DLR-IB-FA-BS-2021-244

Synthese von Schalldruckverteilungen mittels einer Schallquellenmatrix

Masterarbeit

Moritz Prade

Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

MH-FA-56-FB03_v1.3

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2021-244

Synthese von Schalldruckverteilungen mittels einer Schallquellenmatrix

Zugänglichkeit:

Stufe 1 Allgemein zugänglich: Der Interne Bericht wird elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt. Falls vorhanden, ist je ein gedrucktes Exemplar an die zuständige Standortbibliothek und an das zentrale Archiv abzugeben.

Braunschweig, *April, 2022*

Der Bericht umfasst: 111 Seiten

Abteilungsleiter:
Prof. Dr. Hans Peter Monner

Autor:
Moritz Prade

Autor 2 / Betreuer:
Dr.-Ing. Malte Misol

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Vorwort

Dieser Forschungsbericht basiert auf der Masterarbeit „**Synthese von Schalldruckverteilungen mittels einer Schallquellenmatrix“** von Moritz Prade. Unterschiede zwischen Bericht und Arbeit bestehen hauptsächlich in einer Korrektur von Rechtschreibung und Grammatik, sowie einer Konkretisierung unpräziser fachlicher Formulierungen. Zudem wird der Bericht um einige Abbildungen und Anhänge ergänzt, welche aus zeitlichen Gründen der originalen Arbeit nicht beigefügt wurden. Das Synthesebegleitende Skript als elementares Ergebnis der Masterarbeit wird fortlaufend in Bezug auf Kompatibilität und Features erweitert und ist auf den Computern der Messwarte im Akustischen Transmissionsprüfstand Braunschweig abgespeichert.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Synthese einer Schalldruckverteilung mithilfe einer Schallquellenmatrix über einer schallharten Ebene im Akustischen Transmissionsprüfstand Braunschweig (ATB) untersucht. Der Bedarf nach einer Synthese verschiedener Schallfelder leitet sich aus dem Wunsch ab, Prüfkörper unter einsatznahen Bedingungen zu prüfen. Es kommt eine Matrix mit 109 funktionsfähigen, einzeln ansteuerbaren und individuell positionierbaren Kanälen zum Einsatz. Um die Synthese und die Vermessung des modellhaft vorgegebenen Schallfeldes zu ermöglichen, wird eine bewegliche Mikrofonkinematik mit 66 Mikrofonen konzipiert, welche einen Messbereich von $1320x800mm$ aufspannen. Es erfolgt eine Inbetriebnahme des Lautsprecherarrays im ATB und eine Optimierung der Schnittstelle zum Adapterfeld, welches die Lautsprechersignale über Schläuche zu den Ausgängen der Quellenmatrix leitet. Die Grundlagen der Schallfeldsynthese auf Basis von definierten Auto- und Kreuzleistungsdichtespektren werden hergeleitet und in einem Messbegleitenden Skript implementiert. Das Skript ermöglicht eine Simulation der gewählten Konfiguration von Schallquellenmatrix und Mikrofonkinematik. Es wird die Synthese eines vorgegebenen Verlaufs des Autoleistungsdichtespektrums an einer Mikrofonposition durchgeführt und mit der Simulation verglichen. Schließlich werden auf Grundlage der Simulation zwei geometrische Konfigurationen des Quellenarrays auf ihre Performance untersucht. Dazu wird die Modellbeschreibung einer turbulenten Grenzschicht (TBL) nach Corcos als Zielfunktion genutzt. Die Ergebnisse der Arbeit werden schrittweise dokumentiert und Vorschläge für die Verbesserung des Syntheseablaufs werden ausgearbeitet.

Abstract

This work shows an investigation towards the synthesis of a sound pressure distribution using a sound source matrix over a stiff plane utilizing the Sound Field Reproduction (SFR) technique in the acoustic transmission test chamber Braunschweig (ATB). The need for the reproduction of sound fields derives from the desire to evaluate thin structures under realistic conditions. A matrix of acoustic monopoles with 109 individually controllable and freely positionable outlets is used. In order to enable the synthesis and measurement of the modeled sound field, a movable microphone-array with 66 microphones is designed, which spans a measuring range of up to $1320x800mm$. The loudspeaker array is commissioned in the reverberant test chamber of the ATB and the interface to the adapter field is optimized. The adapter field routes the loudspeaker signals via hoses to the outputs of the source matrix. The basics of sound field synthesis based on defined auto and cross power density spectra are derived and implemented in a script accompanying the measurement. The script enables a simulation of the selected geometrical configuration of the sound source matrix relative to the microphone-array. A given trend of the power spectral density over frequency is synthesized at a microphone position and compared with the simulation. Finally, two geometric configurations of the source array are simulated and compared in terms of their performance in relation to the synthesis of the sound pressure distribution of a turbulent boundary layer (TBL) according to the model description by Corcos. The results of the work are documented step by step and suggestions for the improvement of the synthesis process are worked out.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ..... **II**
Kurzfassung ..... **III**
Abstract ..... **IV**
Inhaltsverzeichnis ..... **V**
Abbildungsverzeichnis ..... **VII**
Formelzeichenliste/-verzeichnis ..... **XI**
Liste der Abkürzungen ..... **XIII**
1 Einleitung ..... **- 1 -**
2 Grundlagen und Forschungsstand Schallfeldsynthese ..... **- 2 -**
2.1 Signaltheoretische Betrachtungen ..... - 2 -
2.2 Spektrale Beschreibung von Schallfeldern ..... - 6 -
2.2.1 Ebene Welle ..... - 6 -
2.2.2 Diffuses Schallfeld ..... - 8 -
2.2.3 Turbulent Boundary Layer ..... - 9 -
2.3 Theorie der diskreten Schallfeldsynthese ..... - 13 -
2.3.1 Computersimuliertes CROR-Schallfeld durch Meyer ..... - 13 -
2.3.2 Spektral definierte stochastische Schallfelder ..... - 15 -
2.4 Lautsprecherarray DLR Ausgangsituation ..... - 23 -
2.4.1 Aufbau des Lautsprecherarrays ..... - 23 -
2.4.2 Aufbau des Arrayadapters ..... - 24 -
2.4.3 Versuchsaufbau der CROR-Schallfeldsynthese ..... - 26 -
3 Gestaltung des Versuchsaufbaus ..... **- 30 -**
3.1 Konzeption einer Mikrofonkinematik ..... - 31 -
3.1.1 Konzeption des Mikrofonarrays ..... - 32 -
3.1.2 Auswahl der Mikrofone ..... - 33 -
3.1.3 Umsetzung der Verkabelung ..... - 42 -
3.1.4 Aufbau des beweglichen Ausgleichsmechanismus ..... - 43 -
3.2 Inbetriebnahme der Mikrofonkinematik ..... - 46 -
3.2.1 Einbau des Arrays ..... - 46 -
3.2.2 Inbetriebnahme der Portalkinematik im ATB ..... - 47 -
3.2.3 Anschluss an das Frontend ..... - 49 -
3.3 Inbetriebnahme Lautsprechermatrix im Hallraum ..... - 51 -
3.3.1 Schnittstellenoptimierung zwischen Lautsprechermatrix und dem Adapterfeld ..... - 51 -
3.3.2 Ausrichtung der Lautsprechermatrix und des Adapterfeldes ..... - 53 -
3.3.3 Vorschläge zur Optimierung der Ansteuerung der Quellenmatrix ..... - 55 -
4 Beschreibung des Analyse- und Syntheseablaufs zur Schallfeldsimulation ..... **- 58 -**
4.1 Initialisierung eines Projektes ..... - 59 -

4.2 Laden und diskretisieren der theoretischen spektralen Verläufe ..... - 62 -
4.3 Ermitteln der akustischen Frequenzgänge ..... - 63 -
4.3.1 Approximieren der Frequenzgänge für eine Simulation ..... - 63 -
4.3.2 Experimentelle Ermittlung der Frequenzgänge ..... - 66 -
4.4 Analyse der akustischen Eigenschaften des Quellenarrays ..... - 68 -
4.4.1 Analyse der experimentell ermittelten Frequenzgänge ..... - 70 -
4.4.2 Vergleich mit approximierten Frequenzgängen ..... - 72 -
4.5 Syntheseablauf des Druckfeldes ..... - 73 -
5 Untersuchung der Synthese eines TBL-Schallfeldes ..... - 75 -
5.1 Synthese des Autospektrums an einem Mikrofon ..... - 75 -
5.2 Simulation eines TBL über einem Array von Mikrofonen ..... - 79 -
5.2.1 Schlecht konditionierte Konfiguration ..... - 80 -
5.2.2 Gut konditionierte Konfiguration ..... - 84 -
5.3 Diskussion der Ergebnisse ..... - 87 -
6 Zusammenfassung ..... - 88 -
7 Ausblick ..... - 89 -
Literaturverzeichnis ..... - 91 -
Anhänge i

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Ausbildung räumlicher Korrelation ..... - 5 -

Abbildung 2: Korrelationsstruktur einer ebenen Welle ..... - 7 -

Abbildung 3: Korrelationsstruktur eines Diffusen Schallfeldes ..... - 9 -

Abbildung 4: Experimentell ermitteltes Autoleistungsdichtespektrum einer turbulenten Grenzschicht ..... - 10 -

Abbildung 5: Korrelationsstruktur einer turbulenten Grenzschicht nach Crocos ..... - 12 -

Abbildung 6: Schema für die Anordnung von Lautsprechern und Mikrofonen bei der Schallfeldsynthese ..... - 14 -

Abbildung 7: Diskretisieren eines Schallfeldmodells in einem Mikrofonraster von 10x10 Mikrofonen ..... - 16 -

Abbildung 8: Anzahl der notwendigen unkorrelierten Komponenten zur Reduktion des mittleren Fehlers um 10dB für das reproduzierte Schallfeld ..... - 20 -

Abbildung 9: Vergleich der Korrelationsstrukturen eines TBLs als Ergebnis theoretischer, simulatorischer und experimenteller Betrachtungen ..... - 22 -

Abbildung 10: CAD-Modell des im Hallraum stationierten Lautsprecherarrays ..... - 23 -

Abbildung 11: CAD-Modell des Arrayadapters ..... - 25 -

Abbildung 12: Transmissionsverlust für einen Versuchsaufbau mit Schalleinlassrichter und angeschlossenem Rohr ..... - 26 -

Abbildung 13: Experimentelle Anordnung bei der CROR-Schallfeldsynthese (Meyer) ..... - 27 -

Abbildung 14: Relativer Fehler bei der Reproduktion eines CROR-Schallfeldes (Meyer) . - 28 -

Abbildung 15: Versuchsaufbau von Algermissen bei der CROR-Schallfeldsynthese über einem Prüfkörper ..... - 29 -

Abbildung 16: integrierter Versuchsaufbau zur Schallfeldsynthese durch Elliot ..... - 30 -

Abbildung 17: Mögliche Konzepte für eine Umsetzung des Mikrofonarrays ..... - 33 -

Abbildung 18: Gewähltes Mikrofon für den Aufbau einer Mikrofonkinematik ..... - 34 -

Abbildung 19: Einbausituation der Adafruit Messmikrofone in einem pinhole-Adapter ..... - 35 -

Abbildung 20: Versuchsaufbau für Vergleichsmessungen der Messmikrofone mit dem Referenzmikrofon ..... - 36 -

Abbildung 21: Darstellung verschiedener untersuchter pinhole-Konfigurationen ..... - 37 -

Abbildung 22: Amplitudenverlauf des getesteten Messmikrofons mit verschiedenen Versionen der pinhole-Adapter ..... - 37 -

Abbildung 23: Phasenverläufe des getesteten Mikrofons mit den getesteten Adapterversionen ..... - 38 -

Abbildung 24: Amplitudenverläufe aller in der Kinematik verbauten Mikrofone ..... - 40 -

Abbildung 25: Amplitudenverlauf der gemittelten Korrekturfunktion ..... - 41 -

Abbildung 26: Verkabelung des Mikrofonrrays ..... - 42 -

Abbildung 27: Schema der am Array angreifenden Momente ..... - 44 -

Abbildung 28: Ausgleichsmechanismus des Mikrofonarrays ..... - 45 -

Abbildung 29: Verbindung der Z-Achse der Portalkinematik mit dem Mikrofonarray ..... - 48 -

Abbildung 30: Signalanschluss des Arrays an das Frontend ..... - 49 -

Abbildung 31: Versuchsaufbau vom Freifeldraum aus gesehen ..... - 50 -

Abbildung 32: Schematische Darstellung der Einlasstrichter am Adapterfeld ..... - 52 -

Abbildung 33: Fehlerhafte Ausrichtung der Trichterzeile zur Lautsprecherzeile ..... - 53 -

Abbildung 34: Finale Positionierung des Versuchsaufbaus auf der Hallraumseite ..... - 54 -

Abbildung 35: Anordnung des Mikrofonarrays um den Mittelpunkt des Lautsprecherarrays, wenn nur zwei Mikrofone pro Raumrichtung angegeben werden ..... - 60 -

Abbildung 36: Abbildung Zeitsignal mit Hallfahne und Referenzsignal mit Trigger ..... - 62 -

Abbildung 37: : Frequenzantwort am Auslass einer Adapterröhre als Ausgangspunkt der Approximation der Frequenzgangmatrix ..... - 65 -

Abbildung 38: Angenäherte Konfiguration welche bei der Ermittlung der Frequenzgänge zum Einsatz kam ..... - 69 -

Abbildung 39: Frequenzgang zwischen Lautsprecher 1 und ausgewählten Mikrofonen ... - 70 -

Abbildung 40: Geglätteter Frequenzgang zwischen dem Lautsprecher 1 und ausgewählten Mikrofonen ..... - 71 -

Abbildung 41: Maximal mit dem Lautsprecher 1 erreichbarer Schalldruck an ausgewählten Mikrofonpositionen ..... - 72 -

Abbildung 42: Vergleich der approximierten Frequenzgänge für verschiedene Kombinationen von Quelle und Mikrofon mit der experimentell ermittelten - 73 -

Abbildung 43: Untersuchte Konfiguration von Lautsprechern und 1 Mikrofon ..... - 76 -

Abbildung 44: Autospektrum als Produkt einer Simulation für ein einziges Mikrofon..... - 77 -

Abbildung 45: Experimentell ermitteltes Autospektrum für ein einziges Mikrofon ..... - 77 -

Abbildung 46: Vergleich des mittleren Quadratischen Fehlers des Autospektrums der experimentellen Ermittlung mit der Simulation..... - 78 -

Abbildung 47: Vergleich der Konditionszahlen der Matrix der Frequenzgänge zwischen der schlecht und der gut konditionierten Konfiguration ..... - 79 -

Abbildung 48: Autospektrum als Produkt einer Simulation für 66 Mikrofone..... - 81 -

Abbildung 49: Restfehler als Ergebnis einer Simulation für schlecht konditionierten Fall . - 82 -

Abbildung 50: Korrelationsstrukturen als Ergebnis einer Simulation mit ungünstigen geometrischen Parametern ..... - 82 -

Abbildung 51: Simulierte Korrelationsstrukturen für den schlecht konditionierten Fall an Punkten außerhalb der Mikrofonanordnung..... - 83 -

Abbildung 52: Simulierte geometrische Konfiguration des gut konditionierten Falls ..... - 84 -

Abbildung 53: Vergleich des Restfehlers zwischen der schlecht konditionierten und der gut konditionierten Konfiguration ..... - 85 -

Abbildung 54: Simulierte Korrelationsstrukturen für den gut konditionierten Fall an Punkten außerhalb der Mikrofonanordnung..... - 86 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Notwendige Quellendichte zur Erfüllung des gewünschten Fehlerkriterums .... - 21 -

Tabelle 2: Einstellungen der Portalkinematik für den Versuchsaufbau ..... - 47 -

Tabelle 3: Parameter der Schallfeldsynthese nach Corcos ..... - 75 -

Formelzeichenliste/-verzeichnis

Formelzeichen	*Einheit*	*Beschreibung*
K_{MAT}	$4{,}71\frac{V}{1}$	Kalibrierfaktor Referenzkanal
K_{REF}	$0.0226\ \frac{V}{Pa}$	Kalibrierfaktor Referenzmikrofon
P_0	Pa	Referenzdruck
S_{p_i,p_i}	$dB\ (ref.: P_0^2)$	Autoleistungsdichtespektrum
S_{p_i,p_j}	$dB\ (ref.: P_0^2)$	Kreuzleistungsdichtespektrum
f_s	Hz	Samplingfrequenz
k_0	$\frac{1}{m}$	Wellenzahl des Luftschalls
n_{BL}		Blocklänge eines digitalen Signals
r_x	m	Abstand in x-Richtung (Strömungsrichtung falls bei TBLs)
r_y	m	Abstand in y-Richtung
$u_{p_{i,j}}$	$Pa\ dB\ (ref.: P_0)$	Mikrofonsignalspektrum am Punkt i oder j
u_s	$V\ dB\ (ref.: P_0)$	Lautsprechersignalspektrum
$\vec{x}$		Vektor unkorrelierter weißer Rauschsignale
E		Erwartungswert
H		Hermetisch komplex Konjugiertes
r	m	Abstandsvektor
$\boldsymbol{G_{s,p}}$		Matrix der Frequenzgänge von den Lautsprechern zu den Mikrofonen
$\boldsymbol{I}$		Einheitsmatrix
$\boldsymbol{P}$		Optimale Filtermatrix
$\boldsymbol{\Xi}$		Matrix der Eigenwerte von $\boldsymbol{S}_{p_i,p_j}$
$\mathbf{V}$		Matrix der Eigenvektoren von $\boldsymbol{S}_{p_i,p_j}$

λ	m	Wellenlänge Luftschall
$L_{x,y}$	m	Korrelationslängen
$\alpha_{x.y}$		Konstanten im TBL-Model nach Corcos

Liste der Abkürzungen

AES/EBU	Standard zur Übertragung von Audiosignalen
ATB	Akustischer Transmissionsprüfstand Braunschweig
CROR	Contra Rotating Open Rotor
CSD	Cross Spectral Density/ Kreuzleistungsdichtespektrum
DFT	Diskrete Fouriertransformation
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
LSA	Lautsprecherarray
MADI	Standard zur Übertragung von Audiosignalen mit einer hohen Anzahl von Kanälen pro Anschluss
PSD	Power Spectral Density/ Autoleistungsdichtespektrum
RMS	Root Mean Square/ Quadratisches Mittel
SFR	Spatial Sound Field Reproduction Technique
TBL	Turbulent Boundary Layer/ turbulente Grenzschicht
WFS	Wave Field Synthesis/ Wellenfeldsynthese

1 Einleitung

Eine Aufgabe der Gegenwart ist es, den zunehmenden Luftverkehr mit den Herausforderungen der Klimakrise, sowie dessen Abhängigkeit von endlichen fossilen Brennstoffen, in Einklang zu bringen. Um dieses Ziel zu erreichen wird auf verschiedenen Feldern geforscht: von verbesserter Aerodynamik, über alternative Antriebskonzepte bis hin zu Verbund-Leichtbau. Ein Problem, welches es bei einigen vielversprechenden Konzepten zu lösen gilt ist eine Erhöhung der Lärmemission in den Innenraum und somit eine entschiedene Verringerung des Komforts. So haben zum Beispiel Leichtbaustrukturen aufgrund ihres geringen Massebelags und gleichzeitiger hoher Steifigkeit einen sehr hohen Abstrahlgrad. Der über die Außenhaut in die Kabine abgestrahlte Lärm kann verschiedene Quellen haben. So können sich zum Beispiel Vibrationen von Triebwerken über die Flugzeugstruktur ausbreiten oder aber Druckdifferenzen als Resultat turbulenter Verwirbelungen an der Außenhaut regen diese zum Schwingen an. Die sogenannte „Turbulente Grenzschicht“ oder „Turbulent Boundary Layer“(TBL) bildet sich als Resultat des hohen Geschwindigkeitsgradienten zwischen dem Flugzeug und der umgebenden Luft.

Die Wirksamkeit der klassischen passiven Dämpfungsmaßnahmen ist im Falle der Luftfahrt sowohl durch die zusätzlich eingebrachte Masse, als auch durch das benötigte Volumen begrenzt. Dabei sinkt die Effektivität passiver Luftschalldämmung, wenn deren Ausdehnung im Verhältnis zur zu dämmenden Wellenlänge gering wird. Daraus leitet sich der Anspruch ab, die passiven Maßnahmen durch aktive Schallreduzierung, welche sich als besonders effektiv bei tiefen Frequenzen und gleichzeitig minimalen Materialaufwand erwiesen hat, zu ergänzen. Dazu wird zum Beispiel durch Kokott [1] an einer Strukturschallbarriere auf Basis der Strukturintensität geforscht. Um die Effektivität sowohl aktiver als auch passiver Maßnahmen zu bewerten, bedarf es reproduzierbarer experimenteller Setups die den Eigenschaften des späteren Einsatzbereiches möglichst nahekommen. Dazu kommt am DLR dem akustischen Transmissionsprüfstand Braunschweig (ATB) besondere Bedeutung zu. Ein solcher Prüfstand ermöglicht zuverlässige Messungen der von einer Struktur transmittierten Schallintensität in Abhängigkeit von einer Eingangsgröße. Jedoch sind klassisch lediglich zwei Belastungsfälle umsetzbar, nämlich entweder ein diffuses Schallfeld oder eine Anregung der zu prüfenden Struktur durch einen Shaker. Wünschenswert wäre es auch alternative Belastungen wie ein TBL-Druckfeld mithilfe einer Matrix an Schallquellen zu synthetisieren, um so die anwendungsnahe Prüfung moderner Schall-Reduktions-Maßnahmen zu ermöglichen. Im Vergleich zu Windkanal- oder Flugversuchen ist dabei eine deutliche Reduktion des Aufwandes sowie eine höhere Flexibilität beim Einstellen der Belastungsparameter absehbar.

2 Grundlagen und Forschungsstand Schallfeldsynthese

Luftschallfelder bezeichnen eine vom Ort und von der Zeit abhängige Schalldruckverteilung in einem betrachteten Luftvolumen. Ein einfachstes Schallfeld wäre zum Beispiel eine stehende Welle in einem Kundt'schen Rohr, welche wohlverstanden ist und mit analytischen Mitteln beschrieben werden kann. Andere Schallfelder sind hingegen deutlich schwerer mathematisch zu erfassen, da diese zum einen breitbandig über einen weiten Frequenzbereich ausgeprägt sind, zum anderen, etwa im Falle eines TBLs, einem chaotischen Prozess entspringen. Somit ist ein an einem Punkt des Schallfeldes gemessenes Signal stochastischer Natur. Solche Signale werden im allgemeinen als Rauschen bezeichnet.

Im Folgenden sollen die signaltheoretischen Grundlagen aufgezeigt werden, die zur Beschreibung stochastischer Schallfelder notwendig sind. Mithilfe dieser Grundlagen werden einige theoretische Schallfeldmodelle auf ihre Eigenschaften untersucht. Schließlich kann die Theorie der Reproduktion der durch diese Modelle beschriebenen Schallfelder durch diskrete Schallquellen nachvollzogen werden. Zum Abschluss des Kapitels wird die Ausgangssituation des DLR zum Thema der Schallfeldsynthese aufgezeigt. Dabei wird zum einen die Quellenmatrix näher beschrieben sowie die Synthese eines durch einen CROR-Antrieb hervorgerufenen Schallfeldes durch Meyer [2] und Algermissen [3] mithilfe der Quellenmatrix analysiert.

2.1 Signaltheoretische Betrachtungen

In diesem Kapitel sollen einige grundlegenden Begriffe geklärt werden, welche der Signaltheorie entspringen und bei der modellhaften Beschreibung komplexer Schallfelder unumgänglich sind. Zuvor sollen einige Randbedingungen erläutert werden, welche den in dieser Arbeit erläuterten modellhaften Schallfeldbeschreibungen zugrunde liegen. Da es sich bei den untersuchten Signalen um Schallsignale handelt, wird ein Gleichanteil vernachlässigt.

Stochastische und harmonische Signale:
Der Unterschied zwischen stochastisch und harmonisch charakterisierten Signalen oder Druckfeldern liegt in der Ausprägung ihres Spektrums begründet. Harmonische Signale lassen sich als Kombination diskreter Frequenzanteile analytisch beschreiben. Wichtige beschreibendende Eigenschaften sind die Amplituden der Frequenzanteile sowie deren Phasenbeziehungen untereinander. Stochastische Signale entspringen chaotischen Prozessen, welche physikalisch schwerer greifbar sind. Sie weisen im Vergleich zu den harmonischen Signalen einen kontinuierlichen spektralen Verlauf auf. Stochastische Signale lassen sich nur

eingeschränkt anhand diskreter harmonischer Komponenten annähern, da zwischen zwei Frequenzschritten immer eine unendliche Anzahl weiterer Frequenzen angenommen werden muss. Die Beschreibung stochastischer Signale erfolgt über ihren Erwartungswert, welcher für Schalldrucksignale als null definiert ist, und dem quadratischen Mittel (RMS), welches die Signalleistung wiederspiegelt. Diese Werte sind dabei stochastischen Schwankungen unterworfen, sodass eine Ermittlung theoretisch durch eine Betrachtung über einen unendlichen Signalverlauf oder in der Praxis über eine endliche Anzahl an Mittelungen erfolgt. Da Schallfelder mithilfe von Signalen charakterisiert werden, teilen sie auch deren inhärente Eigenschaften.

Zeitliche Stationarität:

Ein zeitlich stationäres Signal ändert sich über den gesamten betrachteten Zeitraum nicht in seinen beschreibenden Eigenschaften. Dies ist eine Modellannahme, die eine einfache Charakterisierung von Signalen und Schallfeldern anhand einer begrenzten Anzahl an Eigenschaften ermöglicht. Für physikalische Prozesse kann diese Eigenschaft schnell verletzt werden. So wird ein Flugzeug im Laufe eines Fluges, z.B. bei dem Start, der Landung oder wechselnden Wetterverhältnissen unterschiedlichen Ausprägungen der turbulenten Grenzschicht ausgesetzt werden.

Räumliche Homogenität:

Eine weitere Eingrenzung welche zur Beschreibung von Schallfeldern eingeführt werden soll ist die Forderung nach räumlicher Homogenität. Damit wird abgebildet, dass sich die beschreibenden Eigenschaften eines Schallfeldes nicht von der betrachteten Koordinate im Raum Abhängen. Zur Betrachtung räumlich variabler Eigenschaften komplexer Schallfelder müssen daher für gewöhnlich Simulationen durchgeführt werden. Eine vertiefende Eingrenzung räumlicher Homogenität ist die *Isotropie*, mit der die Richtungsunabhängigkeit der Eigenschaften eines homogenen Schallfeldes für eine einzelne Raumkoordinate bezeichnet wird. So ist etwa eine Ebene Welle nicht isotrop, da sich Eigenschaften in Ausbreitungsrichtung und quer dazu unterschiedlich sind. Dennoch ist sie homogen, da ihre Eigenschaften inklusive der Anisotropie nicht vom gewählten Betrachtungspunkt abhängen.

Autoleistungsdichtespektrum:

Das Autoleistungsdichtespektrum bzw. die Power Spectral Density (PSD) ist analog zum RMS-Wert eines Signals eine Charakterisierung des Leistungsgehaltes, jedoch in Bezug auf den Frequenzbereich. Somit ist es ein Maß für den Leistungsgehalt eines Signals pro Hertz. Im Gegensatz dazu bezeichnet das Autoleistungsspektrum den Leistungsgehalt pro aufgelösten Frequenzschritt einer diskreten Fouriertransformation (DFT). Letzterer Wert ist der Beschreibung harmonischer Signale dienlich, die einer oder einer Mehrzahl bestimmter

Frequenzen zugeordnet werden können. Für stochastische Signale mit kontinuierlichen Spektren ändert sich der Anteil an der Signalleistung pro Frequenzschritt in Abhängigkeit von der Frequenzauflösung der DFT. Daher bietet sich eine zusätzliche Normierung des Autoleistungsspektrums mit der Frequenzauflösung f_s an, um die PSD nach Gleichung ***(2.1)*** zu erhalten.

$$S_{p_i,p_i} = E\left[\frac{2}{f_s n_{BL}} u_{p_i} u_{p_i}^H\right] \tag{2.1}$$

Der Operator H bezeichnet das komplex konjugierte. Die PSD ergibt sich also als das einseitigen Mikrofonsignalspektrum u_p multipliziert mit dem eigenen komplex Konjugierten. Der Indizes i zeigt die Koordinate im Raum auf, an der gemessen wird.

Mittelt man das einfache Spektrum eines rein stochastischen Signals, so wird durch die zufällige Phasenverschiebung der Einzelmessungen zueinander immer ein Erwartungswert von Null über mehrere Einzelmessungen resultieren, auch wenn eine Signalleistung größer als Null im betrachteten Frequenzbereich vorliegt. Die PSD zur Beschreibung stochastischer Signale und Schallfelder hat hingegen den Vorteil, dass der Erwartungswert auch für stochastische Signale sich nicht auf null mittelt. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass im betrachteten Frequenzbereich eine Signalleistung größer als Null vorhanden ist. Allerdings geht bei der Bildung der PSD die Phaseninformation des ursprünglichen Signals verloren.

Kreuzleistungsdichtespektrum und Korrelation:
Das Kreuzleistungsdichtespektrum oder die Cross Spectral Density (CSD) ist im vorliegenden Fall ein spektrales Maß für den Anteil eines gemeinsamen Ursprungs zweier statistischer Signale. Zwei statistische Signale *korrelieren*, d.h. der Erwartungswert ihres Produktes ist ungleich null, wenn sie eine Ähnlichkeit aufweisen, welche in der Praxis durch einen gemeinsamen Ursprung eines Teils des Signals hergestellt werden kann. Die CSD wird nach Gleichung ***(2.2)*** definiert.

$$S_{p_i,p_j} = E\left[\frac{2}{f_s n_{BL}} u_{p_i} u_{p_j}^H\right] \tag{2.2}$$

Es ist ersichtlich, dass wenn $p_i = p_j$, dann gilt $u_{p_i} = u_{p_j}$ und somit $S_{p_i,p_j} = S_{p_i,p_i}$. Betrachtet man die *räumliche* Korrelation zweier Signale, dann bedeutet dies, dass die Spektren zur Bildung der CSD am gleichen Ort ermittelt werden und somit maximal korrelieren, da das exakt gleiche Signal gemessen wird. Es folgt, dass die PSD in der Definition der CSD enthalten ist. Andererseits können zwei Signale an weit entfernten Orten aufgenommen werden, sodass

deren räumliche Korrelation je nach Art des untersuchten Schallfeldes gegen Null strebt. Für stochastische Schallfelder kann somit eine räumliche Charakterisierung erfolgen, wenn aus diskreten Zusammenhängen zwischen zwei Messpositionen kontinuierliche funktionale Beschreibungen abgeleitet werden. Die Korrelation, beschrieben durch den Korrelationskoeffizienten, ergibt sich aus dem Kreuzleistungsdichtespektrum normiert mit dem Autoleistungsdichtespektrum. Daher ist dieser Koeffizient in einem Wertebereich von -1 bis 1 definiert, da der maximal mögliche Wert für ersteres gleich dem Autoleistungsdichtespektrum ist. Negative Werte des Korrelationskoeffizienten zeigen ein inverses Verhalten zweier Signale auf [14]. Ein Koeffizient von 0 beschreibt ein vollkommen unkorreliertes Verhalten.

In Abbildung 1 ist eine Möglichkeit schematisch dargestellt, wie die Ausbildung räumlicher Korrelationsstrukturen, oder spektral betrachtet eine schallfeldspezifische Verteilung der CSD, stattfinden kann. Die räumlich nahen Signale u_{p_1} und u_{p_2} werden von den beiden Schallquellen, welche die unkorrelierten Signale u_{s_1} und u_{s_2} abspielen, etwa im gleichen Verhältnis beeinflusst.

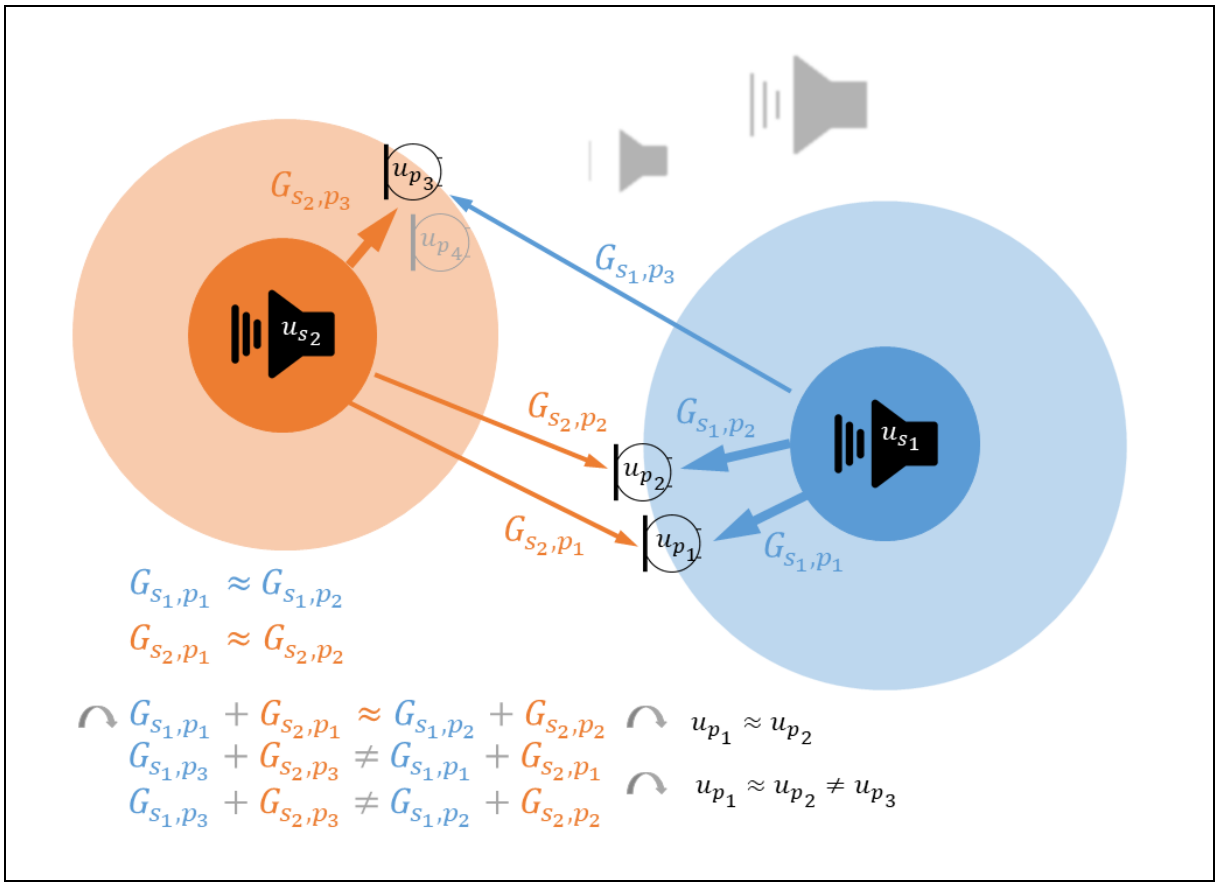


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Ausbildung räumlicher Korrelation

Der Grad der Beeinflussung ist durch den Frequenzgang $G_{s,p}$ gegeben, welche ein Quellsignal u_s mit einem Mikrofonsignal u_p ins Verhältnis setzt. Das Signal u_{p_3}ist im Vergleich weiter entfernt und wird Verhältnismäßig deutlich stärker von der Quelle s_{p_2}beeinflusst. Die Signale u_{p_1} und u_{p_2}weisen also eine große Korrelation zueinander auf und ihre CSD entspricht damit in etwa er PSD. Signal u_{p_3} weist zu den anderen beiden Signalen eine geringe Korrelation und somit eine geringe CSD auf. Wenn das Schallfeld räumlich homogen ist, wird es ein Signal u_{p_4} geben, für welches gilt: $u_{p_3} \approx u_{p_4}$ und $E\left[u_{p_1}u_{p_2}\right] = E\left[u_{p_3}u_{p_4}\right]$. Nimmt man in der Praxis nun statt gedachter diskreter Quellen und Mikrofonpositionen eine kontinuierliche Verteilung an, so erhält man einen Verlauf zwischen den maximal und minimal korrelierten Punkten eines Druckfeldes, womit dieses räumlich charakterisiert werden kann.

Frequenz-Wellenzahlspektrum:
Die definierenden Druckfluktuationen einiger Schallfelder, wie etwa die eines TBLs, basieren nicht vollständig auf akustischen Prozessen. Somit entstehen Korrelationsstrukturen welche nicht einer natürlichen Schallausbreitung, definiert durch die Schallgeschwindigkeit $c_{Luft} = 343{,}2\frac{m}{s}$, entsprechen. Diese Druckfelder lassen sich auch mit dem Frequenz-Wellenzahlspektrum beschreiben, welches als räumliche Fouriertransformierte des abstandsabhängigen Verlaufs der CSD definiert ist [4, 5]. Mit dem Frequenz-Wellenzahlspektrum können räumliche Oszillationen im Verlauf der CSD als spektrale Peaks sichtbar gemacht werden.

2.2 Spektrale Beschreibung von Schallfeldern

Im Folgenden werden einige Schallfelder bzw. Druckfelder erläutert, deren Synthese in der gesichteten Literatur untersucht wurde. Es wird die Beschreibung des spektralen Korrelationsverlaufs über einer Grenzfläche angegeben. Eine Beschreibung über einer Fläche kann als ausreichendes Kriterium angesehen werden, da eine zukünftige Synthese im ATB über einem flächigen Prüfkörper durchgeführt werden soll.

2.2.1 Ebene Welle

Das Modell der ebenen Welle ist die einfachste Beschreibung eines Schallfeldes, welche in dieser Arbeit aufgegriffen wird. Betrachtet man eine flache Ebene auf die eine solche Welle eintrifft, so ergibt sich aus der resultierenden Schalldruckverteilung auch eine Beschreibung für das Kreuzleistungsdichtespektrum, welche Bravo [6] nach Gleichung ***(2.3)*** gibt. Der Winkel ϕ_L ist der Azimut, gibt also die Ausbreitungsrichtung der Welle koplanar zur Ebene an. θ_K ist

der Kippwinkel der Wellenfront im Verhältnis zum lotrechten Einfall auf die Ebene. Der Verlauf des Spektrums ist dann als Funktion der räumlichen Abstände r_x und r_y zwischen zwei Punkten gegeben.

$$S_{p_i,p_j}(r,\omega) = S_{p_ip_i}(\omega)e^{jk(r_x sin\theta_K\, sin\phi_L)}e^{jk(r_y sin\theta_K\, cos\phi_L)} \tag{2.3}$$

Abbildung 2 zeigt eine ausgeprägte harmonische Oszillation im Korrelationsverlauf einer Ebenen Welle. Die Wellenzahl zur Beschreibung dieser Oszillation ist abhängig vom Einfallswinkel θ_K, kann jedoch nicht größer als die Wellenzahl des Luftschalls $k_0 = \frac{\omega}{c_{Luft}}$ werden. Somit ist das Frequenz-Wellenzahl-Spektrum der ebenen Welle auf den akustischen Wellenzahlbereich beschränkt und kann als Schallfeld bezeichnet werden.

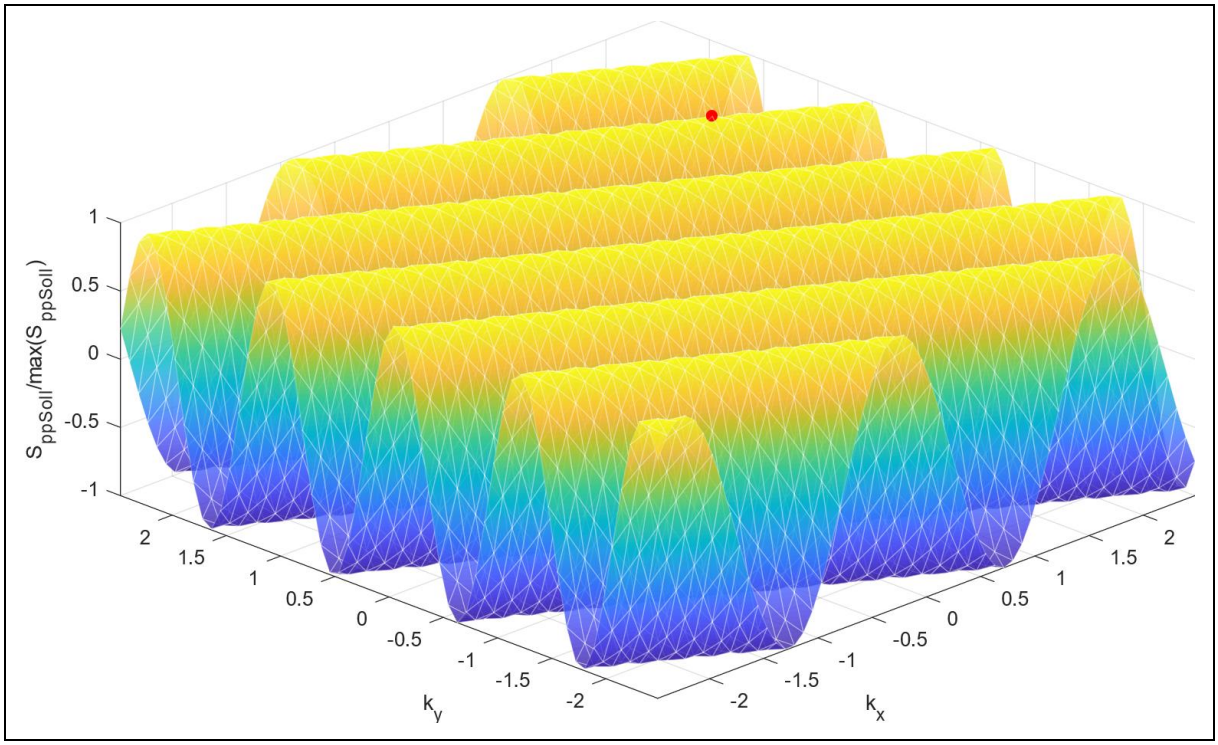


Abbildung 2: **Normalisierte räumliche Verteilung (Korrelationsstruktur) des Kreuzspektrums in Bezug auf einen markierten Punkt p_i für das Modell einer ebenen Welle ($\phi_L = 60°$, $\theta_K = 90°$)**

Die Ausbreitung einer idealen Ebenen Welle erfolgt harmonisch, mit gleichbleibender Intensität und in einheitlicher Richtung von einer gedachten Quelle aus entspringend. Da eine einzige solche Quelle zur Erzeugung eines homogenen Schallfeldes ausreicht sind auch keine unkorrelierten Signalanteile vorhanden und der Verlauf des Kreuzspektrums bleibt über den gesamten betrachteten Bereich konstant.

2.2.2 Diffuses Schallfeld

Wird ein schallharter Raum mit ausreichend stark reflektierenden Wänden einer breitbandigen Schallquelle ausgesetzt, so überlagert sich zum unreflektierten Direktschall dieser Quelle mit steigender Entfernung zunehmend ein diffuses Schallfeld. Dieses diffuse Schallfeld zeichnet sich dadurch aus, dass es keine Vorzugsrichtung für ein in einen Punkt eintreffendes Schallereignis gibt, sowie die Intensität eine gleichmäßige Verteilung im gesamten Raum aufweist. Ein solches Feld eignet sich gut für akustische Transmissionsmessungen da es, entsprechende Räumlichkeiten vorausgesetzt, leicht zu erzeugen ist und aufgrund seiner einfachen mathematischen Beschreibung gut für weiterführende Kalkulationen nutzen lässt. Das Synthetisieren eines diffusen Schallfeld mithilfe eines Quellarrays bietet dabei den Vorteil, dass man nicht an die untere Grenzfrequenz des Hallraumes gebunden ist bzw. ganz auf diesen verzichten könnte Maury [7].

Da ein solches Schallfeld auf festgelegten Annahmen besteht, welche ein Hallraum zu dessen Reproduktion möglichst genau erfüllen soll, ist die räumliche Korrelationsstruktur eines solchen Feldes eindeutig mathematisch beschreibbar. Cook [8] zeigt, dass die Beschreibung des Korrelationskoeffizienten gilt:

$$S_{p_i,p_j}(r,k) = \frac{\sin(kr)}{kr} \tag{2.4}$$

Multipliziert man diesen Koeffizienten, dessen räumlicher Verlauf der Korrelationsstruktur entspricht, mit einem gewünschten Autoleistungsdichtespektrum, so erhält man die Beschreibung des Kreuzleistungsdichtespektrums nach:

$$S_{p_i,p_j}(r,k) = S_{p_ip_i}(\omega)\frac{\sin(kr)}{kr} \tag{2.5}$$

Abbildung 3 zeigt, dass auch der Korrelationsverlauf eines diffusen Schallfeldes eine Oszillation aufweist. Im Gegensatz zur ebenen Welle nimmt deren Amplitude mit steigendem Abstand zum Punkt p_i jedoch ab, wobei die Korrelation gegen 0 strebt. Dies soll im Hallraum durch zahlreiche, sich überlagernde Reflexionen an Wänden und Diffusoren erreicht werden, welche aus unterschiedlichen Richtungen eintreffen und als unkorrelierte Quellen wirken. Eine deutliche Verbesserung der statistischen Eigenschaften eines so erzeugten Schallfeldes kann zum Beispiel durch den Einsatz mehrerer unkorrelierter Schallquellen, welche auf rotierenden Armen befestigt werden, erreicht werden.

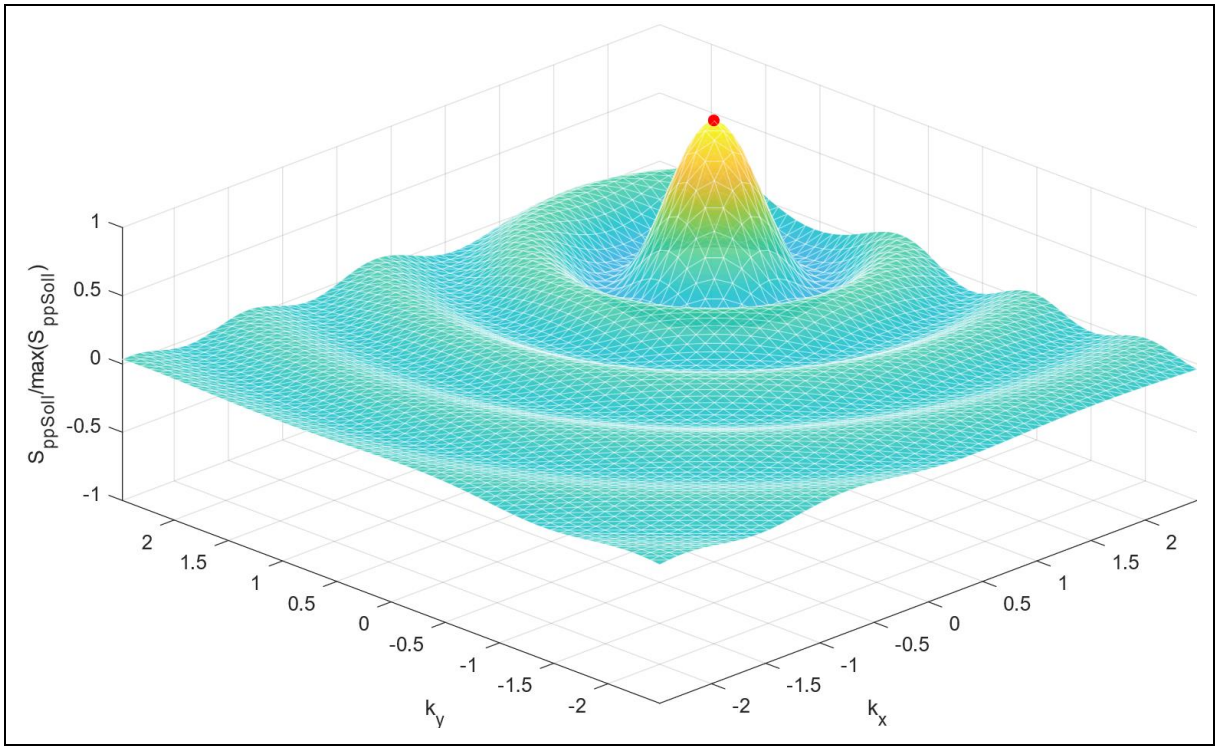


Abbildung 3: **Räumliche Korrelationsstruktur eines Diffusen Schallfeldes in Bezug auf einen rot markierten Punkt p_i**

Das Diffuse Schallfeld ist das einzige in dieser Arbeit aufgeführte Schallfeld welches in seinen Eigenschaften nicht nur homogen, sondern auch isotrop ist. Dies liegt im Richtungsunabhängigen Verlauf des Kreuzspektrums begründet.

2.2.3 Turbulent Boundary Layer

Die Wanddruckverteilungen eines TBLs sind im Gegensatz zum diffusen Schallfeld keine „Labor“-Druckverteilung, für das es eine feste analytische Definition des Kreuzspektrums gibt. Auch das Autoleistungsspektrum ist nicht beliebig, sondern folgt einer Funktion, die nicht zuletzt durch Flugbedingungen wie der Geschwindigkeit und Flughöhe beeinflusst wird. Da die physikalischen Grundlagen der Ausprägung turbulenter Strömungen komplex sind, wurden zu deren Beschreibung semiempirische Modelle entwickelt. Sie ermöglichen eine einfache, anwendungsnahe Voraussage der wichtigsten druckfeldbeschreibenden Größen. Die Ursprünge gehen dabei zurück bis in die 50er Jahre des letzten Jahrhunderts und die Modelle unterliegen einer ständigen Kontrolle und Weiterentwicklung. Miller [9] untersucht in ihrer Dissertation verschiedene Modelle für das Auto- als auch für das Kreuzleistungsspektrum von TBLs und bezieht sich dabei auch auf die Ausführungen von Graham [5]. Sie kommt zu dem Schluss, dass für das Autoleistungsspektrum das Modell von Goody und für das Frequenz-

Wellenzahlspektrum das erste Modell von Chase die beste Beschreibung für TBLs liefert. Ein besonders zugängliches und weit verbreitetes Modell, welches außerdem durch Miller untersucht wird, ist das Modell nach Corcos [10].

2.2.3.1 Verteilung des Autoleistungsdichtespektrums auf der Grenzfläche

Um die Forderung nach einer definierten Zielfunktion für die PSD einer Turbulenten Grenzschicht zu erfüllen, wurde auf durch Klabes [11] experimentell ermittelte Daten zurückgegriffen. Diese sind Produkt eines Flugversuchs mit dem ATRA Forschungsflugzeug des DLR. Abbildung 4 zeigt den Verlauf, welcher nur bis zu einer Frequenz von $100\ Hz$ gegeben ist. Daher wird das Spektrum zu den sehr tiefen Frequenzen als konstant extrapoliert.

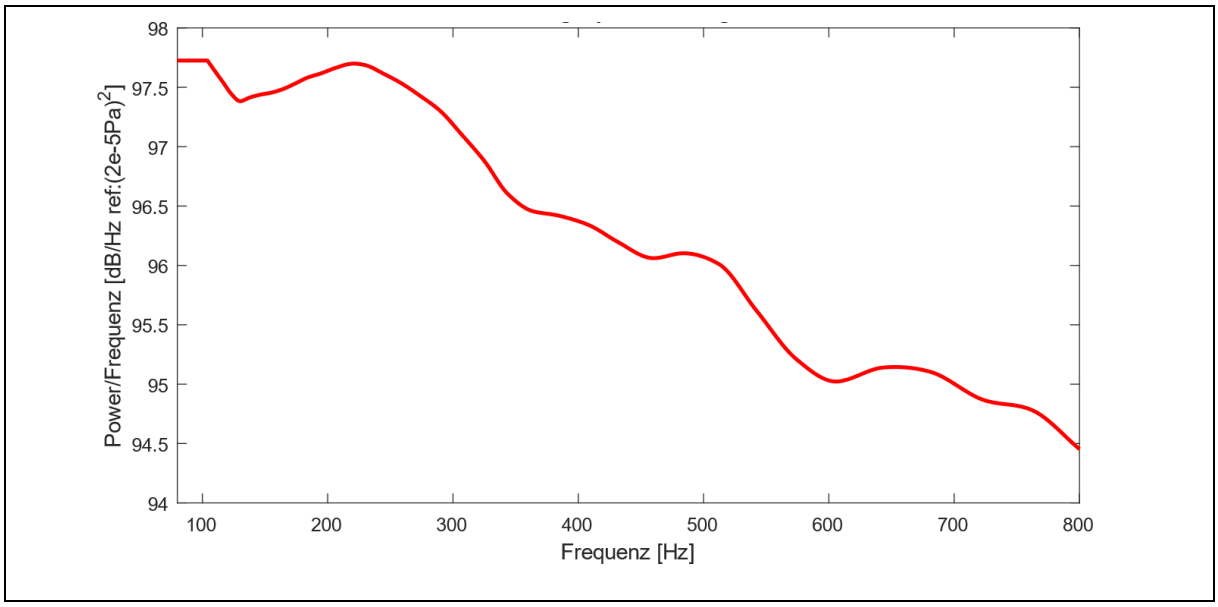


Abbildung 4: Experimentell ermitteltes Autoleistungsdichtespektrum[1] eines TBLs (Klabes[11]), interpoliert für einen Frequenzbereich von 100-800Hz

Die Verwendung dieses Spektrums als Ausgangspunkt hat sich in Bezug auf den Umfang dieser Arbeit als sinnvoll ergeben. Für zukünftige Betrachtung kann die eingehende Untersuchung und Implementierung verschiedener Modelle in das dieser Arbeit angehängte synthesebegleitende Skript erfolgen.

[1] Elektronisch ausgelesen mit „WebPlotDigitizer“: https://automeris.io/WebPlotDigitizer/ (Version 4.5 15.08.2021)

2.2.3.2 Verteilung des Kreuzleistungsspektrums auf der Grenzfläche

Chase's Modell basiert nicht direkt auf dem räumlichen Verlauf des Kreuzleistungsdichtespektrums, sondern auf dem abstrakteren Frequenz-Wellenzahl-Spektrum, welches sich als Fourier transformierte des Kreuzleistungsdichtespektrums vom Raum- in den Wellenzahlbereich definiert. An der Darstellung des Frequenz-Wellenzahl-Spektrums lassen sich, in Abhängigkeit von der Konvektionsgeschwindigkeit und der Biegewellengeschwindigkeit in der Struktur, Bereiche ausmachen, welche die Grenzfläche im besonderen Maße zum Schwingen anregen können, wie Shepherd [12] verständlich aufzeigt. Somit lassen sich Modelle entwickeln, welche die Auswirkungen des TBLs auf die begrenzende Struktur und zugleich deren Reaktion in Form von Schallabstrahlung in den Außen- und Innenbereich vorhersagen [9].

Für diese Arbeit wird im Anschluss an frühere Versuche zur Schallfeldsynthese in der Literatur das Schallfeldmodell nach Corcos gewählt. Dies ist besonders zugänglich, da es neben der räumlichen Auflösung lediglich von der Konvektionsgeschwindigkeit und zwei Konstanten abhängt. Zudem definiert Corcos, analog zu den zuvor behandelten Schallfeldmodellen, direkt einen räumlichen Zielverlauf für das Kreuzleistungsdichtespektrum. Es wurde darauf geachtet, dass der entwickelte experimentelle Ablauf zur Synthese von Schallfeldern in Zukunft eine einfache Integration verschiedener Schallfeldmodelle erlaubt. Der Verlauf des Kreuzspektrums nach Corcos wird von einer Mikrofonposition p_i auf der umströmten Oberfläche zu einer anderen Mikrofonposition p_j mit:

$$S_{p_i,p_j}\left(r_{x_{i,j}}, r_{y_{i,j}}, \omega\right) = S_{p_i p_i}(\omega) e^{-\left|r_{x_{i,j}}\right|/L_x} \; e^{-\left|r_{y_{i,j}}\right|/L_y} \; e^{-j\omega r_{y_{i,j}}/U_c} \qquad (2.6)$$

angegeben. Dabei ist r_x der Abstand senkrecht und r_y der Abstand parallel zur Strömungsrichtung zwischen beiden Punkten. $S_{p_i p_i}$ ist das Autoleistungsspektrum an dem Punkt, zu dem relativ das Kreuzleistungsdichtespektrum ermittelt werden soll. Ist der Abstand zwischen beiden Punkten Null, so entspricht das Kreuzspektrum dem Autospektrum. Wird der Abstand der beiden Punkte vergrößert, so fällt das Kreuzspektrum beider Signale exponentiell ab. Die Rate dieses exponentiellen Abfalls wird durch die Korrelationslängen, welche nach Gleichung *(2.7)* und *(2.8)* beschreiben werden, bestimmt.

$$L_x = \frac{\alpha_x U_c}{\omega} \qquad (2.7)$$

$$L_y = \frac{\alpha_y U_c}{\omega} \qquad (2.8)$$

Die Größen der Koeffizienten $\alpha_x = 1.2$ und $\alpha_y = 8$ werden analog zu Elliot [13] gewählt. U_c ist die Konvektionsgeschwindigkeit und wird für die nachfolgenden Betrachtungen mit $267{,}5\,\frac{m}{s}$ angenommen, was einer Machzahl von $0{,}78$ entspricht. Die exakte Machzahl bei der Durchführung des Flugversuchs kann der verwendeten PSD nicht mehr eindeutig zugeordnet werden. An dieser Stelle ist ersichtlich, dass im Gegensatz zum Diffusen Schallfeld ein TBL nicht isotrop ist, sondern eine Richtungsabhängig aufweist. Abbildung 5 zeigt die räumliche aufgelöste Funktion des Kreuzspektrums. In der Abbildung wurde eine Normalisierung der Amplitude mit dem Betrag des Autospektrums vorgenommen. Zudem sind die räumlichen Achsen mit der Wellenlänge λ normalisiert.

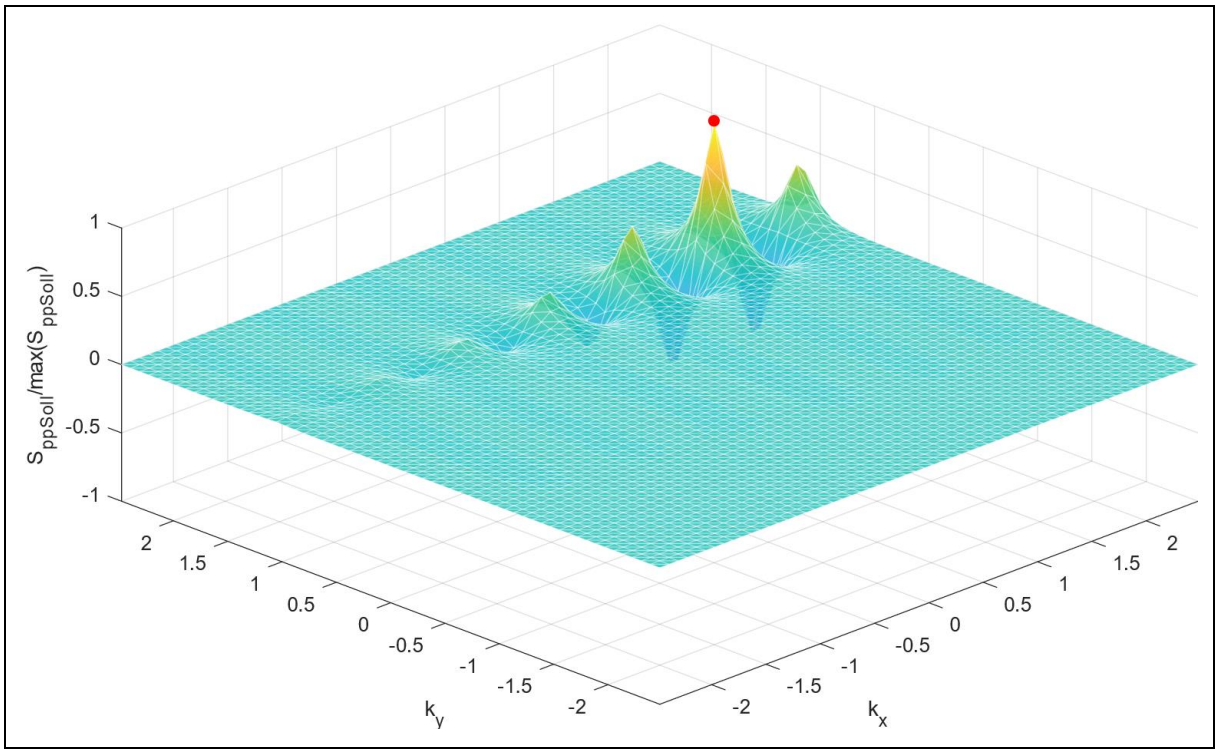


Abbildung 5: **Räumliche Korrelationsstruktur in Bezug auf einen rot markierten Punkt für das Modell eines TBLs nach Corcos ($\alpha_x = 1.2$, $\alpha_y = 8$, $U_c = 267{,}5\,\frac{m}{s}$)**

Es kann beobachtet werden, dass das Spektrum in Strömungsrichtung nicht ausschließlich exponentiell auf null abfällt, sondern in Flugrichtung x eine ausgeprägte Oszillation stattfindet. Unter Annahme normaler Flugbedingungen ist diese Oszillation kurzwelliger als die Wellenlänge des Luftschalls, was zusammen mit den sehr feinen Strukturen entgegen der Strömungsrichtung eine besondere Herausforderung bei der Synthese von TBL-Schallfeldern bedeutet [9]. Ein TBL ist also nicht rein auf den akustischen Wellenzahlbereich beschränkt und sollte daher eher als Druckfeld und nicht als Schallfeld verstanden werden.

2.3 Theorie der diskreten Schallfeldsynthese

Zur Synthese von Schallfeldern bestehen verschiedene Möglichkeiten, wie die Wellenfeldsynthese (WFS) und die Spatial Sound Field Reproduction technique (SFR) (Algermissen [3]). Die WFS erzeugt realitätsgetreue Wellenfronten im dreidimensionalen Raum, benötigt jedoch ein detailliertes Wissen über das Abstrahlverhalten der akustischen Quelle. Dieses Verfahren findet eher im Bereich der Auralisation Anwendung [15]. Für technische Anwendungen, spezieller der Reproduktion stochastischer Schallfelder, wurde die SFR jedoch schon von verschiedenen Autoren untersucht. Bei der SFR werden an diskreten Raumpunkten erwartete Drucksignale, charakterisiert durch die CSD-Matrix als Zielfunktion, durch ein Array an diskreten Quellen reproduziert. Die nötigen Anregungssignale lassen sich dann als Lösungen eines linearen Gleichungssystems ermitteln. Da bei der Untersuchung von Schalldämmmaßen für gewöhnlich flächige Körper zum Einsatz kommen, genügt eine Reproduktion der gewünschten Druckverteilung über einer beliebig geformten Ebene. Solange an dieser Grenzfläche die korrekte Druckverteilung erzeugt wird, kann das Druckfeld im restlichen Raum beliebige Werte annehmen. Daher wird für die weitere Betrachtung der Ansatz der SFR gewählt. Zuerst soll an dieser Stelle die Arbeit von Algermissen und Meyer am DLR aufgezeigt werden, die das harmonisch geprägte Schallfeld eines Contra Rotating Open Rotor (CROR) mithilfe des Lautsprecher-Arrays (LSA) ohne Arrayadapter synthetisiert haben. Schließlich werden die dazu aufgezeigten Ansätze um die Herausforderungen stochastischer Schallfelder erweitert.

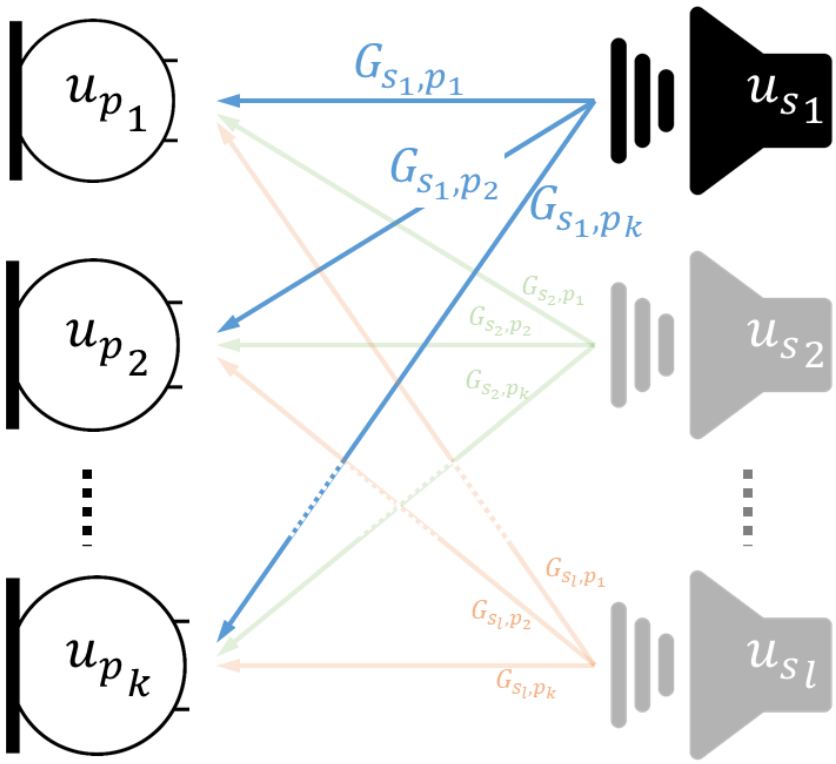
2.3.1 Computersimuliertes CROR-Schallfeld durch Meyer

Meyer synthetisiert mit der Quellmatrix Mikrofonsignale, welche Ergebnisse einer Simulation sind. Somit muss nicht auf semiempirische Modellvorstellungen zurückgegriffen werden, um einen spezifischen Einsatzfall anzunähern. Dabei wird das Druckfeld über einem Rumpfausschnitt unter dem Einfluss eines nummerischen CROR-Modells mithilfe einer Druckfeldsimulation gewonnen [3]. Dieses Druckfeld kann nun in der Simulation auf der Oberfläche des Rumpfausschnitts an den Positionen gemessen werden, an denen es später reproduziert werden soll. An den entsprechenden Stellen müssen dann im Experiment Mikrofone platziert werden, welche ein Messen der entsprechend synthetisierten Signale ermöglichen. Zuvor muss eine Vermessung des Arrays erfolgen um die Frequenzgänge zwischen den Eingangssignalen der Lautsprecher und den Mikrofonsignalen zu ermitteln. Sind die akustischen Eigenschaften des Versuchaufbaus bekannt, können Ansteuerungssignale für die Lautsprecher des LSA berechnet werden, welche das gewünschte Schallfeld an den Mikrofonpositionen erzeugen. Schließlich erfolgt die weitere Messung der synthetisierten Signale aus Kontrollzwecken.

Das Ergebnis der Vermessung des Versuchsaufbaus ist die Matrix der Frequenzgänge $\boldsymbol{G}$, welche den Vektor der zu reproduzierenden Mikrofonsignale $\vec{u}_{p_k}$ und den Signalvektor der Quellen des Lautsprecherarrays $\vec{u}_{s_l}$ nach Formel *(2.9)* miteinander verknüpft. Die Einträge der Zeilen dieser Matrix ergeben sich nach Abbildung 6 [2].

$$\vec{u}_{p_k} = \boldsymbol{G}_{s,p}\vec{u}_{s_l} \tag{2.9}$$

Die Matrix setzt sich aus den Frequenzgängen zwischen jedem Lautsprecher-Mikrofon-Paar zusammen, wobei jeder Frequenzgang die Modifikation des Signals, vom Einspeisen eines digitalen Audiosignals in einen Lautsprecher bis hin zum Erreichen eines Mikrofons, angibt.



$$\boldsymbol{G}_{s,p} = \begin{bmatrix} G_{s_1,p_1} & G_{s_1,p_2} & G_{s_1,p_3} & \cdots & G_{s_1,p_k} \\ G_{s_2,p_1} & G_{s_2,p_2} & G_{s_2,p_3} & \cdots & G_{s_2,p_k} \\ G_{s_3,p_1} & G_{s_3,p_2} & G_{s_3,p_3} & \cdots & G_{s_3,p_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{s_l,p_1} & G_{s_l,p_2} & G_{s_l,p_3} & \cdots & G_{s_l,p_k} \end{bmatrix}$$

Abbildung 6: Schema für die Anordnung von Lautsprechern und Mikrofonen bei der Schallfeldsynthese und deren Verknüpfung über die Matrix der Frequenzgänge $\boldsymbol{G}$

Es soll hinzugefügt werden, dass es sich bei $\boldsymbol{G}$ um eine komplexe Matrix handelt. Sie ordnet einem Lautsprecher-Inputsignal für jedes Mikrofon eine Veränderung der Amplitude und Phase im Bildbereich zu und das über jeden Lautsprecher und über alle betrachteten Frequenzen. Allgemein erfolgen alle Kalkulationen dieser Arbeit, sofern nicht explizit anders erwähnt, im Frequenzbereich. Die Frequenzabhängigkeit wird im Folgenden der Übersichtlichkeit halber nicht notiert.

Ist $\boldsymbol{G}$ bekannt, so ordnet sie also in erster Linie jedem Input in das LSA einen zugehörigen Output an den Mikrofonpositionen zu. In diesem Fall sind jedoch nicht die Eingangssignale, sondern die zu erzeugenden Mikrofonsignale als Produkt der Simulation bekannt. Demnach muss Gleichung *(2.10)* durch bilden der Pseudoinversen von $\boldsymbol{G}$ umgestellt werden, sodass die gesuchten Variablen nun die Inputsignale sind. Wandelt man diese Spektren nun mithilfe der inversen Fouriertransformation in Zeitsignale und spielt diese über die Lautsprecher ab, so stellen sich an den Mikrofonpositionen idealerweise die vorgegebenen Druckverläufe ein.

$$\vec{u}_{s_l} = \boldsymbol{G}^{\dagger}\vec{u}_{p_k} \tag{2.10}$$

Die Pseudoinverse $\boldsymbol{G}^{\dagger}$ wird genutzt, da für das resultierende lineare Gleichungssystem nur dann eine exakte Lösung besteht, wenn die Mikrofonanzahl gleich der Anzahl der Quellen ist. Die Pseudoinverse ermöglicht es also auch unterschiedliche Verhältnisse zu verwenden. Dabei existiert eine exakte Lösung weiterhin, solange die Anzahl der Quellen die der Mikrofone übersteigt. Übersteigt die Anzahl der Mikrofone hingegen die der Lautsprecher, so wird die pseudoinverse lediglich eine Approximation der Lösung ermöglichen, welche durch das genutzte Verfahren zur Bildung der Pseudoinversen definiert ist.

2.3.2 Spektral definierte stochastische Schallfelder

Werden semiempirische Modelle zur Schallfeldbeschreibung genutzt, so kann auf eine Simulation verzichtet werden. Im Gegenzug muss angenommen werden, dass das Schallfeld räumlich homogen ist, was mit einer Simulation besser aufzulösen ist. Dennoch lassen sich vor allem TBLs durch semiempirische Modelle mit deutlich weniger Aufwand nachbilden, da deren Entstehung physikalisch schwer zu beschreiben ist. Die zusätzliche Hürde bei der Beschreibung durch Modelle besteht darin, dass durch diese keine realen Signale an diskreten Mikrofonpositionen gegeben werden. Stattdessen sind die Verläufe für das Auto- und Kreuzleistungsdichtespektrum vorgegeben, wie im Kapitel zuvor bereits aufgezeigt. Aus diesem

Spektrum müssen nun zunächst reale Signale bzw. deren Spektren abgeleitet werden, welche die vorgegebenen Modelle als Zielfunktion erfüllen.

2.3.2.1 Herleitung der Drucksignale an den Mikrofonpositionen

Dazu wird zuerst der vorgegebene spektrale Verlauf an den Positionen der Mikrofone diskretisiert. Aus dieser Diskretisierung ergibt sich die Matrix der Kreuzleistungsdichtespektren oder auch Cross Spectral Density Matrix (CSD Matrix). Diese Matrix gibt das Kreuzspektrum für jede Mikrofonposition in Bezug auf sich selbst und jede andere Mikrofonposition an.

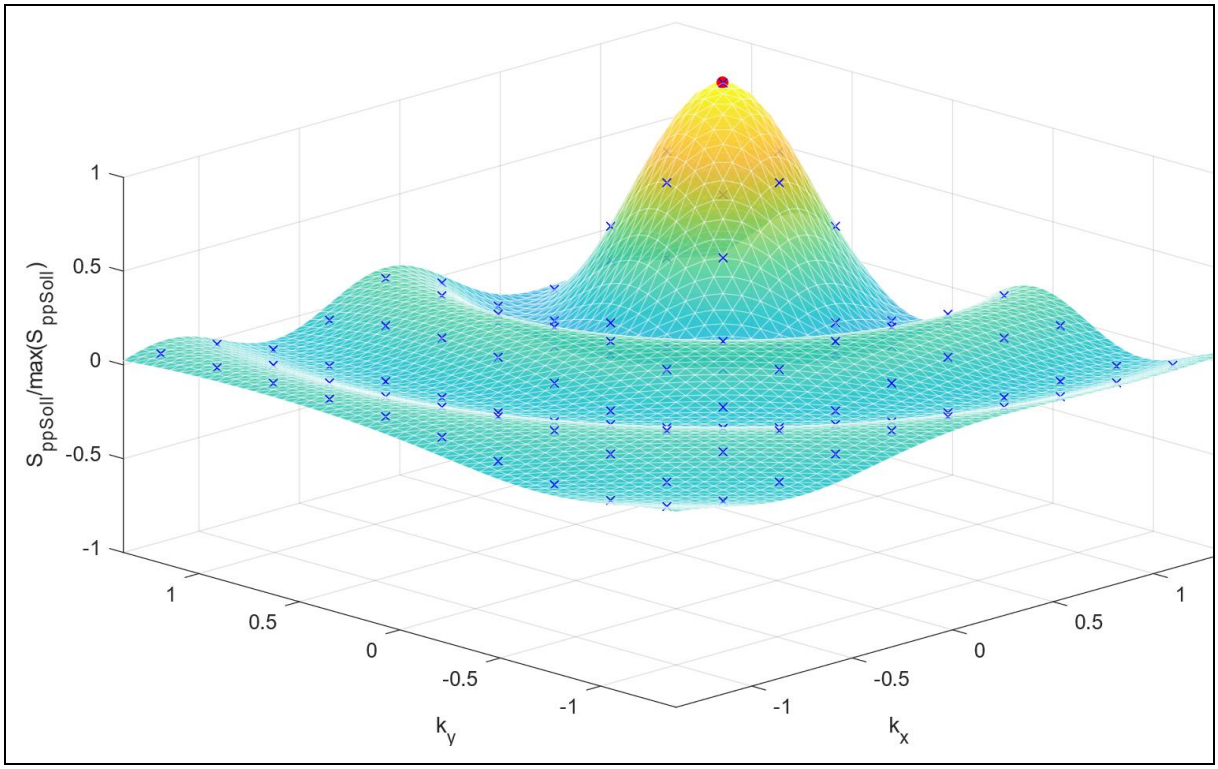


Abbildung 7: **Diskretisieren eines Schallfeldmodells in einem Mikrofonraster von 10x10 Mikrofonen (blau) für ein einiges Referenzmikrofon (rot). Die resultierenden Werte für das Kreuzspektrum an den Mikrofonpositionen variieren in Abhängigkeit vom betrachteten Referenzmikrofon. Die CSD-Matrix enthält alle 100 blau gekennzeichneten diskretisierten Werte für alle 100 mögliche Referenzpositionen.**

Somit ist auch das Autoleistungsdichtespektrum in dieser Matrix enthalten, da Gleichung ***(2.6)*** der CSD für einen Abstand zwischen zwei Punkten von null gleich PSD ist. Die Struktur der CSD Matrix ist in Gleichung ***(2.11)*** dargestellt.

$$\boldsymbol{S}_{p_i,p_j} = \begin{bmatrix} S_{p_1,p_1} & S_{p_1,p_2} & S_{p_1,p_3} & \cdots & S_{p_1,k} \\ S_{p_2,p_1} & S_{p_2,p_2} & S_{p_2,p_3} & \cdots & S_{p_2,k} \\ S_{p_3,p_1} & S_{p_3,p_2} & S_{p_3,p_3} & \cdots & S_{p_3,k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{p_k,p_1} & S_{p_k,p_2} & S_{p_k,p_3} & \cdots & S_{k,k} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

k ist die gesamte Anzahl aller Mikrofone. Die Ortskoordinaten der Mikrofone sind durch die Indizes i und j gekennzeichnet. Entlang der Diagonale gilt $i = j$. Diese Einträge entsprechen also den Autospektren S_{p_i,p_i} an den einzelnen Mikrofonpositionen und da räumlich homogene Felder betrachtet werden, sind deren Beträge an jeder Position implizit gleich. Alle nicht diagonalen Einträge sind die Kreuzspektren welche sich nach Gleichung ***(2.6)*** für den Abstand der durch die Indizes vorgegebenen Punktekoordinaten errechnen lassen. Da dieser relative Abstand für jedes Paar an Mikrofonen gleich ist, d.h. der Abstand in x- und y-Richtung zwischen Punkt p_i und Punkt p_j ist gleich dem Abstand zwischen Punkt p_j und Punkt p_i, ist die Matrix nicht nur quadratisch sondern auch hermetisch.

Aus dieser Matrix sollen nun Zeitsignale gewonnen werden, welche statistisch gesehen die durch diese vorgegebenen spektralen Werte liefern. Da das Kreuzspektrum als Produkt eines Signals mit dem komplex Konjugierten des anderen Signals definiert ist, lässt sich die CSD-Matrix, in der jedes Signal mit jedem Signal multipliziert wird, auch nach Gleichung *(2.12)* formulieren.

$$\boldsymbol{S}_{p_i,p_j} = E[\vec{u}_{p_i} \otimes \overrightarrow{u_{p_j}}^H] = E\left[\begin{bmatrix} u_{p_1} \\ u_{p_2} \\ u_{p_3} \\ \vdots \\ u_{p_k} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} u_{p_1} \\ u_{p_2} \\ u_{p_3} \\ \vdots \\ u_{p_k} \end{bmatrix}^H\right] \tag{2.12}$$

Dabei zeigt der Operator H das hermetisch komplex Konjugierte, und E den Erwartungswert an. Der Vektor $\vec{u}$ setzt sich aus den Spektren der gesuchten Signale an jeder Mikrofonposition zusammen. Geht man davon aus, dass die gesuchten statistischen Signale $\vec{u}$ als Produkt der Filtermatrix $\boldsymbol{P}$ mit unkorrelierten weißen Rauschsignalen $\vec{x}$ mit einem Autospektrum von $\boldsymbol{S}_{p_i,p_j} = 1$ gewonnen werden können [13], so zu Gleichung *(2.13)* erweitert werden.

$$\boldsymbol{S}_{p_i,p_j} = E[\vec{u} \otimes \vec{u}^H] = \boldsymbol{P} E[\vec{x} \otimes \vec{x}^H] \boldsymbol{P}^H = \boldsymbol{P}\boldsymbol{I}\boldsymbol{P}^H = \boldsymbol{P}\boldsymbol{P}^H \tag{2.13}$$

$\boldsymbol{I}$ beschreibt dabei die Einheitsmatrix, welche sich als dyadisches Produkt, also der CSD-Matrix, eines Sets unkorrelierter weißer Rauschsignale mit $\boldsymbol{S}_{p_i,p_j} = 1$ ergibt. Es ist ersichtlich, dass Gleichung ***(2.13)*** Ähnlichkeiten mit dem Eigenwertproblem $\mathbf{M} = \xi \vec{v}\vec{v}^H$ quadratischer

Matrizen hat. Wobei $\mathbf{M}$ die zu zerlegende Matrix, $\vec{v}$ den Eigenvektor und ξ den Eigenwert bezeichnet. Hat $\mathbf{M}$ mehrere Eigenwerte und -vektoren, so werden die Skalare ξ zu einer Diagonalmatrix Ξ angeordnet**,** welche die realen positiven Eigenwerte enthält. Die Eigenvektoren $\vec{v}$ werden des Weiteren zu einer Matrix $\boldsymbol{V}$ angeordnet, dessen Spalten den einzelnen Eigenvektoren entspricht. Zerlegt man nun die CSD-Matrix in ihre Eigenwerte erhält man also Gleichung *(2.14)*.

$$\boldsymbol{S}_{p_i,p_j} = \Xi \boldsymbol{V}\boldsymbol{V}^H = \boldsymbol{V}\Xi\boldsymbol{V}^H = (\boldsymbol{V}\Xi^{1/2})(\Xi^{1/2}\boldsymbol{V})^{\mathrm{H}} \tag{2.14}$$

Für die Diagonalmatrix Ξ gilt $\Xi = \Xi^{\mathrm{H}}$ und somit auch $\Xi^{1/2} = (\Xi^{1/2})^{\mathrm{H}}$. Vergleicht man Gleichung ***(2.13)*** mit Gleichung ***(2.14)***, so lässt sich ableiten:

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{V}\Xi^{1/2} \tag{2.15}$$

Da angenommen wurde, dass $\vec{u}_{p_{i,j}} = \boldsymbol{P}\vec{x}$, sind nun gesuchten Spektren der Drucksignale, welche Gleichung ***(2.12)*** für das gewünschte Druckfeld erfüllen, an den Positionen der Mikrofone ermittelt. Die Gleichung kann wie erwähnt nur für eine ausreichend große Anzahl an Mittlungen als erfüllt angesehen werden. In dem der Arbeit beiliegenden Skript entspricht dieser Schritt dem Teilskript „Theory“. In Kapitel 4 wird die Funktionsweise des Skripts näher dokumentiert.

2.3.2.2 Definition der Reproduktionsabweichung

Durch Maury [6] werden zwei verschiedene Fehlergrößen definiert mit denen sich die Reproduktionsgenauigkeit des synthetisierten Schallfeldes charakterisieren lässt. Den mittleren quadratischen Fehler gibt er als Spur der Abweichung S_{ee} der reproduzierten CSD-Matrix an. Diese Spur wird zusätzlich mit der Spur der geforderten CSD-Matrix normalisiert. Somit ergibt sich für den mittleren quadratischen Fehler:

$$J_e = \frac{Tr[\boldsymbol{S}_{e_i e_j}]}{Tr[\boldsymbol{S}_{p_i p_j soll}]} = \frac{Tr[\boldsymbol{S}_{p_i p_j soll} - \boldsymbol{S}_{p_i p_j ist}]}{Tr[\boldsymbol{S}_{p_i p_j soll}]} \tag{2.16}$$

Der Nachteil dieser Fehlerdefinition ist, dass nur die Diagonale der CSD-Matrix einen Einfluss auf die Fehlergröße hat. Da die Diagonale den PSDs entspricht, weißt ein Schallfeld mit korrekt reproduzierten PSDs an den Mikrofonpositionen einen Fehler von null auf. Dies ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung, da eine korrekte Reproduktion der PSDs keine korrekte Reproduktion der Korrelationsstruktur bedingt. *Es hat sich im Anschluss an diese Arbeit als sinnvoll erwiesen, Den Betrag der Fehlermatrix* $\boldsymbol{S}_{e_i e_j}$ *zu nutzen, da sich ansonsten positive und negative Fehler an den einzelnen Mikrofonen über das gesamte Array*

ausgleichen. Dies ist dann von Interesse, wenn ein sogenannter „penalty operator“, welcher in Kapitel 2.4.3 näher erläutert wird, zum Einsatz kommt. Dieser erzeugt an den Mikrofonpositionen einen zusätzlichen Fehler, welcher mit der bisherigen Definition nicht präzise gemessen werden kann.

Daher wird der Restfehler als weitere Fehlergröße nach Gleichung ***(2.17)*** eingeführt.

$$\varepsilon_e = \frac{\left\| \boldsymbol{S}_{e_i e_j} \right\|}{\left\| \boldsymbol{S}_{p_i p_j soll} \right\|} = \frac{\left\| \boldsymbol{S}_{p_i p_j soll} - \boldsymbol{S}_{p_i p_j ist} \right\|}{\left\| \boldsymbol{S}_{p_i p_j soll} \right\|} \tag{2.17}$$

Diese Fehlergröße basiert auf der Frobenius-Norm und bezieht daher alle Einträge der CSD-Matrix in die Fehlerbildung mit ein. Somit kann durch den Restfehler eine korrekte Reproduktion der vorgegebenen Korrelationsstrukturen charakterisiert werden.

2.3.2.3 Schallfeldsynthese in der Literatur

Betrachtungen zur Schallfeldsynthese wurden in der Vergangenheit vornehmlich theoretisch oder auf Grundlage von Simulationen vorgenommen. Maury [16] simuliert akustische Monopole über einer starren Platte mit darauf angeordneten Mikrofonen. Dabei untersucht er ein TBL-Schallfeld, welches auf dem Modell von Corcos basiert. Er kommt zu dem Schluss, dass für eine Reduktion des mittleren quadratischen Fehlers um $10dB$ ein Raster von $26x11$ Lautsprechern nötig ist, wenn die obere betrachtete Grenzfrequenz 800Hz beträgt (Abbildung 8). Die Dimensionen der betrachteten Fläche betragen dabei $0{,}328\ x\ 0{,}768m$. Zudem untersucht er die vibroakustische Antwort eines Panels, welches dem synthetisierten Schallfeld ausgesetzt wird. Dabei kann er zeigen, dass der Fehler dieser Reaktion auch bei einem ungenügend präzise synthetisierten Schallfeld sehr nah an der Reaktion auf ein ideal reproduziertes Schallfeld ist. Er leitet ab, dass für akustische Messungen auch der Einsatz eines weniger dichten Quellarray denkbar ist.

Elliot [13] erweitert die Betrachtungen von Maury um das Diffuse Schallfeld. Dabei beschränkt er sich vor allem auf eindimensionale Fälle, indem er die Mikrofone entlang einer Richtung des Schallfeldes anordnet. Somit wird eine deutlich höhere Auflösung der Betrachtungen ermöglicht. Eliot untersucht neben dem Einfluss der Quelldichte auch den Einfluss der Distanz zwischen der Quell- und der Mikrofonebene. Er kommt zu dem Schluss, dass ein optimaler Abstand im Bereich des halben Abstandes zwischen zwei Quellen liegt. Bei sehr kleinen Abständen steigt der Fehler bei der Schallfeldreproduktion, bei sehr großen Abständen verschlechtert sich die Konditionierung des zu lösenden Problems. Dabei wird keine Empfehlung für den Fall

gegeben, dass für unterschiedliche Abstände der Quellenabstände in x- und y-Richtung vorliegen.

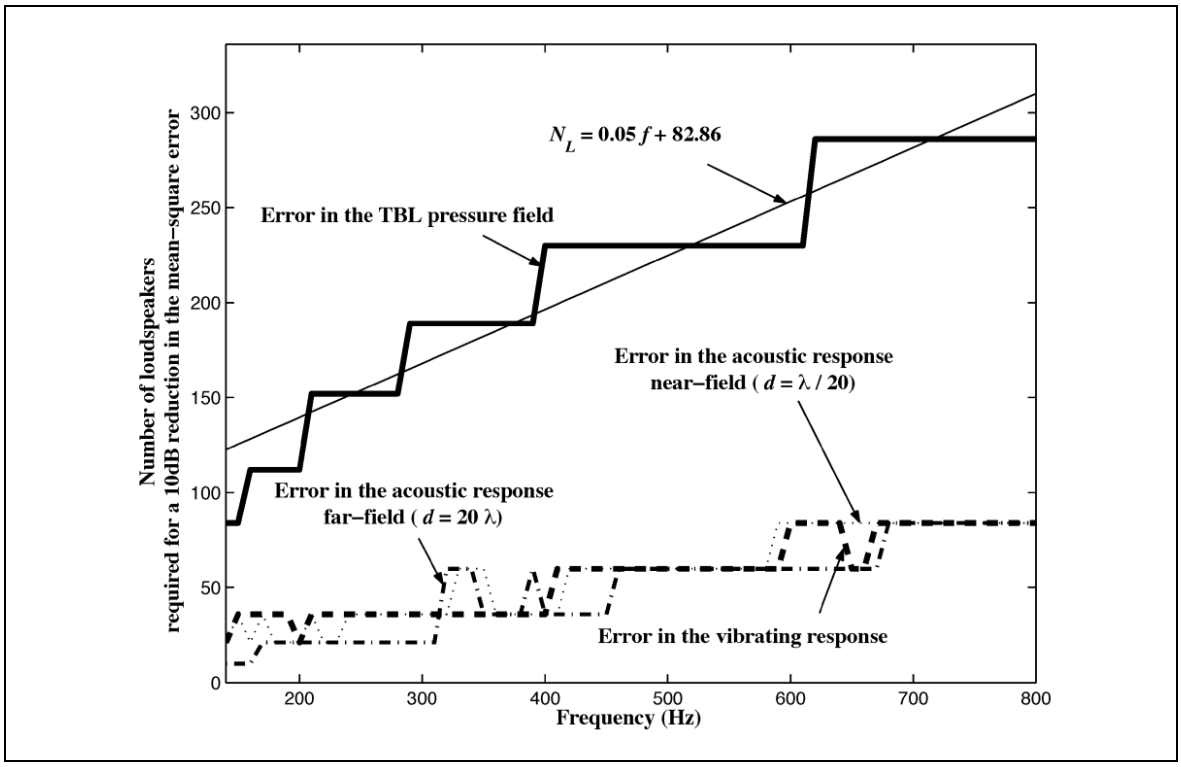


Abbildung 8: Anzahl der notwendigen unkorrelierten Komponenten zur Reduktion des mittleren Fehlers um 10dB für das reproduzierte Schallfeld sowie für die Frequenzantwort des Prüfkörpers [16]

Maury [6] erweitert seine vorherigen Betrachtungen um den Fall des diffusen Schallfeldes, sowie den Fall einer planaren Welle, welche über die Mikrofonebene streift. Sowohl die planare Welle als auch das Diffuse Schallfeld lassen sich mit einer Begrenzten Anzahl an Schallquellen simulativ bis zu einer hohen Frequenz gut approximieren. Für das diffuse Schallfeld werden im Vergleich zu einem Hallraum sogar deutlich idealere Korrelationsstrukturen erreicht [7]. Für das TBL Schallfeld wird nur in Stromrichtung eine akzeptable Approximation der Korrelationsstruktur des Schallfeldes realisiert (Abbildung 9). Er gibt die Quellendichte pro Korrelationslänge, welche für eine ausreichend präzise Reproduktion der betrachteten Schallfelder nötig ist, nach Tabelle 1 an.

Tabelle 1: Notwendige Quellendichte zur Erfüllung des gewünschten Fehlerkriterums

	Criteria on the residual error	Criteria on the mean-square error
Acoustic diffuse field[a]	1.9×1.5	2.7×2.2
Grazing plane wave[a]	2.8×2.3	3.4×2.7
TBL pressure field[b]	0.9×0.7	3.7×3.0

[a]Number of acoustic sources per unit acoustic wavelength.
[b]Number of acoustic sources per unit spanwise correlation length.

Für ein TBL ist die Korrelationslänge als $L_{x,y} = \frac{\alpha_{x,y} U_c}{\omega}$ gegeben. Maury gibt für die Strömungsrichtung 3 und quer zur Strömungsrichtung 3,7 nötige unkorrelierte Quellen an, um ein gegebenes Fehlerniveau von $10dB$ bei der Reproduktion zu unterschreiten. Dabei fällt auf, dass die Quellendichte in beide Raumrichtungen ähnlich groß ist, obwohl die Korrelationslänge in Strömungsrichtung als das etwa 7-Fache der Korrelationsrichtung senkrecht zur Strömungsrichtung angenommen wird. Die Begründung hierfür wird in der Oszillation des Kreuzspektrums in Strömungsrichtung zu finden sein, welche effektiv deutlich höher auflöst als die Größe der Korrelationslänge. Es ist außerdem hinzuzufügen, dass es sich bei den Kriterien teils um empirische Werte handelt. Maury gibt auch theoretische Werte für die Quellendichte an, welche die tatsächlich notwendige Quellendichte jedoch in einigen Fällen unterschätzten.

Berry [4] Untersucht die Synthese der bereits vorgestellten Schallfelder mithilfe der WFS simultativ. Während er gute Ergebnisse für die ebene Welle und das diffuse Schallfeld verzeichnet, gelingt die Beschreibung von TBL-Schallfeldern nur bei der Betrachtung einer Überschallkonfiguration. Er beschreibt sehr geringe erreichbare Pegel bei der Simulation von Unterschall-TBLs. Dafür gibt er die Oszillation der Korrelationsstruktur, welche für TBLs in Unterschallkonfiguration eine geringere Wellenzahl als der Luftschall hat, als Grund für die schlechte Reproduzierbarkeit des Schallfeldes an. Diese Oszillation korrespondiert mit einer starken Erhöhung im Frequenz-Wellenzahlspektrum, womit in diesem Bereich ein großer Teil der Energie des TBLs zu verorten ist. Er zeigt, dass mit der WFS lediglich eine Synthese in der akustischen Domäne, charakterisiert durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls, möglich ist.

Sowohl Elliot [13] als auch Bravo [6] verifizieren ihre Simulationen mit einfachen experimentellen Aufbauten. Dazu wird in beiden Fällen eine Anordnung mit 4x4 Lautsprechern gewählt. Die Ergebnisse decken sich insofern mit den Simulationen, als das sowohl eine Synthese einer streifenden planaren Welle, als auch das diffuse Schallfeld mit guter Genauigkeit zu reproduzieren sind.

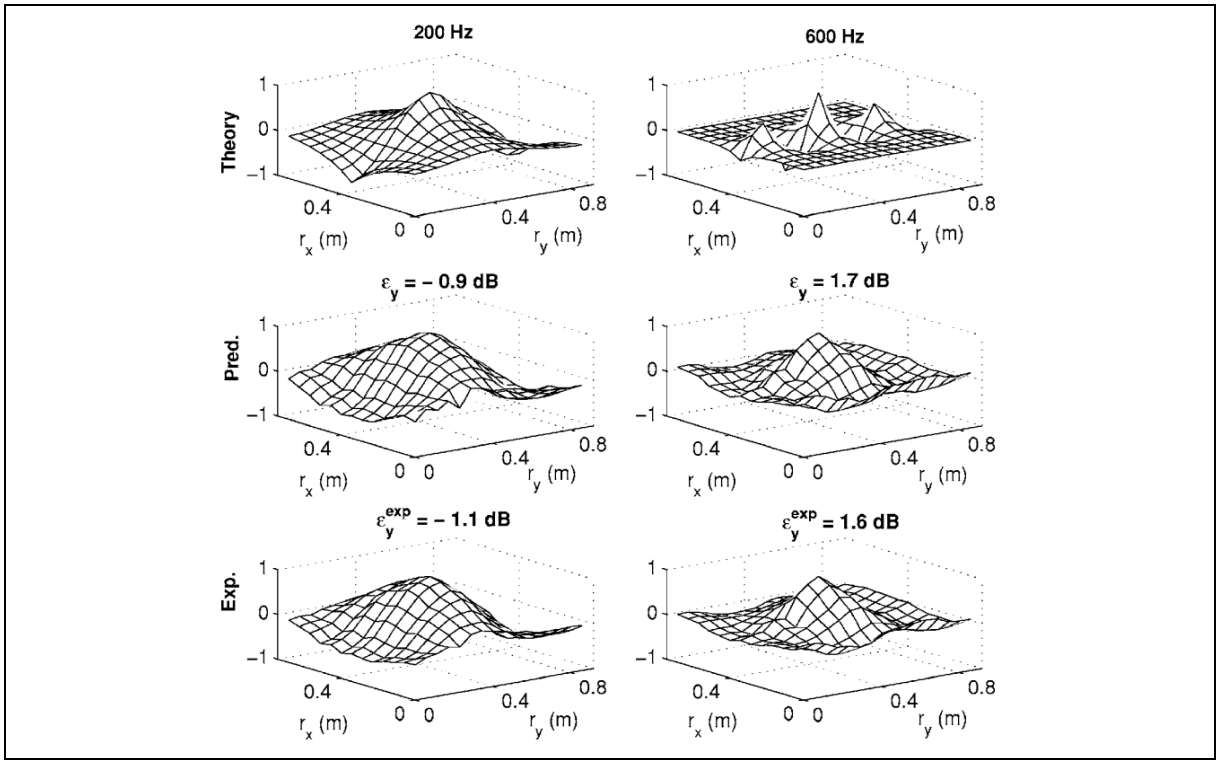


Abbildung 9: Vergleich der Korrelationsstrukturen eines TBLs als Ergebnis theoretischer, simulatorischer und experimenteller Betrachtungen für zwei verschiedene Frequenzen [19]

Bei der Reproduktion eines TBLs werden hingegen sehr hohe Fehler gemessen, woraus die Autoren schließen, dass eine Reproduktion der Korrelationsstrukturen auch mit einer deutlich höheren Anzahl an Lautsprechern nur bis zu einer verhältnismäßig geringen oberen Grenzfrequenz möglich sein könnte. Abbildung 9 zeigt einen Vergleich zwischen der theoretischen Ausprägung eines TBL Schallfeldes, und den Ergebnissen einer Simulation und eines Experimentes. Das Kreuzspektrum ist dabei mit dem Autospektrum normiert, sodass an der Mikrofonposition der Wert eins angenommen wird. Es ergibt sich die dimensionslose Korrelationsstruktur für das betrachtete Mikrofon, welches in diesem Fall mittig auf der Platte gewählt ist. Es ist ersichtlich, dass lediglich für die geringere Frequenz von 200Hz die Korrelationsstruktur in Strömungsrichtung realitätsnah reproduziert werden kann. Bei 600Hz wird die Oszillation in diese Richtung nicht mehr ordnungsgemäß reproduziert. Quer zur Strömungsrichtung lässt sich in beiden Fällen keine ordnungsgemäße Reproduktion feststellen.

2.4 Lautsprecherarray DLR Ausgangsituation

2.4.1 Aufbau des Lautsprecherarrays

Das Lautsprecherarray (LSA) besteht aus 14 verschiebbaren Zeilen in denen jeweils 8 Lautsprecher untergebracht sind. Die Zeilen sind auf einem auf Rollen beweglichen Stahlgestell aufgebaut. Die gesamte Einheit aller Zeilen lässt sich über eine in das Gestell integrierte Trapezgewindespindel in der Höhe verstellen. Eine geometrische Besonderheit der Lautsprecherzeilen ist die angeschrägte Front. Somit lässt die verschiebbare Konstruktion ein nahes Heranführen an gekrümmte Strukturen zu.

Abbildung 10: CAD-Modell des im Hallraum stationierten Lautsprecherarrays[17]

Jedem dieser Lautsprecher ist ein eigener Kanal mit einem im Gehäuse der Lautsprecher untergebrachten Verstärker zugeordnet. Die Signalwiedergabe erfolgt über einen dezidierten Computer, auf dem die Musikproduktionssoftware Cubase installiert ist und der fest im Array integriert ist. Sollen Audiospuren abgespielt werden müssen diese auf den genannten Computer geladen und in Cubase importiert werden. Dieser Computer ist hardwareseitig mit zwei RME HDSP MADI Soundkarten in Master-Slave Konfiguration ausgestattet. Diese Soundkarten nutzen das MADI Protokoll um über eine einzelne koaxiale Anbindung 64 Kanäle digital übertragen zu können. Da zwei Karten installiert sind ergeben sich somit 128 übertragbare Kanäle. Die Steuerung der Kanäle erfolgt über einen den Soundkarten zugehörigen digitalen Mixer. Die Karten haben jeweils einen Monitorausgang in Form eines Klinkenanschlusses. Der Anschluss der Masterkarte wird als Referenzkanal, z.B. zum Registrieren von Triggersignalen,

genutzt und belegt bei Cubase den Kanal 113. Der Monitorausgang der zweiten Karte ist bis dato ungenutzt.

Die Soundkarten werden direkt in zwei ebenfalls auf dem Array verbaute RME ADI-6432 Konverter geroutet. Diese Konverter wandelt die gebündelten MADI Signale in auf die Kanäle aufgetrennten, jedoch ebenfalls digitalen AES/EBU Signale. Somit liegt nun jeder Kanal einzeln digital vor und wird in Gruppen von 8 Kanälen über Netzwerkkabel jeweils einer Zeile zugeführt. In diesen Zeilen sind die Verstärker untergebracht, welche vor der DA-Wandelung noch eine digitale Signalverarbeitung in Form von Routingoptionen sowie Equalizing für jeden Kanal ermöglichen. Dazu ist auf dem Computer ein steuerndes Programm des Herstellers des Arrays installiert. Um die voreingestellten Werte zu ändern muss eine Netzwerkverbindung zwischen der entsprechenden Zeile und dem Computer hergestellt werden. Da jegliche Signalverarbeitung für diese Arbeit mit MATLAB erfolgt, wird diese Option nicht benötigt. Da Experimente im Hallraum aufgrund der potentiell schädlichen Lautstärkepegel nur in Abwesenheit von Personen durchgeführt werden können, muss der fest im LSA installierte Computer dann von der Messwarte aus über eine Remote-Desktop-Verbindung gesteuert werden. Unter Berücksichtigung des fortgeschrittenen Alters dieses Computers und der indirekten Ansteuerung ist die Durchführung komplexer Versuchsabläufe mit großen Audiofiles daher erschwert.

2.4.2 Aufbau des Arrayadapters

Das Adapterfeld wurde von Balzarek [18] vor dem Hintergrund der TBL Schallfeldsynthese entwickelt. Es handelt sich dabei analog zum LSA um ein auf Rollen gelagertes Stahlgestell auf dem jedoch Zeilen mit Trichtern angebracht sind. Diese Trichter sind so angeordnet, dass die Lautsprecher im Idealfall genau auf diese ausgerichtet sind. Somit kann durch ein zusammenführen des LSAs mit dem Adapterfeld ein Einleiten des abgestrahlten Schalls von jedem Lautsprecher in seinen zugehörigen Trichter erfolgen. Nun wird dieser über flexible Schläuche an eine Gitterstangenebene, an der die Rohrenden seitlich beweglich eingehängt werden, geführt. Diese Ebene ist gleich der Ebene der Quellenmatrix im Raum. Auch der Adapter kann in der Höhe verstellt werden.

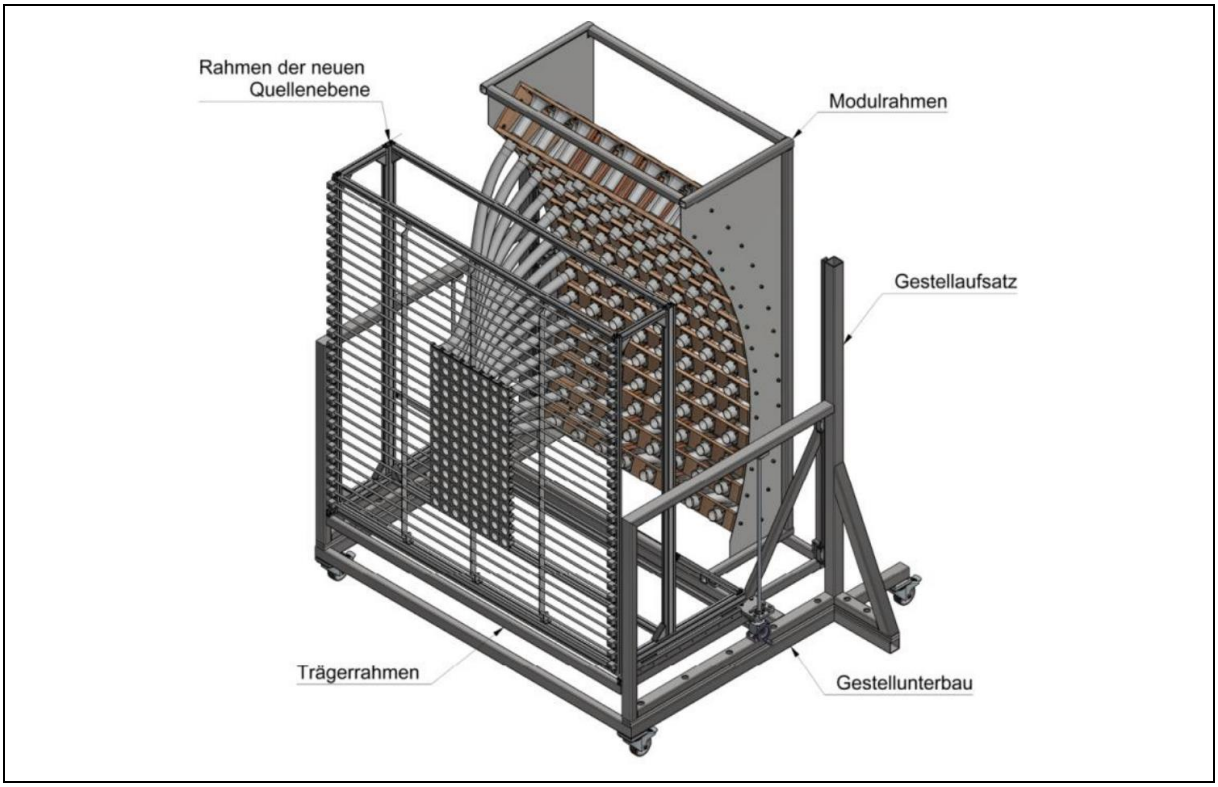


Abbildung 11: CAD-Modell des Arrayadapters[18]

Die Auslässe der Röhren sind deutlich kleiner als die der Lautsprecher. Darin liegt der Nutzen des Adapters begründet, da die Quellen nun bis auf einen Abstand von 60mm zusammengerückt werden können und zudem auch eine Gewisse Variation der Quellenabstände in x- und y-Richtung möglich wird. Balzarek bezieht sich bei der Konzeption des Arrays in Bezug auf die nötige Anzahl an Schallquellen pro Korrelationslänge vor allem auf die Arbeit von Elliot [13] und Maury [19].

Balzarek untersucht zudem den Einfluss des Einlasstrichters auf den Transmissionsverlust der durch den Adapter hervorgerufen wird. Trotz der ausführlichen Optimierung des Einlasstrichters führt der Adapter zu erheblichen Transmissionsverlusten, welche in Abbildung 12 gezeigt werden. Auffällig sind die ausgeprägten Einbrüche, welche sich im zugehörigen Frequenzgang einer Adapterröhre als ausgeprägte Resonanzen zeigen. Diese Resonanzen sind Rohresonanzen welche sich in den Schläuchen aufbauen, da das Ende des Schlauchs eine abrupte Termination des kleinen Schlauchquerschnitts mit hoher akustischer Impedanz in den Raum mit geringer Impedanz darstellt. Ein solcher Impedanzsprung führt zu einer Reflektion eines Teils der Schallenergie zurück ins Rohr. Der Anteil der reflektierten Energie ist dabei abhängig vom Verhältnis der Schallimpedanz im Rohr zur Impedanz im Raum. Wenn die doppelte Rohrlänge gleich der Wellenlänge oder eines Vielfachen davon ist, so wird dieser Anteil der Schallenergie zwischen Rohrauslass und Lautsprecher reflektiert und überlagert sich dabei

konstruktiv. In diesem Fall kommt es zum Aufbau einer Resonanz und daher einer schmalbandigen Steigerung der Sensitivität. An diesen Frequenzen fällt der Transmissionsverlust folglich geringer aus.

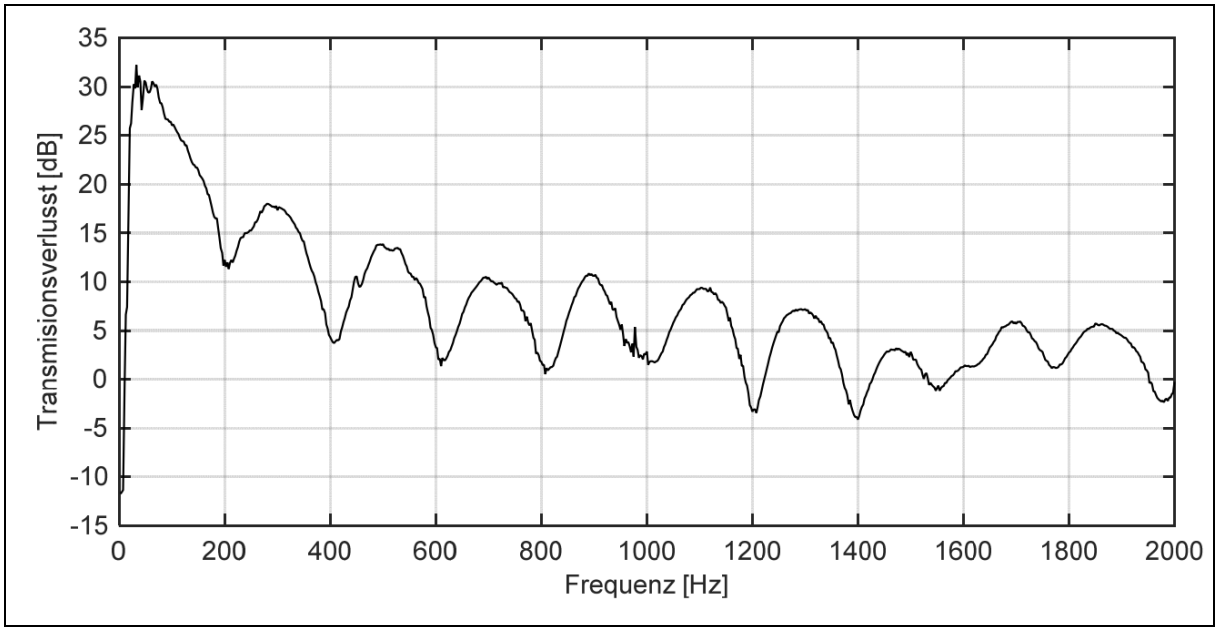


Abbildung 12: Transmissionsverlust für einen Versuchsaufbau mit Schalleinlassrichter und angeschlossenem Rohr [18]

Sieht man jedoch von diesen Resonanzfrequenzen ab, so kommt es zu einem relativ hohen Transmissionsverlusten. Die Schallenergie wird zwar weiterhin ins Rohr zurück reflektiert, kann jedoch auch keine Resonanz aufbauen und verläuft sich. Die einzige Möglichkeit die Transmissionsverluste effektiv zu verringern besteht darin, die Reflektion am Auslass zu verringern. Dabei sind Schalltrichter am Auslass ausgeschlossen, da dies die mögliche Quellendichte wieder herabsetzen würde. Eine andere Möglichkeit bestände im Einsatz eines reflektionsfreien Abschlusses, wie er bei einem Kundt‘schen Rohr zum Einsatz kommt. Da der Bauraum jedoch auch in der Längsachse durch den Abstand zum Prüfkörper begrenzt ist, kann grade bei tiefen Frequenzen keine vollkommene Reflektionsfreiheit durch eine solche Maßnahme erwartet werden.

2.4.3 Versuchsaufbau der CROR-Schallfeldsynthese

Meyer [2] setzte den LSA noch ohne Adapter ein um erste Versuche zur Synthese eines CROR-Schallfeldes zu unternehmen. Die Lautsprecherzeile wurde dazu aus dem beweglichen Stahlgestell ausgehängt und im Freifeldraum vermessen. Im Freifeldraum lassen sich durch die Abwesenheit von Reflexionen deutlich idealere Frequenzgänge ohne ausgeprägte

Interferenzeinflüsse gewinnen. Somit wird die Vergleichbarkeit mit einfachen Simulationen vereinfacht.

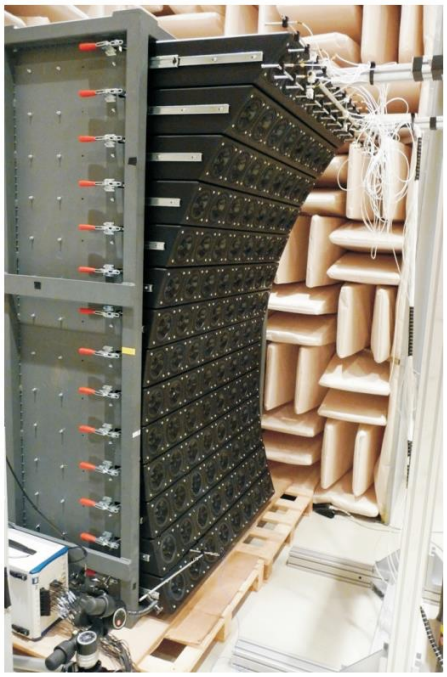


Abbildung 13: Experimentelle Anordnung bei der CROR-Schallfeldsynthese durch Meyer[2]

Meyer nutzt ein Gestell aus Aluminiumprofilen, an denen eine verschiebbare Querverbindung angebracht ist. Diese Querverbindung dient als Halter für insgesamt 20 Messmikrofone in zwei Zeilen. Bei der Ermittlung der Frequenzgänge durch Sinussweeps des Arrays wird also jeweils eine Teilmessung für eine Mikrofonreihe und alle 112 Lautsprecher getätigt. Anschließend werden die Mikrofone verschoben und die Frequenzgänge aller 112 Lautsprecher erneut ermittelt. Da der vertikale Abstand der Mikrofonzeilen nicht dem gewünschten Messraster entsprach war pro Messung nur eine Messung von 10 Mikrofonen möglich. Für die geforderten 110 Messpunkte ergeben sich somit 11 Messungen mit jeweils 112 einzeln zu messenden Sweeps. Dies entspricht einem Zeitaufwand von mindestens einer Stunde allein für das Abspielen der Audiosignale.

Eine zusätzliche Schwierigkeit bietet die exakte Repositionierung bei der anschließenden Vermessung des synthetisierten Schallfeldes. Auch hier sind wieder 11 Einzelmessungen von Nöten. Das reproduzierte Schallfeld wird in diesem Fall noch nicht über einer Struktur erzeugt, sondern im freien Raum. Anfangs wurde erst eine Betrachtung für ein SISO-System, also

einem Lautsprecher und einem Mikrofon durchgeführt und sukzessive um weiter Lautsprecher und Mikrofone erweitert.

Meyer konnte zeigen, dass die Reproduktion des durch einen CROR hervorgerufenen Schallfeldes in sehr guter Näherung möglich ist. Abbildung 14 zeigt den relativen Fehler bei der Schallfeldsynthese im Freifeldraum, welcher für alle relevanten betrachteten Frequenzen unter 10% liegt. Diese Abweichungen können laut Meyer auf Messungenauigkeiten und Störgrößen zurückführen sein. Zum einen kommen Nebengeräusche durch die im LSA verbauten Lüfter in Frage, zum anderen konnte es bedingt durch den Versuchsaufbau durch leichte Fehlplatzierungen zwischen den Ein- und Nachmessungen kommen. Zudem kam es bei der Einbeziehung einer großen Anzahl an Mikrofonen zu unerreichbar großen Signalamplituden, welche als Inputsignale für die Lautsprecher kalkuliert wurden. Daher wurde ein „penalty operator“ [2] eingeführt, der alle sehr kleinen Einträge von $\boldsymbol{G}$ auf null setzt, sodass sie bei der Bildung der Inversen nicht berücksichtigt werden. Solche Einträge korrespondieren mit Lautsprecher-Mikrofon-Kombinationen, welche einen hohen Abstand zueinander aufweisen. Dieses Vorgehen führt jedoch zu zusätzlichen Fehlern in der Reproduktion, da diese geringen vernachlässigten Anteile beim nachmessen des Schallfeldes wieder eingefangen werden.

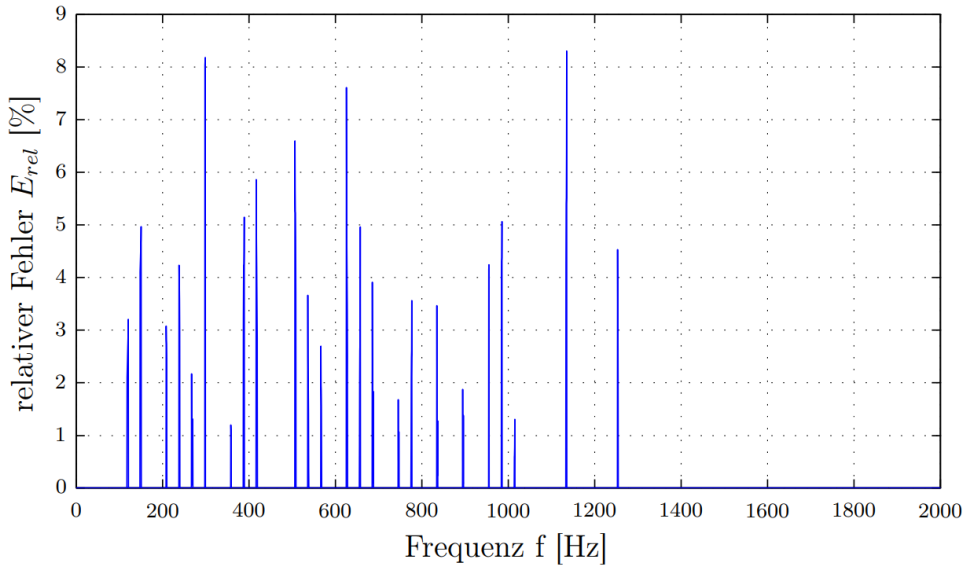


Abbildung 14: Relativer Fehler bei der Reproduktion eines CROR-Schallfeldes durch Meyer [2]. Bei der Betrachtung wurden alle Frequenzen vernachlässigt, deren Amplitude unter 2% der maximalen Schalldruckamplitude liegen

Eine weiterführende Betrachtung wurde durch Algermissen et al. [3] im Hallraum durchgeführt.. Nun wird das CROR-Schallfeld auch über einem in der Prüföffnung eingespannten Flugzeugpanel erzeugt. Dabei werden, womöglich vor dem Hintergrund des aufgezeigten

Problems bei der Verwendung aller 112 Lautsprecher und 110 Mikrofone, lediglich 56 Lautsprecher und maximal 30 Mikrofonpositionen genutzt.

Abbildung 15: Versuchsaufbau von Algermissen bei der CROR-Schallfeldsynthese über einem Prüfkörper [3]

Zudem musste das Array nun im Hallraum verwendet werden, da eine Beschallung des Prüfkörper Hallraumseitig erfolgen muss. Somit wird jedoch die Ermittlung kohärenter Frequenzgänge erschwert. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit denen von Meyer, obwohl eine Verschlechterung der möglichen Signalqualität im Experiment gegenüber der Simulation beobachtet wurde. Da die Simulation unter Freifeldbedingungen erfolgte, wird ein mögliches schwach nichtlineares Verhalten des Hallraums als Einflussfaktor in Erwägung gezogen. An dieser Stelle sei hinzugefügt, dass der Einfluss des Hallraums mit zunehmendem Abstand der Lautsprecher zu den Mikrofonen größer wird, da der Anteil des homogenen diffusen Schallfeldes zur mit der Entfernung abnehmenden direkten Radiation größer wird.

3 Gestaltung des Versuchsaufbaus

Die bisherigen praktischen Versuchsaufbauten aus der Literatur, wie in Abbildung 16 dargestellt, zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass die Anordnung der Lautsprecher fest, und somit als Ausgangspunkt für den restlichen Aufbau des Experimentes bestimmend war. Das Mikrofonraster konnte so entworfen werden, dass bis zu einer festgelegten oberen Grenzfrequenz alle Feinheiten der Korrelationsstruktur der zu reproduzierenden Schallfelder abbildet.

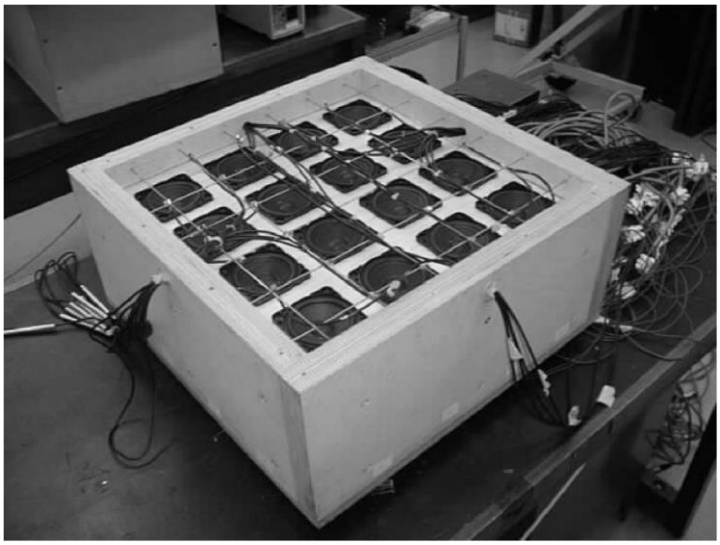


Abbildung 16: integrierter Versuchsaufbau zur Schallfeldsynthese durch Elliot [13]

Diesen Experimenten gingen ausgedehnte theoretische und simulatorische Betrachtungen voraus, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig aufgearbeitet werden können. Die bisherigen Versuchsaufbauten waren an erster Stelle der empirischen Validierung von Simulationsmodellen angedacht. Somit sind sie von beschränktem „praktischen“ Nutzen für die Synthese von Schallfeldern als akustische Belastung über zu vermessenden Strukturen. Dies trifft vor allem auf die Synthese von TBLs zu, da die verwendete Quelldichte für diesen Zweck unzureichend ist. Die am DLR vorhandene Quellenmatrix unterscheidet sich nun dahingehend grundlegend von diesen Aufbauten, als dass die Quellen variabel positionierbar sind. Dies öffnet Möglichkeiten in Bezug auf parametrische Studien, erschwert aber die theoretische Herangehensweise zusätzlich, da weniger Eingangsgrößen als unveränderlich angenommen werden können.

Der Versuchsaufbau von Meyer und Algermissen weißt bereits eine größere Flexibilität auf, da Mikrofone theoretisch beliebig auf den Aluminiumprofilen verteilt werden können. Problematisch bei diesem Aufbau ist jedoch, dass ein sehr großer zeitlicher Aufwand für eine einzige Schallfeldsynthese vonnöten ist, der schnell zu Fehlern in der Datenverarbeitung oder

Positionierung führen kann. Dieser Aufwand erhöht die Hemmschwelle überhaupt Synthesen durchzuführen, sei es um Prüfkörper zu belasten oder sei es um Simulationen zu validieren.

Somit ergibt sich der Bedarf nach einem flexiblen Versuchsaufbau, der die Untersuchung verschiedener Konfigurationen des LSA ermöglicht. Dabei gilt es bei der Konzeption der Versuchsdurchführung auch im Blick zu behalten, dass das LSA in letzter Instanz auch als Werkzeug für die Ermittlung von Schalldämmaßen praktisch eingesetzt werden soll. Eine Konzeptfindung für die Versuchsdurchführung liegt in der Sperrigkeit des LSA und des Adapters begründet, welche reproduzierbare Bedingungen für ein Experiment erschwert. Dies ist vor allem bei der Ermittlung der Frequenzgänge kritisch, da eine Änderung der Positionierung auch eine Änderung der Frequenzgänge bedingt. Somit ist es wenig sinnvoll das Array in einer bestimmten Position zu Vermessen und daraus universell gültige Frequenzgänge abzuleiten. Vielmehr soll die Vermessung des Arrays in der späteren Synthesekonfiguration Teil des gesamten Ablaufs sein. Nur so kann für den experimentellen Aufbau die Gültigkeit der theoretischen Betrachtungen garantiert werden auf denen die Schallfeldsynthese aufbaut.

3.1 Konzeption einer Mikrofonkinematik

Bisherige Mikrofonanordnungen sind entweder auf einem festen [13] Raster oder per Hand verschiebbar [2, 3, 19] vor einer Grenzfläche ausgeführt. Da diese Arbeit die Reproduktion von Schallfeldern auf einer Ebene zum Ziel hat, sollte diese ebene Grenzfläche idealerweise so starr wie möglich sein. So können Interaktionen beim Überprüfen des synthetisierten Schallfeldes geringgehalten werden. Auch bei der Ermittlung der Frequenzgänge sollte eine Interaktion mit der angestrahlten Oberfläche vermindert werden. Jegliche Interaktion würde bei der Bildung der Inversen einfließen und somit das synthetisierte Schallfeld beeinflussen. Erst wenn ein eventueller Prüfkörper mit dem generierten Signal belastet wird, ist die Interaktion zulässig bzw. letztendlich Ziel der Messung. Elliot ordnet die Mikrofone auf dünnen Metallstäben vor einer schallharten Deckplatte an. Dieser Aufbau ermöglicht schnelle und wiederholgenaue Messungen, findet seine Grenzen jedoch in größeren Aufbauten. Zum einen wäre eine sehr große Anzahl an Mikrofonen für eine hohe örtliche Auflösung notwendig, zum anderen müssten sehr viele Kabel an den Metallstäben entlang verlegt werden. Die verschiebbare Konfiguration ermöglicht eine Änderung der Messauflösung in eine Richtung, welche sich sowohl bei Meyer als auch bei Maury aus über hundert Mikrofonpositionen zusammensetzt, in eine Raumrichtung. Die Konfiguration benötigt jedoch eine hohe Anzahl an Einzelmessungen. Auch hier ist die maximale Anzahl der Mikrofone entlang des beweglichen Elementes durch das Kabelmanagement begrenzt. Bei großen Experimenten wird hier ein größerer Querschnitt dieses Elementes nötig, damit eine ausreichende Steifigkeit vorhanden ist. Ein größeres Element

kann jedoch auch zu einer größeren Beeinflussung des synthetisierten Schallfeldes führen. Bei der Einmessung und der Überprüfung wird der Einfluss des Elementes immer mitgemessen und somit in seiner Gesamtheit herausgefiltert. Wird das generierte Schallfeld jedoch für Beschallungsaufgaben genutzt, so fehlt der Einfluss des Balkens und das generierte Schallfeld wird um einen unbekannten Betrag vom erwarteten Schallfeld abweichen. Da eine ebene Fläche konstruktiv leicht umzusetzen ist, erscheint es sinnvoll die Mikrofone plan zu dieser Ebene anzuordnen und die Verkabelung auf der Rückseite der Grenzfläche durchzuführen. Gleichzeitig ist jedoch die Anzahl der vorhandenen Mikrofone sowie die Anzahl der vorhandenen Kanäle zur Signalverarbeitung begrenzt. Dementsprechend soll nicht vollkommen auf eine bewegliche Mikrofon-Arrayausführung verzichtet werden.

3.1.1 Konzeption des Mikrofonarrays

Ein frei im Raum bewegliches Array würde die akustischen Bedingungen bei der Einmessung und anschließenden Nachmessung beeinflussen. Daher bleibt zum einen die Möglichkeit eine größere Ebene zu schaffen in dem Module von Hand vertauschbar sind, oder man nutzt die Prüföffnung um eine einzige übergroße Platte in verschiedenen Positionen so davor zu positionieren, dass immer die gesamte Öffnung verdeckt bleibt. Eine solche Positionierung kann theoretisch auch automatisiert und mit deutlich höherer Geschwindigkeit erfolgen. Die erste Variante, in Abbildung 17 dargestellt, hat dabei den Nachteil, dass nach jeder Messung ein mit Mikrofonen besetztes Element mit einem Platzhalterelement ausgetauscht werden muss. Dies ist nur mit Handarbeit realisierbar. Da die Anzahl der Mikrofone begrenzt ist, müssen je nach gewünschter Messdichte entsprechend auch mehrere solcher Operationen vollzogen werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Anordnung sowie die Dichte der Mikrofone nachträglich nicht mehr verändert werden kann. Bei der zweiten Variante besteht das Problem, dass die Prüföffnung Freifeldraumseitig eine Vertiefung, ähnlich eines Fenstersimses, aufweist. Dieser Sims beschränkt die Beweglichkeit der Mikrofonkinematik. Die Lösung besteht darin, die Mikrofone in gleichmäßigen Abständen über die Trägerplatte zu verteilen. Somit können schon mit leichten horizontalen und vertikalen Bewegungen neue Messpositionen erschlossen werden. Solange die Trägerplatte ausreichend Bewegungsfreiraum im Verhältnis zum Abstand zwischen zwei benachbarten Mikrofonen hat, lassen sich alle Positionen über einen Bereich abbilden, der nur wenig kleiner als die Abmessungen der Prüföffnung ist. Mit dieser Anordnung lassen sich theoretisch beliebige Mikrofondichten realisieren, welche in der Realität durch die Auflösung des Positioniersystems oder aber durch die für die Verarbeitung notwendige Computerressourcen begrenzt sind.

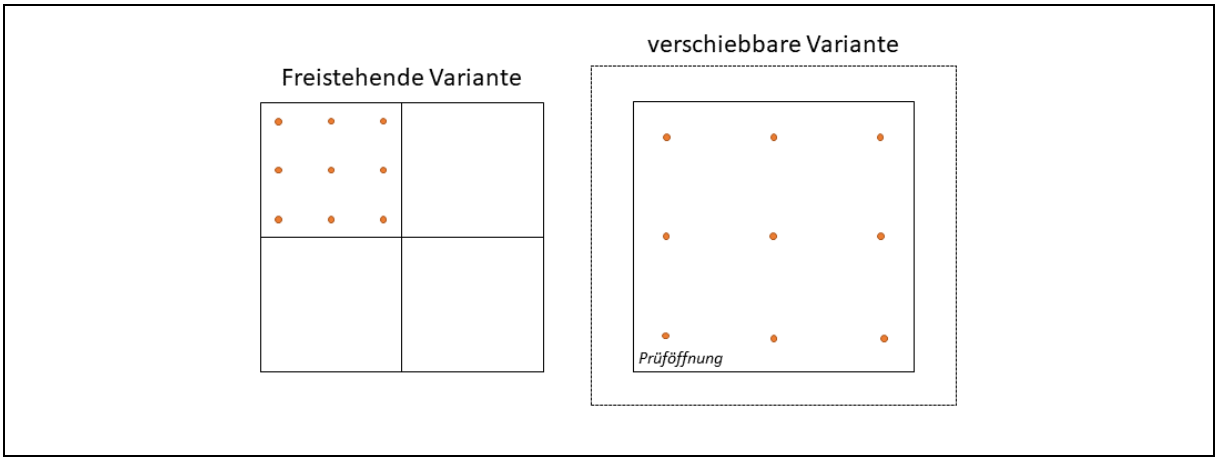


Abbildung 17: Mögliche Konzepte für eine Umsetzung des Mikrofonarrays

Die Positionierung in der Prüföffnung hat zudem den Vorteil, dass die Portalkinematik, welche für Intensitätsmessungen in die Öffnung eingebaut wurde, für die Positionierung verwendet werden kann. Dazu muss sichergestellt sein, dass diese Kinematik nicht mit zu großen Kräften belastet wird, welche zu Schrittverlusten oder sogar zur Beschädigung führen könnten. Daher wird bei der weiteren Ausführung des Konzeptes auf konsequenten Leichtbau geachtet. Zudem bietet sich der Einsatz eines Gegengewichtes an, welches die wirkende Kraft auf die Kinematik soweit verringert, dass bei geringen Beschleunigungen keine Probleme auftreten können.

Als Material wird Holz verwendet, da dieser Werkstoff ein gutes Verhältnis von Dichte zu Steifigkeit aufweist, preisgünstig zu erwerben ist und mit den vorhandenen Werkzeugen unkompliziert bearbeitbar ist. Um ein geringes Gesamtgewicht zu erreichen, wird das Array in sandwich-Bauweise um einen Schaumkern aufgebaut. Diese Bauweise hat zudem den Vorteil, dass bei flächiger Verklebung unter Druck auf planem Untergrund Verzug ausgeglichen wird und für die Zukunft wirksam unterdrückt wird. Ein planes Array ermöglicht ein lückenloses Anpressen an die Prüföffnung. Diese wird dazu mit einem Rahmen mit integrierter Dichtung an das Array angepasst.

3.1.2 Auswahl der Mikrofone

Um die Konzeption der Mikrofonkinematik weiter zu vertiefen, müssen nun geeignete Mikrofone ausgewählt werden, da deren Geometrie sowie der Anzahl bekannt sein muss. Die Auswahl ist wie beschrieben an die Anzahl der verfügbaren Mikrofone und AD-Wandler geknüpft. Im Akustiklabor lassen sich zwar theoretisch über hundert Kanäle verarbeiten, dies ist jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden. Daher wird sich für die Verwendung des mobilen

Datenerfassungssystems „LAN-XI“ von Brüel und Kjaer entschieden. Bei diesem modularen System stehen 72 Eingangskanäle zur Verfügung deren Verwaltung über die zugehörige Software „BK-Connect“ vom selben Hersteller deutlich vereinfacht wird. Mindestens einer dieser Kanäle muss für den Referenzkanal reserviert werden. Zudem ist es sinnvoll einige weitere Kanäle zur Verfügung zu haben, um Vergleichsmessungen mit einem Labormikrofon oder etwa die Nutzung des zweiten Monitoranschlusses des LSA zu erlauben. Im Zusammenhang mit den Platzverhältnissen der Prüföffnung und dem Fakt, dass die Mikrofone in einer rechteckigen Anordnung aufgespannt werden sollen, wurde sich für die Verwendung von 66 Mikrofonen in einem 11x6 Raster entschieden, um die Prüföffnung optimal auszunutzen. Dieser Bedarf kann durch gleichartige Labormikrofone am DLR nicht gedeckt werden. Eine große Anzahl an niedrigpreisigen Elektret Mikrofonkapseln des Herstellers Adafruit mit integriertem Operationsverstärker „MAX4466“ stehen jedoch zur Verfügung.

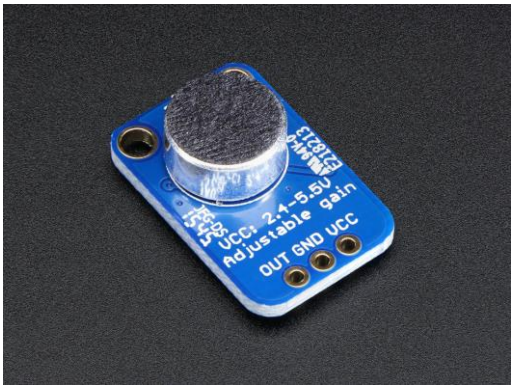


Abbildung 18: Gewähltes Mikrofon für den Aufbau einer Mikrofonkinematik[2]

Diese Mikrofone eignen sich insbesondere für diesen Anwendungsfall, da sie zum einen dauerhaft verbaut werden können, zum anderen keine ausgeprägte Linearität bis hin zu höchsten Frequenzen gefordert ist. Es ist davon auszugehen, dass die erfolgreiche Synthese von Schallfeldern vorerst auf einen niedrigen bis mittleren Frequenzbereich beschränkt bleiben wird. Aufgrund des eingebauten Verstärkers benötigen diese Mikrofone eine Spannungsversorgung von maximal +5,5V[2],die über ein Labornetzteil „LPS 1305“ des Herstellers Voltcraft verwirklicht wird. Für jedes Mikrofon kann die Vorverstärkung über ein rückseitiges

[2] Lt. Datenblatt des Operationsverstärkers (https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX4465-MAX4469.pdf [30.03.22])

Miniaturpotentiometer eingestellt werden. Da hohe Pegel zu erwarten sind, wird die Verstärkung für jedes Mikrofon auf den kleinsten Wert eingestellt.

3.1.2.1 Konzeption der Mikrofonaufnahme

Wie der Abbildung 19 zu entnehmen ist, ist die Mikrofonkapsel auf einer kleinen Platine aufgebaut, die die Verstärkungselektronik aufnimmt. Somit können die Mikrofone nicht in tiefe Bohrungen eingebaut werden. Hier kommt die Ausführung der Trägerplatte als sandwich-Konstruktion entgegen. So ist es möglich in die rückseitige Deckplatte eine übergroße Bohrung zu platzieren, um das Mikrofon direkt von hinten auf der vorderen Deckplatte zu befestigen.

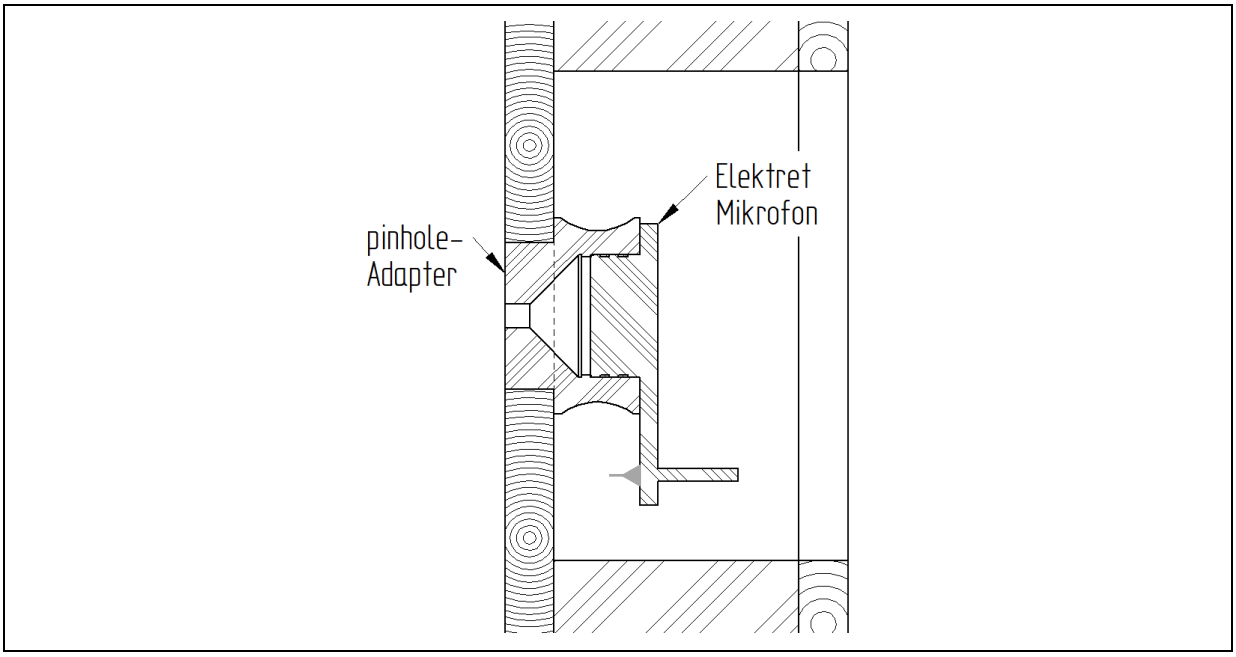


Abbildung 19: Einbausituation der Adafruit Messmikrofone in einem pinhole-Adapter

Das Mikrofon kann jedoch nicht plan an die vordere Deckplatte angefügt werden, da an den Lötstellen für die Signalleitung und der Spannungsversorgung die Drahtenden überstehen. Die Elektret Kapsel würde nur etwa $1 - 2mm$ in die vorgesehene Bohrung reichen und somit nicht bündig mit der Vorderseite abschließen. Daher werden 3D-gedruckte Adapter in der pinhole-Ausführung verwendet, um die Mikrofone etwas von der Vorderplatte abzuheben. Der Adapter wird mit einem privaten „Photon Mono SE“ im MSLA Verfahren mit transparentem „ECO-Resin“ vom selben Hersteller gefertigt. Der Drucker hat eine Auflösung von $0{,}05mm$, womit ein guter Sitz der Mikrofonkapsel im Adapter ermöglicht wird. Somit lässt sich zudem eine lösbare Verbindung ohne dichte Verklebung realisieren. Die pinhole-Konfiguration wurde dem Vorbild echter Flugversuche zur Vermessung von TBL-Strukturen entnommen [20, 21] Hier werden sehr kleine pinhole-Durchmesser genutzt, um die Ausbildung des Grenzfeldes nicht zu

beeinflussen und einen Abfall der gemessenen Spektren zu hohen Frequenzen hin zu vermeiden. Dieser entsteht durch die sehr feinen Korrelationsstrukturen, welche sich über der Mikrofonoberfläche herausmitteln [22]. Zwar werden voraussichtlich weder sehr hohen Frequenzen betrachtet werden können, noch kann an dieser Stelle mit abschließender Sicherheit geklärt werden, ob es bei der stationären Synthese eines TBLs zu diesen Effekten kommt. Dennoch überwiegen die Vorteile eines auf solche Weise ausgeführten Adapters, wenn sichergestellt wird, dass keine ausgeprägten Resonanzen im Messbereich auftreten.

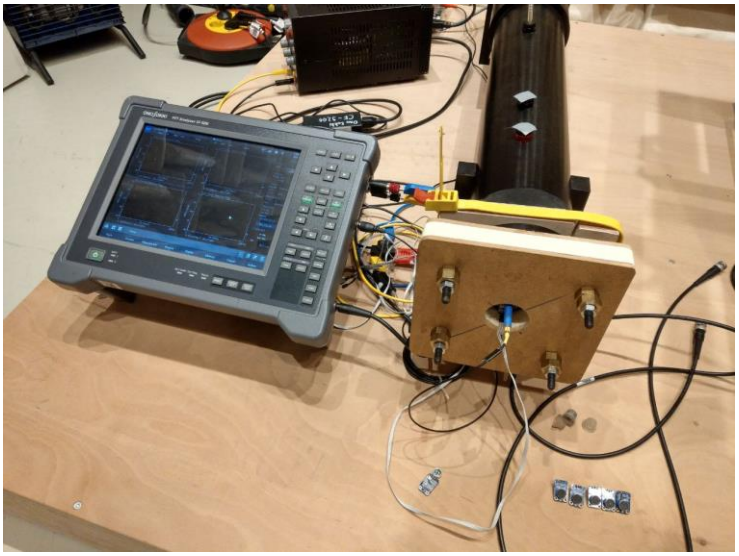


Abbildung 20: Versuchsaufbau für Vergleichsmessungen der Messmikrofone mit dem Referenzmikrofon

Aus diesem Grund wurden verschiedene pinhole-Konfigurationen mit dem in Abbildung 20 dargestellten Versuchsaufbau, mithilfe eines Kundt‘schen Rohres, miteinander verglichen. Im Kundt‘schen Rohr bildet sich bis zur oberen Grenzbereich des Rohres eine ebene Welle aus. Somit kann eine Vergleichsmessung mit einem Labormikrofon, im Folgenden das Referenzmikrofon, auch bei nicht exakt konzentrischer Positionierung der Mikrofone erfolgen. Als Referenzmikrofon wird das „130E21“ mit der Seriennummer SN 42885 des Herstellers PCB eingesetzt. Dieses hatte in einer Vergleichsmessung die beste Kohärenz bei sehr tiefen Frequenzen bis etwa $20 - 25Hz$. Im Datenblatt, wird der Frequenzgang dieses Mikrofons zwar nur bis zu einer Grenzfrequenz von etwa $50Hz$ angegeben, es wird jedoch für diese Arbeit vereinfacht angenommen, dass das 130E21 einen ideal glatten Frequenzgang in Amplitude und Phase aufweist. Somit sind die Voraussetzungen geschaffen, um einige pinhole-Konfigurationen auf ihre Performance zu vergleichen.

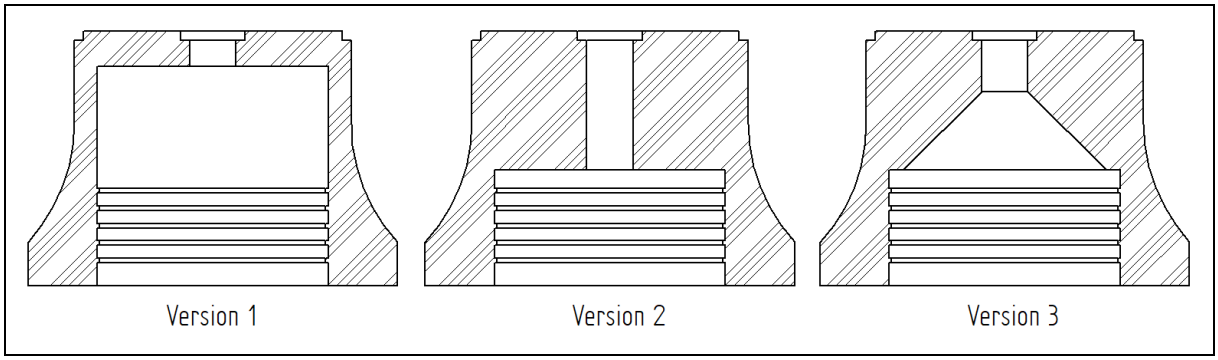


Abbildung 21: Darstellung verschiedener untersuchter pinhole-Konfigurationen

Neben den Konfigurationen aus Abbildung 21, wurden auch verschiedene pinhole-Durchmesser getestet. Es wird angestrebt eine möglichst hohe Resonanzfrequenz des Helmholtz-Resonators zu erreichen und den Messbereich unterhalb der Resonanz auszunutzen. Eine Verringerung des pinhole-Durchmessers verringert zwar die schwingende Masse, allerdings führt eine Verringerung des Durchmessers auch zu einem größeren Verhältnis von pinhole-Querschnitt zu eingeschlossenem Luftvolumen. Somit wird die Federsteifigkeit des Luftvolumens verringert, da, bei gleichbleibender Auslenkung, ein geringeres Volumen der schwingenden Luftsäule in das umschlossene Luftvolumen als Feder eintaucht. Letzterer Effekt überwiegt und es wird sich für den größten pinhole-Durchmesser von 2mm entschieden, da für die vorliegende Anwendung keine extrem kleinen Durchmesser sinnvoll erscheinen. Zudem lässt sich dieser pinhole-Durchmesser mit dem verwendeten Drucker zuverlässiger herstellen, da es bei sehr kleinen Öffnungen zum fertigungsbedingten Verschluss kommen kann.

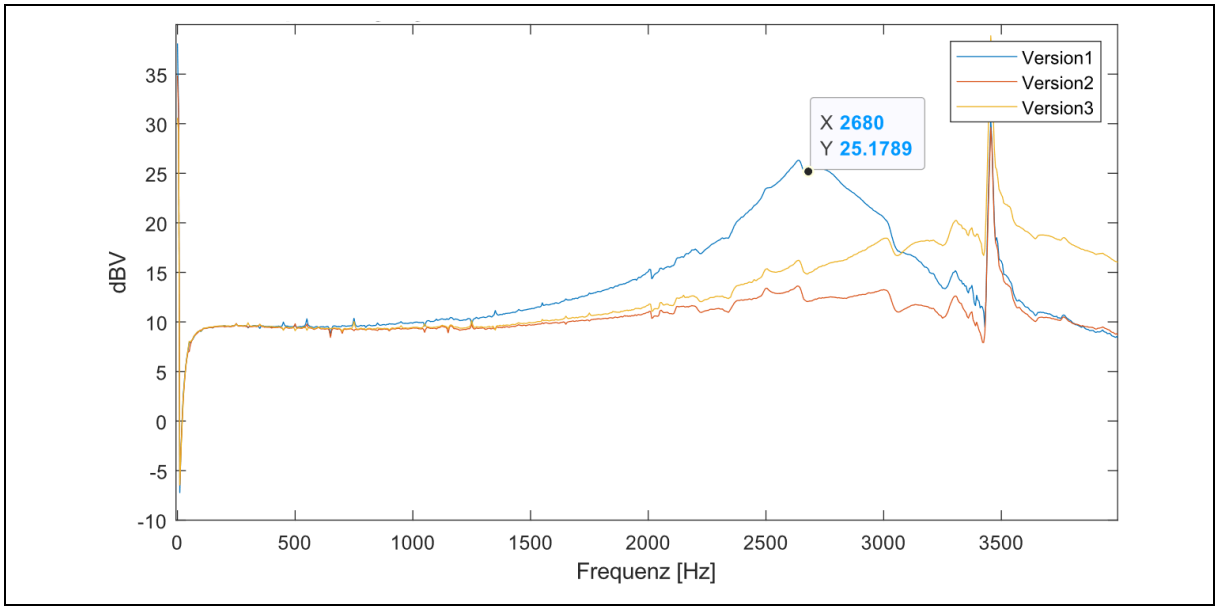


Abbildung 22: Amplitudenverlauf des getesteten Messmikrofons mit verschiedenen Versionen der pinhole-Adapter

Abbildung 22 zeigt den ungeglätteten Amplitudenverlauf der getesteten Konfigurationen im Vergleich zum Referenzmikrofon. Version 1 zeigt einen ausgeprägten Resonanzverlauf um eine Frequenz von etwa $2700Hz$ und beginnt bereits bei etwa $700Hz$ vom Amplitudengang des Referenzmikrofons abzuweichen. Die Resonanz von Version liegt etwas höher im Bereich um etwa $2900Hz$. Diese ist jedoch auch von allen drei Versionen am stärksten bedämpft. Version 3 hat die höchste Resonanzfrequenz bei etwas über $3500Hz$. Dies lässt sich damit erklären, dass die Länge des pinholes so kurz wie bei Version 1 gewählt ist, zugleich das Volumen des eingeschlossenen Luftvolumens durch Phasen verkleinert wurde. Im Vergleich zu Version 2 ist die Resonanz etwas ausgeprägter, jedoch weisen beide Versionen einen nahezu idealen Frequenzverlauf von etwa $100 - 1000Hz$ auf. Über $2000Hz$ sind leichte Unregelmäßigkeiten zu erkennen, die nicht mit abschließender Sicherheit dem Messmikrofon oder den sich verschlechternden Messbedingungen im Kundt'schen Rohr zugeordnet werden können. Die Anomalie bei $3450Hz$ fällt mit der Grenzfrequenz des Kundt'schen Rohres zusammen. Die schmalbandigen Überhöhungen fallen mit einem Vielfachen der Netzfrequenz zusammen und sind somit auf das Netzteil zurückzuführen. Diese könnten in Zukunft zum Beispiel durch eine Verwendung einer Batterie als Gleichstromquelle unterdrückt werden. Abbildung 23 zeigt die Phasenverläufe, welche die ausgeprägte Resonanz der ersten Version bestätigen.

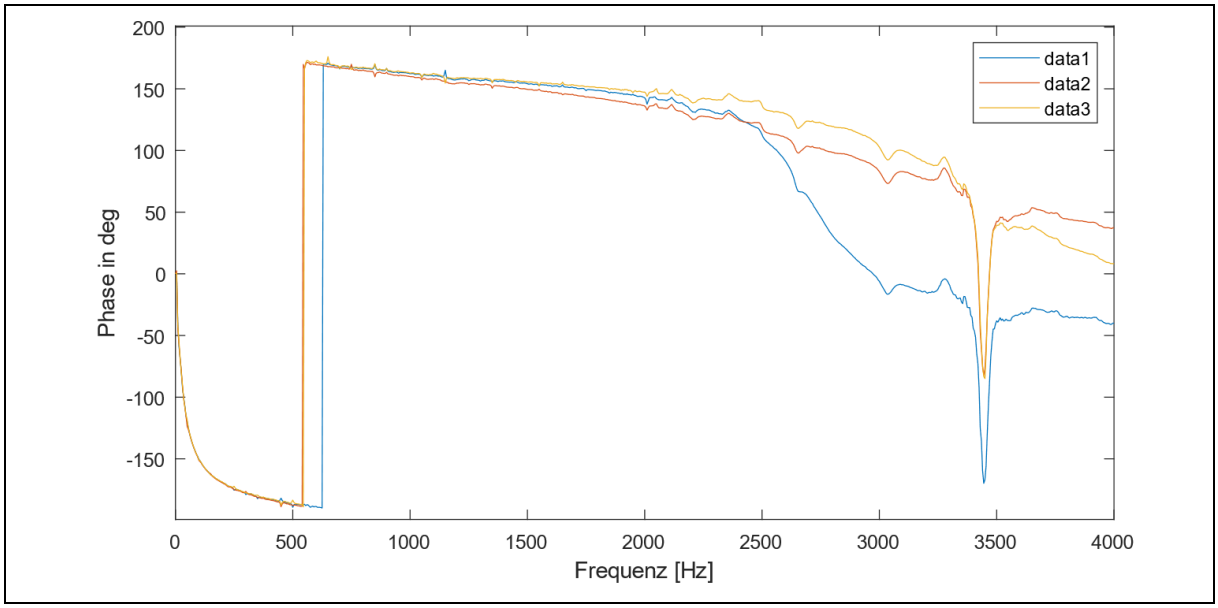


Abbildung 23: Phasenverläufe des getesteten Mikrofons mit den getesteten Adapterversionen

Für die Mikrofonkinematik wird Version 3 gewählt, da sie die besten Fertigungseigenschaften aufweist und der Frequenzgang unter $2000Hz$ nahezu deckungsgleich zu Version 2 ist. Außerdem hat Version 2 ein sehr kleines eingeschlossenes Luftvolumen im Verhältnis zum

Querschnitt der schwingenden Luftsäule. Luftfedern mit kleinem Kammervolumen im Verhältnis zum Stempel weisen eine starke Progressivität auf, da das Volumen der Kammer bei zunehmender Einfederung überproportional schnell abnimmt. Bei großen Pegeln können auftretende Nichtlinearitäten daher nicht ausgeschlossen werden. Leichte geometrische Abweichungen zwischen den einzelnen Mikrofon-Adapterpaaren würden bei Version 2 zudem zu einer anteilig deutlich stärkeren Modulation des Volumens der Luftfeder führen. Somit ist zu erwarten, dass Version 3 daher weniger sensibel auf Ungenauigkeiten während Fertigung und Montage reagiert.

Diese erste Umsetzung der Kinematik mit dem in Abbildung 21 dargestellten pinhole-Adapter Version 3 könnte in Zukunft durch Einsatz einer Gummidichtung an der Schnittstelle zwischen Elektret Kapsel und Adapter unkompliziert verbessert werden. Dies würde auch den Sitz der Mikrofone im Verhältnis zum momentanen strammen Sitz verbessern, bzw. die Gefahr der Beschädigung beim ein oder Ausbau verringern. Da weder Mikrofone noch die Adapter fest verklebt sind, ist ein Austausch ohne Probleme möglich.

3.1.2.2 Vermessung aller im Array verbauten Mikrofone

Um den Abfall bei sehr tiefen Frequenzen sowie den Anstieg im oberen Übertragungsbereich auszugleichen soll eine Frequenzgangkorrektur der mit der Mikrofonanordnung aufgenommenen Daten vor deren Weiterverarbeitung in MATLAB vollzogen werden. Dazu wird jedes Mikrofon inklusive des zugehörigen pinhole-Adapters in der in Abbildung 20 gezeigten Messvorrichtung gemessen. Somit war es auch möglich ein defektes Mikrofon direkt auszusortieren. Leider ist eine Doppelmessung aufgetreten, wobei das doppelt gemessene Mikrofon auch mit einer Ähnlichkeitsuntersuchung vom Amplituden- und Phasenverlauf nicht eindeutig identifiziert werden konnte. Daher wird für die vorliegende Arbeit ein Mittel aller Amplituden- und Phasenverläufe verwendet, um eine annähernde Kompensation zu erreichen. Dies ist für das prinzipiell irrelevant um das Prinzip der Schallfeldsynthese zu untersuchen, solange zur Bildung der Frequenzgänge mit denselben Mikrofonen aufgenommen wird, mit denen auch das synthetisierte Schallfeld überprüft wird. Das erzeugte Schallfeld wird in diesem Fall jedoch vom gemessenen Schallfeld abweichen. Da die Streuung der Mikrofone etwa $3dB$ beträgt, wird die maximale Abweichung annährend im Bereich von $\pm 1{,}5dB$ liegen und soll im Folgenden vernachlässigt werden. Für zukünftige Betrachtungen empfiehlt sich eine Neuvermessung der Mikrofone. Da diese zu diesem Zweck ausgebaut werden müssen, ließen sich in diesem Rahmen auch die Adapter gegen verbesserte Versionen austauschen.

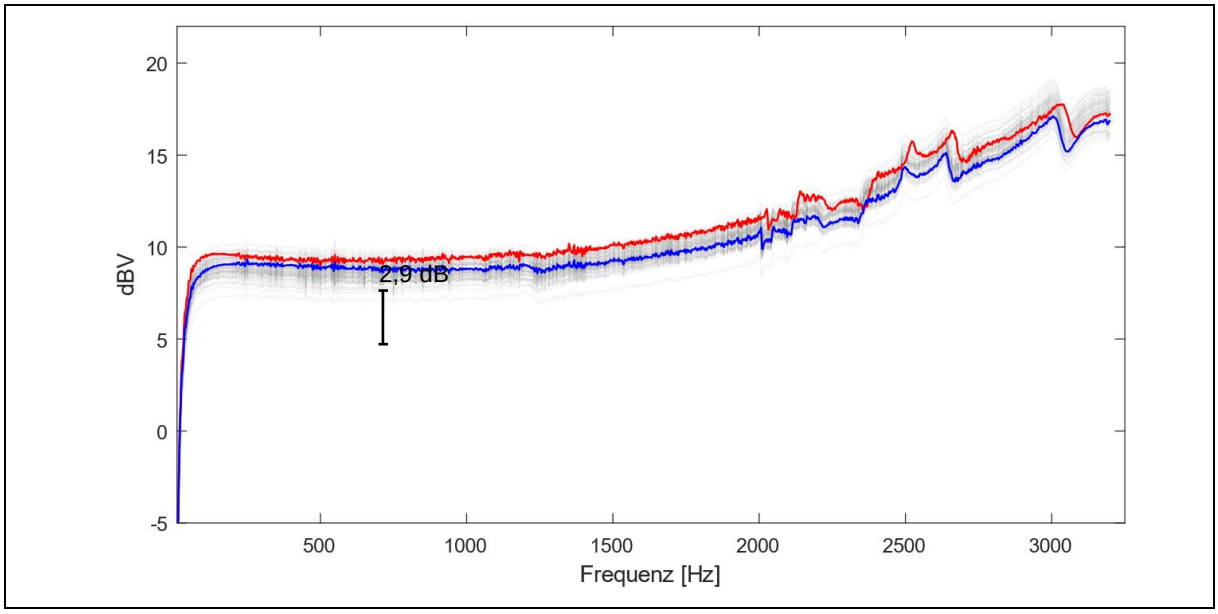


Abbildung 24: Amplitudenverläufe aller in der Kinematik verbauten Mikrofone inkl. Doppelmessung, Blau: Amplitudenverlauf des Mikrofons Nr.65, Rot: Amplitudenverlauf des Mikrofons Nr.63

Abbildung 24 stellt die Amplitudenverläufe der Messmikrofone in einem Frequenzbereich bis $3200Hz$ dar. Darüber wird angenommen, dass die Messung durch die Grenzfrequenz des Kundt'schen Rohres nicht mehr belastbar ist. Daher wird auch der obere Messbereich der Mikrofonkinematik auf $3200Hz$ oder eher $2000Hz$ begrenzt. Zwei hervorgehobene Kurven sollen zeigen, dass die Mikrofone sich nicht ausschließlich durch ihren Kalibrierfaktor unterscheiden. In Bezug auf die ebenfalls untersuchten Phasenverläufe konnte festgestellt werden, dass Mikrofon 6 eine um $180°$ gedrehte Phase im Vergleich zu den anderen Mikrofonen aufweist. Ein solcher Unterschied weist auf eine Verpolung des Messmikrofons hin. Allerdings kann hier nicht mehr eindeutig nachvollzogen werden, ob dies auf den Aufbau des Mikrofons selbst, oder auf einen Fehler während der Vermessung der Mikrofone zurückzuführen ist. In der Annahme, dass es sich um eine Verpolung innerhalb des Mikrofons handelt, wird diese in MATLAB um 180° gedreht. Da eine erneute Einmessung der Mikrofone ohnehin empfohlen wird, könnte das Mikrofon in diesem Zuge ausgetauscht werden, wenn der Fehler erneut festgestellt werden sollte. Aus den Frequenzgängen lässt sich eine gemittelte Korrekturfunktion, in Abbildung 25 rot dargestellt, ableiten.

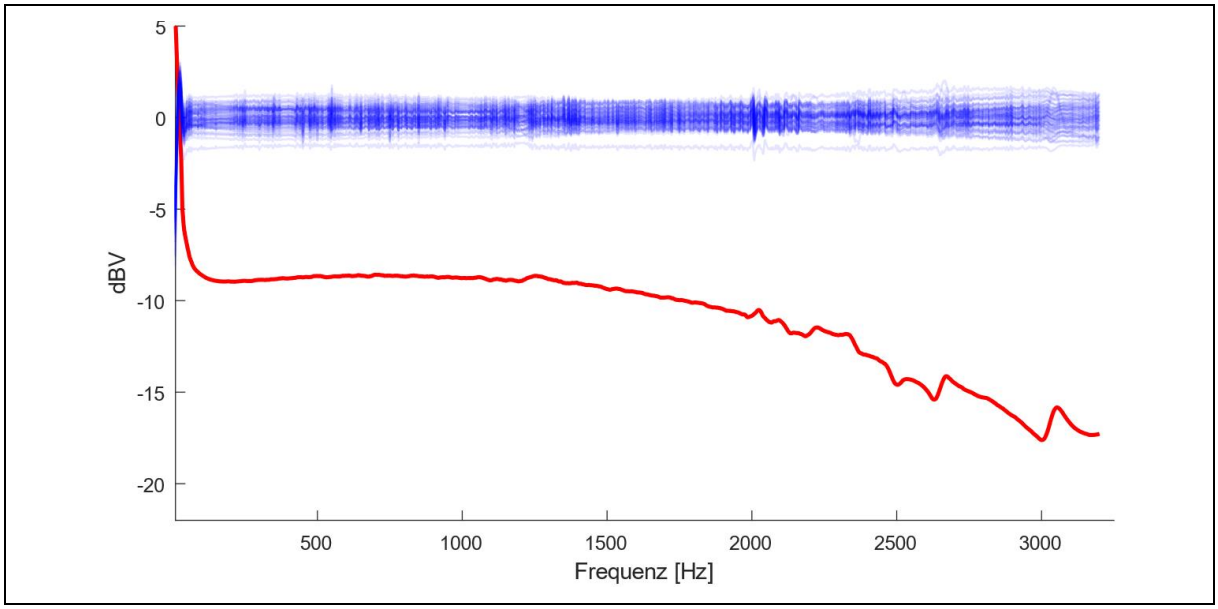


Abbildung 25: Rot: Amplitudenverlauf der gemittelten Korrekturfunktion, Blau: Amplitudenverläufe der korrigierten Mikrofone relativ zum Referenzmikrofon

Die Mikrofone werden durch die Korrektur effektiv dem Referenzmikrofon angeglichen. Nun kann mit der Ermittlung der Sensitivität des Referenzmikrofons auch die Beziehung zwischen dem am Frontend gemessenen Signal und dem das Mikrofon belastenden Schalldruck hergestellt werden. Der verwendete Kalibrator erzeugt einen Schalldruck von $114dB$ RMS bei einer Frequenz von $251{,}2Hz$. $114dB_{RMS}$ entsprechen einem RMS Wert für den Schalldruck von $10{,}0237Pa_{RMS}$ beziehungsweise einer maximalen Amplitude von $14{,}1757\,Pa$. Die am Ono-Sokki CF-9200 abgelesene Eingangsspannung beträgt $0{,}64V$ vom Maximum zum Minimum. Damit ergibt sich der Kalibierfaktor des Referenzmikrofons und folglich auch der korrigierten Messmikrofone zu $K_{REF} = 0.0226\,V/Pa$.

Ein weiterer Effekt der bei der Untersuchung der Mikrofone beobachtet wurde, ist eine sehr geringe Abhängigkeit der Sensitivität in Abhängigkeit von der Versorgungsspannung. Da es sich nur um wenige zehntel Dezibel handelt, wird dieser Effekt vorerst nicht vertieft betrachtet. Er kann jedoch bei einer potentiellen Neuvermessung der Mikrofone untersucht werden. Zudem kann in diesem Zuge auch eine Bestimmung der maximalen Pegelfestigkeit, welche in der Praxis durch die Aussteuerungsspannung des Operationsverstärkers begrenzt ist und somit von der Versorgungsspannung abhängig ist, stattfinden. Wenn in Zukunft für jedes Mikrofon der spezifische Frequenzgang bekannt ist, kann eine exakte Angleichung aller Mikrofone an das Labormikrofon bis hin zu einer oberen Grenzfrequenz von $3200Hz$ erreicht werden

3.1.3 Umsetzung der Verkabelung

Der dauerhafte Aufbau der Mikrofonkinematik erlaubt eine ebenfalls dauerhafte Verkabelung der Mikrofone. Dazu werden Flachbandkabel ausgewählt. Diese haben ein geringes Gewicht und können individuell in einzelne Signalleitungen aufgesplittet werden, womit eine übersichtliche Verkabelung ermöglicht wird. Diese wird über vier Hauptleitungen mit jeweils 34 Adern vom unteren Ende des Arrays aus realisiert. Alle Mikrofone lassen sich über kurze Wege mit diesen Hauptleitungen verbinden. Dazu sind jeweils zwei Adern paarweise nötig, eine davon ist die Signalleitung und über die andere wird das Mikrofon mit Masse verbunden. Jedem Mikrofon ist somit eine eigene Masseleitung zugewiesen um das Auftreten von Brummschleifen zu verhindern. Von den restlichen 4 Adern werden zwei zum Anlegen der Versorgungsspannung genutzt. Diese ist für alle Mikrofone gleich und benötigt keine individuelle Zuleitung. Abbildung 26 zeigt die Umsetzung der Verkabelung, wobei die Signal- und Masseleitungen über die grauen Flachbandkabel und die Spannungsversorgung über die grün gefärbten Leitungen realisiert sind.

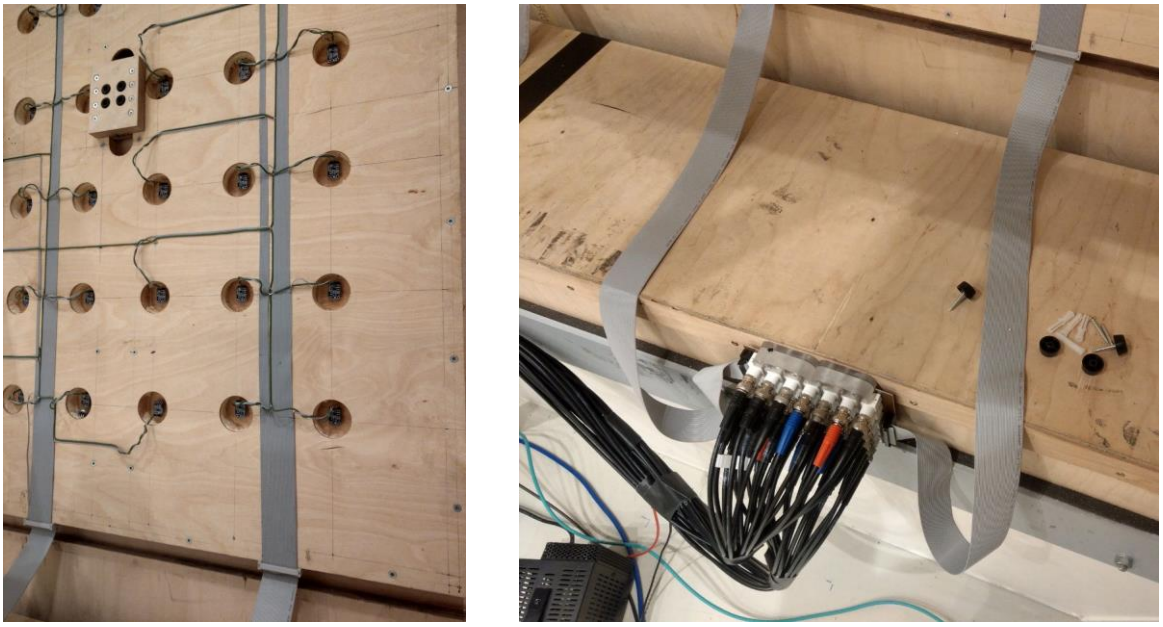


Abbildung 26: links: Verkabelung des Mikrofonrrays mit aufgeklebten Flachbandkabeln, rechts: Flachband-Patchkabel

Fest verklebte Pfostenstecker schließen die Hauptleitung am unteren Ende des Arrays ab. Um eine Beschädigung dieser Stecker, etwa durch ein Abstellen des Arrays auf der unteren Kante bei Transport oder Lagerung zu vermeiden, werden kleine Gerätefüße in deren direkter Nachbarschaft angebracht. Über vier möglichst kurze Flachband-Patchkabel wird eine Verbindung

zur Abbildung 30 gezeigten Anschlussplatine hergestellt. Diese Platine konvertiert die Pfostenverbindung in einzelne BNC-Anschlüsse für jedes Signal. Von der Platine aus kann die Verbindung zum Frontend über geschirmte Leitungen vervollständigt werden.

3.1.4 Aufbau des beweglichen Ausgleichsmechanismus

Die in der Prüföffnung verbaute Portalkinematik wurde für Messaufgaben mit geringer Belastung konzipiert. Um die Positionierung des Mikrofonarrays über diese zu ermöglichen, muss ein Ausgleich der Gewichtskräfte des Arrays realisiert werden. Diesen Mechanismus gilt es mit möglichst geringen Mitteln umzusetzen. Als Ausgangspunkt für diesbezügliche Überlegungen gilt der Umstand, dass ein ausgeglichen gelagertes Array keine oder nur geringe Kräfte am Anschluss zur Portalkinematik erzeugt. Zudem kann dann auf mehrachsige Führungen am Array verzichtet werden kann, wenn bei der Zustellbewegung, mit Ausnahme der als gering anzunehmenden Beschleunigungskräfte, keine Belastungen erzeugt werden. In z-Richtung[3] muss zudem nur eine geringe Bewegung zur Anpressung an die Prüföffnung erfolgen, was eine gesondert geführte Achse unnötig aufwendig erscheinen lässt. Diese Bedingungen könnten durch eine einfache schwebende Aufhängung des Arrays erfüllt werden, wenn eine ausreichende Beweglichkeit in allen Achsen ermöglicht wird. Bei Realisierung des Masseausgleichsmechanismus durch eine Umlenkung ist die Beweglichkeit in y-Richtung bereits sichergestellt. In z-Richtung kann der notwendige Verfahrensweg durch eine ausreichend lang dimensionierte flexible Aufhängung des Ausgleichsmechanismus hergestellt werden. In der Theorie kommt es bei einer solchen Ausführung zu einer Änderung der y-Position des Arrays bei Zustellung in z-Richtung, welche von der Position in y-Richtung und der damit verbunden Verkürzung der Aufhängung abhängt. Der Zusammenhang ergibt sich aus der Segmenthöhe der Sehne eines Kreisbogens[4] als $h = r\left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)$. Wenn die minimale Länge der Aufhängung mit $r = 500mm$ angenommen wird, so ergibt sich für $\alpha = 0{,}573°$ und schließlich $h = 0{,}0063mm$. Daher kann dieser Fehler vernachlässigt werden, wenn eine ausreichende Länge

[3] Definition der Verfahrensrichtungen analog zur Portalkinematik:

x→ horizontal von links nach rechts (bei Betrachtung vom Freifeldraum)

y→ vertikal von unten nach oben

z→ Tiefenrichtung vom Freifeldraum Richtung Hallraum

[4] https://de.wikipedia.org/wiki/Kreissegment (31.03.2022)

der Aufhängung eingeplant wird. Dies wird erreicht, indem eine Befestigung der Aufhängung nicht am oberen Rand des Arrays, sondern mittig erfolgt

Schließlich muss noch die Bewegung in x-Richtung ermöglicht werden, ohne dass dabei die Beweglichkeit in y-Richtung eingeschränkt wird. Theoretisch wäre es möglich die Masseausgleichende Bewegung in y-Richtung über eine oder mehrere drehbar gelagerte Seilrollen zu realisieren, welche wiederum auf einer Linearschiene angebracht sind um die Bewegung in x-Richtung zu realisieren. Jedoch können neben den durch das Gegengewicht auszugleichenden Gewichtskräften auch Momente auftreten, welche aufgrund der großen Ausmaße des Arrays, um alle drei Raumachsen nicht vernachlässigbar klein sind. Abbildung 27 zeigt schematisch die Momente, welche durch die Portalkinematik aufgefangen werden müssten, wenn dies nicht durch den experimentellen Aufbau erreicht werden kann.

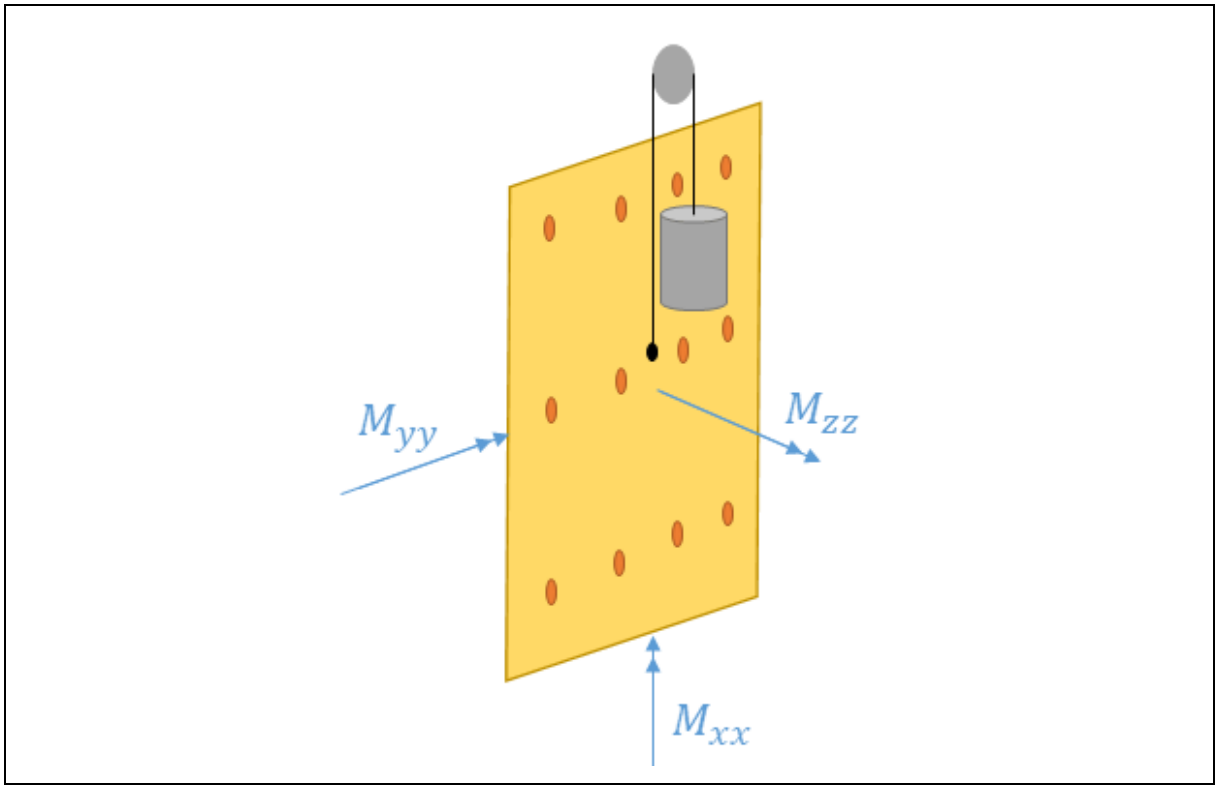


Abbildung 27: Schema der am Array angreifenden Momente

Das Moment um die z-Achse lässt sich auffangen, wenn mindestens zwei gekoppelte, schlupffreie Aufhängungen genutzt werden, welche in ausreichendem Abstand zur Mittelachse des Arrays befestigt werden. In ihrer Bewegung gekoppelt werden die Aufhängungen, indem sie auf derselben Achse spielfrei befestigt werden. Somit wird eine Rotation des Arrays um die z-Achse effektiv unterdrückt, da eine solche Rotation zu einer gegensätzlichen Bewegung der beiden Drehpunkte führen müsste. Die Schlupffreiheit der Aufhängung wird durch die

Verwendung von Zahnriemen sichergestellt, die zusätzlich den Vorteil einer hohen Biegsamkeit bei großer Tragkraft haben und somit die leichte Beweglichkeit des Aufbaus sicherstellen. Aus dieser Konfiguration mit gekoppelten Riemen folgt auch, dass eine exakt austarierte Platzierung des Gegengewichtes nicht mehr notwendig ist. Eventuelle Unterschiede in den Zugkräften der beiden Riemen werden in der Koppelung abgebaut und belasten somit nicht die Portalkinematik. Da die Befestigung des Arrays nicht an der Oberkante, sondern mittig ausgeführt werden soll, können erhebliche Kippmomente um die x-Achse folgen, wenn die Riemen nicht im Schwerpunkt des Arrays in Bezug auf dessen Dicke angreifen. Daher werden die Riemen durch Kanäle im inneren des Arrays geführt um die Befestigung im Schwerpunkt zu erreichen und gleichzeitig die Ungenauigkeit bei der Verfahrensbewegung in z-Richtung gering zu halten. Genau wie das Moment um die x-Achse lassen sich auch die Momente um die y-Achse nicht vollständig unterdrücken. Da das Array jedoch in ständiger Nähe zur Prüföffnung ist, würde es bei einer Verkippung um diese Richtungen schnell anschlagen, bevor eine Beschädigung der Portalkinematik erfolgen könnte. Somit ergibt sich der bewegliche Ausgleichsmechanismus nach Abbildung 28.

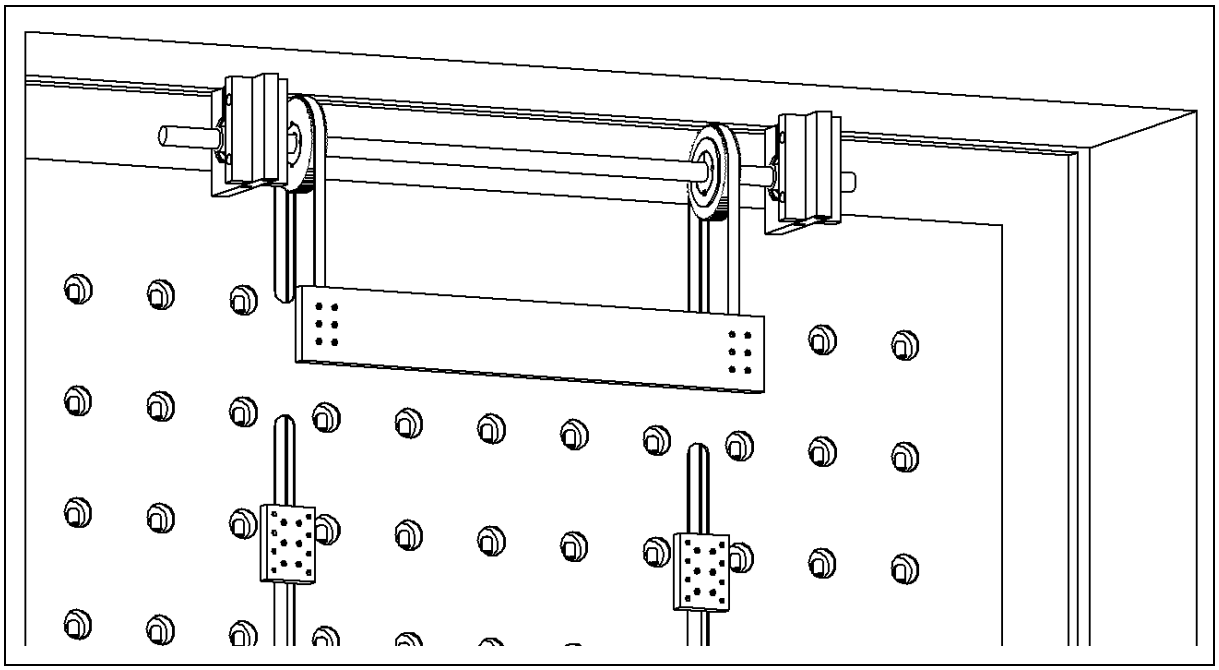


Abbildung 28: Ausgleichsmechanismus des Mikrofonarrays und die Befestigung in der Vertiefung der Prüföffnung mit Lagerblöcken

Die gleichzeitige Bewegung in x- und y-Richtung wird erreicht, indem die Welle mit den beiden Riemenrädern in Kugelumlaufbuchsen gelagert wird. Diese Buchsen werden in Kugellager eingepresst um eine kombinierte axiale und radiale Bewegung zuzulassen. Diese Anordnung hat sich als kostengünstig und leicht zu realisieren herausgestellt. Durch die Verwendung

offener Lager wird dabei die größtmögliche Reibungsarmut erreicht. Die Lager werden in zwei Lagerblöcken befestigt, welche wiederum an der Oberseite der Prüföffnung befestigt werden. Durch die Verwendung einer Stahlachse mit $25mm$ Durchmesser wird die nötige Steifigkeit trotz hohen Lagerabstandes sichergestellt.

3.2 Inbetriebnahme der Mikrofonkinematik

Die Inbetriebnahme der Mikrofonkinematik kann in folgende Einzelschritte unterteilt werden. Zuerst erfolgt eine Montage des Mechanismus des Mikrofonarrays in die Prüföffnung. Diese Aufgabe sollte von mindestens zwei Personen übernommen werden um die Gefahr der Beschädigung des Arrays und vor allem die Gefahr von Verletzungen auszuschließen. Nach der Montage der Prüföffnung kann die Portalkinematik auf den Einsatz im Zusammenspiel mit dem Array angepasst werden und schließlich mit diesem verbunden werden. Nun können die Mikrofone über Patch-Platinen mit den Anschlüssen des Frontends verbunden werden. Nach der Verbindung sollte jedes Mikrofon in der Messsoftware auf Signalabgabe kontrolliert werden.

3.2.1 Einbau des Arrays

Befestigung der Umlenkeinheit mit jeweils drei 120mm M8 Metallschrauben pro Lagerblock an der Oberseite der Prüföffnung. Dazu wurden an den passenden Positionen Rampamuffen dauerhaft in die Verschalung eingebracht. Ein Lagerblock kann getrennt vom restlichen Aufbau montiert werden, vor der Montage des zweiten Blocks muss jedoch die Achse mit den Riemenrädern zuvor durch die entsprechenden Lager geführt werden. Daher wird an dieser Stelle eine zweite Person benötigt, welche die Achse abstützt, während der zweite Lagerblock verschraubt wird. Ein Herausfallen der Achse ist nun unmöglich, da die Welle so lang gewählt wurde, dass die Riemenräder zuvor an die Lagerblöcke anschlagen.

Nach Montage des Umlenkmechanismus kann das Mikrofonarray in Einbauhöhe vor der Prüföffnung positioniert werden. Dazu ist ein Aufbocken um etwa 20-30cm notwendig. Nun führt Person eins die vormontierten Riemen über die Riemenräder während Person 2 darauf achtet, dass das Array nicht seine Position verlässt. An den losen Enden der Riemen lässt sich nun die Aufnahme für die Gegengewichte montieren. Hierzu wurden Markierungen am Riemen gesetzt, um eine gleiche Riemenlänge auf beiden Seiten sicherzustellen. An diese Halterung können nun über zwei Gewindestangen Stahlgewichte angebracht werden. Auch hier wird eine zweite Person zu Hilfe gezogen. *Es ist darauf zu achten, dass die Befestigungsmuttern dabei gekontert werden um ein unbeabsichtigtes Lösen zu verhindern. Es sollte zudem darauf hingewiesen werden, dass ein Aufenthalt unter dem montierten Versuchsaufbau aus*

Sicherheitsgründen nicht zulässig ist, auch wenn eine Havarie als sehr unwahrscheinlich angesehen wird. In zukünftigen Iterationen sollte im Zweifel über zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen wie eine Auffangvorrichtung oder ein Verdrehschutz der Muttern des Gegengewichtes nachgedacht werden.

3.2.2 Inbetriebnahme der Portalkinematik im ATB

Die Verfahrenseinrichtung wird von einem Arduino Mega 2560 gesteuert. Dieser befindet sich zusammen mit der Leistungselektronik in einem Schaltschrank im Freifeldraum. Über einen USB-Kabel wird eine Verbindung zum steuernden Computer hergestellt. Die Befehlseingabe erfolgt über eine Serielle Schnittstelle. Dazu kann entweder eine IDE wie die Arduino IDE mit einem Seriellen Monitor oder MATLAB genutzt werden. Die Befehlseingabe in MATLAB setzt einige von Lübker und Schnurrbusch [23] geschriebene Funktionen voraus welche dieser Arbeit in elektronischer Form beiliegen.

Nach erfolgter Montage des Mikrofonarrays kann dieses mit der Portalkinematik verbunden werden wie in Abbildung 29 dargestellt. Vorher muss diese auf den Betrieb im Zusammenspiel mit dem Array angepasst werden. Es wird eine Anpassung der zulässigen Beschleunigungen und Höchstgeschwindigkeiten in dem der Arbeit beiliegenden Sourcecode auf die in Tabelle 2 angegebenen Werte vorgenommen.

Tabelle 2: Einstellungen der Portalkinematik für den Versuchsaufbau

Bezeichnung in „config.h“	Korrespondierender Wert
stepper_X_Speed = 500	Geschwindigkeit X-Achse
stepper_Y_Speed = 500;	Geschwindigkeit Y-Achse
stepper_Z_Speed = 10000;	Geschwindigkeit Z-Achse
stepper_X_Ratio = 1000;	Beschleunigung X-Achse
stepper_Y_Ratio = 1000;	Beschleunigung Y-Achse
stepper_Z_Ratio = 2000;	Beschleunigung Z-Achse
x_Limit_High = 3000	Maximaler Eingabewert X-Achse
y_Limit_High = 3300	Maximaler Eingabewert Y-Achse
z_Limit_High = 1600	Maximaler Eingabewert Z-Achse

Dazu muss das Dokument „Portalsystem“ in einer kompatiblen IDE geöffnet werden. In dieser Arbeit wird die Arduino IDE in der Version 1.8.19 genutzt. Nach dem öffnen wird auch automatisch das Konfigurationsfile „config.h“ geladen. Nach dem anpassen der Werte auf die

empfohlenen, empirisch ermittelten Beträge, muss der Code erneut kompiliert und auf den Arduino hochgeladen werden. Dabei muss unter Umständen die Hilfsstromversorgung des Controllers ausgesteckt werden, da es sonst auch bei ausgeschalteter Kinematik zu Störungen beim hochladen des Codes kommen kann. Allgemein traten eine Reihe weiterer Probleme auf, deren Lösungen in einem kurzen troubleshootig-guide im Anhang 4 der Arbeit nachgereicht wurden. Es soll zudem darauf hingewiesen werden, dass alle Änderungen welche Brehme und Bauer[5] vorgenommen haben, rückgängig gemacht wurden. Deren Sourcecode stand nicht zur Verfügung, und die Modifikationen waren nicht mit dem ursprünglichen Code von Lübker und Schnurrbusch [23] kompatibel.

Abbildung 29: Verbindung der Z-Achse der Portalkinematik mit dem Mikrofonarray

Neben der Anpassung der Parameter muss auch eine Neuausrichtung der Endlagenschalter erfolgen. Die für den Aufbau gewählten Positionen der Schalter sind dafür auf den Führungsschienen markiert. Zusammen mit der Begrenzung der maximalen Eingabewerte ist nun eine gewisse Grundsicherheit für den Betrieb gegeben. Aufgrund der zahlreichen aufgetretenen Probleme bei dem Betrieb der Anlage besteht dennoch der Bedarf nach weiteren Sicherheitsvorkehrungen. Besonders die unzuverlässige Funktionsweise der Endlagenschalter kann

[5] DLR-IB-FA-BS-2018-99: Implementierung einer Kollisionserkennung und Abstandsfolgefunktion an einer automatisierten Schallmesseinrichtung

schnell zu unvorhergesehenen Betriebszuständen führen, da die Kinematik bei getrennter Verbindung zum Endschalter annimmt, dass sie sich in Referenzposition befindet. Wenn in der Realität jedoch eine andere Position angefahren ist, so ist die Begrenzung des maximalen Verfahrensweges über die Software keine zuverlässige Begrenzung um einen Crash zu verhindern.

Mit einer ausreichend steifen Verbindung zwischen Array und Kinematik sind nun von Seiten der Mikrofonkinematik alle mechanischen Voraussetzungen für die Durchführung des Experimentes gegeben.

3.2.3 Anschluss an das Frontend

In Abbildung 30 sind die einzeln durchnummerierten Leitungen zum Frontend zu erkennen. Somit soll das Vertauschen von Kanälen nach Möglichkeit ausgeschlossen werden. Es wird eine Kiste unter den Kabelstrang platziert, damit das Frontend nicht durch den Kabelzug beschädigt werden kann. Zudem wird das Frontend nicht direkt unter dem Array platziert um Beschädigungen im Falle einer Havarie zu verhindern.

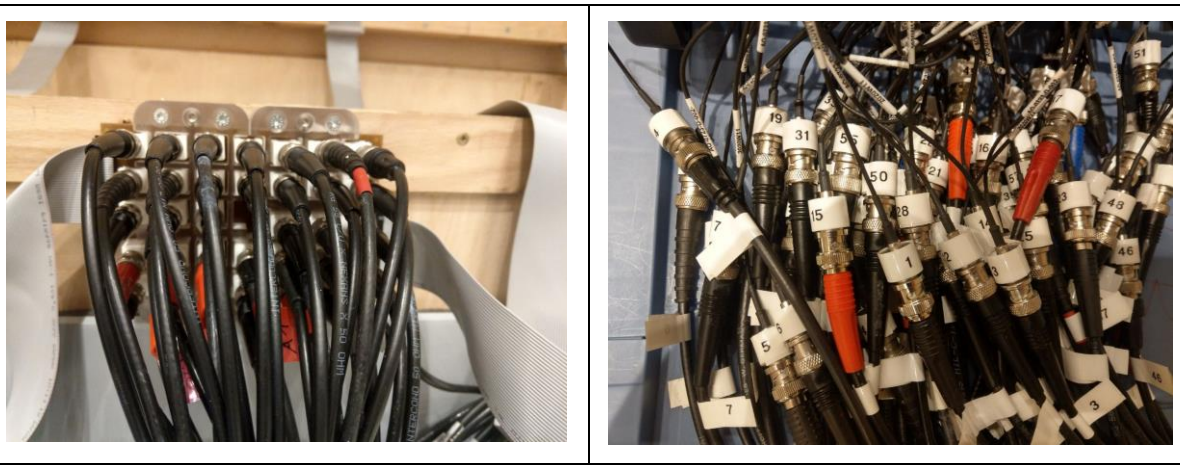


Abbildung 30: Signalanschluss des Arrays an das Frontend, links: Patchplatine, rechts einzeln durchnummerierte Koaxialkabel frontendseitig

Problematisch ist das historisch gewachsene Anschlussschema der Kanäle, da dieses keiner klaren Reihenfolge auf den Anschlussplatinen folgt. Aus diesem Grund wird bei der Verkabelung von Anschlussplatine zum Frontend darauf geachtet, dass jeder Kanal dem Korrekten Eingang am Frontend zugeordnet wird, also das erste Mikrofon mit Kanal 1, das zweite Mikrofon mit Kanal 2 und so weiter. Die Nummerierung der Mikrofone erfolgt bei rückseitiger Betrachtung, also vom Freifeldraum aus, von oben links nach unten rechts. Also setzt sich die

obere Reihe aus den Mikrofonen 1-11, die nächste Reihe aus den Mikrofonen 12-22 zusammen und so weiter. Damit die Verarbeitung der Daten durch das der Arbeit beiliegende Skript korrekt erfolgen kann, muss dieses Anschlussschema eingehalten werden. Die Nummerierung der Kanäle auf den Anschlussplatinen wird der Arbeit nachgereicht beigelegt

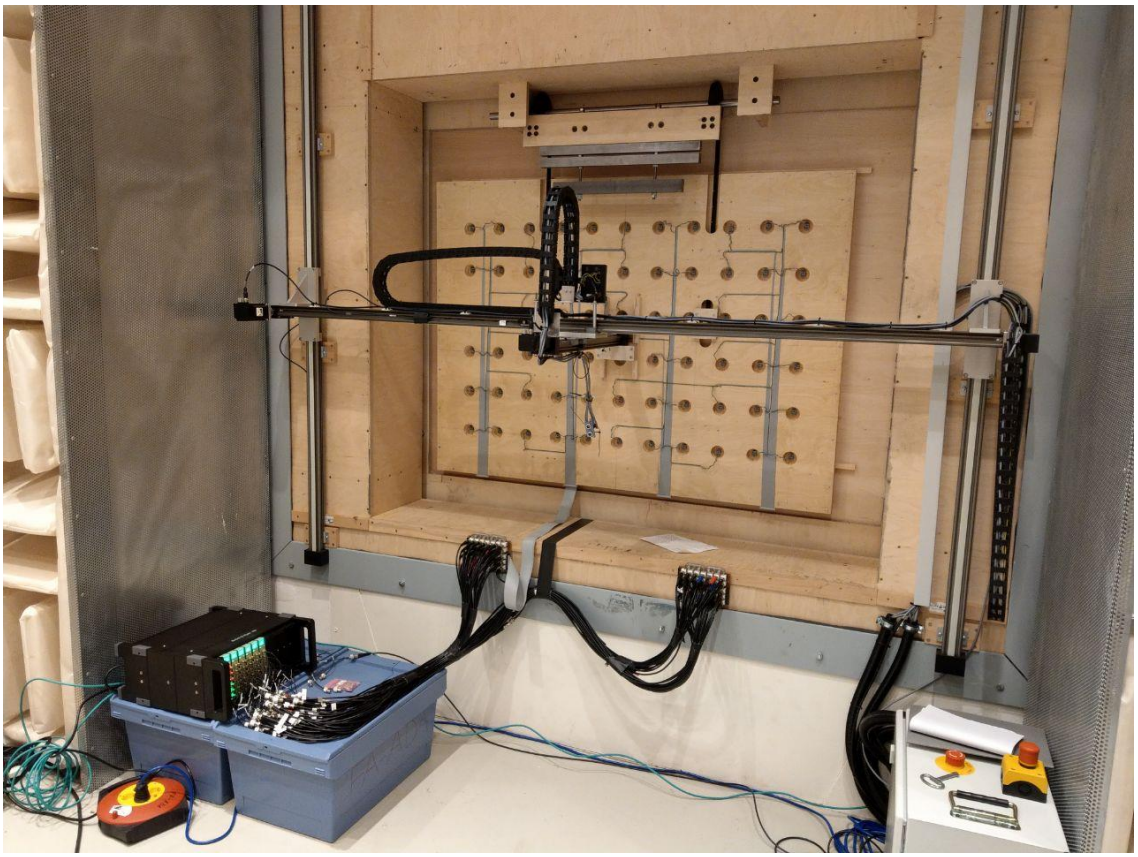


Abbildung 31: Versuchsaufbau vom Freifeldraum aus gesehen

Abbildung 31 zeigt den Versuchsaufbau von der Seite des Freifeldraumes. Es ist auch der Rahmen zu erkennen, welcher die Prüföffnung gerade soweit verkleinert, dass diese vom Array in seinen äußersten Grenzpositionen noch vollständig verdeckt wird.

3.3 Inbetriebnahme Lautsprechermatrix im Hallraum

Die Inbetriebnahme der Lautsprechermatrix im Hallraum erfordert aufgrund ihrer Abmessungen und ihres Gewichts einen relativ großen Aufwand. Um den Boden des Hallraums zu schützen, müssen Sperrholzplatten beim Verfahren der Matrix stückweise untergelegt werden. Dieser Umstand wird auch in Zukunft die Hürde zur Durchführung experimenteller Synthesen von Schallfeldern erhöhen. Vor der abschließenden Positionierung des LSA und des Adapterfeldes wurde eine Dichtung zwischen den Lautsprecherzeilen und dem Adapterfeld angebraucht, um die Transmissionsverluste so gering wie möglich zu halten. Außerdem wurde eine Anpassung der oberen drei Adapterzeilen an die Geometrie des LSA vorgenommen

3.3.1 Schnittstellenoptimierung zwischen Lautsprechermatrix und dem Adapterfeld

Bis auf die Vermessung einer Lautsprecherröhre durch Rzepecki [17] wurde der Arrayadapter noch nicht im Zusammenhang mit dem Lautsprecherfeld verwendet. Dabei müssen zuerst einige Anpassungen vorgenommen werden um die optimale Verbindung zwischen Adapter und LSA herzustellen. Rzepecki [17] untersucht in seinem Bericht verschiedene Dichtungen um den Austritt an der Schnittstelle zwischen Lautsprecherzeile und Adapterzeile zu verringern. Dabei handelt es sich um verschiedene Ausführungen selbstklebender Dichtbänder. Der Nachteil dieser Bänder besteht darin, dass sie sich von der Oberfläche lösen oder durch die Belastung beim Zusammenschieben von LSA und Adapter verrutschen können. Betrachtet man Abbildung 32, so wird ersichtlich, dass eine Dichtung auch das potentielle anschlagen der Lautsprechermembrane an die Trichter des Adapters verhindern muss. Der abgebildete Trichter entspricht zwar nicht exakt dem verbauten, jedoch haben beide Ausführungen das Problem, dass kein Platz für die Hubbewegung der Membrane eingeplant wurde. Da bei der Schallfeldsynthese der hohe Transmissionsverlust des Adapterfeldes durch die Invertierung der Matrix der Frequenzgänge ausgeglichen wird, sind hohe Auslenkungen durchaus zu erwarten. Diese könnten zu Schlägen an den Trichter und somit zu Verzerrungen oder auf Dauer sogar zur Beschädigung des Lautsprechers führen. Zudem umschließen die Trichter in der vorhandenen Ausführung die Sicke am Rand der Membrane exakt. Somit würden schon kleinste Abweichungen von der idealen Positionierung zu einer Überlappung von Trichter und Lautsprecher führen mit vergleichbaren Folgen.

Dieses Problem wird dadurch verstärkt, dass die Einbauverhältnisse für eine Mehrzahl der Zeilen keine Kontrolle der Positionierung von Lautsprecherzeile zu Adapterzeile zulassen. Aus diesem Grund wurde eine 1cm dicke selbstklebende Moosgummibahn der geringsten verfügbaren Härte auf die Zeilen des Adapters aufgeklebt. Diese hat im Bereich der Trichter Ausschnitte, welche dem äußeren Trichterdurchmesser entsprechen. Somit werden in alle Richtungen etwa 3-4mm zusätzliches Spiel zur Sicke aufgebaut um Platzierungsfehler zu kompensieren. Außerdem wird genügend Platz für das freie Schwingen der Membrane geschaffen. Da die Dichtung großflächig verklebt ist, ist ein unbeabsichtigtes Ablösen nicht wahrscheinlich. Durch die Wahl eines extra weichen Werkstoffs können Form- und Lagefehler der Lautsprecherzeile zur Adapterzeile in geringem Maße ausgeglichen werden.

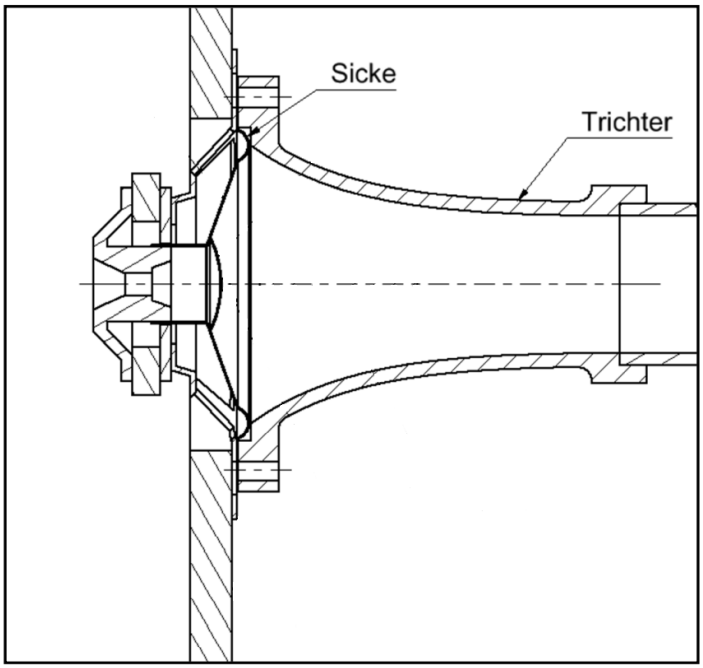


Abbildung 32: Schematische Darstellung der Einlasstrichter am Adapterfeld [18]

Im Rahmen der finalen Ausrichtung des Arrays fiel besonders bei den oberen Lautsprecherzeilen auf, dass diese deutlich zum Adapter verschoben sind. Abbildung 33 zeigt Abdrücke welche mithilfe eines kreideartigen Markierungssprays auf der Oberfläche hinterlassen wurden. Diese deutliche Abweichung konnte durch eine Änderung der Ausrichtung vom LSA relativ zum Adapter nicht behoben werden ohne an anderer Stelle die Ausrichtung zu verschlechtern. Durch die Dicke der neuen Dichtungen und der Schrägstellung der Front der Lautsprecherzeile wird das Problem zusätzlich verstärkt.

Abbildung 33: Fehlerhafte Ausrichtung der Trichterzeile zur Lautsprecherzeile, im Bild: die aufgerüsteten Moosgummidichtungen

Mithilfe der Abdrücke konnte die Abweichung für die oberen drei Zeilen bestimmt werden. Durch das Setzen neuer seitlicher Befestigungsbohrungen sind die Adapterzeilen um den ermittelten Betrag nach unten versetzt wurden, sodass eine ordnungsgemäße Position sichergestellt ist. Aufgrund der unübersichtlichen Einbauverhältnisse können nicht alle Abweichungen exakt festgestellt und korrigiert werden, jedoch wird die Positionierung der restlichen Zeilen zueinander als hinreichend exakt angesehen.

3.3.2 Ausrichtung der Lautsprechermatrix und des Adapterfeldes

Abbildung 34 zeigt die Positionierung des Arrays relativ zur Prüföffnung. Es werden etwa 12cm Abstand von der Quellenebene zur Mikrofonebene erreicht. Eine nähere Positionierung ist nicht möglich, da dies durch die Aufnahmevorrichtung für Testobjekte an der Öffnung verhindert wird. Zudem soll ein Schlagen des Quellenfeldes an die Prüföffnung verhindert werden. Nach Einstellen der optimalen Position von LSA und Adapter kann am LSA eine Verstellung der Neigung über Einstellschrauben in der Nähe der vorderen Rollen erfolgen. So kann eine Feinjustierung der optimalen Position vorgenommen werden um die Passgenauigkeit zum Adapterfeld sicherzustellen.

Am LSA sind einseitig Kniehebelspanner zur Fixierung der verschiebbaren Zeilen in der gewünschten Position angebracht. Wenn nun eine Zeile mit einem gewissen Druck gegen die weiche Dichtfläche gepresst werden, bleibt nur die fixierte Seite in die Dichtung eingepresst.

Da die Führungen der Zeilen ein seitliches Spiel haben stellt sich die Lautsprecherzeile schräg und löst sich auf der Seite ohne Kniehebelspanner von der Dichtfläche ab.

Abbildung 34: Finale Positionierung des Versuchsaufbaus auf der Hallraumseite

Um diesen Effekt zu verhindern sind auf der anderen Seite nun ebenfalls Kniehebelspanner montiert. In der Praxis kommt es dennoch zu einem leichten Lösen der Verbindung, wenn die Lautsprecherzeile zuerst angepresst wird und dann der Kniehebelspanner geschlossen wird. Es hat sich als effektiver erwiesen zuerst die Spanner zu schließen. Anschließend kann der Stempel des Spanners mithilfe eines Hebels in Rückseitige Richtung gedrückt werden, während gleichzeitig die Lautsprecherzeile angepresst wird. So entsteht eine Vorspannung, die die Zeile in die Dichtung drückt.

3.3.3 Vorschläge zur Optimierung der Ansteuerung der Quellenmatrix

Wie in den einleitenden Kapiteln beschrieben gestaltet sich die Signalwiedergabe über das Lautsprecherarray als verhältnismäßig langwieriger Prozess. Dies liegt vor allem daran, dass das LSA von einem dezidierten Computer vom Hallraum aus kontrolliert wird. Dieser Computer ist bereits in die Jahre gekommen und somit ist seine Leistungsfähigkeit auch nicht mehr Zeitgemäß. Die verbauten Soundkarten existieren in dieser Ausführung seit 2003[6] und die zugehörige Software ist veraltet. Auch die Cubase-Software ist mit Stand 2009 bereits in die Jahre gekommen. Das Einlesen aller 113 abspielbaren Spuren kann mehrere Minuten in Anspruch nehmen. Grundsätzlich ist die Funktionsweise gegeben, jedoch eignet sich der Computer nur für den dafür vorgesehenen Anwendungszweck: dem Abspielen von Soundfiles. Modernere, kompaktere und flexiblere Lösungsvorschläge sollen im Anschluss unterbreitet werden. Dabei soll als Ziel der Automatisierung von Messabläufen in Verbindung mit dem Portalsystem im Freifeldraum im Auge behalten werden. Dies würde durch die momentane Verwendung der Remote-Desktopsteuerung sowie Cubase zum Abspielen von Audiofiles extensive Programmierfähigkeiten voraussetzen.

Die Vorschläge gleichen sich insofern, dass die Signalerzeugung nicht mehr im Hallraum durch den dezidierten Computer vollzogen wird, sondern in der Messwarte ausgeführt werden kann. Dazu wird der Umstand genutzt, dass für das MADI-Protokoll über Koaxialkabel, welches ohnehin Teil der Signalkette ist, Übertragungsstrecken über 100m angegeben werden[6]. Bisher wird davon nur etwa ein halber Meter genutzt. Wenn das Übertragungsverhalten der zum Hallraum verlegten Koaxialkabel es zulässt, könnte die MADI fähige Soundkarte also auch in der Messwarte lokalisiert sein. Dabei würde nur der Computer des LSA umgangen und die restliche Signalkette nicht angefasst werden.

3.3.3.1 Ausstattung einer Desktop Workstation mit einer MADI-Soundkarte

Variante 1 wäre die Ausrüstung einer leistungsfähigen Workstation in der Messwarte mit einer entsprechenden Soundkarte. Voraussetzung wäre, dass eine der beiden Workstations unbelegte PCI-Steckplätze hat. In diesem Fall könnte auch der Umbau der bisher im Hallraum verbauten Soundkarten in die Messwarte in Betracht gezogen werden. Dies wäre die

[6] https://archiv.rme-audio.de/products/hdsp_madi.php (31.03.2022)

kostengünstigste Umsetzung mit dem Nachteil, dass die veraltete Steuerungssoftware unter Umständen übernommen werden müsste. Möglicherweise wird die Soundkarte von aktuelleren Rechnern zudem nicht mehr unterstützt. Alternativ kann auch eine neuere Version der Karte vom selben Hersteller zum Einsatz kommen. Damit kommt die HDSPe MADI[7] oder die etwas modernere HDSPe MADI FX von RME[8]. Diese Karten haben bereits 128 Kanäle von denen jedoch nur 64 koaxial ausgegeben werden. Um auf die benötigte Anzahl koaxialer Kanäle zu gelangen könnte entweder wie bisher eine zweite Karte zum Einsatz kommen oder ein externer Konverter[9], welcher optische MADI-Signale in koaxiale umwandelt. Wenn die nachträgliche Verlegung von Kabeln von der Messwarte in den Hallraum umsetzbar ist, ließen sich auch direkt die beiden optischen Outputs der HDSPe MADI FX nutzen und auf einen Konverter verzichten. Zudem ermöglicht die optische Verbindung eine noch höhere Signalintegrität. Die nötigen optischen Eingänge stellt die Signalkette des LSA bereit.

3.3.3.2 Externe USB oder Netzwerksoundkarte

Eine besonders flexible Lösung wäre die Verwendung einer externen Soundkarte. Mit einer solchen wäre man nicht mehr an einen Rechner gebunden und auch der „mobile“ Einsatz wäre ohne Probleme umsetzbar. Solche Soundkarten können je nach Modell auch eine Vielzahl weiterer Anschlussmöglichkeiten aufweisen, sodass ein Referenzkanal ohne Probleme umsetzbar ist. Von RME würde sich das MADIface XT anbieten. Diese Karte hat analog zur HDSPe MADI FX genügend optische Ausgänge um alle Lautsprecher anzusteuern, allerdings nur 64 koaxiale Ausgänge. Daher besteht auch hier die Notwendigkeit entweder einen Konverter oder optische Kabel zu verwenden.

Wenn eine Verbindung des LSA sowie der Mikrofonkinematik mit einem Computer in der Messwarte besteht, ließe sich bereits ein hoher Grad an Automatisierung erreichten. So konnte über eine private externe Soundkarte mithilfe der open-source-Software „pa-wavplay“[10] direkt aus einer Matrix eine mehrkanalige Audiospur wiedergegeben werden. Somit könnte für den vorliegenden experimentellen Aufbau ein automatischer Wiedergabe- und Positionierungsloop eingerichtet werden. Die Möglichkeit die Daten auch automatisch einzulesen

---

[7] https://www.thomann.de/de/rme_hdspe_madi.htm (31.03.2022)

[8] https://www.thomann.de/de/rme_hdspe_madi_fx.htm (31.03.2022)

[9] https://www.thomann.de/de/ssl_x_logic_deltalinkmadi_opticoax.htm (31.03.2022)

[10] https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4017-pa-wavplay (31.03.2022)

müsste dann über die IDE der Frontendsoftware „BK Connect“ eingerichtet werden. Ein solch integrierter Messablauf würde vermutlich vor allem dann Sinn machen, wenn das Array öfter für praktische Anwendungen zum Einsatz kommen soll. Die hier unterbreiteten Vorschläge verstehen sich daher ganz einfach als Anhaltspunkt. Die Verwendung von Soundkarten anderer Hersteller soll nicht ausgeschlossen werden, allerdings konnte kein „ideales“ Angebot gefunden werden, welches eine entscheidend bessere oder günstigere Lösung als mit den Produkten des bisherigen Herstellers RME darstellt.

4 Beschreibung des Analyse- und Syntheseablaufs zur Schallfeldsimulation

Aufgrund der Menge und der Art der zu verarbeitenden Daten ist ein normierter, skriptbasierter Ablauf bei der Erfassung und Analyse wünschenswert. Dieser erhöht den Aufwand bei der eimaligen Implementierung, verhindert an späterer Stelle jedoch Fehler, welche bei einer manuellen Verarbeitung und Zusammensetzung von Messwerten auftreten können. Solche Fehler sind im Nachhinein zudem nur noch schwer nachvollziehbar. Die zu diesem Zweck konzipierten Skripte teilen sich in vier Hauptskripte um die Übersichtlichkeit bei der Benutzung zu erhöhen. Um eine bessere Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten wurde der Arbeit ein Flussdiagramm, welches die Funktionsweise vereinfacht zusammenfasst, nachgereicht. *Das Skript und alle damit erzeugten Abbildungen wurden ursprünglich auf der MATLAB-Version 2021b erstellt. Im Anschluss an die Arbeit wurde das Skript so umgeschrieben, dass es Abwärtskompatibel bis zur Version 2017a ist.*

Ausgangspunkt der Analyse ist das Skript „BBB_INIT_Schallfeldsynthese“. Mit der Ausführung dieses Skripts kann entweder ein im Projektordner bestehendes Projekt geladen werden oder ein neues Projekt begonnen werden. Nach der Projektinitialisierung erfolgt in jedem Fall die Ausführung des Skriptes „CCC_Theory_Schallfeldsynthese“. An dieser Stelle lässt sich das zu erzeugende Druckfeldmodell auswählen. Diese Modelle werden im Ordner MATLAB/Druckfeldmodelle abgelegt. Das Produkt des Skriptes ist die Strukturvariable `Theory` in der die aus der Verteilung des Kreuzleistungsspektrums generierten Signale nach „Herleitung der Drucksignale an den Mikrofonpositionen“ gespeichert sind. Die zwei Skripte DDD_Simu_Schallfeldsynthese“ und „EEE_Measure_Schallfeldsynthese“ lassen sich nun unabhängig voneinander ausführen. Mit ersterem wird eine vereinfachte simulative Ermittlung der nötigen Frequenzgänge durchgeführt und in der Strukturvariable `SIMU` gespeichert. Das Skript „EEE_Measure_Schallfeldsynthese“ begleitet die experimentelle Ermittlung der Frequenzgänge durch das Sensorarray. Die Ergebnisse werden hier in der Strukturvariable `EXP` gespeichert. Sind die Frequenzgänge bekannt, so können die bestmöglichen Ansteuerungssignale zur Erzeugung des gewünschten Kreuzspektrums durch die Bildung der Inversen nach generiert werden. Diese Signale werden dann wiederum virtuell oder experimentell gemessen und die Verteilung des Kreuzspektrums sowie die Autospektren werden berechnet. Dieser Ablauf wurde für die Simulation so nah wie möglich an den experimentellen Ablauf angepasst. So ist es möglich strukturelle Fehler leichter zu identifizieren. Zudem ermöglicht ein Verständnis des Ablaufs der Simulation auch ein Verständnis für den experimentellen Ablauf und anders herum.

4.1 Initialisierung eines Projektes

Bei der Initialisierung des Projektes müssen zwei Fälle unterschieden werden. Entweder soll ein altes Projekt aus dem Ordner „Projekte“ geladen werden oder ein neues Projekt soll auf Basis aktueller Eingabevariablen erzeugt werden. Wenn ein vorhandenes Projekt geladen werden soll, muss die Projektbezeichnung im Projektordner ohne das angehängte Datum in das Eingabefeld „Projekt“ als String eingefügt werden. Führt man das Skript nun aus, so wird überprüft ob ein Ordner mit dem Projektnamen vorhanden ist und die in diesem abgespeicherten Daten werden geladen. Automatisch abgespeichert werden dabei lediglich die das Projekt beschreibenden Parameter um den benötigten Speicherplatz gering zu halten. Daher müssen die Ergebnisse nach dem Laden eines Projektes erneut berechnet werden, sofern diese nicht manuell abgespeichert werden. In diesem Ordner werden auch die Zeitdaten der experimentellen Messungen gespeichert. Alle Mess- oder Ergebnisdaten die manuell gespeichert werden, sollten einen Verweis auf das bei ihrer Erzeugung verwendete Druckfeldmodell in ihrer Benennung enthalten. Allgemein empfiehlt es sich diesen Verweis auch in den Namen des Projektes zu integrieren um Fehler zu vermeiden. Soll ein anderes Druckfeld synthetisiert werden, sollte auch ein neues Projekt erzeugt werden.

Die Erzeugung eines neuen Projektes erfolgt automatisch, wenn der spezifizierte Projektname nicht im Projektordner gefunden werden kann. MATLAB erzeugt dann einen neuen Ordner und speichert die Parameterdateien für das Projekt darin ab. Die Parameter für neue Projekte werden aus den Dateien „AAA_FlatArrayPrarameters“ und „AAA_SignalParameters“ ausgelesen. Daher müssen *vor* einer Initialisierung diese Dateien auf die für das zu erzeugende Projekt gewünschten Werte angepasst werden.

„AAA_FlatArrayPrarameters“ dient der Beschreibung der geometrischen Konfiguration des Projektes. Dazu werden zum einen die Abstände der Quellen als auch die Abstände der Mikrofone vorgegeben. Da die Abstände der Mikrofone des Mikrofonarrays festgelegt sind sollten diese nicht verändert werden, wenn eine experimentelle Messung durchgeführt werden. Wird eine höhere Auflösung benötigt kann dafür die Anzahl der Messungen in x- und y-Richtung spezifiziert werden. Die Auflösung ergibt sich dann als der Quotient aus richtungsspezifischen Mikrofonabstand am Array und der Anzahl Messungen in dieser Richtung. Momentan resultiert eine leichte Vergrößerung des Messfensters durch die Neuplatzierung bei einer Mehrzahl an Messungen. Theoretisch ist es möglich das Messfenster konstant zu halten, dies würde jedoch eine deutlich höhere Anzahl an Messungen und einen komplizierteren Ablauf bedingen. Wenn eine parametrische Studie der Mikrofondichte erfolgen soll, müsste dieser Punkt jedoch Beachtung finden. Die Abstände der Lautsprecher lassen sich hingegen weitestgehend beliebig

verändern, da diese nur für die Simulation der Frequenzgänge benötigt werden und den experimentellen Ablauf nicht entscheidend beeinflussen. Wenn eine Vergleichbarkeit zwischen Simulation und Experiment gegeben sein soll, so sollte die Anordnung natürlich ähnlich zur Anordnung des realen Quellenfeldes ausfallen. Zudem muss darauf geachtet werden, dass die Anzahl der Quellen gleich der Anzahl der 112 Lautsprecher am LSA ist, da diese Anzahl später zur Generierung der Audiospuren in Cubase genutzt wird. Ein Maskierungsvektor ermöglicht das selektive Aussetzen von Lautsprechern, die von links oben nach rechts unten mit den Einträgen 1-112 des Maskierungsvektors korrespondieren. Diese Lautsprecher werden dann bei der späteren Vermessung umgangen und tragen auch bei der Simulation keinen Anteil an der Schallfeldsynthese. Die Kanäle 11,12 und 107 sind vorerst dauerhaft maskiert, da sie defekt sind. Für das Mikrofonarray ist bisher kein Maskierungsvektor implementiert. Eine Variation der Mikrofonanzahl muss also dadurch erreicht werden, dass eine geringere Anzahl an Mikrofonen pro Zeile und Spalte spezifiziert wird. Für die Simulation kann diese Anzahl und auch der Abstand theoretisch beliebig gewählt werden. Bei einer Messung hingegen darf die Anzahl nicht größer gewählt werden als die Anzahl der verbauten Mikrofone. Zudem muss darauf geachtet werden, dass bei der Messung nur die Mikrofone gemessen werden, welche auch im Projekt spezifiziert sind. Dabei wird das virtuelle Mikrofonarray immer um den Mittelpunkt des Arrays aufgebaut.

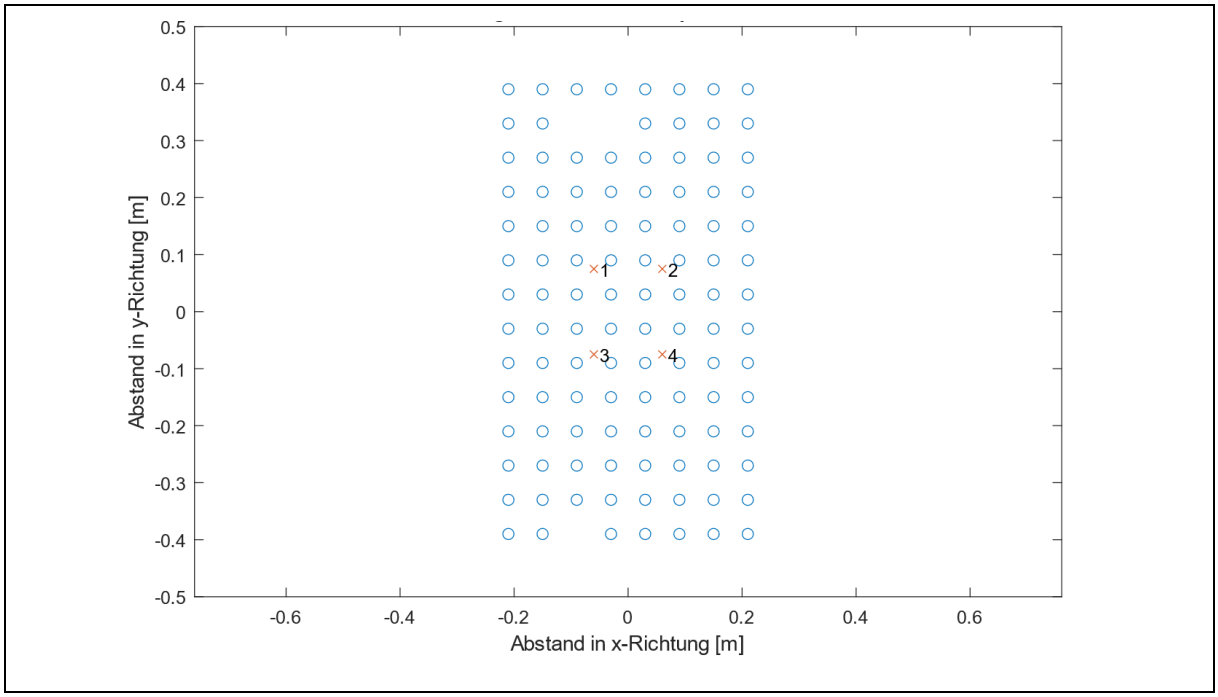


Abbildung 35: Anordnung des Mikrofonarrays um den Mittelpunkt des Lautsprecherarrays, wenn nur zwei Mikrofone pro Raumrichtung angegeben werden (Strömungsrichtung: x)

Schließlich kann in der Parameterdatei noch der Abstand zwischen Mikrofonarray und Quellenmatrix angegeben werden, welcher für diese Arbeit als konstant angenommen wird, jedoch theoretisch auch einer Funktion folgen kann. Dieser Abstand hat auf die experimentelle Vermessung ebenfalls keinen Einfluss. Um die Positionen der Mikrofone und Lautsprecher relativ zueinander überprüfen zu können, lassen sich diese am Ende des Initialisierungsskriptes plotten. Es wird eine zweidimensionale Darstellung unter Vernachlässigung des konstanten Abstandes in z-Richtung gewählt.

Die zweite Parameterdatei „AAA_SignalParameters“ dient der Festlegung der Signalparameter. Hier werden die obere Grenzfrequenz f_{max}, vorgegeben durch die am Messgerät eingestellte Samplingfrequenz, und die geforderte Frequenzauflösung f_{Res} angegeben. Aus dem Nyquist-Shannon-Theorem ergibt sich die maximale korrekt ermittelbare Frequenz als $f_{max} = \frac{f_s}{2} - f_{Res}$. Aus diesen Werten lässt sich wiederum die Blocklänge und auch die Signallänge bestimmen. Da es sich bei den Schallfeldbeschreibungen um stochastische Größen handelt, ist eine Blocklänge des Signals jedoch nicht ausreichend, um den Erwartungswert des Auto- und Kreuzleistungsdichtespektrums zu bestimmen. Daher muss zusätzlich die gewünschte Anzahl an Mittelungen des gemessenen Signals spezifiziert werden. Die für die gewünschte Auflösung und Grenzfrequenz nötige Signallänge wird nun mit der Anzahl der Mittelungen multipliziert, um die Länge des gesamten Signals zu erhalten. Zusätzliche Angaben sind der Kalibrierfaktor des Messmikrofons und der Kalibrierfaktor der Signalwiedergabe am Referenzkanal des LSA. Dieser wird benötigt, weil die Bildung der Frequenzgänge in dieser Arbeit gegen den Referenzkanal, also mit der Einheit $\frac{V}{V}$ erfolgt. Das Signal wird in MATLAB jedoch einheitslos in einem Bereich von -1 bis 1 erzeugt. Dies ist für die Funktion `audiowrite`, welche für die Generierung der von Cubase akzeptierten wav-Dateien zum Einsatz kommt, vorgegeben. Um einen Zusammenhang zwischen dem digitalen Eingangssignal und der Spannung am Referenzkanal herzustellen wurde für eine bekannte Eingangsamplitude die Antwort des Referenzkanals ermittelt und daraus der Kalibrierfaktor $K_{MAT} = \frac{u_{Referenzkanal}}{Matlabamplitude} = \frac{4{,}24}{0.9}\frac{V}{1}$ abgeleitet. Diese Messung erfolgte bei einer Faderstellung am digitalen Mixer der Soundkarte von $0dB$. Dieser Definition liegt die Annahme zugrunde, dass die Signalwiedergabe am Referenzkanal perfekt linear zum digitalen Signal ist.

Der letzte hier ausgeführte Wert ist die minimale Pausenlänge bei der Vermessung des Lautsprecherarrays, welche zwischen dem Abspielen der Messsweeps zweier Lautsprecher verstreicht. Diese Pause ist notwendig, damit der Nachhall des Hallraumes bei der Bildung des Frequenzgangs auch eindeutig dem entsprechenden Lautsprechersignal zugeordnet wird. Bei

diesem Prozess werden die Zeitsignale der Mikrofone im Bereich der Pausen getrennt und somit einem Lautsprecher zugeordnet. Wenn die Hallfahne eines Lautsprechers in die Aufnahme eines anderen Lautsprechers hineinreicht, würde dieser Anteil des Signals dem falschen Lautsprecher zugeordnet werden. Aus der Angabe der minimalen Pausenlänge ermittelt sich die tatsächliche Pausenlänge, die so definiert ist, dass die zuvor gewählte Frequenzauflösung bei der Bildung der Frequenzgänge nicht beeinflusst wird.

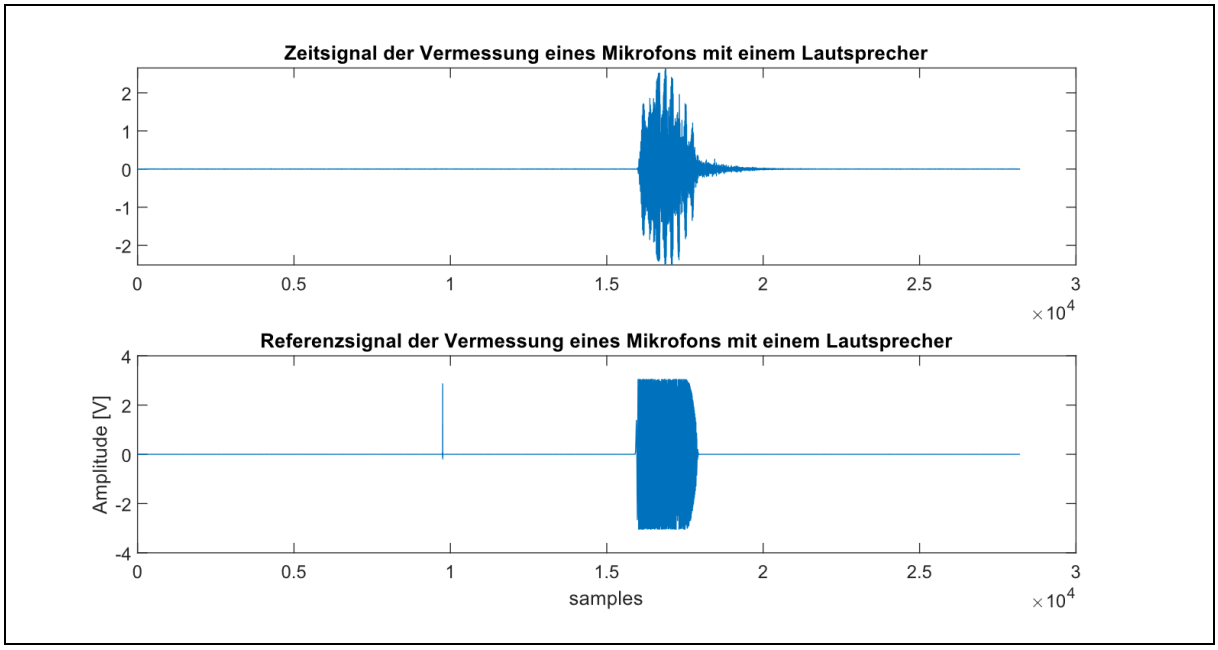


Abbildung 36: Abbildung Zeitsignal mit Hallfahne und Referenzsignal mit Trigger

Aus den Eingabeparametern werden bei der Initialisierung alle nötigen zusätzlichen Größen erzeugt. Die geometrischen Parameter werden in der Strukturvariable `par` und die signalspezifischen Parameter in der Strukturvariable `sig` zusammengefasst. Diese beiden Variablen werden dann im Projektordner abgespeichert und können wie beschrieben wieder geladen werden.

4.2 Laden und diskretisieren der theoretischen spektralen Verläufe

Sind die gewünschten beschreibenden Parameter geladen, kann auf Grundlage eines Auszuwählenden Schallfeldmodells die Matrix des Kreuzleistungsspektrums nach „Herleitung der Drucksignale an den Mikrofonpositionen“ bestimmt werden. Dazu sind zu Beginn des Skriptes „CCC_Theory_Schallfeldsynthese“ die vorhandenen Modelle aufgeführt. Das zu verwendende Modell wird auskommentiert und das Skript kann ausgeführt werden. Das Schallfeldmodell muss so formuliert sein, dass es eine Änderung des Kreuzspektrums in Abhängigkeit vom Abstand zwischen zwei Punkten definiert. Wenn das Schallfeld nur räumlich homogen ist, so

erfolgt das Diskretisieren durch die Multiplikation der Modellbeziehung mit den Abstandsmatrizen `par.Mic.D_x` sowie `par.Mic.D_y`. Wenn es hingegen räumlich isotrop ist, dann kann die Matrix der absoluten Abstände `par.Mic.D_r` verwendet werden. Diese Matrizen enthalten jeweils den Abstand eines jeden Punktes zu allen anderen Punkten.

Im Skript „CCC_Theory_Schallfeldsynthese“ wird zudem eine Eigenwertezerlegung durchgeführt um die optimale Filtermatrix $\boldsymbol{P}$ zu bestimmen. Anschließend wird diese mit auf Grundlage der Signalparameter erzeugten weißen Rauschsignale multipliziert um Signale für den Druckverlauf an jeder Mikrofonposition zu erhalten Die weißen Rauschsignale werden so erzeugt, dass sie ein nach Gleichung ***(2.1)*** ein Autoleistungsspektrum von 1 aufweisen. Somit ergeben sich Signale aus denen wiederum die Auto- und Kreuzspektren generiert werden können. Dies dient zum einen der Überprüfung des Skriptes, zum anderen ermöglicht es eine Abschätzung der notwendigen Anzahl an Mittelungen. Für den Spezialfall, dass die Matrix des Kreuzspektrums keine komplexen Einträge enthält, reicht theoretisch eine einzige Mittelung um exakt den Zielwert abzubilden, da das weiße Rauschsignal mit einem konstanten Spektrum im Bildbereich erzeugt und lediglich die Phase zufällig variiert wurde. Wenn die zu reproduzierende CSD-Matrix jedoch komplexe Anteile enthält, müssen mehrere Mittelungen vorgenommen werden. Die Anzahl der Mittlungen ist dabei durch die Synthesezeit und den Arbeitsspeicher des ausführenden Computers begrenzt, da jede Matrixoperation für jede Mittelung und jede Frequenz ausgeführt werden muss.

4.3 Ermitteln der akustischen Frequenzgänge

Um die zuvor generierten Mikrofonsignale durch ein Array von Lautsprechern zu erzeugen, muss der Einfluss der Wiedergabekette, charakterisiert durch die elektroakustischen Frequenzgänge, durch eine Multiplikation der Matrix der gewünschten Signale mit der invertierten Matrix der Frequenzgänge herausgerechnet werden. Diese Matrix kann entweder auf Basis einer Messung ermittelt oder im Falle dieser Arbeit auf Basis vereinfachter Annahmen approximiert werden.

4.3.1 Approximieren der Frequenzgänge für eine Simulation

Theoretisch ist es möglich das Übertragungsverhalten des Systems „LSA“ von der Spannung am Eingang bis zum Ausgang der Adapterröhren durch ein sogenanntes „lumped parameter model“ zu beschreiben. Der Begriff stammt aus der Elektrotechnik, wo das idealisierte Übertragungsverhalten von Bauteilen wie Spulen und Kondensatoren als lumped parameter

beschrieben werden kann. Meyer [2] verwendet für seine Simulation des LSA ein solches idealisiertes Modell für einen Lautsprecher. Das Übertragungsverhalten von einfachen akustischen Elementen, wie etwa den Adapterröhren, kann ebenfalls durch solche Modellvorstellungen analytisch abgebildet werden, solange die dazu getroffenen Annahmen halten. Für diese akustischen Elemente müssen die dazu korrespondierenden elektronischen Ersatzschaltkreise gefunden werden. Aus zeitlichen Gründen wird in dieser Arbeit auf eine solche Modellierung des Systems bis zu diesem verzichtet, da die Matrix der Frequenzgänge bis zu diesem Punkt ohnehin eine Diagonalmatrix ist. Stattdessen werden die Frequenzgänge bis zum Ausgang der Röhren durch eine Beispielhafte Messung einer Röhre vertreten werden.

Diese Messung erfolgte mit dem Onosokki CF-9200 bis zu einer oberen Grenzfrequenz von 3200Hz gegen die Ausgangsspannung am Referenzkanal bei gleicher Faderstellung der Referenz und des Lautsprechers. Abbildung 37 zeigt den am Adapterausgang gemessene Frequenzgang. Gut ersichtlich sind die stark ausgeprägten Rohrresonanzen. Im Vergleich zu dem ebenfalls dargestellten durch Rzepecki [17] ermittelten Frequenzgang im Freifeldraum wird ein früherer Abfall zu den tiefen Frequenzen beginnend bei etwa 400Hz festgestellt. Dies kann an der Messung im extremen Nahfeld liegen, da hier die potentiell konstruktiven Überlagerungen bei tiefen Frequenzen anteilig weniger stark eingefangen werden. Betrachtet man Rzepeckis Versuchsaufbau, so könnten Reflexionen tieffrequenter Schallenergie zum Beispiel am Schallharten Boden, oder an der Prüföffnung des Freifeldraums auftreten. Besonders die Freifeldöffnung führt in einem eingeschränkten Bereich zu einem Halbkugelförmigen Abstrahlverhalten bei tiefen Frequenzen, während mittlere und hohe Frequenzen durch die Absorbtionselemente um den Trichterauslass stärker bedämpft werden. Somit ist eine exakte Vergleichbarkeit eingeschränkt.

Vom Ausgang der Röhre aus wird die Schallausbreitung als atmende Kugel angenommen, womit sich für den Schalldruck zu einem Punkt mit dem Abstand r_{LSxMic} folgender Zusammenhang ergibt:

$$p_{Mic} = p_{LS} * \frac{r_{Quelle}}{r_{LSxMic}} * e^{ikr_{LSxMic}} \tag{4.1}$$

Diese Approximation ist zulässig, da für den betrachteten Frequenzbereich die Wellenlängen im Verhältnis zur Quellengröße als so groß angenommen werden können, dass keine Richteffekte eintreten. Solche Richteffekte müssten mit einer Zerlegung der Quelle in Teilstrahler abgebildet werden [2], worauf an dieser Stelle verzichtet werden kann. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass der Abstand zwischen Mikrofonebene und Quellenebene größer

gewählt wird als $25mm$, da die Mikrofonebene sonst in das Innere der Kugel gerät. Abbildung 37 zeigt zusätzlich eine Abschätzung des Schalldrucks in 1m Entfernung nach Gleichung *(4.1)* um die Vergleichbarkeit der Messung am Adapterausgang mit der von Rzepecki [17] Durchgeführten Vermessung des Arrays herzustellen. Diese wurde in 1m Entfernung getätigt und liefert die Frequenzgänge in Abhängigkeit einer von ihm angegebenen „Mixerstellung". Diese Messungen sind jedoch nur bedingt aussagekräftig, da keine Mixerstellung für den Referenzkanal angegeben wird. Vernachlässigt man den früheren Abfall zu tiefen Frequenzen decken sich Approximation und Messung in Bezug auf den Pegel hinreichend gut, wenn man annimmt, dass Rzepecki die Messungen bei konstanter Faderstellung von $\approx 0dB$ des Referenzkanals getätigt hat. Nur so ließen sich die Unterschiede in der Sensitivität in Abhängigkeit von der von ihm angegebenen „Mixerstellung" erklären. Die Approximation entspricht dann den Erwartungen in Bezug auf den erreichbaren Pegel pro Volt.

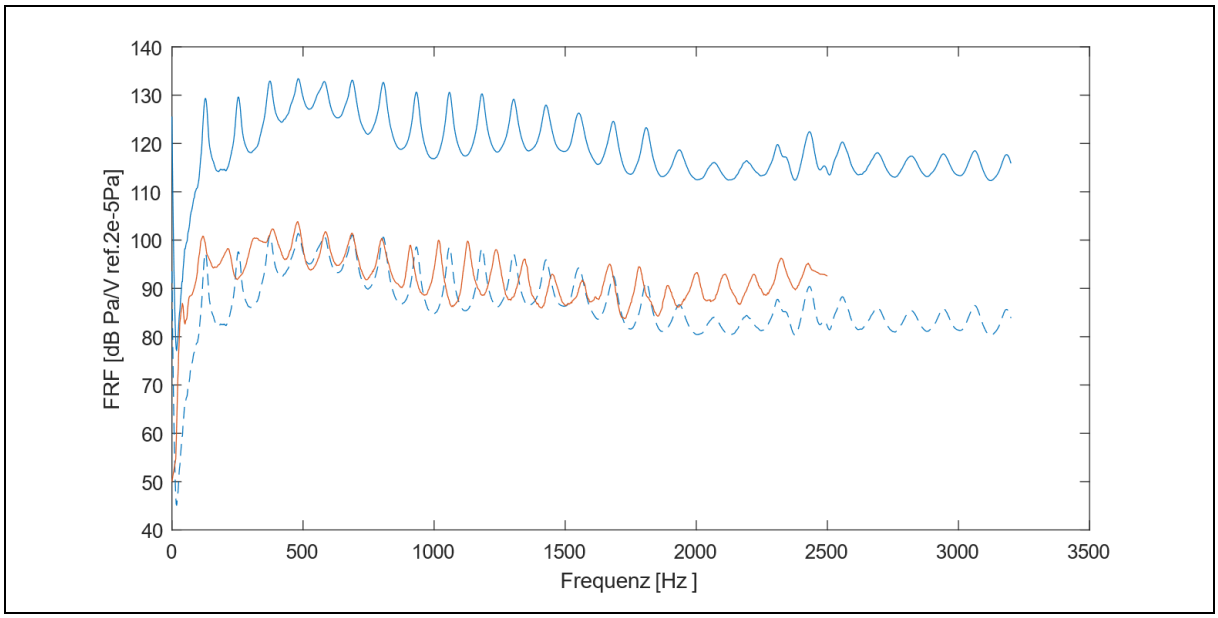


Abbildung 37: **Blau: Frequenzantwort am Auslass einer Adapterröhre als Ausgangspunkt der Approximation der Frequenzgangmatrix, blau gestrichelt: approximierter Frequenzgang in 1m Entfernung nach Gleichung *(4.1)* unter Vernachlässigung des Faktors 2, rot: von Rzepecki im Freifeldraum ermittelte Frequenzantwort[11] für 1m Entfernung und einen „Mixer gain" von -0,3dB [17]**

[11] Elektronisch ausgelesen mit „WebPlotDigitizer": https://automeris.io/WebPlotDigitizer/ (Version 4.5 15.08.2021)

Der Zusammenhang aus Gleichung *(4.1)* ermöglicht nun die Bildung einer vollbesetzten Matrix der Frequenzgänge, da jedes von einem Lautsprecher ausgegebene Signal auch in unterschiedlichem Maße von jedem Mikrofon aufgenommen wird. Die zugehörige MATLAB-Funktion lautet `Transferfunc_estimate`. Der gemessene Frequenzgang ist als MATLAB-Datei im Ordner „AddData“ abgespeichert. Hier finden sich auch die Frequenzgänge der Mikrofone des Mikrofonarrays. Die Funktion `LoadLSAFRF` liest den beispielhaft aufgenommenen Frequenzgang des Arrays aus, glättet diesen leicht und interpoliert die Werte an den für das Projekt vorgegebenen Frequenzen. Schließlich werden die logarithmischen Werte in physikalische übersetzt um Amplitude und Phase in eine komplexe Zahl umwandeln zu können. Die so erzeugte Variable trägt den Namen `Simu.FRF.LSArrayV_V`.

4.3.2 Experimentelle Ermittlung der Frequenzgänge

Die experimentelle Ermittlung der Frequenzgänge kommt dem Vergleich eines gemessenen Mikrofonsignals mit dem zugehörigen bekannten Inputsignal gleich. Definiert man den Referenzkanal der Soundkarte als Inputsignal, so hat dies den Vorteil, dass der Frequenzgang unabhängig von der Fader-Stellung ist, wenn darauf geachtet wird, dass die Fader von Referenzkanal und aufgenommenen Lautsprecher die gleiche Stellung aufweisen. Im Gegenzug kann die Signalbeeinflussung der Soundkarte nicht eingefangen werden. Diese Annahme ist haltbar, da moderne DA-Wandler und Verstärker im Verhältnis zum akustischen Teil des gesamten Frequenzgangs ein nahezu ideal glattes Verhalten aufweisen. Die gemessenen Frequenzgänge liegen in der Einheit $\frac{V}{V}$ vor. Durch das Dividieren des Frequenzgangs mit dem Kalibrierfaktor des Referenzmikrofons wird die Beziehung zum Luftdrucksignal am Mikrofon in $\frac{Pa}{V}$ hergestellt.

Als Messignal wird ein Sinus-Sweep genutzt. Dieser hat einen besonders hohen Signal-Rausch Abstand, da vom Lautsprecher zu jedem Zeitpunkt nur ein sehr schmalbandiger Bereich des Spektrums wiedergegeben wird. Somit kann ein höherer Pegel wiedergegeben werden als bei weißen Rauschsignalen, die ebenfalls infrage kommen. Eine Untersuchung verschiedener Blocklängen und Sampleraten bei der Frequenzgangermittlung mit dem Onosokki CF-9200 hat keine eindeutig ersichtlichen Vorteile bestimmter Konfigurationen gezeigt. Daher wird die Ermittlung der Frequenzgänge immer mit den projektspezifischen Signalparametern vollzogen. Durch dieses geschlossene System soll das Auftreten von leakage-Effekten bei der Umwandelung der Zeitsignale in Spektren verhindert werden. Bei der Ausführung des das Experiment begleitenden Skriptes werden daher zu Beginn die entsprechender Sweeps erzeugt und als mehrkanalige wav-Datei im Projektordner abgespeichert. Alle Lautsprecher die

durch den Maskierungsvektor ausgeschlossen wurden werden als leere Spur hinzugefügt. Somit genügt es die Audiodatei im ersten Kanal in Cubase einzufügen damit alle Spuren am richtigen Platz eingelesen werden. Bisher erfolgt ein upsampling auf 32000Hz vor dem Schreiben der Audiodatei. Dies ist die geringste Sampling-Frequenz welche in Cubase und dem Treiber der Soundkarte einstellbar ist. Theoretisch sind auch höhere Sampling-Frequenzen möglich, doch dies würde zusätzlichen Speicherplatz in Anspruch nehmen und ein Hochladen der Audiodateien in Cubase weiter verlangsamen. Es muss bei der Wiedergabe allerdings darauf geachtet werden, dass die entsprechende Frequenz in den Projekteinstellungen von Cubase ausgewählt wird, da sonst die wiedergegebene Tonhöhe abweicht. Die Samplerate der Soundkarte passt sich dann automatisch den Projekteinstellungen an.

Nach dem Erzeugen des Sweeps wird die „Messschleife“ im Skript ausgeführt. Dieser soll die Messung verständlich begleiten. Eine Schleife ist implementiert, da mehrere Teilmessungen notwendig werden um verschiedene Arraypositionen abzubilden. In der Schleife wird die Ausführung des Skriptes, mit der Aufforderung das Array in die im Command-Window(CW) angezeigte Position zu fahren, unterbrochen. Wenn das Array in Position ist, kann die Messung durchgeführt werden. Das Ausführen der Messung kann im CW mit der Taste Enter bestätigt werden. Nun wird der Nutzer angewiesen die Zeitdaten der Messung als uff-Datei im Projektordner abzulegen und die Benennung der Datei als Text-String in das CW einzufügen. Nach der Bestätigung durch den Nutzer wird die uff-Datei gesucht und durch die Funktion `readuff` eingelesen. Die importierten Zeitsignale liegen dann nach Abbildung 36 in MATLAB vor.

Die Zeitsignale werden daraufhin in die einzelnen Lautsprecher-Sweeps aufgeteilt. Dazu ist auf der Referenzspur vor Beginn des ersten Sweeps ein Sprung als Trigger eingefügt um den Signalbeginn identifizieren zu können. Da die Längen der Sweeps und der Pausen bekannt sind, lassen sich nun die Zeitsignale in gleichmäßige Abschnitte aufteilen. Die Vor- und Nachlaufzeit des Signals wird dabei entfernt. Mithilfe der Fouriertransformation lassen sich die Spektren der einzelnen Signalabschnitte bilden. Der Frequenzgang ist dann als der Quotient der für einen Lautsprecher aufgenommenen Mikrofonspektren und dem Spektrum des korrespondierenden Referenzsignals gegeben.

Da die Pausenzeit zu einer erhöhten transformierten Blocklänge führt, erhöht sich auch die Frequenzauflösung der gemessenen Frequenzgänge im Vergleich zur vorgegebenen Auflösung. Da die Pausenlänge als ein Vielfaches einer Zweierpotenz erzwungen wird, sind die ursprünglichen Frequenzen immer im Spektrum enthalten. Die restlichen Frequenzanteile werden fallen gelassen um die geforderte Frequenzauflösung wiederherzustellen. Wenn der

Nutzer mehrere Messungen gefordert hat, wird er nun aufgefordert die nächste Messung in der nächsten Position auszuführen, bis alle Positionen abgefahren wurden.

4.4 Analyse der akustischen Eigenschaften des Quellenarrays

Eine Analyse der akustischen Eigenschaften des LSA mit Adapterfeld kann nicht auf absolut allgemeingültige Art erfolgen, da die experimentellen Bedingungen, in Bezug auf die Platzierung des LSA und des Adapters im Hallraum und relativ zueinander, schwer exakt reproduzierbar wären. Zudem ist der Einfluss des Hallraumes auf den Frequenzgang aufgrund der zahlreichen Reflexionen und daraus resultierenden Interferenzen so groß, dass mit steigendem Mikrofonabstand dieser die akustischen Eigenschaften der Quellmatrix zunehmend dominiert. Allerdings das Potential der Quellenmatrix in Bezug auf die maximal erreichbaren Schalldrücke im Nahfeld anhand der Messung in Abbildung 37 abgeschätzt werden. Zudem können die approximierten Frequenzgänge mit den durch die im Zuge des experimentellen Ablaufs bestimmten Frequenzgänge verglichen werden. Da ein solcher Ablauf implementiert ist, können die akustischen Eigenschaften auf einfache Art und Weise jeweils für die projektspezifische Konfiguration genau ermittelt werden.

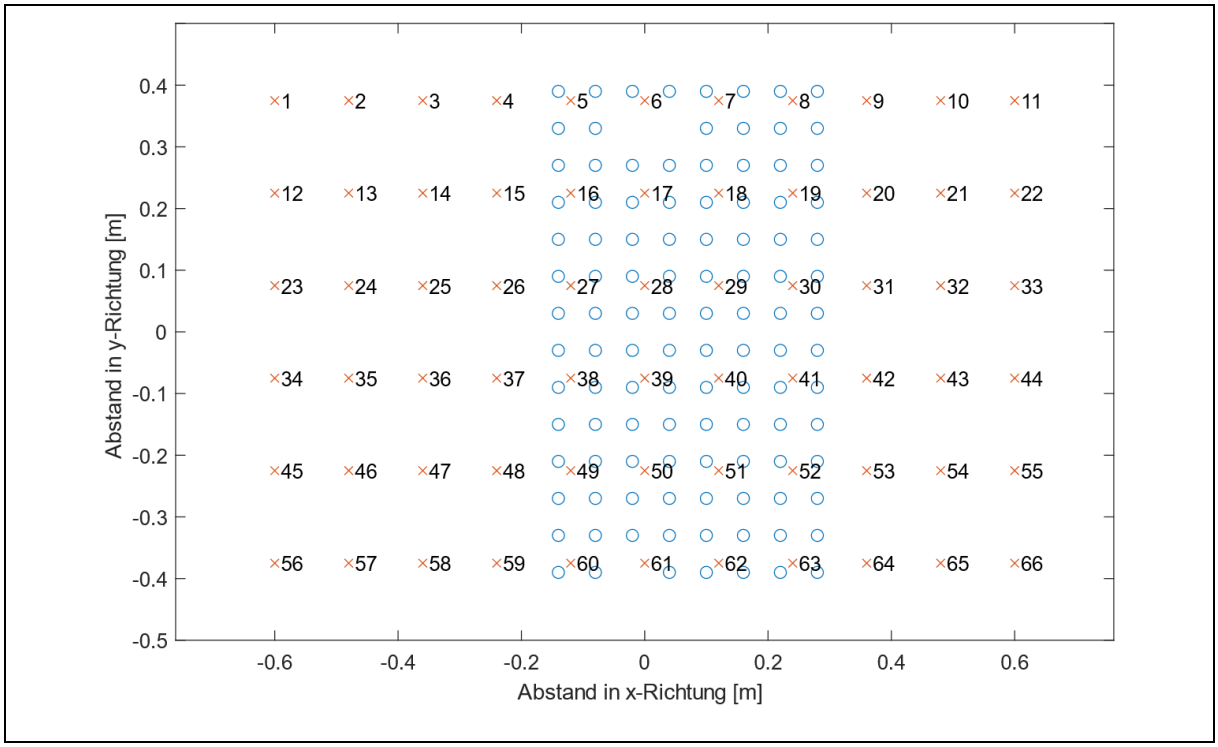


Abbildung 38: Angenäherte Konfiguration welche bei der Ermittlung der Frequenzgänge zum Einsatz kam, blau: Lautsprecherpositionen, rot: Mikrofonpositionen, Abstand Mikrofonebene zu Quellebene $d_z = 0,12m$, Exzentrizität: $E_x = 0,07m$, Strömungsrichtung: x

Bei dem Vergleich zwischen approximierten und experimentell ermittelten Frequenzgängen sollte darauf hingewiesen werden, dass neben dem Einfluss des Hallraums, bereits geringe Abstandsabweichung zwischen virtueller und realer Konfiguration eine deutliche Abweichung im Pegel hervorrufen können. Der Schalldruck halbiert sich idealisiert mit jeder Verdoppelung des Abstandes und im Nahfeld wirken sich Unterschiede daher verstärkt aus. Daher soll es als genügend angesehen werden, wenn die relative Änderung des Pegels in etwa übereinstimmt, da es im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war exakt vergleichbare Bedingungen zu schaffen.

Alle mit dem Array gemessenen Daten werden mit einer Sampling-Frequenz von 2048Hz aufgenommen, was einem oberen Frequenzlimit von 800Hz entspricht. Darüber setzt der Anti-Aliasing Filter des Frontends ein und die Daten sind nicht mehr belastbar. Daher erfolgt eine Darstellung bis $800Hz$.

4.4.1 Analyse der experimentell ermittelten Frequenzgänge

Durch den im Kapitel 4.3.2 dargestellten Ablauf können Frequenzantworten zwischen den verschiedenen Kombinationen zwischen Lautsprechern und Mikrofonen der Mikrofonkinematik gewonnen werden. In Abbildung 39 sind die Frequenzgänge zwischen einem nah beieinander liegenden und einem weiter entfernten Paar dargestellt.

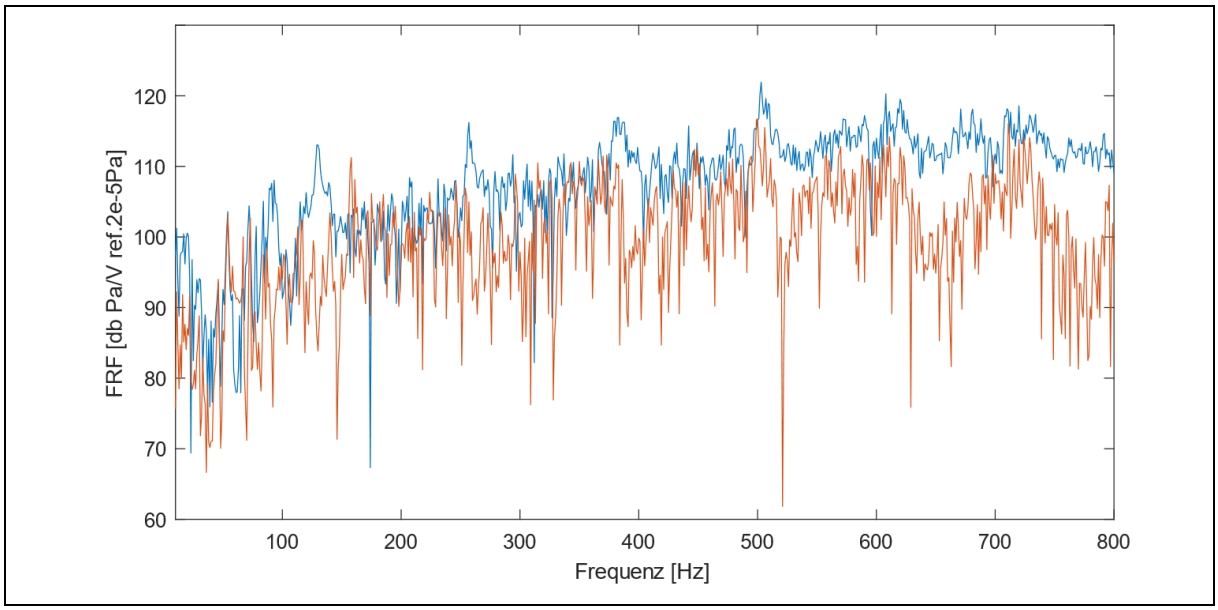


Abbildung 39: Frequenzgang zwischen dem Lautsprecher 1 und ausgewählten Mikrofonen, blau: Mikrofon Nr.5, rot: Mikrofon Nr.66

Im Vergleich zur Nahfeldmessung im vorherigen Kapitel ist ein deutlich größerer Einfluss des Hallraumes in beiden Fällen erkennbar. Dieser erzeugt starke Unregelmäßigkeiten im Frequenzgang, welche durch sich überlagernde und sich auslöschende Wellen entstehen. Der Frequenzgang von Lautsprecher 1 zu Mikrofon 5 weist einen größeren durchschnittlichen Schalldruckpegel als der Frequenzgang von Lautsprecher 1 zu Mikrofon 66. Zudem kann beobachtet werden, dass der Frequenzgang ersterer Kombination weniger starke Einbrüche hat. Dies lässt sich mit der größeren Nähe dieser Kombination zueinander begründen. Zum einen steigt der Pegel mit sinkendem Abstand zur Quelle wie im Kapitel zuvor angenähert, zum anderen ergibt sich der Frequenzgang im Hallraum als Kombination des direkt eintreffenden Schalls und der Raumantwort, welche durch diese starken Einbrüche in Abhängigkeit von der Position im Raum charakterisiert ist. Desto weiter die Quelle vom Mikrofon entfernt ist, desto stärker überwiegt die Raumantwort. Um trotz des starken Raumeinflusses die Daten in Bezug auf die erreichbaren Pegel interpretierbarer zu machen, werden die Graphen in Abbildung 40

geglättet. Bei der Schallfeldsynthese kommen die ungeglätteten Frequenzantworten zum Einsatz.

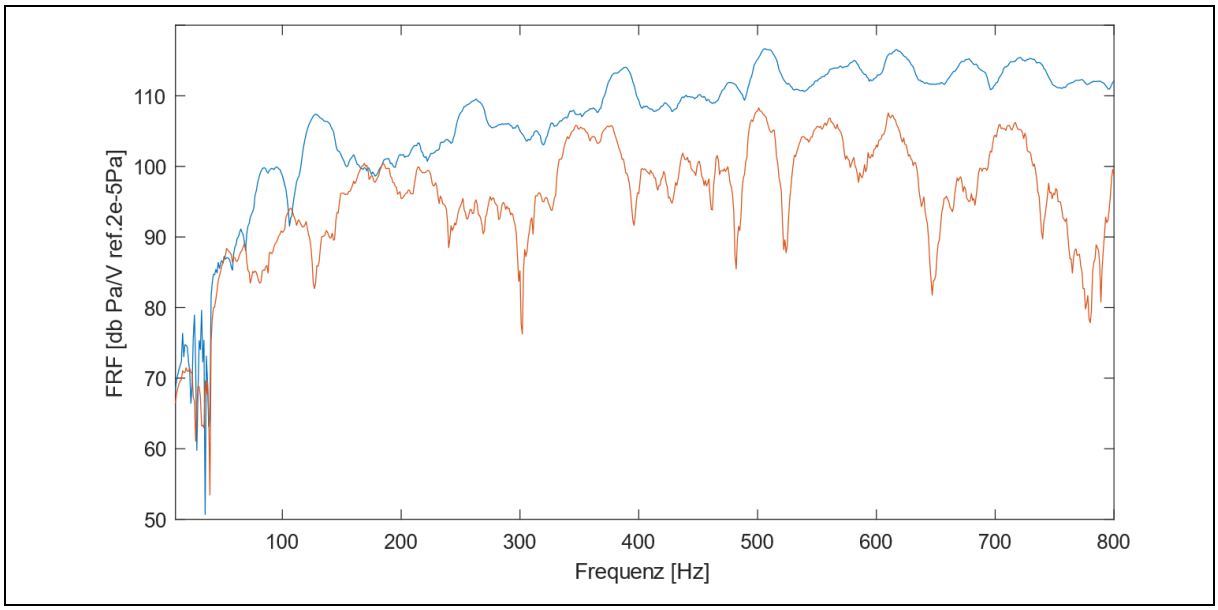


Abbildung 40: Geglätteter[12] Frequenzgang zwischen dem Lautsprecher 1 und ausgewählten Mikrofonen, blau: Mikrofon Nr.5, rot: Mikrofon Nr.66

Aus den Graphen wird ein Unterschied im Pegel um durchschnittlich 10-15dB ersichtlich. Bei tiefen Frequenzen fällt der Unterschied eher geringer aus. Die starken Einbrüche im Frequenzgang des Mikrofons 66 könnten in der Praxis die Pegelreserven bei der Schallfeldsynthese begrenzen. Um die maximal möglichen Pegel in Abhängigkeit von der Frequenz zu erhalten kann der Frequenzgang mit der maximal erzeugbaren Spannung am Referenzkanal multipliziert werden. Diese ist durch den Kalibrierfaktor K_{MAT} gegeben, der die Spannung am Referenzkanal bei einer Fader-Stellung von 0dB mit der maximalen Aussteuerung einer wav-Datei ins Verhältnis stellt. In Abbildung 41 sind die maximal möglichen Pegel des Lautsprecher Nr.1 in Bezug auf ein sehr nahes Mikrofon und ein weiter entferntes Mikrofon gezeigt.

[12] Matlabfunktion: `smoothdata (Parameter:type='sgolay',Faktor=30)`

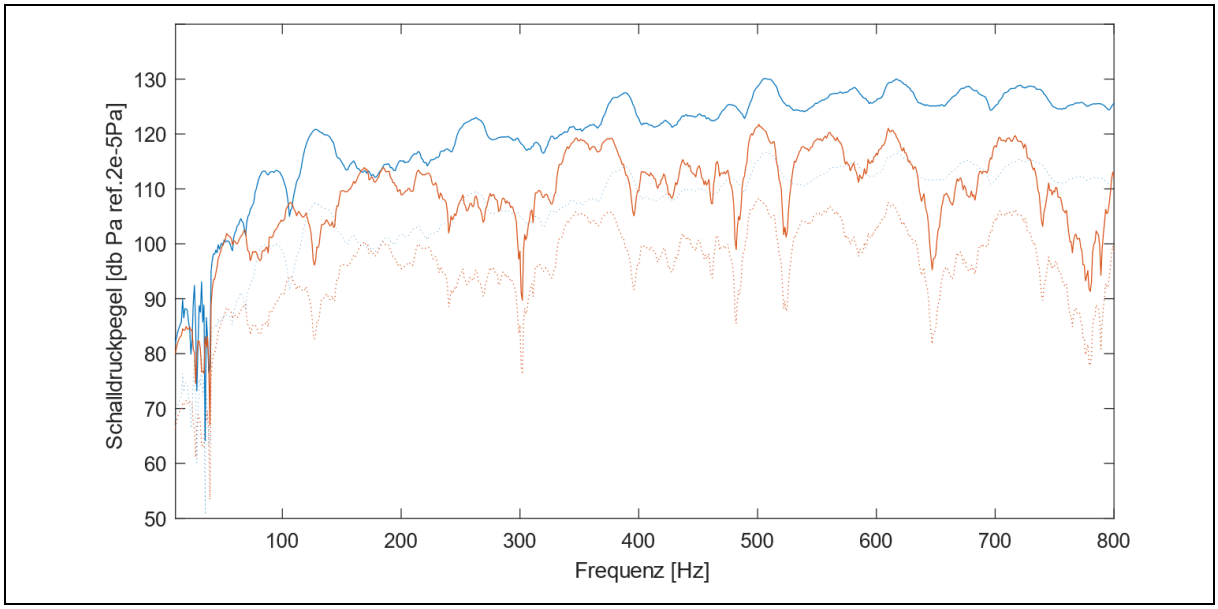


Abbildung 41: Maximal mit dem Lautsprecher 1 erreichbarer Schalldruck an ausgewählten Mikrofonpositionen, blau: Mikrofon Nr.5, rot: Mikrofon Nr.66, gepunktet: Schaldruck pro 1Volt

Diese maximalen Pegel gelten, wenn das Lautsprecherarray auch im Grenzbereich als lineares System funktioniert. Dies wird als gegeben angenommen, da Rzepecki keine deutlichen Schwankungen im Frequenzgang in Abhängigkeit von der Aussteuerungsspannung festgestellt hat. Der deutlich ausgeprägte Raumeinfluss könnte in Abhängigkeit von der Mikrofonposition wie beschrieben zur schmalbandigen Begrenzung des maximal erreichbaren Pegels führen. Der Effekt wird in der Realität weniger drastisch ausfallen, weil mehrere Lautsprecher an der Synthese des Schallfeldes beteiligt sind, sollte jedoch auch nicht vernachlässigt werden. Für zukünftige Betrachtungen empfiehlt sich daher den Einfluss von Dämmmaterial um den Versuchsaufbau zu Prüfen. So könnten große Dämmmatten seitlich und oberhalb des Adapterrahmens angeordnet werden, um den Raumeinfluss abzumildern.

4.4.2 Vergleich mit approximierten Frequenzgängen

Ein Vergleich zwischen den experimentell ermittelten und den approximierten Frequenzgängen ist in Abbildung 42 dargestellt. Da beim Approximieren eine Ausbreitung im Freifeld angenommen wird, lässt sich der Einfluss des Raumes nicht abbilden. Somit lässt sich begründen, dass der Frequenzgang des weiter entfernten Mikrofons stärker von der Approximation abweicht, da der Raumeinfluss hier verhältnismäßig größer ist. Zudem muss bedacht werden, dass nicht alle Röhren exakt die gleiche Länge haben, womit sich die leichte Verschiebung der Rohrresonanzen erklären ließe.

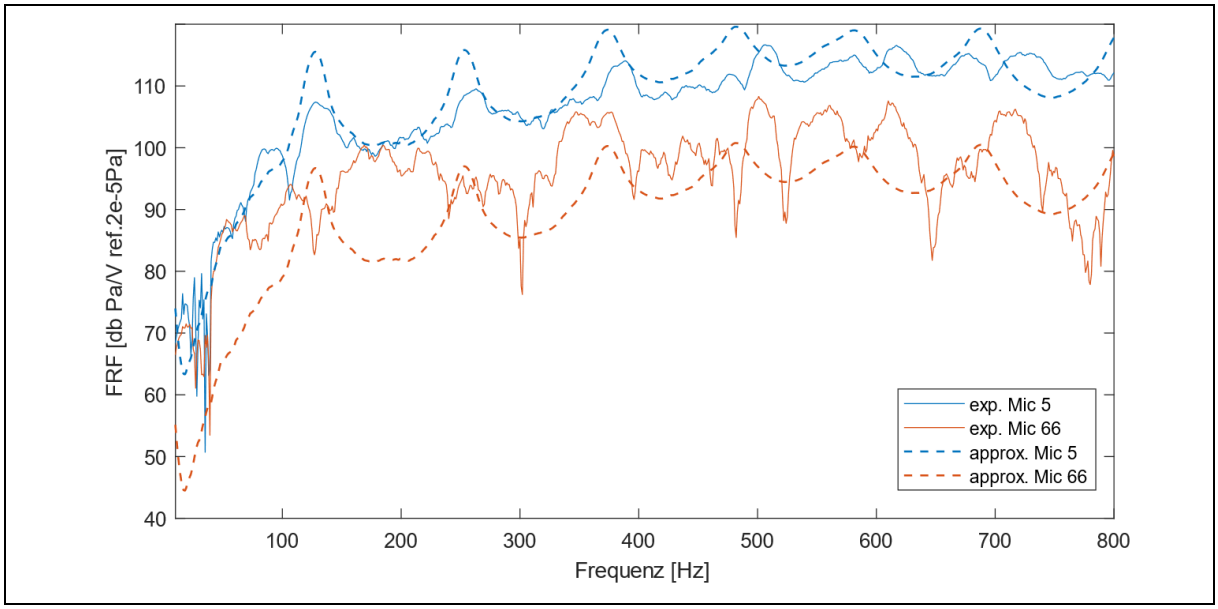


Abbildung 42: Vergleich der approximierten Frequenzgänge für verschiedene Kombinationen von Quelle und Mikrofon mit der experimentell ermittelten

Dennoch kann gezeigt werden, dass die Approximation grundsätzlich mit den gemessenen Werten korreliert. Da bei der Schallfeldsynthese der Einfluss der Lautsprecher ohnehin ausgeglichen wird, ist das momentane Modell für simulative Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit ausreichend geeignet.

Der Vollständigkeit halber soll erwähnt werden, dass Gleichung ***(4.1)*** ein Faktor 2 vernachlässigt, welcher die Messung an einer schallharten Grenzfläche berücksichtigt. Mit diesem Faktor hat sich ein Offset der Approximation mit der Messung von 6dB für verschiedene Kombinationen ergeben. Dies resultiert mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der Aufstellung des Arrayadapters in der Nähe der Wand während der Bestimmung des Frequenzgangs. Daher wurde der Frequenzgang effektiv bereits mit der Grenzbedingung ermittelt, solange tiefe Frequenzen betrachtet werden, und eine Korrektur führt zu der beobachteten Abweichung. Ein weiterer Grund für Abweichungen neben dem Raumeinfluss und der unter suboptimalen Bedingungen durchgeführten Messung, könnte auch durch den Unterschied der relativen Positionen zwischen Lautsprecher und Mikrofon zuzuschreiben sein. Wenn in der Zukunft eine genauere Angleichung von Simulation zur experimentellen Durchführung gewünscht ist, könnte das vorhandene Skript mit neuen Messungen und verbesserten Modellbeziehungen aufgewertet werden.

4.5 Syntheseablauf des Druckfeldes

Ist die Matrix der Frequenzgänge bekannt, können die zu reproduzierenden Mikrofonsignale mit der (pseudo-)Inversen der Matrix der Frequenzgänge multipliziert werden um die

Ansteuerungssignale der Lautsprecher zu erhalten. Die Wiedergabe erfolgt in der Simulation einfach in dem die so erhaltenen Signale im Frequenzbereich mit der Matrix der Frequenzgänge multipliziert werden. Bei der experimentellen Vorgehensweise werden analog zu Kapitel 4.3.2 Zeitsignale in eine wav-Datei geschrieben und die daraus wiedergegebenen Signale über eine Messschleife aufgenommen. Im Gegensatz zur experimentellen Bildung der Frequenzgänge, wird während des Imports das aufgenommene Signal nicht in die einzelnen Sweeps geschnitten, sondern in Blöcke die der gewählten Blocklänge entsprechen. Die Anzahl der so erzeugten Blöcke beträgt dann die Anzahl der spezifizierten Mittlungen.

$$Faderstellung = 20 * log_{10}\left(\frac{1}{F_{Norm} * K_{MAT}}\right) \tag{4.2}$$

Formel ***(4.2)*** zeigt den Zusammenhang für die korrekte Einstellung des Pegels am digitalen Mixer bei der Wiedergabe mit dem LSA. F_{Norm} ist der Faktor mit dem das Lautsprechersignal vor der Erzeugung der wav-Datei auf die zulässige Maximalamplitude normiert wurde. Die generierten Auto- und Kreuzspektren sind für die Simulation in den Strukturvariablen `Simu.PSD.ist` sowie `Simu.CSD.ist` und für die experimentelle Ermittlung in den Variablen `EXP.PSD.ist` sowie `EXP.CSD.ist` gespeichert.

5 Untersuchung der Synthese eines TBL-Schallfeldes

Die Parameter des untersuchten Schallfeldmodells finden sich in der Tabelle 3. Für den Betrag des Autospektrums werden die ausgelesenen Ergebnisse des Flugversuchs von Klabes [11] gewählt. Die Verteilung des Kreuzspektrums wird nach dem Modell von Corcos diskretisiert. Dabei werden die Untersuchungen auf einen Bereich über $75Hz$ limitiert, indem das erforderliche Lautsprecherspektrum unterhalb dieser Frequenz auf null gesetzt wird. Unterhalb dieses Bereiches sind ansonsten schnell sehr hohe Pegel nötig, da die Sensitivität des Quellenarrays stark einbricht.

Tabelle 3: Parameter der Schallfeldsynthese nach Corcos

$U_c = 267{,}5\,\frac{m}{s}$
$\alpha_x = 8$
$\alpha_y = 1{,}2$

Die Untersuchungen werden zuerst sowohl experimentell als auch simulativ für ein einziges Mikrofon vorgenommen. An diesem Beispiel soll gezeigt werden, dass das Ausgleichen der Frequenzantwort des Raumes und des Lautsprecherarrays auch für den experimentellen Ablauf erfolgreich implementiert ist. Schließlich werden die Betrachtungen auf ein Array an Mikrofonen ausgeweitet um die Qualität der Reproduktion des Kreuzspektrums zu bewerten. Dabei wird erst eine ungünstige und im Anschluss eine günstige Verteilung der Quellen betrachtet. Die Ergebnisse werden in der anschließenden Diskussion bewertet. Alle ausgewerteten Konfigurationen liegen der Arbeit in elektronischer Form bei.

5.1 Synthese des Autospektrums an einem Mikrofon

Wird der Algorithmus der Schallfeldsynthese auf ein einziges Mikrofon nach Abbildung 43 angewendet, so hat die CSD-Matrix nur einen einzigen Eintrag, welcher gleich der PSD an dieser Stelle ist. Um diesen angestrebten Verlauf zu erhalten, muss der Verlauf der Frequenzgänge der Lautsprecher in Bezug auf diesen Punkt ausgeglichen werden. Wenn mehrere Lautsprecher bei der Erzeugung des Spektrums beteiligt sind, so wird erwartet, dass der Algorithmus Lautsprechersignale erzeugt, deren Überlagerung am Mikrofon den angestrebten Verlauf in Summe bildet.

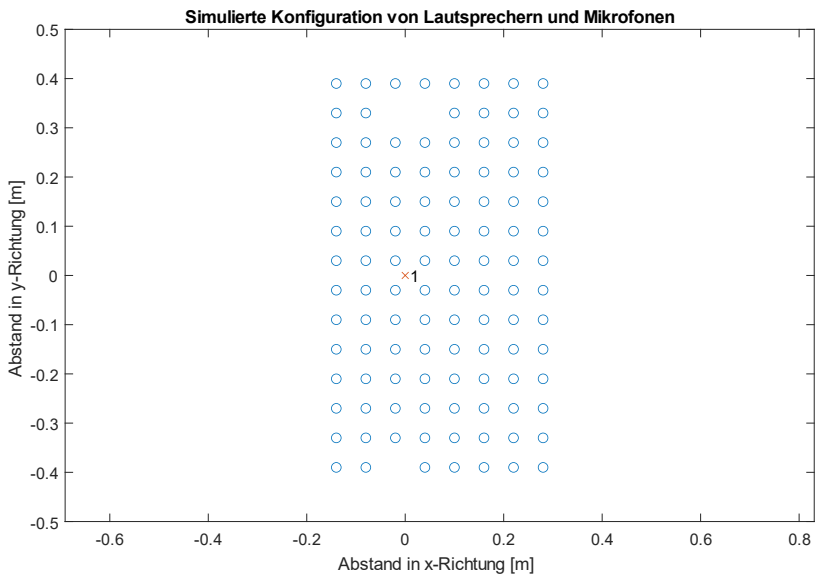


Abbildung 43: Untersuchte Konfiguration von Lautsprechern und Mikrofonen, blau: Lautsprecherpositionen, rot: Mikrofonpositionen, Abstand Mikrofonebene zu Quellebene $d_z = 0,12m$, Exzentrizität: $E_x = 0,07m$, Strömungsrichtung: x

Für die verwendete Konfiguration wird eine empfohlene Fader-Stellung von etwa -9,8 dB für die Simulation und -15,5 dB für die experimentelle Synthese des Autoleistungsspektrums ermittelt. Für die experimentelle Ermittlung des Spektrums muss diese Fader-Stellung am Mixer eingestellt sein, um den angestrebten absoluten Betrag des Autospektrums zu erhalten. Der in der Simulation angegebene Wert hat hingegen keinen weiteren Einfluss auf die Ergebnisse und dient lediglich der Orientierung, um die experimentelle Ausführbarkeit zu bewerten. So kann eine Fader-Stellung deutlich größer als 0dB darauf hinweisen, dass der geforderte absolute Betrag des Autospektrums bei der experimentellen Synthese nicht erreicht werden kann, weil die Maximalstellung bei 0dB erreicht ist. Die Abweichungen in den beiden ermittelten Stellungen könnten sich mit der tendenziell zu gering approximierten Sensitivität des Quellarrays bei tiefen Frequenzen erklären lassen. Bei den Versuchen hat sich herausgestellt, dass besonders diese tiefen Frequenzen den wiederzugebenen Pegel erhöhen. In Abbildung 44 ist das Autospektrum als Produkt einer Simulation über 200 Mittelungen dargestellt. Zur Ermittlung des Spektrums kommt die MATLAB-funktion `pwelch` zum Einsatz, welche die einzelnen zu mittelnden Blöcke mit einem Hanning-Fenster multipliziert. Da eine endliche Zahl an Mittlungen verwendet wird, schwankt der generierte Verlauf des Spektrums einen geringen Betrag um seinen Erwartungswert. Dennoch ist eindeutig erkenntlich, dass der simulierte Wert sehr genau dem geforderten Verlauf folgt.

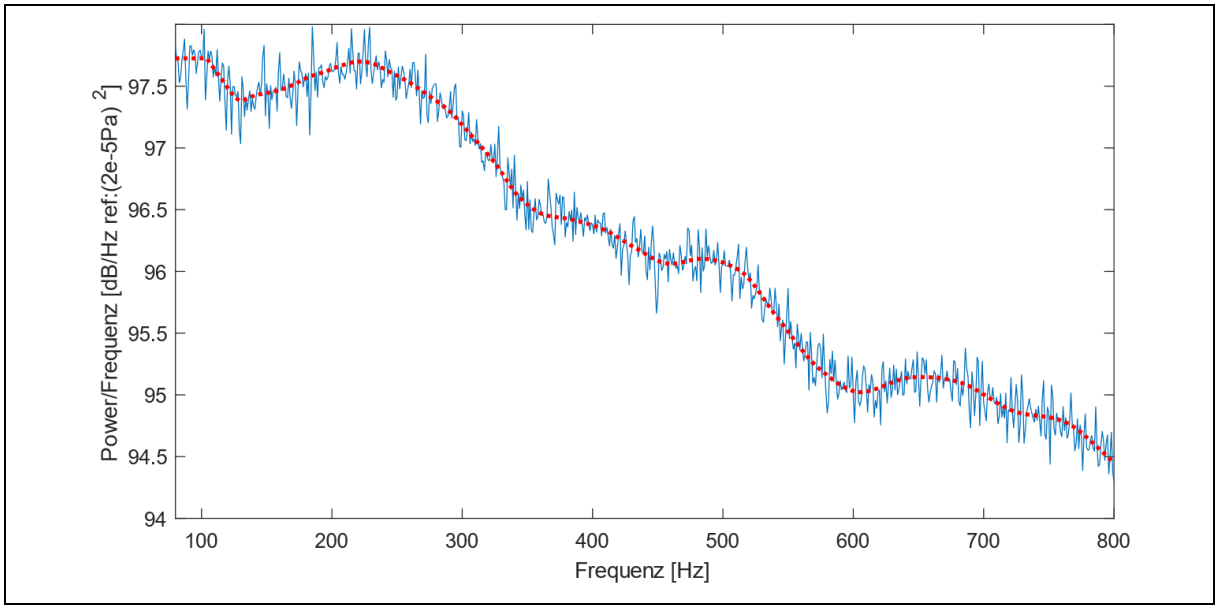


Abbildung 44: **Autospektrum als Produkt einer Simulation für ein einziges Mikrofon blau: simuliertes Spektrum nach 200 Mittelungen, rot: Zielverlauf aus der Modellvorgabe**

In Abbildung 45 ist der experimentell ermittelte Verlauf der Autokorrelationsfunktion für die betrachtete Mikrofonposition abgebildet. Auch hier kann eine gute Übereinstimmung des gemittelten Wertes mit dem vorgegebenen Verlauf festgestellt werden.

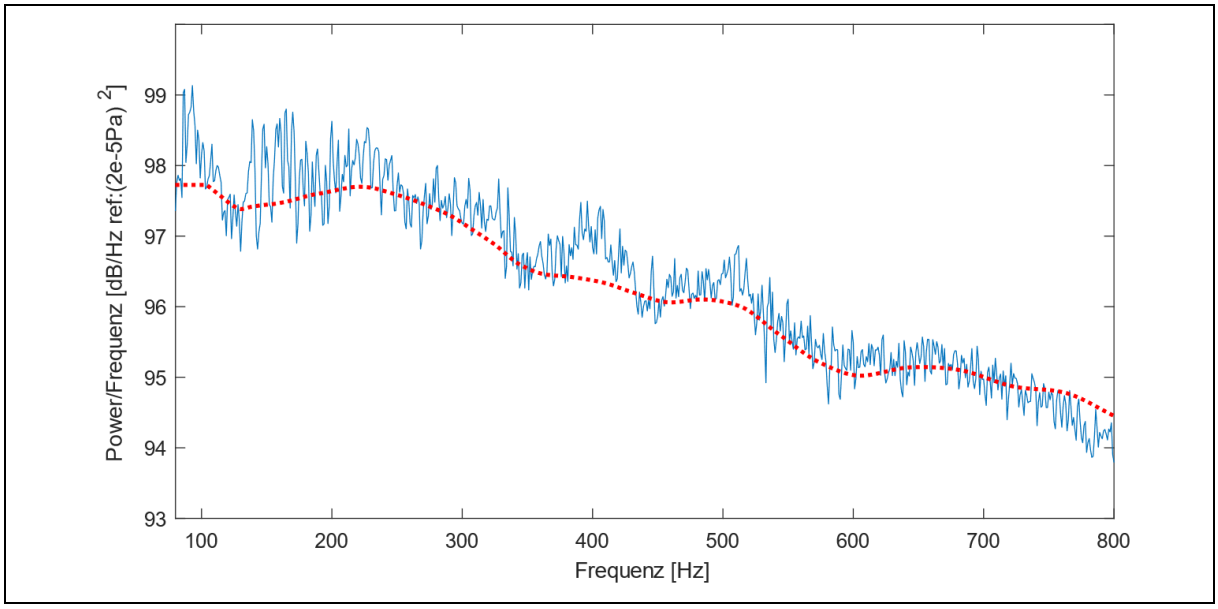


Abbildung 45: **Experimentell ermitteltes Autospektrum für ein einziges Mikrofon blau: gemessenes Spektrum nach 200 Mittelungen, rot: Zielverlauf aus der Modellvorgabe**

Im Vergleich zur Simulation ist eine etwas höhere Schwankung der Werte zu erkennen. Zudem lassen sich Frequenzbereiche erkennen, in dem der Verlauf um einige zehntel dB von der

Vorgabe abweicht. Eine Erklärung für die Diskrepanz könnte das von Algermissen angeführte, möglicherweise nichtlineare Verhalten des Hallraums sein. Erste Vermessungen des LSA mit dem FFT Analysator OnoSokki CF-9200 ergaben, dass manche gemessene Frequenzen eine verschlechterte Kohärenz aufweisen. Dabei wurde festgestellt, dass verschiedene Messignale unterschiedliche Charakteristiken in Bezug auf diesen schmalbandigen Einbruch der Kohärenz aufweisen.

Nach Kapitel 2.3.2.2 lässt sich für beide Verläufe der Fehler in Bezug auf die Vorgabe Ermitteln. Dieser ist in Abbildung 46 dargestellt. Da für ein einziges Mikrofon Auto- und Kreuzspektrum zusammenfallen, erzeugen beide Fehlerdefinitionen denselben Verlauf. Es ist anzumerken, dass der Fehler für den simulierten Verlauf hauptsächlich der begrenzten Anzahl an Mittlungen zuzuschreiben ist. Maury [16] gibt für den zulässigen Fehler ein Grenzkriterium von 10dB an. Dieses kann für das experimentell ermittelte Signal trotz der vermuteten Raumeinflüsse im größten Teil des betrachteten Frequenzbandes eingehalten werden. An dieser Stelle gibt sich auch die Möglichkeit in Zukunft Vergleichsmessungen mit zusätzlichem Dämmmaterial am Array durchzuführen.

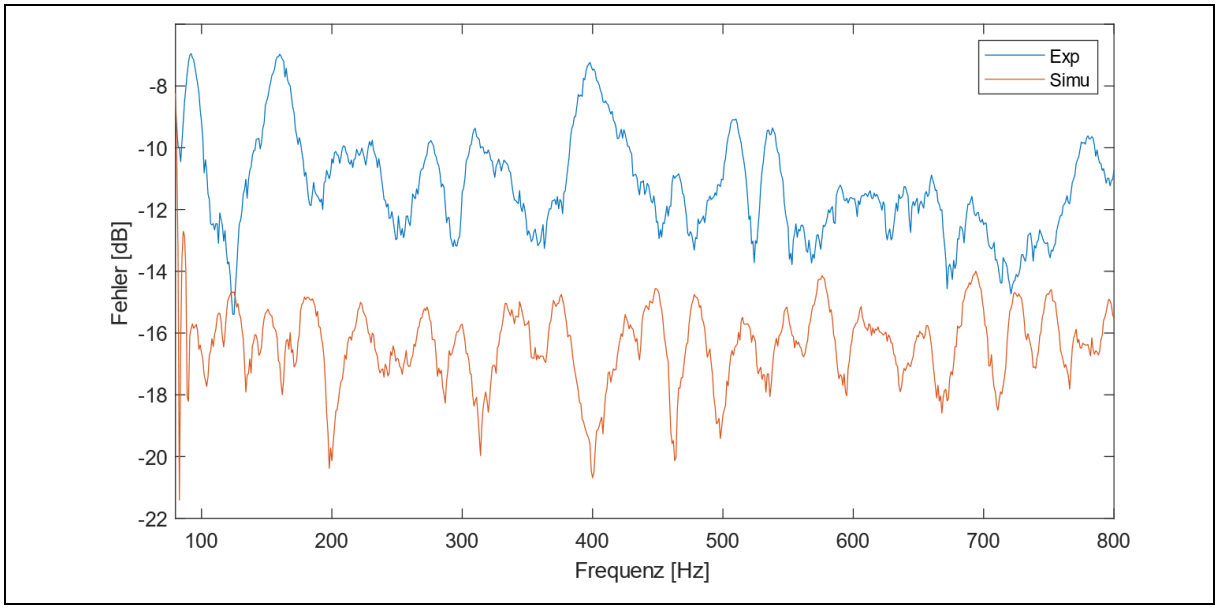


Abbildung 46: **Vergleich des mittleren Quadratischen Fehlers des Autospektrums der experimentellen Ermittlung mit der Simulation (entspricht für ein betrachtetes Mikrofon auch dem Restwertfehler)**

Die Betrachtung dieses einfachen Beispiels zeigt auf, dass der Algorithmus der erwarteten Funktionsweise folgt, auch wenn der zeitliche Rahmen der Arbeit keine experimentelle Synthese über größere Mikrofonanordnungen erlaubt. Da der Ablauf der Simulation nah am Ablauf der experimentellen Ermittlung gehalten wurde, kann angenommen werden, dass die

nachfolgenden simulativen Betrachtungen eingeschränkt auch für den experimentellen Ablauf gültig sind. Die Vergleichbarkeit wird dabei vor allem durch den ungeklärten Einfluss des Hallraumes, sowie durch die begrenzten Pegelreserven des Lautsprecherarrays begrenzt.

5.2 Simulation eines TBL über einem Array von Mikrofonen

In diesem Kapitel werden zwei verschiedene geometrische Konfigurationen des Lautsprecherarrays miteinander verglichen. Dabei wird lediglich die Anordnung der Quellenauslässe in horizontaler Richtung geändert. Dabei kann festgestellt werden, dass die in Abbildung 47 gezeigte Konditionierung des zu lösenden Problems sehr stark von den relativen Positionen der Lautsprecher und Mikrofone zueinander abhängig ist.

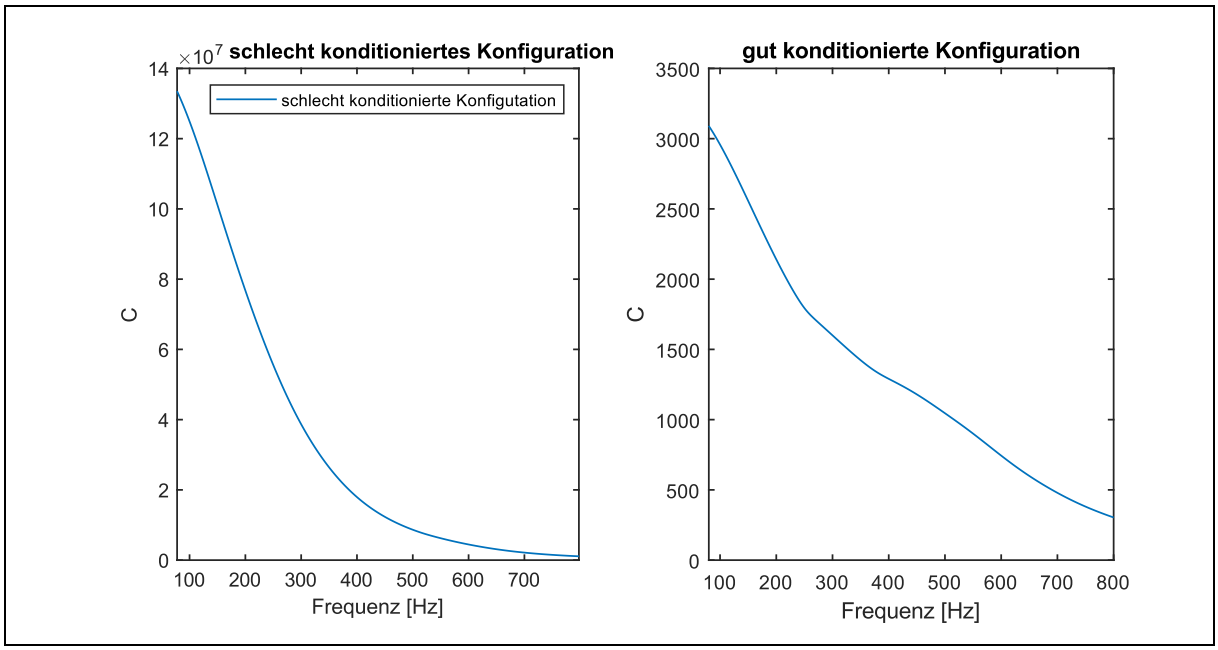


Abbildung 47: Vergleich der Konditionszahlen der Matrix der Frequenzgänge zwischen der schlecht und der gut konditionierten Konfiguration

Zu Beginn wird eine Konfiguration untersucht, deren Eigenschaften zur Schallfeldsynthese als schlecht konditioniert erachtet werden. Im Anschluss wird eine Konfiguration mit einer verbesserten Anordnung simuliert. Dabei wird zudem auf die Ausprägung des Schallfeldes zwischen den Mikrofonen eingegangen. Diese ist von besonderer Bedeutung, da bei der Erzeugung eines Schallfeldes sichergestellt werden muss, dass das Feld auch außerhalb der gemessenen Positionen homogene Eigenschaften hat. Ist dies nicht der Fall, weicht die akustische Belastung auf einen Prüfkörper um ein unbekanntes Maß von der erwarteten ab. Eine eingehendere Untersuchung verschiedener Konfiguration war im Rahmen dieser Arbeit nicht

möglich und wird auch nicht als sinnvoll erachtet, da zuvor eine weitere Vertiefung der theoretischen Grundlagen einen strukturierteren Ablauf ermöglichen würde.

5.2.1 Schlecht konditionierte Konfiguration

Die schlecht konfigurierte Version entspricht der für die Vermessung des Arrays in Kapitel 4 eingesetzten Konfiguration, da diese während des Aufbaus des Experimentes so eingestellt wurde und daher als Startpunkt übernommen wurde. Simuliert man diese Konfiguration mit dem der Arbeit beiliegenden Skript, so erhält man sehr gute Ergebnisse in Bezug auf die Reproduktion der geforderten Autospektralen-Leistungsdichte. Dies ist zu erwarten, da die Anzahl der Mikrofone mit 66Stk. Unter der Anzahl der verwendeten Quellen ist. Da im Modell, sowie auch in der Realität, keine absolut linear abhängigen Mikrofonkanäle in der Matrix der Frequenzgänge enthalten sind, lässt sich das Gleichungssystem also auch genau lösen. Sind mehr Lautsprecher als Mikrofone vorhanden lässt sich das Problem genau genommen auf unendlich viele Arten lösen. Die Wahl der Lösung hängt dann von der Definition der genutzten pseudoinversen[13] ab. Für zukünftige Betrachtungen könnte die Verwendung alternativer Funktionen oder Definitionen geprüft werden. In Abbildung 48 ist der Verlauf des Autospektrums aller 66 Mikrofone gegenüber dem Zielverlauf abgebildet. Wie bei der Simulation mit einem Mikrofon variieren die Verläufe des Autospektrums nur im geringen stochastischen Maße um die Zielfunktion.

Da der mittlere Quadratische Fehler lediglich als Summe der Fehler der Autoleistungsspektren aller Mikrofone definiert ist, mittelt sich dieser zusätzlich zu der Anzahl der gemessenen Signalabschnitte über die 66 Mikrofone. Daher nimmt dieser Fehler extrem geringe, gegen null tendierende Werte an, wenn eine Konfiguration mit mehr Lautsprechern als Mikrofonen berechnet wird und ist in diesem Fall nicht aussagekräftig. Es kann jedoch abgeleitet werden, dass das Gleichungssystem korrekt gelöst ist und sich mit einer steigenden Anzahl an Mittellungen die Zielfunktion des Autospektrums auch von den einzelnen Mikrofonsignalen immer weiter angenähert wird.

---

[13] In dieser Arbeit wird die MATLAB-funktion `pinv` genutzt, eine Moore-Penrose-pseudoinverse https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/pinv.html (Stand 03.04.2022)

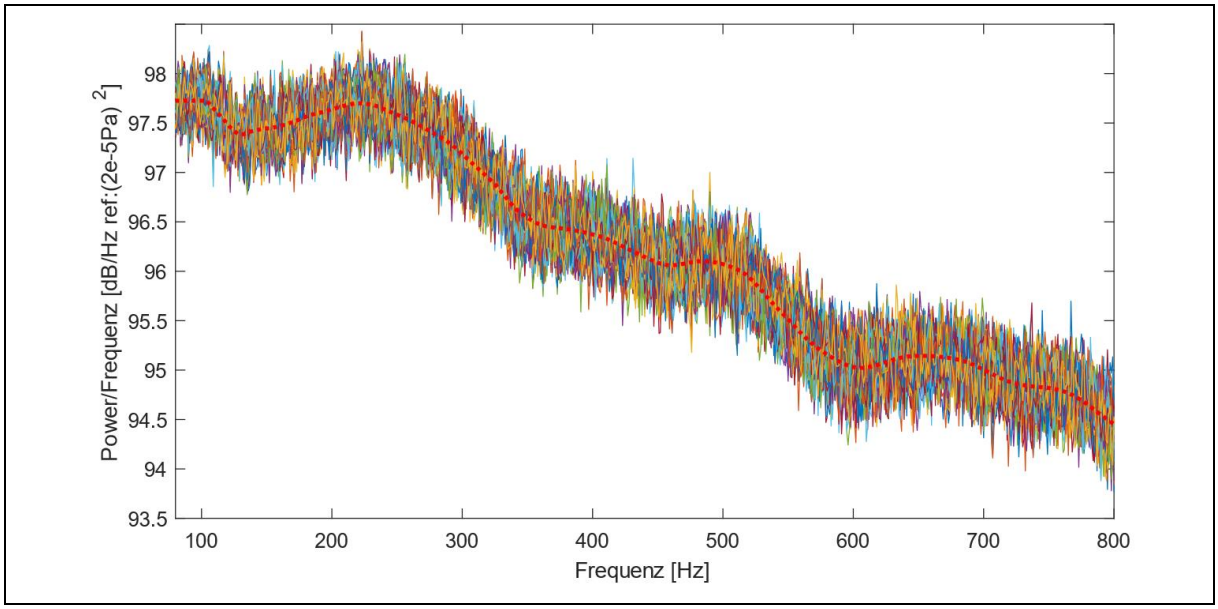


Abbildung 48: **Autospektrum als Produkt einer Simulation für 66 Mikrofone (gemessenes Spektrum nach 200 Mittelungen), rot: Zielverlauf aus der Modellvorgabe**

Der Restfehler, welcher die korrekte Reproduktion der Korrelationsstruktur einbezieht, wird daher als kritischer angesehen und ist in Abbildung 49 dargestellt. Dieser zu den hohen Frequenzen ansteigende Verlauf deckt sich in etwa mit den Ergebnissen der Literatur [13], auch wenn eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben sein kann, da die gesichtete Literatur ausschließlich Fälle mit einer geringeren Anzahl an Lautsprechern als Mikrofone behandelt. Zudem handelt es sich bei den Literaturwerten oft um Fehlergrößen, welche direkt aus $\boldsymbol{G}$ kalkuliert werden. Dabei werden jedoch Ungenauigkeiten bei der erneuten Vermessung sowie statistische Einflüsse bei der Kalkulation der CSD-Matrix vernachlässigt. Im unteren Bereich der dargestellten Frequenzen kann wahrscheinlich eine nummerische Anomalie beobachtet werden.

In Abbildung 50 wird für zwei zufällig gewählte Frequenzen gezeigt, dass der simulierte räumliche Korrelationsverlauf in recht guter Näherung dem theoretisch vorgegebenen entspricht. Da eine solche Abbildung immer nur für ein Mikrofon bei einer Frequenz erzeugt werden kann, sind die Korrelationsverläufe natürlich nicht vollkommen repräsentativ für alle weiteren Fälle. Diese Darstellung vermittelt jedoch ein besonders verständliches Bild.

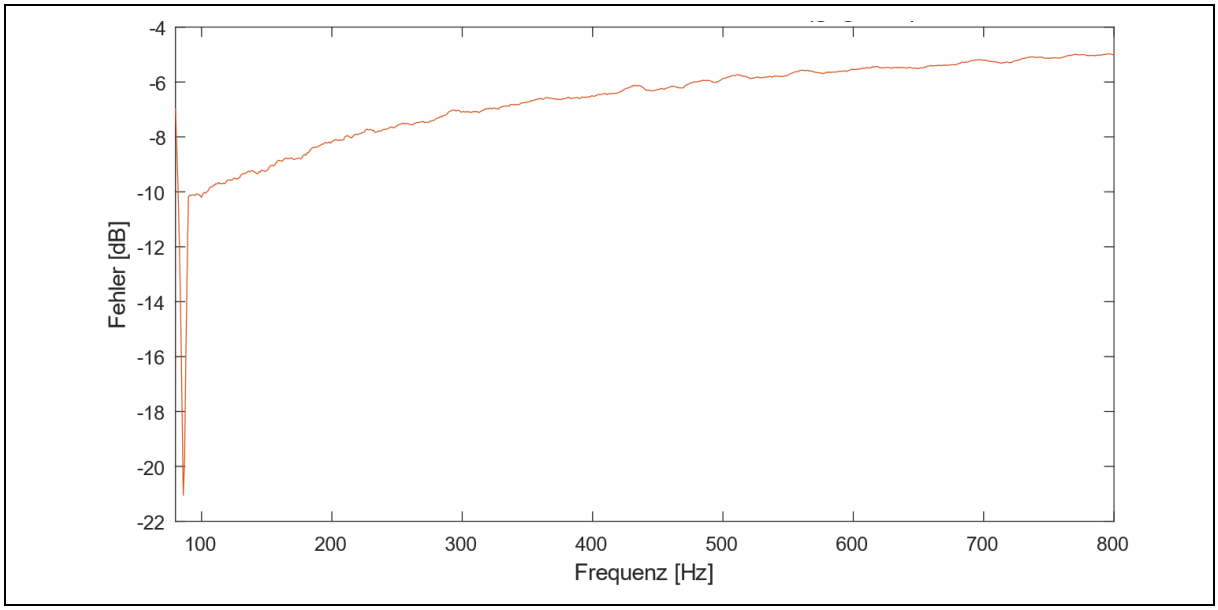


Abbildung 49: **Restfehler der Synthese der kreuzspektralen Verteilung an den Mikrofonpositionen als Ergebnis einer Simulation für den schlecht konditionierten Fall**

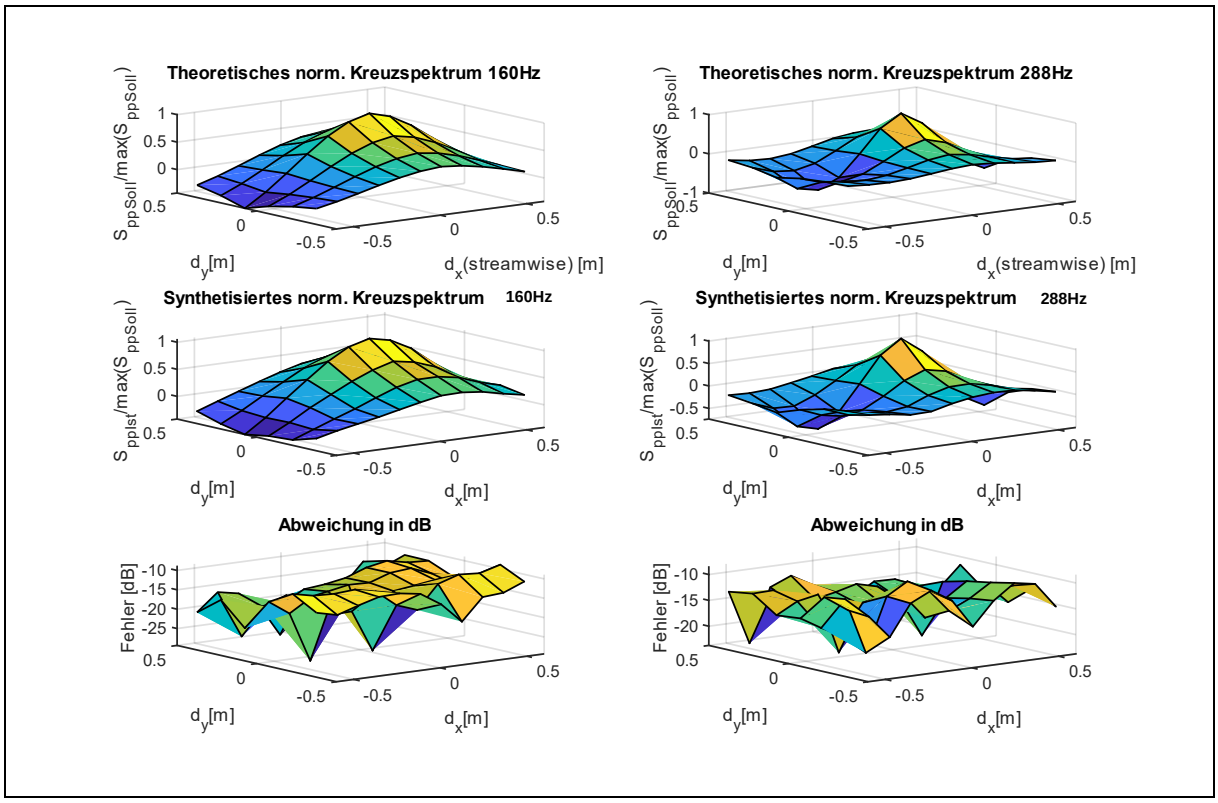


Abbildung 50: **Korrelationsstrukturen als Ergebnis einer Simulation mit ungünstigen geometrischen Parametern für das Mikrofon Nr. 28 und deren Abweichung vom vorgegebenen Spektrum**

An diesem Punkt erscheint die erfolgreiche simulative Synthese des Schallfeldes als gelungen. Jedoch verlangt die Simulation nach einer Fader-Stellung nach einer Pegelerhöhung der Lautsprechersignale um +134dB über dem maximal möglichen Pegel, damit die dargestellten Beträge der Spektren auch tatsächlich erreicht werden können dieser Wert ist physikalisch nicht umsetzbar. Zudem muss angenommen werden, dass die auf diese Weise in den Hallraum übertragene Energie auch eine starke Antwort des Hallraumes zur Folge haben muss, womit das Problem bei einer Berücksichtigung des Raumeinflusses zunehmend schlechter konditioniert sein wird.

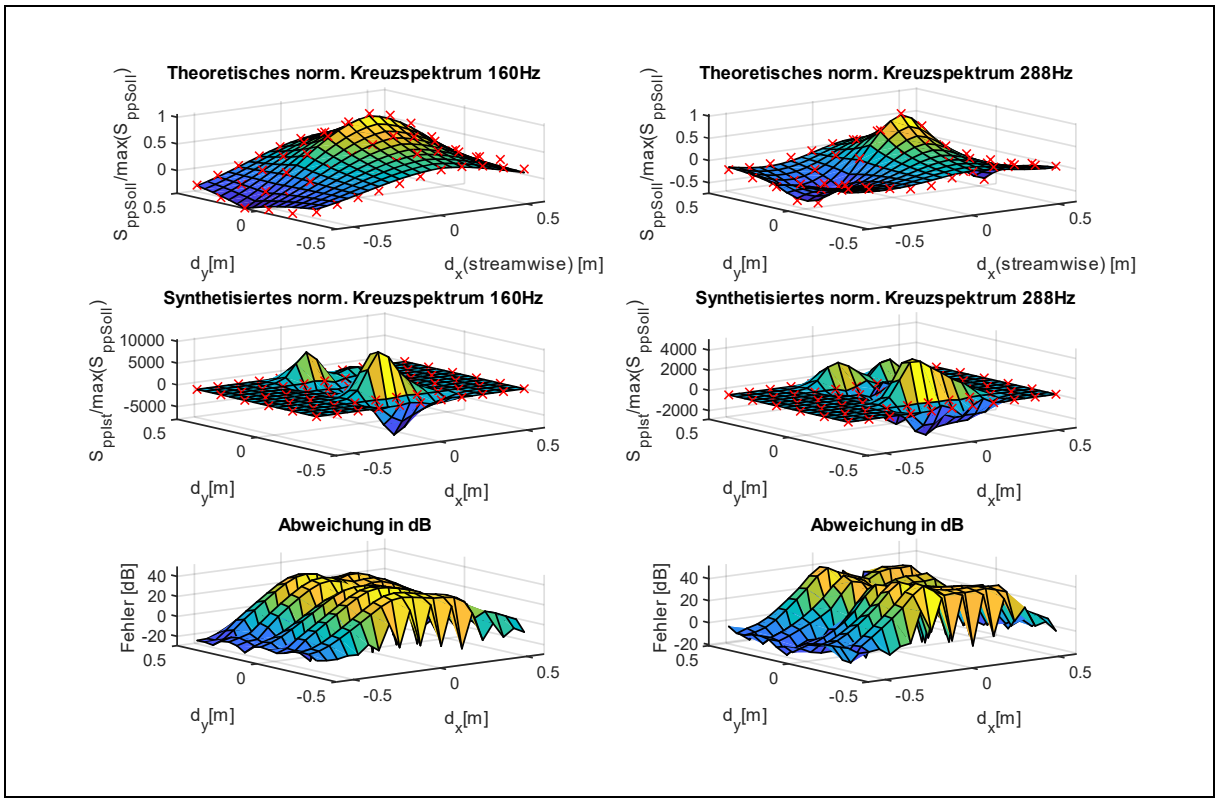


Abbildung 51: **Simulierte Korrelationsstrukturen für den schlecht konditionierten Fall an Punkten außerhalb der Mikrofonanordnung, Rot markiert: Ergebnisse an den Mikrofonpositionen**

Errechnet man daher zur Kontrolle die Druckverteilung zwischen den Positionen der Mikrofone, welche für die Bildung von $\boldsymbol{G}$ genutzt wurden, so wird ersichtlich, dass sich extreme Abweichungen im Kreuzspektrum zwischen den Mikrofonpositionen aufbauen. Dies ist bezeichnend für eine schlecht konditionierte Problemstellung, da kleine Abweichungen in den Einträgen der Matrix der Frequenzgänge, hervorgerufen durch eine Änderung der Position und somit des Übertragungsverhaltens, große Änderungen bei der Bildung der Inversen zur Folge haben. Die in Abbildung 51 dargestellten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass bei der Schallfeldsynthese mit einer schlechten Konditionierung der Matrix $\boldsymbol{G}$ die scheinbar korrekten Auto-

und Kreuzspektralen Verläufe durch ein hohes Maß an lokaler Auslöschung erreicht werden. Außerhalb der Mikrofonpositionen kommt es hingegen zu extremen gleich- und gegenphasigen Überhöhungen des lokalen Spektrums, was mit sehr großen auftretenden Signalamplituden zu erklären ist. Repräsentativer wäre noch eine Kalkulation des Restfehlers, welcher alle Positionen einbezieht, die an dieser Stelle jedoch nicht erfolgen konnte, da durch eine Begrenzung des zur Verfügung stehenden Arbeitsspeichers nur eine grobe Frequenzauflösung erreicht werden konnte. Eine etwas vergrößerte Version der Abbildung 51 ist der Arbeit in Anhang 1 beigefügt.

5.2.2 Gut konditionierte Konfiguration

Die geometrische Ausprägung der besser konditionierten Konfiguration ist der Arbeit in Abbildung 52 dargestellt.

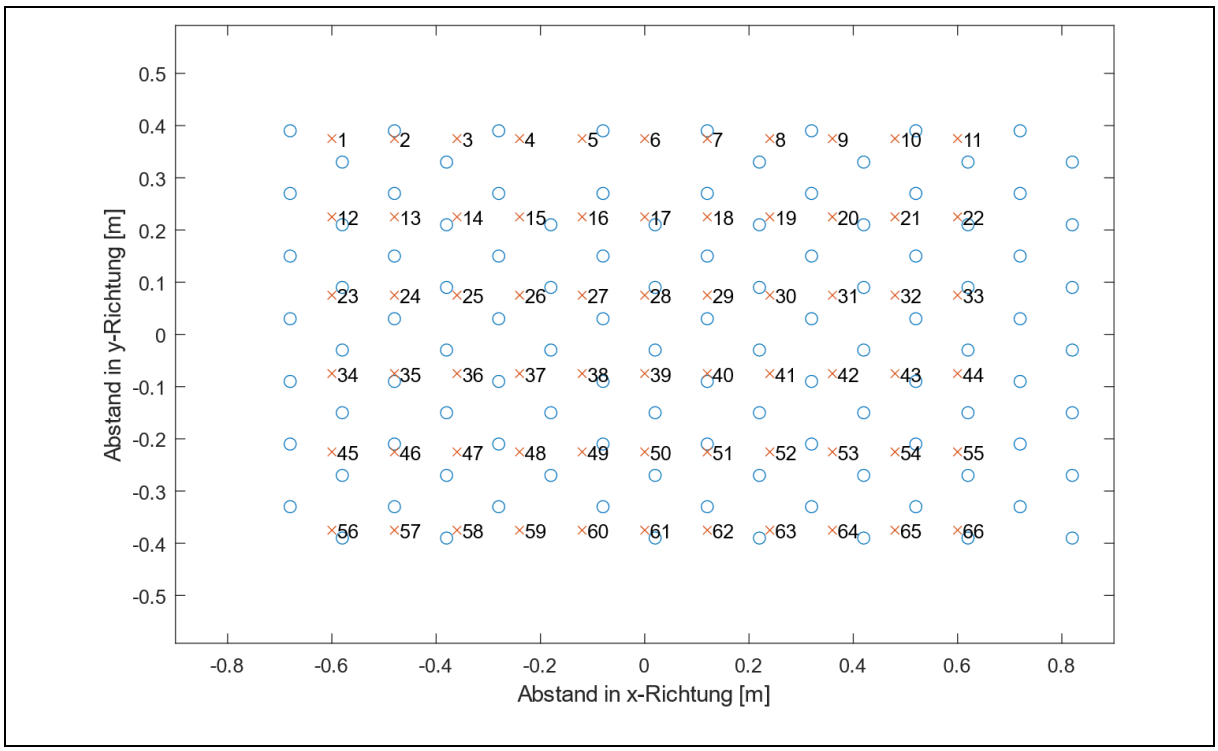


Abbildung 52: **Simulierte geometrische Konfiguration des gut konditionierten Falls, blau: Lautsprecherpositionen, rot: Mikrofonpositionen, Abstand Mikrofonebene zu Quellebene $d_z = 0,12m$, Exzentrizität: $E_x = 0,07m$, Strömungsrichtung: x**

Dabei wurde lediglich die Position der Quellen in horizontaler Richtung auf einen Abstand von $d_x = 0{,}2m$ erhöht. Zudem wurde ein Einschub der Quellen zueinander um 50% vorgenommen. Da die Kalkulation des Auto- und Kreuzleistungsspektrums an den Mikrofonpositionen auch für den schlecht konditionierten Fall sehr gute Ergebnisse geliefert hat, kann auf eine

Darstellung der Autoleistungsspektren an dieser Stelle verzichtet werden. Ein Vergleich des Restfehlers ist in Abbildung 53 aufgezeigt. Es wird ersichtlich, dass der Restfehler für beide Fälle den gleichen Betrag über der Frequenz aufweist. Die zuvor beobachtete Anomalie kann nicht mehr beobachtet werden, was darauf hinweist, dass diese der Konditionierung des Problems entspringt. Erneut scheint ein Vergleich dann aussagekräftiger, wenn er die Verteilung des Kreuzspektrums zwischen den Mikrofonpositionen mit einbezieht, da nur so der extreme Fehler bei der Schallfeldreproduktion des schlecht konditionierten Falls berücksichtigt würde.

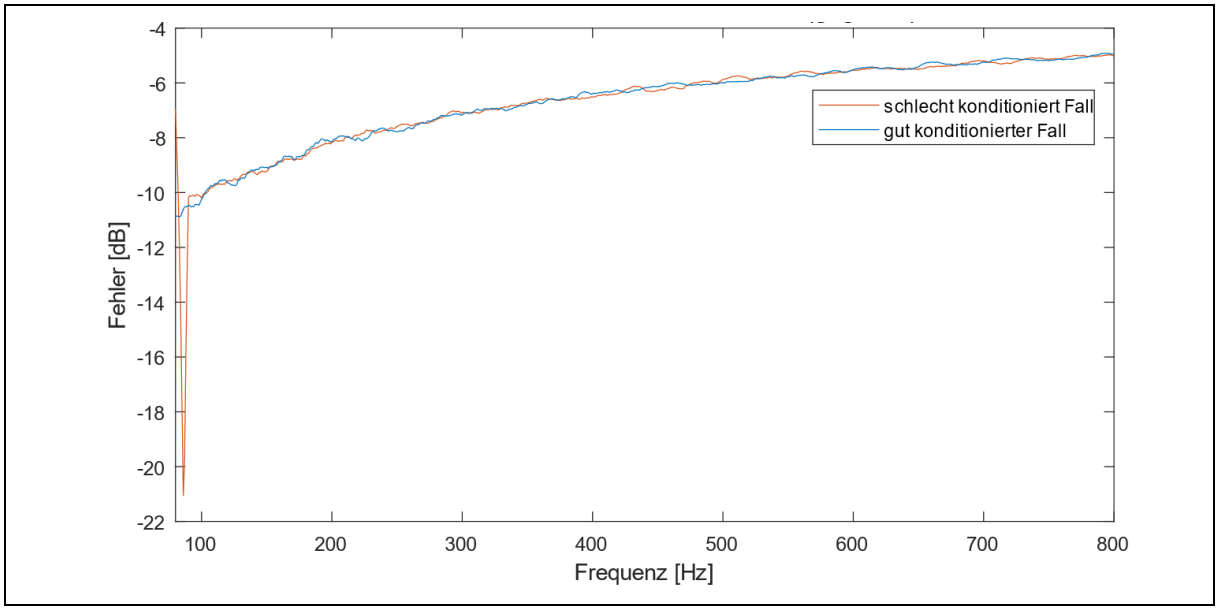


Abbildung 53: Vergleich des Restfehlers zwischen der schlecht konditionierten und der gut konditionierten Konfiguration

An dieser Stelle soll daher vor allem auf den beobachtenden Unterschied zum schlecht konditionierten Fall aufmerksam gemacht werden. Dazu ist in Abbildung 54 erneut der Korrelationsverlauf unter Einschluss zusätzlicher Positionen gegeben. Im Unterschied zum schlecht konditionierten Fall können keinen starken Anomalien in der Reproduktion der Korrelationsstruktur beobachtet werden. Stichprobenartige Betrachtungen an anderen Mikrofonpositionen haben eine gute Konstanz der Daten bestätigt. Die erzeugten Korrelationsstrukturen ähneln in ihrer Form den Darstellungen von Maury [19], der diese unter Einbeziehung einer größeren Anzahl an Mikrofonen als Lautsprecher erzeugt hat. Die dazu notwendige Approximation der Inversen der Matrix G führt schnell zu einer Erhöhung des Fehlers bei der Reproduktion, welcher für die Vorliegende Arbeit zwar graphisch aus Abbildung 54 abgelesen werden kann, von der Fehlergröße über den 66 Mikrofonpositionen jedoch nicht wiedergegeben wird, da das Gleichungssystem für diese Positionen eindeutig lösbar ist. Daraus leitet sich die Vermutung ab, dass eine Betrachtung einer höheren Anzahl an Mikrofonen als Lautsprecher eine bessere

Einschätzung des bei der Reproduktion auftretenden Fehlers zulässt. Dieser Fehler wird bei der Betrachtung einer geringeren Anzahl an Mikrofonen nicht insgesamt geringer, sondern tritt vermehrt außerhalb dieser Positionen auf.

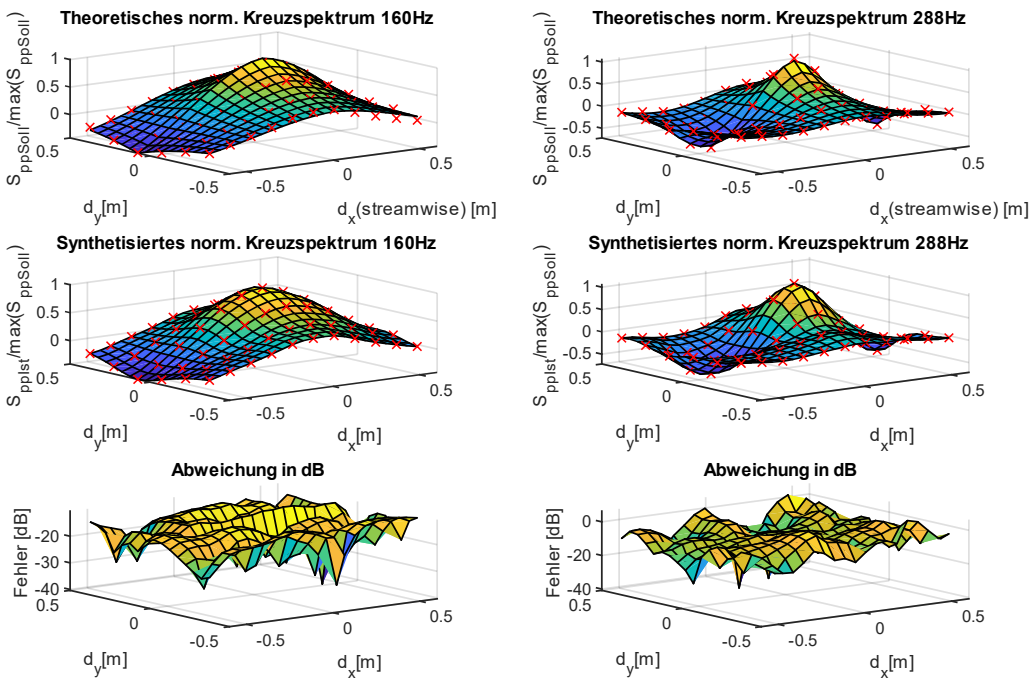


Abbildung 54: **Simulierte Korrelationsstrukturen für den gut konditionierten Fall an Punkten außerhalb der Mikrofonanordnung, Rot markiert: Ergebnisse an den Mikrofonpositionen**

Die Betrachtung des besser konditionierten Falls, dass mit der korrekten Anordnung der Quellen im Verhältnis zu den Mikrofonen durchaus TBL-artige Korrelationsstrukturen mithilfe der Schallquellenmatrix synthetisiert werden können. Allerdings ist die experimentell mögliche Maximallautstärke auch für die optimalere gewählte Konfiguration sehr begrenzt zu sein, da die Simulation eine nötige Verstärkung des generierten Lautsprechersignals um $51dB$ voraussagt.

5.3 Diskussion der Ergebnisse

Die im Kapitel 5.1 vorgenommenen Betrachtungen lassen den Schluss zu, dass der experimentelle Synthese Ablauf mit ausreichender Sicherheit durch die Simulation des Syntheseprozesses abgebildet ist. Die auftretenden Abweichungen sind gering, und können im Laufe weiterführender Betrachtungen untersucht werden. Allerdings zeigen die weiterführenden Betrachtungen auch, dass die notwendigen Pegelreserven mit einer Erhöhung der Anzahl der Mikrofonpositionen schnell ansteigen, womit die experimentelle Synthese neben dem Fehler in der Korrelationsstruktur auch in der erreichbaren maximalen Lautstärke begrenzt ist. Die Simulationen zeigen weiterhin, dass mit der Optimierung der Konditionszahl der Matrix der Frequenzgänge dieser notwendige Pegel verringert werden kann. Da davon ausgegangen werden muss, dass der Einfluss des Hallraumes im experimentellen Aufbau die an den Mikrofonpositionen eher stärker koppelt, als die Simulation es bisher abbilden kann, ist absehbar, dass die Synthese von TBL-Schallfeldern eine große Herausforderung darstellt. Vorschläge um die Konditionierung der Matrix G zu verbessern können dem Ausblick entnommen werden.

Geht man davon aus, dass auch mit einer weiteren Optimierung der geometrischen Konfiguration keine deutliche Absenkung des notwendigen Pegels erreicht werden kann, so kann die Verbindung zu den Betrachtungen von Berry [4] hergestellt werden. Dieser hat die Schalfeldsynthese eines TBL auf Grundlage der WFS untersucht und festgestellt, dass bei der Synthese von Unterschall-Schallfeldern nach Corcos eine sehr geringe Sensitivität der Reproduktion im Bereich der konvektiven Überhöhung des Wellenzahlspektrums erreicht werden konnte. Da bei der Simulation nach dem Modell der SFR ein gewünschter Pegel vorgegeben wird, könnten die beobachteten starken Überhöhungen somit erklärt werden, wenn die Vergleichbarkeit der beiden Herangehensweisen zur Schalfeldsynthese nachgewiesen werden kann. Dazu sind weiterführende theoretische Betrachtungen notwendig. Die Ergebnisse der gesichteten Literatur in Bezug auf die SFR geben keine Angaben über die Zielbeträge der Autospektren und die Darstellungen sind in dieser Hinsicht immer normiert womit eine Interpretation in Bezug auf den erreichbaren Pegel nicht möglich ist.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Inbetriebnahme des Lautsprecherarrays im Hallraum des Akustischen Transmissionsprüfstandes Braunschweig (ATB) mit dem Ziel definierte Verläufe des Auto- und Kreuzleistungsspektrums über einer schallharten Ebene zu erzeugen. Dazu erfolgt eine Optimierung der Schnittstelle zwischen Lautsprecherarray und Adapterfeld unter anderem durch eine Dichtfläche um Transmissionsverluste zu verringern und die potentielle Beschädigung der Lautsprecher zu vermeiden.

Es wird ein Mikrofonarray mit 66 Mikrofonen aufgebaut welches welches in Zukunft die Eingehende Untersuchung von Schallfeldern z.B. durch parametrische Studien ermöglicht. Die Abmessungen des Arrays sind ausreichend groß im Verhältnis zur Prüföffnung, sodass Erkenntnisse auch auf die Schallfeldreproduktion über großflächigen Testkörpern erlangt werden können. Im Vergleich zu vorherigen Schallfeldsynthesen am DLR kann die Anzahl der gleichzeitig messbaren Kanäle deutlich erhöht werden. Zudem ist eine automatische Ausrichtung der Mikrofonarrays mithilfe der im Freifeldraum eingebauten Portalkinematik möglich um eine Erhöhung der räumlichen Messauflösung zu erreichen. Somit kann der zur Schallfeldsynthese nötige Aufwand deutlich reduziert werden. So wird das Thema zugänglicher für zukünftige Betrachtungen.

Eine weitere Vereinfachung des Ablaufs wird durch die Begleitung des Syntheseablaufs in Form eines MATLAB-Skriptes erreicht, welches der Arbeit in elektronischer Form beiliegt. Dieses Skript ermöglicht zudem die Überprüfung potentieller Konfiguration auf ihre Performance durch die Implementierung einer Simulation, welche dem experimentellen Ablauf nachempfunden ist. Das Skript ist so konzipiert, dass weitere modellhafte Beschreibungen von Schallfeldern in Zukunft problemlos implementiert werden können. Es wird eine experimentelle Synthese eines vorgegebenen spektralen Verlaufs an einer Mikrofonposition unter Einbeziehung von 109 Schallquellen erreicht. Ein Vergleich mit den korrespondierenden Ergebnissen der Simulation liefert eine gute Übereinstimmung. Die Betrachtung einer vollen Ausprägung von 66 Mikrofonen erfolgt schließlich durch eine Simulation

Das Vorgehen ist schrittweise dokumentiert und Verbesserungsvorschläge zur Optimierung des Ablaufs zur Schallfeldsynthese werden in den entsprechenden Kapiteln unterbreitet. Aufgrund des knappen Zeitrahmens wurden einige Dokumente zur Beschreibung des implementierten Ablaufs der Arbeit sowie eine Liste der verwendeten Soft- und Hardware nachgereicht.

7 Ausblick

Bevor weitere Betrachtungen zur Synthese von Schallfeldern durchgeführt werden, bietet es sich an die in dieser Arbeit aufgeführten Mängel in Bezug auf den experimentellen Aufbau sowie auf die Annahmen zur Approximation der Frequenzgänge zu beheben. Für den experimentellen Aufbau sollte vor allem eine Neuausmessung der Mikrofone und in diesem Zuge auch eine Verbesserung der pinhole-Adapter umgesetzt werden. Einige konstruktive Anpassungen zur Erhöhung der Betriebssicherheit stehen zudem aus. Bei Bedarf kann auch eine Vereinfachung der Ansteuerung des Lautsprecherarrays eingerichtet werden, womit der nötige Aufwand für eine Schallfeldsynthese weiter herabgesetzt werden könnte.

Es kann weiter geprüft werden, ob ein kurzer, begrenzt reflektionsarmer Abschluss der Adapterrohren zu einer nutzbaren Erhöhung der Sensitivität des Systems führt. Zudem sollte geprüft werden in welchem Maße der Einsatz von Dämmmaterial die Invertierbarkeit der Matrix der Frequenzgänge beeinflusst. In diesem Zuge bietet es sich an das Modell zur Approximation der Frequenzgänge um eine Beschreibung des Hallraums zu erweitern, wenn die Messungen zu den oben genannten Maßnahmen so konzipiert werden, dass eine Angleichung der Einflussgrößen der Modellvorstellung auf den Hallraum am DLR erfolgen kann.

Nachdem alle gewünschten Anpassungen umgesetzt werden, kann die experimentelle Synthese „einfacher“ Schallfelder erfolgen um die Vergleichbarkeit von Simulation und Experiment zu bewerten. Dazu bietet sich die Verwendung der Modelle zum diffusen Schallfeld und der streifenden ebenen Welle an, welche sich in der Literatur als gut synthetisierbar erwiesen haben. *Nachträgliche Versuche haben gezeigt, dass die erfolgreiche experimentelle Synthese für beide Schallfelder auch im Hallraum ohne zusätzliche Maßnahmen mit dem vorhandenen Syntheseablauf möglich ist. Ohne Optimierungen sind der erreichbare Pegel und die erreichbare Genauigkeit jedoch weiterhin begrenzt.*

Bevor eine erfolgreiche Synthese von TBL-Schallfeldern zu erwarten ist, werden ausführliche theoretische und simulative Betrachtungen als nötig erachtet. Zum einen sollte die Arbeit von Berry, der eine Synthese eines TBLs nach Corcos mit der WFS überprüft, nachvollzogen werden, zum anderen sollte dabei ein Vergleich zwischen der WFS und SFR vollzogen werden. Wenn beide Modelle physikalisch fundiert sind, wovon ausgegangen werden muss, so muss auch ein eindeutiger Zusammenhang bestehen. Dies ist vor dem Hintergrund interessant, dass Berry eine Synthese von TBL-Schallfeldern nur im akustischen Bereich des Wellenzahlspektrums als machbar beschreibt. Dieser Bereich umfasst bei Unterschallflügen jedoch nicht die konvektive Erhöhung des Wellenzahlspektrums, welche als wichtig für die strukturelle Anregung der Grenzfläche gilt. Dies wiederspricht auf den ersten Blick der Beobachtung von Maury,

welcher die strukturelle Anregung auch für fehlerhaft synthetisierte Schallfelder als verhältnismäßig genau bestimmt. Somit sollte dieser Aspekt in die theoretischen Betrachtungen einfließen.

Ist ausreichendes Verständnis für die physikalischen Hintergründe der Synthese von TBL-Schallfeldern geschaffen, können Lösungen deren Umsetzungen ausgearbeitet werden. Dazu bietet es sich an, Randbedingungen zu identifizieren, welche von den momentan gesichteten Arbeiten als konstant angenommen werden. Dazu gehört etwa die Anordnung der Quellen, welche meist als rechteckig und plan angenommen wird. Eine parametrische Studie könnte etwa freie Anordnungen auf Optima überprüfen. Dennoch muss angenommen werden, dass die von Berry beschriebene harte Grenze bei der Synthese von Korrelationsstrukturen, welche kleiner als die Wellenlänge sind, auch für die SFR gelten kann. Doch auch die Wellenlänge ist keine zwingend konstante Größe. So ist zum Beispiel bekannt, dass in akustischen Schäumen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Luftschalls abfällt und somit die Wellenlänge kleiner wird. Somit ließe sich potentiell das akustische Wellenzahlspektrum in den Bereich der konvektiven Überhöhung verschieben, wenn sich die Schallausbreitung zwischen Lautsprechern und Mikrofonen durch akustischen Schaum vollzieht. Ein weiterer Vorteil zu Lasten der maximalen Sensitivität wäre, dass eine Verbesserung der Konditionierung der Matrix der akustischen Frequenzgänge zu erwarten ist. Da der Schall zu weiter entfernten Mikrofonen einen weiteren Weg zurücklegen muss, so wird dieser stärker bedämpft und der Einfluss eines Lautsprechers auf weiter entfernte Kanäle wird verringert. Mit der Verbesserung der Konditionierung der Matrix G konnte beobachtet werden, dass ein geringeres Maß an destruktiver Interferenz zur Generierung der Drücke an den Mikrofonpositionen notwendig wird, was dem erwartete Sensitivitätsverlust ausgleichen kann. Diese Modifikationen wäre zudem recht einfach in die Approximation der akustischen Frequenzgänge zu implementieren, sodass auch hier eine parametrische Studie möglich erscheint. Eine weitere Idee zur Veränderung der Wellenzahl ist der Einsatz eines geeigneten Gases, was jedoch auf den ersten Blick wenig praktikabel erscheint.

Sollte es sich als möglich und sinnvoll erweisen, eine Synthese von Schalldruckverteilungen mithilfe einer akustischen Quellmatrix zu vollziehen, können experimentelle Betrachtungen schließlich auf komplexere Anwendungsfälle, wie der Synthese über gebogenen Oberflächen, ausgeweitet werden. Im letzten Schritt könnte eine Überarbeitung der Hardware auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse erfolgen, um zum einen die Hürden zur Synthese durch das sperrige Array abzubauen und zum anderen die optimale Synthesekonfiguration umsetzbar zu machen.

Literaturverzeichnis

[1] Alexander Kokott: Investigation towards an active barrier for structure borne sound using structural intensity. In: 23rd International Congress on Acoustics (2019), S. 8073–8080.

[2] Meyer, S. ; Algermissen, S.: Synthese eines Schalldruckfeldes auf einer Flugzeugauenhaut durch ein Lautsprecher-Array In: DLR IB 131-2012/68 (2012).

[3] Algermissen, S., et al.: Experimental synthesis of sound pressure fields for active structural acoustic control testing. In: Journal of Intelligent Material Systems and Structures 25 (2014), Heft 7, S. 881–889.

[4] Berry, A. ; Dia, R. ; Robin, O.: A wave field synthesis approach to reproduction of spatially correlated sound fields. In: The Journal of the Acoustical Society of America 131 (2012), Heft 2, S. 1226–1239.

[5] W.R. Graham: A Comparison of Models for the Wavebumber-Frequency Spectrum of Turbulent Boundary Layer Pressures. In: Journal of Sound and Vibration (1997), 206(4), S. 541–565.

[6] Bravo, T. ; Maury, C.: The experimental synthesis of random pressure fields: Methodology. In: The Journal of the Acoustical Society of America 120 (2006), Heft 5, S. 2702–2711.

[7] Bravo, T. ; Maury, C.: Enhancing low frequency sound transmission measurements using a synthesis method. In: The Journal of the Acoustical Society of America 122 (2007), Heft 2, S. 869–880.

[8] Cook, R. K., et al.: Measurement of Correlation Coefficients in Reverberant Sound Fields. In: The Journal of the Acoustical Society of America 27 (1955), Heft 6, S. 1072–1077.

[9] Miller, T. S.: *TURBULENT BOUNDARY LAYER MODELS FOR ACOUSTIC ANALYSIS*. Graduate School of Wichita State University. Dissertation. 2011.

[10] Corcos, G. M.: Resolution of Pressure in Turbulence. In: The Journal of the Acoustical Society of America 35 (1963), Heft 2, S. 192–199.

[11] Klabes, A., et al.: Fuselage Excitation During Cruise Flight Conditions: Measurement and Prediction of Pressure Point Spectra. In: 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 06222015.

[12] Shepherd, M. R. ; Feurtado, P. A. ; Conlon, S. C.: Wavenumber scattering and the interactions of turbulent boundary layer flow with the structures exhibiting the acoustic black

hole effect. In: The Journal of the Acoustical Society of America 146 (2019), Heft 4, S. 2837.

[13] Elliott, S. J. ; Maury, C. ; Gardonio, P.: The synthesis of spatially correlated random pressure fields. In: The Journal of the Acoustical Society of America 117 (2005), Heft 3, S. 1186–1201.

[14] Bendat, J. S. ; Piersol, A. G.: Engineering applications of correlation and spectral analysis. 2. Auflage. New York: Wiley, 1993.

[15] Auralization: Fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality.

[16] Maury, C. ; Elliott, S. J. ; Gardonio, P.: Turbulent Boundary-Layer Simulation with an Array of Loudspeakers. In: AIAA Journal 42 (2004), Heft 4, S. 706–713.

[17] Rzepecki, J. ; Misol, M.: Report of research on Loudspeaker Array and Tube Array adapter (2019).

[18] Balzarek, C.: *Modularer Schallquellen-Adapter zur direkten Synthese einer Grenzschichtanregung*. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität. 2016-12-08.

[19] Maury, C. ; Bravo, T.: The experimental synthesis of random pressure fields: Practical feasibility. In: The Journal of the Acoustical Society of America 120 (2006), Heft 5, S. 2712–2723.

[20] Hu, N.: Coherence of wall pressure fluctuations in zero and adverse pressure gradients. In: Journal of Sound and Vibration 511 (2021), S. 116–316.

[21] Palumbo, D.: Determining correlation and coherence lengths in turbulent boundary layer flight data. In: Journal of Sound and Vibration 331 (2012), Heft 16, S. 3721–3737.

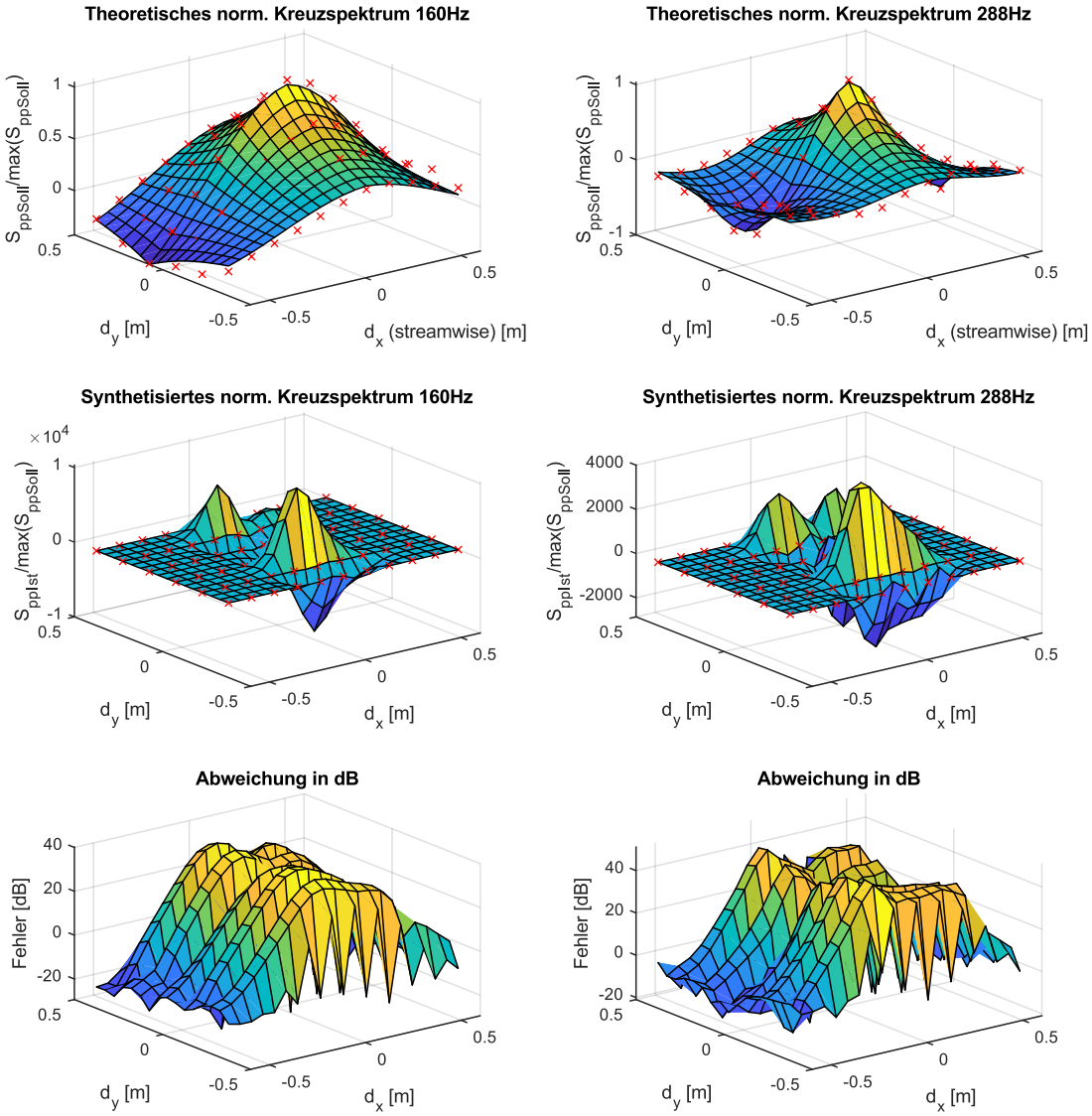
[22] Corcos, G. M.: The resolution of turbulent pressures at the wall of a boundary layer. In: Journal of Sound Vibration 6 (1967), Heft 1, S. 59–70.

[23] Lübker, D. ; Schnurrbusch, S.: *Auslegung und Inbetriebnahme einer automatisierten Schallmessvorrichtung eines Transmissionsprüfstands*. 2017.

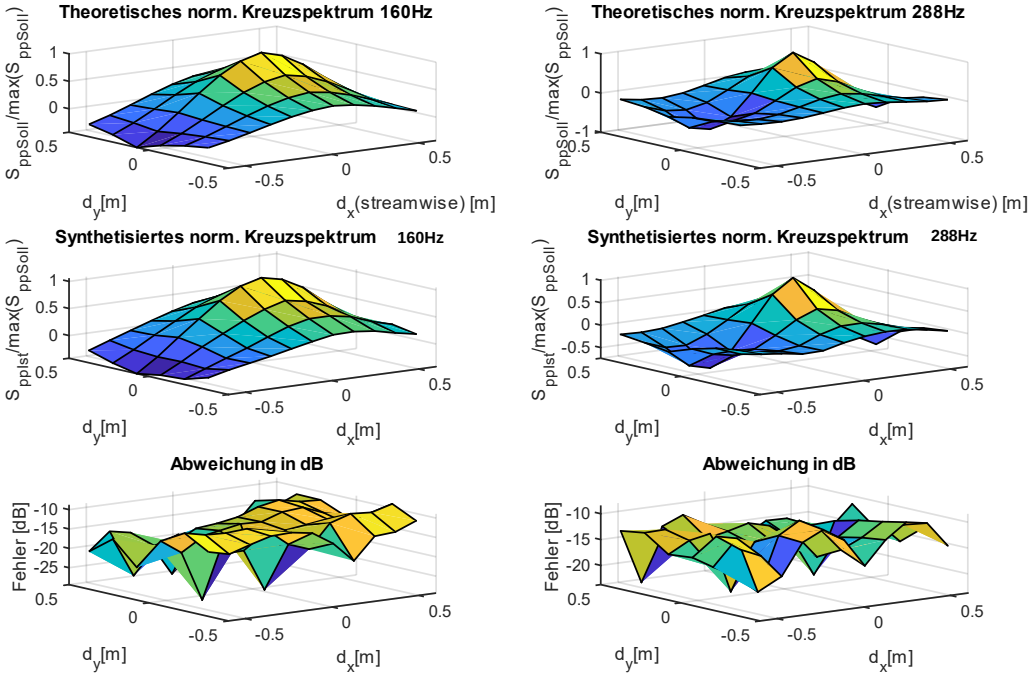
Anhänge

Anhang 1 **Korrelationsstrukturen zwischen den Mikrofonen (schlecht kond. Fall) .. ii**
Anhang 2 **Korrelationsstrukturen für den gut konditionierten Fall ..... iii**
Anhang 3 **Anschlussschema Mikrofonarray ..... iv**
Anhang 4 **Troubleshooting Guide Portalkinematik ..... v**
Anhang 5 **Skript Schallfeldsynthese Flussdiagramm ..... vi**
Anhang 6 **CD Anhang ..... vii**

Anhang 1 Korrelationsstrukturen zwischen den Mikrofonen (schlecht kond. Fall)



Anhang 2 Korrelationsstrukturen für den gut konditionierten Fall



Anhang 3 Anschlussschema Mikrofonarray

Anschlussschema linke Seite (vom Freifeldraum aus gesehen):

3	14	25	36	47	57	46
35	24	13	2	1	12	23
34	45	56				
				58	59	48
37	26	15	4	5	16	27
38	45	60	28	17	6	+

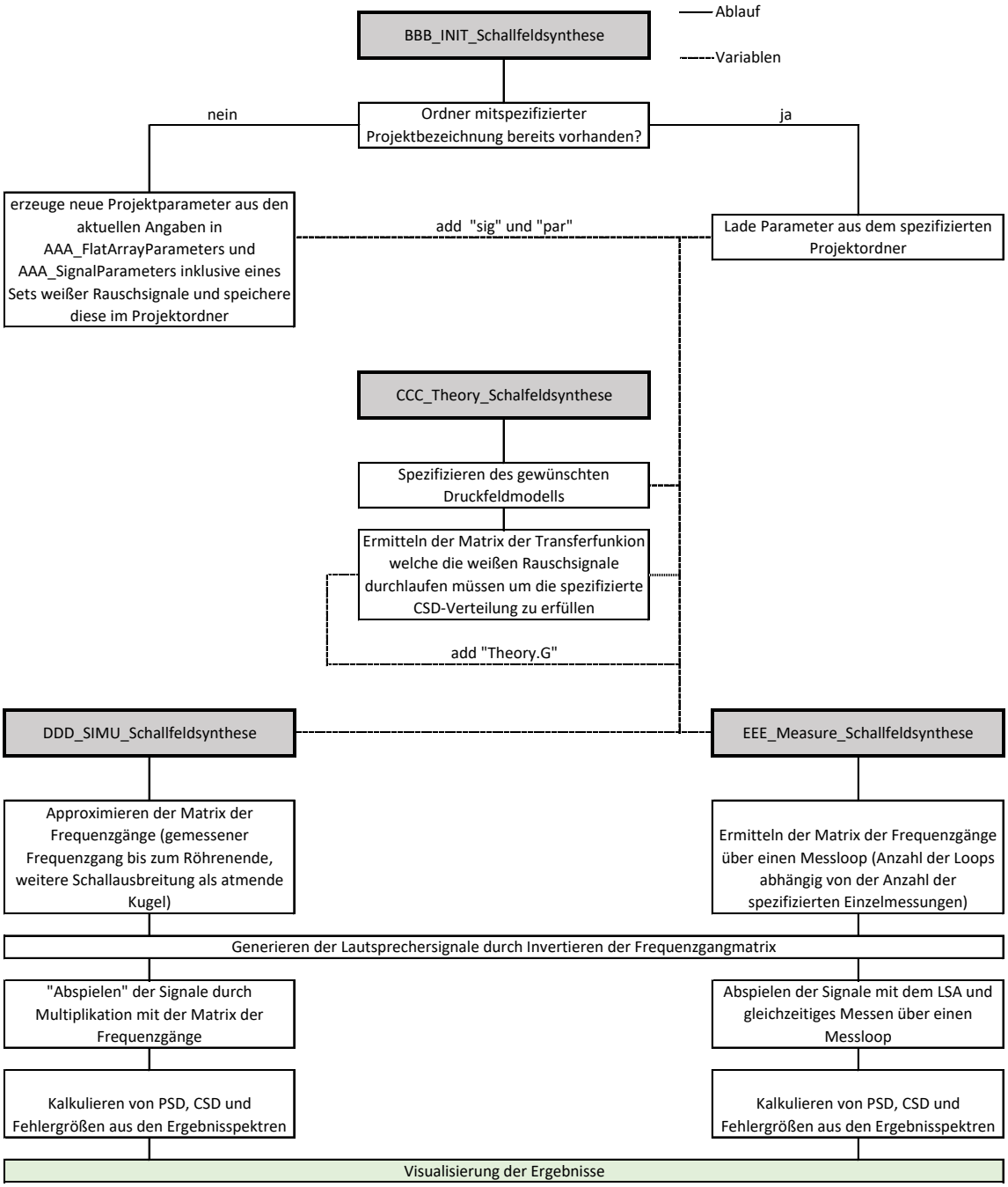
Anschlussschema rechte Seite:

64	63	52	41	30	19	8
7	18	29	40	51	62	61
50	39	+				
				9	20	31
42	53	65	54	43	32	21
10	11	22	33	44	55	66

Anhang 4 Troubleshooting Guide Portalkinematik

Fehlerbeschreibung	Lösungsvorschlag
Kinematik reagiert nicht auf Befehle und gibt keine Rückmeldung	→Notaus gedrückt? Dies triggert ein „programm interrupt“ um Schrittverluste zu verhindern durch Spannungsabfall an Pin 18 oder 19 →Kontaktfehler an Pin 18 oder 19? Arduino registriert Notaus
Portal führt keine Referenzfahrt nach dem Einschalten oder auf Befehl aus (oder nicht in allen Achsen) obwohl sich die Anlage zu diesem Zeitpunkt nicht in Referenzposition befindet Kollisionsgefahr: Arduino zählt maximal mögliche Schritte von der Position aus, die nun als Referenz gewertet wird	→ Kontaktfehler an Pin 8,9 oder 10? Fehlende Spannung an diesen Pins wird als „Referenz erreicht“ interpretiert (Gefahr besteht, wenn der Arduino zwischenzeitlich sowohl vom Netz als auch gleichzeitig von der USB-Verbindung getrennt war)
Anlage verfährt zu schnell oder zu langsam	Config.h sollte für den Betrieb mit dem Mikrofonarray mit den empfohlenen Werten aus Kapitel 3.2.2 modifiziert werden
Modifizierter Code lässt sich nicht hochladen	→Hilfstromversorgung noch angesteckt? Zum hochladen modifizierten Codes sollte die Hilfstromversorgung (Steckleiste mit dem angelöteten Kondensator) getrennt werden. Spannungsversorgung sollte dann nur über die USB-Verbindung erfolgen. Nach dem Hochladen des Codes sollte die Hilfsversorgung wieder angesteckt werden um Schrittverluste zu verhindern wenn die USB-Verbindung getrennt wird

Anhang 5 Skript Schallfeldsynthese Flussdiagramm



Anhang 6 CD Anhang

- Ordner: Schallfeldsynthese
    - Ablaufbegleitendes Skript zur Schallfeldsynthese
- Datei: Masterarbeit_Prade.docx
    - Microsoft Word Version dieser Arbeit
- Datei: Masterarbeit_Prade.pdf
    - Adobe PDF-Version dieser Arbeit