

Master-Thesis
im
Studiengang
Simulation und Experimentaltechnik

**Identifizierung und Reduktion
hydrodynamischer Störanteile bei
aeroakustischen Messungen in Strömungen**

Matthias Rother
Matrikelnummer 612695

Düsseldorf
August 2018

Betreuender Professor (Erster Prüfer)
Prof. Dr. Jörg Becker-Schweitzer
Institute of Sound and Vibration Engineering
Fachbereich Medien
Josef-Gockeln-Str. 9
40474 Düsseldorf
joerg.becker-schweitzer@hs-duesseldorf.de

Zweiter Prüfer
M. Sc. Till Biedermann
Institute of Sound and Vibration Engineering
Fachbereich Maschinenbau und
Verfahrenstechnik
Josef-Gockeln-Str. 9
40474 Düsseldorf
till.biedermann@hs-duesseldorf.de

Thema der Master-Thesis:

Identifizierung und Reduktion hydrodynamischer Störanteile bei aeroakustischen Messungen in Strömungen

Bearbeiter: Matthias Rother, MN: 612695

Erstprüfer: Prof. Dr. Jörg Becker-Schweitzer, ISAVE

Zweitprüfer: Till Biedermann M.Sc., ISAVE

Nach dem derzeitigen Stand der Technik werden strömungsakustische Signale in Strömungen mit Strömungsgeschwindigkeiten von bis 40 m/s unter Verwendung von Schlitzrohrsonden gemessen. Das Anbringen dieser erfordert jedoch in der Regel einen entsprechenden Halter, welcher unerwünschte Strömungsgeräusche verursachen und so die aeroakustische Messung beeinflussen kann. Um diesem Problem entgegen zu wirken, sollen im Rahmen der Abschlussarbeit Mikrofone wandbündig in die Rohrwand eines Prüfstands nach DIN EN ISO 5136 eingelassen werden. Da in dieser Einbausituation die Mikrofonmembran jedoch relativ offen der Strömung und so auch hydrodynamischen Turbulenzen ausgesetzt ist, sind hier ebenfalls Einflüsse auf das akustische Signal zu erwarten. Um diese Störungen zu identifizieren und zu quantifizieren sind verschiedene Versuche an einem Windkanal im reflexionsarmen Raum des Institute of Sound and Vibration Engineering (ISAVE) der Hochschule Düsseldorf durchzuführen. Dafür soll eine Einbausituation mit einer wandbündigen Installation von Mikrofonen entwickelt werden, welche es ebenfalls ermöglicht verschiedene Werkstoffe vor den Mikrofonen zu installieren. Der Fokus liegt hier insbesondere auf dem Testen unterschiedlicher Materialien, um die turbulenzbedingten Druckschwankungen an den Mikrofonen zu reduzieren und so ein möglichst störungsfreies, akustisches Signal innerhalb der Strömung messen zu können. Eine Quantifizierung des Störsignals soll sowohl unter Zuhilfenahme synthetischer, als auch strömungsakustischer Geräuschquellen erfolgen. Abschließend wird die Verwendung wandbündiger Mikrofone in einem Rohrprüfstand nach DIN EN ISO 5136 erprobt und gewonnene Erkenntnisse der Windkanalversuche validiert.

Unterschrift Erstprüfer

Prof. Dr. Jörg Becker-Schweitzer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Abkürzungsverzeichnis	3
Symbolverzeichnis.....	4
1 Einleitung.....	5
2 Methoden zur Messung in Strömungen.....	7
2.1 Schaumstoff – Windschirm	7
2.2 Nasenkonus	8
2.3 Schlitzrohrsonde	9
2.4 Oberflächenmikrofon	9
2.5 Sonstige Möglichkeiten	10
3 Prüfstand zur Identifizierung der Störanteile.....	12
3.1 Versuchsaufbau	18
3.2 Messtechnik.....	21
3.3 Strömungsakustische Geräusche	25
3.4 Abschirmmaterialien	27
3.5 Messplan.....	28
4 Auswertung, Identifizierung und Reduktion der Störanteile.....	29
4.1 Hochlauf Windkanal.....	29
4.2 Frequenzgangkorrekturen.....	32
4.3 Referenzmessungen.....	40
4.4 Vergleich mit Hilfe eines synthetischen Signals	51
4.5 Vergleich durch strömungsakustische Geräusche	70
5 Messungen an Prüfstand nach DIN EN ISO 5136	76
5.1 Ergebnisse der Ausarbeitung.....	77
5.2 Mögliche Verbesserungen der Messeinrichtung	80
6 Zusammenfassung	82
7 Quellenverzeichnis	84
Eidesstattliche Erklärung.....	85

Abkürzungsverzeichnis

APS	Auto Power Spectrum
DoE	Design of Experiments
OASPL	Gesamtschalldruckpegel
RaR	Reflexionsarmer Raum
WR	Weißes Rauschen

Symbolverzeichnis

A_n	[m ²]	(Teil-) Fläche
A	[m ²]	Fläche des Kondensators
C	[A ² s ⁴ /m ² kg]	Kapazität
D	[m]	Zylinderdurchmesser
ε_0	[As/Vm]	Dielektrizitätskonstante
f	[Hz]	Frequenz
g	[m/s ²]	Schwerkraft
L	[dB]	Schalldruckpegel
L_p	[dB]	Gesamtschalldruckpegel
p	[Pa]	Schalldruck
p_0	[Pa]	Bezugsdruck
$p_{hyd.}$	[Pa]	Hydrodynamischer Druck
R	[m]	Kanalradius
r	[m]	Radius der Messposition
ρ	[kg/m ³]	Dichte
Sr	[-]	Strouhalzahl
U	[V]	Spannung
u_{max}	[m/s]	Maximale Strömungsgeschwindigkeit
u_{mittel}	[m/s]	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit
u_n	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
$\dot{V}_{teil}$	[m ³ /s]	Teilvolumenstrom
z_n	[m]	Höhe
z	[m]	Differenz der Radien

1 Einleitung

Das Messen von akustischen Signal in Strömungen birgt die Problematik, dass neben den zu messenden akustischen Druckschwankungen auch sogenannte hydrodynamische Druckschwankungen durch die Strömung entstehen. Letztere können die akustische Messung beeinflussen, indem sie auf die Mikrofonmembran treffen und so mit der Akustik innerhalb der Messumgebung im ausgegebenen Signal interferieren.

Zur Reduktion dieser hydrodynamischen Druckschwankungen gibt es unterschiedliche Ansätze. Die Norm DIN EN ISO 5136 - Bestimmung der von Ventilatoren und anderen Strömungsmaschinen in Kanäle abgestrahlten Schallleistung – benennt einige dieser Messmöglichkeiten, je nach vorliegender Strömungsgeschwindigkeit. Die sogenannte Schlitzrohrsonde ist eine dieser Möglichkeiten, welche den breitesten Einsatzbereich hat, wenn es um die Strömungsgeschwindigkeit geht. Dabei handelt es sich um einen Turbulenzschirm, der (auf ein Mikrofon gesetzt) in der Strömung platziert wird. Dazu ist eine entsprechende Haltevorrichtung notwendig, welche die Schlitzrohrsonde parallel zur Strömung ausrichtet.

Die Problematik hierbei besteht darin, dass diese Haltevorrichtung innerhalb der Strömung aeroakustische Geräusche erzeugt. Diese können die akustische Messung selbst ungewollt beeinflussen, was zu einem verfälschten Messergebnis führen kann.

Eine Alternative, die keine aeroakustischen Geräusche erzeugt, sind wandbündige Mikrofone. Diese werden in die z.B. Rohrwand eines Prüfstands eingelassen, sodass das Mikrofon bündig mit der Innenwand abschließt. Die Mikrofonmembran, üblicherweise nur geschützt durch einen Mikrofongrill, ist so allerdings potenziellen hydrodynamischen Druckschwankungen ausgesetzt. Um einer so entstehenden Verfälschung des Messergebnisses vorzubeugen, müssen diese Störanteile reduziert werden. Dies soll im Rahmen dieser Ausarbeitung erfolgen.

Zunächst wird ein geeignetes Messsetup entwickelt, um die Untersuchungen durchzuführen. Alle Versuche finden im reflexionsarmen Raum (RaR) der Hochschule Düsseldorf an einem Windkanal statt. Anhand des entwickelten Setups wird anschließend der Einfluss der hydrodynamischen Druckschwankungen untersucht.

Im Anschluss wird mittels eines synthetischen Signals (hier weißes Rauschen) untersucht, inwiefern verschiedene Materialien vor dem Mikrofon eine Reduktion der Störanteile herbeiführen können. Das synthetische Signal dient hierbei als Referenz, um einen Sollzustand zu definieren. Dies ist notwendig, da andernfalls nicht beurteilt werden kann, welche Reduktion der Störanteile die zu messende Akustik realistisch widerspiegelt. Diese sollte nämlich nur aus Strömungsgeräuschen und synthetischen Signal bestehen,

nicht jedoch aus einem zusätzlichen Einfluss der hydrodynamischen Druckschwankungen.

Neben dem weißen Rauschen werden noch ein breitbandiges und ein tonales strömungsinduziertes Geräusch untersucht. Zudem werden neben dem wandbündigen Mikrofon auch noch eine installierte Schlitzrohrsonde, ein Oberflächenmikrofon, Nasenkonusse, sowie zwei verschiedene Mikrofongrößen untersucht.

Abschließend werden die gewonnen Erkenntnisse auf einen Prüfstand nach DIN EN ISO 5136, mit wandbündigem Mikrofonarray, angewandt.

2 Methoden zur Messung in Strömungen

Die Methodik zur Messung von aeroakustischen Geräuschen in Strömungen wird für Kanäle in der DIN EN ISO 5136 [1] festgelegt. Hier werden je nach Strömungsgeschwindigkeit unterschiedliche Windschirme (siehe Tabelle 1) für die verwendeten Mikrofone festgelegt.

Mikrofonwindschirm	Max. mittlere Strömungsgeschwindigkeit
Schaumstoff - Windschirm	$15 \frac{m}{s}$
Nasenkonus	$20 \frac{m}{s}$
Schlitzrohrsonde	$40 \frac{m}{s}$

Tabelle 1: Unterschiedliche Mikrofonwindschirme und max. zulässige mittlere Strömungsgeschwindigkeiten nach DIN EN 5136 [1]

Der Grund für die Verwendung von unterschiedlichen Mikrofonwindschirmen sind hydrodynamische Druckschwankungen an der Mikrofonmembran, die die Messung stören können. Da die hydrodynamischen Druckschwankungen um ein Vielfaches größer sind, als die akustischen Druckschwankungen, können letztere stark maskiert werden. Beispielsweise liegt der akustische Druck (Schalldruckpegel L) von 94 dB bei 1 Pa ($L = 20 \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$) [2], wohingegen eine Strömung von $u=10$ m/s bei einer Dichte von Luft $\rho = 1,2 \frac{kg}{m^3}$ bereits einen hydrodynamischen Druck von etwa 60 Pa ($p_{hyd.} = \frac{1}{2}\rho u^2$) hat [3].

Die Beschreibungen der in diesem Kapitel erläuterten Messmethoden basieren auf den Beschreibungen von Prof. Dr. Wolfgang Neise [4].

2.1 Schaumstoff – Windschirm

Bei einem Schaumstoff – Windschirm handelt es sich um einen offenporigen Schaumstoffaufsatz, der direkt auf die Mikrofonkapsel gesetzt wird. Diese Schaumstoffbälle werden üblicherweise im Freien verwendet und sind bis zu einer Geschwindigkeit von 15 m/s zugelassen. In räumlich begrenzten Strömungen, wie einer Rohrströmung, stellen die Schaumstoffbälle aufgrund ihrer Festigkeit und Größe ein zu großes Hindernis dar, weshalb sie dort nicht eingesetzt werden [4].



**Abbildung 1: Kugelförmiger Schaumstoff –
Windball [5]**

2.2 Nasenkonus

Für räumlich begrenzte Strömungen bis 20 m/s werden sogenannte Nasenkonusse eingesetzt. Dabei handelt es sich um Turbulenzschirme, die statt des üblichen Schutzgrills auf die Mikrofonkapsel geschraubt werden und so die Membran vor dem direkten Einfluss der Strömung schützen sollen. Das Mikrofon mit dem Nasenkonus wird parallel entgegen der Strömungsrichtung in der Strömung selbst platziert. Das Drahtgewebe rund um den Nasenkonus soll die Mikrofonmembran von den turbulenten Druckschwankungen abschirmen, aber die Akustik noch durchlassen. In Abbildung 2 sind zwei in dieser Ausarbeitung verwendete Nasenkonusse zu sehen.



**Abbildung 2: Zwei 1/4-Zoll Nasenkonusse
unterschiedlicher Längen**

2.3 Schlitzrohrsonde

Die Schlitzrohrsonde ist ein Aufsatz, der über ein Mikrofon (hier: Abbildung 3, 1/2-Zoll Mikrofon) gesetzt wird und gilt in Normen wie der DIN EN ISO 5136 als die zu verwendende Messmethodik in Strömungen bis 40 m/s. Die Schlitzrohrsonde hat auf einer Seite einen Längsschlitz, der mit einem perforierten Material bedeckt ist. So soll sichergestellt werden, dass Druckschwankungen in Form von Akustik zwar noch eindringen können und zum Mikrofon gelangen, die turbulenten Druckschwankungen der Strömung aber so weit abgeschwächt werden, dass sie nur noch einen geringen Einfluss auf die Messung haben. Die außerhalb vorhandenen Druckschwankungen verursachen im Inneren Elementarwellen, welche sich mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten. Durch ein Dämpfungsmaterial werden Reflexionen abgeschwächt, sodass nur die Druckschwankungen, die direkt zum Mikrofon laufen gemessen werden (vgl. [4]). Die in Abbildung 3 gezeigte Schlitzrohrsonde ist ein Eigenbau der Hochschule Düsseldorf. Der Bau dieser Schlitzrohrsonde wurde von Prof. Dr. Frank Kameier in einem Abschlussbericht (siehe [6]) beschrieben.

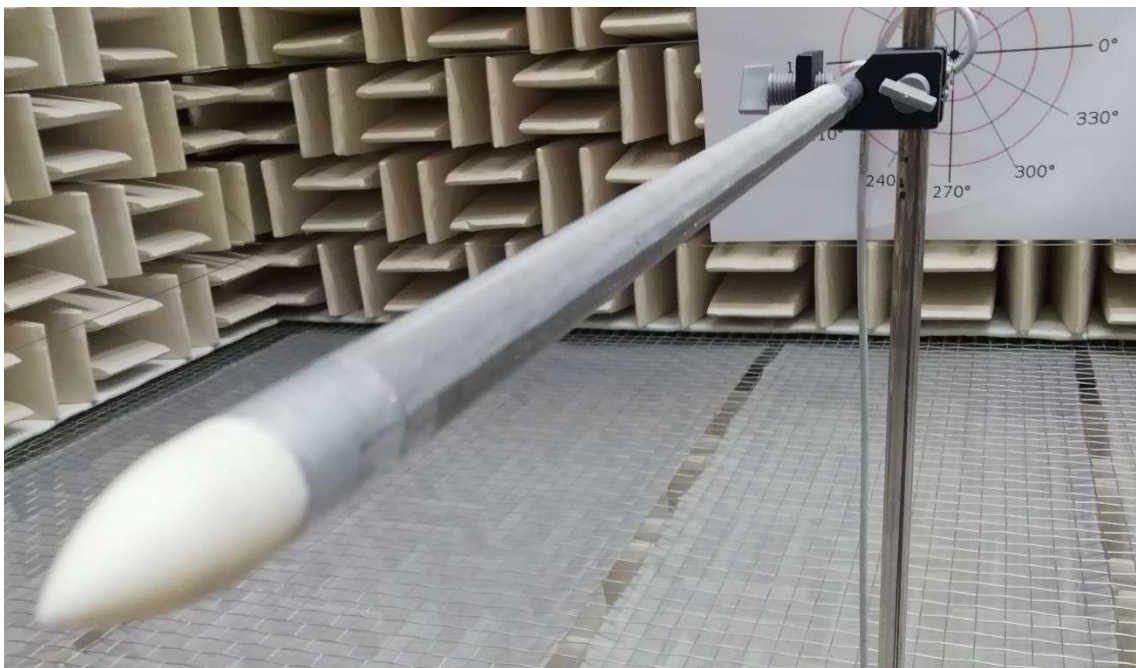


Abbildung 3: Bild einer 1/2-Zoll Schlitzrohrsonde Marke Eigenbau der HS Düsseldorf

2.4 Oberflächenmikrofon

Neben den erwähnten Turbulenzschirmen gibt es die Möglichkeit, Mikrofone direkt auf die Wand des Messkanals anzubringen. Diese sogenannten Oberflächenmikrofone sind so allerdings stark den hydrodynamischen Druckschwankungen ausgesetzt, da sich die Membran direkt an der Strömung befindet, beziehungsweise lediglich ein Turbulenzgitter

aufgeklebt werden kann (siehe Abbildung 4). Zudem stellt das Oberflächenmikrofon eine Erhebung im Messkanal dar, wodurch zusätzliche Geräusche verursacht werden können, die die Messung stören können.

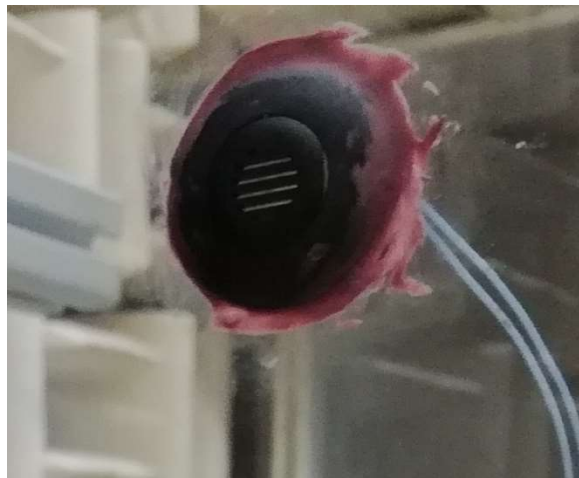


Abbildung 4: Oberflächenmikrofon, wie es im späteren Verlauf im Prüfstand auf einer Plexiglasscheibe installiert war

2.5 Sonstige Möglichkeiten

Neben den üblichen, in verschiedenen Normen erprobten, Messverfahren gibt es auch noch alternative Ansätze zur Verringerung des Einflusses der hydrodynamischen Druckschwankungen. Einige dieser Möglichkeiten werden hier kurz vorgestellt.

2.5.1 Pin-Hole Anordnung

Prof. Dr. Wolfgang Neise stellt in [4] vor, dass es möglich ist, in der Wand des Prüfstands einen Drucksensor hinter einer kleinen Bohrung in die Wand einzulassen (Abbildung 5).

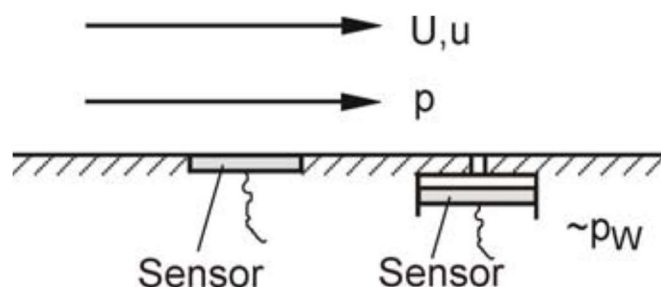


Abbildung 5: Darstellung eines wandbündigen Drucksensors direkt an der Strömung (links) und als Pin-Hole (rechts) [4]

Hierdurch wird die Angriffsfläche der turbulenten Druckschwankungen auf die Membran verkleinert, was allerdings das Übertragungsverhalten beeinflusst. Laut Neise ist dies, abhängig von den Abmessungen (akustische Impedanz), jedoch erst bei hohen Frequenzen der Fall.

2.5.2 Sondenmikrofone

Ebenfalls in [4] wird eine Anordnung vorgestellt, die ähnlich der Pin-Hole Anordnung ist, jedoch mit handelsüblichen Mikrofonen zu realisieren ist. In Abbildung 6 ist erkennbar, dass ein Kanülenrohr kurz hinter einer Bohrung an der Strömungskante eingelassen wird, an deren Ende das Mikrofon eingebaut ist. Dadurch sollen die turbulenten Druckschwankungen an der Membran verringert werden. Das geänderte akustische Übertragungsverhalten soll durch eine geeignete Kalibration berücksichtigt werden.

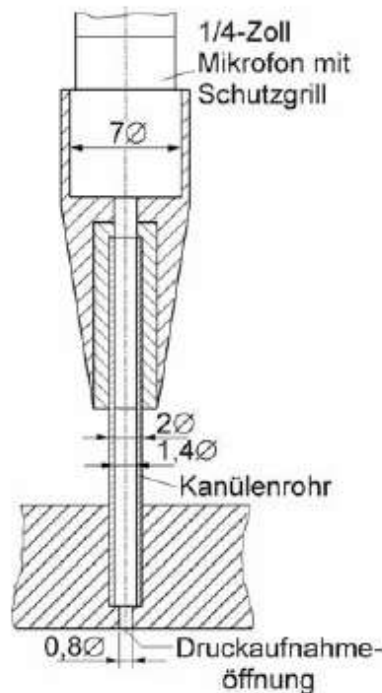


Abbildung 6: Sondenmikrofon, hier als 1/4-Zoll Mikrofon [4]

3 Prüfstand zur Identifizierung der Störanteile

Für die Messungen der Störanteile und deren Reduktion wurde als Messumgebung der reflexionsarme Raum (RaR) im ISAVE an der Hochschule Düsseldorf gewählt. Durch eine Verlängerung des im Strömungslabor installierten Windkanals (Abbildung 7), konnte die Strömung bis in den RaR geleitet werden und so eine akustisch deutlich verbesserte Messumgebung geschaffen werden, da so Reflexionen innerhalb des Messraums reduziert wurden.



Abbildung 7: Verlängerung des Windkanals, im Hintergrund sichtbar ist der reflexionsarme Raum

Durch die Düse am Ende der Verlängerung konnte eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 50 m/s erreicht werden (Abbildung 8), bei einer Düsenöffnung mit 28 cm Kantenlänge. Eine Messung der Strömungsgeschwindigkeit beim Hochlauf des Windkanals aus Abbildung 8 hatte bei einer Ruhemessung ein Offset von 22 Pa, was nachträglich in der Berechnung korrigiert wurde.

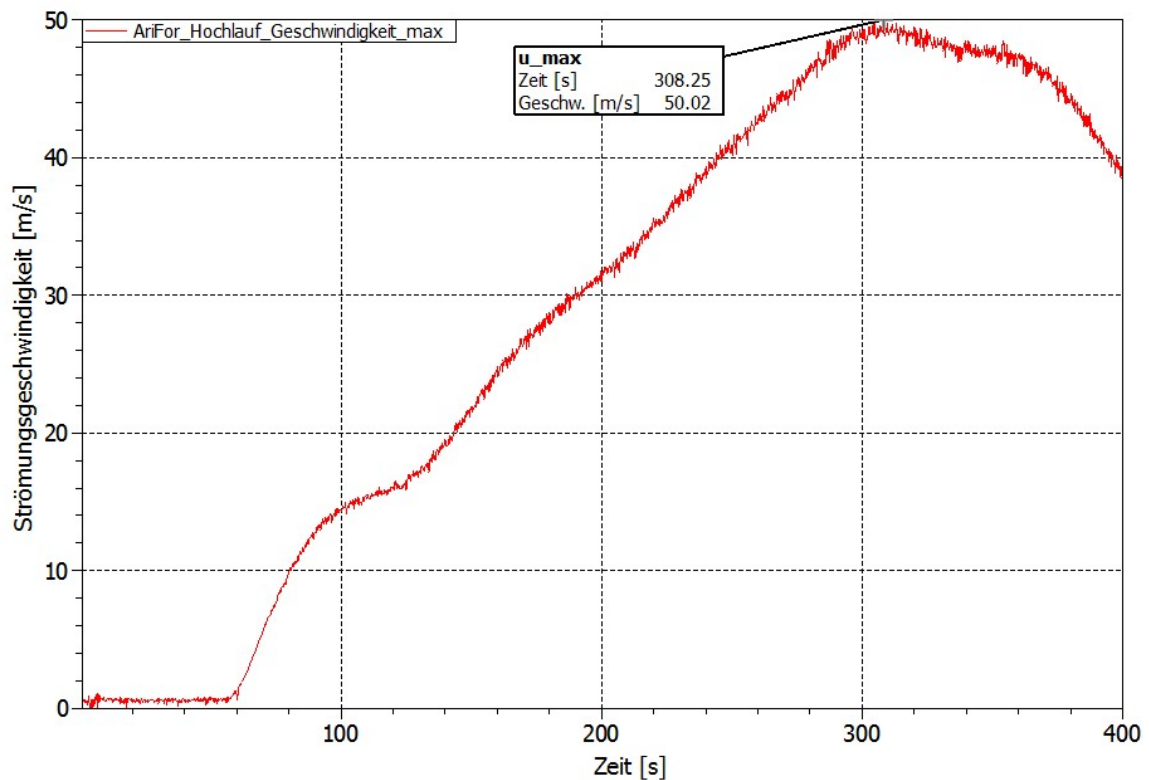


Abbildung 8: Maximale Strömungsgeschwindigkeiten beim Hochlauf des Windkanals

Gemessen wurde die Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe eines Prandtl'schen Staurohrs. Dieses gibt als Messgröße einen Differenzdruck aus, woraus sich dann die Strömungsgeschwindigkeit errechnen lässt. Das Staurohr wurde in der Strömung am Ende der Verlängerung des Windkanals etwa 7 cm von der Wand entfernt platziert. Die Platzierung wurde so gewählt, um später die Strömungsgeräusche, die durch das Staurohr erzeugt werden, zu verringern. Außerdem wurde das Staurohr mit einem Draht (sog. Scruton – Spirale) umwickelt, um so eine periodische Wirbelablösung zu verhindern.

Die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit u aus dem dynamischen Druckanteil Δp erfolgt über die Bernoulli-Gleichung [7].

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0 \quad (3-1)$$

Für den betrachteten Fall ist kein Gefälle $z_2 - z_1$ und somit kein Einfluss der Schwerkraft g vorhanden.

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0$$

Setzt man nun $u_1 = 0$ (Spitze des Staurohrs, keine Strömungsgeschwindigkeit) und ersetzt man $p_2 - p_1$ durch Δp erhält man die Formel zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit im Messpunkt, wobei ρ der Dichte der Luft entspricht.

$$u = \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (3-2)$$

Als Dichte der Luft wurde hier mit $1,2 \text{ kg/m}^3$ gerechnet, da eine laufende Temperaturmessung aufgrund der Einbausituation nicht möglich war, ohne weitere Störgeräusche zu erzeugen. Eine exakte Bestimmung der Geschwindigkeit spielt im Rahmen dieser Untersuchung auch nur eine eher untergeordnete Rolle, da es in erster Linie wichtig ist, dass diese bei den unterschiedlichen Messungen konstant ist, damit eine Vergleichbarkeit gegeben ist.

Da während einer laufenden Messung nur mit einem Staurohr gemessen werden konnte, wurde von der maximalen Strömungsgeschwindigkeit u_{max} auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit u_{mittel} geschlossen. Dazu wurde zunächst das Strömungsprofil bei der entsprechenden Strömungsgeschwindigkeit ermittelt (Tabelle 2), woraus im Anschluss ein Faktor für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit aus der maximalen Strömungsgeschwindigkeit ermittelt wurde.

Da bei den Einstellungen der Messungen ein Faktor von 1,2 für die mittlere Geschwindigkeit bei turbulenten Strömungen angenommen wurde (siehe 1/7-Potenz-Gesetz [8]), dieser aber tatsächlich niedriger ist (wird später in diesem Kapitel aufgezeigt), liegt die mittlere Geschwindigkeit bei der schnellen Strömung nicht bei 40 m/s (wie ursprünglich angenommen), sondern tatsächlich bei etwa 47 m/s.

Strömung 10 m/s	Position [cm] 0 = Mitte	0,00	7,00	10,50	12,25	13,15	13,90	14,00
	Differenz- druck [Pa]	73	70	66	65	65	56	0
	Geschw. [m/s]	11,00	10,81	10,51	10,41	10,40	9,69	0
Strömung 47 m/s	Position [cm] 0 = Mitte	0,00	7,00	10,50	12,25	13,15	13,90	14,00
	Differenz- druck [Pa]	1484	1408	1339	1306	1297	1177	0
	Geschw. [m/s]	49,73	48,44	47,23	46,66	46,50	44,28	0,00

Tabelle 2: Strömungsprofile Kanalquerschnitt, Geschwindigkeiten an Messpositionen

Zur Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit aus den Messungen an den einzelnen Positionen des Strömungsprofils, mussten die Geschwindigkeiten mit der Fläche des abgedeckten Messbereichs gewichtet werden (flächengewichtete Mittelung). Die Berechnung dafür wird in den Vorlesungsskripten von Prof. Frank Kameier der HS Düsseldorf [9] beschrieben.

Dazu wurde die repräsentative Fläche zwischen zwei Messpunkten genommen, auf einen quadratischen Querschnitt die Fläche A gerechnet und anschließend mit der arithmetisch gemittelten Geschwindigkeit der zwei Punkte multipliziert. So erhält man zunächst die Volumenströme $\dot{V}_{teil}$ in den einzelnen Abschnitten des Strömungsprofils. Eine Rechnung der (Teil-) Volumenströme für die Messungen an Position 0 cm und 7 cm bei 10 m/s ist hier exemplarisch gezeigt.

$$(A_2 - A_1) \cdot \frac{u_2 - u_1}{2} = \dot{V}_{teil} \quad (3-3)$$

$$[(0,07 \text{ m} * 2)^2 - (0 \text{ m} * 2)^2] * \frac{\left(11,00 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 10,81 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{2} = 0,2137 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Nach dem Aufsummieren aller Teilvolumenströme dividiert man den Gesamtvolumenstrom durch die Gesamtkanalfläche und erhält so die mittlere Geschwindigkeit.

In Tabelle 3 ist die Berechnung für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit bei 10 m/s dargestellt, in Abbildung 9 sind die einzelnen Strömungsprofile sichtbar.

Kantenlänge [m]	Geschwindigkeit [m/s]	Teilvolumenstrom [m³/s]
0,14	0,00	0,0054
0,139	9,69	0,0815
0,1315	10,40	0,0951
0,1225	10,41	0,1666
0,105	10,51	0,2612
0,07	10,81	0,2137
0	11,00	0
Gesamtvolumenstrom [m³/s]		0,8235
mittlere Geschw. u_mittel [m/s]		10,50

Tabelle 3: Berechnung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe der Teilvolumenströme

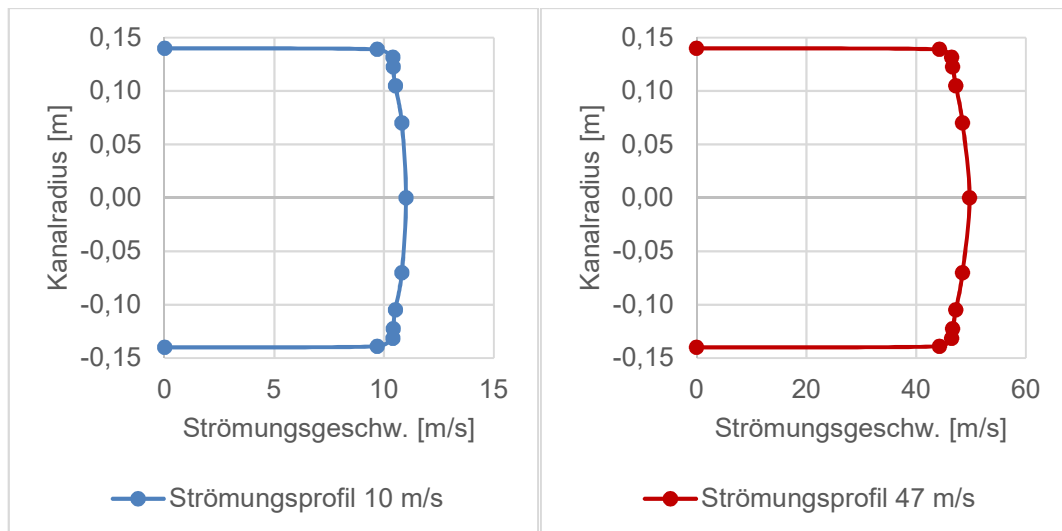


Abbildung 9: Strömungsprofile bei mittleren Geschwindigkeiten von 10 m/s (links) und 47 m/s (rechts), hier gezeigt über den halben Querschnitt, 0 cm entspricht der Kanalmitte

Um die Strömungsprofile vergleichbar zu machen, werden diese durch die jeweils mittlere Strömungsgeschwindigkeit (10,5 m/s und 47,2 m/s) normiert. Der Wert an jedem Punkt des Profils wird durch die mittlere Geschwindigkeit u_{mittel} dividiert. Dadurch erhält man die normierten Profile und kann diese nun miteinander vergleichen.

In Abbildung 10 sind diese normierten Strömungsprofile zu erkennen. Optisch sind die Strömungsprofile klar als turbulent zu bezeichnen, da die Strömungsgeschwindigkeit in der Nähe der Wand plötzlich stark abnimmt, wohingegen der Rest der Strömung in etwa eine gleich schnelle Strömung aufweist. Das normierte Strömungsprofil ist bei beiden Geschwindigkeiten nahezu identisch.

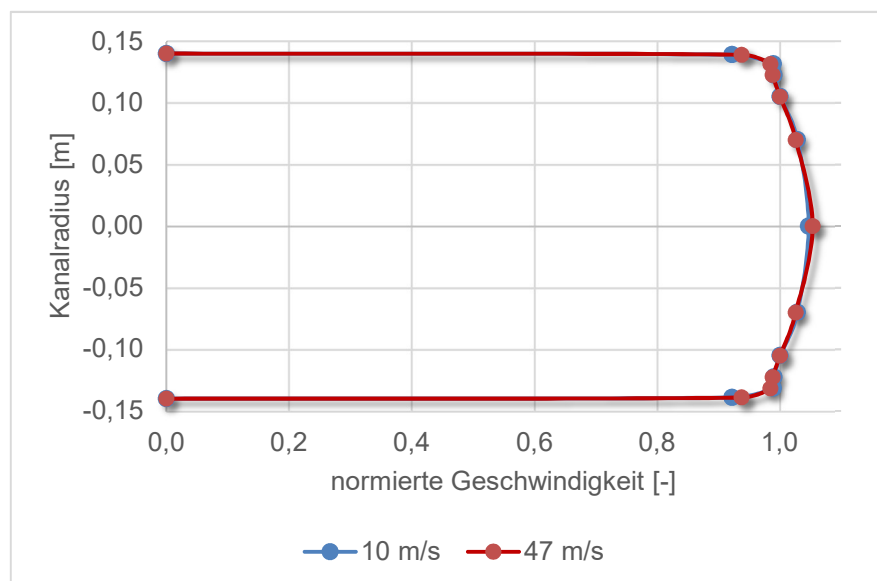


Abbildung 10: Normierte Strömungsprofile bei 10,5 m/s und 47,2 m/s

Die maximale Strömungsgeschwindigkeit in der Mitte des Kanals liegt normiert bei 1,05. Dieser Wert indiziert, dass die dort gemessene Geschwindigkeit $u_{\max}$ durch 1,05 dividiert werden muss, um auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Kanal zu kommen.

Errechnet man das Strömungsprofil nach dem 1/7-Potenz-Gesetz, so ergibt sich mit nachfolgender Formel das Strömungsprofil [10], mit R = Kanalradius [m], r = Radius der Messposition [m], $z = R - r$:

$$\frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}_{\max}} = \left(\frac{z}{R}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (3-4)$$

Löst man also (3-4) nach $\bar{u}(z)$ auf und trägt diese Strömungsgeschwindigkeit neben dem Kanalradius auf, so erhält man das Strömungsprofil.

Verglichen mit den Strömungsprofilen (hier exemplarisch für 47 m/s) aus Abbildung 9 ist das hier gemessene Profil stärker turbulent ausgeprägt, da die Geschwindigkeit in der Nähe der Wand im Verhältnis zur maximalen Geschwindigkeit höher ist, als dies beim 1/7-Potenz-Gesetz der Fall ist (Abbildung 11).

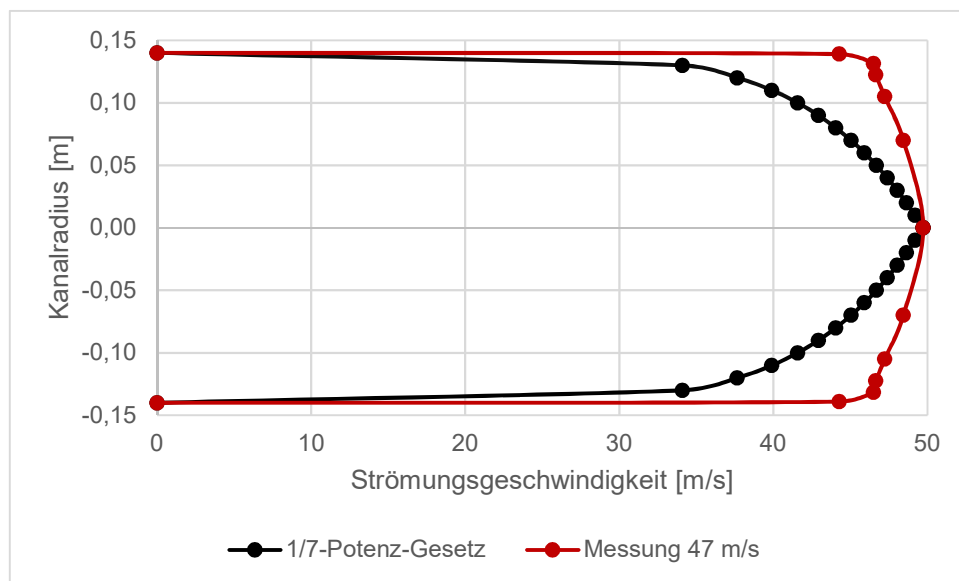


Abbildung 11: Vergleich des Strömungsprofils der Messung 47 m/s mit dem theoretischen Profil nach dem 1/7-Potenz-Gesetz

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erforderte eine wandbündige Einbausituation von Messmikrofonen mit 1/4-Zoll und 1/2-Zoll Membrandurchmesser, vor die unterschiedliche Materialien gespannt werden konnten, um die Mikrofone vor der Strömung und deren Turbulenz zu schützen. Außerdem musste eine Schlitzrohrsonde und ein Oberflächenmikrofon als Referenz verbaut werden können.

Nach einigen Entwürfen fiel die Wahl auf eine Plexiglasscheibe, die wandbündig an die Austrittsdüse des Windkanals angebracht wurde. In diese Plexiglasscheibe wurde dann ein speziell entwickelter Mikrofonhalter, bestehend aus zwei Teilen, eingebaut. Der Halter (Abbildung 12 und Abbildung 13) und die Plexiglasscheibe (Abbildung 13) wurden in Creo modelliert. Der Halter wurde anschließend im 3D-Druck Verfahren gefertigt. Die Plexiglasscheibe wurde von der Holzwerkstatt der HS Düsseldorf angefertigt.

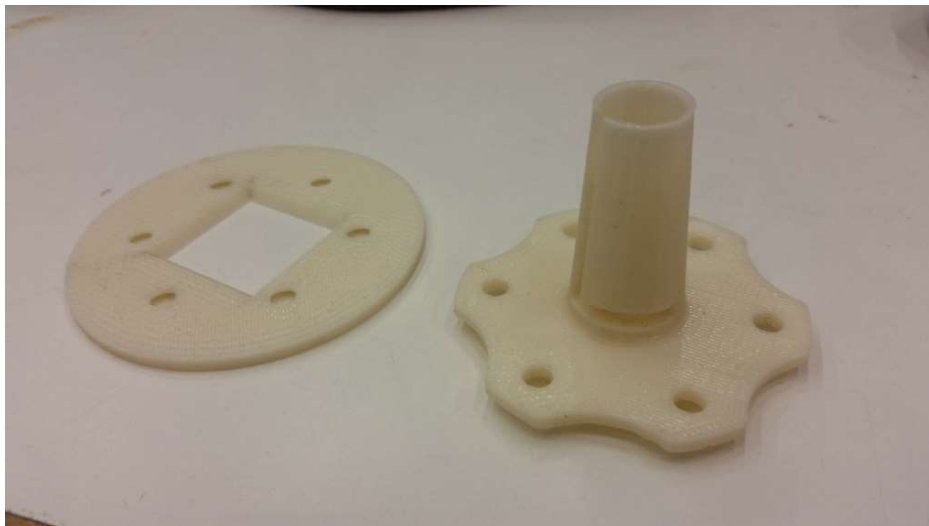


Abbildung 12: Befestigungsring (links) mit 1/2-Zoll Mikrofonhalter (rechts) für wandbündigen Einbau in eine Plexiglasscheibe

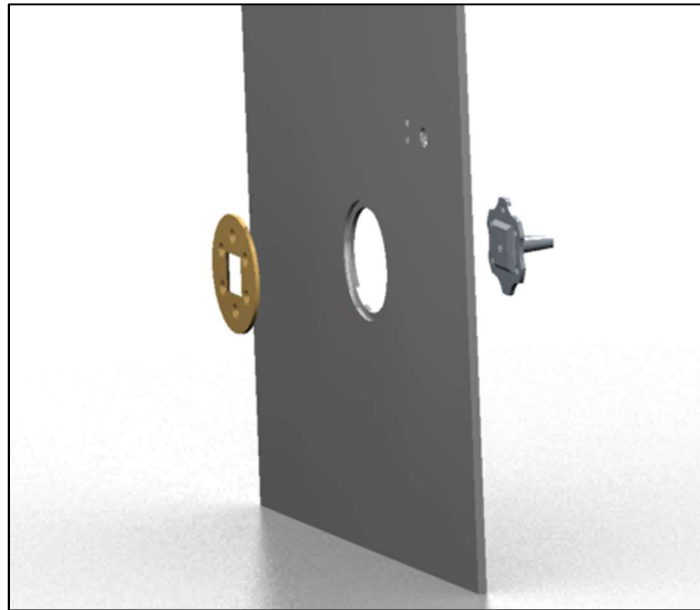


Abbildung 13: In Creo modellierter Halter und Plexiglasscheibe als Explosionsansicht

Für den Einbau in die Plexiglasscheibe wurde eine Nut gefräst, die es ermöglicht hat, den Befestigungsring wandbündig in die Plexiglasscheibe einzukleben. An diesem konnte anschließend der Mikrofonhalter mit dem Mikrofon, bei Bedarf auch mit dem Abschirmmaterial, mit Hilfe von Senkschrauben der Größe M5 befestigt werden.

Der fertig installierte Versuchsaufbau ist in Abbildung 14 zu sehen. Hier ist ebenfalls die Schlitzrohrsonde inklusive des aerodynamisch vorteilhaft geformten Halters sowie das verwendete Oberflächenmikrofon zu sehen.

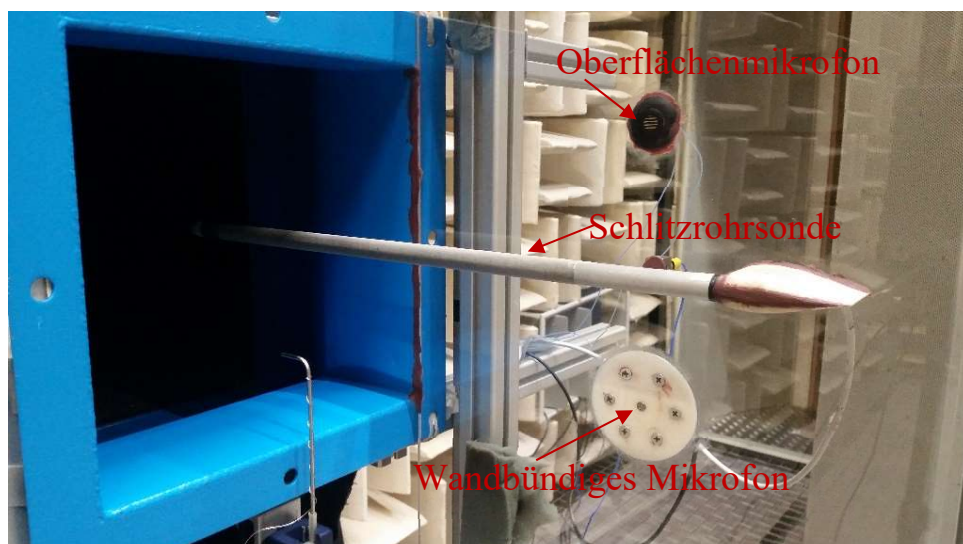


Abbildung 14: Fertig installierter Versuchsaufbau mit Oberflächenmikrofon (oben), Schlitzrohrsonde (mittig) und wandbündigem Mikrofon (unten)

In Abbildung 14 ist außerdem das verwendete Prandtl'sche Staurohr zu sehen. Als Kontrolle zur Bestimmung von Schwingungen an der Scheibe wurde an der Rückseite zusätzlich noch ein Schwingungsaufnehmer angebracht.

Um einen kantenlosen Übergang zwischen Windkanal und Plexiglasscheibe zu schaffen, wurde die Lücke mit Knete abgedichtet und wandbündig geglättet. Ebenfalls mit Knete wurden die Schlitzlöcher der Schrauben abgedichtet und sämtliche entstandenen Lücken an der Schlitzrohrsonde und dem Oberflächenmikrofon. Dadurch sollen Strömungsablösung und entstehende Geräusche bzw. Turbulenzen vermieden werden.

Da als Referenzsignal ein synthetisches Geräusch (hier weißes Rauschen) von außen eingebracht werden soll, wurde ein Lautsprecher in einem festen Abstand von 128 cm zur Plexiglasscheibe aufgestellt. Der Abstand hat sich aus der Einbausituation im reflexionsarmen Raum als maximaler Abstand ergeben, bei dem der Lautsprecher aufgestellt werden konnte, da dieser möglichst weit weg platziert werden sollte, um ein möglichst gleichmäßiges Geräusch ausgeben zu können. Darauf muss geachtet werden, da der Monitor zwei Treiber hat, welche unterschiedliche Frequenzbereiche wiedergeben. Die Höhe des Lautsprechers wurde ebenfalls konstant gehalten. Diese betrug vom Boden des Lautsprechers bis zum Ende des Ständers 124 cm.

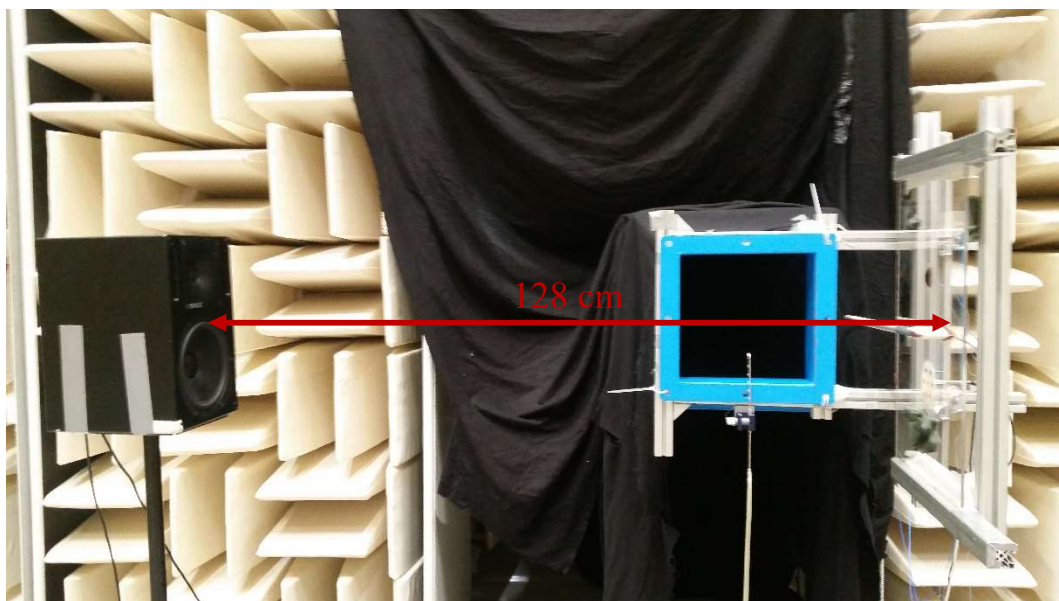


Abbildung 15: Lautsprecher im Abstand von 128 cm zur Plexiglasscheibe, hier bei einer Messung außerhalb der Strömung

Ebenfalls erkennbar ist der schwarze Moltonstoff mit dem der Durchgang der Windkanals zugehangen wurde, um Reflexionen aus dem nebenan gelegenen Hallraum möglichst gering zu halten.

3.1.1 Messumgebung reflexionsarmer Raum

Die Messungen wurden im reflexionsarmen Raum (Abbildung 16) der Hochschule Düsseldorf durchgeführt, welche bis 100 Hz (untere Grenze) als reflexionsfrei deklariert ist. Dadurch, dass der Windkanal in den Raum geleitet wurde, musste allerdings eine Zwischentür geöffnet werden, wodurch eine Lücke nach außen entstanden ist, welche mit Moltonstoff abgehängt wurde, um Reflexionen möglichst gering zu halten (Abbildung 15). Insbesondere bei tiefen Frequenz ist allerdings nicht auszuschließen, dass Schall reflektiert wird, da diese Signalanteile aufgrund der nur geringen Dicke des Stoffs kaum absorbiert werden.

Die Analyse der späteren Messungen erfolgt von 10 bis 17.000 Hz, wobei die Werte unterhalb von 100 Hz aufgrund der Messumgebung nicht als reflexionsfrei angenommen werden können. Mögliche Besonderheiten in diesem Bereich können also auch auf Raummoden zurückzuführen sein. Der Frequenzbereich der Messungen von 10-17.000 Hz wurde gewählt, um einen möglichst großen Messbereich abzubilden, da zu Beginn der Messungen nicht bekannt ist, in welchem Frequenzbereich sich der Einfluss der hydrodynamischen Druckschwankungen auswirken wird.



Abbildung 16: Reflexionsarmer Raum bei Messung des Frequenzgangs des Lautsprechers

3.2 Messtechnik

Die verwendeten Messsensoren waren verschiedene Mikrofone, ein Schwingungsaufnehmer, ein Prandtl'sches Staurohr und ein Lautsprecher. Diese wurden jeweils über unterschiedliche Signalketten mit der Verarbeitungssoftware PAK der Firma Müller BBM verbunden. Eine Auflistung aller verwendeten Messinstrumente ist in Tabelle 4 ersichtlich.

Bezeichnung	Zweck
PAK MK II – Müller BBM	Frontend, an das Messinstrumente angeschlossen werden
Nexus Condition Amplifier Bruel & Kjaer Typ 2690	Versorgung der Kondensatormikrofone mit 200 V Polarisationsspannung
Microtech Gefell 1/4-Zoll Messmikrofon MK301 (Kapsel) MV302 (Vorverstärker)	Messung der Akustik
Bruel & Kjaer 1/2-Zoll Messmikrofon 4165 (Kapsel) und 2639 (Vorverstärker)	Messung der Akustik
Schwingungsaufnehmer PCB Piezotronics 356A15	Messung der Schwingungen der Plexiglasscheibe
Bruel & Kjaer Oberflächenmikrofon Type 4949	Messung der Akustik
Schlitzrohrsonde Eigenbau HS Düsseldorf	Messung der Akustik, Reduktion der turbulenten Druckschwankungen
1/4 -Zoll Nasenkonus kurz (14 mm), Hersteller nicht bekannt	Messung der Akustik, Reduktion der turbulenten Druckschwankungen
1/4 -Zoll Nasenkonus lang (22 mm), Hersteller nicht bekannt	Messung der Akustik, Reduktion der turbulenten Druckschwankungen
Prandtl'sches Staurohr 3mm Durchmesser	Messung der Strömungsgeschwindigkeit über den Differenzdruck
Manometer – Mecotec DP 200	Verarbeitung der Druckdifferenz des Staurohrs
Monitorbox – Genelec 1031a	Wiedergabe des weißen Rauschens
Minirator MR2 – NTI Audio	Signalgenerator für weißes Rauschen
PAK – Müller BBM	Software zur Datenerfassung und Auswertung
Klasse 1 Kalibrator – Bruel & Kjaer Type 4230	Mikrofonkalibrator (94 dB – 1000 Hz)
Klasse II Kalibrator	Kalibrator für Schwingungsaufnehmer (9,81 m/s ² - 159,2 Hz)

Tabelle 4: Auflistung der verwendeten Messtechnik

3.2.1 Lautsprecher

Trotz des verwendeten weißen Rauschens, welches über alle Frequenzen die gleiche Lautstärke besitzt, hat der Lautsprecher seinen eigenen Frequenzgang, wodurch das Signal beeinflusst wird. Um zu ermitteln, wie der Frequenzgang des Lautsprechers aussieht, wurde das weiße Rauschen in einem reflexionsarmen Raum gemessen. Die Messung wurde mit einer Sampling Rate von 44.100 Hz aufgenommen bei einer Blockgröße von 32.768, wodurch eine Frequenzauflösung von 1,34 Hz möglich ist. Gemittelt wurde bei der Messung 300 mal. Für die Frequenzanalyse wurde ein Hanning Fenster verwendet mit einer Überlappung von 66,7 %.

Dazu wurde in einem Abstand von 3,0 m eines der verwendeten 1/2-Zoll Mikrofone aufgebaut und ein weißes Rauschen aus dem Lautsprecher aufgenommen. Das Ergebnis der Messung ist in Abbildung 17 zu sehen. Auffällig ist hier der starke Abfall unterhalb von 50 Hz und der leichte Abfall unterhalb von 80 Hz. Für Studiomonitore ist dies ein durchaus üblicher Wert, der stark von der Größe des Lautsprechers abhängt. Da die Grenzfrequenz des reflexionsarmen Raums jedoch bei etwa 100 Hz liegt, ist es nicht auszuschließen, dass Raummoden hier das Messergebnis im Frequenzgang beeinflussen haben.

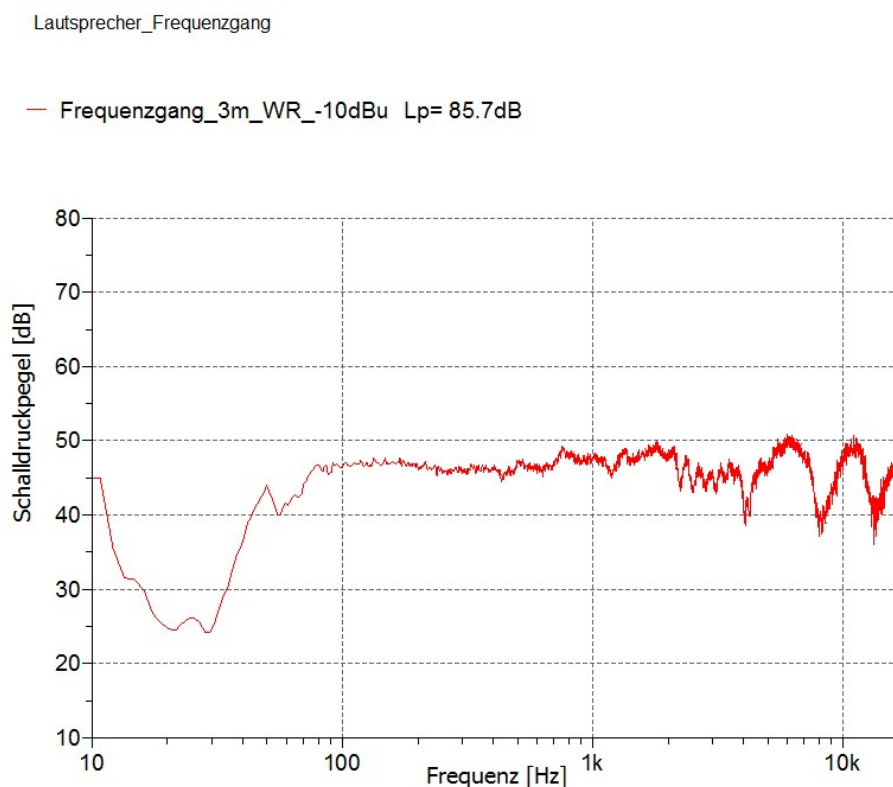


Abbildung 17: Gemessener Frequenzgang des Lautsprechers

Ebenfalls sind die Absenkungen bei 4.000 und 8.000 Hz zu erkennen. Im Mittenbereich ist der Lautsprecher also weitestgehend linear, wobei ab 4.000 Hz Verstärkungen bzw.

Verminderungen einiger Frequenzen zu erkennen sind. Dies liegt daran, dass der verwendete Lautsprecher ein Studiomonitor ist, welcher üblicherweise in Tonstudios verwendet wird. Hier ist zwar ein neutraler Klang gewünscht, durch bestimmte Verstärkungen einiger Frequenzen kann jedoch die Detailtreue in diesem Bereich verbessert werden, was zu einer besseren Arbeitsweise im Prozess des Mischens eines Liedes führen kann.

3.2.2 Mikrofontyp

Bei den verwendeten Mikrofonen handelte es sich bei allen Modellen um Druckempfänger. Das bedeutet, dass der Schalldruck nur auf eine Seite der Membran trifft und die andere Seite von einer geschlossenen Kapsel umgeben ist. Das Innere der Kapsel muss jedoch durch eine kleine Ausgleichsbohrung mit der Umgebung verbunden sein, damit so ein statischer Druckausgleich stattfinden kann. Dieser benötigt bei Änderung der Druckverhältnisse immer einige Zeit, da sich der Druckausgleich nur langsam durch die Kapillare einstellt. Ohne diese Bohrung wären die Mikrofone lediglich elektrische Barometer, da sie bei Druckschwankungen nicht die Membran entspannen können. Die Membran selber bildet gemeinsam mit einer Gegenelektrode einen Kondensator, der durch die angelegte Polarisationspannung von (hier) 200 V über einen Widerstand eine konstante Ladung erzeugt. Durch den eintreffenden Schalldruck bewegt sich die Membran, sodass sich der Abstand d zwischen den beiden Elektroden und somit die Kapazität C verändert (Prinzip aus [11]).

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{\varepsilon_0 * A} * d \quad (3-5)$$

Dadurch ändert sich nach (3-5) [12], unter Berücksichtigung der Dielektrizitätskonstante ε_0 und der Fläche des Kondensators A , die anfallende Spannung U , welche das Messsignal darstellt. In Abbildung 18 wird dieses Prinzip illustriert.

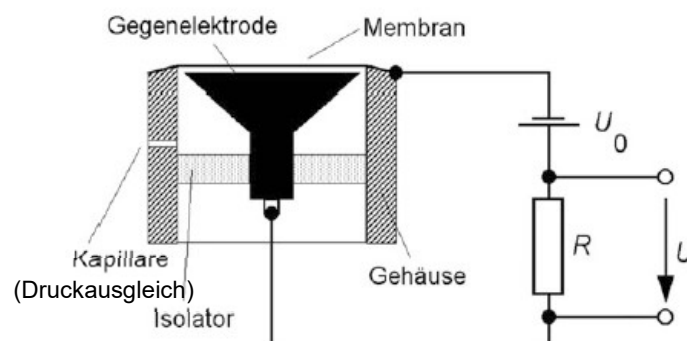


Abbildung 18: Prinzip eines Druckempfängers [11]

3.3 Strömungsakustische Geräusche

Neben dem synthetischen Signal des weißen Rauschens wurden in der Messreihe auch einige Versuche durchgeführt, bei denen Objekte in die Strömung eingebracht wurden, um so Geräusche zu erzeugen. Dazu wurde ein Lochgitter genommen, um ein breitbandiges Geräusch in der Strömung zu erzeugen, da das Gitter eine hohe Turbulenz erzeugt, was sich in einem breitbandigen Geräusch äußert. Das verwendete Lochgitter (Abbildung 19) war ein Aluminiumgitter, mit einer Seitenlänge der Löcher von 8 mm und einer Breite der Gitterstäbe von 4 mm.

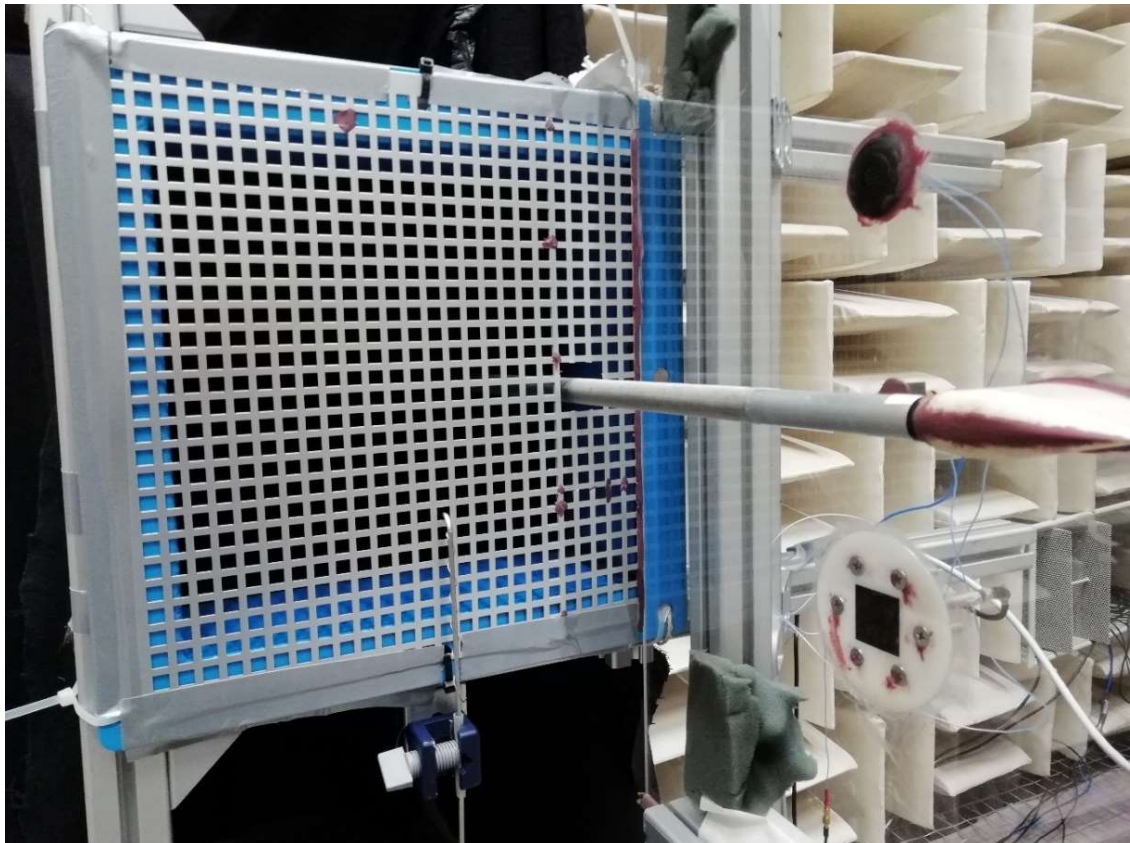


Abbildung 19: Lochgitter zur Erzeugung eines breitbandigen akustischen Signals

Neben dem breitbandigen Geräusch des Lochgitters wurde außerdem ein tonales Geräusch (Hiebton) erzeugt. Hierzu wurde ein Zylinder bzw. Rundstab in die Strömung eingebracht. Der Durchmesser dieses Rundstabs (Zylinder) betrug 3 mm und wurde mittig in der Strömung platziert (Abbildung 20).

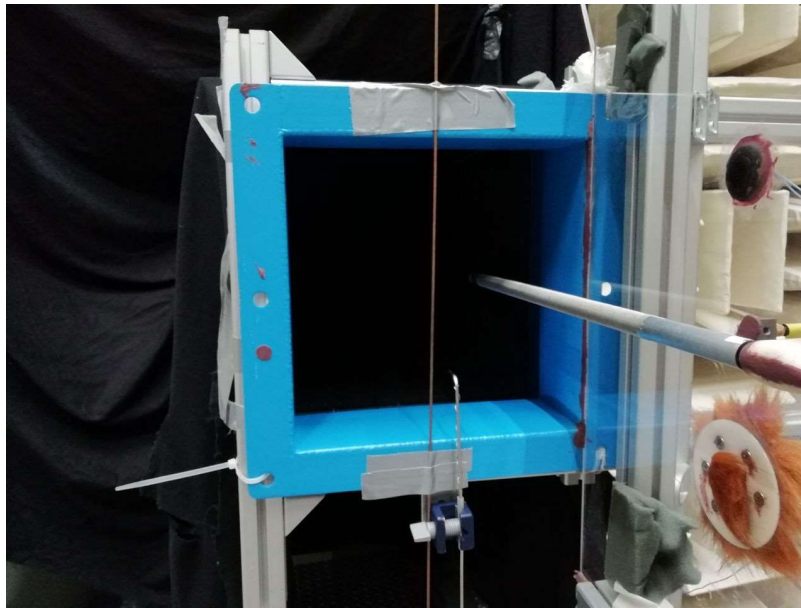


Abbildung 20: Rundstab in der Strömung

Der Durchmesser wurde so gewählt, dass die Wirbelablösung am Zylinder und somit die Frequenz des erzeugten Tons im Bereich von 500-5.000 Hz liegt. Diese variiert je nach Durchmesser und Strömungsgeschwindigkeit.

Die Berechnung der Frequenz der Wirbelablösung erfolgt über die sogenannte Strouhalzahl Sr [13], welche für unterschiedliche Reynoldszahlen andere Werte annimmt, über weite Bereiche der Reynoldszahl jedoch konstant ist ($Sr = 0,21$, siehe Abbildung 21).

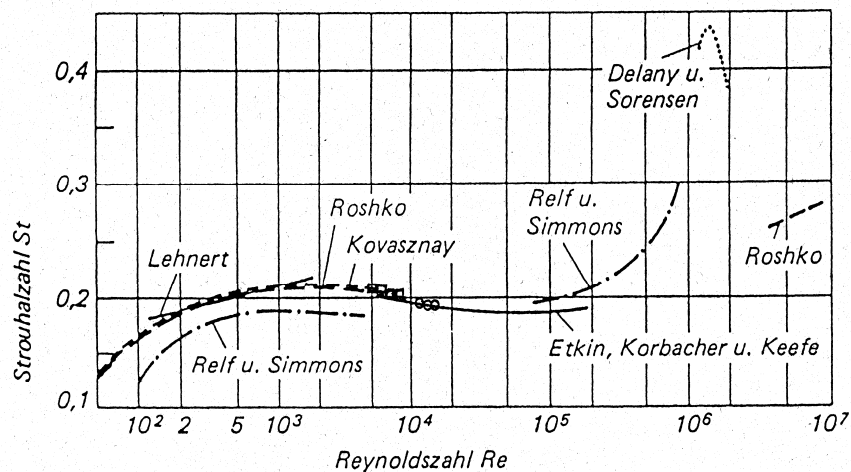


Abbildung 21: Strouhalzahl (hier als St bezeichnet) in Abhängigkeit der Reynoldszahl [14]

Daraus ergeben sich nach der Gleichung (3-6) für die Strouhalzahl für einen Durchmesser des Zylinder $D = 0,003$ m, umgestellt nach der Frequenz f , die theoretischen Frequenzen der Wirbelablösung.

$$f = \frac{Sr * u}{D} \quad (3-6)$$

$$f = \frac{0,21 * 10 \frac{m}{s}}{0,003 m} = 700 [Hz]$$

$$f = \frac{0,28 * 47 \frac{m}{s}}{0,003 m} = 3.290 [Hz]$$

Die Frequenzen liegen somit also theoretisch im angestrebten Bereich von 500-5.000 Hz.

3.4 Abschirmmaterialien

Zum Abschirmen des wandbündigen Mikrofons von den Turbulenzen in der Strömung wurden unterschiedliche Materialien untersucht. Diese zeichnen sich durch unterschiedliche Eigenschaften in akustischer Dämmung oder auch Luftdurchlässigkeit aus. Untersucht wurden ein poröses akustisches Vlies, Netzstrumpf, Frischhaltefolie, Fellstoff und ein Material (Sefar Petex), das beim Bau von Schlitzrohrsonden der HS Düsseldorf verwendet wurde. Die Materialien sind in Abbildung 22 im verbauten Zustand zu erkennen.

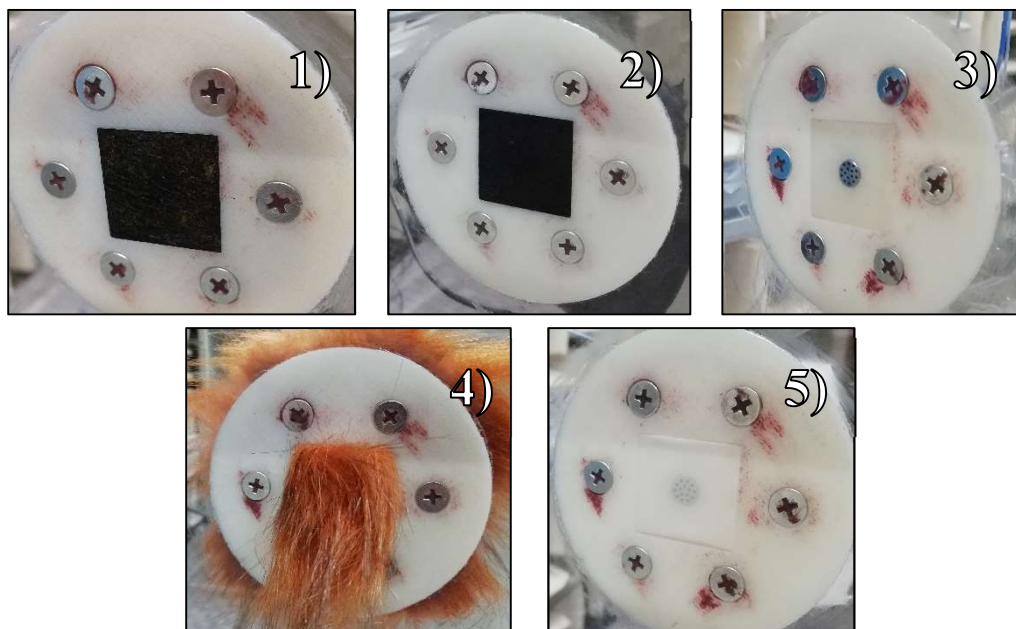


Abbildung 22: Abschirmmaterialien - 1) Akustisches Vlies, 2) Netzstrumpf, 3) Frischhaltefolie, 4) Fellstoff, 5) Sefar Petex

Eine Quantifizierung der Eigenschaften der Abschirmmaterialien erfolgt im weiteren Verlauf durch die jeweilige akustische Dämmeigenschaft, bzw. den daraus resultierenden Frequenzgangkorrekturen.

3.5 Messplan

Um den zeitlichen Aufwand möglichst gering zu halten, mussten die Versuche so gewählt werden, dass zwar möglichst viele Informationen gesammelt werden konnten, jedoch keine Messung doppelt gemacht werden sollte. Ebenfalls sollten die Umrüstzeiten möglichst effizient genutzt werden. Zudem musste darauf geachtet werden, möglichst wenig die Geschwindigkeit des Windkanals umzustellen, da diese Umstellung etwa 5 Minuten gebraucht hat, um sich bei einer Geschwindigkeit einzupendeln.

Dies wäre zwar ein typischer Einsatz für die statistische Versuchsplanungsmethode „Design of Experiments“ (DoE), allerdings muss dafür eine konkrete Zielgröße definiert werden können, was in diesem Fall nicht eindeutig möglich war.

Die Messungen, die gemacht werden mussten, lassen sich grob in drei Bereiche aufteilen.

Die Referenzmessungen, die dazu dienen den Einfluss der Turbulenzen zu erfassen und einen Sollzustand aufzunehmen, damit erkennbar ist wann das erzielte Ergebnis gut ist.

Dabei wurde zunächst der Versuchsstand selber, also der Windkanal, untersucht. Hier wurde z.B. die maximal zu erreichende Strömungsgeschwindigkeit ermittelt. Ebenfalls wurden Messungen außerhalb der Strömung gemacht, um die reinen Strömungsgeräusche aufzunehmen, aber auch das wandbündige Mikrofon in der Strömung vermessen, um so den Einfluss der hydrodynamischen Druckschwankungen zu ermitteln. Hier wurden unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten vermessen und sowohl mit als auch ohne weißem Rauschen durchgeführt. Durch die dezidierte Betrachtung der einzelnen Messungen kann so später genau beurteilt werden, welche Geräusche durch hydrodynamische und welche durch akustische Druckschwankungen entstehen.

Die Messungen der Abschirmmaterialien, bei welchen die Referenzmessungen im Prinzip noch einmal wiederholt werden, nur diesmal mit den entsprechenden Materialien vor dem wandbündigen Mikrofon. Dies geschah sowohl mit synthetischem Signal (weißes Rauschen), als auch mit Strömungsgeräuschen (Lochgitter/Zylinder). Zur Auswertung der Ergebnisse mussten zudem die Frequenzgangkorrekturen der Materialien ermittelt werden.

Zuletzt wurden noch einige *selektive Messungen* vorgenommen, bei denen neben den hauptsächlich betrachteten Geschwindigkeiten von 10 und 47 m/s noch 20 m/s betrachtet wurden. Außerdem wurden noch zwei unterschiedliche Nasenkonusse vermessen, um auch bei diesen Turbulenzschirmen Erkenntnisse sammeln zu können.

4 Auswertung, Identifizierung und Reduktion der Störanteile

Alle Messungen wurden mit einer Sampling Rate von 44.100 Hz aufgenommen bei einer Blockgröße von 32.768, wodurch eine Frequenzauflösung von 1,34 Hz möglich ist. Dadurch kann ein breiter Bereich des menschlichen Hörbereichs abgedeckt und gleichzeitig eine gute Frequenzauflösung erreicht werden. Man könnte dies nochmals erweitern, indem man die Sampling Rate und die Blockgröße erhöht. Dadurch steigert sich allerdings die Messzeit erheblich, wobei nur ein geringer Frequenzbereich am Rande des menschlichen Hörspektrums (17.000-20.000 Hz), dazugewonnen wird. Gemittelt wurde bei jeder Messung 300 mal. Für die Frequenzanalyse wurde ein Hanning Fenster verwendet mit einer Überlappung von 66,7 %. Die Messmikrofone wurden mit einem 1.000 Hz Ton von 94 dB kalibriert.

4.1 Hochlauf Windkanal

Um den Prüfstand zunächst einordnen zu können, wurde zu Beginn der Messungen der Hochlauf des Windkanals untersucht und auf Auffälligkeiten im Frequenzspektrum bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten geachtet (Abbildung 23). Der Hochlauf erfolgte von 0%-100% Leistung des Windkanals. Die Messung der Akustik erfolgte dabei mit dem wandbündigen Mikrofon in der Strömung. Die Messparameter wurden entsprechend verändert, um die Veränderungen im Frequenzspektrum erkennen zu können. Dazu wurde die Blockgröße auf 16.384 geändert, bei gleicher Sampling Rate von 44.100 Hz. Es wurde nicht gemittelt, was zu einer Blocklänge von 0,3715 s geführt hat. Die Frequenzauflösung ist auf Kosten der zeitlichen Auflösung (durch Verringerung der Blockgröße) etwas geringer geworden und betrug 2,69 Hz.

Der Hochlauf (Abbildung 23) zeigt, dass der Schalldruckpegel insbesondere im Frequenzbereich von 10 – 400 Hz mit ansteigender Strömungsgeschwindigkeit kontinuierlich zunimmt. Höhere Frequenzen werden ebenfalls etwas lauter, allerdings gibt es im gesamten Frequenzspektrum keine erkennbaren Ereignisse, die nur bei einer bestimmten Geschwindigkeit auftreten. Die Zunahme an hohen Frequenz ist vermutlich auf die zunehmenden Turbulenzen zurückzuführen. Im weiteren Verlauf konnten die untersuchten Geschwindigkeiten also frei gewählt werden. Dabei wurden die unter 3.5 bereits erwähnten Geschwindigkeiten ausgewählt.

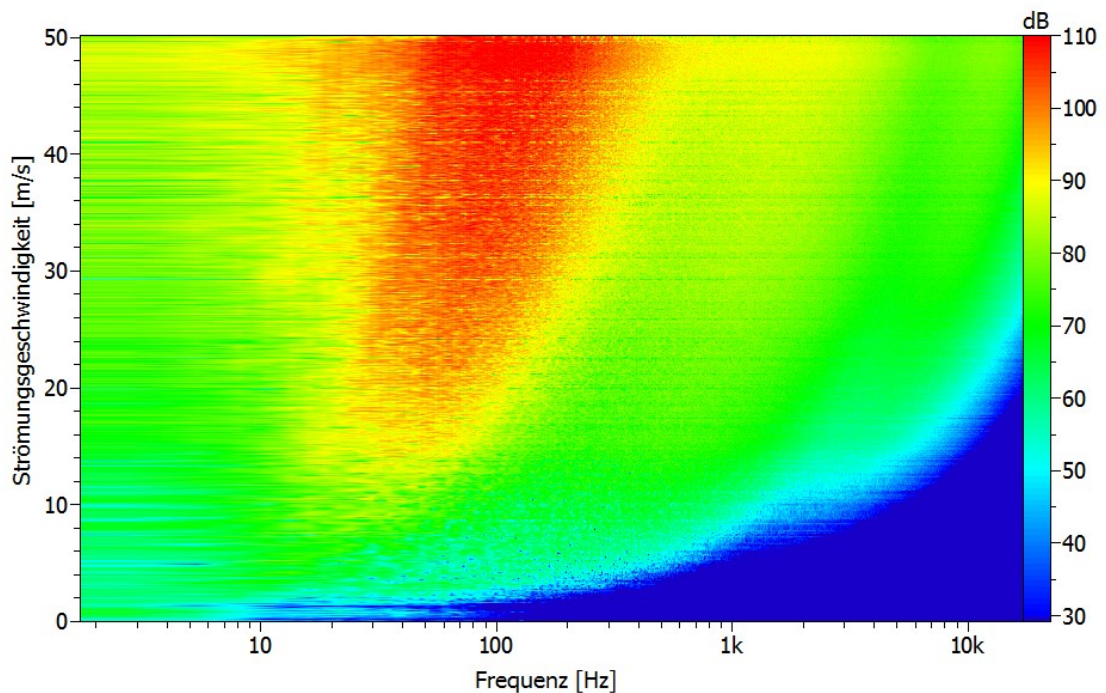


Abbildung 23: Hochlauf Differenzdruck über Frequenz, Untersuchung auf geschwindigkeitsabhängige Geräusche, wandbündiges Mikrofon in Strömung

Die beim Hochlauf entstandenen Schwingungen sind in Abbildung 24 dargestellt. Erkennbar ist hier eine Schwingung bei 24 Hz, die sich im Hochlauf nahezu konstant fortsetzt und kurz vor 50 m/s das Maximum erreicht. Außerdem steigt eine Schwingung, beginnend bei 24 Hz, mit steigender Geschwindigkeit an (bis etwa 60 Hz). Ab ca. 15 m/s wird eine Schwingung bei etwa 130 Hz erkennbar, die unverändert bleibt, sich aber mit steigender Strömungsgeschwindigkeit immer weiter verstärkt.

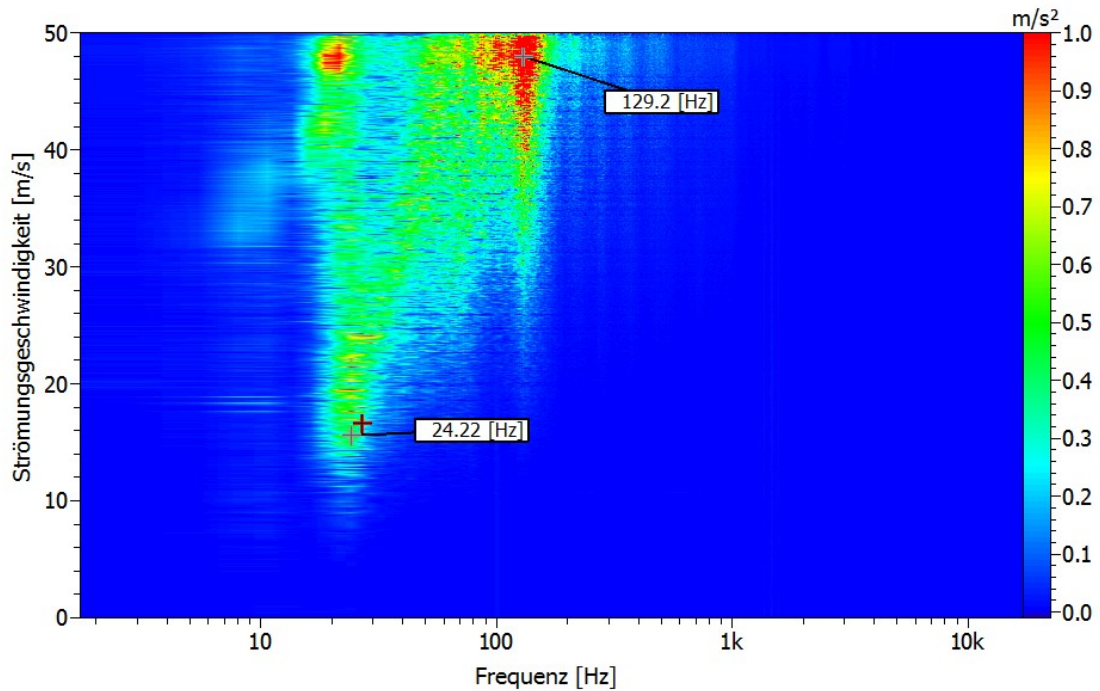


Abbildung 24: Hochlauf Differenzdruck über Frequenz, Untersuchung auf geschwindigkeitsabhängige Geräusche, Schwingungsaufnehmer

Bei den Frequenzen, die vom Schwingungsaufnehmer dargestellt werden, könnten also die Geräusche aus Abbildung 23 ihre Ursache in den Schwingungen haben. Insbesondere ab 130 Hz sind kaum Schwingungen erkennbar, wodurch sich sagen lässt, dass die Geräusche aus der Strömung bzw. den hydrodynamischen Druckschwankungen kommen müssen.

4.2 Frequenzgangkorrekturen

Um die Wirkung auf die Reduktion der Störanteile der unterschiedlichen Materialien verifizieren zu können, musste die akustische Dämmeigenschaft der Materialien bestimmt werden. Dazu wurde für jedes Material eine Frequenzgangkorrektur ermittelt, die später auf die Messung hinzuaddiert werden musste.

4.2.1 Abschirmmaterialien

Zur Ermittlung dieser Korrekturen wurde ein weißes Rauschen aufgenommen, einmal mit und einmal ohne das entsprechende Material vor dem Mikrofon. Die Distanz zwischen dem Lautsprecher und dem Mikrofon betrug dabei 3 m (Abbildung 25). Der Abstand selber spielt für die Frequenzgangkorrektur zwar keine Rolle, da die Dämmeigenschaften durch das Material entstehen und nicht durch den Abstand. Er sollte aber groß genug gewählt werden, damit der verwendete Lautsprecher ein möglichst gleichmäßiges Wellenfeld ausgibt (siehe auch Kapitel 3.2.1).

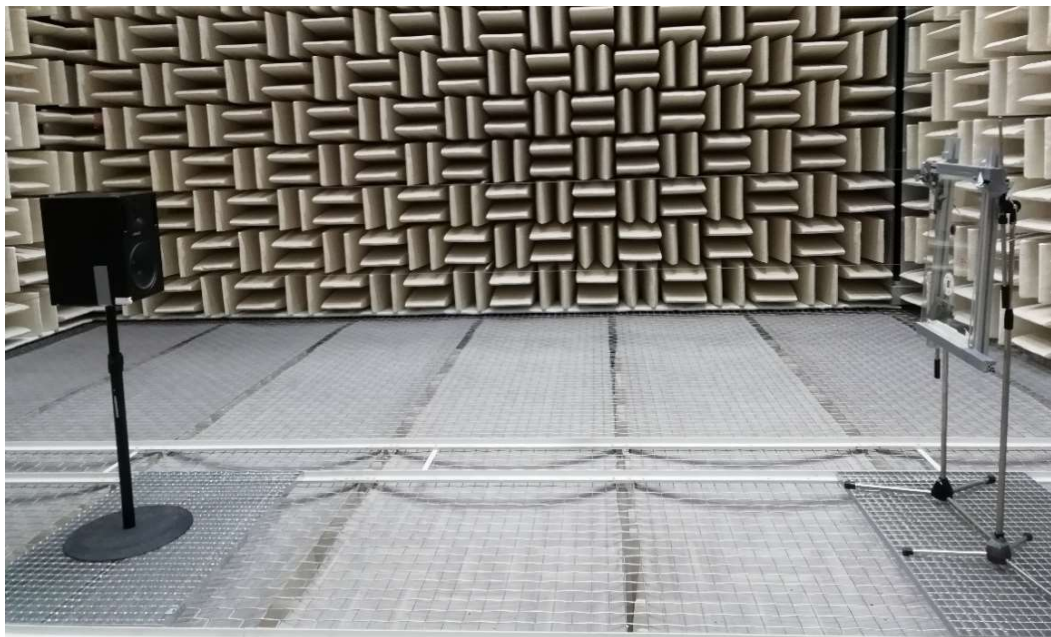


Abbildung 25: Ermittlung der Frequenzgangkorrekturen der Abschirmmaterialien

Subtrahiert man die Messungen mit Abschirmmaterial von den Messungen ohne Abschirmmaterial, so erhält man die einzelnen Korrekturspektren.

$$APS_{Korr.} = APS_{ohne\ Mat.} - APS_{mit\ Mat.} \quad (4-1)$$

Der Unterschied ist in Abbildung 26 beispielhaft für den Fellstoff dargestellt. Dieser hat auf den Gesamtschalldruckpegel eine Dämmwirkung von 2,3 dB, gemessen über den gesamten Frequenzbereich.

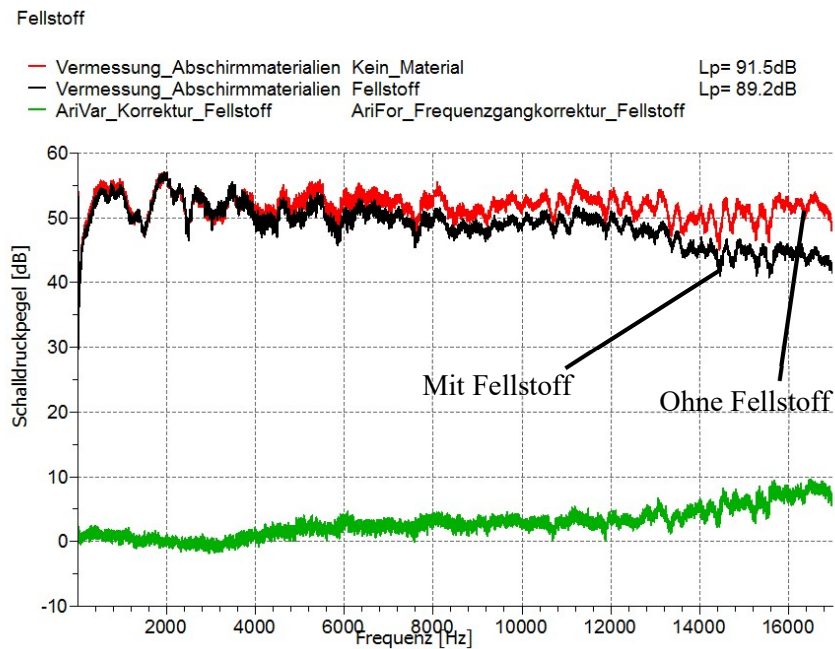


Abbildung 26: Ermittlung der Frequenzgangkorrektur für den verwendeten Fellstoff

Die ermittelten Frequenzgangkorrekturen für alle verwendeten Materialien sind in Abbildung 27 dargestellt. Auffällig hierbei ist, dass insbesondere unterhalb von 5.000 Hz die meisten Materialien kaum einen Dämpfungseffekt haben. Lediglich der Fellstoff weist hier noch eine deutlich erkennbare Wirkung auf, die sich bis unter 1.000 Hz mit einem Schalldruckpegel von etwa 1 dB darstellt. Hochfrequent ergeben sich die größten Unterschiede, wobei die Frischhaltefolie als einziges Material eine deutliche Überbetonung bestimmter Frequenzen darstellt (hier etwa 5.000 – 14.500 Hz), wodurch die Frequenzgangkorrektur für diesen unterhalb 0 dB fällt. Das Akustikvlies hat insgesamt den geringsten Einfluss auf das Messsignal. Es wirkt sich erst ab etwa 13.000 Hz aus und erreicht maximal einen Korrekturwert von etwa 1 dB bei 17.000 Hz. Inwiefern sich diese akustischen Eigenschaften auf die Reduktion der hydrodynamischen Druckschwankungen auswirken, lässt sich hieraus zunächst nicht erkennen.

In Abbildung 28 sind die ermittelten Frequenzgangkorrekturen noch einmal als Terzspektren dargestellt, da sich diese in der Anwendung häufig als praktikabler erweisen. Zu beachten ist, dass das höchste Terzband aufgrund der oberen Grenzfrequenz nur bis zur Mittenfrequenz von 12.500 Hz reicht (obere Grenzfrequenz von 14.000 Hz, obere Grenzfrequenz der nächsten Terz läge bei 18.000 Hz, also nicht mehr hier erfasst) [15]. Hier fällt auf, dass gerade beim Fellstoff einige Frequenzbereiche anders erfasst werden. So ist der Bereich zwischen 2.000 Hz und 4.000 Hz im Schmalbandspektrum etwa mit 0 dB Korrektur beziffert, wohingegen im Terzspektrum dieser Bereich etwa mit + 1 dB Korrektur angegeben ist.

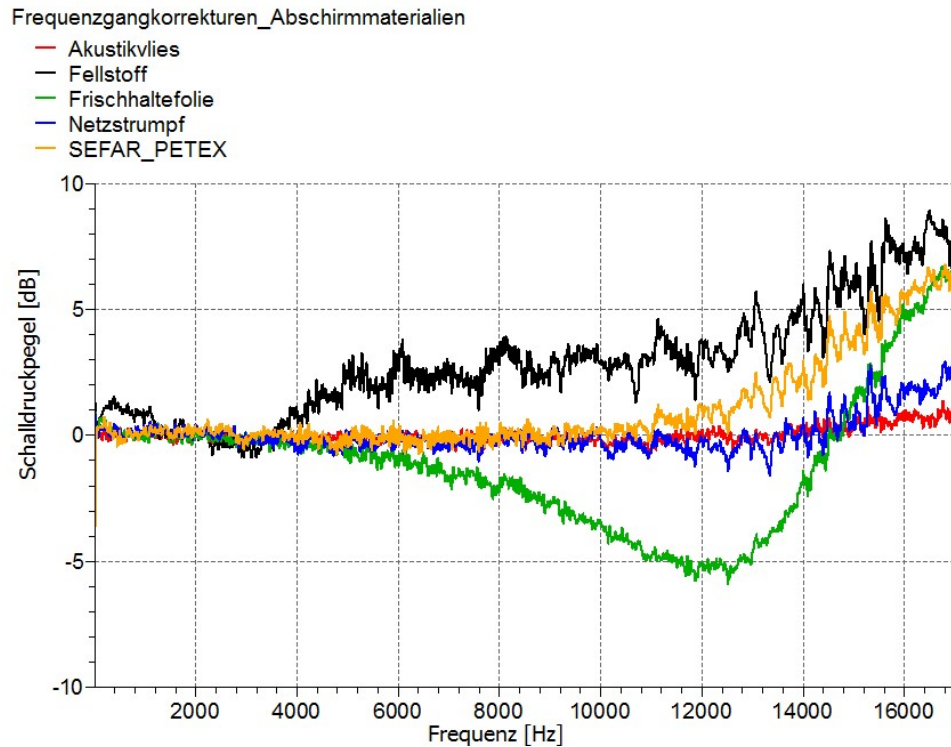


Abbildung 27: Frequenzgangkorrekturen aller verwendeten Materialien, Glättung in PAK bei 5

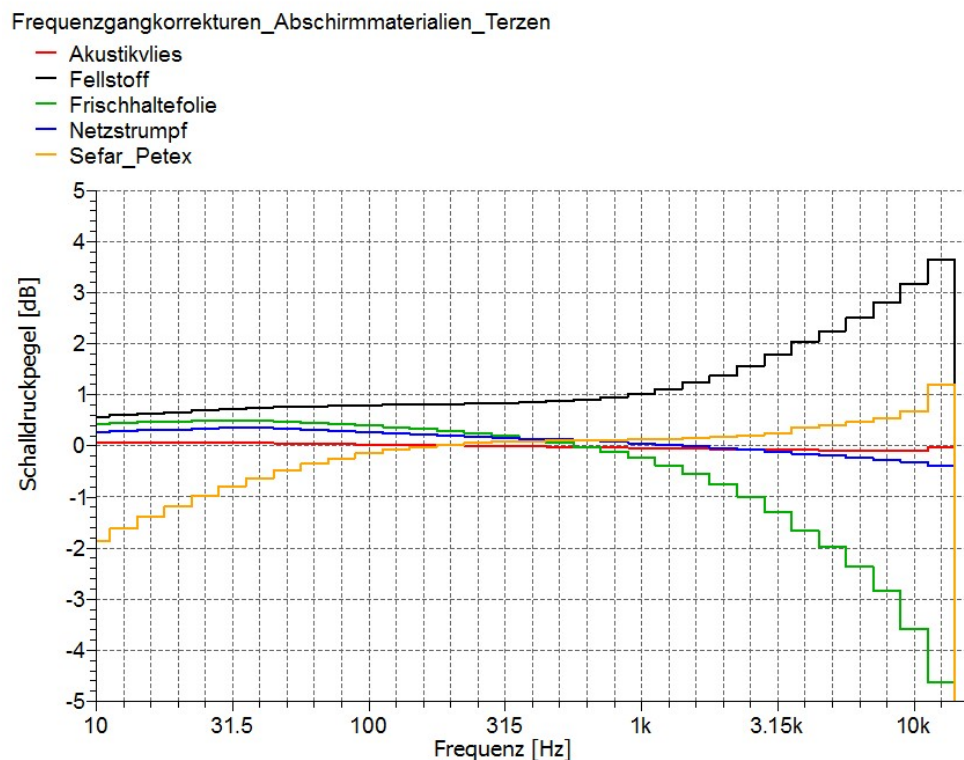


Abbildung 28: Frequenzgangkorrekturen aller verwendeten Materialien als Terzspektren

Im weiteren Verlauf werden aufgrund der detaillierteren Auflösung die aufgenommenen Schmalbandspektren verwendet.

4.2.2 Schlitzrohrsonde

Neben den Abschirmmaterialien der wandbündigen Mikrofone wurde ebenfalls eine Frequenzgangkorrektur für die verwendete Schlitzrohrsonde ermittelt. Hierzu wurde ein weißes Rauschen mit und ohne Turbulenzschirm aufgenommen und über die Differenz konnte so die Frequenzgangkorrektur ermittelt werden. Der Abstand zwischen Lautsprecher und Mikrofon betrug hierbei 3,0 m (Abbildung 29). Diese Korrektur wurde für frontal auftreffenden Schall aufgenommen.



**Abbildung 29: Messaufbau Ermittlung Frequenzgangkorrektur
Schlitzrohrsonde im Abstand von 3,0 m**

In Abbildung 30 sind die Frequenzgangkorrektur der Schlitzrohrsonde und die Messungen, aus denen diese resultiert ist, als Schmalbandspektrum zu sehen.

Die Frequenzgangkorrektur zeigt, dass die Schlitzrohrsonde unterhalb von 6.000 Hz einen höheren Schalldruckpegel aufweist und oberhalb von 6.000 Hz der Schalldruckpegel gedämpft wird. In Abbildung 31 ist die Frequenzgangkorrektur noch einmal als Terzspektrum dargestellt.

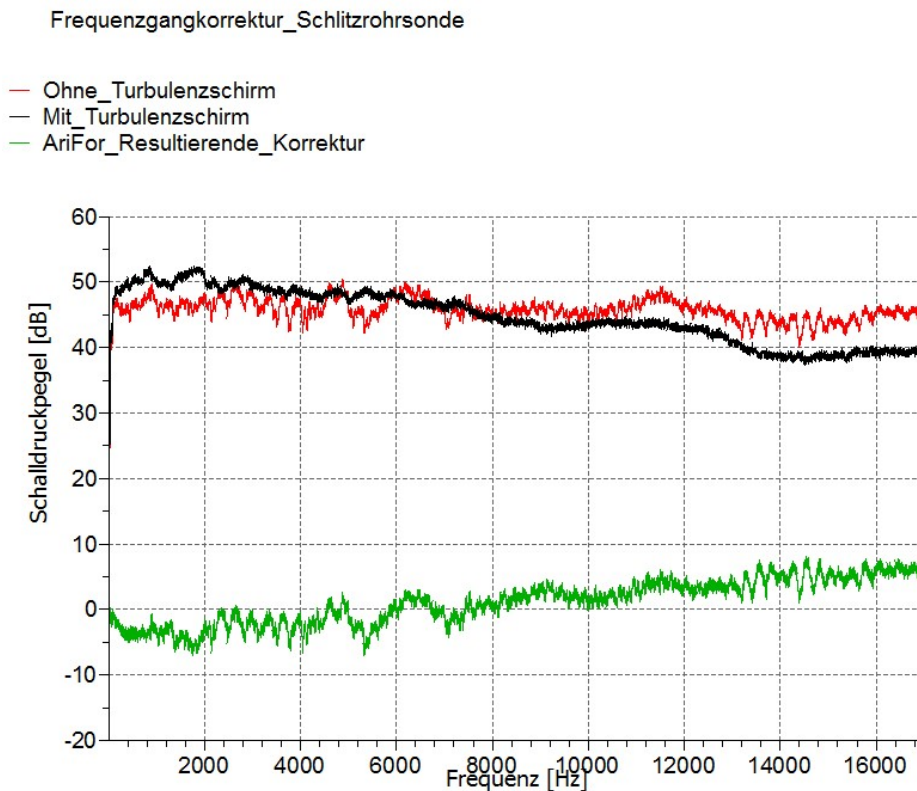


Abbildung 30: Frequenzgangkorrektur Schlitzrohrsonde (grün)

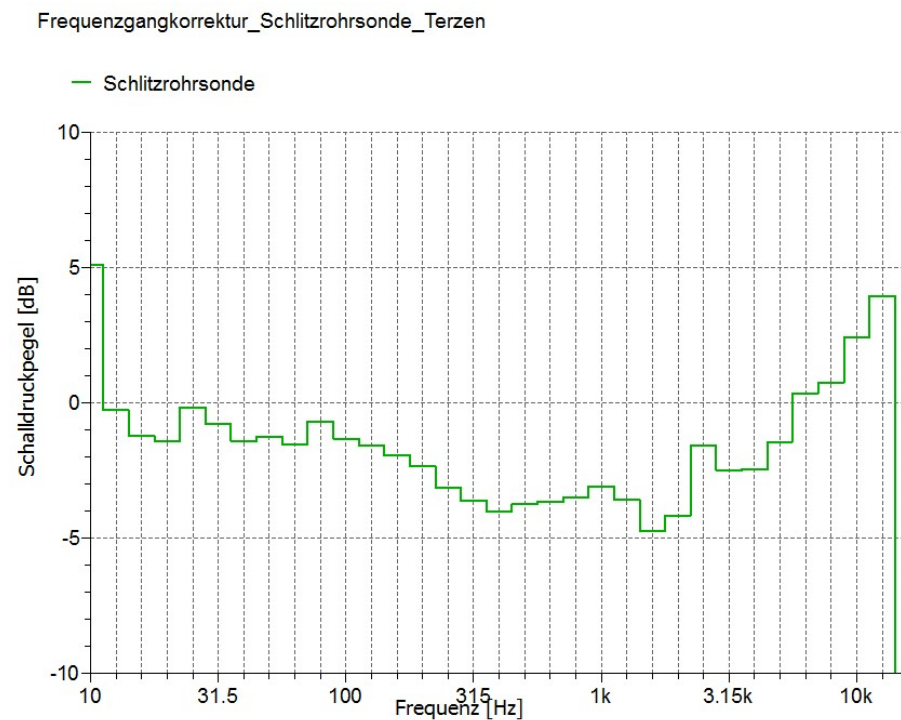


Abbildung 31: Frequenzgangkorrektur Schlitzrohrsonde als Terzspektrum

Vergleich man diese Messung mit den Messungen aus dem Bericht von Prof. Dr. Frank Kameier [6] (Abbildung 32), so erkennt man einen ähnlichen Verlauf. Charakteristisch

ist eine verstärkte negative Korrektur im Bereich von etwa 300-3.000 Hz, sowie eine positive Korrektur ab ca. 6.000 Hz.

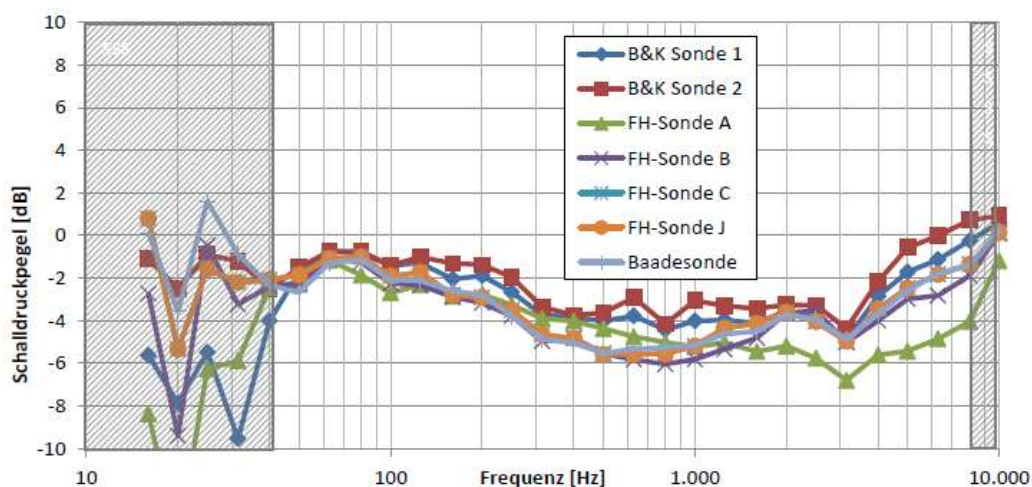


Abbildung 32: Frequenzgangkorrekturen verschiedener Schlitzrohrsonden aus einem Bericht von Prof. Dr. Frank Kameier [6]

Da in der Einbausituation der Schall jedoch seitlich und nicht frontal auf die Schlitzrohrsonde traf, musste noch die Richtcharakteristik ermittelt werden. Hierbei wurde analog zur Frequenzgangkorrektur ein weißes Rauschen aufgenommen. Zusätzlich wurde nach jeder Messung allerdings die Schlitzrohrsonde um 30° gedreht, um so die Aufnahmefähigkeit bei unterschiedlichen Einfallswinkeln zu ermitteln. Die Einstellpositionen wurden dafür auf dem Boden markiert (Abbildung 33).

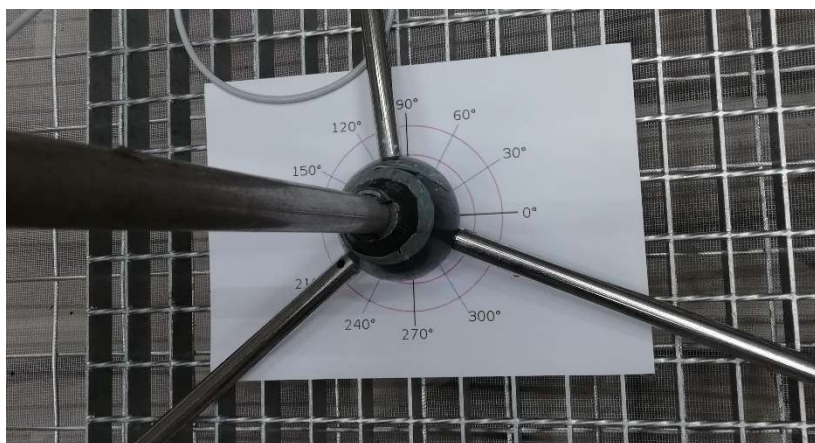


Abbildung 33: Markierungen für Messpositionen zur Ermittlung der Richtcharakteristik der Schlitzrohrsonde

Nachdem die Messungen für alle Positionen abgeschlossen waren, mussten die einzelnen Messungen in Oktavbändern dargestellt werden. Anhand der Oktaven und der Messpositionen konnte so die Richtcharakteristik als Polardiagramm dargestellt werden (Abbildung 34). Dieses zeigt die Korrekturwerte je nach Einfallswinkel des Schalls für unterschiedliche Oktaven. Auffällig ist, dass mit steigender Frequenz die

Richtcharakteristik sich immer stärker ausprägt. Bis 125 Hz ist die Richtcharakteristik noch nahezu kugelförmig, ab 250 Hz prägen sich Dämpfungen seitlich und hinter der Schlitzrohrsonde immer stärker aus. Bei 8.000 Hz wirkt sich dies so aus, dass lediglich eine Verdrehung von 30° bereits eine Dämpfung von etwa 12 dB bewirkt.

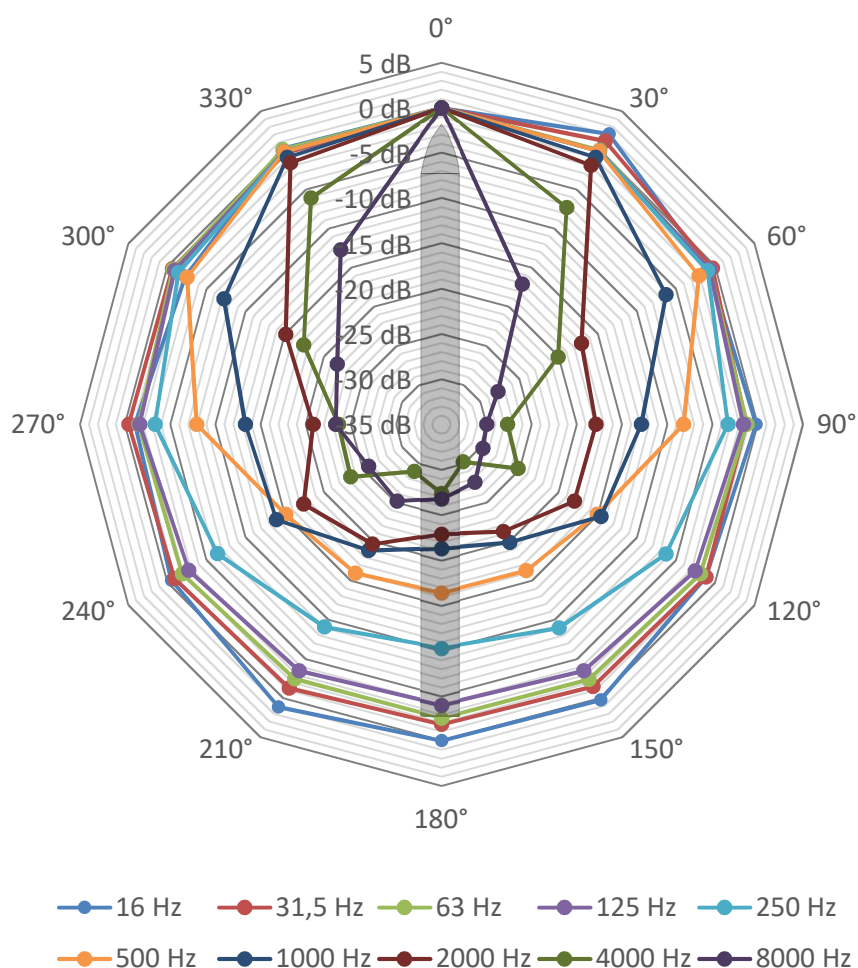


Abbildung 34: Richtcharakteristik der Schlitzrohrsonde für Oktavbänder, Ausrichtung der Schlitzrohrsonde im Hintergrund

Da eine Schlitzrohrsonde aufgrund des namensgebenden Schlitzes nicht rotationssymmetrisch ist, wurde außerdem die Richtcharakteristik bei axialer Rotation der Schlitzrohrsonde ermittelt (Abbildung 35). Hier ist erkennbar, dass insbesondere ab 2.000 Hz eine Verstärkung der Signale seitlich des Schlitzes erfolgt, jedoch abhängig von der Frequenz aus unterschiedlichen Richtungen. Tieffrequent (16 Hz) zeigt die Richtcharakteristik kein Muster auf und erscheint fast schon willkürlich, wohingegen von 31,5 bis 1000 Hz die Richtcharakteristik in alle Richtungen nahezu konstant ist. Dies könnte mit dem Lautsprecher zusammenhängen, da dieser unterhalb von 50 Hz einen starken Abfall im Schalldruckpegel hat.

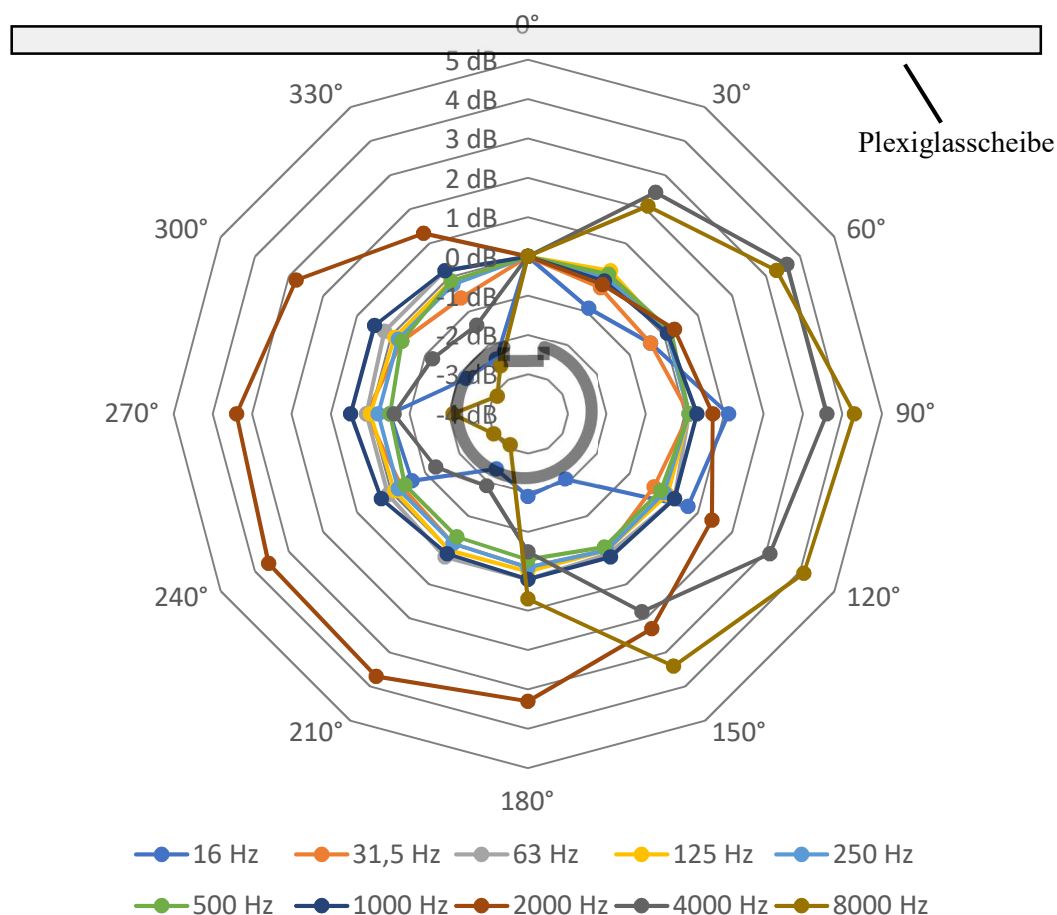


Abbildung 35: Richtcharakteristik bei axialer Rotation der Schlitzrohrsonde für Oktavbänder, frontaler Querschnitt mittig zu sehen, Verhältnis zur Einbauposition anhand Plexiglasscheibe erkennbar

Die Schlitzrohrsonde beeinflusst also deutlich das aufgenommene Signal in Bezug auf akustische Dämpfung. Diese Eigenschaft verstärkt sich je nach Winkel und Frequenz dramatisch und kann das Messergebnis stark beeinflussen. So wird seitlich einfallender Schall im Extremfall um bis zu 30 dB gedämpft, wodurch potenzielle Maskierungseffekte ein Problem sein könnten.

4.2.3 Nasenkonusse

In einigen selektiven Messungen wurden auch zwei unterschiedlich lange Nasenkonusse (1/4-Zoll) untersucht. Für diese beiden Nasenkonusse wurden ebenfalls die Frequenzgangkorrekturen für frontal auftreffenden Schall ermittelt (Abbildung 36). Erkennbar ist hier, dass bis 10.000 Hz beide Nasenkonusse einen relativ neutralen und ähnlichen Verlauf haben, mit einigen Absenkungen und Verstärkungen zwischen 4.000 und 6.000 Hz. Oberhalb von 10.000 Hz treten bei beiden Nasenkonussen starke Absenkungen bzw. Verstärkungen in Form von einzelnen Frequenzen bzw. Peaks auf, von bis zu mehr als 20 dB.

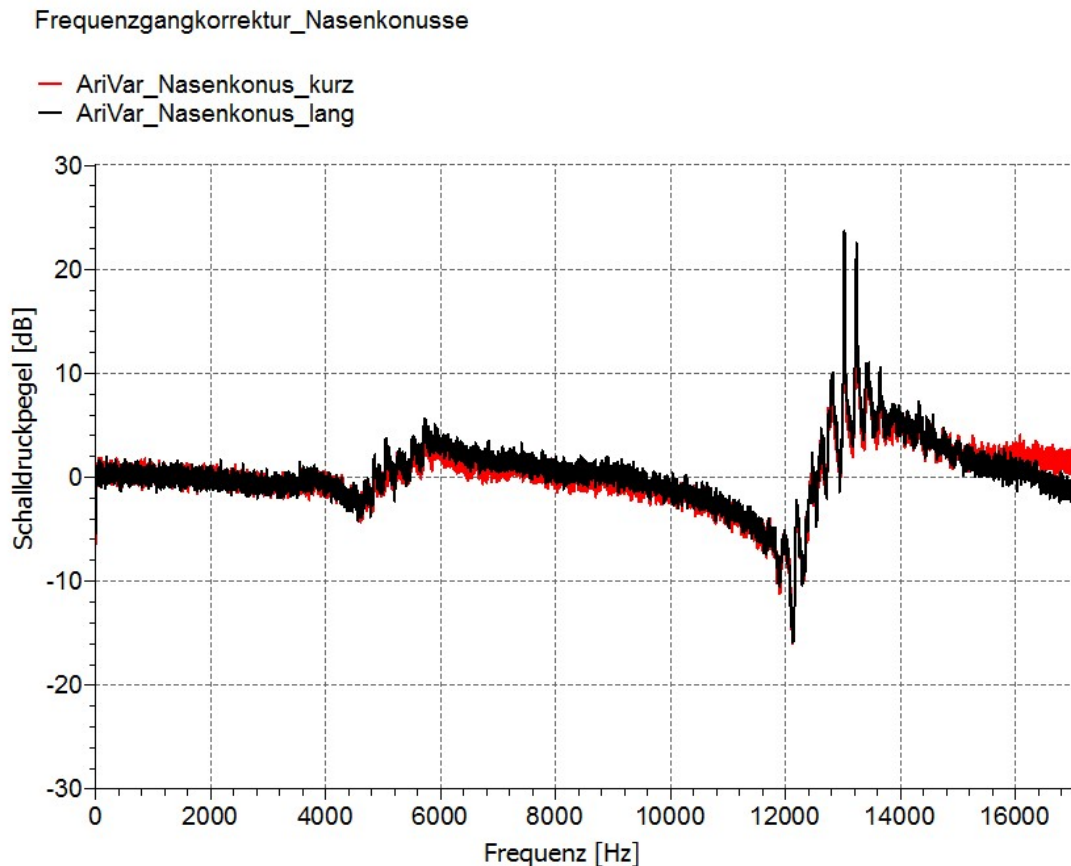


Abbildung 36: Frequenzgangkorrekturen Nasenkonusse

Der starke Abfall im Schalldruckpegel bei etwa 12.000 Hz könnte auf die Koinzidenzfrequenz zurückzuführen sein. Diese ist abhängig von der Materialstärke (hier des Nasenkonus) und der Körperschallgeschwindigkeit im entsprechenden Material. Oberhalb dieser Frequenz sind die Biegewellen innerhalb des Materials größer, als die Luftschallwellen, wodurch es zu drastischen Dämpfungseffekten kommen kann [14]. Dazu müsste man jedoch in einem weiteren Schritt das Material der Nasenkonusse untersuchen.

4.3 Referenzmessungen

Um im späteren Verlauf die Effektivität der Abschirmmaterialien beurteilen zu können, wurden zu Beginn der Messreihe Referenzmessungen gemacht. Dabei wurden das weiße Rauschen und die Strömungsgeräusche außerhalb der Strömung vermessen, um so hinterher auf den Einfluss der Turbulenzen schließen zu können. Außerdem wurde der Einfluss des Halters der Schlitzrohrsonde auf die akustische Messung überprüft.

4.3.1 Ruhemessung

Vor Beginn der Messreihe wurde der Ruhepegel in der Messumgebung aufgenommen, um mögliche Störfaktoren zu identifizieren (Abbildung 37). Insbesondere das Oberflächenmikrofon hatte ein hohes Grundrauschen aufgrund der Netzfrequenz (50 Hz) und derer Harmonischen, welches auch nicht durch zusätzliche Erdungskabel am Frontend (PAK MK2) reduziert werden konnte.

Die anderen beiden Mikrofone zeigen ein Grundrauschen in geringerem Ausmaß, lediglich das 1/2 -Zoll Mikrofon zeigt aufgrund des niedrigen Schalldruckpegels bei teilweise bis zu -10 dB einige Peaks, welche im 1/4 -Zoll Mikrofon aufgrund des höheren Ruhepegels nicht erkennbar sind. Diese werden wahrscheinlich durch das höhere Grundrauschen maskiert.

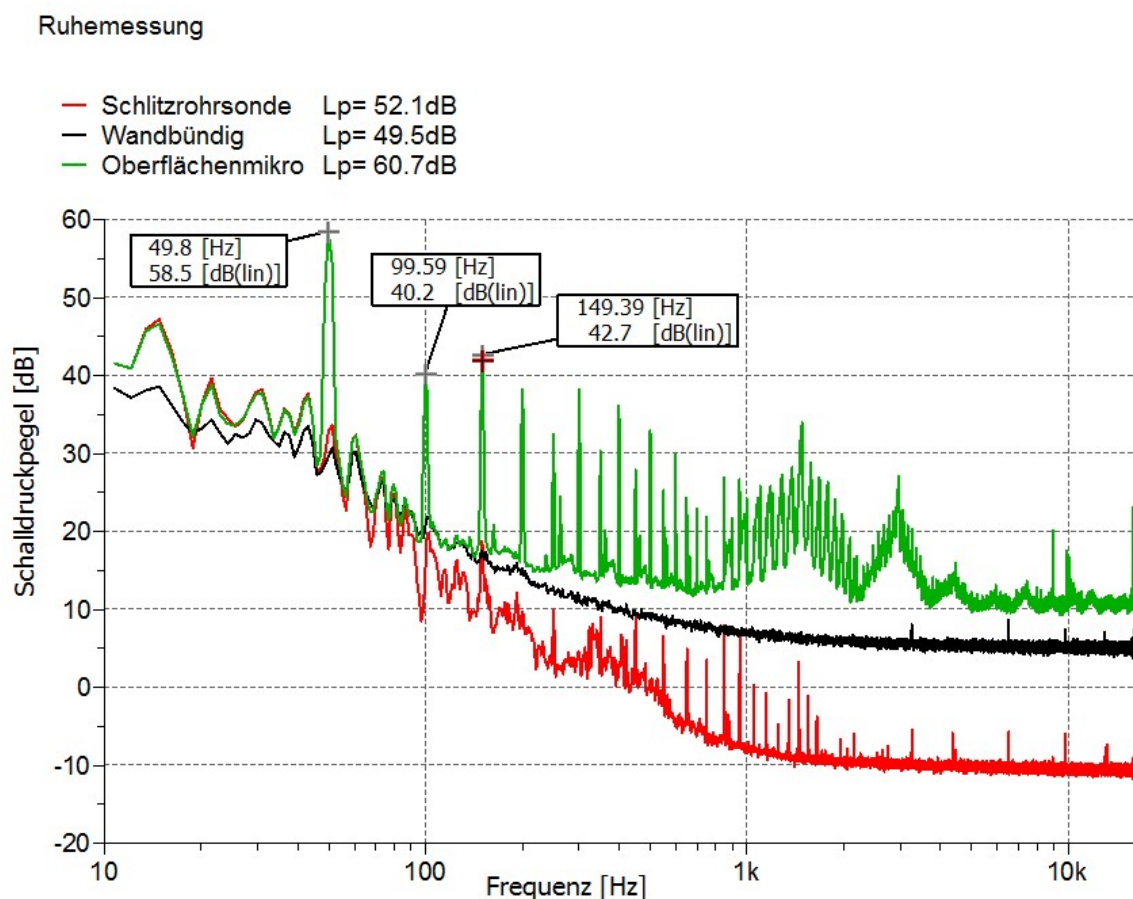


Abbildung 37: Ruhemessung mit Schlitzrohrsonde (1/2-Zoll), wandbündigem Mikrofon (1/4-Zoll) und Oberflächenmikrofon

4.3.2 Unterschiede der Mikrofone

In Abbildung 38 werden die verwendeten Mikrofone dargestellt bzw. das Frequenzspektrum, das von diesen aufgenommen wird, wenn nur weißes Rauschen ohne Strömungsgeräusche vorherrscht.

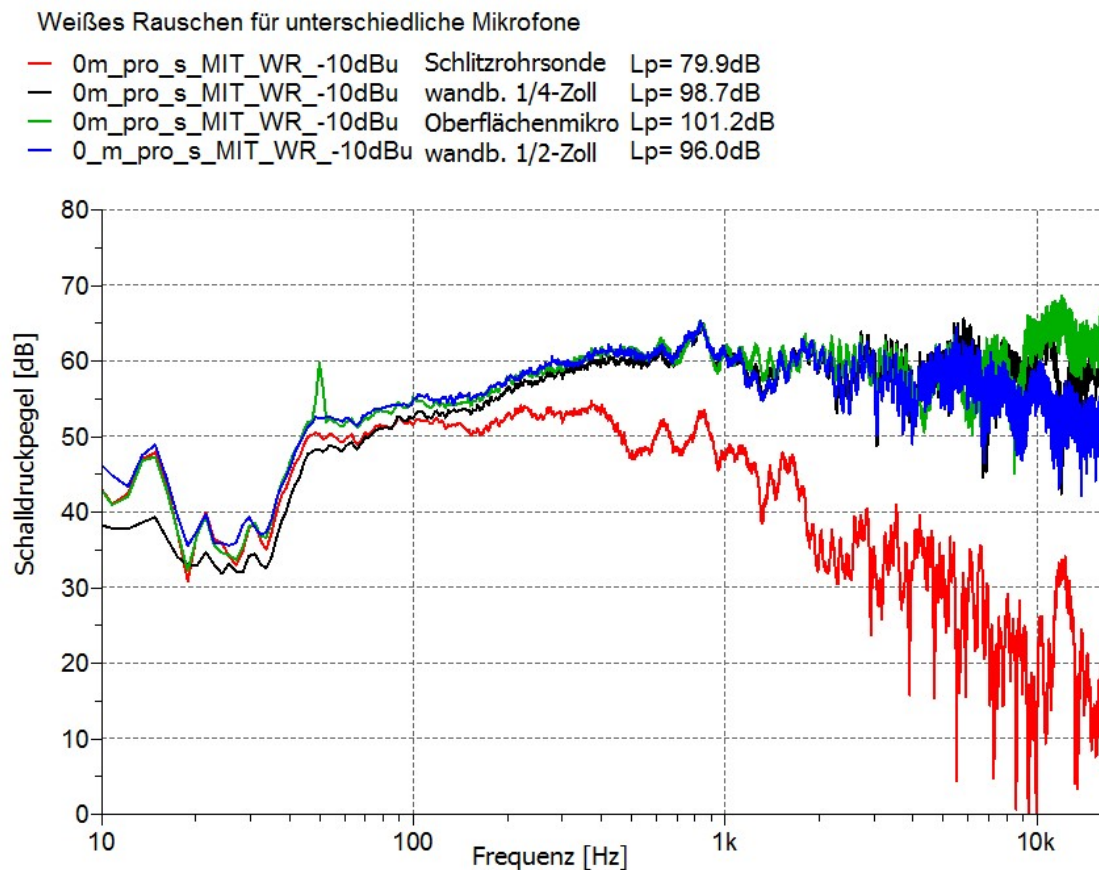


Abbildung 38: Darstellung der verwendeten Mikrofone, weißes Rauschen ohne Strömung

Erkennbar ist hier, dass vor allem die Schlitzrohrsonde aufgrund ihrer starken Richtcharakteristik mit ansteigender Frequenz stark im Schalldruckpegel abfällt, da diese im 90° Winkel zum Lautsprecher installiert war. Die anderen Mikrofone haben direkt auf den Lautsprecher gezeigt, unterscheiden sich oberhalb von 10.000 Hz jedoch teilweise um bis zu 10 dB. Dies könnte damit zusammenhängen, dass der Lautsprecher nicht weit genug entfernt war und so der Hochtöner (der eher auf Höhe des Oberflächenmikrofons war) sich im Oberflächenmikrofon stärker ausgewirkt hat. Tieffrequent liegt das 1/4-Zoll Mikrofon etwas unter dem 1/2-Zoll Mikrofon und dem Oberflächenmikrofon, was wahrscheinlich direkt mit dem Membrandurchmesser zusammenhängt. Der Peak bei 50 Hz des Oberflächenmikrofons ist auf die Netzfrequenz zurückzuführen.

4.3.3 Strömungsgeräusche

Zur Beurteilung der späteren Messergebnisse muss eine Art Referenzsignal aufgenommen werden damit deutlich wird, wann das aufgenommene Signal nur die tatsächliche Akustik darstellt. Hierzu wurden außerhalb der Strömung die Strömungsgeräusche mit und ohne weißem Rauschen aufgenommen. Dabei befand sich die Plexiglasscheibe 17 cm außerhalb der Strömung, wodurch der Einfluss der Turbulenzen auf die Messung ausgeschlossen werden kann (Abbildung 39). Der Abstand zwischen Lautsprecher und Plexiglasscheibe wurde hier bei 128 cm gehalten.

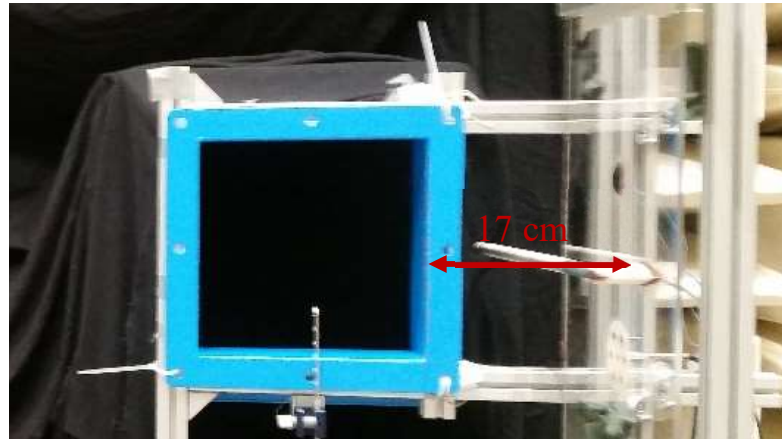


Abbildung 39: Plexiglasscheibe 17cm außerhalb der Strömung

Um eine Referenzmessung zu erhalten, wurden das weiße Rauschen, die Strömungsgeräusche im Fernfeld und die Kombination aus beiden gemessen. So konnte im Nachhinein beurteilt werden, welche Geräusche von der Strömung und welche vom weißen Rauschen induziert werden.

In Abbildung 40 sind diese Messungen dargestellt, wobei erkennbar ist, dass durch das weiße Rauschen die Strömung erst unterhalb von etwa 700 Hz dominant ist. Oberhalb dieser Frequenz werden die Strömungsgeräusche vom weißen Rauschen maskiert.

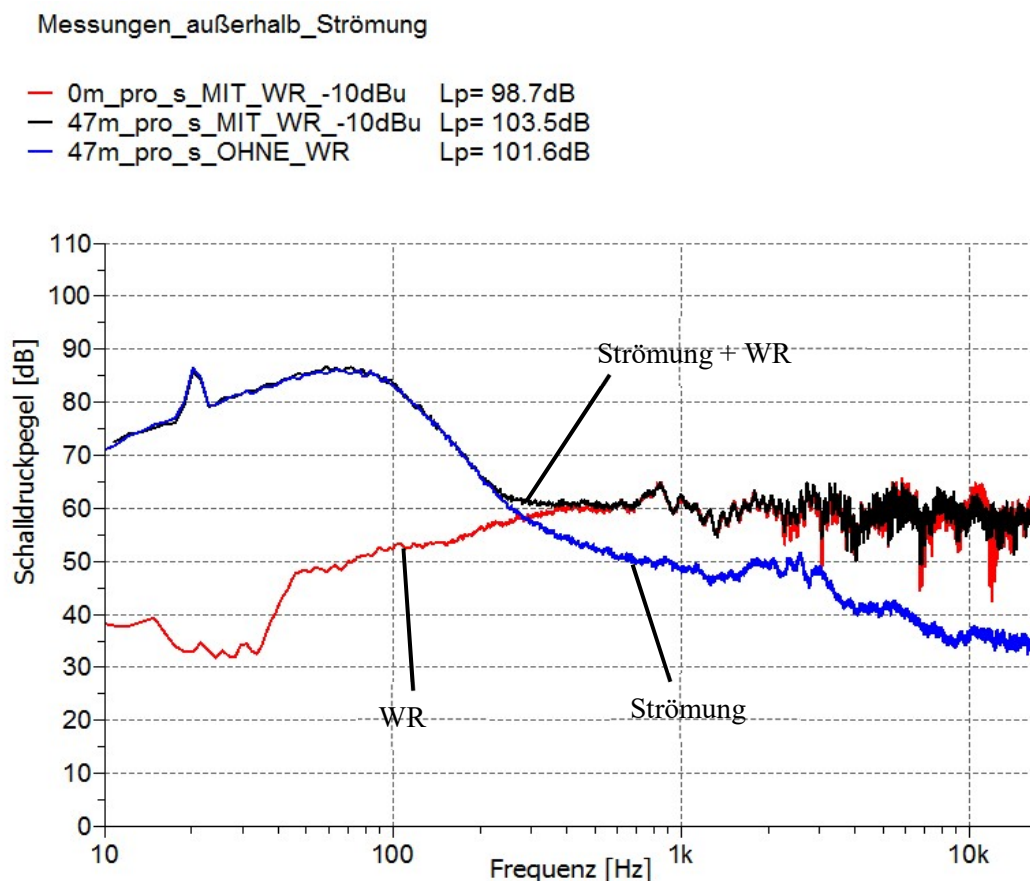


Abbildung 40: Referenzmessung außerhalb der Strömung bei 47 m/s, nur weißes Rauschen (rot), nur Strömungsgeräusche (blau) und Kombination (schwarz) für wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon

Die Referenzmessung, welche zur späteren Beurteilung der Abschirmmaterialien dienen soll, ist die Kombination aus weißem Rauschen und Strömungsgeräuschen. Diese Referenzmessungen sind in Abbildung 41 für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. Hier fällt auf, dass der Frequenzbereich oberhalb von etwa 700 Hz vom weißen Rauschen maskiert wird und unterhalb von 700 Hz der Schalldruckpegel mit steigender Strömungsgeschwindigkeit zunimmt. Der effektive Frequenzbereich, der sich auf die Messung auswirkt, nimmt also mit steigender Geschwindigkeit zu und wirkt sich nur tieffrequent bis maximal etwa 700 Hz aus (bei 47 m/s).

Diese Referenzmessung soll nun mit Hilfe der unterschiedlichen Materialien sowohl im Spektrum als auch im Gesamtschalldruckpegel möglichst genau innerhalb der Strömung, bzw. in der Strömung, gemessen werden.

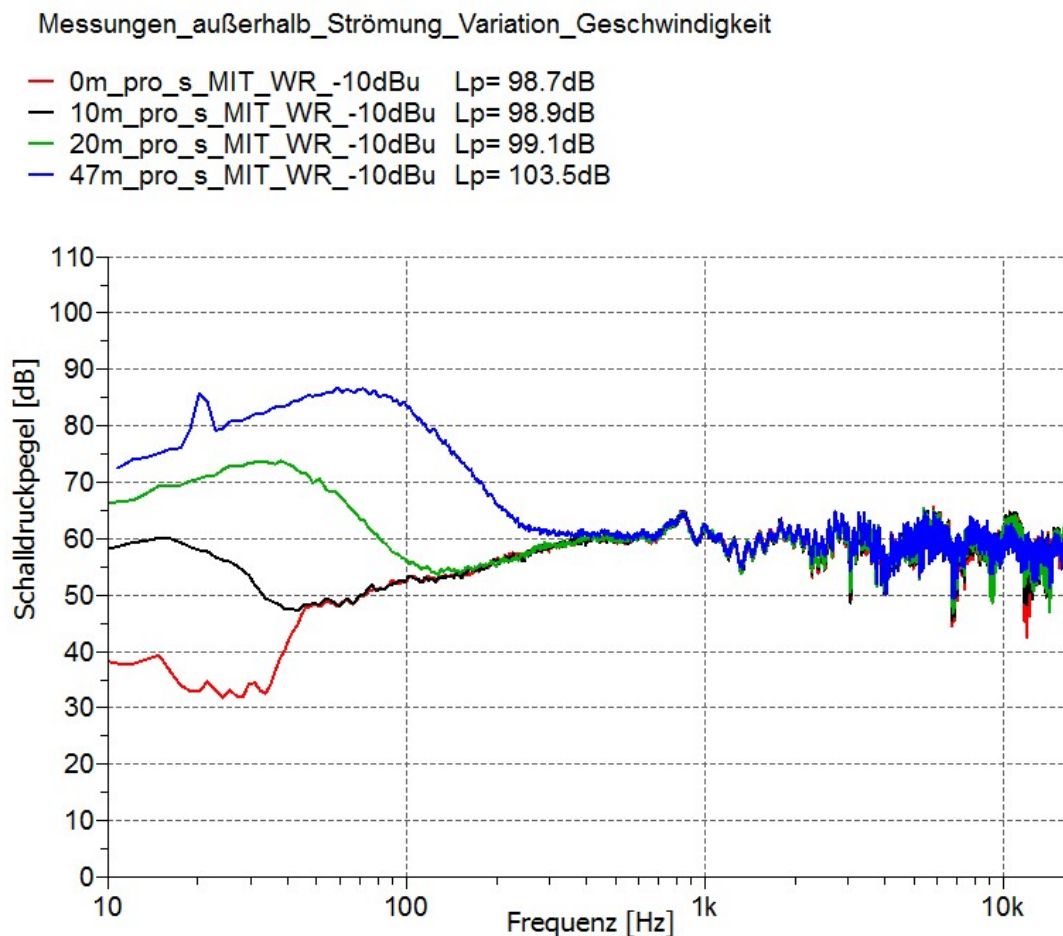


Abbildung 41: Referenzmessungen außerhalb der Strömung für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten, Strömungsgeräusche mit weißem Rauschen, wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon

Der Anstieg an tieffrequenten Geräuschen hängt u.a. mit den Schwingungen durch den Windkanal zusammen. Zum Vergleich sind die aufgenommenen Schwingungen in Abbildung 42 dargestellt. Hier ist ein deutlicher Anstieg des Schwingungspegels der tiefen Frequenzen erkennbar. Ebenfalls erkennbar ist eine starke Schwingung bei etwa 20 Hz (insbesondere bei 47 m/s), welche sich im Verlauf der weiteren Messungen auch in den Signalen der Mikrofone zeigt.

Schwingungen

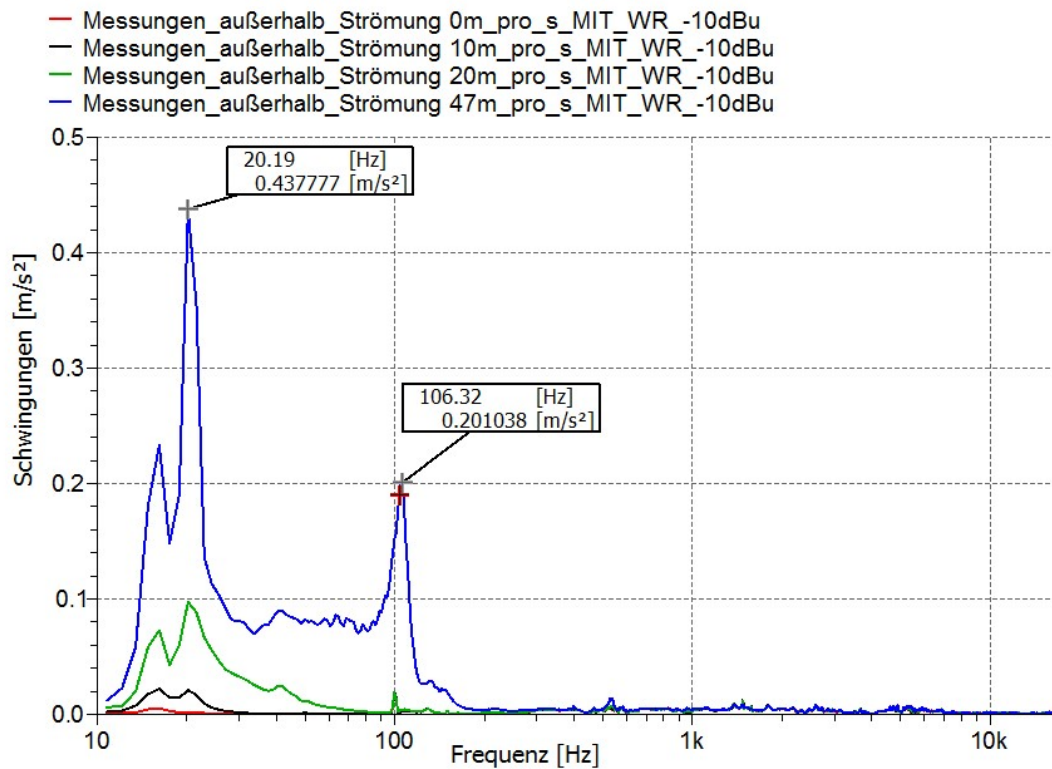


Abbildung 42: Schwingungen bei Referenzmessungen außerhalb der Strömung

Anhand von Abbildung 43 ist zusätzlich erkennbar, dass die Schwingungen der Plexiglasscheibe zunehmen, wenn diese von außerhalb an die Strömung gebracht wird. Die Frequenz von etwa 20 Hz bleibt bestehen und wird sogar verstärkt, wohingegen im Bereich von 40-90 Hz Schwingungen sich ausprägen, die vorher nicht in dem Ausmaß vorhanden waren. Ebenfalls bildet sich eine starke Schwingung bei 125 Hz aus.

Schwingungen

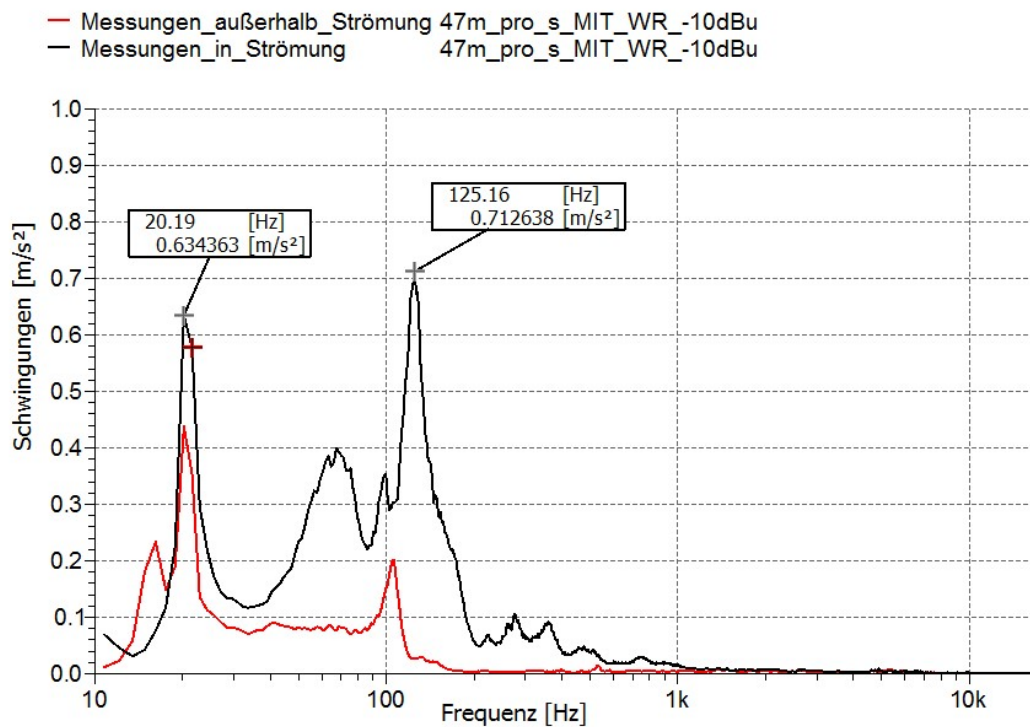


Abbildung 43: Schwingungen in und außerhalb der Strömung

Betrachtet man nun die Schwingungen und die gemessenen Schalldruckpegel bei den unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten, so stellt sich die Frage inwiefern diese voneinander beeinflusst werden. Dazu wurde in Abbildung 44 die Kohärenz der wandbündigen Mikrofone mit den Schwingungsaufnehmern für die verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten gebildet.

Aus der Kohärenz lässt sich erkennen, dass ein Großteil des aufgenommenen Schalls (> 100 Hz) sich mit den Schwingungen an der Platte deckt. Mit ansteigender Strömungsgeschwindigkeit nimmt die Kohärenz insbesondere tieffrequent ab, was bedeutet, dass hier nicht mehr die Schwingungen für das tieffrequente, von dem Mikrofon gemessene Signal verantwortlich sind. Lediglich zwischen 20 und 70 Hz ist die Kohärenz bei 47 m/s im tieffrequenten Bereich noch hoch. Hier geht die Messung von tieffrequentem Schall mit dem Mikrofon also zu einem großen Teil auf die Schwingungen zurück.

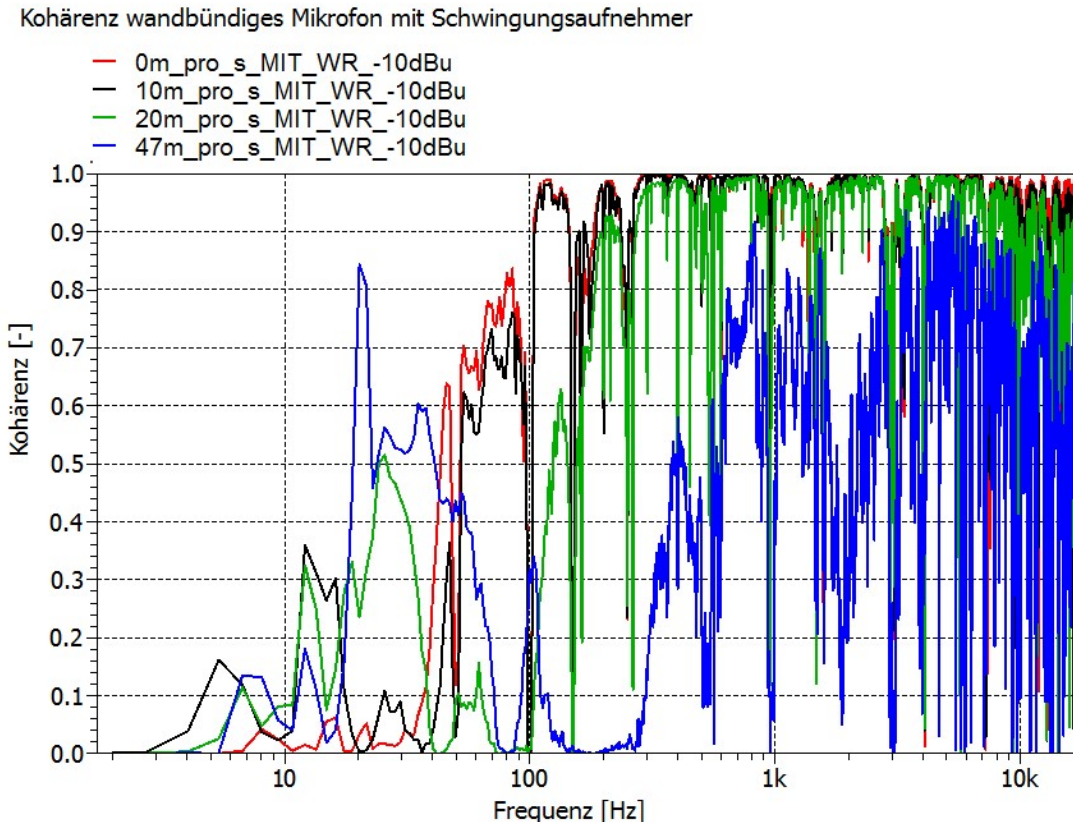


Abbildung 44: Kohärenz zwischen wandbündigem 1/4-Zoll Mikrofon und Schwingungsaufnehmer für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten, außerhalb der Strömung

Es lässt sich also sagen, dass hochfrequent die Strömungsgeräusche vernachlässigbar sind und lediglich tieffrequent (etwa < 700 Hz) vorhanden sind. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit verschiebt sich der Frequenzbereich von tief nach hoch. Die Schwingungen, die an der Platte entstehen, werden nicht nur durch den Schwingungsaufnehmer gemessen, sondern wirken sich auch auf das Mikrofon aus, sodass hier ein Einfluss vorhanden ist. Besonders deutlich wird dies bei etwa 20 Hz, da diese Frequenz als Peak in den gemessenen akustischen Signalen auftaucht und ebenfalls beim Schwingungsaufnehmer.

4.3.4 Hydrodynamische Störanteile

Um den Einfluss der hydrodynamischen Störanteile zu quantifizieren, wurde einmal außerhalb der Strömung und einmal innerhalb der Strömung ohne weißes Rauschen gemessen. Die Unterschiede, die sich so ergeben, sind dann die entsprechenden Störanteile, die durch die hydrodynamischen Druckschwankungen entstehen. In Abbildung 45 sind diese Unterschiede für 10 m/s, 20 m/s und 47 m/s abgebildet, welche sich im gesamten Frequenzbereich bemerkbar machen. Mit steigender Frequenz scheint

außerdem der Einfluss der Störanteile tendenziell zuzunehmen, wobei oberhalb von 10.000 Hz bei 10 m/s und 20 m/s der Einfluss der Störanteile wieder abnimmt, bzw. bei 10 m/s ab 8.000 Hz praktisch nicht mehr vorhanden ist. Die Störanteile bewegen sich im Gesamtschalldruckpegel zwischen 21,4 dB (47 m/s) und 25,2 dB (10 m/s). Bei einer geringeren Strömungsgeschwindigkeit haben die hydrodynamischen Druckschwankungen also einen größeren Einfluss, im Verhältnis zur Akustik ohne diese Störanteile.

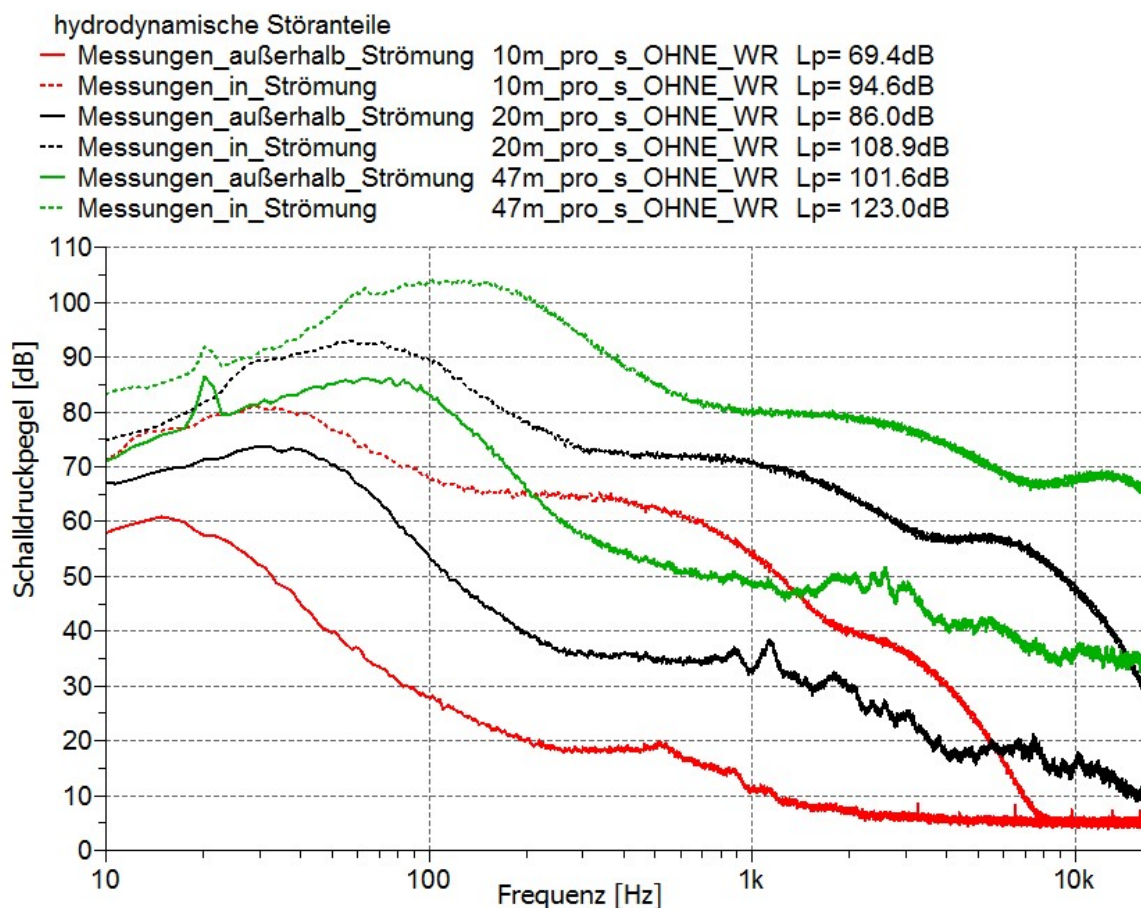


Abbildung 45: Messung in und außerhalb Strömung zur Ermittlung hydrodynamischer Störanteile, unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten, wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon

Der Anstieg im Schalldruckpegel im Bereich von 2.000 – 3.000 Hz könnte durch das Prandtl'sche Staurohr entstanden sein (trotz Maßnahmen zur Reduktion der Wirbelablösungen) und wird bei der Messung in der Strömung maskiert, wodurch es im Frequenzspektrum nicht sichtbar ist.

4.3.5 Einfluss Halter Schlitzrohrsonde

Zur Verifizierung der akustischen Geräusche, die durch den Halter der Schlitzrohrsonde entstehen und so die Messung beeinflussen könnten, wurden Messungen mit und ohne den Halter der Schlitzrohrsonde gemacht. Diese Messungen wurden dann anhand der Messposition der wandbündigen Mikrofone verglichen und so der Einfluss auf das Messsignal an dieser Position ermittelt.

In Abbildung 46 ist der direkte Vergleich zwischen den beiden Messungen bei der jeweiligen Geschwindigkeit dargestellt. Hier ist erkennbar, dass die Unterschiede im Frequenzspektrum kaum zu erkennen sind und im Summenpegel mit 0,1 - 0,3 dB vorhanden sind. Die größte Differenz von 0,3 dB tritt bei 40 m/s auf, wobei die Messung ohne Halter hier sogar lauter ist, als die mit Halter. Dies heißt nicht, dass der Halter keine Strömungsgeräusche verursacht, sondern lediglich, dass diese von dem wandbündigen Mikrophon nicht erkennbar aufgenommen werden, bzw. durch die turbulenten Druckschwankungen maskiert wird.

Der Einfluss des Halters auf die Messung kann also für die weitere Auswertung in Bezug auf die wandbündigen Mikrofone weitestgehend vernachlässigt werden.

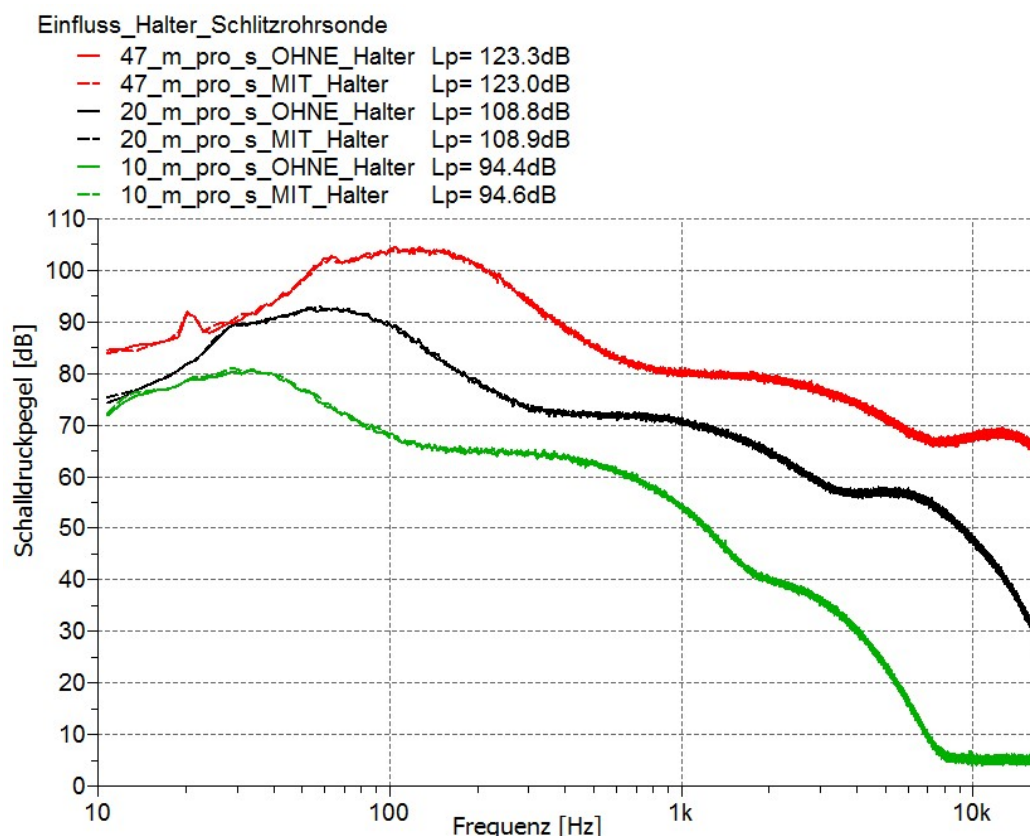


Abbildung 46: Einfluss des Halters der Schlitzrohrsonde auf das akustische Messsignal des wandbündigen 1/4-Zoll Mikrofons bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten

4.4 Vergleich mit Hilfe eines synthetischen Signals

Die einzelnen Materialien wurden alle in der gleichen Einbausituation und mit gleichen Einstellparametern vermessen. So konnte eine Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Messungen hergestellt werden. Für die Messungen mit Abschirmmaterialien werden die Frequenzgangkorrekturen aus 4.2 bereits einberechnet. Für die Auswertung werden die Messungen außerhalb der Strömung mit weißem Rauschen als Referenz angezeigt und zusätzlich die Messungen in der Strömung mit und ohne dem entsprechenden Material. Hieraus kann so auf die Minderung der hydrodynamischen Störanteile geschlossen werden.

Die verwendeten Mikrofone waren ein Oberflächenmikrofon, eine Schlitzrohrsonde und ein wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon.

4.4.1 Kein Abschirmmaterial

Um zu beurteilen, wie gut die Abschirmmaterialien wirken, wurde das Mikrofon anfangs der Strömung ohne Abschirmmaterial ausgesetzt. Die turbulenten Druckschwankungen können so ohne Schutz auf die Mikrofonmembran auftreffen und die Messung so beeinflussen. In Abbildung 47 ist die Referenzmessung mit weißem Rauschen (WR) außerhalb der Strömung gemeinsam mit der Messung in der Strömung (mit/ohne WR) aufgetragen. Hier ist zum einen zu erkennen, dass durch das weiße Rauschen zusätzlich zur Strömung lediglich ein Anstieg von 0,3 dB im Gesamtschalldruckpegel zu verzeichnen ist, welcher hauptsächlich hochfrequent im Frequenzspektrum erkennbar ist. Der Vergleich mit der Messung außerhalb der Strömung fällt mit 19,8 dB im Gesamtschalldruckpegel deutlich erkennbar aus, wodurch das weiße Rauschen im Vergleich zur Referenzmessung komplett maskiert wird, wenn innerhalb der Strömung gemessen wird.

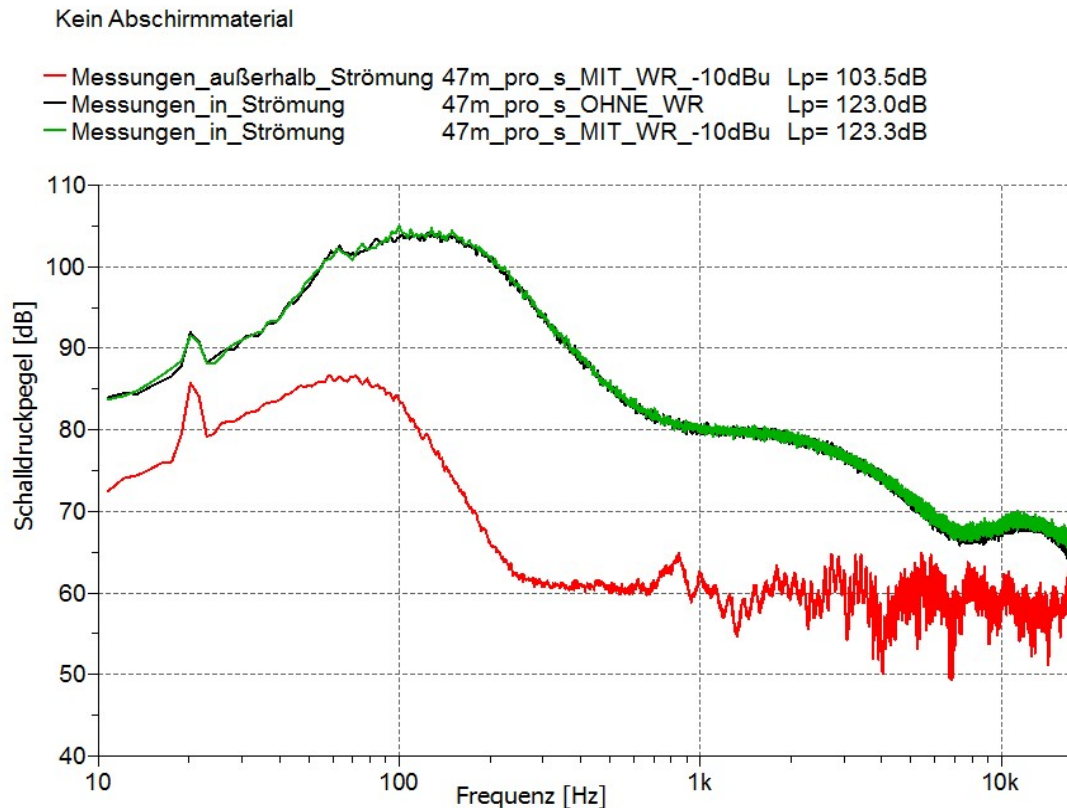


Abbildung 47: Messung in der Strömung ohne Abschirmmaterial mit (grün) und ohne (schwarz) WR, mit Referenzmessung außerhalb der Strömung (rot), $u=47$ m/s, wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon

Hier haben also die hydrodynamischen Druckschwankungen am Mikrofon das weiße Rauschen komplett maskiert, sodass es nicht mehr im Frequenzspektrum zu erkennen ist. Diese Messung dient im weiteren Verlauf als Referenz, durch welche die Reduktion der Abschirmmaterialien quantifiziert wird.

4.4.2 Akustisches Vlies

Das akustische Vlies zeigt in Abbildung 48 hochfrequent (hier > 2.000 Hz) nach Frequenzgangkorrektur eine deutliche Wirkung in der Reduktion im Schalldruckpegel und somit ein Angleichen an die Referenzmessung (rot). Hier ist das weiße Rauschen im Spektrum bereits zu erkennen (grün), wohingegen ohne das Vlies (schwarz) das weiße Rauschen nicht erkennbar ist. Die Reduktion der hydrodynamischen Störanteile im Schalldruckpegel liegt ab 7.000 Hz bei bis zu ca. 10 dB. Im Gesamtschalldruckpegel wirkt sich diese Reduktion des Einflusses der Turbulenz jedoch nur mit $0,3$ dB aus, da die höheren Frequenzen sich geringer auf den Gesamtschalldruckpegel auswirken und somit nicht pegeldominant sind.

Akustikvlies

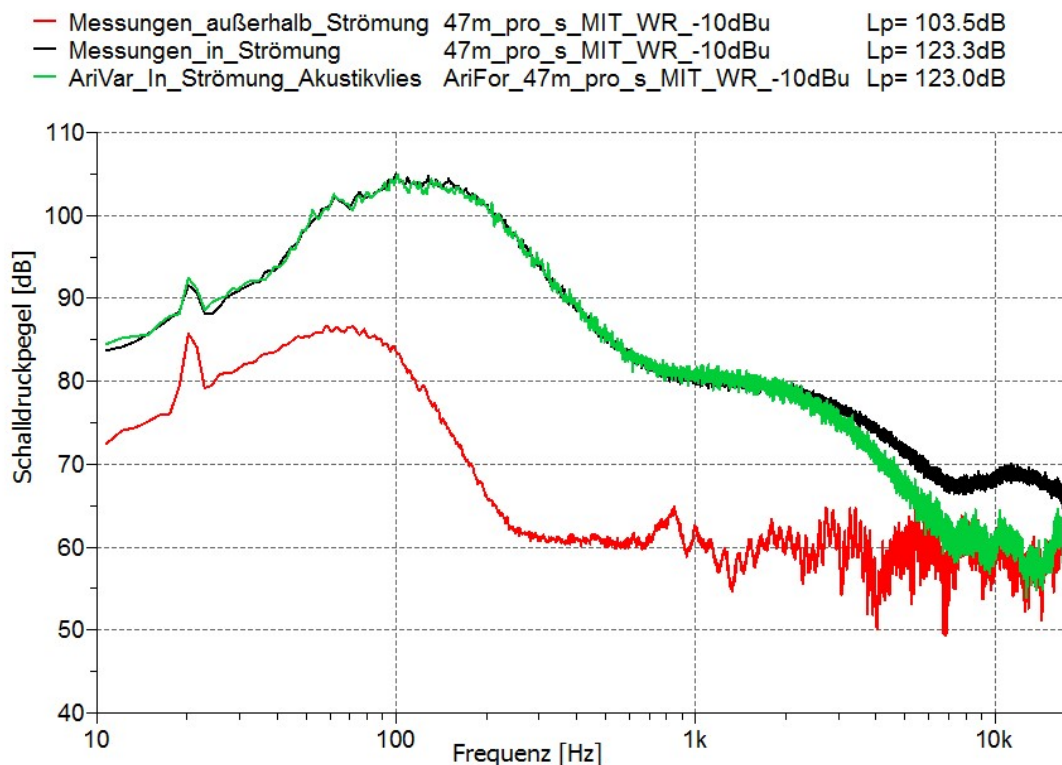


Abbildung 48: Messung in der Strömung mit Akustikvlies (grün) und ohne (schwarz), mit Referenzmessung (rot), $u=47$ m/s mit WR, wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon

Im Vergleich zur Frequenzgangkorrektur des Akustikvlieses aus Abbildung 27 werden hydrodynamische Druckschwankungen also wesentlich tieffrequenter reduziert, als die akustischen Druckschwankungen. Die hydrodynamischen Druckschwankungen werden bereits ab 2.000 Hz verringert, wohingegen die Frequenzgangkorrektur erst ab etwa 12.000 Hz einen Einfluss hat.

4.4.3 Netzstrumpf

Der verwendete handelsübliche Netzstrumpf hatte eine Garnstärke von 40 DEN und wurde einlagig in die Haltevorrichtung eingespannt. In Abbildung 49 ist ab etwa 2.000 Hz eine deutliche Absenkung im Schalldruckpegel von bis zu etwa 10 dB erkennbar. Hier zeigt sich, im Vergleich zur Referenzmessung außerhalb der Strömung, dass das weiße Rauschen im Gegensatz zur Messung ohne Netzstrumpf deutlich erkennbar ist. Unterhalb von 2.000 Hz ist eine geringe Verstärkung erkennbar. Diese bewirkt, dass der Gesamtschalldruckpegel im Vergleich zur Messung ohne Netzstrumpf um 0,5 dB (von 123,3 dB auf 123,8 dB) ansteigt.

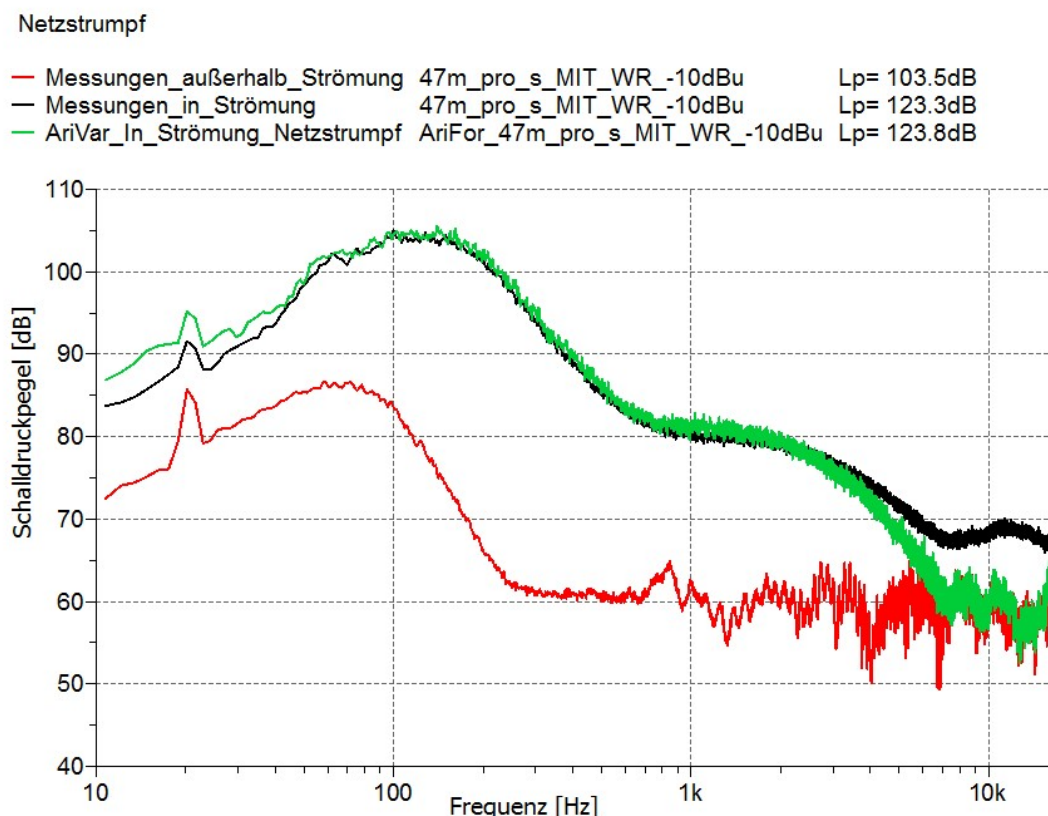


Abbildung 49: Messung in der Strömung mit Netzstrumpf (grün) und ohne (schwarz), mit Referenzmessung (rot), $u=47$ m/s mit WR, wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon

Oberhalb von 2.000 Hz bewirkt der Netzstrumpf also eine Verbesserung des Signals, im Gesamtschalldruckpegel jedoch wirkt sich dieser eher negativ aus, da eine tieffrequente Überbetonung stattfindet. Diese könnte z.B. dadurch entstanden sein, dass der Netzstrumpf ein elastisches Material ist, welches auch im gespannten Zustand eine gewisse Elastizität aufweist. Dadurch könnte das Material leicht in Schwingung geraten sein und so tieffrequente Vibrationen erzeugt haben.

4.4.4 Frischhaltefolie

Bei der verwendeten Frischhaltefolie handelt es sich um handelsübliche Frischhaltefolie aus dem Supermarkt. Die Frischhaltefolie wurde einlagig in der Haltevorrichtung eingespannt.

In Abbildung 50 ist erkennbar, dass bereits ab 100 Hz die Messung mit der Frischhaltefolie unterhalb des Schalldruckpegels der Messung ohne Abschirmmaterial liegt. Die Differenz nimmt hierbei mit zunehmender Frequenz zu, wobei ab etwa 1.500 Hz die Reduktion deutlich erkennbar wird. Oberhalb von 10.000 Hz beträgt die Differenz bis zu etwa 10 dB. Oberhalb von etwa 7.000 Hz ist das weiße Rauschen im

Frequenzspektrum erkennbar. Der Gesamtschalldruckpegel reduziert sich durch die Frischhaltefolie um 0,8 dB.

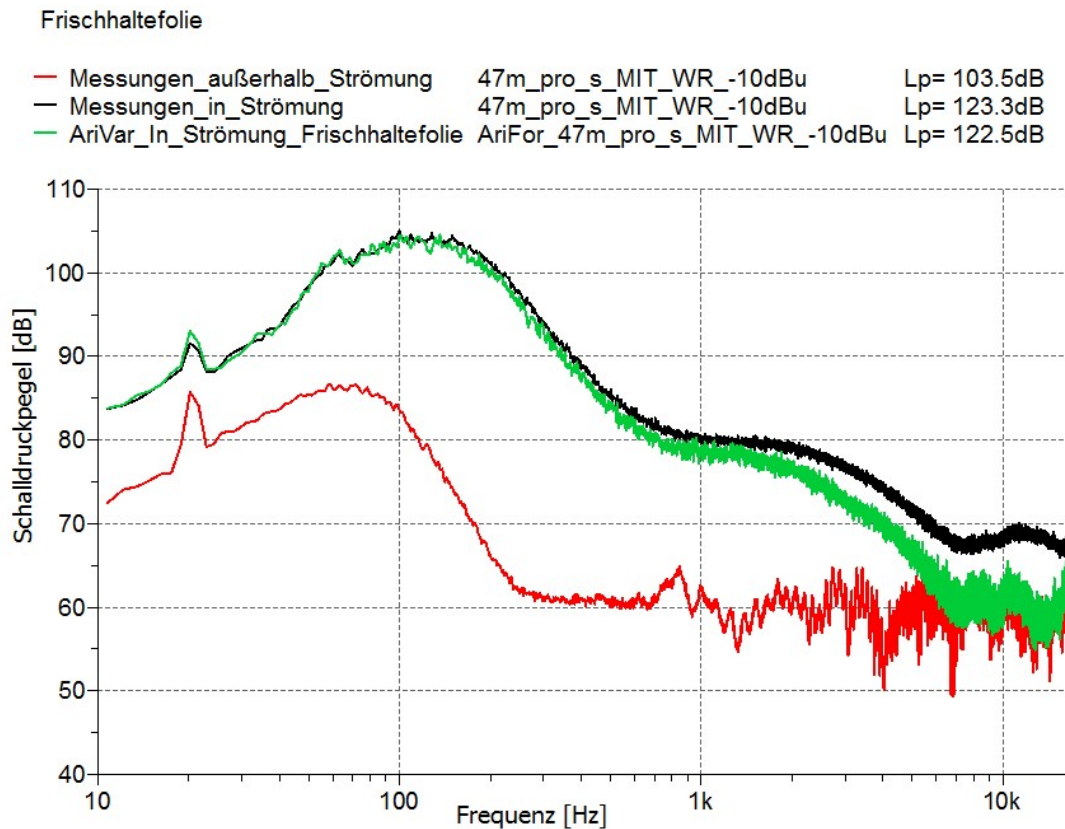


Abbildung 50: Messung in der Strömung mit Frischhaltefolie (grün) und ohne (schwarz), mit Referenzmessung (rot), $u=47$ m/s mit WR, wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon

Die Frischhaltefolie ist ein luftundurchlässiges Material, weshalb theoretisch keine hydrodynamischen Druckschwankungen diese durchdringen sollten. Da die Folie jedoch auch eine sehr geringe Masse hat und somit leicht in Schwingung gerät, könnte sich dies nachteilig auswirken, da so die hydrodynamischen Druckschwankungen über die Schwingung der Frischhaltefolie an die Mikrofonmembran gelangen könnten.

4.4.5 Fellstoff

Der verwendete Fellstoff bewirkt oberhalb von etwa 700 Hz eine Absenkung des Schalldruckpegels innerhalb der Strömung (Abbildung 51), wobei bereits ab etwa 2.500 Hz das weiße Rauschen zu erkennen ist. Unterhalb von 700 Hz liegt eine Verstärkung im Vergleich zur Messung ohne den Fellstoff vor, wodurch sich der Gesamtschalldruckpegel um 1,6 dB erhöht. Oberhalb von 700 Hz ist der Fellstoff also eine deutliche Verbesserung in der aeroakustischen Messung, unterhalb von 700 Hz wird das Signal verschlechtert und entfernt sich weiter von der Referenzmessung.

Fellstoff

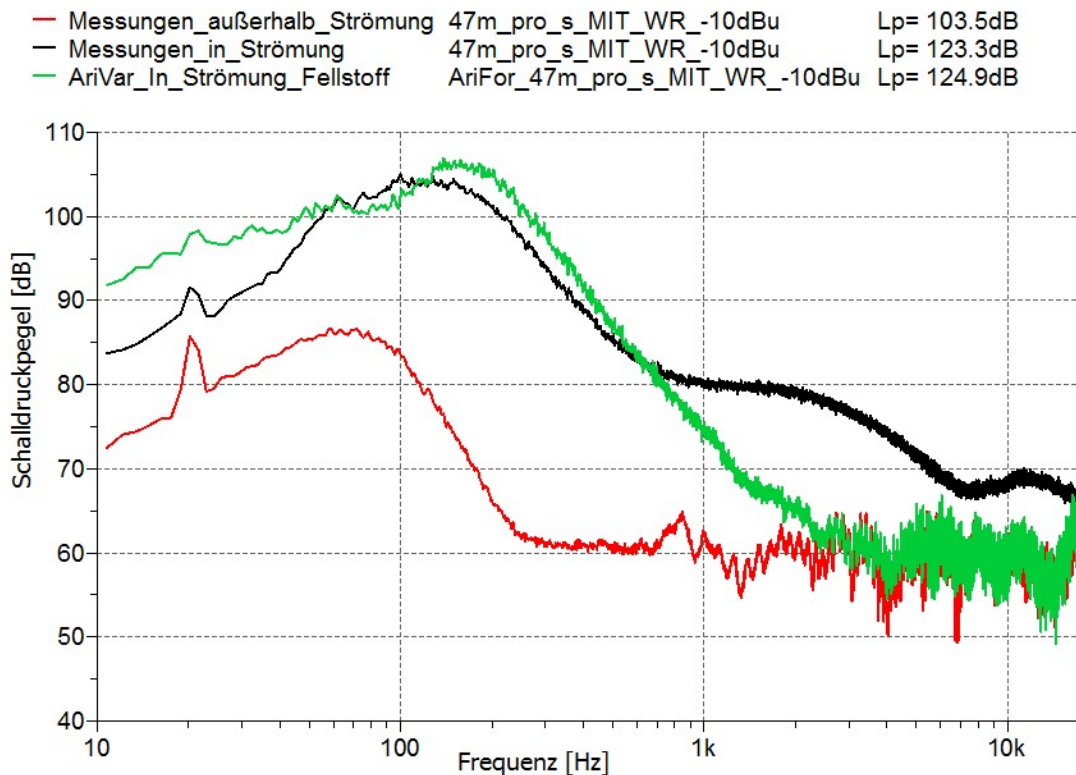


Abbildung 51: Messung in der Strömung mit Fellstoff (grün) und ohne (schwarz), mit Referenzmessung (rot), $u=47$ m/s mit WR, wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon

Um die genauen Gründe für die Verschlechterung unterhalb von 700 Hz bestimmen zu können, müsste man vermutlich weitere Untersuchungen anstellen. Denkbar wäre jedoch, dass beispielsweise durch Unregelmäßigkeiten im Fellstoff tieffrequente, hydrodynamische Druckschwankungen nicht abgehalten werden können und diese den Fellstoff zusätzlich anregen. Die Verstärkung könnte auch ein Artefakt aus der Frequenzgangkorrektur sein, da diese genau in dem Bereich verstärkt. Dies würde eine fehlerhafte Frequenzgangkorrektur zur Folge haben, die noch einmal verifiziert werden müsste. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass die Haare des Fellstoffs in der Strömung angeregt werden, da dieser als einziges Material nicht wandbündig ist, sondern die Haare etwas in die Strömung ragen. Dadurch könnten Turbulenzen aus der Strömung auf den Fellstoff und auf das Mikrofon übertragen werden.

4.4.6 Sefar Petex

Das Material mit dem Namen Sefar Petex wurde von der Hochschule Düsseldorf für den Eigenbau von Schlitzrohrsonden verwendet.

In Abbildung 52 ist zu sehen, dass das Abschirmmaterial einen geringeren Schalldruckpegel in nahezu sämtlichen Frequenzen bewirkt (lediglich 40-90 Hz ist der Schalldruck etwa gleichgeblieben). Oberhalb von etwa 1.000 Hz erhöht sich der Einfluss des Materials und die Differenz zur Messung ohne Material weitet sich auf bis auf über 10 dB oberhalb von 10.000 Hz. Das weiße Rauschen ist im Spektrum etwa ab 5.000 Hz erkennbar.

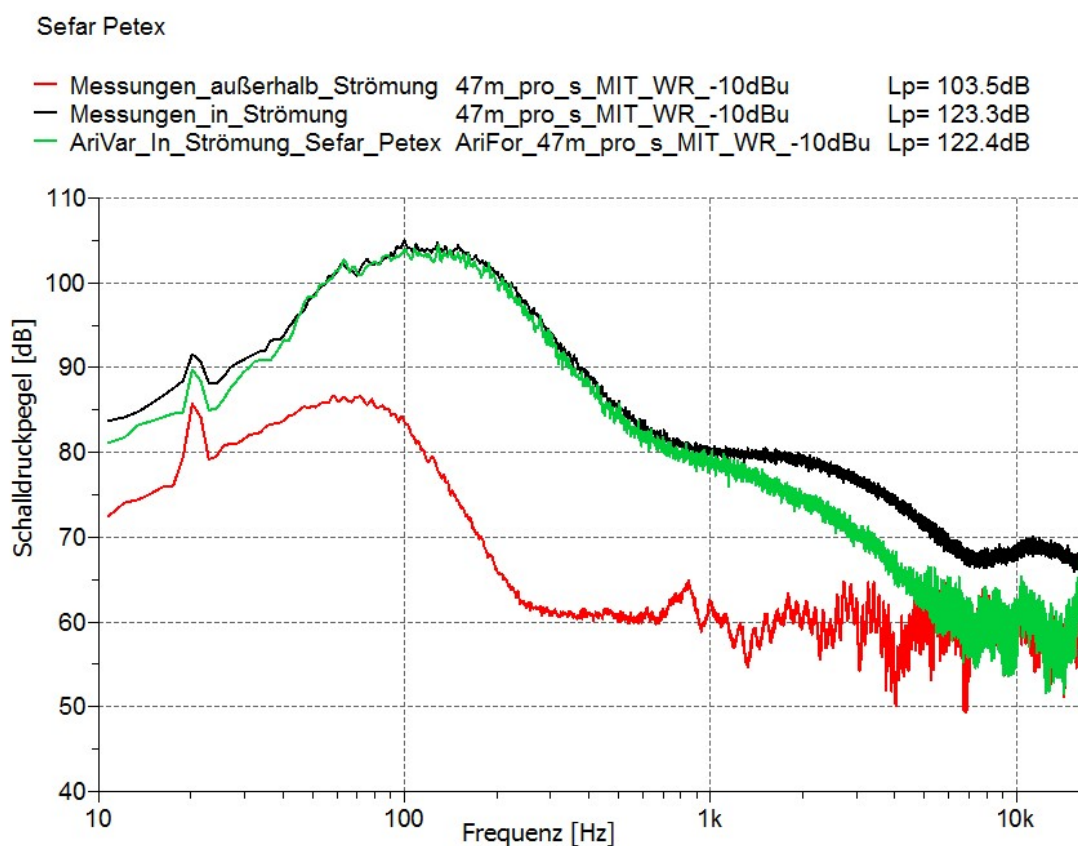


Abbildung 52: Messung in der Strömung mit Sefar Petex (grün) und ohne (schwarz), mit Referenzmessung (rot), $u=47$ m/s mit WR, wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon

Vermutlich hat das Material durch seine dichte Webstruktur (insbesondere im Vergleich zum Akustikvlies oder Netzstrumpf) einen guten Effekt als Abschirmmaterial. Die dichte Struktur verhindert das Eintreten von hydrodynamischen Druckschwankungen, darüber hinaus scheint das Material selber nicht von der Strömung zum Schwingen angeregt zu werden.

4.4.7 Vergleich der Abschirmmaterialien

Zum Vergleich und zur Verifizierung welches Material das beste Ergebnis in Bezug auf die Referenzmessung liefert, wurden verschiedene Eckdaten der Messungen mit den Abschirmmaterialien herangezogen und aufgelistet (Tabelle 5). Es wurde die Reduktion des Gesamtschalldruckpegels von 10-17.000 Hz verglichen, die Reduktion des Gesamtschalldruckpegels mit einem Bandpassfilter von 700-17.000 Hz (700 Hz da das die tiefste Frequenz ist, bis zu der ein Material eine deutliche Reduktion herbeiführen konnte), die Frequenz, ab der eine deutliche Absenkung des Schalldruckpegels erkennbar ist und die Frequenz ab der das weiße Rauschen in der Messung zu erkennen ist.

Vergleich ab 700 Hz bei 47 m/s mit WR -10dBu

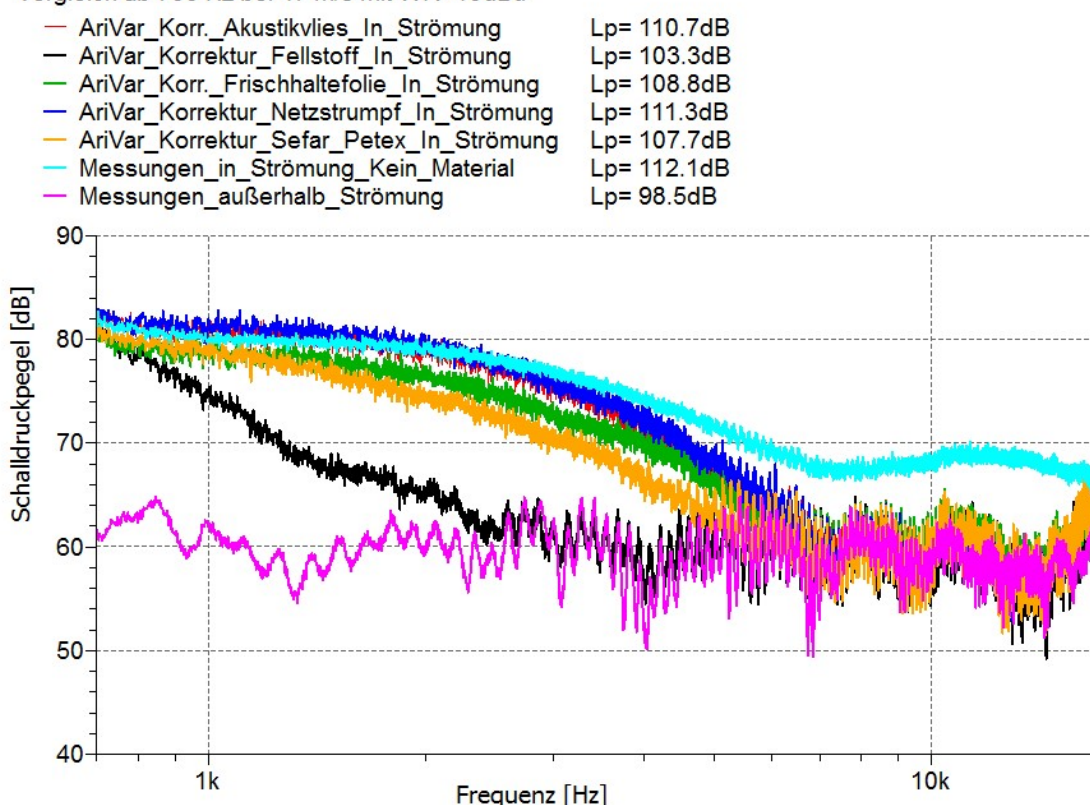


Abbildung 53: Vergleich Abschirmmaterialien ab 700 Hz mit Referenzmessung außerhalb und in Strömung, $u=47$ m/s mit WR, wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon

Besonders auffällig ist hier der Fellstoff, da dieser zwar von 10-17.000 Hz sogar eine Erhöhung des Gesamtschalldruckpegels bewirkt (negativer Wert) und hier das schlechteste Ergebnis liefert, im Bereich von 700-17.000 Hz allerdings die Reduktion deutlich über den anderen Abschirmmaterialien liegt.

Das Material Sefar Petex liefert im Vergleich in allen Kategorien gute Ergebnisse, in der Gesamtschallpegelreduktion von 10-17.000 Hz sogar mit 0,9 dB den besten Wert.

Abschirmmaterial	Reduktion OASPL 10 – 17.000 Hz[dB]	Reduktion OASPL 700 - 17.000 Hz [dB]	Deutlich Absenkung erkennbar ab [Hz]	Weißes Rauschen erkennbar ab [Hz]
Akustikvlies	0,3	1,4	2.000	7.000
Netzstrumpf	-0,5	0,8	2.000	7.000
Frischhaltefolie	0,8	3,3	1.500	6.500
Fellstoff	-1,6	8,8	700	1.500
Sefar Petex	0,9	4,4	1.000	5.000

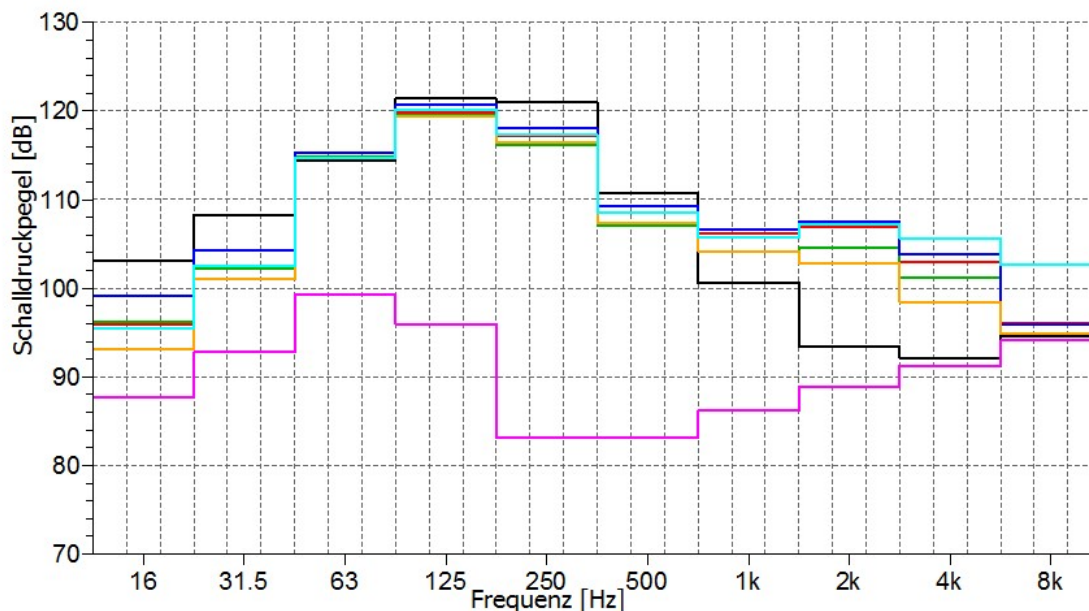
Tabelle 5: Vergleich der Abschirmmaterialien anhand von ausgewählten Eckdaten

Die oben genannten Messungen können auch als Oktavspektren dargestellt werden. Dabei werden allerdings die höchsten Frequenzen nicht berücksichtigt, da bei einer höchsten gemessenen Frequenz von rund 17.000 Hz die 16.000 Hz Oktave nicht abgebildet wird (obere Grenzfrequenz bei 22.400 Hz) [15]. Die höchste Oktave ist somit die 8.000 Hz Oktave, welche eine obere Grenzfrequenz von 11.200 Hz besitzt. Die untere Grenzfrequenz der tiefsten Oktave (16 Hz) ändert sich ebenfalls leicht, von bisher 10 auf nunmehr 11,25 Hz [16].

Die Oktavspektren der Messergebnisse sind in Abbildung 54 dargestellt.

Vergleich Oktavspektren

— Oktavspektren_47m_pro_s_mit_WR Akustikvlies	Lp= 122.9dB
— Oktavspektren_47m_pro_s_mit_WR Fellstoff	Lp= 124.9dB
— Oktavspektren_47m_pro_s_mit_WR Frischhaltefolie	Lp= 122.5dB
— Oktavspektren_47m_pro_s_mit_WR Netzstrumpf	Lp= 123.8dB
— Oktavspektren_47m_pro_s_mit_WR Sefar_Petex	Lp= 122.4dB
— Oktavspektren_47m_pro_s_mit_WR In_Strömung_Ohne_Mat	Lp= 123.2dB
— Oktavspektren_47m_pro_s_mit_WR außerhalb_Strömung	Lp= 103.1dB

**Abbildung 54: Oktavspektren der Abschirmmaterialien und Referenzmessungen**

Bildet man die Differenz zwischen den einzelnen Oktaven der Messung ohne Material und der Messungen mit einem Abschirmmaterial, so erhält man die Reduktion des Schalldruckpegels in dieser Oktave für das entsprechende Abschirmmaterial. Die Reduktionen sind in Tabelle 6 dargestellt, wobei negative Werte einer Verstärkung entsprechen.

Abschirmmaterial	16 Hz	31,5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1.000 Hz	2.000 Hz	4.000 Hz	8.000 Hz
Akustikvlies	-0,4	0,0	0,1	0,4	0,1	-0,1	-0,5	0,3	2,6	6,6
Netzstrumpf	-3,7	-1,8	-0,6	-0,5	-0,7	-0,8	-1,0	-0,3	1,8	6,8
Frischhaltefolie	-0,7	0,2	-0,1	0,6	1,1	1,4	1,5	2,6	4,4	6,8
Fellstoff	-7,6	-5,7	0,4	-1,2	-3,6	-2,2	5,1	13,8	13,5	8,0
Sefar Petex	2,4	1,5	0,0	0,8	0,9	1,1	1,5	4,4	7,2	7,9

Tabelle 6: Vergleich der Reduktion der Abschirmmaterialien für unterschiedliche Oktaven

Hieraus geht hervor, dass insbesondere ab der 1.000 Hz Oktave der Fellstoff die höchste Reduktion liefert, im Gegenzug allerdings tieffrequent die größte Verstärkung aufweist. Die feine Haarstruktur des Fells hält hier scheinbar besonders im hochfrequenten Bereich die hydrodynamischen Druckschwankungen ab. Im tieffrequenten Bereich hat das Material Sefar Petex die besten Ergebnisse geliefert. Vermutlich durch seine hohe Webdichte hält das Material auch tieffrequente hydrodynamische Druckschwankungen ab, wodurch sich auch in hohen Oktaven ab 1.000 Hz das Sefar Petex als immerhin zweitbestes Material herausstellt.

Insgesamt lässt sich also ableiten, dass ein ideales Material nach Möglichkeit eine hohe Webdichte hat, um möglichst gut die hydrodynamischen Druckschwankungen abhalten zu können. Das Akustikvlies und der Netzstrumpf haben mit ihrer relativ groben Struktur die geringste Reduktion geliefert, wohingegen insbesondere der Fellstoff und das Sefar Petex hohe Reduktion liefern konnten.

Gleichzeitig sollte das Material jedoch so beschaffen sein, dass es durch die Strömung nicht in Schwingung geraten kann (wie vermutlich beim Fellstoff geschehen) und so das Messergebnis verfälscht. Dies könnte durch eine gewisse Materialstärke oder Steifigkeit erreicht werden.

4.4.8 Variation der Strömungsgeschwindigkeit

Mit veränderter Strömungsgeschwindigkeit kann sich auch der Einfluss der turbulenten Druckschwankungen auf die Messungen verändern. Um dies zu verifizieren und den Einfluss zu bestimmen, wurden ebenfalls Messungen bei 10 m/s und selektiv auch bei 20 m/s gemacht. Anhand des Akustikvlieses wird hier der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Wirkung des Abschirmmaterials überprüft. In Abbildung 55 ist eine Messung bei 20 m/s zu erkennen.

Zunächst fällt auf, dass die Messung ohne Abschirmmaterial um nur noch 10,6 dB lauter ist, als die Referenzmessung außerhalb der Strömung. Bei 47 m/s lag dieser Wert noch bei 19,8 dB. Der Einfluss der Turbulenz ist also generell weniger geworden.

Demnach fällt die Reduktion im Gesamtschalldruckpegel auch geringer aus. Diese liegt hier bei 0 dB (bei 47 m/s waren es noch 0,3 dB). Es ist zwar noch eine Reduktion im Schalldruckpegel oberhalb von 400 Hz erkennbar, diese fällt aber nicht so deutlich aus, wie noch bei 47 m/s.

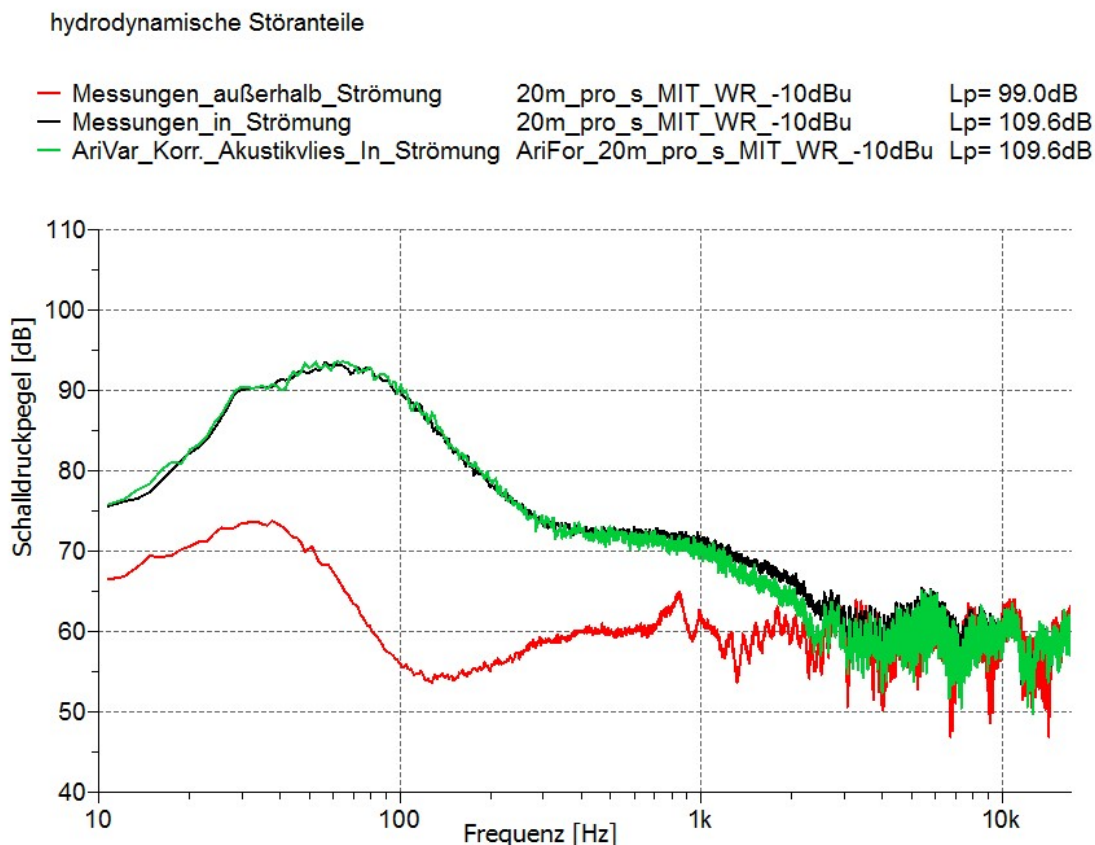


Abbildung 55: Messung mit (grün) und ohne (schwarz) Akustikvlies, mit Referenzmessung (rot), Variation Strömungsgeschwindigkeit auf $u=20$ m/s, mit WR

Verringert man die Strömungsgeschwindigkeit noch weiter auf 10 m/s (Abbildung 56), so erkennt man, dass die Messung ohne Abschirmmaterial in der Strömung nur noch um 1,1 dB lauter ist, als die Referenzmessung außerhalb der Strömung. Der Einfluss der Turbulenz ist also noch einmal deutlich geringer im Vergleich zu 20 m/s. Das Akustikvlies hat eine Reduktion von 0,1 dB im Gesamtschalldruckpegel. Diese resultiert maßgeblich aus der Reduktion des Schalldruckpegels im Frequenzspektrum zwischen 100 Hz und 1.000 Hz.

hydrodynamische Störanteile

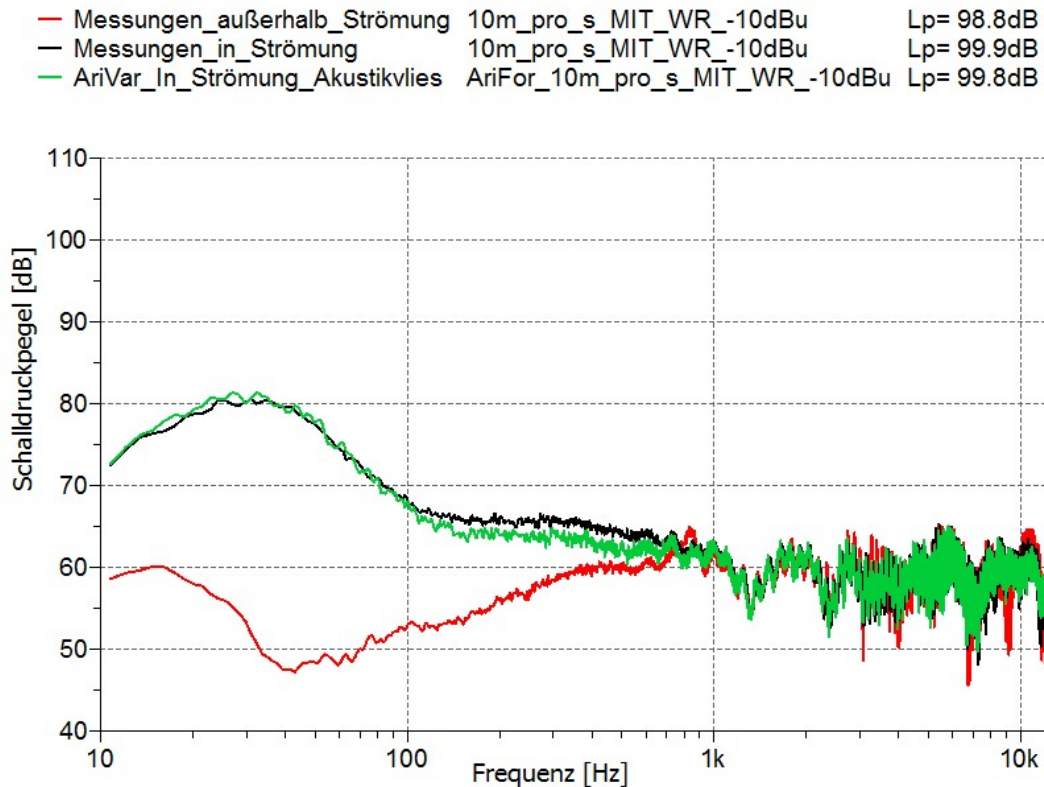


Abbildung 56: Messung mit (grün) und ohne (schwarz) Akustikvlies, mit Referenzmessung (rot), Variation Strömungsgeschwindigkeit auf $u=10$ m/s, mit WR

Durch Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit wirken sich also die turbulenten Druckschwankungen weniger stark aus, wodurch auch das Abschirmmaterial einen geringeren Effekt (geringere Verbesserung) auf die Messung hat.

4.4.9 Variation der Mikrofongröße

In einigen ausgewählten Messungen wurde das wandbündige 1/4-Zoll Mikrofon durch ein 1/2-Zoll Mikrofon ausgetauscht. Hierbei wurde untersucht, inwiefern sich die turbulenten Druckschwankungen unterschiedlich auswirken, da durch die größere Membranoberfläche z.B. theoretisch mehr Angriffsfläche für Turbulenzen vorhanden ist, oder durch die höhere „Sensitivity“ sich die hydrodynamischen Druckschwankungen eher bemerkbar machen können.

Abbildung 57 zeigt die Unterschiede unter gleichen Messbedingungen, sowohl bei der Referenzmessung außerhalb der Strömung ohne Abschirmmaterial, als auch in Strömung mit (in diesem Fall) dem Akustikvlies.

Bei den Referenzmessungen fällt zunächst einmal auf, dass unterhalb von etwa 600 Hz das 1/2-Zoll Mikrofon im Vergleich lauter ist, als das 1/4-Zoll Mikrofon. Dies zeigt sich sowohl in als auch außerhalb der Strömung. Eine größere Membran ist aufgrund des Membrandurchmessers grundsätzlich besser dazu in der Lage tiefe Frequenzen aufzunehmen.

In der Strömung ist allerdings auffällig, dass oberhalb von 600 Hz das 1/4-Zoll Mikrofon deutlich lauter ist als das größere 1/2-Zoll Mikrofon. Dies kann außerhalb der Strömung nicht beobachtet werden. Hier stimmen die unterschiedlichen Mikrofondurchmesser nahezu überein.

Da dies nur in der Strömung der Fall ist, muss diese Verstärkung auf die Messsituation in der Strömung, also die hydrodynamischen Druckschwankungen, zurückzuführen sein. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Druckschwankungen auf eine größere Fläche verteilen können und so punktuell auf der Membran nicht mehr so stark wirken, wie dies beim 1/4-Zoll Mikrofon der Fall ist.

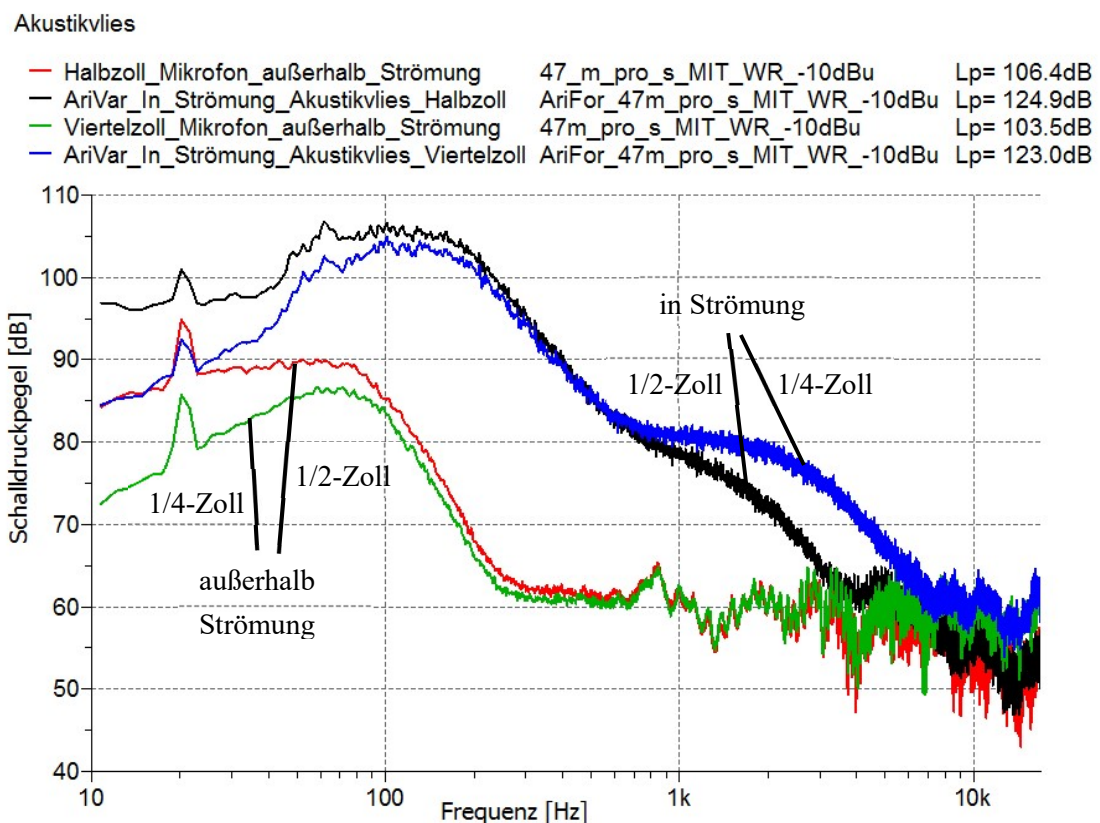


Abbildung 57: Vergleich 1/4-Zoll mit 1/2-Zoll Mikrofon, Referenzmessungen ohne Material außerhalb und mit Abschirmmaterial Akustikvlies in Strömung, $u = 47$ m/s mit WR

Eine größere Membran scheint sich also bei der Messung in der Strömung mit einem Abschirmmaterial zumindest (in diesem Fall) oberhalb von 600 Hz eher positiv

auszuwirken, da bereits ab einer niedrigeren Frequenz eine Reduktion des Schallpegels im Frequenzspektrum erfolgt und das zu messende Geräusch (hier weißes Rauschen) besser zu identifizieren ist.

Zwar steigt der Gesamtschalldruckpegel aufgrund der Betonung der tiefen Frequenzen um 1,9 dB an, mit zunehmender Frequenz ist die große Membran hier allerdings von Vorteil.

4.4.10 Oberflächenmikrofon

Neben dem wandbündigen Mikrofon mit den unterschiedlichen Materialien wurde ebenfalls mit einem Oberflächenmikrofon (siehe 3.2) gemessen. Zum Schutz des Mikrofons wurde lediglich ein Plastikgrill auf das Mikrofon geklebt (siehe Abbildung 4). Darüber hinaus war die Membran der Strömung frei ausgesetzt.

Die Messung in Abbildung 58 zeigt die Referenzmessung außerhalb der Strömung mit weißem Rauschen und die Messung in der Strömung bei 47 m/s (mit und ohne weißem Rauschen). Zunächst ist erkennbar, dass das weiße Rauschen so stark von der Strömung bzw. der Turbulenz maskiert wird, dass es keinen Einfluss auf den Gesamtschalldruckpegel hat. Lediglich oberhalb von 10.000 Hz ist ein Unterschied im Frequenzspektrum erkennbar, der sich allerdings so gut wie gar nicht auf den Gesamtschalldruckpegel auswirkt.

Der Unterschied zwischen der Referenzmessung außerhalb der Strömung und der Messung in der Strömung ist jedoch mit 23,9 dB deutlich vorhanden. Das weiße Rauschen wird durch die turbulenten Druckschwankungen komplett maskiert und ist nicht mehr in der Messung zu identifizieren.

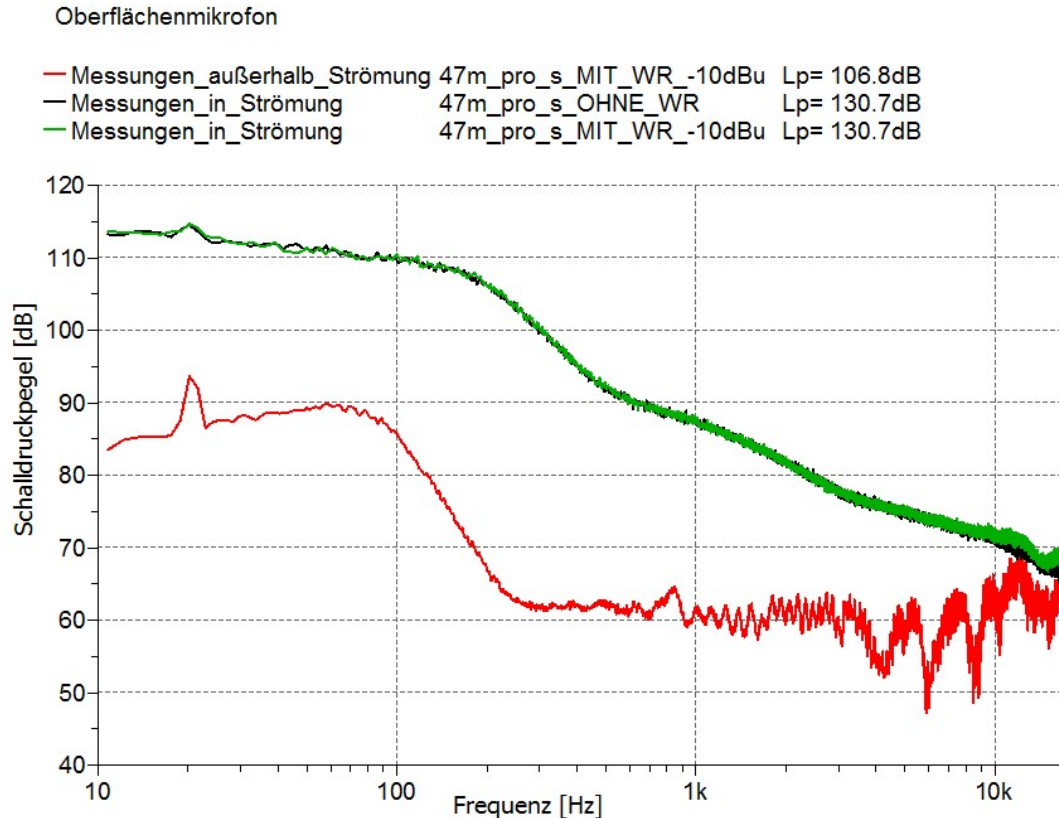


Abbildung 58: Messung mit Oberflächenmikrofon in der Strömung mit (grün) und ohne (schwarz) WR, Referenzmessung (rot) bei $u=47$ m/s

Verringert man die Strömungsgeschwindigkeit auf 10 m/s, so sieht man in Abbildung 59, dass die Messung in der Strömung ab etwa 1.000 Hz mit der Referenzmessung außerhalb nahezu übereinander liegt. Auch im Gesamtschalldruckpegel ist die Erhöhung deutlich geringer, als noch bei 47 m/s, nämlich 3,9 dB (statt 23,9 dB bei 47 m/s). Unterhalb von 1.000 Hz haben die Turbulenzen jedoch weiterhin einen im Frequenzspektrum deutlich sichtbaren Einfluss auf den Schalldruckpegel (bis zu > 30 dB Unterschied).

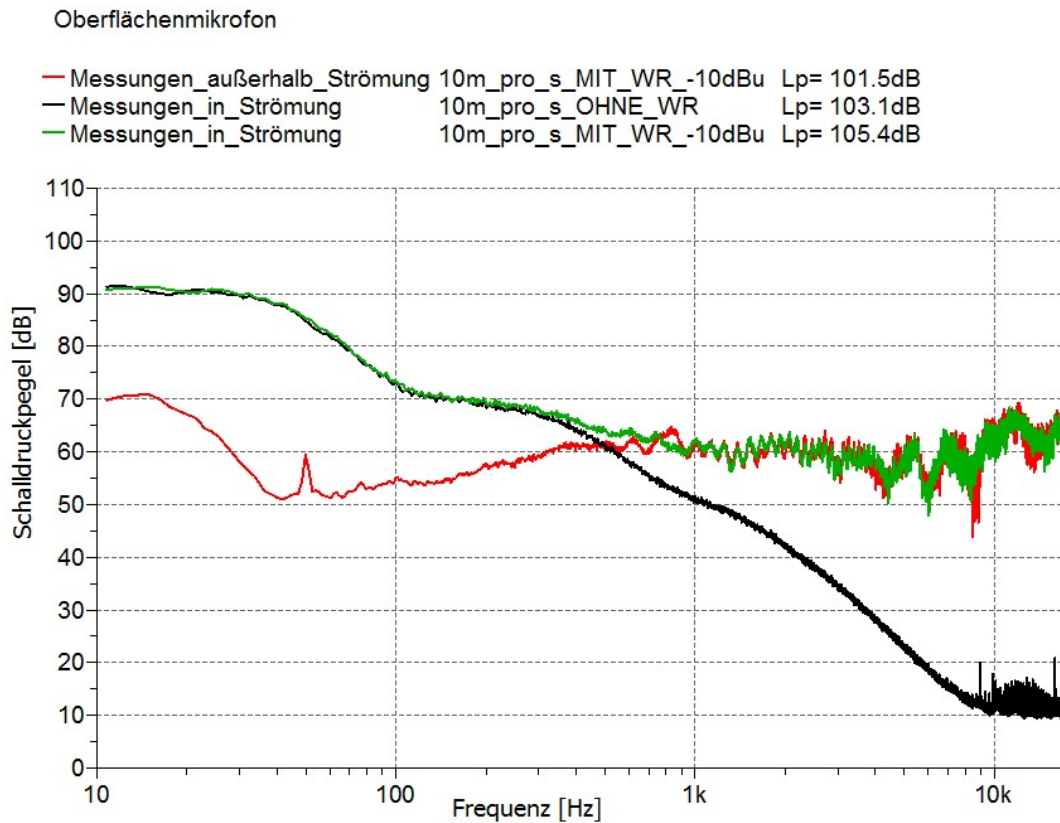


Abbildung 59: Messung mit Oberflächenmikrofon in der Strömung mit (grün) und ohne (schwarz) WR, Referenzmessung (rot) bei $u=10$ m/s

Mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit nimmt also der Einfluss der Turbulenz bei hohen Frequenzen immer stärker ab, bzw. wird vom Oberflächenmikrofon weniger stark aufgenommen.

4.4.11 Schlitzrohrsonde und Nasenkonusse

Zusätzlich zu den wandbündigen Mikrofonen und den Oberflächenmikrofonen wurden ebenfalls die Schlitzrohrsonde und die zwei unterschiedlichen Nasenkonusse untersucht. Dafür wurden die Messungen bei 47 m/s mit weißem Rauschen verglichen und die Messung außerhalb der Strömung bei 47 m/s mit weißem Rauschen der Schlitzrohrsonde als Referenz angenommen.

Die Frequenzgangkorrekturen aus Kapitel 4.2 wurden bereits einberechnet.

Zu beachten ist hier, dass Nasenkonusse nach DIN 5136 nur bis 20 m/s zulässig sind. Daher werden diese deutlich über ihrem Limit getestet, was sich im Messergebnis widerspiegeln sollte.

In Abbildung 60 werden die gemessenen Schalldruckpegel für die unterschiedlichen Mikrofone abgebildet. Hier ist erkennbar, dass mit zunehmender Länge des Turbulenzschirms der Schalldruckpegel immer weiter abnimmt (Schlitzrohrsonde < Nasenkonus lang < Nasenkonus kurz). Im Gesamtschalldruckpegel hat die Schlitzrohrsonde demnach den geringsten Unterschied zur Referenzmessung mit 8,3 dB. Hier ist allerdings zu beachten, dass oberhalb von 1.000 Hz bei der Schlitzrohrsonde das weiße Rauschen (erkennbar in der Referenzmessung) nicht abgebildet wird. Das hängt mit der, besonders für hohe Frequenzen, stark ausgeprägten Richtcharakteristik der Schlitzrohrsonde zusammen (siehe Kapitel 4.2.2, Abbildung 34). Die extremen Peaks der Nasenkonusse oberhalb von 10.000 Hz gehen auf die ermittelten Frequenzgangkorrekturen zurück. Die Nasenkonusse besitzen ebenfalls eine eigene Richtcharakteristik, die im Rahmen dieser Ausarbeitung jedoch nicht erstellt wurde. Da die Nasenkonusse jedoch rundum ein Gitter haben, durch das Schall eindringen kann, ist die Richtcharakteristik vermutlich nicht so extrem wie bei der Schlitzrohrsonde zu erwarten.

Vergleich_Nasenkonusse_Schlitzrohrsonde

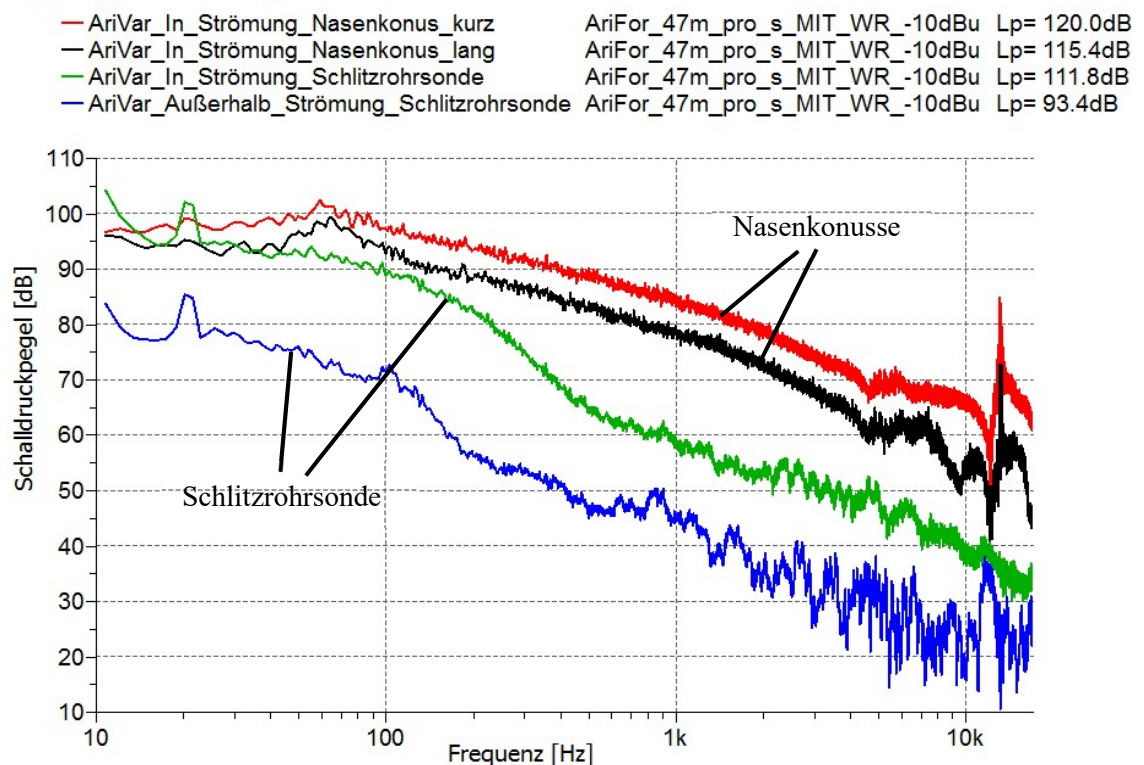


Abbildung 60: Vergleich Nasenkonusse und Schlitzrohrsonde bei $u=47$ m/s mit WR

Die Nasenkonusse liefern in nahezu dem gesamten Frequenzbereich ein unbrauchbares Ergebnis. Das gemessene weiße Rauschen wird von den hydrodynamischen Druckschwankungen nahezu vollständig maskiert. Lediglich oberhalb von 4.000 Hz ist beim langen Nasenkonus das weiße Rauschen zu erahnen. Die Artefakte aus der ermittelten Frequenzgangkorrektur lassen oberhalb von 10.000 Hz jedoch keine Auswertung zu. Der kurze Nasenkonus eignet sich bei der hier betrachteten Strömungsgeschwindigkeit definitiv nicht für aeroakustische Messungen, da dieser das weiße Rauschen im Frequenzspektrum nicht erkennen lässt.

Die Schlitzrohrsonde liegt in der Strömung im Gesamtschalldruckpegel 18,4 dB oberhalb der Messung außerhalb der Strömung. Hier hat die Strömung also auf jeden Fall einen deutlichen Einfluss auf die Messung, wobei das weiße Rauschen bei beiden Messungen nicht erkennbar ist, da die Richtcharakteristik der Schlitzrohrsonde dies, insbesondere bei hohen Frequenzen, nicht zulässt.

4.5 Vergleich durch strömungsakustische Geräusche

Neben dem synthetischen Geräusch (weißes Rauschen) von außerhalb der Strömung wurde ebenfalls das Verhalten der Abschirmmaterialien bei strömungsakustischen Geräuschen untersucht. Dabei wurden zum einen ein Lochgitter an die Öffnung des Windkanals eingebracht, um ein breitbandiges Geräusch zu erzeugen, zum anderen ein Zylinder, um ein tonales Geräusch (Hiebton) zu erzeugen.

Es wurde analog zum synthetischen Signal zunächst außerhalb der Strömung gemessen, um die Strömungsgeräusche möglichst ohne hydrodynamische Druckschwankungen am Mikrofon aufzunehmen. Anschließend wurden in der Strömung selektive Messungen für einige Abschirmmaterialien gemacht. Betrachtet wird hier der Fellstoff, da dieser bei dem synthetischen Signal deutlich erkennbare Ergebnisse im Frequenzspektrum geliefert hat.

Zusätzlich wird hier die Schlitzrohrsonde betrachtet. Da die Geräusche nahezu frontal auf die Schlitzrohrsonde treffen, wirkt sich hier die Richtcharakteristik bei weitem nicht so gravierend aus, wie dies beim synthetischen Signal der Fall war. Die Frequenzgangkorrektur für die Schlitzrohrsonde aus Abbildung 30 wurde hier bereits mit einberechnet.

4.5.1 Lochgitter

Die Messungen mit dem Lochgitter an der Windkanalöffnung konnten nur bei 10 m/s durchgeführt werden, da der Windkanal den nötigen Druck nicht aufbauen konnte, um höhere Geschwindigkeiten zu realisieren.

Der Einfluss des Lochgitters ist in Abbildung 61 dargestellt. In der Messung außerhalb der Strömung mit und ohne Lochgitter ist erkennbar, dass über den gesamten Frequenzbereich ein breitbandiges Geräusch erzeugt wird, welches den Gesamtschalldruckpegel von 68,5 dB auf 81,0 dB erhöht. Einzelne Frequenzen sind teilweise sogar bis zu knapp 40 dB lauter, wobei das Signal des Lochgitters mit steigender Frequenz einen stärkeren Einfluss hat. Jedoch ist hier wichtig zu erwähnen, dass durch das Lochgitter nicht nur ein breitbandiges Geräusch erzeugt wird, sondern das Lochgitter ebenfalls als Turbulenzgitter dient und so den Turbulenzgrad erhöht.

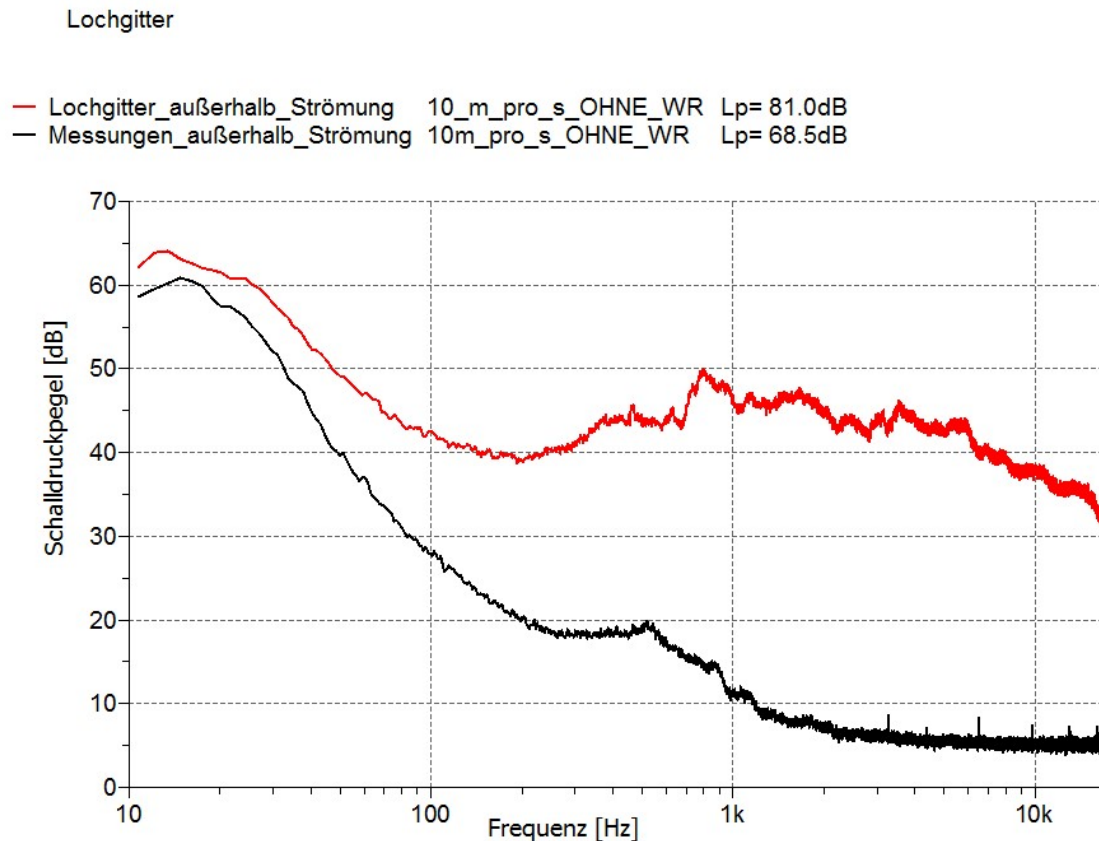


Abbildung 61: Einfluss des Lochgitters, außerhalb Strömung $u = 10$ m/s mit (rot) und ohne (schwarz) Lochgitter, wandbündiges 1/4-Zoll Mikrofon ohne Abschirmmaterial, ohne WR

In Abbildung 62 ist erkennbar, dass der Unterschied zwischen der Messung außerhalb der Strömung und der Messung in der Strömung ohne Abschirmmaterial bei einzelnen Frequenzen bis zu 40 dB beträgt, im Gesamtschalldruckpegel 26,3 dB.

Hier fällt auf, dass insbesondere hochfrequent keine starke Reduktion des Schalldruckpegels durch den Fellstoff erreicht wurde (im Gegensatz zu den Messungen in 4.4). Stattdessen konnte maßgeblich eine Reduktion unterhalb von 4.000 Hz erreicht werden. Der Gesamtschalldruckpegel hat sich um 6,8 dB verringert.

Ebenfalls auffällig ist der Bereich von 4.000 – 7.000 Hz, wo sowohl die Messung ohne als auch die Messung mit Fellstoff sich deutlich (etwa 5-6 dB) von der Referenzmessung unterscheiden.

Die Schlitzrohrsonde konnte zwar mit 10 dB eine noch stärkere (insbesondere < 300 Hz) Reduktion des Gesamtschalldruckpegels erzeugen, liegt allerdings oberhalb von 3.000 Hz deutlich unterhalb der Referenzmessung. Daraus lässt sich deuten, dass die Reduktion des Gesamtschalldruckpegels in diesem Fall nicht nur positiv zu werten ist, da hochfrequent unter Umständen Informationen über das Geräusch verloren gehen können.

Der Grund für den niedrigeren Verlauf könnte auch in der Richtcharakteristik begründet sein, welche in Abbildung 34 insbesondere für die Oktavbänder 4.000 Hz und 8.000 Hz eine starke Richtungsabhängigkeit zeigt.

In die Messung ist lediglich die Frequenzgangkorrektur der Schlitzrohrsonde aus Abbildung 30 eingeflossen, nicht aber eine explizite Richtcharakteristik, da diese nicht eindeutig für die Einbausituation aus einer Richtung zu bestimmen ist.

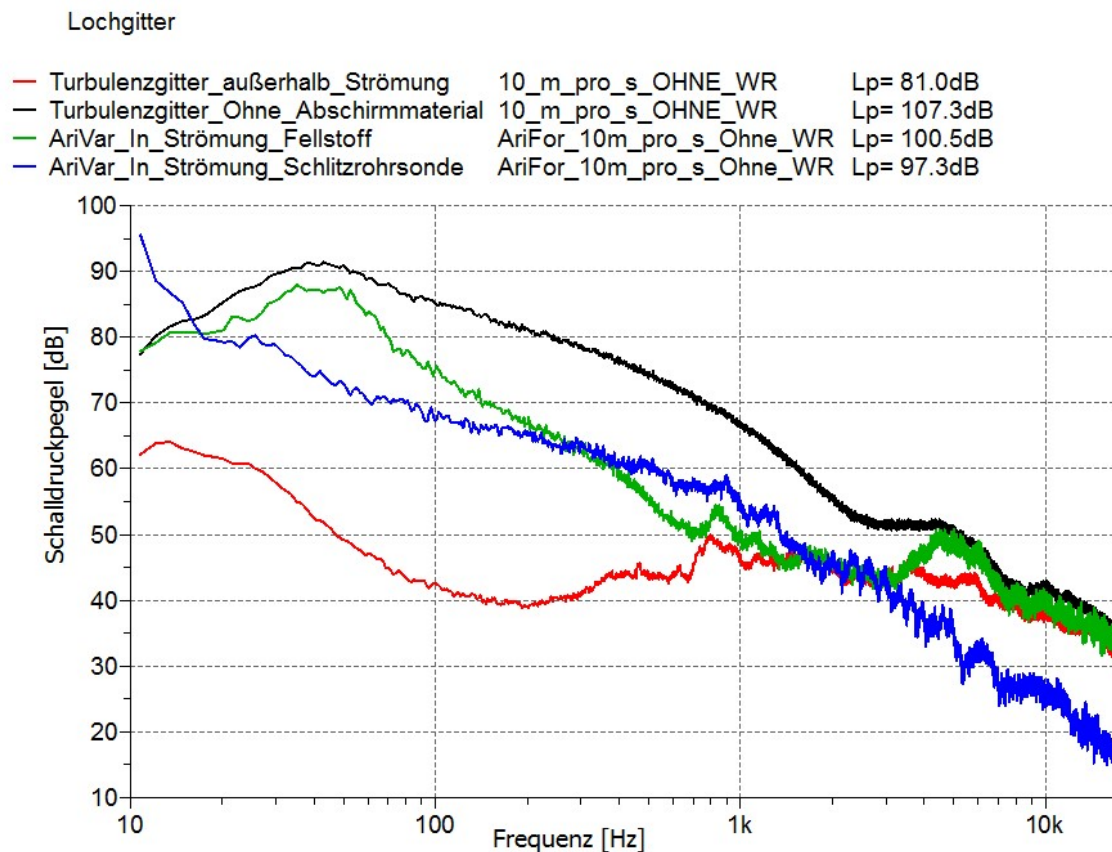


Abbildung 62: Lochgitter mit und ohne Fellstoff vor wandbündigem 1/4-Zoll Mikrofon in Strömung, Schlitzrohrsonde in Strömung und Referenzmessung (rot) außerhalb der Strömung, $u = 10$ m/s, ohne WR

Zudem wäre in weiteren Messungen interessant zu untersuchen, warum der Fellstoff ausgerechnet bei dieser Messung tieffrequent nicht verstärkend wirkt, sondern auch hier eine Verringerung des Schalldruckpegels zur Folge hat. Die hydrodynamischen Druckschwankungen fallen hier zwar deutlich stärker aus als ohne Lochgitter, wodurch der Einfluss dieser auch zunimmt, allerdings ist es auffällig, dass sich der Fellstoff hier tieffrequent augenscheinlich etwas anders verhält, als bei den Messungen ohne Lochgitter.

4.5.2 Zylinder

Die Messung mit dem Zylinder in der Strömung wurde sowohl bei 10 m/s, als auch bei 47 m/s durchgeführt. Zunächst wird auf die Messung bei 47 m/s eingegangen, da hier der durch den Zylinder erzeugte Ton deutlich ausgeprägter ist.

In Abbildung 63 ist zunächst erkennbar, bei welcher Frequenz sich der erzeugte Ton befindet. Bei 47 m/s ist die Frequenz 3.375,33 Hz. Vergleicht man diese Frequenz mit der zuvor errechneten Frequenz aus 3.3 (3.290 Hz), so stellt man fest, dass diese etwa in der gleichen Größenordnung liegt.

Die Referenzmessung zeigt einen deutlich ausgeprägten Peak, mit den entsprechenden Harmonischen (6.781 Hz). Dieser Peak hebt sich aus der Messung ohne Abschirmmaterial nur um wenige dB hervor, wohingegen die Messung mit Fellstoff diesen Peak deutlich darstellt. Auch die Harmonischen sind hier erkennbar, wenn auch bei einem höheren Schalldruckpegel, als bei der Referenzmessung. In der Messung ohne Abschirmmaterial sind diese gar nicht zu erkennen, da diese von den hydrodynamischen Druckschwankungen komplett maskiert werden.

Im Gesamtschalldruckpegel wirkt sich der Fellstoff allerdings verstärkend aus und bewirkt eine Erhöhung von 2,7 dB, da unterhalb von 800 Hz der Schalldruckpegel über dem der Messung ohne Abschirmmaterial liegt.

Die Schlitzrohrsonde stellt den erzeugten Ton bei 3.375,33 Hz zwar ebenfalls dar, allerdings liegt dieser fast 20 dB unterhalb des Schalldruckpegels der anderen Messungen. Unterhalb von 40 Hz bewirkt die Schlitzrohrsonde zwar eine Verstärkung, in allen anderen Frequenzen jedoch eine Reduktion des Schalldruckpegels. Dadurch wird eine Reduktion im Gesamtschalldruckpegel von 10,7 dB erreicht. Dies ist zwar deutlich besser, als der Fellstoff, jedoch wird auch hier (ähnlich zum Lochgitter) hochfrequent das Signal nicht exakt abgebildet, da die hohen Frequenzen scheinbar nicht akkurat von der Schlitzrohrsonde aufgenommen werden. Dies könnte hier ebenfalls wieder mit der Richtcharakteristik der Schlitzrohrsonde aus (Abbildung 34) zusammenhängen.

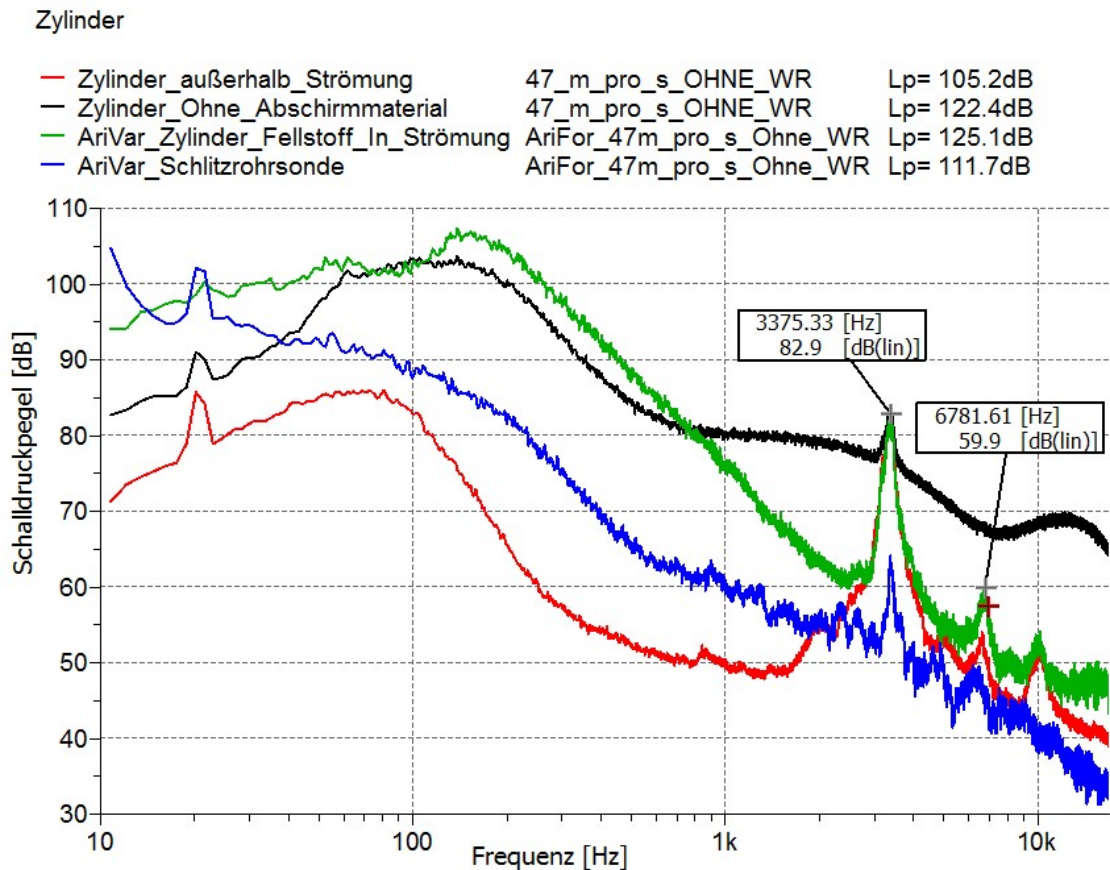


Abbildung 63: Zylinder mit und ohne Fellstoff vor wandbündigem 1/4-Zoll Mikrofon in Strömung, Schlitzrohrsonde in Strömung und Referenzmessung außerhalb der Strömung bei $u = 47$ m/s, ohne WR

Die Schlitzrohrsonde stellt den hier erzeugten Ton also nicht akkurat dar. Teilweise ist dies vermutlich zwar in der Richtcharakteristik begründet, jedoch ist der Winkel, aus dem das Signal auf die Schlitzrohrsonde trifft, nicht so groß, wie bei den Messungen mit synthetischem Signal. Durch den Fellstoff lässt sich der erzeugte Ton inklusive seiner Harmonischen darstellen, wenn auch auf Kosten des Gesamtschalldruckpegels, der durch die Anhebung in den tiefen Frequenzen ansteigt.

Verringert man die Strömungsgeschwindigkeit auf 10 m/s (Abbildung 64) erkennt man, dass der erzeugte Ton zunächst einmal eine andere Frequenz besitzt (771 Hz). Ebenfalls fällt auf, dass die Schlitzrohrsonde den Schalldruckpegel des Tons deutlich besser darstellt, als bei 47 m/s. Der Fellstoff hingegen stellt den Ton nur leicht dar, die Messung ohne Abschirmmaterial gar nicht.

Die verringerte Darstellung des Tons bei 47 m/s durch die Schlitzrohrsonde, könnte also auf die, mit steigender Frequenz stärker ausgeprägte, Richtcharakteristik zurückzuführen sein.

Zylinder

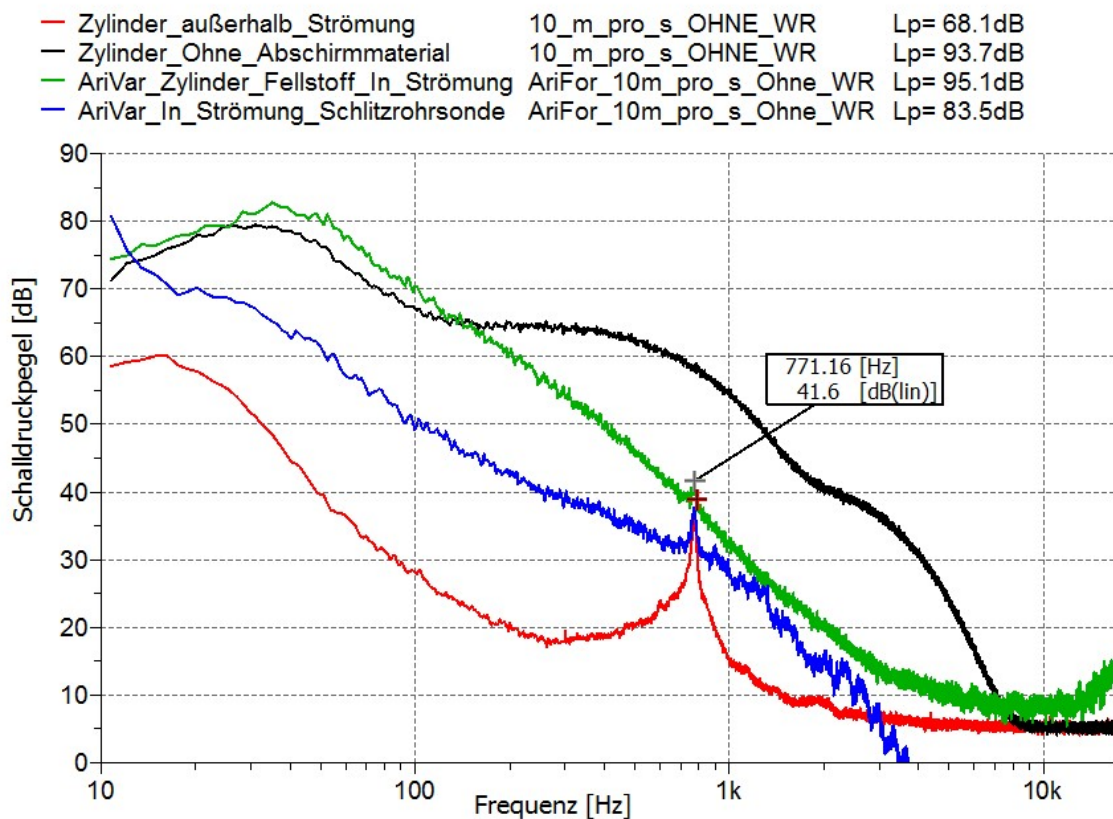


Abbildung 64: Zylinder mit und ohne Fellstoff vor wandbündigem 1/4-Zoll Mikrofon in Strömung, Schlitzrohrsonde in Strömung und Referenzmessung außerhalb der Strömung bei $u = 10 \text{ m/s}$, ohne WR

Die verringerte Darstellung des Tons bei 47 m/s durch die Schlitzrohrsonde, könnte also auf die, mit steigender Frequenz stärker ausgeprägte, Richtcharakteristik zurückzuführen sein. Dies würde auch die verbesserte Darstellung bei niedrigerer Frequenz erklären.

5 Messungen an Prüfstand nach DIN EN ISO 5136

Im Rahmen eines Forschungsprojekts am ISAVE der Hochschule Düsseldorf, wurde die Reduktion des Schalldruckpegels bei Axialventilatoren durch Zacken (sog. Serrations) an den Vorderkanten der Rotorblätter untersucht. Dazu wurde ein Prüfstand gemäß der DIN EN ISO 5136 – Bestimmung der von Ventilatoren und anderen Strömungsmaschinen in Kanäle abgestrahlten Schallleistung – errichtet. Die Versuche an diesem Prüfstand fanden bei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 10 m/s statt.

Innerhalb dieses Prüfstands wurden im Rahmen einer anderen Ausarbeitung [16] zwei Rohrelemente mit wandbündigen Mikrofonen gebaut, um so den Schalldruckpegel im Rohrprüfstand, als Alternative zur ebenfalls installierten Schlitzrohrsonde, messen zu können.

Dieses Messsetup hat noch nicht die Möglichkeit geboten, ein Abschirmmaterial vor die Mikrofone zu spannen, weshalb die Mikrofonmembran der Strömung und den turbulenten Druckschwankungen ausgesetzt war (abgesehen vom Schutzgrill).

Die Erkenntnisse aus den Messungen im reflexionsarmen Raum dieser Ausarbeitung sollen nun auf die Messungen am Rohrprüfstand angewandt werden. Hier werden einige Messungen aus der Ausarbeitung [16] erläutert und anschließend mit den Messungen im reflexionsarmen Raum in Beziehung gebracht. Für genaue Informationen zum Bau der Rohrelemente und dem Messaufbau ist die Ausarbeitung [16] heranzuziehen. Eine Abbildung des fertig installierten Rohrelements mit den wandbündigen Mikrofonen ist in Abbildung 65 zu sehen. Hier erkennt man ebenfalls an einer Position im Vordergrund ein axial versetztes Mikrofon. Dieses diente zur Verifizierung des Einflusses der Messposition im Rohr in Bezug auf Rohrmoden oder auch Turbulenzwirbel.

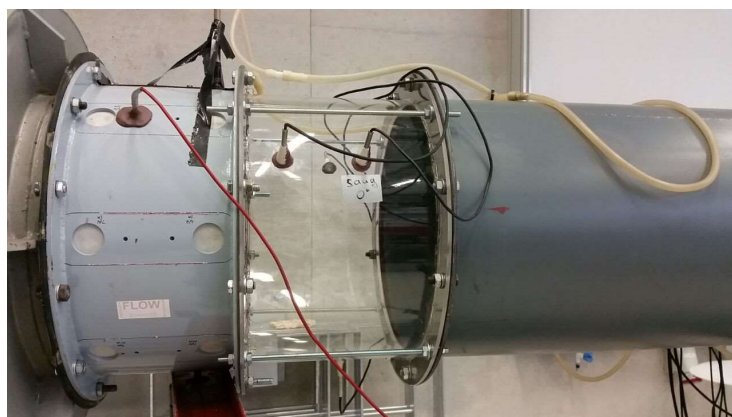


Abbildung 65: Rohrelement mit wandbündigen Mikrofonen, saugseitig an Prüfstand nach DIN EN ISO 5136 [16]

5.1 Ergebnisse der Ausarbeitung

In Abbildung 66 werden die Schalldruckpegel der drei wandbündigen 1/4-Zoll Mikrofone (druckseitig über den Umfang gemittelt) mit der Schlitzrohrsonde verglichen und in Terzen dargestellt. Die Frequenzgangkorrektur der Schlitzrohrsonde wurde hier bereits einberechnet. Auffällig ist hier, dass insbesondere oberhalb von 1.000 Hz die wandbündigen Mikrofone einen deutlich höheren Schalldruckpegel aufweisen, als die Schlitzrohrsonde. Dies trifft auch für alle Drosselzustände zu, wobei geringe Drosselung (T2) höhere Schalldruckpegel in hohen Frequenzen zur Folge hat. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass ein insbesondere sich hochfrequent auswirkender Einfluss der turbulenten Druckschwankungen in dem Prüfstand vorhanden ist, der die Messungen mit den wandbündigen Mikrofonen beeinflusst. Wie hoch dieser Einfluss jedoch exakt ist, kann hier nicht genau bestimmt werden, da die Schlitzrohrsonde, je nach Richtung des einfallenden Schalls, aufgrund der Richtcharakteristik den hochfrequenten Schall dämpft (vgl. hier Kapitel 4.5).

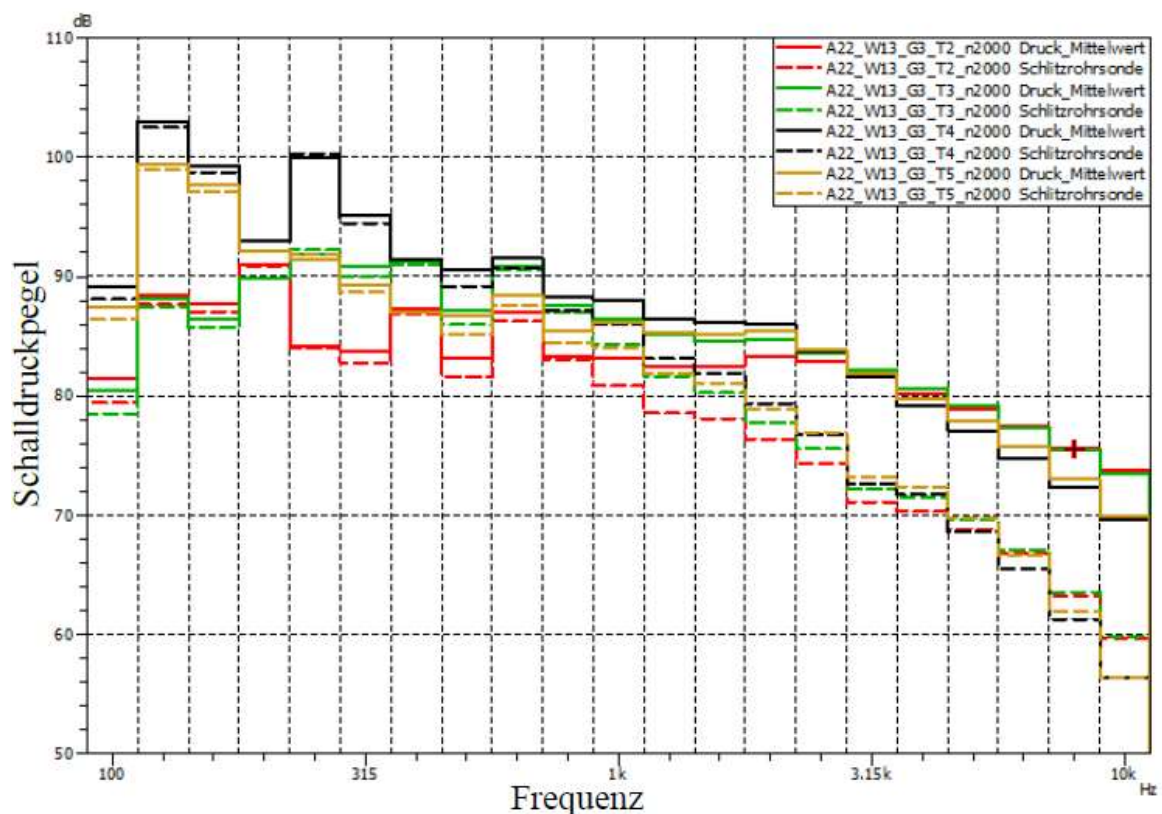


Abbildung 66: Vergleich der Mittelwerte der wandbündigen 1/4-Zoll Mikrofone mit der Schlitzrohrsonde (korrigiert) bei verschiedenen Drosselzuständen der Serration A22_W13, Darstellung in Terzbändern [16]

Der zu messende Schall des Prüfstands besteht allerdings aus tonalen und breitbandigen Anteilen. Die Darstellung in Terzen lässt besonders die Identifikation von tonalen Geräuschen nicht zu, weshalb eine Betrachtung als Schmalbandspektrum ebenfalls sinnvoll ist.

Die gleiche Messung, die zuvor in Terzen dargestellt wurde (Abbildung 66) ist nun in Abbildung 67 als Schmalbandspektrum dargestellt, wobei die Schlitzrohrsonde ebenfalls wieder mit der entsprechenden Frequenzgangkorrektur angepasst wurde. Erkennbar sind nun tonale Komponenten, die sowohl von der Schlitzrohrsonde als auch von den gemittelten wandbündigen Mikrofonen aufgenommen wurden. Diese tonalen Komponenten treten bis etwa 2.700 Hz auf, bzw. sind im Frequenzspektrum sichtbar. Im darüber liegenden Frequenzbereich dominiert ein breitbandiger Signalanteil. Tieffrequente werden die tonalen Komponenten in beiden Frequenzspektren ziemlich genau gleich abgebildet. Erst ab etwa 1.000 Hz treten hier Differenzen im Schalldruckpegel auf. Im Gesamtschalldruckpegel ist nach der Frequenzgangkorrektur die Schlitzrohrsonde mit 0,5 dB etwas leiser, als die wandbündigen Mikrofone.

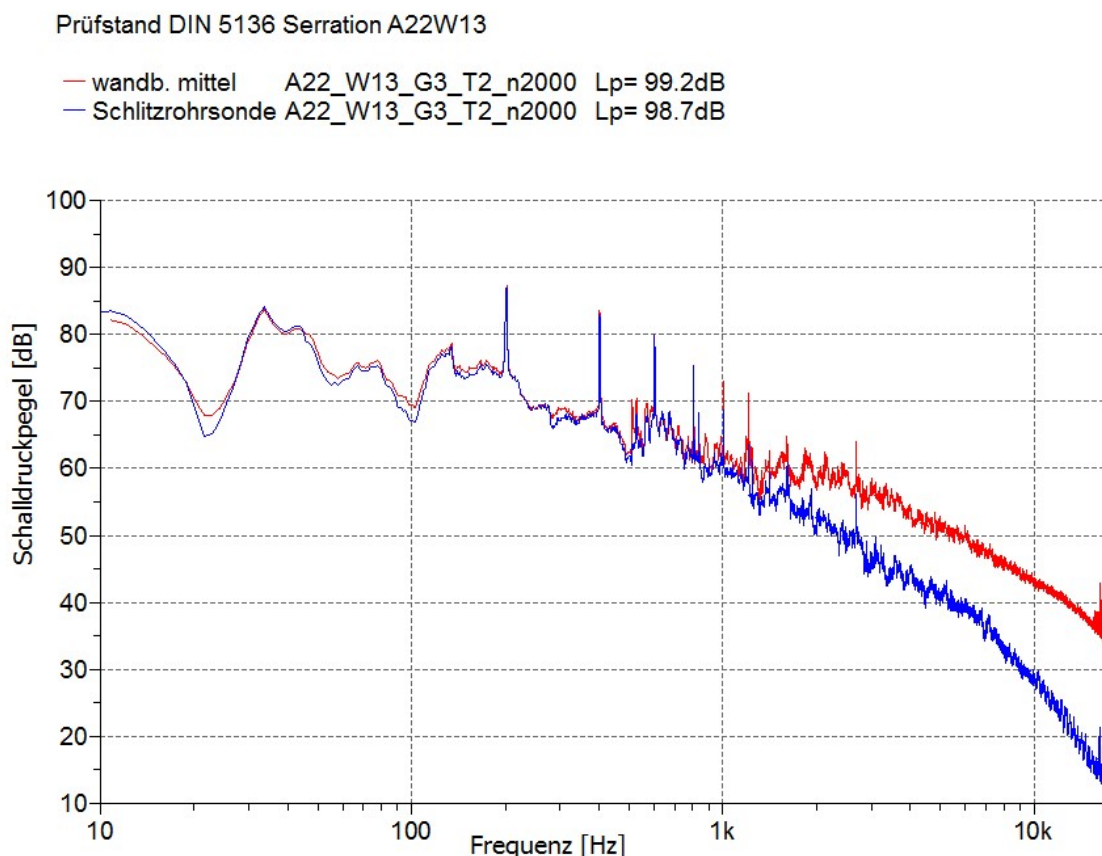


Abbildung 67: Messung der Serration A22W13 als Schmalbandspektrum, gemittelte wandbündige 1/4-Zoll Mikrofone und Schlitzrohrsonde, Frequenzgangkorrektur der Schlitzrohrsonde ist einberechnet, Daten aus [16] neu dargestellt

Betrachtet man nun den Bereich der tonalen Komponenten ab 1.000 Hz im Detail (Abbildung 68), so erkennt man, dass hier Differenzen von etwa 5-8 dB vorliegen. Da das aufgenommene Frequenzspektrum der Schlitzrohrsonde hier jedoch im Vergleich zu den wandbündigen Mikrofonen generell mit steigender Frequenz im Schalldruckpegel abfällt könnte der entstandene Unterschied auch darin begründet sein. Der Peak bei 1.208 Hz jedoch, scheint sich bei den wandbündigen Mikrofonen deutlich stärker hervorzuheben, als bei der Schlitzrohrsonde. Hier kann letztere vermutlich den Ton nicht akkurat darstellen. Dies würde sich, zumindest für den Bereich der Mittenfrequenzen, mit den Erkenntnissen aus Kapitel 4.5.2 decken, da hier auch die Schlitzrohrsonde den erzeugten Ton wesentlich leiser dargestellt hat, als die Vergleichsmessungen.

Prüfstand DIN 5136 Serration A22W13

— wandb. mittel A22_W13_G3_T2_n2000 Lp= 99.2dB
 — Schlitzrohrsonde A22_W13_G3_T2_n2000 Lp= 98.7dB

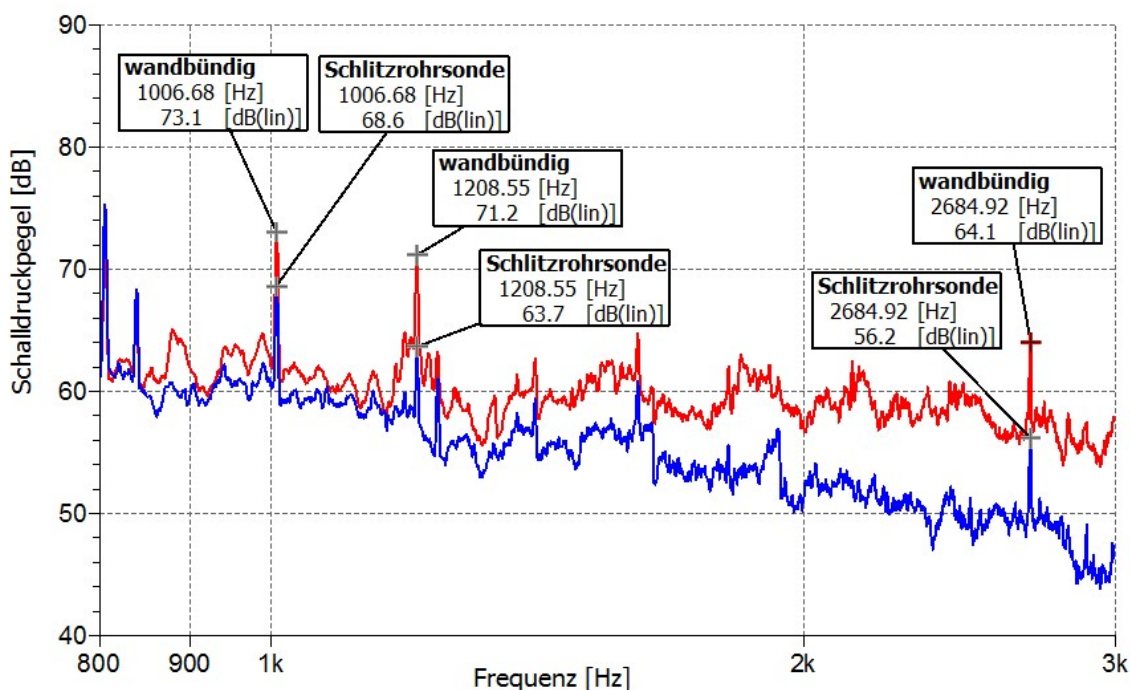


Abbildung 68: Messung der Serration A22W13 als Schmalbandspektrum, Detailansicht tonaler Komponenten, gemittelte wandbündige 1/4-Zoll Mikrofone und Schlitzrohrsonde, Frequenzgangkorrektur der Schlitzrohrsonde ist einberechnet, Daten aus [16] neu dargestellt

Der absinkende Schalldruckpegel der Schlitzrohrsonde könnte auf vermehrte Reduktion hydrodynamischer Druckschwankungen zurückzuführen sein. Es wäre auch möglich, dass die Schlitzrohrsonde es hier nicht schafft die hochfrequenten Informationen akkurat abzubilden, bzw. könnte eine Kombination aus beiden Möglichkeiten vorliegen.

Eine abschließende, exakte Erklärung ist aufgrund eines fehlenden Referenzwertes nicht mit Sicherheit zu geben. Ein Vergleich mit der Untersuchung mittels eines Zylinders in der Strömung (Kapitel 4.5.2) lässt jedoch den Schluss zu, dass eine Kombination aus beiden Faktoren gegeben ist, wobei die Reduktion der hydrodynamischen Druckschwankungen den größeren Anteil haben dürfte. Erkennbar ist dies aus Abbildung 63, da hier die Entfernung (in Bezug auf Schalldruckpegel) zur Messung der wandbündigen Mikrofone ohne Abschirmmaterial, deutlich größer ist, als die Entfernung zur Referenzmessung, welche den Sollzustand dargestellt.

Insgesamt geben die wandbündigen Mikrofone also ein lauterer Messergebnis, als die Schlitzrohrsonde. In welchem Ausmaß dafür die akustischen Eigenschaften Schlitzrohrsonde oder eventuelle hydrodynamische Druckschwankungen an den wandbündigen Mikrofonen verantwortlich sind, müsste durch weitere, gezielte Versuche überprüft werden. Die Erkenntnisse bzgl. Abschirmmaterialien aus dieser Arbeit sollten jedoch angewandt werden, um zu überprüfen, inwiefern ein besseres Ergebnis erzielt werden kann.

5.2 Mögliche Verbesserungen der Messeinrichtung

Um die Messsituation innerhalb des Prüfstands noch weiter zu verbessern, wäre es sinnvoll eine Einbausituation zu entwickeln, die es ermöglicht ein Material vor den wandbündigen Mikrofonen anzubringen. Eine einfache Möglichkeit diese Messmethodik zu testen wäre es, wenn man zunächst ein Material vor die bestehen Mikrofone mit Klebeband möglichst glatt und straff aufklebt. Hier bietet sich wahrscheinlich das Sefar Petex an, da dieses Material gute (hier ermittelte) Reduktionseigenschaft im gesamten Frequenzspektrum gegenüber hydrodynamischen Druckschwankungen besitzt und gleichzeitig dünn und flexibel ist, was den Einbau (insbesondere im Vergleich zum relativ dicken Fellstoff) vereinfachen sollte. Für detaillierte, hochfrequente Messungen, wie zum Beispiel der Identifikation von tonalen Geräuschen/Harmonischen, sollte auf den Fellstoff zurückgegriffen werden, dessen Installation sich jedoch aufgrund der Materialdicke als aufwendig darstellen könnte.

Es wäre durchaus denkbar, dass dadurch ein breitbandiger Einfluss der hydrodynamischen Druckschwankungen teilweise reduziert wird und somit Frequenzbereiche klarer messbar sind, die zuvor maskiert wurden.

Um diese einfache Einbausituation zu verfeinern und mögliche Störgeräusche durch z.B. das Klebeband zu vermindern, wäre eine Vorrichtung, ähnlich der des Prüfstand dieser Ausarbeitung, sinnvoll. Inwiefern dies, insbesondere aufgrund des Einbaus in einem

Plexiglasrohr, umsetzbar ist, oder ob ein anderer Ansatz entwickelt werden muss, müsste im Weiteren untersucht werden.

Ebenfalls denkbar wäre ein Austausch der 1/4-Zoll Mikrofone durch 1/2-Zoll Mikrofone, da diese insbesondere im Mittenbereich des Frequenzspektrums einen geringen Störanteil zu haben scheinen.

6 Zusammenfassung

Die hydrodynamischen Druckschwankungen beeinflussen Messungen in Strömungen mit wandbündigen Mikrofonen maßgeblich. Ein Anstieg des Gesamtschalldruckpegels ist hier von bis zu 25 dB möglich, wobei dieser Anstieg im Verhältnis zu den Strömungsgeräuschen mit steigender Strömungsgeschwindigkeit abnimmt (21 dB bei 47 m/s).

Durch das Vorspannen von verschiedenen Abschirmmaterial kann dieser Einfluss, je nach Material, unterschiedlich stark und in bestimmten Frequenzbereichen verringert werden. Wichtig ist es, die akustischen Eigenschaften der Materialien zu berücksichtigen, indem eine spezifische Frequenzgangkorrektur für jedes Material angewandt wird. Hochfrequent hat besonders der verwendete Fellstoff ein breites Frequenzspektrum gezeigt, in dem dieser die hydrodynamischen Druckschwankungen reduzieren und das akustische Signal akkurat abbilden konnte. Tieffrequent hatte diese Material jedoch Probleme, da es eine Verstärkung statt einer gewünschten Reduktion bewirkt hat. Hier konnte das Material Sefar Petex die größte Reduktion liefern, bei gleichzeitig zweitbesten (der betrachteten Materialien) Reduktion im hochfrequenten Bereich. In der Reduktion des Gesamtschalldruckpegels hat das Sefar Petex ebenfalls die größte Reduktion geliefert.

Für Materialien, die nicht innerhalb dieser Ausarbeitung betrachtet wurde, lässt sich sagen, dass grundsätzlich eine hohe Webdichte von Vorteil ist, um hydrodynamische Druckschwankungen abhalten zu können. Gleichzeitig sollte das Material eine gewisse Steifigkeit besitzen, um nicht in Schwingung zu geraten, was das Messergebnis zusätzlich verfälschen kann.

Mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit nimmt der Einfluss der hydrodynamischen Druckschwankungen von hohen zu tiefen Frequenzen hin ab, wodurch das Reduktionspotenzial durch ein Abschirmmaterial ebenfalls abnimmt. Die Veränderung der Mikrofongröße (hier von 1/4-Zoll nach 1/2-Zoll) bewirkt ebenfalls eine Änderung des Einflusses der hydrodynamischen Druckschwankungen auf die Messung. So konnte durch einen größeren Mikrofondurchmesser im Mittenbereich ein geringerer Schalldruckpegel erreicht werden, wobei tieffrequent eine Anhebung im Schalldruckpegel entstand.

Bei aeroakustischen Messungen mit 47 m/s schafft die Schlitzrohrsonde es nicht, den erzeugten Ton mit dem Schalldruckpegel der Referenzmessung darzustellen, sondern liegt etwa 20 dB unter dieser. Bei verringerter Strömungsgeschwindigkeit (10 m/s) ist die

Darstellung deutlich akkurater. Ob dies, aufgrund der anderen Frequenz des Hiebtons, mit der Richtcharakteristik der Schlitzrohrsonde zusammenhängt, oder mit der Strömungsgeschwindigkeit bleibt abschließend zu klären. Bei breitbandigen, aeroakustischen Geräuschen wirkt sich die Schlitzrohrsonde im Gesamtschalldruckpegel vorteilhaft aus, jedoch liegt die Schlitzrohrsonde im Schalldruckpegel ab 3.000 Hz unterhalb der Referenzmessung, was eine Unterrepräsentation der Referenzmessung bedeutet.

Im Rahmen der Messung an dem Prüfstand nach DIN EN ISO 5136 liegen die wandbündigen Mikrofone im Schalldruckpegel tendenziell oberhalb dem der Schlitzrohrsonde. Insbesondere hochfrequent ist hier ein deutlicher Unterschied erkennbar. Auch tonal ergeben sich Unterschiede, die sich vom breitbandigen Unterschied in dem umgebenden Frequenzbereich unterscheiden. Inwiefern diese Unterschiede auf die akustischen Eigenschaften der Schlitzrohrsonde selbst, auf die bereits erwähnte, teilweise nicht akkurate, Darstellung tonaler Geräusche, oder aber hydrodynamische Druckschwankungen zurückzuführen ist, müsste im Weiteren explizit getestet werden.

Für den Einsatz der wandbündigen Mikrofone, wäre es zukünftig denkbar die Messsituation zu verbessern, indem man z.B. 1/2-Zoll statt 1/4-Zoll Mikrofone verwenden und ein Abschirmmaterial vor den Mikrofonen installiert. Hier würde sich das Sefar Petex empfehlen, da es leicht zu installieren ist und gute Eigenschaften in der Reduktion hydrodynamischer Druckschwankungen gezeigt hat. Der gemessene Schalldruckpegel müsste erkennbar unterhalb der Messung ohne Abschirmmaterial liegen, wobei es denkbar wäre, dass z.B. weitere tonale Geräusche im Frequenzspektrum erkennbar werden, welche zuvor von den hydrodynamischen Druckschwankungen maskiert wurden.

7 Quellenverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 5136 - Bestimmung der von Ventilatoren und anderen Strömungsmaschinen in Kanäle abgestrahlten Schallleistung - Kanalverfahren
- [2] Möser, M. (2012). Technische Akustik.
- [3] Schade, Kunz (1989). Strömungslehre, 2. Auflage Seite 363
- [4] Neise, W. Messungen in Strömungen
- [5] https://www.thomann.de/de/neumann_wss_100_schwarz.htm
- [6] Prof. F. Kameier (2014). Konstruktionsrichtlinie sowie Hinweise zum Betrieb, zur Wartung und Fertigung von Schlitzrohrsonden (Turbulenzschirm gemäß ISO 5136)
- [7] Schade, Kunz (1989). Strömungslehre, 2. Auflage Seite 403
- [8] Schade, Kunz (1989). Strömungslehre, 2. Auflage Seite 339
- [9] Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier, Gi-Don Na – Hochschule Düsseldorf Vorlesung Grundlagen Strömungstechnik
- [10] Schade, Kunz (1989). Strömungslehre, 2. Auflage Seite 340
- [11] Müller G., Möser M (2017). Akustische Messtechnik Seite 3
- [12] <https://de.wikipedia.org/wiki/Kondensatormikrofon>
- [13] Schade, Kunz (1989). Strömungslehre, 2. Auflage Seite 521
- [14] Stüber, B. Untersuchung aerodynamisch erzeugter Schallfelder mit Hilfe der Modellmethode, Dissertation, TU München 1968
- [15] <https://www.uni-due.de/ibpm/BauPhy/Schall/Buch/22.00-22.10.htm>
- [16] Rother, M. (2018). Bau von zwei Rohrelementen mit wandbündigem Mikrofonarray für einen Prüfstand nach DIN 5136

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Matthias Rother, an Eides statt, die vorliegende Master-Thesis selbstständig verfasst und keine weiteren als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt zu haben.

Dies ist die von der Hochschule Düsseldorf zu bewertende Version.

Ort, Datum _____ Unterschrift _____