



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Ostfalia
Hochschule für angewandte
Wissenschaften



Bachelorarbeit

Sommersemester 2013

von

Fabian Hartung

(Mat. Nr. 20860026)

Thema:

**Detektion und Analyse von
multiplen Störschallquellen am Teststand ROTEST**

1. Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Claus W. Turtur

2. Betreuer: Dipl.-Ing. Michael Przybilla

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Claus W. Turtur für die freundliche Vermittlung zum Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt in Braunschweig und für die Betreuung meiner Bachelorarbeit bedanken. Außerdem möchte ich mich bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Michael Przybilla bedanken, der mir überhaupt diese Arbeit beim DLR ermöglicht hat. Ohne ihn hätte ich die durchweg interessante Arbeitsumgebung, direkt am Forschungsgeschehen des Rotorversuchsstandes, nicht kennenlernen können und auch nicht mitwirken dürfen, für Fragen stand er mir stets zur Seite und gab mir wertvolle Denkanstöße zur Realisierung des Projekts. Abschließend möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie bedanken, die mich während meines Studiums jederzeit voll unterstützt hat und bei meinem Freundeskreis, der mir verhalf auch mal auf andere Gedanken zu kommen.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das akustische Verhalten am Rotorversuchsstand ROTEST beim DLR in Braunschweig untersucht. Nach Erhöhung der Antriebsleistung am Teststand musste der eingesetzte Zahnriemen stärker gespannt werden. Bei den ersten Versuchstests mit der neuen Konfiguration wurden laute Störgeräusche aus dem Bereich des Antriebssystems festgestellt, die vor allem die nachfolgenden Messungen der Rotorakustik beeinflussen. Zur messtechnischen Erfassung der Störgeräusche dienten fünf Kondensatormikrofone, die im Bereich des Antriebssystems anzuordnen waren. Da die Mikrofonkapseln nicht den erforderlichen Ausgangspegel für das verwendete Messsystem lieferten, war hier zuvor eine Verstärkerschaltung zu entwickeln. Aufgrund der synchronen Aufnahme der Mikrofonsignale war es möglich, anhand der aufgezeichneten Signallaufzeiten, eine Störquellenortung zu realisieren. Die hier entwickelten und untersuchten Verfahren zur Störquellenortung wurden mit Hilfe der Entwicklungssoftware LabVIEW in Form einer Analysesoftware realisiert. Neben der Störquellenortung ist es mit der Analysesoftware möglich, die Messhardware zu konfigurieren, und die Mikrofonmessdaten für Nachuntersuchungen abzusichern.

Anhand der aufgezeichneten Frequenzspektren konnten bereits ein Großteil der Störschallquellen zugeordnet werden. Einen erweiterten Einblick in das Geräuschbild lieferte das hier entwickelte „Delay and sum“ – Ortungsverfahren. Vergleichbar mit einem Wärmebild kann hiermit aufgezeichnet werden, in welchem Bereich sich die Störschallquellen befinden.

Neben der Störquellenortung wurde auch das akustische Dämpfungsverhalten der Störschallquellen untersucht. Als passive Maßnahme, diente hierzu eine schallabsorbierende Rumpfverkleidung, mit dem der Antriebsbereich des Versuchsmodells umschlossen werden kann. Mit sechs weiteren Mikrofonen, die außerhalb des Versuchsmodells platziert wurden, war ein Vergleich mit und ohne Rumpfverkleidung möglich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielstellung.....	1
1.2	Gliederung.....	2
2	Untersuchung des Rotorversuchsstandes	3
2.1	Schallentstehung am Zahnriemen.....	3
2.1.1	Abschätzung der Schallemission.....	5
2.1.2	Abstrahlverhalten am Zahnriemen.....	6
2.2	Weitere Störschallquellen.....	7
3	Hardwareseitiger Aufbau	8
3.1	Kondensatormikrofone.....	8
3.2	Verstärkerstufe.....	11
3.3	Anschlussgehäuse.....	15
3.4	Weitere Messmikrofone.....	15
3.5	Messsystem.....	17
4	Realisierung der Störquellenortung	19
4.1	Entwicklungsumgebung LabVIEW.....	19
4.2	Technische Voraussetzungen und Randbedingungen.....	20
4.3	Übersicht der Entwicklungsphasen.....	20
4.4	Störquellenortung anhand von Laufzeitmessungen.....	21
4.4.1	Phasenmessung.....	22
4.4.2	Kreuzkorrelation.....	25
4.4.3	Kombination der Messverfahren.....	27
4.4.4	Berechnung der Laufzeitdifferenzen.....	27
4.4.5	Suchfunktion in der xy -Ebene.....	28
4.4.6	Suchfunktion in der z -Ebene.....	29
4.4.7	Suchfunktion zur Störquellenortung im Raum.....	30
4.5	Störquellenortung mittels Delay-and-sum Verfahren.....	31
4.5.1	Räumliches Abtasttheorem.....	32
4.5.2	Korrektur der Signallaufzeiten.....	34
4.6	Bewertung der Störquellenortung.....	38

5	Aufbau der Analysesoftware.....	41
5.1	Installation.....	41
5.2	Programmstart	43
5.3	Programmteil – Messung.....	43
5.3.1	Registerkarte - Messsystem	43
5.3.2	Registerkarte - Messung	45
5.3.3	Registerkarte - Geräuschortung	48
5.4	Programmteil – Auslesen & Analyse.....	52
5.5	Aufbau der Programmstruktur.....	52
5.5.1	Hauptmenü.....	54
5.5.2	NoiseFinder - Messung.....	55
5.5.3	NoiseFinder - Analyse.....	57
6	Versuchsmessung.....	58
6.1	Platzierung der Mikrofone.....	58
6.2	Aufnahme der Messdaten.....	61
7	Analyse der Messdaten	63
7.1	Untersuchung der Frequenzspektren.....	63
7.2	Störquellenortung am Zahnriemen.....	68
7.3	Dämpfungsverhalten der Rumpfverkleidung.....	73
7.3.1	Störpegelentwicklung.....	73
7.3.2	Störpegeldämpfung.....	75
8	Erweiterungsmöglichkeiten und Aussichten	78
8.1	Störquellenortung	78
8.2	Dämpfung der Störschallquellen.....	79
	Literaturverzeichnis.....	81
	Abbildungsverzeichnis	83
	Tabellenverzeichnis	85
	Anhang A	86
A1.1:	Messung – Frequenzspektren	86
A1.2:	Geräuschbilder mit gefilterten Frequenzspektren.....	89
A1.3:	Versuchsmessung - Messwerttabellen.....	93
	Anhang B: CD.....	97

1 Einleitung

Komplexe mechanische Antriebssysteme, die zumeist noch mit hohen Leistungen betrieben werden, setzen ein Teil der zugeführten Energie in Schalleistung um. In der Automobilindustrie, beim Schienenverkehr oder in der Luftfahrt ist das akustische Verhalten technischer Systeme von zentraler Bedeutung. Zumeist geht es darum bestimmte Grenzwerte in Sachen Schallschutz einzuhalten, speziell in der Autoindustrie wird aber auch versucht einen speziellen Sound zu entwerfen. Eins haben diese Beispiele aber gemeinsam, es wird versucht bestimmte Störgeräusche zu lokalisieren und zu unterdrücken. Dazu ist es aber notwendig die Ursachen der Schallentstehung zu analysieren. Im Normalfall ist die Störschallquelle nicht auf einen zentralen Punkt zurückzuführen, sondern verteilt sich zumeist, mit verschiedenen Schwingfrequenzen, auf das ganze System. Das menschliche Ohr reicht in der Regel nicht aus diese voneinander zu trennen. Zur Analyse ist es daher erforderlich mit technischen Mitteln die Schallquellen genau zu lokalisieren und anschließend getrennt zu betrachten. Damit wird es möglich die Ursachen der Schallentstehung zu analysieren und ferner sogar durch spezielle Gegenmaßnahmen zu dämpfen.

1.1 Zielstellung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem speziellen System am Rotorversuchsstand ROTEST des Deutschen Luft und Raumfahrtzentrums in Braunschweig. Aufgrund einer Erhöhung der Antriebsleistung am Rotorversuchsmodell mussten neue Zahnriemen eingesetzt werden, die zur Übertragung der höheren Leistung zudem stärker gespannt werden mussten. Bei den ersten Versuchstests wurden bei 1000rpm Rotordrehzahl laute Störgeräusche festgestellt, die vor allem die folgenden Messungen der Rotorakustik beeinflussen. Daher ist es nun erforderlich das akustische Geräusch erstmals messtechnisch genau zu erfassen und das Frequenzspektrum aufzunehmen. Weitere Maßnahmen sehen es vor, die Störquellen genauer zu lokalisieren und anschließend mögliche Dämpfungsmaßnahmen zu untersuchen. Zur Störquellenortung stehen insgesamt fünf Kondensatormikrofone zur Verfügung, die verteilt um die Geräuschquelle am Zahnriemen angeordnet werden sollen. Für die Kondensatormikrofone sind Verstärkerschaltungen zu entwickeln und aufzubauen, damit die Signale in optimaler Auflösung aufgenommen werden können. Ein Messsystem von National Instruments dient zur Aufnahme und zur Analyse der Mikrofon-signale. Dazu soll eine Analysesoftware entwickelt werden, die das ganze Verfahren automatisiert und für den Anwender die Ergebnisse visualisiert.

Nach Abschluss der Störquellenortung sollen anschließend mögliche Gegenmaßnahmen zur Dämpfung dieser multiplen Störschallquellen untersucht werden. Als passive Maßnahme dient hierzu vorerst eine Rumpfvorverkleidung mit dem der mechanische Antrieb

des Versuchsmodells umgeben ist und die Schallemission somit gedämpft werden kann. Zur Aufnahme des Dämpfungsverhaltens der Rumpfverkleidung dienen weitere Messmikrofone, die außerhalb des Versuchsmodells aufgestellt werden.

1.2 Gliederung

Zu Beginn wird das zu untersuchende Versuchsmodell näher betrachtet, mit besonderem Augenmerk auf das mechanische Antriebssystem. Dies soll den ersten Ansatz dafür liefern wie die Messmikrofone anzuordnen und die Verstärkerschaltungen auszulegen sind. Anschließend wird auf die Realisierung der Geräuschortung näher eingegangen. Hierzu wurden mehrere Verfahren entwickelt und untersucht, die ihre Vor- und Nachteile aufweisen. Die aus diesen Verfahren entstandene Analysesoftware wird anschließend beschrieben. Diese Analysesoftware kommt auch bei dem ersten Versuchstest am Rotorversuchsstand zum Einsatz. Nach Abschluss der Versuchsmessung werden die Ergebnisse analysiert und Nachuntersuchungen zum Dämpfungsverhalten angestellt.

2 Untersuchung des Rotorversuchsstandes

Für die Störquellenortung ist es vorerst wichtig abzuschätzen, wo mögliche Störquellen ihren Ursprung haben, damit die Mikrofone für ein optimales Messergebnis platziert werden können. Ein hoher Anteil der Geräuschemission ist auf den Zahnriemen zurückzuführen, der dazu dient die mechanische Kraft des 190kW Hydraulikmotors auf den Rotor zu übertragen. Die Störquellenortung soll dazu auch in dieser Ebene durchgeführt werden. In Abbildung 2.1 ist das Versuchsmodell ROTEST des Rotorversuchsstandes, zusammen mit einem Teil der Rumpfverkleidung, dargestellt. Um eine Aussage über die Entstehung der Wellenfronten und vor allem auch deren Eigenschaften treffen zu können, müssen zuvor die möglichen Störquellenemissionen abgeschätzt werden.



Abbildung 2.1: Rotorversuchsstand - ROTEST

2.1 Schallentstehung am Zahnriemen

Die entstehende Schwingung, ist maßgeblich von der Zahneingriffsfrequenz abhängig. Die Zahneingriffsfrequenz ist wiederum abhängig von der Anzahl der Zähne, sowie von der Drehzahl der Scheibe. Eine vergrößerte Aufnahme des Zahneingriffs beim Versuchsmodell ist in Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3 dargestellt. Die Schallentstehung ist zum großen Teil auf die Luftverdrängung zwischen Riemen- und Scheibenrücken zurückzuführen. Beim Zahneintritt wird das darin eingeschlossene Luftvolumen verdrängt. Dabei sind die Riemenzähne, wie auch die Zahnradzähne an der Luftverdrängung beteiligt. Wird nun der Riemen in Bewegung versetzt, folgt ein pulsierender Vorgang.

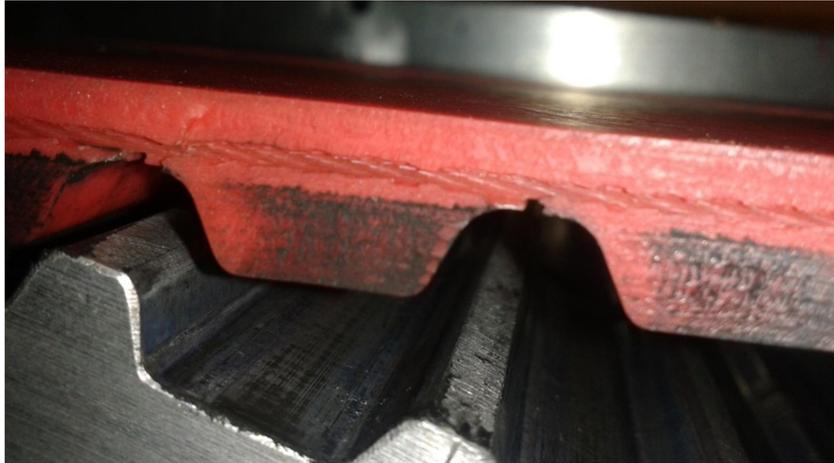


Abbildung 2.2: Zahneingriff - Zahnriemen

Die Anzahl der Zähne beträgt 24 für das kleinere Zahnrad mit einem Durchmesser von 150 mm und 48 für das Zahnrad mit dem Durchmesser 300 mm. Das kleinere Zahnrad ist dabei direkt mit dem Hydraulikmotor gekoppelt und überträgt die mechanische Kraft auf das hintere Zahnrad, worauf der Hauptrotor in Drehung versetzt wird. Aufgrund der Größenverhältnisse besteht ein 1:2 Übersetzungsverhältnis, was bedeutet, dass das hintere Zahnrad die halbe Umlaufgeschwindigkeit der vorderen aufweist.

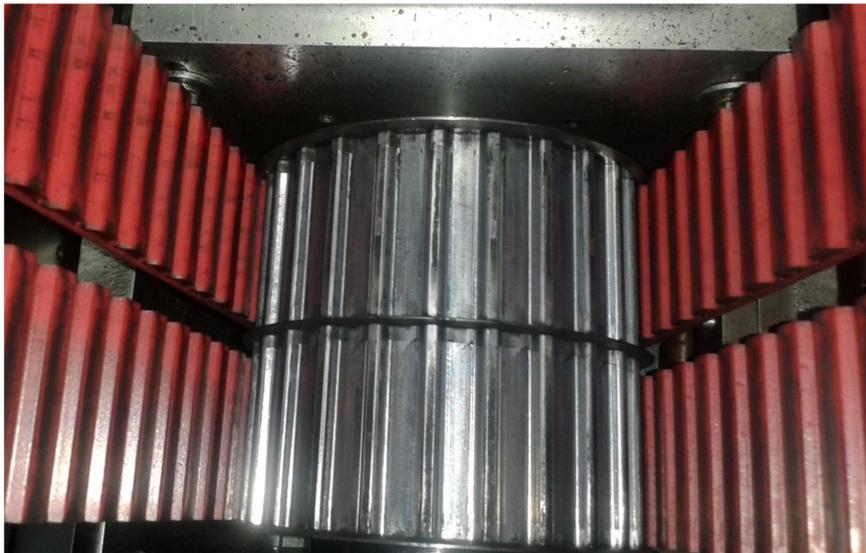


Abbildung 2.3: Vorderes Zahnrad - Antriebsseite

Aus der Anzahl der Zähne und der Drehzahl kann eine Aussage zu den zu erwartenden akustischen Frequenzen für die beide Zahnräder getroffen werden. Das folgende Berechnungsbeispiel zeigt eine Abschätzung der hier vorliegenden Zahneingriffsfrequenzen bei einer Rotordrehzahl von 1000rpm.

$$f_{N1} = z_N \cdot f_U = 48 \cdot \frac{1000}{60} \text{ Hz} = 48 \cdot 16,6\bar{6} \text{ Hz} = 800,0 \text{ Hz} \quad (2.1)$$

$$f_{N2} = z_N \cdot f_U = 24 \cdot \frac{2000}{60} \text{ Hz} = 24 \cdot 33,3\bar{3} \text{ Hz} = 800,0 \text{ Hz} \quad (2.2)$$

Ein Vergleich der beiden Ergebnisse aus Gleichung (2.1) und (2.2) zeigt anschaulich, dass die beiden Eingriffsfrequenzen identisch sind, obwohl jeweils ein anderer Zahnraddurchmesser zum Einsatz kommt. Die Antriebsseite weißt zwar die halbe Umlaufgeschwindigkeit auf, aber dadurch, dass sich die Zähnezahl aufgrund des Durchmessers verdoppelt, bleibt die Eingriffsfrequenz konstant.

Nach [1] – „*Handbuch Zahnriementchnik*“ S. 74 werden noch weitere Ursachen der Geräuschestehung beschrieben. Hier genannt wird der Polygoneffekt, der die Einlaufstöße der Riemenzähne in die Verzahnung beschreibt. Dieser Effekt steht in Verbindung mit Transversalschwingungen, die dazu führen können, dass der Trum dazu anregen wird in der Zahneinlauffrequenz zu schwingen. Als Trum wird dabei der freistehende Teil des Zahnriemens bezeichnet, der nicht auf dem Umschlingbogen aufliegt. Das Auf- und Abspringen dieser freien Riementrume wird nach [1] S.67 auch Trumschwingung genannt. Dabei bewirken Transversalschwingungen Auslenkungen des Riementrums in einer Ebene senkrecht zur Riemenoberfläche, die zu longitudinalen Spannungsschwankungen im Zugstrang führen. Der Polygoneffekt ist maßgeblich von der Zähnezahl abhängig. Je kleiner die Anzahl ist, desto stärker wirkt sich dieser Effekt aus.

Mit dem Auftreten der Trumschwingungen können sich kritische Resonanzen ausbilden, die in der Zahneingriffsfrequenz schwingen. Es können dabei Schallleistungspegelerhöhungen von 5dB auftreten ([1] S.75).

Abschließend zu erwähnen sind noch die Reibungen beim Einzahn der Riemenzähne und die Riemenbewegungen auf dem Umschlingbogen, die zusätzlich an der Geräuschentwicklung beteiligt sind.

Durch das Erhöhen der Riemenspannung am Rotorversuchsstand steigt die Kraftübertragung der einzelnen Riemenelemente an. Damit nehmen die Dauerbelastungen am Zahnriemen zu und es kommt aufgrund der höheren Reibungsverluste zu stärkeren Verschleißeffekten. Es ist demnach davon auszugehen, dass auch der Polygoneffekt stärker ausgeprägt ist, und damit auch die akustischen Störleistungspegel ansteigen.

2.1.1 Abschätzung der Schallemission

Zur Abschätzung der zu erwarteten Schallemission des Zahnriemens gibt [1] auf S.76 eine Berechnungsformel an. Hierbei werden geometrische Parameter wie Achsabstand, Übersetzungsverhalten oder der Zahnriemendurchmesser nicht weiter berücksichtigt, da diese näherungsweise keinen großen Einfluss haben. Die Formel berücksichtigt hingegen die Haupteinflussgrößen wie die Antriebsleistung p und die Drehzahl n . Die Drehzahl n bezieht sich dabei auf die Drehzahl der kleineren Scheibe n_1 .

Die Formel liefert den mit A -bewertetem Schalleistungspegel.

$$L_{WA} = 60 + 0,0018 \cdot \frac{n_1}{n_0} + \left(21,52 + 0,0014 \cdot \frac{n_1}{n_0} \right) \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right) + \Delta L \quad (2.3)$$

Die Konstante ΔL aus Gleichung (2.3) beschreibt den Auf- oder Abschlagsleistungspegel, der vom Zahnradtyp abhängigen ist und aus der Tabelle aus [1] S.7 zu bestimmen ist. Es wird von einem Hochleistungsprofil-Zahnriemen mit der Bezeichnung „AT 20“ und mit einem Zahnabstand von 2cm ausgegangen. Für das ΔL ist hier -8dB(A) zu wählen. Die Drehzahl der kleineren Scheibe wird auf 2000rpm gesetzt, was einer Rotordrehzahl von 1000rpm entspricht. Diese Drehzahl wird auch oft bei Versuchstest angefahren. Die Antriebsleistung beträgt dabei etwa 100kW.

$$\begin{aligned} L_{WA} &= 60 + 0,0018 \cdot \frac{2000 \text{ min}^{-1}}{1 \text{ min}^{-1}} + \left(21,52 + 0,0014 \cdot \frac{2000 \text{ min}^{-1}}{1 \text{ min}^{-1}} \right) \cdot \log \left(\frac{100 \text{ kW}}{1 \text{ kW}} \right) - 8\text{dB(A)} \\ &= 104,2 \text{ dB(A)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Auch wenn das Ergebnis aus Gleichung (2.4) nur als Prognose zu verstehen ist, bestärkt es die Annahme, dass hier ein Großteil der Schalleistung entsteht. Da die Leistung hier auf zwei Riemen verteilt wird ist allerdings davon auszugehen das, das Ergebnis noch etwas niedriger ausfällt. Wiederrum ist auch nicht außer Acht zu lassen, dass es sich hierbei um einen nach der menschlichen Hörkurve bewerteten Leistungspegel handelt und der echte Leistungspegel meist noch etwas höher ausfällt.

2.1.2 Abstrahlverhalten am Zahnriemen

Für die Realisierung der Störquellenortung sind die Ausbreitungseigenschaften der Schallwellen von Bedeutung. Anhand bisheriger Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass ein Großteil des Schalls beim Zahneingriff entsteht. Nach der Definition aus [2] - „Die Audio-Enzykloädie“ S.27 ist davon auszugehen, dass die Schallwellen kugelförmig abgestrahlt werden. Ist die Schallquelle im Verhältnis zu der Wellenlänge sehr klein, so ist das Abstrahlverhalten, aufgrund von Beugungseffekten, kugelförmig. Die Zahneingriffsfrequenz wurde im Abschnitt 2.1 bereits für die Drehzahl von 1000rpm exemplarisch berechnet. Die Wellenlänge berechnet sich anhand der Schallgeschwindigkeit nach Gleichung (2.5).

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{343 \text{ m/s}}{800 \text{ Hz}} = 0,43 \text{ m} \quad (2.5)$$

Die daraus resultierende Wellenlänge beträgt 0,43m. Eine Abschätzung der Größe der Schallquelle ist allerdings nur schwer möglich, da diese sich beim Zahneintritt laufend verändert. Bei einem Zahnabstand von 2cm wird allerdings schon ersichtlich, dass die

Definitionsbeschreibung hier gegeben ist. Beim Zahneintritt wird diese Zahnücke bis hin zu einem sehr schmalen Spalten zwischen Riemen- und Scheibenrücken noch weiter verkleinert. Entlang der Zahnradkante müssten demzufolge besonders starke Beugungseffekte auftreten.

2.2 Weitere Störschallquellen

Es sind allerdings noch weitere Störschallquellen zu nennen. Der Hydraulikmotor und die Hydraulikpumpen sind natürlich an der Geräusentwicklung beteiligt und müssen anhand der Frequenzspektren näher analysiert werden. Auch wenn die akustischen Messungen hier ohne Rotorblätter ausgeführt werden, kann die Blatthalterung, aufgrund von Luftverwirbelungen, an der Geräusentwicklung beteiligt sein. Weitere Störanteile sind anhand einer Messung bei Stillstand zu identifizieren. Dabei können Lüftungsgeräusche der Messgeräte, Netzteile und die Hydraulikpumpen als mögliche Störquellenanteile näher betrachtet werden.

Einige der hier genannten Störschallquellen können, wie am Beispiel des Zahneingriffs am Zahnriemen, anhand ihrer Frequenz identifiziert werden. Für den Hydraulikmotor und der Hydraulikpumpen ist eine Abschätzung der Schwingfrequenzen möglich. Die Berechnung hierfür erfolgt anhand der Anzahl der Kolben n_K und der Drehfrequenz f_U nach Gleichung (2.6).

$$f_S = n_K \cdot f_U \quad (2.6)$$

Für die Hydraulikpumpen, wie auch für den Hydraulikmotor, sind 9 Kolben eingesetzt. Da die Drehzahl der Hydraulikpumpen mit 1485rpm konstant ist, kann die Schwingfrequenz nach Gleichung (2.7) vorab berechnet werden.

$$f_H = n_K \cdot f_U = 9 \cdot \frac{1485}{60} \text{ Hz} = 222,75 \text{ Hz} \quad (2.7)$$

Die Frequenz des Hydraulikmotors ist hingegen von der eingestellten Drehzahl des Hauptrotors abhängig.

3 Hardwareseitiger Aufbau

Da die einzusetzenden Mikrofonkapseln nicht den erforderlichen Ausgangspegel für das Messsystem liefern, muss eine Verstärkerschaltung entwickelt werden. Für den Schaltungsaufbau sind einige Vorgaben zu beachten. Zur Spannungsversorgung steht am Versuchsstand ein 28V Netzteil zur Verfügung, worauf die Schaltung letztendlich abgestimmt werden muss. Es sind insgesamt fünf identische Mikrofonenschaltungen aufzubauen, mit jeweils drei Anschlüssen. Einem Anschluss für die Versorgungsspannung, einen für das Mikrofonausgangssignal und einen für die Bezugsmasse. Zum Schaltungsentwurf muss allerdings zuvor das hier verwendete Mikrofon näher betrachtet werden.

3.1 Kondensatormikrofone

Nun ein kurzer Einblick zum technischen Aufbau eines üblichen Kondensatormikrofons. Das Kernstück besteht nach [3] – „*Technische Akustik*“ S.358 aus einer hauchdünnen, sehr leichten Membran als Elektrode und einer massiven, schweren Gegenelektrode. Dazu besitzt das Kondensatormikrofon einen sehr hochohmigen Ausgang. In Abbildung 3.1 ist das Prinzipschaltbild eines Kondensatormikrofons abgebildet.

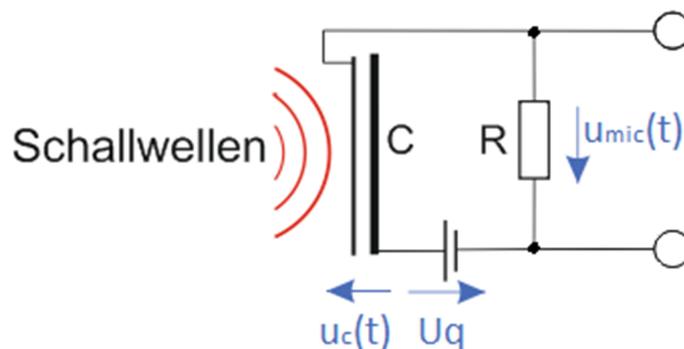


Abbildung 3.1: Prinzipschaltbild eines Kondensatormikrofons

Die Vorspannung U_q lädt den Kondensator auf das Potential der Spannungseinspeisung auf. Beim Bewegen der Membran ändern sich der Abstand der Kondensatorplatten und somit auch die Kapazität des Kondensators. Von der Kapazität ist letztendlich aber auch die Spannung u_c und somit auch die Ausgangsspannung u_{mic} abhängig. Die Ausgangsspannung befindet sich, abhängig von den Bewegungen der Membran, nur im Millivoltbereich. Die Gleichung (3.1) zeigt anschaulich woraus sich die Ausgangsspannung zusammensetzt.

$$u_{mic}(t) = U_q - u_c(t) \tag{3.1}$$

Daher ist eine Mikrofonvorverstärkerschaltung unabdingbar, damit die schwachen Ausgangsspannungen auf geeignete Werte für das Messsystem angehoben werden.

Für den Messaufbau sind insgesamt fünf Kondensatormikrofone vom Typ RTI Technologies Model 1207A vorgesehen. Das Datenblatt ist unter [4] – „RTI Tech - MODEL 1207“ abrufbar und ein Auszug mit den Informationen zu Anschluss und zu den Abmessungen ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

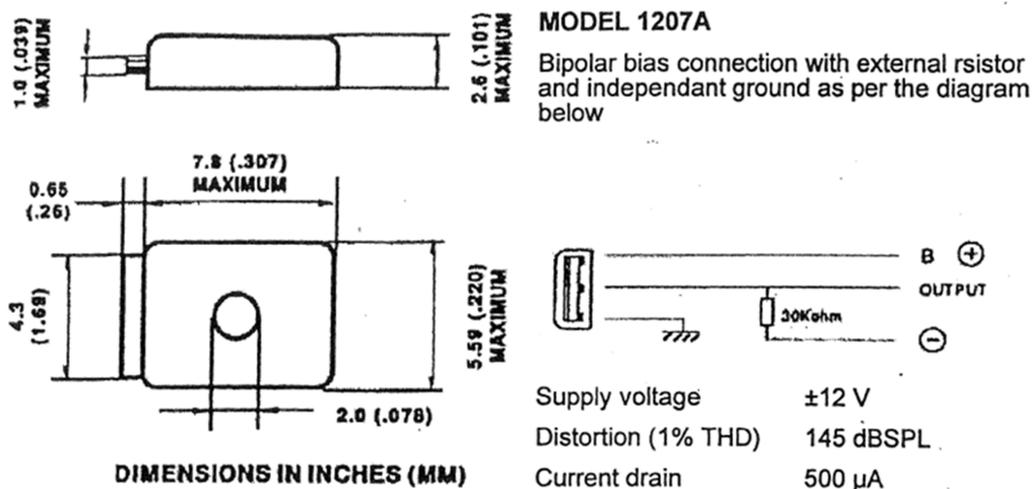


Abbildung 3.2: Auszug des Datenblatts [4] - Abmessungen/Anschluss

Im Datenblatt ist zusätzlich der Frequenzgang enthalten, an dem eine erste Einschätzung der Ausgangsspannung möglich ist. Die Kennlinie zeigt in einem Frequenzbereich von 50Hz bis 10kHz einen konstanten Verlauf, bei einer Empfindlichkeit von -40dB (re 1 V/Pa), der geradezu deckungsgleich mit dem Bemaßungsgitter ist. Eine Umrechnung ergibt einen Übertragungsfaktor von 10mV/Pa. Wird nun eine Schallquelle mit einem Schalldruck von 20 Pascal (120 dB (SPL)) angenommen, würde daraus am Mikrofon eine Ausgangsspannung von 200mV folgen.

Der hier abgebildete Frequenzgang wurde für eine andere Ausführungsform des Mikrofons aufgenommen; daher sind die genannten Werte nur zur Abschätzung geeignet.

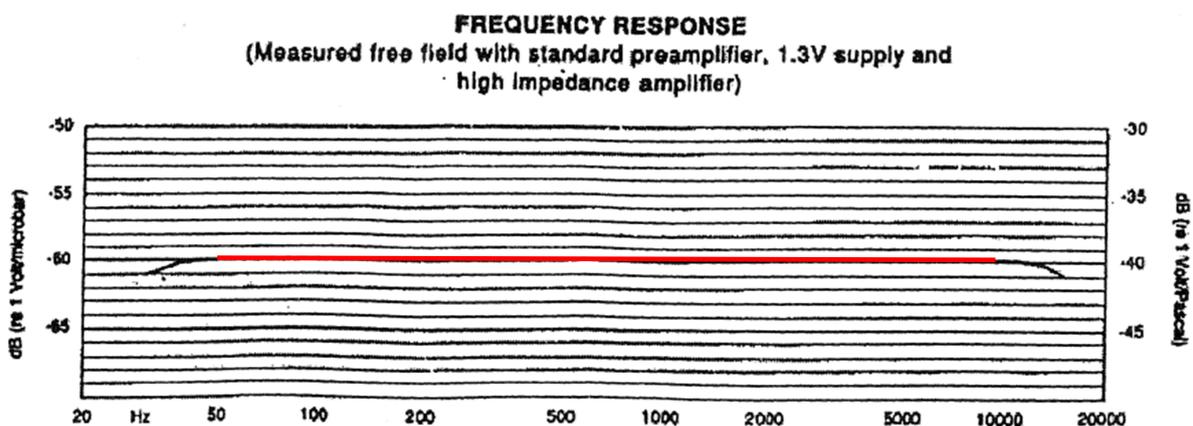


Abbildung 3.3: Auszug des Datenblatts [4] - Frequenzgang

Zur genaueren Bestimmung des erforderlichen Verstärkungsfaktors dient der einfache Schaltungsaufbau aus Abbildung 3.2. Als Schallquelle kommt ein einfacher Lautsprecher mit einem Sinusgenerator zum Einsatz. Das Ausgangssignal des Mikrofons wurde dabei am Oszilloskop beobachtet und die maximale Spannungsamplitude notiert. Der experimentelle Aufbau wies einen Maximalpegel von etwa $\pm 320\text{mV}$ auf.

Zum Schaltungsentwurf muss nun die am Versuchsstand vorliegende Spannung von $+28\text{V}$ auf die $\pm 12\text{V}$ Versorgungsspannung des Kondensatormikrofons angepasst werden. Hierzu dient der Schaltungsaufbau aus Abbildung 3.4.

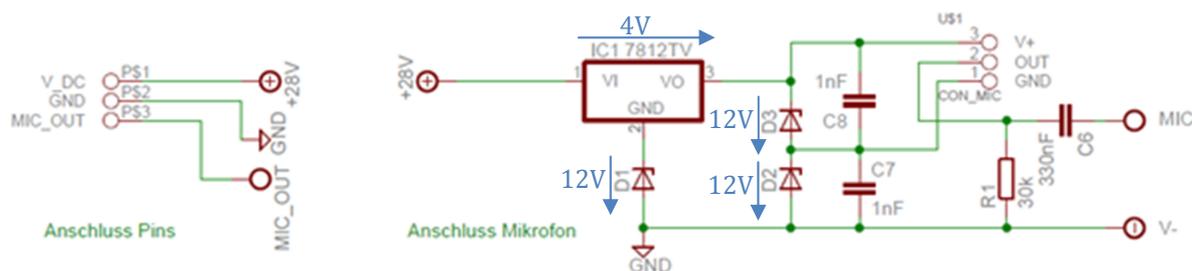


Abbildung 3.4: Schaltungsplan - Mikrofonanschluss

Zu sehen sind links die drei Anschlusspins für die externe Versorgungsspannung, Bezugsmasse und Mikrofonanschluss. Die 28V Versorgungsspannung geht auf einen Spannungsregler vom Typ LM7812, der die angelegte Spannung auf 12V runterregelt. Allerdings wird der Bezugspunkt des Reglers über die Z-Diode D_1 auf $+12\text{V}$ angehoben. Somit ergibt sich zwischen dem Pin 3 und der Bezugsmasse (GND) einen Spannungsteiler von jeweils $+12\text{V}$. Die dazu parallel geschalteten Z-Dioden D_2 und D_3 und die Kondensatoren C_7 und C_8 dienen ausschließlich zur Spannungsstabilisierung bzw. zur Glättung. Der mittlere Punkt zwischen den beiden Z-Dioden stellt nun den Bezugspunkt für die positive und negative Versorgungsspannung des Kondensatormikrofons dar. Der Widerstandsgröße für R_1 mit $30\text{k}\Omega$ wurde dem Datenblatt entnommen. Das Ausgangssignal wurde mit dem Kondensator C_6 gleichstrommäßig Entkoppelt, da das Bezugspotential des Mikrofons, durch den Mittelabgriff, nicht mehr der Bezugsmasse entspricht. Somit wird die nachgeschaltete Verstärkerstufe, die im nächsten Abschnitt erläutert wird, nicht mit einem Spannungsoffset beaufschlagt.

Die Problematik bei dieser Art von Schaltungsaufbau ist, dass die Diode D_1 , je nach Höhe der anliegenden Last, überlastet werden kann. Daher ist dieser Schaltungsaufbau nur für relativ kleine Belastungen geeignet und kann bei zu großen Strömen zum Durchbruch der Diode führen. Zur Gewährleistung eines sicheren Betriebes muss daher zuerst die angeschlossene Last, in diesem Fall das Kondensatormikrofon, überprüft werden. Eine Testmessung zeigte hierbei eine maximale Stromaufnahme von 15mA beim Anlegen der 28V Versorgungsspannung. Der Ausgang des Mikrofons ist sehr hochohmig, daher blieb dieser Wert auch bei akustischen Schwankungen nahezu konstant. Die eingesetzte Z-

Diode kann bis zu einem Durchlassstrom von 30mA sicher betrieben werden und ist daher für diesen Einsatz durchaus geeignet, solange keine weitere Last anliegt.

Eine Alternative hierzu hätte ein DC-DC Wandler dargestellt, der direkt aus der Eingangsspannung die erforderlichen $\pm 12V$ zur Verfügung stellt. Dieser Weg wäre auch in Bezug auf den Wirkungsgrad deutlich besser, da hier nicht wie beim normalen Spannungsregler der Spannungsüberschuss direkt in Wärme umgesetzt wird. Der große Nachteil hierbei liegt aber bei der Schaltfrequenz auf dem der Wandler arbeitet, um die Spannungsumwandlung umzusetzen. Diese verursacht zum einem Störungen auf der Versorgungsspannung, zum anderen könnte, bei unzureichender Kapselung, auch Störstrahlung induziert werden. Wie bereits erwähnt befindet sich das Ausgangssignal der Mikrofone im Millivoltbereich und ist somit sehr empfindlich gegenüber Störstrahlung dieser Art. Daher ist der Einsatz dieses Wandlertyps, ohne den Einsatz von größere Filtermaßnahmen und Kapselungen, ungeeignet.

3.2 Verstärkerstufe

Um möglichst viele Quantisierungsstufen des Messsystems zu nutzen, ist es nun erforderlich die kleinen Ausgangsspannungen des Kondensatormikrofons zu verstärken, um somit letztendlich die Auflösung zu erhöhen. Zur Verstärkung dient der Operationsverstärker mit der Bezeichnung OPA726, der als SMD Bauform vorliegt. Dieser wird nach dem Datenblatt [5] – „*Datasheet - OPA726AID*“ mit der Eigenschaft als „Very Low Noise“ Operationsverstärker bezeichnet und ist daher für den Verwendungszweck zur Verstärkung kleiner Spannungen besonders gut geeignet.

In Abbildung 3.5 ist die Verschaltung des SMD-Bauteils abgebildet. Zum Anschluss des Bauteils auf einer normalen Lochrasterplatine wurde ein SMD-Adapter verwendet (Abbildung 3.5 rechts).

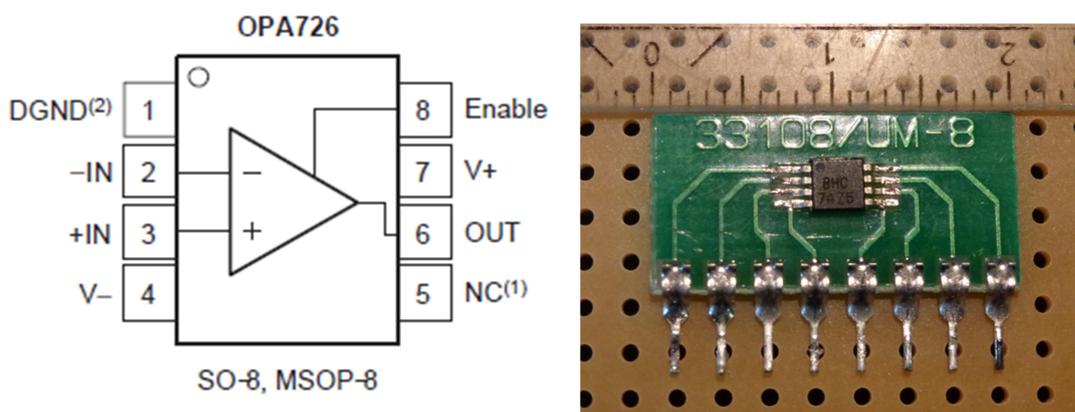


Abbildung 3.5: Pin-Konfiguration OPA726 aus [5]/ SMD-Bauteil und Adapter

Die Anschlüsse an Pin 1 und 8 werden nicht weiter betrachtet. Hiermit kann der Operationsverstärker bei Bedarf abgeschaltet werden. Der Operationsverstärker ist aber aufgrund der internen Verschaltung auch ohne Anschluss dieser Pins aktiv. An Pin 2 und 3 sind die Anschlüsse für den invertierenden und nichtinvertierenden Eingang wiederzufinden und über Pin 6 kann das Ausgangssignal abgegriffen werden. Zum Anschluss der Versorgungsspannung dienen die Anschlüsse 4 und 7. Laut Datenblatt sind für eine symmetrische Versorgung Spannungen von $\pm 2\text{ V}$ bis $\pm 6\text{ V}$ und für eine unsymmetrische Versorgung $+4\text{ V}$ bis $+12\text{ V}$ vorgesehen.

Beim Schaltungsentwurf der Verstärkerstufe war nun das Problem zur Erzeugung der positiven und negativen Versorgungsspannung zu vermeiden. Eine nichtinvertierende Verstärkerstufe mit einer unsymmetrischen Versorgung war hier der ideale Ansatz dieses Problem zu umgehen. Der Schaltungsaufbau ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Schaltung wird, analog zum Kondensatormikrofonschaltung, auch mit einem 12 V Spannungsregler versorgt, nur das nun die Potentialanhebung durch die Z-Diode wegfällt. Ein einfacher Spannungsteiler aus den Widerständen R_2 und R_3 halbiert die Versorgungsspannung und überlagert sie mit der zu verstärkenden Eingangsspannung. Der Verstärkungsfaktor kann mittels der beiden Widerstände R_4 und R_5 , mit Hilfe der Gleichung (3.2), eingestellt werden.

$$V_U = \frac{U_a}{U_e} = \frac{R_4 + R_5}{R_5} \quad \rightarrow \quad R_5 = \frac{R_4}{V_U - 1} = \frac{100\text{ k}\Omega}{17,75} = 5633,8\ \Omega \quad (3.2)$$

Wie bereits aus Abschnitt 3.1 bekannt, beträgt der maximale Pegel am Mikrofonausgang etwa $\pm 320\text{ mV}$. Daraus folgt ein Verstärkungsfaktor von $18,75$ zum Erreichen der $\pm 6\text{ V}$ am Ausgang der Verstärkerstufe. Für den Widerstand R_5 ergibt sich nach Gleichung (3.2), bei Festlegung des Widerstandes R_4 auf $100\text{ k}\Omega$, ein Wert von $5633,8\ \Omega$. Letztendlich eingesetzt wurde ein Widerstand mit $5600\ \Omega$, was einem Verstärkungsfaktor von $18,86$ entspricht.

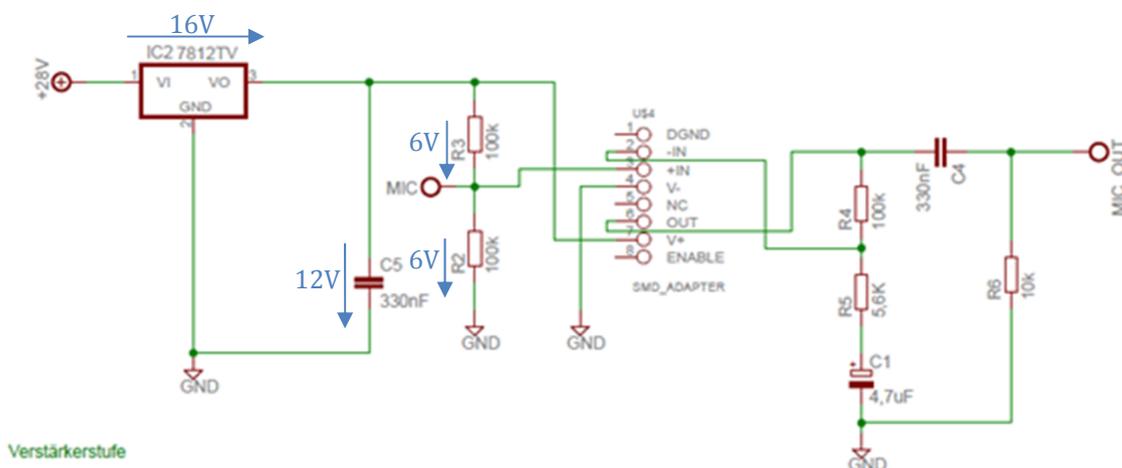


Abbildung 3.6: Schaltungsaufbau - Verstärkerstufe

Aufgrund der virtuellen Masse am Eingang des nichtinvertierenden Eingangs ist darauf zu achten, dass der Gleichspannungsanteil nicht mitverstärkt wird. Hierfür dient der Kondensator C_1 der bei Gleichspannungen einen quasi unendlich hohen Widerstand annimmt und zusammen mit dem Widerstand R_5 dafür sorgt, dass sich eine Verstärkung von eins ergibt. Das zu verstärkende Eingangssignal ist davon also nicht weiter beeinflusst. Zum gleichspannungsmäßigen Entkoppeln des Ausgangssignals wird der Kondensator C_4 verwendet. Da das daran anzuschließende NI-Messsystem äußerst hochohmig ist ($>10G\Omega$), wird der Widerstand R_6 benötigt, der das Auf- und Entladen des Kondensators ermöglicht.

Die beiden Schaltungsteile stellen zusammengefügt den gesamten Schaltungsaufbau eines Mikrofonmoduls dar. Versorgungstechnisch sind die beiden Teilschaltungen parallel geschaltet und gleichspannungsmäßig vollkommen getrennt voneinander zu betrachten. Somit besteht auch kein Problem einer Überbelastung der Z-Dioden des Mikrofonaufbaus.

Die gesamte Schaltung wurde nach dem Layout aus Abbildung 3.7 erstellt. Als Raster dient das einer üblichen Lochrasterplatine mit dem Lochabstand von $2,54\text{mm} = 0,1\text{inch} = 100\text{ mil}$. In blau sind die Leitbahnen und grün die Pins dargestellt.

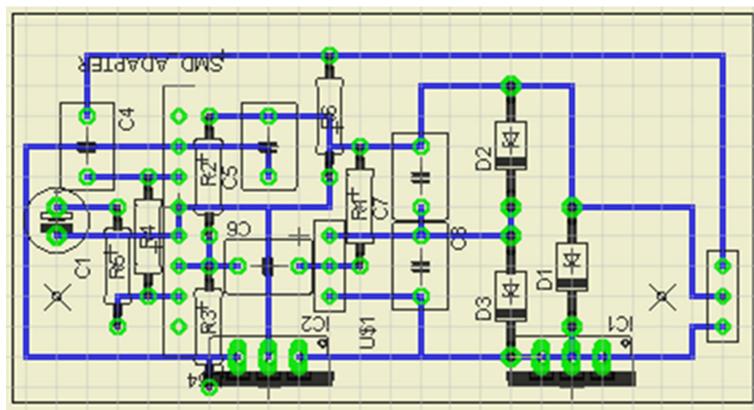


Abbildung 3.7: Layout Leiterplatte

In Abbildung 3.8 ist das fertigbestückte Mikrofonmodul dargestellt. Die drei Anschlusspins, mit dem Mikrofonsignal ganz oben, gefolgt von der Bezugsmasse und ganz unten die +28V Versorgungsspannung, sind auf der rechten Platinenseite wiederzufinden. Zum Einbau der Mikrofonkapsel in das vorgesehene Gehäuse wurden anschließend noch drei Kabel angelötet. Die Ausgangssignale sind je nach Lautstärkepegel zwischen $\pm 6\text{V}$ zu erwarten. Die Versorgungsspannung darf, nach dem Datenblatt [6] – „Datenblatt: LM78XX“, im Bereich von +26V bis +35V variieren. Die untere Spannungsgrenze ergibt sich aus der +12V Spannung der Z-Diode und der Mindestspannung des Reglers von +14V.

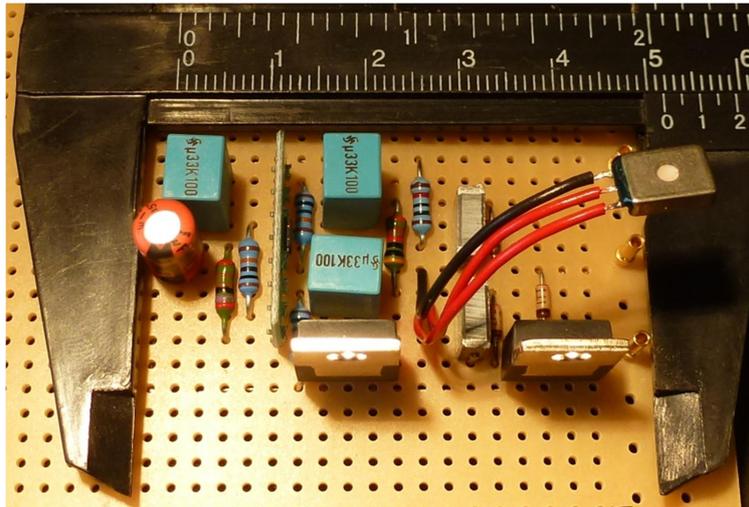


Abbildung 3.8: Mikrofonmodul - Lochrasterplatine

Abschließend musste die Platine noch zugeschnitten und in ein passendes Gehäuse montiert werden. Auf der Gehäuseoberfläche wurde für die Mikrofonöffnung eine Aussparung gebohrt und das Mikrofon zusammen mit der Platine in das Gehäuse eingesetzt. Das gesamte Modul mit dem Gehäuse aus Abbildung 3.9 kann nun an den vorgesehenen Positionen am Versuchstand montiert werden.

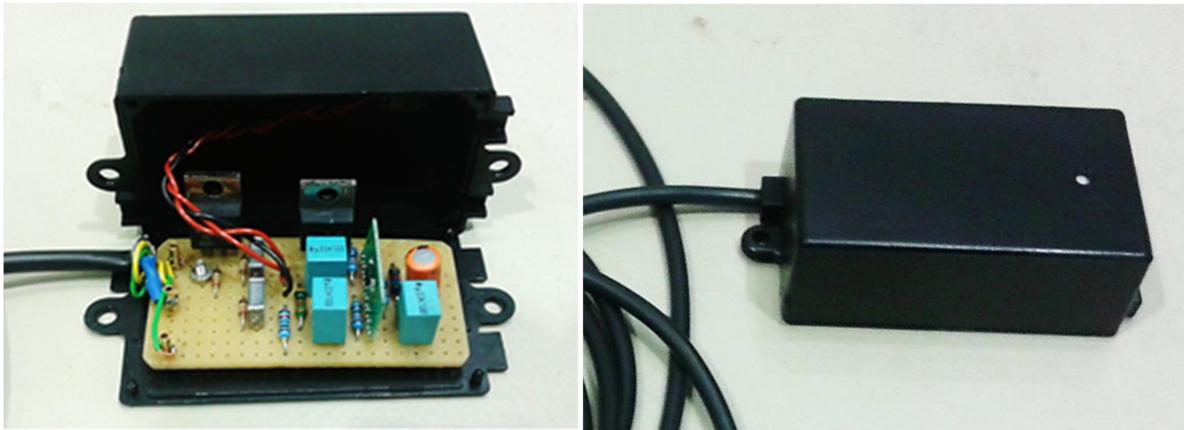


Abbildung 3.9: Mikrofonmodul - Gehäuseeinbau

3.3 Anschlussgehäuse

Zum Anschluss an die Messhardware wurde noch eine zentrale Anschlussbox angefertigt, womit die einzelnen Mikrofone über einen Stecker angeschlossen werden können. Über dieses Gehäuse erhalten die gesamten Mikrofonenschaltungen auch die gemeinsame Versorgungsspannung vom Netzteil. Innerhalb der Box sind die fünf Mikrofonmesssignale mit einem gemeinsamen Ausgangsstecker, zum Anschluss an die Messhardware, verbunden. Die Anschlussbox ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

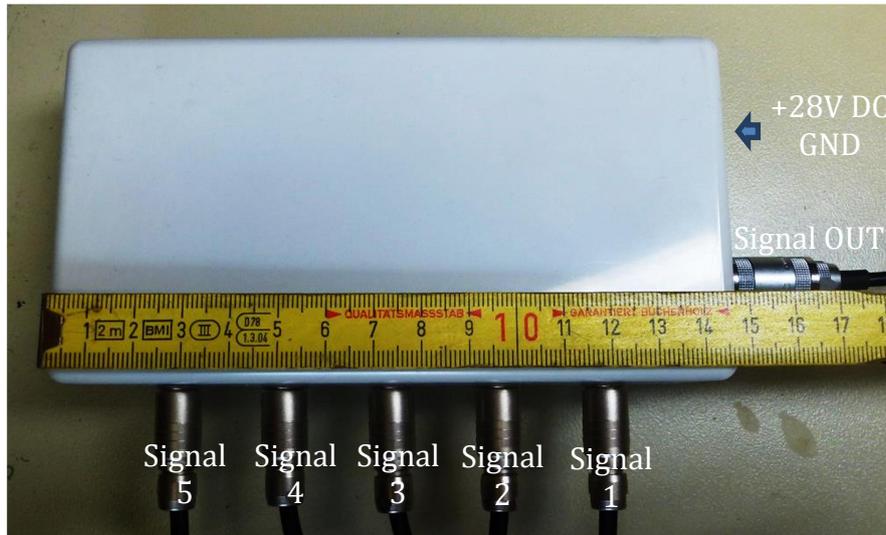


Abbildung 3.10: Anschlussgehäuse

Die Anschlussbelegung der Stecker und der Kabel sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Anschlussbelegung für Stecker und Kabel

Pin Nr.	Mikrofonanschluss	Messhardwareanschluss
1	GND (Braun)	GND (Schwarz)
2	Signal (Grün)	Signal 1 (Rot)
3	+28V (Gelb)	Signal 2 (Blau)
4		Signal 3 (Grün)
5		Signal 4 (Gelb)
6		Signal 5 (Weiß)

3.4 Weitere Messmikrofone

Zur Aufnahme des Dämpfungsverhaltens der Rumpfverkleidung wurden noch 6 weitere Mikrofone der Firma Sennheiser verwendet, die außerhalb des Modells befestigt wurden. Die Mikrofone sind in Abbildung 3.11 dargestellt.



Abbildung 3.11: Sennheiser Mikrofone

Die Richtcharakteristiken reichen von der supernierenförmigen bis hin zur kugelförmigen Empfangseigenschaft. Die Mikrofone sind keine klassischen Messmikrofone und primär eigentlich für Bühnenaufnahmen zur Aufnahme von Instrumenten und Gesang konzipiert, aber für einen Vergleich der beiden Zustände mit und ohne Rumpfverkleidung sind diese Mikrofone durchaus aussagekräftig. Sie sind allesamt über einem Vorverstärker an dem Messsystem mit angeschlossen. Die Typen sowie einige Eigenschaften sind in der Tabelle 3.2 zusammengefasst. Die Information hierzu stammen aus [7]-„Thomann“.

Tabelle 3.2: Bezeichnungen und Spezifikationen der Mikrofone

Nr.	Anzahl und Bezeichnung	Spezifikationen
1	2x Sennheiser e606	<ul style="list-style-type: none"> • Richtcharakteristik: Superniere • Frequenzbereich: 40 Hz – 15 kHz • nominelle Impedanz: 350 Ohm • z.B. für E-Gitarre, Snare, Brass
2	2x Sennheiser MD42	<ul style="list-style-type: none"> • Richtcharakteristik: Kugel • Frequenzbereich: 40 Hz – 18 kHz • geringe Körperschallempfindlichkeit • schwingend-gelagerte Kapsel • z.B. für Reporteranwendung
3	1x Sennheiser e935	<ul style="list-style-type: none"> • Charakteristik: Niere • Gleichmäßige Richtcharakteristik • z.B. für Gesang und Percussion
4	1x Sennheiser e845 mit Funkmodul	<ul style="list-style-type: none"> • Charakteristik: Superniere • z.B. für Gesang und Brass

3.5 Messsystem

Zur Aufnahme der Messdaten dient ein NI USB-6343 X Series System von National Instruments. In Tabelle 3.3 sind die Spezifikationen zu dem Modul, aus dem dazugehörigen Datenblatt [8] - „NI 6341/6343 Specifications“, zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Spezifikationen des NI-6363

Bus	Analog Inputs (AI)	Max AI Sampling Rate (1-Channel)	Max Total AI Throughput	Analog Outputs (AO)	Max AO Update Rate	Digital I/O Lines	Max Digital I/O Rate	Triggering
USB	32	500 kS/s	500 kS/s	4	900 kS/s	48	1 MHz	Digital

Mit einer Abtastrate von 500kS/s ist das Nyquist-Shannon- Abtasttheorem bis zu einer Frequenz unterhalb 250kHz erfüllt und damit für die bevorstehenden Messungen bestens geeignet. Auch mit 32 analogen Eingängen ist ausreichend Platz zum Anschluss der Mikrofone. Die zulässige Eingangsspannung liegt zwischen ±10V bei einer ADU (Analog-Digital-Umsetzer) von 16-Bit. Das heißt es kann im genannten Spannungsbereich von 65536 Quantisierungsstufen unterschieden werden. Die analogen Ausgänge und die digitalen Ein- und Ausgänge werden hier nicht weiter benötigt. Die gesamten Anschlüsse sind mit Schraubverschlüssen versehen. Der Anschlussplan für die analogen Eingänge ist in Abbildung 5.9 abgebildet.

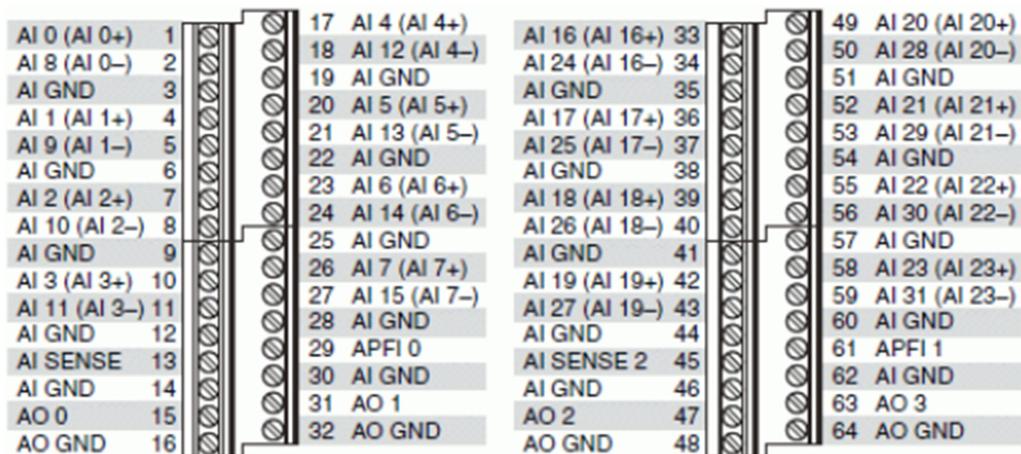


Abbildung 3.12: Ausschnitt Anschlussplan aus [8]

Das ganze Messmodul lässt sich über den USB Anschluss an einem handelsüblichen Computer anschließen, wobei mindestens Windows XP vorausgesetzt wird. Die Treiber zu dem Modul werden bereits bei der LabVIEW-Professional Installation direkt mit installiert, andernfalls sind diese auch separat auf der Internetseite [9] - „National Instruments – Treiber“ abrufbar.



Abbildung 3.13: NI X Series Messsystem aus [8]

Die Tabelle 3.4 zeigt die Anschlussbelegung, die bei den Versuchsmessungen verwendet wurde.

Tabelle 3.4: Anschlussbelegung der Mikrofonsignale

Index	Bezeichnung	NI-Anschlusspin	
		U_{in}	GND
0	Kondensatormikrofon-1207A	1	3
1	Kondensatormikrofon-1207A	4	6
2	Kondensatormikrofon-1207A	7	9
3	Kondensatormikrofon-1207A	10	12
4	Kondensatormikrofon-1207A	17	19
5	Sennheiser MD42	20	22
6	Sennheiser MD42	23	25
7	Sennheiser e606	26	28
8	Sennheiser e606	2	3
9	Sennheiser e935	5	6
10	Sennheiser SK1012	8	9
11	Sennheiser e845 mit Funkmodul	11	14

In der Tabelle ist ein weiteres Mikrofon, das Sennheiser SK1012, aufgelistet, das aber für die Auswertung leider ausschied. Das Mikrofon sollte ursprünglich dafür genutzt werden die Geräusentwicklung direkt hinter dem Modell aufzuzeichnen. Dieses Mikrofon war allerdings zur Hallendecke ausgerichtet und nahm dabei ausschließlich den reflektierenden Störschall der Hallenwände auf. Die aufgezeichneten Messdaten konnten daher für die Analyse nicht weiter betrachtet werden, sie befinden sich allerdings auf der beigelegten CD.

4 Realisierung der Störquellenortung

Es gilt eine Analysesoftware zu entwickeln, die von einem Mikrofonarray digitalisierte Messdaten erhält und anhand dieser Daten eine Störquellenortung durchführt. Dabei sollten die Mikrofonanordnung und die Anzahl der Mikrofone beliebig sein. Zu Beginn ist zu klären, welche Voraussetzungen und Randbedingungen hierzu gegeben sein sollten. Anschließend ist ein Verfahren zu entwickeln, mit dem eine Störquellenortung unter den am Rotorstand vorherrschenden Bedingungen realisiert werden kann.

4.1 Entwicklungsumgebung LabVIEW

Zur Programmierung der Analysesoftware standen einige Programmiersprachen zur Auswahl. Zum einem C/C++ die in Sachen Performance und Flexibilität ideal, aber auch für größere Projekte mit viel Programmieraufwand verbunden ist. Zur weiteren Auswahl stand das Softwarepaket LabVIEW von National Instruments. Bei LabVIEW handelt es sich um eine grafische Programmiersprache, die auch als Programmiersprache G bezeichnet wird, die zugleich die Entwicklungsumgebung darstellt. Das Haupteinsatzgebiet liegt in der Lösung von technischen Aufgabenstellungen, wie der Datenerfassung und der Analyse. Da diese Punkte auch hier im Vordergrund stehen, ist diese Programmiersprache optimal geeignet, um das Programmierprojekt zu realisieren.



Abbildung 4.1: LabVIEW - Symbol

Die Abkürzung LabVIEW steht für Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Es entstand im Jahre 1986 [10] – „Einführung in LabVIEW“ mit dem Hauptaugenmerk auf die Visualisierung der Programmstrukturen. Das kombinieren bzw. das virtuelle Verdrahten von grafischen Symbolen macht es möglich die Funktion eines Blockdiagramms zu beschreiben. Dabei folgt die Struktur des in G programmierten Blockdiagramms stets dem Datenflussprinzips. Dazu zählt auch, dass die Programmiersprache die Parallelverarbeitung von Rechenaufträgen beherrscht und daher für moderne Multiprozessorsysteme besonders effizient ist. Für erfahrende C/C++ Programmierer ist diese Denkweise meist ungewohnt, da hier auf die herkömmliche sequenzielle Verarbeitung gesetzt wird. Aber LabVIEW bieten hierfür zusätzlich die Möglichkeit der

Implementierung von C/C++ Code und auch MathScripts im textbasierten Style, die besonders beim Realisieren von mathematischen Funktionen geeignet sind. Außerdem bietet LabVIEW, wie die meisten moderneren Programmiersprachen, die Möglichkeit der Objektorientierten Programmierung. Die aktuelle Version ist LabVIEW 2013, das hier realisierte Projekt wurde mit der Vorgängerversion LabVIEW 2011 Professional erstellt. Einen sehr guten Einstieg in die Programmierung mit LabVIEW bietet das Buch [10], das auch hier für den Einstieg in die Programmiersprache diente.

4.2 Technische Voraussetzungen und Randbedingungen

Zur Realisierung der Geräuschortung müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein und Vereinfachungen getroffen werden.

Zur zeitgleichen Aufnahme mehrerer Mikrofonsignale muss ein Messsystem vorhanden sein bei dem die analogen Eingänge möglichst synchron arbeiten, um den Laufzeitunterschied anhand der digitalisierten Signale bestmöglich festzustellen. Mit dem hier verwendeten Messsystem ist das realisierbar.

Zusätzlich wird von einem idealen Punktstrahler mit isotropen Sendeverhalten als Stör-schallquelle und mit Mikrofonen mit idealen Empfangsverhalten ausgegangen. Mehrwegeausbreitungen durch Reflektionen werden, aufgrund deren Komplexität, nicht weiter berücksichtigt. Die Ausbreitung der Wellenfronten im Medium sei als homogen und zeitinvariant angenommen und unterliegt keiner wesentlichen Dispersion in der Phasen- sowie in der Gruppenlaufzeit.

4.3 Übersicht der Entwicklungsphasen

Bei der Realisierung der Störquellenortung wurden einige Entwicklungsphasen durchschritten, die in den nachfolgenden Abschnitten nacheinander erläutert werden. Zu Beginn war zu klären welche messtechnischen Größen überhaupt zur Störquellenortung genommen werden können. Daraus folgte die Überlegung anhand der entstehenden Laufzeiten, die eine Störschallquelle verursacht, die Störquellenortung zu realisieren, wie es im nächsten Abschnitt 4.4 beschrieben steht. Der Schwerpunkt lag hierbei die Laufzeiten messtechnisch zu erfassen und aus diesen Ergebnissen anschließend den Störquellenursprung festzustellen. Eine Phasenmessung aus Abschnitt 4.4.1 lieferte den ersten Ansatz zur Erfassung dieser Laufzeiten. Bei den ersten Testmessungen wurde allerdings ersichtlich, dass die Phasenbeziehung nicht an allen Störquellenpositionen sicher detektiert werden kann. Hier zeigten sich ganz anschaulich die Grenzen des räumlichen Abtasttheorems, worauf zwei weitere Verfahren entwickelt wurden, die im Abschnitt 4.4.2 und 4.4.3 beschrieben stehen. Erst bei ersten Versuchsmessungen direkt

am Rotorversuchsstand deutete sich ab, dass eine Laufzeitbestimmung anhand einer bestimmten Beobachtungsfrequenz keine sichere Aussage zu Störquellenortung zulässt. Daher wurden hier weitere Optimierungsmaßnahmen eingestellt und es wurde das „Delay and sum“-Verfahren aus Abschnitt 4.5 entwickelt, das auch bereits in der Praxis weit verbreitet ist. Mit diesem Verfahren wurde letztendlich auch die Störquellenortung am Rotorversuchsstand ausgeführt.

4.4 Störquellenortung anhand von Laufzeitmessungen

Die Funktionsweise dieses Verfahrens beruht auf dem Prinzip des Richtungshörens beim menschlichen Ohr. Ein Geräusch trifft mit einer gewissen Laufzeitdifferenz und einer Intensitätsdifferenzen zwischen dem rechten und linken Ohr auf. Treten die transmittierten Schallwellen der Quelle früher auf das jeweilige Ohr auf, ist davon auszugehen, dass die Quelle sich auch in der jeweiligen Richtung befindet. Analog hierzu ist eine Aussage anhand der Intensitätsdifferenzen zutreffen.

Genau dieses Prinzip diente als erster Ansatz zur Realisierung der Störquellenortung. Zu Beginn sind die Laufzeitdifferenzen zu den einzelnen Mikrofonen messtechnisch zu ermitteln. Anschließend wird ein Störpunkt L im dreidimensionalen Raum angenommen und zu diesem Punkt werden die Laufzeitdifferenzen der Mikrofone im Bezug zu einem Referenzmikrofon berechnet. Ein Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Laufzeitdifferenzen soll nun darüber Auskunft geben, ob die gewählte Störquellenposition der realen Schallquelle entspricht. Ein vereinfachtes Modell ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

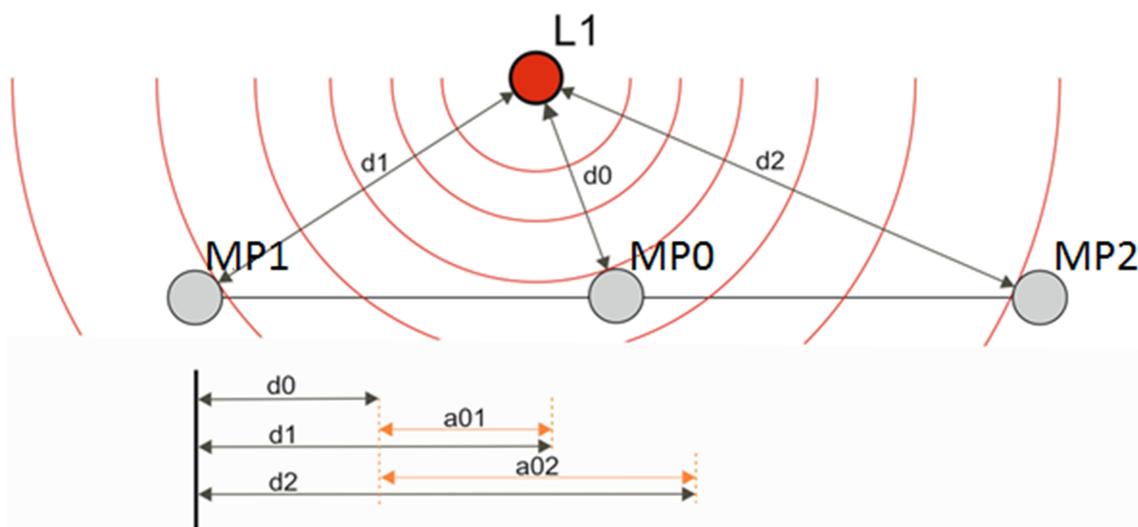


Abbildung 4.2: Modell zur Störquellenortung einer Schallquelle

Im vorliegenden Fall wird eine isotrope Schallquelle L betrachtet, die kugelförmige (hier kreisförmige) Wellenfronten aussendet. Die Abstände aller Mikrofone sind vorerst iden-

tisch und das Mikrofon MP_0 dient im Folgenden als Bezugspunkt für die Mikrofone MP_1 und MP_2 . Die hier genannten Abkürzungen wurden auch im Rahmen der Programmierung verwendet. In diesem Beispiel treffen die Wellenfronten zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf die Mikrofone auf. Diese Laufzeitunterschiede führen zu Phasenverschiebungen zwischen den Mikrofonsignalen. Im Allgemeinen gibt die Phasenbeziehung zwischen zwei Signalen an, ob das Signal von MP_1 dem Signal von MP_0 vorausseilt oder eben nacheilt oder im Spezialfall sogar gleich Null ist. Betreffend der entstehenden Laufzeiten kann also bestimmt werden ob das Signal MP_1 früher oder später oder gleichzeitig im Vergleich zum Signal MP_0 eintritt. Im Bezug zur Schallquellenlokalisierung kann wiederum darüber Auskunft gegeben werden, ob das Mikrofon MP_1 näher dran, weiter entfernt oder gleichweit zur Schallquelle L positioniert ist. Diese Laufzeitunterschiede sind demnach bedeutend für die Geräuschortung und sind daher messtechnisch zu erfassen. Hierfür wurden insgesamt drei Verfahren entwickelt, die im Folgenden beschrieben werden.

4.4.1 Phasenmessung

Messtechnisch können diese Laufzeiten anhand von Phasenmessungen erfasst werden. Für das Beispiel aus Abbildung 4.2 liefert eine Phasenmessung vom Signal MP_1 und Signal MP_2 , im Bezug zu MP_0 , die Größen für α_{01} und α_{02} im Bogen- oder Gradmaß. Die Phase kann exemplarisch für das Gradmaß, anhand der vorliegenden Frequenz f_B , in eine Laufzeit τ umgerechnet werden (Gleichung(4.1)).

$$\tau = \frac{\varphi}{360^\circ \cdot f_B} \quad (4.1)$$

Die gerade gemachten Aussagen gelten allerdings nur solange keine $\pm 180^\circ$ Phasensprünge zwischen den einzelnen Signalen auftreten.

Messtechnisch wurde die Phase mit Hilfe einer Fourier-Transformation bestimmt. Allgemein gilt für ein Signal das um t_0 verschoben wurde folgender Zusammenhang:

$$\underbrace{\text{Zeitbereich}} \quad f(t - t_0) \leftrightarrow F(\omega) \cdot e^{-j\omega t_0} \quad \underbrace{\text{Frequenzbereich}} \quad (4.2)$$

Die Berechnung des Frequenzspektrums übernimmt der Funktionsblock „Phasenmessung_FFT.vi“ des LabVIEW Projekts. Wie der Name schon sagt wird hier ein FFT- Algorithmus angewandt, um die diskrete Fourier-Transformation der Messdaten durchzuführen. Dieser Algorithmus liefert das Ergebnis der einzelnen Frequenzkomponenten in exponentieller Schreibweise, wobei die Phaseninformation im Exponenten direkt mitgeliefert wird. Diese Angabe kann nun mit Gleichung (4.1) direkt in eine Laufzeit umgerechnet werden.

Zur Unterdrückung des Leck-Effekts muss vor der eigentlichen Transformation das Zeitsignal gefenstert werden. Eine Fensterung wird dann benötigt, wenn sich das aufgenommene Signal nicht ohne Sprünge im Zeitverlauf periodisch fortsetzen lassen. Diese Sprünge bilden sich als hochfrequente Spektralanteile im Frequenzspektrum ab und verschmieren dadurch das aufgezeichnete Spektrum. LabVIEW bietet hierzu bereits einige Fensterfunktionen an, mit dem das Zeitsignal sanft auf null gewichtet werden kann. Hier ist nun abzuschätzen wie stark diese Gewichtung ausfallen darf. Die Art der Gewichtung bestimmt letztendlich wie breit der Haupt-Peak im Spektrum ausfällt und wie weit sich dieser im Vergleich zu den Nebenlinien (Sidelobes) abhebt. Bei der Wahl der Fensterfunktion wurde nun ein Kompromiss zwischen dem hart abschneidenden Rechteckfenster und einem stark abfallenden Blackman-Fenster gesucht (Abbildung 4.3). Hier eingesetzt wurde letztendlich die Hamming-Fensterfunktion, die genau diesen Kompromiss darstellt.

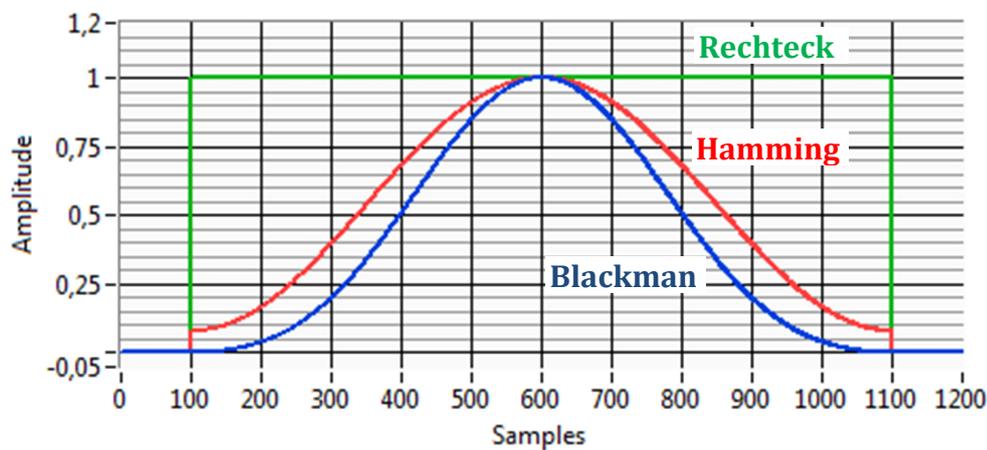


Abbildung 4.3: LabVIEW - Fensterfunktionen

Eine Funktion zur Berechnung des Frequenzspektrums ist in LabVIEW bereits implementiert. Diese wird anhand des Algorithmus zur schnellen Fourier-Transformation berechnet. Die Definition für die eindimensionale DFT, wie sie am Ende auch bei LabVIEW vorliegt, ist in Gleichung (4.3) abgebildet. Dabei ist y das Ergebnis der Transformation, x_n das jeweilige Eingenselement und N die Anzahl der Elemente.

$$y_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N} \quad (4.3)$$

Die Frequenzauflösung wird aus dem Kehrwert der Messdauer T_m nach Gleichung (4.4) bestimmt.

$$\Delta f = \frac{f_a}{N} = \frac{1}{T_a \cdot N} = \frac{1}{T_m} \quad (4.4)$$

Die Frequenzauflösung sollte auch bei der Konfiguration der Messhardware beachtet werden, um eine möglichst hohe Messgenauigkeit im Betrag und Phase für die jeweilige Frequenz zu erhalten. Die Phaseninformation ist anschließend noch mit dem Referenzmikrofon MP_0 in Bezug zu stellen:

$$\varphi_{\Delta x} = \varphi_x - \varphi_{\text{Bezug}} = \varphi_{MP_x} - \varphi_{MP_0} \quad (4.5)$$

Das berechnete Frequenzspektrum ermöglicht somit die Betrachtung der Phaseninformation zu jeder Frequenzkomponente. Damit können auch Schallquellen unterschiedlicher Frequenz unterschieden werden.

Das Problem bei diesem Verfahren besteht darin, dass $\pm 180^\circ$ Phasensprünge mit einer gewöhnlichen Phasenmessung nicht detektiert werden können und zu Auswertungsfehlern führen. Diese Phasensprünge entstehen sobald die durch eine Schallquelle verursachte Laufzeitdifferenz, zwischen einem Mikrofon und Bezugsmikrofon, größer ist als die halbe Wellenlänge der auftretenden Frequenz. In diesem Fall kann nicht mehr Eindeutig zu gewiesen werden, wie viele Wellenlängen an Laufzeit zwischen den Mikrofonen liegen und dies führt zu Fehlinterpretationen der Laufzeiten.

Zur Vermeidung dieses Effektes gilt es das räumliche Abtasttheorem einzuhalten, das im Abschnitt 4.5.1 noch behandelt wird.

Dieses Problem führte anschließend zu der Überlegung einen Korrekturfaktor einzuführen, mit dem diese Phasensprünge korrigiert werden können. Je nach Höhe des Faktors wird zur gemessenen Phase $\pm 180^\circ$ zum jeweiligen Messmikrofon hinzu addiert. Da dieser Korrekturfaktor nur schlecht abzuschätzen ist wurde eine automatische Phasenkorrektur implementiert. Die automatisierte Phasenkorrektur erfolgt auf Grundlage einer Positionsschätzung der gesuchten Schallquelle. Zu dieser Position werden dann anschließend die Laufzeiten simuliert und anhand der berechneten Phasensprünge eine Korrektur der gemessenen Phase durchgeführt. Zur Berechnung des Korrekturfaktors dient Gleichung (4.6).

$$k_{lx} = \frac{\tau_{lx_{sim}} - \tau_{lx_{mess}}}{\lambda/2} \quad (4.6)$$

Diese Berechnung liefert allerdings nur dann korrekte Ergebnisse wenn die Position richtig geschätzt wurde. Aber auch eine Schätzung ist bei unbekanntem Objekten nur bedingt möglich. Daher wurde anschließend das Korrelationsverfahren entwickelt, um die Laufzeiten detektieren zu können.

4.4.2 Kreuzkorrelation

Die Korrelation beschreibt den zeitlichen Zusammenhang zweier Signale. Das Korrelationsergebnis lässt sich nach [11] – „Digitale Signalverarbeitung“ S. 50 für zwei reelle Signale wie folgt berechnen:

$$r_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot y(t + \tau) dt \quad (4.7)$$

Das Ergebnis beschreibt die Ähnlichkeit beider Signale in Abhängigkeit der zeitlichen Verschiebung τ . Aus diesem Ansatz ergibt sich Gleichung (4.8) für die digitale Signalverarbeitung die diskrete Signalfolge.

$$r_{xy}(m) = \sum_{n=-N}^N x(n) \cdot y(n + m) \quad (4.8)$$

Das Signal $y(n)$ wird mit der Verschiebungsgrad m über das Signal $x(n)$ verschoben. Der Verschiebungsgrad m und Koeffizient n sind ganzzahlige Indizes der diskreten Messreihe. Nach jeder Verschiebung werden die beiden Signale über die gesamte Signalbreite jeweils multipliziert und addiert. An dem Punkt an dem beide Signale die größte Übereinstimmung aufweisen bildet sich ein Maximum im Korrelationsergebnis aus. Das Prinzip soll in Abbildung 4.4 anhand einer LabVIEW-Simulation zweier Sinussignale veranschaulicht werden.

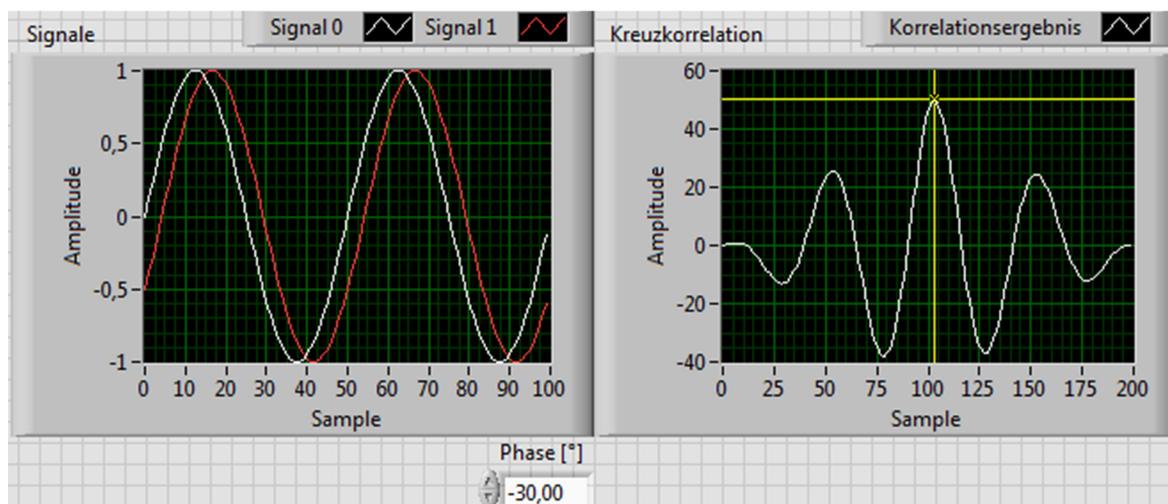


Abbildung 4.4: Kreuzkorrelation zweier Sinussignale

Da LabVIEW nur positive Indexwerte kennt und beim Indexwert 0 startet ist der Koordinatenursprung um $(N - 1)$ Abtastwerte verschoben. Der eigentliche Koordinatenursprung befindet sich hier beim Index 99 des Korrelationsergebnisses. Die Simulation zeigt einen Si-förmigen Verlauf mit einem Korrelationsmaximum, das vom eigentlichen

Koordinatenursprung verschoben ist. Zum Erhalt der zeitlichen Verschiebung beider Signale ist es nun erforderlich den Peak zu detektieren und die zeitliche Verschiebung vom Ursprung festzustellen. Die gesuchte Laufzeit erhält man aus Gleichung (4.9). Hierbei ist m_{\max} der Index des aufgetretenen Maximums im Signalverlauf.

$$\tau = (m_{\max} - (N - 1)) \cdot T_a = (m_{\max} - (N - 1)) \cdot \frac{1}{f_a} \quad (4.9)$$

Aber auch bei diesem Verfahren bestehen Probleme. Im Gegensatz zur Phasenmessung ist es zwar nun durchaus möglich Phasensprünge zu detektieren allerdings nur über das gesamte Zeitsignal und nicht anhand bestimmter Beobachtungsfrequenzen. Als Alternativweg wurde ein digitales Bandpassfilter hinzugeschaltet das, je nach eingestellter Bandbreite, das Zeitsignal vor der Korrelation rund um die Beobachtungsfrequenz filtert.

Aber auch diese Lösung liefert keine optimalen Ergebnisse. Die Filterung bewirkt, dass aus dem Zeitsignal grundlegende Informationen rausgefiltert werden, die zur Korrelation erforderlich sind. Wird das Signal exemplarisch exakt im Bereich der Beobachtungsfrequenz gefiltert ist das Ergebnis eine annähernd reine Sinusschwingung. Phasensprünge sind somit nicht mehr detektierbar und das Verfahren liefert somit auch keinen Vorteil gegenüber der Phasenmessung. Daher ist die Bandbreite des Bandpassfilters im Programmaufbau frei wählbar oder im ungünstigsten Fall auch ganz deaktivierbar. Aber wie die ersten praktischen Testmessungen zeigten, ist auch bei deaktiviertem Filter keine sichere Aussage möglich. Mögliche Ursachen werden im Abschnitt 4.6 näher erläutert.

Ein weiteres Problem besteht in der Genauigkeit des Messverfahrens. Aus Gleichung (4.9) wird deutlich, dass das Laufzeitergebnis nur ein Vielfaches der Abtastperiode T_a ist. Bezogen auf das soeben behandelte Simulationsbeispiel bedeutet das, obwohl das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem mit 50 Abtastwerten pro Schwingung weitaus erfüllt ist, dass nur zwischen $7,2^\circ$ Phasenschritten unterschieden werden können. Mit einer Messunsicherheit von $\pm 3,6^\circ$ wär das Korrelationsverfahren für eine präzise Geräuschornung zu ungenau. Zum Erhalt genauerer Messergebnisse liegt es nah, einfach die Abtastfrequenz f_a bei der Messung zu erhöhen oder eine Interpolation der Messdaten durchzuführen. Beide Wege führen allerdings dazu, dass der Umfang der Messdaten und somit auch die Rechenzeit zur Durchführen der Korrelation deutlich ansteigen. Zusätzlich ist die Auflösung des Messsystems begrenzt. Beim verwendeten NI-Messsystem liegt die maximale Abtastfrequenz bei 200kHz.

4.4.3 Kombination der Messverfahren

Da beide Messverfahren Vor- und Nachteile aufweisen führte es zu der Überlegung beide Messverfahren zu kombinieren. Das Verfahren der Kreuzkorrelation hat den Vorteil, dass bei ausreichendem Informationsgehalt im Messsignal Phasensprünge erkannt werden können. Die Phasenmessung anhand der Fourier-Transformation erkennt diese Sprünge nicht, liefert aber deutlich genauere Phasenangaben bei der jeweiligen Frequenz. Nun kann das Korrelationsergebnis dazu genutzt werden die Sprünge in der Phasenmessung zu korrigieren. Da das FFT-Spektrum für die Darstellung des Betragsspektrums fortlaufend berechnet wird, entsteht hier auch kein höherer Berechnungsaufwand. Dieses Verfahren liefert allerdings nur dann zuverlässige Ergebnisse wenn beide Messverfahren korrekt arbeiten. Zur Korrektur der Phasenmessung dient Gleichung (4.10).

$$\varphi_{\text{kombi}} = \varphi_{\text{FFT}} + k_1 \cdot 180^\circ = \varphi_{\text{FFT}} + \left[\frac{\varphi_{\text{kreuzK.}} - \varphi_{\text{FFT}}}{180^\circ} \right] \cdot 180^\circ \quad (4.10)$$

Mit Hilfe von Gleichung (4.1) kann die Phaseninformation wieder in eine Laufzeit τ umgerechnet werden.

4.4.4 Berechnung der Laufzeitdifferenzen

Nach der Messung der Laufzeiten folgt nun die Berechnung für den Vergleich der Ergebnisse. Zur Berechnung der Laufzeitdifferenzen zu einem Referenzmikrofon müssen zuvor die räumlichen Abstände zu einem Fokuspunkt berechnet werden. Dieser Fokuspunkt entspricht einer Position innerhalb des Suchbereichs.

Nun wurde eine Funktion entwickelt, die einen Vektor $P(p_1; p_2; p_3)$ entgegennimmt und den räumlichen Abstand zu einem Vektor $L(l_1; l_2; l_3)$ berechnet. Zum Erhalt der Streckendifferenzen werden die einzelnen Vektorkomponenten der beiden Punkte subtrahiert (Gleichung (4.11)).

$$\vec{PL} = \vec{l} - \vec{p} = \begin{pmatrix} l_1 - p_1 \\ l_2 - p_2 \\ l_3 - p_3 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Zur Berechnung der Raumdiagonale $|\vec{PL}|$ muss anschließend nur noch eine Betragsbildung des neuen Ergebnisvektors ausgeführt werden. In Gleichung (4.12) ist der Berechnungsvorgang abgebildet.

$$|\vec{PL}| = \sqrt{(l_1 - p_1)^2 + (l_2 - p_2)^2 + (l_3 - p_3)^2} \quad (4.12)$$

Anschließend müssen die räumlichen Abstände, eines Mikrofons zum Fokuspunkt, in eine Laufzeit τ umgerechnet werden. Für diese Umrechnung wird die Schallgeschwindigkeit c_s benötigt. Die Schallgeschwindigkeit c_s ist von der Temperatur abhängig und lässt sich nach [12] – „Tontechnik-Rechner – sengpielaudio“ mit Hilfe der Gleichung (4.13) wie folgt bestimmen:

$$c_s \approx 331,5 \cdot \sqrt{\frac{\vartheta/^\circ\text{C} + 273,15 \text{ m}}{273,15 \text{ s}}} = 331,5 \cdot \sqrt{1 + \frac{\vartheta}{273,15 \text{ }^\circ\text{C}} \frac{\text{m}}{\text{s}}} \quad (4.13)$$

$$c_{20^\circ\text{C}} \approx 331,5 \cdot \sqrt{1 + \frac{20^\circ\text{C}/^\circ\text{C}}{273,15} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 343,42 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.14)$$

Aus Gleichung (4.13) ergibt sich aus dem räumlichen Abstand d die Laufzeit τ_l .

$$\tau_l = \frac{d}{c_s} = \frac{d}{331,5 \cdot \sqrt{1 + \frac{\vartheta/^\circ\text{C}}{273,15} \frac{\text{m}}{\text{s}}}} \quad (4.15)$$

Nach dieser Umrechnung müssen abschließend die Laufzeitdifferenzen im Bezug zum Referenzmikrofon MP_0 mit Hilfe von Gleichung (4.16) für das jeweilige Mikrofon berechnet werden.

$$\tau_{\text{MP}}(x) = \tau_{\text{IMP}}(x) - \tau_{\text{IMP}}(0) \quad (4.16)$$

Die berechneten Laufzeitdifferenzen, für einen gewählten Fokuspunkt, können nun mit den gemessenen Werten verglichen werden.

4.4.5 Suchfunktion in der xy -Ebene

Die Suchfunktion in xy -Ebene übernimmt die Mikrofonpositionen zusammen mit den dazugehörigen Laufzeiten und tastet einen vorgegebenen Bereich in x - und y -Richtung mit einer vorgegebenen Schrittweite ab. Der Abstand z wird dabei konstant gehalten. Beim Suchvorgang wird ein dreidimensionales Array erstellt. Begonnen wird am Suchbereichsanfang an den Koordinaten mit den Parameterbezeichnungen $minY$ und $minX$, die der Funktion übergeben werden. Schrittweise wird für jeden Fokuspunkt im Suchbereich die Differenz zwischen berechneter und gemessener Laufzeit bestimmt. Die berechneten Laufzeiten werden anhand der Gleichungen (4.15) und (4.16) bestimmt.

Das Ergebnis für einen Fokuspunkt ergibt sich aus der Summe der Laufzeitdifferenzen der X Mikrofone, wie es in Gleichung (4.17) steht.

$$\tau_{\text{sum}} = \sum_{x=0}^{X-1} |\tau_{\text{MP}_{\text{mess}}}(x) - \tau_{\text{MP}_{\text{sim}}}(x)| \quad (4.17)$$

Befindet sich die Schallquelle innerhalb des angegebenen Bereichs existiert ein entsprechender Punkt, der gegen Null konvergiert. Im Ergebnisarray sind letztendlich zu jedem Koordinatenpunkt die Laufzeitdifferenzen zwischen gemessener und berechneter Laufzeit abgelegt. Abschließend gilt es das absolute Minimum aus der Datenarray zu suchen und die entsprechenden Koordinaten auszugeben.

In Abbildung 4.5 ist das Ergebnisarray für eine Testmessung exemplarisch dargestellt. Hier ist gut erkenntlich das in der xy -Ebene ein Fokuspunkt existiert bei dem das Ergebnis gegen Null konvergiert.

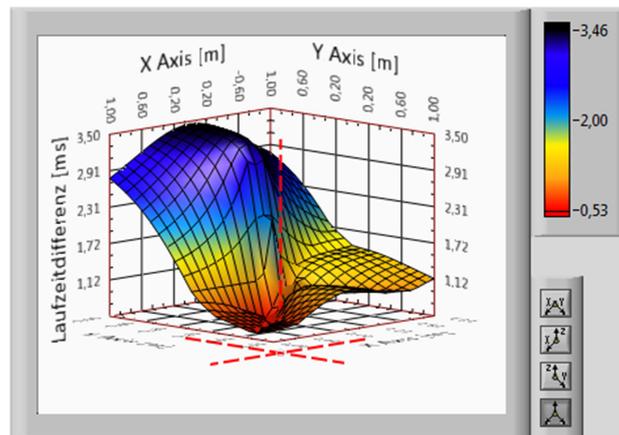


Abbildung 4.5: 3D-Plot des Ergebnisarrays der Suchfunktion in der xy -Ebene

Am Funktionsende wird noch eine weitere Optimierungsmaßnahme ersichtlich. Es wird zusätzlich zu den Koordinaten der gefundenen Störquelle ein Bereich ausgegeben, der dazu genutzt werden kann, den Suchbereich beim erneuten Aufruf weiter einzuschränken. Dieser Bereich folgt aus einem Vergleich zwischen gefundenem Maximum und Minimum innerhalb des Suchbereichs des Ergebnisarrays.

4.4.6 Suchfunktion in der z -Ebene

Die Suchfunktion für die z -Ebene beruht auf der selben Funktionsweise wie der xy -Suchfunktion. Die Funktion erhält beim Aufruf eine xy -Koordinate und den Suchbereich in der z -Ebene. Anschließend wird innerhalb der z -Ebene mit Hilfe von Gleichung (4.17) ein Ergebnisfeld mit den Laufzeitdifferenzen erzeugt. Das Minimum weist erneut auf die gesuchte Schallquelle hin. Das Ergebnisfeld ist in Abbildung 4.6 exemplarisch für eine Testmessung dargestellt. Der Cursor zeigt wiederum auf das erfasste Minimum.

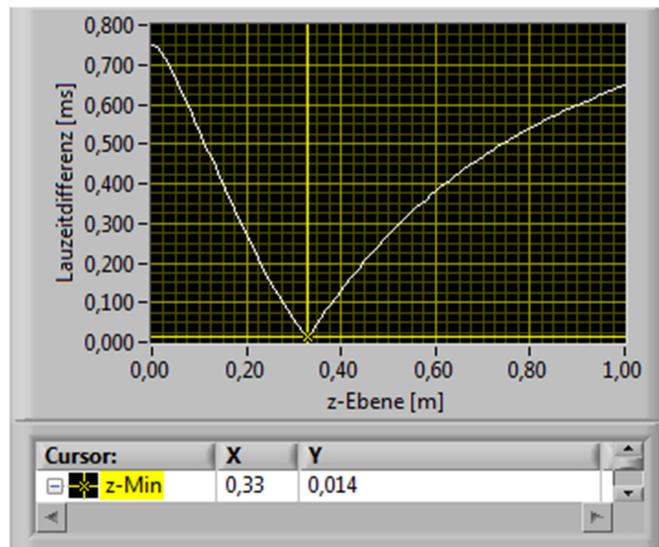


Abbildung 4.6: 2D-Plot des Ergebnisarrays der Suchfunktion in z-Richtung

4.4.7 Suchfunktion zur Störquellenortung im Raum

Der Suchbereich erstreckt sich nicht nur in x - und y -Ebene, sondern auch in einer räumlichen Tiefe z . Aus Performancegründen wurde sich dafür entschieden nicht den gesamten Bereich abzutasten, sondern zwei separierbare Suchfunktionen zu implementieren. Eine Suchfunktion dient ausschließlich zur Abtastung der x - und y -Ebene (Abschnitt 4.4.5) und eine weitere zur Abtastung in z -Richtung (Abschnitt 4.4.6), die nacheinander aufgerufen werden. Damit ist es nicht mehr erforderlich den gesamten Raum abzutasten, sondern nur gezielt bestimmte z -Ebenen zu betrachten. Damit sinkt der Berechnungsaufwand erheblich, wie ein einfaches Berechnungsbeispiel zeigt: Bei einem Suchbereich von jeweils 1 m in x -, y -, z -Ebene und einer Schrittweite von jeweils 0,01 m würden daraus 100^3 Abtastwerte, ohne weitere Optimierungen folgen. Für jeden dieser Abtastwerte müssten eine Vielzahl von Rechenoperationen durchgeführt werden, die den Programmablauf spürbar ausbremsen. Werden mit der Optimierung nur noch 10 spezielle Ebenen abgetastet, ist es möglich diesen Wert auf $10 \cdot 100^2$ Abtastwerte zu reduzieren.

Beim Funktionsaufruf wird der gesamte Suchbereich in x -, y - und z -Richtung zusammen mit den Mikrofonpositionen und den gemessenen Laufzeitdifferenzen übergeben. Der Suchbereich besteht jeweils aus drei Parametern. Einen für den Startwert, einen für den Endwert und einen für die Schrittweite mit dem die jeweilige Ebene abgetastet wird. Zusätzlich ist eine Temperaturangabe erforderlich, die zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit dient. Die vom Anwender vorgegebene Schrittweite wird vorerst nicht beachtet.

Beim ersten Durchlauf wird der gesamte Suchbereich in xy -Richtung zuerst grob abgetastet. In x - und y -Richtung wird der Bereich in 20 Bereiche gleichmäßig gerastert, was

21 Rasterpunkten für jede Ebene entspricht. Aus der Rasterung ergibt sich letztendlich die Schrittweite, die anschließend zusammen mit den gesamten Übergabeparametern der xy -Suchfunktion übergeben wird. Der Abstand z beträgt beim ersten Aufruf den Suchbereichsmittelwert. Nach dem ersten Durchlauf ergibt sich für die Schallquellenortung eine vorläufige Schallquellenposition. Diese Position wird wiederum der z -Suchfunktion übergeben. Nun findet eine Annäherung in z -Richtung statt.

Anschließend wird dieser gesamte Suchvorgang mit dem neuen Suchbereich, der von der xy -Suchfunktion ausgegeben wird, und dem neuen Abstand z wiederholt. Da dieser Suchbereich weiter begrenzt ist, wird die Schrittweite aufgrund der konstanten Rasterung zwangsläufig kleiner. Bei stetiger Wiederholung dieses Vorgangs wird der Suchbereich weiter begrenzt und die Suchgenauigkeit steigt. Nach Erreichen der erforderlichen Schrittweite wird der Suchvorgang beendet und die resultierende Schallquellenposition ausgegeben. Dieser Suchalgorithmus resultiert aus mehreren experimentellen Tests zur Optimierung des Suchvorganges.

4.5 Störquellenortung mittels Delay-and-sum Verfahren

Da die Störquellenortung anhand von Laufzeitmessungen in den ersten praktischen Versuchstest nicht zu den erwünschten Ergebnissen führten wurde ein weiteres Verfahren entwickelt, das nach einer anderen Vorgehensweise vorgeht. Die dazu erforderlichen theoretischen Grundlagen wurden aus [13] – „*Messtechnik der Akustik*“; Kapitel 6: *Akustische Antennen*“ und [14] - „*Praktikum für Nachrichtentechnik*“ entnommen.

Das „Delay and sum“ Verfahren stammt aus den Grundlagen des Beamformings zur Lokalisierung von Schallquellen. Analog zum vorigen Verfahren wird auch hier zu Beginn eine Störschallquelle im Raum festgelegt und zu diesem Fokuspunkt die Laufzeitdifferenzen gebildet. Statt nun einen Vergleich der Laufzeiten durchzuführen, werden nun die einzelnen Mikrofonensignale mit den jeweiligen Laufzeitdifferenzen korrigiert. Durch das schrittweise Korrigieren der Mikrofonensignale wird ein Drehen der gesamten Mikrofonanordnung nachgebildet. Vergleichbar mit der Aufnahme eines Richtdiagramms eines Mikrofons kann so scheinbar die Mikrofonanordnung schrittweise gedreht und für jeden Einfallswinkel ein bestimmter Richtfaktor $\Gamma(\phi)$ (Gleichung (4.18)) aufgenommen und in Polarkoordinatensystem aufgetragen werden.

$$\Gamma(\phi) = \frac{u(\phi)}{u(0^\circ)} \quad (4.18)$$

Beim Beamforming wird also durch das Ändern von bestimmten Parametern die Richtcharakteristik quasi geformt, wie man auch aus dem Namensgebung ableiten kann. Die dabei aufgenommene Hauptkeule weist dabei auf die Hauptempfangsrichtung hin, die

wiederrum auf die gesuchte Störschallquelle hinweist. Ein Beispiel hierzu ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

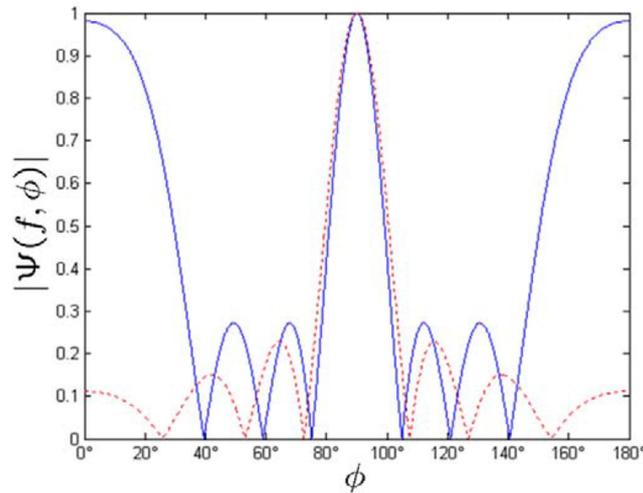


Abbildung 4.7: Auszug einer Richtcharakteristik aus [14] S.19 für 4 Mikrofone (durchgezogene Linie) und 8 Mikrofonen (gepunktete Linie)

Bei dem am weitesten verbreiteten „Delay and sum“ Verfahren wird nach dem Verzögern der einzelnen Mikrofonsignale eine Summation durchgeführt. Je nach Phasenlage verursacht diese Summation nun destruktive aber auch konstruktive Interferenzen. Wurde nun ein Fokuspunkt gewählt bei dem sich die Laufzeitunterschiede genau kompensieren, entsteht ein Maximum im Summationssignal. Damit ist dieser Punkt als maßgebliche Störschallquelle anzunehmen.

Dieses Verfahren wurde in der LabVIEW-Funktion „delay-and_sum_LzuMP_XY.vi“ implementiert. Beim Funktionsaufruf werden die Mikrophonmessdaten zusammen mit den Mikrophonpositionen übergeben. Zusätzlich ist ein Suchbereich in der x - und y -Ebene zusammen mit den jeweiligen Schrittweiten anzugeben. Der Abstand in der z -Ebene wird beim Suchvorgang konstant gehalten und kann nur beim Funktionsaufruf geändert werden. Des Weiteren ist die im Ausbreitungsmedium vorherrschende Temperatur, zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit, und noch weitere Filterparameter anzugeben, die im nächsten Abschnitt 4.5.1 beschrieben stehen.

4.5.1 Räumliches Abtasttheorem

Hier kommen insgesamt zwei digitale Filter zum Einsatz, die vom Anwender hinzugeschaltet werden können. Das erste Filter dient als Anti-Aliasing-Filter. Aliasing-Effekte sind aus der digitalen Abtastung bekannt, wobei ein Signal unter Nichtbeachtung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems aus Gleichung (4.19) zeitlich abgetastet wird.

$$f_a > 2 \cdot f_{\max} \quad (4.19)$$

Eine korrekte Rekonstruktion der Messdaten ist dann nicht mehr möglich, da sich Signalanteile oberhalb der Nyquistfrequenz als niederfrequente Schwingungen abbilden. Zur Unterdrückung dieser Erscheinungen wird eine Tiefpassfilterung vor der eigentlichen Abtastung durchgeführt. Bei der Störquellenortung handelt sich allerdings nicht um eine zeitliche sondern um eine räumliche Unterabtastung. Wie bereits beschrieben, entstehen bei der zeitlichen Korrektur der Mikrofonensignale destruktive und konstruktive Interferenzen. Beträgt die Laufzeitdifferenz zwischen zwei Mikrofonen nun ein Vielfaches der Wellenlänge ist keine eindeutige Aussage möglich wie viele Wellenlängen nun von der Störschallquelle verursacht worden sind. Bei der Korrektur der Signale entstehen nun neben der Hauptkeule noch weitere Nebenkeulen, die aber durchaus ähnliche Amplituden aufweisen können und damit Mehrdeutigkeiten im Ergebnis aufzeigen. Bei Korrektur um eine halben Wellenlänge entsteht durch destruktive Interferenz eine Nullstelle worauf danach wieder das neue Maxima entsteht. Aus diesem Ansatz folgt die Gleichung (4.20) für die räumliche Abtastung.

$$d_{\min} < \frac{\lambda}{2} \quad (4.20)$$

Der räumliche Abstand zweier Mikrofon sollte demnach nicht größer sein als die halbe Wellenlänge der zu untersuchenden Schwingung. Zur Minimierung von diesen räumlichen Aliasing-Effekten wird nun versucht anhand der gewählten Mikrofonanordnung eine Grenzfrequenz zu berechnen und mit Hilfe eines digitalen Tiefpasses störende Frequenzen vor der räumlichen Abtastung zu filtern. Eine Abschätzung zur maximal aufzulösenden Frequenz folgt aus dem Ansatz aus Gleichung (4.20).

$$d_{\min} = \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad \text{mit} \quad \lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} \quad (4.21)$$

$$d_{\min} = \frac{c}{2 \cdot f_{\max}} \quad \rightarrow \quad f_{\max} = \frac{c}{2 \cdot d_{\min}} \quad (4.22)$$

Im Abschnitt 4.4.4 wurde bereits eine Funktion beschrieben, die zur Berechnung des Abstandes zweier Punkte dient. Diese Funktion wurde nun dazu genutzt, die Abstände zwischen den vier Mikrofonen zum Referenzmikrofon zu berechnen, um anschließend den maximalen Mikrofonabstand zu bestimmen. Für die am Rotorversuchsstand verwendete Anordnung, die im Abschnitt 6.1 noch behandelt wird, ergibt sich ein Abstand von $d_{\min} = 420,46\text{mm}$. Aus Gleichung (4.22) resultiert daraus eine Frequenz von $f_{\max} = 414,03\text{Hz}$, die als Durchlassfrequenz für das eingesetzte Filters verwendet wird. LabVIEW bietet bereits eine Vielzahl von Filtern an. Gesucht ist ein Tiefpassfilter mit einstellbarer Durchlassfrequenz. Zur räumlichen Abtastung ist es erforderlich, dass das Filter keine Signalverzerrung erzeugt. Daher sollte das Filter einen linearen Phasengang und somit eine konstante Gruppenlaufzeit besitzen. Mit diesen Spezifikationen kamen nur FIR-Filter infrage. Zur Konfiguration sind Filterspezifikationen, wie die Durch-

lassfrequenz und die Sperrfrequenzen, sowie die Verstärkungsfaktoren in diesen Bereichen anzugeben. Die je nach Flankensteilheit resultierende Filterordnung ist zusätzlich von der am Eingangssignal verwendeten Abtastfrequenz abhängig. Der Realisierungsaufwand fällt beim FIR-Filterdesign deutlich höher aus als bei vergleichbaren IIR-Filter. IIR-Filter liefern allerdings nicht die Linearitäts- und Stabilitätskriterien, die hier geben sein sollten. Da eine feste FIR-Filterstruktur für unterschiedlichste Eingangssignale nur schwer zu realisieren ist, wird zwischen zwei Eingangssignalen unterschieden. Die gewählten Filterspezifikationen sind aus Testmessungen entstanden und sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Filterspezifikationen Anti-Aliasing-Filter

f_a [kHz]	Durchlassfrequenz	DB-Verstärkung	Sperrfrequenz	SB-Verstärkung
0 - 100	f_{max}	20,00 dBm	$f_{max} + 200$ Hz	-30,00 dBm
100 - 200	f_{max}	20,00 dBm	$f_{max} + 400$ Hz	-30,00 dBm

Das zweite Filter dient als Bandpassfilter, das zur Selektion bestimmter Beobachtungsfrequenzen genutzt werden kann. Hier wurde, aufgrund des hohen Realisierungsaufwandes beim FIR-Filter, nun doch auf ein IIR-Filter gesetzt. Bei IIR-Filter besteht die Gefahr, infolge der rekursiven Struktur, dass Instabilitäten und Signalverzerrungen auftreten. Nach einem Vergleich verschiedener IIR-Filter ist das Bessel-Frequenzfilter das geeignete Filter für diesen Anwendungsbereich. Es weist zwar im Vergleich zu einem Tschebyscheff-Filter eine geringe Flankensteilheit auf, besitzt aber dafür im Durchlassbereich eine konstante Gruppenlaufzeit. Zum Einsatz kommt ein Filter dritter Ordnung, wobei die obere und untere Grenzfrequenz vom Anwender frei wählbar ist.

4.5.2 Korrektur der Signallaufzeiten

Im Anschluss wird nun eine Laufzeitkorrektur der Messdaten ausgeführt. Hierzu wird im ersten Schritt ein Fokuspunkt gewählt, zu dem dann die Laufzeitdifferenzen bestimmt werden. Als Anfangspunkt dient hier der am Funktionsaufruf übergebene Suchbereichsbeginn. Die Funktion zur Bestimmung der Laufzeitdifferenzen kann aus dem zuvor entwickelten Verfahren aus Abschnitt 4.4.4 direkt wieder übernommen werden. Auch hier dient das Mikrofon MP_0 als Referenzmikrofon. Nun wird aus dem Messdatensatz des Referenzmikrofons ein Zeitspalt extrahiert, der sich Mittig zu einem Beobachtungszeitpunkt befindet. Der Beobachtungszeitpunkt ist abhängig von der Position eines Schieberegler, der über die Benutzeroberfläche zu bedienen ist. Je nach aufgenommener Messdauer kann so die Störgeräuschentwicklung zeitlich verfolgt oder eine Mittelung über mehrere Zeitpunkte durchgeführt werden.

Der Zeitspalt der extrahiert wird, besitzt eine Länge von $1/(20\text{Hz} \cdot T_a)$ Samples, was einer Länge einer 20Hz Schwingung entspricht. Im Bezug zu diesem Messdatensatz wer-

den nun die Datensätze der weiteren Mikrofone, unter Beachtung der jeweiligen Laufzeitdifferenzen, extrahiert.

Anschließend werden diese Datensätze normiert, damit sich die Signale skaliert in einem Bereich von +1,0 bis -1,0 befinden. Die in LabVIEW implementierte Funktion bestimmt hierzu den Maximalwert aus dem Datenfeld und verwendet diesen als Skalierungsfaktor, um das Signal anzupassen. Die Normierung wird nach Gleichung (4.23) berechnet. Dabei ist m_p der vom Fokuspunkt \vec{x}_f abhängige, zeitlich korrigierte Messdatensatz.

$$m_{P_NORM}(\vec{x}_f, n) = \frac{m_p(\vec{x}_f, n) - M_{\text{Offset}}}{M_{\text{Skalierung}}} \quad (4.23)$$

Die korrigierten und normierten Datensätze der einzelnen Mikrofone werden nun summiert und abschließend, zur Anpassung des Summationssignals, durch die Anzahl der Mikrofone dividiert (Gleichung (4.24)).

$$m_{P_SUM}(\vec{x}_f, n) = \frac{1}{X} \sum_{x=0}^{X-1} m_{P_NORM_x}(\vec{x}_f, n) \quad (4.24)$$

In Abbildung 4.8 zur Veranschaulichung ist dieser Vorgang exemplarisch für zwei Mikrofon-signale abgebildet.

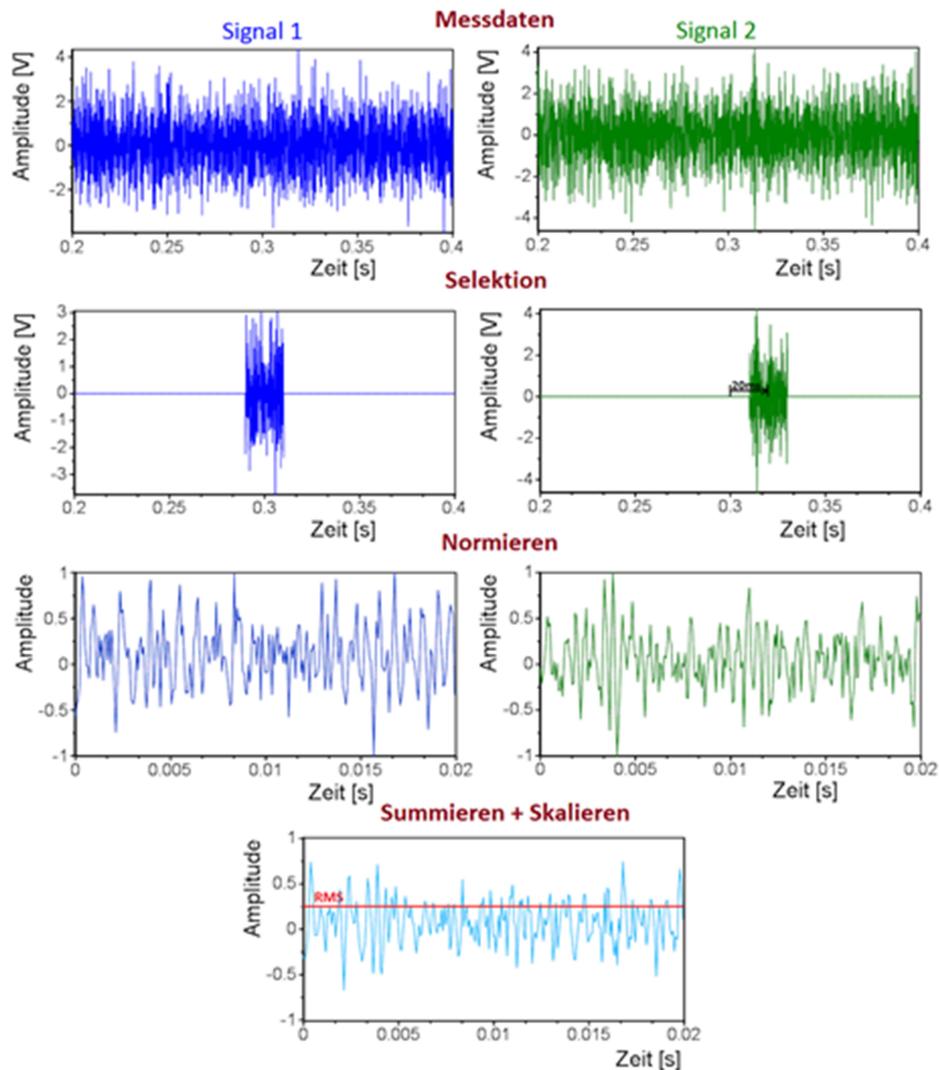


Abbildung 4.8: Ablauf des „Delay and sum“- Verfahrens

Je nach destruktiver und konstruktiver Interferenz ergibt sich ein unterschiedlich hoher Ausgangspegel im Summationssignal. Im Anschluss wird hierrüber noch der quadratische Mittelwert berechnet, der als Vergleichswert für die noch ausstehenden Fokuspunkte steht. Der gesamte Vorgang befindet sich in einer doppelten Programmschleife, womit nun für jeden Fokuspunkt in der x - und y -Ebene die Messergebnisse berechnet werden. Der quadratische Mittelwert und das Summationssignal werden in einem Datenfeld abgelegt und beim Funktionsabschluss ausgegeben. Des Weiteren kann nun ein Geräuschbild erstellt und ausgegeben werden, dass zu jedem abgetasteten Raumpunkt den Effektivwert abbildet. Abschließend wird noch der Koordinatenpunkt ausgegeben, an dem der quadratische Mittelwert sein Maximum erreicht. Dieser Punkt spiegelt die höchst auftretende konstruktive Interferenz und damit den höchsten Störquellenanteil wieder.

Ein vereinfachter Teilausschnitt der Programmschleifen ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

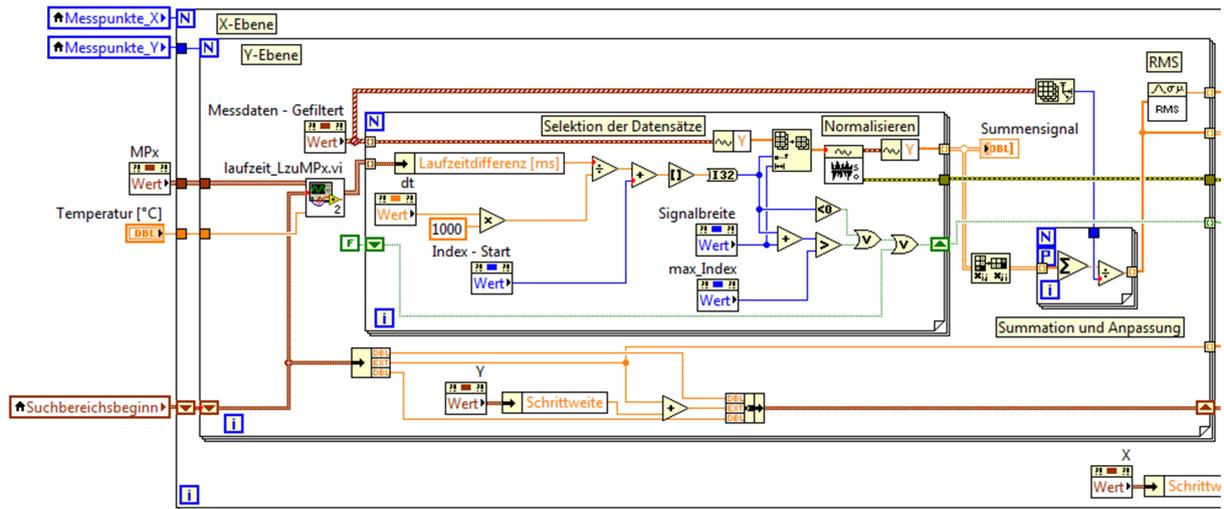


Abbildung 4.9: Programmausschnitt des „Delay and sum“- Verfahrens

Alternativ zur Normierung des Signalverlaufs kann auch der Einfluss der Ausbreitungsentfernung für Kugelwellen hinzugenommen werden. Damit wird das Signal nicht nur zeitlich, sondern auch in der Amplitude korrigiert. Hierzu dient der Ansatz aus [13] S. 378, der dazu verwendet wurde die Gleichung (4.24) anzupassen:

$$m_{P_SUM_AMP}(\vec{x}_f, n) = \frac{1}{X} \sum_{x=0}^{X-1} m_{P_x}(\vec{x}_f, n) \cdot w_x \cdot \frac{r_{fm}}{r_{ref}} \quad (4.25)$$

Dabei ist r_{fm} der Abstand des Mikrofons zum Fokuspunkt und r_{ref} eine Referenzentfernung, die nur dazu dient die Amplitude zu normieren. Der Parameter r_{ref} wurde hier auf den Wert der z-Ebene gesetzt, der den Abstand zur Fokusebene widerspiegelt. Der Parameter w_x ist eine Gewichtsfolge, mit dem die einzelnen Mikrofonsignale unterschiedlich stark gewichtet werden können. Hiermit wird versucht, ähnlich wie beim Prinzip der Fensterung, entstandene Sidelobes zu unterdrücken. Weitere Informationen hierzu stehen auf [13] S.374.

Beim Funktionsstart entscheidet ein boolescher Eingangsparameter ob die Normierung oder die Amplitudenanpassung durchgeführt wird.

Von der Struktur zeigen sich viele Analogien zum Korrelationsverfahren. Auch hier werden die Signale zueinander verschoben, um eine Beziehung zwischen den Signalen zu suchen. Die Verschiebung der Signale zueinander, zur Korrektur der Signallaufzeiten, ist auch hier je nach Höhe der Laufzeit, ein Vielfaches der Abtastperiode T_a . Daher sind die Genauigkeitsbetrachtungen auch identisch. Ebenfalls wäre hier eine Erhöhung der Abtastfrequenz oder eine Interpolation praktikabel, was aber wiederum mit einem noch höheren Rechenaufwand verbunden wäre.

4.6 Bewertung der Störquellenortung

Zur Bewertung des Messverfahrens diente ein einfacher Testaufbau mit einer mobilen Störschallquelle ($\approx 50\text{mW}$), die auf eine Frequenz von 1kHz eingestellt wurde. Die Störschallquelle wurde an vordefinierten Positionen plaziert und hierzu die Messdaten aufgenommen. Diese Messdaten sind auch auf der beigelegten CD hinterlegt. Der Testaufbau ist zusammen mit den Koordianten $(x; y; z)$ in Abbildung 4.10 dargestellt. Die Mikrofoneanordnung gleicht dabei der, die am Rotorversuchsstand eingesetzt wurde.

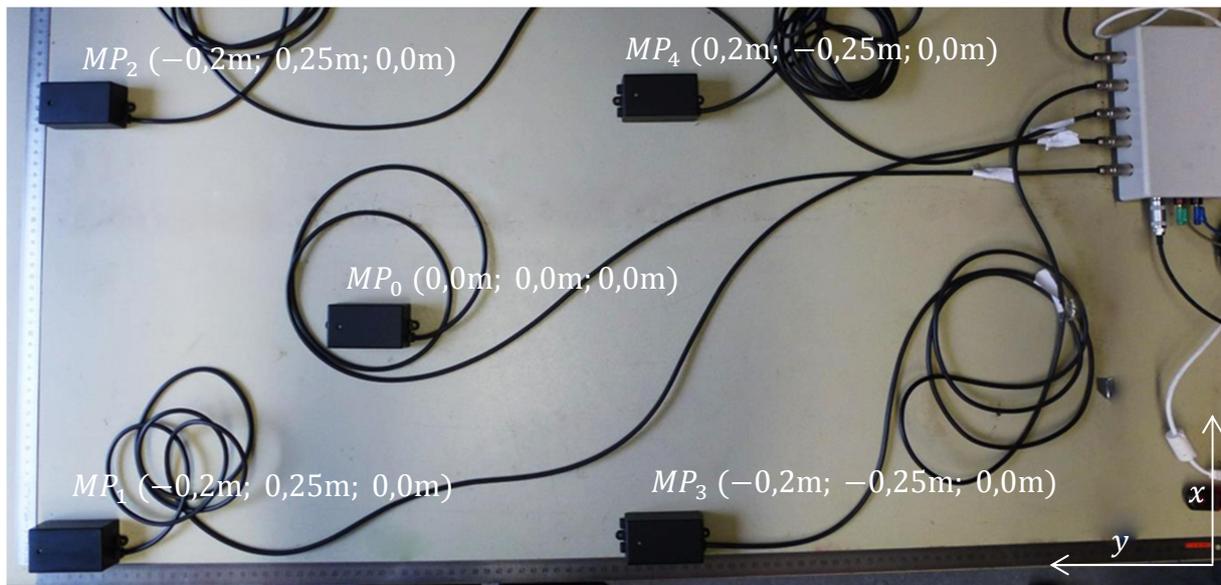


Abbildung 4.10: Testaufbau zur Störquellenortung

Anhand dieser Testmessung wurden einige Probleme ersichtlich, die innerhalb der Simulationen noch unentdeckt blieben. Die hier entwickelten Verfahren haben eine Eigenschaft gemeinsam. Aufgrund auftretender Phasensprünge, bei nichtbeachtung des räumlichen Abtasttheorems, ist nicht immer eine sichere Aussage über die Störquellenposition möglich. Bei Einhaltung des räumlichen Abtastkriteriums ist es aber mit allen Verfahren durchaus möglich präzise Positionsangaben zu machen, beziehungsweise Bereiche zu spezifizieren.

Eine Testmessung für die Position $(0,0\text{m}; 0,125\text{m}; 0,43\text{m})$ wurde in Tabelle 4.2 dargestellt. Bei dieser Messung wurde das räumliche Abtasttheorem bis zur Grenze ausgereizt und noch knapp eingehalten.

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Testmessung an der Position $(0,0\text{m}; 0,125\text{m}; 0,43\text{m})$

Verfahren	Gemessene Position	Absolute Abweichung
Delay-and-sum	-0,01m; 0,15m; 0,43m	-0,01m; 0,025m; 0,00m
Phasenmessung	0,005m; 0,174m; 0,55m	0,005m; 0,049m; 0,12m
Kreuzkorrelation	0,012; 0,16m; 0,55m	0,01m; 0,035m; 0,12m
Kombination	0,005m; 0,174m; 0,55m	0,005m; 0,049m; 0,12m

In Abbildung 4.11 wurde dazu die Testmessung am Beispiel des „Delay and sum“-Verfahrens geplottet.

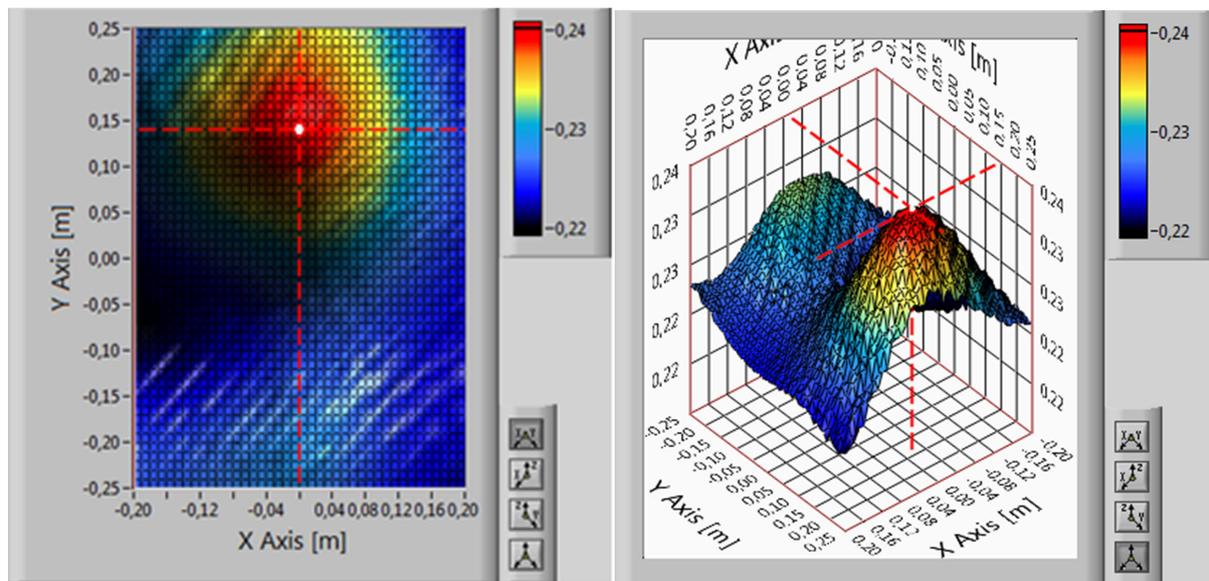


Abbildung 4.11: Geräuschbild des „Delay and sum“-Verfahrens

Bei der Analyse mehrerer Testmessungen wiesen die entwickelten Verfahren Abweichungen von wenigen Zentimetern zur voreingestellten Störquelle auf. Dabei wurde festgestellt, dass die räumliche Auflösung maßgeblich mit dem Abstand der Schallquelle zum Mikrofonarray zusammenhängt. Anschaulich lässt sich dieser Effekt anhand einer Grenzbetrachtung erklären. Bei einer unendlich weit entfernten Schallquelle würde die Laufzeitdifferenz zwischen den Mikrofonen gegen Null konvergieren. Das heißt bei steigender Entfernung der Schallquelle nimmt die Auflösung merklich ab. Die Auflösung ist demnach maßgeblich von der Entfernung, aber analog dazu auch von der Frequenz der Schallquelle abhängig. Genau entgegengesetzt hierzu verhält sich das räumliche Abtasttheorem. Damit die entstehenden Laufzeitdifferenzen nicht höher als eine halbe Wellenlänge der Störfrequenz ausfallen, sind hier niederfrequente Störschallquellen mit großen Abständen geeignet. Es ist demnach ein Kompromiss nötig zwischen der Erkennung möglichst vieler benachbarter Störschallquellen und der Einhaltung des Abtasttheorems.

Bei den beiden Korrelationsverfahren wurden erhebliche Schwächen in der Dedektion der Laufzeiten festgestellt. Neben den Hauptmaxima, wie bereits am Si-Verlauf aus Abbildung 4.4 zusehen, bilden sich vergleichbar hohe Maximas im Umfeld aus. Dagegen können Laufzeiten, verursacht von einmalig auftretenden Implusen, ohne Probleme bestimmt werden. Daher ist das Verfahren für nahezu periodischen Signalverlauf nur bedingt zu gebrauchen.

Aber auch die im Vorfeld erfassten Testmessungen sind nicht mit einer realen Messung am Rotorversuchsstand vergleichbar. Da erwiesen sich die Verfahren der Störquellenortung anhand der Laufzeitmessungen als zu unzuverlässig. Das Problem

besteht darin, dass das aufgenommene Signalgemisch aus einer Vielzahl von Frequenzen, mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Störschallquellen besteht. Hinzu kommt noch, dass die Zahneingriffsfrequenz beider Zahnräder, unabhängig von der Rotordrehzahl, identisch sind. Daher kann eine gegenseitige Beeinflussung im Phasenspektrum nicht ausgeschlossen werden. Für die Messumgebung sind diese Verfahren ungeeignet und eignen sich ausschließlich, wenn die zu untersuchenden Störschallquellen klar unterscheidbare Frequenzen aufweisen. Daher wurden weitere Optimierungsmaßnahmen für diese Verfahren eingestellt und das „Delay and sum“-Verfahren entwickelt.

Ein Vorteil des „Delay and sum“-Verfahrens zeigte sich gegenüber den zuvor entwickelten Verfahren sehr anschaulich. Bei nicht Beachtung des räumlichen Abtasttheorems entstehen im Geräuschbild mehrere Sidelobes zu dem die Geräuschquelle zugeordnet werden kann. Diese Sidelobes zeigen sich bereits bei der Testmessung aus Abbildung 4.11, die sich im unteren Bereich ausbilden. Das Ergebnis kann zwar nun Mehrdeutigkeiten aufweisen, führt aber nicht zwangsläufig zu Fehlinterpretationen des Geräuschbildes. Bei den Verfahren mittels Laufzeitbestimmung wird im Vergleich nur eine Laufzeitverschiebung betrachtet und zu der die Störschallquelle berechnet. Hier ist es nun so, dass für jeden dieser Fokuspunkte ein Ergebnis der Störschallintensität vorliegt, aber verfälscht sein kann aufgrund des räumlichen Aliasings. Der Rechenaufwand ist allerdings im Vergleich zu den anderen Verfahren auch am Höchsten. Eine Störquellenortung in Echtzeit ist hiermit nur sehr schwer zu realisieren und bedarf hier noch viel Optimierungsaufwand und Rechner mit hoher Rechenleistung.

Eine gleichzeitige Korrektur der Amplitude wurde in der Testmessung und in der noch folgenden Versuchsmessung aus Abschnitt 7.2 nicht mit aufgezeichnet. Die Laufzeitkorrektur der normierten Amplitudenverläufe zeigten in den Testmessungen eindeutiger Ergebnisse. Hier wird im Vergleich zur Amplitudenanpassung nur der Signalverlauf zur Störquellenortung hinzugenommen. Die Amplitudenanpassung hingegen ist stark davon abhängig aus welcher Richtung der Schall auf die Mikrofone eintritt und wie stark die auftretenden Reflexionen sind.

5 Aufbau der Analysesoftware

Zu entwickeln ist ein Programm, das die Mikrofonssignale während eines Rotorversuchstest aufnimmt und vorerst sichert, damit überhaupt Nachuntersuchungen angestellt werden können. Das Programm sollte zusätzlich eine Übersicht über das Frequenzspektrum bereitstellen und zumindest innerhalb der Nachuntersuchungen die Möglichkeit bieten eine Störquellenortung durchzuführen. Dazu gehört nicht nur die Positionsangabe relativ zu einem Referenzpunkt, sondern auch eine Visualisierung der aufgenommenen Umgebung anhand verschiedener Grafiken. Das fertige Programm sollte letztendlich auch benutzerfreundlich und möglichst selbsterklärend sein.

Das abgeschlossene Projekt besteht aus zwei Programmteilen. Ein Programmteil dient zur Aufnahme der Messdaten und das zweite für Nachuntersuchungen, um die gesicherten Daten auszulesen und auszuwerten. Beide Programmteile bieten bereits schon die Funktionalität der Störquellenortung. Beim Vergleich der beiden Programmfunktionen sind bei der Benutzeroberfläche sowie in der Programmstruktur viele Gemeinsamkeiten zu erkennen. Sie sind überwiegend aus den selben Funktionsblöcken zusammengesetzt und nur auf ihrem speziellen Einsatzgebiet hin ausgerichtet.

Im nächsten Abschnitt wird die Installation der Analysesoftware näher erläutert, wonach ein Programmstart ausgeführt werden kann. Darauf folgt eine Beschreibung der Bedienung und des Aufbaus der Analysesoftware.

5.1 Installation

Die Installation der Analysesoftware erfolgt über einen Setupassistent nach Ausführen der „setup.exe“, die sich auf der beigelegten CD befinden. Zu Beginn ist, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, das Zielverzeichnis zu wählen, in dem die Installation ausgeführt werden soll. Hier wird zusätzlich ein Installationspfad für National Instruments angegeben. Darin werden die Installationsdateien der LabVIEW Bibliotheken abgelegt, damit eine Installation der LabVIEW Entwicklungsumgebung nicht mehr vorausgesetzt wird. Somit ist das Programm ohne weitere Installationen auf allen Windows Rechnern, ab der Version von Windows XP, ausführbar. Für das Messsystem sind allerdings zusätzlich die Gerätetreiber erforderlich, die unter [9] zu finden sind.

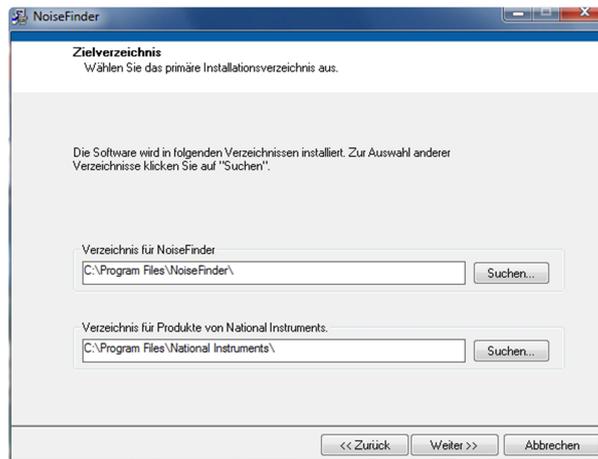


Abbildung 5.1: Setupassistent – Auswahl des Zielverzeichnisses

Nach Akzeptieren der Lizenzvereinbarungen von National Instruments startet die Installation (Abbildung 5.2). Bei einer erfolgreichen Installation ist ein Neustart des Rechners empfehlenswert, da sonst die installierten Gerätetreiber nicht korrekt erkannt werden könnten.

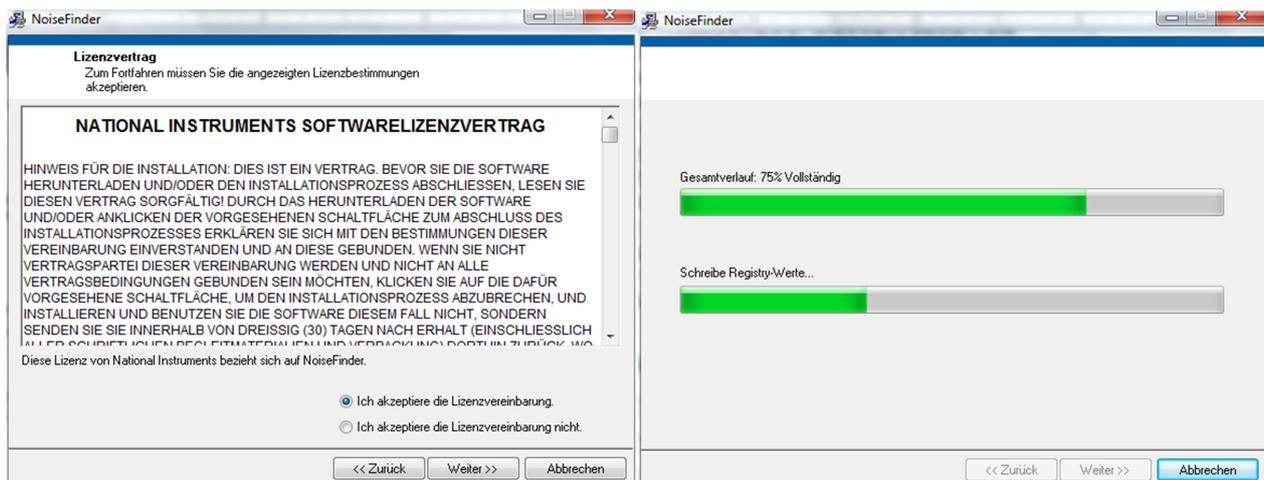


Abbildung 5.2: Setupassistent – Lizenzvereinbarungen / Installation

Nach Abschluss der Installation kann das Programm über den Desktop Icon oder im Startmenü unter „Programme/NoiseFinder/NoiseFinder.exe“ aufgerufen werden.

5.2 Programmstart

Nach Aufruf der Applikation öffnen sich als erstes das Hauptmenü aus Abbildung 5.3. Hier stehen drei Menüpunkte zur Auswahl. Beim ersten Menüpunkt startet der Programmteil zur Aufnahme der Mikrofonmessdaten. Beim zweiten können die aufgenommenen Messdaten geladen und weiter analysiert werden. Die dritte Option schließt die Anwendung wieder.

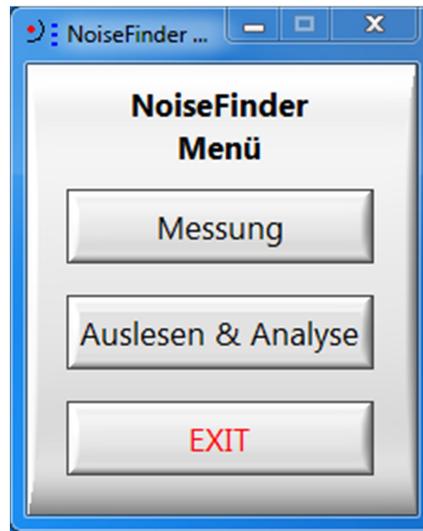


Abbildung 5.3: Noise Finder Menü

5.3 Programmteil – Messung

Nach Aufruf des ersten Menüpunkts startet der Programmteil für die Messung. Im Reiter des oberen Fensterbereichs wird zwischen den drei Bereichen „Messung“, „Geräuschornung“ und „Messsystem“ unterschieden. Der Eintrag „Menü“, der sich rechts davon befindet, wechselt wieder zurück zum Hauptmenü.

5.3.1 Registerkarte - Messsystem

Vor Beginn der Messung muss die Messhardware konfiguriert werden. Die Konfiguration geschieht mit der dritten Registerkarte „Messsystem“. Hierzu ist allerdings die Messhardware zuvor anzuschließen und einzuschalten.

Zur besseren Übersicht wurden die einzelnen Bedienfenster, innerhalb der Grafik in Abbildung 5.4 in Bereiche unterteilt, die nachfolgend erläutert werden.

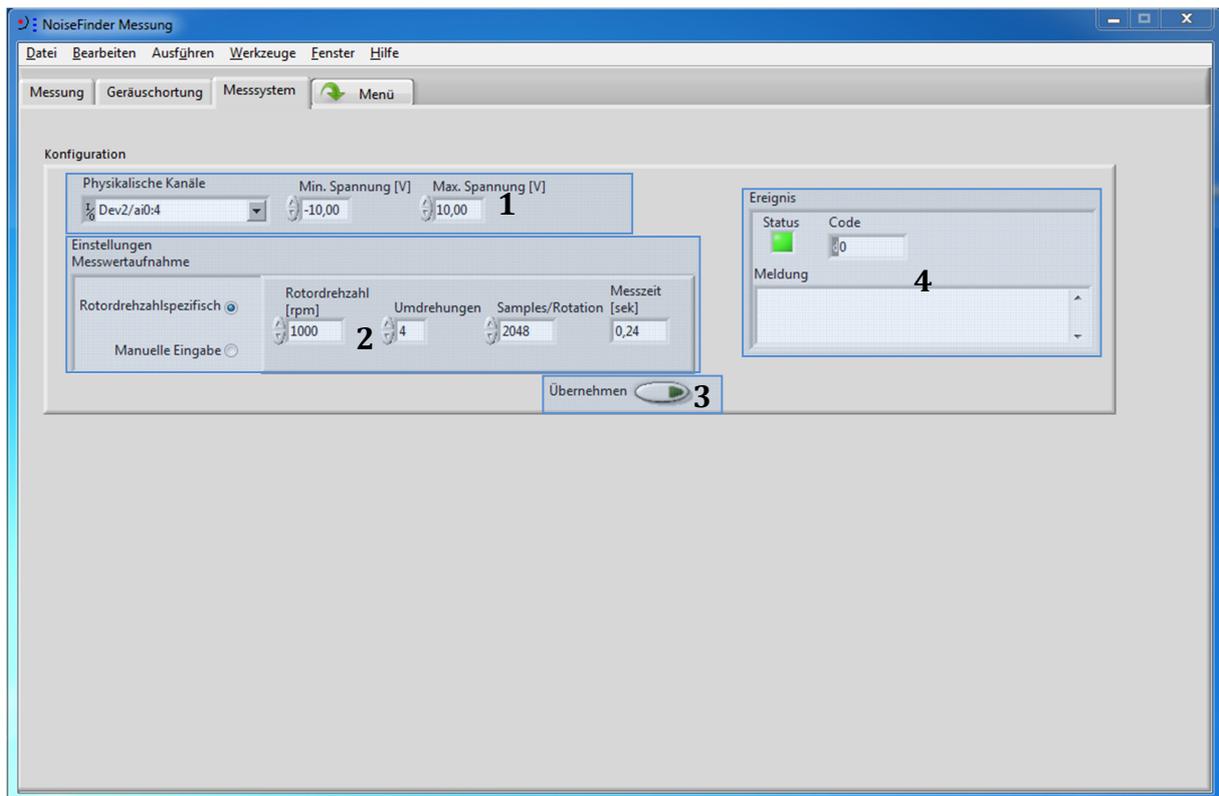


Abbildung 5.4: Registerkarte - Messsystem

Bereich 1: Nach Anschluss des Messsystems kann nun unter „Physikalische Kanäle“ die Messhardware und die Messkanäle ausgewählt werden. Für die Störquellenortung werden insgesamt fünf Messkanäle abgefragt, es ist aber durchaus auch möglich weitere Messkanäle hinzu zunehmen. Der Spannungsbereich ist auf -10V bis +10V vorkonfiguriert.

Bereich 2: Hier sind anschließend die Abtastfrequenz und die Messdauer zu wählen. Diese Angaben können zum einem über die Auswahl „Manuelle Eingabe“, wie es in Abbildung 5.5 dargestellt ist, gemacht werden oder über den ersten Menüpunkt rotordrehzahlspezifisch. Bei der zuletzt genannten Option kann für die eingestellte Rotordrehzahl eine konstante Anzahl an Abtastwerten gewählt werden. Das hat den Vorteil, dass auch bei höheren Drehzahlen, die auftretenden höher frequenten akustischen Signale optimal aufgelöst sind. Die daraus resultierende Messzeit ist, in der jeweiligen Option, auf der rechten Seite abgebildet.

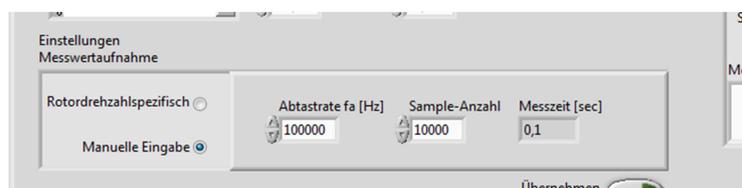


Abbildung 5.5: Manuelle Konfiguration der Messhardware

Bereich 3: Die gesamten Einstellungen sind anschließend mit dem Button mit der Bezeichnung „Übernehmen“ der Messhardware zu übermitteln.

Bereich 4: Ist die Messhardware korrekt erkannt und konfiguriert geht die Statusanzeige auf grün und die Messung ist aktiv. Andernfalls kann anhand des Fehler-Codes und der darunter stehenden Meldung der Fehler analysiert und behoben werden.

5.3.2 Registerkarte - Messung

Nach erfolgreicher Konfiguration der Messhardware kann nun zur Registerkarte „Messung“ gewechselt werden und es erscheint die in Abbildung 5.6 dargestellte Benutzeroberfläche.

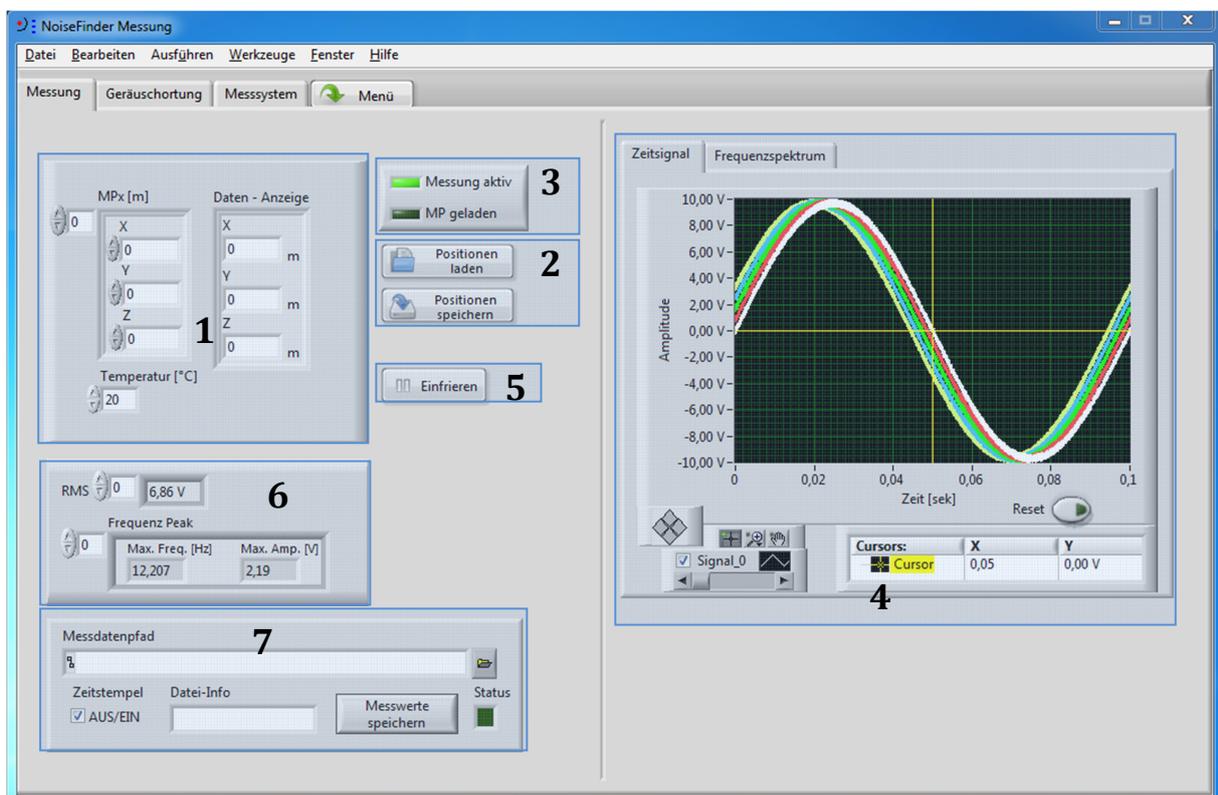


Abbildung 5.6: Registerkarte - Messung

Bereich 1: In diesem Feld sind die Mikrofonpositionen relativ zum Referenzmikrofon mit Index 0 in Metern anzugeben. Das Referenzmikrofon sollte hier mit den Koordinaten [0; 0; 0] als Bezugspunkt gewählt werden. Prinzipiell kann der Koordinatenursprung beliebig gewählt werden, aber aus Sicht des Referenzmikrofons ist die Denkweise deutlich überschaubarer. Der aktuelle Index für das jeweilige Mikrofon wird oben links angezeigt und kann über die Pfeilbedienelemente ausgewählt werden.

In der Anzeige im rechten Bereich werden diese Angaben nochmals zusammengefasst. Für die Störquellenortung ist hier noch die Temperatur im Ausbreitungsmedium anzu-

geben. Diese Angabe dient zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit für die Störquellenortung.

Bereich 2: Die Positionsangaben der Mikrofone können auch mit Hilfe des Buttons „Positionen laden“ abgesichert und über „Positionen speichern“ auch wieder geladen werden, womit eine manuelle Eingabe umgangen werden kann. Nach betätigen des ersten Buttons öffnet sich eine File-Dialog, der zur Auswahl der Konfigurationsdatei dient.

Bereich 3: Beim erfolgreichen Laden der Positionsdaten wechselt die Anzeige „MP geladen“ auf grün und die Daten werden nach Bereich 1 übernommen.

Bereich 4: Bei aktiver Messung können hier nun die aktuellen Messdaten betrachtet werden. Dieser Bereich teilt sich in drei Registerkarten auf. Die erste Registerkarte gibt einen Einblick in die Zeitsignale. Der gelb markierte Cursor kann per Drag and Drop direkt innerhalb der Grafik verschoben oder in der darunter befindlichen Cursor-Legende auf einen speziellen Wert eingestellt werden. Über die Grafik-Palette, die sich links unten befindet, kann beispielsweise über das „Lupen“-Werkzeug ein bestimmter Bereich zur genaueren Untersuchung aufgezoomt werden. Der „Reset“-Button, der sich direkt unter der Anzeige befindet, ermöglicht das Zurücksetzen der aktuellen Ansicht. Die dargestellten Signale lassen sich mit Hilfe des Schiebereglers, im Bereich unten links, einzeln hinzu- und abschalten.

Die zweite Registerkarte „Frequenzspektrum“ ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

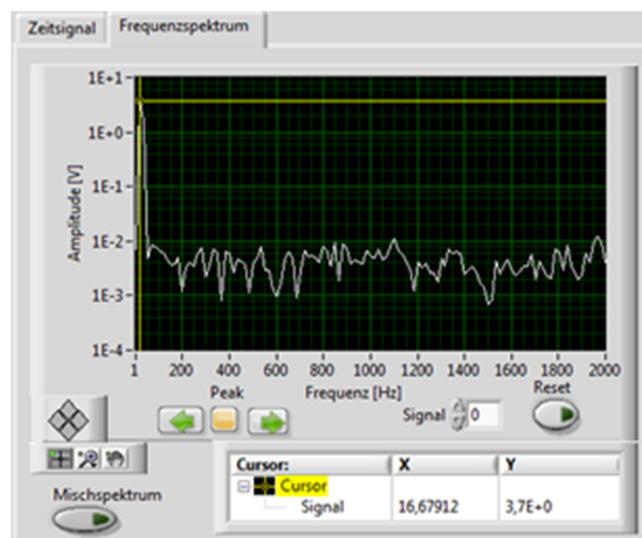


Abbildung 5.7: Manuelle Konfiguration der Messhardware

Hier ist das einseitige Betragsfrequenzspektrum des Zeitsignals zusehen. Das Frequenzspektrum kann mit Hilfe der Cursorfunktion untersucht werden. Die Bedienung des Cursors ist identisch mit dem des Zeitsignals. Erweitert wurde die Bedienung mit einer Peak-Funktion mit der ein Maximum im Spektrum verfolgt werden kann. Bei aktivem „Peak“-Button ist es möglich, mit Hilfe der Pfeiltasten zwischen den einzelnen Peaks durchzuschalten. Der deaktivierte Button ermöglicht das Durchschreiten des Frequenz-

spektrums in der kleinstmöglichen Schrittweite. Zwischen den Frequenzspektren der einzelnen Mikrofone kann mit dem Auswahlbutton „Signal“ gewechselt werden. Es ist auch möglich mit Hilfe des Buttons „Mischspektrum“ die gesamten Spektren arithmetisch zu mitteln, um so einen allgemeinen Überblick über das akustische Geräuschkennlinien zu bekommen. Dabei sollte allerdings beachtet werden, dass die verwendeten Mikrofone vom Aufbau, wie auch vom Ausgangspegel vergleichbar sind. Mit dem „Reset“-Button ist die Ansicht, falls erforderlich, wieder zurückzusetzen.

Bereich 5: Der Button „Einfrieren“ pausiert die Messwertaufnahme, damit die aktuellen Ergebnisse in Ruhe betrachten und gesichert werden können.

Bereich 6: Hier können Kennwerte wie der Effektivwert oder die maximale Frequenzkomponente für das jeweilige Mikrofonmesssignal abgelesen werden.

Bereich 7: Zur Sicherung der Mikrofonmessdaten muss zuvor der Messdatenpfad angegeben werden. Die beiden Eingabefelder für „Zeitstempel“ sowie die „Datei-Info“ dienen ausschließlich dazu den Ordner zu beschreiben, in dem die Messdaten abgelegt werden. Hier kann beispielsweise die aktuelle Rotordrehzahl angegeben werden. Der Dateiname setzt sich je nach Option wie folgt zusammen:

Messdaten_*[Tag]*-*[Monat]*-*[Jahr]*_*[Stunden]*-*[Minuten]*_*[Datei-Info]*

Das eigentliche Abspeichern der Messdaten geschieht über den „Signal-Speichern“-Button. Die Mikrofonsignale werden separat mit der Dateibezeichnung „mp0.lvm“ bis „mp4.lvm“, für das Beispiel mit fünf Mikrofonen, im Messdatenordner abgelegt. Das Format mit der Dateierweiterung „.lvm“ ist ein LabVIEW spezifisches Format, das allerdings auf einer normalen ASCII-Textdatei basiert. Somit kann diese Datei auch mit einem beliebigen Texteditor geöffnet und ausgelesen werden. Innerhalb der Auswertung wurden beispielsweise die Messdaten mit dem Analyseprogramm NI DIAdem eingelesen und dort weiter analysiert. Dieses Dateiformat besitzt eine von LabVIEW vorgeschriebene Formatierung, die allerdings vorwiegend selbsterklärend ist. Weitere Informationen hierzu stehen auf der National Instruments Homepage unter [15] – „*Specification for the LabVIEW Measurement File (.lvm)*“ beschrieben. Zusätzlich werden noch zwei weitere Textdateien angelegt, die aber für den Anwender keine größere Bedeutung haben. Hier sind die vom Benutzer getätigten Einstellungen, für Positionen der Mikrofone und für die Störquellenortung, wiederzufinden. Damit bleiben die aktuellen Einstellungen beim erneuten Laden der Messdaten erhalten und eine Eingabe wird hierdurch erspart. Die Status-Anzeige spiegelt den Speicherstatus wieder. Es sind drei Farbcodes zu beachten. Grün: „Speichern erfolgreich“, Rot: „Inkorrekter Messdatenpfad“, Gelb: „Speicherfehler“.

5.3.3 Registerkarte - Geräuschortung

Nach Konfiguration der Messhardware und Angabe der Mikrofonpositionen kann nun zur Registerkarte „Geräuschortung“ gewechselt werden (Abbildung 5.8).

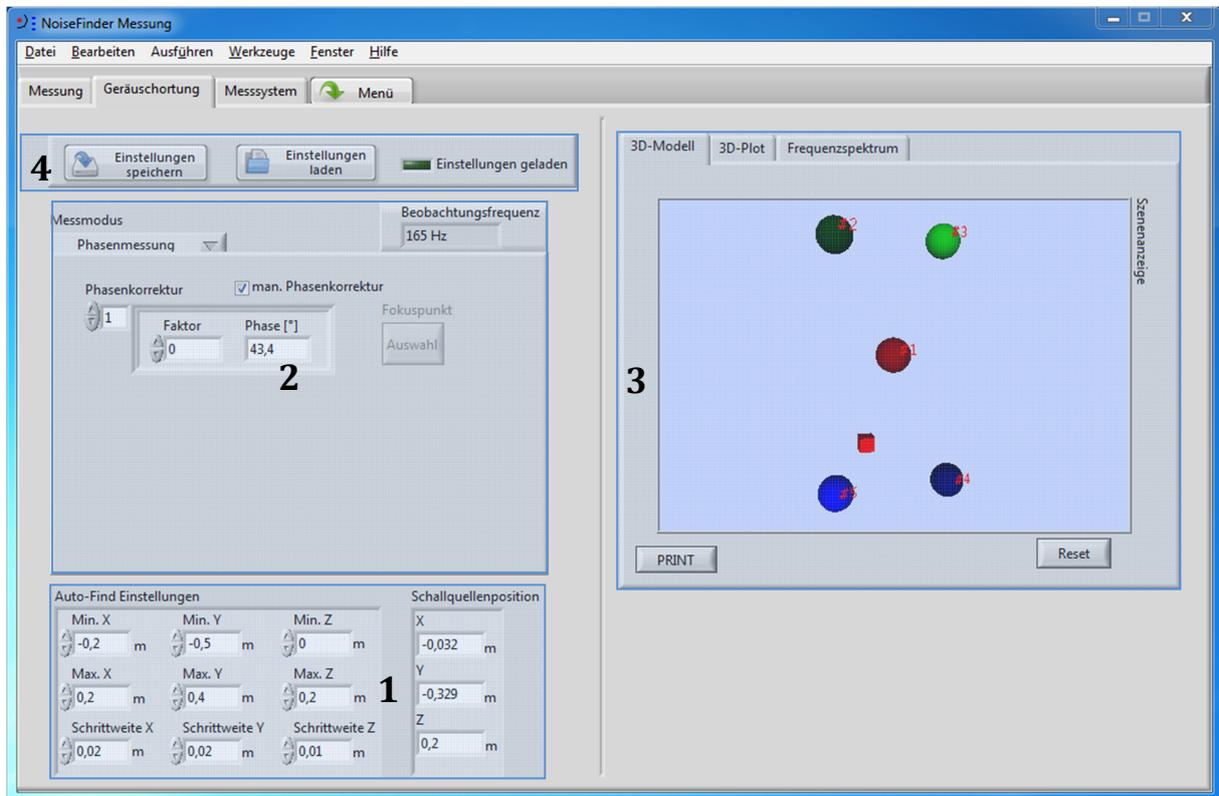


Abbildung 5.8: Registerkarte - Geräuschortung

Bereich 1: Zur Störquellenortung ist ein Suchbereich anzugeben, relativ zum gesetzten Koordinatenursprung, in dem die Schallquelle gesucht wird. Abhängig vom gewählten Messmodus im Bereich 2 wird anschließend, anhand der gegebenen Schrittweite, der angegebene Bereich abgetastet. Nach Abschluss des Suchvorgangs werden im rechten Feld die Koordinaten der Schallquelle angegeben. Für den Messmodus „Delay and sum“ sind die Angaben für die z-Ebene nicht erforderlich, da hier die Ebenen gesondert betrachtet wird.

Bereich 2: Mit Hilfe des Pfeil-Symbols am oberen Rand öffnet sich eine Auswahlliste der verschiedenen Messmodi. Die Funktionsweise der verschiedenen Messmodi zur Störquellenortung wurden bereits im Abschnitt 3 beschrieben. Abhängig vom gewählten Menüpunkt der Auswahlliste ändert sich das Konfigurationsfenster. Die verschiedenen Konfigurationsfenster sind in Abbildung 5.9 und Abbildung 5.11 dargestellt.

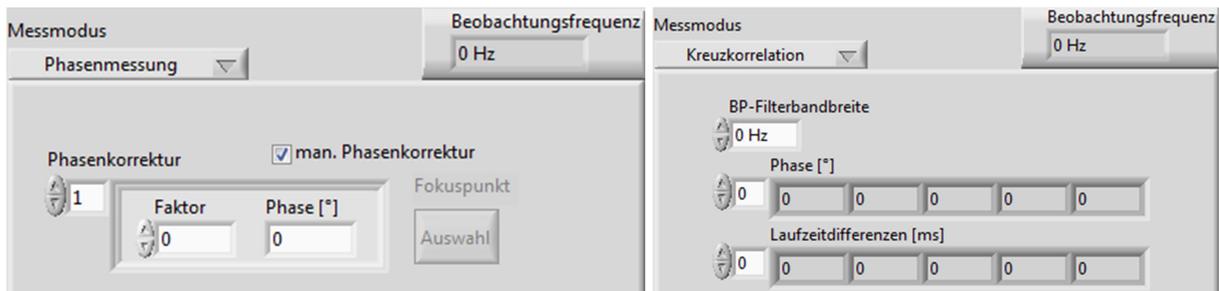


Abbildung 5.9: Messmodus Phasenmessung/Kreuzkorrelation

Der Messmodus „Phasenmessung“ berechnet mittels einer Fourier-Transformation die Phasenbeziehungen zwischen den Mikrofonsignalen und bestimmt anhand der Beobachtungsfrequenz die aktuellen Laufzeiten. Die Beobachtungsfrequenz wird im Bereich 3 innerhalb des Frequenzspektrums gewählt. Die aktuelle Frequenz wird im Bereich 2 oben rechts angezeigt.

Mögliche Phasensprünge können über den Korrekturfaktor für jedes Mikrofon ausgeglichen werden. Das Ergebnis aus Korrekturfaktor und gemessener Phase wird im rechten Feld für jedes Mikrofon angezeigt. Für die automatische Phasenkorrektur muss der Haken bei „man. Phasenkorrektur“ entfernt werden. Der noch grau hinterlegte Button namens „Fokuspunkt“ wird nun aktiviert. Beim ersten Aufruf und beim Betätigen des Buttons wird nun das Fenster aus Abbildung 5.10 geöffnet. In der Szeneanzeige des Fensters ist die aktuelle Anordnung zusammen mit der geschätzten Schallquelle zusehen. Die Positionsschätzung der Schallquelle ist unter „L geschätzt“ rechts von der Szeneanzeige anzugeben. Das Fenster kann nach Wahl der Phasenkorrektur wieder geschlossen werden.

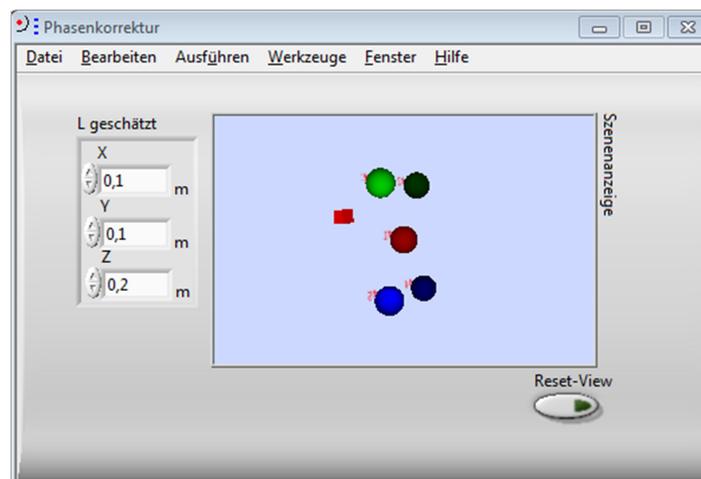


Abbildung 5.10: Automatische Laufzeitkorrektur

Der Messmodus „Kreuzkorrelation“ bestimmt die Laufzeitunterschiede anhand der Korrelation zweier Signale. Angezeigt werden die gemessenen Phasenangaben, sowie Laufzeitdifferenzen im Bezug zum Referenzmikrofon MP_0 . Hier erfolgt auch die Angabe zur Filterbandbreite des Bandpassfilters, zur Selektion der Beobachtungsfrequenz. Wird die

Filterbandbreite auf null gesetzt ist das Filter inaktiv. Der Messmodus „Kombination“ ist hierzu identisch aufgebaut.

Das Konfigurationsfenster zum „Delay and sum“-Messmodus ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Mit dem Schieberegler im oberen Bereich ist der Messzeitpunkt zu wählen, der aus den Messdatensatz untersucht wird. Rechts davon ist der Abstand Z anzugeben, der als Fokussierungsebene für die Störquellenortung dient. In der nächsten Zeile sind die Filtereinstellungen zu wählen. Das Bandpassfilter kann über die obere- und untere Grenzfrequenz eingestellt werden. Eine Zeile weiter kann eine Mittelung über mehrere Messzeitpunkte erfolgen. Die Funktion ist über das Kontrollkästchen zu aktivieren und anschließend eine Schrittweite anzugeben, mit der das Messsignal durchfahren wird. Die Amplitudenbewertung ist in der letzten Zeile wiederzufinden. Neben den Kontrollkästchen zur Aktivierung der Funktion können die Korrekturfaktoren für jedes Mikrofon dazu genutzt werden die Amplitudenbewertung anzupassen.

Da dieses Verfahren mit Abstand am rechenintensivsten ist, wurde hier von einer kontinuierlichen Berechnung abgesehen, da sonst der Programmfluss merklich stockt. Die Berechnung ist über den „Start“-Schalter in der rechten Ecke zu aktivieren.



Abbildung 5.11: Messmodus – „Delay and sum“

Bereich 3: Nach dem Berechnungsvorgang zur Störquellenortung können die Ergebnisse in diesem Bereich analysiert werden. Die Szeneanzeige bietet eine gute Möglichkeit die Mikrofonanordnung zu überprüfen und einen ersten Eindruck davon zubekommen, an welcher Position die Schallquelle sich befindet. Die Mikrofone sind in dieser Grafik als Kugeln dargestellt und jeweils mit einem Index versehen. Der rote quadratische Würfel stellt die Schallquelle dar. Per Drag & Drop kann mit der Maus die Ansicht gedreht werden. Bei gedrückter „Shift“-Taste ist es außerdem möglich die Ansicht zu vergrößern und zu verkleinern. Mit gedrückter „Strg“-Taste ist die Ansicht zu verschieben. Der „Re-

set“- Button, der sich unterhalb der Szeneanzeige befindet, ermöglicht ein zurücksetzen der aktuellen Ansicht.

Eine weitere Visualisierung liefert die Registerkarte „3D Plot“ die, vergleichbar mit einem Wärmebild, anzeigt in welchem Bereich sich die Schallquelle befindet. Ein Plot einer Testmessung ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Die xy -Achse stellt den Suchbezirk in x - und y -Ebene dar. Die Bedeutung für die z -Ebene ist je nach Messmodus unterschiedlich. Im Messmodus „Delay and sum“ wird hier der Effektivwert des Summationssignals abgebildet. Die Bereiche mit den höchsten Effektivwerten weisen auf die gefundene Schallquelle hin. Im Messmodus „Phasenmessung“, „Kreuzkorrelation“ und „Kombination“ wird hier die Übereinstimmung aus gemessenen und berechneten Laufzeitdifferenz abgebildet. Je höher diese Übereinstimmung ausfällt, desto mehr konvergiert der resultierende Wert gegen Null. Das heißt, im Vergleich zum „Delay and sum“- Verfahren, weist hier das Minimum auf die gefundene Schallquelle hin. Die Cursorfunktion und der farblich rot markierte Bereich zeigen, unabhängig vom gewählten Messmodus, den Bereich des Schallquellenereignisses an.

Mit den Symbolen unten rechts im Plot-Fenster kann von einer zweidimensionalen bis hin zur dreidimensionalen Ansicht durchgeschaltet werden.

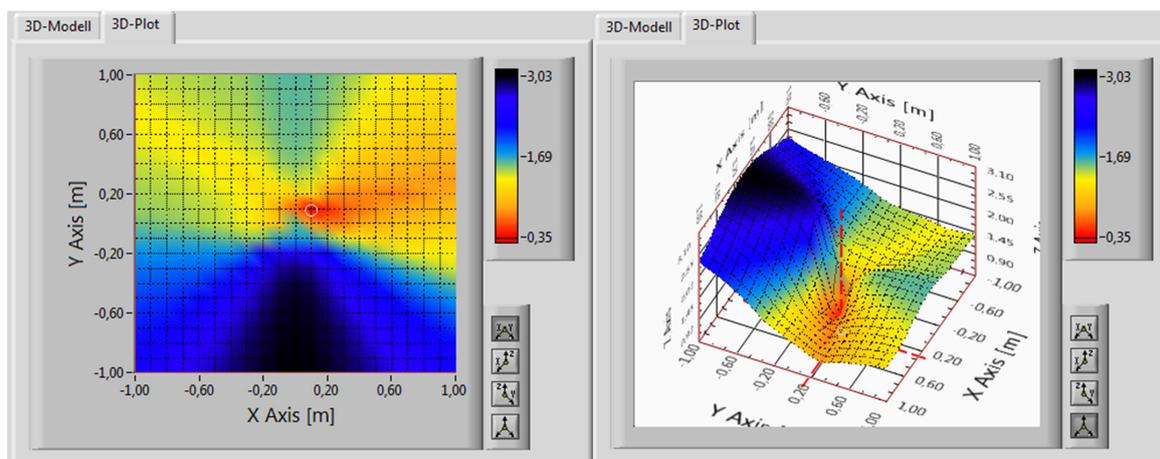


Abbildung 5.12: 3D Plot - zweidimensionale/ dreidimensionale Ansicht

In der dritten Registerkarte sind die Frequenzspektren der Mikrofonsignale dargestellt. Die Bedienung ist identisch mit dem aus dem Programmteil „Messung“ aus dem Bereich 4. Bei der Störquellenortung mittels Laufzeitmessungen dient nun die Cursorfunktion dazu die Beobachtungsfrequenz zu wählen, zu der die Phasenbeziehungen bestimmt werden. Das „Delay and sum“- Verfahren benötigt hierzu keine Angaben. Stattdessen wird hier das Frequenzspektrum des gefilterten Zeitsignals vor der Störquellenortung angezeigt. Die hier Dargestellten Grafiken können über den „PRINT“-Button abschließend gesichert werden.

Bereich 4: Nach Abschluss der Geräuschortung können hier die gesamten Konfigurationen abgespeichert und nach Bedarf auch wieder geladen werden.

5.4 Programmteil – Auslesen & Analyse

Über den zweiten Button im Hauptmenü gelangt man zum Programmteil „Auslesen & Analyse“. Dieser Bereich dient dazu die aufgenommenen Mikrofonmessdaten einzulesen und weiter auszuwerten. Das Hauptfenster aus Abbildung 5.13 zeigt bereits, dass der Aufbau mit dem zuvor besprochenen Programmteil nahezu identisch ist.

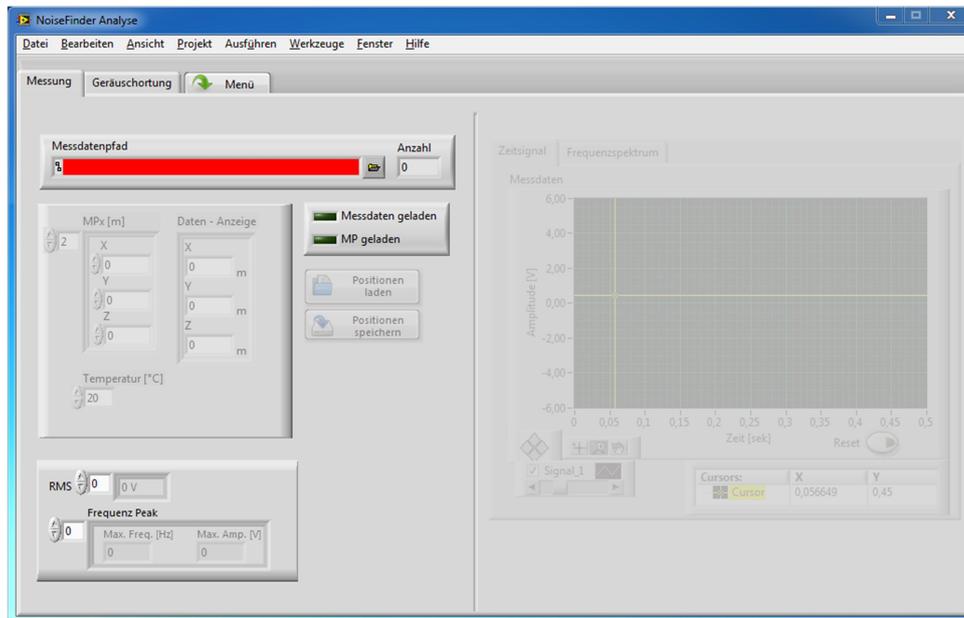


Abbildung 5.13: Hauptfenster - Auslesen & Analyse

Die Rubrik zur Konfiguration der Messhardware, sowie die Speicherfunktion für die Messdaten fallen nun weg. Dafür ist es nun möglich, über einem Messdatenpfad, die aufgenommenen Signale wieder einzulesen. Solange hier keine gültigen Messdaten vorliegen blinkt diese Anzeige für den Messdatenpfad rot auf und die gesamten Eingabefenster und Grafiken bleiben grau hinterlegt. Nach erfolgreichem Laden wird die Anzahl der geladenen Messdaten im rechten Feld neben den Messdatenpfad angezeigt und die Kontrollleuchte „Messdaten geladen“ leuchtet grün auf. Sind Mikrofonpositionen im Messdatenordner hinterlegt werden diese automatisch mitgeladen. Alle weiteren Bedienelemente und Funktionen sind mit dem Programmteil „Messung“ identisch.

5.5 Aufbau der Programmstruktur

Die Analysesoftware besteht aus zwei Hauptfunktionsblöcken, die aus dem Hauptmenü aus aufgerufen werden. Diese beinhalten wiederum weitere Funktionsblöcke, die verschiedenste Aufgabenteile übernehmen. In LabVIEW heißen diese Funktionsblöcke „Virtuelle Instrumente“ oder in Kurzform „VI“. Eine Übersicht der hier programmieren VI's bietet Tabelle 4.1.

Tabelle 5.1: Analysesoftware - Funktionsübersicht

VI-Bezeichnung	Funktion
Menue.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl und Aufruf der Programmfunktion • Beenden der Anwendung
NoiseFinder_Messung.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme der Messdaten • Verwaltung der Störquellenortungsverfahren • Analyse der Messdaten
NoiseFinder_Analyse.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Laden der Messdaten • Verwaltung der Störquellenortungsverfahren • Analyse der Messdaten
NI_Messsystem.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Verwaltung/Konfiguration der Messhardware • Laden der Messdatensätze
Phasenmessung_FFT.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellen des Frequenzspektrums • Phasenmessung anhand einer Beobachtungsfrequenz • Dient zur Berechnung der Laufzeiten anhand der Phasenmessung und Beobachtungsfrequenz
Peak_suchfunktion.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Bedienung des Frequenzspektrums • Ausgabe der Peaks des Frequenzspektrums • Ausgabe der Beobachtungsfrequenz
Phasenkorrektur_sub.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Manuelle/automatische Phasenkorrektur
Phasenkorrektur.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Unterprogramm zur automatische Phasenkorrektur
Phase_kreuzk.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Bandpassfilterung zur Selektion der Beobachtungsfrequenz • Phasenmessung mittels Kreuzkorrelation • Berechnung der Laufzeiten anhand der Phasenmessung und Beobachtungsfrequenz
Auto_find_MPxzL.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Störquellenortung anhand der Laufzeitdifferenzen • Erstellen des 3D-Plots
Laufzeitvergleich_LzuMPx_XY.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Laufzeitvergleich zur Positionsbestimmung in xy-Ebene
Laufzeitvergleich_LzuMPx_Z.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Laufzeitvergleich zur Positionsbestimmung in z-Ebene
Laufzeit_LzuMPx.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Laufzeitberechnung vom Fokuspunkt zur Mikrofonanordnung
Delay_and_sum_LzuMP_XY.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Tiefpass- und Bandpassfilterung der Messdaten • Störquellenortung mittels „Delay and sum“-Verfahren • Mittelung mehrerer Messzeitpunkte • Erstellen des 3D-Plots
Abstand_d.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Räumlicher Abstand zweier Punkte
Laufzeit.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der Schallgeschwindigkeit anhand der Temperatur • Berechnung der Laufzeit anhand eines räumlichen Abstandes
Sphere3D.vi	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellen des 3D-Modells

5.5.1 Hauptmenü

Nach Programmstart sieht der Anwender zuerst das Menü zur Auswahl der Programmfunktionen. Der Aufbau ist sehr übersichtlich, da sich die Hauptfunktionen innerhalb der Funktionen der Menüpunkte befinden. Zur Veranschaulichung dient das Flussdiagramm in Abbildung 5.14.

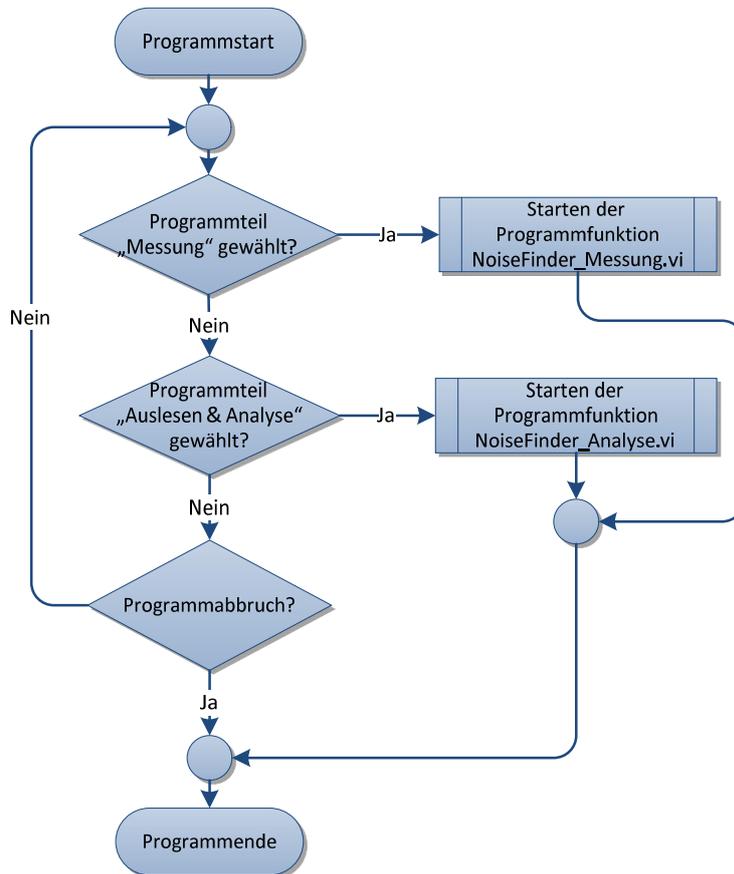


Abbildung 5.14: Flussdiagramm - Hauptmenü

Die Menüeinträge werden laufend über eine Ereignisstruktur abgefragt, solange kein Programmabbruch über den „Exit“-Button eingeleitet wird. Nach Auswahl eines der Programmfunktionen wird eine Referenz der Programminstanz dynamisch erzeugt und das Frontpanel geöffnet und zugleich das Menü geschlossen. Die beiden Programmfunktionen die hier unterschieden werden heißen „NoiseFinder_Messung.vi“ und „NoiseFinder_Analyse.vi“.

5.5.2 NoiseFinder - Messung

Die Programmstruktur besteht aus insgesamt sechs Sequenzblöcken, die fortlaufend nacheinander ausgeführt werden. Jedes dieser Blöcke übernimmt einen speziellen Aufgabenteil, die im Zusammenspiel die gesamte Programmfunktion realisieren. Eine Ereignisstruktur kontrolliert dabei fortlaufend, ob ein Programmabbruch eingeleitet wurde. Damit die CPU-Auslastung des Systems nicht an die Grenzen stößt und damit das ganze System blockiert sorgt die Ereignisstruktur außerdem dafür, dass die Sequenzblöcke maximal alle 30ms ausgeführt werden können.

Der Aufbau und der Ablauf dieser Sequenzblöcke wird anhand eines Flussdiagramms aus

Abbildung 5.15 erläutert. Diese Sequenzblöcke, mit der Reihenfolge der Indizes, spiegeln den Aufbau des LabVIEW Programmierprojekts wieder.

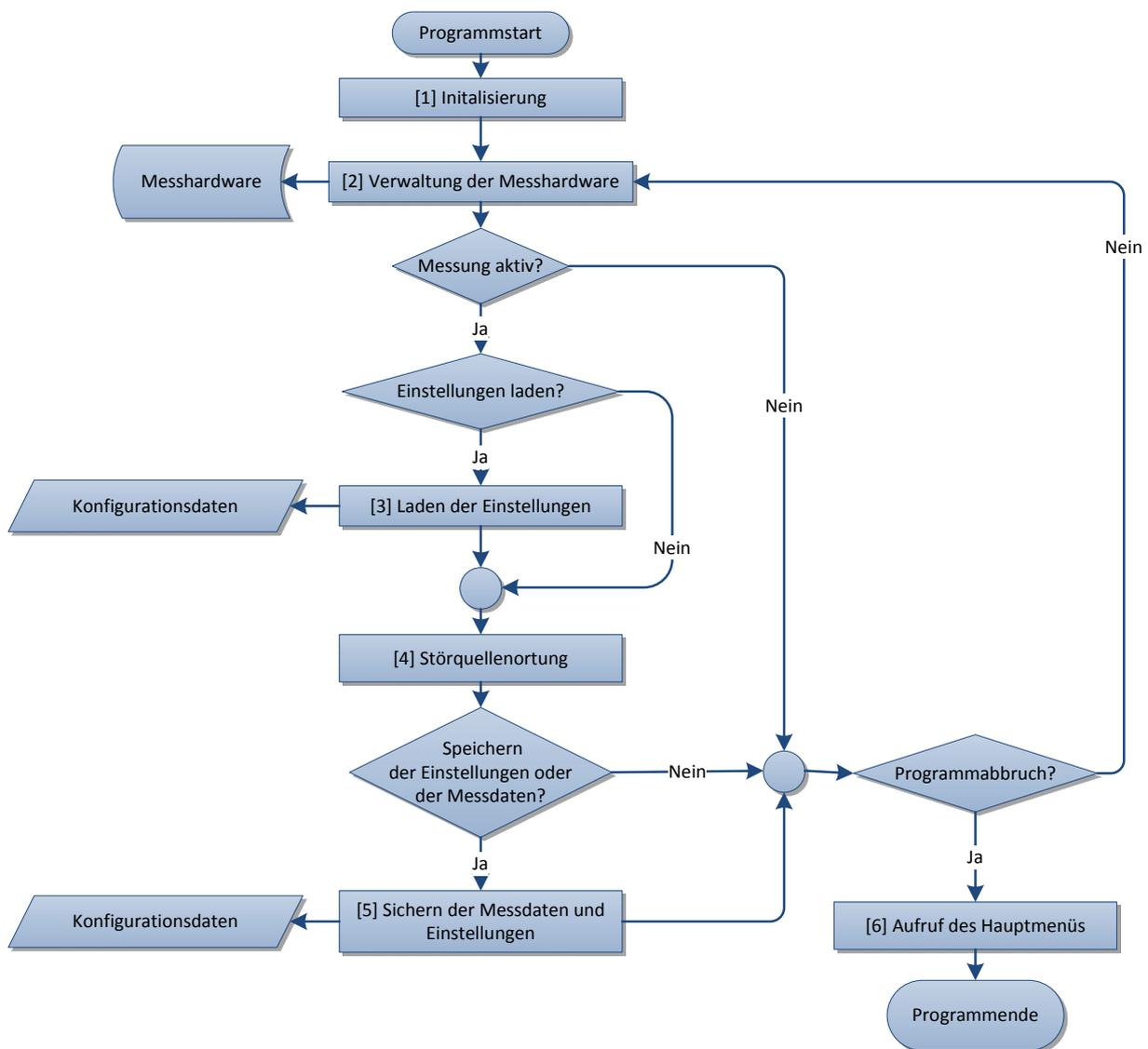


Abbildung 5.15: Flussdiagramm – Messung

Sequenz 1: Beim ersten Aufruf muss zu Beginn eine Initialisierung durchgeführt werden. Die gesamten Einstellungen der Benutzeroberfläche und Variablen werden zurückgesetzt und mit den Standardeinstellungen geladen.

Sequenz 2: Zur Messwertaufnahme muss im nächsten Schritt die Messhardware konfiguriert werden (Index 1). Für die Konfiguration sind die Benutzereingaben entscheidend. Solange das Messsystem nicht bereit ist Messdaten aufzunehmen, bleiben die gesamten Schaltflächen deaktiviert und grau hinterlegt. Andernfalls war die Konfiguration erfolgreich, die Schaltflächen werden aktiv und die Messwertaufnahme läuft.

Sequenz 3: Nun kann auch die Konfiguration der Störquellenortung erfolgen. Damit eine manuelle Eingabe nicht zwingend erforderlich ist, können die Einstellungen auch mit Hilfe von Konfigurationsdateien geladen werden. Hier wird zwischen zwei Dateitypen unterschieden. Die Mikrofonpositionen werden in einer üblichen Textdatei in der Reihenfolge [x; y; z] abgelegt, wobei jede Zeile zu einem Mikrofon gehört. Der voreingestellte Name für diese Datei heißt „mp_config.txt“. Die zweite Datei beinhaltet die Einstellungen der Störquellenortung. Der voreingestellte Name für diese Datei heißt „config.xml“. Das xml-Format ist auch ein Textdatei basiertes Format das besonders für den Datenaustausch geeignet ist. LabVIEW bietet hierzu vollwertige Funktionen mit dem die gesamten Datenfelder komfortabel abgespeichert und wieder gelesen werden können.

Die jeweilige Konfigurationsdatei wird anhand eines Dateipfades geöffnet. Dieser Pfad wird vom Anwender über einem Dateidialog, der nach betätigen des jeweiligen „Laden“-Buttons gestartet wird, übermittelt.

Sequenz 4: Im Sequenzblock zur Geräuschortung wird nun anhand der Konfigurationseinstellungen mit den aufgenommenen Messdaten eine Störquellenortung durchgeführt. Zuvor werden die beiden Anzeigen für das Zeitsignal und das Frequenzspektrum mit Daten versorgt. Die Anzeige für das Zeitsignal erhält direkt die Daten des Messsystems. Das Frequenzspektrum wird mit dem Funktionsblock „Phasenmessung_FFT.vi“ erstellt. Dieser Block liefert außerdem die Laufzeitdifferenzen für die Störquellenortung. Es wird hier zwischen vier Verfahren zur Störquellenortung unterschieden, wobei ein Index der Menüliste darüber entscheidet welches Verfahren ausgeführt wird. Mit den Ergebnissen der Störquellenortung werden nun die Grafiken für das 3D-Modell sowie für den 3D-Plot erstellt und die Störquellenposition angezeigt.

Sequenz 5: Dieser Sequenzblock beschäftigt sich mit dem Sichern der Konfigurations- und der aufgenommenen Messdaten. Falls die Messung aktiv ist und der angegebene Messdatenpfad existiert, kann eine Speicherung des Messdatensatzes erfolgen. Hierzu wird geprüft ob der Anwender den „Messwerte speichern“ Button betätigt. Falls dies der Fall ist wird zu Beginn der Name des Ordners generiert, der sich aus der String-Konstanten „Messdaten_“ und dem aktuellen Zeitstempel und den der Benutzerangaben Datei-Info zusammensetzt. Die Messdaten werden anschließend hintereinander mit der Namensbezeichnung „mp1.lvm“ bis „mp4.lvm“, im Falle von fünf Messmikrofonen, be-

zeichnet und im generierten Ordner hintereinander angelegt. Zusätzlich zu den Messdaten werden hier noch die zwei Dateien „mp_config.txt“ und „config.xml“ für die Konfigurationseinstellungen erstellt. Diese Konfigurationsdateien können auch über den jeweiligen Button manuell abgespeichert werden. Für jeden dieser Datentypen existiert hier eine eigene Speicherfunktion, die nach Bedarf aufgerufen wird.

Sequenz 6: Wird nun durch die Ereignisstruktur ein Programmabbruch eingeleitet, muss das Hauptmenü wieder geöffnet werden. Hierzu wird eine Referenz der Programminstanz „Menue.vi“ dynamisch erzeugt und das Frontpanel geöffnet. Die *While*-Scheife, in dem sich die gesamten Sequenzblöcke befinden, wird abgebrochen und die Programminstanz anschließend geschlossen.

5.5.3 NoiseFinder - Analyse

Die Programmstruktur entstand aus der Programmfunktion „NoiseFinder_Messung.vi“. Daher ist der strukturelle Aufbau auch nahezu identisch, mit dem Unterschied, dass der Sequenzblock für die Verwaltung der Messhardware fehlt. In diesem Sequenzblock sind nun die Funktionen zum Einlesen der Messdaten zu finden.

6 Versuchsmessung

Für die Versuchsmessungen mussten zuvor die Mikrofone platziert, die Anschlusskabel verlegt und an das NI-Messsystem angeschlossen werden. Damit die Rotorblätter nicht die akustischen Messungen am Antriebsbereich beeinflussen, wurden diese zuvor demontiert.

6.1 Platzierung der Mikrofone

Die Standorte der einzelnen Mikrofone sind, zusammen mit der Nummerierung aus Tabelle 3.4, in Abbildung 6.1 schematisch dargestellt. Die Koordinaten der Mikrofone sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Die z-Achse ist hierbei in positiver Richtung dem Halbboden ausgerichtet. Die Drehrichtung ist an dieser Stelle auch mit eingezeichnet.

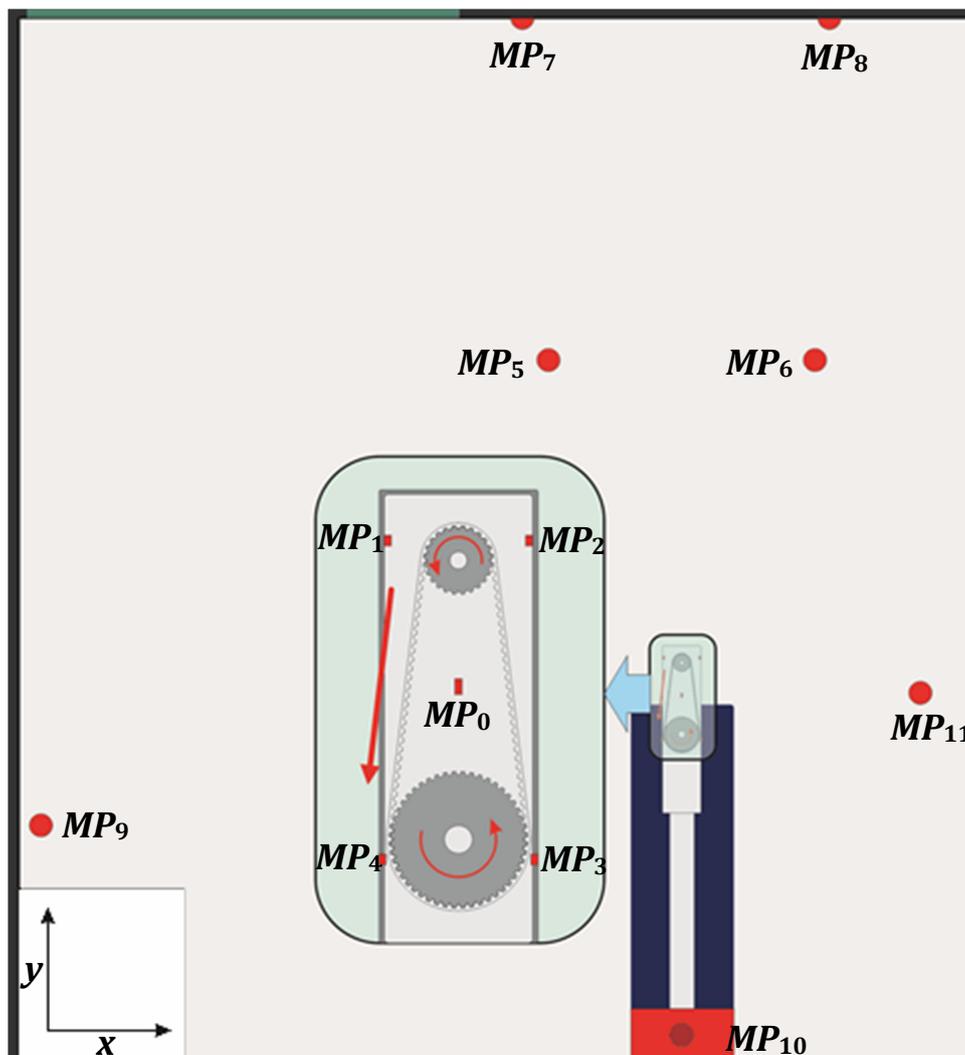


Abbildung 6.1: Anordnung der Messmikrofone

Tabelle 6.1: Raumkoordinaten der Messmikrofone mit Bezugspunkt MP_0

Index	Raumkoordinaten (x [m] ; y [m]; z [m])
0	0,00; 0,00; 0,00
1	-0,157; 0,325; -0,004
2	0,157; 0,325; -0,004
3	0,169; -0,385; 0,013
4	-0,169; -0,385; 0,013
5	-1,15; 2,91; 0,93
6	1,15; 2,91; 0,93
7	-1,375; 5,78; -0,35
8	1,375; 5,78; -0,35
9	-5,53; -1,13; -0,54
10	0,00; -2,95; -1,10
11	2,06; 0,02; 0,73

Für die Störquellenortung wurde versucht die Mikrofone auf einer gemeinsamen z-Ebene anzuordnen und sich dabei so weit wie möglich oberhalb des Zahnriemens zu befinden. Allerdings ist anzumerken, dass zur Anordnung der Mikrofone der Platz innerhalb des Versuchsmodells sehr begrenzt war. Es wurde die in den Testmessungen bereits verwendete Anordnung eingesetzt. Das heißt, jeweils zwei Mikrofone befinden sich auf Höhe der beiden Zahnräder und eins mittig zur Anordnung. Der Abstand zum Zahnriemen beträgt am vorderen Zahnrad 3,8cm und am hinteren Zahnrad 2,1 cm. Die fünf Mikrofonsignale wurden anschließend an die Anschlussbox aus Abschnitt 3.3 angeschlossen und diese wurde dann direkt unterhalb des Modells platziert. Von hier aus wurde ein 17 Meter langes 6 Adriges geschirmtes Kabel durch die Kabelschächte des Versuchstandes verlegt (Abbildung 6.2), das bis vor die Rotorhalle reicht und dort an die Messhardware angeschlossen wurde.



Abbildung 6.2: Verlegen der Signalkabel

Zur Aufnahme des Dämpfungsverhaltens wurden insgesamt vier Mikrofone im vorderen Rumpfbereich aufgestellt. Zwei Mikrofone befinden sich dabei in Bodennähe und zwei Mikrofone an die Wand der Versuchshalle.



Abbildung 6.3: Anordnung der Messmikrofone (Indexbezeichnung aus Tabelle 6.1)

Zusätzlich wurde jeweils ein Mikrofon rechts, wie links vom Modell befestigt. Somit ist der gesamte vordere Bereich abgedeckt. Für den hinteren Bereich war ein weiteres Mikrofon vorgesehen das aber, wie bereits im Abschnitt 3.4 beschrieben, aus systematischen Fehlern nicht mit einbezogen werden konnte.

Nach Anschluss der gesamten Hardware und einem Funktionstest der einzelnen Mikrofone konnte eine Versuchsmessung starten.

6.2 Aufnahme der Messdaten

Zur Aufnahme des akustischen Dämpfungsverhaltens der Rumpferkleidung waren zwei Messungen, einmal mit und ohne Rumpferkleidung, erforderlich.

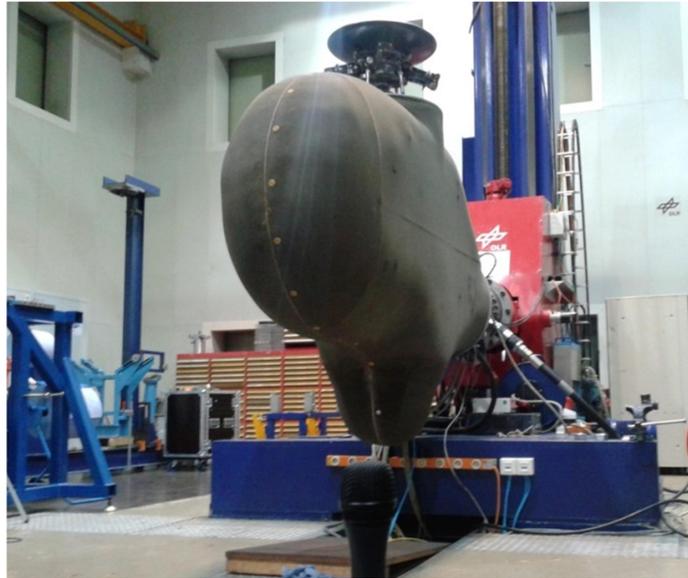


Abbildung 6.4: ROTEEST - Rumpferkleidung

Zur Aufnahme der Messdaten wurden zwei verschiedene Konfigurationen für die Abtastung gewählt, die in Tabelle 6.2 zusammengefasst sind.

Tabelle 6.2: Konfiguration der Messhardware

Nr.	Messbereich	Abtastung	Samples n	Messzeit T_m
1	$\pm 10V$	2048 Samples/Rotation	$4 \cdot 2048 = 8192$	$4 \cdot 1/f_{rot}$
2	$\pm 10V$	$f_a = 100kHz$	$2^{15} = 32768$	327,68ms

Die rotordrehzahlspezifische Abtastung in Zeile mit Nr. 1 hat den Vorteil, dass die Abtastfrequenz und die Messdauer sich der eingestellten Rotordrehfrequenz f_{rot} anpassen. Zur Minimierung zufälliger Messfehler wurden dabei jeweils vier ganze Umdrehungen aufgenommen. Die niedrigste Abtastfrequenz ist dabei 1,23kHz, bei einer Rotordrehzahl von 100rpm, was etwa das 7,7 fache der Zahneingriffsfrequenz entspricht. Bei der zweiten Einstellung wurde zum Vergleich eine sehr hohe zeitliche Auflösung gewählt.

Anhand dieser Einstellungen wurden nun für die Rotordrehzahlen von 100rpm bis 1000rpm, in 100rpm Schritten die gesamten Messdaten für jedes Mikrofon abgesichert. Die Messdaten sind auf der beigelegten CD hinterlegt.

Innerhalb der Messung zeigte sich, dass die Messmikrofone (0-4) zur Störquellenortung bei einer Drehzahl von 800rpm in den Sättigungsbereich gingen, da der Verstärkungsfaktor der Schaltungen aus Abschnitt 3.2 zu hoch gewählt wurden war. Das hat zur Folge das, das Zeitsignal bei hohen Schallintensitäten abgeschnitten wird und damit die Mes-

sung verfälschen. Da das Versuchsmodell kurz vor der Umrüstung auf ein neues System stand, war, aus organisatorischen Gründen, kein erneuter Umbau möglich und daher wurde dieser systematische Fehler in Kauf genommen.

Bei einer erneuten Messung, sollte zuvor der Verstärkungsfaktor der Verstärkerstufe verkleinert werden. Hier bietet sich an, den Widerstand R_5 der Verstärkerschaltung aus Abschnitt 3.2, mit einen in Stufen einstellbaren Widerstand auszutauschen. Damit ist es möglich verschiedene Verstärkungsfaktoren einzustellen und somit das Signal für verschiedene Belastungsfälle optimal für das Messsystem aufzulösen. Der Widerstandswert sollte sich dabei mindestens in einem Bereich von $5,6\text{k}\Omega$ bis $100\text{k}\Omega$ variieren lassen. Somit ist ein Verstärkungsfaktor von 2 bis hin zu dem hier verwendeten Wert von 18,86 einstellbar.

7 Analyse der Messdaten

Nach der Aufnahme der Messdaten gilt es nun diese auszuwerten. Zu Beginn werden einige Frequenzspektren betrachtet, die einen ersten Einblick gewähren welche Spektralkomponenten hier einen Einfluss auf das Geräuschbild haben.

7.1 Untersuchung der Frequenzspektren

Die Messdaten wurden mit der Analysesoftware NI DIAdem eingelesen und anschließend die hier dargestellten Frequenzspektren erstellt. Zur Identifizierung der Zahneingriffsfrequenzen dient die Tabelle 7.1, wo diese zusammen mit den Oberwellen für die untersuchten Rotordrehzahlen dargestellt sind. Die Berechnung hierzu erfolgte nach Gleichung (2.1).

Tabelle 7.1: Rotordrehzahlabhängige Zahneingriffsfrequenzen am Zahnriemen

RPM	Grundschiwingung	Oberwellen						
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
100	80 Hz	160 Hz	240 Hz	320 Hz	400 Hz	480 Hz	560 Hz	640 Hz
200	160 Hz	320 Hz	480 Hz	640 Hz	800 Hz	960 Hz	1120 Hz	1280 Hz
300	240 Hz	480 Hz	720 Hz	960 Hz	1200 Hz	1440 Hz	1680 Hz	1920 Hz
400	320 Hz	640 Hz	960 Hz	1280 Hz	1600 Hz	1920 Hz	2240 Hz	2560 Hz
500	400 Hz	800 Hz	1200 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2400 Hz	2800 Hz	3200 Hz
600	480 Hz	960 Hz	1440 Hz	1920 Hz	2400 Hz	2880 Hz	3360 Hz	3840 Hz
700	560 Hz	1120 Hz	1680 Hz	2240 Hz	2800 Hz	3360 Hz	3920 Hz	4480 Hz
800	640 Hz	1280 Hz	1920 Hz	2560 Hz	3200 Hz	3840 Hz	4480 Hz	5120 Hz
900	720 Hz	1440 Hz	2160 Hz	2880 Hz	3600 Hz	4320 Hz	5040 Hz	5760 Hz
1000	800 Hz	1600 Hz	2400 Hz	3200 Hz	4000 Hz	4800 Hz	5600 Hz	6400 Hz

In Abbildung 7.1 ist das Frequenzspektrum bei Ruhezustand dargestellt. Bei Ruhezustand laufen ausschließlich zwei Hydraulikpumpen, die sich außerhalb der Versuchshalle in einem Container befinden, und die Messsysteme am Versuchsstand.

Es wurde nun eine Mittelung der vergleichbaren Spektren der Mikrofone (0-4) und (5-6) durchgeführt. Die Darstellung des Mischspektrums hat den Vorteil, dass ein Teil des Rauschens unterdrückt wird und es außerdem einen allgemeinen Einblick in das Geräuschbild auf dieser Ebene am Zahnriemen erlaubt.

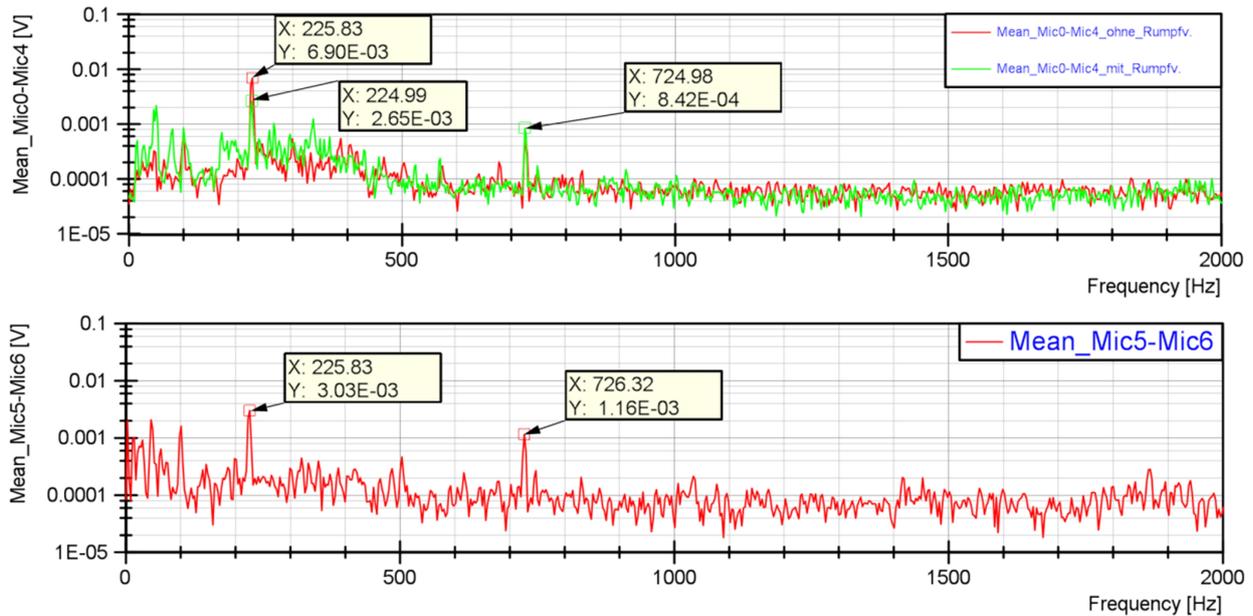


Abbildung 7.1: Frequenzspektrum bei Stillstand – mit Hydraulikpumpen

Bei beiden Spektren bildet sich ein Peak bei der Frequenz 225Hz ab. Diese Frequenz ist auf das Antriebsaggregat der Hydraulikpumpen zurückzuführen. Dabei pulsiert die Ölsäule innerhalb der Hydraulikleitungen, was zur Entstehung von Körperschall innerhalb der Hydraulikleitungen führt. Die Berechnung dieser Frequenz wurde bereits im Abschnitt 2.2 durchgeführt und beträgt 222,75 Hz.

Für den Spektralanteil bei 725Hz ist naheliegend, dass diese von Lüftergeräuschen von Messgeräten und Netzteilen am Versuchsmodell stammen. Außerdem zeichnet sich bei beiden Spektren die 50Hz Netzspannung des Netzteils ab, die aber mit < 3mV vernachlässigbar klein ist. Zwischen den beiden Spektren sind keine größeren Unterschiede zu erkennen.

Nun folgen die Spektren bei laufendem Betrieb. Die blau markierten Rautenpunkte spiegeln die Zahneingriffsfrequenz zusammen mit den Oberwellen wieder. Die braunen Quadrate zeigen auf weitere Frequenzkomponenten, die von der Zahneingriffsfrequenz abweichen. Die Markerkoordinaten, der hier dargestellten Frequenzgänge sind im Anhang A1.1 in tabellarischer Form hinterlegt. Die hier nicht betrachteten Frequenzgänge können anhand der DIAdem Messdaten, die auf der CD enthalten sind, betrachtet werden. Das Spektrum aus Abbildung 7.2 zeigt das gemittelte Spektrum bei einer Rotordrehzahl von 100rpm.

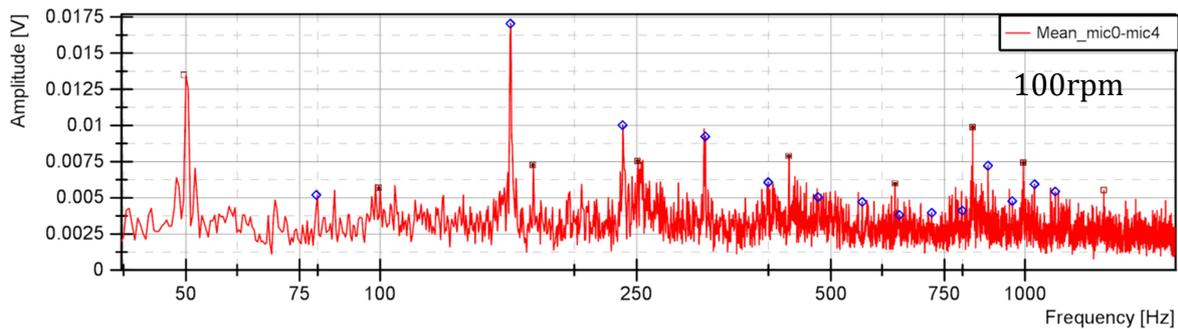


Abbildung 7.2: Frequenzspektrum bei 100rpm ohne Rumpfv. – Mean_Mic(0-4)

Die Zahneingriffsfrequenz hebt sich zusammen mit den Oberwellen deutlich aus dem Spektrum raus. Allerdings zeigt sich, dass nicht unbedingt die Grundschwingung, hier bei 80Hz, maßgeblich an der Geräuschemission beteiligt sein muss. Hier sind die ersten Oberwellen deutlich ausgeprägter, was darauf hinweist, dass es sich bei dem Zahneingriff nicht um einen harmonischen Sinusschwingungsverlauf handelt, sondern eher einen impulsartigen Verlauf annimmt. Beim Zahneintritt kann es zu Stoßreibung zwischen den Zahnkanten kommen, die dafür verantwortlich sein könnten. Die Abweichungen zu den berechneten Eingriffsfrequenzen liegen zwischen 0,11% und 0,57%. Die Messung passt also gut mit der Theorie überein.

Auch hier tritt die 50Hz Netzspannung zusammen mit der ersten Oberwelle bei 100Hz auf, die aber nun deutlicher ausgeprägt sind. Das liegt insbesondere an der steigenden Signalleistung, womit auch deutlich mehr Rauschen induziert wird.

In Abbildung 7.3 ist das Frequenzspektrum von Mikrofon (11), das sich außerhalb des Versuchsmodells befindet, bei 100rpm abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, wie stark das Dämpfungsverhalten der Rumpfv. ist. Der gesamte Rauschpegel wird deutlich gedämpft und ab einer Frequenz von 250Hz sind im oberen Frequenzbereich die Oberwellen der Zahneingriffsfrequenz kaum noch wahrzunehmen. Das Dämpfungsverhalten der Rumpfv. ist für hohe Frequenzen also deutlich stärker. Näheres zum Dämpfungsverhalten wird im Abschnitt 7.3 erläutert. Weiterhin ist auffällig, dass hier eine Verschiebung der Spektralanteile zu höheren Frequenzen durch das Dämmmaterial verursacht wird. Auch die Frequenz 225Hz der pulsierenden Ölsäule tritt hier erneut auf.

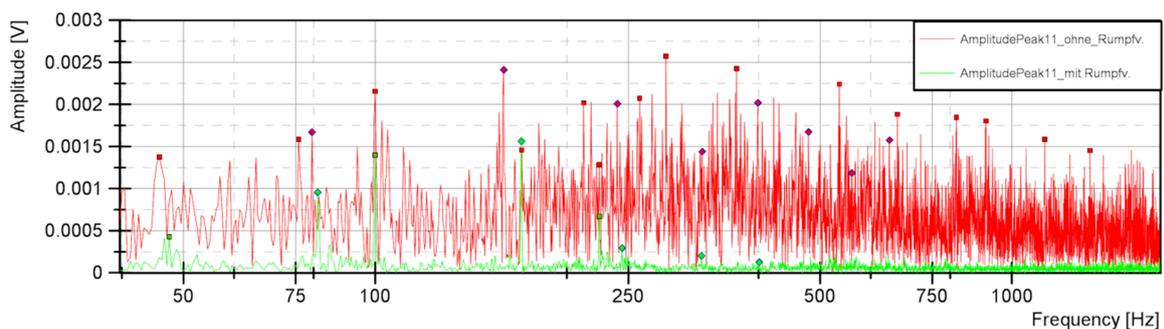


Abbildung 7.3: Frequenzspektrum bei 100rpm ohne/mit Rumpfv. – Mikrofon (11)

Bei höher werdenden Rotordrehzahlen wird deutlich, dass die vom Zahneingriff verursachten Frequenzen sich zunehmend vom Frequenzrauschen und der Frequenz der pulsierenden Ölsäule abheben und die Spannungspegel ansteigen.

In Abbildung 7.4 sind die Frequenzspektren für 300 bis 500rpm dargestellt. Bei 300rpm zeigt sich ein weiterer Effekt, der zuvor noch nicht so stark ausgeprägt war. Es entsteht um die Zahneingriffsfrequenz ein breites Frequenzmuster, das sich auch auf die folgenden Oberwellen ausbildet. Hier macht es sogar den Anschein, als wäre eine Frequenz von 240Hz auf der Zahneingriffsfrequenz aufmoduliert. Aufgrund der geringen Frequenzdifferenz besteht die Gefahr von Schwebungseffekten. Klanglich sorgen diese Schwebungseffekte für Lautstärkeschwankungen in der Differenzfrequenz der beiden auftretenden Spektralkomponenten. Hier liegt die Differenzfrequenz bei etwa 15Hz im Bereich der Grundschwingung. Diese Frequenzverzerrungen können entstehen, wenn der Zahnriemen oder das Zahnrad leichte Unregelmäßigkeiten in der Struktur aufweist. Aufgrund dieser Unregelmäßigkeiten können auch die im Abschnitt 2.1 beschriebenen Trumschwingungen entstehen, die dazu führen, dass der freistehende Teil des Zahnriemens zum Schwingen angeregt wird. Dadurch entstehen Spannungsschwankungen im Zahnriemen, die wiederum zu Frequenzschwankungen beim Zahneingriff am Zahnrad führen.

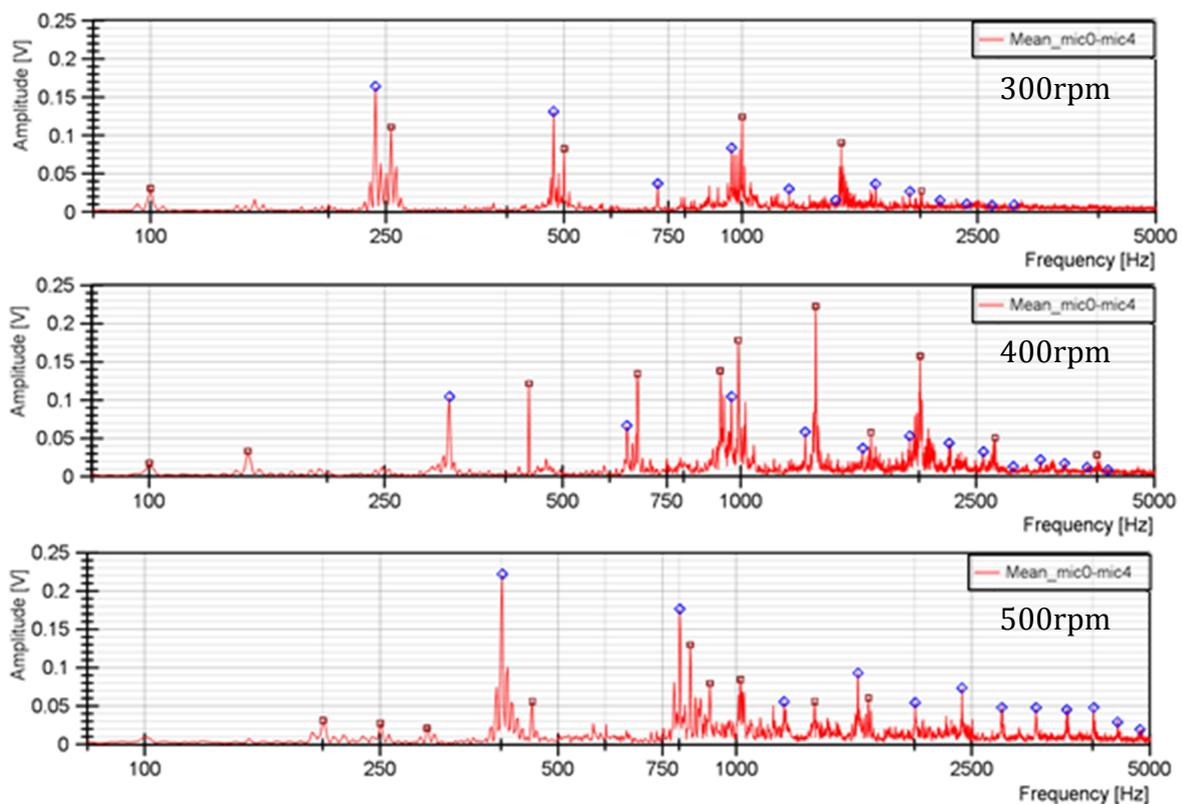


Abbildung 7.4: Frequenzspektren: 300-500rpm; Mean_Mic (0-4); ohne Rumpfv.

Bei einem Vergleich der Frequenzspektren zeigt sich sehr anschaulich, wie sich die Zahneingriffsfrequenzen zusammen mit den Oberwellen zunehmend in höhere Frequenzbereiche verschieben. Die Frequenzkomponenten bei 1kHz fallen bei dieser Betrachtung besonders auf. Bei den gewählten Rotordrehzahlen befindet sich eine Komponente der Zahneingriffsfrequenz häufig bei 960Hz. Bei einer Drehzahl von 500rpm sind allerdings bei 1016,73Hz weiterhin Frequenzkomponenten enthalten, obwohl hier eine Oberwelle der Zahneingriffsfrequenz nicht mehr vorliegt. Dieses Geräusch stammt demnach von einer drehzahlunabhängigen Ursache. Je nach Drehzahl kann es dazu führen das, das Versuchsmodell in seiner Eigenfrequenz schwingt und ein Teil des Körperschalls hier zur Geräuschenstehung beiträgt. Weiterhin ist es möglich, dass der Belüftungskanal, der dazu dient den Zahnriemen zu kühlen, hier mit aufgenommen wurde.

Bei höheren Drehzahlfrequenzen, ab etwa 500rpm, kommen vermehrt niederfrequente Anteile hinzu. Bei den Frequenzspektren 700rpm und 1000rpm aus Abbildung 7.5 sind diese gut ersichtlich. Für 1000rpm ist allerdings anzumerken, dass aufgrund der Übersteuerung der Mikrofone (0-4), weitere Frequenzkomponenten entstanden sein könnten. Es liegt ein Frequenzpeak bei 420,03Hz für 700rpm und ein bei 598,14Hz bei 1000rpm vor, die zusätzlich Oberwellen ausbilden. Bei höheren Drehzahlen entstehen zunehmend Vibrationen, die hier weiterhin ihren Einfluss haben können. Auch ein leichtes Schwingen des Zahnriemens kann nicht ausgeschlossen werden. Die Geräuschbilder, die im nächsten Abschnitt hierzu dargestellt sind, erlauben eine bessere Aussage zum Störquellenursprung dieser Frequenzkomponenten.

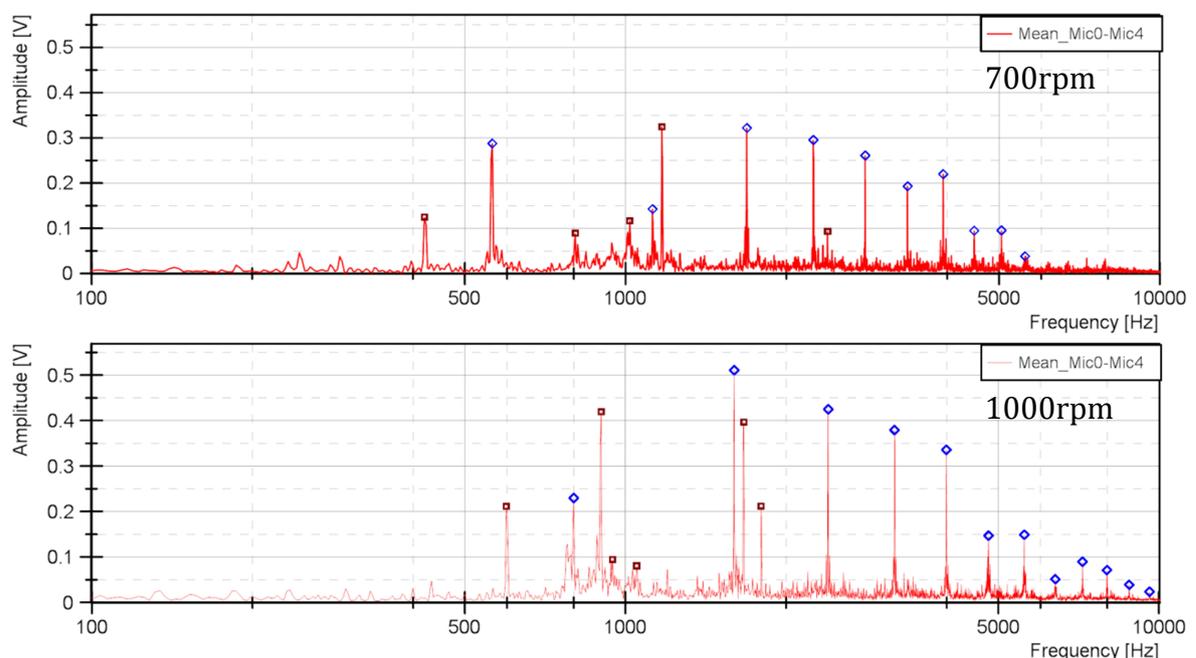


Abbildung 7.5: Frequenzspektren: 700rpm; 1000rpm; Mean_Mic (0-4); ohne Rumpfv.

Allgemein ist hier noch festzuhalten, dass sich die Zahneingriffsfrequenz zusammen mit den Oberwellen immer stärker ausbildet und auch hier, am Beispiel des Frequenzspekt-

rums für 1000rpm, Schwebungseffekte bei der Oberwelle mit 1,6kHz auftreten können. Es zeichnet sich außerdem ab, dass die Grundschiwingung im Verhältnis zu den Oberwellen immer weiter absinkt und damit einen sehr oberwellenhaltigen Klang im Geräuschbild erzeugt.

7.2 Störquellenortung am Zahnriemen

Mit Hilfe der Analysesoftware wurde nun für jede eingestellte Rotordrehzahl eine Störquellenortung durchgeführt. Die Einstellungen zur Störquellenortung sind für die jeweilige Rotordrehzahl hierfür in den Konfigurationsdateien der Messreihen hinterlegt. Wie bereits aus Abschnitt 4.5.1 bekannt ist das räumliche Abtasttheorem bis zu einer Frequenz von 414,03Hz eingehalten und es sind daher keine weiteren Aliasing-Effekte zu erwarten. Die Grundschiwingung der Zahneingriffsfrequenz kann nach Tabelle 7.1 bis zu einer Rotordrehzahl von 500rpm analysiert werden. Da die Oberwellen zumeist stärker vertreten sind, muss allerdings auch hier, bei unzureichender Filterung, mit räumlichen Aliasing-Effekten gerechnet werden. Für die hier abgebildeten Geräuschbilder wurde nur das „Delay and sum“-Verfahren verwendet, da es für diese Messumgebung am geeignetsten ist. Die Koordinaten für die Messmikrofone stehen in Abbildung 6.3. Für den Abstand z zur Fokusebene wurde 0,03m gewählt, was dem mittleren Abstand zur Zahnradoberfläche entspricht. Der Suchbereich erstreckt innerhalb der Ebene der beiden Zahnräder von -0,2m bis 0,2m in der x -Ebene und -0,5m bis 0,4m in der y -Ebene, bei einer Schrittweite von jeweils 0,01m. Es wurden hierzu die rotordrehzahlspezifischen Messdatensätze der Mikrofone (0-4) ohne Rumpfverkleidung verwendet, wobei ein Vergleich zeigte, dass die Ergebnisse mit Rumpfverkleidung überwiegend übereinstimmen, aber mit höheren Reflexionseffekten behaftet sind. Die Geräuschbilder wurden über 20 Messpunkte für eine Rotorumdrehung gemittelt. Das heißt, bei der hier gewählten Messdauer von 4 Rotorumdrehungen wurden insgesamt 80 Geräuschbilder für die jeweilige Messreihe gemittelt. Das Erstellen einer Grafik erforderte etwa 10-20 Minuten an Rechenzeit. Die Rechenzeit ist hierbei stark abhängig von der gewählten räumlichen wie auch zeitlichen Abtastfrequenz. Die vorgefilterten Frequenzspektren und die hier nicht behandelten Geräuschbildern sind im Anhang A1.2 und auf der CD hinterlegt.

In Abbildung 7.6 ist das Geräuschbild bei Stillstand und bei einer Rotordrehzahl von 100rpm dargestellt. Zur besseren Übersicht wurde der Zahnriemen mit eingezeichnet. Die Farbleiste, in der oberen rechten Ecke jeder Grafik, zeigt in welchem Bereich sich das Summationsergebnis aufhält. Die Funktion der Amplitudenanpassung wurde an dieser Stelle nicht verwendet, da hier deutliche Schwankungen im Ergebnis zuerkennen waren. Die Ursachen hierfür wurden bereits im Abschnitt 4.6 erläutert. Demnach stellt das Ergebnis den Effektivwert des Summationsergebnisses der zeitlich korrigierten und normierten Datensätze dar und befindet sich in einem Bereich zwischen null (destruktivi-

ve Interferenz) und $1/\sqrt{2}$ (konstruktive Interferenz). Aufgrund der Komplexität der Signale liegen die Ergebnisse allerdings weit unterhalb des Maximalwertes.

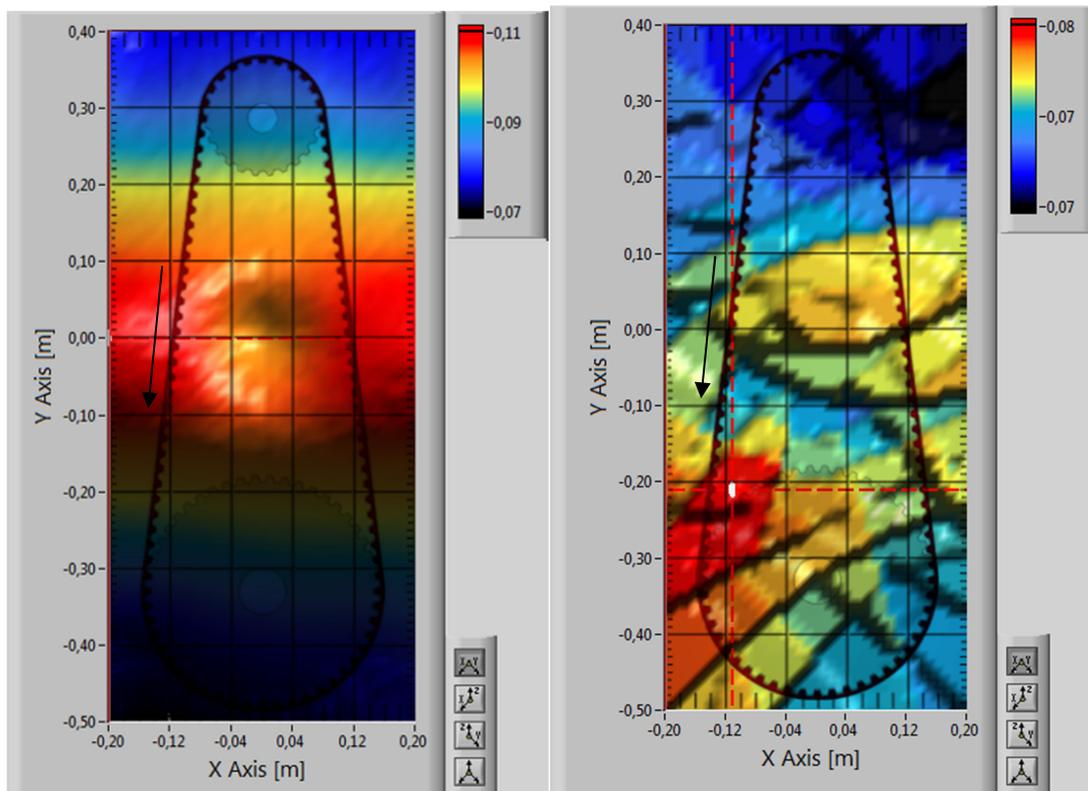


Abbildung 7.6: Geräuschbild – Links: Sillstand; Rechts: 100rpm

Bei Stillstand bildet sich ein sehr gleichmäßiger roter Bereich im Zentrum des Suchbereichs ab. Hier liegen die Effektivwerte der Mikrofon-signale noch unter 20mV. Das heißt Auflösungsbedingt kann bei diesem Bild noch keine Störquelle eindeutig spezifiziert werden. Anders sieht es bei einer Rotordrehzahl von 100rpm aus. Es bildet sich ein Maximum im Summationssignal an den Koordinaten (-0,2m; -0,35m; 0,03m) ab. Hier ist das Zahnrad auf der Abtriebsseite maßgeblich an der Geräuschentstehung beteiligt. Das Auftreten der harten Konturen, wie sie hier zu sehen sind, ist auf die noch relativ geringe Abtastfrequenz von 1,23kHz zurückzuführen. Die Auflösungs-genauigkeit ist also bei dieser Konfiguration noch relativ gering. Weiterhin ist zu sehen, dass sich der Bereich bis zum gelb markierten Bereich weit erstreckt. Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen ist noch anzumerken, dass auch in den tiefblauen Bereichen durchaus Störquellen auftreten, nur dass diese im Verhältnis zum roten Bereich deutlich leiser ausfallen. Außerdem ist anzumerken, dass aufgrund der Filterung nur ein Teil des Geräuschbildes zu sehen ist. Wie viel hiervon letztendlich abgebildet wird, ist abhängig von der Zusammensetzung des Frequenzspektrums. Ab einer Drehzahl von 400rpm liegt der Geräuschanteil weit oberhalb der Aliasing-Filterfrequenz und die Darstellung bietet daher eigentlich nur einen kleinen Einblick in das Geräuschbild. Wie aus Abschnitt 7.1 bereits bekannt ist, sind sogar überwiegend die Oberwellen an der Geräuschentwicklung beteiligt, die hier zum Teil rausgefiltert werden und daher nicht abgebildet sind.

Bei einer Drehzahl von 300rpm aus Abbildung 7.7 ist das nun im Vergleich zur vorigen Darstellung deutlich feiner aufgelöst. Am linken Rand ist hier nun das Maximum zu verzeichnen. Das ist zum großen Teil auf den hohen Reflexionsgrad zurückzuführen, der sich in diesem kleinen Raum ausbildet. Hier wandert das Maximum in der Abbildung außerdem etwas weiter höher, wonach auch Trumschwingungen am Zahnriemen an der Geräusentwicklung beteiligt sein können.

Bei Erhöhung der Drehzahl auf 400rpm aus Abbildung 7.7 (rechts), zeigt sich weiterhin ein ähnliches Geräuschbild, wobei das Maximum wieder direkt im Bereich des Zahneingriffs wiederzufinden ist.

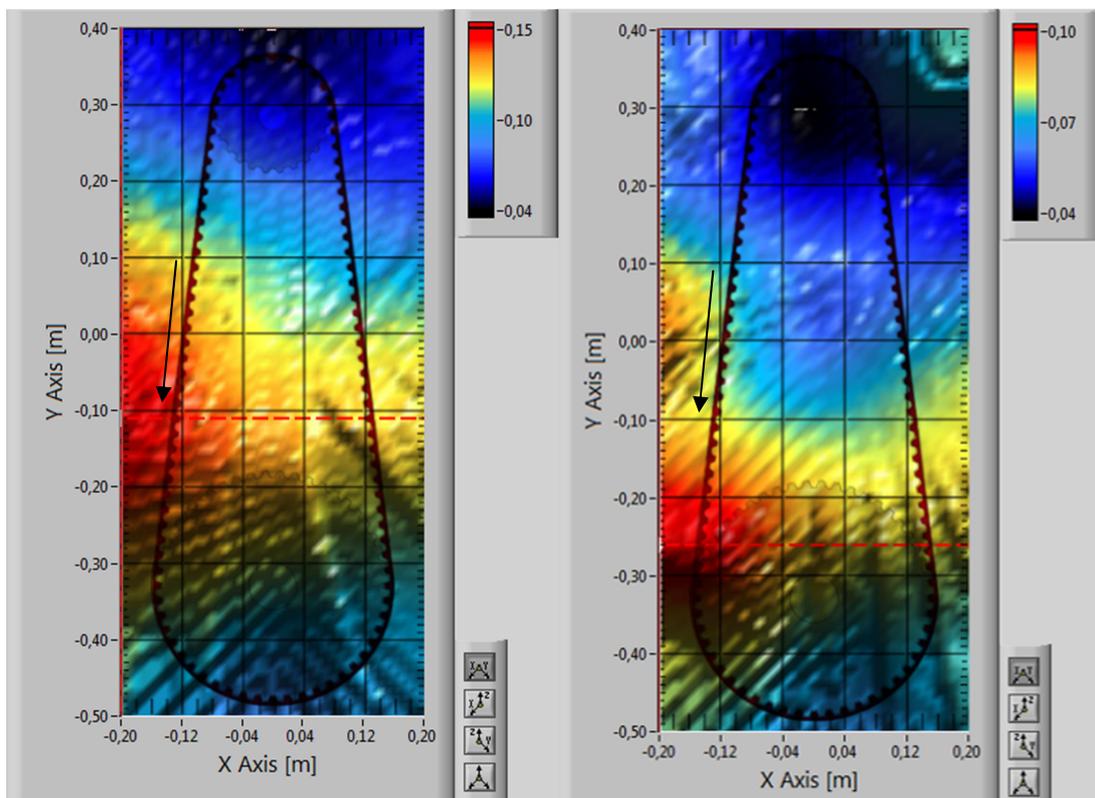


Abbildung 7.7: Geräuschbild – Links: 300rpm; Rechts: 400rpm

Das Geräuschbild zur Rotordrehzahl 500rpm aus Abbildung 7.8 zeigt, dass die hier vorherrschende Zahneingriffsfrequenz von 402,11Hz das räumliche Abtasttheorem voll ausreizt. Es bildet sich ein weiterer Peak mit ähnlicher Struktur aus, der etwa 0,3m oberhalb der bisherigen Störschallquelle liegt. Hier ist im rechten Bild auch einmal gezeigt, wie sich das Geräuschbild entwickelt, wenn auf weitere Filtermaßnahmen verzichtet wird. Es entstehen eine Vielzahl kleinerer Peaks, die sich überwiegend aus Sidelobes ausbilden und somit keinen eindeutigen Hinweis auf eine Störquelle mehr geben können. Erst bei aktiver Filterung ist eine präzisere Aussage möglich.

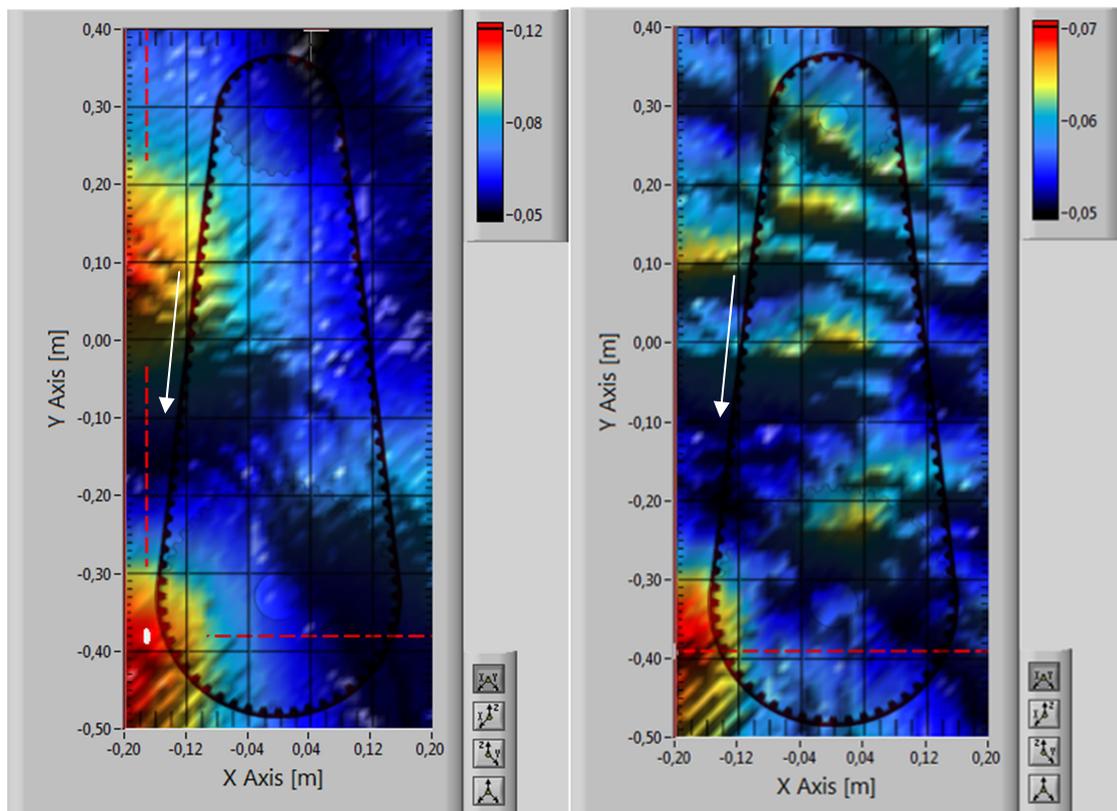


Abbildung 7.8: Geräuschbild 500rpm – Links: mit Filter; Rechts: ohne Filter

Bis zu dieser Rotordrehzahl waren die Zahneingriffsfrequenz die hier vorherrschenden Frequenzkomponente. Wie bereits aus Abschnitt 7.1 bekannt, kommt nun für 700rpm und 1000rpm, aus Abbildung 7.9, ein niederfrequentes Schwingen bei 420,03Hz bzw. 598Hz hinzu, das nicht zu der Zahneingriffsfrequenz zugeordnet werden kann. Auch wenn das räumliche Abtasttheorem hier nicht erfüllt ist, zeigt sich beim direkten Vergleich beider Geräuschbilder eine Gemeinsamkeit. Bei den Koordinaten (0,12m; 0,08m) entsteht ein weiterer Störbereich am vorderen Zahnrad. Hier ist es sehr gut möglich, dass sich Trumsvibrationen am Zahnriemen ausbilden. Aber bei genauerer Betrachtung der Frequenzspekten wird eine Abhängigkeit zur Rotordrehzahl ersichtlich. Das Grundschwingen dieser Oberwellen entspricht das 18 fache der eingestellten Rotordrehfrequenz und damit das 9 fache der Drehfrequenz des kleineren, vorderen Zahnrad. Das vordere Zahnrad befindet sich auf der Antriebsseite und ist somit direkt mit dem Hydraulikmotor gekoppelt. Die Frequenz des Hydraulikmotors wird nach Gleichung (7.1) und (7.2) mit Hilfe der Drehzahl des vorderen Zahnrad f_{Z1} bei 700rpm und 1000rpm Rotordrehzahl und der Kolbenzahl n_M des Motors berechnet.

$$f_{H_{700RPM}} = f_{Z1} \cdot n_M = 2 \cdot f_{Z2} \cdot n_M = 9 \cdot \frac{1400}{60} \text{ Hz} = 210 \text{ Hz} \quad (7.1)$$

$$f_{H_{1000RPM}} = f_{Z1} \cdot n_M = 2 \cdot f_{Z2} \cdot n_M = 9 \cdot \frac{2000}{60} \text{ Hz} = 300 \text{ Hz} \quad (7.2)$$

Demnach ist bei 700rpm und 1000rpm die erste Oberwelle der Hydraulikmotorfrequenz besonders stark ausgeprägt. Durch die stärkere Beanspruchung des Hydraulikmotors wird nun auch ersichtlich warum erst bei höheren Drehfrequenzen dieses Störgeräusch einen stärkeren Einfluss auf das Geräuschbild nimmt, und es erklärt auch warum der Störbereich in der Grafik nach oben wandert.

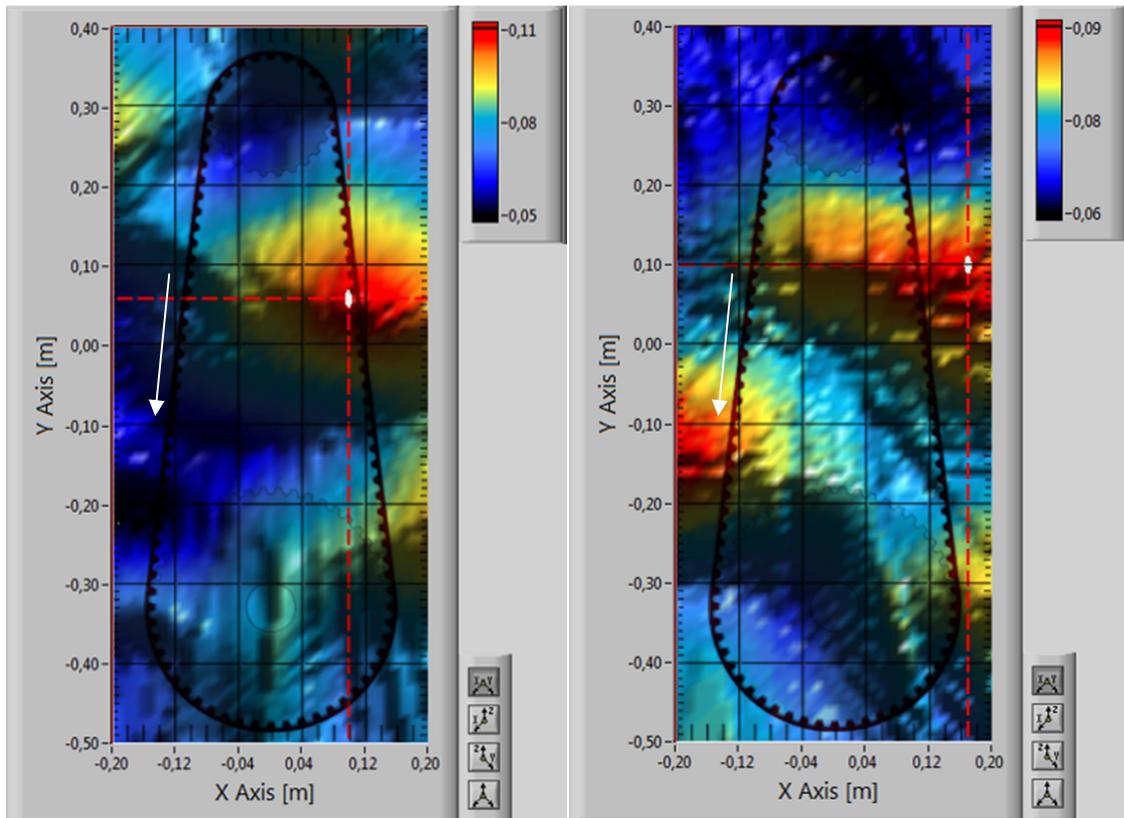


Abbildung 7.9: Geräuschbild – Links: 700rpm; Rechts: 1000rpm

Abschließend ist festzustellen, dass bei der hier vorliegenden Anzahl von Mikrofonen, vor allem bei höheren Drehzahlen, nur ein begrenzter Einblick in das Geräuschbild möglich ist. Zusätzliche Mikrofone dieses Typs waren nicht vorhanden, sodass die räumliche Auflösung hier nicht weiter erhöht werden konnte. Alternativ kann auch durch ein gezieltes Platzieren der einzelnen Mikrofone, im Bereich der hier aufgezeichneten Störbereiche, die Auflösung weiter erhöht werden.

Die Störquellenortung, direkt am Zahnriemen, hat sich als schwierig erwiesen. Reflexionen sind in diesem Bereich nicht zu vermeiden und erschweren es eine eindeutige Aussage zu treffen. Die Mittelung mehrerer Geräuschbilder half hierbei einen besseren Einblick zubekommen.

7.3 Dämpfungsverhalten der Rumpfverkleidung

Zur Untersuchung des Dämpfungsverhaltens wurde für jede untersuchte Drehzahl die Effektivwerte der Mikrofonzeitsignale, mit und ohne Rumpfverkleidung, aufgenommen und innerhalb einer Excel-Tabelle gegenübergestellt. Diese Datei ist auch mit auf der CD enthalten. Ein Ausschnitt der Messwerttabellen ist auch im Anhang A1.3 hinterlegt.

7.3.1 Störpegelentwicklung

Mit Hilfe des Übertragungsfaktors von 10mV/Pa und des Verstärkungsfaktors für die hier entwickelte Verstärkerschaltung aus Abschnitt 3.2, wurden für die Mikrofone (0-4) die Schalldruckpegel berechnet. Zur Berechnung des Schalldruckpegels dient die Gleichung (4.19) aus [16] – „Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen“ S.10. Für den Referenzwert p_0 wird der Schalldruck an der Hörschwelle bei 1kHz von $2 \cdot 10^{-5}$ Pa genommen.

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (7.3)$$

In Abbildung 7.10 ist nun die Schalldruckpegelentwicklung im Bezug zur Drehzahl abgebildet. Der Verlauf der einzelnen Mikrofone ist nahezu deckungsgleich. Daher wurde in Abbildung 7.11 hierzu der gemittelte Signalverlauf dargestellt, der im Vergleich steht zu der Messung mit Rumpfverkleidung.

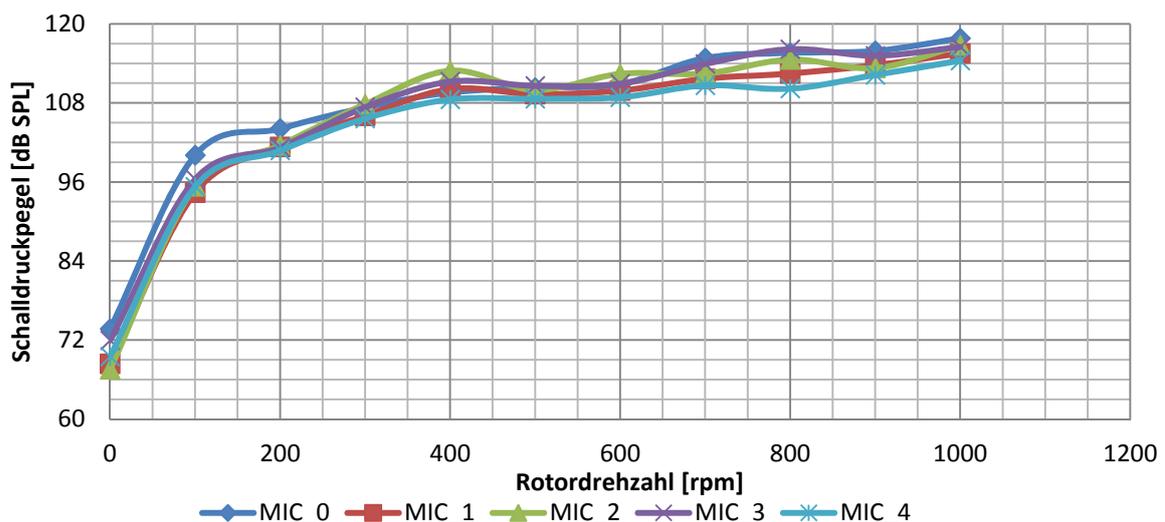


Abbildung 7.10: Schalldruckpegelentwicklung (SPL)– Mic (0-4) ohne Rumpfverkleidung.

Bei Stillstand liegt ein mittlerer Schalldruckpegel von 70,23dB vor und bei 100rpm steigt dieser Wert auf 96,30dB an. Von hier aus geht es bis 1000rpm mit einem näherungsweise linearen Anstieg mit $\approx 1,67$ dB/100rpm weiter. Hier wird der Spitzenwert

mit einem Schalldruckpegel von 116,21dB bei einem Abstand von etwa 3cm zur Zahnradoberfläche erreicht. Beim Vergleich der beiden Schalldruckpegelverläufe sind keine merklichen Unterschiede ersichtlich. Damit hat die Rumpfverkleidung innerhalb des Versuchsmodells keinen größeren Einfluss auf den Schalldruckpegel. Bei 400rpm zeichnet sich eine leichte Überhöhung ab, die aus einem Vergleich der Frequenzspektren aus Abbildung 7.4 auf die hohe Amplitude der Grundschiwingung zusammen mit dem hohen Oberwellenanteil der Zahneingriffsfrequenz zurückzuführen ist.

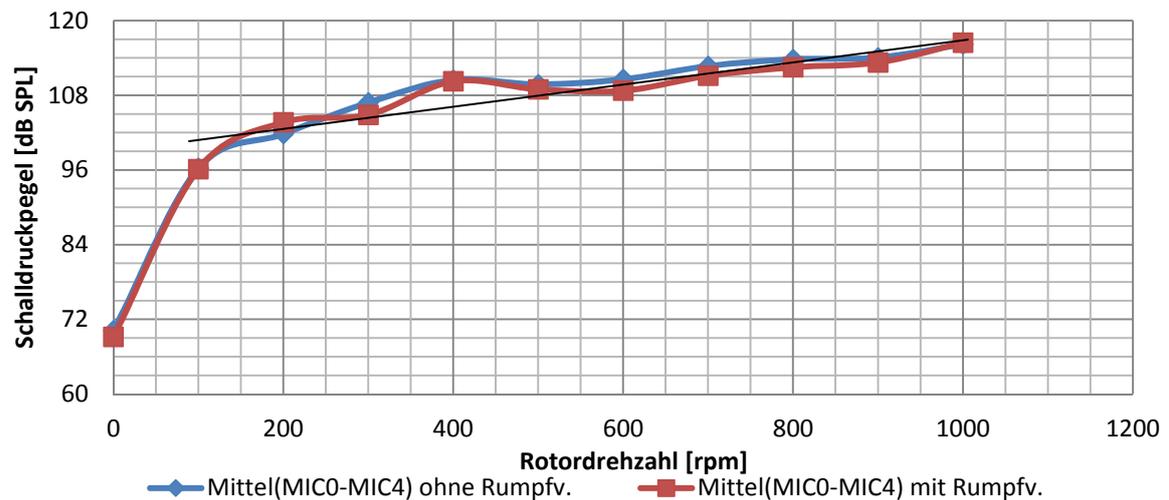


Abbildung 7.11: Schalldruckpegelentwicklung Mic (0-4); ohne und mit Rumpfv.

Da die Verstärkungs- und Übertragungsfaktoren für die weiteren Messmikrofone nicht vorliegen wurde an dieser Stelle nur eine Normierung der Messdaten nach Gleichung (7.4) durchgeführt. Als Referenzwert u_0 dient hier der Effektivwert der Stillstandsmessung des jeweiligen Mikrofons.

$$L_{PR} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{u_{RMS}}{u_0} \right) \text{ dB} \quad (7.4)$$

Aufgrund der unterschiedlichen Ausführungsform der einzelnen Mikrofone sind diese nur begrenzt untereinander zu vergleichen. Ein Vergleich der beiden Messreihen mit und ohne Rumpfverkleidung ist aber durchaus möglich, worauf eine Mittelung der Signalverläufe durchgeführt wurde. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.12 dargestellt.

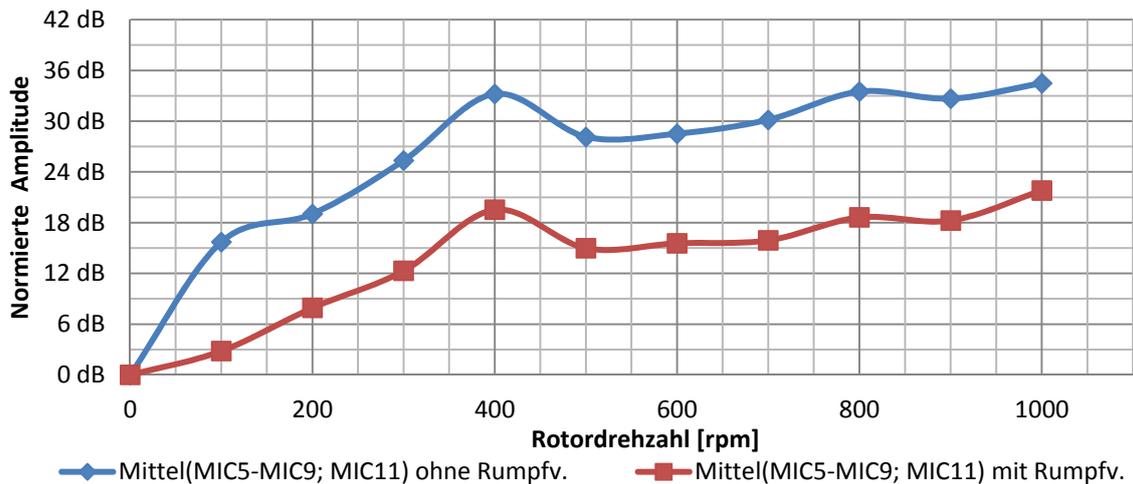


Abbildung 7.12: Vergleich der gemittelten Amplitudenverläufe (Mic5-Mic9; Mic11)

Im allgemeinen weisen die beiden Signalverläufe bereits einige Analogien zu den zuvor betrachteten Mikrofonen am Zahnriemen auf. Ab 100rpm ist wieder ein nahezu linearer Verlauf bis 1000rpm zu vermerken und auch die Überhöhung bei 400rpm ist enthalten. Beim Vielfachen dieser Drehfrequenz deutet sich bei 800rpm noch eine weitere leichte Überhöhung an, was darauf hindeutet, dass hier jeweils Resonanzeffekte auftreten.

Ein Vergleich beider Signalverläufe zeigt anschaulich die Wirkungsweise der Rumpfverkleidung. Augenscheinlich verlaufen die beiden Kurven ab 100rpm mit einem Abstand von etwa 15,5dB parallel zueinander. Weiteres zum Dämpfungsverhalten wird im nächsten Abschnitt behandelt.

7.3.2 Störpegeldämpfung

Zur Berechnung des Dämpfungsverhaltens wurden die Messdatensätze der außen stehenden Mikrofone (5-9; 11) mit Rumpfverkleidung mit denen ohne Rumpfverkleidung in Bezug gestellt, wie es auch in Gleichung (7.5) zu sehen ist. In Abbildung 7.13 ist das Ergebnis dieser Berechnung dargestellt.

$$L_{PD} = 20 \cdot \log \left(\frac{u_{RMS_mit_Rumpfv.}}{u_{RMS_ohne_Rumpfv.}} \right) \text{ dB} \quad (7.5)$$

Die Mikrofone (5-8; 11) bewegen sich in einem Bereich von -12dB bis -21dB. Die Signalverläufe weisen teilweise deutliche Schwingungen auf, was zum einen darauf zurückzuführen ist, dass sich das akustische Signal, von der Rotordrehzahl abhängig, spektral verändert, aber auch die Empfangseigenschaften bezogen auf die Frequenzgänge nicht ideal und die Richtcharakteristiken unterschiedlich sind. Das Mikrofon (9) hebt sich von den eingesetzten Mikrofonen etwas heraus. Da das Mikrofon im Vergleich zum Mikrofon (11) relativ weit vom Versuchsmodell entfernt ist, und zudem sich noch leicht darüber befin-

det, ist hier das Dämpfungsverhalten nicht so stark ausgeprägt. Mit steigendem Abstand zum Versuchsmodell sinkt der Direktschallanteil und der Diffusschallanteil nimmt zu. Der Anteil der Hallenakustik beeinflusst demnach zunehmend die Messung, was zur Folge hat, dass der Unterschied mit und ohne Rumpfverkleidung um etwa 6dB niedriger ausfällt.

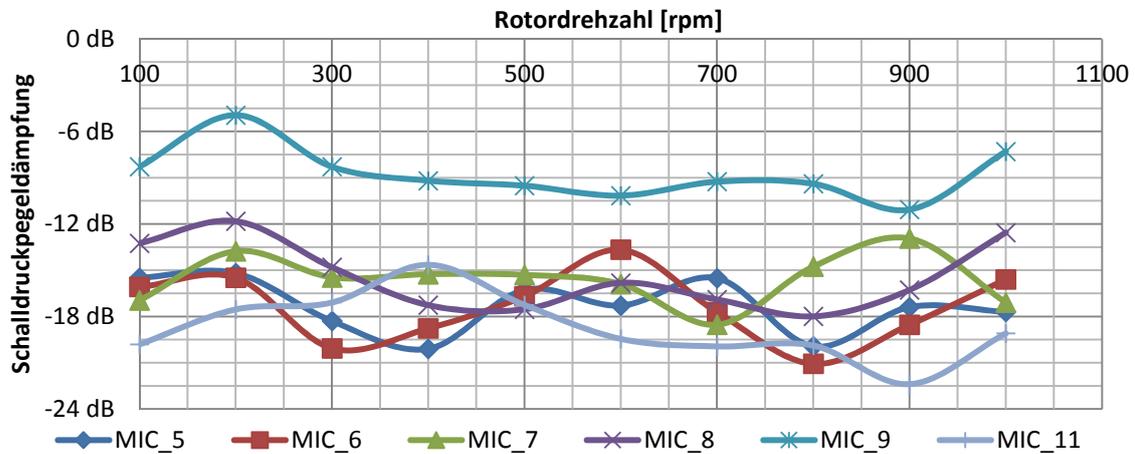


Abbildung 7.13: Schalldruckpegeldämpfung – Mic (0-9, 11)

Zum Erhalt einer allgemeineren Aussage zum Dämpfungsverhalten wurden die Signalverläufe gemittelt und in Abbildung 7.14 dargestellt. Hier stellt sich ein Dämpfungsverhalten von -15,52dB ein. Was dieses Verhältnis für die Lautstärke, den Schalldruck und für die Schallintensität bedeutet wird nach [17] - „Tontechnik-Rechner - sengpielaudio“ berechnet. Daraus folgt eine Lautstärkeänderung ($= 2^{(\Delta L/10)}$) um Faktor 2,93 für die Lautstärke, 5,97 für den Schalldruck ($= 10^{(\Delta L/20)}$) und 35,65 für die Schallintensität ($= 10^{(\Delta L/10)}$).

Für den Lautstärkefaktor liegt hier allerdings keine Bewertung nach der menschlichen Hörkurve vor. Die Empfindung ist subjektiv zu betrachten und kann mit und ohne Bewertung für jeden Menschen durchaus anders ausfallen.

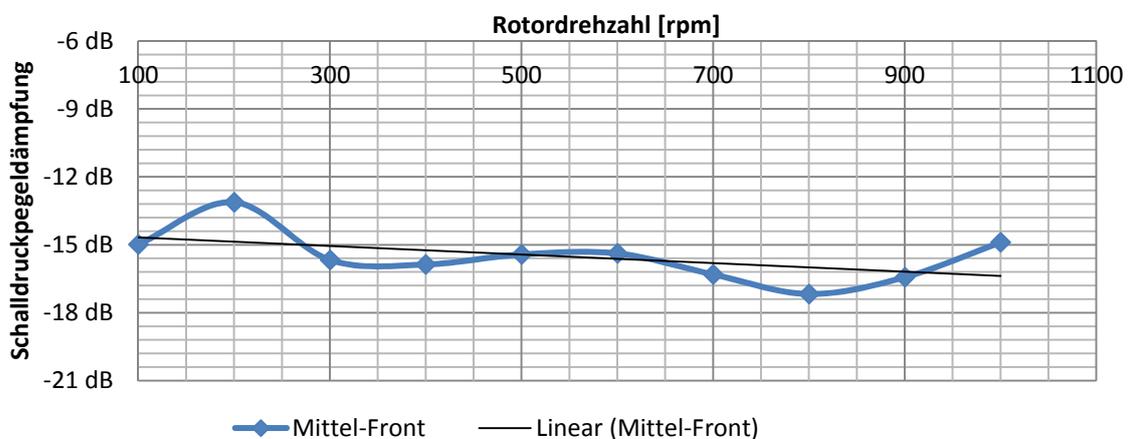


Abbildung 7.14: Schalldruckpegeldämpfung – Mean_Mic (5-9, 11)

Das Dämpfungsverhalten ist näherungsweise linear und sinkt leicht mit steigender Drehzahl ($\approx 0,2\text{dB}/100\text{rot}$). Bei höheren Drehzahlen treten höhere akustische Frequen-

zen auf, die aber im Vergleich zu den niederfrequenten Signalen einen geringeren Energiegehalt aufweisen und sich daher besser dämpfen lassen. Das heißt die Dämpfung der hier auftretenden Störpegel wird mit steigender Drehzahl leicht besser. Allerdings ist auch hier ein leichtes Schwingen zu erkennen.

8 Erweiterungsmöglichkeiten und Aussichten

Hier sind zwei Themen zu nennen zu denen noch weitere Untersuchungen angestellt werden sollten. Zum einem die Störquellenortung und zum anderen das Dämpfen der gefundenen Störschallquellen.

8.1 Störquellenortung

Hier wurde letztendlich nur das „Delay and sum“ Verfahren verwendet um eine Störquellenortung durchzuführen. Dies ist aber nur ein Verfahren von vielen, die zu dieser Thematik existieren. Im Buch [13] Kapitel 6 werden noch einige weitere Verfahren beschrieben, die man hier durchaus noch mit implementieren und testen kann. Exemplarisch kann, alternativ zur Untersuchung im Zeitbereich, wie es hier implementiert wurde, die zeitliche Korrektur der Signallaufzeiten auch im Frequenzbereich erfolgen. Auch eine Filterung im Frequenzbereich würde sich an dieser Stelle anbieten.

Damit die Geräuschbilder auch richtig interpretiert werden können, ist es wichtig zu wissen, wie stark diese Reflexionen einen Einfluss auf das erstellte Geräuschbild haben. Hier sollten weitere Untersuchungen der Störempfindlichkeit und der dabei auftretenden Unsicherheiten erfolgen.

Zur Erhöhung der räumlichen Auflösung sollten außerdem weitere Messmikrofone installiert werden, damit der Abstand zwischen den Mikrofonen sinkt und damit auch ein größerer Frequenzbereich betrachtet werden kann. Da es sich hierbei um ein nahezu periodisches Störsignal handelt, kann alternativ auch versucht werden, die akustischen Aufnahmen mit den Rotorbewegungen zu synchronisieren und über mehrere Messungen mit verschiedenen Mikrofonanordnungen den Abstand so indirekt zu verringern und die Messgenauigkeit zu steigern. Hierzu würde sich das am Rotorversuchsstand verwendete Messsystem eignen. Andernfalls ist es auch ohne Synchronisation der Messdaten möglich, die Auflösung zu erhöhen, in dem die bisherigen Resultate dazu genutzt werden, die Mikrofone präzise im Bereich der Störschallquellen auszurichten.

8.2 Dämpfung der Störschallquellen

Aus der Auswertung gehen einige Bereiche hervor die weiter analysiert werden sollten. Zur Reduzierung des oberwellenhaltigen Klangs sollte das Profil der Zahnriemens und der Zahnräder auf Unregelmäßigkeiten in der Struktur geprüft werden. Mit höherem Aufwand verbunden wäre es, den Zahnriemen auszutauschen. Aber speziell am Zahnriemen existieren einige Optimierungsmaßnahmen, die erheblich zur Minderung der Geräuschentwicklung beitragen. Einige Optimierungsmaßnahmen hierzu stehen im Buch [1] S.76, wovon hier nun einige Stichpunktartige zusammengefasst sind:

- Verwendung einer schmalen Riemenbreite. Eine Halbierung der Riemenbreite hat einer Geräuschminderung von etwa 12dB zur Folge.
- Verwendung einer kleineren Profiltiefe erzeugt einen geringeren Schalleistungspegel.
- Vergrößerung der Riemenmasse zur Verminderung von Resonanzerscheinungen. Verringerung des Schalleistungspegels bis ca. 6dB möglich.
- Lochen des Riemens. Erleichtert die Luftverdrängung und verringert die pulsierende Kompression der Luft. Verringerung des Schalleistungspegels bis zu 10dB möglich.
- Einsatz von Pfeilverzahnung sind Geräuschminderungen um ca. 18 dB möglich.

Dabei ist allerdings noch zu untersuchen, welcher der hier genannten Stichpunkte auch, mit denen hier vorherrschenden Bedingungen, realisierbar sind. Zur Verwendung einer schmalen Riemenbreite muss gewährleistet sein, dass der Zahnriemen noch die Sicherheitskriterien erfüllt. Das gleiche gilt auch für das Lochen des Riemens. Das Erhöhen der Riemenmasse, so wie der Einsatz von einer Pfeilverzahnung sind hier die Ansätze, die verfolgt werden sollten. Hier können hohe Geräuschminderungen erzielt werden, ohne die Stabilität des Zahnriemens zu gefährden. Der Einsatz der Pfeilverzahnung hat allerdings den Nachteil, dass hier die Zahnräder mit ausgetauscht werden müssten.

Zur Vermeidung eines Umbaus kann stattdessen auch versucht werden, die Verspannung des Riemens so gezielt einzustellen, dass dieser möglichst geringe Resonanzerscheinungen an den interessierenden Rotordrehzahlen aufweist.

Neben den primären Maßnahmen, mit denen eben versucht wird die Schallemission am Ursprungsort zu minimieren, ist es aber auch möglich sekundäre Maßnahmen, wie der Einsatz der Rumpfverkleidung, zur Optimierung mit einzuschließen. Alternativ zu dieser passiven Maßnahme stehen die aktiven Maßnahmen. Hier wird versucht ein Schallsignal elektronisch zu erzeugen, das genau gegenphasig zur Geräuschquelle verläuft. Dadurch wird das ursprüngliche Signal teilweise destruktiv überlagert und löscht sich je nach Grad der Überlagerung aus. Dieses Verfahren ist dabei bevorzugt auf niederfrequenterer

Störschallquellen einzusetzen, da sich diese, aufgrund der längeren Wellenlänge, leichter erfassen und überlagern lassen.

Das Prinzip kann zudem direkt mit der Störquellenortung verknüpft werden, in dem das aufgenommene Geräuschbild dazu genutzt wird, die Schallquelle zur Störschallquelle optimal auszurichten. Analog zum Prinzip der Störquellenortung kann aber auch mit Hilfe mehrerer Schallquellen versucht werden, ein lokales Maximum am Punkt der Störschallquelle zu erzeugen und dabei destruktiv zu überlagern. Bei der richtigen Aussteuerung könnten sogar auch mehrere Punkte gleichzeitig aktiv überlagert werden. Läuft dieses Verfahren dazu noch näherungsweise in Echtzeit ab, wäre es außerdem möglich zeitlichen Veränderungen zu folgen. Wenn es sich dabei allerdings nicht um ein periodisches Störsignal handelt, muss zusätzlich gegeben sein, dass auch die Störquellenortung hierzu näherungsweise in Echtzeit abläuft.

Literaturverzeichnis

- [1] RAIMUND, Perneder: *Handbuch Zahnriementchnik: Grundlagen, Berechnung, Anwendung*. Springer Berlin, 2009
- [2] FRIESECKE, Andreas: *Die Audio-Enzykloädie: Ein Nachschlagewerk für den Tontechniker*. München : K.G Saur Verlag, 2007
- [3] MÖSER, Michael: *Technische Akustik*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2012
- [4] RTI Tech - MODEL 1207: *1207A PERFORMANCE SPECIFICATION*.
[URL] <http://www.rti-corp.com/microphones/1207specs.htm>. [Zugriff am 03.06.2013]
- [5] Datenblatt: *OPA726AID*. [URL] <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/97460/BURR-BROWN/OPA726AID.html>. [Zugriff am 05.09.2013]
- [6] Datenblatt: *LM78XX (KA78XX, MC78XX) FIXED VOLTAGE REGULATOR (POSITIVE)*.
[URL] http://pdf.datasheetcatalog.net/datasheets2/52/529144_1.pdf. [Zugriff am 21.06.2013]
- [7] THOMANN, Hans: *Musikhaus Thomann*.
[URL] <http://www.thomann.de>. [Zugriff am 05.09.2013]
- [8] National Instruments: *NI 6341/6343 Specifications*.
[URL] <http://www.ni.com/pdf/manuals/370786d.pdf>. [Zugriff am 25.03.2013]
- [9] National Instruments: *National Instruments – Treiber*.
[URL] <http://www.ni.com/nisearch/app/main/p/bot/no/ap/tech//lang/de/pg/1/sn/catnav:du,n8:3478.41.181.5495,ssnav:ndr/>. [Zugriff am 03.09.2013]
- [10] GEORGI, Wolfgang; METIN, Ergun: *Einführung in LabVIEW 5. Auflage*. München : Carl Hanser Verlag, 2012
- [11] GRÜNIGEN, Daniel ch. von: *Digitale Signalverarbeitung: mit einer Einführung in die kontinuierlichen Signale und Systeme*. Leipzig : Hanser Verlag, 2008
- [12] Sengpielaudio: *Tontechnik-Rechner – Schallgeschwindigkeit*.
[URL] <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallgeschw.htm> [Zugriff am 03.09.2013]
- [13] MÖSER, Michael: *Messtechnik der Akustik*. Berlin : Springer Verlag, 2010

- [14] HUMMES, Frithjof: *Praktikum für Nachrichtentechnik: Beamforming mit Mikrofonarrays*. [URL] <http://www.ifn.ing.tu-bs.de/fileadmin/Praktikum/Skripte/Beamforming.pdf>
- [15] National Instruments: *Specification for the LabVIEW Measurement File (.lvm)*. [URL] <http://www.ni.com/white-paper/4139/en>. [Zugriff am 20.09.2013]
- [16] LERCH, Reinhard; SESSLER, M. Gerhard; WOLFE, Dietrich: *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2009
- [17] Sengpielaudio: *Tontechnik-Rechner*. [URL] <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-pegelaenderung.htm>. [Zugriff am 03.09.2013]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Rotorversuchsstand - ROTEST	3
Abbildung 2.2: Zahneingriff - Zahnriemen.....	4
Abbildung 2.3: Vorderes Zahnrad - Antriebsseite	4
Abbildung 3.1: Prinzipschaltbild eines Kondensatormikrofons.....	8
Abbildung 3.2: Auszug des Datenblatts [4] - Abmessungen/Anschluss.....	9
Abbildung 3.3: Auszug des Datenblatts [4] - Frequenzgang	9
Abbildung 3.4: Schaltungsplan - Mikrofonanschluss	10
Abbildung 3.5: Pin-Konfiguration OPA726 aus [5]/ SMD-Bauteil und Adapter	11
Abbildung 3.6: Schaltungsaufbau - Verstärkerstufe	12
Abbildung 3.7: Layout Leiterplatte	13
Abbildung 3.8: Mikrofonmodul - Lochrasterplatine.....	14
Abbildung 3.9: Mikrofonmodul - Gehäuseeinbau	14
Abbildung 3.10: Anschlussgehäuse	15
Abbildung 3.11: Sennheiser Mikrofone.....	16
Abbildung 3.12: Ausschnitt Anschlussplan aus [8].....	17
Abbildung 3.13: NI X Series Messsystem aus [8]	18
Abbildung 4.1: LabVIEW - Symbol	19
Abbildung 4.2: Modell zur Störquellenortung einer Schallquelle.....	21
Abbildung 4.3: LabVIEW - Fensterfunktionen	23
Abbildung 4.4: Kreuzkorrelation zweier Sinussignale	25
Abbildung 4.5: 3D-Plot des Ergebnisarrays der Suchfunktion in der xy -Ebene	29
Abbildung 4.6: 2D-Plot des Ergebnisarrays der Suchfunktion in z -Richtung.....	30
Abbildung 4.7: Auszug einer Richtcharakteristik aus [14] S.19 für 4 Mikrofone (durchgezogene Linie) und 8 Mikrofonen (gepunktete Linie).....	32
Abbildung 4.8: Ablauf des „Delay and sum“- Verfahrens.....	36
Abbildung 4.9: Programmausschnitt des „Delay and sum“- Verfahrens.....	37
Abbildung 4.10: Testaufbau zur Störquellenortung.....	38
Abbildung 4.11: Geräuschbild des „Delay and sum“- Verfahrens	39
Abbildung 5.1: Setupassistent – Auswahl des Zielverzeichnisses	42
Abbildung 5.2: Setupassistent – Lizenzvereinbarungen / Installation.....	42
Abbildung 5.3: Noise Finder Menü.....	43
Abbildung 5.4: Registerkarte - Messsystem.....	44
Abbildung 5.5: Manuelle Konfiguration der Messhardware	44
Abbildung 5.6: Registerkarte - Messung.....	45
Abbildung 5.7: Manuelle Konfiguration der Messhardware	46
Abbildung 5.8: Registerkarte - Geräuschortung.....	48
Abbildung 5.9: Messmodus Phasenmessung/Kreuzkorrelation	49
Abbildung 5.10: Automatische Laufzeitkorrektur.....	49
Abbildung 5.11: Messmodus – „Delay and sum“	50

Abbildung 5.12: 3D Plot - zweidimensionale/ dreidimensionale Ansicht	51
Abbildung 5.13: Hauptfenster - Auslesen & Analyse.....	52
Abbildung 5.14: Flussdiagramm - Hauptmenü	54
Abbildung 5.15: Flussdiagramm – Messung	55
Abbildung 6.1: Anordnung der Messmikrofone	58
Abbildung 6.2: Verlegen der Signalkabel	60
Abbildung 6.3: Anordnung der Messmikrofone (Indexbezeichnung aus Tabelle 6.1).....	60
Abbildung 6.4: ROTEST - Rumpferkleidung	61
Abbildung 7.1: Frequenzspektrum bei Stillstand – mit Hydraulikpumpen.....	64
Abbildung 7.2: Frequenzspektrum bei 100rpm ohne Rumpfv. – Mean_Mic(0-4)	65
Abbildung 7.3: Frequenzspektrum bei 100rpm ohne/mit Rumpfv. – Mikrofon (11)	65
Abbildung 7.4: Frequenzspektren: 300-500rpm; Mean_Mic (0-4); ohne Rumpfv.	66
Abbildung 7.5: Frequenzspektren: 700rpm; 1000rpm; Mean_Mic (0-4); ohne Rumpfv. 67	
Abbildung 7.6: Geräuschbild – Links: Stillstand; Rechts: 100rpm	69
Abbildung 7.7: Geräuschbild – Links: 300rpm; Rechts: 400rpm	70
Abbildung 7.8: Geräuschbild 500rpm – Links: mit Filter; Rechts: ohne Filter	71
Abbildung 7.9: Geräuschbild – Links: 700rpm; Rechts: 1000rpm.....	72
Abbildung 7.10: Schalldruckpegelentwicklung (SPL)– Mic (0-4) ohne Rumpfv.	73
Abbildung 7.11: Schalldruckpegelentwicklung Mic (0-4); ohne und mit Rumpfv.....	74
Abbildung 7.12: Vergleich der gemittelten Amplitudenverläufe (Mic5-Mic9; Mic11)	75
Abbildung 7.13: Schalldruckpegeldämpfung – Mic (0-9, 11).....	76
Abbildung 7.14: Schalldruckpegeldämpfung – Mean_Mic (5-9, 11)	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Anschlussbelegung für Stecker und Kabel.....	15
Tabelle 3.2: Bezeichnungen und Spezifikationen der Mikrofone	16
Tabelle 3.3: Spezifikationen des NI-6363	17
Tabelle 3.4: Anschlussbelegung der Mikrofonsignale.....	18
Tabelle 4.1: Filterspezifikationen Anti-Aliasing-Filter	34
Tabelle 4.2: Ergebnisse der Testmessung an der Position (0,0m; 0,125m; 0,43m).....	38
Tabelle 5.1: Analysesoftware - Funktionsübersicht	53
Tabelle 6.1: Raumkoordinaten der Messmikrofone mit Bezugspunkt MP_0	59
Tabelle 6.2: Konfiguration der Messhardware	61
Tabelle 7.1: Rotordrehzahlabhängige Zahneingriffsfrequenzen am Zahnriemen.....	63

Anhang A

A1.1: Messung – Frequenzspektren

Tabelle A1.1: Markerpunkte bei 100rpm zu den Frequenzspektren aus Abschnitt 7.1

100 rpm - Zahneingriffsfrequenzen f_z					
Mean_Mic(0-4)		Mic(11) mit Rumpfv.		Mic(11) ohne Rumpfv	
f_z	Amplitude	f_z	Amplitude	f_z	Amplitude
79,57 Hz	5,19 mV	81,24 Hz	0,95 mV	79,57 Hz	1,67 mV
159,15 Hz	17,02 mV	169,57 Hz	1,56 mV	159,15 Hz	2,41 mV
237,47 Hz	10,01 mV	244,14 Hz	0,29 mV	239,97 Hz	2,01 mV
319,13 Hz	9,23 mV	325,38 Hz	0,20 mV	326,22 Hz	1,44 mV
399,54 Hz	6,06 mV	400,79 Hz	0,12 mV	399,12 Hz	2,02 mV
477,45 Hz	5,03 mV			479,12 Hz	1,67 mV
558,69 Hz	4,69 mV			560,77 Hz	1,18 mV
638,27 Hz	3,80 mV			642,01 Hz	1,57 mV
716,17 Hz	3,95 mV				
799,08 Hz	4,09 mV				
875,74 Hz	7,20 mV				
955,31 Hz	4,76 mV				
1034,06 Hz	5,92 mV				
1114,05 Hz	5,42 mV				
Mischfrequenzen f_m					
Mean_Mic(0-4)		Mic(11) mit Rumpfv.		Mic(11) ohne Rumpfv	
f_m	Amplitude	f_m	Amplitude	f_m	Amplitude
49,58 Hz	13,46 mV	47,49 Hz	0,42 mV	45,83 Hz	1,37 mV
99,57 Hz	5,67 mV	99,99 Hz	1,39 mV	75,83 Hz	1,58 mV
172,48 Hz	7,25 mV	224,98 Hz	0,67 mV	99,99 Hz	2,15 mV
250,81 Hz	7,52 mV			169,98 Hz	1,45 mV
429,95 Hz	7,87 mV			212,48 Hz	2,01 mV
628,27 Hz	5,96 mV			224,98 Hz	1,28 mV
829,08 Hz	9,85 mV			260,39 Hz	2,07 mV
993,23 Hz	7,43 mV			286,22 Hz	2,57 mV
1324,44 Hz	5,52 mV			369,54 Hz	2,42 mV
				535,78 Hz	2,24 mV
				661,18 Hz	1,88 mV
				818,25 Hz	1,84 mV
				910,74 Hz	1,80 mV
				1126,55 Hz	1,58 mV
				1326,53 Hz	1,45 mV

Tabelle A1.2: Markerpunkte bei 300, 400, 500rpm zu den Frequenzspektren aus Abschnitt 7.1

Zahneingriffsfrequenzen f_z					
300RPM		400RPM		500RPM	
f_z	Amplitude	f_z	Amplitude	f_z	Amplitude
240,02 Hz	163,93 mV	321,68 Hz	104,33 mV	402,11 Hz	222,23 mV
480,03 Hz	131,05 mV	641,69 Hz	66,64 mV	802,13 Hz	176,52 mV
720,05 Hz	36,62 mV	965,03 Hz	104,33 mV	1204,24 Hz	55,71 mV
960,06 Hz	83,42 mV	1285,04 Hz	58,25 mV	1606,35 Hz	93,04 mV
1200,08 Hz	29,84 mV	1606,71 Hz	37,18 mV	2006,38 Hz	54,60 mV
1440,09 Hz	15,06 mV	1928,39 Hz	53,25 mV	2406,40 Hz	73,54 mV
1680,11 Hz	36,47 mV	2250,07 Hz	43,71 mV	2808,51 Hz	47,98 mV
1918,87 Hz	26,55 mV	2571,74 Hz	32,43 mV	3210,62 Hz	47,80 mV
2158,89 Hz	14,89 mV	2888,42 Hz	12,91 mV	3618,98 Hz	45,19 mV
2397,65 Hz	10,31 mV	3210,10 Hz	21,98 mV	4019,01 Hz	48,02 mV
2640,17 Hz	8,62 mV	3525,10 Hz	16,86 mV	4410,70 Hz	29,23 mV
2881,44 Hz	9,10 mV	3848,45 Hz	12,27 mV	4810,72 Hz	19,34 mV
		4170,12 Hz	8,91 mV		
Mischfrequenzen f_m					
300RPM		400RPM		500RPM	
f_m	Amplitude	f_m	Amplitude	f_m	Amplitude
50 Hz	25,80 mV	100,00 Hz	17,50 mV	200,01 Hz	30,89 Hz
100,01 Hz	30,81 mV	146,67 Hz	33,07 mV	250,02 Hz	27,69 Hz
255,02 Hz	110,96 mV	438,35 Hz	121,34 mV	300,02 Hz	21,16 Hz
500,03 Hz	82,71 mV	668,35 Hz	134,10 mV	452,11 Hz	56,15 Hz
1000,06 Hz	123,77 mV	923,36 Hz	138,23 mV	835,47 Hz	129,77 Hz
1470,09 Hz	90,56 mV	990,03 Hz	177,87 mV	902,14 Hz	79,3 Hz
2010,13 Hz	27,01 mV	1338,37 Hz	222,65 mV	1016,73 Hz	84,22 Hz
		1660,05 Hz	57,40 mV	1356,34 Hz	56,17 Hz
		2010,06 Hz	157,54 mV	1673,02 Hz	60,75 Hz
		2691,75 Hz	50,61 mV		
		4000,12 Hz	28,16 mV		

Tabelle A1.3: Markerpunkte bei 700, 1000rpm zu den Frequenzspektren aus Abschnitt 7.1

Zahneingriffsfrequenzen f_z			
700rpm		1000rpm	
f_z	Amplitude	f_z	Amplitude
562,95 Hz	0,29 mV	799,56 Hz	229,32 mV
1122,99 Hz	0,14 mV	1599,12 Hz	510,78 mV
1685,94 Hz	0,32 mV	2398,68 Hz	424,45 mV
2245,98 Hz	0,29 mV	3195,19 Hz	378,73 mV
2808,93 Hz	0,26 mV	3994,75 Hz	335,30 mV
3371,89 Hz	0,19 mV	4794,31 Hz	146,61 mV
3931,92 Hz	0,22 mV	5593,87 Hz	148,62 mV
4494,88 Hz	0,09 mV	6393,43 Hz	50,84 mV
5054,91 Hz	0,10 mV	7192,99 Hz	89,10 mV
5594,53 Hz	0,04 mV	7989,50 Hz	70,99 mV
		8792,11 Hz	38,43 mV
		9588,62 Hz	22,98 mV
Mischfrequenzen f_m			
700rpm		1000rpm	
f_m	Amplitude	f_m	Amplitude
420,03 Hz	0,12 mV	598,14 Hz	210,96 mV
805,05 Hz	0,09 mV	900,27 Hz	418,95 mV
1017,98 Hz	0,12 mV	946,04 Hz	93,48 mV
1169,66 Hz	0,32 mV	1049,81 Hz	79,98 mV
2388,91 Hz	0,09 mV	1666,26 Hz	396,13 mV
		1797,49 Hz	211,30 mV

A1.2: Geräuschbilder mit gefilterten Frequenzspektren

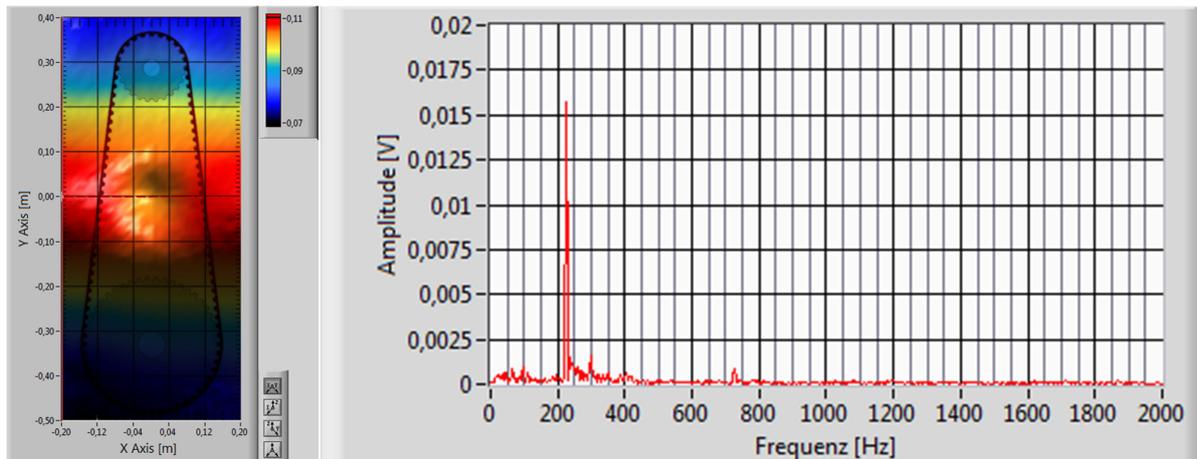


Abbildung A1.1: Geräuschbild/gefaltetes Frequenzspektrum von Mic (0) bei Stillstand

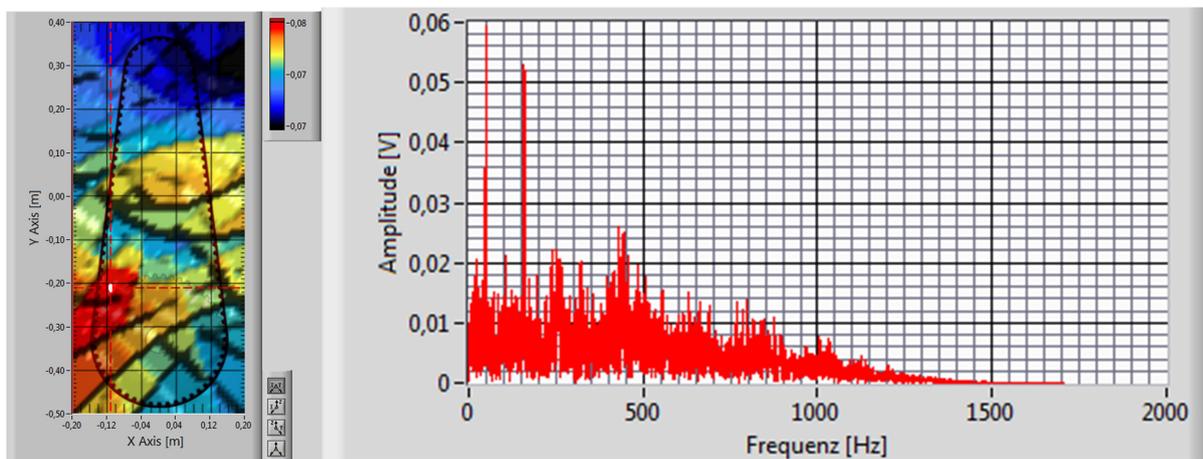


Abbildung A1.2: Geräuschbild/gefaltetes Frequenzspektrum von Mic (0) bei 100rpm

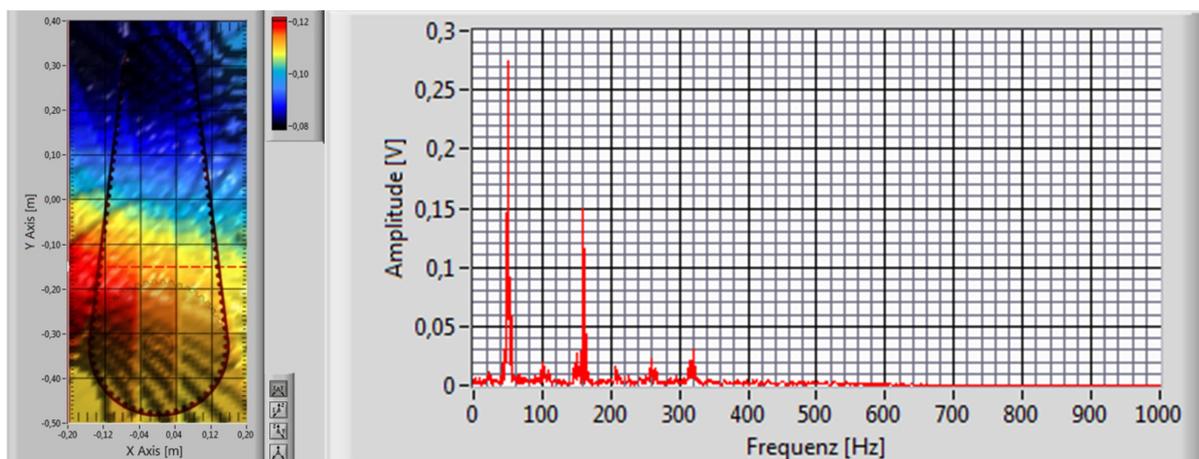


Abbildung A1.3: Geräuschbild/gefaltetes Frequenzspektrum von Mic (0) bei 200rpm

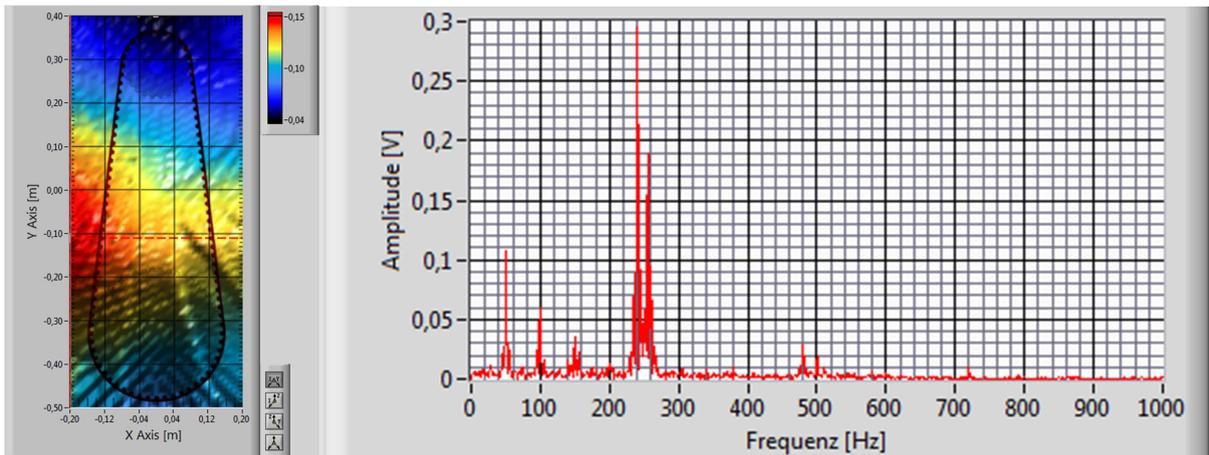


Abbildung A1.4: Geräuschbild/gefiltertes Frequenzspektrum von Mic (0) bei 300rpm

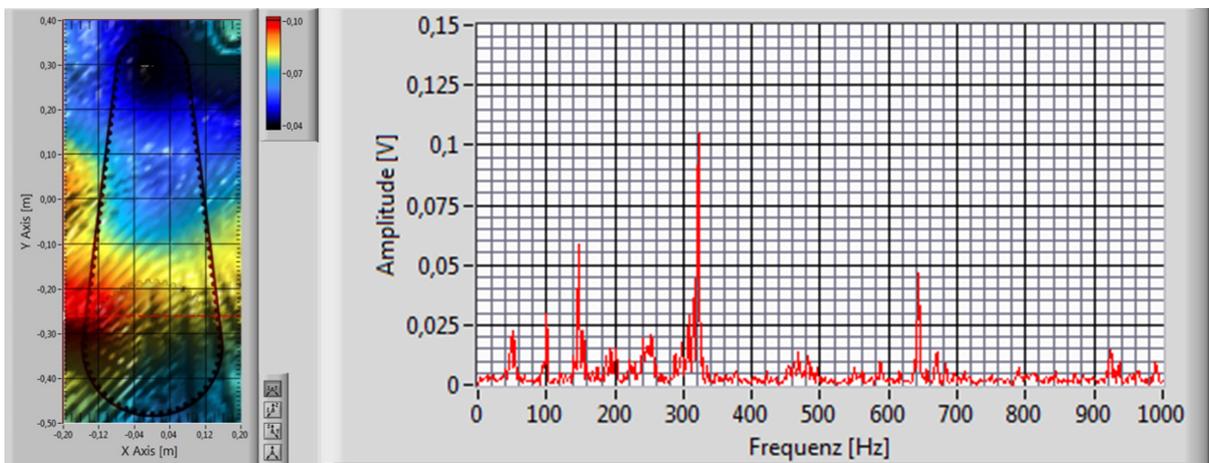


Abbildung A1.5: Geräuschbild/gefiltertes Frequenzspektrum von Mic (0) bei 400rpm

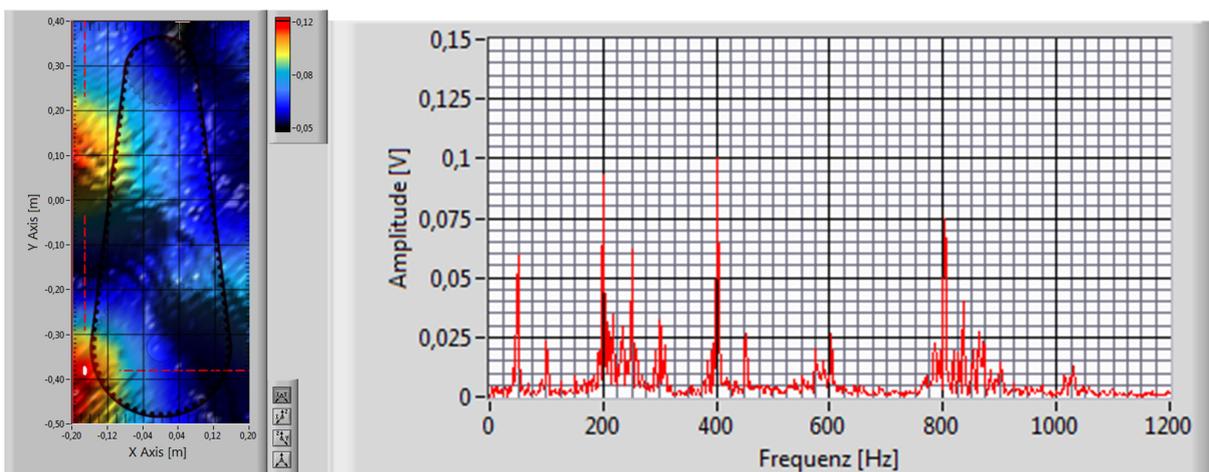


Abbildung A1.6: Geräuschbild/gefiltertes Frequenzspektrum von Mic (0) bei 500rpm

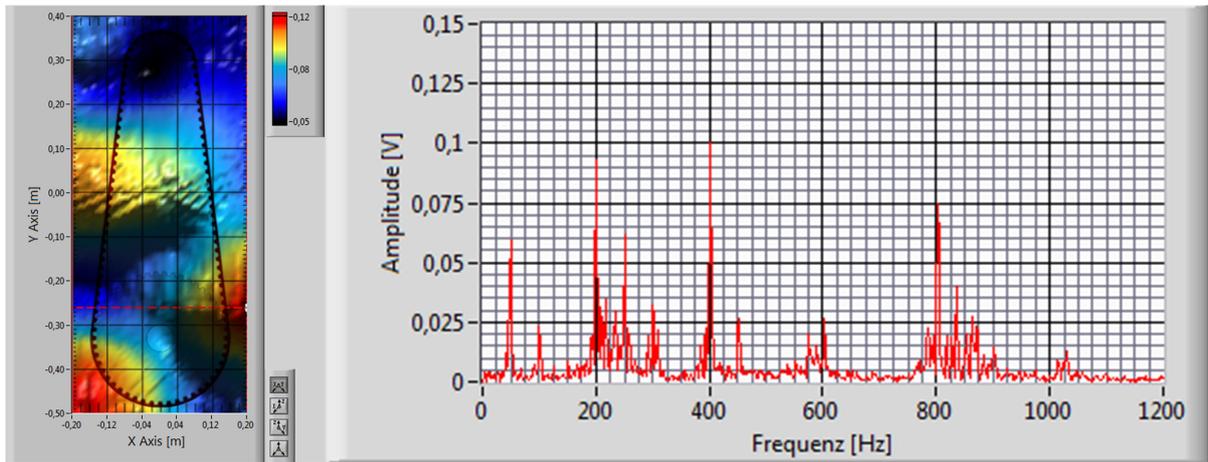


Abbildung A1.7: Geräuschbild/gefiltertes Frequenzspektrum von Mic (0) bei 600rpm

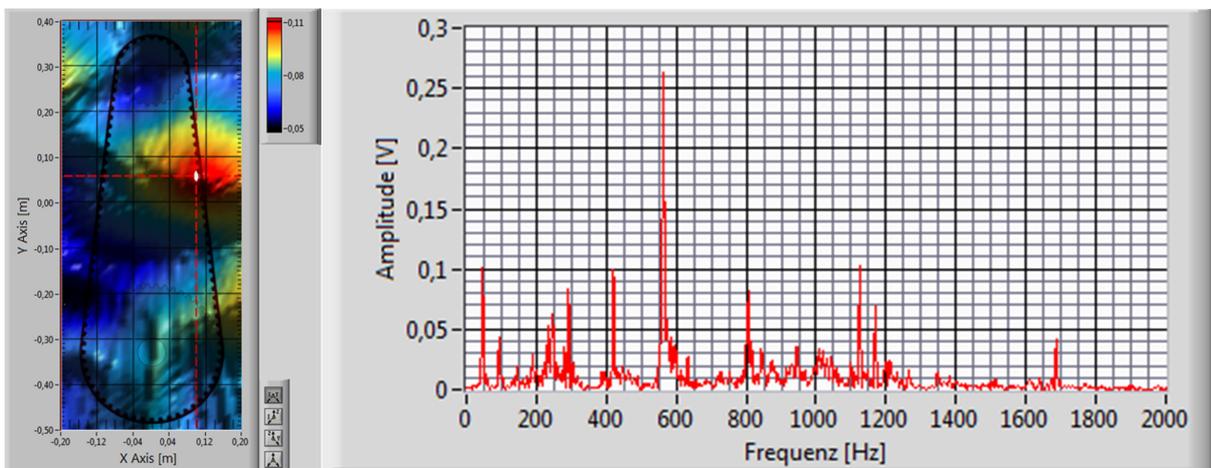


Abbildung A1.8: Geräuschbild/gefiltertes Frequenzspektrum von Mic (0) bei 700rpm

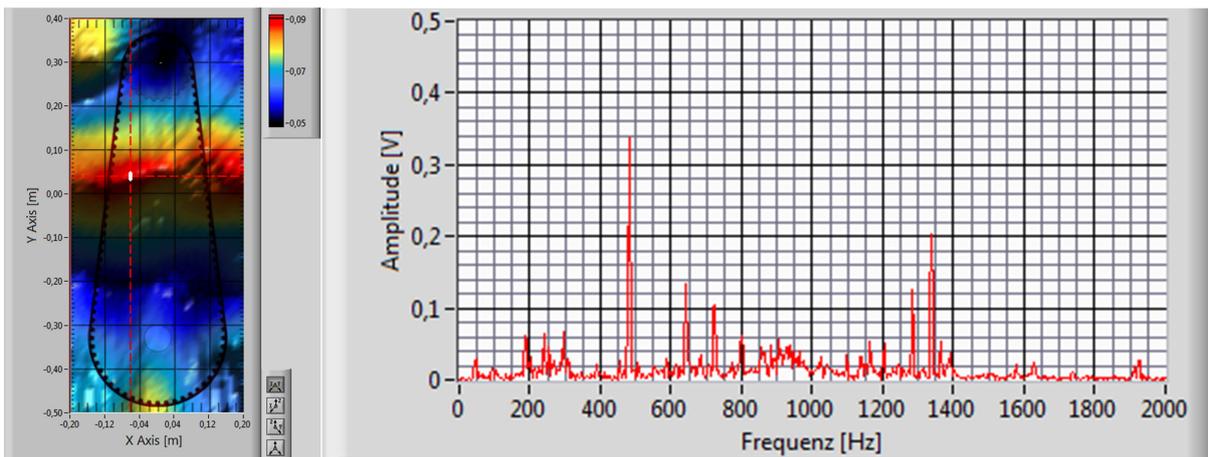


Abbildung A1.9: Geräuschbild/gefiltertes Frequenzspektrum von Mic (0) bei 800rpm

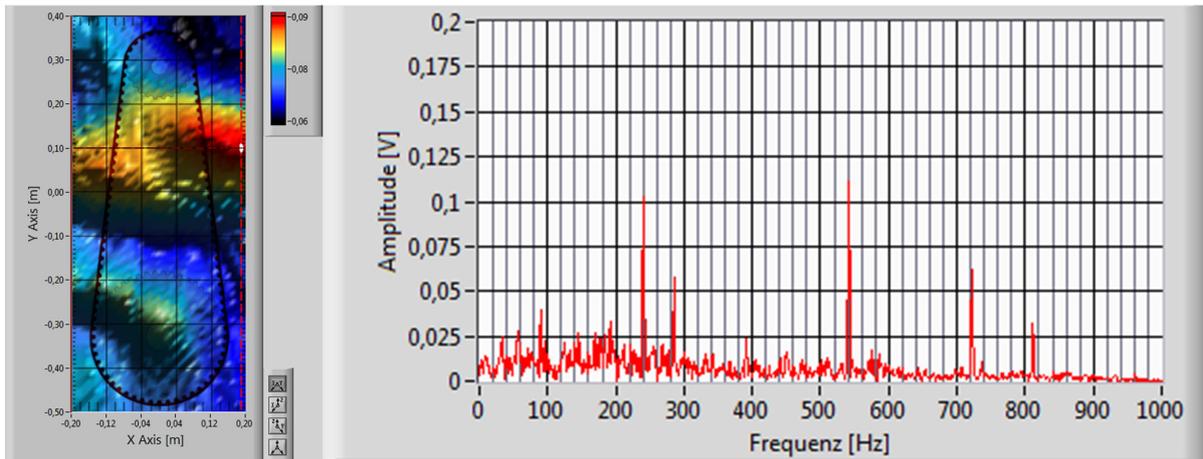


Abbildung A1.10: Geräuschbild/gefiltertes Frequenzspektrum von Mic (0) bei 900rpm

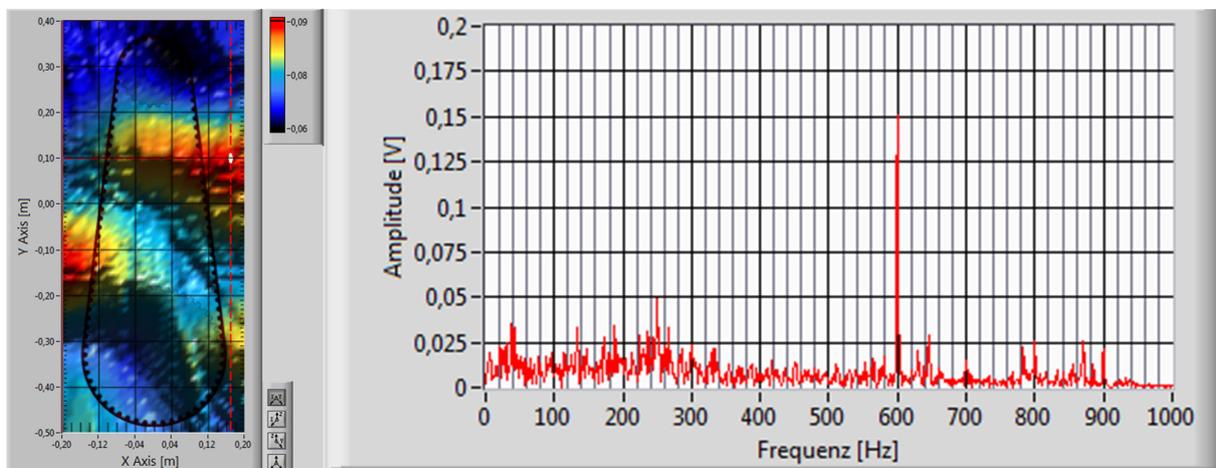


Abbildung A1.11: Geräuschbild/gefiltertes Frequenzspektrum von Mic (0) bei 1000rpm

A1.3: Versuchsmessung - Messwerttabellen

Tabelle A1.4: Effektivwerte der Messmikrofone ohne Rumpfverkleidung aus Abschnitt 7.3.1

	Effektivwert (RMS) [V]										
RPM	MIC_0	MIC_1	MIC_2	MIC_3	MIC_4	MIC_5	MIC_6	MIC_7	MIC_8	MIC_9	MIC_11
0	0,018	0,010	0,009	0,015	0,011	0,011	0,007	0,004	0,008	0,002	0,004
100	0,381	0,198	0,221	0,250	0,220	0,079	0,086	0,035	0,039	0,006	0,053
200	0,606	0,441	0,453	0,437	0,413	0,131	0,129	0,054	0,058	0,011	0,070
300	0,877	0,760	0,930	0,883	0,724	0,318	0,419	0,109	0,150	0,021	0,118
400	1,140	1,210	1,670	1,380	1,010	0,961	1,050	0,342	0,307	0,062	0,321
500	1,240	1,110	1,190	1,280	1,020	0,440	0,462	0,174	0,206	0,032	0,193
600	1,320	1,180	1,580	1,330	1,050	0,502	0,497	0,195	0,213	0,029	0,214
700	2,080	1,450	1,590	1,880	1,290	0,487	0,548	0,249	0,272	0,038	0,271
800	2,280	1,590	2,030	2,430	1,220	0,882	1,100	0,332	0,391	0,055	0,364
900	2,360	1,840	1,750	2,170	1,550	0,755	1,030	0,267	0,347	0,044	0,392
1000	2,940	2,260	2,600	2,530	1,990	1,120	0,873	0,427	0,433	0,061	0,537

Tabelle A1.5: Effektivwerte der Messmikrofone mit Rumpfverkleidung aus Abschnitt 7.3.1

	Effektivwert (RMS) [V]										
RPM	MIC_0	MIC_1	MIC_2	MIC_3	MIC_4	MIC_5	MIC_6	MIC_7	MIC_8	MIC_9	MIC_11
0	0,012	0,010	0,008	0,017	0,010	0,009	0,009	0,003	0,006	0,002	0,004
100	0,370	0,188	0,209	0,254	0,225	0,013	0,014	0,005	0,008	0,002	0,005
200	0,675	0,655	0,494	0,485	0,597	0,023	0,022	0,011	0,015	0,006	0,009
300	0,704	0,697	0,740	0,682	0,515	0,039	0,042	0,018	0,027	0,008	0,017
400	1,130	1,320	1,630	1,420	0,819	0,095	0,121	0,059	0,042	0,022	0,060
500	1,050	1,110	1,060	1,160	0,947	0,068	0,068	0,030	0,027	0,011	0,027
600	1,170	1,050	1,070	1,130	0,805	0,069	0,103	0,031	0,035	0,009	0,023
700	1,810	1,180	1,350	1,490	1,100	0,082	0,071	0,030	0,039	0,013	0,027
800	1,760	1,470	1,610	2,080	1,200	0,089	0,097	0,061	0,049	0,019	0,037
900	1,950	1,690	1,550	2,120	1,500	0,102	0,122	0,060	0,053	0,012	0,030
1000	2,640	2,220	3,010	2,580	2,200	0,146	0,145	0,060	0,102	0,026	0,060

Tabelle A1.6: Schalldruckpegel der Messmikrofone ohne Rumpfverkleidung aus Abschnitt 7.3.1

RPM	MIC_0	MIC_1	MIC_2	MIC_3	MIC_4
0	73,70 dB	68,40 dB	67,56 dB	71,97 dB	69,51 dB
100	100,07 dB	94,38 dB	95,34 dB	96,41 dB	95,30 dB
200	104,10 dB	101,34 dB	101,57 dB	101,26 dB	100,77 dB
300	107,31 dB	106,07 dB	107,82 dB	107,37 dB	105,64 dB
400	109,59 dB	110,11 dB	112,90 dB	111,25 dB	108,54 dB
500	110,32 dB	109,36 dB	109,96 dB	110,59 dB	108,62 dB
600	110,86 dB	109,89 dB	112,42 dB	110,93 dB	108,87 dB
700	114,81 dB	111,68 dB	112,48 dB	113,93 dB	110,66 dB
800	115,61 dB	112,48 dB	114,60 dB	116,16 dB	110,18 dB
900	115,91 dB	113,75 dB	113,31 dB	115,18 dB	112,26 dB
1000	117,82 dB	115,53 dB	116,75 dB	116,51 dB	114,43 dB

Tabelle A1.7: Schalldruckpegel der Messmikrofone mit Rumpfverkleidung aus Abschnitt 7.3.1

RPM	MIC_0	MIC_1	MIC_2	MIC_3	MIC_4
0	69,66 dB	68,06 dB	66,88 dB	73,26 dB	68,17 dB
100	99,81 dB	93,93 dB	94,85 dB	96,55 dB	95,49 dB
200	105,04 dB	104,77 dB	102,32 dB	102,16 dB	103,97 dB
300	105,40 dB	105,31 dB	105,83 dB	105,13 dB	102,69 dB
400	109,51 dB	110,86 dB	112,69 dB	111,50 dB	106,72 dB
500	108,87 dB	109,36 dB	108,96 dB	109,74 dB	107,98 dB
600	109,81 dB	108,87 dB	109,04 dB	109,51 dB	106,57 dB
700	113,60 dB	109,89 dB	111,06 dB	111,91 dB	109,28 dB
800	113,36 dB	111,80 dB	112,59 dB	114,81 dB	110,03 dB
900	114,25 dB	113,01 dB	112,26 dB	114,98 dB	111,97 dB
1000	116,88 dB	115,38 dB	118,02 dB	116,68 dB	115,30 dB

Tabelle A1.8: Pegelentwicklung der Messmikrofone ohne Rumpfverkleidung aus Abschnitt 7.3.1

	Pegelentwicklung [dB]										
RPM	MIC_0	MIC_1	MIC_2	MIC_3	MIC_4	MIC_5	MIC_6	MIC_7	MIC_8	MIC_9	MIC_11
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	26,37	25,99	27,77	24,44	25,79	17,07	21,88	19,31	13,86	12,03	22,80
200	30,40	32,94	34,01	29,29	31,26	21,52	25,40	23,05	17,37	17,20	25,15
300	33,61	37,67	40,26	35,40	36,13	29,22	35,63	29,13	25,67	22,54	29,75
400	35,89	41,71	45,34	39,28	39,02	38,83	43,61	39,06	31,89	32,01	38,44
500	36,62	40,96	42,40	38,62	39,11	32,04	36,48	33,19	28,42	26,24	34,02
600	37,16	41,49	44,86	38,96	39,36	33,19	37,11	34,18	28,71	25,47	34,92
700	41,11	43,28	44,91	41,96	41,15	32,92	37,96	36,31	30,84	27,73	36,97
800	41,91	44,08	47,04	44,19	40,67	38,08	44,01	38,80	33,99	30,96	39,54
900	42,21	45,35	45,75	43,21	42,75	36,73	43,44	36,91	32,95	29,07	40,18
1000	44,12	47,13	49,19	44,54	44,92	40,16	42,01	40,99	34,88	31,80	42,91

Tabelle A1.9: Pegelentwicklung der Messmikrofone mit Rumpfverkleidung aus Abschnitt 7.3.1

	Schalldruckpegelentwicklung [dB]										
RPM	MIC_0	MIC_1	MIC_2	MIC_3	MIC_4	MIC_5	MIC_6	MIC_7	MIC_8	MIC_9	MIC_11
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	30,15	25,87	27,97	23,29	27,33	3,64	3,69	4,41	2,80	1,89	2,19
200	35,37	36,72	35,44	28,90	35,80	8,39	7,81	11,34	7,74	10,41	6,82
300	35,74	37,26	38,95	31,86	34,52	12,98	13,46	15,73	13,06	12,40	11,86
400	39,85	42,80	45,81	38,23	38,55	20,79	22,74	25,86	16,82	20,98	23,00
500	39,21	41,30	42,07	36,48	39,81	17,83	17,69	19,94	13,09	14,88	15,98
600	40,15	40,81	42,15	36,25	38,40	17,96	21,34	20,34	15,09	13,47	14,67
700	43,94	41,83	44,17	38,65	41,11	19,46	18,14	19,83	16,14	16,63	16,24
800	43,70	43,74	45,70	41,55	41,87	20,21	20,84	26,09	18,19	19,73	18,85
900	44,59	44,95	45,37	41,72	43,80	21,40	22,81	26,02	18,87	16,16	17,00
1000	47,22	47,32	51,14	43,42	47,13	24,52	24,31	25,95	24,51	22,65	23,02

Tabelle A1.10: Schalldruckpegeldämpfung der Rumpfverkleidung aus Abschnitt 7.3.2

RPM	Schalldruckpegeldämpfung [dB]											Mean MIC(5-9; 11)
	MIC 0	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 4	MIC 5	MIC 6	MIC 7	MIC 8	MIC 9	MIC 11	
100	-0,25	-0,45	-0,48	0,14	0,20	-15,49	-16,08	-16,95	-13,24	-8,29	-19,81	-14,98
200	0,94	3,44	0,75	0,91	3,20	-15,19	-15,48	-13,76	-11,82	-4,94	-17,54	-13,12
300	-1,91	-0,75	-1,99	-2,24	-2,96	-18,29	-20,06	-15,45	-14,80	-8,29	-17,09	-15,66
400	-0,08	0,76	-0,21	0,25	-1,82	-20,09	-18,77	-15,25	-17,26	-9,19	-14,64	-15,87
500	-1,44	0,00	-1,00	-0,86	-0,65	-16,27	-16,68	-15,30	-17,52	-9,52	-17,25	-15,42
600	-1,05	-1,01	-3,39	-1,42	-2,31	-17,29	-13,67	-15,89	-15,81	-10,16	-19,45	-15,38
700	-1,21	-1,79	-1,42	-2,02	-1,38	-15,52	-17,71	-18,53	-16,89	-9,25	-19,94	-16,31
800	-2,25	-0,68	-2,01	-1,35	-0,14	-19,93	-21,07	-14,76	-17,99	-9,39	-19,88	-17,17
900	-1,66	-0,74	-1,05	-0,20	-0,28	-17,39	-18,53	-12,94	-16,27	-11,06	-22,38	-16,43
1000	-0,93	-0,16	1,27	0,17	0,87	-17,70	-15,59	-17,09	-12,56	-7,30	-19,09	-14,89
Mean	-0,98	-0,14	-0,95	-0,66	-0,53	-17,31	-17,36	-15,59	-15,42	-8,74	-18,71	-15,52

Anhang B: CD

Inhalt:

- Dokumentation
- Applikation „NoiseFinder“- Setupdateien
- LabVIEW-Projekt „NoiseFinder“
- Versuchsmessung - Mikrofonmessdaten
- DIAdem – Mikrofonmessdaten und Frequenzspektren
- Excel-Tabellen: Pegelentwicklung und Dämpfungsverhalten
- Geräuschbilder