequenzgrenze im Spektrum soweit nach unten geschoben, bis die Leckage in der akustischen Karte bei einer Dynamik von 1 dB erstmals sichtbar ist, auch wenn gleichzeitig SG sichtbar sind. Beispielsweise liegt bei einer 6 mm Leckage mit 60 mm Pfadlänge die linke Frequenzgrenze bei 20,25 kHz (siehe Abbildung 4-18). Dieser Wert wird in der späteren Darstellung (siehe Abbildung 4-22) mit einem *Dreieck* markiert, um die Auswerteschritte nachvollziehbar zu machen und die Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Messreihen zu gewährleisten.

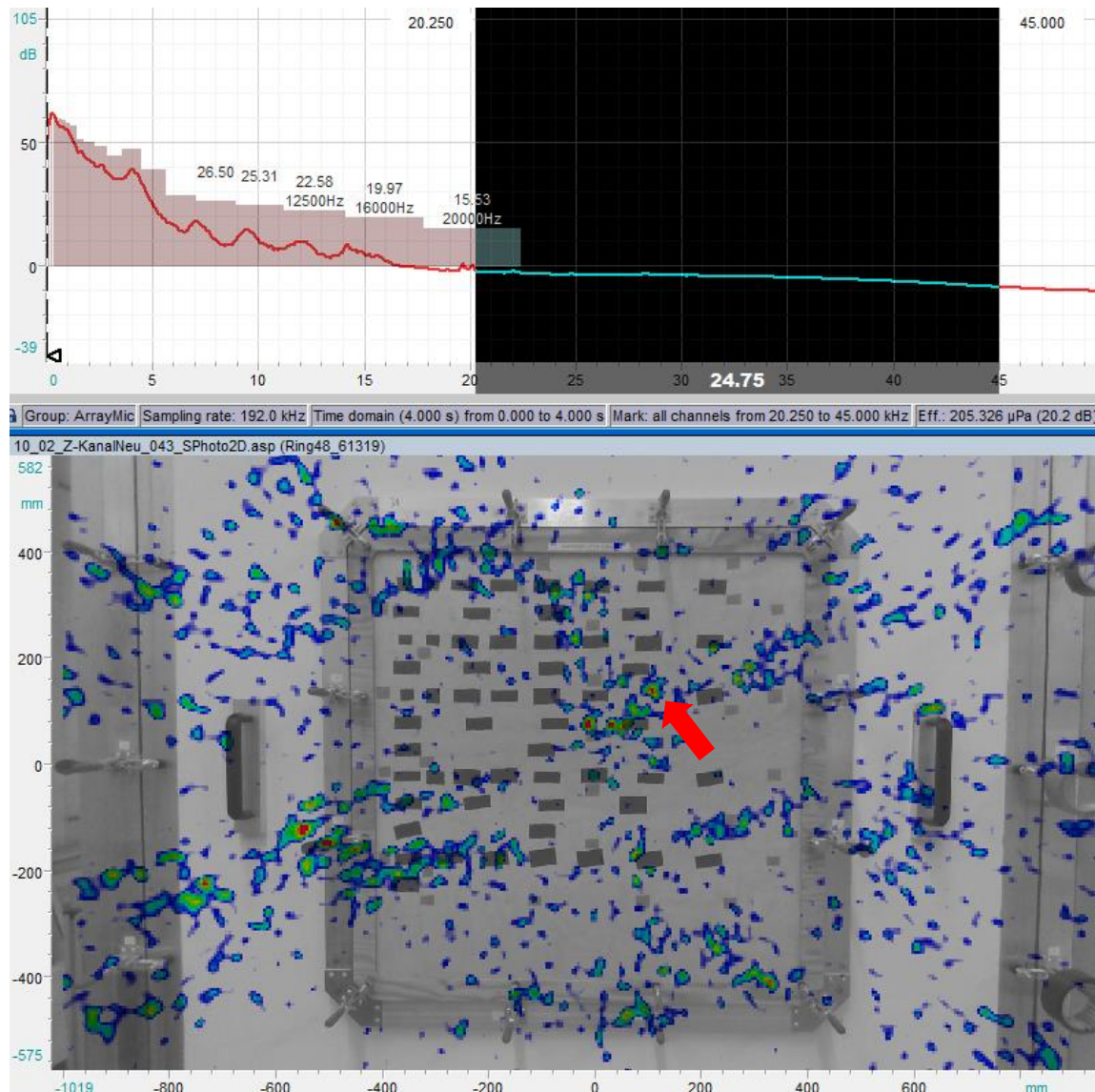


Abbildung 4-18: Kleinster FB mit SG, bei dem die Leckage erstmals erkennbar ist. In der Auswertung mit einem *Dreieck* markiert. Prüfkörper: Z-Kanal. Leckage: 6 mm. Pfadlänge: 60 mm

2. Kleinster FB ohne SG (Symbol ●)

Aufbauend auf dem zuvor bestimmten kleinsten FB mit SG wird die untere Frequenzgrenze nun so weit wie möglich nach unten verschoben, bis bei einer Dynamik von 1 dB keine SG mehr erkennbar sind und die Leckage eindeutig identifiziert werden kann (siehe Abbildung 4-19). Die Anpassung der unteren Grenze erfolgt schrittweise, wobei kontinuierlich überprüft wird, ob das Leckagesignal klar sichtbar bleibt. Beispielsweise liegt bei der gleichen 6 mm-Leckage mit einer Pfadlänge von 60 mm dieser Wert bei 16,594 kHz. In der späteren Auswertung wird dieser Grenzwert durch einen *Kreis* dargestellt.

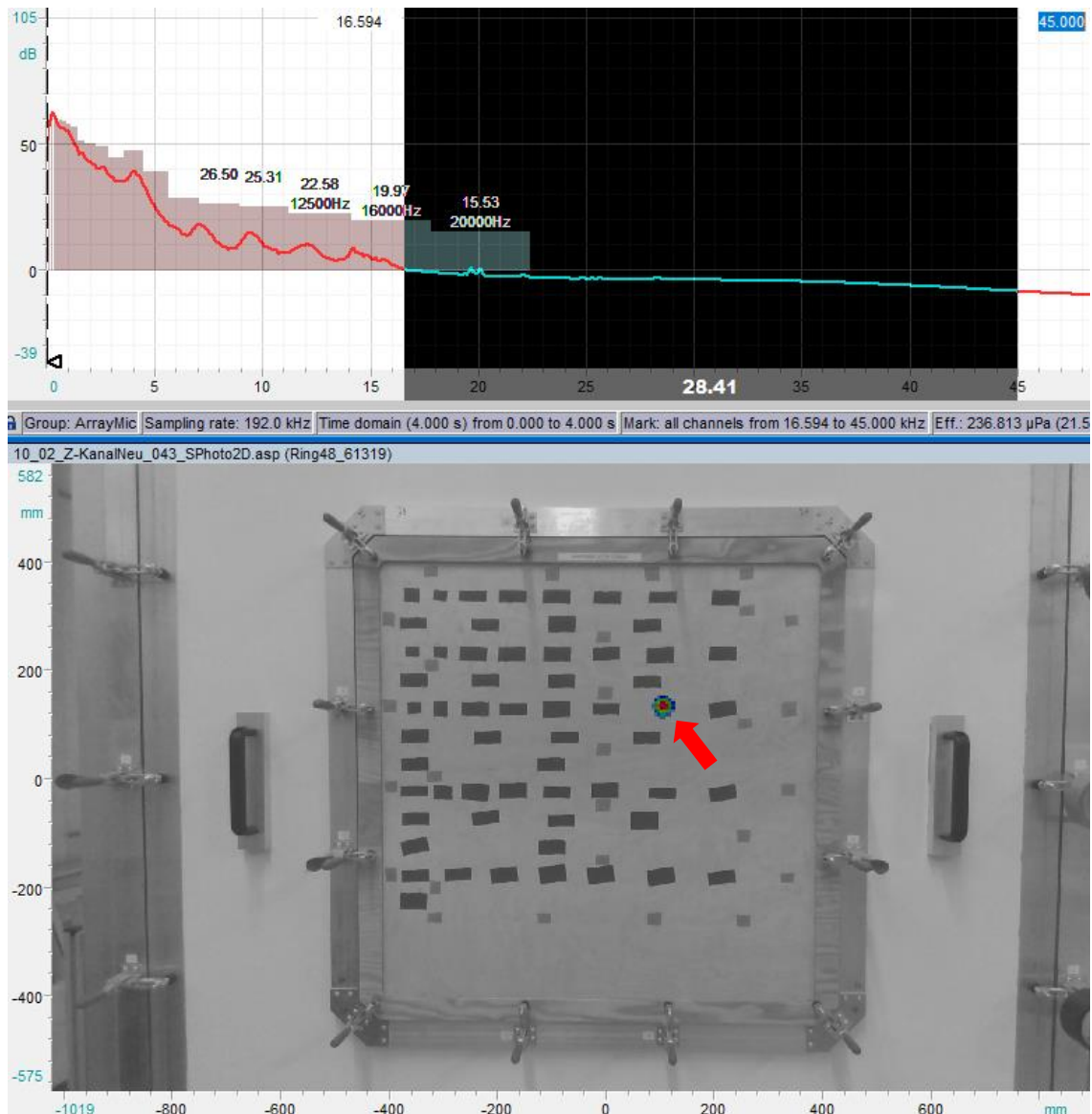


Abbildung 4-19: Kleinster FB ohne SG, bei dem die Leckage eindeutig identifiziert werden kann. In der Auswertung mit einem *Kreis* markiert. Prüfkörper: Z-Kanal.
Leckage: 6 mm. Pfadlänge: 60 mm

3. Größter FB ohne SG (Symbol ■)

Um den größtmöglichen FB ohne SG zu bestimmen, wird die untere Frequenzgrenze so weit nach unten verschoben, bis der letzte Frequenzwert erreicht ist, bevor die SG bei einer Dynamik von 1 dB wieder erkennbar sind (siehe Abbildung 4-20). Beispielsweise liegt der Wert für die bereits beschriebene 6 mm-Leckage bei 4,594 kHz. In der späteren Auswertung wird diese untere Grenze durch ein *Viereck* dargestellt.

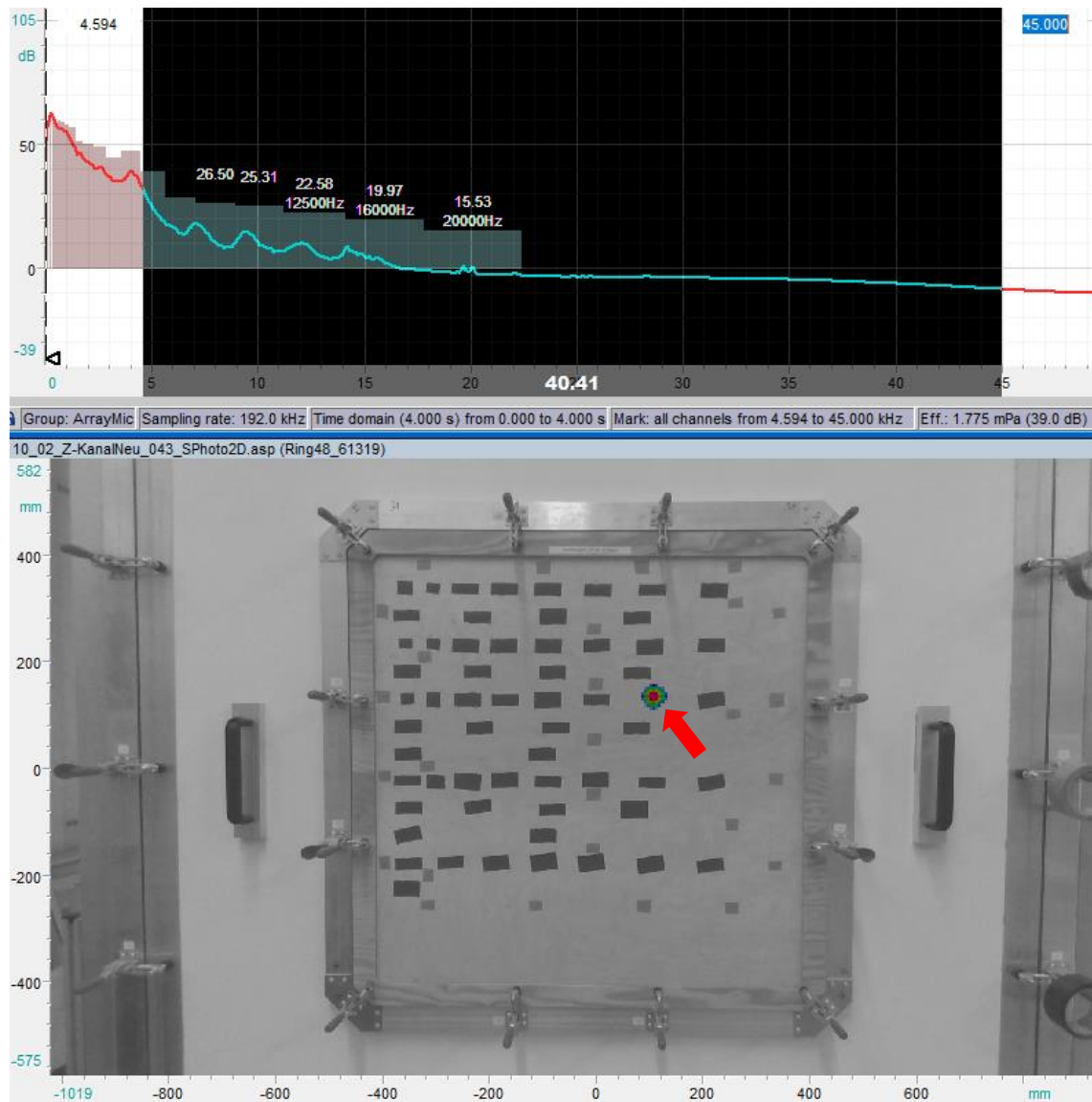


Abbildung 4-20: Größter FB ohne SG, bei dem die Leckage eindeutig identifiziert werden kann. In der Auswertung mit einem *Viereck* markiert. Prüfkörper: Z-Kanal.
Leckage: 6 mm. Pfadlänge: 60 mm

4. Größter FB mit SG (Symbol ★)

Ausgehend auf dem zuvor bestimmten FB ohne SG wird die untere Frequenzgrenze weiter nach unten verschoben, bis die Leckage bei einer Dynamik von 1 dB trotz der nun einsetzenden SG zuletzt sichtbar bleibt (siehe Abbildung 4-21). Für die beispielhaft betrachtete 6 mm-Leckage liegt diese untere Grenzfrequenz bei 4,313 kHz und wird in der späteren Auswertung durch einen *Stern* dargestellt.

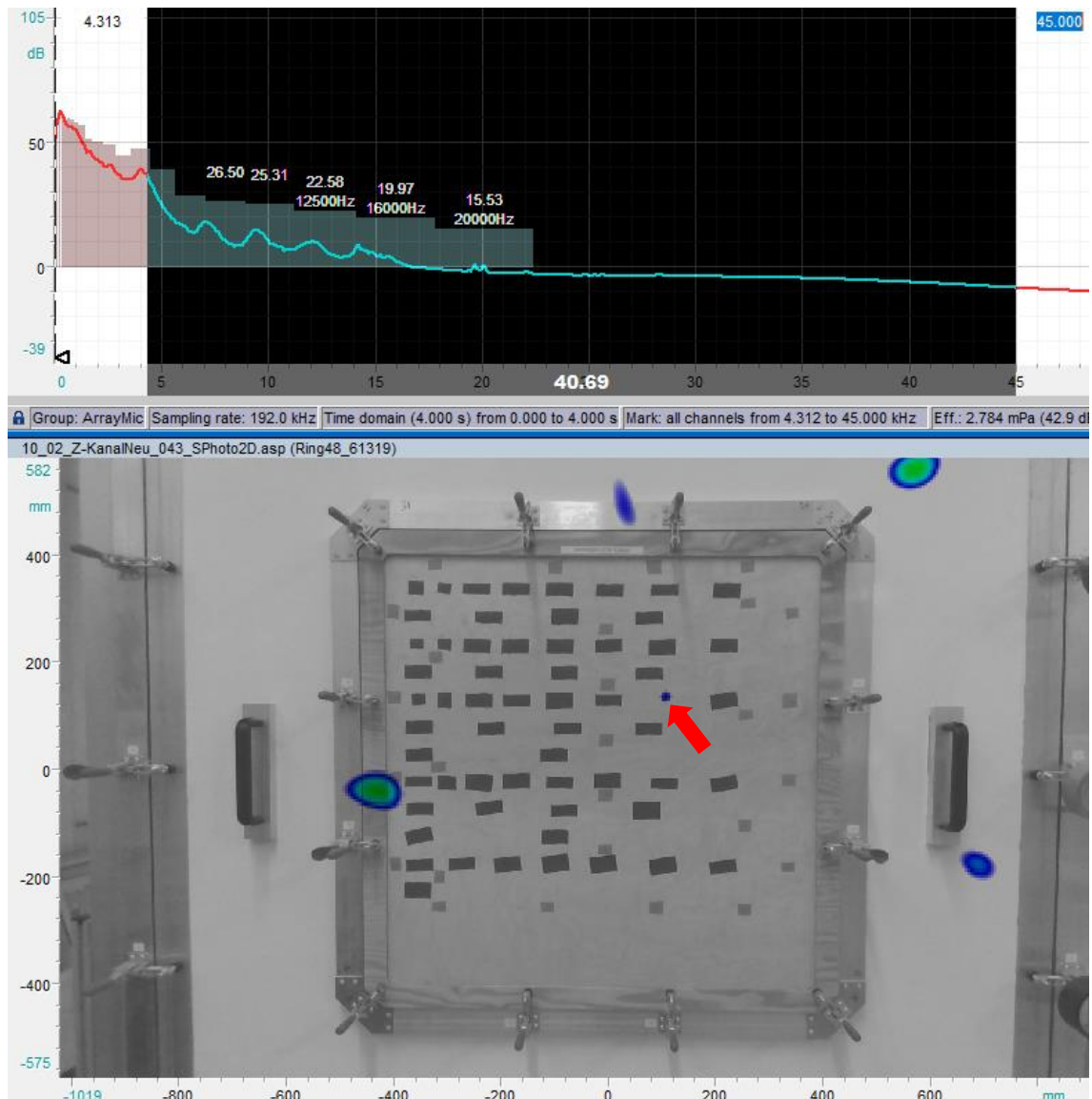


Abbildung 4-21: Größter FB mit SG, bei dem die Leckage zuletzt noch erkennbar ist. In der Auswertung mit einem *Stern* markiert. Prüfkörper: *Z-Kanal*. Leckage: 6 mm. Pfadlänge: 60 mm

Die Auswertung für jede Kanallänge und Lochgröße wird in einem Diagramm dargestellt, in dem die untere Frequenzgrenze mit den jeweiligen Symbolen über der Pfadlänge aufgetragen ist. In Abbildung 4-22 ist die beispielhafte Auswertung der 6 mm Leckage mit Pfadlänge 60 mm dargestellt. Dabei kennzeichnet die durchgezogene Linie zwischen *Kreis* und *Viereck* den Bereich der eindeutigen Identifizierung und eine gepunktete Linie den Bereich mit SG. Zusätzlich sind die Symbole *Kreis* und *Viereck* farbcodiert, um den gemessenen Schalldruckpegel an dieser Stelle darzustellen. Die Symbole *Dreieck* und *Stern* sind hingegen schwarz dargestellt, da eine Schalldruckpegelanalyse in diesen Fällen aufgrund der nur schwach detektierbaren Leckage mit niedrigem Schalldruckpegel nicht sinnvoll ist.

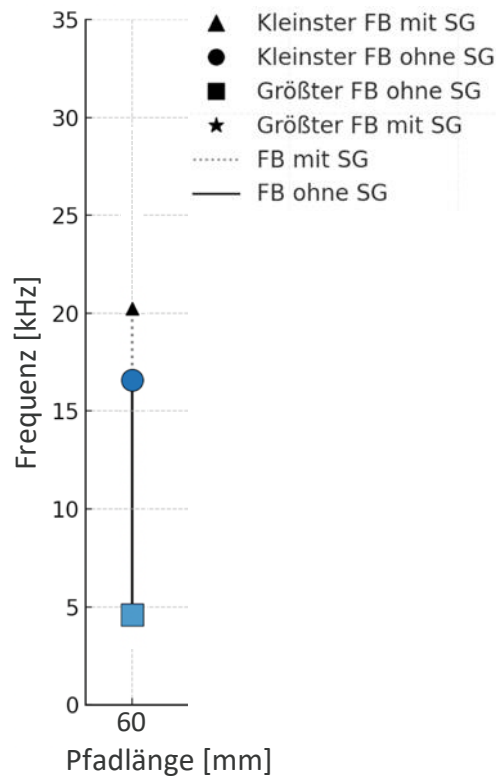


Abbildung 4-22: Beispielhafte Auswertung der 6 mm Leckage mit Pfadlänge 60 mm. Darstellung der FB mit und ohne SG sowie der zugehörigen Symbole. Das Symbol *Stern* ist hier vom Symbol *Viereck* überlagert.

Um die Schalldruckpegelwerte verschiedener Frequenzbereiche vergleichbar zu machen, wurde zunächst eine Referenzmessung ohne eingesetzten Prüfkörper durchgeführt. Die Referenz dient der frequenzabhängigen Normalisierung der Messwerte. Da der Schalldruckpegel eine Funktion der Frequenz ist, könnte beispielsweise der Pegel einer kleinen Leckage bei tiefen Frequenzen größer erscheinen als das Signal einer großen Leckage bei höheren Frequenzen. Um diesen Effekt zu vermeiden, wird für jede Frequenz der gemessene Schalldruckpegel im Verhältnis zu einem Referenzwert bei derselben Frequenz gesetzt. Dieser Referenzwert wurde näherungsweise durch eine Messung mit komplett entferntem Prüfkörper ermittelt.

Im Rahmen der Referenzmessung wird das Frequenzspektrum erfasst und auf dieser Basis eine akustische Karte erstellt, sodass der Schalldruckpegel für beliebige Frequenzbereiche bestimmt werden kann. Zur Normierung der Messwerte auf diesen Referenzwert werden die ermittelten Schalldruckpegel unter Anwendung der umgestellten Gleichung (2.4) und unter Berücksichtigung des Referenzwertes p_0 mit $2 \cdot 10^{-5}$ Pa zunächst in Pascal umgerechnet:

$$p = p_0 \cdot 10^{\frac{L}{20}} \quad (4.1)$$

Anschließend wird das Verhältnis p/p_R gebildet, wobei p den Schalldruckpegel des untersuchten Pfades und p_R den entsprechenden Referenzwert bei gleicher Frequenz darstellt. Dieses

Verhältnis wird wiederum in Gleichung (2.4) eingesetzt, um den Schalldruckpegelunterschied in dB zu berechnen. Ein negativer Wert zeigt dabei an, um wie viel dB der Schalldruckpegel im Vergleich zur Referenzmessung bei gleicher Frequenz abgenommen hat.

Werden diese Auswertungsmethoden auf alle Pfadlängen angewendet, entsteht für jeden Lochdurchmesser ein Diagramm, das die ermittelten unteren Frequenzgrenzen und Schalldruckpegeln in Abhängigkeit von der Pfadlänge darstellt. In den Abbildungen ist zusätzlich eine Grenze eingetragen, die durch einen grauen Hintergrund markiert ist und Bereiche kennzeichnet, die mit einer Dynamik von weniger als 1 dB ausgewertet wurden. Die Position dieser Grenze liegt stets zwischen der letzten bei 1 dB detektierten Pfadlänge und der ersten mit geringerer Dynamik erfassten Pfadlänge und wurde innerhalb dieses Bereichs frei gewählt. Diese Darstellung ermöglicht sowohl die Analyse der Messergebnisse bei einer festgelegten Dynamik als auch eine Einschätzung des Potenzials, längere Pfadlängen durch eine Reduzierung der Dynamik zu detektieren. Eine detaillierte Begründung für die Wahl des Dynamikbereichs von 1 dB befindet sich im Anhang (siehe Abbildung A-1).

Die maximal detektierbaren Pfadlängen bei einer Dynamik von 1 dB unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser:

- 3 mm: 30 mm (siehe Abbildung 4-23). Bei 20 mm und 60 mm konnten keine Signale detektiert werden, vermutlich aufgrund von Messungenauigkeiten wie Unebenheiten im Prüfkörper. Die Pfadlängen 40, 50 und 70 mm wurden bei einer Dynamik von 0,5 dB ausgewertet. Die Auswertungen mit reduzierter Dynamik verdeutlichen, dass sich dadurch auch längere Pfadlängen erfassen lassen. Bei einem Lochdurchmesser von 3 mm ermöglicht die Halbierung der Dynamik die Detektion einer mehr als doppelt so langen maximalen Pfadlänge von 70 mm.

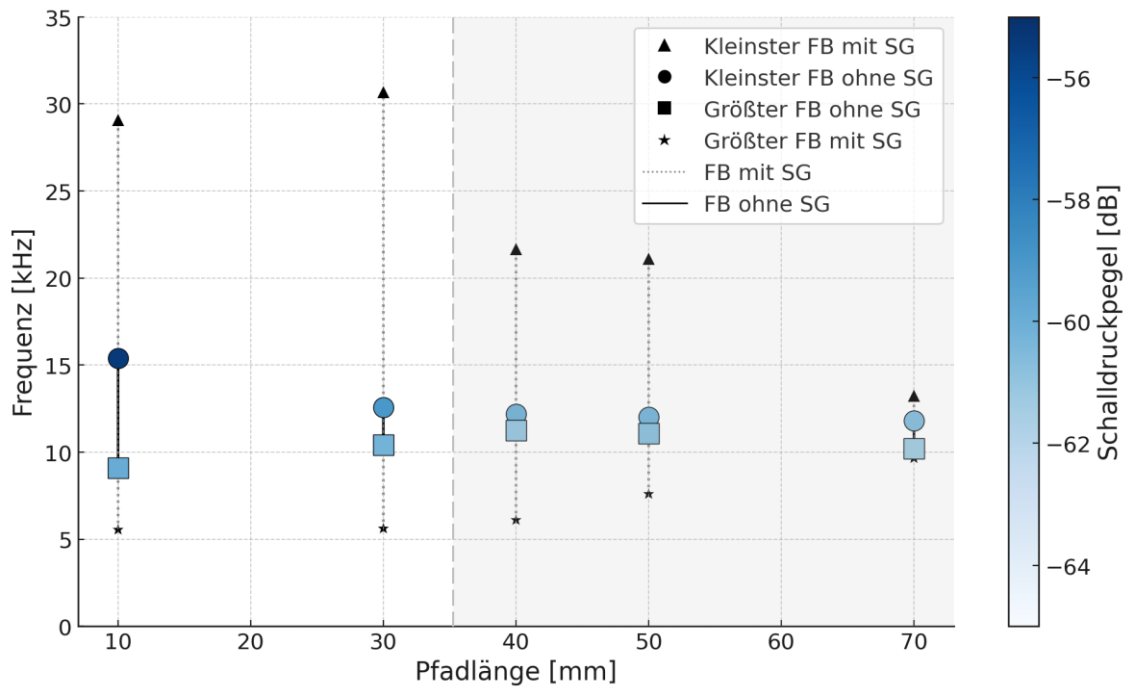


Abbildung 4-23: Ermittelte untere Frequenzgrenze und zugehöriger Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Lochdurchmesser: 3 mm. Obere Frequenzgrenze: 45 kHz. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,5 dB (grauer Hintergrund)

- 4 mm: 70 mm (siehe Abbildung 4-24). Die Pfadlängen 80, 90, 100 und 150 mm wurden bei einer Dynamik von 0,5 dB ausgewertet. Auch hier kann die detektierbare Pfadlänge durch Halbierung der Dynamik von 70 auf 150 mm mehr als verdoppelt werden.

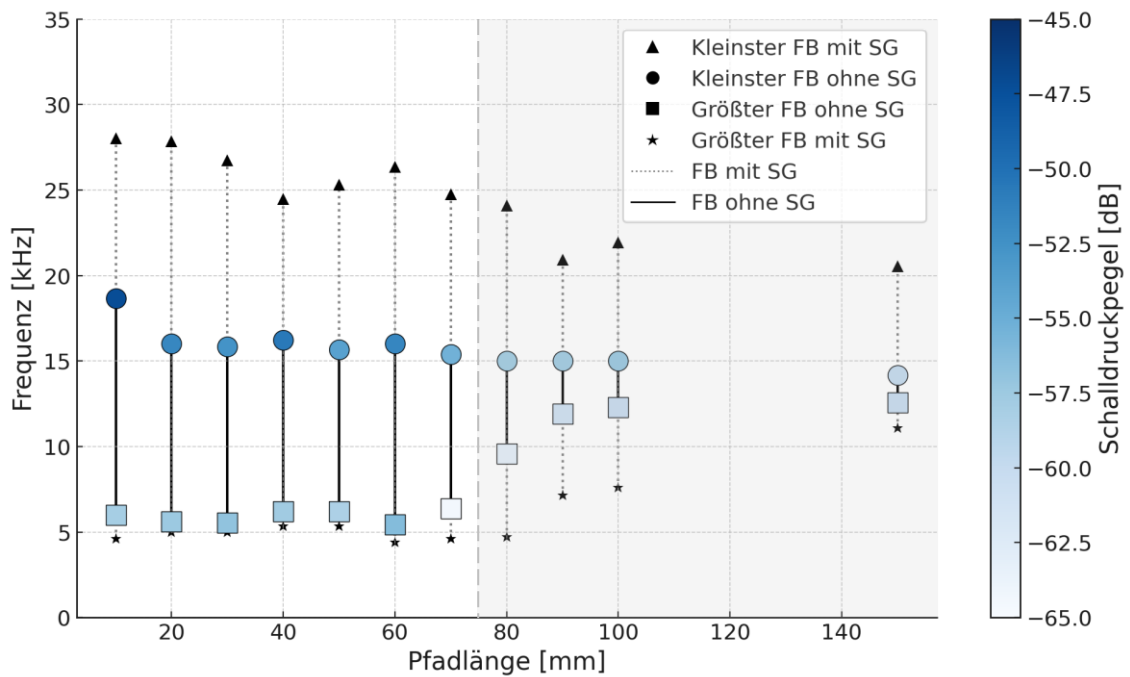


Abbildung 4-24: Ermittelte untere Frequenzgrenze und zugehöriger Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Lochdurchmesser: 4 mm. Obere Frequenzgrenze: 45 kHz. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,5 dB (grauer Hintergrund)

- 6 mm: 250 mm (siehe Abbildung 4-25). Die Pfadlänge von 350 mm kann bei einer reduzierten Dynamik von 0,1 dB kann nur noch mit SG detektiert werden.

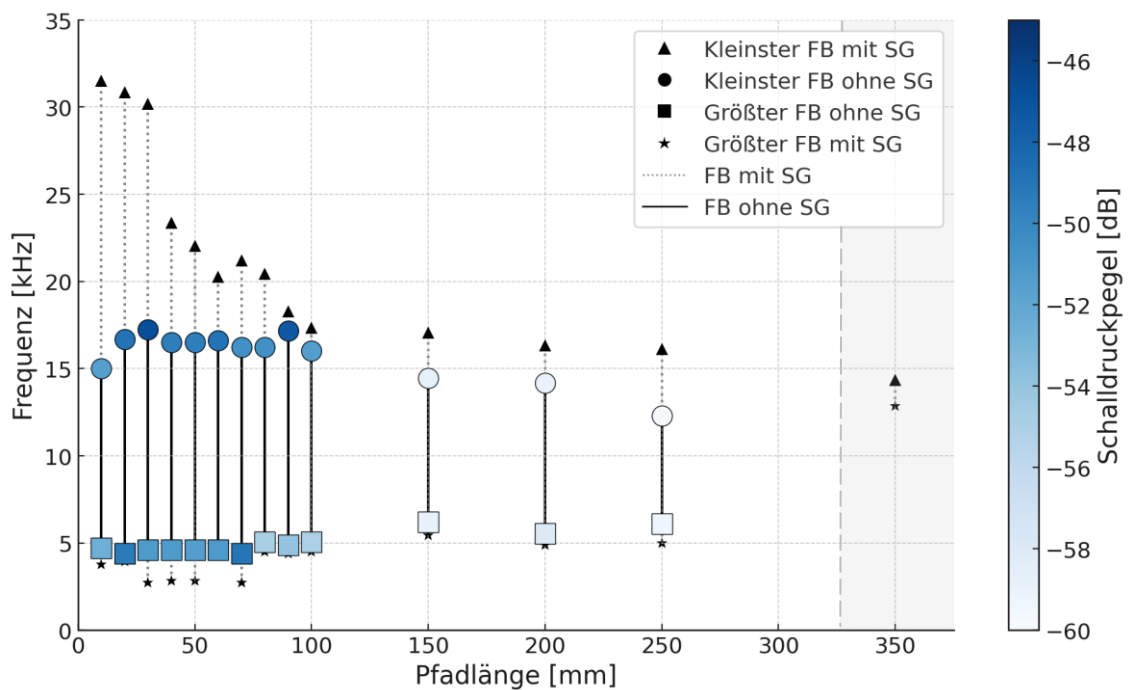


Abbildung 4-25: Ermittelte untere Frequenzgrenze und zugehöriger Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Lochdurchmesser: 6 mm. Obere Frequenzgrenze: 45 kHz. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,1 dB (grauer Hintergrund)

- 8 mm: 350 mm (siehe Abbildung 4-26). Die Pfadlänge von 450 mm kann noch bei einer bei Dynamik von 0,3 dB ausgewertet werden.

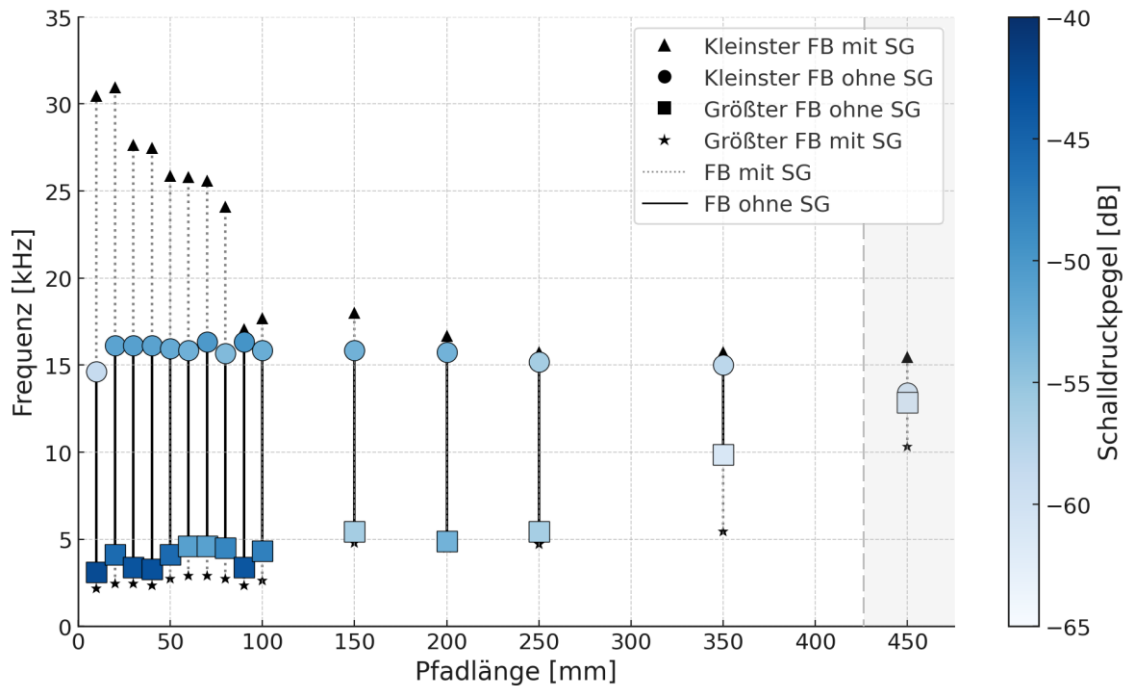


Abbildung 4-26: Ermittelte untere Frequenzgrenze und zugehöriger Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Lochdurchmesser: 8 mm. Obere Frequenzgrenze: 45 kHz. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,3 dB (grauer Hintergrund)

Unabhängig vom Lochdurchmesser zeigt sich, dass der detektierte Schalldruckpegel mit zunehmender Pfadlänge abnimmt. Dies deutet darauf hin, dass längere Leckagepfade durch Energieverluste entlang des Pfades eine verstärkte Dämpfung des Schallsignals verursachen. Darüber hinaus weisen größere Lochdurchmesser in der Regel einen höheren detektierten Schalldruckpegel auf, was damit zusammenhängen könnte, dass durch größere Öffnungen mehr Luftvolumen transportiert wird und dadurch stärkere Schallsignale entstehen.

Mit Blick auf die Frequenzbereiche fällt auf, dass sich der kleinste detektierbare FB jeweils sowohl mit als auch ohne SG mit zunehmender Pfadlänge zu niedrigeren Frequenzen verschiebt. Der größte FB hingegen nimmt mit zunehmender Pfadlänge tendenziell zu und bewegt sich zu höheren Frequenzen. Insgesamt verengt sich der gesamte detektierte FB mit zunehmender Pfadlänge, da sich die beiden Grenzen einander annähern.

Ein Vergleich aller Lochdurchmesser bei einer Dynamik von 1 dB in Abbildung 4-27 verdeutlicht zudem, dass sich der detektierbare FB ohne SG für alle Pfadlängen überwiegend im Bereich zwischen 10 und 12,5 kHz befindet. Dies weist darauf hin, dass Leckagen in diesem FB besonders zuverlässig detektiert werden können.

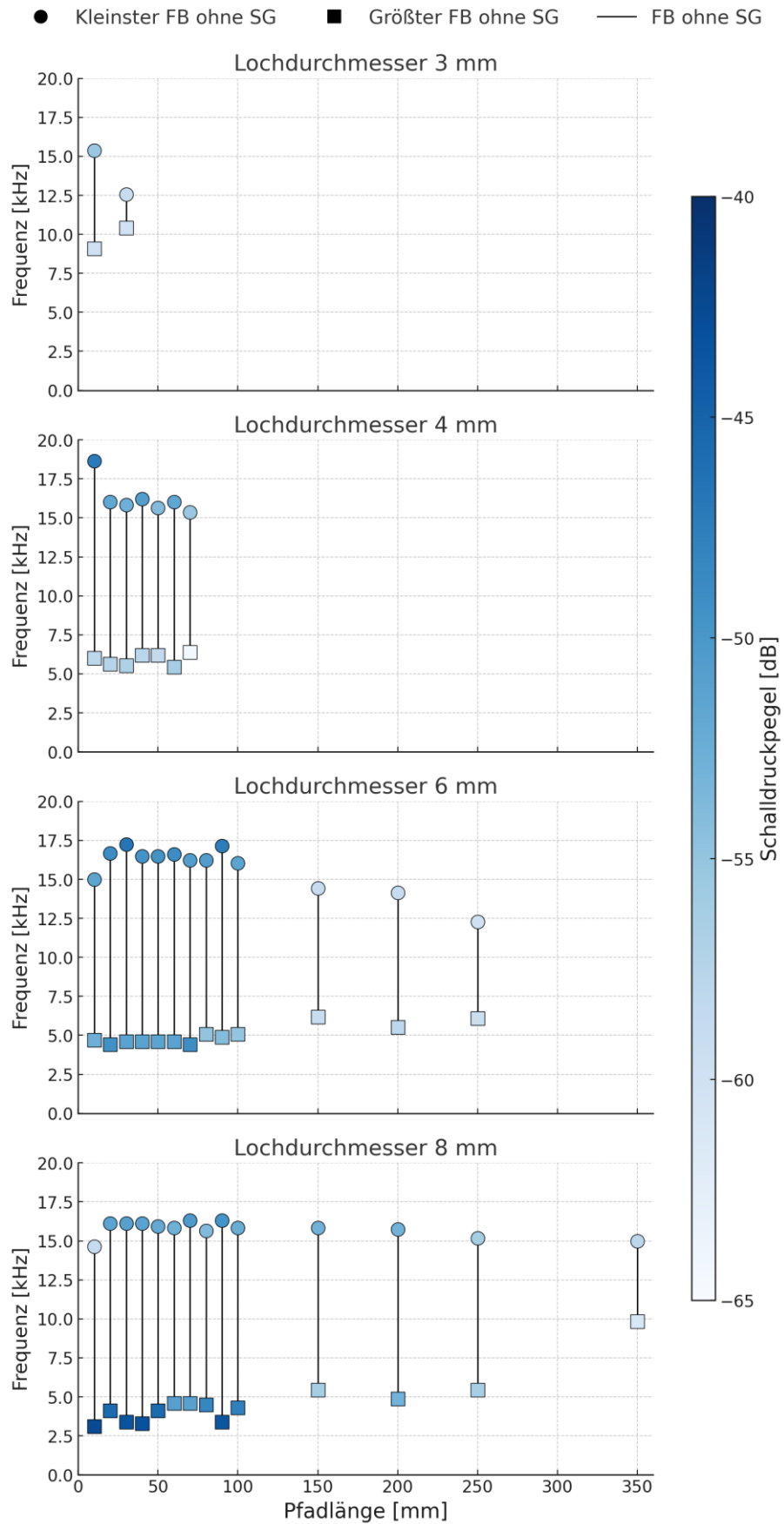


Abbildung 4-27: Vergleich der ermittelten FB ohne SG für alle vier Lochdurchmesser in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Dynamik: 1 dB

4.6 Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Leakagegeometrie, Strömungsparametern und akustischer Detektierbarkeit

Für jede Pfadlänge bis maximal 250 mm jedes Lochdurchmessers des Prüfkörpers *Z-Kanal* wurde der entsprechende q_{50} -Wert ermittelt (siehe Tabelle A-2 im Anhang). Es konnte jedoch kein klarer Zusammenhang zwischen dem q_{50} -Wert, der Leakagegeometrie und den akustischen Parametern festgestellt werden.

Jayarathne (2023) konnte bereits nachweisen, dass sowohl der Strömungskoeffizient C als auch der Druckexponent n stark von der Geometrie der Leakage abhängen. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wird in diesem Kapitel untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen den Strömungsparametern C und n , der Leakagegeometrie sowie den akustischen Messergebnissen besteht. Ziel ist es, anhand ausgewählter Konfigurationen zu analysieren, ob sich bestimmte Leakagegeometrien (Lochdurchmesser, Pfadlänge) systematisch mit bestimmten Strömungsparametern und akustischen Merkmalen (Frequenzbereich ohne Störgeräusche, Schalldruckpegel) korrelieren lassen.

Hierzu werden zwei verschiedene Lochdurchmesser im Prüfkörper *Z-Kanal* mit den Größen 4 und 8 mm betrachtet, jeweils in Kombination mit drei unterschiedlichen Pfadlängen. Für das 4 mm große Loch wurden Pfadlängen von 20, 70 und 150 mm untersucht, während für das 8 mm große Loch Pfadlängen von 20, 250 und 450 mm analysiert wurden. Für jede der sechs Konfigurationen wurden die aus den Differenzdruckmessungen abgeleiteten C - und n -Werte gemäß der Methodik in Kapitel 3.3 berechnet (siehe Tabelle A-3 im Anhang).

Zunächst wurden die ermittelten C -Werte über die beiden Lochdurchmesser hinweg dargestellt. Wie in Abbildung 4-28 zu erkennen ist, ist der C -Wert bei jeder Pfadlänge für den 8-mm-Lochdurchmesser höher als für den 4-mm-Lochdurchmesser. Unabhängig vom Lochdurchmesser zeigt sich außerdem, dass der C -Wert bei der kürzesten Pfadlänge von 20 mm jeweils am höchsten ist. So beträgt der C -Wert bei einem Lochdurchmesser von 8 mm und einer Pfadlänge von 20 mm etwa 0,075, während er bei einem Lochdurchmesser von 4 mm und einer Pfadlänge von 20 mm einen Wert von 0,023 besitzt.

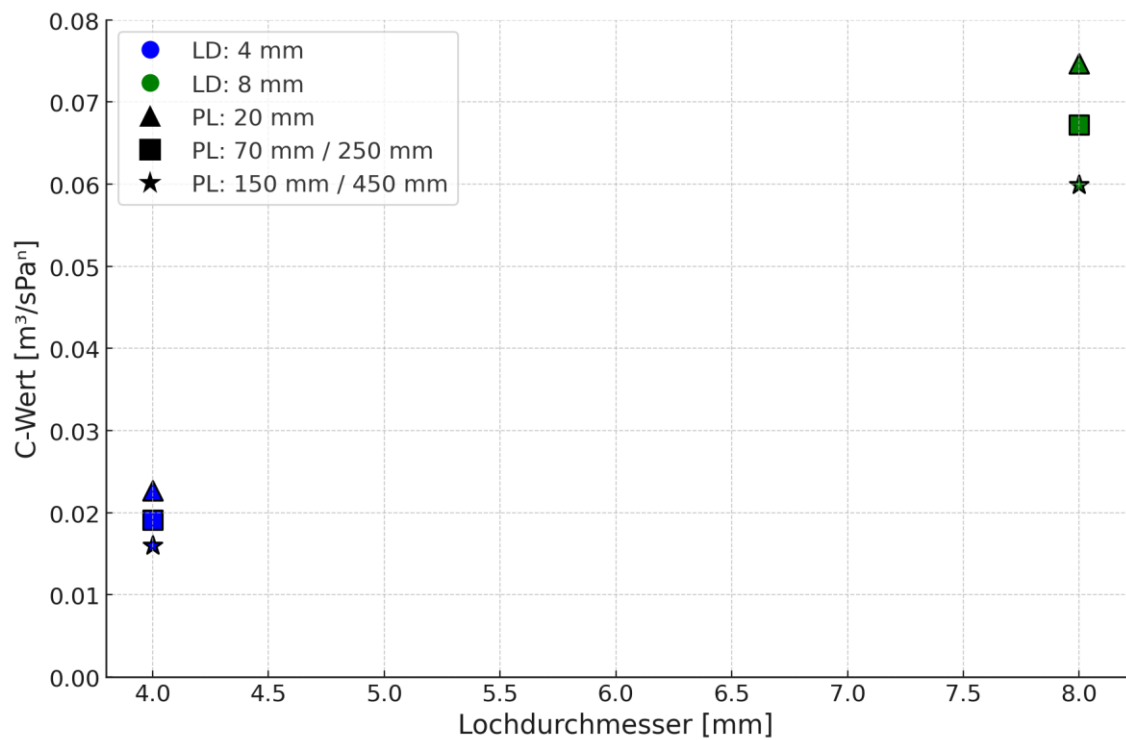


Abbildung 4-28: *C*-Werte der unterschiedlichen Pfadlängen (PL) über die Lochdurchmesser (LD) 4 und 8 mm. PL bei 4 mm: 20, 70 und 150 mm. PL bei 8 mm: 20, 250 und 450 mm

In Abbildung 4-29 sind die berechneten *n*-Werte dargestellt. Es zeigt sich, dass der *n*-Wert für jede Pfadlänge beim 4-mm-Loch höher ist als beim 8-mm-Loch. Zudem steigt der *n*-Wert bei beiden Lochdurchmessern mit zunehmender Pfadlänge. Der höchste gemessene *n*-Wert liegt bei 0,82 für einen Lochdurchmesser von 4 mm und einer Pfadlänge von 150 mm. Beim 8 mm-Loch beträgt der maximale *n*-Wert 0,69 bei einer Pfadlänge von 450 mm.

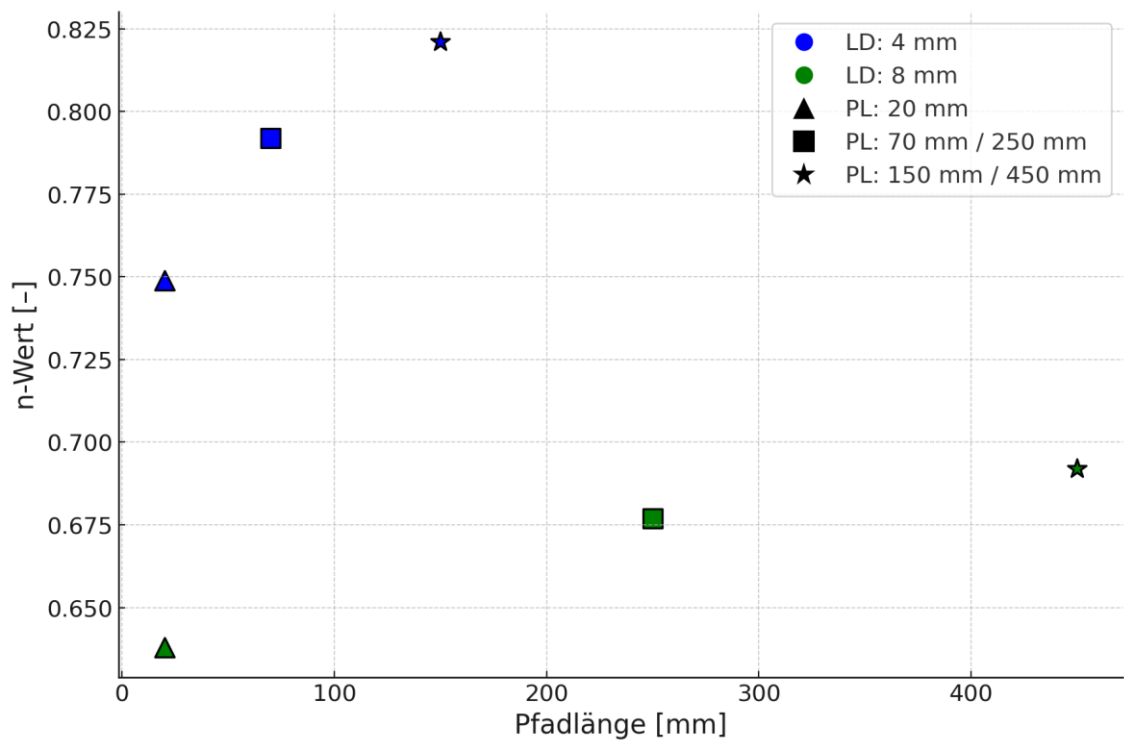


Abbildung 4-29: n -Werte der unterschiedlichen PL für die LD 4 und 8 mm

In Abbildung 4-30 werden die Frequenzbereiche ohne Störgeräusche sowie die dazugehörigen Schalldruckpegel (siehe Abbildung 4-27) in Abhängigkeit vom C -Wert dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem C -Wert der störgeräuschfreie Frequenzbereich zunimmt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass ein größerer C -Wert typischerweise mit einer kürzeren Pfadlänge einhergeht (siehe Abbildung 4-28) und kürzere Leckagepfade bedingen größere Frequenzbereiche (siehe Kapitel 4.5).

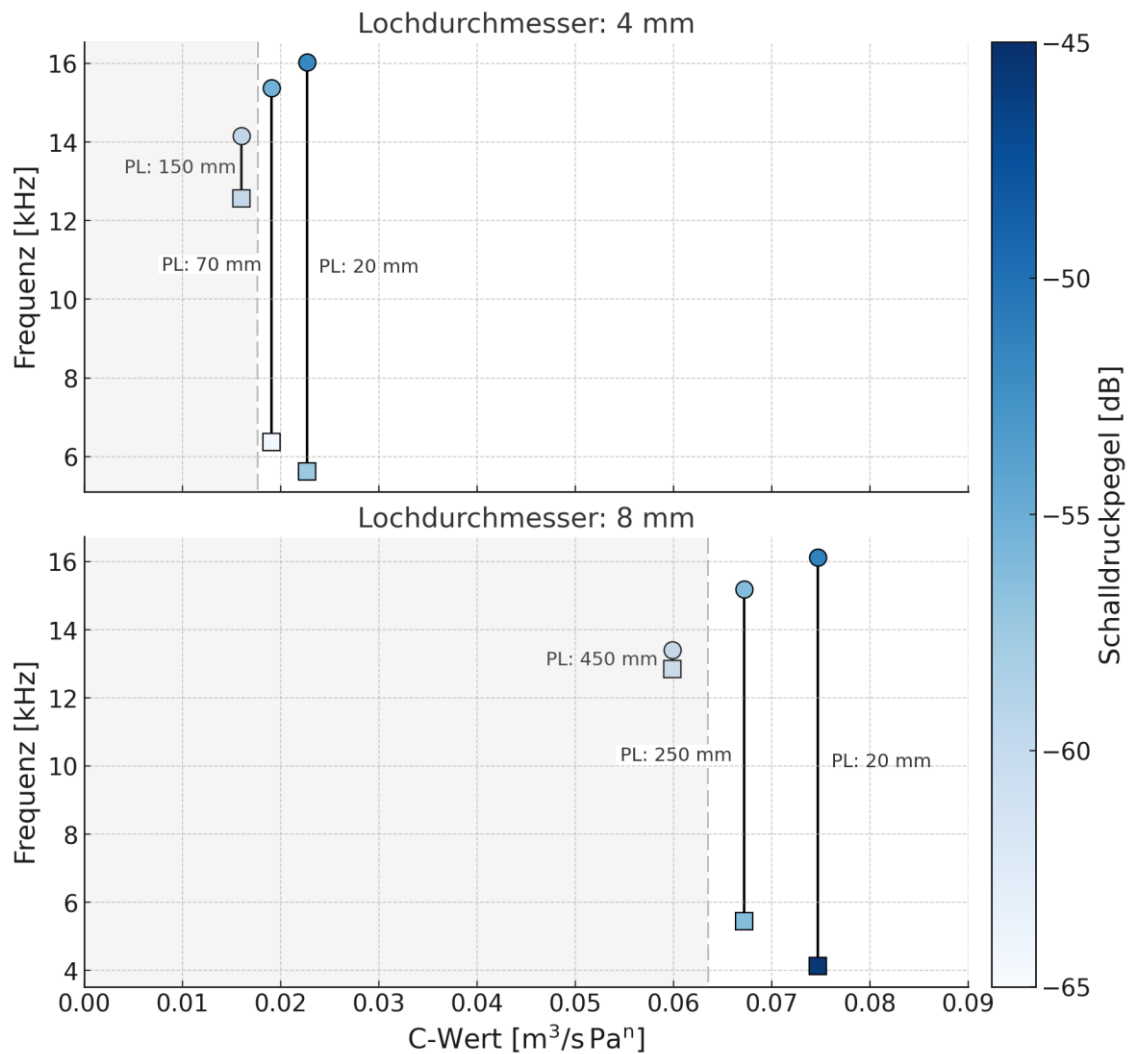


Abbildung 4-30: Frequenzbereiche ohne SG und zugehörige Schalldruckpegel über den C-Wert für LD 4 und 8 mm. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,5 dB (grauer Hintergrund, oben), 0,3 dB (grauer Hintergrund, unten)

Abbildung 4-31 zeigt denselben Zusammenhang, jedoch in Abhängigkeit vom n -Wert. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmendem n -Wert der störgeräuschfreie Frequenzbereich abnimmt. Dies steht im Einklang mit dem vorherigen Befund, da ein höherer n -Wert typischerweise bei längeren Pfaden auftritt (siehe Abbildung 4-29), die wiederum kleinere Frequenzbereiche aufweisen (siehe Kapitel 4.5).

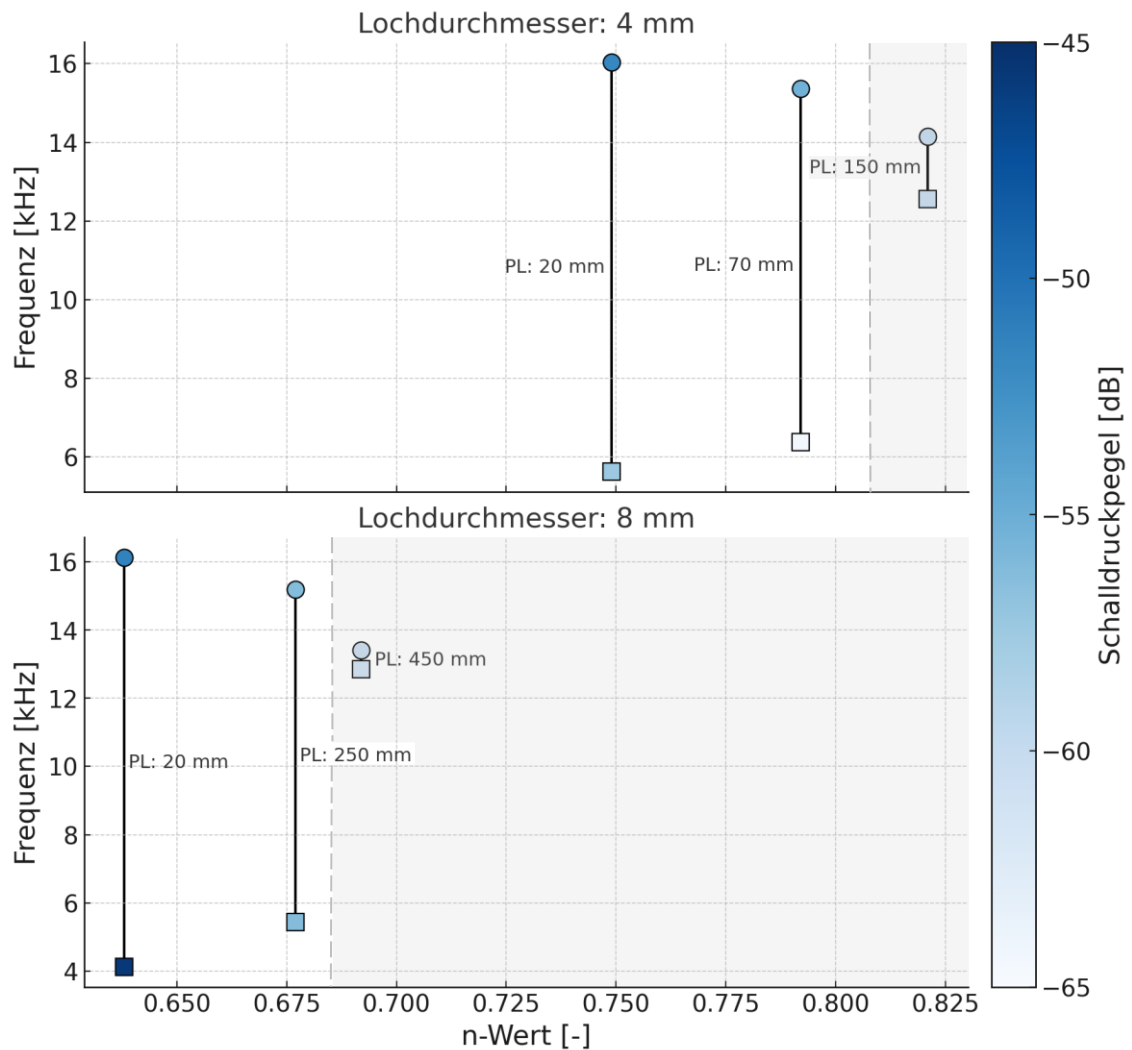


Abbildung 4-31: Frequenzbereiche ohne SG und zugehörige Schalldruckpegel über den n -Wert für LD 4 und 8 mm. Dynamik: 1 dB (weißer Hintergrund), 0,5 dB (grauer Hintergrund, oben), 0,3 dB (grauer Hintergrund, unten)

Ein Ziel der Erstellung dieser Darstellung war es zu überprüfen, ob der n -Wert unabhängig vom Lochdurchmesser zuverlässig als Indikator für die Pfadlänge genutzt werden kann. Zeigen gleiche Pfadlängen ähnliche n -Werte, könnte der gemessene n -Wert zunächst der Pfadlänge zugeordnet werden. In einem weiteren Schritt ließen sich anschließend der gemessene Frequenzbereich bzw. der Schalldruckpegel heranziehen, um Rückschlüsse auf den Lochdurchmesser zu ermöglichen.

Die Untersuchung verdeutlicht jedoch, dass der n -Wert maßgeblich vom Lochdurchmesser beeinflusst wird (siehe Abbildung 4-32). So unterscheidet sich der n -Wert beispielsweise bei einer Pfadlänge von 20 mm deutlich zwischen 4 und 8 mm Lochdurchmesser. Damit konnte die ursprüngliche Annahme, dass der n -Wert allein zur eindeutigen Bestimmung der Pfadlänge geeignet ist, nicht bestätigt werden.

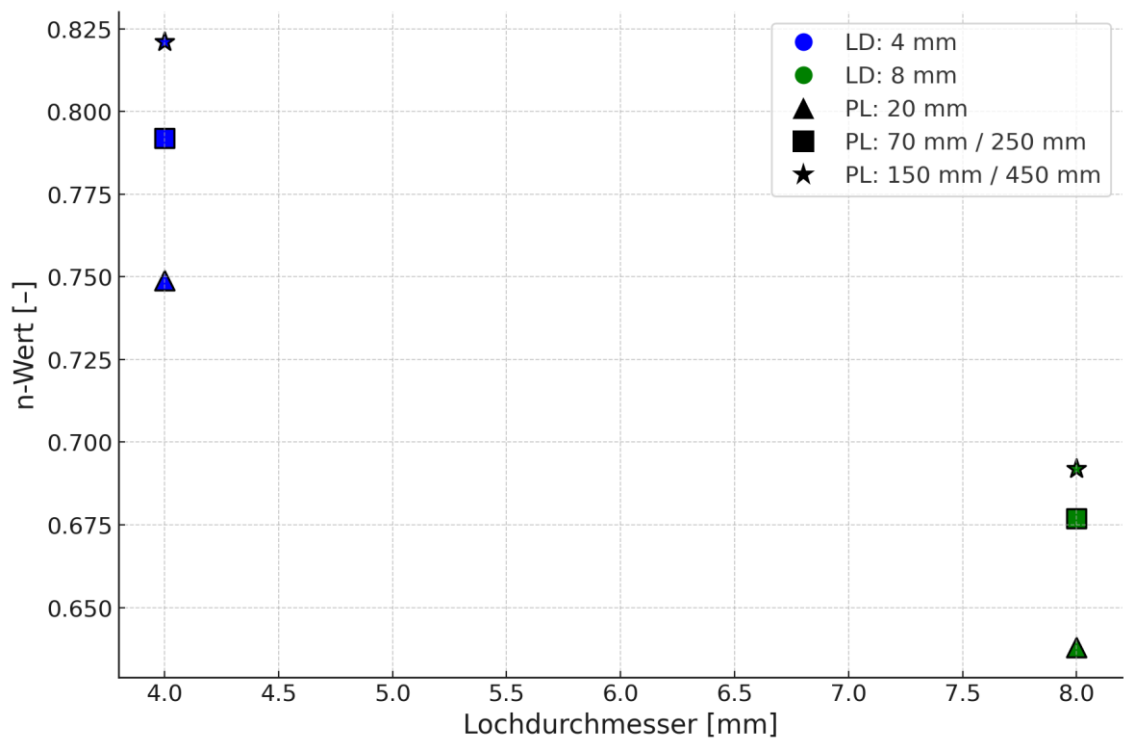


Abbildung 4-32: n -Werte der unterschiedlichen PL über die LD 4 und 8 mm. PL bei 4 mm: 20, 70 und 150 mm. PL bei 8 mm: 20, 250 und 450 mm

Ein klarer, unmittelbarer Zusammenhang zwischen den Strömungsparametern (C , n) und den akustischen Parametern (Frequenz, Schalldruckpegel) ließ sich mit der vorliegenden Messkonfiguration nicht ableiten. Zwar zeigen die Strömungsparameter eine Abhängigkeit von Lochdurchmesser und Pfadlänge, jedoch lässt sich nicht eindeutig bestimmen, welche Geometrieparameter den größeren Einfluss haben. So ist der C -Wert bei größeren Öffnungen und kürzeren Pfaden höher, während der n -Wert mit zunehmender Pfadlänge und kleineren Lochdurchmessern ansteigt. Die akustischen Messungen deuten zudem darauf hin, dass bei kleinerem C -Wert und höherem n -Wert tendenziell kleinere störungsgeräuschfreie FB detektiert werden können als bei größeren C - und kleineren n -Werten. Insgesamt erlaubt die Analyse jedoch keine belastbare Aussage darüber, ob eine eindeutige Bestimmung der Leckagegeometrie allein auf Grundlage der Strömungs- und akustischen Messgrößen möglich ist.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Im abschließenden Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse zur Verbesserung der Messmethodik und zur Identifikation von Leckagen im Prüfstand zusammengefasst. Zudem werden Potenziale der akustischen Detektion von Leckagen sowie Ansätze für zukünftige Untersuchungen aufgezeigt.

Die vorliegende Arbeit erweitert das Verständnis der akustischen Leckagedetektion und dokumentiert die Weiterentwicklung eines speziell zu diesem Zweck entwickelten Prüfstandes. Ein Schwerpunkt lag zunächst auf der Installation einer Schalldämmung des Prüfstandes. Der Prüfstand trat durch Übertragung der Schwingungen des Lautsprechers als Folge davon selbst als Schallquelle in Erscheinung. Dieser Körperschall wurde von der akustischen Kamera erfasst und in die Messergebnisse einbezogen, was die Detektion von Leckagen erschwerte. Nach der Schalldämmung zeigten verschiedene Messungen unter identischen Rahmenbedingungen eine signifikante Verbesserung der Leckageerkennung, da Störgeräusche effektiv reduziert werden konnten.

Darüber hinaus führte die Schalldämmung zu veränderten Verfahrensgrenzen bei den untersuchten Prüfkörpern. Beim Prüfkörper *Spanplatte* konnte die Nachweisgrenze von ursprünglich 2 auf 1,5 mm Lochdurchmesser reduziert werden, wobei sich der Ultraschallbereich von etwa 30 – 40 kHz als besonders geeignet erwies. Beim Prüfkörper *Labyrinth* war nach der Schalldämmung eine eindeutige Detektion von Leckagen mit längeren Kanälen und erhöhter Anzahl an Richtungswechseln möglich. Dabei traten Signale überwiegend in einem Frequenzbereich von 15 – 20 kHz auf, der sich in Folge dessen als besonders vorteilhaft für die Leckagedetektion herausstellte. Da neben dem Prüfstand zusätzlich auch der Prüfkörper Körperschall überträgt, wurde schalldämmendes Material von innen an den Prüfkörpern angebracht. Beim Prüfkörper *Sandwich* kamen neben einer inneren Schalldämmung auch Dämmelemente als Fixierungen zwischen den Schichten zum Einsatz, wodurch die Körperschallübertragung zwischen den Plexiglasscheiben reduziert werden konnte. Durch diese Maßnahmen konnten Leckagen mit Schlitzabmessungen von 7 mm Breite und 60 mm Länge (bis zu vier Schichten) sowie mit Schlitzdimensionen von 3 mm Breite und 60 mm Länge (bis zu drei Schichten) zuverlässig detektiert werden. Insgesamt wurde damit gezeigt, dass durch die Schalldämmung und durch gezielte Anpassungen an den Prüfkörpern eine reproduzierbare, störungsfreie und valide Leckagedetektion erreicht werden kann.

Zusätzlich wurden Ultraschallmessungen mit einer Frequenz von 40 kHz und einem Schalldruckpegel von 120 dB am Prüfkörper *Spanplatte* durchgeführt. Dabei konnten

zuverlässige Ergebnisse für eine 3,3 mm große Durchgangsleckage erzielt werden. Auch eine 2 mm große Durchgangsleckage konnte unter optimierten Messbedingungen (Variation von Abstand und Winkel der akustischen Kamera bzw. Minimierung des Lautsprecherabstands) detektiert werden. Bei einer zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführte Wiederholungsmessung, die ausschließlich für den Fall der Variation von Abstand und Winkel der akustischen Kamera vorgenommen wurde, war diese Leckage unter vermeintlich unveränderten Messkonfigurationen jedoch nicht mehr nachweisbar. Dieses Ergebnis verdeutlicht die hohe Sensitivität von Ultraschallmessungen gegenüber den gewählten Messparametern und unterstreicht die Notwendigkeit einer äußerst präzisen Einstellung sämtlicher Messgrößen, um reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten. Gleichzeitig wird deutlich, dass die akustische Leckagedetektion im Ultraschallbereich noch ein erhebliches Potenzial für weiterführende Forschungsarbeiten bietet.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit war die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Frequenzbereiche auf die Detektion verschiedener Leckagearten am Prüfkörper *Z-Kanal*. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfkörper mit fein abgestuften Kanälen unterschiedlicher Länge und Breite konstruiert und eine reproduzierbare Messmethodik entwickelt, um Ergebnisse für unterschiedliche Lochdurchmesser und Pfadlängen vergleichbar zu machen. Die Auswertung konzentrierte sich auf die detektierte untere Frequenzgrenze sowie den Schalldruckpegel in störungsfreien Frequenzbereichen. Die Analyse ergibt einen Rückgang des Schalldruckpegels mit zunehmender Pfadlänge, was auf eine stärkere Signaldämpfung durch Energieverluste entlang des Kanals hindeutet. Bei größeren Lochdurchmessern wurden höhere Schalldruckpegel ermittelt, was auf den erhöhten Luftvolumendurchsatz zurückgeführt werden kann. Zudem verengt sich der detektierte Frequenzbereich mit zunehmender Pfadlänge, wobei ein für die Leckagedetektion besonders geeigneter Frequenzbereich zwischen 10 und 12,5 kHz identifiziert werden konnte.

Abschließend wurde der Zusammenhang zwischen den Strömungsparametern C und n auf der einen Seite sowie den akustischen Messergebnissen auf der anderen Seite untersucht. Ziel war es zu ermitteln, ob sich spezifische Leckagegeometrien (Lochdurchmesser und Pfadlänge) eindeutig aus den Strömungsparametern und akustischen Kenngrößen ableiten lassen. Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass der C -Wert mit größeren Öffnungen und kürzeren Pfaden steigt, während der n -Wert mit zunehmender Pfadlänge und kleineren Öffnungen zunimmt. Eine eindeutige Unterscheidung zur Detektion des Lochdurchmessers oder der Pfadlänge war jedoch weder auf Grundlage der Strömungsparameter noch mithilfe der akustischen Kenngrößen möglich. Zwar deuten die akustischen Messungen darauf hin, dass

größere Öffnungen in der Regel höhere Schalldruckpegel erzeugen und die Detektion längerer Pfade begünstigen, doch konnte mit den vorliegenden Messkonfigurationen keine verlässliche Identifikation der Leckagegeometrie allein anhand dieser Parameter erreicht werden.

Zusammenfassend zeigen die durchgeführten Untersuchungen am speziell entwickelten Prüfstand das hohe Potenzial akustischer Verfahren zur Lokalisierung von Leckagen in Gebäudehüllen. Akustische Methoden bieten gegenüber konventionellen Verfahren eine höhere Flexibilität, da sie einen einfacheren Aufbau bei Messungen in Gebäuden ermöglichen. Die in dieser Arbeit erzielten Fortschritte hinsichtlich Schalldämmung, Prüfkörpergestaltung und Frequenzauswahl bilden eine solide Grundlage für die Weiterentwicklung der Methodik am Prüfstand. Der identifizierte, vielversprechende Frequenzbereich von etwa 10 – 20 kHz, der sich insbesondere bei den Prüfkörpern *Z-Kanal* und *Labyrinth* bewährt hat, sollte jedoch an realen Gebäudestrukturen validiert werden, um seine Praxistauglichkeit zu bestätigen. Während der Ultraschallbereich von etwa 30 – 40 kHz eine zuverlässige Detektion kleinster Leckagen bis zu einem Durchmesser von 1,5 mm ermöglichte, zeigte sich, dass eine ausschließliche Fokussierung auf 40 kHz keine verlässlichen Ergebnisse liefert. Zukünftige Arbeiten sollten sich daher verstärkt auf die Optimierung der Reproduzierbarkeit von Ultraschallmessungen konzentrieren, da dieser Spektralbereich besonders unempfindlich gegenüber typischen Umgebungsgeräuschen wie Verkehrs- oder Baustellenlärm ist und sich somit gut für Messungen unter Realbedingungen eignet. Darüber hinaus ist eine Automatisierung der Auswertung anzustreben, da die Bestimmung des optimalen Frequenzbereichs bisher für jede Messung manuell erfolgt. Ergänzend sollten Methoden zur Differenzierung von Störgeräuschen entwickelt werden, um deren Auftreten systematisch zu erfassen und Strategien zu ihrer Minimierung zu erarbeiten. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die akustische Leckagedetektion nach gezielter Weiterentwicklung und praktischer Validierung nicht nur eine vielversprechende Ergänzung zu etablierten Differenzdruckverfahren darstellen kann, sondern auch die Möglichkeit eröffnet, die Leckageortung effizienter, schneller und kostengünstiger zu gestalten.

A Anhang

Anhang 1: Strömungsparameter verschiedener Prüfkörper

Tabelle A-1: q_{50} -Werte der Prüfkörper *Labyrinth* und *Sandwich*

Prüfkörper	Pfadbezeichnung	q_{50} -Wert [m^3/s]
<i>Labyrinth</i>	5-4r1d-5	0,316
<i>Labyrinth</i>	3-2d5l4u-7	0,129
<i>Labyrinth</i>	3-3d5l5u-7	0,152
<i>Sandwich</i>	S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24	5,208
<i>Sandwich</i>	S7-S7-p3-t24-S7-p0-t24-S7-p0-t21	4,781
<i>Sandwich</i>	S3-S3-p3-t24-S3-p0-t24	2,803
<i>Sandwich</i>	S3-S3-p3-t24-S3-p0-t24-S3-p0-t21	2,478

Tabelle A-2: q_{50} -Werte des Prüfkörpers *Z-Kanal* bis zu einer Pfadlänge von 250 mm

Lochdurchmesser [mm]	Pfadlänge [mm]	q_{50} -Wert [m^3/s]
3	10	0,109
	20	0,094
	30	0,116
	40	0,118
	50	0,113
	60	0,116
	70	0,09
	80	0,089
	90	0,078
	100	0,101
	150	0,071
4	10	0,167
	20	0,156
	30	0,16
	40	0,151
	50	0,144
	60	0,153

	70	0,162
	80	0,15
	90	0,147
	100	0,142
	150	0,147
6	10	0,412
	20	0,438
	30	0,459
	40	0,454
	50	0,424
	60	0,412
	70	0,399
	80	0,4
	90	0,386
	100	0,384
	150	0,378
	200	0,366
	250	0,328
8	10	0,765
	20	0,673
	30	0,741
	40	0,743
	50	0,638
	60	0,744
	70	0,78
	80	0,867
	90	0,808
	100	0,745
	150	0,773
	200	0,664
	250	0,735

Tabelle A-3: Logarithmierte Messwerte Δp und Q sowie berechnete Werte für n und C für verschiedene Lochdurchmesser und Pfadlängen

Loch- durchmesser [mm]	Pfad- länge [mm]	Δp [Pa]	Q [m³/s]	$\log(\Delta p)$	$\log(Q)$	n	C [m³/(s·Pa ⁿ)]
4	20	24,71	0,257	1,393	-0,59	0,749	0,0227
		50,38	0,413	1,702	-0,384		
		75,77	0,564	1,879	-0,249		
		100,85	0,75	2,004	-0,125		
	70	24,94	0,249	1,397	-0,604	0,792	0,0191
		50,04	0,414	1,7	-0,383		
		75,03	0,565	1,875	-0,248		
		100,22	0,764	2,001	-0,117		
	150	25,68	0,235	1,41	-0,629	0,821	0,016
		50,32	0,385	1,702	-0,415		
		75,93	0,537	1,88	-0,27		
		99,95	0,733	2	-0,135		
8	20	24,4	0,571	1,387	-0,243	0,638	0,0747
		49,73	0,908	1,7	-0,042		
		75,2	1,184	1,876	0,073		
		100,52	1,403	2,002	0,147		
	250	25,09	0,586	1,4	-0,232	0,677	0,0671
		50,18	0,983	1,701	-0,007		
		74,84	1,25	1,874	0,097		
		99,96	1,493	2	0,174		
	450	25,98	0,56	1,415	-0,252	0,692	0,0599
		50,21	0,929	1,701	-0,032		
		75,04	1,189	1,875	0,075		
		100,18	1,424	2,001	0,154		

Anhang 2: Begründung der Wahl des Dynamikbereichs bei der Auswertung der Messungen am Prüfkörper Z-Kanal

In Abbildung A-1 ist die Auswertung der Frequenzbereiche für einen Lochdurchmesser von 4 mm bei einer Dynamik von 0,3 dB dargestellt. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass eine

Verringerung der Dynamik den detektierbaren FB ohne SG im Allgemeinen vergrößert. Auch können bei einer geringeren Dynamik längere Pfadlängen detektiert werden, beispielsweise im Vergleich zu der Untersuchung bei 1 dB in Abbildung 4-24. Gleichzeitig bewirkt die reduzierte Dynamik, dass das Verhältnis zwischen dem Schalldruckpegel der Hauptkeule und dem der stärksten Nebenkeule sinkt, wodurch die exakten Werte einzelner Messpunkte nicht mehr eindeutig bestimmbar sind. Während sich die Abgrenzung zwischen Bereichen mit und ohne SG bei einer Dynamik von 1 dB klar unterscheiden lässt, sind diese Grenzen bei 0,3 dB teilweise schwer zu erkennen. Dies erhöht die Gefahr subjektiver Interpretation durch die messende Person, wie es hier mit hoher Wahrscheinlichkeit bei einer Pfadlänge von 40 und 50 mm für den kleinsten FB ohne SG der Fall ist. Auch die Bewertung des kleinsten FB mit SG unterliegt dieser Unsicherheit.

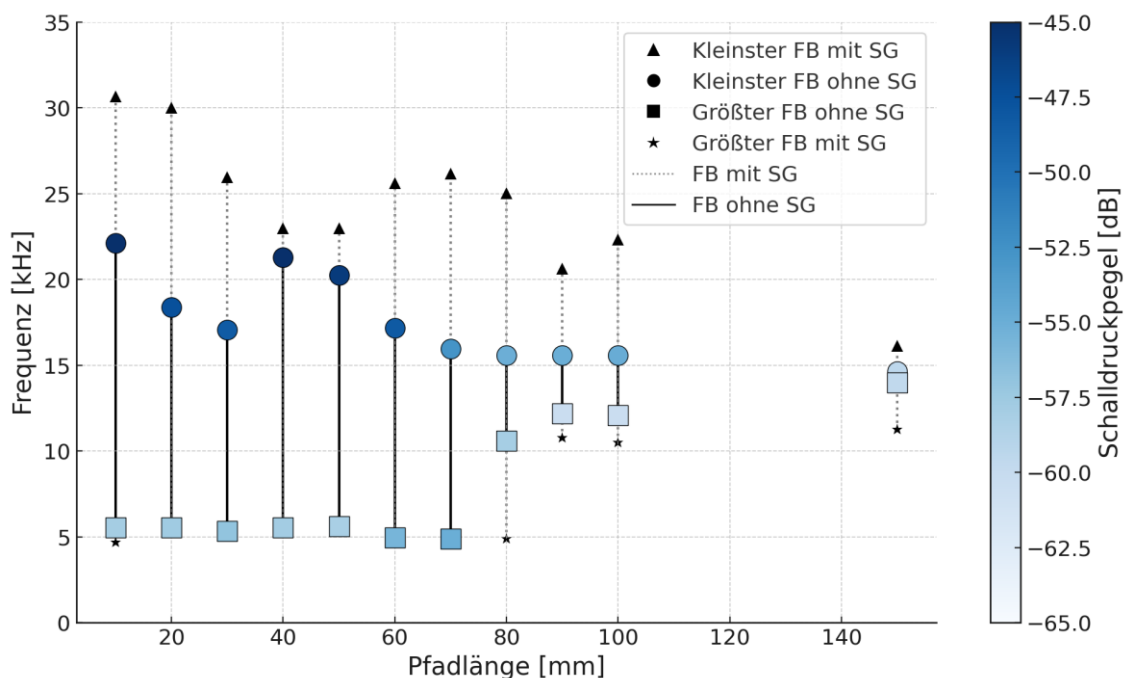


Abbildung A-1: Ermittelte untere Frequenzgrenze und zugehöriger Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Pfadlänge. Lochdurchmesser: 4 mm. Obere Frequenzgrenze: 45 kHz. Dynamik: 0,3 dB

Der Vergleich von Messungen bei unterschiedlichen Dynamikbereichen hat gezeigt, dass sich eine Dynamik von 1dB als zuverlässig erwiesen hat und sich besonders für Vergleiche zwischen verschiedenen Lochdurchmessern eignet. Die Auswertung mit geringerer Dynamik macht zwar deutlich, dass auch längere Pfadlängen detektiert werden können, dies erfolgt jedoch auf Kosten der Genauigkeit einzelner Messpunkte. Aus diesem Grund wurde der Dynamikbereich 1 dB für die Messreihe in Kapitel 4.5 festgelegt.

Literaturverzeichnis

- Aldridge, D. F. (1992). MATHEMATICS OF LINEAR SWEEPS. *CANADIAN JOURNAL OF EXPLORATION GEOPHYSICS*, VOL. 28.(NO. 1), 62–68. Verfügbar unter https://cseg.ca/wp-content/uploads/1992_06_math_linear_sweeps.pdf
- Allen, E. & Iano, J. (2014). *Fundamentals of Building Construction: Materials and Methods* (6th ed., S. 791-815). *New York Academy of Sciences Series*. John Wiley & Sons Incorporated. Verfügbar unter <https://archive.org/details/fundamentals-of-building-construction-materials-and-methods-6th-edition/mode/2up>
- BBSR. (2024). *Maßnahmenkonzepte für einen klimaneutralen Gebäudebestand bis 2045*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). BBSR-Online-Publikation 105/2024, Bonn. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2024/bbsr-online-105-2024-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (Zugriff am 17. September 2025)
- BlowerDoor GmbH (Hrsg.). (o. J.). *Mikro Leakage Meter*. Verfügbar unter https://www.blowerdoor.de/fileadmin/BlowerDoorDE/_Dokumente/Datenblaetter/B-Datenblatt_MLM_de_Ir.pdf (Zugriff am 30. August 2025)
- Bundeswirtschaftsministerium. (2024). *Bundesbericht Energieforschung 2024: Forschungsförderung für die Energiewende*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Verfügbar unter <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/240716-bundesbericht-energieforschung-2024.pdf> (Zugriff am 10. September 2025)
- Bürger, V., Hesse, T., Köhler, B., Palzer, A. & Engelmann, P. (2019). German Energiewende—different visions for a (nearly) climate neutral building sector in 2050. *Energy Efficiency*, 12(1), 73–87. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9660-6>
- Chiariotti, P., Martarelli, M. & Castellini, P. (2019). Acoustic beamforming for noise source localization – Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 422–448. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.09.019>
- Diel, M., Schiricke, B. & Pernpeintner, J. (2024). *Test facility for building envelope leakage type analysis and improvement of acoustic and thermographic airtightness measurement methods*. Proceedings of 44th AIVC-12th TightVent & 10th venticoool Conference, Dublin.
- DIN EN ISO 9972, iTeh Standard Preview (1996 & i.d.F.v. 15. August 2015). Verfügbar unter <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/55718/618cb285e8bc49c393f5e6db071dbca6/I-SO-9972-2015.pdf> (Zugriff am 05. August 2025)
- Döbler, D. (o. J.). *DIE AKUSTISCHE KAMERA: MIT DEN AUGEN HÖREN*. Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V. Verfügbar unter [https://www.gfi.de/](#)

- https://www.gfai.de/fileadmin/user_upload/GFaI-Produktblatt_Akustische_Kamera_de.pdf (Zugriff am 28. Mai 2025)
- Dougherty, R. P. (2014). *FUNCTIONAL BEAMFORMING*. Proceedings of 5th Berlin Beamforming Conference, Berlin.
- Eur-Lex. (2024). *Richtlinie (EU) 2024/1275 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. April 2024 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden*. Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union. Verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32024L1275> (Zugriff am 10. September 2025)
- Everest, A. F. (2001). *Master Handbook of ACOUSTICS* (Fourth Edition). McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1036/0071399747>
- FLiB e. V. (2018). *Leck ist Leck – oder doch nicht? Hinweise zur Definition von Luft-Leckagen* [Pressemitteilung]. Verfügbar unter https://flib.de/presse/2018/01/Meld_Leckagedefinition.pdf (Zugriff am 30. Juli 2025)
- FLiB e. V. (2024). *Wo häufen sich Luftdichtheitsfehler?* [Pressemitteilung]. Verfügbar unter https://flib.de/presse/2024/11/Meld_Umfrage_BbM_Leck_Dach.pdf (Zugriff am 05. August 2025)
- Gebäudeenergiegesetz, BGBl. I S. 1728 (2020 & i.d.F.v. 16. Oktober 2023). Verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf> (Zugriff am 05. August 2025)
- gfai tech GmbH (Hrsg.). (o. J. a). *Was bewirkt die Fensterung beim FDBF?* Verfügbar unter <https://www.gfaitech.com/de/wissen/faq/fdbf-vs-tdbf> (Zugriff am 28. Mai 2025)
- gfai tech GmbH (Hrsg.). (o. J. b). *Was sollten Sie über die Punktspreizfunktion wissen?* Verfügbar unter <https://www.gfaitech.com/de/wissen/faq/punktspreizfunktion> (Zugriff am 01. September 2025)
- gfai tech GmbH (Hrsg.). (o. J. c). *Was verbirgt sich hinter der akustischen Karte?* Verfügbar unter <https://www.gfaitech.com/de/wissen/faq/was-ist-eine-akustische-karte> (Zugriff am 22. Juli 2025)
- gfai tech GmbH (Hrsg.). (o. J. d). *Wie funktioniert Delay-and-Sum-Beamforming im Zeitbereich?* Verfügbar unter <https://www.gfaitech.com/de/wissen/faq/delay-und-sum-beamforming-im-zeitbereich> (Zugriff am 25. August 2025)
- Hassani, H., Mashhad, L. M., Royer-Carenzi, M., Yeganegi, M. R. & Komendantova, N. (2025). White Noise and Its Misapplications: Impacts on Time Series Model Adequacy and Forecasting. *Forecasting*, 7(1), 8. <https://doi.org/10.3390/forecast7010008>
- Holstein, P., Bader, N., Moeck, S., Münch, H.-J., Döbler, D. & Jahnke, A. (2020). Akustische Verfahren zur Ermittlung der Luftdichtheit von Bestandsgebäuden. In B. Weller & L.

- Scheuring (Hrsg.), *Denkmal und Energie 2020* (S. 111–123). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-28753-5_8
- Hübelt, J. (2023). Messtechnik. In W. Schirmer & J. Hübelt (Hrsg.), *Technischer Lärmschutz* (S. 93–154). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65668-6_3
- Hult, E. L. & Sherman, M. H. (2014). Estimates of Uncertainty in Multi-Zone Air Leakage Measurements. *International Journal of Ventilation*, 12(4), 359–368. <https://doi.org/10.1080/14733315.2014.11684029>
- Hult, E. L., Sherman, M. H. & Walker, I. S [Iain S.]. (2013). Blower-door techniques for measuring interzonal leakage. In *Proceedings of the 12th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings*. ASHRAE / Lawrence Berkeley National Laboratory. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1167386>
- Jayarathne, T. (2023). *Advancing building air leakage measurement and modelling: new measurement methods and experimental analysis of crack flow behavior*. Boston University. Verfügbar unter <https://hdl.handle.net/2144/46285>
- Jones, B., Das, P., Chalabi, Z., Davies, M., Hamilton, I., Lowe, R., Mavrogianni, A., Robinson, D. & Taylor, J. (2015). Assessing uncertainty in housing stock infiltration rates and associated heat loss: English and UK case studies. *Building and Environment*, 92, 644–656. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.033>
- Kalamees, T. (2007). Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*, 42(6), 2369–2377. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.001>
- Kölsch, B. (2022). *Untersuchung eines verbesserten akustischen Verfahrens zur Bestimmung der Luftdichtheit von Gebäudehüllen*. RWTH Aachen University. <https://doi.org/10.18154/RWTH-2022-05352>
- Lerch, R., Sessler, G. M. & Wolf, D. (2009). *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-49833-9>
- Maas, A. (2022). Lüftung. In W. M. Willems (Hrsg.), *Lehrbuch der Bauphysik* (S. 65–78). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34093-3_4
- Mijorski, S. & Cammelli, S. (2016). Stack Effect in High-Rise Buildings: A Review. *International Journal of High-Rise Buildings*, 5(4), 327–338. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2016.5.4.327>
- Möser, M. (2015). *Technische Akustik* (10. Auflage). VDI-Buch. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47704-5>
- Pernpeintner, J. & Diel, M. (2025). *Pressure Inversion for Leakage Detection at Building Envelopes with Lock-In Thermography*, Unveröffentlichtes Manuskript.

- Pierce, A. D. (2014). Basic Linear Acoustics. In T. D. Rossing (Hrsg.), *Springer handbook of acoustics* (2. ed., S. 49–115). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7_3
- Prignon, M., Altomonte, S., Ossio, F., Dawans, A. & van Moeseke, G. (2021). On the applicability of meta-analysis to evaluate airtightness performance of building components. *Building and Environment*, 194, 107684. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107684>
- Puhle, C. (2021). Demonstration of a unified approach to beamforming. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 263(2), 4450–4458. <https://doi.org/10.3397/IN-2021-2709>
- Raman, G., Prakash, M., Ramachandran, R., Patel, H. & Chelliah, K. (2014). *Remote detection of building air infiltration using a compact microphone array and advanced beamforming methods*. Proceedings of 5th Berlin Beamforming Conference, Berlin.
- Rolfsmeier, S., Vogel, K., Solcher, O. & Vater, M. (2015). *Leckagebewertung. Abschlussbericht zum FLiB-Workshop am 17./18. April 2013 in Fulda*. Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e.V. Verfügbar unter https://flib.de/publikationen/04_workshop/FLiB_Leckagebewertung_Workshop_Fulda_2015.pdf
- Rossing, T. D. (Hrsg.). (2014). *Springer handbook of acoustics* (2. ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0755-7>
- schaumstofflager.de. (o. J.). *Nachbar ist zu laut: Wände und Decken nachträglich dämmen - wir erklären wie*. Verfügbar unter <https://www.schaumstofflager.de/cms/nachbar-is-zu-laut.html> (Zugriff am 04. April 2025)
- Schild, K. & Willems, W. M. (2022). *Wärmeschutz*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-38274-2>
- Schiricke, B., Diel, M. & Kölsch, B. (2024). Field Testing of an Acoustic Method for Locating Air Leakages in Building Envelopes. *Buildings*, 14(4), 1159. <https://doi.org/10.3390/buildings14041159>
- Schirmer, W. & Hübelt, J. (Hrsg.). (2023). *Technischer Lärmschutz*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-65668-6>
- Schulz, D. (2023). Größen und Messverfahren zur Kennzeichnung von Geräuschen und Geräuschquellen. In W. Schirmer & J. Hübelt (Hrsg.), *Technischer Lärmschutz* (S. 23–92). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-65668-6_2
- Sherman, M., Chan, R. & Ab, Thabet (2004). Building Airtightness: Research and Practice. *LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY REPORT NO. LBNL-53356*. Verfügbar unter <https://escholarship.org/uc/item/5jb277km>

- Taylor, T., Counsell, J. & Gill, S. (2013). Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography. *Energy and Buildings*, 66, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.051>
- Vogel, K., Sous, S., Zöller, M., Grün, G. & Norrefeldt, V. (2017). *Bewertung von Fehlstellen in Luftdichtheitsebenen - Handlungsempfehlung für Baupraktiker. Forschungsinitiative Zukunft Bau: F 3012*. Fraunhofer IRB Verlag. Verfügbar unter <https://www.irbnet.de/daten/rswb/17029008942.pdf>
- Vorländer, M. (2017). Akustische Messtechnik. In G. Müller & M. Möser (Hrsg.), *Akustische Messtechnik* (S. 1–34). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55371-8_2
- Walker, I. S [I. S.], Sherman, M. H [M. H.], Joh, J. & Chan, W. R. (2013). Applying Large Datasets to Developing a Better Understanding of Air Leakage Measurement in Homes. *International Journal of Ventilation*, 11(4), 323–338. <https://doi.org/10.1080/14733315.2013.11683991>
- Walker, I. S [Iain S.], Wilson, D. J. & Sherman, M. H. (1998). A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations. *Energy and Buildings*, 27(3), 293–299. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00047-9)
- Willems, W. M. (Hrsg.). (2022). *Lehrbuch der Bauphysik*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-34093-3>
- Younes, C., Shdid, C. A. & Bitsuamlak, G. (2012). Air infiltration through building envelopes: A review. *Journal of Building Physics*, 35(3), 267–302. <https://doi.org/10.1177/1744259111423085>