

Diplomarbeit

# Entwicklung einer Akustischen Kamera zur Analyse der Geräuschabstrahlung von Antriebsstrangkomponenten

Uwe Neugebauer

**Betreuung:**

DI Dr.techn. Alois Sontacchi  
Institut für Elektronische Musik und Akustik (IEM)  
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

DI Lukas Ottowitz  
DI (FH) Joachim Sigl  
Magna Powertrain AG & Co KG

**Beurteilung:**

O.Univ.Prof. Mag.art. DI Dr.techn. Robert Höldrich

eingereicht an der Technischen Universität Graz im Juni 2011

# Kurzfassung

Zur akustisch-messtechnischen Analyse von Antriebsstrangkomponenten ist eine umfassende Prüfung auf einem geeigneten Prüfstand erforderlich. Für die Untersuchung der akustischen Eigenschaften eines Mesobjekts stellen Beschleunigungssensoren in vielen Anwendungsfällen ein probates Werkzeug zur Körperschallanalyse dar. Eine gezielte Erfassung des in die Luft abgestrahlten Schallanteils kann jedoch nur unter Verwendung von speziellen Mikrofonanordnungen realisiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines optoakustischen Messsystems, das eine Lokalisation der schallemittierenden Bereiche von Antriebsstrangkomponenten ermöglicht. Systeme dieser Art werden gemeinhin als „Akustische Kamera“ bezeichnet und bestehen im Wesentlichen aus einem optischen Kamerasystem, einer Mikrofonanordnung (Mikrofonarray) und einer nachgeschalteten Signalverarbeitung zur Datenauswertung, die meist in Form einer Softwareumsetzung erfolgt. Die Visualisierung der lokalisierten akustischen Quellen wird durch eine semitransparente Überlagerung der optischen Bildinformation mit einer berechneten Schalldruckkartierung erreicht.

Die Entwicklungsaufgabe umfasst sowohl die Auslegung, Kombination und den Bau entsprechender Hardware, als auch die Implementierung geeigneter Softwaremodule. Hierfür wurde ein ebenes 40-kanaliges Wheel-Array entworfen, das, gepaart mit einer Kamera und Delay&Sum Beamforming den gewünschten Funktionsumfang realisiert. Besonderes Augenmerk wurde auf die Drehzahlabhängigkeit der auftretenden Schallereignisse gelegt. Dieser Rechnung tragend, lässt die Software zusätzlich zu einer Zeit-Frequenz-Analyse der Messsignale eine Auswertung anhand auftretender Ordnungen zu. Die Softwareimplementierung ist zur Gänze in MATLAB® umgesetzt und erlaubt durch eine integrierte grafische Benutzeroberfläche und den modularen Softwareaufbau einfache Nutzung bzw. erleichterte Erweiterbarkeit.

Die Evaluierung der Leistungsfähigkeit des Systems erfolgt neben numerischen Simulationen sowohl durch Messungen unter Laborbedingungen, als auch unter realen Prüfstandsbedingungen anhand einer Vermessung bekannter, steuerbarer Schallquellenanordnungen, sowie durch eine Referenzvermessung eines ausgewählten elektrischen Achsantriebs.

Diese Arbeit entstand in Kooperation mit der Magna Powertrain AG & Co KG in Lannach, Österreich.

# Abstract

Acoustic-metrology-related analysis of powertrain components requires in-depth testing on an appropriate test stand. In a majority of cases, acceleration sensors can be considered an appropriate tool for analysing structure-borne sound when researching into the acoustic characteristics of devices under test. However, specific recording of the share of noise emitted into the air requires employing specific microphone test arrays.

This thesis aims at developing an opto-acoustic measurement system for localising noise-emitting areas of powertrain components. Such systems are commonly referred to as 'acoustic camera' and, in essence, consist of an optical camera system, a microphone array and a signal-processing unit for analysing data downstream (usually a software application). Visualisation of localised acoustic sources is achieved via semi-transparent overlap of optical imaging with calculated sound pressure mapping.

The respective development task comprises both dimensioning, combination and prototyping of corresponding hardware as well as implementation of appropriate software modules. In order to achieve this, a 40-channel plane wheel array was designed to perform the scope of operations desired, in concert with a camera and a Delay&Sum Beamforming algorithm. Particular emphasis was put on rotation speed dependency of sound events occurring. In order to accommodate for such events, in addition to time-frequency analysis of measurement signals, the software allows for evaluation of occurring orders. Software implementation was entirely accomplished in MATLAB® and allows easy handling and upgrading based on an integrated graphical user interface and modular software configuration.

System performance evaluation is achieved by means of numerical simulations, via measurements under laboratory conditions, real-life test-stand application measurement of established and controllable sound source configurations, as well as reference point measurement of a select electric axle drive.

This thesis was developed in cooperation with Magna Powertrain AG & Co KG in Lannach, Austria.

# Eidesstattliche Erklärung/ Statutory Declaration

Deutsch:

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....  
(Ort, Datum) .....  
(Unterschrift)

English:

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, .....  
(place, date) .....  
(signature)

# Danksagung

Allen voran gilt mein großer Dank dir, lieber Alois, für deine Zeit, deine Ideen und die vielen intensiven Gespräche. Auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IEM, im besonderen Markus, Franz und Stefan danke ich für die Selbstverständlichkeit, mit der sie mich im Laufe der Arbeit unterstützt haben.

Einen besonders großen Anteil am Gelingen der Arbeit hatte die gesamte Abteilung NVH der Magna Powertrain AG & Co KG. Vor allen Dingen möchte ich euch, lieber Lukas, Joachim und Herwig danken, für eure Leidenschaft zum Thema, euer großes Engagement und die bedingungslose Integration in euer Team. Es war eine wahre Freude mit euch zu arbeiten.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meiner Familie, der ich diese Arbeit widmen möchte, für den Rückhalt, die Unterstützung und die Ermöglichung der Ausbildung.

Uwe Neugebauer  
Graz, Juni 2011

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>viii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Physikalische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Schallwellenausbreitung . . . . .	3
2.1.1 Die Wellengleichung in kartesischen Koordinaten . . . . .	3
2.1.2 Die Wellengleichung in Kugelkoordinaten . . . . .	4
2.2 Aperturtheorie . . . . .	5
2.2.1 Feldregionen . . . . .	5
2.2.2 Kontinuierliche Volumsapertur . . . . .	5
2.2.2.1 Aperturfunktion . . . . .	5
2.2.2.2 Richtungsfunktion . . . . .	6
2.2.3 Kontinuierliche lineare Apertur . . . . .	7
2.2.4 Kontinuierliche planare Apertur . . . . .	8
<b>3 Mikrofonarrays</b>	<b>10</b>
3.1 Lineare Arrays . . . . .	10
3.1.1 Apertur- und Richtungsfunktion . . . . .	10
3.2 Planare Arrays . . . . .	12
3.2.1 Apertur- und Richtungsfunktion . . . . .	12
<b>4 Beamforming</b>	<b>14</b>
4.1 Beamsteering . . . . .	14
4.2 Delay&Sum Beamforming . . . . .	16
<b>5 Akustische Kamera</b>	<b>19</b>
5.1 Hardwaredesign . . . . .	19
5.1.1 Mikrofonarray . . . . .	19
5.1.1.1 Qualitätskriterien . . . . .	20
5.1.1.2 Geometriedesign . . . . .	22

5.1.2	Aufzeichnung der Mikrofon- und Drehzahlssignale . . . . .	25
5.1.3	Aufzeichnung des optischen Bildes . . . . .	26
5.2	Softwaredesign . . . . .	27
5.2.1	Programm „Cheese“ . . . . .	28
5.2.2	Programm „Datenauswertung“ . . . . .	28
5.3	Funktionsevaluierung . . . . .	31
5.3.1	Vermessung des Lautsprecherarrays . . . . .	31
5.3.1.1	Testsignale . . . . .	31
5.3.1.2	Vermessung im Tonstudio . . . . .	32
5.3.1.3	Vermessung am Prüfstand . . . . .	38
5.3.2	Vermessung realer Antriebsstrangkomponenten . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>48</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>50</b>
<b>A</b>	<b>Geräteverzeichnis und Messketten</b>	<b>52</b>
<b>B</b>	<b>Bestimmung des Frequenzganges eines Tropfenlautsprechers</b>	<b>62</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Einfall ebener Wellen auf eine kontinuierliche, lineare Apertur . . . . .	6
2.2	Normalisierte Fernfeld-Richtungsfunktion der Rechteck-Aperturfunktion . . . . .	8
2.3	Normalisierte horizontale Fernfeld-Richtungsfunktion der endlichen Rechteck-Aperturfunktion in Polardarstellung für unterschiedliche $L/\lambda$ . . . . .	8
3.1	Normalisierte Fernfeld-Beam-Patterns eines linearen, diskreten Arrays . . . . .	11
3.2	Normalisiertes Fernfeld-Beam-Pattern eines linearen, diskreten Arrays mit $N = 8$ , $d = 0.1$ und $500 \leq f \leq 3500$ . . . . .	12
3.3	Normalisiertes Fernfeld-Beam-Pattern eines planaren, diskreten Grid-Arrays mit $M = N = 8$ und $d = \lambda/2$ . . . . .	13
4.1	Horizontales Beam-Pattern für ein lineares, diskretes Array mit $N = 15$ und $d = 0.1$ für $\phi' = 0^\circ$ und $\phi' = 20^\circ$ . . . . .	15
4.2	Normalisierte, horizontale Fernfeld-Beam-Patterns der endlichen Rechteck-Aperturfunktion der Länge $L$ in Polardarstellung für $L/\lambda = 4$ und unterschiedliche $\phi$ . . . . .	16
4.3	Einfall ebener Wellen auf ein lineares diskretes Sensorarray . . . . .	16
4.4	Delay&Sum Beamformer, Blockschaltbild . . . . .	18
5.1	Definition der 3-dB beamwidth (a) und der Nebenkeulendämpfung (b) . . . . .	20
5.2	64-Kanal Grid-Array mit einer Gesamtapertur von $1 LE^2$ ( $LE$ =Längeneinheit) (a) und dessen Co-Array (b) . . . . .	21
5.3	Ausgewählte planare Arraygeometrien für den Einsatz als Akustische Kamera . . . . .	22
5.4	Co-Arrays der in Abbildung 5.3 dargestellten planaren Arraygeometrien . . . . .	24
5.5	schematische Darstellung des Trägergerüsts (a) und Rückansicht des gefertigten 40-Kanal Wheel-Arrays (b) . . . . .	25
5.6	Webcam . . . . .	26
5.7	Testbilder zur Bestimmung der Aberrationen der Webcam . . . . .	27
5.8	Tonnenverzeichnung . . . . .	27
5.9	grafische Benutzeroberfläche „Cheese“ . . . . .	28
5.10	grafische Benutzeroberfläche „Datenauswertung Teil 1“ . . . . .	29
5.11	grafische Benutzeroberfläche „Datenauswertung Teil 2“ . . . . .	30
5.12	geometrische Anordnung der Tropfenlautsprecher im Lautsprecherarray . . . . .	31
5.13	Draufsicht Messanordnung im Tonstudio . . . . .	32
5.14	Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio, log. Sweep @ 5000 Hz, Dynamik = 9 dB, Fernfeld-Annahme . . . . .	33



5.15	Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio, log. Sweep @ 3500 Hz, Dynamik = 9 dB, Fernfeld-Annahme . . . . .	33
5.16	Einfall ebener bzw. sphärischer Wellen auf ein lineares, diskretes Sensorarray . . . . .	34
5.17	Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio, log. Sweep @ 5000 Hz, Dynamik = 9 dB, Nahfeld-Annahme . . . . .	35
5.18	Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio, log. Sweep @ 3500 Hz, Dynamik = 9 dB, Nahfeld-Annahme . . . . .	35
5.19	Messung Tropfenlautsprecher 1 und 4 gleichzeitig bespielt, Tonstudio, log. Sweep @ 1000 Hz (a) bzw. 1500 Hz (b), Dynamik = 6 dB, Nahfeld-Annahme . . . . .	36
5.20	Boxplot der Abweichungen in X-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Tonstudio) . . . . .	37
5.21	Boxplot der Abweichungen in Z-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Tonstudio) . . . . .	38
5.22	Draufsicht Messanordnung am Prüfstand . . . . .	39
5.23	Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio vs. Antriebsstrangprüfstand, log. Sweep @ 5000 Hz, Dynamik = 9 dB, Nahfeld-Annahme . . . . .	39
5.24	Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio vs. Antriebsstrangprüfstand, log. Sweep @ 3500 Hz, Dynamik = 9 dB, Nahfeld-Annahme . . . . .	40
5.25	Boxplot der Abweichungen in X-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Prüfstand) . . . . .	41
5.26	Boxplot der Abweichungen in Z-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Prüfstand) . . . . .	42
5.27	Boxplot der Abweichungen in X-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Prüfstand) . . . . .	43
5.28	Boxplot der Abweichungen in Z-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Prüfstand) . . . . .	44
5.29	3D-CAD-Modell des elektrischen Achsantriebs . . . . .	45
5.30	Draufsicht Messanordnung am Prüfstand . . . . .	45
5.31	Hochlaufmessung elektrischer Achsantrieb (Zug), Prüfstand, Verzahnungsgeräusch des Getriebes, 21. Ordnung, Dynamik = 9 dB . . . . .	46
5.32	Hochlaufmessung elektrischer Achsantrieb (Zug), Prüfstand, Verzahnungsgeräusch des Getriebes, 42. Ordnung, Dynamik = 9 dB . . . . .	46
5.33	Hochlaufmessung elektrischer Achsantrieb (Zug), Prüfstand, Geräuschentwicklung Elektromotor, 40. Ordnung, Dynamik = 9 dB . . . . .	47
5.34	Messung elektrischer Achsantrieb, Lokalisation eines Schaltgeräusches im ITA, Dynamik = 6 dB . . . . .	47
A.1	Müller-BBM PAK-Mobil MK II . . . . .	52
A.2	PCB 130D21 . . . . .	52
A.3	TMS 130C10 und TMS130P11 . . . . .	53
A.4	Brüel & Kjær 4321 - Sound Level Calibrator . . . . .	53
A.5	Tropfenlautsprecher . . . . .	53
A.6	Logitech C905 . . . . .	54
A.7	RME Fireface 800 . . . . .	54

A.8	RME ADI-8 DS . . . . .	54
A.9	RME ADI 648 . . . . .	55
A.10	Behringer Ultragain Pro-8 Digital ADA8000 . . . . .	55
A.11	Apart PA 4060 . . . . .	55
A.12	RME HDSPe MADI . . . . .	56
A.13	HP Compaq 8510p . . . . .	56
A.14	HP EliteBook 8530w . . . . .	56
A.15	G.R.A.S. Free Field Microphone Type 40AF . . . . .	57
A.16	G.R.A.S. Preamplifier Type 26AK . . . . .	57
A.17	G.R.A.S. Power Module 12AA . . . . .	57
A.18	Outline ET250-3D . . . . .	58
A.19	Systemaufbau für die Bespielung der Tropfenlautsprecher . . . . .	59
A.20	Mess- und Wiedergabekette für die Frequenzgangsbestimmung eines Tropfenlautsprechers . . . . .	59
A.21	schematischer Systemaufbau der Akustischen Kamera . . . . .	60
B.1	Draufsicht Messanordnung am Institut für Elektronische Musik und Akustik (nicht maßstabsgetreu), Messung: Bestimmung der winkelabhängigen Frequenzgänge eines Tropfenlautsprechers . . . . .	62
B.2	Foto Messanordnung, Messung: Bestimmung der winkelabhängigen Frequenzgänge eines Tropfenlautsprechers . . . . .	63
B.3	Frequenzgänge eines Tropfenlautsprechers in 1°-Schritten von 0° (oberste Linie) - 90° (unterste Linie), 1 – 10 kHz . . . . .	63

# Tabellenverzeichnis

5.1	Hauptkeulenbreite und Nebenkeulendämpfung der untersuchten Beam-Patterns ( $\phi = \theta = 90^\circ$ )	23
5.2	Hauptkeulenbreite und Nebenkeulendämpfung der untersuchten Beam-Patterns bei maximaler Auslenkung der Hauptkeule um $\pm 24^\circ$ um die Ausgangslage $\phi = \theta = 90^\circ$	23
A.1	Müller-BBM PAK-Mobil MK II, Spezifikationen (Auszug)	52
A.2	PCB 130D21, Spezifikationen (Auszug)	52
A.3	TMS 130C10 und TMS130P11, Spezifikationen (Auszug)	53
A.4	Brüel & Kjær 4321 - Sound Level Calibrator, Spezifikationen (Auszug)	53
A.5	Tropfenlautsprecher, Spezifikationen (Auszug)	53
A.6	Logitech C905, Spezifikationen (Auszug)	54
A.7	RME Fireface 800, Spezifikationen (Auszug)	54
A.8	RME ADI-8 DS, Spezifikationen (Auszug)	54
A.9	RME ADI 648, Spezifikationen (Auszug)	55
A.10	Behringer Ultragain Pro-8 Digital ADA8000, Spezifikationen (Auszug)	55
A.11	Apart PA 4060, Spezifikationen (Auszug)	55
A.12	RME HDSPe MADI, Spezifikationen (Auszug)	56
A.13	HP Compaq 8510p, Spezifikationen (Auszug)	56
A.14	HP EliteBook 8530w, Spezifikationen (Auszug)	56
A.15	G.R.A.S. Free Field Microphone Type 40AF, Spezifikationen (Auszug)	57
A.16	G.R.A.S. Preamplifier Type 26AK, Spezifikationen (Auszug)	57
A.17	G.R.A.S. Power Module 12AA, Spezifikationen (Auszug)	57
A.18	Outline ET250-3D, Spezifikationen (Auszug)	58
A.19	Raumkoordinaten der Mikrofone der analysierten Arrays in Metern (auf Millimeter gerundet)	59
A.20	Funktionsbeschreibungen der Software „Cheese“ und „Datenauswertung“	61

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Lokalisation einer akustischen Quelle ist in vielen Bereichen der Wissenschaft von essenzieller Bedeutung. In Konferenzgesprächen, an denen mehrere, in einem Raum befindliche Personen teilnehmen, bildet eine erfolgreiche Quelllokalisierung die Basis für ein gezieltes Verstärken des gewünschten Sprachsignals bzw. für das Unterdrücken unerwünschten Störschalls. Auch in der Seismologie beispielsweise ist es von großem Interesse, akustische Ereignisse auf deren örtliche Entstehung zurückzuführen.

In dieser Arbeit wurde der Fokus auf die Nutzung der akustischen Quelllokalisierung im Zusammenhang mit Problemstellungen der Fahrzeugindustrie gelegt. Dieser breite Themenkreis wurde auf die Analyse von Antriebsstrangkomponenten eingegrenzt. Der Antriebsstrang eines Kraftfahrzeuges bezeichnet jenen Verband aus Bauteilen, der das im Motor erzeugte Drehmoment bis an die Räder überträgt. Die Komponenten des Antriebsstrangs bestehen zu einem großen Teil aus rotierenden Bauteilen. Durch die Bewegungen an und in diesen Bauteilen entstehen elastodynamische Schwingungen und Wellen, die man als Schall bezeichnet [DEG06]. Dieser Schall kann sich sowohl als Körperschall in Festkörpern, als auch als Luftschall im umschließenden Medium Luft ausbreiten. Die Erfassung des sich im Festkörper ausbreitenden Schallanteils kann z.B. mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern erfolgen [Sei06]. Der Anteil des entstandenen Schalls, der als Luftschall abgestrahlt wird, kann sich auf unterschiedliche Weise bis in die Fahrgastzelle ausbreiten. Der von der Oberfläche des Antriebsstrangs abgestrahlte Schallanteil wird als Primärschall bezeichnet und gelangt beispielsweise über kleine Öffnungen bis in den Fahrzeuginnenraum. Der abgestrahlte Primärschall führt des Weiteren, wie auch der Körperschallanteil, zu einer Anregung unterschiedlicher Begrenzungsflächen der Fahrgastzelle. Der Schallanteil, der durch die dadurch entstehenden Schwingungen abgestrahlt wird, wird als luft- bzw. körperschallinduzierter Sekundärluftschall bezeichnet [PBBF10]. Die Erfassung des Luftschalls kann unter Verwendung von Mikrofonen realisiert werden, die die Druckschwankungen an einer im Mikrophon befindlichen Membran detektieren und in elektrische Signale umwandeln. Ein einzelnes Mikrophon kann nur jene Druckschwankung auswerten, die an besagter Membran auftritt und ermöglicht es nicht, eine Aussage über deren Ursprungsort zu treffen. Erst eine Anordnung von  $N$  Mikrofonen, ein sogenanntes Mikrofonarray erlaubt es, in Verbindung mit entsprechender Signalverarbeitung die Quelle der Schallwellen zu lokalisieren. Die Genauigkeit dieser Lokalisation unterliegt allerdings diversen Einschränkungen, auf die in den folgenden Kapiteln genauer eingegangen wird.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte optoakustische Messsystem ist imstande, aufgezeichnete Signale einzelner Mikrofone eines Mikrofonarrays mithilfe entsprechender Algorithmen so auszuwerten, dass eine Lokalisation der Schallquelle(n) möglich ist. Diese Lokalisation erfolgt mittels „Beamforming“ [VVB88]. Beamforming bezeichnet ein Verfahren, mit dem die Richtcharakteristik und somit die räumliche Sensitivität

des Mikrofonarrays gezielt verändert werden kann, ohne das Array dabei zu bewegen. Erwünschte Signale aus einer bestimmten Raumrichtung können dadurch, bei gleichzeitiger Unterdrückung unerwünschter Signale aus anderen Raumrichtungen, verstärkt werden [BCH08]. Dadurch wird es möglich, eine frequenzabhängige Schalldruckkartierung zu erstellen, die in Verbindung mit der Aufnahme des Messobjektes durch ein Kamerasystem eine Lokalisation der frequenzabhängigen Teilschallquellen erlaubt. Diese Art von Messsystem wird gemeinhin als „Akustische Kamera“ bezeichnet und stellt das Entwicklungsziel dieser Arbeit dar.

## 1.1 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist nachfolgend in vier inhaltliche Kapitel gegliedert. Kapitel 2 beschäftigt sich mit grundlegenden theoretischen Betrachtungen, die die Basis für die folgenden Kapitel darstellen. Diese Grundlagen werden in Kapitel 3 aufgegriffen und für die Theorie der diskreten räumlichen Abtastung mithilfe ein- und zweidimensionaler Sensorarrays weiterentwickelt. Die für die Lokalisation der Schallquellen notwendige Signalverarbeitung in Form von Beamforming wird in Kapitel 4, ausgehend von der Änderung der Richtungssensitivität eines linearen, diskreten Arrays, genau erläutert. Die Bündelung der theoretischen Abhandlungen aus diesen drei Kapiteln erfolgt in Kapitel 5 mit dem Entwurf der Akustischen Kamera. Beginnend mit dem Hard- und Softwaredesign des Systems schließt das Kapitel mit einer Funktionsevaluierung sowohl unter Laborbedingungen, als auch in einem realen Anwendungsszenario.

# Kapitel 2

## Physikalische Grundlagen

### 2.1 Schallwellenausbreitung

Die physikalische Beschreibung der räumlichen und zeitlichen Eigenschaften einer Schallwelle erfolgt über die Wellengleichung, die sich aus den Feldgleichungen für bewegte Fluide bestimmen lässt [DEG06]. Als Feldgleichungen werden die Bewegungsgleichung und die Kontinuitätsgleichung der Fluidmechanik sowie die Zustandsgleichung der Thermodynamik bezeichnet. Durch geeignete Kombination dieser drei elementaren Gleichungen, lassen sich die Wellengleichungen für die Schallfeldgrößen  $p$  (Schalldruck),  $v^1$  (Schallschnelle),  $\Phi$  (Schallschnellepotenzial), sowie  $\rho$  (Dichteschwankung) berechnen.

#### 2.1.1 Die Wellengleichung in kartesischen Koordinaten

Setzt man als Schallquelle eine konphas schwingende Ebene oder Platte unendlicher Ausdehnung voraus, so strahlt diese ebene Wellen ab [DEG06]. Für diesen Fall lässt sich die Wellengleichung des raum- und zeitabhängigen Schalldruckes  $p$ , unter der Voraussetzung eines homogenen, quellenfreien Schallfeldes, anschreiben als [Wil99]

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 p}{\delta t^2} = 0, \quad (2.1)$$

mit

$$\nabla^2 \equiv \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2}. \quad (2.2)$$

$c$  steht hier für die temperatur- und mediumsabhängige Schallgeschwindigkeit. Die Lösung dieser homogenen Differenzialgleichung in kartesischen Koordinaten, kann mit Hilfe des Produktansatzes berechnet werden und ergibt für eine ebene Welle mit der Kreisfrequenz  $\omega_0$  [Wil99]

$$p(x, y, z, t) = A e^{i(k_x x + k_y y + k_z z - \omega_0 t)}. \quad (2.3)$$

$A$  symbolisiert hier die Amplitude der Welle. Der Wellenzahlvektor  $\mathbf{k}$  beinhaltet die Information über die Ausbreitungsrichtung der Welle und ist definiert als [Wil99]

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

---

<sup>1</sup>Die Fettschreibung des Formelzeichens kennzeichnet an dieser Stelle und in der gesamten Arbeit eine vektorielle Größe.

mit

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.5)$$

Mit  $\lambda$  wird hier die Wellenlänge bezeichnet, die gemäß  $\lambda=c/f$  indirekt proportional zur Frequenz  $f$  ist.  $\theta$  und  $\phi$  repräsentieren den Elevations- bzw. Azimutwinkel.

### 2.1.2 Die Wellengleichung in Kugelkoordinaten

Die Annahme ebener Wellen setzt, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, Quellen ebener Form mit unendlicher geometrischer Ausdehnung voraus. Reale Schallquellen lassen sich allerdings besser als Punktquellen oder pulsierende Kugelquellen annähern. Für die Lösung der Wellengleichung für diesen Anwendungsfall ist es daher zielführend, die Betrachtungen im Kugelkoordinatensystem zu formulieren. Der Zusammenhang zwischen kartesischem und Kugelkoordinatensystem lässt sich darstellen als [Wil99]

$$x = r \sin \theta \cos \phi, \quad (2.6)$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi, \quad (2.7)$$

$$z = r \cos \theta, \quad (2.8)$$

bzw.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (2.9)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \right), \quad (2.10)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right). \quad (2.11)$$

$r$  bezeichnet hierbei den Radius vom Koordinatenursprung zum Aufpunkt,  $\theta$  der Elevations- und  $\phi$  den Azimutwinkel. Mit diesem Zusammenhang lässt sich nun die Wellengleichung darstellen als [Wil99]

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0. \quad (2.12)$$

Die Lösung dieser Gleichung wird mittels Separation der Variablen erreicht:

$$p(r, \theta, \phi, t) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\phi)T(t). \quad (2.13)$$

Letztendlich lässt sich die Lösung anschreiben als

$$p(r, \theta, \phi, \omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (A_{mn}j_n(kr) + B_{mn}y_n(kr)) Y_n^m(\theta, \phi). \quad (2.14)$$

$n$  bezeichnet hier die Ordnung,  $m$  den Grad,  $A_{mn}$  bzw.  $B_{mn}$  die Wellenspektren,  $j_n(kr)$  die sphärischen Besselfunktionen,  $y_n(kr)$  die sphärischen Hankelfunktionen und  $Y_n^m(\theta, \phi)$  die Kugelflächenfunktionen.

Betrachtet man eine punkt- oder kugelförmige Quelle aus ausreichend großer Entfernung, befindet man sich also im akustischen Fernfeld der Quelle, so kann für gewisse Betrachtungen eine Vereinfachung getroffen werden. Das im Fernfeld vorherrschende Wellenfeld kann dann als eben angesehen werden. Man spricht in diesem Fall von quasi-ebenen Wellen [DEG06]. Diese Vereinfachung wird auch für den Fernfeld-Beamforming-Algorithmus, der in Kapitel 4 genauer erläutert wird, getroffen.

## 2.2 Aperturtheorie

Der Begriff Apertur hat in unterschiedlichen Bereichen der Wissenschaft eine ähnliche Bedeutung. In der Optik beispielsweise, wird eine Öffnung in einer lichtundurchlässigen Oberfläche, durch die Licht strahlen kann, als Apertur bezeichnet [Zio95]. In der Akustik wird der Begriff Apertur in einem ähnlichen Kontext verwendet. Hier wird ein räumlich begrenzter Bereich, in den Schallwellen entweder eintreten (passiv) oder aus dem Schallwellen austreten (aktiv) als Apertur bezeichnet. Betrachtet man einen elektroakustischen Wandler, so kann dieser z.B. als passive Apertur im Falle eines Mikrofons, oder als aktive Apertur im Falle eines Lautsprechers ausgeführt sein [Zio95].

### 2.2.1 Feldregionen

Der Raum rund um eine Apertur lässt sich in unterschiedliche Bereiche klassifizieren. In dieser Arbeit sind vor allem das Nah- und das Fernfeld der Apertur von Relevanz. Betrachtet man beispielsweise zwei sphärische Wellenfelder, die ihren Ursprung im Nah- bzw. Fernfeld der Apertur haben, so kann ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen Feldern beim Auftreffen auf eine Apertur festgestellt werden. Befindet sich der Ursprung des Wellenfeldes im Fernfeld der Apertur, treffen die Wellen nahezu parallel auf diese. Man spricht in diesem Fall von einem quasi-ebenen Wellenfeld. Liegt der Ursprung hingegen im Nahfeld, bleibt der sphärische Charakter der Wellen erhalten. Da der Übergang zwischen den beiden Feldern fließend stattfindet, existiert für dessen Bestimmung keine eindeutige Lösung. In der Literatur findet man unterschiedliche Ansätze um diese Grenze zu definieren wie z.B. in [Bal05, Rya98, Zio95]. Als Faustregel soll für die weiteren Betrachtungen für den Beginn des Fernfeldes folgende Bedingung gelten:

$$r > \frac{2L^2}{\lambda}. \quad (2.15)$$

$r$  bezeichnet hier die Entfernung zum Aufpunkt,  $\lambda$  die Wellenlänge und  $L$  die maximale Ausdehnung der Apertur.

Die folgenden Betrachtungen haben ausschließlich Gültigkeit im Fernfeld der Apertur. Die entsprechenden mathematischen Abhandlungen mit Gültigkeit im Nahfeld sind z.B. in [Zio95] detailliert ausgeführt.

### 2.2.2 Kontinuierliche Volumsapertur

#### 2.2.2.1 Aperturfunktion

Man stelle sich vor, eine ebene Welle breite sich verlustlos im Raum aus und treffe auf eine allgemeine Volumsapertur. Betrachtet man nun die Welle, die durch die Apertur hindurchtritt, so kann man feststellen, dass diese Welle nicht mehr der ebenen Welle entspricht, die auf die Apertur getroffen ist. Die Apertur nimmt nur einen gewissen Teil der ebenen Welle auf. Dieser Vorgang wird als räumliche Filterung bezeichnet. Diese Filterung lässt sich im Zeitbereich durch die Faltung des auf die Apertur zum Zeitpunkt  $t$ , am Ort  $\mathbf{r}_P$  einfallenden Signals  $y_M(t, \mathbf{r}_P)$  mit der Impulsantwort  $\alpha_P(t, \mathbf{r}_P)$  der Apertur darstellen als [Zio95]:

$$y(t, \mathbf{r}_P) = \int_{-\infty}^{\infty} y_M(\tau, \mathbf{r}_P) \alpha_P(t - \tau, \mathbf{r}_P) d\tau, \quad (2.16)$$

bzw.

$$y(t, \mathbf{r}_P) = y_M(t, \mathbf{r}_P) * \alpha_P(t, \mathbf{r}_P). \quad (2.17)$$



Die Indizes  $M$  und  $P$  sollen hier an die Ausbreitung in einem Medium bzw. an die Betrachtung einer passiven Apertur erinnern. Transformiert man nun Gleichung 2.17 mittels Fouriertransformation in den Frequenzbereich, erhält man den Term

$$Y(f, \mathbf{r}_P) = Y_M(f, \mathbf{r}_P) A_P(f, \mathbf{r}_P), \quad (2.18)$$

mit

$$Y(f, \mathbf{r}_P) = \mathfrak{F}_t\{y(t, \mathbf{r}_P)\} = \int_{-\infty}^{\infty} y(t, \mathbf{r}_P) e^{-i2\pi ft} dt, \quad (2.19)$$

$$Y_M(f, \mathbf{r}_P) = \mathfrak{F}_t\{y_M(t, \mathbf{r}_P)\} = \int_{-\infty}^{\infty} y_M(t, \mathbf{r}_P) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.20)$$

und

$$A_P(f, \mathbf{r}_P) = \mathfrak{F}_t\{\alpha_P(t, \mathbf{r}_P)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_P(t, \mathbf{r}_P) e^{-i2\pi ft} dt. \quad (2.21)$$

Die Fouriertransformierte  $A_P(f, \mathbf{r}_P)$  der Impulsantwort  $\alpha_P(t, \mathbf{r}_P)$  der kontinuierlichen Apertur, wird als Aperturfunktion bzw. Empfindlichkeitsfunktion (engl.: aperture function, sensitivity function) bezeichnet und definiert die Systemantwort als Funktion der räumlichen Position auf der Apertur [McC01, Zio95].  $f$  repräsentiert hier die von der Apertur aufgenommenen Frequenzen<sup>2</sup>. Das Signal am Ausgang der Apertur  $y(t, \mathbf{r}_P)$  lässt sich nun nach inverser Fouriertransformation von Gleichung 2.18 anschreiben als

$$y(t, \mathbf{r}_P) = \int_{-\infty}^{\infty} Y_M(f, \mathbf{r}_P) A_P(f, \mathbf{r}_P) e^{i2\pi ft} df. \quad (2.22)$$

### 2.2.2.2 Richtungsfunktion

Betrachtet man nun die Möglichkeit unterschiedlicher Einfallsrichtungen der Wellen im zwei- bzw. dreidimensionalen Raum, so stellt man fest, dass der von der Apertur aufgenommene Teil der Welle frequenz- und winkelabhängig ist [McC01, Zio95].

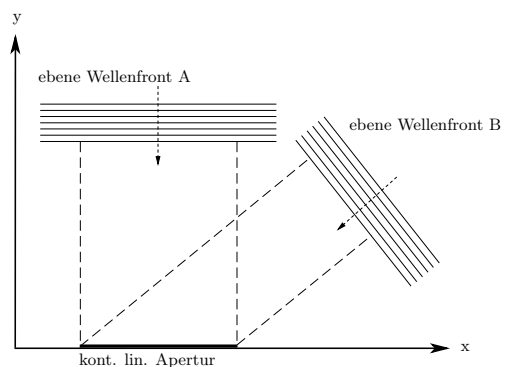


Abbildung 2.1: Einfall ebener Wellen auf eine kontinuierliche, lineare Apertur [McC01]

Mathematisch lässt sich dieses Phänomen mithilfe der Richtungsfunktion (engl.: directivity function, directivity pattern, beam pattern) beschreiben. Die Fernfeld-Richtungsfunktion für eine allgemeine kontinuierliche

<sup>2</sup>Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass diese nicht immer jenen des einfallenden Signals entsprechen müssen [Zio95].

Apertur lässt sich anschreiben als [Zio95]

$$D_P(f, \boldsymbol{\alpha}) = \mathfrak{F}_{\mathbf{r}_P} \{A_P(f, \mathbf{r}_P)\} = \int_{-\infty}^{\infty} A_P(f, \mathbf{r}_P) e^{i2\pi \boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{r}_P} d\mathbf{r}_P, \quad (2.23)$$

mit dem Positionsvektor

$$\mathbf{r}_P = \begin{bmatrix} x_P & y_P & z_P \end{bmatrix}^T, \quad (2.24)$$

dem Richtungsvektor der Welle

$$\boldsymbol{\alpha} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} \sin\theta \cos\phi & \sin\theta \sin\phi & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

und

$$d\mathbf{r}_P = dx_P dy_P dz_P. \quad (2.26)$$

Der Ausdruck  $\mathfrak{F}_{\mathbf{r}_P} \{\cdot\}$  bezeichnet hier die räumliche Fouriertransformation.

### 2.2.3 Kontinuierliche lineare Apertur

Betrachtet man nun eine lineare, kontinuierliche Apertur der Länge  $L$ , die symmetrisch um den Koordinatenursprung auf der positiven bzw. negativen  $X$ -Achse liegt, so lässt sich die Fernfeld-Richtungsfunction der Apertur darstellen als [McC01, Zio95]

$$D_P(f, \alpha_x) = \mathfrak{F}_{x_P} \{A_P(f, x_P)\} = \int_{-L/2}^{L/2} A_P(f, x_P) e^{i2\pi \alpha_x x_P} dx_P, \quad (2.27)$$

mit

$$A_P(f, x_P) = a_P(f, x_P) e^{i\theta(f, x_P)}, \quad (2.28)$$

und

$$\alpha_x = \frac{\sin\theta \cos\phi}{\lambda}. \quad (2.29)$$

Für eine definierte Frequenz  $f$  mit  $\theta(f, x_P) = 0$ , ergibt sich die Aperturfunktion [Zio95]

$$A_P(f, x_P) = a_P(f, x_P) = \text{rect}\left(\frac{x_P}{L}\right). \quad (2.30)$$

Mithilfe dieser Aperturfunktion in Form eines Rechtecks mit

$$\text{rect}(x/L) \triangleq \begin{cases} 1, & |x| \leq L/2 \\ 0, & |x| > L/2 \end{cases}, \quad (2.31)$$

lässt sich nun mittels Fouriertransformation die entsprechende Fernfeld-Richtungsfunction berechnen [McC01, Zio95]:

$$D_P(f, \alpha_x) = \mathfrak{F}_{x_P} \left\{ \text{rect}\left(\frac{x_P}{L}\right) \right\} = L \text{sinc}(\alpha_x L), \quad (2.32)$$

mit

$$\text{sinc}(x) \triangleq \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}. \quad (2.33)$$

Betrachtet man nun den Plot der Fernfeld-Richtungsfunction aus Gleichung 2.32 in Abbildung 2.2, so kann man daraus einige grundsätzliche Attribute von Beam-Patterns ablesen [Zio95]. Der Bereich für  $-\lambda/L \leq \alpha_x \leq \lambda/L$  wird als Hauptkeule (engl.: main lobe) des Patterns bezeichnet. Die Breite des Beams (engl.: beamwidth) für eine lineare, kontinuierliche Apertur ergibt sich also zu  $2\lambda/L$ . Berücksichtigt man

noch die Tatsache, dass  $\lambda = c/f$  ist, so kann man daraus schließen, dass die Breite der Hauptkeule mit steigender Frequenz abnimmt. Oftmals wird als Breite des Beams die sogenannte 3-dB beamwidth angegeben [Zio95]. Diese beschreibt die Breite der Hauptkeule an der Stelle, an der die Amplitude um -3dB abgenommen hat.

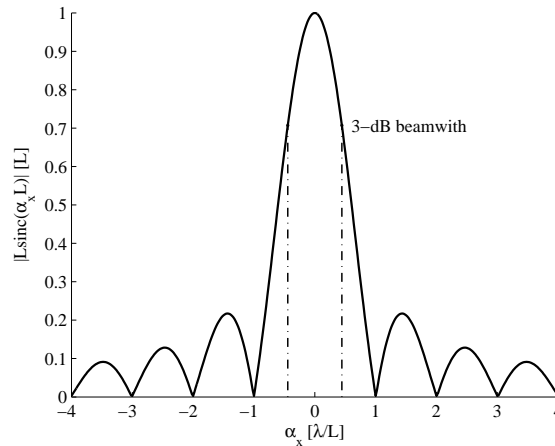


Abbildung 2.2: Normalisierte Fernfeld-Richtungsfunktion der Rechteck-Aperturfunktion

Generell ist es oft üblich, die Fernfeld-Richtungsfunktion in der normalisierten Form [McC01, Zio95]

$$D_N(f, \alpha_x) = \frac{D_P(f, \alpha_x)}{D_{\max}} = \text{sinc}(\alpha_x L), \tag{2.34}$$

oder abhängig von den Winkeln  $\theta$  und  $\phi$  als horizontales Beam-Pattern

$$D_N(f, \theta, \phi) = \text{sinc}\left(\frac{L}{\lambda} \sin \theta \cos \phi\right), \text{ mit } \theta = \frac{\pi}{2} \tag{2.35}$$

anzugeben [Zio95]. Abbildung 2.3 zeigt die normalisierte horizontale Fernfeld-Richtungsfunktion der linearen, kontinuierlichen Apertur in Polardarstellung. Die frequenzabhängige Breite der Hauptkeule ist hier gut zu erkennen. Steigt das Verhältnis  $L/\lambda$  an, wird die Hauptkeule schmaler und Nebenkeulen treten auf.

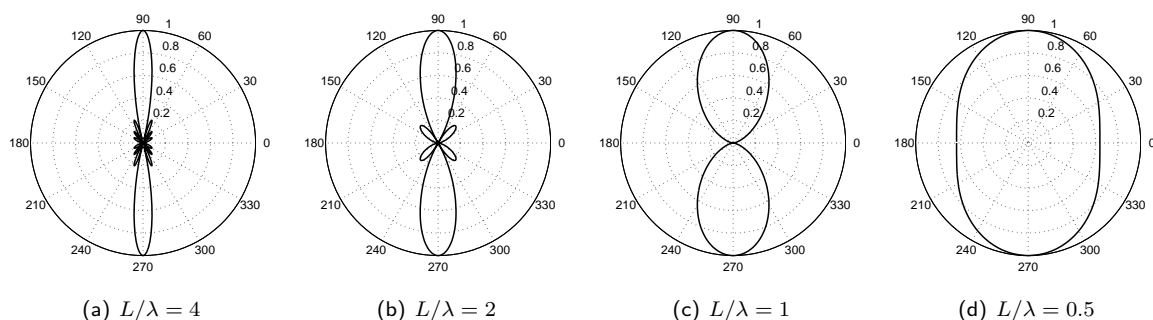


Abbildung 2.3: Normalisierte horizontale Fernfeld-Richtungsfunktion der endlichen Rechteck-Aperturfunktion in Polardarstellung für unterschiedliche  $L/\lambda$

### 2.2.4 Kontinuierliche planare Apertur

Die Ausführungen in Kapitel 2.2.3 lassen sich einfach für zweidimensionale Aperturen beliebiger geometrischer Beschaffenheit weiterentwickeln. Diese zweidimensionalen Aperturen werden gemeinhin als planare

Aperturen bezeichnet. Betrachtet man also eine planare, kontinuierliche Apertur beliebiger geometrischer Form, die in der X-Y-Ebene liegt, so lässt sich Gleichung 2.27 erweitern zu [Zio95]

$$D_P(f, \alpha_x, \alpha_y) = \mathfrak{F}_{x_P} \mathfrak{F}_{y_P} \{A_P(f, x_P, y_P)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_P(f, x_P, y_P) e^{i2\pi(\alpha_x x_P + \alpha_y y_P)} dx_P dy_P, \quad (2.36)$$

mit

$$A_P(f, x_P, y_P) = a_P(f, x_P, y_P) e^{i\theta(f, x_P, y_P)}, \quad (2.37)$$

$$\alpha_x = \frac{\sin \theta \cos \phi}{\lambda}, \quad (2.38)$$

sowie

$$\alpha_y = \frac{\sin \theta \sin \phi}{\lambda}. \quad (2.39)$$

Die Fernfeld-Richtungsfunktion entspricht in diesem Fall einer zweidimensionalen Sinc-Funktion.

# Kapitel 3

## Mikrofonarrays

In diesem Kapitel sollen nun die in Kapitel 2 erarbeiteten Grundlagen auf ein Mikrofonarray umgelegt werden. Als Mikrofonarray wird eine endliche Anzahl  $N > 1$  an Mikrofonen bezeichnet, deren aufgezeichnete Signale durch entsprechende Signalverarbeitung miteinander in Bezug gestellt werden. Die erlangte Mehrinformation gegenüber einem einzelnen Mikrofon, bedingt durch die räumliche Trennung der Mikrofone, erlaubt es beispielsweise, spezielle Signalparameter zu bestimmen oder erwünschte Signalanteile zu extrahieren [BCH08]. Jeder einzelne Sensor eines Mikrofonarrays kann hierbei als kontinuierliche Apertur betrachtet werden. Das Mikrofonarray in seiner Gesamtheit kann hingegen als diskretisierte Apertur interpretiert werden [Zio95]. Mit steigender Sensoranzahl lässt sich demnach eine kontinuierliche Apertur endlich genau annähern.

### 3.1 Lineare Arrays

Werden  $N$  identische Mikrofone entlang einer Raumachse angeordnet, bilden diese Mikrofone die einfachste Form eines Mikrofonarrays. Man spricht in diesem Fall von einem linearen Array.

#### 3.1.1 Apertur- und Richtungsfunktion

Die diskrete Aperturfunktion lässt sich nach dem Superpositionsprinzip aus den einzelnen Aperturfunktionen der Sensoren bilden und ergibt z.B. für ein lineares Array mit einer ungerade Anzahl an Sensoren [McC01, Zio95]

$$A_P(f, x_P) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w_n(f) e_n(f, x_P - x_n). \quad (3.1)$$

$w_n(f)$  stellt die komplexe Gewichtungsfunktion,  $e_n(f, x_P)$  die komplexe Frequenzantwort des  $n$ -ten Sensors und  $x_n$  dessen Position auf der Koordinatenachse dar. Die über die Fouriertransformation mit der Aperturfunktion verknüpfte Fernfeld-Richtungsfunktion ergibt [McC01, Zio95]

$$D_P(f, \alpha_x) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w_n(f) E_n(f, \alpha_x) e^{i2\pi\alpha_x x_n}. \quad (3.2)$$

$E_n(f, \alpha_x)$  steht hier für die Richtungsfunktion des Sensors  $n$ . Gleichen sich die Frequenzantworten der einzelnen Sensoren, vereinfachen sich die Gleichungen 3.1 und 3.2 zu [McC01]

$$A_P(f, x_P) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w_n(f) \delta(x_P - x_n), \quad (3.3)$$

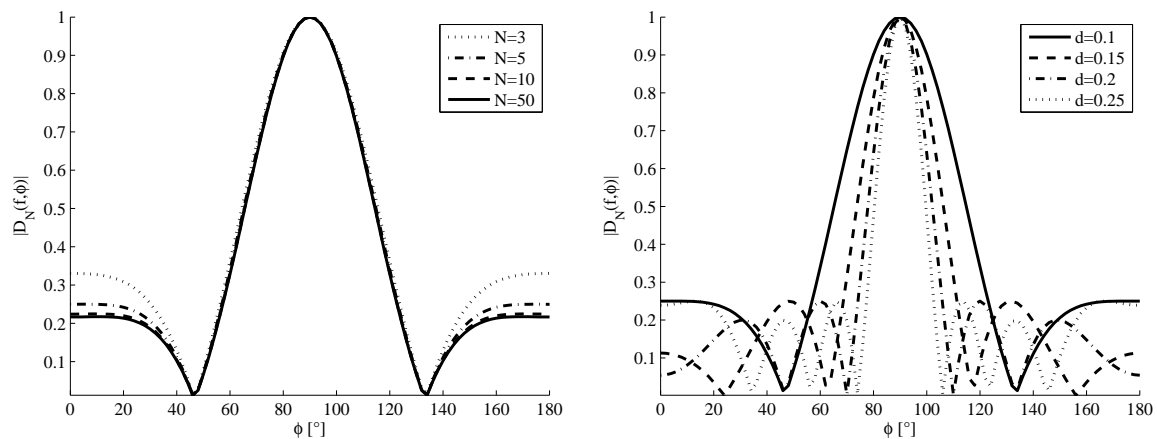
bzw

$$D_P(f, \alpha_x) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w_n(f) e^{i2\pi\alpha_x x_n}. \quad (3.4)$$

Betrachtet man nun die horizontale Richtungsfunktion für ein lineares Mikrofonarray mit  $N$  identischen Sensoren, die im Abstand  $d$  äquidistant voneinander positioniert sind

$$D_P(f, \theta, \phi) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w_n(f) e^{i\frac{2\pi f}{c} n d \sin \theta \cos \phi}, \text{ mit } \theta = \frac{\pi}{2}, \quad (3.5)$$

so ist ersichtlich, dass diese nicht nur, wie bereits in Kapitel 2.2.2.2 besprochen, von der Frequenz  $f$  und dem Einfallswinkel abhängt, sondern im diskretisierten Fall auch von der Anzahl der Sensoren  $N$ , sowie dem Abstand zwischen den Sensoren  $d$  und der daraus resultierenden maximalen Gesamtausdehnung der Apertur. Grundsätzlich ist anzustreben, die Anzahl der Sensoren möglichst groß und deren Abstand möglichst klein zu wählen, da so eine kontinuierliche Apertur am besten angenähert werden kann. Die Auswirkungen einer unterschiedlichen Wahl von  $N$  bzw.  $d$  auf die Richtungsfunktion zeigt Abbildung 3.1. Hier ist gut zu erkennen, dass eine Verringerung der Sensoranzahl  $N$  zu einer Erhöhung der Amplitude



(a) Variation der Sensoranzahl bei gleich bleibender Frequenz  $f = 1 \text{ kHz}$  und effektiver Arraylänge  $L = 0.5 \text{ m}$  (b) Variation des Abstandes zwischen den Sensoren bei gleich bleibender Frequenz  $f = 1 \text{ kHz}$  und Sensoranzahl  $N = 5$

Abbildung 3.1: Normalisierte Fernfeld-Beam-Patterns eines linearen, diskreten Arrays bei einer Variation von  $N$  bzw.  $d$  [McC01]

der Nebenkeulen und somit zu einer Verschlechterung des Signal-Rausch-Abstandes, der als Verhältnis der Amplituden der Hauptkeule und der höchsten Nebenkeule definiert ist, führt. Eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den Sensoren, bei gleich bleibender Sensoranzahl, resultiert in einer Verringerung der Hauptkeulenbreite und somit in einer Erhöhung der Auflösung [McC01]. Diese Tatsache würde den Gedanken nahe legen, die Sensoren in möglichst großem Abstand voneinander zu platzieren. Abbildung

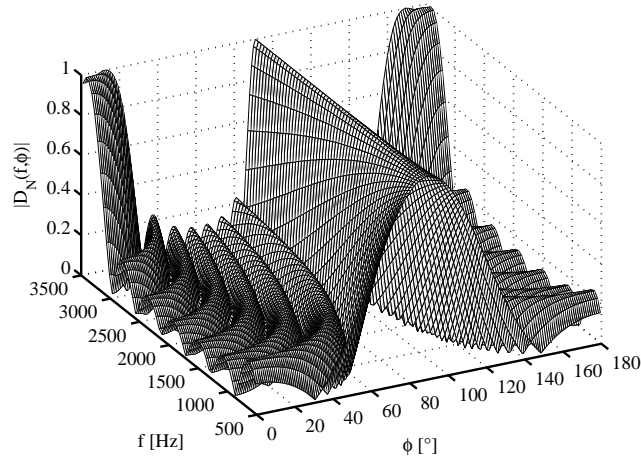


Abbildung 3.2: Normalisiertes Fernfeld-Beam-Pattern eines linearen, diskreten Arrays mit  $N = 8$ ,  $d = 0.1$  und  $500 \leq f \leq 3500$

3.2 zeigt neben der aus Gleichung 3.5 ersichtlichen Frequenzabhängigkeit einen weiteren Effekt, der in Verbindung mit einem großen Sensorabstand auftritt. Dieser Effekt wird als räumliches Aliasing bezeichnet und ist ab einer Frequenz von  $3000 \text{ Hz}$  gut zu erkennen. Die Theorie des räumlichen Aliasing beruht auf dem Shannon'schen Abtasttheorem. Aliasing tritt grundsätzlich dann auf, wenn eine zum Array parallel laufende ebene Welle nicht mehr zweimal je Wellenlänge und somit korrekt abgetastet werden kann. Dies ist dann der Fall wenn

$$d > \frac{\lambda_{min}}{2}, \quad (3.6)$$

mit

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} \quad (3.7)$$

wird [BCH08].

## 3.2 Planare Arrays

In den bisherigen Betrachtungen wurden lineare, diskrete Arrays behandelt. Da diese Geometrien aber nur eine Analyse des Schallfeldes in Azimutrichtung ermöglichen und keinerlei Auswertung des Elevationswinkels erlauben, werden im Folgenden planare Arrays analysiert. Diese zweidimensionalen Arrays bilden in weiterer Folge die Basis für das zu entwickelnde optoakustische Messsystem.

### 3.2.1 Apertur- und Richtungsfunktion

Es sollen nun die in Kapitel 3.1.1 entwickelten Gleichungen für die Apertur- und Richtungsfunktion eines linearen, diskreten Arrays für ein zweidimensionales Array gemäß Abbildung 5.3(a) weiterentwickelt werden. Für die Berechnung der Aperturfunktion eines planaren  $M \times N$  Grid-Arrays, das in der XY-Ebene liegt, lässt sich Gleichung 3.1 erweitern zu [Zio95]

$$A_P(f, x_P, y_P) = \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w_{mn}(f) e_{mn}(f, x_P - x_m, y_P - y_n). \quad (3.8)$$

Die entsprechende Fernfeld-Richtungsfunktion wird mittels 2D-Fouriertransformation berechnet und lautet

$$D_P(f, \alpha_x, \alpha_y) = \mathfrak{F}_{x_P} \mathfrak{F}_{y_P} \{A_P(f, x_P, y_P)\}, \quad (3.9)$$

bzw.

$$D_P(f, \alpha_x, \alpha_y) = \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w_{mn}(f) E_{mn}(f, \alpha_x, \alpha_y) e^{i2\pi(\alpha_x x_m + \alpha_y y_n)}. \quad (3.10)$$

Für Arrays, deren Sensorverteilung kein rasterförmiges Muster zugrunde liegt, lässt sich die Richtungsfunktion als Funktion der Frequenz  $f$  und der Winkel  $\theta$  und  $\phi$  darstellen als

$$D_P(f, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{N-1} w_n(f) e^{i\frac{2\pi f}{c}(p_{x_n} \sin \theta \cos \phi + p_{y_n} \sin \theta \sin \phi)}. \quad (3.11)$$

$N$  steht hierbei für die Anzahl an Sensoren, und  $p_{x_n}$  bzw.  $p_{y_n}$  repräsentieren deren räumliche Position. Abbildung 3.3 zeigt abschließend ein Beispiel für das Fernfeld-Beam-Pattern eines Grid-Arrays.

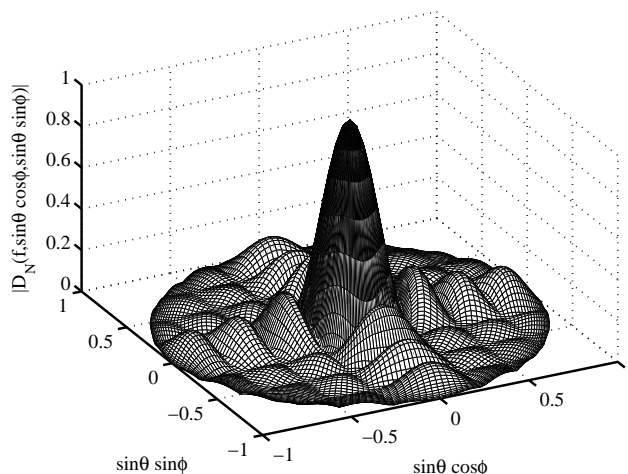


Abbildung 3.3: Normalisiertes Fernfeld-Beam-Pattern eines planaren, diskreten Grid-Arrays mit  $M = N = 8$  und  $d = \lambda/2$



# Kapitel 4

## Beamforming

In den bisherigen Kapiteln wurden die Eigenschaften unterschiedlicher Apertur- und Arraygeometrien beleuchtet. Es wurde gezeigt, wie es möglich wird, durch die Anordnung von  $N$  Sensoren als Array, Signale aus einer bestimmten Raumrichtung, bei gleichzeitiger Abschwächung von Signalen aus anderen Raumrichtungen, zu verstärken. Betrachtet man das Beam-Pattern eines diskreten Arrays, so kann aus diesem die Sensitivität des Arrays für unterschiedliche Raumrichtungen abgelesen werden. Durch eine Variation der komplexen Gewichtungsfunktion der Sensoren lässt sich ohne eine räumliche Neuausrichtung des Arrays dessen räumliche Sensitivität gezielt beeinflussen. Die Theorie hinter der dafür notwendigen systematischen Steuerung der Hauptkeule des Arrays, wird als Beamforming bezeichnet. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen vom Eingangssignal abhängigen (adaptiven) und vom Eingangssignal unabhängigen (fixen) Beamforming-Algorithmen.

### 4.1 Beamsteering

Betrachtet man nun abermals die in Kapitel 3.1.1 erarbeitete Gleichung für die Fernfeld-Richtungsfunktion eines linearen, diskreten Arrays mit  $N$  identen Sensoren, die äquidistant auf der X-Achse verteilt sind

$$D(f, \alpha_x) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w_n(f) e^{i2\pi\alpha_x nd}, \quad (4.1)$$

so wurde bisher eine Gleichgewichtung der Sensoren vorausgesetzt. Die berechnete Richtungsfunktion soll nun durch gezielte Variation der Gewichtungsfunktion [McC01]

$$w_n(f) = a_n(f) e^{i\varphi_n(f)} \quad (4.2)$$

beeinflusst werden. Diese Gewichtungsfunktion besteht aus zwei Teilen. Eine Variation von  $a_n(f)$  bewirkt eine Änderung in der Amplitude der Richtungsfunktion. Der frequenzabhängige Phasenterm  $\varphi_n(f)$  ermöglicht eine Beeinflussung der räumlichen Ausrichtung der Hauptkeule der Richtungsfunktion. Die gezielte Variation der Position der Hauptkeule wird als „Beamsteering“ bezeichnet [Zio95]. Um diesen Effekt zu verdeutlichen, soll nun nur der Phasenterm der Gewichtungsfunktion genauer betrachtet werden. Aus diesem Grund soll für die folgenden Betrachtungen  $a_n(f) = 1$  gelten. Durch diese Vereinfachung kann die

Richtungsfunktion angeschrieben werden als

$$D(f, \alpha_x) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} e^{i(2\pi\alpha_x nd + \varphi_n(f))}. \quad (4.3)$$

Wählt man nun

$$\varphi_n(f) = -2\pi\alpha'_x nd, \quad (4.4)$$

mit

$$\alpha'_x = \frac{\sin \theta' \cos \phi'}{\lambda}, \quad (4.5)$$

lässt sich die um  $\phi'$  bzw.  $\theta'$  verschobene Richtungsfunktion anschreiben als [McC01, Zio95]

$$D'(f, \alpha_x) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} e^{i\frac{2\pi}{\lambda} nd(\alpha_x - \alpha'_x)}, \quad (4.6)$$

bzw.

$$D'(f, \alpha_x) = D(f, \alpha_x - \alpha'_x). \quad (4.7)$$

In den Abbildungen 4.1 und 4.2 sind horizontale Richtungsfunktionen sowohl in kartesischen Koordinaten, als auch in Polardarstellung abgebildet. In Abbildung 4.2 ist gut erkennbar, dass die Breite des Beams der

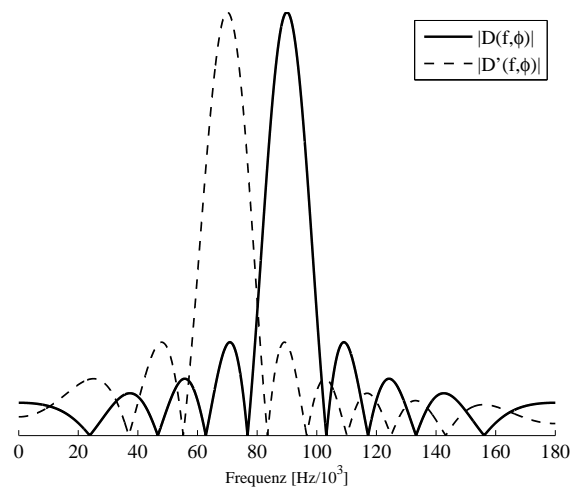


Abbildung 4.1: Horizontales Beam-Pattern für ein lineares, diskretes Array mit  $N = 15$  und  $d = 0.1$  für  $\phi' = 0^\circ$  (durchgehende Linie) und  $\phi' = 20^\circ$  (strichlierte Linie)

Fernfeld-Richtungsfunktion zunimmt, je weiter die Hauptkeule verschoben wird. Die maximale Verschiebung ist hier bei  $\phi = 0^\circ$  erreicht.

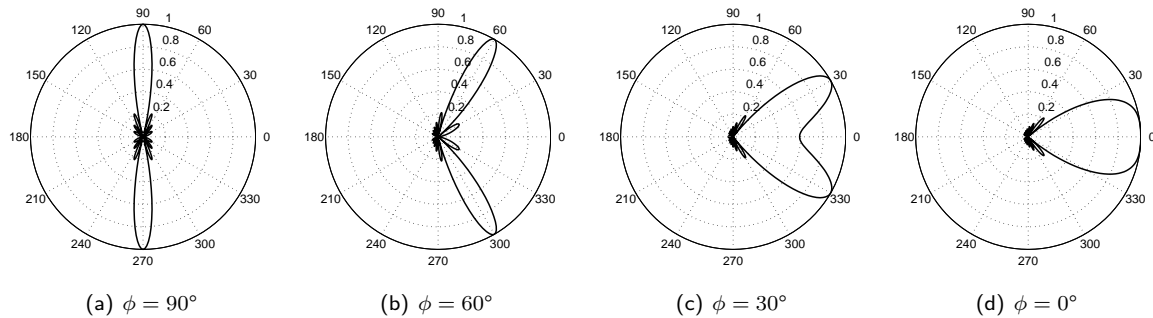


Abbildung 4.2: Normalisierte, horizontale Fernfeld-Beam-Patterns der endlichen Rechteck-Aperturfunktion der Länge  $L$  in Polardarstellung für  $L/\lambda = 4$  und unterschiedliche  $\phi$

## 4.2 Delay&Sum Beamforming

Die im vorigen Kapitel erläuterte Möglichkeit der Beeinflussung der Richtungsfunktion, durch einen entsprechenden Eingriff in die komplexe Gewichtungsfunktion, soll nun weiterentwickelt werden. Man stelle sich nun vor, eine von einer sich im Fernfeld befindenden Quelle emittierte ebene Welle treffe mit dem Einfallswinkel  $\phi'$  auf ein lineares, diskretes Sensorarray (Abbildung 4.3). Das an den Sensoren gemessene Signal ist im Idealfall ident, mit Ausnahme eines zeitlichen Versatzes, der sich über den Zusammenhang [McC01]

$$\tau_n = \frac{\varphi_n}{2\pi f} = \frac{2\pi f n d \cos \phi'}{2\pi f c} = \frac{n d \cos \phi'}{c} \tag{4.8}$$

beschreiben lässt.

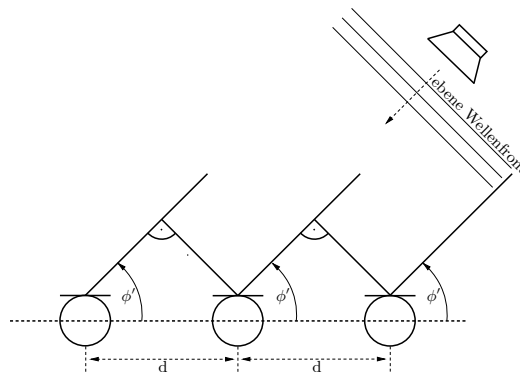


Abbildung 4.3: Einfall ebener Wellen auf ein lineares diskretes Sensorarray

Diese zeitliche Verzögerung entspricht einer frequenzabhängigen Phasenverschiebung in den einzelnen Sensorsignalen. Dieser Zusammenhang bildet die Basis für das „Delay&Sum Beamforming“. Hier wird die Tatsache genutzt, dass das „Steering“ des Beams in eine gewünschte Richtung durch gezielte Verzögerung (Delay) der Sensorsignale gegenüber einem Referenzpunkt erreicht werden kann.

Man stelle sich nun ein aus  $N$  Sensoren bestehendes, diskretes Sensorarray beliebiger Geometrie vor. Die Sensoren befinden sich an den räumlichen Positionen  $\mathbf{p}_n^1$ , mit  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ . Die am Ausgang

<sup>1</sup>Begründet durch die leichtere Lesbarkeit wird in den folgenden Abschnitten auf eine Indexierung zur Kennzeichnung des passiven Sensorcharakters verzichtet.

der Sensoren messbaren Signale ergeben sich dann zu [VT02]

$$\mathbf{f}(t, \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} f(t, \mathbf{p}_0) \\ f(t, \mathbf{p}_1) \\ \vdots \\ f(t, \mathbf{p}_{N-1}) \end{bmatrix}, \text{ mit } \mathbf{p}_n = \begin{bmatrix} p_{x_n} \\ p_{y_n} \\ p_{z_n} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Nimmt man nun am Eingang des Arrays eine eintreffende ebene Welle an, die sich in Richtung

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta \sin \phi \\ -\cos \theta \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

zum Koordinatenursprung hin ausbreitet, so gilt für die Sensorsignale [VT02]

$$\mathbf{f}(t, \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} f(t - \tau_0) \\ f(t - \tau_1) \\ \vdots \\ f(t - \tau_{N-1}) \end{bmatrix}, \text{ mit } \tau_n = \frac{\mathbf{a}^T \mathbf{p}_n}{c}. \quad (4.11)$$

$\tau_n$  ergibt sich dann durch Einsetzen von  $\mathbf{a}$  und  $\mathbf{p}_n$  zu

$$\tau_n = -\frac{1}{c} [\sin \theta \cos \phi \cdot p_{x_n} + \sin \theta \sin \phi \cdot p_{y_n} + \cos \theta \cdot p_{z_n}]. \quad (4.12)$$

Wechselt man nun mit den Betrachtungen in den Frequenzbereich, so kann für das Signal am  $n$ -ten Sensor das Fourierintegral angeschrieben werden als [VT02]

$$F_n(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau_n) e^{-i\omega t} dt, \quad (4.13)$$

bzw.

$$F_n(\omega) = e^{-i\omega\tau_n} F(\omega), \text{ mit } \omega\tau_n = \frac{\omega}{c} \mathbf{a}^T \mathbf{p}_n. \quad (4.14)$$

Unter Berücksichtigung der Wellenzahl  $\mathbf{k}$  als

$$\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} \mathbf{a} \quad (4.15)$$

und anschließendem Einsetzen für  $\mathbf{a}$ , ergibt sich der Zusammenhang [VT02]

$$\omega\tau_n = \mathbf{k}^T \mathbf{p}_n. \quad (4.16)$$

Ausgehend von Gleichung 4.14 kann  $\mathbf{F}(\omega)$  nun angeschrieben werden als

$$\mathbf{F}(\omega) = F(\omega) \mathbf{v}_{\mathbf{k}}(\mathbf{k}), \quad (4.17)$$

mit

$$\mathbf{v}_{\mathbf{k}}(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} e^{-i\mathbf{k}^T \mathbf{p}_0} \\ e^{-i\mathbf{k}^T \mathbf{p}_1} \\ \vdots \\ e^{-i\mathbf{k}^T \mathbf{p}_{N-1}} \end{bmatrix}. \quad (4.18)$$

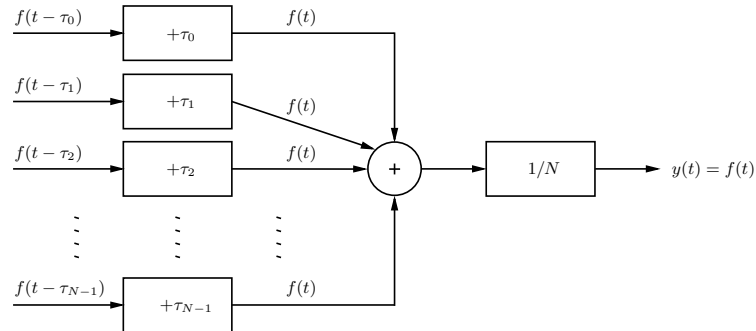


Abbildung 4.4: Delay&amp;Sum Beamformer, Blockschaltbild

Der Vektor  $\mathbf{v}_k(\mathbf{k})$  wird als „Array Manifold Vektor“ bezeichnet und beinhaltet alle räumlichen Charakteristika des Arrays. Für die Berechnung des Signals  $y(t)$  am Arrayausgang, das dem Signal der Quelle, also der zu erfassenden ebenen Welle entsprechen soll, ist es notwendig, die einzelnen Sensorsignale entsprechend zu verzögern, zu summieren und die Amplitude mit  $1/N$  zu gewichten. Dieser Vorgang ist in Abbildung 4.4 in Form eines Blockschaltbildes dargestellt.

Der Delay&Sum Vorgang wird nun mithilfe der komplexen Gewichtungsfunktion  $\mathbf{W}$  umgesetzt. Im Frequenzbereich notiert, ergibt sich das Ausgangssignal zu

$$Y(\omega) = \mathbf{W}^H(\omega)\mathbf{F}(\omega).^1 \quad (4.19)$$

Wählt man nun die Gewichtungsfunktion mit

$$\mathbf{W}^H(\omega) = \frac{1}{N}\mathbf{v}_k^H(\mathbf{k}), \quad (4.20)$$

so erhält man für das Signal am Ausgang des Beamformers

$$Y(\omega) = \frac{1}{N}\mathbf{v}_k^H(\mathbf{k})\mathbf{v}_k(\mathbf{k})F(\omega), \quad (4.21)$$

bzw.

$$Y(\omega) = F(\omega). \quad (4.22)$$

Das Autoleistungsdichtespektrum am Beamformerausgang ergibt sich in weiterer Folge zu [VT02]

$$S_y(\omega) = Y(\omega)^2, \quad (4.23)$$

bzw.

$$S_y(\omega) = \mathbf{W}^H(\omega)\mathbf{S}_x(\omega)\mathbf{W}(\omega), \quad (4.24)$$

mit

$$\mathbf{S}_x(\omega) = \mathbf{F}(\omega)\mathbf{F}^H(\omega). \quad (4.25)$$

<sup>1</sup>Das 'H' im Exponenten beschreibt hier und in weiterer Folge die Hermitesche eines Vektors bzw. einer Matrix

# Kapitel 5

## Akustische Kamera

Die theoretischen Grundlagen aus den bisherigen Kapiteln sollen nun miteinander verknüpft werden. Ziel ist es, ein optoakustisches Messsystem zu konzipieren, das sich für die akustische Analyse von Antriebsstrangkomponenten eignet. Hierzu wird ein planares Mikrofonarray entworfen, das gemeinsam mit einem digitalen Kamerasystem eine auf Wunsch drehzahlabhängige Lokalisation entsprechender Schallquellen erlaubt. Ein System dieser Art wird gemeinhin als Akustische Kamera bezeichnet und wurde erstmals 1999 präsentiert [Mic06].

### 5.1 Hardwaredesign

Für die Konstruktion der Akustischen Kamera wurden, in Absprache mit dem Industriepartner, vorab folgende Randbedingungen festgelegt:

- Nutzung vorhandenen Equipments
- kostengünstige Anschaffung nicht vorhandenen Equipments
- Integration des Messsystems in die bestehende Messinfrastruktur
- min. Arbeitsfrequenzbereich  $1000 \text{ Hz} \leq f \leq 6000 \text{ Hz}$
- möglicher Messabstand zum Messobjekt  $1 \text{ m} \leq \text{Distanz} \leq 3 \text{ m}$
- hohe Mobilität
- einfache Fertigung
- einfache Handhabung

#### 5.1.1 Mikrofonarray

Die geometrische Anordnung der Mikrofone, die in ihrer Gesamtheit das Array aufspannen, hat großen Einfluss auf dessen Leistungsfähigkeit im jeweiligen Einsatzbereich. Der Wunsch nach hoher örtlicher Auflösung, einer hohen Unterdrückung unerwünschter Signalanteile und einem großen Frequenzbereich, in dem das Array eingesetzt werden kann, wird durch verschiedene Mikrofonanordnungen und die Form der

Weiterverarbeitung der Mikrofonsignale unterschiedlich gut erfüllt. Daraus resultiert die Notwendigkeit einer Überprüfung der Eignung einer speziellen Arraystruktur für den definierten Anwendungsfall anhand ausgewählter Kriterien.

### 5.1.1.1 Qualitätskriterien

Für die Evaluierung der Eignung einer definierten Arraygeometrie für den vorgesehenen Einsatzbereich, werden an dieser Stelle drei Parameter definiert. Neben einer Analyse der Hauptkeulenbreite und der Nebenkeulendämpfung wird mittels Co-Array Analyse die Mikrofonverteilung untersucht.

#### Hauptkeulenbreite

Als Maß für die örtliche Auflösung des Arrays dient die Hauptkeulenbreite. Wie bereits in Kapitel 2.2.3 diskutiert, wird üblicherweise die 3-dB beamwidth angegeben. Diese beschreibt die Breite der Hauptkeule des Beam-Patterns an der Stelle, an der die Amplitude um -3 dB abgenommen hat [Bal05]. Je geringer die Hauptkeulenbreite ist, umso höher wird die örtliche Auflösung in der Steering-Richtung.

#### Nebenkeulendämpfung

Im Beam-Pattern endlicher Aperturen treten neben der Hauptkeule zusätzliche Nebenkeulen auf. Da in der Regel eine Unterdrückung der Signalanteile außerhalb der Hauptkeule erwünscht ist, sollen die Nebenkeulen eine möglichst geringe Amplitude aufweisen. Ein Maß für die Ausprägung der Nebenkeulen ist die Nebenkeulendämpfung (engl.: Maximum Side Lobe Level bzw. MSL). Diese beschreibt die Pegeldifferenz zwischen dem Maximalpegel der Hauptkeule des Beam-Patterns und jenem der höchsten Nebenkeule [Bal05].

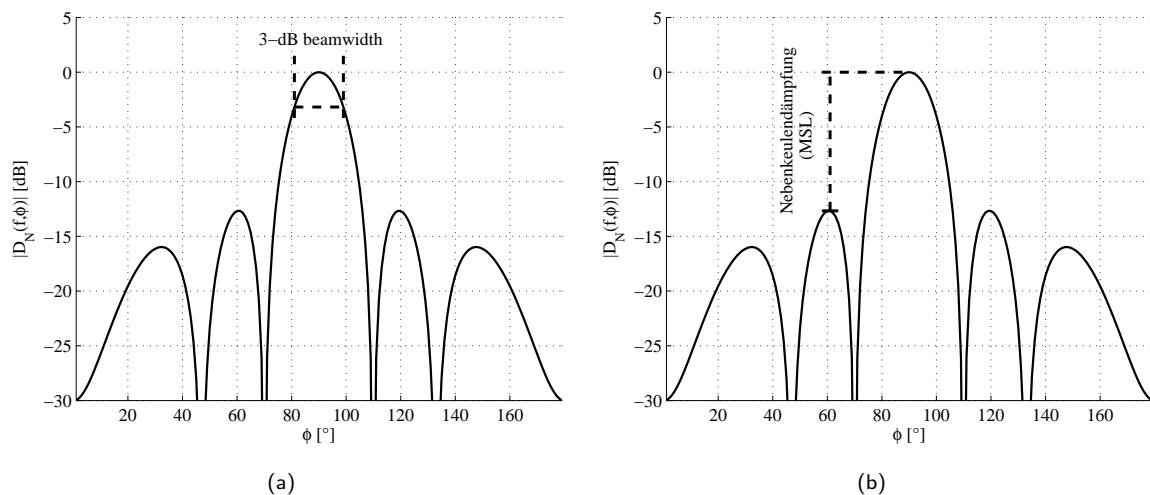


Abbildung 5.1: Definition der 3-dB beamwidth (a) und der Nebenkeulendämpfung (b)

#### Co-Array Analyse

Die Positionen der Mikrofone bzw. deren Distanzen untereinander bestimmen, wie gut ein Signal bestimmter Wellenlänge abgetastet werden kann [SSZ04]. Es erscheint folglich zweckmäßig, die Anordnung so zu wählen, dass die Redundanz der Distanzen zwischen den Mikrofonen möglichst minimiert wird. Daraus resultiert eine ideale Abtastung möglichst vieler Frequenzen. Ein sogenanntes Co-Array visualisiert die

vorliegenden Distanzen und erlaubt somit eine Analyse der Mikrofonverteilung [SSZ04, DHJDED93]. Die Werte des Co-Arrays eines Mikrofonarrays, dessen Mikrofone alle unterschiedliche Distanzen zueinander aufweisen, wären alle gleich 1. Eine Ausnahme stellt lediglich der Nullpunkt dar, dessen Wert in jedem Co-Array der Anzahl der Mikrofone entspricht. Dies resultiert aus der Tatsache, dass jedes Mikrofon zu sich selbst die Distanz null aufweist.

In Abbildung 5.2 ist ein 64-Kanal Grid-Array und dessen Co-Array dargestellt. Die Durchmesser der Kreise im Co-Array verhalten sich direkt proportional zum Vorkommen der jeweiligen Distanzen. Es lässt sich demnach klar das redundante Vorkommen vieler Intermikrofondistanzen in Abbildung 5.2 ablesen. Diese Tatsache lässt sich über den Wert der mittleren Redundanz

$$R_m = \frac{D_g}{D_d}, \tag{5.1}$$

mit

$$D_g = N^2 \tag{5.2}$$

quantifizieren.  $R_m$  steht hier für mittlere Redundanz,  $D_g$  für die Anzahl aller im Array vorkommenden Distanzen,  $D_d$  für die Anzahl unterschiedlicher Distanzen und  $N$  für die Mikrofonanzahl. Die mittlere Redundanz beschreibt demnach das Verhältnis zwischen allen im Array vorkommenden Distanzen und der Anzahl der Co-Array Werte und beträgt für das abgebildete Grid-Array ca. 18,2 [SSZ04].

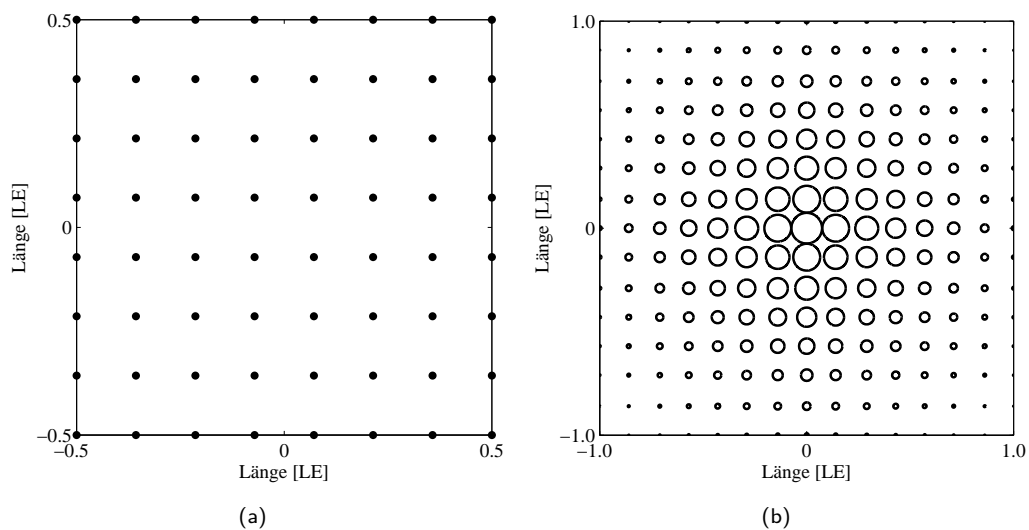


Abbildung 5.2: 64-Kanal Grid-Array mit einer Gesamtapertur von 1  $LE^2$  ( $LE$ =Längeneinheit) (a) und dessen Co-Array (b)



5.1.1.2 Geometriedesign

Im folgenden Abschnitt soll die Geometrie des für die Akustische Kamera verwendeten Mikrofonarrays definiert werden. Es soll dabei eine maximale Anzahl an Mikrofonen von  $N = 40$  nicht überschritten werden. Die Vorgabe der einfachen Fertigung berücksichtigend, werden vier unterschiedliche planare Arrays in Anlehnung an [CH04] entworfen und anhand der in Kapitel 5.1.1.1 definierten Parameter miteinander verglichen. Abbildung 5.3 zeigt die gewählten Arrays. Die Mikrofonkoordinaten der jeweiligen Anordnung sind in Anhang A gelistet.

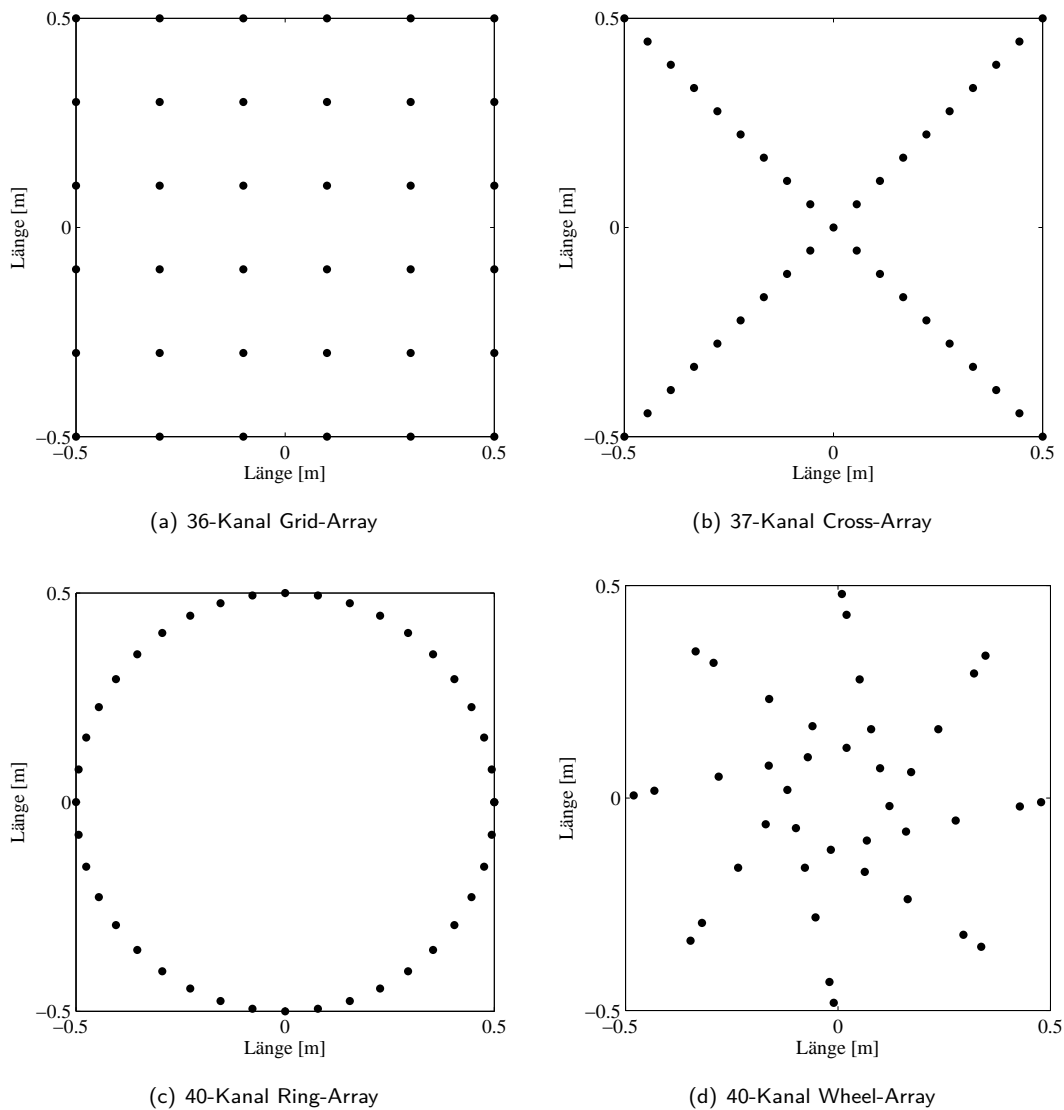


Abbildung 5.3: Ausgewählte planare Arraygeometrien für den Einsatz als Akustische Kamera

Vergleich von Hauptkeulenbreite und Nebenkeulendämpfung

Die vorgestellten planaren Arrays sollen nun anhand der aus den Beam-Patterns gewonnenen Werte für Hauptkeulenbreite und Nebenkeulendämpfung verglichen werden. Eine Bestimmung der Hauptkeulenbreite und der Nebenkeulendämpfung aus den Beam-Patterns für  $\phi = \theta = 90^\circ$  liefert für die Arrays die in

Frequ. [kHz]	Grid		Cross		Ring		Wheel	
	HB [°]	ND [dB]	HB [°]	ND [dB]	HB [°]	ND [dB]	HB [°]	ND [dB]
1 - 2	15 - A	-12 - 0	16 - 8	-12	14 - 7	-8	22 - 11	-15
2 - 3	A	0	8 - 5	-12	7 - 5	-8	11 - 7	-15 - -14
3 - 4	A	0	5 - 4	-12	5 - 4	-8	7 - 5	-14 - -13
4 - 5	A	0	4 - 3	-12	4 - 3	-8 - -7	5 - 4	-13 - -11
5 - 6	A	0	3	-12 - -5	3 - 2	-7	4 - 3	-11

Tabelle 5.1: Hauptkeulenbreite und Nebenkeulendämpfung der untersuchten Beam-Patterns ( $\phi = \theta = 90^\circ$ ); „A“ steht an dieser Stelle für Aliasing

Frequ. [kHz]	Grid		Cross		Ring		Wheel	
	HB [°]	ND [dB]	HB [°]	ND [dB]	HB [°]	ND [dB]	HB [°]	ND [dB]
1 - 2	17 - A	-12 - 0	19 - 9	-12	16 - 8	-8	25 - 12	-15 - -14
2 - 3	A	0	9 - 6	-12	8 - 5	-8	12 - 8	-14 - -11
3 - 4	A	0	6 - 4	-12	5 - 4	-8 - -7	8 - 6	-11
4 - 5	A	0	4 - A	-12 - 0	4 - 3	-7	6 - 5	-11
5 - 6	A	0	A	0	3	-7	5 - 4	-11 - -9

Tabelle 5.2: Hauptkeulenbreite und Nebenkeulendämpfung der untersuchten Beam-Patterns bei maximaler Auslenkung der Hauptkeule um  $\pm 24^\circ$  um die Ausgangslage  $\phi = \theta = 90^\circ$ ; „A“ steht an dieser Stelle für Aliasing

Tabelle 5.1 dargestellten Werte. Betrachtet man die Werte für die analysierten Arrays, so fällt in erster Linie das Grid-Array auf, das aufgrund auftretenden Aliasings für den vorgesehenen Einsatzzweck nicht geeignet ist. Das Cross-Array und das Ring-Array zeigen in der Hauptkeulenbreite ähnliche Werte. Die gute Nebenkeulendämpfung des Cross-Arrays kann allerdings im obersten Frequenzbereich nicht mehr gehalten werden. Das Wheel-Array weist gegenüber dem Ring-Array, das ebenfalls aus 40 Sensoren zusammengesetzt ist, eine deutlich höhere Nebenkeulendämpfung auf. Die Hauptkeulenbreite liefert jedoch vor allem im Frequenzbereich zwischen 1 und 2 kHz deutlich höhere Werte als für das Ring-Array. Wie in Kapitel 4.1 erläutert, verändert sich die Form der Hauptkeule und der Nebenkeulen, wenn die Richtungssensitivität des Arrays durch einen entsprechenden Phasenbelag in der komplexen Gewichtungsfunktion beeinflusst wird. Für den Einsatz als Akustische Kamera wird ein Steering-Winkel von maximal  $\pm 24^\circ$  um die Ausgangslage  $\phi = \theta = 90^\circ$  festgelegt. Diese Einschränkung lässt im definierten Minimalabstand von 1 m vom Messobjekt die Analyse der Schallabstrahlung auf einer Abtastfläche von ca.  $0.9 m^2$  zu, die für den gewünschten Anwendungsbereich als ausreichend definiert wird. Einen Vergleich der Hauptkeulenbreite und der Nebenkeulendämpfung der untersuchten Arrays bei maximaler Auslenkung der Hauptkeule zeigt Tabelle 5.2. Neben einer generellen Verschlechterung der Hauptkeulenbreiten und der Nebenkeulendämpfungen ist ersichtlich, dass beim Cross-Array nun ebenfalls Aliasing auftritt.

### Vergleich der Co-Arrays

Betrachtet man die in Abbildung 5.4 dargestellten Co-Arrays der definierten Mikrofonarrays, so fällt die

deutlich höhere Redundanz der vorkommenden Intermikrofondistanzen bei dem Grid-Array gegenüber den anderen Arrays auf. Diese Tatsache wird durch den Wert für die mittlere Redundanz bestätigt, der für das Grid-Array 10.71, für das Cross-Array 3.45, für das Ring-Array 1.99 und für das Wheel-Array lediglich 1.61 beträgt.

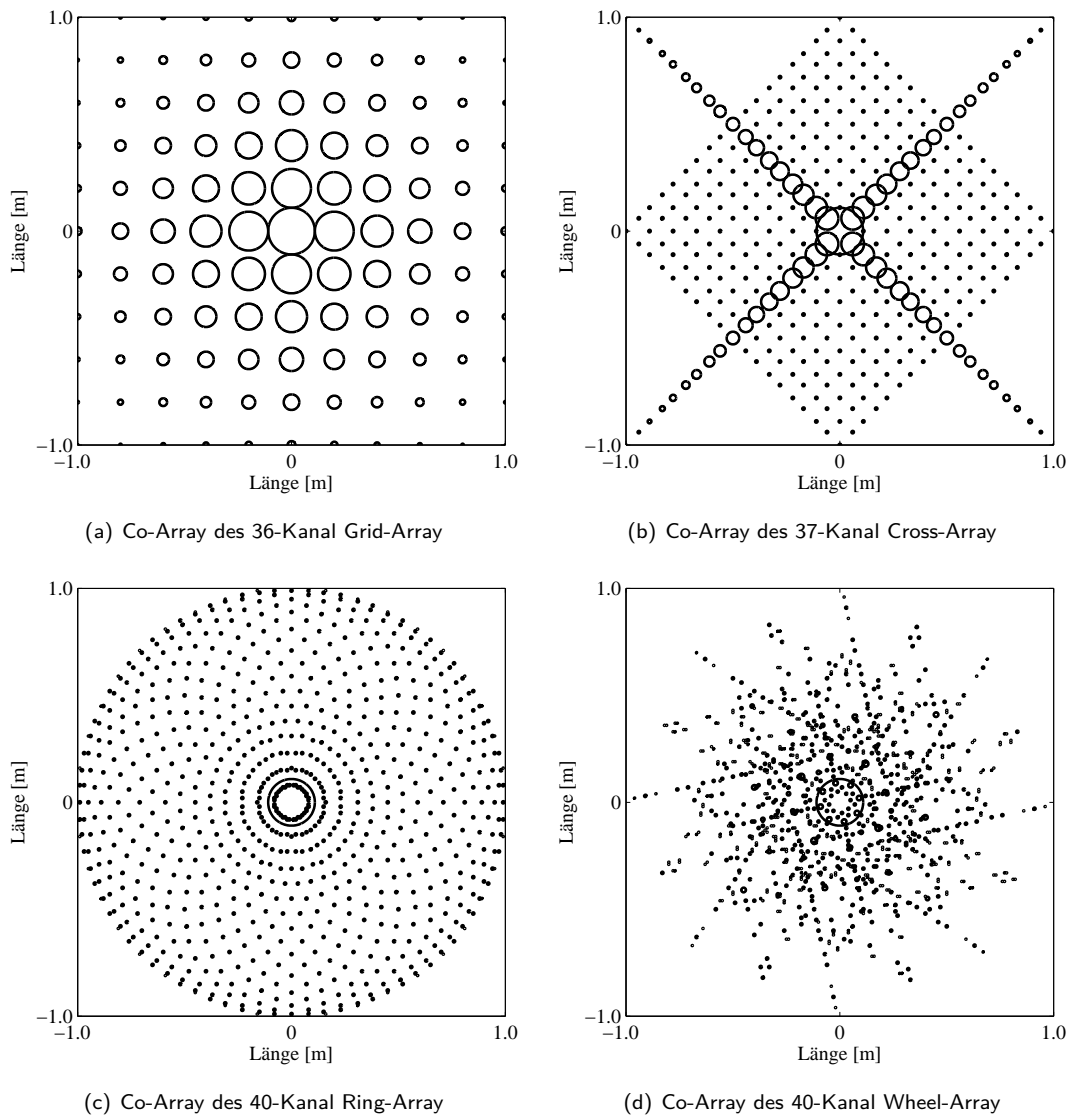


Abbildung 5.4: Co-Arrays der in Abbildung 5.3 dargestellten planaren Arraygeometrien

**Fertigung des Arrays**

Anhand der analysierten Qualitätskriterien soll nun jenes Array ausgewählt werden, das für die Verwendung als Akustische Kamera am besten geeignet ist. Die Wahl fällt hierbei auf das Wheel-Array. Zusätzlich zu den guten Werten in der Nebenkeulendämpfung und in der mittleren Redundanz der Intermikrofondistanzen, lässt sich, wie zu Beginn des Kapitels 5.1 vorausgesetzt, relativ einfach ein entsprechendes Trägergerüst für die Mikrofone fertigen. Der relativ großen Hauptkeulenbreite im tiefen Frequenzbereich wird eine geringere Bedeutung attestiert, da die zu vermessenden Antriebsstrangkomponenten vor allem im höherfrequenten

Bereich eine unerwünschte Schallabstrahlung aufweisen (siehe Kapitel 5.3.2).

Um die akustische Transparenz der Trägerkonstruktion des Wheel-Arrays weitestgehend gewährleisten zu können, besteht diese aus 0.004 m dickem und 0.04 m breitem Flachstahl, der, wie in Abbildung 5.5 dargestellt, speichenförmig verschweißt ist. Die Trägerkonstruktion wird von zwei Dreibeinstativen

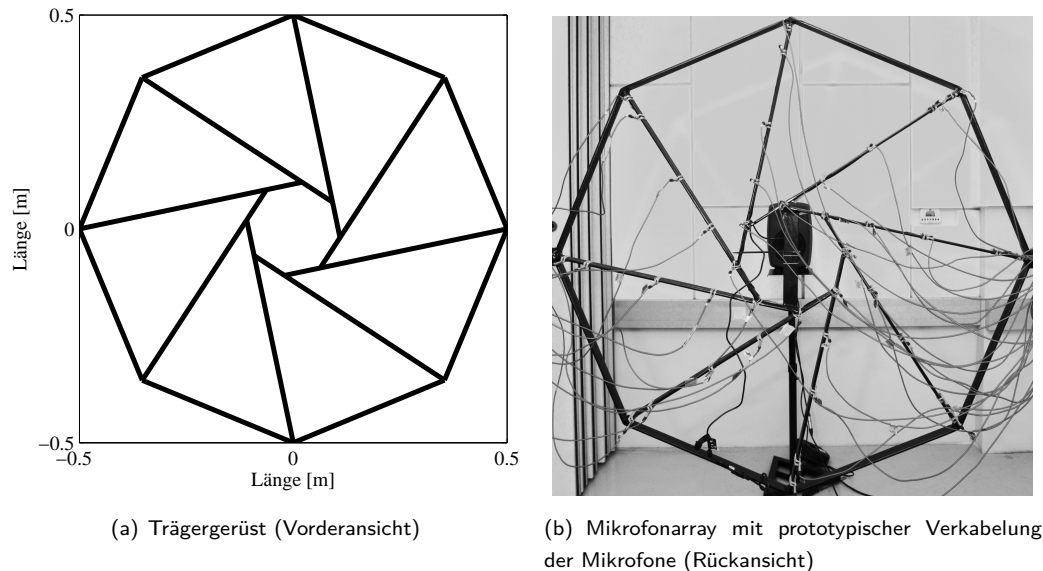


Abbildung 5.5: schematische Darstellung des Trägergerüsts (a) und Rückansicht des gefertigten 40-Kanal Wheel-Arrays (b)

aus Aluminium getragen. Die Befestigung der 40 Mikrofone auf dem Trägergerüst erfolgt, aufgrund des prototypischen Charakters der Akustischen Kamera, verrutschsicher mit elastischen Kunststoffbändern.

### 5.1.2 Aufzeichnung der Mikrofon- und Drehzahlsignale

Wie in Kapitel 5.1 bereits erwähnt, war die Einbindung der Akustischen Kamera in die bestehende Messinfrastruktur eine Grundvoraussetzung vor Entwicklungsbeginn. Aus diesem Grund wird für die Aufzeichnung der Mikrofon- und Drehzahlsignale ein vorhandenes Messfrontend der Firma „Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH“ und die Software PAK in der Version 5.5 eingesetzt (technische Spezifikationen siehe Anhang A). Die in Kapitel 5.2 vorgestellte Software ist in der Lage, die aufgezeichneten Daten zu importieren und weiter zu verarbeiten.

### 5.1.3 Aufzeichnung des optischen Bildes

Aufgrund der definierten finanziellen Rahmenbedingungen wird für die optische Bildaufzeichnung eine handelsübliche Webcam verwendet (siehe Abbildung 5.6 und Anhang A). Diese verfügt über einen Bildsensor, der Aufnahmen in UXGA-Auflösung erlaubt. Webcams sind, bedingt durch ihren Haupteinsatzzweck, in der Regel für die Aufzeichnung von Bildern oder Videos statischer oder bewegter Objekte, die sich in sehr kurzer Distanz zum Linsensystem befinden, optimiert. Sie verfügen daher meist über Weitwinkelobjektive. Da es sich bei der verwendeten Kamera um ein Consumer-Produkt handelt, diese also nicht für einen professionellen Einsatz vorgesehen ist, konnte der Hersteller auf Nachfrage keine detaillierten technischen Spezifikationen bereitstellen. Die Eignung der Webcam für den Einsatz im zu entwickelnden Messsystem muss demnach vorab geprüft werden. Aufgrund des günstigen Anschaffungspreises muss von einem, im Vergleich

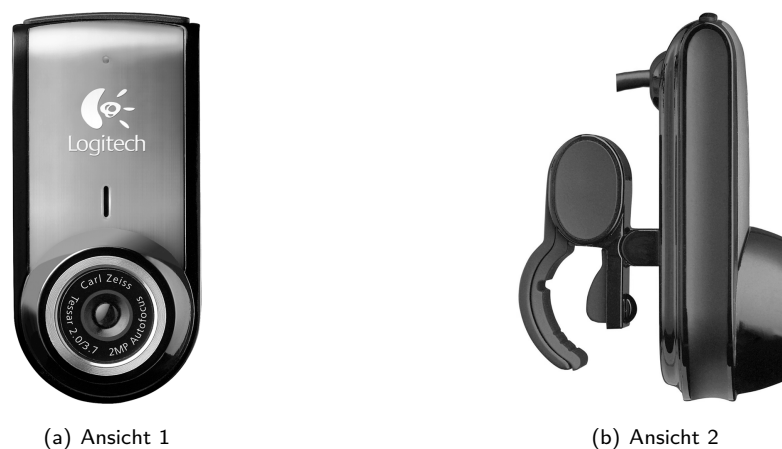


Abbildung 5.6: Webcam

zu professionellen Kamerasystemen, minderwertigen Linsensystem ausgegangen werden. Folglich ist mit dem Auftreten mehr oder minder relevanter Aberrationen zu rechnen. Zur Bestimmung dieser Abbildungsfehler sollen mehrere Testbilder aufgezeichnet werden. Als Aufnahmeobjekt dient eine Wandverkleidung, die sich aus einzelnen Metallpaneelen zusammensetzt. Auf dieser wird ein  $0.5 \text{ m}^2$  großes Testmuster, das sich aus einfachen geometrischen Formen zusammensetzt, befestigt. Beispiele der Testbilder zeigt Abbildung 5.7.

Die in den Testbildern festzustellende chromatische Aberration spielt für den vorgesehenen Einsatzzweck keine besondere Rolle und wird aus diesem Grund an dieser Stelle nicht genauer erläutert bzw. analysiert. Detaillierte Informationen zu diesem Thema finden sich z.B. in [Hec03]. Als bedeutend problematischer erweist sich ein weiterer Abbildungsfehler. Die Testbilder zeigen eine relativ stark ausgeprägte Tonnenverzeichnung, die vor allem in den seitlichen Randbereichen der aufgezeichneten Bilder deutlich erkennbar ist. Die Tonnenverzeichnung beschreibt eine Verzerrung des gesamten Bildes. Jeder Bildpunkt wird hierbei radial in Richtung Bildmitte mehr oder weniger verschoben [Hec03]. Abbildung 5.8 verdeutlicht anhand einer rasterförmigen Skizze diesen Effekt.

Da das Endprodukt der Akustischen Kamera ein Zwei-Ebenen-Bild sein soll, das sich aus der Superposition der berechneten Schalldruckkartierung und dem optischen Bild der Webcam zusammensetzt, würde eine Verzerrung des optischen Bildes letztendlich in einer vermeintlichen Fehllokalisation der Schallquelle resultieren. Die in Kapitel 5.1.1.2 definierte Einschränkung des Steering-Winkels erlaubt es allerdings, das Schallfeld nur an jenen räumlichen Positionen auszuwerten, die durch die Webcam mit geringer Verzeich-

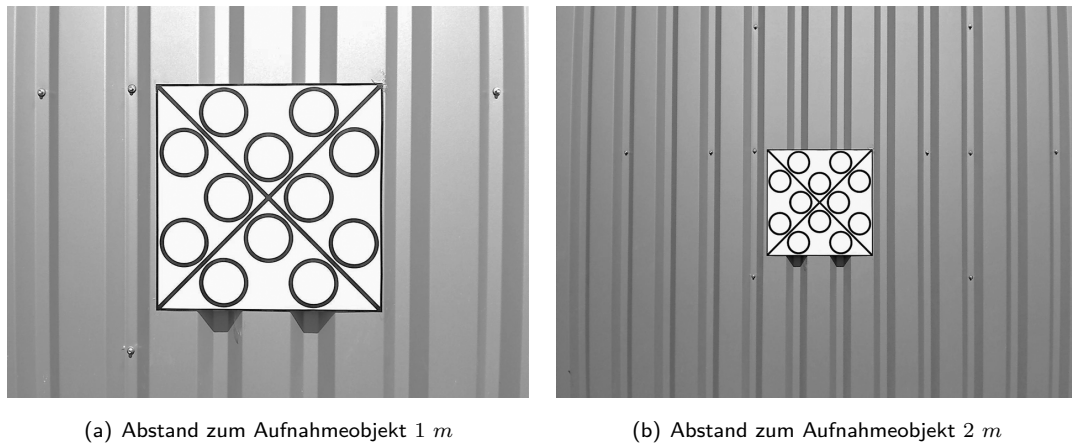


Abbildung 5.7: Testbilder zur Bestimmung der Aberrationen der Webcam

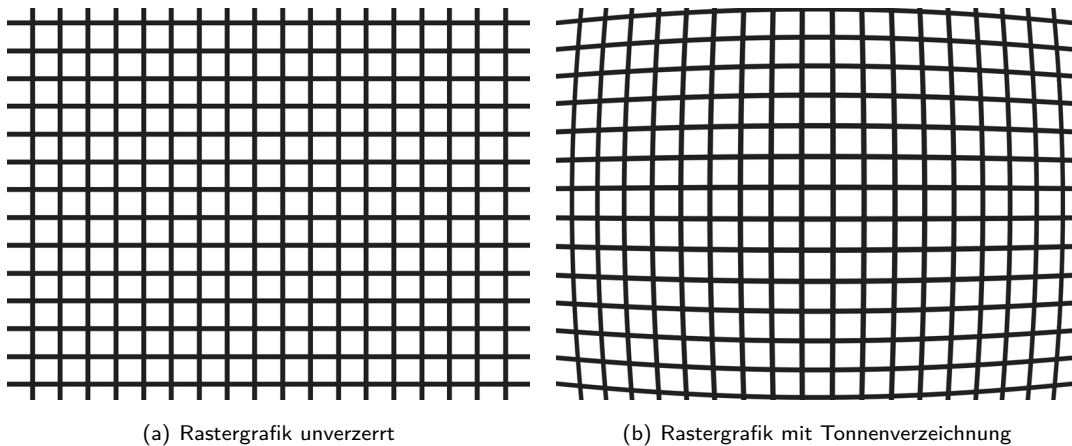


Abbildung 5.8: Tonnenverzeichnung

nung im Vergleich zu jener an den Randbereichen des Bildes aufgezeichnet werden.

## 5.2 Softwaredesign

Die Entwicklung einer Anwendungssoftware stellt einen wesentlichen Teil dieser Arbeit dar. Für die Implementierung der Beamforming-Algorithmik und der weiterführenden Analysen stellt MATLAB<sup>®</sup> eine probate Entwicklungsumgebung dar. MATLAB<sup>®</sup> erlaubt nicht nur eine umfassende Analyse und Weiterverarbeitung digitaler Signale, sondern auch die Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche (**GUI = Graphical User Interface**), die die Bedienung der Software für den Anwender erheblich erleichtert. Diese Benutzeroberfläche soll für Bildschirme mit einer Auflösung  $\geq$  WXGA optimiert werden.

Da die Aufzeichnung der Mikrofon- und Drehzahlsignale, wie in Kapitel 5.1.2 erläutert, über eine bestehende Messinfrastruktur erfolgt, wird der Softwareteil der Akustischen Kamera in zwei Programmteilen realisiert:

- Programm 1: „Cheese“

- Programm 2: „Datenauswertung“

Der Funktionsumfang der beiden Programmteile wird in den folgenden Abschnitten erläutert. Der schematische Systemaufbau der Akustischen Kamera ist in Abbildung A.21 dargestellt.

### 5.2.1 Programm „Cheese“

Das Programm „Cheese“ ist für die Aufzeichnung des optischen Bildes der Akustischen Kamera vorgesehen. Diese Aufzeichnung muss unmittelbar vor bzw. nach der Aufzeichnung der Mikrofon- und Drehzahlsignale stattfinden und wird deshalb in einem separaten Programm implementiert. Die Software ermöglicht den

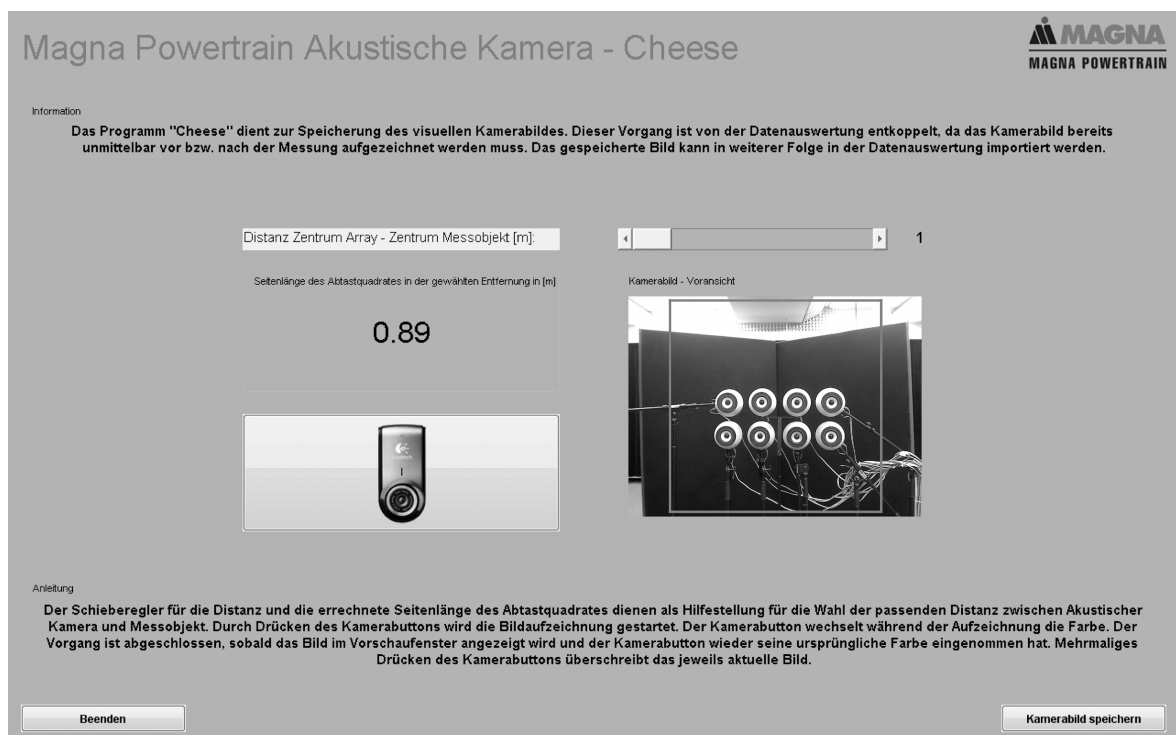


Abbildung 5.9: grafische Benutzeroberfläche „Cheese“

direkten Zugriff auf die über die USB-Schnittstelle angeschlossene Webcam und zeichnet Bilder in nativer UXGA-Auflösung auf. Auf der in Abbildung 5.9 dargestellten grafischen Benutzeroberfläche sind weitere Funktionen von „Cheese“ erkennbar. In der Vorschau des Kamerabildes zeigt ein Quadrat den effektiv für die akustische Analyse genutzten Bildausschnitt. Die entfernungsabhängige Seitenlänge dieses Quadrats kann mithilfe eines Schiebereglers berechnet werden und soll bei der Wahl der Positionierung der Akustischen Kamera behilflich sein. Die Schaltfläche, auf der die Webcam abgebildet ist, startet den Aufzeichnungsvorgang. Aufgezeichnete Bilder können über die Schaltfläche „Kamerabild speichern“ exportiert werden und stehen im Anschluss für den Import im Programm „Datenauswertung“ bereit.

### 5.2.2 Programm „Datenauswertung“

Aufgrund getrennter Systeme für Signalaufzeichnung und Datenauswertung ist das Programm „Datenauswertung“ für die Offline-Analyse der Messdaten vorgesehen. Mithilfe dieses Softwaremoduls ist es möglich,

die aufgezeichneten Mikrofon- und Drehzahlsignale, sowie das mit „Cheese“ erstellte optische Kamerabild zu importieren und entsprechend weiter zu verarbeiten.

Zu Beginn ist es erforderlich, die Messdaten und das optische Kamerabild zu importieren (siehe Abbildung 5.10). Weiters ist eine Angabe der Abtastfrequenz bei der Aufzeichnung, der zum Messzeitpunkt vorherrschenden Raumtemperatur sowie der Messdistanz zwischen Akustischer Kamera und Messobjekt erforderlich. Diese Daten werden für die weiteren Analysen und Berechnungen gespeichert und bereitgestellt. Für die Analyse der Messdaten stehen, abhängig von den aufgezeichneten Daten, zwei unterschiedliche

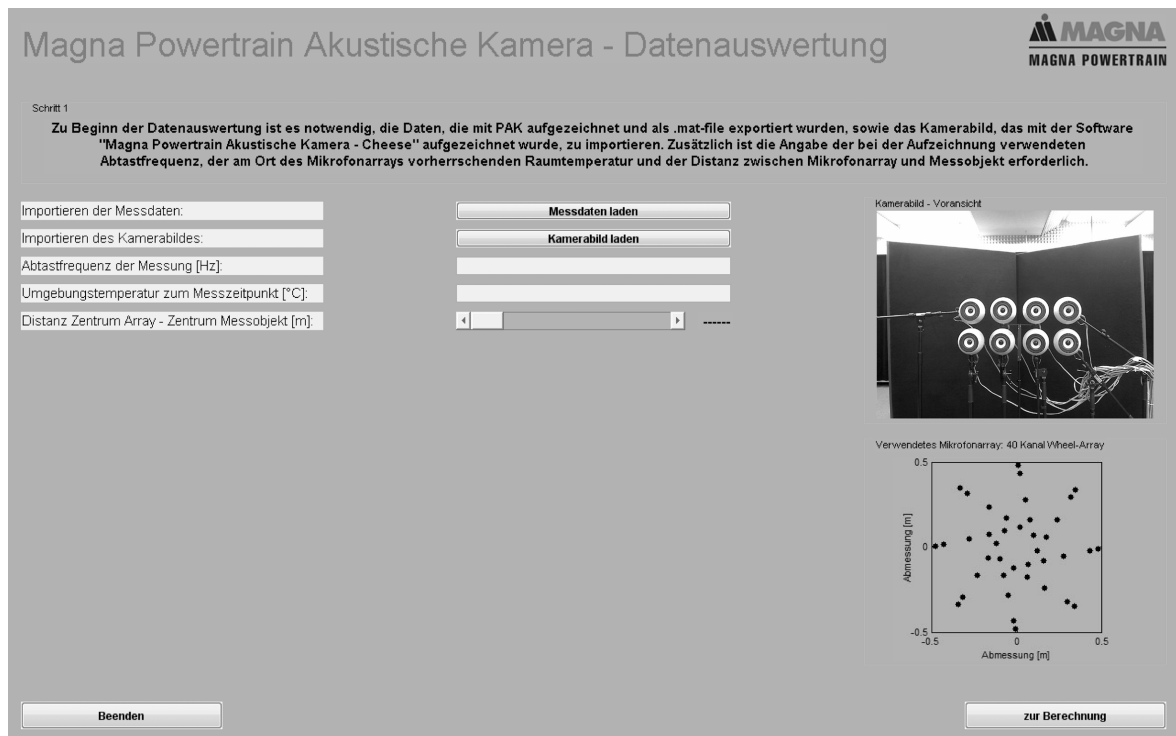


Abbildung 5.10: grafische Benutzeroberfläche „Datenauswertung Teil 1“

Modi zur Verfügung. Beinhalten die Messdaten zusätzlich zu den Mikrofonsignalen ein entsprechendes Drehzahlsignal, steht dem Benutzer alternativ zur Analyse nach den Parametern Zeit und Frequenz ein Campbell-Diagramm zur Verfügung. Dieses wird vor allem in der Schwingungsanalyse rotierender Systeme eingesetzt und stellt den Schalldruckpegel über Frequenz und Drehzahl dar [Zel09]. In der Geräuschanalyse von Getrieben sind Hochlaufmessungen weit verbreitet. Die Rotationsfrequenz und deren Harmonische regen hierbei Eigenfrequenzen des untersuchten Messobjekts an. Im Campbell-Diagramm bildet sich ein sogenannter Ordnungsfächer aus, der eine Analyse dieser Schwingungsanregung erlaubt. Zusätzlich ermöglicht diese Form der Darstellung eine einfache Unterscheidung zwischen drehzahlabhängigen und drehzahlunabhängigen Schwingungen [NBL07]. Liegt kein entsprechendes Drehzahlsignal vor, ist eine Analyse der Ordnungen nicht möglich. In diesem Fall steht ausschließlich ein Spektrogramm sowie ein Plot des Frequenzspektrums zum gewählten Auswertzeitpunkt zur zeitlichen Analyse der Frequenzspektren bereit.

Das Hauptfenster von „Datenauswertung“ ist in fünf Bereiche gegliedert. Abbildung 5.11 zeigt die entsprechende grafische Benutzeroberfläche von „Datenauswertung“ in der die fünf Bereiche nummeriert sind. In Bereich 1 kann zwischen den Analysemodi „Zeit“ bzw. „Ordnung“ gewechselt werden. Wird der Modus „Zeit“ gewählt, lassen sich im Bereich 1 Werte für Frequenz und Zeitpunkt frei eingeben. Die Blockgröße



der Fouriertransformation, die Darstellungsdynamik des Konturplots, sowie das Farbschema des Konturplots und die Anzahl der Abtastpunkte in der Fokusebene können aus vordefinierten Werten gewählt werden. In Bereich 3 wird das Frequenzspektrum des Signals zum gewählten Auswertzeitpunkt und in Bereich 4 das Spektrogramm dargestellt. Der Benutzer hat hier die Möglichkeit, Werte in den Grafiken zu selektieren und diese für die Berechnung zu übernehmen. Wechselt man in den Modus „Ordnung“, werden in Bereich 1 statt der Felder Frequenz und Zeit, die Felder Ordnung und Drehzahl aktiv. In Bereich 4 dient anstelle des Spektrogramms ein Campbell-Diagramm zur Datenanalyse. Bereich 2 der grafischen Benutzeroberfläche bleibt in beiden Analysemodi unverändert. Hier wird das Zwei-Ebenen-Bild, bestehend aus dem importierten Kamerabild und dem berechneten Konturplot dargestellt. Zusätzlich zur optischen Analyse der Messdaten ist in beiden Analysemodi eine Audioausgabe der Messdaten möglich. Die entsprechenden Steuerschaltflächen befinden sich in Bereich 4. Die Berechnung des Konturplots folgt den theoretischen Ausführungen in Kapitel 4 bzw. 5.3.1.2 und kann über die Schaltfläche „Berechnung starten“ in Bereich 5 gestartet werden. Nach einer abgeschlossenen Berechnung ist der Export des Zwei-Ebenen-Bildes als jpg-Datei in UXGA-Auflösung über die Schaltfläche „Superposition Exportieren“ möglich.

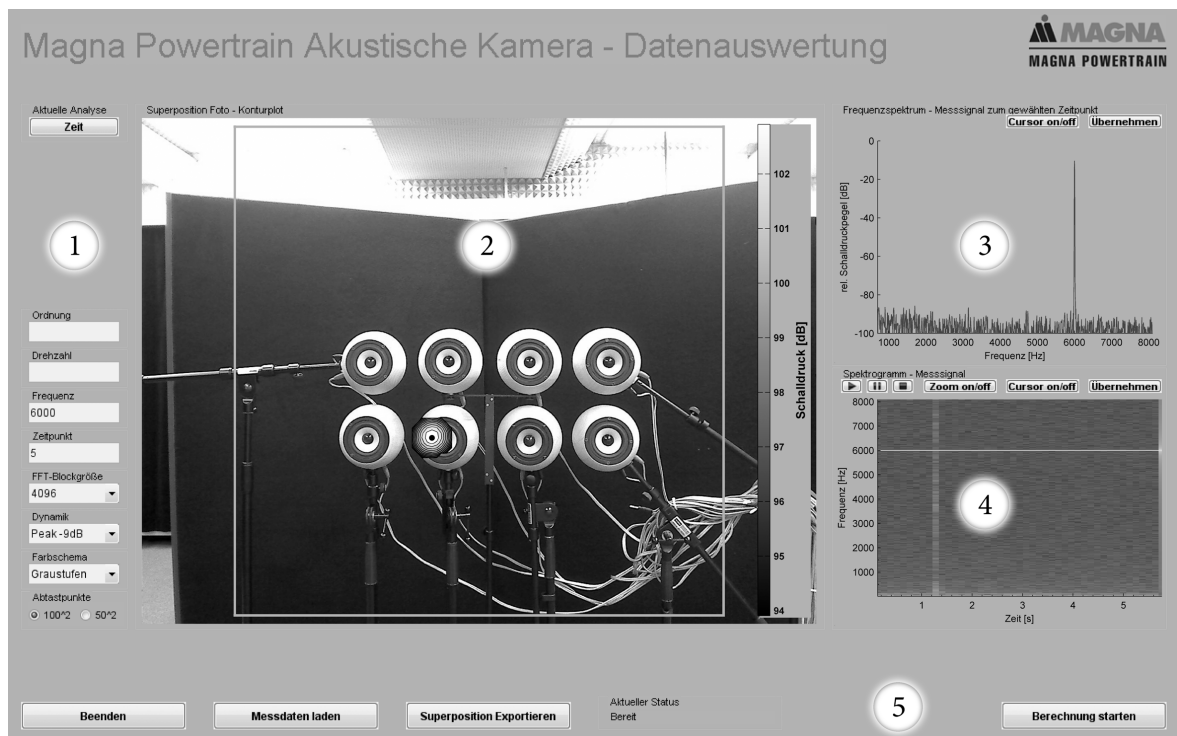


Abbildung 5.11: grafische Benutzeroberfläche „Datenauswertung Teil 2“

## 5.3 Funktionsevaluierung

Für die Funktionsevaluierung der Akustischen Kamera werden drei Wege gewählt. Vor der Durchführung realer Messungen werden Computersimulationen berechnet, mithilfe derer die fehlerfreie Funktion der Software sichergestellt wird. Die Simulationsergebnisse sollen außerdem als Vergleich gegenüber realen Messungen dienen und dadurch eine mögliche falsche Modellbildung aufzeigen. Hierfür werden virtuelle Schallquellen an definierten Raumpunkten erzeugt und mit der Software lokalisiert. Im nächsten Schritt wird die virtuelle Messanordnung real nachgestellt. Eine Anordnung realer Schallquellen in Form eines Lautsprecherarrays wird sowohl in einer reflexionsarmen, als auch in einer reflexionsbehafteten Messumgebung untersucht und soll die Eignung des Messsystems für diesen Anwendungsbereich aufzeigen. Den Abschluss der Funktionsevaluierung stellt eine Vermessung eines elektrischen Achsantriebs auf einem Antriebsstrangprüfstand dar, mit der die Leistungsfähigkeit des Systems im eigentlichen Einsatzbereich geprüft wird.

### 5.3.1 Vermessung des Lautsprecherarrays

Um die Lokalisationseigenschaften der Akustischen Kamera bei einer Vermessung bekannter Schallquellen zu prüfen, wird ein Lautsprecherarray zusammengestellt. Dieses besteht aus acht rotationssymmetrischen Tropfenlautsprechern (technische Spezifikationen siehe Anhang A und B), die in einer  $2 \times 4$ -Array-Anordnung angeordnet werden. Das Lautsprecherarray liegt, in kartesischen Koordinaten beschrieben, im X-Y-Z-Raum. Das Zentrum der Anordnung liegt im Nullpunkt und die Lautsprecher wurden entlang der X- bzw. Z-Achse aufgereiht. Das akustische Zentrum der Lautsprecher wird an der Position der jeweiligen Spule angenommen und liegt bei  $y = 0$ . Abbildung 5.12 zeigt schematisch die Anordnung der Lautsprecher im Lautsprecherarray. Die Nummerierung der Lautsprecher von 1 – 8 wird in den folgenden Ausführungen aufgegriffen.

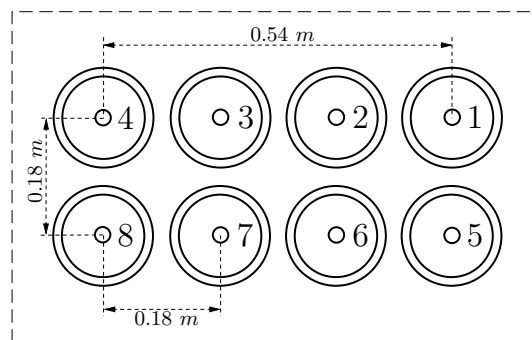


Abbildung 5.12: geometrische Anordnung der Tropfenlautsprecher im Lautsprecherarray

#### 5.3.1.1 Testsignale

Im Zuge der Messungen sollen die Tropfenlautsprecher mit unterschiedlichen, in MATLAB<sup>®</sup> generierten Testsignalen bespielt werden. Neben einzelnen Sinussignalen kommen rosa Rauschen und logarithmische Sweeps unterschiedlicher Länge zum Einsatz. Die Sweepmessung bringt hierbei den Vorteil mit sich, dass sich die entsprechende Impulsantwort des Systems bestimmen lässt [Far00]. Dies ermöglicht in weiterer Folge auch eine Identifikation möglicher Reflexionserscheinungen.

### 5.3.1.2 Vermessung im Tonstudio

Die ersten Messungen sollen in einer Umgebung stattfinden, die möglichst frei von akustischen Störgeräuschquellen und Reflexionserscheinungen ist. Für eine Messung dieser Art ideal wären Freifeldbedingungen. Da die Messungen in einem geschlossenen Raum stattfinden sollen, der von mehr oder weniger schallreflektierenden Begrenzungsflächen umschlossen ist, ist es notwendig, mithilfe von eingebrachtem Absorptionsmaterial den Reflexionsfaktor und in weiterer Folge die Nachhallzeit des Raumes breitbandig gegen null zu führen. Ein Beispiel für Räume dieser Art wäre ein sogenannter Akustik-Prüfstand, der, häufig in der Automobilindustrie eingesetzt, eine sehr gute Umgebung für akustische Messungen darstellt [Fuc10].

Für die Vermessung der Tropfenlautsprecher stellt ein Tonstudio, gewisse Randbedingungen vorausgesetzt, eine passende Alternative dar. Aus diesem Grund wird auf den Aufnahmeraum des Tonstudios des Instituts für Breitbandkommunikation der TU-Graz zurückgegriffen. Mit Nachhallzeiten im relevanten Frequenzbereich von  $T_{30} < 0.2 \text{ s}$  [Beh04] stellt dieser eine akzeptable Umgebung für die geplanten Messungen dar. Das Mikrofonarray wird in der Mitte des Raumes und die Lautsprecheranordnung in einem Normalabstand vom Mikrofonarray-Zentrum von  $1.25 \text{ m}$  positioniert. Hinter den Tropfenlautsprechern sollen zwei Absorber-Baffeln mit den Abmessungen  $1.8 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$  (H x B x T) in V-förmiger Anordnung zusätzliche Absorption bieten. Die Höhe des Mikrofonarray-Zentrums, sowie des Zentrums der Lautsprecheranordnung wird auf  $1.32 \text{ m}$  bzw.  $1.23 \text{ m}$  eingestellt. Abbildung 5.13 skizziert die Draufsicht der Messanordnung.

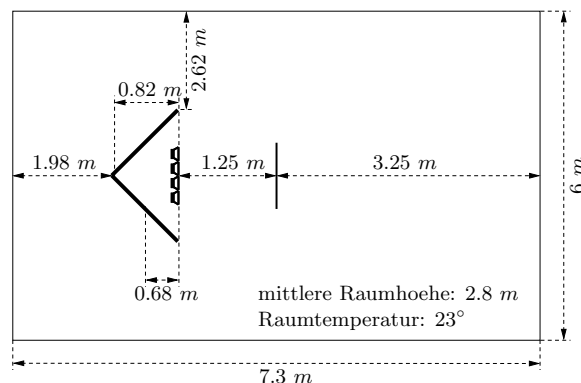


Abbildung 5.13: Draufsicht Messanordnung im Tonstudio (nicht maßstabsgetreu). Die senkrechte durchgezogene Linie im Zentrum der Grafik stellt das Mikrofonarray dar, das sich in einem Abstand von  $1.25 \text{ m}$  zum Lautsprecherarray befindet. Die V-förmige Anordnung im Abstand von  $1.98 \text{ m}$  zur linken Raumbegrenzungsfläche (dicke durchgezogene Linie) repräsentiert die Absorber-Baffeln.

Die Tropfenlautsprecher des Lautsprecherarrays werden in der ersten Testreihe mit den in Kapitel 5.3.1.1 beschriebenen Testsignalen in unterschiedlichen Varianten bespielt. Exemplarisch soll nun eine Messung des Lautsprechers 4, der mit einem logarithmischen Sweep bespielt wird, diskutiert werden. Die Messung wird in „Datenauswertung“ mittels Delay&Sum Beamforming gemäß Kapitel 4.2 für unterschiedliche Frequenzen ausgewertet. Betrachtet man nun den in Abbildung 5.14 dargestellten Vergleich zwischen Simulation und realer Messung für die Auswertung bei  $5000 \text{ Hz}$ , so kann ein geringer Versatz der realen gegenüber der simulierten Quelle in der Lokalisation festgestellt werden. Sowohl der Versatz in X- als auch in Z-Richtung beträgt ca.  $0.02 \text{ m}$ . Eine Auswertung weiterer Frequenzen zeigt allerdings teilweise stark ausgeprägte Unter-

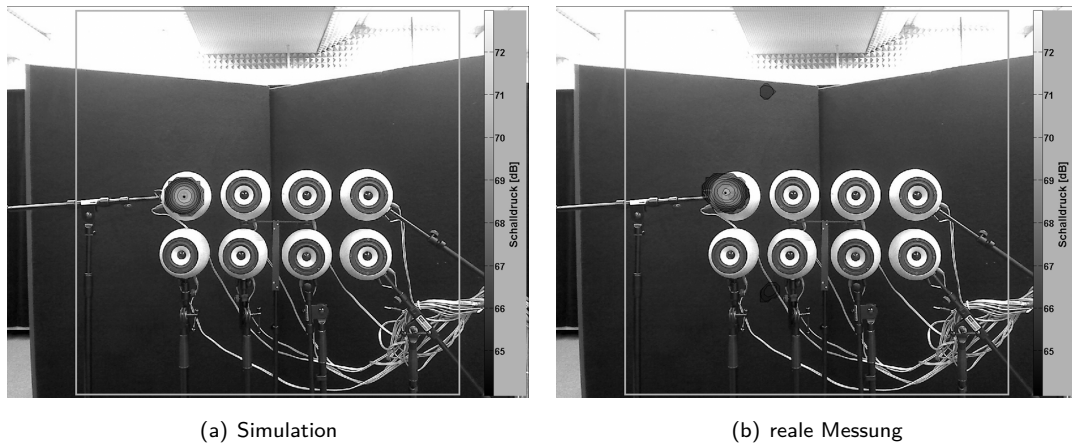


Abbildung 5.14: Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio, log. Sweep @ 5000 Hz, Dynamik = 9 dB, Fernfeld-Annahme

schiede zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. Die Unterschiede führen teilweise zu einer eklatanten Fehllokalisierung der akustischen Quelle. Abbildung 5.15 zeigt ein Beispiel für diese Fehllokalisierungen anhand der Auswertung bei 3500 Hz der Messung im Tonstudio. Eine Erklärung für diese augenscheinlichen

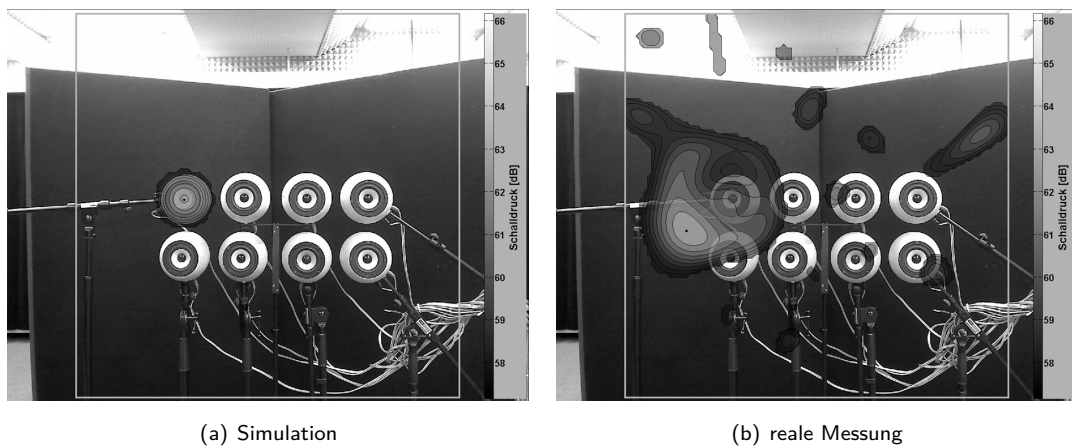


Abbildung 5.15: Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio, log. Sweep @ 3500 Hz, Dynamik = 9 dB, Fernfeld-Annahme

Fehldarstellungen der Akustischen Kamera liefert Kapitel 2.2.1. Da sich bei der Messung Lautsprecher 4 in einem Abstand von ca. 1.28 m zum Mikrofonarray-Zentrum befindet, ist die Bedingung in Gleichung 2.15 nicht erfüllt. Der Lautsprecher ist demnach im Nahfeld des Mikrofonarrays positioniert. Die Annahme eines im Fernfeld des Arrays vorherrschenden quasi-ebenen Wellenfeldes hat daher keine Gültigkeit mehr. Anstelle ebener Wellen muss im Nahfeld von einer kugelförmigen Wellenausbreitung ausgegangen werden. Liegt ein sphärisches Wellenfeld vor, wird dieses aber mit einem Fernfeld-Delay&Sum-Algorithmus ausgewertet, so entstehen durch die Falschannahme der Zeit- bzw. Wegdifferenzen und den daraus resultierenden Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Mikrofonpositionen entsprechende Fehlinterpretationen. Abbildung 5.16 illustriert den Einfall ebener und sphärischer Wellen aus Richtung  $\phi = \theta = 90^\circ$  auf ein lineares, diskretes Sensorarray.

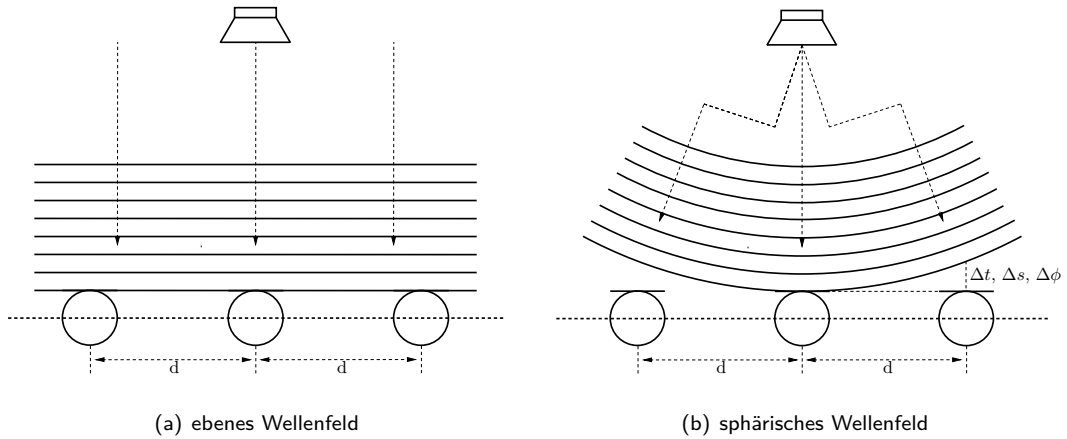


Abbildung 5.16: Einfall ebener bzw. sphärischer Wellen auf ein lineares, diskretes Sensorarray

Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, ist eine Anpassung der Beamforming-Berechnungen erforderlich. In weiten Teilen der Literatur wird die Nahfeld-Theorie vernachlässigt. Historisch gesehen ist dies auch durchaus nachvollziehbar, waren doch ursprüngliche Einsatzgebiete von Sensor-Arrays in der Nachrichtentechnik oder Seismologie angesiedelt. Aufgrund der großen Quelldistanzen in diesen Anwendungsbereichen, hat der Fernfeld-Ansatz Gültigkeit [Abh99].

Gleichung 5.3 zeigt zur Erinnerung die in Kapitel 3.1.1 vorgestellte horizontale Fernfeld-Richtungsfunktion für ein lineares Mikrofonarray mit  $n$  identischen Sensoren, die im Abstand  $d$  voneinander positioniert sind.

$$D_P(f, \theta, \phi) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w_n(f) e^{i \frac{2\pi f}{c} n d \sin \theta \cos \phi}, \quad \text{mit } \theta = \frac{\pi}{2}, \quad (5.3)$$

Die Differenz des zurückgelegten Weges einer einfallenden ebenen Welle zwischen zwei benachbarten Sensoren lässt sich in diesem Fall berechnen gemäß [McC01]

$$d' = n d \cos \phi. \quad (5.4)$$

Für den in Abbildung 5.16(a) dargestellten Fall ergibt diese exakt 0. Aufgrund der radial abhängigen Krümmung einer sphärischen Wellenfront, lässt sich die Distanz in diesem Fall beschreiben als [McC01]

$$d' = d_n(r, \phi) - d_0(r, \phi). \quad (5.5)$$

$d_n(r, \phi)$  und  $d_0(r, \phi)$  bezeichnen an dieser Stelle die Distanzen zwischen  $n$ -tem bzw. Referenzsensor und der Quelle.  $d_n(r, \phi)$  lässt sich berechnen über den Zusammenhang [McC01, War96]

$$d_n(r, \phi) = [r^2 + 2r(x_n - x_0) \cos \phi + (x_n - x_0)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (5.6)$$

$x_n$  und  $x_0$  beschreiben dabei die räumliche Position der Sensoren. Berücksichtigt man weiters die Tatsache, dass sich die Amplitude einer sphärischen Welle indirekt proportional zum Ausbreitungsradius verhält, lässt sich die horizontale Nahfeld-Richtungsfunktion anschreiben als [McC01, War96]

$$D_{PN}(f, r, \theta, \phi) = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \frac{d_0(r, \phi)}{d_n(r, \phi)} w_n(f) e^{i \frac{2\pi f}{c} (d_n(r, \phi) - d_0(r, \phi))}, \quad \text{mit } \theta = \frac{\pi}{2}. \quad (5.7)$$

Diese Nahfeld-Richtungsfunktion lässt sich mittels Nahfeld-Kompensation der entsprechenden Fernfeld-Richtungsfunktion anpassen. Realisiert wird diese Kompensation über eine Anpassung der Sensorgewichte gemäß [McC01, War96]

$$w'_n(f) = \frac{d_n(r, \phi)}{d_0(r, \phi)} e^{i \frac{2\pi f}{c} (d_0(r, \phi) - d_n(r, \phi) + x_n \cos \phi)} w_n(f). \quad (5.8)$$

Die Berücksichtigung der sphärischen Wellenausbreitung ermöglicht nun eine korrekte Berechnung der Zeit- bzw. Wegdifferenzen und der daraus resultierenden Phasenverschiebungen zwischen den einzelnen Mikrofonpositionen. Die Abbildungen 5.17 und 5.18 zeigen abermals den Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Ergebnissen aus der zu Beginn des Kapitels diskutierten Messung des Lautsprechers 4, diesmal jedoch unter Berücksichtigung der Nahfeld-Situation.

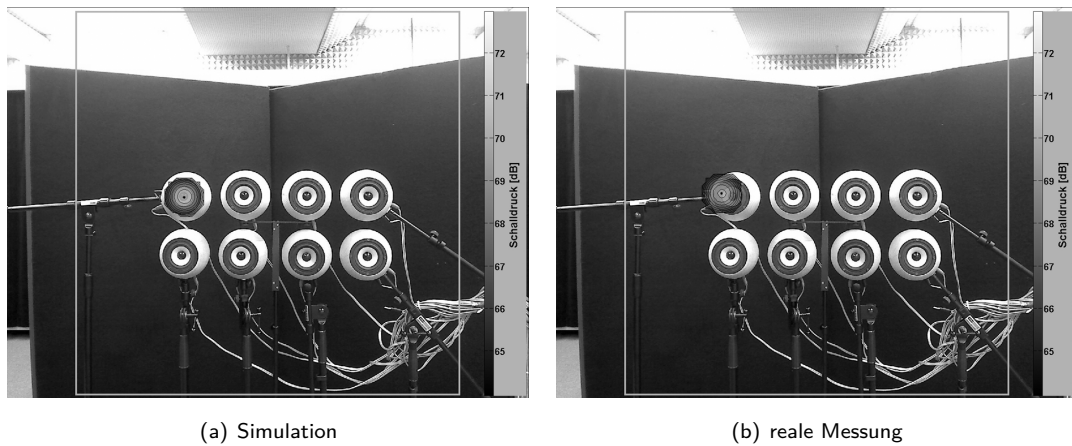


Abbildung 5.17: Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio, log. Sweep @ 5000 Hz, Dynamik = 9 dB, Nahfeld-Annahme

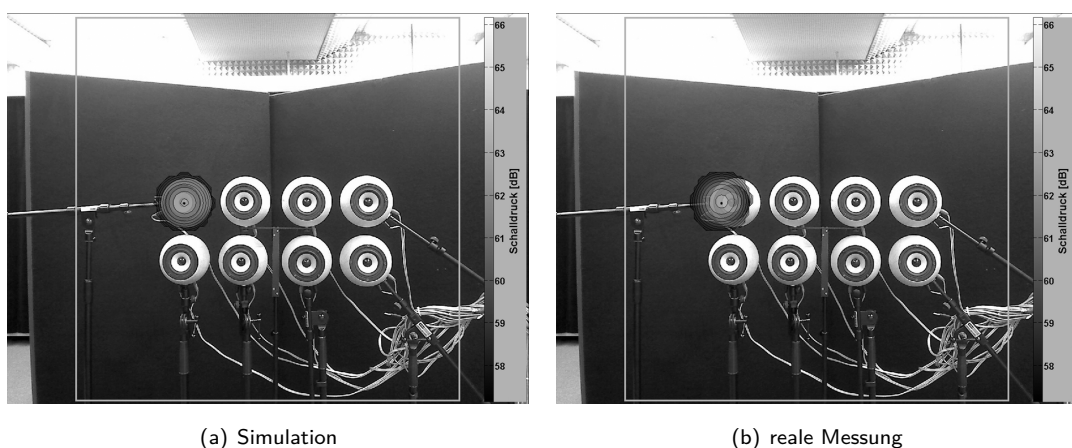


Abbildung 5.18: Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio, log. Sweep @ 3500 Hz, Dynamik = 9 dB, Nahfeld-Annahme

Eine Auswertung bei 1000 Hz sowie 1500 Hz bei gleichzeitiger Bespielung der Lautsprecher 1 und 4 zeigt wie in Abbildung 5.19 dargestellt, dass aufgrund der geometrischen Anordnung des Messaufbaus die

Breite der Hauptkeule im Falle der Analyse bei  $1000\text{ Hz}$  zu groß ist, um die beiden Quellen voneinander zu trennen. Es wird hier eine vermeintliche Quelle zwischen den beiden Lautsprechern lokalisiert. Die Auswertung bei  $1500\text{ Hz}$  zeigt, dass die beiden Quellen bereits erfolgreich getrennt werden. Aufgrund der hier verwendeten Darstellungsdynamik der Grafiken scheinen beide Quellen nur dann im Bild auf, wenn deren Pegeldifferenz nicht größer als  $6\text{ dB}$  ist.

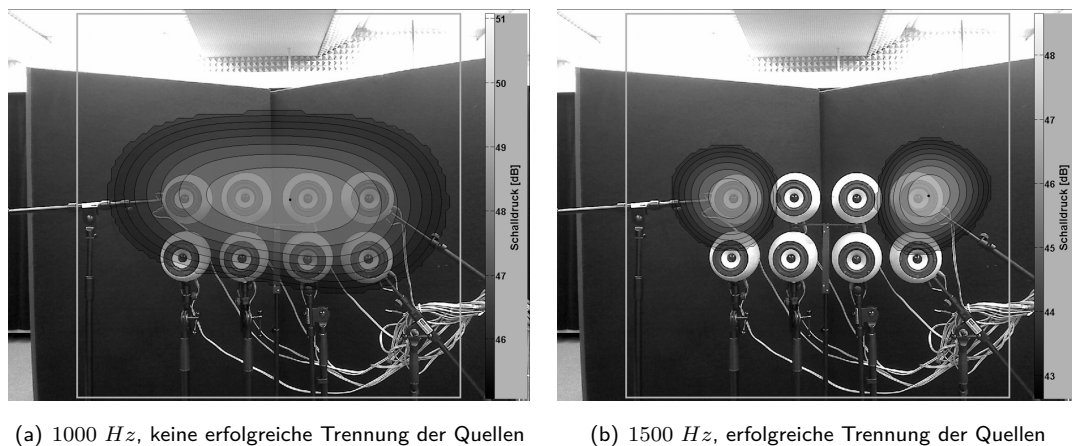
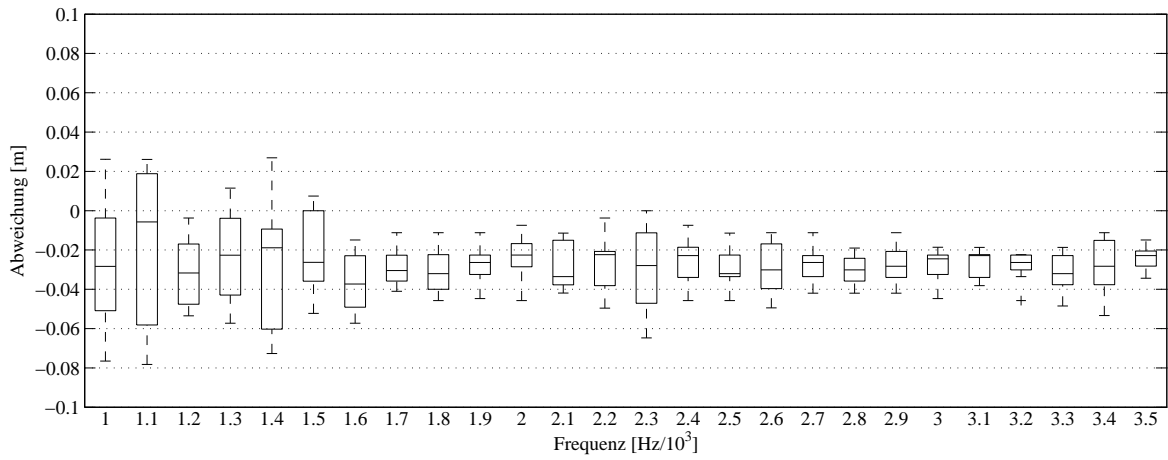


Abbildung 5.19: Messung Tropfenlautsprecher 1 und 4 gleichzeitig gespielt, Tonstudio, log. Sweep @  $1000\text{ Hz}$  (a) bzw.  $1500\text{ Hz}$  (b), Dynamik =  $6\text{ dB}$ , Nahfeld-Annahme

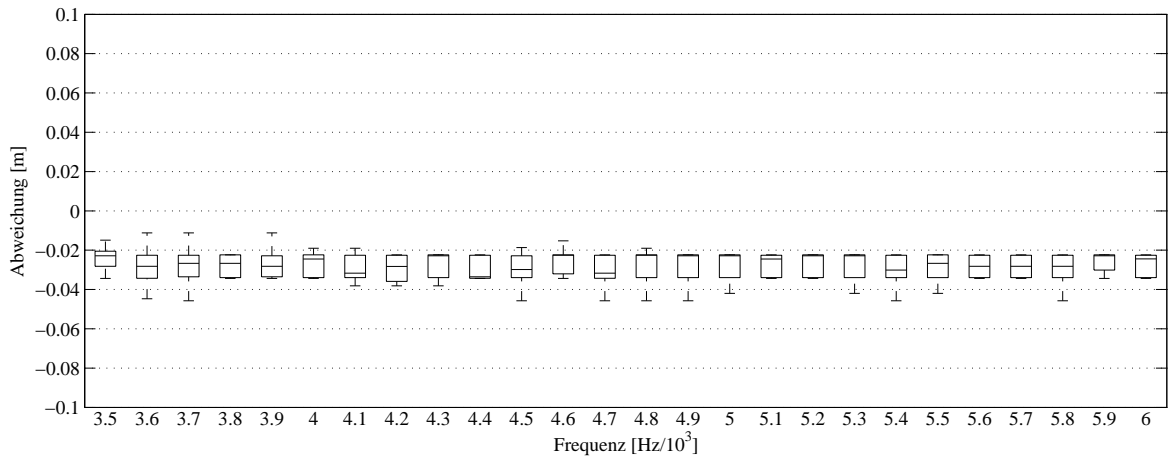
Um die Korrektheit der Quelllokalisierung über den gesamten relevanten Frequenzbereich zu prüfen, werden die Abweichungen der berechneten gegenüber den realen Quellzentren untersucht. Hierfür werden alle Lautsprecher nacheinander mit dem Rauschsignal gespielt. Die Messungen werden über vier Zeitpunkte innerhalb einer Sekunde gemittelt und in  $10\text{ Hz}$  Schritten, von  $1000\text{ Hz}$  bis  $6000\text{ Hz}$  ausgewertet. Die über alle Lautsprecher gemittelte, frequenzabhängige Abweichung der berechneten gegenüber den realen Quellzentren zeigen die Abbildungen 5.20 und 5.21. Zugunsten der Übersicht beträgt die Frequenzauflösung in den Darstellungen  $100\text{ Hz}$ .

Dieser Vergleich zeigt durchwegs geringe Abweichungen gegenüber den Simulationsergebnissen. Eine hohe Abweichung bei einer bestimmten Frequenz tritt in keinem der untersuchten Bereiche auf. Die Ausreißer der Boxplots liegen ebenfalls in einem tolerierbaren Bereich und bedürfen daher keiner genaueren Untersuchung. Da die akustischen Zentren der Lautsprecher an der jeweiligen räumlichen Position der Spule angenommen werden, könnten die Abweichungen durch diese Vereinfachung begründet werden. Hervorzuheben ist die relativ konstante Negativabweichung der X-Koordinate. Dies könnte durch die prototypische Fertigung der Hardware und damit verbundenen Fertigungs- und Montageteranzen begründet werden. Ein Versatz der Webcam gegenüber der Idealposition im Zehntelmillimeter-Bereich hätte bei der Superposition des optischen Bildes und des Konturplots eine, in ihrer Ausprägung von der Distanz zum Messobjekt abhängige, vermeintliche Fehllokalisation zur Folge.

Bei genauer Betrachtung der Abbildungen 5.17 und 5.18 fällt des Weiteren eine vermeintliche Rotation der Tropfenlautsprecher um die vertikale Achse auf. Diese Rotation ist bei den Lautsprechern 1, 4, 5 und 8 besonders stark ausgeprägt. Die Lautsprecher sind allerdings in Übereinstimmung mit Abbildung 5.13 positioniert. Die vermeintliche Rotation lässt sich über die in Kapitel 5.1.3 erläuterte Tonnenverzeichnung des Objektivs der Webcam erklären und hat ebenfalls Auswirkungen auf die Übereinstimmung der realen und der berechneten Quellzentren.



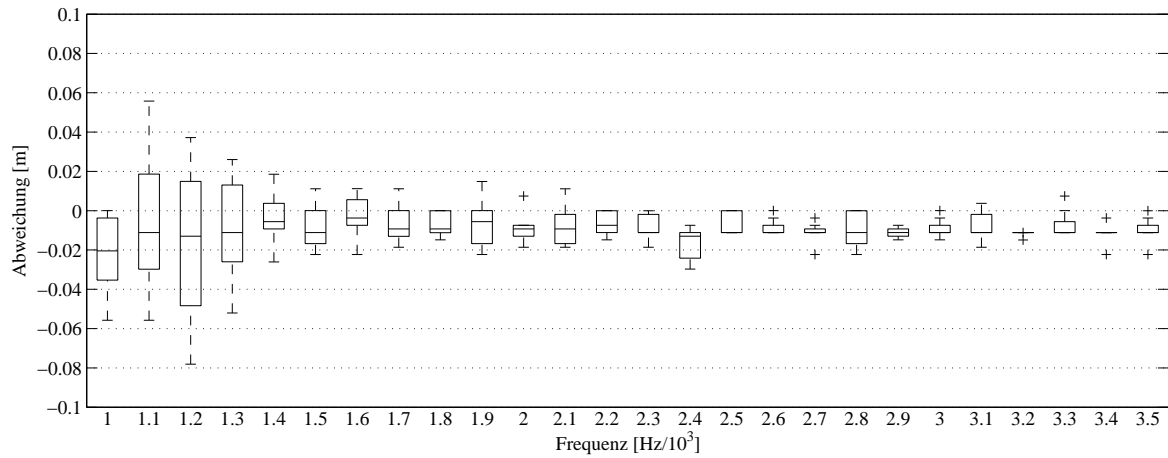
(a) Frequenzbereich 1000 Hz - 3500 Hz



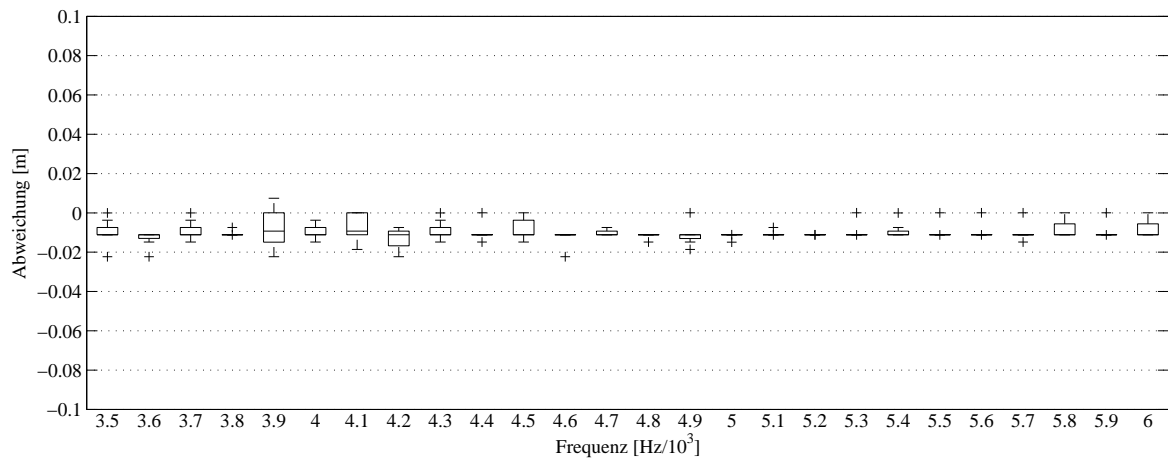
(b) Frequenzbereich 3500 Hz - 6000 Hz

Abbildung 5.20: Boxplot der Abweichungen in X-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Tonstudio); die maximale Länge der Antennen (Whiskers) ist auf das 1.5-fache des Interquartilsabstandes begrenzt





(a) Frequenzbereich 1000 Hz - 3500 Hz



(b) Frequenzbereich 3500 Hz - 6000 Hz

Abbildung 5.21: Boxplot der Abweichungen in Z-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Tonstudio); die maximale Länge der Antennen (Whiskers) ist auf das 1.5-fache des Interquartilsabstandes begrenzt

### 5.3.1.3 Vermessung am Prüfstand

Nachdem die Messung im Tonstudio akzeptable Ergebnisse liefert, soll nun das idente Lautsprecherarray in einer Umgebung vermessen werden, die einer realen Messsituation möglichst nahe kommt. Die Wahl fällt hier auf einen Antriebsstrangprüfstand, der in weiterer Folge auch die Umgebung für den eigentlichen Einsatzzweck der Akustischen Kamera darstellt. Dieser Raum unterscheidet sich in seinen Eigenschaften wesentlich von dem genutzten Tonstudio. Die Raumgeometrie, gepaart mit den ausnahmslos schallharten Umschließungsflächen, zeichnet akustisch betrachtet eher einen Hallraum, denn einen Akustikprüfstand aus. Es muss demnach mit ausgeprägten Reflexionserscheinungen gerechnet werden.

Das Lautsprecherarray und die Akustische Kamera können aus Platzgründen bei dieser Messung nicht im Zentrum des Raumes platziert werden. Die Höhe des Mikrofonarray-Zentrums, sowie des Zentrums der Lautsprecheranordnung ist abermals auf 1.32 m bzw. 1.23 m eingestellt. Abbildung 5.22 skizziert die Draufsicht der Messanordnung. Die Tropfenlautsprecher des Lautsprecherarrays werden, entsprechend

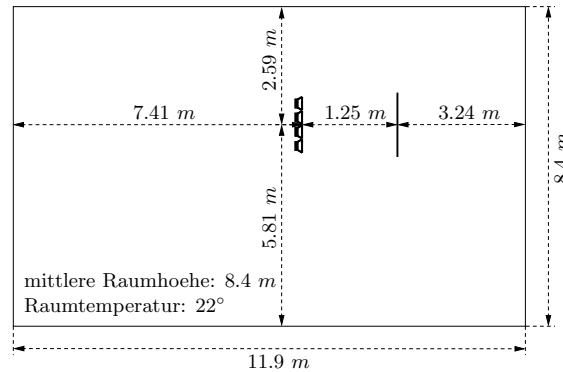


Abbildung 5.22: Draufsicht Messanordnung am Prüfstand (nicht maßstabsgetreu). Die senkrechte durchgezogene Linie stellt das Mikrofonarray dar, das in einem Abstand von 1.25 m zum Lautsprecherarray bzw. 3.24 m zur rechten Raumbegrenzungsfläche positioniert ist.

den Messungen im Tonstudio, mit den in Kapitel 5.3.1.1 beschriebenen Testsignalen in unterschiedlichen Varianten bespielt. Exemplarisch soll nun erneut eine Messung des Lautsprechers 4, der mit einem logarithmischen Sweep bespielt wird, diskutiert werden. Die Messung wird in „Datenauswertung“ mittels Delay&Sum Beamforming für unterschiedliche Frequenzen ausgewertet. Betrachtet man nun den in Abbildung 5.23 und 5.24 dargestellten Vergleich zwischen der Messung im Tonstudio und der Messung am Prüfstand, für die Auswertung bei 5000 Hz bzw. 3500 Hz, so ist ein maximaler Versatz der lokalisierten Quelle von ca. 0.02 m in X- wie in Z-Richtung erkennbar.

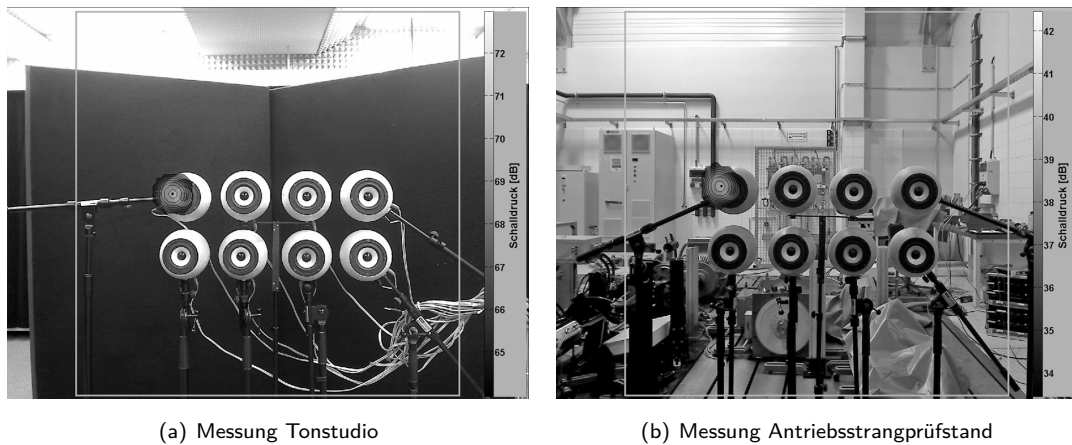


Abbildung 5.23: Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio vs. Antriebsstrangprüfstand, log. Sweep @ 5000 Hz, Dynamik = 9 dB, Nahfeld-Annahme

Auch für dieses Messszenario soll eine Analyse der Abweichungen der berechneten gegenüber den realen Quellzentren Aufschluss über die Qualität der Quelllokalisierung geben. Hierfür werden, analog zur Messung im Tonstudio, alle Lautsprecher nacheinander mit dem Rauschsignal bespielt. Die Messungen werden über vier Zeitpunkte innerhalb einer Sekunde gemittelt und in 10 Hz Schritten, von 1000 Hz bis 6000 Hz ausgewertet. Die über alle Lautsprecher gemittelte, frequenzabhängige Abweichung der berechneten gegenüber den realen Quellzentren zeigen die Abbildungen 5.25 und 5.26. Zugunsten der Übersicht beträgt

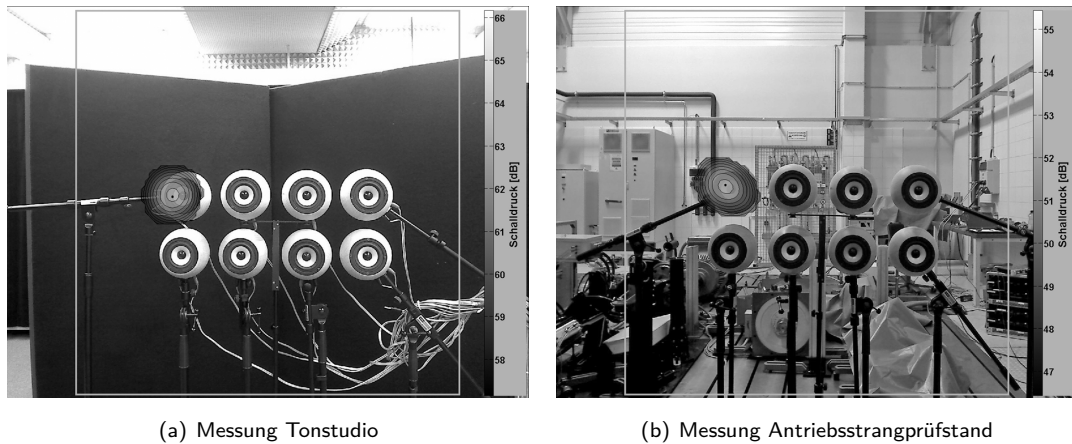
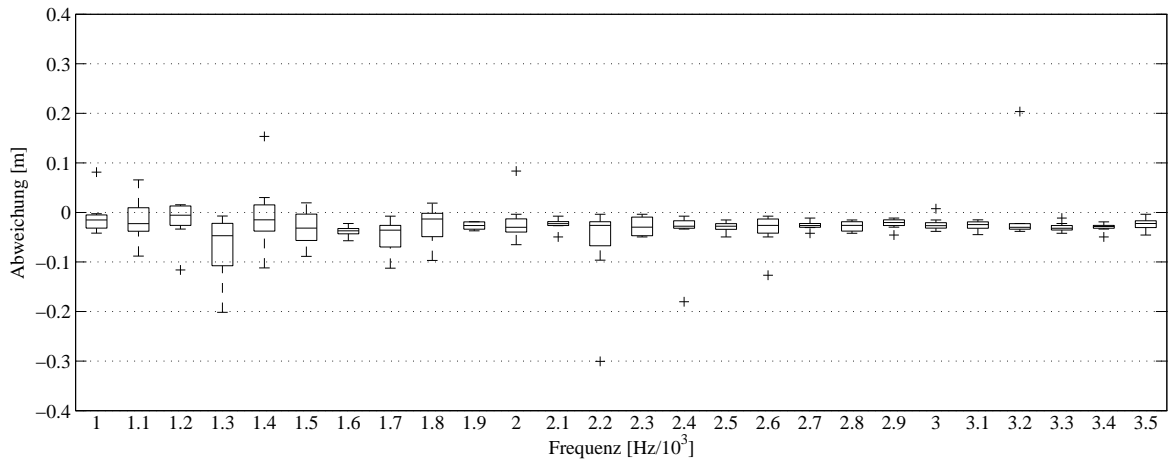


Abbildung 5.24: Messung Tropfenlautsprecher 4, Tonstudio vs. Antriebsstrangprüfstand, log. Sweep @  $3500 \text{ Hz}$ , Dynamik =  $9 \text{ dB}$ , Nahfeld-Annahme

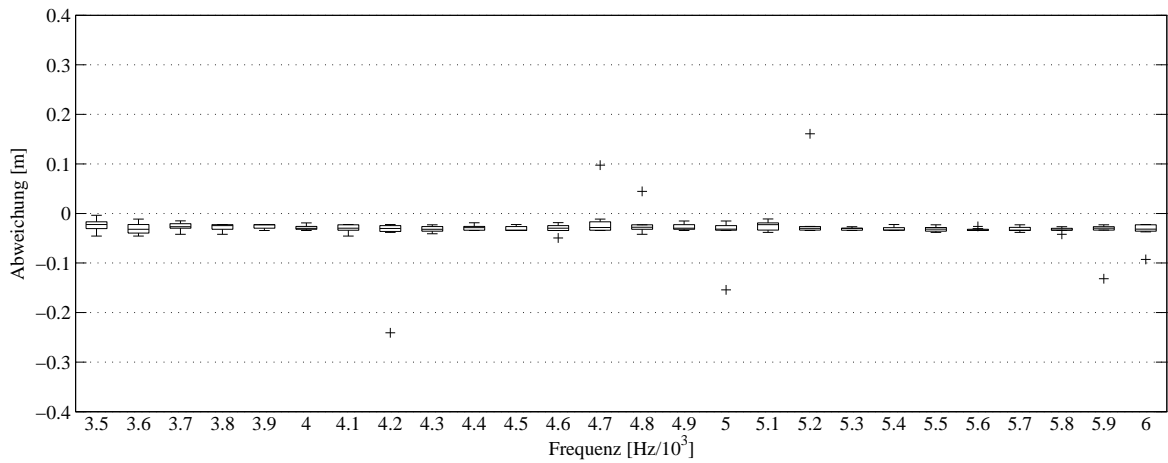
die Frequenzauflösung in den Darstellungen  $100 \text{ Hz}$ . Es sei des Weiteren auf die geänderte Skalierung der Y-Achse gegenüber den Abbildungen 5.20 und 5.21 hingewiesen.

Bei genauerer Betrachtung der Abbildungen 5.25 und 5.26 fällt ein deutlicher Unterschied zu den Messungen im Tonstudio auf. Eine gehäufte Anzahl der in ihrem Betrag relevanten Ausreißer zeigt, dass eine gewünschte Lokalisationsgenauigkeit wie im Tonstudio nicht erreicht werden kann.

Die Ausreißer bedürfen daher einer genaueren Untersuchung, für die die Sweep-Messungen herangezogen werden. Die eingangs beschriebenen, für akustische Messungen nicht idealen Raumeigenschaften, werden durch die Auswertung der Impulsantworten eindeutig belegt. Von den erwarteten Reflexionserscheinungen zeigen sich vor allem die Bodenreflexion und die Reflexion an der Wand hinter dem Array, die sich im Abstand von  $3.24 \text{ m}$  befindet besonders stark ausgeprägt. Um die Relevanz dieser räumlich bedingten Störeinflüsse zu überprüfen, werden die Impulsantworten zeitlich beschnitten. Erst durch eine Verkürzung dieser auf eine Länge von ca.  $6 \text{ ms}$  und der damit verbundenen Reduktion auf den Direktschallanteil, können zufriedenstellende Lokalisationsergebnisse erzielt werden (siehe Abbildung 5.27 und 5.28). Damit können die auftretenden Reflexionserscheinungen als Ursache für die fehlerhafte Lokalisation identifiziert werden.

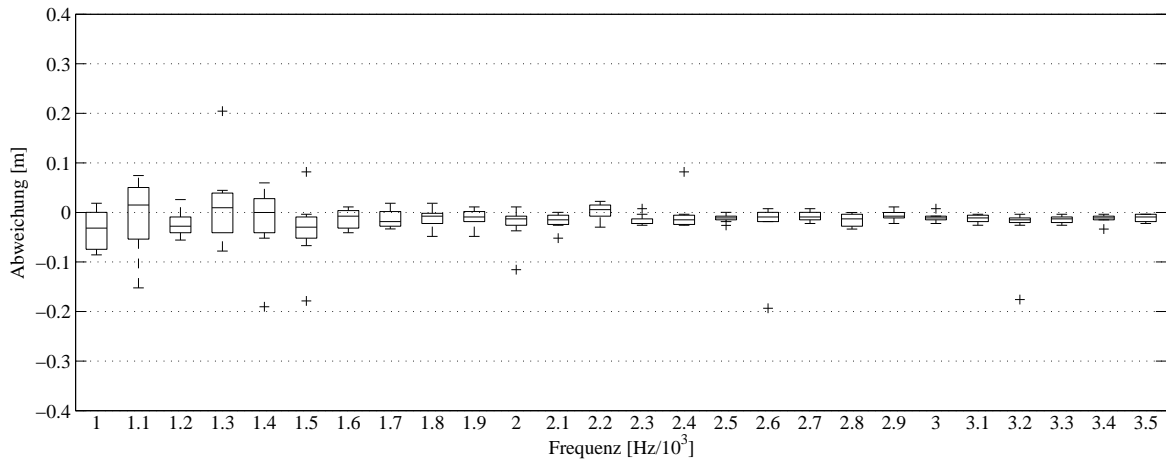


(a) Frequenzbereich 1000 Hz - 3500 Hz

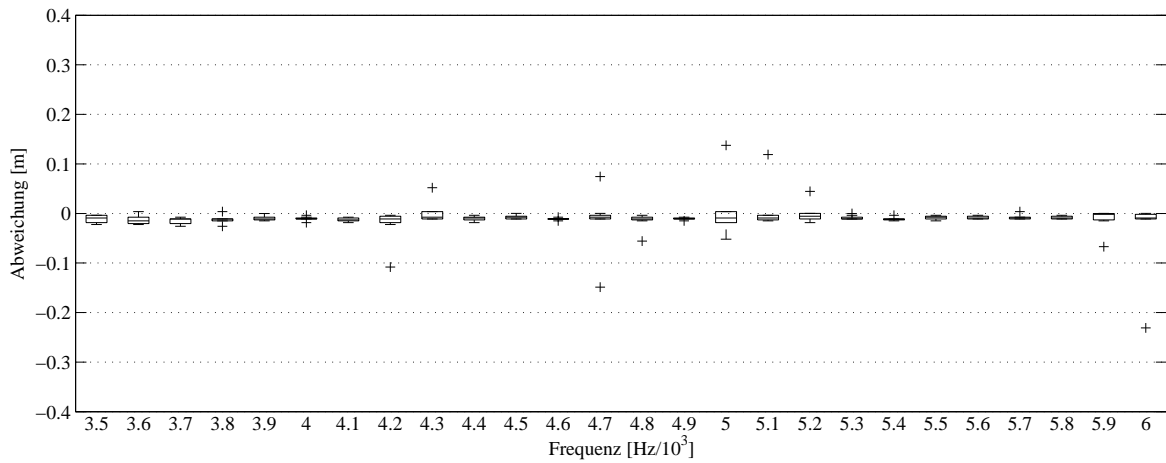


(b) Frequenzbereich 3500 Hz - 6000 Hz

Abbildung 5.25: Boxplot der Abweichungen in X-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Prüfstand); die maximale Länge der Antennen (Whiskers) ist auf das 1.5-fache des Interquartilsabstandes begrenzt

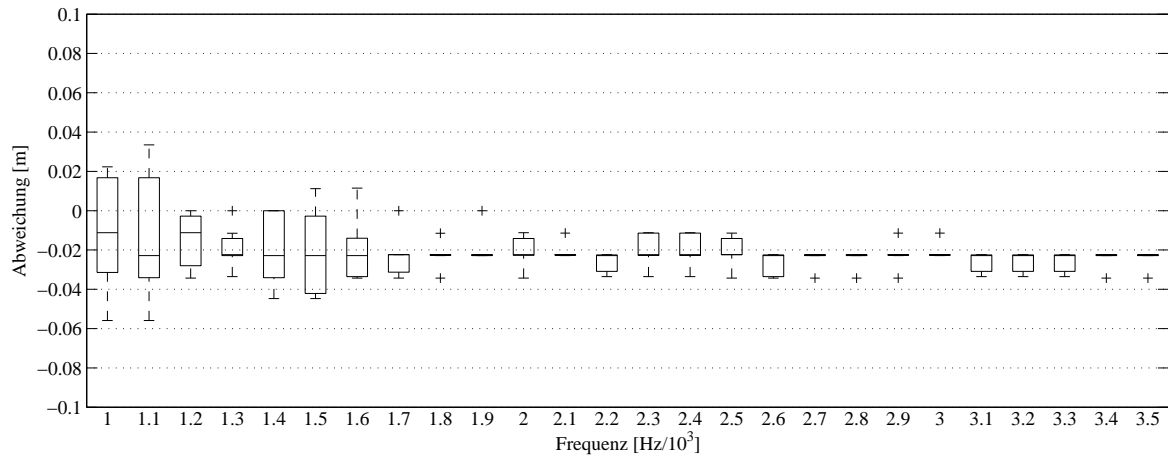


(a) Frequenzbereich 1000 Hz - 3500 Hz

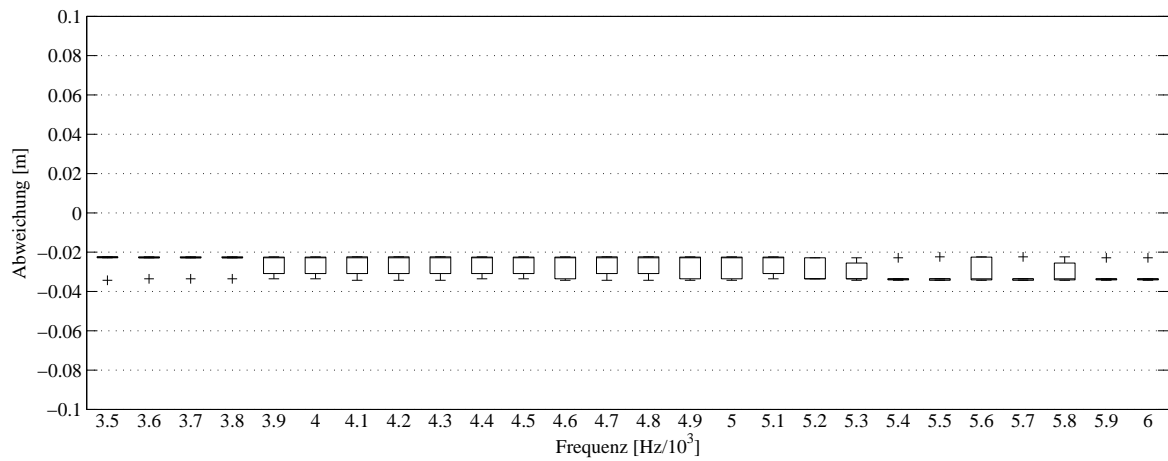


(b) Frequenzbereich 3500 Hz - 6000 Hz

Abbildung 5.26: Boxplot der Abweichungen in Z-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Prüfstand); die maximale Länge der Antennen (Whiskers) ist auf das 1.5-fache des Interquartilsabstandes begrenzt

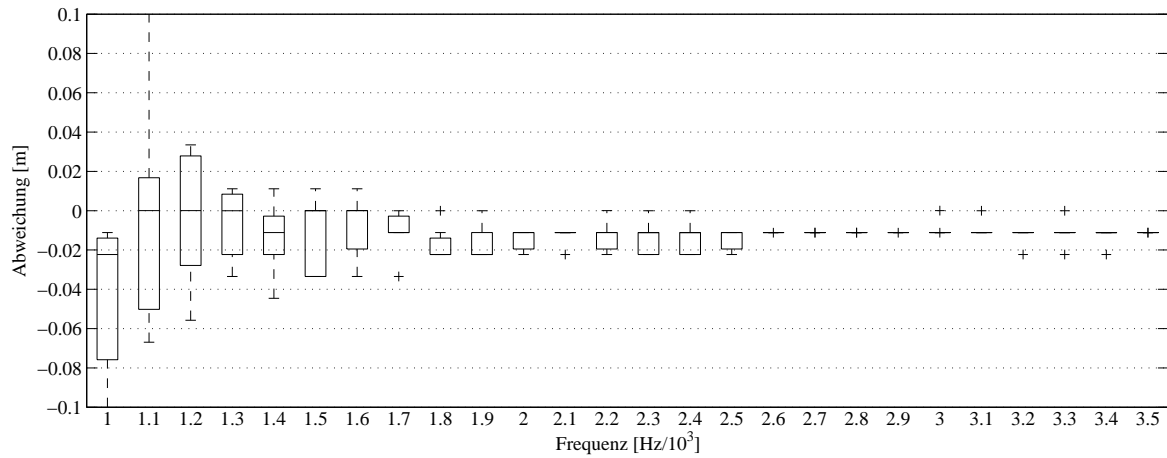


(a) Frequenzbereich 1000 Hz - 3500 Hz

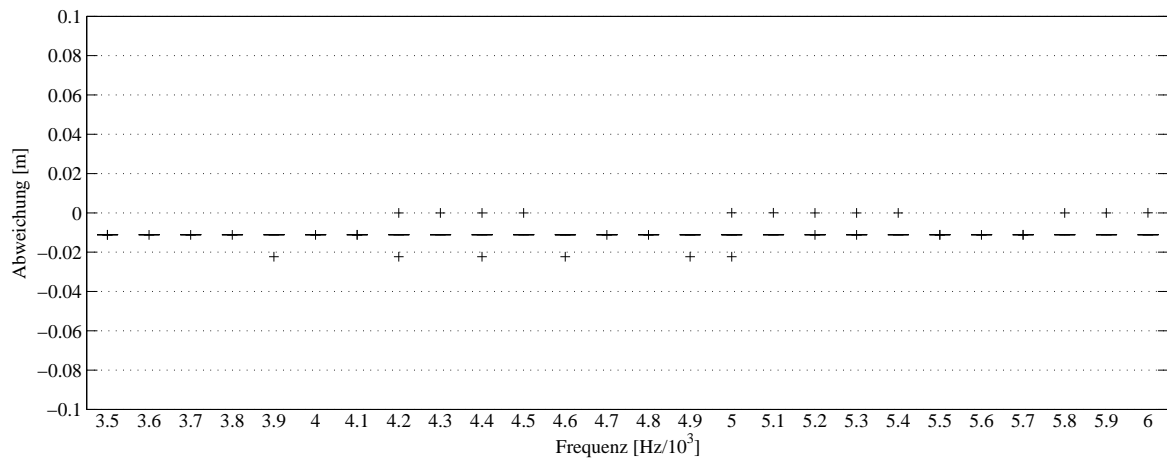


(b) Frequenzbereich 3500 Hz - 6000 Hz

Abbildung 5.27: Boxplot der Abweichungen in X-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Prüfstand); Auswertung einer auf 6 ms beschnittenen Impulsantwort; die maximale Länge der Antennen (Whiskers) ist auf das 1.5-fache des Interquartilsabstandes begrenzt



(a) Frequenzbereich 1000 Hz - 3500 Hz



(b) Frequenzbereich 3500 Hz - 6000 Hz

Abbildung 5.28: Boxplot der Abweichungen in Z-Richtung der realen Quellzentren gegenüber den berechneten Quellzentren (Messung Prüfstand); Auswertung einer auf 6 ms beschnittenen Impulsantwort; die maximale Länge der Antennen (Whiskers) ist auf das 1.5-fache des Interquartilsabstandes begrenzt

### 5.3.2 Vermessung realer Antriebsstrangkomponenten

Nach der absolvierten Funktionsevaluierung der Akustischen Kamera, die mittels Lautsprechervermessung durchgeführt wurde, muss die Eignung des Systems für den eigentlichen Einsatzzweck geprüft werden. Als Messobjekt dient der Prototyp eines elektrischen Achsantriebs. Dieser besteht im Wesentlichen aus einem Elektromotor, der mit einem Getriebe und einer sogenannten Disconnect-Einheit verbunden ist (siehe Abbildung 5.29). Die Messungen werden auf dem Prüfstand durchgeführt, der bereits zur Vermessung der Tropfenlautsprecher diente. Die Akustische Kamera ist in einem Abstand von 1.24 m zur Vorderkante des Messobjekts positioniert und so ausgerichtet, dass sich der zu analysierende Bereich sowohl im visuellen, als auch im akustischen Blickfeld der Akustischen Kamera befindet. Zusätzlich zum Messobjekt existieren im Messaufbau weitere unerwünschte Störgeräuschquellen, wie zum Beispiel Maschinen, die der Lastsimulation dienen, oder entsprechende Übersetzungsgetriebe. Um den Einfluss dieser Geräuschquellen

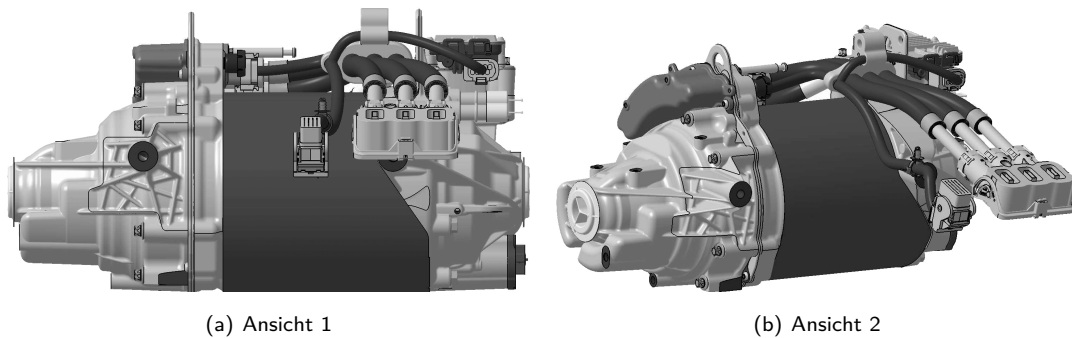


Abbildung 5.29: 3D-CAD-Modell des elektrischen Achsantriebs

auf die Messung zu minimieren, werden zwei Wände aus jeweils acht aneinandergereihten, säulenförmigen Achteck-Absorber-Baffeln eingesetzt, die mit 1 m Höhe hoch genug sind, um einen ausreichenden Absorptions- bzw. Abschattungseffekt zu erreichen. Um die Bodenreflexionen zu reduzieren, wird der Boden zwischen Akustischer Kamera und Messobjekt mit Absorber-Platten ausgelegt. Abbildung 5.30 zeigt eine reduzierte Darstellung der Messanordnung.

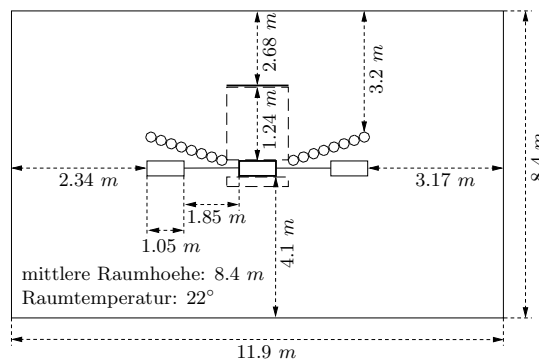


Abbildung 5.30: Draufsicht Messanordnung am Prüfstand (nicht maßstabsgetreu). Eine waagrechte durchgezogene Linie repräsentiert das Mikrofonarray, das in einem Abstand von 2.68 m zur oberen Raumbegrenzungsfläche positioniert ist. Der Achsantrieb befindet sich in einem Abstand von 1.24 m zum Array und wird durch ein Rechteck dargestellt. Die Rechtecke rechts und links neben dem Antrieb symbolisieren Maschinen zur Lastsimulation. Das eingebrachte Absorptionsmaterial ist durch strichlierte Rechtecke zwischen Array und Antrieb und hinter dem Antrieb, bzw. durch insgesamt 16 Achtecke dargestellt.

Exemplarisch soll an dieser Stelle eine Hochlaufmessung des Messobjekts diskutiert werden. Hierbei sollen die Abstrahlungsorte bekannter Quellen lokalisiert werden. Für die Analyse werden sowohl der Zug (Teillast) als auch der Schub der Messung untersucht. Zu Beginn sollte das Verzahnungsgeräusch des Getriebes lokalisiert werden. Dieses tritt in den Eingriffsordnungen und deren Vielfachen auf [PBBF10]. Im vorliegenden Fall entspricht die 21. Ordnung der Verzahnungsordnung. Eine Auswertung dieser Ordnung in „Datenauswertung“ liefert, wie in Abbildung 5.31(a) dargestellt, eine erfolgreiche Lokalisation der Quelle. Eine Auswertung derselben Ordnung bei einer höheren Drehzahl (siehe Abbildung 5.31(b)) zeigt, dass auch der Elektromotor durch die entstehenden Schwingungen angeregt wird und über das Gehäuse zur Abstrahlung beiträgt. Dieses unerwünschte Verhalten des Gehäuses des Elektromotors kann auch bei der



Analyse einer Harmonischen der Verzahnungsordnung, wie in Abbildung 5.32 dargestellt, nachgewiesen werden. Eine Analyse der 40. Ordnung, als deren Ursprung der Elektromotor bekannt ist, liefert ebenfalls korrekte Lokalisationsergebnisse, wie in Abbildung 5.33 ersichtlich.

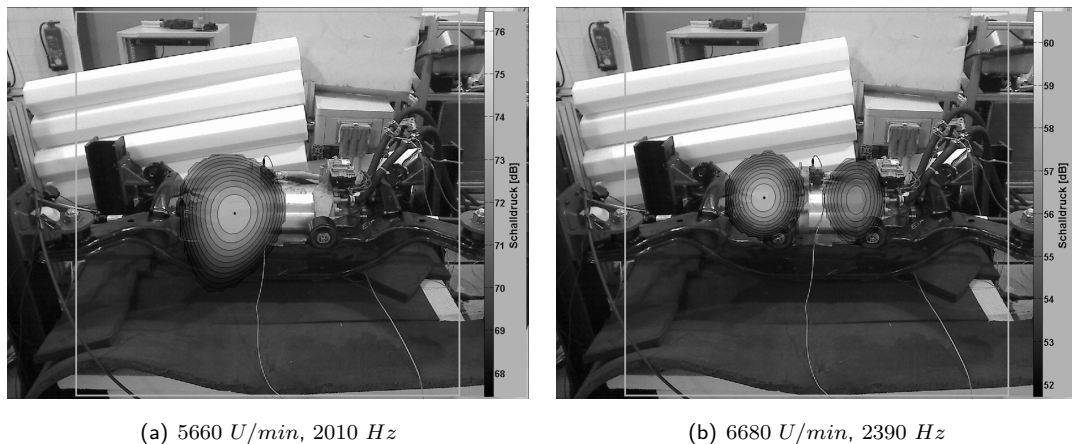


Abbildung 5.31: Hochlaufmessung elektrischer Achsantrieb (Zug), Prüfstand, Verzahnungsgeräusch des Getriebes, 21. Ordnung, Dynamik = 9  $dB$

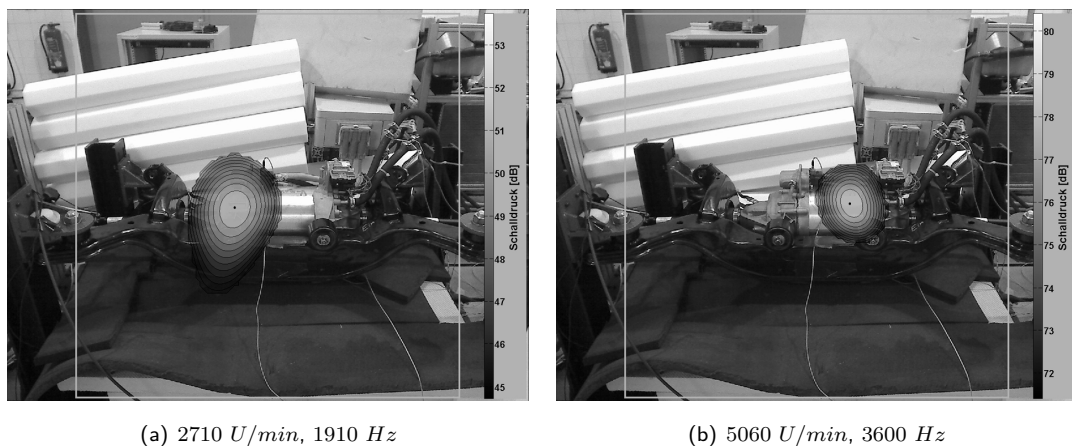


Abbildung 5.32: Hochlaufmessung elektrischer Achsantrieb (Zug), Prüfstand, Verzahnungsgeräusch des Getriebes, 42. Ordnung, Dynamik = 9  $dB$

Für die Eignungsprüfung der Akustischen Kamera zur Lokalisation impulsartiger Geräusche wird zusätzlich zur Hochlaufmessung ein Schaltgeräusch untersucht. Dieses Schaltgeräusch wird im ITA (**I**ntegrated **A**ctuator) des Achsantriebes erzeugt. Der ITA setzt sich aus einem elektronischen Steuergerät und einem kleinen Elektromotor zusammen, mit dessen Hilfe das Öffnen und Schließen der Klauenkupplung (Kupplung Achse-Antrieb) realisiert wird. Um trotz der zeitlichen Kürze des Signals eine Lokalisation zu ermöglichen, wird für die Analyse die zeitliche Auflösung erhöht. Zu diesem Zweck wird für die Berechnung der Fouriertransformationen eine FFT-Blockgröße von 128 Punkten bei einer Abtastfrequenz von  $f_s = 44100 \text{ Hz}$  gewählt. Dies bringt zwar eine Verschlechterung der Frequenzauflösung mit sich, diese spielt für die reine Detektion des Schallereignisses jedoch eine untergeordnete Rolle. Abbildung 5.34 zeigt die erfolgreiche Lokalisation des Geräusches, dessen Ursprung a priori bekannt war.

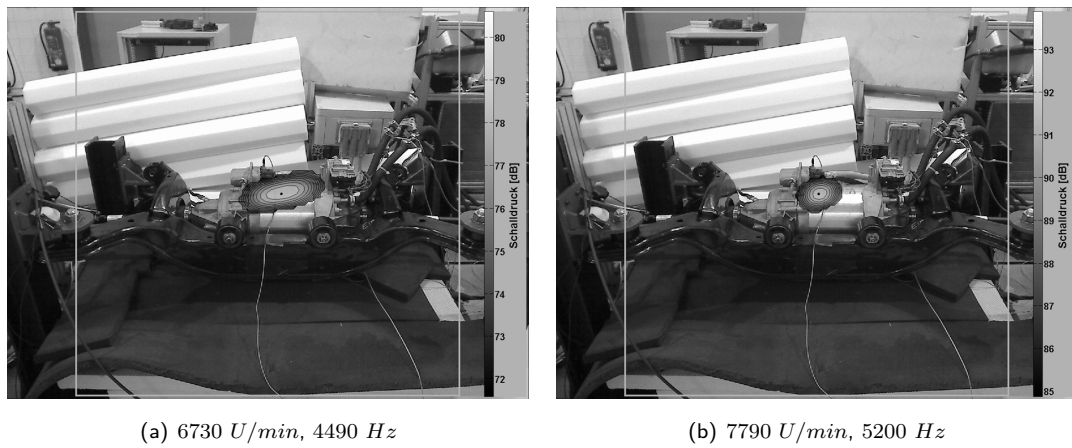


Abbildung 5.33: Hochlaufmessung elektrischer Achsantrieb (Zug), Prüfstand, Geräusentwicklung Elektromotor, 40. Ordnung, Dynamik = 9 dB

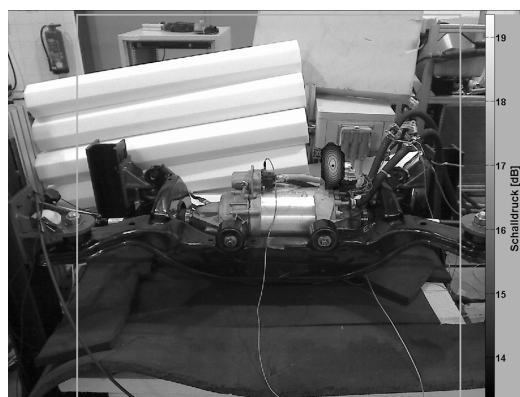


Abbildung 5.34: Messung elektrischer Achsantrieb, Lokalisation eines Schaltgeräusches im ITA, Dynamik = 6 dB

## Kapitel 6

# Zusammenfassung und Ausblick

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte optoakustische Messsystem zeigt trotz der prototypischen Fertigung und der Verwendung von Standard-Algorithmik in der Funktionsevaluierung durchwegs gute Lokalisationsergebnisse. Das gewählte Wheel-Array ermöglicht eine Analyse der Geräuschabstrahlung der Antriebsstrangkomponenten im definierten Frequenzbereich zwischen  $1\text{ kHz}$  und  $6\text{ kHz}$ . Dem Vorteil einer hohen Nebenkeulendämpfung der Wheel-Geometrie steht allerdings der Nachteil einer breiten Hauptkeule und einer damit verbundenen geringen örtlichen Auflösung gegenüber. Im Zuge weiterer Entwicklungsarbeit ist es deshalb notwendig, die Mikrofonverteilung unter Berücksichtigung beider Qualitätskriterien - der Hauptkeulenbreite und der Nebenkeulendämpfung - zu optimieren. Die Verringerung der Hauptkeulenbreite lässt sich auch durch einen superdirektiven Ansatz im Beamforming-Algorithmus erreichen. Dieser Ansatz setzt allerdings aufgrund der hohen Sensorgewichte geringe unkorrelierte Störungen, wie zum Beispiel Sensorrauschen und eine geringe Toleranz in der Fehlpositionierung der Sensoren voraus. Folglich muss die Montage- bzw. Fertigungstoleranz in der Realisierung des Arrays verringert werden. Diese Toleranzen betreffen auch die Montage der eingesetzten Webcam, da ein Versatz dieser gegenüber der Idealposition bei der Überlagerung der Bildes mit der berechneten Schalldruckkartierung, in einem vermeintlichen Versatz der lokalisierten, gegenüber der realen Quelle resultiert. Die Verwendung eines Kamerasystems, das im genutzten Bildausschnitt keinerlei Verzeichnung aufweist, trägt ebenfalls zu einer Minimierung der Lokalisationsfehler bei.

Da der theoretische Ansatz des Beamforming auf den zeitlichen Versatz der an den Mikrofonen ankommenden Signale aufbaut, verhindern vorhandene Raumreflexionen, wie in der Vermessung des Lautsprecherarrays am Prüfstand, eine korrekte Quelllokalisierung. Die Dämpfung der Raumreflexionen durch in den Raum eingebrachtes Absorptionsmaterial ist aus diesem Grund eine zusätzlich zu erfüllende Randbedingung für den Einsatz des Systems.

Ein generelles Problem von Messsystemen dieser Art ist die begrenzte Darstellungsdynamik aufgrund der begrenzten Nebenkeulendämpfung. Treten zusätzlich zur Hauptschallquelle im selben Frequenzbereich Schallquellen auf, deren Schalldruckpegeldifferenz zur Hauptschallquelle größer ist als die Darstellungsdynamik, werden diese nicht abgebildet. Eine Lösung dieses Problems kann mittels Kohärenzfilterung erreicht werden [Gui10]. Hierfür wird ein zusätzliches Mikrofon eingesetzt, das nahe an der Hauptschallquelle positioniert wird. Die Filterung der Mikrofonsignale des Arrays ermöglicht dann eine Unterdrückung der Hauptschallquelle und eine damit verbundene Erhöhung der Darstellungsdynamik.

Die Vorgabe der Integration des Messsystems in die bestehende Messinfrastruktur kann durch die Konzeption als Offline-Analyse gewährleistet werden. Gerade bei der akustischen Analyse von Antriebs-

trangkomponten kann eine Echtzeitanalyse der Schallabstrahlung während einer Hochlaufmessung sehr schnell gewünschte Ergebnisse liefern. Hierfür müsste das System von MATLAB<sup>®</sup> gelöst werden, um die volle Leistungsfähigkeit heutiger Rechnersysteme auszuschöpfen.

# Literaturverzeichnis

- [Abh99] T. D. Abhayapala, "Modal Analysis and Synthesis of Broadband Nearfield Beamforming Arrays," Ph.D. dissertation, Australian National University, Canberra, AU, 1999.
- [Bal05] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. New Jersey: Wiley-Interscience, 2005, vol. 3.
- [BCH08] J. Benesty, J. Chen, and Y. Huang, *Microphone Array Signal Processing*, ser. Springer Topics in Signal Processing. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2008, vol. 1.
- [Beh04] S. Behr, "Raumakustiksimulation mit Auralisation unter Verwendung von CATT-Acoustic," Master's thesis, Technische Universität Graz and Joanneum Research Graz, Graz, AT, 2004.
- [CH04] J. J. Christensen and J. Hald, "Technical Review No.1 2004 - Beamforming," Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, Nærum, DK, Tech. Rep., 2004.
- [DEG06] DEGA, "DEGA Empfehlung 101 - Akustische Wellen und Felder," Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Berlin, DE, Tech. Rep., 2006.
- [DHJDED93] Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*, ser. Prentice Hall Signal Processing Series. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [Far00] A. Farina, "Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique," in *Audio Engineering Society Convention 108*, Paris, FR, February 2000.
- [Fuc10] H. V. Fuchs, *Schallabsorber und Schalldämpfer*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2010, vol. 3.
- [Gui10] S. Guidati, "Advanced Beamforming Techniques in Vehicle Acoustics," in *Berlin Beamforming Conference 2010 Conference Contributions*, Berlin, DE, February 2010.
- [Hec03] E. Hecht, *Optics*. San Francisco: Addison Wesley, 2003, vol. 4.
- [McC01] I. A. McCowan, "Robust Speech Recognition using Microphone Arrays," Ph.D. dissertation, Queensland University of Technology, Queensland, AU, 2001.
- [Mic06] U. Michel, "History of Acoustic Beamforming," in *Berlin Beamforming Conference 2006 Conference Contributions*, Berlin, DE, November 2006.
- [NBL07] H. Naunheimer, B. Bertsche, and G. Lechner, *Fahrzeuggetriebe*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007, vol. 2.

- [PBBF10] M. Pflüger, F. Brandl, U. Bernhard, and K. Feitzelmayer, *Fahrzeugakustik*. Wien, New York: Springer, 2010, vol. 1.
- [Rya98] J. G. Ryan, "Criterion for the minimum source distance at which plane-wave beamforming can be applied," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, no. 1, pp. 595–598, July 1998.
- [Sei06] E. Seidel, "Messtechnik," in *Technischer Lärmschutz*, W. Schirmer, Ed. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006, vol. 2, pp. 64–114.
- [SSZ04] E. Sarradj, C. Schulze, and A. Zeibig, "Characteristics of microphone arrays," in *Proceedings of Internoise 2004*, Prague, CZ, August 2004.
- [VT02] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing*, ser. Detection, Estimation, and Modulation Theory. New York: Wiley-Interscience, 2002, vol. 1.
- [VVB88] B. D. Van Veen and K. M. Buckley, "Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering," in *IEEE ASSP Magazine*, vol. 5, April 1988, pp. 4–24.
- [War96] D. B. Ward, "Theory and Application of Broadband Frequency Invariant Beamforming," Ph.D. dissertation, Australian National University, Canberra, AU, 1996.
- [Wil99] E. G. Williams, *Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*. San Diego, London: Academic Press, 1999.
- [Zel09] P. Zeller, Ed., *Handbuch Fahrzeugtechnik*, ser. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009, vol. 1.
- [Zio95] L. J. Ziomek, *Fundamentals of Acoustic Field Theory and Space-Time Signal Processing*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995.

## Anhang A

# Geräteverzeichnis und Messketten

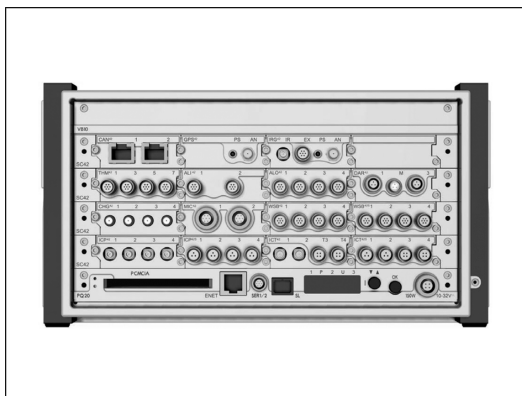


Abbildung A.1: Müller-BBM PAK-Mobil MK II

Mainframe:	MF06
Module:	PQ20 (1 Stk.) ICP42 (12 Stk.)
Software:	PAK 5.5

Tabelle A.1: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.2: PCB 130D21

Durchmesser:	1/4 in
Sensitivität:	45 mV/Pa
Frequenzantwort:	±1 dB @ 100 Hz – 4 kHz –2 dB bis 5 dB @ 20 Hz – 15 kHz
Dynamikbereich:	30 dB - 122 dB re. 20 µPa

Tabelle A.2: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.3: TMS 130C10 und TMS130P11

Durchmesser:	1/4 in
Sensitivität:	25 mV/Pa
Frequenzantwort:	±1 dB @ 100 Hz – 4 kHz –2 dB bis 5 dB @ 20 Hz – 15 kHz
Dynamikbereich:	30 dB - 122 dB re. 20 µPa

Tabelle A.3: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.4: Brüel & Kjær 4321 - Sound Level Calibrator

Ausgabe:	94 dB ± 0.2 dB re. 20 µPa 114 dB ± 0.2 dB re. 20 µPa
----------	---

Tabelle A.4: Spezifikationen (Auszug)

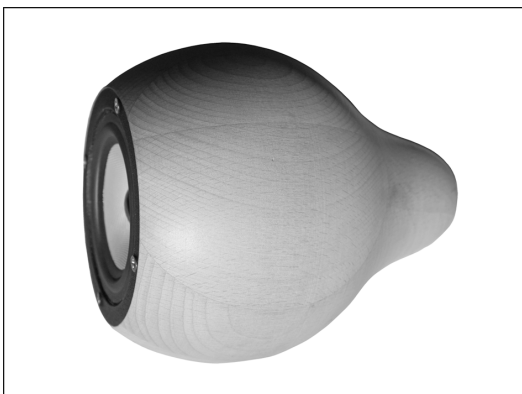


Abbildung A.5: Tropfenlautsprecher

Durchmesser (max.):	0.145 m
Durchmesser (min.):	0.05 m
Länge:	0.18 m
Durchmesser Treiber:	0.1 m

Tabelle A.5: Spezifikationen (Auszug)





Abbildung A.6: Logitech C905

Fokus:	Autofokus
Auflösung:	2 MP nativ, 8 MP interpoliert
Schnittstelle PC:	USB 2.0

Tabelle A.6: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.7: RME Fireface 800

Ausgang:	2 × ADAT optical oder SPDIF optical, SPDIF koaxial
Abtastfrequenz int.:	32, 44.1, 48, 64, 88.2, 96, 128, 176.4, 192 kHz
Schnittstelle PC:	2 × Firewire 800 1 × Firewire 400

Tabelle A.7: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.8: RME ADI-8 DS

Eingang DA:	ADAT optical, TDIF-1 (je 24 Bit), Wordclock
Ausgang DA:	6.3 mm Stereoklinke und 25 pol. Sub-D, servosymmetrisch, DC-gekoppelter Signalpfad
Dynamik DA:	112 dB(A) unmuted
THD DA:	< 0,00063 %
THD+N DA:	< 0,0008 %

Tabelle A.8: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.9: RME ADI 648

Eingang:	MADI (1 BNC, 1 optical), ADAT optical (8 Toslink, 24 Bit, Bitclock PLL)
Ausgang:	MADI (1 BNC, 1 optical), ADAT optical (8 Toslink, 24 Bit)

Tabelle A.9: Spezifikationen (Auszug)

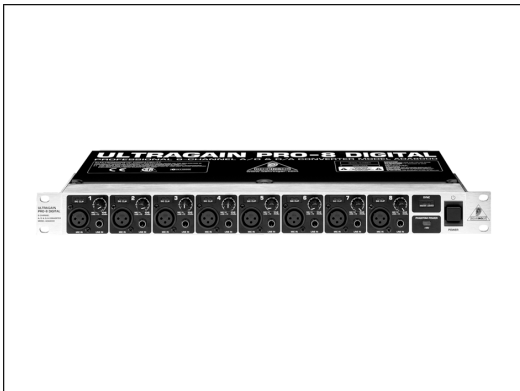


Abbildung A.10: Behringer Ultragain Pro-8 Digital ADA8000

Eingang:	8 balanced, Gain: +10 bis +60 dB
Ausgang:	ADAT optical (8 To- slink, 24 Bit)
AD:	24 Bit, 64-fach over- sampling, delta-sigma
Frequenzbereich:	10 Hz - 21 kHz
THD:	< 0.01%

Tabelle A.10: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.11: Apart PA 4060

Eingang:	RCA Cinch unbalanced 1 V / 10 kΩ
Ausgang:	8 Ω: 4 x 50 W / 70 W
Ausgang:	4 Ω: 4 x 60 W / 90 W
Frequenzantwort:	15 Hz - 30 kHz
THD:	< 0.03%

Tabelle A.11: Spezifikationen (Auszug)

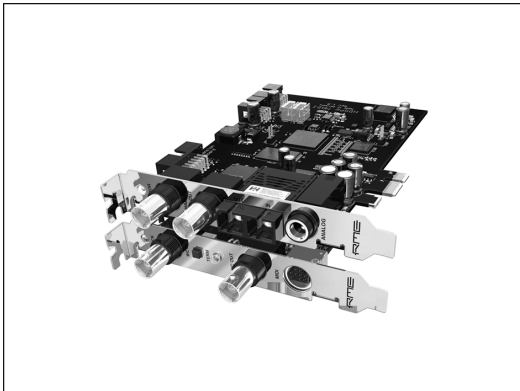


Abbildung A.12: RME HDSPe MADI

Eingang:	MADI (BNC, optical)
Ausgang:	MADI (BNC, optical)
Abtastfrequenz int.:	44.1, 48, 88.2, 96, 176.4, 192 kHz
Schnittstelle PC:	PCIe

Tabelle A.12: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.13: HP Compaq 8510p

CPU:	Intel T7700
Hauptspeicher:	2 GB
Bildschirmauflösung:	WSXGA+
Betriebssystem 1:	MS Win XP Professional x86 @ SP3
Betriebssystem 2:	MS Win Vista Business x86 @ SP2
MATLAB®:	7.10.0 (R2010a)

Tabelle A.13: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.14: HP EliteBook 8530w

CPU:	Intel T9400
Hauptspeicher:	4 GB
Bildschirmauflösung:	WSXGA+
Betriebssystem:	MS Win 7 Ultimate x64 @ SP1
MATLAB®:	7.10.0 (R2010a)

Tabelle A.14: Spezifikationen (Auszug)

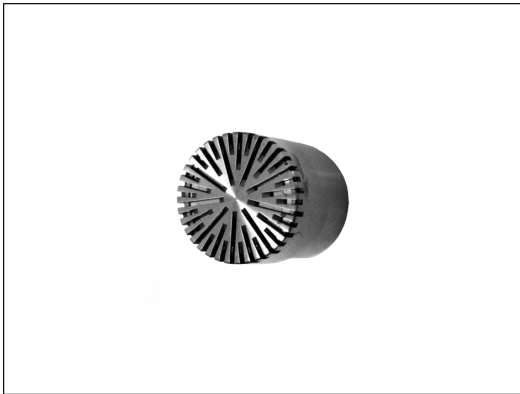


Abbildung A.15: G.R.A.S. Free Field Microphone Type 40AF

Sensitivität:	45.01 $mV/Pa$
Frequenzantwort:	$\pm 2 \text{ dB}$ @ 3.15 Hz – 20 kHz $\pm 1 \text{ dB}$ @ 12.5 Hz – 10 kHz
Dynamikbereich:	14 dB - 146 dB re. 20 $\mu Pa$

Tabelle A.15: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.16: G.R.A.S. Preamplifier Type 26AK

Frequenzbereich $\pm 0.2 \text{ dB}$ :	2 Hz - 200 kHz
Eingangsimpedanz:	20 $G\Omega$ , 0.4 $pF$
Ausgangsimpedanz:	55 $\Omega$

Tabelle A.16: Spezifikationen (Auszug)



Abbildung A.17: G.R.A.S. Power Module 12AA

Kanäle:	2 Lemo IN 2 BNC OUT
Verstärkung:	-20 dB, 0 dB, +20 dB
Verstärkungsfehler:	< 0.2 dB
Frequenzantwort:	3.5 Hz – 200 kHz ( $\pm 1 \text{ dB}$ ) 2 Hz – 250 kHz ( $\pm 3 \text{ dB}$ )
Ausgangsimpedanz:	30 $\Omega$

Tabelle A.17: Spezifikationen (Auszug)

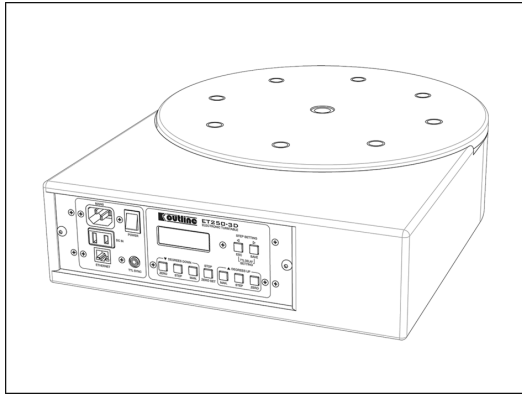


Abbildung A.18: Outline ET250-3D

Minimale Schrittweite:	0.5°
Genauigkeit:	0.05°
Schnittstellen:	Ethernet (Rj45) TTL Sync

Tabelle A.18: Spezifikationen (Auszug)

Mik.	36-Kanal Grid			37-Kanal Cross			40-Kanal Ring			40-Kanal Wheel		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	-0.500	0	0.500	0.056	0	0.056	0.500	0	0	0.099	0	0.070
2	-0.300	0	0.500	0.111	0	0.111	0.494	0	0.078	0.078	0	0.162
3	-0.100	0	0.500	0.167	0	0.167	0.476	0	0.155	0.051	0	0.279
4	0.100	0	0.500	0.222	0	0.222	0.446	0	0.227	0.020	0	0.431
5	0.300	0	0.500	0.278	0	0.278	0.405	0	0.294	0.009	0	0.480
6	0.500	0	0.500	0.333	0	0.333	0.354	0	0.354	0.121	0	-0.019
7	-0.500	0	0.300	0.389	0	0.389	0.294	0	0.405	0.172	0	0.061
8	-0.300	0	0.300	0.444	0	0.444	0.227	0	0.446	0.236	0	0.162
9	-0.100	0	0.300	0.500	0	0.500	0.155	0	0.476	0.320	0	0.293
10	0.100	0	0.300	-0.056	0	0.056	0.078	0	0.494	0.347	0	0.335
11	0.300	0	0.300	-0.111	0	0.111	0	0	0.500	0.068	0	-0.100
12	0.500	0	0.300	-0.167	0	0.167	-0.078	0	0.494	0.160	0	-0.079
13	-0.500	0	0.100	-0.222	0	0.222	-0.155	0	0.476	0.277	0	-0.053
14	-0.300	0	0.100	-0.278	0	0.278	-0.227	0	0.446	0.428	0	-0.020
15	-0.100	0	0.100	-0.333	0	0.333	-0.294	0	0.405	0.478	0	-0.010
16	0.100	0	0.100	-0.389	0	0.389	-0.354	0	0.354	-0.017	0	-0.122
17	0.300	0	0.100	-0.444	0	0.444	-0.405	0	0.294	0.063	0	-0.174
18	0.500	0	0.100	-0.500	0	0.500	-0.446	0	0.227	0.164	0	-0.238
19	-0.500	0	-0.100	0.056	0	-0.056	-0.476	0	0.155	0.295	0	-0.322
20	-0.300	0	-0.100	0.111	0	-0.111	-0.494	0	0.078	0.337	0	-0.350
21	-0.100	0	-0.100	0.167	0	-0.167	-0.500	0	0	-0.099	0	-0.071
22	0.100	0	-0.100	0.222	0	-0.222	-0.494	0	-0.078	-0.078	0	-0.164
23	0.300	0	-0.100	0.278	0	-0.278	-0.476	0	-0.155	-0.053	0	-0.281
24	0.500	0	-0.100	0.333	0	-0.333	-0.446	0	-0.227	-0.020	0	-0.433
25	-0.500	0	-0.300	0.389	0	-0.389	-0.405	0	-0.294	-0.010	0	-0.482
26	-0.300	0	-0.300	0.444	0	-0.444	-0.354	0	-0.354	-0.119	0	0.019
27	-0.100	0	-0.300	0.500	0	-0.500	-0.294	0	-0.405	-0.170	0	-0.062
28	0.100	0	-0.300	-0.056	0	-0.056	-0.227	0	-0.446	-0.235	0	-0.164

Mik.	36-Kanal Grid			37-Kanal Cross			40-Kanal Ring			40-Kanal Wheel		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
29	0.300	0	-0.300	-0.111	0	-0.111	-0.155	0	-0.476	-0.320	0	-0.294
30	0.500	0	-0.300	-0.167	0	-0.167	-0.078	0	-0.494	-0.347	0	-0.336
31	-0.500	0	-0.500	-0.222	0	-0.222	0	0	-0.500	-0.071	0	0.096
32	-0.300	0	-0.500	-0.278	0	-0.278	0.078	0	-0.494	-0.163	0	0.076
33	-0.100	0	-0.500	-0.333	0	-0.333	0.155	0	-0.476	-0.281	0	0.050
34	0.100	0	-0.500	-0.389	0	-0.389	0.227	0	-0.446	-0.432	0	0.017
35	0.300	0	-0.500	-0.444	0	-0.444	0.294	0	-0.405	-0.481	0	0.006
36	0.500	0	-0.500	-0.500	0	-0.500	0.354	0	-0.354	0.020	0	0.118
37	-	-	-	0	0	0	0.405	0	-0.294	-0.060	0	0.169
38	-	-	-	-	-	-	0.446	0	-0.227	-0.162	0	0.233
39	-	-	-	-	-	-	0.476	0	-0.155	-0.293	0	0.318
40	-	-	-	-	-	-	0.494	0	-0.078	-0.335	0	0.345

Tabelle A.19: Raumkoordinaten der Mikrofone der analysierten Arrays in Metern (auf Millimeter gerundet)

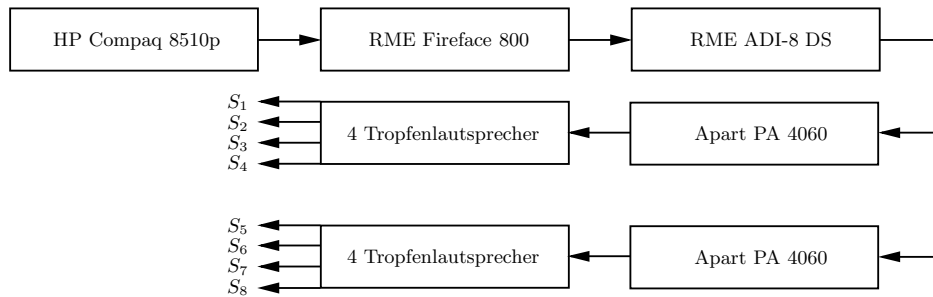


Abbildung A.19: Systemaufbau für die Bespielung der Tropfenlautsprecher

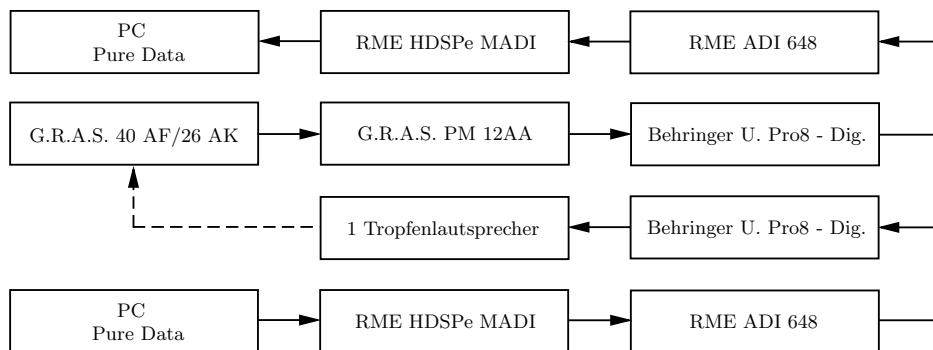


Abbildung A.20: Mess- und Wiedergabekette für die Frequenzgangsbestimmung eines Tropfenlautsprechers

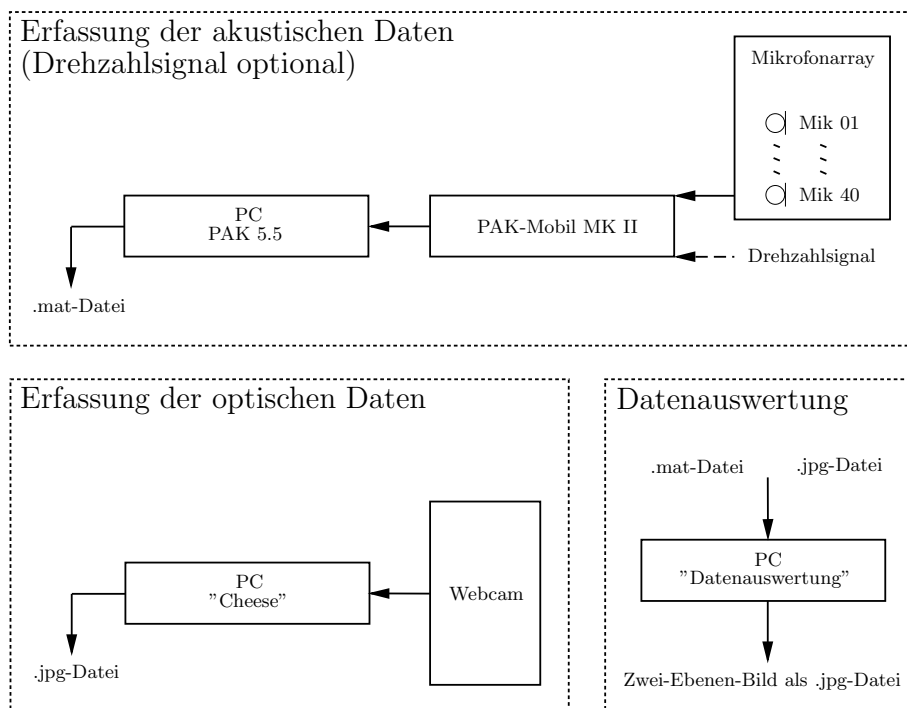


Abbildung A.21: schematischer Systemaufbau der Akustischen Kamera

Dateiname	Funktionsname	Beschreibung
Cheese.m	beenden_cb	Beenden der Anwendung
	cameracapture_cb	Aufzeichnen der Bildinformation der Webcam
	entfernung_cb	Berechnung der Seitenlänge des Abtastquadrates bei gewählter Entfernung
	speichern_cb	Speichern des aufgezeichneten Bildes als .jpg-Datei
Auswertung1.m	beenden_cb	Beenden der Anwendung
	cameraload_cb	Laden des aufgezeichneten Bildes der Webcam
	matload_cb	Laden der aufgezeichneten Messdaten
	starten_cb	Speichern der Importierten bzw. eingegebenen Daten und Starten von Auswertung2
Auswertung2.m	abtastpunkte_cb	Wahl der Abtastpunkte in der Fokusebene
	beenden_cb	Beenden der Anwendung
	berechnenDS_cb	Laden der von Auswertung1 übergebenen Daten, Auslesen der Eingabefelder in Auswertung2, Berechnung der Schalldruckkartierung, Berechnung der Plots für die Darstellung in Auswertung2
	colorpopup_cb	Änderung der Farbschemata für die Darstellung der Plots
	cursor_cb	Aktivieren/Deaktivieren des Cursor-Modus der Plots
	neuedaten_cb	Löschen aller Variablen und Öffnen von Auswertung1 zum Import neuer Messdaten
	pause_cb	Pausieren/Fortsetzen der Audiowiedergabe des Messsignals
	play_cb	Starten der Audiowiedergabe des Messsignals
	speichern_cb	Speichern des berechneten Zwei-Ebenen-Bildes als .jpg-Datei
	stop_cb	Stoppen der Audiowiedergabe des Messsignals
	übernehmen_cb	Übernehmen der mit dem Cursor selektierten Daten für die Berechnung
	umschalt_cb	Umschalten zwischen den Analyseformen „Zeit“ und „Ordnung“
	zoomin_cb	Aktivieren/Deaktivieren der Zoomfunktion für die dargestellten Plots

Tabelle A.20: Funktionsbeschreibungen der Software „Cheese“ und „Datenauswertung“



## Anhang B

# Bestimmung des Frequenzganges eines Tropfenlautsprechers

Um die Eignung der baugleichen Tropfenlautsprecher für die Messungen zu prüfen, soll der Frequenzgang eines Lautsprechers bestimmt werden. Dies erfolgt am Institut für Elektronische Musik und Akustik der Universität für Musik und darstellende Kunst Graz. Hier steht ein Messraum zur Verfügung, der an fünf Umschließungsflächen vollflächig mit Absorbermaterial ausgekleidet ist und dessen sechste Umschließungsfläche aus einem variablen Absorber besteht. Der Frequenzgang soll für unterschiedliche Azimutwinkel, bei gleich bleibender Distanz zwischen Mikrofon und Lautsprecher bestimmt werden. Da sich die Differenz der Einfallswinkel des Schalls auf die Mikrofone des Mikrofonarrays, bei einer Vermessung des Lautsprechers mit der Akustischen Kamera teilweise im einstelligen Grad-Bereich bewegt, muss der Lautsprecher mit einer sehr hohen Winkelauflösung untersucht werden. Aus diesem Grund wird die Untersuchung in  $1^\circ$ -Schritten durchgeführt. Um die Frequenzgänge im Halbraum vor dem Tropfenlautsprecher bestimmen zu können,

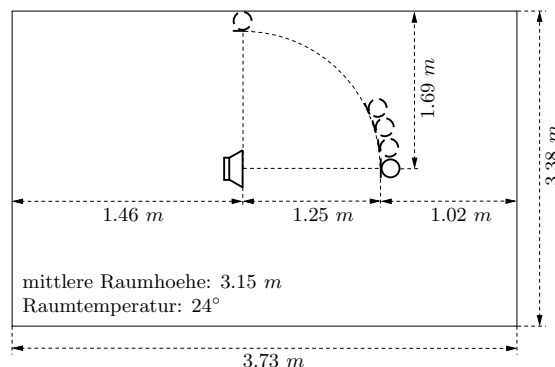


Abbildung B.1: Draufsicht Messanordnung am Institut für Elektronische Musik und Akustik (nicht maßstabgetreu), Messung: Bestimmung der winkelabhängigen Frequenzgänge eines Tropfenlautsprechers

wären bei der geforderten Winkelauflösung mehr als 30000 Mikrofone bzw. bei Verwendung eines Mikrofons, eine ebenso hohe Anzahl an Messungen erforderlich. Die Rotationssymmetrie der Tropfenform lässt hier allerdings eine erhebliche Verringerung des Messaufwandes zu. Eine Bestimmung der Frequenzgänge für die Azimutwinkel von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  bei einem Elevationswinkel von  $90^\circ$  ermöglicht eine komfortable In-

terpolation der übrigen Messungen. Zu diesem Zweck wird der Tropfenlautsprecher auf einem Drehteller (technische Spezifikationen siehe Tabelle A.18) befestigt. Das Messmikrofon wird in einer Distanz von  $1.25\text{ m}$  zur Lautsprechermembran positioniert. Lautsprecher und Mikrofon befinden sich in einer Höhe von  $1.68\text{ m}$ . Abbildung B.1 skizziert die Draufsicht der Messanordnung. Mittels Drehteller wird die Ausrichtung des Lautsprechers bei jeder Messung um  $1^\circ$  verändert. Als Messsignale dienen logarithmische Sweeps [Far00]. Abbildung B.2 zeigt zwei Ansichten des Messaufbaus. Der Lautsprecher, das Messmikrofon, sowie der Drehteller sind hier durch einen weißen, kreisförmigen Rahmen hervorgehoben. Die ebenfalls ersichtlichen sphärisch angeordneten Mikrofone sind im Raum fix installiert, werden für die Messungen allerdings nicht verwendet. Die Mikrofonkugel soll im Raum belassen werden, da aufgrund des kleinen Querschnitts des Gestänges mit keinen relevanten Reflexionserscheinungen zu rechnen ist. Abbildung B.3 zeigt die er-

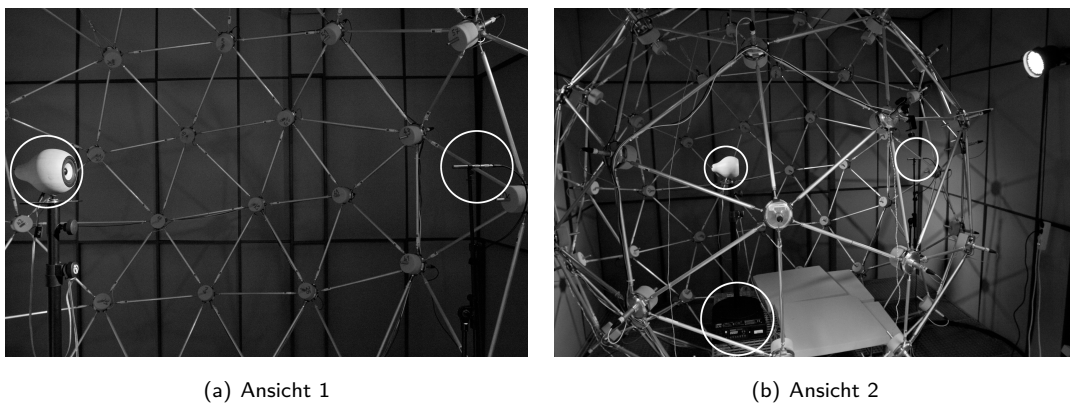


Abbildung B.2: Foto Messanordnung, Messung: Bestimmung der winkelabhängigen Frequenzgänge eines Tropfenlautsprechers. Die weißen Kreise heben im linken Bild Lautsprecher und Messmikrofon und im rechten Bild zusätzlich den Drehteller hervor.

mittelten Frequenzgänge der Messungen. Die oberste Linie entspricht dem  $0^\circ$ -Frequenzgang, die unterste dem  $90^\circ$ -Frequenzgang. Die Messung zeigt im relevanten Winkelbereich von  $0^\circ$  bis  $25^\circ$  keine besonderen winkelabhängigen Auffälligkeiten. Folglich wird der Lautsprecher als geeignetes Messobjekt befunden.

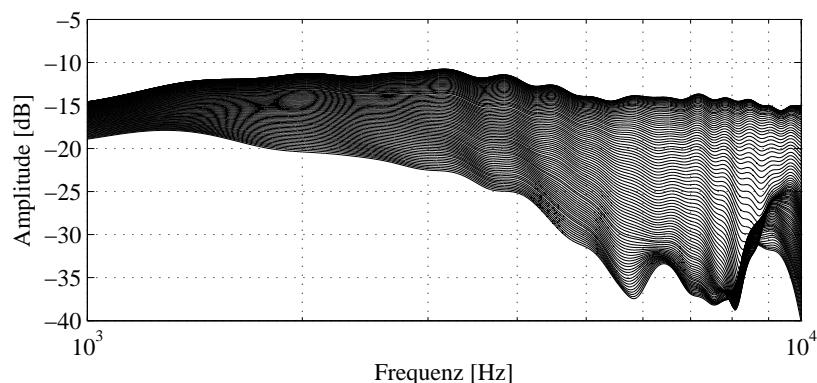


Abbildung B.3: Frequenzgänge eines Tropfenlautsprechers in  $1^\circ$ -Schritten von  $0^\circ$  (oberste Linie) -  $90^\circ$  (unterste Linie),  $1 - 10\text{ kHz}$