Technische Universität Berlin

Fakultät I - Geisteswissenschaften

Institut für Sprache und Kommunikation: Fachgebiet Audiokommunikation

Sekretariat EN-8, Einsteinufer 17c, 10587 Berlin

Masterarbeit

Einfluss von Aufprojektionsbildwänden auf das Abtstrahlverhalten von Lautsprechern

vorgelegt von: Alexander Nowak

[redacted]

Betreuender Dozent: Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Datum: 22. Juni 2015

Danksagung

Der Aufwand einer solchen wissenschaftlichen Arbeit ist nicht ohne Unterstützung zu bewältigen. Ein besonderer Dank geht daher an meine Ehefrau Sabrina, für die viele Geduld die sie während der gesamten Erarbeitungszeit mit mir hatte. Weiterhin möchte ich Michael Staats in Vertretung für die Firma Amptown System Company GmbH meinen Dank dafür aussprechen, dass mir die Möglichkeit gegeben wurde, mich ausführlich mit dem Thema in den Räumlichkeiten der Firma zu beschäftigen. Bei der Firma Nordakustik möchte ich mich für das Angebot bedanken, ein Messsystem zur Datenerhebung zu bekommen und für die schlussendliche Leihgabe von Hardware, die die Messung erleichtert hat.
Weiterer Dank gilt ebenfalls allen Personen, die mit direkter oder indirekter Hilfe die Umsetzung dieser Arbeit ermöglichten.

Abstract

Beschallungsanlagen in Kinos befinden sich im Falle der Frontbeschallung (L, C, R) - außer bei speziellen Veranstaltungen - hinter der Bildwand. Besonders die Positionierung hinter der Projektionsfläche, aber auch die Art der Projektionsflächen haben hier einen beträchtlichen Einfluss auf das Abstrahlverhalten der Lautsprecher.
In der vorliegenden Arbeit werden die aktuellen Standards der Branche erläutert und einige Arbeiten des Bereiches aufgezeigt. Die gegebenen Erkenntnissen dieser Arbeiten und die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit haben das Ziel, das Kinoerlebnis klanglich zu verbessern.
Untersucht wurden Phasen- und Amplitudenfrequenzgänge bei dem gängigsten Projektionsmaterial in verschiedenen Situationen in einem optimierten Screeningroom. Mit den Messungen wurden Probleme aufgezeigt und mögliche Lösungswege erarbeitet. Hierzu gehören hauptsächlich die korrekte Positionierung der Lautsprecher hinter der Projektionsfolie und eine Entzerrung des Amplituden- und Phasenfrequenzganges. Da die Bildwand im Kino zur Schallquelle hinzugerechnet werden kann, gibt es mit einer Vorabentzerrung des Systems 'Lautsprecher und Aufprojektionsbildwand' die Möglichkeit für den Systemintegrator sich im Kino einzig und allein um die Gegebenheiten des Raumes zu kümmern. Besonders die Optimierung des Wiedergabesystems hinsichtlich der Reflexionen zwischen Projektionsfolienrückseite und der Wand des Kinosaales bildet hier eine elementare Grundlage um eine hohe Wiedergabequalität des Filmtons zu gewährleisten.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Fragestellung **1**
1.1 Relevanz des Themas . . . 1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit . . . 1
1.3 Aufbau der Arbeit . . . 2

2 Stand der Forschung **3**
2.1 Aktuelle Standards . . . 4
2.2 Untersuchungen zum aktuellen Status . . . 4

3 Begründung der Untersuchung **5**

4 Methodik **6**
4.1 Eingrenzungen bezüglich des Messumfeldes . . . 6
4.2 Messsoftware . . . 6
4.2.1 Schematisches Vorgehen . . . 6
4.2.2 Länge der Fourier-Transformation (FFT) und Einflüsse . . . 7
4.2.3 Umgang mit der FFT Länge . . . 8
4.2.4 Mittelungsverfahren . . . 9
4.2.5 Unwrapping und entstehende Fehler . . . 9
4.2.6 Berechnung des Endergebnisses . . . 14
4.2.7 Kurzbeschreibung der Matlab-Skripte . . . 15
4.2.8 Abänderung für andere Messsituationen . . . 17
4.3 Messraum . . . 17
4.4 Messaufbau . . . 18
4.5 Verwendete Technik . . . 20
4.6 Vorgehen . . . 21

5 Messergebnisse **22**
5.1 Einstellungen . . . 22
5.2 Verifizierung des Messsystems . . . 22
5.3 Messung des Einflusses bei Drehung um vertikale Achse . . . 25
5.4 Messung des Einflusses bei Drehung um horizontale Achse . . . 29
5.5 Messung des Abstandseinflusses . . . 30

6 Diskussion **32**
6.1 Verifizierung des Messsystems . . . 32
6.2 Einstellungsmöglichkeiten . . . 33
6.3 Direkter Einfluss der Aufprojektionsbildwand . . . 33
6.4 Folgen des Einflusses . . . 34

6.5 Reflexionen hinter der Bildwand 35
6.6 Erläuterungen 35
6.7 Fehlerbetrachtung 36

7 Zusammenfassung **38**

8 Schlussbemerkungen und Ausblicke **39**

Literaturverzeichnis **V**
Verwendete Literatur V
Inhaltlich weiterführende Literatur VI

Abbildungsverzeichnis **VII**

Anhang **VIII**
Datenträger zur Masterarbeit VIII

Erklärung zur Urheberschaft **IX**

1 Einleitung und Fragestellung

Zu Beginn soll in den folgenden Abschnitten dargelegt werden, warum eine Untersuchung in diesem Bereich notwendig ist und welche Ziele für die Arbeit gesetzt werden. Weiterhin wird der Aufbau der Arbeit dargelegt.

1.1 Relevanz des Themas

Besonders die Tonqualität ist ein wichtiger Aspekt um den Kinobesuch zu einem Erlebnis zu machen. Aufgrund der großen Bildwände in Kinos und der Richtungsauflösung beim Hören des Menschen ist es nicht möglich einen Centerlautsprecher über oder unter der Bildfläche zu platzieren. Da sie meist die volle Breite des Kinosaales einnehmen, ist es auch nicht möglich die Frontbeschallung neben ihnen zu platzieren. Vor der Bildwand einen Lautsprecher aufzuhängen ist ebenfalls keine adäquate Lösung. Die Lautsprecher für den linken, den rechten und den Centerkanal befinden sich daher hinter der Projektionsfläche.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Die Bildwand hat als Hindernis unumgänglich einen Einfluss auf das vom Lautsprecher erzeugte Schallfeld. Im Falle einer Leinwand mit gewebter Struktur kann dieser Einfluss relativ gering ausfallen und wäre möglicherweise sogar linear. Um bessere Reflexionseigenschaften im Bezug auf die Lichtreflexion des Lichtes vom Projektor zum Zuschauer zu erzeugen, ist es heutzutage die gängigste Lösung Projektionsfolien zu nutzen. Deren nahtlose Fertigung war in der Anfangszeit von Kinos nicht möglich. Um eine gewisse Schalldurchlässigkeit zu ermöglichen sind diese Projektionsfolien mit einer Perforation versehen. Hier verbirgt sich die Problematik, dass bei intensiverer Perforation die Projektionsfläche zwar durchlässiger für den Schall wird, aber auch weniger Licht zum Publikum zurückwirft.
Der größte Einfluss durch ein Hindernis vor einem Lautsprecher findet - je nach Größe des Hindernisses - im Hoch- und Mitteltonbereich statt. Nicht nur ich selbst, sondern auch Kollegen stellten in fast allen besuchten Kinos eine dumpfe Stimme, ein fehlendes Stereoimage bei Musik und extreme Hochtonarmut fest und auch gänzlich fachfremde Personen bemängelten derartiges schon des Öfteren. Eine höherfrequent bedämpfte Stimme zum Beispiel klingt nicht nur ungewohnt, sondern ist auch unverständlicher, als eine Unbedämpfte. Ein Einfluss auf die Sprachverständlichkeit ist somit nicht von der Hand zu weisen und kann besonders bei älteren Kinobesuchern das Kinoerlebnis stark beeinflussen.
Dass eine Projektionsfläche einen Einfluss auf die Schallausbreitung der dahinter liegenden Lautsprecher hat, ist zwar bekannt, allerdings können selbst Systemintegratoren für Beschallungsanlagen in Kinos auf Nachfrage diesen Einfluss nicht komplett quantifizieren.

Es stellt sich somit die Frage: Welchen exakten, messbaren Einfluss hat eine Aufprojektionsbildwand vor einem Lautsprecher?
Zur Untersuchung soll ein perforiertes Projektionsmaterial herangezogen werden, welches am meisten Verbreitung auf dem globalen Markt findet.
Ziel ist es, auf den starken Einfluss der Bildwand hinzuweisen, Fehler bei der Positionierung von Bildwand und den dahinter liegenden Lautsprechern aufzuzeigen und den exakten Phasen- sowie Amplitudenfrequenzgang für mindestens ein Bildwandmaterial, welches hier als Übertragungssystem gilt, zu erarbeiten. Die Ergebnisse sollen keinesfalls eine einhundertprozentige Entzerrungslösung für das gegebene Bildwandmaterial darstellen. Lediglich unter den gegebenen Randbedingungen können die erarbeiteten Ergebnisse zur Entzerrung genutzt werden. Ist das Gesamtsystem Lautsprecher-Bildwand fähig eine lineare Wiedergabe vor der Projektionsfläche zu realisieren, erleichtert dies die eventuell nötige Entzerrung im Raum.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach der Erläuterung, in welchen Feldern sich Neuerungen bezüglich des Kinotons ergeben haben und in welche Richtung sich die Forschung diesbezüglich aktuell bewegt, wird darauf eingegangen, inwiefern mit den aktuellen Normen und Regeln eventuelle Fehler begangen werden. Hinzu kommt ein weiterer Abschnitt mit dem Thema, warum ein Hinweis auf mögliche Herausforderungen in der Kinobeschallung wichtig ist und worin der Nutzen einer derartigen Untersuchung liegt. Nach den Eingrenzungen bezüglich des Messumfeldes folgen Erläuterungen zu der genutzten Software und zu den zur Auswertung entwickelten Skripten für diese Software. Bevor die Ergebnisse in zusammengefasster Form dargelegt werden, werden noch einige methodisch relevante Aspekte ausgeführt. Abschließend werden die diskutierten Ergebnisse zusammengefasst und weitere Untersuchungsmöglichkeiten und Ausblicke aufgezeigt.

2 Stand der Forschung

Im Kino wurden besonders die Zuspielqualität und die Bildqualität in den letzten Jahren im Zuge der Digitalisierung verbessert.
Forschungen im Bereich der Beschallungskonzepte sind nur in geringem Maße bekannt beziehungsweise zugänglich. Die Firmen Dolby und Barco bieten neue Mehrkanalformate, wie Atmos und AURO, an um das Kinoerlebnis lebendiger zu gestalten, haben hier jedoch eher die Übertragung der Audiosignale und Positionierung der Lautsprecher im Fokus. Forschungen zur und Ansprüche an die Beschallungstechnik sind hier nicht bekannt. (Dolby Laboratories, 2015a; Barco GmbH, 2015b,c,a)
Dolby Digital und DTS sind lediglich Übertragungs- beziehungsweise Kodierungsstandards, welche sich keineswegs mit der eigentlichen Beschallung im Kino beschäftigen (Weinzierl, 2008; Dolby Laboratories, 2015b; DTS, INC., 2015, S. 687ff). Das Format SDDS der Firma Sony beschäftigt sich ebenfalls nur mit der Kodierung von Signalen (Schmidt, 2005, S.285).
Long et al. (2012) haben intensive Untersuchungen durchgeführt, in denen das Abstrahlverhalten des Systems Lautsprecher-Bildwand untersucht wurde, während der Lautsprecher immer parallel zur Bildwand positioniert war. Untersucht wurde das Verhalten in drei verschiedenen Abständen des Lautsprechers zur Projektionsfläche (150 mm, 300 mm und 450 mm) und in verschiedenen Winkeln bezüglich der 0°-Achse des Systems. Hinzu kam eine Untersuchung bezüglich des Transmissionsgrades der Aufprojektionsfolie. Zusammenfassend wird in dieser Arbeit gesagt, dass es einen komplexen Einfluss gibt, der durch Reflexionen einen starken Kammfilter erzeugt. Ebenfalls wird darauf hingewiesen, dass eine größere Entfernung zwischen Lautsprechern und Bildwand den Einfluss auf das Abstrahlverhalten reduziert. Es wird erwähnt, dass es auch möglich sei, den von der Projektionsfolie nach hinten zurückreflektierten Schall vom Lautsprecher weg in den Raum dahinter zu richten, es aber weiterhin die Möglichkeit gibt, dass der Schall wieder durch die Bildwand dringt und eventuell dafür sorgt, dass der Frequenzgang verändert wird. Zu den Ergebnissen gehören einzelne Abbildungen, in denen jeweils die einzelnen Messsituationen zu erkennen sind und in denen die Änderung des Phasenganges und der Transmissionsverlust des Schalls durch die Bildwand quantifiziert werden.
Neben den dokumentierten Forschungen sind auch Line Array Lösungen oder Hybridansätze aus Line Arrays und Punktschallquellen in einigen Kinos zu finden, allerdings gibt es keine spezielle Anpassung der Beschallungskonzepte und/oder Systeme beziehungsweise keine bekannte, spezielle Anpassung auf die Situation von Lautsprechern hinter Bildwänden.

2.1 Aktuelle Standards

Die aktuell einzuhaltenden Standards für den Bereich Kinobeschallung belaufen sich auf zwei Ausfertigungen der SMPTE (Society of Motion Pictures and Television Engineers). Die SMPTE RP 200:2012 ist der Bezeichnung nach eine empfohlene Praxis, beschäftigt sich mit relativen und absoluten Schalldruckpegeln im Kino und verweist für die Messung des elektroakustischen Verhaltens der einzelnen Lautsprecherkanäle im Kino auf den SMPTE ST 202:2010. Dieser Standard beschreibt, wie Lautsprecherkanäle in einem Kino gemessen werden sollen und welche Frequenzgänge für das Gesamtsystem einzuhalten sind. (SMPTE, 2012, 2010)
In der SMPTE ST 202:2010 werden Zielkurven vorgegeben, die den späteren Frequenzgang im Hörerbereich beschreiben. Hinzu kommen Anmerkungen, welche Handlungen zum Erreichen dieser Zielkurven unangebracht sind, welche Eigenschaften die eingesetzten Messgeräte haben sollten und welche Methoden für die Messung bevorzugt werden. (SMPTE, 2010)
Bezüglich der Bildwand wird erwähnt, dass mit einer Dämpfung von 3 dB zwischen 5 kHz und 8 kHz und bei höheren Frequenzen mit einer Dämpfung von 6 dB/Oct. zu rechnen ist. Um Reflexionen hinter der Bildwand zu vermeiden soll vor der Messung sichergestellt sein, dass sich der Lautsprecher 'nahe genug' an der Projektionsfolie befindet.

2.2 Untersuchungen zum aktuellen Status

Newell et al. (2011 May) und Gedemer (2013 October) zeigen eine Tendenz gegen die von der SMPTE vorgegebenen Zielkurven, welche in der Branche als raumgrößenbezogene Anpassungen der X-Curve bekannt sind. Die Idee hinter dieser Art ein Kino einzumessen ist verständlich, aber veraltet und der Grund, weswegen eine solche Methode angewendet wurde ist nicht mehr vorhanden. Mit der Messtechnik, die auf dem Markt ist, ist es ohne weiteres möglich, sich auf den Direktschall der einzelnen Kanäle zu konzentrieren und so eine lineare Wiedergabe des Systems Lautsprecher-Bildwand zu realisieren. Psychoakustisch macht dies ebenfalls Sinn, da die menschliche akustische Wahrnehmung daran gewöhnt ist, dass ein Schallereignis mit der Entfernungszunahme im Hochtonbereich schneller leiser wird, als im Tieftonbereich. Teilweise korrigieren Mischtonmeister im Bereich des Filmtons die X-Curve, weil sie ebenfalls eine Hochtonarmut feststellen. Da zur Zeit allerdings keine wirklich einheitliche Einrichtung der Beschallungsanlagen zwischen den Kinos herrscht, entstehen hier teilweise starke klangliche Defizite. (Newell et al., 2011 May; Gedemer, 2013 October)

3 Begründung der Untersuchung

Um die Erwartungen der Kinobesucher zu erfüllen und sie nicht nur mit einem brillianten Bild als Kunden zu halten, ist es unumgänglich auch für eine atemberaubende Beschallung im Kino zu sorgen. Je naturgetreuer die Wiedergabe ist, desto angenehmer ist das Kinoerlebnis für den Besucher.
Es muss jedem, der sich im Bereich der Medientechnik mit dem Bau eines Kinos beschäftigt, klar sein, dass es physikalische Grenzen gibt, die man ohne Qualitätsverlust nicht überschreiten kann. Im Bereich der Projektionstechnik sind dies die geometrischen Grenzen, bis zu welchen mit der geplanten Technik eine Projektion im gewünschten Format noch möglich ist. Für die Beschallung gibt es ebenfalls geometrische Grenzen, zwischen denen sich nur ein begrenzter Bewegungsspielraum befindet. Neben den raumakustischen Maßnahmen, die im Zuschauerbereich des Kinosaals vorgenommen werden ist ein ebenso wichtiger Teil die Ausgestaltung der Wand hinter der Projektionsfolie. Je nach Beschaffenheit muss diese entsprechend absorbierend ausgestaltet sein. Hinweise hierfür sind in der Arbeit von Long et al. (2012) zu finden. Zur Raumakustik kommt die Leistung und die Positionierung des Lautsprechers. Während es bezüglich der Positionierung gegenüber der Leinwand nur die Aussagen der SMPTE (2010) gibt und dem entgegen in der Arbeit von Long et al. (2012) mehrere Abstände untersucht wurden, ließ sich bezüglich der Leistung, die nötig ist, um eine Projektionsfolie zu durchschallen, kein Hinweis in der Literatur finden. Es gilt zu erforschen, ob eine Überdimensionierung gegenüber des maximalen Schalldruckpegels, den der Lautsprecher im Freifeld erzeugen kann, notwendig ist. Einflüsse der Bildwand auf den Frequenzgang des Lautsprechers werden bisher lediglich in der Untersuchung von Long et al. (2012) aufgezeigt. Diese werden allerdings direkt mit der X-Curve in Verbindung gebracht, welche lediglich eine Messhilfe darstellt, keinesfalls aber den Frequenzgang des Direktschalls beschreibt.
Wie die Untersuchungen unter Abschnitt 2.2 zeigen, gibt es bei der Standardisierung der Beschallungsqualität in Kinos noch Defizite. Besonders die Erwartungen und Zielsetzungen der Kinobetreiber und das damit verbundene Vertrauen, welches den jeweiligen technischen Dienstleistern entgegengebracht wird, wird so teilweise enttäuscht. Die Bemühungen, eine adäquate Beschallung zu realisieren, sind in der Kinoindustrie spürbar, seien es die Standards zur Signalübertragung, oder der Aufwand in der Filmherstellung, allerdings ist das Thema der Beschallungssysteme nicht direkt beziehungsweise nicht ausreichend abgedeckt.

4 Methodik

In den folgenden Abschnitten werden die genutzte Messroutine und der Versuchsaufbau dargestellt. Hinzu kommt die Beschreibung des Vorgehens bei der Messung sowie bei der Auswertung.

4.1 Eingrenzungen bezüglich des Messumfeldes

Die Untersuchung fand in einem optimierten Screeningroom statt und nicht in einem reflexionsarmen Raum. Somit ergibt sich eine reale Messumgebung. Diese bringt mit sich, dass in den Messungen einige kleine Reflexionen zu Einbrüchen oder Überhöhungen in den gemessenen Amplitudenfrequenzgängen und zu Sprüngen in den Phasenfrequenzgängen führt. Neben der Tatsache, dass es trotzdem möglich ist auf einen Einfluss zu schließen, eröffnet sich im realen Versuchsfeld ebenfalls die Möglichkeit auf andere Herausforderungen in der Kinobeschallung aufmerksam zu werden. Besonders zu beachten sind hier unter anderem der Einfluss von starken Reflexionen im Raum oder Flatterechos hinter der Bildwand.
Weiterhin ist zu erwähnen, dass nicht der Einfluss von verschiedenen Projektionsfolien untersucht wurde, da hier nicht das Ziel bestand Kompensationskurven für verschiedene Materialien zu erstellen, sondern auf den Einfluss hinzuweisen, der durch das Projektionsmaterial entsteht.

4.2 Messsoftware

Um den Einfluss der Bildwand auf das Abstrahlverhalten eines Lautsprechers zu untersuchen, ist es sinnvoll diesen durch Subtraktion der Messergebnisse, die mit Projektionsfläche vor dem Lautsprecher generiert wurden, von den Messergebnissen, die ohne Projektionsfolie vor dem Lautsprecher ermittelt wurden, zu bestimmen.
Um die Berechnungen und somit die komplette Auswertung nachvollziehbar zu halten, wurde entschieden, eine Auswertungsroutine in Matlab zu schreiben. Dies bietet unter anderem den Vorteil während der Messung nur Rohdaten aufzunehmen und diese später mit verschiedenen Parametern in der Berechnung auszuwerten. In den folgenden Abschnitten wird die Herangehensweise beim Schreiben der Auswertungsroutine beschrieben.

4.2.1 Schematisches Vorgehen

Wie erwähnt, wurde für die Messungen entschieden vorerst nur die Rohdaten aufzunehmen und diese später auszuwerten. Während der Aufnahme wird eine Stereo-WAV-Datei gespeichert, wobei der Kanal 1 das Messsignal und der Kanal 2 das Referenzsignal ist. Aus diesen beiden Signalen wird später in der Auswertung eine Impulsantwort errechnet,

die dann zum Erlangen weiterer Ergebnisse genutzt wird. Die Ergebnisse werden je auszuwertendem Messpunkt gespeichert und zur späteren Darstellung wieder geladen. Mit dem Abspeichern der reinen Audiosignale ist es somit später möglich, Anpassungen in allen Bereichen der Auswertung vorzunehmen ohne die Messung noch einmal durchführen zu müssen. Lediglich die Berechnung muss noch einmal durchlaufen werden. Um einige Schritte in der Auswertung später noch nachvollziehen zu können, werden diese beim Speichern der Ergebnisse je Messpunkt mit gespeichert.

4.2.2 Länge der Fourier-Transformation (FFT) und Einflüsse

Nach einigen Tests stellte sich heraus, dass es besonders in der Auswertung des Phasengangs bei höheren Frequenzen mehr Probleme gibt, wenn eine komplette Fourier-Transformation (FFT) zur Berechnung genutzt wird. Um im Frequenzbereich unter 100 Hz eine ausreichende Auflösung zu haben, ist es nötig eine relativ lange FFT zu verwenden, was zur Verstärkung der Probleme führt, solange mit der Länge der FFT auch die Länge der verwendeten Impulsantwort gleichgesetzt wird. Die Herausforderung liegt darin, dass die Phasenfrequenzgänge für die Bildung der Differenz vorher entrollt werden müssen. Springt der Phasengang sehr stark oder bewegt sich der Phasengang in der Nähe der Grenze zwischen -180° und 180° können beim Entrollen Fehler geschehen. Diese Fehler können durch eine Erhöhung der Auflösung oder/ und durch Vermeiden von vielen Sprüngen im Phasenspektrum vermieden werden. Je länger die Impulsantwort ist, desto mehr Reflexionen können mit in die Auswertung einfließen und je länger die FFT ist, desto höher ist die resultierende Frequenzauflösung. Um eine hohe Auflösung zu gewährleisten und trotzdem eine kurze Impulsantwort zu nutzen, wurde diese auf eine Länge von 2^n Samples gekürzt und im Bereich der letzten 8 Samples mit der Form eines invertierten Sinus von 0 bis $\pi/2$ ausgeblendet. Der Rest der Impulsantwort wurde weiterführend mit Nullen aufgefüllt.
Weiterhin ist es besonders für die Berechnung des Phasengangs wichtig die Impulsantwort am Anfang so zu kürzen, dass ihr Peak möglichst nahe am Beginn liegt. Im Idealfall so, dass sich der Peak auf dem ersten Sample der Impulsantwort befindet. Um den Vergleich zwischen zwei Messungen hintereinander ziehen zu können, wurde die Stelle, an der die Impulsantwort der Messung ohne eine Projektionsfolie im Weg vorne 'abgeschnitten' wurde, gespeichert und ebenfalls für die Messung mit Projektionsfolie im Weg und alle weiteren Messungen der Reihe, bei denen sich der Winkel ändert, genutzt. Da beim Schneiden im Peak das Einschwingverhalten und somit auch ein Teil der Informationen verloren geht, wurde während der Auswertung nicht im Peak, sondern 6 Samples davor geschnitten.
Um die Messung korrekt zu halten, ist es nicht möglich nur ein Sample der Impulsantwort zu nutzen, dieses wäre zwar immer noch gemessen, würde aber einem Dirac-Impuls entsprechen und nicht das Verhalten des realen Systems beschreiben. Damit eine Frequenz

messtechnisch ausgewertet werden kann, muss die genutzte Impulsantwort mindestens die Länge der Periodendauer der gewünschten Frequenz aufweisen. Dies führt dazu, dass die Impulsantwort für eine korrekte Messung bei 50 Hz eine Länge von mindestens 20 ms haben müsste, was bei 5 kHz allerdings schon 100 Perioden entsprechen würde. Dieser Fakt allein ist wiederum nicht so kritisch, wie der, dass dann auch alle Reflexionen mit einem Umweg von bis zu 6,88 m mit erfasst werden. Gerade im höherfrequenten Bereich beeinflussen diese den Phasengang dann so, dass es bei dem bereits angesprochenen Entrollen zu Fehlern kommt.
Hinzu kommt beim logarithmischen Auftragen des Frequenzganges, dass die Stützstellen zu höheren Frequenzen immer enger beieinander liegen und die Variationen in der Darstellung der Phase (°) oder der Amplitude (dB) sozusagen zusammengestaucht werden. Um einen 'lesbaren' Frequenzgang zu erzeugen gibt es hier die Möglichkeit einer gleitenden Mittelwertbildung, bei der die Anzahl der zum Mitteln genutzten Stützstellen zu hohen Frequenzen hin steigt und so zum Beispiel eine Glättung mit Terzbandbreite realisiert wird.

4.2.3 Umgang mit der FFT Länge

Der Notwendigkeit einer Glättung und der zuvor beschriebenen Herausforderung der FFT Länge in Bezug auf den Phasengang wurde in der erstellten Matlab-Routine mit dem Generieren eines Vektors begegnet, der je Oktave die gleiche Anzahl an Stützstellen hat. Um die Auflösung nach Wunsch zu erhöhen, wurden FFT Länge und Impulsantwortlänge in Schrittlängen von 2^n frei einstellbar gehalten. Das Skript ist für eine Abtastrate von 48 kHz geschrieben und somit liegt die erste Oktave für die Auswertung zwischen 12 kHz und 24 kHz. Für diese Oktave werden die Grundeinstellungen vorgenommen. Je Oktavschritt nach unten wird für die Länge der FFT und für die Länge der Impulsantwort der Exponent um eins erhöht. Folglich würde die Auswertung für den Bereich zwischen 46 Hz und 23 Hz aus einer FFT mit einer Länge von 65536 Samples (2^{16}) entnommen werden, wenn für den Bereich zwischen 24 kHz und 12 kHz eine FFT mit einer Länge von 128 Samples (2^7) als Grundeinstellung genutzt wird. Aus den je Oktave berechneten Transformationen wird dann immer der gleiche Stützstellenbereich genutzt. Der Bereich der Stützstellen bleibt zwar gleich, aber der damit beschriebene Frequenzbereich entspricht immer der gewünschten Oktave. Während des Berechnungsprozesses werden ebenfalls die Frequenzen der einzelnen Stützstellen gespeichert, wodurch neben dem Vektor mit den Messwerten auch ein Vektor mit den dazugehörigen Frequenzen entsteht. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass aus Speicherplatzgründen die angesprochenen einzelnen Fourier-Transformationen nach dem Zusammensetzen in Matlab 'keinen Wert' (NaN) zugewiesen bekommen, da sonst ein einzelner gespeicherter Messpunkt 1 bis 2 GB groß werden kann und das Laden von 60 Messpunkten in Matlab so viele Ressourcen des Rechners verbraucht. Sollte ein Vergleich zwischen den einzelnen Transformationen

und der zusammengesetzten 'Transformation' gewünscht sein, kann das Entfernen der Werte im Skript abgeändert werden.

4.2.4 Mittelungsverfahren

Um genauere Ergebnisse zu erlangen wird jede zu messende Situation über mehrere Messungen gemittelt. Nachdem aus den aufgenommenen Audiosignalen je einzelnem Sweep eine Impulsantwort errechnet wurde und aus dieser mit der unter 4.2.3 beschriebenen Methode eine zusammengesetzte 'Transformation' gewonnen wurde, findet die Mittelung einmal im Amplitudenbereich und einmal im Phasenbereich statt. Für den Amplitudenbereich wird hierbei ein reiner Mittelwert über die logarithmierten Einzelamplituden gebildet. Für die Mittelung der Phasengänge werden alle einzelnen Phasengänge zuerst entrollt und dann ebenfalls über eine reine Mittelwertbildung zusammengefasst.

4.2.5 Unwrapping und entstehende Fehler

Das Unwrapping (Entrollen) der Phasengänge ist nötig um die Subtraktion der gemessenen Phasengänge voneinander zu realisieren. Das Ergebnis der Phasenberechnung in Matlab liegt im Bereich zwischen -π und π. Werden die Werte durch $(2 \cdot \pi/360°)$ dividiert erhält man den Wertebereich von -180° bis 180° für die Phasenverschiebung. Zur Verdeutlichung der Problematiken beim Entrollen sollen die folgenden Abbildungen dienen. Abbildung 1 zeigt drei einzelne Phasengänge, die je aus einem Dirac-Impuls berechnet wurden. Bei zwei der drei Impulse wurden vor dem Impuls einmal vier und einmal fünf Samples mit dem Wert 'Null' eingefügt. Dies hat einen Abfall der Phase zu hohen Frequenzen hin zur Folge.

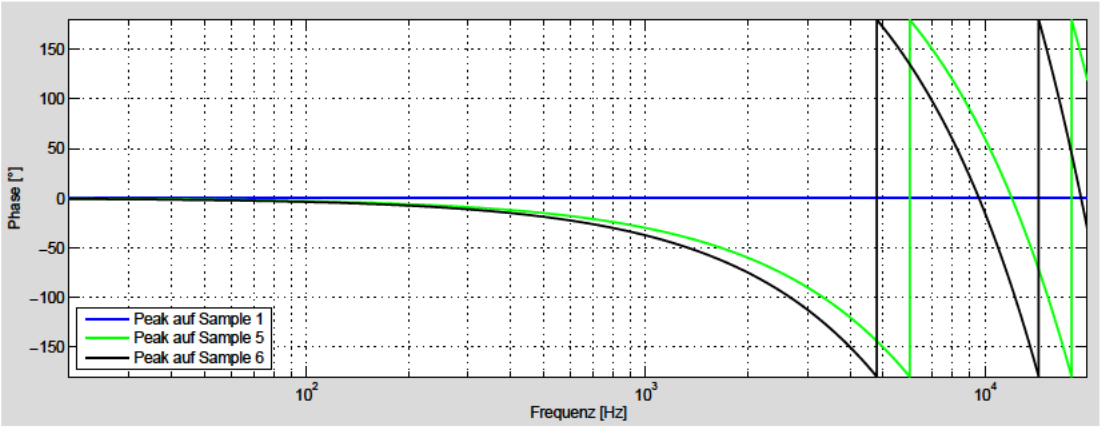

Abbildung 1: Veranschaulichung von Problematiken beim Entrollen der Phasengänge: Drei Phasengänge von drei zeitlich verschieden positionierten Dirac-Impulsen

In Abbildung 2 sind dieselben Phasengänge, wie in Abbildung 1 dargestellt. Hier wurden

allerdings die in Abbildung 1 sichtbaren Sprünge zwischen -180° und 180° entfernt. Es ist besser zu erkennen, dass die Phasengänge sich zu hohen Frequenzen hin zunehmend voneinander entfernen.

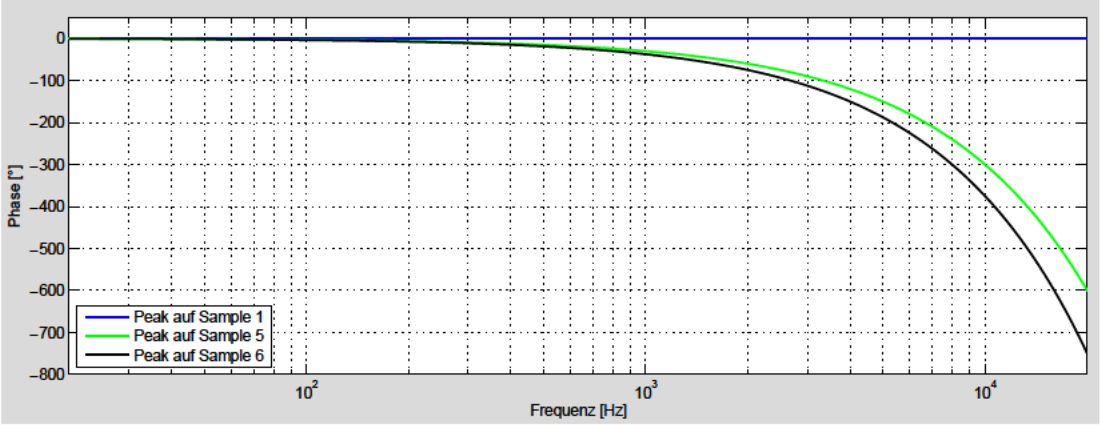

Abbildung 2: Veranschaulichung von Problematiken beim Entrollen der Phasengänge: Drei entrollte Phasengänge von drei zeitlich verschieden positionierten Dirac-Impulsen

Ein Teil der Untersuchung ist die Betrachtung der Veränderung des Phasenfrequenzganges durch Hinzufügen einer Aufprojektionsbildwand zwischen Lautsprecher und Messmikrofon. Zur Berechnung des Einflusses wird der Phasenverlauf der Messung ohne Bildwand von dem Phasenverlauf der Messung mit Bildwand subtrahiert. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse von drei verschiedenen Berechnungswegen für die gesuchte Phasendifferenz am Beispiel der in Abbildung 2 und 1 gezeigten Phasengänge (grün und schwarz). Die grüne Kurve zeigt das Ergebnis, wenn von der zweiten Fourier-Transformation (mit Peak auf dem sechsten Sample) die erste Transformation (mit Peak auf dem fünften Sample) abgezogen wird und dann der Phasengang berechnet wird. Die blaue Kurve zeigt das Ergebnis, wenn vom Phasenverlauf der zweiten Transformation der Phasenverlauf der ersten Transformation abgezogen wird. Zuletzt zeigt die schwarze Kurve das Ergebnis, wenn von dem entrollten Phasenverlauf der zweiten Transformation der entrollte Phasenverlauf der ersten Transformation abgezogen wird.

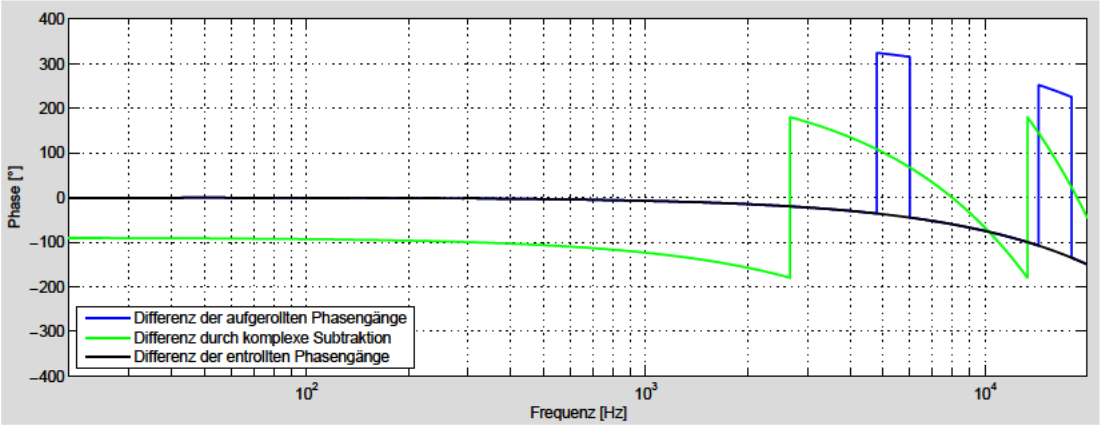

Abbildung 3: Veranschaulichung von Problematiken beim Entrollen der Phasengänge: Differenzen der Phasengänge, welche in vorangehenden Abbildung in schwarz und grün dargestellt sind, berechnet über drei verschiedene Wege, die blaue Kurve verläuft teilweise hinter der schwarzen

Im Vergleich der Ergebnisse in Abbildung 3 mit den Kurven in Abbildung 2 wird ersichtlich, dass nur die Differenz der entrollten Phasengänge das korrekte Ergebnis liefern kann.

Das Entrollen der Phasengänge ist somit notwendig um ein Ergebnis zu erlangen. Weiterhin bleiben die unter 4.2.2 erwähnten Fehler beim Entrollen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass es sich nur um 'Fehler' im Sinne der gewünschten Auswertung handelt. Diese 'Fehler' entstehen, indem Werte, die über die Grenze von -180° zu 180° springen, als Sprung interpretiert werden und dementsprechend entrollt werden, obwohl sie nur die Streuung um den zum Beispiel bei -178° liegenden, nicht abfallenden Phasengang beschreiben. Diese Streuung ist in der gegebenen Messsituation sehr groß, da es, trotz der akustischen Bearbeitung des Raumes, zu relativ starken Reflexionen kommt. Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt eines gemessenen Phasengangs und eines dem gemessenen Phasengang grob angenäherten Phasengangs. Der gemessene Phasengang stammt aus einer Messung, welche stark mit Reflexionen behaftet ist.

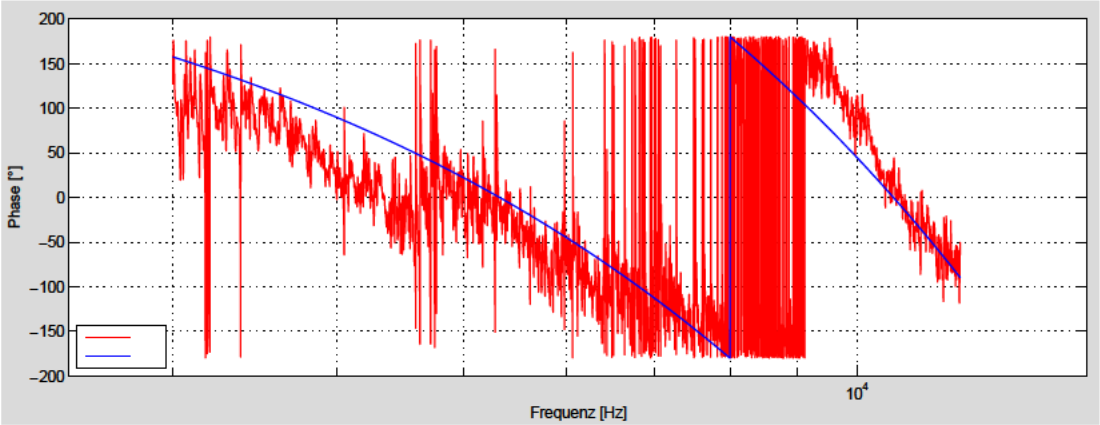

Abbildung 4: Veranschaulichung von Problematiken beim Entrollen der Phasengänge: gemessener Phasengang in rot und grob angenäherter Phasengang in blau

In Abbildung 5 sind die selben Messungen, wie in Abbildung 4 zuzüglich ihrer entrollten Versionen dargestellt. Zum Entrollen wurde die Matlab-Funktion „unwrap()“ genutzt.

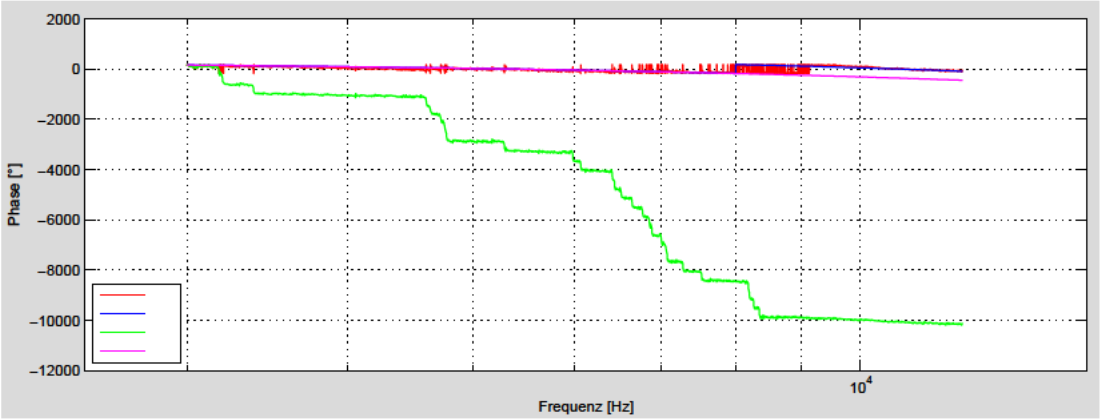

Abbildung 5: Veranschaulichung von Problematiken beim Entrollen der Phasengänge: gemessener Phasengang in rot und grob angenäherter Phasengang in blau (wie in der vorangehenden Abbildung) zuzüglich der jeweiligen entrollten Phasengänge (magenta entspricht blau, entrollt | grün entspricht rot, entrollt)

Während der in magenta dargestellte Verlauf in Abbildung 5 dem erwarteten entrollten blauen Phasenverlauf entspricht, wurden beim Entrollen des roten Phasenverlaufes auch einige der unerwünschten, durch Reflexionen hervorgerufenen Einflüsse mit entrollt. Enthält nun eine der beiden Messungen, die verglichen werden sollen, eine Reflexion mehr, die mit entrollt wird, 'verrutscht' der Phasengang gegenüber der anderen Messung und eine Subtraktion ergibt nicht mehr das korrekte Ergebnis. Liegen derartige Reflexionen hingegen in beiden Messungen vor und sorgen in beiden Messungen zu weiterem Entrollen der Phasengänge, so ist dies unkritisch, da die Phasengänge beider Messungen gleichmäßig

'verrutschen'.

Beim Entrollen von verschiedenen Phasengängen, welche zusammen in eine Auswertung einfließen sollen, gibt es einen weiteren Einfluss der nicht außer Acht gelassen werden kann. Eine Fourier-Transformation ergibt Werte, die dem Frequenzbereich von 0 Hz bis zur Samplingfrequenz zugeordnet sind. Besonders im tieffrequenten Bereich, in dem die Schallquelle einen sehr geringen Schalldruckpegel in Relation zu dem erzeugt, den sie in ihrem Arbeitsbereich wiedergibt, ist es möglich, dass für die Messung ein sehr geringer Signal-Rauschabstand vorliegt. Selbiges trifft zu, falls das genutzte Messmikrofon außerhalb seiner Spezifikationen genutzt wird. Bei einem Messsystem, welches nicht bis 0 Hz valide Daten erfasst, werden die Messwerte an dieser unteren Grenze stochastisch verteilt sein. Abbildung 6 zeigt zur Veranschaulichung zwei fiktive Phasenfrequenzgänge, welche sich nur am Anfang unterscheiden. Im Bereich zwischen etwa 70 Hz und 20 kHz sind beide Verläufe völlig identisch.

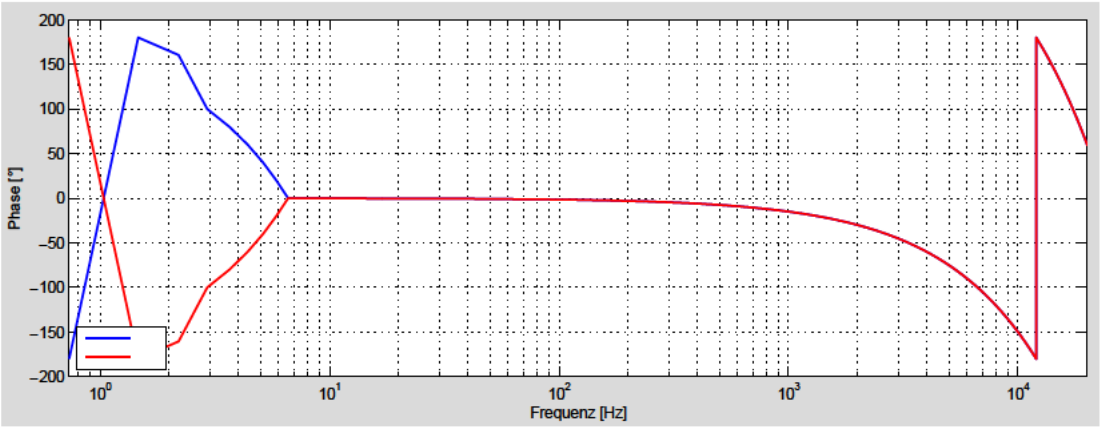

Abbildung 6: Veranschaulichung von Problematiken beim Entrollen der Phasengänge: zwei fiktive Phasenfrequenzgänge mit unterschiedlichen Anfangswerten

Werden die in Abbildung 6 dargestellten Phasengänge mit Hilfe der Matlab-Funktion „unwrap()“ entrollt, liegen beide Verläufe aufgrund ihres unterschiedlichen Verhaltens nicht mehr übereinander, sondern verlaufen versetzt zueinander. Der angesprochene Fall ist in Abbildung 7 dargestellt.

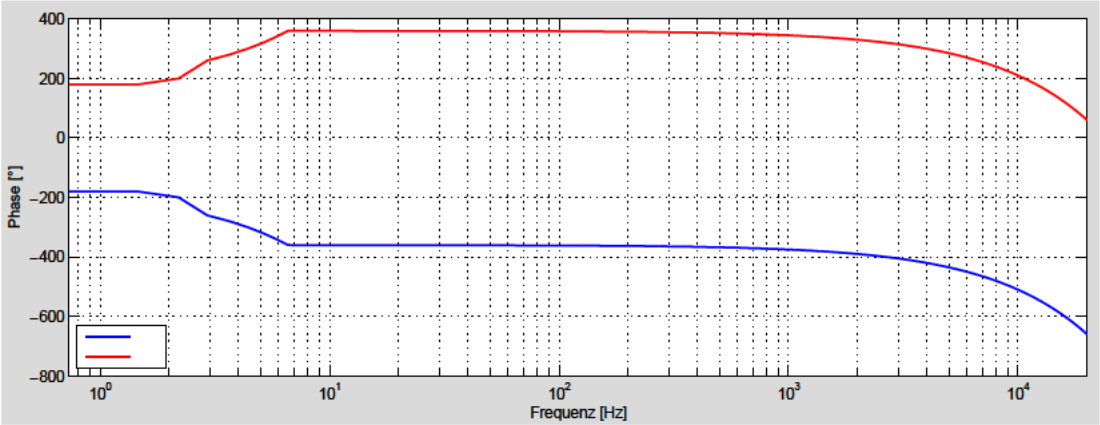

Abbildung 7: Veranschaulichung von Problematiken beim Entrollen der Phasengänge: die selben Phasengänge, wie in Abbildung 6 nach dem Entrollen

Wird in den Darstellungen lediglich der Bereich zwischen 20 Hz und 20 kHz betrachtet, führt dies zu Irritationen. Wird nicht jeder Rechenschritt einzeln betrachtet, kann es weiterhin zu Rechenfehlern kommen.
In der angefertigten Matlab-Auswertung wurde dieser Herausforderung mit dem Finden des ersten gemeinsamen Punktes zwischen allen zu mittelnden Phasenverläufen begegnet. Es wurden alle stochastischen Werte am Anfang gelöscht und das Entrollen wurde erst an einem Punkt begonnen, bei dem alle Phasengänge möglichst nahe beieinander lagen.

4.2.6 Berechnung des Endergebnisses

Nachdem während der Berechnung einige Einflüsse verringert werden konnten, wie es in den vorangehenden Abschnitten beschrieben wurde, bleiben nach der Berechnung für jeden einzelnen Winkel, der gemessen wurde,

- ein Phasenfrequenzgang und ein Amplitudenfrequenzgang für die Messung des Lautsprechers ohne eine Bildwand vor dem Lautsprecher und
- ein Phasenfrequenzgang und ein Amplitudenfrequenzgang für die Messung des Lautsprechers mit einer Bildwand vor dem Lautsprecher.

Zusammenfassend wurden je Situation (mit oder ohne Bildwand) ein Phasen- und ein Amplitudenfrequenzgang aus mehreren zusammengesetzten 'Transformationen' gewonnen, über welche ein Mittelwert gebildet wurde.
Um den Einfluss der Bildwand auf den Amplitudenfrequenzgang der Beschallung im Zuhörerbereich zu berechnen, wurde der logarithmierte Amplitudenfrequenzgang der Messung ohne Bildwand von dem logarithmierten Amplitudenfrequenzgang mit Bildwand abgezogen. Der gleiche Rechenweg wurde für den Einfluss der Bildwand auf den Phasenfrequenzgang durchlaufen.

4.2.7 Kurzbeschreibung der Matlab-Skripte

Im Folgenden sollen die geschriebenen Matlab-Skripte zum Verständnis schematisch beschrieben werden.

Sweeperstellung Die Funktion „Sweeperstellung“ dient dazu, den für die Messung gewünschten Sweep zu erstellen. Es ist möglich, die Länge des Sweeps in Samples vorzugeben, sowie auch die Auflösung, die Samplingfrequenz, die Startfrequenz, die Endfrequenz und eine Zeit für das Ansteigen und das Abfallen des Pegels von Null auf Eins beziehungsweise von Eins auf Null am Anfang und am Ende des Sweeps einzustellen.

Aufnahme In der Aufnahmefunktion werden ausschließlich aufgenommene Rohdaten gesammelt und abgespeichert. Hierzu müssen vor dem Ausführen einige Daten eingegeben werden um die Messungen den eigenen Wünschen entsprechend durchführen zu können. Weiterhin wird der verwendete Drehteller, der sich unter dem Lautsprecher befindet um die Veränderung des Winkels zwischen Lautsprecher und Bildwand zu realisieren, von der Funktion gesteuert, damit die Messung so gut wie möglich automatisiert werden kann. Nachdem eingestellt wurde, ob jede Messposition einzeln abgefragt werden soll um eine Datenerhebung auch ohne automatisierten Drehteller durchführen zu können, werden noch folgende Angaben benötigt:

- Anzahl der Messpositionen
- Anzahl der Messungen über die gemittelt werden soll
- Name der Audiodatei, welche zum Messen genutzt werden soll (hier ein mit Matlab generierter und als WAV-Datei abgespeicherter Sweep)
- späterer Dateiname, welcher mit dem Zusatz der Messpositionsnummer, der Messungsnummer (zum Mitteln) und der Bezeichnung „mit“ oder „ohne“ ergänzt wird
- ob mit oder ohne 'Hindernis' gemessen wird, um den Dateinamenszusatz zu kontrollieren
- bei welcher Startposition/ welchem Startwinkel begonnen beziehungsweise neu begonnen werden soll
- Winkelerhöhung zwischen den Messungen

Gespeichert werden in dieser Funktion lediglich Stereodateien, von denen Kanal 1 das gemessene Signal ist und Kanal 2 das Referenzsignal.

Auswertung Bei der Auswertung werden ebenfalls einige Einstellungen vor dem Ausführen der Funktion getroffen. Die maximale Phasendifferenz beschreibt hierbei die maximale Differenz der einzelnen gemessenen Phasengänge je Messpunkt. Weicht ein einzelner Messpunkt mehr als den angegebenen Wert vom Mittel aller Messpunkte ab, so werden die Werte des Vektors gelöscht. Dies hat zur Folge, dass die Einzelmessungen einen nahezu gemeinsamen Startpunkt haben, ab dem sie entrollt werden können um später gemittelt zu werden.
Weitere wichtige Werte sind:

- Der Messpunktbeginnindex, der beschreibt, ab welchem Messpunkt die Auswertung beginnen soll. Im Fall der durchgeführten Arbeit ist die Messung mit dem Index „1“ die Messung mit einem Drehwinkel von 0°.
- Die Auflösung, in der die Messung stattgefunden hat. (hier 24 Bit)
- Das DelayOffset, welches in Sampleanzahl angibt, wie weit vor dem eigentlichen Peak der Impulsantwort die Auswertung der Messung beginnen soll.
- Die Auflösungserhöhung, welche die Länge der FFTs beeinflusst. Für die oberste Oktave beträgt die FFT Länge $2^{7+Aufloesungserhoehung}$. Je Oktavenschritt nach unten wird der Exponent um eins erhöht. Die Notwendigkeit der künstlichen Auflösungserhöhung ergibt sich aus den unter 4.2.5 beschriebenen Unwrappingfehlern.
- Die Länge der Impulsantwort für die erste Oktave unter fs/2, welche über $2^{Impulsantwortgundlänge}$ berechnet wird. Je Oktavenschritt nach unten wird der Exponent ebenfalls um eins erhöht. Durch die gekürzte Impulsantwort werden viele Raumeinflüsse quasi abgeschnitten und der Direktschall bleibt zur Berechnung. Da mit einer sehr kurzen Impulsantwort keine reale Messung im Tieftonbereich ausgewertet werden kann, ist es notwendig für tiefere Frequenzen eine längere Impulsantwort zu benutzen, welche bei hohen Frequenzen schon zu viel Raumeinfluss beinhalten würde.
- Der Name der gespeicherten WAVs in Verbindung mit dem Name des Hindernisses vor dem Lautsprecher, der Anzahl der Mittelungen und der Anzahl der Messpunkte. Diese Daten werden schon während der Messung eingegeben und gespeichert und später nur über eine Nummernauswahl abgerufen.

Für die Berechnung werden die aufgenommenen Daten eingelesen und mit Hilfe zweier Unterfunktionen ausgewertet. Die Auswertung und ein Teil der auf dem Weg zum Ergebnis entstandenen Daten werden dann je Messpunkt einzeln abgespeichert. Das Abspeichern aller Daten ist möglich, führt allerdings dazu, dass die Daten eines Messpunktes mehr als ein Gigabyte Speicherplatz benötigen.

Darstellung Die abgespeicherten Daten werden mit Hilfe des per Nummernauswahl gegebenen Namens eingelesen und einzeln oder zusammengefasst dargestellt. Das Skript für die Darstellung ist nicht dafür gedacht komplett in einem Zug ausgeführt zu werden. Da es während der Untersuchung einige Spezialfälle gab, welche betrachtet werden mussten, beinhaltet das Skript mehr Darstellungen, als zwangsläufig notwendig.

4.2.8 Abänderung für andere Messsituationen

Für die Untersuchung des Abstandseinflusses konnte die Aufnahmefunktion weiter genutzt werden. Die Auswertungsfunktion wurde dahingehend angepasst, dass nur noch Werte für die Situationen „mit“ oder „ohne“ Bildwand einzeln ausgewertet werden und keine Differenzen mehr gebildet werden. Von einer Differenzenbildung zwischen diesen Werten wurde abgesehen, da sich im realen Raum durch die Positionsänderung zu viele Einflüsse verändern und der Einfluss nicht ohne Weiteres berechnet werden kann. Die Darstellung soll hier für die Auswertung genügen.

4.3 Messraum

Die Datenerhebung wurde in einem optimierten Screeningroom durchgeführt. Durch die Gegebenheit eines realen Raumes ergeben sich einerseits kleine Fehler in den Messungen, andererseits besteht die Möglichkeit während der Messungen auch andere im Kino störende Einflüsse zu erkennen. Der Raum hat die Grundabmaße von ca. 10,5 m x 9,6 m und hat eine leicht gekrümmte Decke, welche auf der einen Seite 5,9 m und auf der anderen Seite 4,5 m hoch ist. Laut den Messergebnissen der Firma NordAkustik, welche in Abbildung 8 dargestellt sind, hatte der Raum zum Zeitpunkt der raumakustischen Messung zwischen 500 Hz und 10 kHz eine gleichmäßige Nachhallzeit von ca. 0,45 s. Im tieffrequenteren Bereich steigt in den Messungen die Nachhallzeit auf bis zu 1 s an. Um diesen Anstieg zu beseitigen wurde der Raum mit Absorbern in den Ecken simuliert und so eine gleichmäßige Nachhallzeit von ca. 0,45 s bis 80 Hz realisiert. Die Kantenabsorber, welche hier in der Simulation hinzugefügt wurden, waren bei der Datenerhebung der vorliegenden Untersuchung bereits installiert.

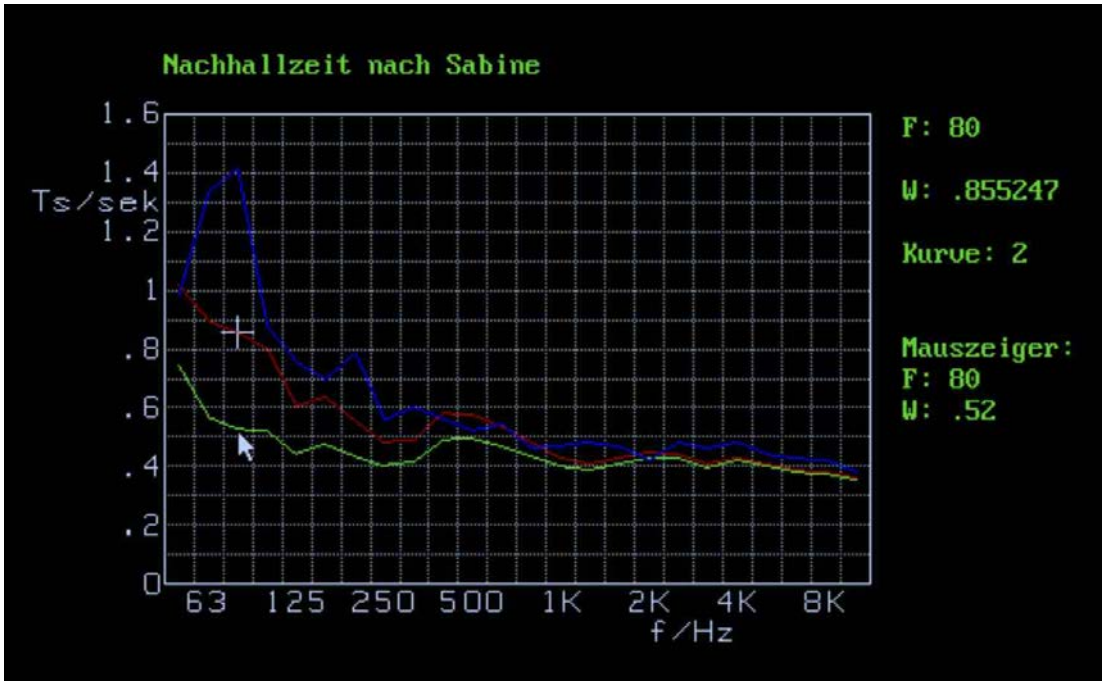

Abbildung 8: Raumstatistik des Messraums, Messungen im Messraum durchgeführt von der Firma NordAkustik (rot: Messung 19.6.2013 | grün: Simulation mit zus. Kantenabsorbern | blau Einzelmessung im Eingangsbereich)

Der Messraum ist mit einer vollständigen Kinobeschallung ausgerüstet. Hinter der Bildwand befinden sich somit links, rechts und zentriert nach dem ersten Drittel von der Unterkante der Projektionsfolie nach oben je eine Kombination aus Topteil und Low-Mid-Extension und im oberen Bereich je ein Topteil. Der LFE-Kanal (LFE = Low Frequency Effect) wird von zwei 18 Zoll Basslautsprechern wiedergegeben, welche zwischen linkem Kanal und Center und rechtem Kanal und Center auf dem Fußboden stehen. Die fünf Surroundkanäle sind ebenfalls in unteren und oberen Bereich aufgeteilt. Hinzu kommen drei Lautsprecher an der Decke in der Raummitte. Diese Lautsprecher sind extern verstärkt und waren während der Messungen an den abgeschaltenen Leistungsverstärkern angeschlossen.

4.4 Messaufbau

Zur Datenerhebung wurden im beschriebenen Screeningroom verschiedene Situationen gemessen. Um den Einfluss der Projektionsfolie bei variierender Drehung des Lautsprechers um seine Horizontalachse hinter der Bildwand zu untersuchen, wurde der Lautsprecher, der zur Untersuchung genutzt wurde quer auf den Drehteller gelegt und um das Zentrum des Hochtöners gedreht. Bei der Untersuchung mit Drehung um die Vertikalachse wurde der Lautsprecher um sein akustisches Zentrum gedreht. Die spätere Messung, um den Einfluss des Abstandes des Lautsprechers zur Bildwand zu untersuchen, wurde wieder

mit hochkant stehendem Lautsprecher durchgeführt.
Alle Messungen wurden auf dem rechten Basslautsprecher zwischen rechtem Kanal und Centerlautsprecher durchgeführt. Die Messung bei 0° beschreibt den Zustand, bei dem der Lautsprecher mit seiner Front parallel zur Bildwand steht. Das Messmikrofon ist in diesem Zustand auf einer Achse mit dem Lautsprecher. Die Winkeländerung beschreibt den Winkel, um den der Lautsprecher um seine eigene Achse von oben betrachtet im Uhrzeigersinn gedreht wird. Mikrofon und Lautsprecher hatten zur linken Raumwand bei Blick auf den Lautsprecher aus Sicht des Mikrofons einen Abstand von 6,83 m und zur linken einen Abstand von 3,64 m. Bei den Messungen mit stehendem Lautsprecher betrug die Höhe des akustischen Zentrums des Lautsprechers und die des Mikrofons 1,6 m und bei quer liegendem 1,47 m. Die Lautsprecherfront hatte zur Rückwand des Raumes (hinter der Bildwand) einen Abstand von 0,83 m und zur Bildwand einen Abstand von 0,7 m. Der Abstand zwischen Bildwand und Messmikrofon betrug 2,5 m. Abbildung 9 links und rechts zeigen einmal den Messaufbau mit Bildwand zwischen Lautsprecher und Messmikrofon und einmal ohne Bildwand zwischen Lautsprecher und Messmikrofon.

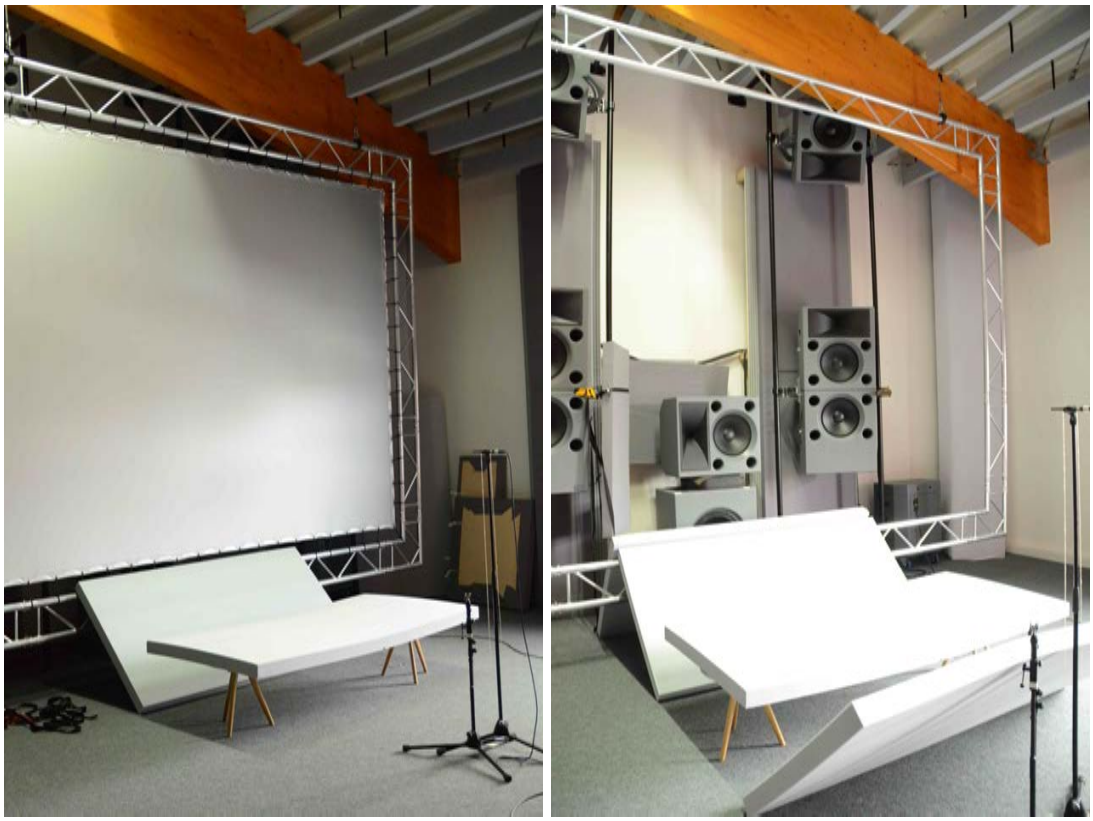

Abbildung 9: Messaufbau mit Bildwand (links) und ohne Bildwand (rechts)

Weiterhin sind in Abbildung 9 links und rechts jeweils mehrere Basotect-Platten zu sehen. Die Anordnung der 8 cm starken Platten mit den Abmaßen von 1 m x 2 m war während der Messungen so, wie es auf dem rechten Bild in Abbildung 9 zu sehen ist.

Das Absorptionsmaterial war nötig um ungewünschte Bodenreflexionen zu vermeiden. Die mittlere Platte befand sich auf einer Höhe von etwa 40 cm. Zusätzlich zu den Absorbern auf dem Boden wurden ebenfalls zwei weitere Absorber hinter und neben dem Testlautsprecher angebracht um starke, direkte Reflexionen zu vermeiden.
Es ist anzumerken, dass die Bilder nicht den exakten Messaufbau zeigen, da im linken Bild eine Basotect-Platte fehlt und im rechten Bild der Lautsprecher nicht auf seiner finalen Drehposition liegt. Die Positionierung wurde später auf den oben beschriebenen Punkt der Drehung um das akustische Zentrum des Hochtöners angepasst, um eine Entfernungsänderung zwischen Hochtöner und Bildwand während der Drehung zu vermeiden.
Der technische Aufbau der Messanordnung ist in Abbildung 10 zu sehen.

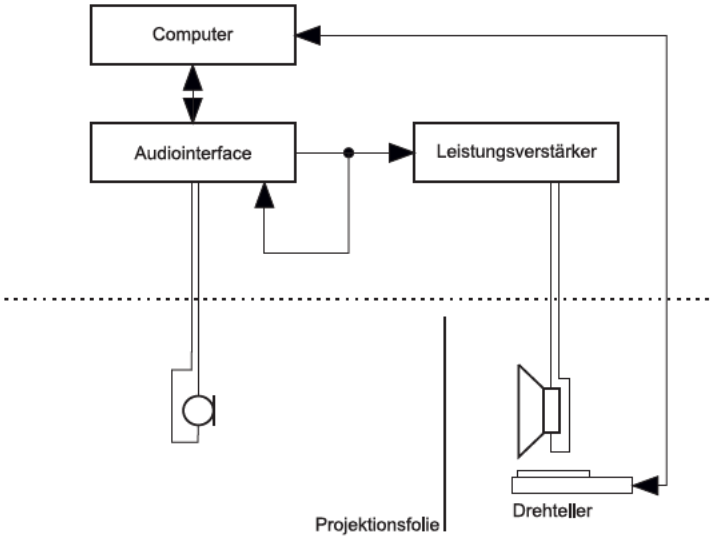

Abbildung 10: Skizzierter technischer Messaufbau

Für die Untersuchung des Einflusses des Abstands zwischen Lautsprecher und Bildwand wurde der Lautsprecher mit seiner Front parallel zur Bildwand in 90 cm Abstand aufgestellt. Hierfür wurde der Drehteller entfernt und der Testlautsprecher direkt auf den Basslautsprecher gestellt. Unter diesem wurde ein Rollbrett platziert, welches mit vier Bockrollen bestückt war, um ein Verschieben der Lautsprecher auf einer Achse zu ermöglichen, ohne den Winkel zur Bildwand zu verändern.

4.5 Verwendete Technik

Aufgrund dessen, dass das Hauptaugenmerk auf Vergleichswerten zwischen verschiedenen Messungen lag und somit der Referenzpunkt während der Messung mit der Messtechnik gesetzt wurde, war es nicht nötig Laborgeräte zu nutzen.

Zur Messung wurde ein MacBook Pro Retina (13“, Late 2013) mit dem Betriebssystem OS X Yosemite Version 10.10.13 genutzt. Die auf dem Gerät laufende Matlab-Version war R2013a (8.1.0.604). Als Audiointerface wurde ein Fireface 800 genutzt, welches mit einem FireWire 800-Kabel und einem FireWire 800-Thunderboldt-Adapter an den Rechner angeschlossen war. Als Messmikrofon wurde ein Beyerdynamic MM1 herangezogen. Um die Drehung des Lautsprechers zu automatisieren wurde der Drehteller (Outline ET250-3D) per LAN gesteuert. Der zur Messung genutzte Lautsprecher war ein Cine Sound Lab. CT15-300 mit einem Abstrahlwinkel von 120° x 60°, für den ein Cine Sound Lab. Control Electronics System mit integriertem CT15-300 Controller als Leistungsverstärker eingesetzt wurde. Die Trennfrequenz des Zwei-Wege Lautsprechers liegt bei 700 Hz.
Die Zielstellung der gesamten Untersuchung erlaubte es nur ein Bildwand-Material zu untersuchen. Um den Einfluss beispielhaft zu untersuchen und mit den Ergebnissen auf die gegebenen Herausforderungen bei der Kinobeschallung hinzuweisen, wurde für alle durchgeführten Messungen ein Harkness Spectral 240-3D Screen mit der Standard “Theatre Perforation” genutzt. Selbige Perforation, welche einen Flächenanteil von 4,5 % einnimmt, kommt ebenfalls bei den 2D Matt Screens zum Einsatz.

4.6 Vorgehen

Zur Einstellung der Eingangsempfindlichkeit des Audiointerfaces wurde zuerst eine Messung mit Bildwand durchgeführt um einen Lautstärkepegel zu finden, bei dem das Eigenrauschen des Messequipments als irrelevant für die nachfolgenden Untersuchungen angenommen werden kann. Danach wurde die Bildwand entfernt und die Eingangsempfindlichkeit so eingestellt, dass der Vorverstärker während der Messungen nicht übersteuert. Ohne Projektionsfolie zwischen Lautsprecher und Mikrofon herrscht bei ungeänderter Pegelung der Technik der höchste Schalldruckpegel am Mikrofon. Die eingestellten Lautstärkewerte wurden während der kompletten Messungen nicht wieder verändert. Von einer Pegelkalibrierung wurde im Zuge der angestrebten Messungen abgesehen, da nur Vergleichswerte zwischen einzelnen Messungen gesucht wurden.
Um beide nötigen Zustände für die Messung zu erzeugen, wurde nichts am Setup geändert, außer, dass die Projektionsfolie entweder hinzugefügt, oder entfernt wurde. Für den Fall, dass sich Dinge, wie etwa Absorberpositionen, geändert haben, wurde die Messung für beide Zustände wiederholt.
Um den Einfluss des Abstandes des Lautsprechers zur Bildwand zu untersuchen, wurde der Drehteller zum Schluss entfernt und unter dem Basslautsprecher ein Rollbrett mit vier Bockrollen hinzugefügt. Es wurde dann mit dem angepassten Skript je Abstand eine Reihe von acht Sweeps aufgenommen. Die Pegel wurden hierfür nicht verändert.

5 Messergebnisse

Folgend sollen die Ergebnisse der Messungen grafisch präsentiert werden. Da einzelne Tabellen der jeweiligen Messungen unübersichtlich würden und teilweise ebenfalls die Darstellung einzelner Messkurven in Bezug auf das Ergebnis keinen Mehrwert erzeugen würde, werden viele Ergebnisse in der Darstellung zusammengefasst.
Bei Bedarf können jedoch jegliche Rohmessdaten, die genutzte Auswertung sowie auch diverse zusätzliche Darstellungen auf dem beiliegenden Datenträger eingesehen werden. Einige zusätzlich erzeugte Darstellungen zum Betrachten der einzelnen Messungen hintereinander sind in der Matlab-Funktion „plots“ enthalten.
Die Bezeichnung Amplitudendifferenz stellt - entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 4 - in den Abbildungen den Einfluss dar, den die Bildwand auf den vom Lautsprecher wiedergegebenen Schalldruckpegel hat, wenn sie zwischen Lautsprecher und Zuhörer gespannt wird. Die Phasendifferenz bezeichnet den Einfluss, den die Bildwand auf den Phasengang des Signals im Zuhörerbereich hat.

5.1 Einstellungen

Bis auf die Messungen zur Verifizierung des Messsystems, wurden alle durchgeführten Messungen über acht Sweeps mit einer Länge von 2^{16} Samples gemittelt. Im Zuge der Systemverifizierung wurden Messungen mit einer Mittelung über fünf Sweeps durchgeführt. Um eine hohe Auflösung zu gewährleisten und trotzdem eine kurze Impulsantwort zu nutzen, wurde diese auf eine Länge von 2^n Samples gekürzt und im Bereich der letzten 8 Samples mit der Form eines invertierten Sinus von 0 bis $\pi/2$ ausgeblendet. Der Rest der Impulsantwort wurde weiterführend mit Nullen aufgefüllt. In der Auswertung wurden die Impulsantworten sechs Samples vor dem Maximum des Absolutwertes der Impulsantwort abgeschnitten. Die Auflösungserhöhung führte mit einem Wert von „7“ dazu, dass für die erste Oktave unter fs/2 eine FFT mit einer Länge von 2^{13} Samples genutzt wurde. Die Impulsantwortgrundlänge lag für alle hier erwähnten Messungen bei 2^4 Samples. Die angesprochene maximale Phasendifferenz wurde auf 0,4° eingestellt. Entsprechend wurden alle Werte im niederfrequenten Bereich, die vom Mittelwert der Messung um mehr als 0,4° abwichen, gelöscht. Sobald ein 'gemeinsamer' Punkt aller Messungen, über die gemittelt werden sollte, gefunden wurde, wurde ab diesem Punkt das Entrollen gestartet.

5.2 Verifizierung des Messsystems

Die folgenden Abbildungen zeigen Messungen, für deren Differenzenbildung das Messsetup konstant blieb. Somit stellen sie die Streuung der Messungen dar. Abbildung 11 und 12 zeigen hierbei eine Messsituation, in der kein externer Prüfling vorhanden war. Das Messsignal wurde direkt in die Eingangskanäle des Audiointerfaces geleitet. Somit

stellen die Ergebnisse die Streuung des Audiointerfaces dar. Es wurden fünf Messungen durchgeführt, die jeweils über fünf Durchgänge gemittelt wurden.

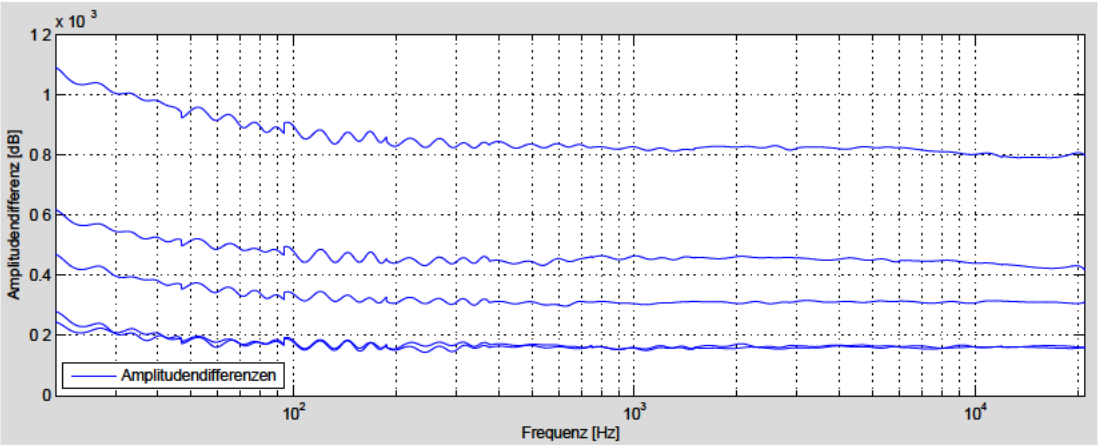

Abbildung 11: Amplitudendifferenzen zur Messsystemverifizierung 1: für die fünf einzelnen Differenzenbildungen wurde keine Änderung vorgenommen, Messkanal und Referenzkanal wurden hier am Audiointerface per Y-Adapter mit dem selben Signal versorgt

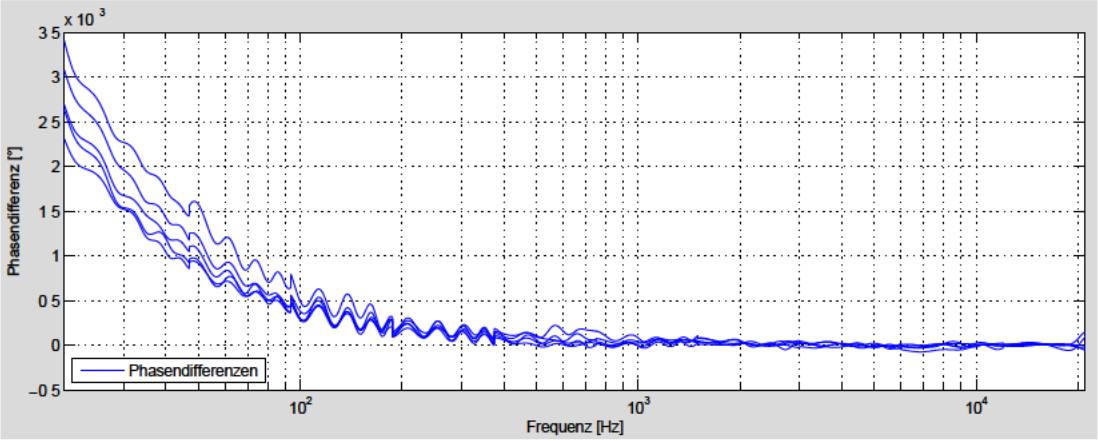

Abbildung 12: Phasendifferenzen zur Messsystemverifizierung 1: für die fünf einzelnen Differenzenbildungen wurde keine Änderung vorgenommen, Messkanal und Referenzkanal wurden hier am Audiointerface per Y-Adapter mit dem selben Signal versorgt

Entgegen der in Abbildung 11 und 12 dargestellten Messsituation ist in Abbildung 13 und 14 eine Referenzsituation dargestellt, bei der der Messraum mit einbezogen war. Es wurde für beide Messungen, aus denen später die Differenz gebildet wird, weiterhin nichts geändert. Gemessen wurde 20 mal die gleiche Situation, wobei für jede Situation über sechs Messungen gemittelt wurde.

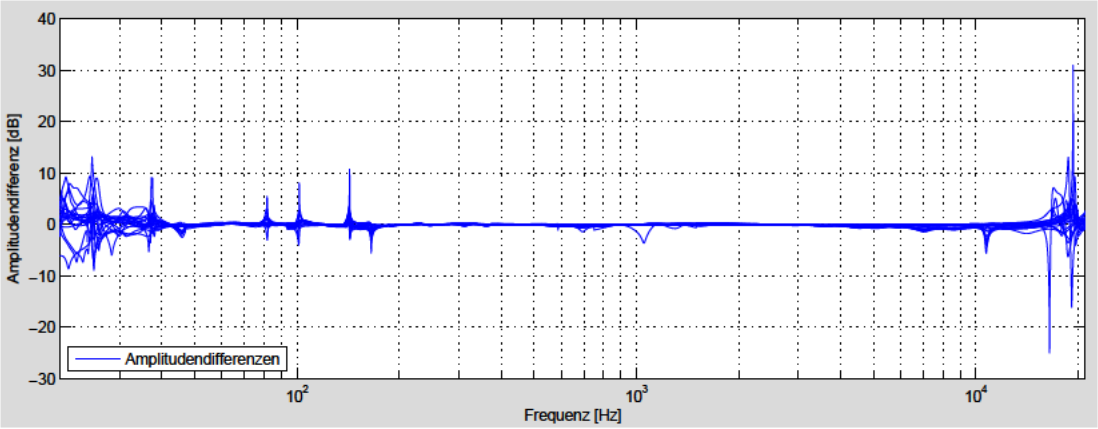

Abbildung 13: Amplitudendifferenzen zur Messsystemverifizierung 2: für die 20 einzelnen Differenzenbildungen wurde keine Änderung vorgenommen, zur Auswertung wurde zweimal die gleiche Situation im späteren Messraum gemessen

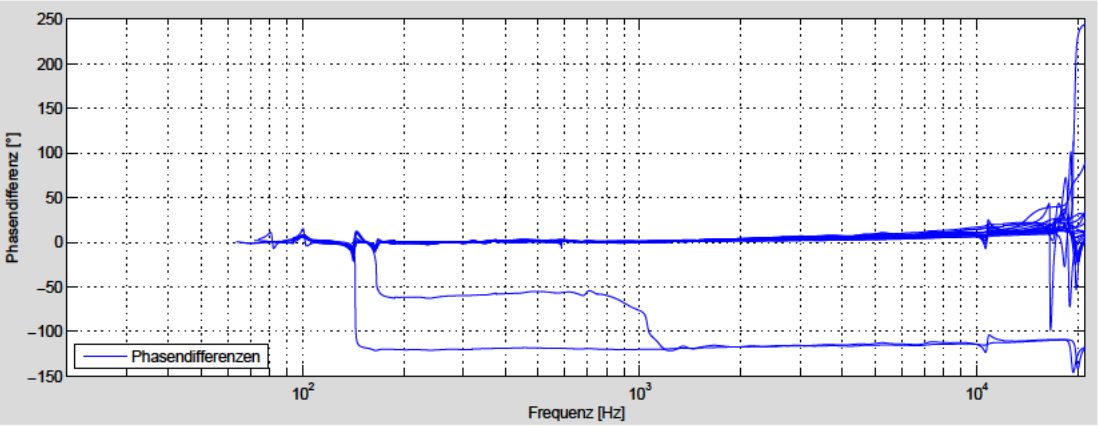

Abbildung 14: Phasendifferenzen zur Messsystemverifizierung 2: für die 20 gleichen Differenzenbildungen wurde keine Änderung vorgenommen, zur Auswertung wurde zweimal die gleiche Situation im späteren Messraum gemessen

Abbildung 15 und 16 zeigen ein Messergebnis, dessen Messung durchgeführt wurde, nachdem die in Abbildung 9 (rechts) hinter und links neben dem Lautsprecher zu sehenden Absorber hinzugefügt wurden. Wie auch auf dem Weg zu den Ergebnissen der Abbildungen 11 bis 14 blieb das Messsetup unverändert.

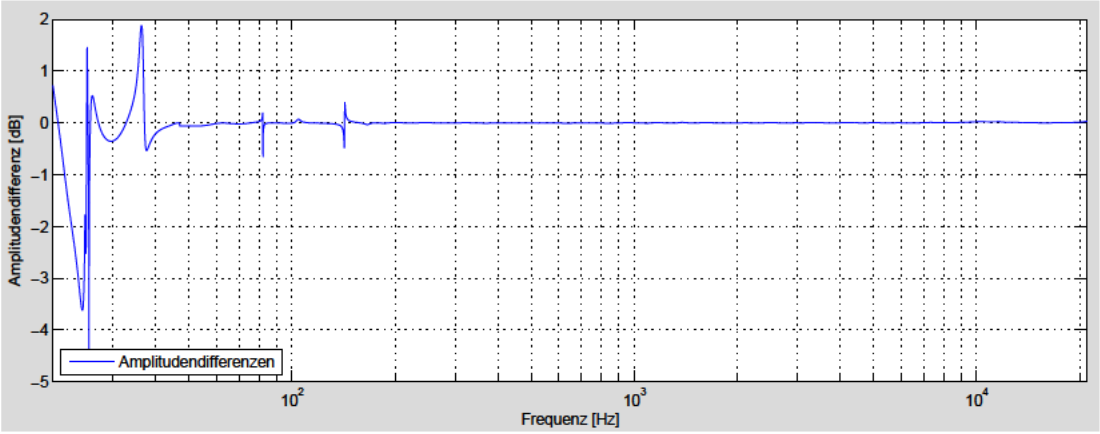

Abbildung 15: Amplitudendifferenzen zur Messsystemverifizierung 3: für die einzelne Differenzenbildung wurde keine Änderung vorgenommen, zur Auswertung wurde zweimal die gleiche Situation im späteren Messraum gemessen

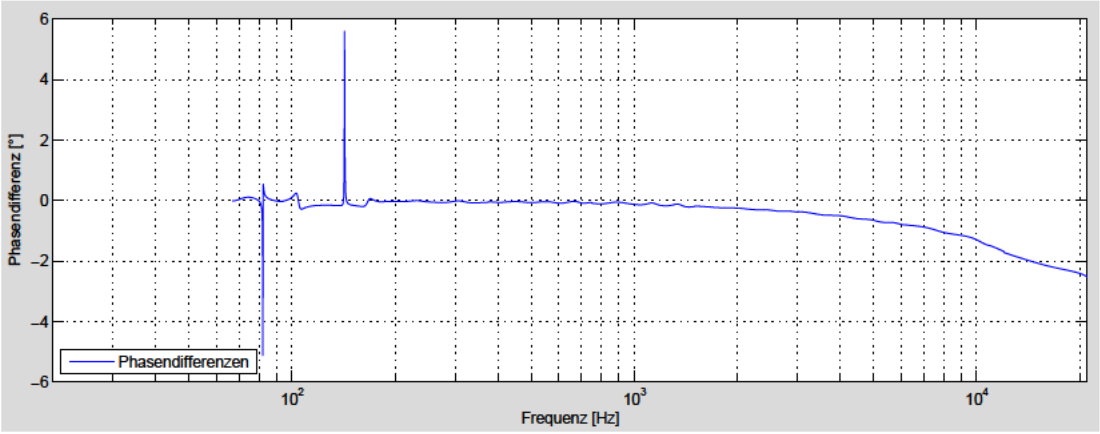

Abbildung 16: Phasendifferenzen zur Messsystemverifizierung 3: für die einzelne Differenzenbildung wurde keine Änderung vorgenommen, zur Auswertung wurde zweimal die gleiche Situation im späteren Messraum gemessen

5.3 Messung des Einflusses bei Drehung um vertikale Achse

Um mit Bezug auf die realen Messungen das Vorgehen aufzuzeigen, folgen die ersten vier Abbildungen, welche bei paralleler Lautsprecherfront zur Projektionsfolie - also bei 0° Drehung - aufgenommen wurden. Abbildung 17 zeigt im oberen Bild die errechneten Phasenfrequenzgänge für die beiden Messsituationen, die verglichen werden sollen (mit Bildwand vor dem Lautsprecher und ohne Bildwand vor dem Lautsprecher). Das zweite Bild von oben zeigt die Differenz der beiden Messungen (Messung mit Bildwand minus Messung ohne Bildwand), welche dem Einfluss der Bildwand auf den Phasenfrequenzgang entspricht.

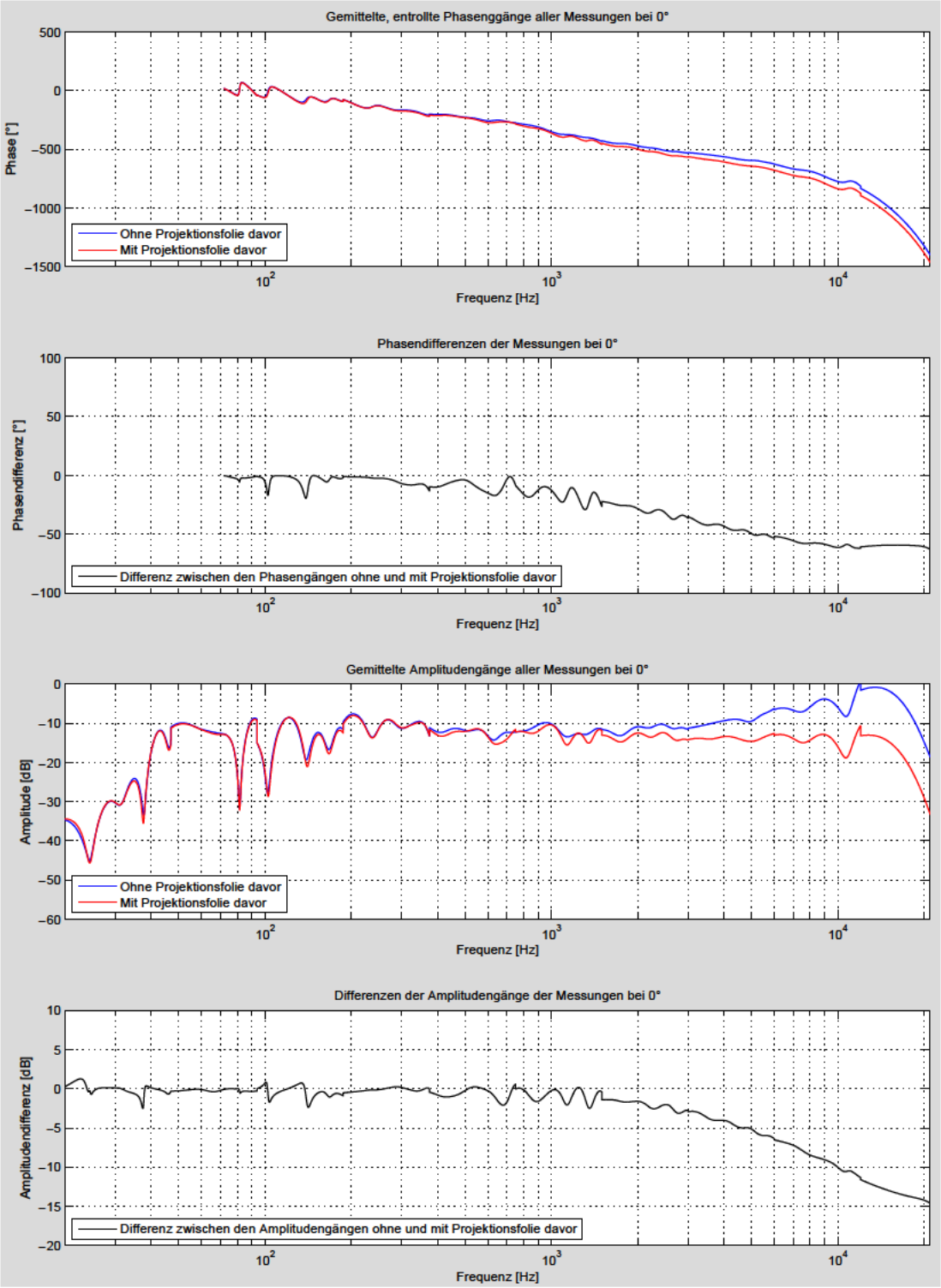

Abbildung 17: Darstellung des Vorgehens

Die dritte Kurve von oben in Abbildung 17 zeigt ähnlich der obersten die beiden Messsituationen, allerdings hier die Amplitudenfrequenzgänge. Der Graph ganz unten

zeigt die Differenz der Amplitudenfrequenzgänge. Die Amplitudenfrequenzgänge der dritten Kurve von oben aus Abbildung 17 sind in Abbildung 18 geglättet dargestellt. Die Differenz aus den beiden geglätteten Kurven wiederum ist in Abbildung 19 zu sehen.

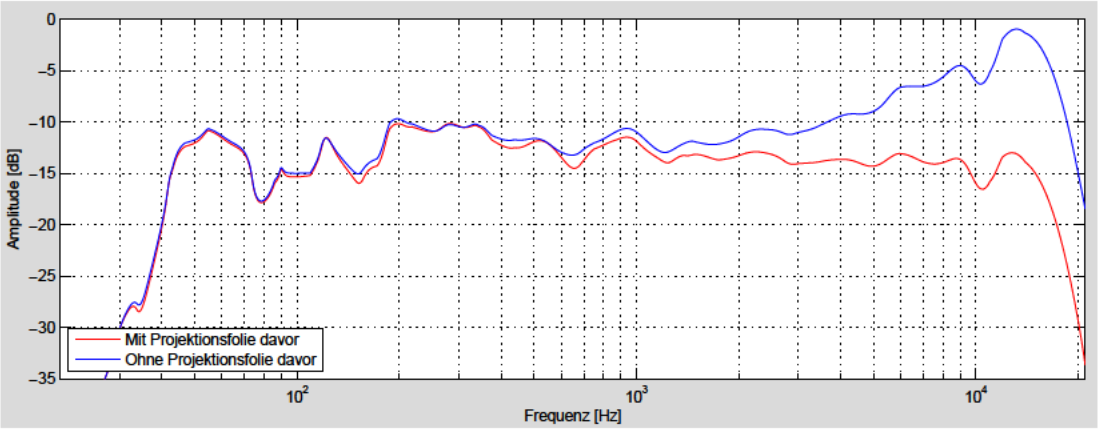

Abbildung 18: Geglättete Amplitudenfrequenzgänge bei 0 Grad mit und ohne Projektionsfolie vor dem Lautsprecher, geglättet über 1/3 Oktave

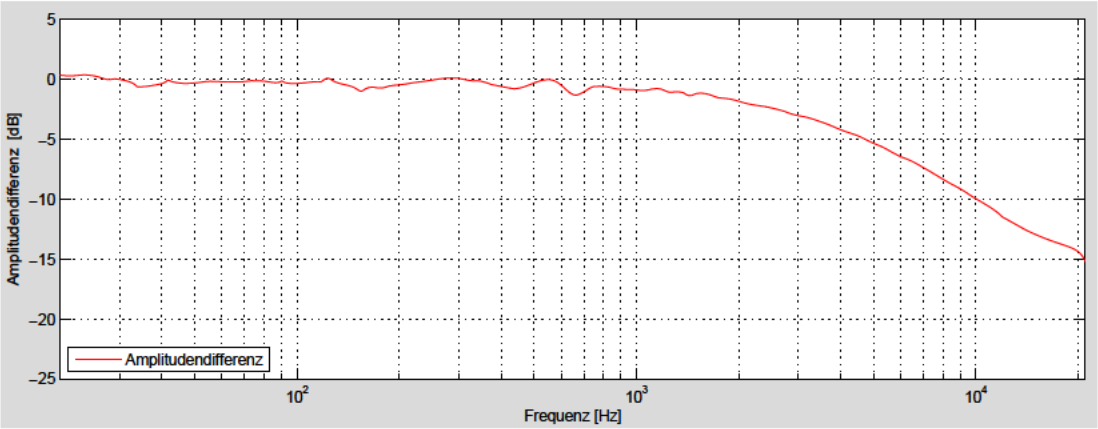

Abbildung 19: Amplitudendifferenz aus geglätteten Amplitudenfrequenzgängen bei 0 Grad zwischen der über 1/3 Oktave glätteten Messung mit Projektionsfolie und der über 1/3 Oktave glättete Messung ohne Projektionsfolie

Zur späteren Erläuterung der gemessenen Kurven wurden die in Abbildung 18 dargestellten Kurven noch einmal mit der in Abbildung 19 dargestellten Kurve gefiltert und werden mit selbiger zusammen in Abbildung 20 gezeigt.

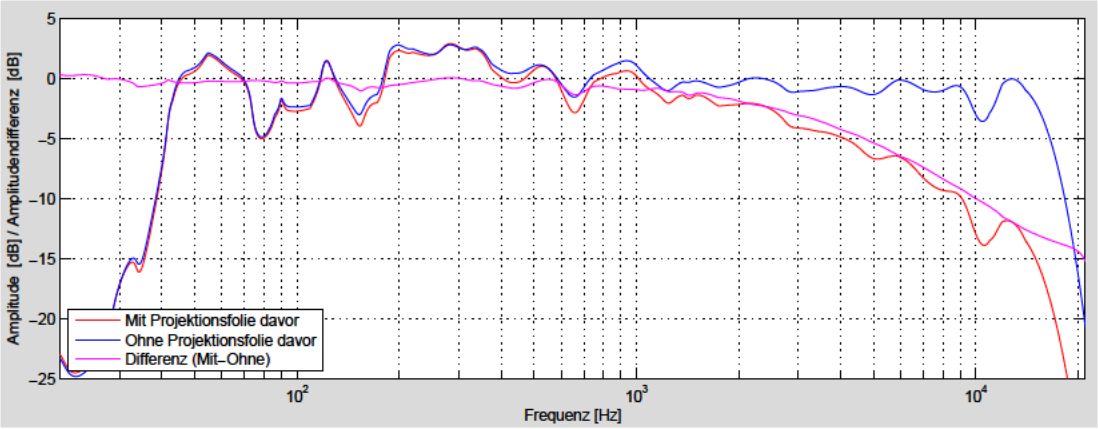

Abbildung 20: Amplitudenfrequenzgänge der Messung gefiltert zuzüglich der Filterkurve: Die magentafarbene Kurve ist gleich der Kurve in der vorherigen Abbildung und wurde hier jeweils für die bereits über 1/3 Oktave geglätteten Messkurven mit und ohne Bildwand vor dem Lautsprecher als Filter genutzt. Betrachtet wird weiterhin die Messung bei 0 Grad.

Die Abbildungen 21 und 22 zeigen die Messergebnisse, der Messungen, bei denen sich der Lautsprecher hinter der Bildwand um seine vertikale Achse drehte.

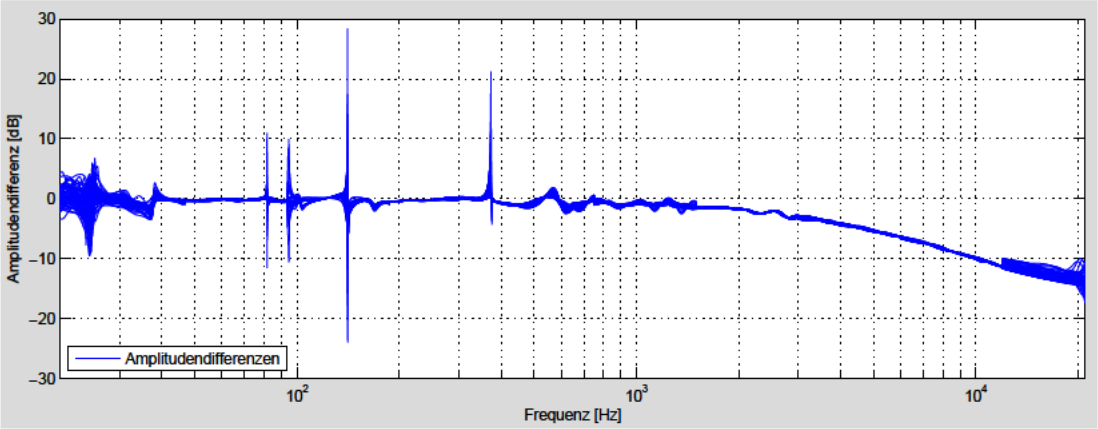

Abbildung 21: Amplitudendifferenzen bei Drehung um vertikale Achse: Differenzen zwischen den Messungen mit Projektionsfolie vor dem Lautsprecher und ohne Projektionsfolie vor dem Lautsprecher je Messwinkel, in 1 Grad Schritten von 0 bis 59 Grad

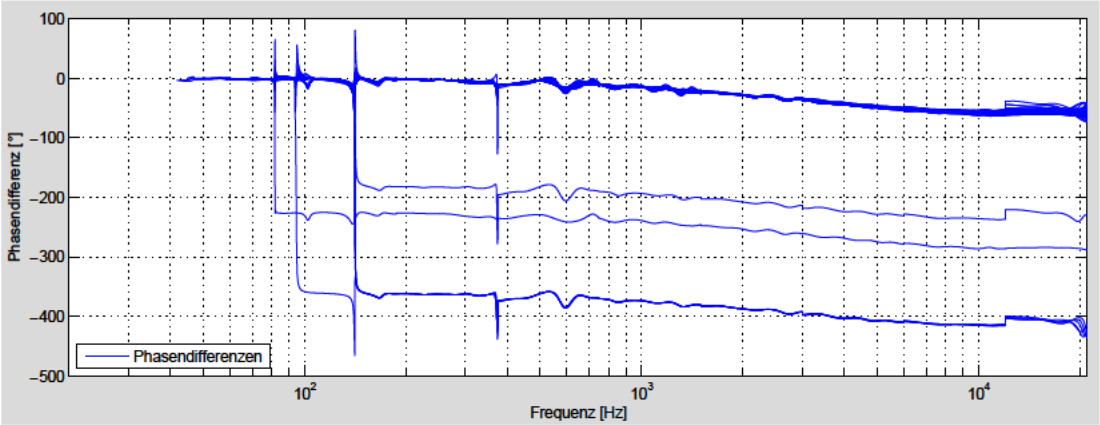

Abbildung 22: Phasendifferenzen bei Drehung um vertikale Achse: Differenzen zwischen den Messungen mit Projektionsfolie vor dem Lautsprecher und ohne Projektionsfolie vor dem Lautsprecher je Messwinkel, in 1 Grad Schritten von 0 bis 59 Grad

5.4 Messung des Einflusses bei Drehung um horizontale Achse

Die Abbildungen 23 und 24 zeigen die Messergebnisse, der Messungen, bei denen sich der Lautsprecher hinter der Bildwand um seine horizontale Achse drehte. Hierzu wurde der Lautsprecher, wie bereits erwähnt, seitlich auf den Drehteller gelegt und um das akustische Zentrum des Hochtöners gedreht.

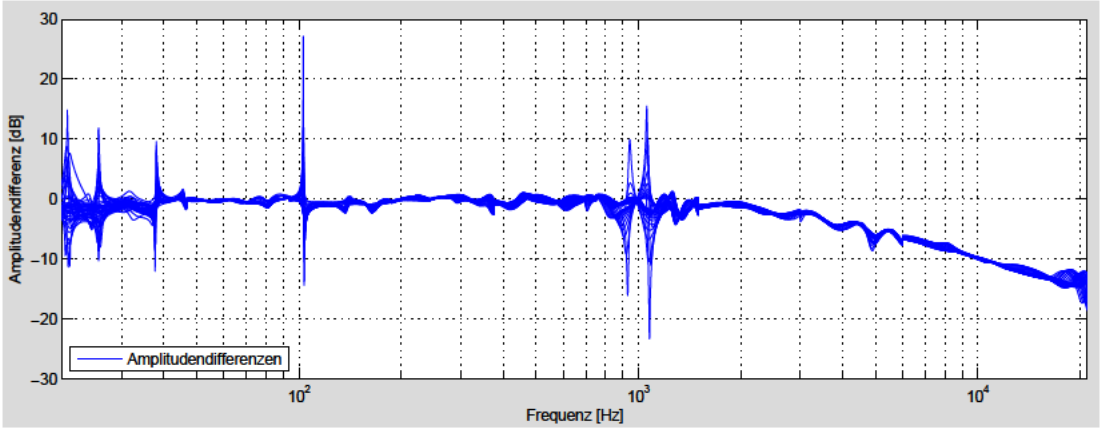

Abbildung 23: Amplitudendifferenzen bei Drehung um horizontale Achse: Differenzen zwischen den Messungen mit Projektionsfolie vor dem Lautsprecher und ohne Projektionsfolie vor dem Lautsprecher je Messwinkel, in 1 Grad Schritten von 0 bis 40 Grad

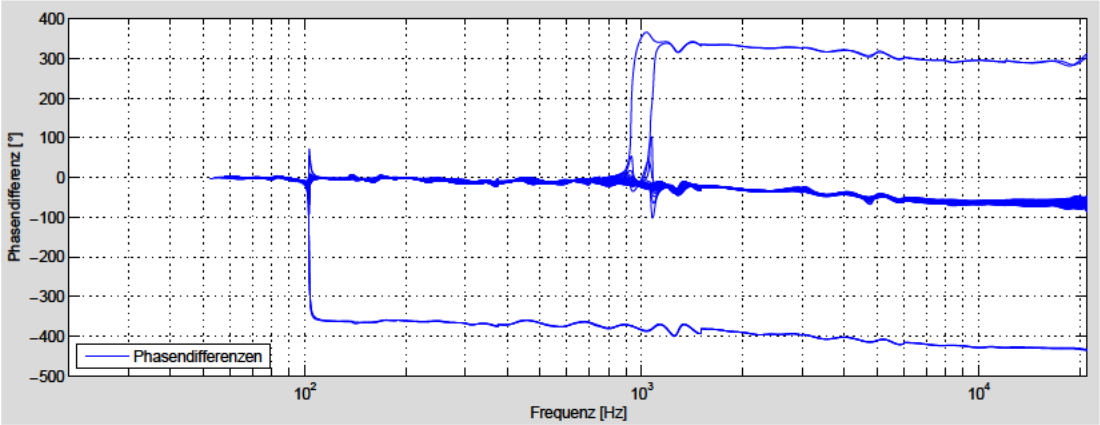

Abbildung 24: Phasendifferenzen bei Drehung um horizontale Achse: Differenzen zwischen den Messungen mit Projektionsfolie vor dem Lautsprecher und ohne Projektionsfolie vor dem Lautsprecher je Messwinkel, in 1 Grad Schritten von 0 bis 40 Grad

5.5 Messung des Abstandseinflusses

Die Abbildungen 25 und 26 zeigen die Messergebnisse bei Lautsprecher-Bildwand Abständen zwischen 90 cm und 0 cm. Abbildung 26 zeigt dabei drei ausgewählte Abstände, welche ebenfalls in Abbildung 25 enthalten sind.

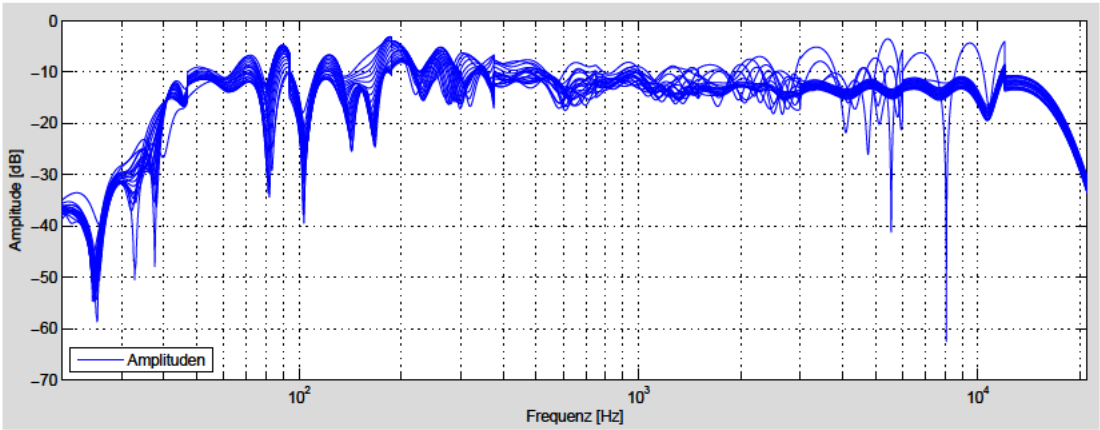

Abbildung 25: gemessene Amplituden bei verschiedenen Lautsprecher-Bildwand Abständen: Alle gemessenen Amplituden bei Lautsprecher-Bildwand Abständen zwischen 90 und 0 cm.

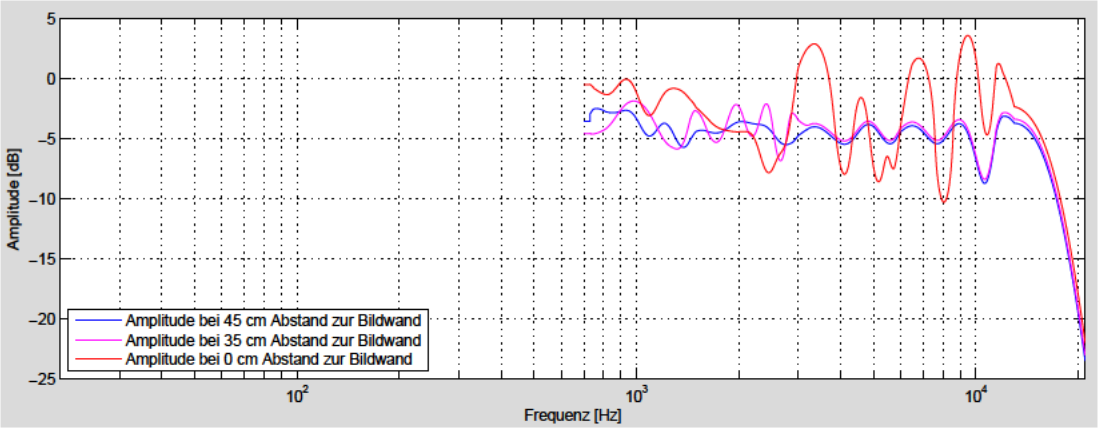

Abbildung 26: Gemessene Amplituden bei drei ausgewählten Lautsprecher-Bildwand Abständen

6 Diskussion

Die Ergebnisse der Messungen und andere in der bisherigen Arbeit angesprochene Themen werden in den folgenden Abschnitten ausgewertet. Hierzu wird mit der Verifizierung des Messsystems begonnen.

6.1 Verifizierung des Messsystems

Nachdem die Ergebnisse aus den Abbildungen 11 und 12 zeigen, dass in Bezug auf die Messhardware und auf die Messsoftware nicht mit einem Fehler gerechnet werden muss, der größer als $\pm 0,0012\,dB$ beziehungsweise $\pm 0,0035\,^{\circ}$ ist, wurde das Messsystem als tauglich eingestuft. Auch wenn der Fehler sich verdoppeln oder verdreifachen würde, wären die Messungen in Bezug auf den gesuchten, zu messenden Einfluss nicht nennenswert verfälscht.
Die in Abbildung 13 dargestellten Amplitudendifferenzen zeigen, dass die Streuung der Messungen in einem realen Messraum sehr hoch sind. Die schmalbandigen Überhöhungen und Einbrüche sind hierbei auf Reflexionen im Raum zurückzuführen. Während im Hochtonbereich davon ausgegangen werden kann, dass die Messungen durch Reflexionen verfälscht wurden, liegt der Grund für die hohe Streuung im Tieftonbereich im niedrigen Signal-Rausch-Abstand. Es ist zu erkennen, dass in den Bereichen, in denen keine oder nur wenige äußere Einflüsse auf die Messung einwirken, keine besonders hohe Streuung in den Ergebnissen liegt. Die zugehörigen Phasendifferenzen in Abbildung 14 zeigen mit näherer Erklärung das gleiche Ergebnis. Im Tieftonbereich wurden die Messwerte aufgrund hoher Streuungen vom Rechenalgorithmus entfernt. Es ist zu erkennen, dass bei den gleichen Frequenzen, bei denen auch in den Amplitudendifferenzen Fehler entstehen, in den sonst linearen Phasendifferenzen Fehler auftreten. Besonders im Hochtonbereich ist zu erkennen, dass über 15 kHz keine kohärenten Messungen durchgeführt werden konnten.
In Abbildung 14 sind weiterhin die unter Abschnitt 4.2.5 angesprochenen Fehler zu erkennen. Zwei der 20 Messungen weisen hier einen Phasenberechnungsfehler auf. Auch nach diversen Anpassungen der Auswertungsparameter ließen sich derartige Fehler nicht vermeiden.
Nachdem weiteres Absorptionsmaterial in den Raum um den Lautsprecher, der zum Messen genutzt wurde, eingebracht worden ist, wurden weitere, gleichartige Messungen durchgeführt um den Nutzen des Absorptionsmaterials für die Messung zu zeigen. Die Abbildungen 15 und 16 zeigen erhebliche Verbesserungen gegenüber den vorangegangenen Darstellungen. Selbst mit dem Aufzeigen von nur dieser einen Messung, kann aufgrund der prozentual geringen Einflüsse davon ausgegangen werden, dass der spätere gesuchte Effekt der Bildwand je nach seiner Intensität gut quantifiziert werden kann.
Nach der Verifizierung können schmalbandige Einbrüche, schmalbandige Überhöhungen

oder auch schmalbandige Phasenfehler als 'Messfehler' beschrieben werden. Die Reflexionen werden zwar teilweise sogar von der Bildwand erzeugt, stellen aber keinesfalls das direkte Verhalten des Materials dar, sondern weisen schon nach der Verifizierung des Messsetups auf die in Abschnitt 6.5 erläuterten Herausforderungen hin.

6.2 Einstellungsmöglichkeiten

In Abschnitt 5.1 werden die für die Auswertung der Messungen genutzten Einstellungen dargelegt. Besonders die Einstellung der je Oktave genutzten Impulsantwortlänge und der je Oktave genutzten FFT Länge haben einen sehr großen Einfluss auf das Messergebnis. Mit einer längeren Impulsantwort für die Auswertung sind entsprechend mehr Einflüsse zu erkennen, die allerdings nicht direkt mit der Aufprojektionsfolie in Verbindung stehen müssen. In der Matlab-Routine ist standardmäßig immer eine künstliche Auflösungserhöhung vorhanden, allerdings müssen dafür auch die beiden Parameter der Impulsantwortgrundlänge und der FFT Länge zusammenpassen.
Nachdem der relativ gleichmäßige, direkte Einfluss der Bildwand in Bezug auf die Durchschallung zu erkennen war, wurden die Parameter zur Auswertung so angepasst, dass eine möglichst 'fehlerfreie' Darstellung des Einflusses möglich war.
Auch wenn die Messkurven mit anderen Einstellungen detailreicher werden, bleibt das Ergebnis das gleiche. Lediglich durch die Bildwand zusätzlich entstehende Reflexionen können bei längerer, genutzter Impulsantwort besser erkannt werden.

6.3 Direkter Einfluss der Aufprojektionsbildwand

Die Abbildung 19 zeigt allgemein den Einfluss der Bildwand in der gegebenen Situation, stellvertretend für die Detaildarstellungen in Abbildung 21 und 23. Unabhängig vom Winkel zwischen Lautsprecher und Bildwand bleibt der Einfluss auf den Direktschall gleich. Die Ergebnisse decken sich weiterhin mit denen, welche Long et al. (2012) im zweiten Teil ihrer Arbeit in einer Messsituation mit planaren Wellen erlangten. Auch die Aussagen der SMPTE (2010) bezüglich der zu erwartenden Dämpfung werden somit bestätigt.
Nach der Betrachtung der Ergebnisse in den Abbildungen 22 und 24 können die Ergebnisse von Long et al. (2012) in Bezug auf das Phasenverhalten der Bildwand ebenfalls bestätigt werden. Mit der Darstellung von jeweils 60 und 41 Messergebnissen übereinander ist gut zu erkennen, dass sich das Verhalten bei einer Winkeländerung zwischen Lautsprecher und Bildwand nicht ändert. Der Einfluss der Bildwand auf den Phasengang des Signals ist im Vergleich zum Einfluss auf den Amplitudengang nicht erwähnenswert.
Mit einem anderen Bildwandmaterial ist natürlich ebenfalls ein anderer Einfluss auf die Frequenzgänge zu erwarten.
Aufgrund der Aussage der SMPTE (2010) in Bezug auf die Positionierung des Laut-

sprechers hinter der Bildwand wurde in der vorliegenden Arbeit ebenfalls der Einfluss des Abstandes zwischen Lautsprecher und Bildwand auf das Abstrahlverhalten des Lautsprechers untersucht. Laut SMPTE (2010) muss der Lautsprecher für die Messung 'nahe genug' an der Bildwand stehen um Reflexionen zwischen Bildwand und Lautsprecher zu vermeiden. Im Klartext heißt dies, dass der Lautsprecher mit dem geringst möglichen Abstand zur Bildwand montiert werden soll. Abbildung 26 zeigt die Messergebnisse von drei verschiedenen Abstandssituationen. Es ist gut zu erkennen, dass der Hochtonbereich durch einen zu geringen Abstand extrem negativ beeinflusst wird. Aus den Ergebnissen von Abbildung 25 kann geschlossen werden, dass ab einem bestimmten Abstand eine Abstandsvergrößerung keine Verbesserung mehr erwirkt. Die rote Kurve aus Abbildung 26 zeigt einen Amplitudenfrequenzgang der aufgrund der Ursache der Verzerrung nicht wieder entzerrt werden kann. Allerdings kann ohne Abstand zur Bildwand auch keine Reflexion in den Raum hinter der Projektionsfolie gelangen und der Gesamtenergiegehalt im Hochtonbereich ist im Zuhörerbereich höher als mit einem Abstand zwischen Lautsprecher und Bildwand.

6.4 Folgen des Einflusses

Folgt man den aktuellen Regeln, kommt der Einfluss des Abstandes zwischen Lautspecher und Bildwand zum Tragen. Der Frequenzgang des Direktschalls ist dann zwar zerklüftet, hat aber im Mittel noch einen relativ hohen Energiegehalt im Hochtonbereich. Jede Messung, die nicht auf intensiver räumlicher und zeitlicher Mittelung basiert, sollte diesen Effekt zeigen können.
Mit ein wenig Abstand von den angesprochenen, aktuellen Normen ist es möglich den Lautsprecher nicht direkt an der Bildwand zu positionieren, sondern etwas weiter dahinter. Folglich wird es Reflexionen zwischen Lautsprecher und Bildwand geben, welche ab einem gewissen Abstand auch hörbar werden. Weiterhin wird Schall in den Raum hinter der Bildwand reflektiert, der hier unbedingt absorbiert werden muss, da er sonst mit relativ großer Verzögerung (Reflexion an der Saalwand hinter der Bildwand) wieder durch die Bildwand tritt. Flatterechos zwischen Bildwand und Lautsprecher sind in der Regel nicht zu befürchten, da die Lautsprecher hinter der Bildwand wegen der nötigen akustischen Abdeckung des Zuhörerbereiches meistens in irgendeiner Form gewinkelt sein werden und somit keine parallelen Flächen vorhanden sind. Dem Thema der Absorption hinter der Bildwand kann mit einer 'schalltoten' Wand begegnet werden, welche allein aus raumakustischen Gründen in jedem Kino vorhanden sein sollte.
Ein Einfluss der nicht zu unterschätzen ist, ist die gemessene Dämpfung der hohen Frequenzen durch die Bildwand, welche nicht nur in der Arbeit von Long et al. (2012) ergründet wurde, sondern auch in der vorliegenden Arbeit. Die Dämpfung welche bei 20 kHz etwa 15 dB erreicht, ist in Abbildung 19 dargestellt. Aufgrund der Gleichmäßigkeit des Einflusses, kann dieser mit einem Filter beseitigt werden. Die so entstehende Entzerrung hat

allerdings zur Folge, dass der Hochtontreiber mit der rund 31,5-fachen Leistung betrieben werden muss ($L_P = 10 \cdot log_{10}(P/1\,W) \rightarrow P = 10^{L_P/10} \cdot 1\,W \rightarrow 10^{15\,dB/10} \cdot 1\,W \approx 31,5\,W$). Ist ein Lautsprecher nicht dafür ausgelegt derartige Leistungen in Schall zu wandeln, kann es zu extremen Verzerrungen bis zur Zerstörung des Lautsprechers kommen. Die angesprochene Entzerrung ist somit nicht vom Field-Service-Engineer zu verantworten, sondern ist ein Eingriff in die Funktion des Lautsprechers. Somit hat der Hersteller der Lautsprecher dafür Sorge zu tragen, dass derartige Leistungen verzerrungsfrei wiedergegeben werden können.

6.5 Reflexionen hinter der Bildwand

Wie schon in Abschnitt 6.4 angedeutet, hat die Projektionsfolie zwangsläufig zur Folge, dass ein nicht zu unterschätzender Anteil der Schallenergie in den Raum hinter der Bildwand zurückreflektiert wird. Long et al. (2012) schreiben, dass es möglich sei, den Lautsprecher so zu positionieren, dass sie nicht zwischen Lautsprecher und Bildwand hin und her reflektiert wird, sondern in den rückwärtigen Raum. Weiterhin sei es allerdings möglich, dass die Schallenergie von dort aus wieder durch die Bildwand in den Zuhörerbereich gelangen kann. Die Arbeit von Long et al. (2012) zeigt ebenfalls, dass die Energie, die im Zuhörerbereich nicht ankommt, nach hinten in den rückwärtigen Raum reflektiert wird. Wie ebenfalls in Abschnitt 6.4 angedeutet, ist es sehr unwahrscheinlich, dass ein Flatterecho zwischen Lautsprecher und Bildwand entsteht. Einerseits wäre dies im tieffrequenteren Arbeitsbereich des Lautsprechers aufgrund seiner Abmessungen nicht möglich und andererseits sind die Lautsprecher in der Regel aufgrund der nötigen Abdeckung des Zuhörerfeldes nicht parallel mit ihrer Front zur Bildwand, sondern gewinkelt. Folglich wird der Schall relativ schnell in den rückwärtigen Raum reflektiert. Wie schon in den ersten Messungen zur Verifizierung des Messsystems zu erkennen, wird der Schall aus dem rückwärtigen Raum wieder Richtung Zuhörer reflektiert. Sicher wird dieser Schall im Hochtonbereich wieder eine Dämpfung von bis zu 15 dB erfahren, aber er ist nicht nur messbar, sondern auch hörbar. Aufgrund dieser Gegebenheiten bei einer Projektionsfolie ist es unabdingbar den rückwärtigen Raum stark absorbierend zu gestalten. Im Bereich der Kinowelt heißt eine solche Wand „baffle wall“. Nicht ganz korrekt übersetzt ist damit eine 'schalltote' beziehungsweise stark absorbierende, nicht reflektierende Wand gemeint.

6.6 Erläuterungen

Nach SMPTE (2010) wird ein Kinosaal in eingeschwungenem Zustand mit einem Pink Noise eingemessen. Als Zielkurve für diese Messung in etwa der Mitte des Zuhörerbereiches bei relativ langer zeitlicher Mittelung wird die X-Curve in einer dem Raum angepassten Variante genutzt. Das Ziel dieses Verfahrens war es den Direktschall möglichst linear

einzumessen, ohne ihn einzeln gefenstert greifbar machen zu können. Die X-Curve beschreibt dabei den Einfluss der Luftdämpfung, der im eingeschwungenen Zustand dafür sorgt, dass im diffusen Schallfeld weniger Schallenergie im Hochtonbereich vorhanden ist. Mit dieser Methode ist es jedoch nicht möglich den Direktschall ähnlich linear einzumessen, wie mit neueren Messsystemen, die die errechneten Impulsantworten entsprechend fenstern, oder wenn der Direktschall in einem Punkt gemessen wurde, in dem der Diffusanteil wesentlich geringer ist als der Direktanteil. Im rein psychoakustischen Sinn ist es sinnvoller den Direktschall so linear wie möglich zu halten, unabhängig vom restlichen Raumanteil.
Unter anderem in den Abbildungen 18 und 25 sind die gemessenen Amplitudenfrequenzgänge des genutzten Lautsprecher-Bildwand Systems zu sehen. Trotz Bildwand vor dem Lautsprecher ist der Frequenzgang relativ linear. Dies liegt daran, dass in der genutzten Endstufe für den Lautsprecher schon das passende, kompensierende Modul für die Signalentzerrung eingebaut war. Entsprechend sind alle Messungen ohne Bildwand im Hochtonbereich sehr überbetont. Abbildung 20 zeigt eine kompensierte Messung, in der der errechnete Einfluss der Bildwand in die einzelnen Messungen mit eingerechnet wurde. Obwohl der gemessene Amplitudengang wie auch der gemessene Phasengang aufgrund des nicht durch die Fensterung der Impulsantwort verschwundenen Raumeinflusses relativ zerklüftet aussieht, ist ein Messergebnis in sofern möglich, als dass für das Ergebnis nur der Unterschied zwischen den beiden Messungen relevant ist. Die einzige Änderung im Raum war die Bildwand und folglich kann auch der Bildwand die gemessene Änderung zugesprochen werden.

6.7 Fehlerbetrachtung

In Bezug auf die Fehler in den Messungen sind als wichtigster Punkt die im Raum stattfindenden Reflexionen zu nennen. Besonders im tieffrequenten Bereich, in dem der Weg, den der Schall für die Reflexion zurücklegen muss in Relation zur Wellenlänge kurz ist, sind Einbrüche im Amplitudenfrequenzgang zu erkennen. Diesbezüglich wäre eine Messung in einem reflexionsarmen Raum zwar unkritischer, aber hätte nicht den Erfahrungsmehrwert des genutzten Screeningrooms gebracht. Mit dem Wissen, dass die schmalbandigen Einbrüche und Überhöhungen nichts mit dem eigentlichen Prüfling zu tun haben, sind die Ergebnisse allerdings klar, aber es ist schwierig mit ihnen weiter zu rechnen.
Die Entscheidung eine Messroutine in Matlab zu skripten war in Bezug auf die mögliche Automatisierung, die finanziellen Mittel und die Möglichkeit der Rohdatenarchivierung sicher nicht falsch, brachte allerdings die angesprochenen Herausforderungen bei der Berechnung des Phasengangs mit sich. In den Abbildungen 22 und 24 sind eindeutige Berechnungsfehler zu sehen. An den Stellen, an denen eine Reflexion den Amplituden- und auch den Phasengang beeinflusst, kommt es zu starken Beeinflussungen der Routine,

die für das Entrollen der Phasengänge zuständig ist.
Aufgrund des gegenüber eines reflexionsarmen Raumes relativ unruhigen Ambientes sind die Messungen ebenfalls ein wenig verfälscht. Wie im Abschnitt 6.1 erwähnt, liegt eine relativ hohe Streuung bei der ersten Referenzmessungen vor. In der späteren Referenzmessung in der das Umfeld des Lautsprechers optimiert wurde, ist das Ergebnis jedoch als unkritisch zu betrachten. Im Vergleich zu dem großen gemessenen Einfluss der Bildwand ist die Streuung jedoch eher klein und kann somit unter Vorbehalt vernachlässigt werden. Bei Messungen, deren Ergebnis unklar ist oder bei denen ein sehr kleiner Effekt gemessen werden soll, ist die Streuung jedoch nicht zu vernachlässigen.
Neben der Messhardware, welche für die durchgeführten Messungen mehr als ausreichend war, produzierte nicht nur die Problematik des Entrollens Fehler, sondern ebenfalls das Vorgehen der Berechnung der FFTs. Das Zusammensetzen des komplexen Frequenzganges aus Ausschnitten von verschieden langen Transformationen führt an den Übergängen zu Sprüngen, welche besonders in Abbildung 25 bei etwa 12 kHz zu sehen sind. Auch an diesen Sprüngen kann es zu Fehlern beim Entrollen kommen. Weiterhin können die gezeigten Frequenzgänge ohne eine Verbesserung des Algorithmusses eher nur als Tendenz in diesem Bereich gesehen werden. Für die gesuchten Ergebnisse bezüglich der Bildwand sind diese Sprünge jedoch als unproblematisch zu sehen, da sie immer in beiden Messungen vor der Differenzenbildung stattfinden und sich somit, wenn sie exakt gleich sind, in der Berechnung des Endergebnisses aufheben.

7 Zusammenfassung

Nach der Untersuchung ist festzustellen, dass eine Beschallung in einem Kino gewissen physikalischen Grenzen obliegt. Die vorhandenen Standards beziehungsweise Regeln führen nicht zu einem einheitlichen und befriedigenden Ergebnis in der Kinobeschallung. Ein sinnvoller Ansatz zur Lösung wäre es, Anforderungen an die Schallwandler im Kinobereich so zu standardisieren, dass besonders im Hochtonbereich genügend Energie zur Verfügung steht um dem Gesamtsystem Lautsprecher-Bildwand die Fähigkeit zu verleihen, einen linearen Amplitudenfrequenzgang wiedergeben zu können. Die Kompensation der starken Dämpfung durch die Bildwand kann keinesfalls allein dem Field-Service-Engineer überlassen werden. Er muss die Rahmenbedingungen für eine solche Kompensation vom Hersteller des jeweiligen Lautsprechersystems zur Verfügung gestellt bekommen. Weiterhin müssen die Standards für die Positionierung und das Einmessen von Lautsprechern hinter einer Bildwand überarbeitet werden. In Verbindung mit einer Projektionsfolie sollte weiterhin eine stark absorbierend gestaltete Saalwand hinter der Bildwand vorgeschrieben werden.

8 Schlussbemerkungen und Ausblicke

Das Ziel, mit der Masterarbeit auf die aktuellen Herausforderungen in der Kinobeschallung hinzuweisen, konnte in Verbindung mit den durchgeführten Messungen und den beschriebenen Quellen erreicht werden. Auf Basis der Ergebnisse und der während der Messungen gewonnenen Erkenntnisse war es weiterhin möglich Lösungsansätze aufzuzeigen.
Der Programmieraufwand für eine Messauswertung ist nicht zu unterschätzen. Daher sollte bei weiteren Arbeiten mehr Zeit für derartige Arbeitsschritte eingeplant werden.
In weiteren Untersuchungen ist es sinnvoll die gewonnenen Ergebnisse nach Möglichkeit in einem reflexionsarmen Raum zu evaluieren, beziehungsweise mit einem Messsystem mit geringerer Streuung Details zu untersuchen, wie zum Beispiel die Reflexionen zwischen Bildwand und Lautsprecher.

Literaturverzeichnis

Verwendete Literatur

Barco GmbH (2015a): „Audio processing for 3D cinema sound | Barco." URL http://www.barco.com/de/Auro11-1/exhibitors-tab-2?

Barco GmbH (2015b): „How does Barco's 3D sound work? | Barco." URL http://www.barco.com/de/Auro11-1/exhibitors-tab-1?

Barco GmbH (2015c): „Object vs. channel-based immersive sound formats | Barco." URL http://www.barco.com/de/Auro11-1/exhibitors-tab-3?

Dolby Laboratories, Inc. (2015a): „Dolby and the Cinema Industry." URL http://www.dolby.com/in/en/professional/cinema/industry.html.

Dolby Laboratories, Inc. (2015b): „Dolby Digital 5.1: The Standard for Digital Sound." URL http://www.dolby.com/us/en/technologies/dolby-digital.html.

DTS, INC. (2015): „About DTS | DTS." URL http://www.dts.com/corporate/about-dts.aspx.

Gedemer, Linda A. (2013 October): „Evaluation of the SMPTE X-curve Based on a Survey of Re-recording Mixers." Presented at the 135th Convention New York, USA: Convention Paper 8996.

Long, Brian; Roger Schwenke; Peter Soper und Glenn Leembruggen (2012): „Further Investigations Into the Interactions Further Investigations Into the Interactions between Cinema Loudspeakers and Screens." In: *SMPTE Motion Imaging Journal* S. 46–62.

Newell, Philip; Keith Holland; Julius Newell und Branko Neskov (2011 May): „Convention Paper 8383 - New Proposals for the Calibration of Sound in Cinema Rooms." Presented at the 130th Convention London, UK: Convention Paper 8383.

Schmidt, Ulrich (2005): *Professionelle Videotechnik.* 4. Springer Berlin Heidelberg.

SMPTE (2010): „SMPTE STANDARD for Motion-Pictures — Dubbing Stages (Mixing Rooms), Screening Rooms and Indoor Theaters - B-Chain Electroacoustic Response."

SMPTE (2012): „SMPTE RECOMMENDED PRACTICE - Relative and Absolute Sound Pressure Levels for Motion-Picture Multichannel Sound Systems — Applicable for Analog Photographic Film Audio, Digital Photographic Film Audio and D-Cinema."

Weinzierl, Stefan (Hrg.) (2008): *Handbuch der Audiotechnik.* Springer Berlin Heidelberg.

Inhaltlich weiterführende Literatur

Everest, F. Alton und Ken C. Pohlman (2009): *Master Handbook of Acoustics*. fifth. Mc Graw Hill.

Heyser, Richard C. (1988): *Time Delay Spectrometry: An Anthology of the Works of Richard C. Heyser on measurement, analysis and perception*. New York: Audio Engineering Society.

Abbildungsverzeichnis

1 Problematiken beim Entrollen der Phasengänge 1 9
2 Problematiken beim Entrollen der Phasengänge 2 10
3 Problematiken beim Entrollen der Phasengänge 3 11
4 Problematiken beim Entrollen der Phasengänge 4 12
5 Problematiken beim Entrollen der Phasengänge 5 12
6 Problematiken beim Entrollen der Phasengänge 6 13
7 Problematiken beim Entrollen der Phasengänge 7 14
8 Raumstatistik des Messraums 18
9 Messaufbau mit Bildwand (links) und ohne Bildwand (rechts) 19
10 Skizzierter technischer Messaufbau 20
11 Amplitudendifferenzen zur Messsystemverifizierung 1 23
12 Phasendifferenzen zur Messsystemverifizierung 1 23
13 Amplitudendifferenzen zur Messsystemverifizierung 2 24
14 Phasendifferenzen zur Messsystemverifizierung 2 24
15 Amplitudendifferenzen zur Messsystemverifizierung 3 25
16 Phasendifferenzen zur Messsystemverifizierung 3 25
17 Darstellung des Vorgehens 26
18 Geglättete Amplitudenfrequenzgänge bei 0 Grad 27
19 Amplitudendifferenz aus geglätteten Amplitudenfrequenzgängen bei 0 Grad 27
20 Amplitudenfrequenzgänge der Messung gefiltert zuzüglich der Filterkurve 28
21 Amplitudendifferenzen bei Drehung um vertikale Achse 28
22 Phasendifferenzen bei Drehung um vertikale Achse 29
23 Amplitudendifferenzen bei Drehung um horizontale Achse 29
24 Phasendifferenzen bei Drehung um horizontale Achse 30
25 Gemessene Amplituden bei verschiedenen Lautsprecher-Bildwand Abständen 30
26 Gemessene Amplituden bei drei ausgewählten Lautsprecher-Bildwand Abständen 31

Anhang

Datenträger zur Masterarbeit

Inhalt:

- Masterarbeit als PDF im Volltext
- Volltexte der im Literaturverzeichnis aufgeführten Publikationen im PDF-Format
- Rohmessdaten / Audiodaten
- Matlab-Skripte
- Ausgewertete Matlab-Daten
- Das in der Masterarbeit abgedruckte Literaturverzeichnis als separate PDF-Datei

Erklärung zur Urheberschaft

Hiermit erkläre ich, dass ich, Alexander Nowak, diese Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die ich bewusst und wörtlich oder sinngemäß veröffentlichtem oder nicht veröffentlichtem Schrifttum entnommen habe, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift