# DAIMLER



Technische Universität Berlin Fachbereich Audiokommunikation und -technologie

Daimler AG Mercedes-Benz Cars Research and Technology Center

# Implementierung von Übertragungsfunktionen in den Beamforming Prozess zur Verbesserung der Schallquellen-Lokalisation im Fahrzeug-Innenraum

Masterarbeit



Abgabe:

04. November 2016

- 1. Betreuer: Prof. Dr. Stefan Weinzierl
- 2. Betreuer: Dr.-Ing. Clemens Nau

# Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit soll einen Beitrag zur Verbesserung des Beamformings für die Schallquellenortung im Fahrzeuginnenraum leisten. Dazu werden zunächst grundlegende Untersuchungen an einem Modellraum durchgeführt. Ziel ist es, experimentell ermittelte Übertragungsfunktionen in den Berechnungsprozess zu implementieren, da Nau (in Druck) in seiner Dissertation das Potential dieser Methode herausgearbeitet hat.

Der Modellraum wird mit einem Impulshammer angeschlagen, während sich im Inneren ein 48-kanaliges sphärisches Mikrofonarray befindet. Somit ergeben sich für jedes Eingangssignal insgesamt 48 Übertragungsfunktionen. Die möglichst praxisnahe Durchführung und Umsetzung des Experiments wird im Rahmen dieser Arbeit im Besonderen beachtet. Es werden verschiedene Methoden zur Ermittlung der Übertragungsfunktionen mit dem Impulshammer untersucht, um eine möglichst effektive Herangehensweise zu erreichen. Daraus entstehen vier Gruppen von Übertragungsfunktionen, welche untereinander verglichen werden.

Zur Validierung des Ansatzes wird der Modellraum an definierten Positionen mit einer Volumenschallquelle und einem Shaker angeregt. Die ermittelten Übertragungsfunktionen werden dann mit verschiednen Beamforming-Algorithmen in unterschiedlichen Frequenzbereichen untersucht und mit dem entsprechend gleichen Ansatz ohne das Einbinden von Übertragungsfunktionen verglichen.

Eine Verbesserung der Lokalisierung kann im Rahmen dieser Untersuchungen nicht erreicht werden. Zwischen den Beamforming-Ergebnissen mit und ohne das Einbeziehen von Übertragungsfunktionen kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Der self-consistent MUSIC Algorithmus zeigt im Besonderen bei der Lokalisierung der Volumenschallquelle im hochfrequenten Bereich präzise Ergebnisse an. Den Ort der Anregung des Shakers kann keine der untersuchten Algorithmen lokalisieren. Die aus den verschiedenen Methoden resultierenden Gruppen von Übertragungsfunktionen weisen die gleichen Resultate auf und haben somit ebenfalls keinen Einfluss auf das Ergebnis.

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einle	Einleitung 1							
	1.1.	Quellenortung in der Fahrzeugakustik	1						
	1.2.	Stand der Forschung	2						
	1.3.	Projektbeschreibung	5						
2.	The	oretischer Hintergrund	7						
	2.1.	Mikrofon-Arrays.	7						
		2.1.1. Akustische Kartierung mit Mikrofonarrays	8						
	2.2.	Grundlagen der Signalverarbeitung	10						
		2.2.1. Digitalisierung	10						
		<ul><li>2.2.2. Korrelation, Autokorrelation und Leistungsdichtespektrum</li><li>2.2.3. Kreuzkorrelation, spektrale Kreuzleistungsdichte und Kreuzspek-</li></ul>	11						
		tralmatrix	12						
	2.3.	Beamforming	13						
		2.3.1. Delay-and-Sum Beamformer im Zeit- und Frequenzbereich	13						
		2.3.2. Beamforming im Frequenzbereich mittels Kreuzspektralmatrix .	14						
		2.3.3. Gewichtung mit SCOT und PHAT	15						
		2.3.4. MUSIC Algorithmus	16						
		2.3.5. Self-consistent MUSIC Algorithmus	17						
		2.3.6. Robust Capon Algorithmus	18						
		2.3.7. Clean SC	18						
3.	Erm	nittlung von Übertragungsfunktionen an einem Modellraum 19							
	3.1.	Beschreibung des Modellraumes	19						
	3.2.	Messtechnik	21						
	3.3.	Einbindung von Übertragungsfunktionen in den Beamforming-Prozess .	21						
	3.4.	Experimentelle Ermittlung von Übertragungsfunktionen	23						
	3.5.	Simulative Ermittlung von Übertragungsfunktionen	25						
4.	Unte	ersuchungen der Methode	27						
	4.1.	Ansatz und Vorgehen	27						
	4.2.	Anregung mit Luftschall	28						
	4.3.	Anregung mit Körperschall	29						
5.	Erge	bnisse und Vergleich der Methoden	30						
	5.1.	Ergebnisse des experimentellen Ansatzes	31						
		5.1.1. Variante A: Gruppe 1 der Übertragungsfunktionen, alle Algorith-							
		men, alle Frequenzgruppen	31						
		5.1.2. Variante B: Gruppe 2 der Übertragungsfunktionen, alle Algorith-							
		men, alle Frequenzgruppen	34						
		5.1.3. Variante C: Gruppe 3 der Ubertragungsfunktionen, alle Algorith-	_						
		men, alle Frequenzgruppen	35						
		5.1.4. Variante D: Gruppe 4 der Ubertragungsfunktionen, alle Algo-							
	<b>.</b> .	rithmen, alle Frequenzgruppen	37						
	5.2.	Beamforming ohne Ubertragungsfunktionen	38						
	5.3.	Vergleich der Methoden	39						

	5.4.	Fehlerbetrachtung	41
6.	<b>Zusa</b> 6.1. 6.2. 6.3.	Immenfassung und AusblickBeschaffenheit des ModellraumesZusammenfassung der ErgebnisseAusblick	<b>43</b> 43 44 45
Lit	eratu	rverzeichnis	47
Eid	lessta	attliche Erklärung	49
Α.	Verw	vendetes Messequipment	51
в.	Prog	grammablaufplan	54

# Abbildungsverzeichnis

Technische Universität Berlin

1.	3D Kartierung mit 2D-Mikrofonarray (links) und CAD-Modell mit sphä-	
	rischem Mikrofonarray (rechts)	9
2.	3D-Szene simuliert mit einer Punktschallquelle vor einem Ringarray	
	(links) und mit zwei Punktschallquellen seitlich und hinter einem Kuge-	
	larray (rechts) nach Meyer und Döbler (2007)	10
3.	Grafische Darstellung des Modellraums mit sphärischem Mikrofonarray	
	(links) und CAD-Modell (rechts)	20
4.	Abbildung des Modellraumes auf einem Prüfstand	20
5.	Messaufbau der Modalanalyse für die Materialprobe	26
6.	Matrixdarstellung der durchgeführten Untersuchungen	29
7.	Darstellung der Messpositionen, Volumenschallquelle (blau) und Shaker	
	(grün) auf Fläche 1 (links) und auf Fläche 2 (rechts)	30
8.	Ergebnis des CSM-Beamformings mit PHAT-Gewichtung zwischen 1000-	
	3000 Hz für die Volumenschallquelle auf der Vorderseite	32
9.	Ergebnis des CSM-Beamformings mit SCOT-Gewichtung zwischen 1000-	
	3000 Hz für die Volumenschallquelle auf der Vorderseite	32
10.	Ergebnis mit Robust Capon zwischen 1000-3000 Hz für die Volumen-	
	schallquelle auf der Vorderseite	33
11.	Ergebnis mit Clean SC zwischen 1000-3000 Hz für die Volumenschall-	
	quelle auf der Vorderseite	33
12.	Ergebnis des MUSIC Algorithmus zwischen 3000-5000 Hz für den Shaker	
	auf der rechten Seite (Fläche 2)	34
13.	Ergebnis des self-consistent MUSIC Algorithmus zwischen $3000-5000$ Hz	
	für den Shaker auf der rechten Seite (Fläche 2)	35
14.	Ergebnis des MUSIC Algorithmus zwischen 1000-3000 Hz für die Volu-	
	menschallquelle auf der rechten Seite (Fläche 2) $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	36
15.	Ergebnis des self-consistent MUSIC Algorithmus zwischen 1000-3000 Hz	
	für die Volumenschallquelle auf der rechten Seite (Fläche 2)	36
16.	Vergleich der Ergebnisse aus self-consistent MUSIC zwischen 1000-3000	
	Hz mit den verschiedenen Gruppen von Ubertragungsfunktionen für die	
	Lokalisierung der Volumenschallquelle auf der Vorderseite	40
17.	Ergebnisse des self-consistent MUSIC zwischen 1000-3000 Hz für die	
	Lokalisierung der Volumenschallquelle auf der Vorderseite ohne Über-	
	tragungsfunktionen	41
18.	Ergebnismatrix für die Schallquellen-Lokalisierung aller verwendeten Al-	
	gorithmen ab 1000 Hz $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	42

# Tabellenverzeichnis

Technische Universität Berlin

1.	Ermittelte Nachhallzeiten und resultierende Schröder-Frequenzen	20
2.	Überblick der durchgeführten Untersuchungen mit dem Impulshammer	
	am Modellraum	25
3.	Darstellung der verwendeten Gruppen von experimentell ermittelten	
	Übertragungsfunktionen	25
4.	Tabellarische Darstellung der ermittelten Moden an der Materialprobe	
	des Modellraumes	26
5.	Verwendete Frequenzgruppen für Luft- und Körperschall-Anregung bei	
	der Untersuchung der Methoden	28
6.	Verwendete Messmittel	53

# 1. Einleitung

Die Bedeutung des Automobils als Wirtschaftsgut wird von Zeller (2009) differenziert betrachtet, da das Produkt sowohl durch rationale als auch durch emotionale Aspekte gekennzeichnet ist. Fahrzeuge stellen ein Fortbewegungs- und Transportmittel dar und sind für die moderne Gesellschaft somit unverzichtbar geworden. Des Weiteren kann das Automobil ein Statussymbol und Lifestyle-Produkt repräsentieren. Dementsprechend unterschiedlich sind die Anforderungen an die Qualität des Fahrzeugs. So erläutert Zeller (2009) weiter, dass sich die Anforderungen an die akustische Signatur eines Fahrzeuges in den letzten Jahren sowohl durch den Wettbewerb verschiedener Automobil-Hersteller als auch durch verschärfte gesetzliche Vorgaben verändert haben. Es muss daher zwischen Störgeräuschen, hörbar im Fahrzeuginnenraum, Funktions- und Betätigungsgeräuschen, wie Fensterheber- oder Blinkergeräuschen, und dem eigentlichen Fahrgeräusch, zum größten Teilen bestehend aus Abroll- und Motorgeräusch, unterschieden werden. Zudem veranschaulichen Engel et al. (2010) den Paradigmenwechsel zu umweltfreundlichen, emissionsarmen und effizienten neuen Leitmotiven, welche ebenfalls neue Herausforderungen an die Fahrzeugakustik stellen. Die damit einhergehende Veränderung des Antriebsstrangs durch Hybridantriebe, Elektromotoren und generell leichtere Motorisierung beeinflusst das NVH (engl. noise, vibration, harshness)-Anregungsverhalten und muss daher gleichermaßen in der Akustikentwicklung Berücksichtigung finden.

Das Team Akustik Gesamtfahrzeug der Daimler AG im Mercedes-Benz Cars Research and Technology Center in Sindelfingen beschäftigt sich mit dem akustischen Charakter von Mercedes-Benz Fahrzeugen. In diesem Bereich leistet die geplante Masterarbeit einen Beitrag zur Verbesserung der Lokalisation von Schallquellen bei Luft- und Körperschallanregung im Fahrzeuginnenraum mittels Vergleich von gemessenen und berechneten Übertragungsfunktionen und deren Implementierung in den Beamforming-Prozess.

## 1.1. Quellenortung in der Fahrzeugakustik

Wie bereits erwähnt spielt die Quellenortung im Entwicklungsprozess eine wichtige Rolle. Die vorliegende Arbeit unterstützt die Weiterentwicklung der Quellenortung im Fahrzeuginnenraum mittels akustischer Kamera. Nau (2016) beschreibt die Wirkungsweise einer akustischen Kamera auf Basis des Beamforming-Verfahrens, welches das einfallende Wellenfeld in ebene und sphärische Elementarwellen zerlegt und deren relative Phasen so interpretiert, dass die Einfallsrichtungen und Quellorte identifiziert und klassifiziert werden können. Mittels der dazu verwendeten Mikrofon-Arraytechnik können so die gesuchten Geräusche sichtbar gemacht werden. Dieser Ansatz wird in den Abschnitten 2.1 Mikrofon-Arrays und 2.3 Beamforming detailliert erläutert.

Im Rahmen der Fahrzeugentwicklung stehen die für das Beamforming notwendigen Randbedingungen nur teilweise, nämlich für das Außengeräusch oder die Untersuchung an einzelnen Fahrzeugkomponenten zur Verfügung. Die verwendeten Prüfstände für Fahrzeuge jeglicher Art werden speziell für akustische Untersuchungen konstruiert und können somit annähernd Freifeld- oder Halbfreifeld-Bedingungen erzeugen. Im Fahrzeuginnenraum bildet sich auf Grund der geschlossenen Geometrie jedoch ein modales Schallfeld aus, welches die Anwendung des Beamforming-Verfahrens nach Nau (2016) nur unter starken Einschränkungen möglich macht und daher nicht zu den gewünschten Ergebnissen führen kann. Für Untersuchungen im Fahrzeuginnenraum muss demnach ein Konzept entwickelt werden, um den dort vorherrschenden kontraproduktiven Bedingungen entgegenzuwirken.

## 1.2. Stand der Forschung

Das Beamforming in der Fahrzeugakustik wird von Nau (2016) als Möglichkeit beschrieben, sowohl im Inneren als auch außerhalb des Fahrzeuges Schallquellen zu lokalisieren. Auf Grund der komplexen Struktur des Fahrzeuginnenraumes, unter anderem bedingt durch dessen Geometrie und verschiedene Materialien mit unterschiedlichen Absorptionseigenschaften, ist die Anwendung des Beamforming-Ansatzes im Inneren eines Fahrzeuges im Vergleich zur Lokalisation von außen als anspruchsvoller anzusehen. Wird das Beamforming für Außengeräusche angewandt, kommt dem Ergebnis in guter Näherung die Annahme des akustischen Freifeldes und die Monopol-Charakteristik für die gesuchten Schallquellen zu Gute. Insbesondere die Ergebnisse des Beamformings mit dem Delay-and-Sum Algorithmus sind nur unter Freifeld-Bedingungen als valide anzusehen und demnach unter den Bedingungen eines Fahrzeuginnenraumes in Bezug auf Dynamik und Auflösung nicht verwertbar.

Die Arbeit von Kern (2008) stellte bereits heraus, dass sich ein kugelförmiges Mikrofonarray am Besten für die Ortung von Schallquellen im Fahrzeuginnenraum eignet, da ein dreidimensionales Array die Unterscheidung zwischen verschiedenen Richtungen des Schalleinfalls ermöglicht und somit gut für die Verwendung in reflexionsreichen Räumen geeignet ist. Zudem erlaubt die Verwendung einer Kamera in Zusammenarbeit mit einem kugelförmigen Mikrofonarray eine vollständige Betrachtung des entsprechenden Raumes. Hierbei erfolgt die Berechnung des Schallfeldes bezogen auf das dreidi-



mensionale Oberflächengitter eines CAD-Modells anstatt auf eine zweidimensionale Fokusebene, welches als Vorgehensweise bei einem ebenen, beispielsweise ringförmigen, Mikrofonarray verwendet wird. Das Kamerabild wird im untersuchten Ansatz dazu verwendet, um die relative Position des Arrays zum vermessenen Raum oder Messobjekt zu identifizieren.

Weiterführende Versuche zur Weiterentwicklung des Beamformings als Werkzeug zur Schallquellenlokalisierung im Rahmen der Fahrzeugentwicklung bei der Daimler AG wurden mit einem 48-kanaligen Kugel-Mikrofonarray von Nau et al. (2014) durchgeführt. Hierbei konnten im Fahrzeug eingebaute Lautsprecher in einem Frequenzbereich von 500-1500 Hz reproduzierbar lokalisiert werden, bei *freiem* Übertragungsweg, sprich ohne Hindernisse zwischen Sender und Empfänger, in einem Bereich von 300-2000 Hz. Die Autoren heben hervor, dass der beschriebene Ansatz für Frequenzen unterhalb von 500 Hz auf Grund der Array-Geometrie, der Apertur und der Anzahl der Mikrofone Grenzen aufgewiesen hat. Daher wurden zu diesem Zeitpunkt zusätzlich Schallintensitätsmessungen durchgeführt, welche valide Lokalisierungsergebnisse für den Bereich zwischen 50-2000 Hz liefern konnten. Dieser Ansatz bietet laut Möser (2010) den Vorteil, dass eine Anwendung im Nahfeld einer Quelle möglich ist und Robustheit gegenüber externen akustischen Störgeräuschen auf Grund signifikanter Unterdrückung der Störgeräusche von hinten vorherrscht.

Im Folgenden wurden verschiedene Beamforming-Algorithmen untersucht. So stellten Nau et al. (2015) heraus, dass moderne adaptive Algorithmen wie Robust Capon, Functional Beamforming (FUBF) oder MUSIC (*engl. multiple signal classification*) verlässliche Lokalisierungsergebnisse speziell im Fahrzeuginnenraum im Frequenzbereich um die Schröder-Frequenz und darüber liefern können. Als Vorteil gegenüber dem CBF ist hierbei im Besonderen die verbesserte Dynamik und Auflösung hervorzuheben. Der MUSIC Algorithmus wies dabei besonders gute Ergebnisse im modalen Schallfeld eines Fahrzeuginnenraumes durch die implementierte Eigenvektor-Analyse auf. Zudem konnte das Ergebnis unter Hinzunahme der SCOT (*engl. smooth coherence transform*)-Gewichtung noch weiter verbessert werden, da dieser Ansatz nach Kuhn (1978) ein effektives Werkzeug zur Unterdrückung von korrelierten - also modalen -Schallanteilen darstellt.

Um das Beamforming-Verfahren für Frequenzbereiche unterhalb der Schröder-Frequenz verwendbar zu machen, wurde von Nau (2016) ein signaltheoretischer Ansatz, welcher aus einer Kombination aus *generalized cross correlation* (GCC) und adaptiven Beamforming-Algorithmen besteht und ein physikalischer Ansatz, einer automatisier-



ten Moden-Detektion (engl. automated mode detection), verfolgt.

Das GCC-Verfahren unterdrückt in Form der SCOT-Gewichtung korrelierte Signalanteile. Der Ansatz wurde von Nau (2016) mit dem FUBF-Algorithmus untersucht: es zeigte sich eine präzisere Lokalisierung, wobei korrelierte Signale, in diesem Fall Reflexionen, deutlich reduziert werden konnten. Der untersuchte Ansatz ist vor allem bei korrelierten Signalen von multiplen Quellen, bzw. für die Unterdrückung von korrelierten Signalen einer einzigen Quelle (Reflexionen) von Vorteil.

Die automatisierte Moden-Detektion, welche das modale Schallfeld des entsprechenden Raumes in den Beamforming-Prozess einbindet und somit ebenfalls bessere Lokalisierungs-Ergebnisse unterhalb der Schröder-Frequenz erwarten ließ, stellt den physikalischen Ansatz dar. Dazu wurden die Übertragungsfunktionen zwischen einer Schallquelle und dem sphärischen Mikrofon-Array im Inneren eines Fahrzeuges bestimmt. Daraus wurde die rationale Übertragungsfunktion mittels All-Pole-Modell nach Haneda et al. (1994) bestimmt. Die nun generierten Polstellen repräsentierten die Resonanzen, die nunmehr mittels Filter reduziert werden konnten. Daraus entstand eine - vom verwendeten Beamforming-Algorithmus unabhängige - präzisere Lokalisierung von Quellen, da die Einflüsse des modalen Schallfeldes reduziert werden konnten.

Mit den ermittelten Untersuchungsergebnissen konnte die Lokalisierung von Luftschall-Quellen im Fahrzeuginnenraum deutlich verbessert und weiterentwickelt werden, so dass es möglich war, den Ort des Ursprungs des Luftschalls, z.B. eine schwingende Oberfläche oder Undichtigkeiten im schalldämmenden Material zu finden. Diese Methode ermöglichte es jedoch nicht die Körperschallanregung zu lokalisieren, welche im Fahrzeug in vielen Fällen die Ursache für eine Luftschallausbreitung zum Fahrerohr ist. Daher beschäftigte sich Nau (in Druck) im Rahmen seiner Dissertation in einem weiterführenden Versuch mit der Implementierung von Übertragungsfunktionen in den Beamforming-Prozess. Ein Satz von realen Übertragungsfunktionen als zusätzliche Information für den Beamforming-Algorithmus anstatt stark vereinfachte akustische Randbedingungen durch die Freifeld-Annahme sollte die Quellenlokalisierung in diesem Bereich erwartungsgemäß deutlich verbessern.

Es konnte herausgearbeitet werden, dass eine Strukturanregung bei idealisiertem Anregungsverhalten mit weißem Rauschen zwischen 20-1000 Hz unter Verwendung simulierter Übertragungsfunktionen unabhängig vom verwendeten Beamforming-Algorithmus lokalisiert werden kann - bei Annahme von Freifeld-Bedingungen anstatt der Informationszugabe von Übertragungsfunktionen war dies nicht möglich. Auch bei realer Anregung der Fahrzeugstruktur mittels Shaker konnte die Quelle unter Verwendung des Robust-Capon-Algorithmus mit SCOT-Gewichtung lokalisiert werden. Allerdings musste dafür ein ausgewählter Frequenzbereich und ein optimierter  $\epsilon$ -Parameter für Abweichungen des Steering-Vektors beachtet werden. Daraus lässt sich ableiten, dass für die pegelunabhängigen Bewertung der Lokalisierung durch Gewichtungsfunktionen wie SCOT ein Vorteil gegenüber der pegelabhängigen Bewertung der Lokalisierung (delay and sum) vorliegt.

#### 1.3. Projektbeschreibung

Die vorliegende Arbeit greift den Ansatz aus der Dissertation von Nau (2016) auf, in welcher die Implementierung von Übertragungsfunktionen in den Beamforming-Prozess als vielversprechender Ansatz zur Verbesserung der Quellenlokalisation im Fahrzeuginnenraum beschrieben wird.

Die Grundlage hierzu ist das Beamforming im Fahrzeuginnenraum mit einem sphärischen Mikrofon-Array. Dieses Verfahren wird bisher verwendet, um den Ort des Eintritts von Störschall zu lokalisieren und mittels Kartierung auf ein CAD-Modell des entsprechenden Fahrzeugs zu visualisieren. Die Güte der Lokalisierung der Störschallquelle ist hierbei abhängig von dem verwendeten Beamforming-Algorithmus. Die Methode bietet zum jetzigen Zeitpunkt keinen Aufschluss über die Ursache des Störgeräusches wenn es sich um eine Körperschall-Anregung handelt.

In dem bereits vorhandenen quaderförmigen Modellraum aus schallhartem Material werden die ersten grundlegenden Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt. Zunächst werden die Übertragungsfunktionen des Modellraum experimentell mittels Anschlagen mit dem Impulshammer ermittelt. Die so gewonnenen Daten werden dem Beamforming-Post-Processing als zusätzliche Information zugeführt und so in den Lokalisierung-Prozess eingebunden. Außerdem werden die Übertragungsfunktionen des Modellraumes simulativ ermittelt. Die Ergebnisse des Beamformings in Bezug auf die Lokalisierungs-Eigenschaften werden für beide Ansätze herausgearbeitet und verglichen.

Ziel der Arbeit ist es, den Beamforming-Algorithmus durch Hinzunahme von Übertragungsfunktionen in Bezug auf die Qualität der Lokalisierung zu verbessern und es somit zu ermöglichen, dass vor allem durch Körperschall eingeleitete Störgeräusche, die schließlich als Luftschall am Fahrerohr ankommen, direkt am Ort der Entstehung lokalisiert und somit eliminiert werden können. Die Validierung des Algorithmus erfolgt



durch Anregung der Messobjekte mit Luft- und Körperschallquellen und die daraus resultierende Qualität der Lokalisierungseigenschaften des Algorithmus. Zudem werden die Vor- und Nachteile der beiden beschriebenen Ansätze erarbeitet und im Ausblick heraus gestellt, welche Methode für eine zukünftige alltägliche Anwendung geeigneter scheint.

# 2. Theoretischer Hintergrund

Im folgenden Abschnitt werden die für die vorliegende Arbeit verwendeten theoretischen Grundlagen dokumentiert. Der Leser erhält eine Übersicht über die Grundlagen von Mikrofon-Arrays und die Theorie des Beamformings. In diesem Zusammenhang werden zudem einige Inhalte aus der Signalverarbeitung erläutert. Als weiterführende Literatur zur digitalen Signalverarbeitung seien beispielsweise die Werke von Vorländer (2010a), Kammeyer und Kroschel (2002) oder Werner (2012) empfohlen.

#### 2.1. Mikrofon-Arrays

Ein Mikrofon-Array besteht aus einer räumlichen Anordnung von n Mikrofonen. Dabei können die Sensoren regelmäßig oder unregelmäßig angeordnet und die Konstruktion kann ein- zwei- oder dreidimensional sein. Die aufgezeichneten Signale werden miteinander in Bezug gestellt. Die räumliche Trennung der einzelnen Mikrofone eines Arrays ermöglicht das Bestimmen spezieller Signalparameter oder das Extrahieren unerwünschter Signalanteile.

Die einfachste Form eines solchen Arrays ist ein lineares Array, welches aus *n* identischen, äquidistanten Mikrofonen entlang einer Raumachse besteht. Die Richtwirkung eines solchen Arrays ist nach Neugebauer (2011) von der Frequenz und vom Einfallswinkel des Eingangssignals, der Anzahl der und dem Abstand zwischen den Mikrofonen und der daraus resultierenden maximalen Ausdehnung der Apertur abhängig. Verwendet man möglichst viele Sensoren mit einem möglichst kleinen Abstand zueinander, kann eine kontinuierliche Apertur bestmöglich angenähert werden. Je größer die Anzahl der verwendeten Mikrofone, desto geringer ist die Ausprägung der Nebenkeulen und desto besser ist somit der SNR (*engl. signal to noise ratio*). Zwar kann die Vergrößerung des Abstandes zwischen den Mikrofonen die Hauptkeule bis zu einem gewissen Grad schmälern und somit für ein verbessertes Auflösungsvermögen sorgen, diese Maßnahme resultiert jedoch ab einer entsprechenden Frequenz in räumlichem Aliasing (siehe 2.2 *Grundlagen der Signalverarbeitung*).

Der Algorithmus zur Auswertung der Mikrofonsignale eines äquidistant angeordneten Sensorarrays basiert nach Vorländer (2010a) auf der Summierung zeitverschobener Mikrofonsignale (delay and sum) und wird wie folgt definiert

$$s(t,\vartheta) = \sum_{m=1}^{M} p_m(t - \tau_m(\vartheta))$$
(1)

Hierbei ist  $p_m$  das m-te Mikrofonsignal und  $\tau_m$  die entsprechende Zeitverschiebung abhängig von der Einfallsrichtung  $\vartheta$  der Schallwellen. Die daraus entstehenden Hauptund Nebenkeulen können mit einer unterschiedlichen Gewichtung noch weiter beeinflusst werden.

Die beschriebenen linearen Arrays erlauben die Auswertung des Schallfeldes in eine Richtung, bringen jedoch keine Information über den Elevationswinkel hervor. Zu diesem Zweck werden zweidimensionale planare Arrays verwendet. Kreidl und Pucher (2009) beschreiben diese Arrays als Möglichkeit für große Strukturen, große Entfernungen und schnell sichtbare Ergebnisse. Je größer der Durchmesser des planaren Arrays, desto geringer ist die untere Grenzfrequenz für das Beamforming-Verfahren. Diese Frequenz berechnet sich zu

$$f_{min} = \frac{3 * c}{d} \tag{2}$$

mit d als dem Durchmesser des zweidimensionalen Mikrofon-Arrays. Vorländer (2010a) hebt hervor, dass Linien-Arrays nur eingesetzt werden können, wenn die Schallquellen auf einer bekannten eindimensionalen Ebene angeordnet sind. Beim Einsatz von zweidimensionalen Arrays muss des Weiteren sichergestellt sein, dass sich keine Schallquelle hinter dem Array befindet, da diese Sensoranordnung nicht zwischen Vorder- und Rückseite unterscheiden kann. Wenn Schallquellen in allen Richtungen liegen können, müssen dreidimensionale Mikrofonanordnungen verwendet werden.

#### 2.1.1. Akustische Kartierung mit Mikrofonarrays

Bei der zweidimensionalen Kartierung wird das zu untersuchende Objekt durch eine rechteckige Ebene vor dem Mikrofonarray angenähert. Die Modellannahme einer einzelnen Objektebene entspricht im Besonderen bei der Verwendung im Fahrzeuginnenraum nicht der Realität, da hier tiefstrukturierte Oberflächen und im Raum verteilte Schallquellen beachtet werden müssen. Somit treten bei der Anwendung von zweidimensionaler Kartierung nach Meyer und Döbler (2007) Schwierigkeiten in Form von



Pegelverfälschungen, verzerrten Lokalisierungsergebnissen oder Aliasingeffekten auf.



Abbildung 1: Funktionsschema der dreidimensionalen Kartierung mit einem 2D-Mikrofonarray (links) und dreieckförmige Oberflächenstruktur eines dreidimensionalen CAD-Modells mit sphärischem Mikrofonarray (rechts)

Bei der dreidimensionalen Kartierung wird die Objektebene durch ein 3D-Modell des zu untersuchenden Objektes ersetzt. Dieses besteht aus einer Vielzahl von Dreiecken, welche direkt für die Ermittlung von Laufzeitunterschieden und entsprechend farbige Kodierung der Schalldruckpegel verwendet werden. In den Untersuchungen von Meyer und Döbler (2007) wurde deutlich, dass die akustische Kartierung eines dreidimensionalen Objektes mit einem planaren Array keine korrekten Ergebnisse liefert, da alle Quellen spiegelbildlich auf der jeweils anderen Seite noch einmal abgebildet werden. Demnach wird ein dreidimensionales Mikrofonarray für eine solche Anwendung benötigt, welches in alle Richtungen eine gleiche Hauptkeulenbreite, Frequenzgang und Auflösung bei möglichst kleinen Nebenkeulen aufweist. Meyer und Döbler (2007) erörtern weiter, dass die Lokalisierung zweier Punktschallquellen neben und hinter einem kugelförmigen Array korrekt funktioniert. Das in dieser Studie verwendete kugelförmige Mikrofonarray wird für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls verwendet. Es weist nach Meyer und Döbler (2007) eine akustische Transparenz auf, durch welche das sich ausbildende Schallfeld kaum beeinflusst wird. Zudem wird kein Mikrofon abgeschattet und es bilden sich keine frequenzabhängigen Schalldruckerhöhungen durch die Oberfläche.

Speziell bei der Kartierung auf dreidimensionale Objekte in der Fahrzeugakustik kann man so die räumliche Schalldruck-Verteilung im Fahrzeuginnenraum oder auf einzelnen Komponenten realisieren und akustische Schwachstellen finden, die zum Eintreten von Störgeräuschen in den Innenraum führen.





Abbildung 2: 3D-Szene simuliert mit *einer* Punktschallquelle vor einem Ringarray (links) und mit *zwei* Punktschallquellen seitlich und hinter einem Kugelarray (rechts) nach Meyer und Döbler (2007)

## 2.2. Grundlagen der Signalverarbeitung

Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigen Begriffe aus der digitalen Signalverarbeitung erläutert, welche zum Verständnis der Berechnungen beim Beamforming beitragen.

#### 2.2.1. Digitalisierung

Für die Weiterverarbeitung von aufgenommenen (gemessenen) Signalen ist die Digitalisierung dieser Daten notwendig. Mittels A/D-Wandler können analoge Zeitfunktionen s(t) hinsichtlich Amplitude, bzw. hinsichtlich der jeweiligen physikalischen Messgröße und zeitlicher Abfolge diskretisiert werden. Dieser Vorgang wird als für den Übergang von wertekontinuierlich nach wertediskret als Quantisierung, für zeitkontinuierlich nach zeitdiskret als Abtastung bezeichnet. Der verwendete Takt heißt Abtastfrequenz. Quantisierung und Abtastung liefern somit ein hinreichend genaues Bild des analogen Signals. Dabei muss die Abtastfrequenz  $f_a$  nach Michel und Möser (2010) größer als das Doppelte der Grundfrequenz eines periodischen Signals, bzw. größer als das Doppelte der höchsten im Signal enthaltenen Frequenzkomponente in einem beliebigen Signal sein. Das Nyquist-Theorem bestimmt somit die Abtastfrequenz, welche daher auch oftmals als *Nyquistfrequenz* bezeichnet wird.

$$f_a \ge 2 f_{max}.$$
 (3)

Wird das Abtasttheorem nicht eingehalten, können Mehrdeutigkeiten und somit Feh-

ler bei der Signalrekonstruktion auftreten, da sich beispielsweise ganzzahlige Vielfache von harmonischen Signalen mit den gleichen Abtastwerten des Original-Signals rekonstruieren lassen. Dieses Phänomen wird als *Aliasing* bezeichnet. Zur Vermeidung von Aliasing werden in der Regel Tiefpassfilter (in diesem Zusammenhang auch als *Anti-Aliasing-Filter* bezeichnet) verwendet, welche den verwertbaren Frequenzbereich auf höchstens die Hälfte der Abtastfrequenz begrenzen.

Für die Wertediskretisierung wird der physikalische Messbereich in eine endliche Anzahl von Intervallen unterteilt und jedem dieser Intervalle eine Quantisierungsstufe zugewiesen. Für die Rekonstruktion des Signals wird jeder Eingangswert pro Abtastwert auf eine der Quantisierungsstufen auf- oder abgerundet.

Bei der Verwendung von Mikrofonarrays muss zudem noch der Effekt des räumlichen Aliasing beachtet werden. Ist der Mikrofonabstand d ein Vielfaches der der Wellenlänge  $\lambda$ , sind die unter dem Winkel  $\vartheta$  einfallenden Schallwellen phasengleich mit dem von vorne eintreffenden Signal und werden durch Überlagerung gleich verstärkt. Es entstehen somit Gitterkeulen, welche eine Fokussierung nicht mehr eindeutig möglich machen. Kann man durch größere Abstände d zwar die untere Grenzfrequenz erweitern, wird gleichzeitig die obere Grenzfrequenz durch räumliches Aliasing beschränkt. Das räumliche Abtasttheorem ist definiert durch

$$f_a \ge f_{max} = \frac{c}{2d}.\tag{4}$$

#### 2.2.2. Korrelation, Autokorrelation und Leistungsdichtespektrum

Der Korrelationskoeffizient ist nach Werner (2012) als Erwartungswert des Produkts der standardisierten stochastischen Variablen und durch Normierung definiert als

$$-1 \le \rho \ge 1. \tag{5}$$

Für  $\rho = 1$  nehmen die Variablen  $x_1, x_2$  mit der Wahrscheinlichkeit 1 den gleichen Wert an, bei einem Korrelationskoeffizienten mit dem Wert  $\theta$  sind die beiden Variablen unkorreliert.

Die Autokorrelationsfunktion beschreibt somit die Korrelation eines Signals "mit sich selbst" als Funktion einer zeitlichen Verschiebung. Nau (in Druck) definiert diese als

den Erwartungswert eines Signals zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten  $t_1, t_2$ :

$$\varphi_{xx}(t_1, t_2) = E[x(t_1) \cdot x(t_2)] \tag{6}$$

Betrachtet man die Autokorrelationsfunktion eines stationären Prozesses, also eines invarianten Signals über die Zeit, so hängt die Funktion nur von der Zeitdifferenz  $\tau = t_2 - t_1$  ab und kann dann ebenfalls formuliert werden als

$$\varphi_{xx}(t_1, t_2) \to \varphi_{xx}(\tau) = E[x(t) \cdot x(t+\tau)]. \tag{7}$$

Die spektrale Leistungsdichte (*engl. power spectral density*) gibt die auf eine Frequenz bezogene Leistung in einem Frequenzband an. Das Integral der Leistung über alle Frequenzen stellt die Gesamtleistung eines Signals dar. Sie ist definiert durch

$$\varphi_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{xx}(t) e^{j\pi f\tau} d\tau.$$
(8)

Die spektrale Leistungsdichte ist somit die Fourier-Transformierte der Autokorrelationsfunktion Der Zusammenhang zwischen Autokorrelationsfunktion und spektraler Leistungsdichte über die Fouriertransformation wird als *Wiener-Khintchine-Theorem* bezeichnet.

#### 2.2.3. Kreuzkorrelation, spektrale Kreuzleistungsdichte und Kreuzspektralmatrix

Analog zur Autokorrelation wird die Korrelation zweier unterschiedlicher Signale durch die Kreuzkorrelationsfunktion beschrieben. Diese ist definiert durch:

$$\varphi_{xy}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau).$$
(9)

Die Fouriertransformierte dieser Funktion wird als spektrale Kreuzleistungsdichte (*engl. power spectral density (PSD)*) bezeichnet und ist beschrieben mit

$$\varphi_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_{xy}(t) \,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\pi f\tau} d\tau.$$
(10)

Die Kreuzspektralmatrix (engl. cross spectral matrix (CSM)) wird erzeugt, indem die

Technische Universität Berlin

PSD und die entsprechenden komplex-konjugierten PSD aller verwendeten Mikrofonpaare in eine Matrix eingetragen werden. Dabei stellt die Autokorrelation jedes einzelnen Mikrofons die Diagonale dieser Matrix dar.

$$C_{mn} = \begin{pmatrix} \varphi_{1,1} & \varphi_{1,2} & \cdots & \varphi_{1,n} \\ \varphi_{2,1} & \varphi_{2,2} & \cdots & \varphi_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{m,1} & \varphi_{m,2} & \cdots & \varphi_{m,n} \end{pmatrix}$$
(11)

#### 2.3. Beamforming

Die bildgebende Analyse von komplexen akustischen Schallquellen mittels Beamforming und akustischer Kamera gewinnt nach Meyer und Döbler (2007) auch in industriellen Anwendungen mehr und mehr an Bedeutung. Das Prinzip des Beamformers wird von Nau (in Druck) mittels Zerlegung des einfallenden Wellenfeldes in ebene oder sphärische Elementarwellen beschrieben. Bei Betrachtung im Zeitbereich werden die zeitlichen Verzögerungen (*engl. delays*), im Frequenzbereich die relativen Phasen, so interpretiert, dass die Einfallsrichtungen identifiziert und die Quellen lokalisiert werden können. Ebenso kann ein Beamformer auf signaltheoretischer Ebene als räumliches Filter charakterisiert werden, welches dem Array nachgeschaltet eine gewünschte Richtcharakteristik erzeugen kann. Der folgende Abschnitt soll sowohl eine theoretische Einführung in allgemein gültige Beamforming-Grundlagen geben, als auch auf die Besonderheiten der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Ansätze eingehen.

#### 2.3.1. Delay-and-Sum Beamformer im Zeit- und Frequenzbereich

Die Auswertung im Zeitbereich beruht nach Vorländer (2010a) auf der Betrachtung des aufgenommenen Signals zum Zeitpunkt der Abstrahlung. Die Grundgleichung des Beamformers im Zeitbereich beschreibt das fokussierte Signal  $p(\vec{x}_f, t_f)$  als Summe aller zeitverzögerten Mikrofonsignale mit

$$p(\vec{x}_{f}, t_{f}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} p_{m}(t_{f} + t_{fm}) w_{m} r_{fm} / r_{ref}$$
(12)

wobei  $p_m(t_f+t_{fm})$  das verzögerte Signal des Mikrofons m ist und  $w_m$  eine optionale Gewichtsfolge der Mikrofonsignale darstellt. Der Faktor  $r_{fm}/r_{ref}$  normiert die Amplitude auf eine Referenzentfernung  $r_{ref}$ . Die hier angestellten Überlegungen gelten für kugelförmige Schallwellen. Für die Analyse und Auswertung werden nach Vorländer (2010a) meist die darauf basierenden zeitlich gemittelten Größen wie die spektrale Leistungsdichte oder das Leistungsspektrum verwendet.

Vorländer (2010a) leiten analog dazu die Grundgleichung des Beamformers im Frequenzbereich aus Gleichung 12 her, welche die zeitabhängigen Größen durch die komplexe Fourierkomponente des Mikrofonsignals  $P_m(\omega)$  bei der Kreisfrequenz  $\omega$  darstellt.

$$P(\overrightarrow{x}_{f},\omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} P_{m}(\omega) e^{-j\omega t f_{m}} w_{m} r_{fm} / r_{ref}$$
(13)

Der Term  $e^{-j\omega t f_m}$  beschreibt hierbei den Einfluss der Ausbreitung auf die Phase am Mikrofon. Das Leistungsspektrum in  $[Pa^2]$  lässt sich nunmehr direkt bestimmen zu

$$S_{pp}(\overrightarrow{x}_{f},\omega) = P(\overrightarrow{x}_{f},\omega) \ P^{*}(\overrightarrow{x}_{f},\omega)$$
(14)

Die spektrale Leistungsdichte mit der Einheit  $[Pa^2/Hz]$  ergibt sich entsprechend nach Division durch  $\Delta f = \frac{1}{T}$ , wobei T die Länge der Zeitreihen der Mikrofonsignale beschreibt.

#### 2.3.2. Beamforming im Frequenzbereich mittels Kreuzspektralmatrix

Die für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Algorithmen basieren auf der Manipulation der Kreuzspektralmatrix mit dem *steering vector*. Zunächst wird die Kreuzspektralmatrix nach der Methode von Welch (1967) berechnet, welche einen Ansatz zum Schätzen der spektralen Leistungsdichte repräsentiert. Dabei wird das gemessene Signal in einander überlappende Segmente unterteilt. Aus den Segmenten werden nach anschließender Fensterung und Fouriertransformation die Betragsquadrate gebildet. Die nun entstandenen, sogenannten *Periodogramme* werden gemittelt und bilden schließlich eine Gruppe von Werten, welche Leistung pro Frequenz*bin* gegenüberstellt.

Im nächsten Schritt werden die über die Mikrofone erfassten Daten (Zeit- und Raumkorrelation zwischen den Signalen) und die Richtungsinformationen (Laufzeit- und Phasendifferenzen zwischen Mikrofon und den Gitterpunkten der Schallkarte) voneinander getrennt. Die Steuerung der akustischen Kamera wird über den *steering vector* realisiert, welcher die relevanten geometrischen Informationen für die Fokussierung beinhaltet. Er ist definiert durch

$$g(\overrightarrow{x_t}, \omega_k) = \frac{1}{M} \begin{pmatrix} e^{j\omega_k \Delta t_0} \\ \vdots \\ e^{j\omega_k \Delta t_{M-1}} \end{pmatrix}$$
(15)

Hierbei ist  $\overrightarrow{x_t}$  die Position einer möglichen Quelle, M beschreibt die Anzahl der Mikrofone und  $\omega$  ist die Kreisfrequenz. Mittels steering vector kann die *beamforming map b* berechnet werden zu

$$b(\overrightarrow{x_t}, \omega_k) = g^{\dagger}(\overrightarrow{x_t}, \omega_k) \cdot CSM(\omega_k) \cdot g(\overrightarrow{x_t}, \omega_k), \tag{16}$$

wobei  $g^{\dagger}$  die adjungierte Form des steering vectors darstellt.

#### 2.3.3. Gewichtung mit SCOT und PHAT

Die PHAT- (*engl. phase transform*) und SCOT- (*engl. smoothed coherence factor*) Gewichtung gehören jeweils zur Gruppe der adaptiven Filterfunktionen, welche nach Nau (in Druck) besonders vorteilhaft für die mehrkanalige Störgeräuschunterdrückung sind, indem sie das Maximum durch Gewichtung der Werte des Kreuzkorrelationsspektrums schärfen, bzw. hervorheben. Dies kann notwendig sein, wenn die Nebenkeulen des Kreuzkorrelationsspektrums durch Reflexionen oder andere Störeinflüsse eine Amplitude in der Größenordnung der Hauptkeule aufweisen.

Der PHAT-Filter ergibt sich zu

$$\Psi_{PHAT} = \frac{1}{|G_{x_1, x_2}(n)|} \tag{17}$$

und normiert das Betragsspektrum der Kreuzkorrelation zu Eins ohne den Phasengang zu beeinflussen. Dieser Vorgang wird nach Kammeyer und Kroschel (2002) auch als *pre-whitening* des Spektrums bezeichnet. Dabei werden farbige Störsignale, d.h. Signale mit deutlichen Erhöhungen bei verschiedenen Frequenzen, unterdrückt. Das Filter benötigt einen hohen SNR und eine möglichst geringe Nachhallzeit für gute Ergebnisse.

Auch die SCOT-Bewertung handelt zunächst als pre-whitening Filter und interpre-

tiert die Eingangssignale mittels anschließender Kohärenzbildung.

$$\Psi_{SCOT} = \frac{1}{\sqrt{G_{x_1,x_1}(f)G_{x_2,x_2}(f)}}$$
(18)

Frequenzen, an denen ein unkorreliertes Signal ausgeprägt vorliegt, werden mit einem Wert nahe Null gewichtet, während Frequenzen mit ausgeprägter Kohärenz mit einem höheren Faktor bewertet werden.

Beide Funktionen müssen nach Nau (in Druck) für die Anwendung auf die Kreuzspektralmatrix im Rahmen des Beamformings wie folgt modifiziert werden.

$$C_{nm,SCOT} = \frac{C_{nm}}{\sqrt{A_{nn} \cdot A_{mm}}} \tag{19}$$

$$C_{nm,PHAT} = \frac{C_{nm}}{|C_{nm}|} \tag{20}$$

Dabei beschreiben  $A_{nn}$  und  $A_{mm}$  die Elemente der zugehörigen Autokorrelationsspektren.

#### 2.3.4. MUSIC Algorithmus

Der Algorithmus beschreibt nach Nau (in Druck) die Singulärwert-Zerlegung der Kreuzspektralmatrix, nach welcher eine Unterteilung in die Eigenwerte der Quelle, in kohärente Rauschanteile, bezeichnet als Subraum  $U_S$  und in die inkohärenten Rauschanteile, welche folgend durch den Subraum  $U_R$  beschrieben werden, vollzogen wird. Auf Basis der in  $U_S$  vorhandenen Eigenwerte kann eine Abschätzung der Anzahl der Quellen vorgenommen werden, für die eigentliche Lokalisierung wird jedoch der Subraum  $U_R$ betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass die Energie des Rauschens am Ort der Abstrahlung des Signals am geringsten ist, da das Rauschen and diesen Stellen vom Nutzsignal überdeckt wird. Der Output P des Ansatzes ist somit definiert durch

$$P_{Music} = \frac{1}{g^* \cdot U_R \cdot U_R^* \cdot g} \tag{21}$$

Daraufhin wird die *beamforming map* mit dem in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Verfahren berechnet.

#### 2.3.5. Self-consistent MUSIC Algorithmus

Die Qualität der Ergebnisse des MUSIC Algorithmus ist in geräuschvollen und halligen Umgebungen begrenzt, da lokale Maxima, welche größer als die Amplitude der tatsächlichen Quellen sein können, auftreten (*engl. ghost sources*). Um diese ghost sources von den tatsächlichen Quellen unterscheiden zu können, wurde in einer ersten Erweiterung des Ansatzes der RAP MUSIC Algorithmus eingeführt. Dieser ermittelt jede Quelle in Form eines lokalen Maximums mittels eines rekursiven Vorgehens. Der geschätzte Signal-Subraum  $U_S$  aus dem ursprünglichen MUSIC Algorithmus wird schrittweise nach lokalen Maximu durchsucht. Jede gefundene Quelle - gleichbedeutend mit einem lokalen Maximum - wird dann aus den Berechnungen abgezogen, so dass sich keine Reflexionen ergeben. Für eine detaillierte Erläuterung dieser Herangehensweise sei auf Mosher und Leahy (1999) verwiesen.

Der ursprüngliche Verwendungszweck des RAP MUSIC besteht in der Datenanalyse von EEG-Daten in medizinischen Anwendungen. Daher besteht grundsätzlich zunächst keine Frequenzabhängigkeit. Bei der Überführung des Ansatzes in das Beamforming muss demnach eine Erweiterung für diesen Bereich stattfinden. Dazu wird der Ort der Quelle über alle Frequenzen mittels gewichteter Summe aus der Gleichung

$$H(l) = \sum_{f} \frac{h(l, f)}{g(f)}$$
(22)

geschätzt, wobe<br/>ih(l,f)das Amplituden-Maximum bei jeder Frequenz beschreibt und<br/>  $g(f)=\sum_l h(l,f)$ ist.

Der self-consistent MUSIC Algorithmus verwendet somit als Basis den Ansatz aus RAP MUSIC zur Identifizierung von Quellen und deren entsprechenden Topografien. Daraufhin wird mittels generierten Sweep-Sequenzen die N-te Quelle ermittelt, indem alle anderen gefundenen Quellen nicht mehr betrachtet werden. Im gleichen Schritt wird somit das Amplitudenspektrum geschärft. Das Verfahren endet, sobald ein Sweep dieselben Quellen hervorhebt wie im Schritt zuvor.

#### 2.3.6. Robust Capon Algorithmus

Das ursprüngliche Verfahren nach Capon ist auch als MVDR- (*engl. Minimum Variance Distortionless Response*) Beamforming bekannt. Hierbei werden die verwendeten Mikrofone so gewichtet, dass die gemittelte Leistung über alle Signale minimiert wird. Dazu muss jedoch in der jeweiligen untersuchten Richtung eine Verstärkung von eins herrschen. Dementsprechend werden alle Störsignale, die nicht aus der untersuchten Richtung kommen, unterdrückt. Bei idealer Dämpfung werden die Nebenkeulen fast vollständig unterdrückt. Der Unterschied zum CSM-Beamforming besteht in der Inversion der Kreuzspektralmatrix. Der Output ist demnach beschrieben mit

$$P_{MVDR} = \frac{1}{g^* \cdot C^{-1} \cdot g} \tag{23}$$

Kommt es bei den Mikrofonpositionen zu Abweichungen zwischen der tatsächlichen und der angenommenen Position hat dies einen Fehler bei der Schätzung des *steering vectors* zur Folge. Der Robust Capon Algorithmus macht die Schätzung dieser Größe robuster gegenüber Abweichungen. Dazu gilt die Annahme, dass der *steering vector* nicht bekannt ist, sondern innerhalb einer Ellipse um den tatsächlichen Vektor herum liegt. Da dieser für jeden Ort und jede Frequenz neu berechnet werden muss, erhöht sich die Berechnungszeit etwa um den Faktor 10 gegenüber dem ursprünglichen Ansatz.

#### 2.3.7. Clean SC

Das Verfahren nutzt die räumliche Kohärenz der Nebenkeulen mit der Hauptkeule aus, um die benötigten Richtcharakteristiken für jeden Fokuspunkt aus den gemessenen Mikrofonsignalen zu ermitteln. Die Schallquellen werden basierend auf der Annahme, dass die tatsächliche Position der Schallquelle mit dem Maximum der Schallfeldkartierung übereinstimmt, schrittweise ermittelt. Dazu wird der kohärente Anteil aller Positionen der Schallfeldkartierung mit der Position des Maximums ermittelt und eliminiert. Durch die Nutzung der räumlichen Kohärenz scheint dieser Ansatz im Besonderen für reflexionsreiche Bedingungen geeignet zu sein. Allerdings weist Vorländer (2010a) darauf hin, dass die Annahme der Quellposition der nächsten zu berechnenden Quelle am jeweiligen Maximum bei mehreren verteilten Quellen zu Fehlern führen kann.

# 3. Ermittlung von Übertragungsfunktionen an einem Modellraum

In diesem Kapitel wird der erste Teil des Projekts erläutert, welcher aus den Untersuchungen am Modellraum besteht. Zunächst wird die Beschaffenheit des Raumes beschrieben, anschließend erfolgt die Dokumentation der durchgeführten Messungen. Ein weiterer kurzer Abschnitt beschäftigt sich mit der verwendeten Messtechnik und deren Funktion, sowie der Beschreibung der Methode des Einbindens von Übertragungsfunktionen in den Beamforming-Prozess. Der zweite Projektabschnitt, welcher aus der Simulation der Transferfunktionen für den Modellraum besteht, schließt das Kapitel ab.

#### 3.1. Beschreibung des Modellraumes

Der verwendete Modellraum besteht aus dem Holzverbundwerkstoff *BaryVam*<sup>®</sup>, welcher laut der Rudolf Rost Sperrholz GmbH (Zugriff am 21.06.2016) aus finnischem Birkensperrholz und einer Schwerfolie auf Kunststoffbasis mit anorganischen Füllstoffen zusammengesetzt ist und somit ein akustisch wirksames Sandwich-Element darstellt. Das Material findet seine Anwendung in der Luftschalldämmung und wird für den Bau von Schallschutz- oder Fahrzeugkabinen, sowie im Bau von Zügen oder Schiffen verwendet.

Der Modellraum hat eine Größe von 1.74 x 1.19 x 1.19 [m] und ist auf einem fahrbaren Unterbau befestigt. Dieser ist mit einer Schicht aus Gummimatten vom Modellraum entkoppelt. Eine Halterung für die Mikrofonanordnung ist ebenso fest verbaut wie die Innenraum-Beleuchtung und eine Plexiglasscheibe zur Überwachung an der Vorderseite. Die vordere Seite des Modellraumes kann zudem für die Bestückung mit Messequipment geöffnet werden. Diese Platte ist mit zusätzlichen Dichtungen an den Kanten ausgestattet, um den schalldichten Wieder-Verschluss zu ermöglichen.

Für die geplanten Untersuchungen wird ein CAD (*engl. computer-aided design*)-Modell erstellt, welches das dreidimensionale Beamforming an diesem Modellraum in den folgenden Auswertungen ermöglicht.

Der Modellraum wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit konstruiert. Hierbei sind die raumakustischen Parameter von Poetter (2016) ermittelt worden. In der Tabelle 1 ist





Abbildung 3: Grafische Darstellung des Modellraums mit sphärischem Mikrofonarray (links) und CAD-Modell (rechts)



Abbildung 4: Abbildung des Modellraumes auf einem Prüfstand

die Nachhallzeit für 500 Hz und 1000 Hz ebenso dargestellt wie die daraus resultierenden Schröder-Frequenzen. Für einem Raum dieser Größe ist eine hohe Nachhallzeit zu verzeichnen, welche entsprechend in einer Schröder-Frequenz resultiert, welche ein Abklingen des modalen Schallfeld-Anteils ab 1636, bzw. 1514 Hz beschreibt.

Frequenz [Hz]	Nachhallzeit $T_{30}$ [s]	Schröder-Frequenz [Hz]			
500	1,41	1636			
1000	1,21	1514			

Tabelle 1: Ermittelte Nachhallzeiten und resultierende Schröder-Frequenzen

## 3.2. Messtechnik

Eine detaillierte Beschreibung des verwendeten Mikrofonarrays, des Impulshammers und der gesamten Signalkette ist im Anhang A dokumentiert. Dieser Abschnitt beschäftigt sich vornehmlich mit der für die Auswertung verwendeten Software *NoiseImage* und deren Schnittstelle zu *MatLab*, um die Funktion und das Zusammenspiel dieser beiden Programme zu erläutern.

Die Software basiert nach dem Hersteller GFaI auf einem Modul-Konzept, welches nach den Anforderungen des Anwenders individuell zusammengestellt werden kann. Das Programm erlaubt die Erfassung, Auswertung und Speicherung von Daten, akustischen Bildern und Filmen. Gemeinsam mit der in Anhang A dokumentierten Hardware stellt sie so ein vollständiges Messsystem inklusive Auswertungsmöglichkeiten dar.

Die verschiedenen dreidimensionalen CAD-Modelle von einzelnen Komponenten oder dem gesamten Fahrzeug können in NoiseImage geladen werden. Das Programm legt ein Gitternetz (*engl. mesh*) über das entsprechende Objekt, an welchem sich die spätere Farbgebung orientieren wird. Die aufgezeichneten Zeitsignale werden mittels delayand-sum Verfahren nach Zeitverschiebungen sortiert. Daraus wird im nächsten Schritt die Visualisierung und entsprechende Kartierung auf dem CAD-Modell berechnet. Der Nutzer kann durch das modulare Konzept auf die MatLab-Anwenderschnittstelle zugreifen, in der weitere eigene Berechnungsvarianten verfügbar gemacht werden. Diese müssen entsprechend zuvor in MatLab programmiert und kompiliert werden.

Für einen weiteren Versuch wird zudem das Messsystem *PAK* der Firma Müller BBM verwendet. Diese Anordnung bietet gleichermaßen eine vollständige Signalkette für Aufnahme, Speicherung und Auswertung der Daten an. Das System wird auf Grund einer implementierten Funktion zur Kontrolle der Krafteinleitung bei dem Anschlagen mit dem Impulshammer im Rahmen des implementierten Messmoduls *Impulshammer-Messung* verwendet und ist in Anhang A dokumentiert. Die Software zur Auswertung wurde nicht verwendet.

# 3.3. Einbindung von Übertragungsfunktionen in den Beamforming-Prozess

Ein Überblick des vollständigen Prozesses ist im Anhang B in Form eines Programmablaufplans dargestellt. Das Beamforming kann demnach *mit* dem Einbinden von Übertragungsfunktionen oder *ohne* diesen Schritt durchgeführt werden. Die Übertra-



gungsfunktionen eines beliebigen Systems müssen entsprechend zu Beginn generiert werden. Dies kann entweder experimentell oder als Simulation realisiert werden. Diese beiden Prozesse werden durch den Unterprozess *Ermittlung der Übertragungsfunktionen* dargestellt und sind im Detail in den beiden folgenden Abschnitten erläutert. Der Output des Unterprozesses ist eine Datenbank von Übertragungsfunktionen verschiedener Systeme.

Für den experimentellen Ansatz wird der Unterprozess *Berechnung von Übertragungsfunktionen* verwendet um die Datenbank zu füllen. Dazu müssen die gemessenen Daten - nach In- und Output aufgeteilt - als Zeitrohdaten übergeben werden. Zudem müssen die Koordinaten der Anschläge mit dem Impulshammer jedem der Ein- und Ausgangssignale zugeordnet werden. Die Übertragungsfunktionen werden nach der Methode von Welch (1967) berechnet. Die resultierende Datei muss dann einer Datenbank zugeführt werden, welche von NoiseImage aus zugänglich ist.

Das zu untersuchende System wird in beiden Fällen (mit/ohne Übertragungsfunktionen) gleich behandelt. In der vorliegenden Arbeit wird im Inneren des Modellraumes ein Mikrofonarray platziert und eine Aufnahme gestartet. Der Raum wird in diesem Zusammenhang bewusst mit einer bekannten Schallquelle und bekanntem Signal angeregt. In der alltäglichen Praxis können entweder künstliche Schallquellen verwendet werden oder es wird im Fahrzeuginnenraum in verschiedenen Betriebszuständen gemessen, um Schallquellen identifizieren und lokalisieren zu können.

Das so aufgezeichnete Zeitsignal und das zugehörige 3D-Modell werden in der Software NoiseImage geladen. Dazu greift die Software je nach Auswahl des Anwenders auf lokal bestehende Datenbanken mit hinterlegten CAD-Modelldaten zurück. Der Nutzer hat in der Anwenderoberfläche die Möglichkeit, die gewünschten Übertragungsfunktionen aus der erstellten Datenbank zu laden und anschließend einen Beamforming-Algorithmus zu wählen. Diese Auswahl des Algorithmus kann entsprechend auch ohne Laden von Übertragungsfunktionen durchgeführt werden. Das Programm greift je nach Nutzerbefehl auf die in einer weiteren Datenbank hinterlegten Berechnungsvarianten zurück, um die gewünschte Methode auszuführen.

Der Unterprozess *Berechnung* im Fall der Einbindung von Übertragungsfunktionen soll im Folgenden betrachtet werden.

Der steering vector beruht im Allgemeinen auf der Freifeld-Annahme zwischen Mikrofon und Schallquelle. Diese Annahme stellt den Anwender demnach beim Beamforming im Fahrzeuginnenraum vor eine besondere Herausforderung. Im Rahmen dieser Arbeit wird der steering vector durch Übertragungsfunktionen manipuliert. Zunächst ist der steering vector eine dreidimensionale Matrix bestehend aus den hinterlegten Freifeld-Übertragungsfunktionen, den betrachteten Frequenzbins und den sogenannten map points, welche die Geometrie des untersuchten Gegenstands durch die Verteilung von Punkten auf der Oberfläche beschreiben. Die ermittelten Übertragungsfunktionen werden ebenfalls einer dreidimensionalen Matrix aus 48 nun realen Übertragungsfunktionen, Frequenzbins und Koordinaten der Messpunkte zusammengefasst. Nun werden beide Matrizen für jeden Frequenzbin betrachtet und verglichen. Jeder Messpunkt wird seinem nächstliegenden map point zugeordnet und die reale Übertragungsfunktion an dieser Stelle im steering vector verwendet. Dann wird das Beamforming mit dieser manipulierten steering vector Matrix je nach einem gewählten Algorithmus, der über die MatLab-Schnittstelle zur Verfügung gestellt wird, durchgeführt. Ohne das Hinzufügen von Übertragungsfunktionen wird die Berechnung nach der in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Methode ausgeführt.

## 3.4. Experimentelle Ermittlung von Übertragungsfunktionen

Durch Anschlagen zufällig ausgewählter Punkte auf jeder Fläche des Modellraumes mit dem Impulshammer werden die Übertragungseigenschaften dieser Konstruktion in Form von akustischen Transferfunktionen ermittelt. Darauf folgend wird die Struktur mit Luft- und Körperschall an wiederum zufällig gewählten Punkten angeregt. Diese Aufnahmen dienen zur späteren Validierung der MatLab-Anwendung, welche die Übertragungsunktionen in den Beamforming Prozess einbindet, um die Qualität der Quellenlokalisierung zu verbessern.

Das im Inneren des Modellraumes installierte 48-kanalige sphärische Mikrofonarray nimmt die Antwort des Modellraumes auf. Das Eingangssignal wird durch das Anschlagen mit dem Impulshammer erzeugt. So können aus jedem Anschlag jeweils 48 Übertragungsfunktionen generiert werden. Der Modellraum wird an 90 zufällig verteilten Messpunkten auf allen Flächen angeschlagen. Die Unterseite wird hierbei nicht berücksichtigt. Aus den gemessenen Daten werden mittels der in Abschnitt 2.3.2 erläuterten Methode die Übertragungsfunktionen berechnet. Anschließend werden diese Daten jeweils dem Gitterpunkt auf dem CAD-Modell zugeordnet, welcher entsprechend dem Ort der Anregung entspricht.

Für die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit steht der praktische Nutzen im Vorder-



grund. Es muss demnach stets beachtet werden, dass die Umsetzbarkeit der Untersuchungen für die alltägliche Anwendung im Unternehmen gegeben ist. Nach den ersten Untersuchungen ist deutlich geworden, dass die manuell ausgeführten Anschläge mit dem Impulshammer sehr großen Differenzen bei der Krafteinleitung unterliegen. Dies ist vor allem auf die geringe Erfahrung im praktischen Umgang mit diesem Messsystem zurückzuführen. Des Weiteren stellt die Plexiglasscheibe auf der Vorderseite des Modellraumes eine Herausforderung dar. Hier ist eine Einleitung vergleichbarer Kräfte nicht möglich. Die daraus resultierenden, stark unterschiedlichen Übertragungsfunktionen werden in der anschließenden ersten Auswertung anstatt der tatsächlichen Luftschallquelle als dominante Schallquelle gekennzeichnet und haben somit nicht zum gewünschten Ergebnis geführt, sondern dieses vielmehr verfälscht. Im Folgenden sind daher einige weitere Ansätze und Versuche für die experimentelle Ermittlung von Übertragungsfunktionen untersucht worden.

Die verschiedenen Messungen mit ihren jeweiligen Besonderheiten sind in Tabelle 2 dokumentiert. Die erste Messung beinhaltet einen einzigen Anschlag pro Messpunkt, wobei die jeweilige eingeleitete Kraft nicht überwacht worden ist. So ergeben sich Unterschiede von bis zu 830 [N] zwischen den Anschlägen verteilt über den gesamten Modellraum. Der erste Lösungsansatz ist eine Mittelung über zehn Anschläge pro Messpunkt, um die Ungleichheiten beim Anschlagen durch unerfahrene Anwender auszugleichen. Diese unterschiedlichen Anschlag-Varianten ergeben sich durch Veränderung der Körperhaltung, des Anschlagwinkels und der Position der Hand auf dem Griff. Es ist darauf geachtet worden, dass der Anwender die Anschläge in der immer gleichen Körperhaltung ausführt. Es sei darauf hingewiesen, dass dies gerade bei den Anschlägen auf der Oberseite des Modellraumes im Vergleich zu den seitlichen Komponenten nicht uneingeschränkt möglich gewesen ist. Die so erfassten Daten werden vor der Weiterverarbeitung gemittelt, so dass wiederum ein Eingangs- und Ausgangssignal pro Messpunkt verwendet werden kann. Auch diese Methode stellt keine Verbesserung bezüglich der großen Unterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten dar. Im dritten Versuch wird daher parallel zum Messsystem der GfAI das bereits erwähnte System PAK verwendet. Dieses bietet die Möglichkeit die eingeleitete Kraft unmittelbar auf dem Bildschirm anzeigen zu lassen. Auf Basis einiger zufällig verteilter Probeschläge wird ein Kraftbereich festgelegt, in welchem sich alle Anschläge befinden sollen. Zudem wird jeweils über drei Anschläge pro Messpunkt gemittelt. Hierbei ist anzumerken, dass eine alltägliche Anwendung dieses Messaufbaus und der entsprechenden Durchführung auf Grund des sehr großen zeitlichen Aufwandes nicht realisierbar ist. Dieser Versuch dient lediglich dazu, die möglichen einflussnehmenden Faktoren durch die unterschiedliche Krafteinleitung zu identifizieren und ihre Wirkung zu dokumentieren.

Messung	Messsystem	Beschreibung	Besonderheiten
1	GFaI	einzelne Anschläge	-
2	GFaI	pro Messpunkt zehn Anschläge pro Messpunkt	Mittelung der An- schläge
3	GFaI und PAK	3 Anschläge pro Messpunkt	Überprüfung der Krafteinleitung, Mittelung

Tabelle 2: Überblick der durchgeführten Untersuchungen mit dem Impulshammer am Modellraum

Gruppe	Krafteinleitung	Anzahl Messpunkte
1	430-481 [N]	69
2	403-537 [N]	86
3	285-537 [N]	90
4	120-950 [N]	90

Tabelle 3: Darstellung der verwendeten Gruppen von experimentell ermittelten Übertragungsfunktionen

Für die Auswertung und Validierung des Beamforming-Ansatzes werden daraus folgend vier verschiedene Gruppen (siehe Tabelle 3) von Übertragungsfunktionen gebildet, welche jeweils mit verschiedenen Algorithmen getestet und in unterschiedlichen Frequenzbereichen verglichen werden. Die erste Messung, bei welcher der Dynamikbereich der Krafteinleitung nicht unmittelbar überwacht worden ist, wird dabei in der vierten Gruppe dargestellt. Die erste bis dritte Gruppe stellt jeweils Übertragungsfunktionen dar, welche entsprechend ihres Dynamikbereiches bei der Krafteinleitung abgestuft worden sind.

## 3.5. Simulative Ermittlung von Übertragungsfunktionen

Für die Simulation müssen zunächst einige relevante Materialkenndaten des Modellraumes ermittelt werden. Dies wird mit einer Modalanlayse an einer Materialprobe in Form eines Balkens realisiert. Der Balken wird an einer Seite fest eingespannt und auf der anderen Seite mittels Shaker angeregt. Auf der Mittellinie des Balkens werden in äquidistanten Abständen fünf Beschleunigungsaufnehmer angebracht, dementsprechend wird eine eindimensionale Analyse durchgeführt. Ein weiterer Aufnehmer dient als Referenzmesspunkt unmittelbar an der Anregungsposition. Aus der Analyse ergeben sich die in Tabelle 4 dokumentierten Ergebnisse. Für die detaillierte Beschreibung

Mode	Frequenz [Hz]	Dämpfungsgrad [%]
1	39,729	1,13
2	$154,\!087$	$0,\!88$
3	167,202	1,59
4	$226,\!271$	$3,\!17$

Tabelle 4: Tabellarische Darstellung der ermittelten Moden an der Materialprobe des Modellraumes



Abbildung 5: Messaufbau der Modalanalyse für die Materialprobe

und Anwendungsbereiche der Modalanalyse sei auf Kokavecz (2010) verwiesen.

Aus den zuvor ermittelten Kennwerten wie Dichte  $\rho$ , Dicke d, Länge L des Balkens und der Resonanzfrequenz einer Mode  $f_n$  kann nun der Elastizitätsmodul bestimmt werden aus

$$E_{f_n,T} = \frac{12\rho L^4 {f_n}^2}{d^2 {C_n}^2} \tag{24}$$

wobei  $C_n$  eine je nach Mode n zu wählende Konstante darstellt. Nach den Untersuchungen von Oberst und Frankenfeld (1952) ist der Elastizitätsmodul von der Temperatur und der Frequenz abhängig.

Die so ermittelten Kennwerte werden in der Simulation eingebunden, um die Struktur des Modellraumes nachzubilden. Zudem dienen die bereits vorher generierten Daten des CAD-Modells als Grundlage für die Koordinaten des Gitternetzes auf der Oberfläche und der Positionen der Mikrofone des Arrays innerhalb des Raumes. Das die Oberfläche umschliessende mesh besteht aus 101800 Punkten. Die Simulation erzeugt nun eine Übertragungsfunktion zwischen jedem Punkt des mesh und jedem Mikrofon, so dass insgesamt 101800 \* 48 = 4886400, demnach etwa 4.8 Millionen Übertragungsfunktionen berechnet werden. Pro Mikrofon muss nun einen Datenvolumen von etwa 25 GB verarbeitet werden.

Der so erzeugte Output muss für die Weiterverarbeitung in ein MatLab-Format überführt werden. Bei einem bereits implementierten Ansatz aus einer vorangegangenen Masterarbeit wurden ähnlichen Daten aus einer Simulation bereits verarbeitet. Dieser Ansatz soll daher verwendet werden, um die simulierten Übertragungsfunktionen für das Beamforming in NoiseImage verfügbar zu machen.

Der erste Schritt ist dabei die bereits erwähnte Überführung der Daten in ein geeignetes MatLab Format, welcher mit einem relativ großen Rechenaufwand von etwa einer Woche realisiert worden ist. Das Kompilieren der entsprechenden MatLab Skripte für eine Verwendung in NoiseImage ist jedoch nicht erfolgreich durchgeführt worden. Die vorhandene MatLab-Umgebung weist zum einen Lücken in der Datenverarbeitung auf, die eine korrekte Formatierung unmöglich machen und ist zum anderen mit der Auswahl der experimentell ermittelten Übertragungsfunktionen nicht kompatibel. Daraus folgt entweder, dass die simulierten Daten mit neuen Berechnungsroutinen in das Format der Daten aus dem Experiment gebracht werden müssen, oder das Erzeugen einer zweiten Nutzeroberfläche, welche das Format der simulierten Transferfunktionen lesen und verarbeiten kann. Das Umschreiben oder die neue Erzeugung entsprechender Skripte geht allerdings über den gesetzten zeitlichen Rahmen hinaus. Daher muss an diesem Punkt von der Auswertung der simulierten Übertragungsfunktionen Abstand genommen werden.

# 4. Untersuchungen der Methode

## 4.1. Ansatz und Vorgehen

Die grundlegende Idee der vorliegenden Arbeit ist der Vergleich zwischen experimentellem Ansatz und Simulation. Aus den in Abschnitt 3.5 genannten Gründen können die simulierten Daten nicht ausgewertet werden. Daher steht die Validierung der Methode aus dem Experiment im folgenden Abschnitt im Vordergrund. Dazu wird der Modellraum zunächst mit einer Luftschall-, dann mit einer Körperschallquelle an verschiedenen Positionen angeregt. Die beiden verschiedenen Quellen sollen mit der

Anregung	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$f_4$ [Hz]
Luftschall	20 - 10k	100 - 1k	1k - 3k	200 - 4,5k
Körperschall	20 - 10k	100 - 1k	1k - 3k	3k - 5k

Tabelle 5: Verwendete Frequenzgruppen für Luft- und Körperschall-Anregung bei der Untersuchung der Methoden

Implementierung von Übertragungsfunktionen in den Beamforming-Prozess lokalisiert werden können. Die Qualität der Schallquellenortung wird im nächsten Schritt mit beiden Methoden untersucht.

Für die Untersuchung werden entsprechend Tabelle 5 vier verschiedene Frequenzgruppen gebildet, da eine frequenzabhängige Veränderung der Güte der Quellenlokalisierung zu erwarten ist. Dabei werden für die Auswertung der Luft- und Körperschallanregung entsprechend der verwendeten Quelle teilweise unterschiedliche Frequenzen betrachtet. Zudem werden die Methoden mit verschiedenen Beamforming-Algorithmen getestet. Für den hierbei verwendeten Beamforming-Ansatz, das konventionelle Beamforming auf Basis der Kreuzspektralmatrix und der Manipulation des steering vectors, wird die Abkürzung CSM-Beamforming verwendet. Die verwendeten Berechnungsvarianten sind auf Grund der in Abschnitt 2.3 erläuterten Eigenschaften ausgewählt worden.

Die in Tabelle 3 auf Seite 25 erläuterten Gruppen von Übertragungsfunktionen stellen ebenfalls einen Parameter für Auswertung dar. Dies gilt allerdings ausschließlich für die experimentell ermittelten Übertragungsfunktionen. Für eine zukünftige Auswertung der simulierten Übertragungsfunktionen erfolgt keine Einteilung in verschiedene Gruppen, da hierbei keine manuelle Krafteinleitung erfolgt.

#### 4.2. Anregung mit Luftschall

Als Luftschallquelle dient eine Volumenschallquelle mit den Parametern nach Siemens LMS International (Zugriff am 03.08.2016). Für den Versuch werden zwei kreisrunde Öffnungen in die Seitenwände des Modellraums gefräst, welche mittels Stopfen und Gummidichtung wieder verschliessbar sind. So kann der Schallaustritt der schlauchförmigen Volumenschallquelle nahtlos an der Innenseite des Modellraumes platziert werden. Die ausgewählten Positionen entsprechen einzelnen Messpunkten des Impulshammer-Versuches, so dass für den Ort der gesuchten Quelle unmittelbar eine Übertragungsfunktion zur Verfügung steht und sich eine Verbesserung der Lokalisie-



Übertragungsfunktion

Abbildung 6: Matrixdarstellung der durchgeführten Untersuchungen

rung unmittelbar auf das Hinzunehmen der Übertragungsfunktion zurückführen liesse.

Der Modellraum wird mit einem Sinus-Sweep zwischen 200-4500 Hertz angeregt, da die vorhandene Schallquelle hier ein lineares Verhalten von  $\pm 2dB$  bis 5000 Hertz liefert. Für höhere Frequenzen wird eine Erweiterung (*Q-MHF-wide*) benötigt, welche für die Untersuchung nicht vorliegt. Da jedoch im Fahrzeuginnenraum nicht mit Frequenzen oberhalb von 5000 Hertz gerechnet wird, reicht dieser Frequenzbereich für einen realitätsnahen Versuch aus. Das Signal wird jeweils einmal abgespielt und mit dem 48-kanaligen Mikrofonarray aufgezeichnet.

Es wird bereits während der Messung deutlich, dass der Modellraum sehr dominante Raummoden ausbildet, die in Form von deutlich hörbaren Verstärkungen des Signals von aussen wahrnehmbar sind.

#### 4.3. Anregung mit Körperschall

Ein Shaker des Typs B&K 4824 mit den nach Brüel & Kjær (Zugriff am 03.08.2016) dokumentierten Kennwerten dient als Körperschallquelle. Das System wird ebenfalls an verschiedenen Positionen mit bekannter Übertragungsfunktion angebracht. Zudem werden sechs weitere Messpunkte im Umkreis eines bekannten Messpunktes ausgewählt, welche im Vorfeld nicht mit dem Impulshammer angeschlagen worden sind und für die somit keine direkte Übertragungsfunktion zur Verfügung steht.



Abbildung 7: Darstellung der Messpositionen, Volumenschallquelle (blau) und Shaker (grün) auf Fläche 1 (links) und auf Fläche 2 (rechts)

Der Shaker wird jeweils fest an der Oberfläche des Modellraumes angebracht. Hierbei ist zu beachten, dass die Unterkonstruktion des Modellraumes bei zu hoher Amplitude und Frequenz ebenfalls angeregt worden ist und somit der ganze Raum sichtbar in Schwingung versetzt worden ist. Da jedoch eine punktuelle Anregung für diesen Versuch gewünscht ist, wird die Frequenz auf 4 Hz festgelegt und die Verstärkung soweit herab geregelt, dass keine sichtbare Schwingung des Raumes zu sehen ist. Die Aufzeichnung des Signals erfolgt wiederum mit dem 48-kanaligen Mikrofonarray im Innenraum über einen Zeitraum von 30 Sekunden.

## 5. Ergebnisse und Vergleich der Methoden

Der folgende Abschnitt dokumentiert die Auswertung der durchgeführten Untersuchungen. Die verschiedenen Algorithmen werden anhand der erläuterten Frequenzgruppen in Hinblick auf ihre Qualität bei der Schallquellenlokalisierung getestet. Um eine Tendenz hinsichtlich des Verbesserungspotentials der eingebundenen Übertragungsfunktionen zu erhalten, werden die Ergebnisse jeweils mit den Berechnungen ohne Übertragungsfunktionen verglichen.

#### 5.1. Ergebnisse des experimentellen Ansatzes

Es folgt ein Überblick der Ergebnisse aus den untersuchten Algorithmen im Zusammenhang mit den experimentell ermittelten Übertragungsfunktionen. Dabei wird zunächst zwischen der Anregung mit Luft- oder Körperschall unterschieden und die verschiedenen Gruppen von Übertragungsfunktionen unabhängig voneinander betrachtet. Abschließend werden die verwendeten Varianten miteinander verglichen.

# 5.1.1. Variante A: Gruppe 1 der Übertragungsfunktionen, alle Algorithmen, alle Frequenzgruppen

Beim CSM-Beamforming ohne weitere Modifikationen ist die tatsächliche Quelle in keiner Frequenzgruppe sichtbar. Zwischen 1000-3000 Hz sind einzelne Pegelerhöhungen sichtbar, welche sich jedoch nicht auf die tatsächliche Schallquelle beziehen. Verwendet man die SCOT-/PHAT-Gewichtung mit dem CSM-Beamforming wird die tatsächliche Schallquelle eindeutig lokalisiert, zwischen 20-10000 Hz sind allerdings noch weitere Quellen mit dem gleichen Pegel markiert. In der dritten und vierten Frequenzgruppen wird die Schallquelle jeweils ohne die Darstellung weiterer potentieller Quellen eindeutig lokalisiert. Allerdings weist die Schallquelle bei der SCOT-Gewichtung nur einen Pegelunterschied von 1 dB gegenüber ihrer Umgebung auf. Bei bekannter Position kann dies ein eindeutiger Hinweis sein. Kennt man jedoch den Ursprung der Quelle nicht, wird eine Entscheidung auf Basis eines solch geringen Pegelunterschiedes schwer fallen. Im tieferen Frequenzbereich zwischen 100-1000 Hz ist mit beiden Varianten keine Lokalisierung möglich.

Ebenso lässt sich die originale Schallquelle in diesem tiefen Frequenzbereich bei keinem anderen der untersuchten Algorithmen lokalisieren. Im breiten Frequenzband von 20-10000 Hz weisen MUSIC und self-consistent MUSIC sehr gute Lokalisierungseigenschaften auf, während bei Robust Capon und Clean-SC mehrere Schallquellen dargestellt werden, welche jeweils als gleich dominant dargestellt sind und somit keine korrekte Lokalisierung möglich ist. Diese Beobachtung setzt sich für die beiden weiteren Frequenzgruppen fort.

Vergleichbar mit der Anregung durch die Volumenschallquelle kann auch der Ursprung der Shaker-Anregung mit keinem der verwendeten Algorithmen zwischen 100-1000 Hz lokalisiert werden. Dies gilt ebenso für das CSM- und Robust Capon Beamforming im Frequenzbereich von 20-10000 Hz. Für die Frequenzgruppe zwischen 3000-5000 Hz





Abbildung 8: Ergebnis des CSM-Beamformings mit PHAT-Gewichtung zwischen 1000-3000 Hz für die Volumenschallquelle auf der Vorderseite



Abbildung 9: Ergebnis des CSM-Beamformings mit SCOT-Gewichtung zwischen 1000-3000 Hz für die Volumenschallquelle auf der Vorderseite





Abbildung 10: Ergebnis mit Robust Capon zwischen 1000-3000 Hz für die Volumenschallquelle auf der Vorderseite



Abbildung 11: Ergebnis mit Clean SC zwischen 1000-3000 Hz für die Volumenschallquelle auf der Vorderseite



Abbildung 12: Ergebnis des MUSIC Algorithmus zwischen 3000-5000 Hz für den Shaker auf der rechten Seite (Fläche 2)

ergibt sich eine Besonderheit: es wird eine dominante Schallquelle dargestellt, welche jedoch nicht der tatsächlichen Anregung entspricht, und zudem ergibt sich eine kreisrunde Anordnung mehrerer Quellen an der linken Seitenwand des Modellraumes. Dieser Effekt ist bei allen Algorithmen zu beobachten. In den weiteren betrachteten Frequenzgruppen werden jeweils mehrere Quellen von allen Berechnungsvarianten lokalisiert von denen jedoch keine der tatsächlichen Anregung entspricht. Hierbei ist zu erwähnen, dass alle weiteren Varianten die gleichen Ergebnisse bei der Validierung der Körperschall-Anregung aufweisen und daher im Folgenden die hier dokumentierten Ergebnisse nicht für jede Variante wiederholt werden.

#### 5.1.2. Variante B: Gruppe 2 der Übertragungsfunktionen, alle Algorithmen, alle Frequenzgruppen

Mittels CSM-Beamforming kann die Quelle in keiner untersuchten Frequenzgruppen lokalisiert werden. Zwischen 1000-3000 Hz sind einzelne Erhöhungen erkennbar, von denen sich jedoch nicht auf die originale Anregung schließen lässt. Es ist denkbar, dass die ausgebildeten Raummoden auf der Oberfläche als Schallquelle dargestellt werden. Mit der Erweiterung durch die SCOT-Gewichtung wird der Ort der Anregung zwischen 20-10000 Hz und zwischen 1000-3000 Hz eindeutig identifiziert. Dabei werden je nach gewähltem Dynamikbereich weitere Quellen, welche sich jedoch um bis zu 4 dB von der originalen Quelle unterscheiden, dargestellt. Die PHAT-Gewichtung erzeugt ähnliche Ergebnisse, wobei der Pegelunterschied zwischen lokalisierter Schallquelle und der restlichen Oberfläche jedoch deutlich geringer bei maximal 2 dB liegt.



Abbildung 13: Ergebnis des self-consistent MUSIC Algorithmus zwischen 3000-5000 Hz für den Shaker auf der rechten Seite (Fläche 2)

Der MUSIC Algorithmus findet über alle untersuchten Frequenzen die richtige Umgebung der Schallquelle, eine exakte Lokalisierung wird mit der Berechnungsvariante self-consistent MUSIC erreicht. Mit Robust Capon und Clean SC kann keine Lokalisierung der originalen Anregung erfolgen. Hier werden über alle Frequenzen verschiedene Bereiche hervorgehoben, die jedoch in keinem Fall dem Ursprung der Anregung entsprechen.

#### 5.1.3. Variante C: Gruppe 3 der Übertragungsfunktionen, alle Algorithmen, alle Frequenzgruppen

Für das konventionelle CSM-Beamforming gibt es wiederum keine plausiblen Ergebnisse in keiner Frequenzgruppen. Bei der Gewichtung mit PHAT lassen sich bei involvierten höheren Frequenzen sichtbare Verbesserungen erkennen. Eine eindeutige Lokalisierung der ursprünglichen Quelle ist nicht möglich, jedoch wird die korrekte Umgebung gegenüber anderen Bereichen des Modellraumes eindeutig mit einem Pegelunterschied von bis zu 4 dB hervorgehoben. Die SCOT-Gewichtung deutet die Quelle durch leichte Pegelerhöhungen an, lässt jedoch keinen eindeutigen Rückschluss zu. Hierbei ist hervorzuheben, dass die genannten Erhöhungen in der Kartierung nur durch Verändern des angezeigten Dynamikbereiches gezeigt werden können. Der verwendbare Dynamikbereich muss für jede neue Frequenzgruppe angepasst werden, d.h. sowohl der untere als auch der obere Grenzwert sind nicht konstant, während die PHAT Variante verlässlich zwischen 90-110 dB reproduzierbare Ergebnisse liefert.





Abbildung 14: Ergebnis des MUSIC Algorithmus zwischen 1000-3000 Hz für die Volumenschallquelle auf der rechten Seite (Fläche 2)



Abbildung 15: Ergebnis des self-consistent MUSIC Algorithmus zwischen 1000-3000 Hz für die Volumenschallquelle auf der rechten Seite (Fläche 2)

Mittels Robust Capon oder Clean-SC kann die tatsächliche Schallquelle in keiner der untersuchten Frequenzgruppen lokalisiert werden. Im tieferen Frequenzbereich zwischen 100-1000 Hz ist eine Lokalisierung für alle verwendeten Algorithmen nicht möglich.

Der MUSIC Algorithmus erzeugt ähnlich wie die Variante der PHAT-Gewichtung ein gutes Ergebnis in allen Frequenzgruppen mit hochfrequenten Anteilen. Die korrekte Umgebung wird eindeutig hervorgehoben, wobei eine exakte Lokalisierung nicht realisiert werden kann. Mittels self-consistent MUSIC kann die Schallquelle zwischen 200-4500 Hz exakt lokalisiert werden. In den weiteren Frequenzgruppen werden zunächst mehrere Quellen kartiert, welche jedoch nach Anpassung des Dynamikbereiches ausgeschlossen werden können. So wird die reale Schallquelle in einem Dynamikbereich von 60-90 dB als einzig dominante Quelle dargestellt.

# 5.1.4. Variante D: Gruppe 4 der Übertragungsfunktionen, alle Algorithmen, alle Frequenzgruppen

Für das CSM-Beamforming gilt auch in dieser Variante, dass die tatsächliche Schallquelle in keiner Frequenzgruppe lokalisiert werden kann. Ebenso können mittels SCOTund PHAT-Gewichtung keine Quellen in der Frequenzgruppe von 100-1000 Hz gefunden werden. Auch die weiteren Algorithmen weisen kein hinreichend gutes Ergebnis in diesem tieffrequenten Bereich auf. Hier sind zwar einige größere Bereiche auf der Oberfläche um bis zu 2 dB lauter dargestellt, lassen jedoch keinen Rückschluss auf den Ursprung der realen Anregung zu. Die Berechnung mittels CSM und PHAT-Gewichtung resultiert in den beiden hochfrequenten Gruppen in einem eindeutigen Ergebnis ohne die Darstellung weiterer Quellen. Allerdings ist hier nur ein geringer Pegelunterschied von maximal 2 dB zwischen Quelle und der übrigen Oberfläche sichtbar. Die SCOT-Gewichtung kann die Quelle nicht eindeutig lokalisieren, zeigt jedoch im gleichen Dynamikbereich wie PHAT die korrekte Umgebung auf. In der breitbandigen Anwendung zwischen 20-10000 Hz findet SCOT keine Quelle, während mittels PHAT die unmittelbare Umgebung mit einem Pegelunterschied von bis zu 4 dB gegenüber der restlichen Oberfläche richtig geortet werden kann.

Der Clean SC Algorithmus lokalisiert die reale Schallquelle in den Frequenzgruppen mit hochfrequentem Anteil nicht oder lediglich geringer als weitere dominante Quellen, so dass eine eindeutige Ortung nicht möglich ist. Mittels Robust Capon kann die korrekte Quelle nur in der Frequenzgruppe zwischen 1000-3000 Hz gefunden werden.



MUSIC und self-consistent MUSIC bieten ein sehr gutes Ergebnis zwischen 20-10000 Hz und stellen die Umgebung der tatsächlichen Schallquelle in allen weiteren untersuchten Frequenzgruppen ebenfalls korrekt dar.

## 5.2. Beamforming ohne Übertragungsfunktionen

Für die Frequenzgruppe zwischen 100-1000 Hz kann die reale Volumenschallquelle von keinem der verwendeten Algorithmen lokalisiert werden. In den Gruppen mit hochfrequenten Anteilen weisen wiederum MUSIC und self-consistent MUSIC gute Lokalisierungseigenschaften auf, indem die korrekte Umgebung der tatsächlichen Schallquelle mit einer Dynamik von bis zu 5 dB gegenüber dem Rest der Oberfläche kartiert wird und keine weiteren Quellen dargestellt werden. So ist eine eindeutige Zuordnung möglich. Vor allem zwischen 20-10000 Hz ist eine eindeutige Identifizierung der tatsächlichen Anregung mit diesem beiden Berechnungsmethoden möglich.

Mittels Robust Capon und Clean-SC werden entweder jeweils mehrere Schallquellen identifiziert, so dass eine eindeutige Lokalisierung nicht möglich ist, oder die Kartierung zeigt weitere Bereiche als dominante Quelle an, welche nicht dem Ursprung der tatsächlichen Anregung entsprechen. Dieses Ergebnis ist in allen untersuchten Frequenzgruppen zu beobachten.

Das konventionelle Beamforming lässt weder mit noch ohne Erweiterung durch SCOToder PHAT-Gewichtung eine korrekte Quellenlokalisierung zu. In bestimmten Dynamikbereichen werden einige Teilflächen um bis zu 2 dB lauter angezeigt als die restliche Oberfläche, jedoch entspricht diese Markierung in keinem Fall dem Ursprung der realen Anregung.

Auch bei der Anregung mit dem Shaker kann die Quelle in der Frequenzgruppe zwischen 100-1000 Hz nicht lokalisiert werden. Mit dem CSM Algorithmus und der Erweiterung durch SCOT-/PHAT-Gewichtung kann die Anregung in keiner Frequenzgruppe identifiziert werden. Mit den weiteren Berechnungsmethoden werden jeweils mehrere Schallquellen kartiert, wobei jedoch keine der angezeigten Quellen der tatsächlichen Anregung entspricht. Die Schalleinleitung mit dem Shaker kann im Rahmen dieses Ansatzes mit keiner der untersuchten Varianten lokalisiert werden.

## 5.3. Vergleich der Methoden

Für die Anregung des Modellraumes mit der Volumenschallquelle lässt sich generell schlussfolgern, dass die verschiedenen Gruppen von Übertragungsfunktionen keinerlei Einfluss auf die Qualität der Lokalisierung haben. Die Untersuchungen der verschiedenen Gruppen mit den verwendeten Algorithmen in den unterschiedlichen Frequenzgruppen weisen die gleichen Ergebnisse auf. Ein Einfluss der unterschiedlichen Krafteinleitungen bei den Impulshammer-Schlägen auf die Qualität der Lokalisierung kann somit ausgeschlossen werden.

Mit der konventionellen Beamforming-Variante CSM, sowie in Verbindung mit der SCOT- und PHAT-Gewichtung lassen sich keine, bzw. keine eindeutigen Ergebnisse erzielen. Vor allem in der alltäglichen Praxis sind diese Berechnungsvarianten nicht zielführend wenn der Ursprung der Störschallquelle nicht bekannt ist. Je nach ausgewähltem Frequenzbereich werden die gleichen mögliche Schallquellen in unterschiedlichen Dynamikbereichen angezeigt und unterliegen somit der Gefahr nicht erkannt zu werden. In der Frequenzgruppe von 100-1000 Hz kann die tatsächliche Schallquelle von keinem der verwendeten Algorithmen lokalisiert werden. Zwischen 20-10000 Hz liefert die Berechnung mit PHAT-Gewichtung leichte Verbesserungen bei der Lokalisierung der Volumenschallquelle unter der Verwendung von Übertragungsfunktionen.

Vor allem der self-consistent MUSIC Algorithmus zeigt bei der Anregung mit der Volumenschallquelle großes Potential. Dieses Ergebnis wird allerdings auf die Verwendung bei höheren Frequenzanteilen begrenzt. Mittels MUSIC lässt sich reproduzierbar die korrekte Umgebung der Schallquelle lokalisieren, während Robust Capon und Clean-SC wiederum keine plausiblen Ergebnisse liefern.

Bei der Anregung mit dem Shaker kann keiner der verwendeten Algorithmen den korrekten Ursprung lokalisieren. Zumeist werden mehrere Schallquellen gleicher Quellstärke gefunden, welche jedoch in keinem der untersuchten Fälle dem Ort der ursprünglichen Anregung entsprechen. Die unregelmäßige Verteilung der dargestellten Quellen auf der gesamten Oberfläche lässt darauf schließen, dass die in den Raum eingebrachten Reflexionen stärker eingestuft werden als die eigentliche Anregung und somit als Schallquellen charakterisiert werden. Die reflexionsreiche Umgebung des Innenraumes bringt den hier untersuchten Ansatz an seine Performance-Grenze und lässt keine korrekte Schallquellen-Lokalisierung zu.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass verschiedene Algorithmen ab einer Frequenz von 1000 Hz die Volumenschallquelle gut und korrekt lokalisieren können und unter-



(a) Gruppe 1



(b) Gruppe 2



(c) Gruppe 3



(d) Gruppe 4

Abbildung 16: Vergleich der Ergebnisse aus self-consistent MUSIC zwischen 1000-3000 Hz mit den verschiedenen Gruppen von Übertragungsfunktionen für die Lokalisierung der Volumenschallquelle auf der Vorderseite





Abbildung 17: Ergebnisse des self-consistent MUSIC zwischen 1000-3000 Hz für die Lokalisierung der Volumenschallquelle auf der Vorderseite ohne Übertragungsfunktionen

halb dieser Frequenz keine reproduzierbaren Ergebnisse erzielt werden konnten. Daher werden die Ergebnisse der verwendeten Algorithmen über alle gemessenen Positionen für Frequenzen ab 1000 Hz im Folgenden in einer Ergebnismatrix zusammengefasst. Dabei wird ein Algorithmus mit O gekennzeichnet, wenn die Schallquelle an der korrekten Position und einem Dynamikbereich ab 5 dB korrekt lokalisiert werden konnte.

#### 5.4. Fehlerbetrachtung

Die verschiedenen Untersuchungen am Modellraum konnten nicht am gleichen Prüfstand oder an aufeinander folgenden Tagen durchgeführt werden. Das verwendete Holz ist gegenüber den damit einhergehenden Temperaturunterschieden nicht robust gewesen. Die vordere Seite hat sich sichtbar verformt, so dass die Tür nur mit hohem Kraftaufwand verschlossen werden konnte. Aus Sicherheitsgründen ist der Modellraum zudem auf einem Prüffeld auf Holzbalken platziert worden, so dass sich das Gesamtsystem aus Unterkonstruktion und darauf sitzendem Modellraum verändert hat. Das sich wiederholende, erneute Auf- und Abbauen der Messanordnung hat zu unterschiedlichen Mikrofonpositionen geführt, welche beim Fitting des 3D-Modells zu Schwierigkeiten führen können. Die Mikrofonpositionen, die zum generieren des verwendeten Satzes von Übertragungsfunktionen führen, müssen mit der Position der Mikrofone bei der tatsächlichen Messreihe bei einer Quellenortung übereinstimmen. Dies ist in exakter Position zu verschiedenen Messzeitpunkten kaum realisierbar. Somit müssen entweder jeweils neue Übertragungsfunktionen vor jeder Untersuchung ermittelt werden, oder

		Gesamtbewertung	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10	
		Fläche 2 Position 2	×	×	×	×	×	×	×	
		Fläche 2 Position 1c	х	×	×	×	×	х	х	
	gu	Fläche 2 Position 1b	х	×	×	×	×	х	×	
	all Anregu	Fläche 2 Position 1a	х	×	×	×	×	х	×	
	Körpersch	Fläche 2 Position 1	х	×	×	×	×	×	×	
		Fläche 1 Position 2	х	×	×	×	×	х	х	
ismatrix		Fläche 1 Position 1c	х	×	×	×	×	х	х	
Ergebn		Fläche 1 Position 1b	х	×	×	×	×	х	х	
		Fläche 1 Position 1a	×	×	×	×	×	×	×	
		Fläche 1 Position 1	×	×	×	×	×	×	×	
	l Anregung	Gesamtbewertung	0/2	0/2	2/2	2/2	2/2	0/2	0/2	
	Luftschal	Fläche 1 Position 2	×	×	0	0	0	×	×	
		Fläche 1 Position 1	×	×	0	0	0	×	×	
		Algorithmus	Delay and Sum	SCOT Gewichtung	PHAT Gewichtung	MUSIC	self-consistent MUSIC	Clean SC	Robust Capon	

O Quelle korrekt lokalisiert X Quelle nicht lokalisiert

> Die Positionen 1a, 1b und 1c entsprechen den Punkten um die Position 1, für welche keine direkte Übertragungsfunktion vorliegt.

Abbildung 18: Ergebnismatrix für die Schallquellen-Lokalisierung aller verwendeten Algorithmen ab 1000 Hz

es muss ein Korrekturfaktor in der Anwendung hinterlegt werden, welcher die entsprechenden Variablen der Mikrofonpositionen ausliest, vergleicht und das Fitting bei Bedarf anpasst. Die im Rahmen dieser Untersuchungen verwendeten Kombinationen aus Übertragungsfunktionen und Schallquellen stammen jeweils aus der gleichen Messreihe.

Bei der Körperschall-Anregung mit dem Shaker ist der komplette Modellraum inklusive seines Unterbaus sichtbar in Schwingung versetzt worden. Dadurch entstehen weitere, in diesem Fall nicht kontrollierbare Parameter des Abstrahlverhaltens des Raumes. Eine Identifizierung von möglichen Ursachen der ausbleibenden Verbesserung bei der Quellenortung wird somit deutlich erschwert. Es ist jedoch die deutliche Ausbildung des modalen Schallfeldes innerhalb des Raumes als hauptsächliche Ursache für die negativem Ergebnisse anzusehen. Die vorhergegangenen Arbeiten, insbesondere die Arbeit von Nau (in Druck), welche gute Lokalisierungsergebnisse nachgewiesen hat, beschäftigt sich mit Beamforming in modalen Schallfeldern im Fahrzeuginnenraum. Durch vorhandene Strukturen wie den Sitzen, der Boden- oder Türverkleidung, welche Schalldämmung und -absorption bewirken, werden viele reflektierende Anteile eliminiert. Zudem kann hier auf die Erfahrungswerte aus diesem Bereich zurückgegriffen werden. Das Team für die Strukturdynamik setzt sich täglich mit der Körperschallanregung von diversen Karosserien und Fahrzeugkomponenten auseinander, so dass das Verhalten dieser Objekte sehr genau bekannt und dokumentiert ist. Der Modellraum stellt für das Beamforming demnach eine extreme Situation im Hinblick auf vorhandene Reflexionen dar. Daher sind vor allem die nicht ausreichenden Ergebnisse bei der Anregung mit dem Shaker mit dieser Situation innerhalb des Raumes zu erklären.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 erläutert, muss bei der Verwendung von Mikrofonarrays im Besonderen das Phänomen des räumlichen Aliasing beachtet werden. Im hochfrequenten, jedoch hörbaren Bereich ist eine ausreichend große Anzahl von Mikrofonen und ein ausreichend großer Abstand zwischen diesen Sensoren kaum umsetzbar. Eine Lösung stellt lediglich die Begrenzung der Bandbreite dar. Des weiteren verstärkt sich der unkorrelierte Rauschanteil signifikant, je kleiner der Parameter kr wird, da die Robustheit des Mikrofonarrays mit sinkendem Parameter abnimmt. Hierbei wird die Wellenzahl mit k ( $k = \frac{1}{\lambda}$ ) bezeichnet, und der Array-Radius ist durch r beschrieben. Daraus folgt, dass der Rauschanteil bei gleich bleibendem Array-Radius zu tiefen Frequenzen hin ansteigt.

# 6. Zusammenfassung und Ausblick

#### 6.1. Beschaffenheit des Modellraumes

Der Modellraum wurde aus bereits vorhandenen Materialien erstellt, ohne deren Eigenschaften detailliert im Voraus zu betrachten. Die Recherche über die Materialkenndaten und die Modalanalyse wurden im Rahmen dieser Arbeit vornehmlich für die akustische Simulation durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass sich im Raum ein sehr starkes Modenfeld ausbildet, welches auch durch die Implementierung von Übertragungsfunktionen keine Verbesserung im Beamforming-Prozess erlaubt. Des Weiteren führt das Einbeziehen der Plexiglasscheibe für die Ermittlung der Übertragungsfunktionen zu keiner sinnvollen Änderung des Gesamtsystems. Das Anschlagen mit dem Impulshammer stellt hier eine große Herausforderung dar, da auf diesem Untergrund eine gleichmäßige Krafteinleitung nicht möglich war. Daher sollte eine solche Struktur zukünftig nicht in die Untersuchungen einbezogen werden.

Zudem sind die Öffnungen für die Luftschallquelle und eine alternative Halterung für das Mikrofonarray erst nachträglich eingebracht worden, so dass eine Wiederholung aller bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführten Messungen notwendig geworden ist. Das Verfahren und Umsetzen des Modellraumes in unterschiedliche Prüfstände bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen macht eine absolute Vergleichbarkeit der Ergebnisse unmöglich, zudem sich das verwendete Material unter den verschiedenen Temperatureinflüssen verformt hat. Bei einer erneuten Untersuchung sollte nicht auf diesen Modellraum zurückgegriffen werden, da dieser selbst relevante Parameter einführt, welche nicht kontrolliert werden können.

#### 6.2. Zusammenfassung der Ergebnisse

Vor allem im tiefen Frequenzbereich soll das Einbinden von Übertragungsfunktionen in den Beamforming-Prozess eindeutige Verbesserungen liefern. Dies kann jedoch durch die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit nicht aufgezeigt werden. Sowohl bei Anregung mit Luft- als auch mit Körperschall lässt sich die tatsächliche Schallquelle in der Frequenzgruppe zwischen 100-1000 Hz mit keinem verwendeten Algorithmus lokalisieren.

Bei mehreren Berechnungsvarianten, insbesondere beim CSM-Beamforming mit SCOTund PHAT-Gewichtung, werden die korrekte Umgebung der Schallquellen korrekt lokalisiert, allerdings jeweils nur mit sehr geringer Dynamik zwischen 0,5-2 dB, wobei die Ergebnisse aus der PHAT-Variante die größte Präzision bei der Lokalisierung aufweisen. Hierbei muss beachtet werden, dass der Ursprung der Schallquelle im vorliegenden Fall bekannt ist und die Kartierung somit als korrekt wahrgenommen werden kann. Bei vollkommen unbekanntem Ursprung kann mit solch geringen Unterschieden nicht unmittelbar auf eine Quelle zurückgeschlossen werden. Zusätzlich ist das Ergebnis der Kartierung abhängig von der Wahl des Dynamikbereiches bei der Darstellung.

Für die Luftschall-Anregung stellen insbesondere der MUSIC und self-consistent MU-SIC Algorithmus einen guten Ansatz dar. Vor allem im hochfrequenten Bereich wird die korrekte Schallquelle reproduzierbar lokalisiert. Hier arbeitet der self-consistent MUSIC sehr präzise und ist dem MUSIC Algorithmus bei der Lokalisierung der Volumenschallquelle überlegen. Robust Capon und Clean SC sind nach den durchgeführten Untersuchungen jeweils nicht in der Lage, eine korrekte Quellenortung unter reflexionsreichen Bedingungen durchzuführen.

Bei der Anregung mit dem Shaker konnte kein Ansatz die Quelle korrekt lokalisieren. Auch hier lässt sich sagen, dass die verschiedenen Gruppen von Übertragungsfunktionen keinen Einfluss auf das Ergebnis haben. Zusammenfassend ist keine signifikante Verbesserung zwischen dem Beamforming ohne Übertragungsfunktionen und den Ergebnissen nach der Implementierung des Ansatzes zu erkennen. Es bleibt festzuhalten, dass das Beamforming oberhalb von 1000 Hz vor allem mit dem self-consistent MU-SIC Algorithmus gute Lokalisierungsergebnisse liefert. Eine Verbesserung vor allem im tieffrequenten Bereich kann nicht erzielt werden.

# 6.3. Ausblick

Die Untersuchungen am Modellraum haben wie bereits erläutert nicht zum erwarteten Ergebnis geführt. In einem Folge-Projekt wird der zentrale Ansatz der Implementierung von Übertragungsfunktionen in den Beamforming-Prozess weiter verfolgt. Die experimentelle Ermittlung von Übertragungsfunktionen an einer aufsetzfertigen Fahrzeugkarosserie wird hierbei im Mittelpunkt stehen. Somit kann der hier untersuchte Ansatz unter realen Bedingungen validiert werden. Die Komplexität des Fahrzeuginnenraumes ist in der Einleitung durch die Arbeit von mehreren Autoren bereits beschrieben worden, allerdings ist nicht zu erwarten, dass sich hier wie die im Modellraum erfahrenen derart ausgeprägte Raummoden ausbilden. Somit ist die Erwartung einer Verbesserung der Schallquellen-Lokalisierung mittels beschriebenem Ansatz durchaus realistisch, vor allem, da diverse Untersuchungen wie in Abschnitt 1 beschrieben, das Potential dieser Methode eindeutig hervorheben.

Es muss dabei beachtet werden ,dass die Alltagstauglichkeit jeweils in Bezug auf die Art der Anregung, der Anzahl der Messpunkte und deren praxisnahe Auswahl gewährleistet ist. Die Zielvorstellung ist weiterhin, dass die experimentelle Erzeugung von Übertragungsfunktionen in eine umsetzbare Messprozedur eingefügt wird und damit die Schallquellen-Lokalisierung verbessert werden kann. Dabei sollen im Besonderen die bekannten Punkte der Einleitung von Störgeräuschen in die Karosserie Beachtung finden. Diese sind Entkopplungselemente und Lagerungen, der Unterboden, Radhaus und Radaufhängung für das Abroll- und Fahrgeräusch, sowie potentielle Öffnungen wie Fenster, Türen, Schiebedach oder Kofferraum. Erfahrungsberichte zeigen zudem, dass der Beifahrersitz erst in einem hohen Frequenzbereich Einfluss auf das Schallfeld im Fahrzeuginnenraum nimmt. Es kann daher in Betracht gezogen werden, diesen Sitz zu entfernen, um so Platz für das vorhandene größere 80-kanalige sphärische Mikrofonarray schaffen zu können. Dies ermöglicht die Abtastung größerer Frequenzbereiche ohne räumliches Aliasing.

Zudem ist zu empfehlen, die Einbindung der simulierten Übertragungsfunktionen in NoiseImage in einem Folge-Projekt zu realisieren, um den Vergleich zwischen Experiment und Simulation abschließend darstellen zu können. Auch die simulierten Übertragungsfunktionen eines Fahrzeuges können so zukünftig mit dem experimentellen Ansatz an der Karosserie verglichen werden.

## Literaturverzeichnis

- Bathelt, Hartmut et al. (2010): "Messung und Analyse." In: Klaus Genuit (Hrg.) Sound-Engineering im Automobilbereich (Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen). Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 205 316.
- Brüel & Kjær (Zugriff am 03.08.2016): "LMS Mid High Frequency Volume Source (Q-MHF) Flyer." https://www.plm.automation.siemens.com/de\_de/products/ lms/testing/qsources/mid-high-frequency-source.shtml.
- Chen, Joe C.; Kung Yao und Ralph E. Hudson (2003): "Acoustic Source Localization and Beamforming: Theory and Practice." In: *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2003:4 S. 359–370.
- Elko, G.W. und J. Meyer (2008): "Microphone Arrays." In: M. Mohan Sondhi und Yiteng Huang Jacob Benesty (Hrg.) *Springer Handbook of Speech Processing*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 1021–1041.
- Engel, Klaus et al. (2010): "Wesentliche Geräuschquellen im Fahrzeug und deren Charakterisierung." In: Klaus Genuit (Hrg.) Sound-Engineering im Automobilbereich (Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen). Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 205–316.
- Gannot, Sharon und Israel Cohen (2008): "Adaptive Beamforming and Postfiltering." In: Jacob Benesty; M. Mohan Sondhi und Yiteng Huang (Hrgs.) Springer Handbook of Speech Processing. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 945–978.
- gfai tech GmbH (Zugriff am 25.02.2016): "Software Noise Image." http://www.acoustic-camera.com/de/produkte/noiseimage.html.
- Haneda, Yoichi; Shoji Makino und Yutaka Kaneda (1994): "Common Acoustical Pole and Zero Modeling of Room Transfer Functions." In: *IEEE Transactions on Speech* and Audio Processing, Vol.2, No.2 S. 320–328.
- Henn, Herrmann; Gh. Reza Sinambari und Manfred Fallen (2008): Ingenieurakustik.
  4. überarbeitete und erweiterte auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner/GWV Fachverlage GmbH.
- Huang, Qinghua und Tong Wang (2014): "Acoustic source localization in mixed field using spherical microphone arrays." In: EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2014:90.
- Jaeckel, Olaf und Gunnar Heilmann (2006): "Transient Noise Source Localization." In: *Euronoise*, 38. Tampere, Finnland.
- Kammeyer, Karl-Dirk und Kristian Kroschel (2002): Digitale Signalverarbeitung (Filterung und Spektralanalyse mit MATLAB-Übungen). 5. durchgesehene und ergänzte auflage. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner.
- Kern, Marcus (2008): Ein Beitrag zur Erweiterung von Beamforming-Methoden. Dissertation, Technische Universität, Berlin.

- Klaus, Sonny (2015): Gewichtungsfunktion einer Optimal-Filterung zur Beurteilung der Luft- und Körperschallbeiträge bezüglich eines lokalisierten Schalldruckmaximums im Fahrzeuginnenraum. Masterarbeit, Universität Stuttgart/Daimler AG, Stuttgart.
- Kokavecz, Judith (2010): "Modalanalyse." In: Michael Möser (Hrg.) Messtechnik der Akustik. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, S. 499 536.
- Kreidl, Heinz und Prof. Ernst Pucher (2009): "Schallquellenortung an Fahrzeugen im Wandel der Zeit." In: Symposium Reifen und Fahrwerk, 7. Wien, Österreich.
- Kuhn, J.P. (1978): "Detection Performance of the Smooth Coherence Transform (SCOT)." In: Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP, Volume 3. Tulsa, Oklahoma.
- Kuttruff, Heinrich (2000): Room Acoustics. 4. Auflage. London, New York: Spon Press.
- Lang, Andreas (2012): Einführung in die Signalanalyse und digitale Signalverarbeitung. München: Müller-BBM VibroAkustik Systems GmbH.
- Meyer, Andy und Dirk Döbler (2007): "Dreidimensionale akustische Kartierungen mit kugelförmigen Mikrofonarrays." In: 33. Deutsche Jahrestagung für Akustik. Stuttgart.
- Michel, Ulf und Michael Möser (2010): "Akustische Antennen." In: Michael Möser (Hrg.) *Messtechnik der Akustik.* Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, S. 365–425.
- Mosher, John C. und Richard M. Leahy (1999): "Source localization using recursively applied and projected (RAP) MUSIC." In: *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.47, No.2 S. 332–340.
- Möser, Michael (2010): "Messung der Schallleistung." In: Michael Möser (Hrg.) Messtechnik der Akustik. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, S. 335–363.
- Möser, Michael (2012): *Technische Akustik.* 9. aktualisierte auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Nau, Clemens (2016): "Beamforming within the modal sound field of a vehicle interior." In: *Berlin Beamforming Conference*, BeBeC-2016-S9. Berlin.
- Nau, Clemens (in Druck): Beamforming in modalen Schallfeldern von Fahrzeuginnenräumen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RW-TH)/Daimler AG, Aachen/Stuttgart.
- Nau, Clemens; Johannes Klein; Werner Moll und Michael Vorländer (2015): "Analysis of the robustness of various advanced beamforming algorithms in comparison to the classical beamforming method when applied in reactive sound fields." In: 41. Jahrestagung für Akustik. Nürnberg.
- Nau, Clemens; Werner Moll; Martin Pollow und Michael Vorländer (2014): "Extension of traditional measurement methods in vehicle acoustics to the method of source localization in the vehicle interior." In: *Berlin Beamforming Conference*, BeBeC-2014-15. Berlin.

- Neugebauer, Uwe (2011): Entwicklung einer akustischen Kamera zur Analyse der Geräuschabstrahlung von Antriebsstrangkomponenten. Diplomarbeit, Technische Universität, Graz.
- Oberst, Hermann und Kurt Frankenfeld (1952): "Über die Dämpfung der Biegeschwingungen dünner Bleche durch fest haftende Beläge." In: Acta Acustica united with Acustica, Vol.2, No.4 S. 181–194.
- Pape, Lutz (2005): Vergleich robuster Mikrofonarrays. Diplomarbeit, Universität für Musik und darstellende Kunst, Graz.
- Poetter, Justus C. (2016): Evaluierung der Berücksichtigung von Übertragungsfunktionen im Beamformingprozess am Beispiel eines Fahrzeugersatzmodells. Bachelorarbeit, Technische Universität/Daimler AG, Berlin/Stuttgart.
- Reutter, Edzard (2014): Mehrkanalige Erfassung des Schallfeldes eines Fahrzeuginnenraumes. Bachelorarbeit, Hochschule Reutlingen/Daimler AG, Reutlingen/Stuttgart.
- Rudolf Rost Sperrholz GmbH (Zugriff am 21.06.2016): "Schalldämmplatten BA-RYVAM." http://rudolf-rost-sperrholz.de/unsere-werkstoffe-1/.
- Siemens LMS International (Zugriff am 03.08.2016): "LMS Mid High Frequency Volume Source (Q-MHF) Flyer." https://www.plm.automation.siemens.com/de\_de/ products/lms/testing/qsources/mid-high-frequency-source.shtml.
- Vorländer, Michael (2010a): "Digitale Signalverarbeitung in der Messtechnik." In: Michael Möser (Hrg.) Messtechnik der Akustik. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, S. 537–575.
- Vorländer, Michael (2010b): "Grundlagen der Fahrzeugakustik." In: Klaus Genuit (Hrg.) Sound-Engineering im Automobilbereich (Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen). Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 1 37.
- Welch, P.D. (1967): "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms." In: *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, Vol.15, No.2 S. 70–73.
- Werner, Martin (2012): *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB*. 5., durchgesehene und aktualisierte auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Zeller, Peter (2009): Handbuch Fahrzeugakustik (Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch). Wiesbaden: Vieweg + Teubner/GWV Fachverlage GmbH.

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt gegenüber der Fakultät I der Technischen Universität Berlin, dass die vorliegende, dieser Erklärung angefügte Arbeit selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der im Literaturverzeichnis genannten Quellen und Hilfsmittel angefertigt wurde. Alle Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind kenntlich gemacht. Ich reiche die Arbeit erstmals als Prüfungsleistung ein. Ich versichere, dass diese Arbeit oder wesentliche Teile dieser Arbeit nicht bereits dem Leistungserwerb in einer anderen Lehrveranstaltung zugrunde lagen.

#### Titel der schriftlichen Arbeit

Implementierung von Übertragungsfunktionen in den Beamforming Prozess zur Verbesserung der Schallquellen-Lokalisation im Fahrzeug-Innenraum

Verfasser

Gasper, Jessica

Betreuender Dozent Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Mit meiner Unterschrift bestätige ich, dass ich über fachübliche Zitierregeln unterrichtet worden bin und verstanden habe. Die im betroffenen Fachgebiet üblichen Zitiervorschriften sind eingehalten worden.

Eine Überprüfung der Arbeit auf Plagiate mithilfe elektronischer Hilfsmittel darf vorgenommen werden.

Unterschrift:

Ort, Datum:

# A. Verwendetes Messequipment

#### Empfänger

48-kanaliges sphärisches Mikrofonarray mit implementierter Kamera, http://www.acousticcamera.com/en/products/ microphone-arrays/sphere-48-35-ac-pro.html, (Zugriff: 23.03.20416)

#### Datenverarbeitung und aufnahme

mcdRec Data Recorder, http://www.acousticcamera.com/en/products/dataacquisition/data-recordermcdrec.html, (Zugriff: 23.03.20416)

Adapterbox ADCA100, http://www.acoustic-camera. com/en/products/accessories/ adapterbox-adca100.html, (Zugriff: 23.03.20416)

Müller BBM PAK MKII, http://www.muellerbbmvas.de/fileadmin/user\_upload/ vas/Broschueren/PAK\_MKII\_ HB1606.pdf, (Zugriff: 10.07.2016)











# Software und Messrechner

Software NoiseImage (Recording: V.5.4 / Auswertung: V.4.7. beta),http://media.optiodata.com/ catalog/category/M4800\_3.png, (Zugriff: 23.03.20416)

Software PAK V.5.8., https://www.th-koeln.de/mam/ downloads/deutsch/hochschule/ fakultaeten/fahrzeugtechnik\_ und\_produktion/tutorial\_ hammermessung.pdf, (Zugriff: 10.07.2016)

Dell Precision M4800, http://www.acoustic-camera. com/en/products/softwarenoiseimage.html, (Zugriff: 23.03.20416)

Signalgenerator Agilent 33210A,

http://sdpha2.ucsd.edu/Lab\_ Equip\_Manuals/hp\_33210a\_Data\_ Sheet.pdf, (Zugriff: 23.03.20416)

Schallquellen

Signalgeber,

und Verstärker











Technische Universität Berlin

> Brüel&Kjær Power Amplifier Type 2706, http: //www.surplustechmart. com/media/catalog/product/ cache/1/image/650x/ 040ec09b1e35df139433887a97daa66f/ 2/2/22680\_1\_.JPG, (Zugriff: 23.03.20416)



Siemens LMS Qsources Volumenschallquelle, http://www. plm.automation.siemens.com/ de\_de/products/lms/testing/ qsources/mid- high-frequencysource.shtml#lightview-close, (Zugriff: 23.03.20416)

Brüel&Kjær Modal Exciter Type 4824, http://www. bksv.com/Products/shakersexciters/modal-exciters/type-4824?tab=overview, (Zugriff: 23.03.20416)





PCB Piezotronics Model 086C03 ICP Impact Hammer, http://www.imi-sensors. com/contentstore/images/ PCB\_Corporate/Vibration/ Products/Photo/400/086C03. jpgt=635936862096046190, (Zugriff: 23.03.20416)



Tabelle 6: Verwendete Messmittel

# B. Programmablaufplan

Technische Universität Befin

