

Fakultät I

Institut für Sprache und Kommunikation

Fachgebiet Audiokommunikation

Magisterarbeit

**Wahrnehmbarkeit klanglicher Unterschiede  
von Hochtonlautsprechern unterschiedlicher  
Wirkprinzipien**

vorgelegt von:

Andreas Rotter



|                 |                            |
|-----------------|----------------------------|
| Erstgutachter:  | Prof. Dr. Stefan Weinzierl |
| Zweitgutachter: | Dr. Hans-Joachim Maempel   |
| Abgabedatum:    | 25. Mai 2010               |



"Über Membranstoffe bzw. Materialien und deren Zusammensetzung werden zuweilen regelrechte Wunderdinge verbunden mit geheimnisvollen Hintergründen berichtet, jedoch auswertbare und wissenschaftliche Aussagen im deutschsprachigen Raum tunlichst vermieden,[...]."

aus: Heinz Sahm: Arbeitsbuch für Lautsprecher-Systeme, 1987, S.98





# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und ausschliesslich unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Andreas Rotter

Berlin, den 25. Mai 2010



# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                        | <b>3</b>  |
| 1.1      | Vorstellung des Themas und Motivation . . . . .          | 3         |
| 1.2      | Einordnung in bestehende Arbeiten am Lehrstuhl . . . . . | 5         |
| 1.3      | Stand der Forschung . . . . .                            | 6         |
| <b>2</b> | <b>Theoretische Grundlagen</b>                           | <b>11</b> |
| 2.1      | Lautsprecher . . . . .                                   | 11        |
| 2.1.1    | Die elektroakustische Übertragungskette . . . . .        | 11        |
| 2.1.2    | Grundlagen der Lautsprechertechnik . . . . .             | 13        |
| 2.1.3    | Arten von Hochtוןchassis . . . . .                       | 16        |
| 2.1.4    | Kennwerte von Hochtוןlautsprechern . . . . .             | 25        |
| 2.2      | Frequenzweichen . . . . .                                | 32        |
| 2.3      | Digitale Filter . . . . .                                | 33        |
| 2.3.1    | Digitale Filter in der Lautsprecherentzerrung . . . . .  | 35        |
| 2.4      | Binauraltechnik . . . . .                                | 37        |
| 2.4.1    | Akquise binauraler Impulsantworten . . . . .             | 37        |
| 2.4.2    | Dynamische Binauralsynthese . . . . .                    | 39        |
| 2.4.3    | Vorteile für die Evaluierung von Lautsprechern . . . . . | 40        |
| <b>3</b> | <b>Entzerrung der Lautsprecher</b>                       | <b>41</b> |
| 3.1      | Vorstellung der Hochtוןlautsprecher . . . . .            | 41        |
| 3.2      | Anforderungen an Versuchsumgebung und -aufbau . . . . .  | 43        |
| 3.2.1    | Reflexionsarmer Raum . . . . .                           | 44        |
| 3.2.2    | Quasi-unendliche Schallwand . . . . .                    | 44        |
| 3.2.3    | Nahfeld- und Fernfeldevaluation . . . . .                | 45        |

|          |                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.4    | Messequipment . . . . .                                       | 47        |
| 3.2.5    | Signale für die Vermessung von Lautsprecher . . . . .         | 48        |
| 3.2.6    | Postprocessing . . . . .                                      | 49        |
| 3.3      | Vermessung der Chassis . . . . .                              | 50        |
| 3.3.1    | Zwischenergebnisse . . . . .                                  | 52        |
| 3.4      | Entzerrung der Chassis . . . . .                              | 57        |
| 3.4.1    | Ziel der Kompensation . . . . .                               | 57        |
| 3.4.2    | Erstellung der FIR-Filter mit MonkeyForrest Express . . . . . | 59        |
| 3.5      | Evaluation der Entzerrung . . . . .                           | 63        |
| 3.5.1    | Amplitudenspektren . . . . .                                  | 64        |
| 3.5.2    | Phasenspektren und Gruppenlaufzeiten . . . . .                | 65        |
| 3.5.3    | Impulsantworten . . . . .                                     | 65        |
| 3.6      | Zusammenfassung . . . . .                                     | 67        |
| <b>4</b> | <b>Akquise der binauralen Impulsantworten</b>                 | <b>71</b> |
| 4.1      | Ziel der binauralen Vermessung der Lautsprecher . . . . .     | 71        |
| 4.2      | Durchführung der Messung . . . . .                            | 73        |
| 4.2.1    | Aufbau . . . . .                                              | 73        |
| 4.3      | Durchführung . . . . .                                        | 74        |
| 4.4      | Auswertung . . . . .                                          | 75        |
| 4.5      | Zusammenfassung . . . . .                                     | 78        |
| <b>5</b> | <b>Perzeptive Evaluation</b>                                  | <b>79</b> |
| 5.1      | Vorversuch . . . . .                                          | 79        |
| 5.2      | Versuchsbeschreibung . . . . .                                | 80        |
| 5.2.1    | Methodik . . . . .                                            | 80        |
| 5.3      | Versuchsaufbau und -durchführung . . . . .                    | 82        |
| 5.3.1    | Stimuli . . . . .                                             | 84        |
| 5.3.2    | Probanden . . . . .                                           | 84        |
| 5.4      | Auswertung . . . . .                                          | 85        |
| 5.5      | Zusammenfassung . . . . .                                     | 86        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                        | <b>89</b> |

|                                                  |            |
|--------------------------------------------------|------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                     | <b>95</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>                       | <b>97</b>  |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                      | <b>I</b>   |
| <b>7 Anhang</b>                                  | <b>III</b> |
| 7.1 Abmessungen Schallwand . . . . .             | III        |
| 7.2 Monoaurale Messungen . . . . .               | IV         |
| 7.2.1 Impulsantworten . . . . .                  | IV         |
| 7.2.2 Amplitudenfrequenzgänge . . . . .          | VII        |
| 7.2.3 Klirrpegel . . . . .                       | XI         |
| 7.3 Erstellung der Kompensationsfilter . . . . . | XIV        |
| 7.4 HRTF-Differenzen . . . . .                   | XVII       |

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit wäre ohne die Unterstützung von vielen Personen und Institutionen nicht möglich gewesen, denen an dieser Stelle explizit gedankt werden soll.

Dem Fachgebiet Audiokommunikation und Prof. Dr. Stefan Weinzierl sowie dem Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik und hier besonders Roman Tschakert. Klaus Heinz von A.D.A.M. Audio Professional für die Stiftung der Lautsprecher. Anselm Goertz für die Bereitsstellung des FIR-Filter "Hugo" und wichtigen Ratschlägen im Vorfeld der Messungen. Der Zentralwerkstatt für Holz der TU Berlin und hier besonders Herrn Spielhagen für die Herstellung der Schallwand. Frau Jordan vom Prüfungsamt der Fakultät I für ihr Verständnis dafür, dass es mal wieder etwas länger gedauert hat.

Den Lektoren Caroline Bennewitz, Victoria Tomaschko und Kay Ziegenbalg, hier vor allem Letzterem für wertvolle methodische Ratschläge. Meinen Eltern, die mich mit viel Geduld während dieser letzten Phase meines Studium unterstützt haben. Allen Freunden und Bekannten sowie natürlich den Probanden des Hörversuches für die wertvolle Zeit, welche sie im Namen der Wissenschaft geopfert haben.

Last but not least natürlich Alexander Lindau, der nicht nur den Anstoß zur Bearbeitung dieses Thema gab, sondern auch immer mit Ratschlägen und praktischen Tips zur Seite stand und für die nötige Motivation sorgte, wenn es so aussah, als könne das Unmögliche nicht möglich gemacht werden.

Euch allen gilt mein aufrichtigster Dank.



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Vorstellung des Themas und Motivation

Der Lautsprecher als Schallwandler ist seit seiner Erfindung Gegenstand zahlreicher Untersuchungen und Mystifizierungen. Seit der Patentierung des heute am weitesten verbreiteten Chassis mit elektrodynamischen Antrieb durch Oliver J. Lodge (British Patent No.9712, 1898) und der Vorstellung des ersten kommerziell erhältlichen Lautsprecher, dem "Blatthaller" [Kru05] beschäftigt er fortwährend Wissenschaftler, Entwicklungsingenieure, Tonmeister, Techniker und interessierte Laien. Zwischen 1950 und 1998 finden sich allein in den Journals der Audio Engineering Society mehr als 450 Veröffentlichungen, die sich aus ingenieurstechnischer Sicht mit der Entwicklung, Konstruktion und Verbesserung von Chassis und Lautsprechergehäusen befassen [Gan98]. Eine grosse Herausforderung bei der Entwicklung stellt dabei immer noch die Erfassung aller Zusammenhänge zwischen messtechnisch-objektiven Kenndaten eines Chassis bzw. einer Lautsprecherbox und den von ihnen hervorgerufenen individuellen Höreindrücken bei Menschen dar.

An dieser Schnittstelle zwischen Elektro- und Psychoakustik ist das Thema der vorliegenden Arbeit angesiedelt. Es soll herausgefunden werden, ob zwischen Hochtonchassis mit verschiedenen Wandlerprinzipien und Membranmaterialien nach Entfernung von Amplituden- und Phasengangsunterschieden noch auditiv wahrnehmbare Unterschiede existieren. Um eine ausschließliche Untersuchung der Schallfelder der Chassis zu ermöglichen, wurden sowohl Interaktionen mit dem Raum als auch mit der Schallwand, in welcher sie betrieben werden, durch einen entsprechenden



Versuchsaufbau ausgeschlossen. Die Kompensation aller Treiber auf lineare Betrags- und Phasengänge erfolgte mit Hilfe einer digitalen Frequenzweiche. Die Hörbarkeit der verbleibenden Unterschiede zwischen den Hochtonsystemen sollen im Rahmen eines Hörversuches ermittelt werden, in dem ein direkter, dynamisch auralisierter AB-Vergleich der Treiber in virtuellen Stereoanordnungen erfolgen soll. Die Simulation der Lautsprecher wird durch deren binauralen Impulsantworten (BIR) ermöglicht, die im Vorfeld von jedem Chassis erfasst werden. Die BIR stellt die nachhallfreie Impulsantwort des Treibers bezogen auf beide Ohren dar, im Gegensatz zu einer monauralen Impulsantwort, die sich nur auf einen Messpunkt, den Standpunkt des Mikrofons, bezieht. Dynamische Auralisierung meint dabei, dass die BIR für Winkel von  $\pm 80^\circ$  für jedes Lautsprecherchassis aufgezeichnet werden, was dem Probanden im Hörversuch die Möglichkeit gibt, seinen Kopf zur Bewertung der Unterschiede frei in der horizontalen Ebene zu bewegen. Um während des Vergleiches den Probanden das ganze akustische Spektrum zur Verfügung zu stellen, werden alle Hochtontreiber in Verbindung mit einem Tiefmitteltöner (TMT bzw. TT) entzerrt und binaural vermessen. Die Treiberkombination entspricht damit typischen HiFi-Boxen oder Nahfeld-Studiomonitoren und erfüllt damit, abgesehen vom Gehäuse, den Anspruch eines realistischen Lautsprecher.

Eine Motivation für diese Untersuchung ist die unter Verkäufern, Autoren von Fachzeitschriften, Hobbykonstrukteuren, Marketing-Leuten sowie Laien populäre Meinung, dass Wandlerprinzip, Membranmaterial sowie Membranausdehnung Einfluss auf die Art und Weise der Schallproduktion haben und deshalb unterschiedliche Varianten von Hochtוןlautsprechern auch unterschiedliche Hörempfindungen produzieren [Sah87, S.98]. Diese Behauptung sollen an dieser Stelle zwei Zitate aus verschiedenen Publikationskontexten untermauern. Das erste ist der Beschreibung eines Regielautsprechers im Internetauftritt eines Herstellers von Studioequipment entnommen:

"Bändchen-Hochtöner bringen einen Grad von Exaktheit und Vollkommenheit in der Hochtוןwiedergabe, die vorher bei Studio-Monitoren unerreicht war. [...] Und dadurch, dass unser Bändchen-Hochtöner nahezu gewichtslos ist, kann es unmittelbar und schnell auf Veränderungen im Hochtון-Bereich reagieren." [Beh10]

Das zweite Zitat ist dem Produkttest eines Regielautsprechers in einer englischsprachigen Fachzeitschrift entnommen:

"From my previous experience, titanium-dome tweeters, unless damped with a special coating, tend to have a bright, slightly aggressive quality about them." [Whi03]

Die Motivation zur wissenschaftlichen Untersuchung dieses Themas begründet sich auch damit, dass in der bisherigen Forschung Lautsprecher immer nur als Summe von verschiedenen Treibern in einem Gehäuse betrachtet wurden. Der Standpunkt der subjektiven Wahrnehmung von unterschiedlichen Lautsprecherboxen wurde hierbei unter anderem von Toole [Too86a][Too86b], Olive [Oli07], Goertz [Goe06], Gabrielsson [Gab83] und Lavandier [Lav08] ausführlich untersucht. Die Korrelation zwischen objektiv-technischen Messwerten wie dem Betragsfrequenzgang und der subjektiven Präferenz beim Hörer wurde vor allem von Staffeldt [Sta74][Sta84][Sta91] erforscht. Klippel [Kli04] untersucht diese Korrelation im Bezug auf Verzerrungen bei Lautsprecherboxen. Allerdings ist dem Autor weder im deutschsprachigen noch im englischsprachigen Raum keine Veröffentlichung bekannt, in welcher ein Zusammenhang zwischen den Konstruktionsparametern von Hochtontreibern, also Antriebssprinzip, Membranmaterial und -ausdehnung, und deren subjektiver Wirkung beim Hörer untersucht wurde.

## **1.2 Einordnung in bestehende Arbeiten am Lehrstuhl**

Zur Messung und zur Auralisierung der binauralen Impulsantworten der Lautsprecher sowie zur Durchführung des Hörversuches wurde Hard- und Software eingesetzt, die zum einem am Fachgebiet entwickelt und zum anderen vom Partner des Fachgebietes, dem Institut für Technische Akustik an der RWTH Aachen (Digitale Frequenzweiche HD-2) zur Verfügung gestellt wurde. Der im Rahmen seiner Abschlussarbeit entworfene Head and Torso Simulator F.A.B.I.A.N. (Fast and Automatic Binaural Impulse Response Acquisition) von Lindau [Lin06] erlaubt die automatisierte Messung von HRIR's in zwei Freiheitsgraden (Rotation und Elevation) und ermöglicht damit in kurzer Zeit die Messung grosser Reihen binauraler Impulsantworten, wie sie für die dynamische Simulation der Hochtontchassis-Stereosetups erforderlich sind.

Der Hörversuch wurde mit der von Ciba und Wlodarski [CiW09] erstellten Hörversuchsumgebung WhisPER 1.0.5 und dem darin, vom Verfasser erstellten, ABX-Plugin realisiert und durchgeführt. Für die dynamische Auralisierung der Impulsantworten während des Hörversuches wurde auf die Faltungssoftware fWONDER zurückgegriffen. Die von Kersten [Ker06] ursprünglich für das EU-Projekt Virtual Electric Poem [Wei10] entwickelte, und später von Hohn [LHW07] in ein Jack Audio Server Plug-In [Dav10] portierte Faltungssoftware lässt sich über das OSC-Protokoll mit Positionsdaten aus einem Headtracker speisen und faltet in Echtzeit für die entsprechende Raumposition Audiomaterial mit den für diese Position aufgenommenen binauralen Impulsantworten. Bei der Auralisierung über elektrostatische Kopfhörer wurde auf einen, den Ohren des Kunstkopfes angepassten, Entzerrungsfilter zurückgegriffen, der von Schärer [Schä08] im Rahmen ihrer Arbeit entwickelt wurde. Mit diesem ist es möglich, Verzerrungen des Betrags- und Phasenfrequenzgangs durch den Kopfhörer zu kompensieren, weitere Informationen dazu finden sich im Abschnitt "Aufbau" im Kapitel 5.

## 1.3 Stand der Forschung

Zur Verbindung zwischen objektiven Kenndaten und subjektiven Höreindrücken im Bezug auf Lautsprecher wurde schon eine Vielzahl an Forschungsarbeiten veröffentlicht, wobei die wichtigsten für diese Arbeit hier genannt werden sollen.

Leckschat [Lec92] untersuchte, welche Amplituden- und Phasenabweichungen sich überhaupt feststellen lassen. Dafür setzte er FIR-Filter ein, deren Amplituden- und Phasengang unabhängig voneinander eingestellt werden kann, was selektive Eingriffe im Hoch- und Mitteltonbereich ermöglicht. Die bewußten Abweichungen vom idealen Amplitudengang lies Leckschat in einem Hörversuch bewerten. Ein erstes Ergebniss war, dass Anhebungen oder Absenkungen von der Breite einer Dekade und einer Oktave und in einer Größenordnung von 0,5 dB überwiegend nicht wahrgenommen wurden. Bei Anhebungen von 1 dB konnte die Hälfte der Hörer einen Unterschied feststellen. In einem weiteren Hörversuch stellte sich heraus, dass Tiefpassfilterungen von weißen Rauschen bei einer Frequenz von 16,5 kHz von allen Probanden nicht mehr wahrgenommen werden. Eine Tiefpassfilterung bei 15 kHz konnten zu-

mindest noch von einem Drittel der Hörer wahrgenommen werden. Im Rahmen der Arbeit wurden weiterhin Hörversuche zur Wahrnehmbarkeit von Verzerrungen im Phasengang sowie bei der Gruppenlaufzeit durchgeführt. Es wurde zum einem Hörbeispiele mit gleichen Amplitudengang aber unterschiedlichen Gruppenlaufzeit und Phasengang (linearer Phasenverlauf vs. typischer Phasenverlauf eines Lautsprechers, also mehrere Phasensprünge im hörbaren Spektrum) bewertet. Die Probanden konnten zwischen beiden Varianten keine Unterschiede hören, woraus Leckschat schloß, dass bei linearen Amplitudenfrequenzgang Phasen- und Gruppenlaufzeitverzerrungen für den Höreindruck unerheblich sind. Diese Schlußfolgerung ist insofern interessant, als das die Entzerrung von Lautsprechern auf lineare bzw. minimalphasige Phasenfrequenzgänge offenbar keinen auditiven Unterschied beim Hörer produziert. Einschränkungen dieser Aussage müssen jedoch für steilflankige minimalphasige Filter und Laufzeit- und Phasengangsverzerrungen im Tieftonbereich gemacht werden. Bei steilflankigen Filtern stellen sich durch große Laufzeiten durchaus hörbare Verzerrungen ein. Im Bassbereich stellte Leckschat eine Hörbarkeit von Laufzeitfehlern fest, wie sie von einem Butterworthfilter 6. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 50 Hz verursacht werden.

Müller [Mül99] untersuchte in seiner Doktorarbeit, welche objektiven Mess- und Kenndaten zur auditiven Diskriminierbarkeit von Lautsprechern beitragen und knüpfte damit an die Forschungsthemen von Leckschat und weiteren Autoren im Umfeld des ITA Aachen an. Pflaum [Pfl95] entzerrte verschiedene Boxenpaare axial linear in Betrag und Phase und lies durch diese abgespieltes Musikmaterial einmal monaural und einmal mit einem Kunstkopf, also binaural, aufzeichnen. In einem Hörversuch sollten Probanden anhand der Aufnahmen entscheiden, ob sie das Material aus derselben oder aus verschiedenen Boxen hören. Die Auswertung des Hörtests ergab, dass durch die Kunstkopfaufnahmen die Unterscheidung der Lautsprecher signifikant möglich war, wohingegen die monaural aufgezeichneten Signale keine signifikante Unterscheidung der Lautsprecher mehr erlaubten. Pflaum kam zu dem Schluss, dass linear entzerrte Lautsprecher, bei denen die unterschiedlichen Effekte der räumlichen Abstrahlung entfernt wurden, nicht mehr sicher zu unterscheiden sind. Müller stellt hier die Hypothese auf, dass die Diskriminierbarkeit von Lautsprechern untereinander also auf unterschiedliche Betragsfrequenzgänge am Trommelfell

zurückzuführen ist, welche durch Beugung und Reflexion am Kunstkopf entstehen in Abhängigkeit von den akustischen Wellenfeldern der Lautsprecher.

Goertz [Goe06] und Makarski [Mak06] greifen diese Hypothese im Rahmen eines Tests von 30 kompakten Regielautsprechern [GM06] für eine Fachzeitschrift wieder auf. In diesem wurden zunächst die bekannten, einen Lautsprecher charakterisierenden Kennwerte Betrags- und Phasenfrequenzgang, Richtcharakteristik in der horizontalen Ebene, Ausschwingverhalten und Verzerrungswerte gemessen. Weiterhin wurden Messungen der Richtcharakteristik in drei Dimensionen um den Lautsprecher, sogenannte Balloondaten angefertigt und binaurale Impulsantworten der Lautsprecher als Stereopaar an einem typischen Studioarbeitsplatz in einer reflexionsfreien Umgebung aufgenommen. Goertz ließ in einem Hörversuch Probanden die virtuellen Stereopaare bewerten, mit dem Ergebnis, dass Lautsprecher mit objektiv besseren Kennwerten, also zum Beispiel geringer Welligkeit im Betragsfrequenzgang, auch von den Versuchsteilnehmern besser bewertet wurden, als solche Monitore, bei denen dies nicht der Fall war. Makarski untersuchte anhand der Binauraldaten, ob mit diesen die tonalen Unterschiede zwischen Lautsprechern sowie die Abbildungsleistung von Stereopaaren quantitativ erfasst werden können. In einem ersten Versuch bestätigte Makarski die von Müller aufgestellte Hypothese über die Relevanz der Trommelfellfrequenzgänge für die Unterscheidbarkeit von Lautsprechern. Der Kunstkopf könne deutlich mehr Information erfassen als ein Messmikrofon mit Kugelcharakteristik, wobei diese Informationen sich im "Wesentlichen durch die am Kunstkopf stattfindenden Beugungs-, Reflexions- und Abschattungsvorgänge und deren Abhängigkeit von jeweils anregenden Wellenfeld" [Mak06, S.8] entstehen. Bei der Auswertung der HRTF stellte er zudem fest, dass sich einige der Lautsprecher im Testfeld in bestimmten Bereichen des Spektrums wie Punktquellen im Freifeld unter Elevation von  $-5^\circ$  bis  $10^\circ$  verhalten. Das zerissenene Klangbild von dem Probanden bei diesem Lautsprecher berichteten, lässt sich laut Makarski in Verbindung mit den scheinbaren vertikalen Erhöhungen oder Absenkungen bringen. An der kopfbezogenen Transferfunktionen des Lautsprecher mit den besten objektiven Kennwerten und den besten subjektiven Bewertungen wurde festgestellt, dass dieser alle spektralen Eigenschaften einer idealen Quelle mit  $0^\circ$  Elevation hatte. Daraus schloß Makarski [Mak06], dass anhand von Kunstkopfmessungen geprüft werden kann, ob ein Lautsprecher eine

plausible Quelle in der Horizontalebene darstellt oder nicht.



**Abbildung 1.1** – Aufbau Kunstkopfmessungen von Monitorenpaaren bei Goertz/Makarski (Quelle: [Mak06])

Um die Möglichkeiten eines direkten Vergleiches von Lautsprechern mit Hilfe einer binauralen Darstellung über Kopfhörer zu erfassen, vergleichen Hiekkanen et. al. [Hie08] den Unterschied zwischen zwei Lautsprecherpaaren. In dem Hörversuch wurden die Stereopaare einmal über individuell vermessene binaurale Impulsantworten (BIR) und einmal über BIR's, die mit einem Kunstkopf gemessen und nachträglich entzerrt wurden, dargeboten. Die individuellen BIR's wurden dabei mit Mikrofonen an den Ohrkanaleingängen der Probanden erfasst. Die Kunstkopf-BIR's wurden mit einem von Hiekkanen entwickelten Filter für jede Person zusätzlich individuell entzerrt. In einem anschliessenden Hörversuch sollten Probanden sowohl die auralisierten BIR's der Individualkopf- als auch der individuell entzerrten Kunstkopfmessungen bewerten. Die Auswertung zeigte, dass die über die individuellen BIR's auralisierten Lautsprecher besser bewertet wurden als die mit Hilfe der entzerrten Kunstkopf-BIR's auralisierten. Hiekkanen et. al. belegt damit, dass Kunstkopf-BIR's nicht genau das Klangbild an den Trommelfelleingängen erfassen, wie es mit individuell gemessenen BIR's der Fall ist. Vielmehr sorgt die Geometrie des Kunstkopfes für eine zusätzliche Verzerrung der HRTF's, die sich im Hörversuch in einer schlechteren Bewertung der Lautsprecher niederschlägt. Neben der Geometrie sieht Hiekkanen die

Ursache dafür auch in Ungenauigkeiten des Individualisierungsfilter für die Kunstkopfaufnahmen. Er kommt zu dem Schluss, dass individuell entzerrte Kunstkopfaufnahmen dennoch zur Bewertung von Lautsprecher benutzt werden können, da diese die räumlichen Eigenschaften verbessern und Klangverfärbungen reduzieren könnten. Er merkt jedoch auch an, dass die räumliche Beschränkung bei der Bewertung über statische, binaurale Darbietungen (nur eine Entfernung und ein Abhörwinkel werden erfasst), der direkten, in-situ Bewertung von Lautsprechern einen Vorrang gibt.

# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

### 2.1 Lautsprecher

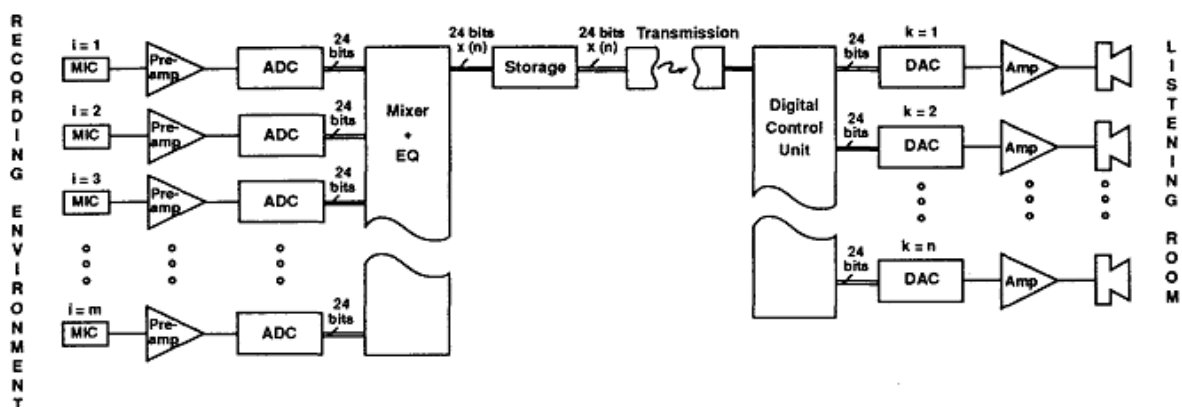
Der Begriff Lautsprecher wird sowohl als Bezeichnung für einzelne Treiber verwendet, die in einem bestimmten spektralen Übertragungsbereich arbeiten, als auch für eine Kombination von Treibern, welche in einem Gehäuse verbaut und um akustische Schallführungen und sogenannte Ports (Bassreflexrohr) ergänzt sind. Da in dieser Arbeit allein Hochtוןlautsprecher im Mittelpunkt der Betrachtung stehen, soll mit dem Begriff Lautsprecher hier immer der einzelne Treiber gemeint sein, mit Lautsprecherbox oder einfach Box soll hingegen die Kombination mehrerer Treiber in einem Gehäuse bezeichnet werden. Die Chassis werden in der Regel nach ihrem Übertragungsbereich eingeteilt, man unterscheidet Tief-, Mittel- und Hochtöner bzw. Kombinationen dieser wie zum Beispiel Tiefmitteltöner oder Breitbandlautsprecher. Lautsprecherboxen unterscheidet man in der Zahl der verbauten Chassis (Zwei-Wege, Drei-Wege u.a.), an der Form des Gehäuses (geschlossen, Bassreflex u.a.) oder nach Art der Anwendung wie sie zum Beispiel von Goertz [Goe08, S.422] vorgeschlagen wird (Studiomonitore, Beschallungsanlagen, Lautsprecher für Consumer-Anlagen, Kinolautsprecher, Elektroakustische Anlagen).

#### 2.1.1 Die elektroakustische Übertragungskette

Der Begriff elektroakustische Übertragungskette umfasst allgemein alle Glieder, die ein akustisches Signal von der Aufnahme über die Mischung und der Speicherung bis hin zur Wiedergabe beim Konsumenten durchläuft. Bestandteile dieser Kette



sind Mikrofone, Vor- und Endverstärker, AD/DA-Wandler, Mischpulte, analoge und digitale Speichermedien (z.B. Magnetband, CD-ROM) und Übertragungskanäle (z.B. FM-Radio, S/PDIF) sowie natürlich Lautsprecherboxen bzw. die einzelnen Treiber. Gütefaktoren, an denen sich alle Glieder vergleichen lassen sind unter anderem der Signal-Rausch-Abstand (SNR) sowie der Umfang der Verzerrungen im Betrags- und Phasenspektrum, der durch das System verursacht wird. Während der SNR zumindest bei professionellen Aktivlautsprechern (110-120 dB) ausreichend ist im Vergleich zu dem von Aufnahmемikrofonen (108-115 dB) [Fie94] ist das Maß der Betrags- und Phasengangsverzerrungen bei Lautsprechern um den Faktor 2-20 höher als bei anderen Geräten in der Übertragungskette [Lin09]. Hinzu kommt die komplexe akustische Wechselwirkung zwischen Lautsprechern und dem Raum, in welchem sie betrieben werden [Oli07]. Die dadurch entstehenden Amplituden- und Phasenverzerrungen haben ihre Ursache in der Überlagerung von Wandreflexionen und Raummoden mit dem vom der Box abgestrahlten Schalls. Der Lautsprecher kann damit als die Achillesferse in der Übertragungskette von akustischen Ereignissen betrachtet werden. Digitale Filter, wie der für die Entzerrung verwendete HD-2 Controller, ermöglichen zwar die Linearisierung von Lautsprechern für einen Sweetspot im Raum, mit moderatem Aufwand ein homogenes Klangbild an allen Punkten in Raum zu erzeugen wird die Elektroakustik aber sicher noch eine Weile beschäftigen.



**Abbildung 2.1** – Aufbau einer elektroakustischen Übertragungskette,  
m - Anzahl Mikrofone, n - Anzahl Lautsprecher [Flie94]

## 2.1.2 Grundlagen der Lautsprechertechnik

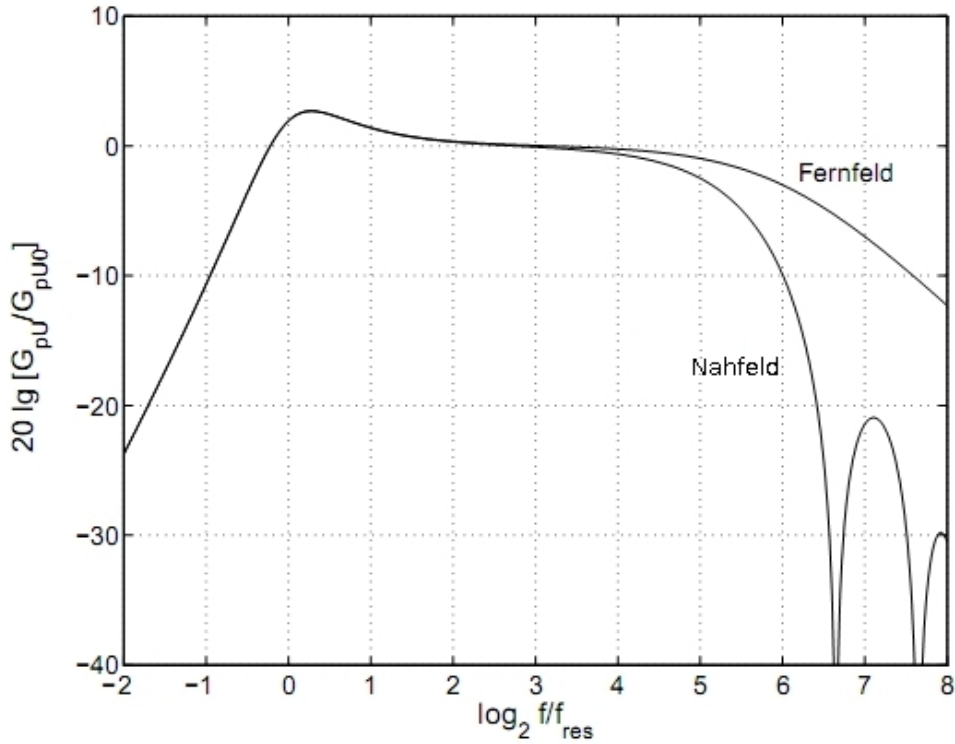
Lautsprecher sind elektroakustische Wandler, die elektrisch niederfrequente Signale in mechanische Bewegungen einer Membran umwandeln, was zur Abstrahlung von Schallwellen in das Umgebungsmedium führt. Als Annäherung an die akustische Schallabstrahlung der Membran wird diese als eindimensional schwingender, kreisförmiger Kolbenstrahler in einer unendlichen Wand betrachtet [Zwi93, S.91], bei welchem nur die Vorderseite Schall abstrahlt. Das Verhältnis zwischen elektrischer Spannung und abgestrahlten Schalldruck wird mit dem frequenzabhängigen Übertragungsfaktor  $G_{pU}$  erfasst, der exemplarisch für einen elektrodynamischen Lautsprecher (vgl. Abbildung 2.3) in Gleichung 2.1 beschrieben ist.

$$G_{pU}(\omega) = \frac{p(\omega)}{U(\omega)} = \frac{\omega^2 \rho \pi a^2 B l}{(-\omega^2 m + j\omega r + s)(R_a + R_i + j\omega L_i)} \quad (2.1)$$

In dieser Gleichung enthalten sind die Terme für die mechanischen und die elektrische Resonanzfrequenz des Lautsprechers

$$\omega_{mech} = \sqrt{\frac{s}{m}} \quad \text{bzw.} \quad \omega_{elek} = \frac{R_a + R_i}{L_i} \quad (2.2)$$

Die untere, mechanische Grenze ergibt sich aus der Hochpasswirkung des Feder-Masse-System, dem die schwingend gelagerte Membran vereinfacht betrachtet entspricht, die obere Grenzfrequenz ergibt sich aus dem Tiefpass, den Schwingspule und Widerstände bilden. Zwischen den beiden Eckfrequenzen besitzt der elektrodynamische Lautsprecher theoretisch einen linearen Frequenzgang, wie er in Abbildung 2.2 dargestellt ist. Die elektrische Grenzfrequenz ist hierbei willkürlich sechs Oktaven oberhalb der mechanischen Eckfrequenz gelegt. Die linke Flanke fällt mit -12 dB/Oktave ab, die rechte Flanke im Fernfeld mit -6 dB/Oktave. Die Art der Schallabstrahlung hängt von dem auf die Membran wirkenden Strahlungswiderstand der Umgebung (gegeben durch die Masse der Luft) ab, welcher dem Realteil der Strahlungsimpedanz  $Z_{K0}$  entspricht und abhängig von abgestrahlter Wellenlänge und Radius der Membran  $a$  ist. Der gesamte Strahlungswiderstand ergibt sich nach Sahm



**Abbildung 2.2** – Theoretischer Betragsgang eines Lautsprecher im Nah- und Fernfeld (nach [Mös06], verändert)

[Sah, S.34] aus dem Term 2.3.

$$Z_{K0} = \Re\{Z_{K0}\} + j\Im\{Z_{K0}\} \quad (2.3)$$

mit

$$\Re\{Z_{K0}\} = \frac{\omega^2 S_m^2 \rho_0}{4\pi c} \quad \text{und} \quad \Im\{Z_{K0}\} = 1,93 \omega a^2 \rho_0 \quad (2.4)$$

Das Verhältnis zwischen Größe des Schallabstrahlers und erzeugten Wellenlänge wird in der Gleichung 2.5 [Sah87, S.34] erfasst, wobei die Wellenlänge durch die Wellenzahl  $k$  beschrieben wird.

$$ka = \frac{\omega a}{c} = \frac{2\pi a}{\lambda} = \frac{u_m}{\lambda}, \quad u_m - \text{Umfang der Membran} \quad (2.5)$$

Das Verhalten der Strahlungsimpedanz lässt sich spektral in zwei Bereiche einteilen. Im Fall von  $ka \ll 1$  gilt die Annäherung an einen Kolbenstrahler, der Realteil der Strahlungsimpedanz steigt zusammen mit der Membranschnelle an, was zu einer frequenzunabhängigen Schallabstrahlung führt. Für diesem Bereich gilt auch Abbildung 2.2, der Richtungsfaktor aus 2.6 ist in diesem Fall rund eins. Die Größe des komplexen

Schalldrucks ist nur von der Entfernung zur Membran abhängig.

Der Punkt  $ka = 1$  entspricht einer Frequenz, deren Wellenlänge gleich dem Umfang der Membran ist. Bei einem Konuslautsprecher mit einem Membrandurchmesser von 17 cm entspricht dies einer Frequenz von 650 Hz. Hier konvergiert der Realteil des Strahlungswiderstandes gegen einen Wert  $Z_0$ . Dies hat zur Folge, dass bei einer, vom Membranradius abhängigen Grenzfrequenz  $\omega_0$ , sich zur abfallenden Flanke in Abbildung 2.2 noch ein weiterer Tiefpass erster Ordnung mit -6 db/Oktave hinzuaddiert. Dies ist auch der Grund, warum der Übertragungsfaktor aus Gleichung 2.1 nur bis zu diesem Punkt Gültigkeit besitzt.

Für den Bereich  $ka \gg 1$  gilt das Modell des eindimensionalen Kolbenstrahler nicht mehr ohne Einschränkung für die Membran. Die wirksame Strahlungsimpedanz bleibt hier gleich, während die Membranschnelle wieder sinkt. Das Schallfeldes ändert sich von dem einer Kugel zu einer Halbkugel. Der von der Membran erzeugt komplexe Schalldruck ist nun neben der Entfernung auch abhängig vom Abstrahlungswinkel relativ zur Flächennormalen der Membran. Für kreisförmige Strahler ergibt sich dann der komplexe Schalldruck aus Gleichung 2.6 (vgl. [Zwi93]).

$$p(r, \Theta) = \underbrace{\frac{2J_1(ka \sin \Theta)}{ka \sin \Theta}}_{\text{Richtungsfaktor}} j \underbrace{\frac{Z_0 k}{2r} a^2 \hat{v} e^{j(\omega t - kr)}}_{\text{Halbkugelwelle}} \quad (2.6)$$

Ergänzend zu dieser Änderung des Schallfeldes aufgrund der Wellenlänge ist eine Richtwirkung auf der Membran zu beobachten, welche ihre Ursache in den richtungsabhängigen Laufzeitunterschieden zwischen den gleichphasig schwingenden Flächen auf der Membran haben. Es kommt zur Ausbildung von Haupt- und Nebenkeulen symmetrisch um die Normale der Membran. Bei einer Betrachtung im Fernfeld findet sich eine erste totale Auslöschung des Schalldrucks bei  $\pm 90^\circ$  zur Flächennormalen bei einer Frequenz, für deren Wellenlänge  $\lambda = 4a$  gilt. Weiterhin sorgt eine Wiedergabe von Wellenlängen kleiner als der Membranradius und eine punktuelle Kraftzuführung (vor allem bei Chassis mit Schwingspulenantrieb) dafür, dass Teile der Membran nicht mehr in Phase schwingen, es kommt zur Ausbildung von sogenannten Partialschwingungen. Teile der Membran beginnen in diesem Bereich gegenphasig zu einander zu schwingen, was zur konstruktiven und destruktiven Interferenz führt und einer damit verbundenen Bildung von Axial- und Radialmoden. Man spricht hier auch

von einem Aufbrechen der Membran, welches eine Verkleinerung der effektiv strahlenden Fläche zur Folge hat und dementsprechend der wirksame Schall zunehmend von der Mitte abgestrahlt wird. Dem Problem versucht man durch eine Verwendung von leichten, besonders steifen Membranmaterialien wie (Nomex oder Kevlar) mit Wabenstruktur sowie mit nichtabwickelbaren Membranen (NaWi-Membran) entgegenzutreten. Interferenzen treten zusätzlich auf, wenn der Lautsprecher gleichzeitig eine tiefe und eine hohe Frequenz wiedergeben soll. Sie werden verursacht durch die unterschiedlichen Auslenkungen der Membran, infolgedessen es zu Dopplereffekten auf der Membran kommt. Bei diesen wird der Wiedergabepunkt der hohen Frequenz moduliert durch die enorme Auslenkung der Membran infolge der Tieftonproduktion.

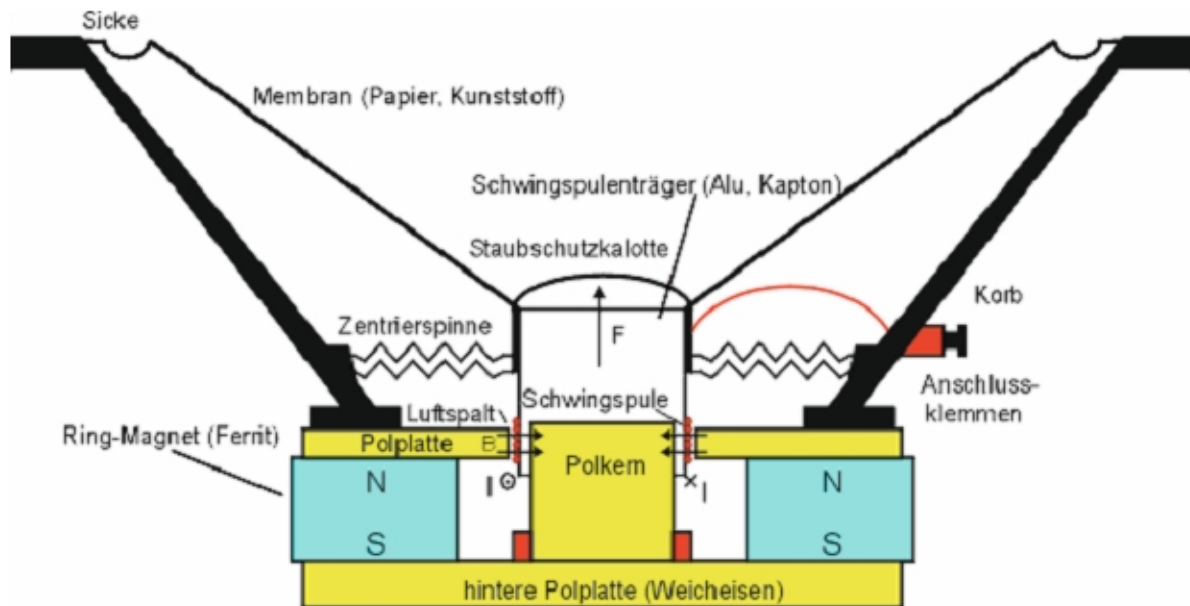
Die hier genannten Modelle und deren Grenzen gelten prinzipiell für elektrodynamische Treibersysteme, das Prinzip des eindimensionalen Kolbenstrahlers und seinem frequenzabhängigen Verhalten lässt sich aber auch auf alle anderen Antriebsprinzipien und Membranformen anwenden.

### **2.1.3 Arten von Hochtוןchassis**

#### **Elektrodynamische Hochtוןlautsprecher**

Elektrodynamische Lautsprecher sind mit Abstand die bekanntesten und am weitesten verbreiteten. Das elektrodynamische Wandlerprinzip ist im Studio- und Consumerbereich nahezu konkurrenzlos, wenn es darum geht tiefe und mittlere Frequenzen effektiv wiederzugeben, sieht man von den Möglichkeiten, die sich durch bestimmte Gehäusekonstruktionen ergeben, einmal ab. Auch im Hochtוןbereich ist das Verfahren weit verbreitet und weitaus günstiger zu fertigen als etwa gleichgroße Chassis mit planaren Membranen.

Das Antriebsprinzip basiert auf der Kraft, die auf stromdurchflossene Leiter in Magnetfeldern wirkt. Dabei befindet sich eine Spule, welche mit einer schwingungsfähigen Membran gekoppelt ist, im Luftspalt eines Magneten. Das magnetische Feld verläuft senkrecht zur Wicklung des Spulendrahtes. Wird die Spule von einem Strom durchflossen, so wirkt auf diese die Lorentzkraft senkrecht zum magnetischen Feld und zur Spulenwicklung. Die Lorentzkraft versetzt die Spule und damit auch die

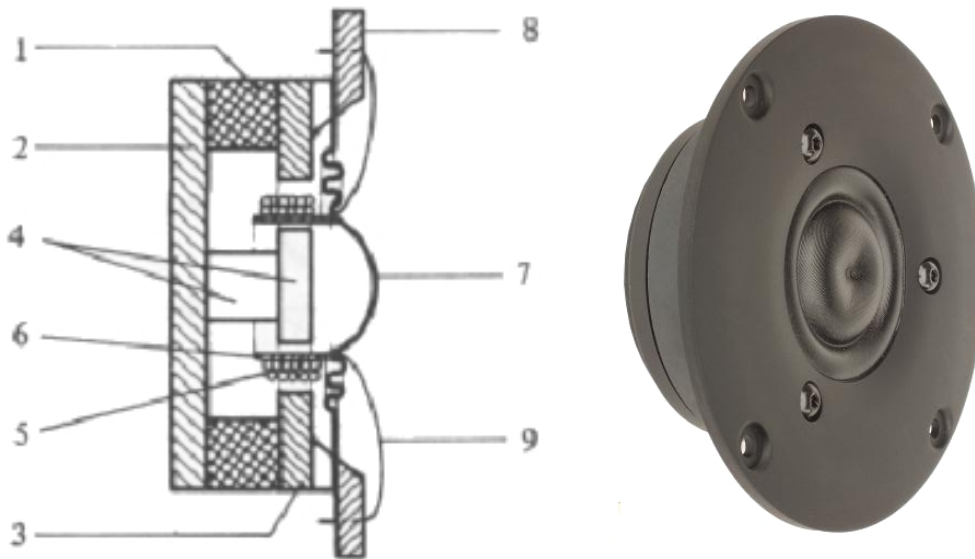


**Abbildung 2.3** – Schnittbild durch einen elektrodynamischen Konuslautsprecher mit den eingezeichneten Verläufen des magnetischen Feldes  $B$ , der Stromflussrichtung  $I$  und der resultierenden Lorentzkraft  $F$  (Quelle: [Beh99])

daran gekoppelte Membran in eine Schwingungsbewegung, infolgedessen auch die Luftmasse vor der Membran in Schwingung versetzt wird. Die Wirkungsrichtungen von Stromfluss, Magnetfeldverlauf und Lorentzkraft sind in Abbildung 2.3 gekennzeichnet.

Elektrodynamische Hochtönlautsprecher sind in der Regel in Form konvexer Halbkugeln (Kalotte) ausgeführt (siehe Abbildung 2.4, links)), wobei sowohl Varianten mit loser als auch mit fixierter Membranmitte, in letzterem Fall oft auch als Ringstrahler bezeichnet, existieren (siehe Abbildung 2.4, rechts)). Es existieren aber auch Hochtönochassis in Konusbauweise sowie in Form konkaver Halbkugeln.

Nach Kates [Kat76] hat allein die Membranform, unabhängig von ihren mechanischen Eigenschaften, keinen großen Einfluß auf die axiale und außeraxiale Schallabstrahlung im üblichen Arbeitsbereich von Hochtönern. Bis  $ka = 4$  ( $a$  - Membranradius), was bei einem Durchmesser von 25 mm einer Frequenz von 17,5 kHz entspricht, gibt es axial und außeraxial geometriebedingt keine Unterschiede zwischen flachen und halbkugelförmigen Membran. Bei  $ka = 13$  treten bei halbkugelförmigen im Gegensatz zu flachen Membran Einbrüche im axialen Betragsfrequenzgang auf, deren Stärke vom Verhältniss Kalottenradius - Kalottenhöhe bestimmt wird. Bei gängigen Kalottendurchmessern von 19 mm bis 37 mm liegen diese jedoch weit außerhalb



**Abbildung 2.4** – Links: Schematischer Aufbau einer Hochtוןkalotte (Quelle: [Dic97]),  
 1. Ringmagnet, 2. Magnetplatte, 3. Polplatte, 4. Polkern  
 5. Schwingspule, 6. Schwingspulenträger, 7. Kalotte mit Sicken  
 8. Montageplatte, 9. Zuführungslitzen  
 Rechts: Bild einer Kalotte mit fixierter Membranmitte [SBA10]

des wahrnehmbaren Spektrums liegt. Eine Gegenüberstellung der axialen Fernfeldfrequenzgänge von drei elektrodynamischen Chassis mit gleichem Membrandurchmesser in Abbildung 3.3 bestätigt die theoretische Annahme. Außeraxial kommt es neben dem typischen Schalldruckabfall aufgrund der einsetzenden Richtwirkung bei flachen Membranen zu einem spektralen Einbruch bei  $ka = 5,5$ , der bei gekrümmten Membranen nicht in der Größenordnung auftritt. Dieses Phänomen liegt jedoch bei den üblichen Kalottengrößen auch außerhalb des Wahrnehmungsbereichs für Schall. Somit ist die obere Grenze des axialen Frequenzgangs sowie die Richtcharakteristik nur von der Ausdehnung der Membran abhängig.

Da die Kalotte nur an ihren Rändern mit der Schwingspule verbunden ist, wird versucht, mit einer Fixierung der Membrannmitte am Polkern (siehe Abbildung 2.4) eine stabilere Führung der Membran zu ermöglichen, was in einem besserem Impulsverhalten resultieren soll. Aufgrund fehlender Beweise in der Fachliteratur liegt jedoch der Verdacht nahe, dass diese Annahme sich nicht bestätigt hat. Bei der Wahl eines Membranmaterial sind Eigenschaften wie die Dichte, das Elastizitätsmodul (Biegesteife), Gewicht, innerer Dämpfung sowie materialbedingte Schalllaufzeiten [Sah87, S.107] von Bedeutung. Weiche Membrane werden heute aus Kunststofffolie (Supra-

nyl) oder Kunststoffgewebe basierend auf Karbon-, Aramid- oder Glasfasern gefertigt. Die Gewebe werden zum Teil noch mit einem Einstrich aus Acrylharz wie Acronal abgedichtet. Früher fand auch gepresstes Papier Verwendung beim Bau von Hochtonkalotten. Harte Membrane bestehen in der Regel aus Aluminium, Magnesium, Beryllium, Titan oder aus Legierungen dieser Metalle.

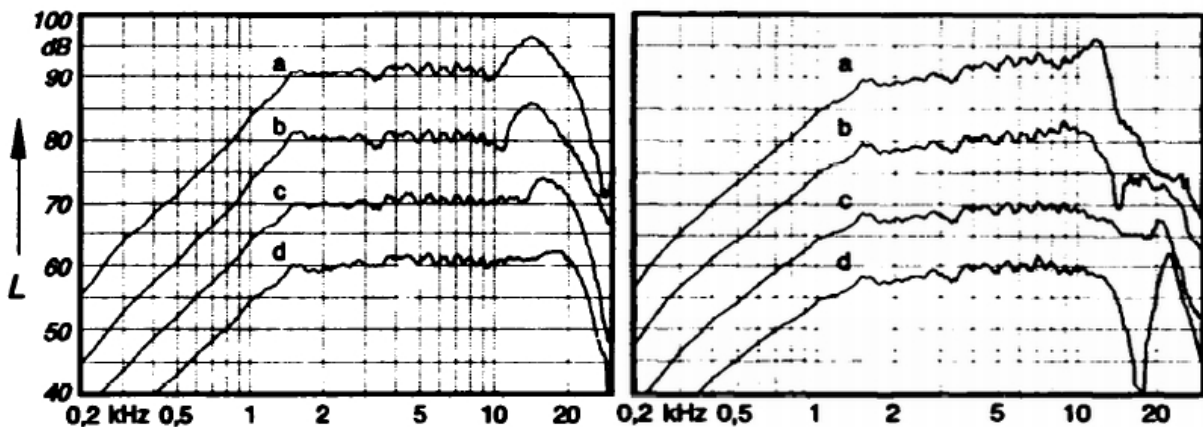
Für die Gestaltung von Hochtonkalotten mit ausgewogenen Frequenzgang bis zur oberen Wahrnehmungsschwelle von 20 kHz, einem guten Impulsverhalten, also kurze Ein- und Ausschwingzeiten, sowie geringen Verzerrungswerten sind Materialien mit hohen Elastizitätsmodul, geringen Gewicht und Dichte, hohen Schalllaufzeiten sowie hoher innerer Dämpfung notwendig. Gepresstes Papier fördert aufgrund seiner geringen Steifigkeit die Ausbildung von Resonanzen, was sich unmittelbar in den Klirrwerten niederschlägt [Sak81]. Die vergleichsweise geringe Schallausbreitungsgeschwindigkeit sorgt zudem für ein schlechtes Impulsverhalten, was in einem kleineren spektralen Arbeitsbereich und einer oberen Grenzfrequenz, die noch im Bereich der menschlichen Wahrnehmung liegt, was sich unmittelbar auch auf das Klangbild auswirkt. Lange Zeit wurden die genannten Kriterien nur von Metallen im zufriedenstellenden Maße erfüllt, allerdings mit dem Nachteil, dass diese eine sehr niedrige innere Dämpfung haben. Dies führt dazu, dass Schwingungen und insbesondere Resonanzen nur langsam abklingen, was in höheren Klirrwerten und damit verbundenen hörbaren Verzerrungen des Klangbildes resultiert. Das Bedampfen der Metallmembran mit einer Karbonschicht wirkt sich positiv auf die innere Dämpfung und somit auf die Klirrwerte aus. Die Einführung von Verbundfasern aus Karbon [Tsu81] und Alken-verstärkten Polymeren [Nig81] machte es möglich, dass die Eigenschaften weicher Membrane, also hohe innere Dämpfung, geringe Dichte und Gewicht, mit dem von harten Membranen, also hohes Elastizitätsmodul und große Schalllaufzeit, kombiniert werden konnte. Theoretisch können seither Kalottenmembrane mit den geforderten Eigenschaften, also ausgewogener Frequenzgang, gutes Impulsverhalten und niedrige Verzerrungswerte, sowohl aus weichen als auch harten Materialien hergestellt werden. Der qualitative Vergleich der Betragsfrequenzgänge einer Aluminiumkalotte und einer Gewebekalotte in Abbildung 3.3 unterstreicht dies.

Krump [Kru94] zeigt, dass auch die mechanische Stabilität bei weichen und sehr weichen Membranen Auswirkungen auf den Betragsfrequenzgang hat. Ein Mangel an



Stabilität aufgrund zu geringer Kalottenhöhen hat spektralen Anhebungen und Absenkungen ab 12 kHz zur Folge, was sich auch im Klangeindruck niederschlagen wird. Zudem hat laut Krump das Material des Schwingspulenträgers und die Wahl des Dämpfungsmaterials hinter der Membran Einfluß auf den spektralen Verlauf bei hohen Frequenzen hat. Ist der Schwingspulenträger nicht in der Lage, die betriebsbedingt entstehende Wärme schnell genug abzuführen, wie es zum Beispiel bei Papier der Fall ist, so kann es zu starken Pegelüberhöhungen zwischen 10 kHz und 20 kHz kommen. Aluminium eignet sich aufgrund seiner Wärmeleitfähigkeit eher als Schwingspulenträger. Ferrofluide im Luftspalt zwischen Magnet und Spule können zusätzlich als Wärmeableiter eingesetzt werden. Das Dämpfungsmaterial hinter der Membran soll konstruktionsbedingte Reflexionen am Polkern verringern, die auftreten, wenn deren Abstand ein Viertel der Wellenlänge beträgt. Bei einer Kalottenhöhe von sechs Millimeter käme es zu einer Reflexion bei rund 14 kHz, die einen Einbruch im Spektrum zur Folge hat, der sich je nach Tiefe im Klangeindruck niederschlagen kann (siehe Abschnitt Amplitudenfrequenzgang).

Zusammenfassend läßt sich sagen, dass Eigenschaften wie der axiale Betragsfre-



**Abbildung 2.5** – Links: Betragsfrequenzgang einer Gewebekalotte bei verschiedenen Höhen und verschiedenen steifen Materialien  
Rechts: Betragsfrequenzgang einer Gewebekalotte bei verschiedenen Schwingspulenträgermaterialien [Kru94]

quenzgang und die Verzerrungswerte maßgeblich über das Membranmaterial sowie Wandlerkomponenten, wie das Trägermaterial der Schwingspule oder die Art der Bedämpfung hinter der Membran, bestimmt werden. Axial nahezu lineare Amplitudenfrequenzgänge lassen sich mit weichen wie auch harten Materialien erzielen

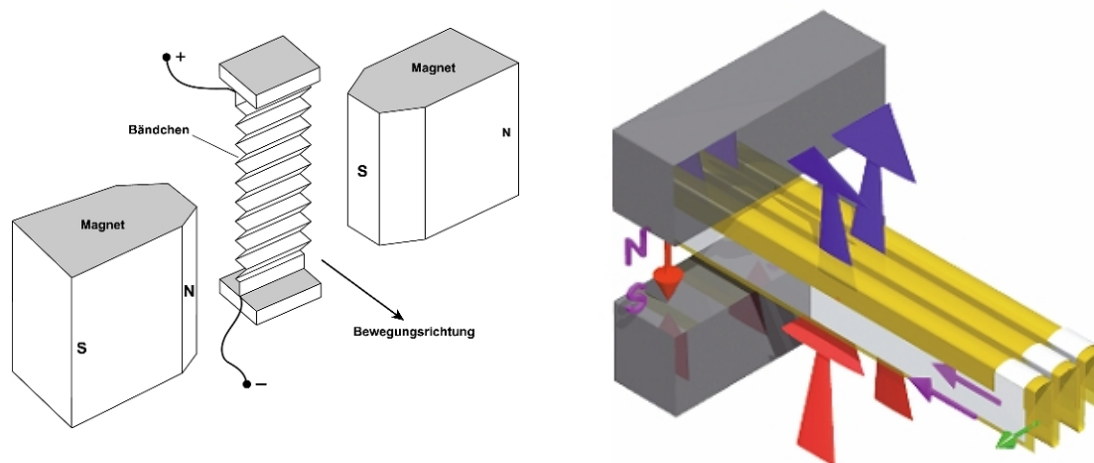
in Kombination mit den entsprechend abgestimmten Wandlerkomponenten erzielen. Die Richtcharakteristik von elektrodynamischen Hochtönern hängt maßgeblich von Form und Ausdehnung der Membran ab. Da alle Hochtönkalotten kreisförmig sind, ergibt sich hier prinzipiell kein Unterschied zwischen den verschiedenen Materialien.

### **Elektromagnetische Hochtönlautsprecher**

Elektromagnetische Lautsprecher, häufig einfach unter dem Begriff "Bändchenlautsprecher" zusammengefasst, werden im Unterschied zu elektrodynamischen Treibern ausschließlich als Mitten- und Hochtönlautsprecher verwendet. Prinzipiell unterscheidet man Chassis, bei denen die gesamte Membran elektrisch leitfähig ist (klassische Bändchenhochtöner) und jene, bei denen die Membran aus Kunststoff besteht, in den Leiterbahnen eingebracht sind (Magnetostat). Letztere finden aufgrund hoher Belastbarkeit und hoher maximaler Schalldruckpegel nahezu unmodifiziert im PA-Bereich Verwendung, während bei elektrodynamischen Treibern häufig auf Kompressionstreiber und Hornkonstruktionen zurückgegriffen werden muss, um mittlere und hohe Frequenzen mit ausreichender Lautstärke wiederzugeben.

Das elektromagnetische Wandlerprinzip basiert auf dem gleichen physikalischen Zusammenhang wie das elektrodynamische Prinzip mit dem Unterschied, dass die schallabstrahlende Membran elektrisch leitfähig ist und damit selbst als Schwingspule fungiert (siehe Abbildung 2.6). Das Magnetfeld wirkt somit direkt auf die Membran, die in der Regel an einem Punkt großer Homogenität platziert wird. Dies hat zur Folge, dass die antreibende Lorentzkraft theoretisch gleichmäßig auf die gesamte Membranfläche wirkt, im Gegensatz zu den, durch eine Schwingspule nur punktuell angetriebenen, elektrodynamischen Chassis. Die Membran hat in der Regel die Form eines wenige Millimeter schmalen, ungefähr 60 bis 100 mm langen Rechteckes. Auch wenn für die Membranform prinzipiell das Modell des Kolbenstrahlers gilt, gibt es aufgrund ihrer Form im Abstrahlverhalten einen deutlichen Unterschied gegenüber den kreisförmigen Kalottenmembranen. Die vertikale Ausrichtung der längeren Membranseite führt zu einer konstanten Abstrahlung des Schalls in der horizontalen Ebene auch bei hohen Frequenzen, die geringe Breite sorgt für eine stärkere Bündelung des Schalls in der vertikalen Ebene [Sah87, S.116]. Bei der Schallabstrahlung in

Räumen zieht dies weniger Boden- und Deckenreflexionen nach sich, die Verzerrung des Klangbildes am Hörerplatz durch Diffusschall wird dadurch verringert. Hörner, die vor der Membran angebracht werden, ermöglichen höhere Schalldruckpegel bei der Wiedergabe [Nak81]. Beim klassischen Bändchen besteht die Membran aus voll-



**Abbildung 2.6** – Links: Prinzipieller Aufbau eines Aluminiumbändchenhochtöners.  
Rechts: Funktionsprinzip des Air-Motion-Transformers, bei dem je nach Signalfloss die Luft durch die Lamellen gepresst bzw. angesaugt wird  
(Quelle: [ADA10])

ständig leitfähigen Material, in der Regel Aluminium oder Beryllium, welches zur Erhöhung des Widerstandes und der Stabilität oftmals geriffelt ist. Bei den Ende der 70er Jahre [Sak77] eingeführten Magnetostaten besteht die Membran aus einem belastbaren, hitzebeständigem Kunststoff wie Polyimid, in dem Bahnen aus elektrisch leitfähigen Metall eingebracht sind. Die verwendeten Materialien erfüllen nahezu alle, bei den elektrodynamischen Chassis bereits genannten, gewünschten Kriterien: hohe Steifigkeit, hohe Schalllaufzeit sowie geringes Gewicht. Das Gewicht der Membrane beträgt in der Regel nur wenige Hundertstel Gramm, was kurze Ein- und Ausschwingzeiten zur Folge hat. Unmittelbar davon beeinflusst wird auch die obere und untere Grenzfrequenz des Betragsspektrums, was gerade bei Magnetostaten durchaus zu oberen Grenzfrequenzen von 40 kHz und mehr führt. Ein Problem stellt auch bei elektromagnetischen Treibern die geringe innere Dämpfung der Membranmaterialien dar, was aufgrund der direkten Anregung der Membran zur Ausbildung von Resonanzen über den gesamten Arbeitsbereich führt [Nie88]. Diese können bei Magnetostaten durch das Einfügen von Dämpfungsmaterial hinter der Membran nahezu vollständig unterbunden werden, bei klassischen Bändchen läßt sich eine Dämpfung

der Membran über die Aufhängung erreichen. Ein weiterer Nachteil bei Aluminium ist der Umstand, dass es im Betriebszustand aufgrund unterschiedlicher Temperaturverteilung auf der Membran zur Konzentration der Lorentzkraft an den Seiten des Bändchens kommt [Sah87,S.113], was in Resonanzen und damit hörbaren Verzerrungen im Klangbild resultieren kann.

Ein bauliche Sonderform des Magnetostaten stellt der Air Motion Transformer (A.M.T.) nach Oskar Heil [Hei72] dar. Der Unterschied zum Magnetostaten mit flacher Membran besteht darin, dass die rechteckige Kunststoffolie mit den darauf befindlichen Leiterbahnen gefaltet ist, was letztlich in einer quadratischen Form der Membran resultiert. Damit ergibt sich für den A.M.T. prinzipiell nicht der Vorteil der breiten horizontalen und schmalen vertikalen Schallabstrahlung. Ein weiter spektraler Arbeitsbereich von 2 kHz bis 40 kHz ermöglicht dennoch eine ausgeglichene horizontale und vertikale Richtcharakteristik. Die größere Membranfläche, die im Verhältniss zur einer ein Zoll Kalotte bei 4:1 liegt, sorgt dafür, dass sich der Strahlungswiderstand vor der Membran erhöht, was in einer Erhöhung des Wirkungsgrades des Chassis resultiert, was gegenüber der Kalotte bei gleicher elektrischer Leistung höhere Schalldruckpegel ermöglicht.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das oft als klar bezeichnete Klangbild von elektromagnetischen Treibern (siehe Zitat Einleitung) wohl verschiedene Ursachen hat. Ein gutes Impulsverhalten ergibt sich aus einem geringen Membrangewicht sowie dem direkten Antrieb der Membran. Weitere Ursachen können der weite spektrale Arbeitsbereich sowie die Bündelung des Schalls in der vertikalen Ebene aufgrund der geringen horizontalen Membranausdehnung sein. Für die konstante horizontale Richtcharakteristik lässt sich die weite vertikale Ausdehnung der Membran als Grund benennen. Die Ursache für die, im Vergleich zu elektrodynamischen Treiber, oftmals höheren Klirrwerte liegen in der erhöhten Resonanzanfälligkeit des Membranmaterials und der unzureichenden Dämpfung der Membran.

### **Weitere Wandlerprinzipien**

Es existiert noch ein Vielzahl anderer Möglichkeiten, hochfrequenten Schall zu erzeugen, von denen einige hier kurz aufgeführt werden sollen. Allen Verfahren ist ein recht exotischer Status gemein und keines von ihnen konnte sich kommerziell durch-

setzen, so wie es etwa bei dem elektrodynamischen Prinzip der Fall war.

Zu nennen wäre zuerst das elektrostatische Prinzip, bei dem sich ein stark polarisierte Membran (1-3 KV) zwischen zwei Elektroden synchron zum angelegten Audiosignal bewegt. Die Bewegung der Membran kommt durch die Kapazitätsänderung des elektrischen Feldes aufgrund konstanter Ladung zwischen Membran und Elektrode zustande, weshalb Elektrostaten oftmals als gerade oder gebogene Flächenstrahler auftreten. Als Vorteile des Prinzips sind das gute Impulsverhalten aufgrund des geringen Membrangewichtes sowie geringe Verzerrungen durch Frequenzintermodulationen aufgrund großer Abstrahlflächen und geringer Membranauslenkung zu nennen [Sah87, S.46]. Letzterer Fakt macht aber die Wiedergabe von tiefen Frequenzen schwierig, weiterhin kommt es durch große Strahlerflächen zur starken Schallbündelung bei hohen Frequenzen.

Ein weiteres Verfahren nutzt den piezoelektrischen Effekt, um hörbaren Schall zu erzeugen. Der Effekt besteht in der signalsynchronen Verformung von bestimmten Kristallen (z.B. Keramik-Quartzelemente). Diese wird auf eine Membran übertragen, die sich analog zum Signal bewegt, wobei aufgrund der geringen Größe der Verformung nur die Wiedergabe hoher Frequenzen möglich ist, welche nur eine geringe Auslenkung der Membran erfordern.

Als letztes Wandlerprinzip soll an dieser Stelle das des Biegewellenlautsprecher und der D.M.L (Distributed Mode Loudspeaker) behandelt werden. Der Unterschied zwischen beiden liegt in der Bauart. Tritt der Biegewellenlautsprecher meist in runder Bauform mit der vom elektrodynamischen Lautsprecher bekannten Schwingspule auf, so ist der D.M.L. meist flach und rechteckig. Das Antriebsprinzip beruht in beiden Varianten nicht auf dem Gedanken, eine Membran einem Kolbenstrahler anzunähern und sie im Ganzen anzutreiben, sondern sie so anzuregen, dass sich Biegewellen auf ihr ausbreiten und diese für eine Schallabstrahlung sorgen.

Ein Beispiel für einen Biegewellenlautsprecher ist der sogenannte Mangerwandler [Man99], bei dem eine mehrlagig bedämpfte Platte mit einem mittig angebrachten Schwingspulsystem so angeregt wird, dass sich Biegewellen für hohe Frequenzen nur um den Ort der Anregung ausbilden und die Biegewellen für tiefe Frequenzen sich bis zum Plattenrand ausbreiten. Vorteile sind dadurch eine geringe Richtwirkung auch bei hohen Frequenzen, sowie eine zeitgleiche Abstrahlung von allen spektralen

Anteilen, was die übliche Aufteilung auf mehrere Wege unnötig macht. Beim D.M.L. werden mehrere Anreger (Exciter) als Antriebe für die, besonders steif ausgeführte, Platte verwendet. Um eine gleichmäßige spektrale Abstrahlung zu erzielen, muss die Dichte der Eigenfrequenzen möglichst gleichmäßig und hoch sein, was sich durch Größe und Form der Platte, der Verteilung der Anreger sowie durch die Dichte und Dämpfung des Materials beeinflussen lässt (vgl. [Goe08]). Als Einführung in das Thema D.M.L. bietet das Paper von Ferekidis [Fer98] einen guten Einstieg.

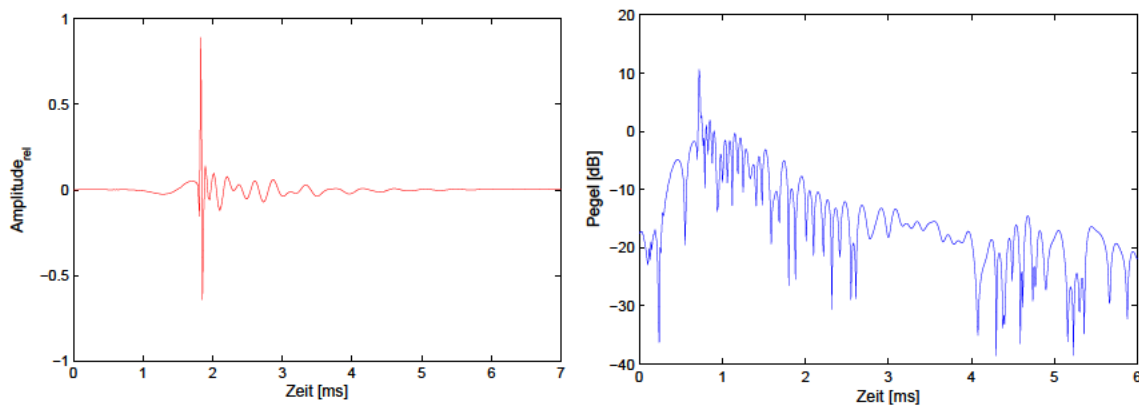
#### **2.1.4 Kennwerte von Hochtönlautsprechern**

Lautsprecher, als einzelne Chassis oder auch als Mehrwege-Varianten in einer Box, lassen sich durch eine Vielzahl an objektiven-technischen Parametern, seien es nun elektrische oder akustische Kennwerte, beschreiben. Die wichtigsten von ihnen sollen im folgenden Abschnitt näher erläutert werden, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Sie gelten natürlich auch für alle anderen Varianten von Lautsprechern, also auch für Tief- und Mitteltöner beziehungsweise entsprechende Kombinationen. Einen guten Überblick über dieses Thema bietet auch das Kapitel "Lautsprecher" im "Handbuch der Audiotechnik" [Wei08] sowie das "Arbeitsbuch für Lautsprecher" [Sah87].

#### **Impulsantwort**

Im elektrotechnisch systemtheoretischen Sinne ist ein Lautsprecher im verzerrungsfreien Betrieb ein lineares, zeitinvariantes System (LTI-System für engl.: linear, time-invariant), was bedeutet, dass seine Reaktionen auf Eingangssignale unabhängig von der Zeit sind und für Ein- und Ausgangssignale lineare Zusammenhänge gelten. Theoretische LTI-Systeme erfüllen zusätzlich die Kriterien der Kausalität (kein Ausgangssignal vor einem Eingangssignal) und der Stabilität, sofern das Eingangssignal einen endlichen Wertebereich aufweist. Reale LTI-Systeme, wie zum Beispiel Lautsprecher, Verstärker etc., erfüllen letztere Kriterien hingegen nicht unbedingt. Erst dadurch ist die Beschreibung des Übertragungsverhaltens mit Hilfe einer Impulsantwort (IR) möglich, die durch entsprechende digitale Filter invertiert werden kann. LTI-Systeme sind durch ihre Impulsantwort vollständig charakterisiert. Messtechnisch wird sie durch einen unendlichen kurzen Impuls mit unendlicher Energie

(Dirac-Impuls) am Eingang des Systems gewonnen, wobei die IR des Systems dem Ausgangssignal entspricht. Zur praktischen Messung der IR kann ein solcher Impuls durch einen endlicher Amplitude angenähert werden, verbreiter sind jedoch Signale die vorteilhaftere zeitliche und spektrale Eigenschaften aufweisen. Einen Überblick zu verbreiteten Messsignalen findet sich im entsprechenden Abschnitt Anregesignale im Kapitel Entzerrung. Aus der Impulsantwort eines Treibers lassen sich Informationen



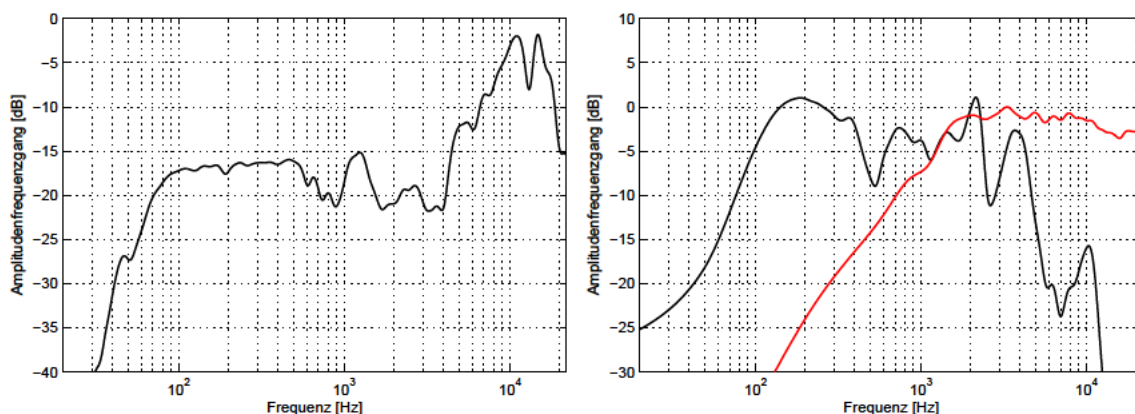
**Abbildung 2.7** – Links: Impulsantwort einer Aluminiumkalotte  
Rechts: Gleiche Impulsantwort in logarithmierter Darstellung

über sein zeitliches Verhalten, also sein Ein- und Ausschwingverhalten, erhalten. In der logarithmierten Darstellung läßt sich feststellen, ob hörbare Reflexionen in einer Impulsantwort enthalten sind (vgl. Abbildung 2.7, rechts).

## Amplitudenfrequenzgang

Der Amplitudenfrequenzgang gibt Aufschluß über das spektrale Verhalten des Treibers. Man erhält ihn durch zwanzigfache Logarithmierung des Betrages des komplexen Spektrums (deswegen auch Betragsfrequenzgang). Er ist das wichtigste objektive Kriterium eines Lautsprechers. Im Vergleich zu allen weiteren Parametern wirkt sich der spektrale Verlauf der Amplitude am ehesten auf den wahrgenommenen Klangbild beim Hörer aus [Kru05]. Er wird üblicherweise axial zur Lautsprechermembran im Fernfeld gemessen, womit die Messdistanz prinzipiell nur von der Ausdehnung des Chassis und der betrachteten Wellenlänge abhängt (siehe Kapitel drei, Abschnitt Anforderungen an die Versuchsumgebung). Der Amplitudenfrequenzgang eines Chassis gibt prinzipiell Aufschluß über die Grenzen des Übertragungsbereichs, welche bei -6 dB angesetzt werden. Um eine neutrale Wiederga-

be von Klangmaterial zu ermöglichen, sollte ein Chassis möglichst geringe Abweichungen von einem linearen Verlauf zwischen den Eckfrequenzen aufweisen. In Regielautsprechern sollten sie in einem Korridor von  $\pm 1\text{dB}$  liegen [Dic97, S.211]. Bei Lautsprechern im HiFi-Bereich werden durchaus größere Abweichungen in Kauf genommen, vor allem aufgrund der Konsumerpräferenzen [Kru05]. Der Amplitudenfrequenzgang kann weiterhin Aufschluss über baubedingte Resonanzen des Chassis geben. In reflexionsfreier Umgebung, in welcher auch die spätere Untersuchung der Hochtonlautsprecher erfolgen wird, ist der Amplitudenfrequenzgang eines Treibers das wichtigste Unterscheidungsmerkmal, da dieser den Klangeindruck von einem Treiber am meisten bestimmt. Unter Diffusfeldbedingung, wie sie annähernd in allen Räumen herrschen, wird das Klangbild eines Treibers zusätzlich durch die komplexe Lautsprecher-Raum-Interaktion verfärbt, weswegen der axiale Amplitudenfrequenzgang als objektives Vergleichskriterium nur noch wenig Aussagekraft besitzt. Näher liegt in diesem Fall eine spektrale Untersuchung der abgestrahlten Schallleistung, die auch einen Zusammenhang mit der Richtcharakteristik eines Lautsprechers herstellt. Breitbandige Verzerrungen von 1 dB im Amplitudenfrequenzgang sind nach Zwicker



**Abbildung 2.8** – Links: Amplitudenfrequenzgang eines 2-Wege-Regielautsprechers  
Rechts: Amplitudenfrequenzgänge eines Tiefmitteltöners und einer Kalotte  
verbaut in einer Schallwand. (alle 1/6-Oktav geglättet)

[Zwi93, S.292] im direkten Vergleich hörbar, wobei dieser nur unter reflexionsfreien Bedingungen möglich ist. Müller [Mül99, S.212] bestätigte die Aussage, seine Probanden hörten Anhebungen sowie Absenkungen von der Breite einer Dekade ab einem Minimum von 1 dB heraus. Bücklein [Büc81] kommt nach Hörtests zu dem Schluß, dass prinzipiell Anhebungen, vor allem breitbandige, im Betragsgang besser zu hören sind als Absenkungen mit gleicher Güte. Bei Untersuchungen zur Hörbarkeit von

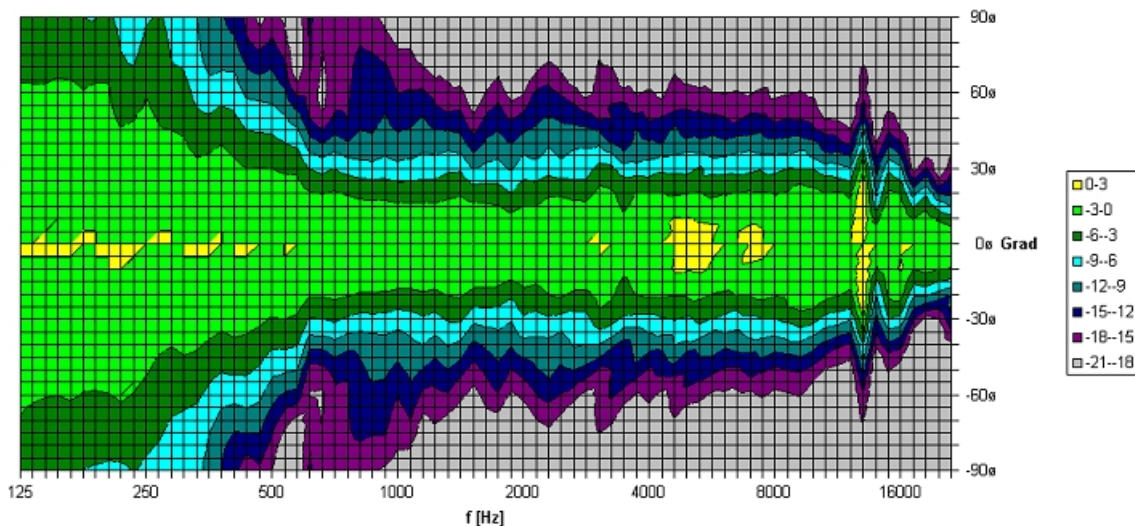


Kammfiltereffekten konnten von einigen Versuchspersonen in breitbandigen Signalen spektrale Einbrüche von weniger als 0,4dB wahrgenommen werden [Bru07], welche aus Signalverzögerungen von 0.1 ms bis 1 ms resultierten.

### **Phasenfrequenzgang und Gruppenlaufzeit**

Der Phasengang kann ebenfalls aus dem komplexen Spektrum der Impulsantwort bestimmt werden. Einzelne Chassis können als minimalphasige Systeme aufgefaßt werden [Goe08, S.473], was bedeutet, dass sie zu ihrem Amplitudengangsverlauf die kleinstmögliche Phasenveränderung nach Abzug des Allpass besitzen [OpS04]. Bei Mehrwegelautsprechern addieren sich die Phasengänge der einzelnen Treiber zusammen mit dem Phasenverhalten des Gehäuses zu einem wesentlich komplexeren Phasenverhalten, was in mehrfachen Drehungen der Phase um  $360^\circ$  im Bereich des hörbaren Spektrums resultieren kann. Nehmen diese Phasenänderungen nicht streng lineare Weise zu, führt dies zu Abweichungen von einer konstanten Gruppenlaufzeit. Diese entspricht der negativen Ableitung des Phasenganges nach der Frequenz und gibt die Laufzeit jeder Frequenz durch den Treiber an.

Leckschat [Lec92] schließt aus Hörversuchen, dass Gruppenlaufzeitveränderungen in üblichen Mehrwege-Lautsprecheranordnungen vor allem im tieffrequenten Bereich in Zusammenhang mit hohen Filterordnungen hörbar werden. Letztere treten bei Baßreflexgehäusen im Bereich der Rohrresonanz sowie beim Einsatz von Vorfiltern als Auslenkungsschutz auf. Müller [Mül99] stellt bei der Entzerrung von Lautsprechern mit gleichen Amplituden- und unterschiedlichen Phasenfrequenzgang fest, dass Phasenverzerrungen im tieffrequenten Bereich eher ins Gewicht fallen als Phasenverzerrungen im mittleren und hohen Spektrum und bestätigt somit Leckschats Feststellung. Laut Zwicker [Zwi93, S. 292] sind Änderungen der Phase nur in einigen Grenzfällen hörbar. Ein Fall liegt vor, wenn spektrale nah beieinander liegende Töne unterschiedliche Phasen aufweisen und sich damit eine hörbare Änderung des zeitlichen Verlaufs der Hüllkurve ergibt. Der zweite Fall tritt bei der teilweisen spektralen Maskierung von mittelfrequenten Tönen durch starke tieffrequente Signale ein, da bei der Wahrnehmung von tieffrequenten Tönen neben dem Amplitudenspektrum zusätzlich die Zeitfunktion des Schalldrucks eine Rolle spielt, was im Einklang mit Leckschat's und Müller's Schlüssen steht. Goertz [Goe08, S.474] meint in Bezug auf Lautsprecherkon-



**Abbildung 2.9** – Isobarenkurve eines Beschallungslautsprechers, unterschiedliche Farben markieren Gebiete gleichen Schalldrucks in der horizontalen Ebene (Quelle: [Goe08, S.485])

struktionen, dass unterschiedliche Phasenverläufe der Chassis zu einer unplausiblen Quelle führen, da es an einem akustischen Zentrum fehle. Bei der Konstruktion der Box soll deswegen versucht werden, dass alle Chassis gleichphasig abstrahlen.

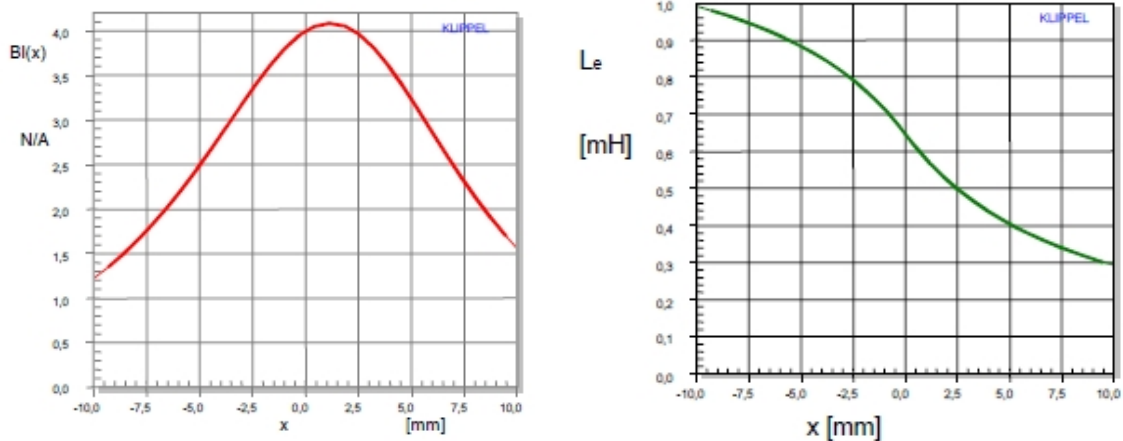
### Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik, im englischen Directivity genannt, gibt generell die Größe des Schalldruckpegel bei einer Frequenz in einer Ebene, also horizontal oder vertikal, des Chassis respektive einer Box wieder. Es existieren verschiedene Darstellungsmöglichkeiten, wobei das Polardiagramm wohl das bekannteste sein dürfte. Aufgrund der Nachteile des Polardiagramms bei der Darstellungsdimensionen (nur für eine Ebene und nur eine Frequenz), hat sich die Verwendung von Isobarenkurven oder Balloondaten zur Charakterisierung des Abstrahlverhaltens eines Lautsprechers mittlerweile durchgesetzt. Isobarenkurven ermöglichen den Zusammenhang zwischen Frequenz und winkelabhängigen Schalldruck in einer Ebene besser zu erfassen, Balloondaten ermöglichen eine gleichzeitige Darstellung der Schalldrücke sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Ebene in einem Polarkoordinatennetz. Die Richtcharakteristik ist für das wahrgenommene Klangbild abseits der Hauptachse eines Lautsprechers ein wichtiges Kriterium. Sie gibt Aufschluss darüber, wieviel von dem axialen Amplitudenfrequenzgang und dem damit verbundenen Klangeindruck des Treiber noch vorhanden ist. Weiterhin gibt sie einen Anhaltspunkt darüber, in welchen Maße

der Lautsprecher mit der Umgebung interagieren wird. Die Interaktion eines Treibers mit der Umgebung kann sich, aufgrund von reflexionsbedingten Überhöhungen und Auslöschungen im Amplitudenfrequenzgang, auf den Klangeindruck eines Lautsprechers auswirken. Dies läßt sich in der Praxis vor allem bei der Wiedergabe von tiefen Tönen beobachten. Diese werden von den Chassis bis zu  $ka = 1$  nahezu kugelförmig abgestrahlt und die daraus resultierenden Reflexionen an Begrenzungswänden führen zu einer Schalldruckerhöhung im Bereich tiefer Frequenzen, die sich wiederum in Form eines stärkeren Bass im Klangeindruck wiederfinden. In der Regel nimmt die Bündelung des abgestrahlten Schalls zur Hauptachse eines Lautsprecher mit der Frequenz zu (vgl. Abbildung 2.9), womit auch das Maß der Interaktion mit Umgebung abnimmt. Einzelwerte wie der Bündelungsgrad und das Bündelungsmaß geben das Verhältniss des Schalldruckpegels eines Chassis im Verhältniss zur Schallabstrahlung einer idealen Kugelquelle an, welches die selbe akustische Gesamtleistung in den Raum abstrahlt.

### **Verzerrungswerte**

Mit dieser Gruppe von Kenndaten werden bei Lautsprechern in der Regel die Klirr- bzw. Intermodulationsverzerrungen zahlenmäßig erfasst. Der Klirrfaktor gibt das Verhältniss der Leistung von harmonischen Oberwellen zu ihrem sinusförmigen Anregesignal an. Im Fall eines indizierten Klirrfaktors gibt die Zahl die Nummer der Oberwelle an, deren Leistungsverhältniss betrachtet wurde. Üblicherweise werden bei Lautsprechern immer die Verhältnisse der zweiten bis fünften Oberwelle sowie deren Summe festgestellt. Während der Klirrfaktor in Prozent angegeben wird, stellt der THD (engl. Total-Harmonic-Distortion) einen logarithmierten Pegel dar. In beiden werden nur nichtlineare, harmonische Verzerrungen erfasst, deren Ursache meist im Funktionsapparat des Lautsprecher liegen, wie im Abschnitt "Grundlagen" bereits kurz angesprochen. Verzerrungen werden bei hoher Belastung des Chassis verursacht durch das auslenkungsabhängige Verhalten der antreibenden Lorentzkraft, der Federsteife (bestimmt durch die Steife der Einspannung) und der Schwingspuleninduktivität (vgl. Abbildung 2.10, rechts). Das Messverfahren des Klirrfaktors erfasst allerdings nicht alle Parameter, mit denen subjektiv Nichtlinearitäten beschrieben werden können. Problematisch ist unter anderem die fehlende Erfassung von nichtharmonischen



**Abbildung 2.10** – Links: Abhängigkeit zwischen Lorentzkraft und Membranauslenkung. Rechts: Abhängigkeit zwischen Membranauslenkung und Spuleninduktivität.

(Quelle: [Kli01])

Verzerrungen, wie sie durch Intermodulation von Tönen entstehen, und welche als wesentlich störender empfunden werden.

## Impedanzen

Die elektrische Impedanz eines Chassis ist eine weitere komplexe Größe. Sie gibt das spektrale Widerstandsverhalten des Treibers wieder und ist damit bei Konstantspannungsanregung ein Maß dafür, wieviel Strom vom Verstärker "gezogen" wird. Bei elektrodynamischen Chassis kommt es einmal im Bereich der mechanischen Resonanzfrequenz aufgrund des hier gelegenen Schnellemaximums der Schwingspule zu erhöhter Gegeninduktion und damit zu einem Anstieg der Impedanz. Zum zweiten findet sich ein Impedanzanstieg im hochfrequenten Bereich, wo sich der induktive Widerstand der Spule bemerkbar macht. Bei Bändchenhohtönern ist in der Regel kein Impedanzanstieg im Bereich der mechanischen Resonanzfrequenz zu beobachten, was auf eine starke Dämpfung zum Schutz der Membran zurückzuführen ist. Der weitere Impedanzverlauf ist üblicherweise recht flach bis hin zu hohen Frequenzen, wo eine kapazitive Impedanz meist für eine leichte Erhöhung sorgt (siehe Anhang, Abschnitt Impedanzmessungen).

## 2.2 Frequenzweichen

Da die meisten Chassis nicht in der Lage sind, das gesamte wahrnehmbare akustische Spektrum von 20 Hz bis 22 kHz akkurat zu reproduzieren, besteht die Notwendigkeit, verschiedene Chassis für die Wiedergabe zu verwenden. Jedem Treiber kann so der Frequenzbereich zugeordnet werden, in welchem er die besten Übertragungseigenschaften zeigt, also möglichst geringe Abweichungen von einem linearen Amplitudenfrequenzgang, geringer Verzerrungswerte und ausgeglichene Richtcharakteristik. Über spektrale Überschneidungen zwischen den Arbeitsbereichen einzelner Chassis und vor allen um Schäden an Treibern durch zu hohe Verstärkerleistung zu vermeiden, werden Lautsprecherkombinationen in der Regel mit Frequenzweichen "vorge trennt". Sie liegen damit in der Signalkette zwischen Leistungsverstärker und Chassis. Frequenzweichen stellen Netzwerke aus Tief-, Band- und Hochpassfiltern dar, welche sowohl passiv, das heißt ohne zusätzliche Verstärkung, als auch aktiv, also mit einer zusätzlichen Verstärkung der einzelnen Wege, ausgeführt sein können. Passive Frequenzweichen stellen meist, aus Widerständen, Kondensatoren und Spulen gefertigte, analoge Filter erster oder zweiter Ordnung dar, mit einer Flankensteilheit von 6 dB/Oktave (1. Ordnung) bzw. 12 dB/Oktave (2. Ordnung). Bei aktiven Frequenzweichen werden zur Realisierung zusätzlich Operationsverstärker eingesetzt, höhere Filterordnungen (bis zur vier) und daraus resultierende höhere Flankensteilheiten (24 dB/Oktave) sind auch aufgrund kleinere Bauteile realisierbar.

Aktive Frequenzweichen lassen sich sowohl analog als auch digital mit entsprechenden FIR- oder IIR-Filter realisieren. Gerade digitale Weichen, sogenannte Controller, mit FIR-Filter haben den Vorteil, dass der Frequenz- und Phasenverlauf am Ausgang nahezu frei wählbar ist und nur durch die maximale Anzahl der Filterkoeffizienten und die Laufzeitverzögerung beschränkt wird. Nachteile wie Impedanzrückwirkungen oder hohe Verlustleistungen durch Spulen treten hier nicht mehr auf.

## 2.3 Digitale Filter

Digitale Filter stellen digitale Filterrealisierungen von bereits bekannten Typen wie Tief-, Hoch- und Bandpässen (oder sperren) dar, welche erhebliche Möglichkeiten bei der Wahl der Zielamplituden- und phasenfrequenzgänge bieten, allerdings auch gewissen Grenzen unterworfen sind. Sie stellen lineare, zeitinvariante Systeme, die vollständig durch eine Impulsantwort beschreibbar sind. Die Ausgangswerte von Digitalfiltern errechnen sich prinzipiell in Abhängigkeit von Eingangs- und Ausgangswerten und sind in Gleichung ?? dargestellt.

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} b_k x(n-k) - \sum_{k=1}^M a_k y(n-k) \quad (2.7)$$

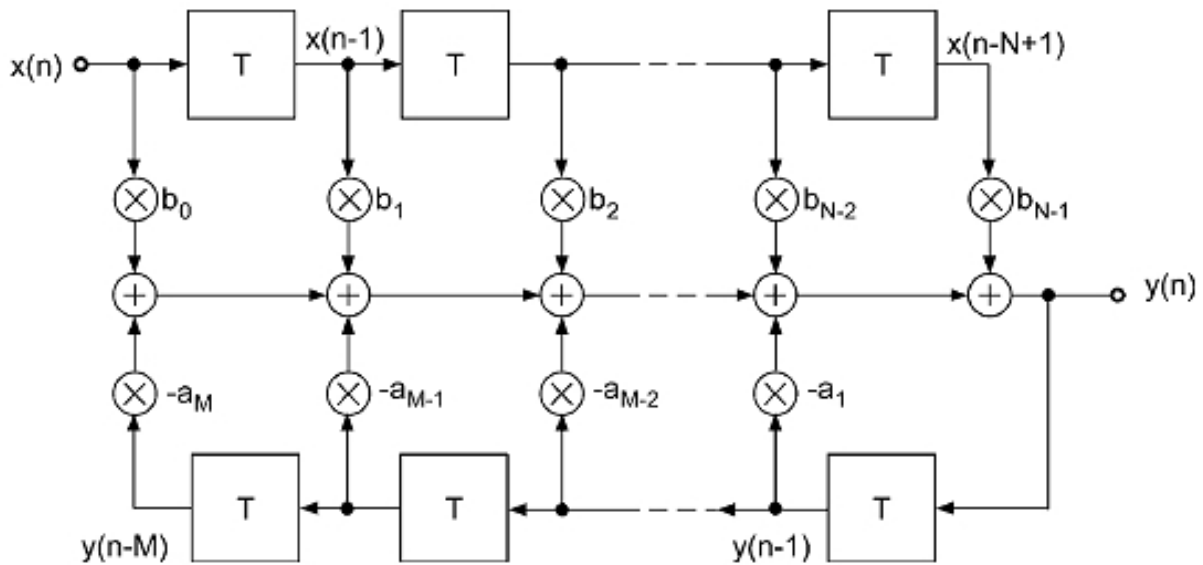
Aus der Impulsantwort eines digitalen Filters lassen sich mit Hilfe der FFT sowohl sein Amplitudenfrequenzgang- als auch sein Phasenfrequenzgang ableiten. Im Zeitbereich ist sie durch den Quotienten aus Ausgangs- und Eingangswerten beschrieben, in Gleichung 2.8 ist sie exemplarisch für einen Filter mit zwei nichtrekursiven Elementen dargestellt.

$$h(n) = b_0 \delta(n) + b_1 \delta(n-1) + b_2 \delta(n-2) \quad (2.8)$$

Die Filterordnung, wie man sie auch von den analogen Filter kennt, ergibt sich bei digitalen Filter aus dem Zweig (rekursiv oder nicht-rekursiv) mit der höheren Koeffizientenzahl. Dessen Anzahl von Filterkoeffizienten stellt die Ordnungszahl des Filters. Anhand der Gleichung und theoretischen Funktionsweise lassen sich zwei Arten von Filter charakterisieren, solche mit endlicher (FIR-Filter, Finite Impulse Response) und solche mit unendlicher Impulsantwort (IIR-Filter, Infinite Impulse Response).

### FIR-Filter

Im systemtheoretischen Sinne verwenden FIR-Filter nur Nullstellen in der komplexen Ebene zur Beschreibung ihres Betrags- und Phasenganges. Sie stellen prinzipiell einen Sonderfall der später besprochenen IIR-Filter dar, dass heißt sie arbeiten ohne Rückkopplung (oder mathematisch Rekursion, daher der Name), was ihnen eine endliche Impulsantwort sowie ein immer stabiles Verhalten verleiht. Zu den Vorteilen von FIR-Filter zählt, dass ihr Betrags- und Phasengang unabhängig voneinander



**Abbildung 2.11** – Schema eines digitalen Filters mit  $N-1$  nichtrekursiven Koeffizienten (oben) und  $M$  rekursiven Koeffizienten (unten) (Quelle: [Zöl08])

einstellbar ist und das mit ihnen linearphasige Filter, also Filter mit einer konstanten Gruppenlaufzeit, realisiert werden können. Nachteilig sind die im Vergleich zu IIR-Filtern höheren Zahlen an Koeffizienten, die für gleiche Flankensteilheit benötigt werden, sowie die hohen Grundlaufzeiten, die sich bei einer linearphasigen Zielfunktion ergeben. Die Impulsantwort von nicht-rekursiven Filter stellen die Koeffizienten  $b_0 \dots b_{N-1}$  in 2.11 dar. Der obere Zweig in dieser Abbildung stellt damit den FIR-Teil des Filters dar. Wöllte man mit dieser Darstellung einen rein nicht-rekursiven Filter erzeugen, so wären die Beträge der Koeffizienten  $a_1 \dots a_M$  gleich 0.

## IIR-Filter

IIR-Filter benutzen sowohl Pole als auch Nullstellen in der komplexen  $z$ -Ebene zur Definition ihres Betrags- und Phasenganges. Aufgrund der verwendeten Rückkopplung von Ausgangswerten können sie jedoch auch eine unendliche Impulsantwort sowie Instabilität aufweisen. Ihr Vorteil gegenüber FIR-Filter ist, dass sich mit weniger Koeffizienten hohe Flankensteilheiten erreichen lassen. Allerdings ist das Phasenverhalten immer abhängig vom gewählten Betragsfrequenzgang. Allein mit einem IIR-Filter zweiter Ordnung, einer sogenannten Biquadstruktur, können alle Arten von in der Audiotechnik verwendeten Equalizern, parametrisch oder mit fester Breite, realisiert werden [Zoe08, S.829]. Der untere Teil der Abbildung 2.11 stellt den rein rekursiven Teil dar.

### 2.3.1 Digitale Filter in der Lautsprecherentzerrung

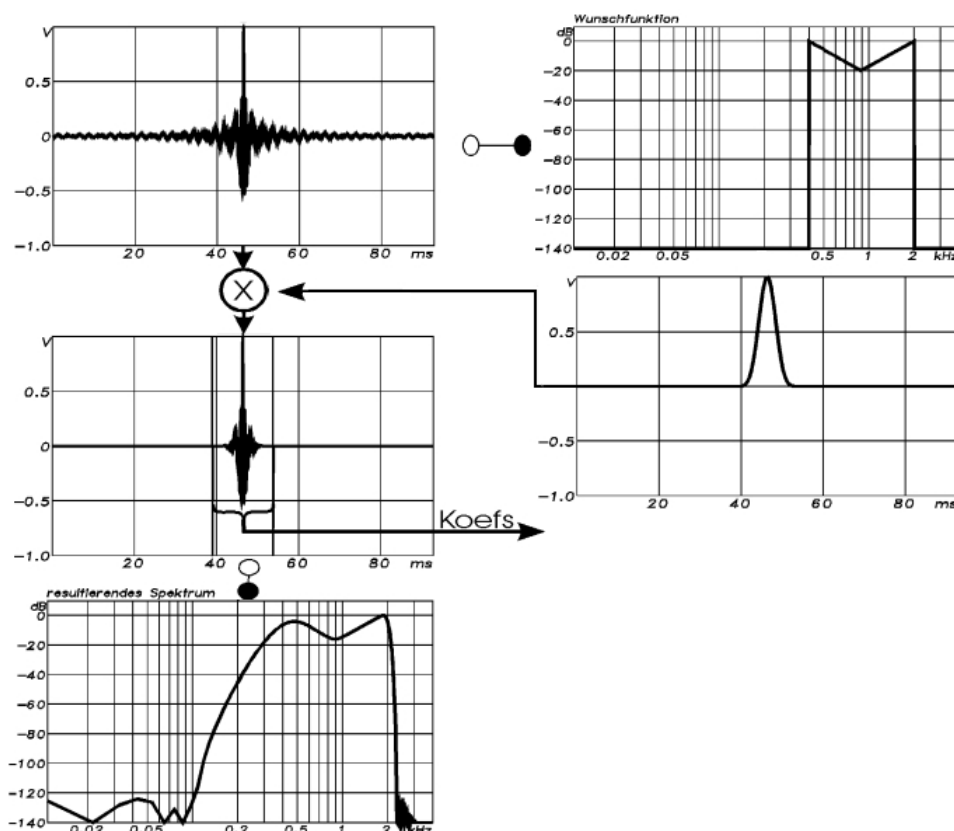
Zur Entzerrung von Lautsprecher mit digitalen Filtern eignen sich aufgrund der genannten Eigenschaften nur FIR-Filter. Mit Hilfe der Impulsantworten von Lautsprechern, welche in Fernfeldmessungen gewonnen werden, lassen sich Bandpässe mit Hilfe von nicht-rekursiven Filtern so gestalten, dass diese die Abweichungen des Chassis im Amplituden- und Phasenbereich kompensieren. Die Kompensation soll im Fall dieses Versuches sogar soweit gehen, dass die resultierenden Amplituden- und Laufzeitspektren der Hochtonlautsprecher perzeptorisch nicht mehr zu unterscheiden sind.

Die Schritte zur Gewinnung der FIR-Filterkoeffizienten aus den IR der Chassis sollen hier zusammengefasst und kurz erläutert werden. Ausgangspunkt sind die Grenzfrequenzen des Arbeitsbereiches, in welchem der zu entzerrende Treiber später verwendet werden soll. Da in der Regel nur ein Chassis für die Wiedergabe von Frequenzen bis zur oberen Abtastfrequenz verwendet wird, liegt eine Verarbeitung der unteren Signalwege, also der für Tief- und eventuell Mitteltöner, bei entsprechend verringerten Abtastraten nahe (Multiratenverarbeitung). Durch das Verringern der Abtastrate steigt zwar die Durchlaufzeit des Filter an, die Anzahl der Rechenoperation sinkt allerdings in einem weit größerem Maße, so dass die so benötigte Rechenzeit um das Quadrat des neuen Abtastratenverhältniss sinkt [Mül99, S.73]. Einen Nachteil stellt das Absinken des SNR pro Abtastfrequenzhalbierung um 3dB dar. Hat man allen Treibern eine, dem Arbeitsbereich genügende, Abtastrate gewählt, wird ein Bandpass mit den festgelegten Grenzfrequenzen des Treibers per IFFT in den Zeitbereich transformiert, und mit einem Fenster multipliziert, dass der Länge des späteren FIR-Filter entspricht (siehe Abbildung 2.12). Dabei ist die Wahl des Fenster recht entscheidend, dass Kaiser-Bessel Fenster hat sich für die Koeffizientengenerierung von Entzerrfiltern als praktisch erwiesen [Mül99, S.160]. Bei ihm lässt sich zum einem der Energiegehalt aller Nebenmaxima im Vorfeld festlegen und es besitzt weiterhin ein schmales Hauptmaximum, was für große Flankensteilheiten wichtig ist, wie sie für IR's benötigt werden. Die Länge der Fensters hängt von der tiefsten Frequenz ab, die es zu beeinflussen gilt. Die Fenstergröße sollte mindestens eine halbe Wellenlänge haben, möchte man tiefe Absenkungen ausgleichen sollte die Fensterlänge mindestens vier bis fünfmal so groß sein [Lin09]. Nach Wahl der Abtastrate, Transformation des Bandpasses in



den Zeitbereich und Multiplikation mit einem ausreichend langen Fenster, muss das Produkt wieder zurück in den Frequenzbereich transformiert werden und durch das Spektrum des Treibers dividiert werden. Der Bandpass besitzt damit den invertierten Frequenzgang des Treibers, bei einer Reihenschaltung von Filter und Chassis erhält man den anfangs gewünschten Frequenzgang [Mül99, S.163]. Diesem kann nun das gewünschte Phasenverhalten (linear- oder minimalphasig) aufprägt werden.

Die Anzahl der Koeffizienten ist aufgrund des begrenzten Speichers im Controller be-



**Abbildung 2.12** – Schematische Darstellung der Koeffizientengewinnung aus Wunschspektrum und Fensterung [Mül99, S.153]

schränkt. Die bei der Entzerrung verwendete Frequenzweiche stellt vier FIR-Filter pro Eingangskanal zur Verfügung, von denen jeder eine maximale Länge von 500 Koeffizienten haben kann. Zur Erhöhung der Koeffizientenzahl in einem Signalweg können diese zusammengeschaltet werden (FIR-Multipath-Option). Die Grenzfrequenz der Zwei-Wege Lautsprecher in unserem Versuch soll bei 2 kHz liegen, womit der Weg des Tiefmitteltöners theoretisch mit einer Abtastrate von 4 kHz (Nyquist-Theorem) betrieben werden kann. In der Praxis wird später eine Abtastfrequenz von 6 kHz gewählt, da die Flankensteilheit der Antialiasingfilter nicht unendlich ist.

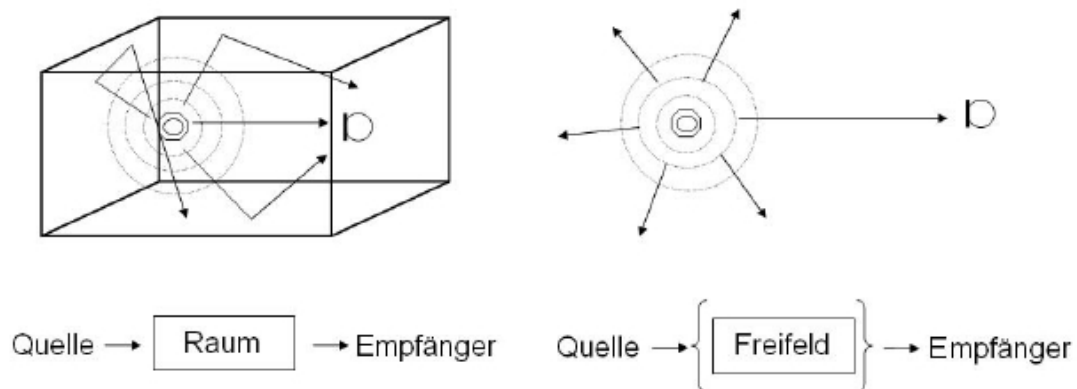
## 2.4 Binauraltechnik

Aufnahme- und Wiedergabesysteme der akustischen virtuellen Realität ermöglichen das Design psychoakustischer Hörversuche, die bisher nicht ohne Einschränkungen möglich waren, da in der Realität der instantane Vergleiche akustischer Situationen, zum Beispiel der direkte Vergleich mehrerer Lautsprecher an einer Abhörposition, aus praktischen Gründen kaum umsetzbar ist. Binauralsynthese ist neben der (perfekten) Wellenfeldsynthese und Ambisonics ein Verfahren zur Reproduktion realer Schallfelder, welches eine potentiell plausible, eventuell sogar authentische, Simulation einer prinzipiell beliebigen akustischen Situation ermöglicht. Von den drei genannten Verfahren ist es derzeit das einzig Praktikable, dass dies auf leistungsfähigen Systemen vermag. Der Gedanke besteht darin, dass bei der Aufnahme und Reproduktion des komplexen Frequenzgang am Trommelfell, beim Hörer diesselben perzeptiven Empfindungen hervorgerufen werden, als wenn dieser sich in der realen Szene befinden würde [Møl92]. Ein binaurales Messinstrument, ein sogenannter Kunstkopf oder Head-and-Torso-Simulator (HATS), welcher dem Aufbau des menschlichen Kopfes und, im Falle eines HATS, des Oberkörpers nachempfunden ist, ermöglicht mit Mikrofonen am Eingang der Ohrkanäle die Aufnahme solcher binauralen Signale. Sie enthalten die für das Richtungshören wichtigsten Eigenschaften eines akustischen Signals, namentlich Pegel- und Laufzeitdifferenzen zwischen den Schalldruckverläufen an beiden Ohren. Geht man davon aus, dass es sich bei der so festgehaltenen akustischen Situation um ein lineares, zeitinvariantes System, so ist deren Hörbarmachen, oder auch Auralisation, durch Faltung mit nachhallfreiem Quellmaterial ohnes weiteres möglich.

### 2.4.1 Akquise binauraler Impulsantworten

Raumakustische Situationen, wie die in Abbildung 2.13, lassen sich ebenfalls als LTI-Systeme (vgl. Kapitel Grundlagen Abschnitt Kennwerte) betrachten und damit durch eine entsprechende Impulsantwort charakterisieren. Der anregende Impuls kann dabei wieder mit einem der im Abschnitt "Anregungssignale" erwähnten Signalvarianten realisiert werden. Im Gegensatz zur einkanaligen Impulsantwort eines Lautsprechers, hat die sogenannte binaurale Impulsantwort BIR (engl. Binaural Impulse

Response) oder auch kopfbezogene Impulsantwort HRIR (engl. Head Related Impulse Response) der Kunstkopfmessung zwei Kanäle, entsprechend den Systemantworten des linken und des rechten Aussenohrs. Akustische Szenen im Freifeld, wie die in



**Abbildung 2.13** – Zwei akustische Szenen, links: Diffusfeldsituation, rechts: Freifeldsituation (Quelle: [Lin06])

in Abbildung 2.13, rechts dargestellte, werden durch BIR's vollständig beschrieben. Hier kommt es zu keinerlei Schallreflexionen in der Umgebung, auf den Hörer wirkt allein der von der Quelle abgestrahlte Direktschall. Am Außenohr, Kopf und Torso unterliegt die Wellenfront des Direktschall Beugungs- und Reflexionsphänomenen, welche abhängig von der Einfallrichtung des Schall sind, also vom Standort der Quelle sind. Durch eine räumliche Trennung der Ohren voneinander kommt es zu Laufzeit- und Pegelunterschieden zwischen den Signalen an den Trommelfellen, welche eine Bestimmung von Richtung und Abstand der Schallquelle ermöglichen. Bei akustischen Szenen in Räumen addieren sich zu dem Direktschall der Quelle auch noch Reflexionen an Raumwänden und Begrenzungsflächen, welche zeitverzögert und aus verschiedenen Richtungen am Ohr des Hörers eintreffen. Bei der Messung einer binauralen Impulsantwort werden diese Reflexionen mit erfasst, man spricht jetzt von einer binauralen Raumimpulsantwort BRIR (engl. Binaural Room Impulse Response), in der sowohl die Charakteristik der Quelle als auch die des Raumes codiert sind. Werden BIR, HRIR oder BRIR mit Hilfe der Fouriertransformation in den spektralen Bereich überführt, werden sie als HRTF (engl. Head Related Transfer Function) im Falle einer Freifeldmessung und BRTF (engl. Binaural Room Transfer Function) im Falle einer Messung in Räumen bezeichnet.

Während frühe Kunstkopfsysteme binaurale Impulsantworten aufgrund fehlender

Automatisierung und Speicherkapazität meist nur für eine horizontale Kopfstellung aufgezeichnet haben, erlauben mittlerweile in akademischen Kontexten gefertigte Prototypen die automatisierte Aufzeichnung für verschiedene Kopfstellungen. Eines dieser Systeme ist der am Fachgebiet entwickelte FABIAN Head and Torso Simulator, der für die binauralen Messungen im Laufe des Versuches auch verwendet wurde. Sein, in zwei Freiheitsgraden bewegliches Halsgelenk, erlaubt eine Rotation und eine Elevation des Kunstkopfes, was es möglich macht, BIR oder BRIR innerhalb von natürlichen Kopfbewegungen eines Menschen aufzuzeichnen.

### **2.4.2 Dynamische Binauralsynthese**

Die Auralisation oder Hörbarmachung der Impulsantworten erfolgt in der Regel über Kopfhörer. Nur diese Methode erlaubt eine ausreichende Übersprechdämpfung zwischen linken und rechten Wiedergabekanal. Die gewonnenen binauralen Raumimpulsantworten werden mit Quellmaterial gefaltet (man spricht auch von rendern), dass im Falle von BRIR nachhallfrei sein muss. Die Notwendigkeit ergibt sich daraus, dass die räumliche Umgebung ja bereits vollständig in den BRIR's festgehalten ist somit die zusätzliche, künstliche Verräumlichung des Klangmaterial durch Hallgeräte nicht notwendig ist. Hat man Impulsantworten einer Quelle im Freifeld aufgezeichnet (BIR), zum Beispiel in einem reflexionsarmen Raum, lässt sich jegliches Klangmaterial, also auch fertig produziertes Musikmaterial, mit diesen falten.

Für den Fall, dass Impulsantworten für mehrere Kopfpositionen aufgezeichnet wurden, muss bei der Wiedergabe der Faltungsalgorithmus, auch Renderer genannt, Kenntniss über die Stellung und Position des Kopfes erhalten. Dies kann zum Beispiel mit einem Headtracker, einem System zur Bestimmung der Kopfhaltung im Raum, erfolgen. Der Tracker wird auf eine Position kalibriert (meist Blick nach vorn) und sendet kontinuierlich Positionsdaten an den Renderer, der entsprechend der festgestellten Position die binaurale Impulsantwort für diese Position auswählt und das Quellmaterial mit dieser faltet.

### **2.4.3 Vorteile für die Evaluierung von Lautsprechern**

Der Vergleich von verschiedenen Lautsprechern entweder hinsichtlich der Präferenz von Nutzern oder dem Klangbild stellte Entwickler schon lange vor Probleme. Es wurden zum Beispiel Verzerrungen der Versuchsergebnisse durch unterschiedliche Platzierung der Lautsprecher [Oli94], Rauminteraktionen [Too06] oder einfach durch ungeübte Versuchspersonen [Too85] beobachtet. Den ersten zwei genannten Problemen kann mit einer Virtualisierung der Lautsprecher durch binaurale Vermessung und einer Wiedergabe über Kopfhörer gut entgegengewirkt werden [Too91]. Bei der Vermessung kann eine gleichbleibende Positionierung der Lautsprecher sichergestellt werden, während Rauminteraktionen durch eine Aufnahme der IR's in reflexionsarmen Räumen oder durch entsprechende Fensterung vermieden werden können. Einen Einblick in die Verwendung von Binauraltechnik bei der Evaluierung von Lautsprechern bietet [Hie08] und [Mül99].

# Kapitel 3

## Entzerrung der Lautsprecher

Im diesem Kapitel steht die Kompensation der Amplituden- und Phasenspektren der Hochtonlautsprecher im Mittelpunkt. Nach einer Einführung der sechs verschiedenen Chassis folgt eine ausführliche Beschreibung der Messumgebung. Daran schließt sich die Fernfeldvermessung der Lautsprecher an, deren Ergebnisse später die Grundlage für die Kompensationsfilter bilden werden. Nach der Generation der Filter soll mit einer Evaluationsmessung deren korrekte Funktionsweise sichergestellt werden.

### 3.1 Vorstellung der Hochtonlautsprecher

Die Kriterien, anhand welcher die sechs Hochtonlautsprecher ausgewählt wurden, waren das elektroakustische Wandlerprinzip, das Membranmaterial sowie die Größe der Membran. Bis auf den X-ART sind alle Hochtonchassis sowie der Tiefmitteltöner einzeln kommerziell erhältlich.

Die Auswahl der Chassis deckt in den drei genannten Parametern nahezu alle Varianten von Hochtonlautsprechern ab, die derzeit in Lautsprecherboxen, unabhängig von Verwendungszweck, Bestückung und Preis, verbaut werden. Das Fehlen eines Chassis auf Basis des elektrostatischen Prinzips sowie das des Biegewellenschwingers in diesem Vergleich läßt sich mit der geringen Verbreitung und der Nichtverfügbarkeit dieser Treiber als einzelne Hochtonchassis begründen. Das Fehlen von Kompressionstreibern und entsprechenden Hörnern ist mit deren ausschließlicher Verwendung im Bereich von PA-Lautsprechern zu begründen. Eine Übersicht der Treiber findet sich in Tabelle 3.1. Die drei elektrodynamischen Hochtöner entsprechen typischen Chassis,

| Name                   | Membran-<br>form    | Antriebs-<br>prinzip  | Membran-<br>material     | Membran-<br>ausdehnung | Schalldruck<br>[dB] |
|------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| A.D.A.M<br>X-Art       | planar,<br>gefaltet | magneto-<br>statisch  | Kunststoff               | 2,8 x 3,5cm            | 92                  |
| Exponential<br>ARL 90  | planar              | magneto-<br>statisch  | Aluminium                | 4 x 0,5cm              | 92,5                |
| Vifa<br>D25 AG35       | Kalotte             | elektro-<br>dynamisch | Aluminium                | Ø2,5cm                 | 90                  |
| Vifa<br>XT 25 GT 30    | Ringstrahler        | elektro-<br>dynamisch | Gewebe                   | Ø2,6 cm                | 91,5                |
| Exponential<br>RT7-Pro | planar              | magneto-<br>statisch  | Kunststoff<br>(Polyimid) | 11,6 x 2,4 cm          | 100                 |
| SEAS<br>Excel T25      | Kalotte             | elektro-<br>dynamisch | Gewebe                   | Ø2,6 cm                | 91                  |
| Eton<br>5-880/25       | Konus               | elektro-<br>dynamisch | HexaCone<br>(Polyaramid) | Ø14 cm                 | 87                  |
|                        |                     |                       |                          |                        |                     |

**Tabelle 3.1** – Übersicht der verwendeten Chassis

wie sie heute sowohl in günstigen Konsumerlautsprechern als auch in hochwertigen Monitoren eingesetzt werden. Der Ringstrahler ist zum Beispiel ein Markenzeichen der Firma Lipinski und Aluminiumkalotten werden unter anderem in allen Monitoren der Firma Genelec in allen Preisklassen verwendet. Die drei elektromagnetischen Hochtöner stellen in gewisser Form Exoten dar. Das Bändchen und der Magnetostat werden in einer Manufaktur hergestellt und einzeln verkauft. Sie finden in dieser Form ausschließlich in Lautsprecherboxen Verwendung, welche im Heimbereich nach Anleitungen aus bekannten Fachmagazinen selbst gebaut werden. Insbesondere der Magnetostat mit seiner aus Aluminium bestehen 20 cm mal 12 cm großen Frontplatte würde aufgrund der ungünstigen Reflexionseigenschaften des schallharten Materials so wohl kaum in einem kommerziellen Gehäuse Anwendung finden. Der X-Art Hochtöner wird ausschließlich in Lautsprechern der Firma A.D.A.M. Audio Professional bzw. der Firma Raumfeld verbaut.

### **3.2 Anforderungen an Versuchsumgebung und -aufbau**

Um sicherzustellen, dass mit den monauralen Messungen nur die Impulsantworten der in Schallwand verbauten Chassis erfasst werden, müssen beim Versuchsaufbau bestimmte idealisierte Bedingungen herrschen. Um die für die Entzerrung wichtigen nachhallfreien Impulsantworten zu erhalten, müssen die Messungen in einer reflexionsarmen Umgebung durchgeführt werden. Um Interaktionen, des Hochtönerschallfeldes mit der Schallwand zu verhindern, wie sie mehr oder weniger bei allen Boxen auftreten, müssen die Hochtontreiber in einer für ihre Dimensionen quasi-unendliche Wand verbaut werden. Die recht unterschiedlichen Dimensionierungen der Treiber machen dabei einen Wechselrahmen notwendig, der sich am größten Treiber, dem Magnetostaten mit einer Frontplattengröße von 24 cm mal 14 cm, orientiert. Näheres zur Schallwand findet sich im betreffenden Abschnitt. Weiterhin muss der Punkt für die Entzerrung sowohl im Fernfeld der Treiber als auch an einer Position liegen, der bei der späteren binauralen Vermessung einer typischen Abhörentfernung in einem Stereodreieck entspricht. Als Ausgangspunkt für die Abmessungen des Stereodreiecks wurde die Anforderungen der DIN 15996 "Grundsätze und Festlegungen für Arbeitsplätze in Film-, Video- und Rundfunkbetrieben" als Vorlage benutzt. Die-



se sieht für die Seitenlänge des gleichseitigen Dreiecks linker Laustsprechern-rechter Lautsprecher-Hörerposition Entfernungen zwischen  $b = 3m$  und  $b = 4.5m$  vor. Die entspricht einem Lot mit einer Länge zwischen  $l = 2,7m$  und  $l = 3,6m$  (vgl. Abbildung 4.1). Der untere Grenzwert von  $2,7m$  wurde als Distanz für die monaurale Messung gewählt, da an diesem Punkt alle Fernfeldbedingungen (siehe Abschnitt "Nahfeld- und Fernfeldevaluation") erfüllt sind.

### 3.2.1 Reflexionsarmer Raum

Der reflexionsarme Vollraum des Instituts für Strömungsmechanik und Technische Akustik hat ein Volumen von  $1850m^3$  und wird in der Transversalebene durch ein Netz aus Stahlseilen getrennt, welches den Raum begehbar macht und die Platzierung von leichten Messaufbauten ermöglicht. Zusätzlich waren während unseres Versuches zwei, auf jeweils vier Stahlrohren lagernde, Metallgitter in dem Raum installiert, auf denen zum einem die Schallwand und zum anderen das Messmikrofon respektive der HATS positioniert wurden. Die Grenzfrequenz des Raumes ergibt sich aus der Länge der Absorptionskeile an den Wänden ( $\sim 1,20m$ ) und wird mit  $63Hz$  angegeben. Theoretisch ist bis zu dieser Frequenz die Freifeldmessung einer Quelle ohne störende Einflüsse möglich. Unterhalb dieser Frequenz kommt es zur Ausbildung von Raummoden, welche die Messergebnisse verzerren können. Da von dieser Umgebungseinschränkung die Fernfeldmessungen des Tiefmitteltöners beeinträchtigt werden wird, wird dessen Impulsantwort zusätzlich im Nahfeld gemessen, um eine bessere Aussage über sein Verhalten bei tiefen Frequenzen zu erhalten.

Um hochfrequente Reflexionen an Metallgitter, Mikrofonständer, Vorverstärker oder Kabeltrommel zu unterbinden, wurden diese zusätzlich mit Schaumstoffmatten eingehüllt.

### 3.2.2 Quasi-unendliche Schallwand

Die verwendete Schallwand hatte eine Größe von einem Meter in der Breite und zwei Metern in der Höhe, eine Abbildung findet sich im Anhang im Abschnitt Entzerrung. Der Begriff unendlich bedeutet hier, dass in der Wand theoretisch auch die tiefsten Frequenzen eines, nach hinten offenen, Chassis wiedergegeben werden können, ohne dass es zu Interaktionen zwischen den nach vorn und nach hinten abge-

strahlten Schallwellen kommt. Die Wand verhindert bis zu einer gewissen Frequenz einen akustischen Kurzschluss des Treiber, in Folge dessen es zu Auslöschungs- oder Überhöhungsvorgängen kommt, deren Auswirkungen sich im axial gemessenen Betragsspektrum wiederfinden. Bei einer unteren Grenzfrequenz von 2 kHz, welche für die Arbeitsbereiche aller Hochtöner gewählt wurde, entspricht dies einer Wellenlänge von  $\lambda = 17,2\text{cm}$ .

Nach Sahm [Sah87, S.178] errechnet sich die untere Grenzfrequenz, für welche die Wand im Bezug auf das Chassis noch als unendlich betrachtet werden kann, aus Gleichung 3.1.

$$f_{gr} = \frac{172}{b_{br}} \quad b_{br} - \text{Wandbreite}[m] \quad (3.1)$$

Sahm gibt diesen Zusammenhang für den Fall einer quadratischen Schallwand mit zentral montierten Chassis an. Für die horizontale, also kürzere, Ausdehnung der Schallwand ergäbe sich somit eine Grenzfrequenz von  $f = 172\text{Hz}$ , womit eine Interaktion der Wand mit dem Schallfeld der Hochtöner ausgeschlossen werden kann.

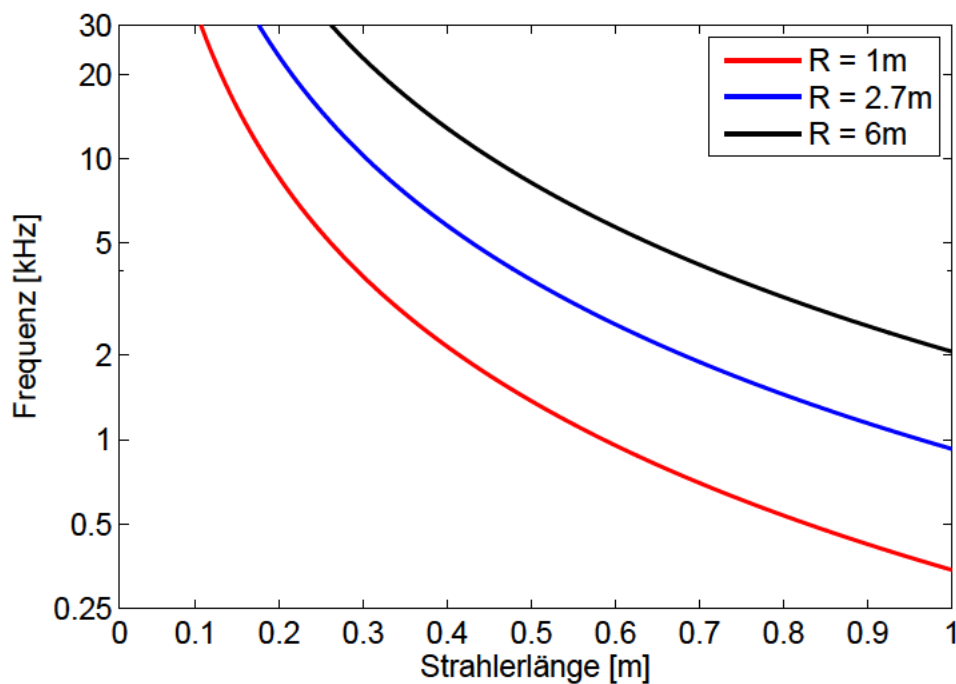
### 3.2.3 Nahfeld- und Fernfeldevaluation

Das Schallfeld einer akustischen Quelle lässt sich in die Bereiche Nahfeld und Fernfeld trennen. Nur in letzteren kann ein gemessener komplexer Frequenzgang als entfernungsunabhängig betrachtet werden. Während im Fernfeld Schalldruck und Schallschnelle nahezu phasengleich schwingen, ist im Nahfeld eine Phasenverschiebung um  $90^\circ$  zwischen beiden Größen zu beobachten. Die Grenze Nahfeld - Fernfeld ist von der Größe des Treibers und der betrachteten Wellenlänge abhängig, was die Messung von ausgedehnten Quellen und tiefen Frequenzen, wie es bei großen Tieftönern der Fall ist, schwierig gestaltet. Da die Fernfeldfrequenzgänge die Ausgangspunkte der Entzerrung der einzelnen Treiber darstellen, erfolgt an dieser Stelle eine kurze Darstellung der drei Fernfeldkriterien im Bezug auf die Treibergeometrien. Eine umfassende Herleitung aller Kriterien findet sich in Möser (2005, S.100). Das erste Merkmal für Fernfeldbedingungen geht davon aus, dass am Punkt der Betrachtung alle Teilbereiche einer schallabstrahlenden Fläche, also zum Beispiel einer Membran, die gleich Verringerung des Schalldruckamplitude verzeichnen. Damit kann sichergestellt werden, dass alle Teile einer Membran den gleichen Anteil zum Schalldruckpegel an einem

Messpunkt liefern. Es gilt also, dass der Abstand zum Strahler wesentlich größer sein muss als der Strahler selbst, was im Falle der größten Membran im Versuch (14cm) gegenüber der Messentfernung von 2,7m gegeben war.

$$R \gg h \quad (3.2)$$

Der Zusammenhang zwischen Strahlerlänge, verschiedenen Messdistanzen und der daraus resultierenden Messbandbreite wird auch noch einmal in Abbildung 3.1 verdeutlicht.



**Abbildung 3.1** – Zusammenhang Messbandbreite, Strahlergröße und Messabstand

Das zweite Kriterium soll sicherstellen, dass der Phasenunterschied aller vom Chassis abgestrahlten Frequenzen am Messpunkt einen gewissen Wert, in diesem Fall 180°, nicht überschreitet. Das heißt, dass das Verhältniss von Strahlerlänge zu abgestrahlter Wellenlänge wesentlich kleiner sein muss als das Verhältniss von Messentfernung zu Strahlerlänge.

$$\frac{h}{\lambda} \ll \frac{R}{h} \quad (3.3)$$

Einen kritischen Punkt stellt hier die recht große Membran des Kunststoffbändchens mit 11cm Ausdehnung und einer maximal abgestrahlten Wellenlänge von 1.56cm entsprechend 22kHz dar, was im Verhältniss einen Wert von  $\sim 7$  ergibt, also ungefähr

ein Viertel des Verhältnisses Messabstand - Strahlerlänge, dessen Verhältniss bei  $\sim 25$  liegt. Das heißt, in diesem Fall muss mit einem größeren Phasenversatz zwischen den Frequenzen am Messpunkt gerechnet werden.

Die dritte Fernfeldeigenschaft soll sicherstellen, dass die Impedanz der abgestrahlten Welle am Messpunkt der einer ebenen Welle entspricht, was bedeutet, dass der Phasenunterschied zwischen Schallschnelle und Schalldruck möglichst klein, idealerweise null, sein muss. Für die Geometrie des Aufbaus bedeutet dies, dass der Messabstand wesentlich größer als die tiefste zu messende Frequenz respektive die größte gemessenen Wellenlänge sein soll.

$$\lambda \ll R \quad (3.4)$$

Nun entspricht der Messabstand von  $2,7m$  einer Wellenlänge mit einer Frequenz von  $127Hz$ , womit davon auszugehen ist, dass spätestens unterhalb dieses Punktes in den Messungen nicht mehr von einer ebenen Welle ausgegangen werden kann. Dieses Kriterium betrifft nicht die Messungen der Hochtonchassis, da diese erst ab  $2\text{ kHz}$  betrachtet werden sollen. Um Aufschluß über das tieffrequentes Verhalten des zusätzlich verwendeten Tieftöners zu erhalten, ist eine zusätzliche Messung in dessen Nahfeld erforderlich.

### 3.2.4 Messequipment

Wichtigstes Kriterium für die verwendete Messtechnik ist der lineare Amplitudenfrequenzgang, um eine Verzerrung der Frequenzgänge der Chassis bei der Messung zu vermeiden. Alternativ müssen die Geräte eine Möglichkeit zu Kompensation ihrer eignen Impulsantworten bieten, wie es beim ITA Frontend und dem integrierten Verstärker zum Beispiel der Fall ist. In Tabelle 3.2 sind alle Glieder der Messkette aufgelistet, die für die monauralen Messungen und die Evaluation der FIR-Filter verwendet werden. Die Verwendung des externen Mikrofonvorverstärker ist nötig, da das ITA Frontend nicht die notwendigen  $200\text{ V}$  Polarisationsspannung für die Mikrofonkapsel liefern kann. Als AD/DA-Wandler für Anregesignale und gemessene Signale wurde das RME Multiface verwendet. Das ITA Frontend, mit dem das Multiface über ei-

| Name                       | Geräte-<br>art                              | SNR<br>[dB] | Spektrum<br>(Abweichung [dB]) | Klirrpegel<br>[dB]    |
|----------------------------|---------------------------------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------|
| Bruel & Kjaer<br>4149      | 1/8 Zoll Freifeld-<br>Kondensatormikrofon   | 160         | 1-30 kHz<br>( $\pm 0.5$ )     |                       |
| Bruel & Kjaer<br>2610      | Mikrofon-<br>vorverstärker                  | 160         | 2-200 kHz<br>100              | -130<br>( $\pm 0.1$ ) |
| ITA Frontend               | AD/DA-Wandler<br>Verstärker                 | 85          | 2-22,5kHz                     | -90                   |
| RME Multiface<br>HD-2 Hugo | AD/DA-Wandler<br>Digitale<br>Frequenzweiche | 112<br>121  | 2-22,5kHz<br>4-22.5kHz        | -98<br>-110           |
| Yamaha P3500               | Verstärker                                  |             | 2-24 kHz                      | -60                   |

**Tabelle 3.2** – Übersicht der verwendeten Geräte

ne Wandlerkarte (Four Audio, Aachen) verbunden war, stellte die Schnittstellen zur Ausspielung und Aufnahme der Signale dar.

### 3.2.5 Signale für die Vermessung von Lautsprecher

Vor der Verbreitung der Digitaltechnik wurden die Impulsantworten von Lautsprechern in der Regel mit Hilfe der Time Delay Spectrometry (TDS) bestimmt. Sie arbeitet mit frequenzlinearen Sinus-Sweeps als Anregesignal und kommt bei der Ermittlung der Übertragungsfunktion ohne eine Transformation in den Frequenzbereich aus [Mül99, S.132]. Später fanden vor allem pseudostochastische Signale, MLS-Folgen (engl. Maximum Length Sequence) genannt, Anwendung. Sie besaßen eine dirac-förmige Autokorrelationsfunktion und die Entfaltung konnte mit der extra dafür entworfenen Fast-Hadamard-Transformation (FHT) unmittelbar im Zeitbereich erfolgen. Seit der Einführung von Digital-Analog-Wandlern in der Messkette werden in der Regel determinierte Anregungssignale mit einer Länge von  $2^n$  Abtastwerten verwendet, deren Amplituden und Phasen unabhängig voneinander eingestellt werden können. Sie werden in der Regel softwareseitig erstellt und können mit Hilfe der FFT (engl. Fast-Fourier-Transformation) bzw. der IFFT (engl. Inverse FFT) beliebig in Zeit- und Frequenzbereich transformiert werden. So lassen sich je nach gewünschter Messbandbreite und Frequenzauflösung beliebig lange Signale erstellen. Die Beziehung

zwischen spektraler Auflösung und Abtastfrequenz ist in Gleichung 3.5 dargestellt.

$$df = \frac{1}{Dauer} = \frac{f_s}{N} \quad f_s - \text{Abtastrate}, N - \text{Abtastwerte} \quad (3.5)$$

Nach Vorgabe eines Amplitudenverlaufes und zufälliger Festlegung aller Phasen können MLS-ähnliche Signale erzeugt werden, die aufgrund ihrer passenden Länge auch mit Hilfe der FFT transformierbar sind [Mül99, S.129]. Gibt man zu einem Amplitudenverlauf auch einen Verlauf der Gruppenlaufzeit oder Phase vor, so erhält man nach einer IFFT ein Sweep-signal. Die individuelle Einstellung von Amplitude und Phase erlaubt auch die beliebige Färbung von Messsignalen, was vor allem das Problem des geringen Energiegehaltes im den unteren Oktaven beseitigt.

### 3.2.6 Postprocessing

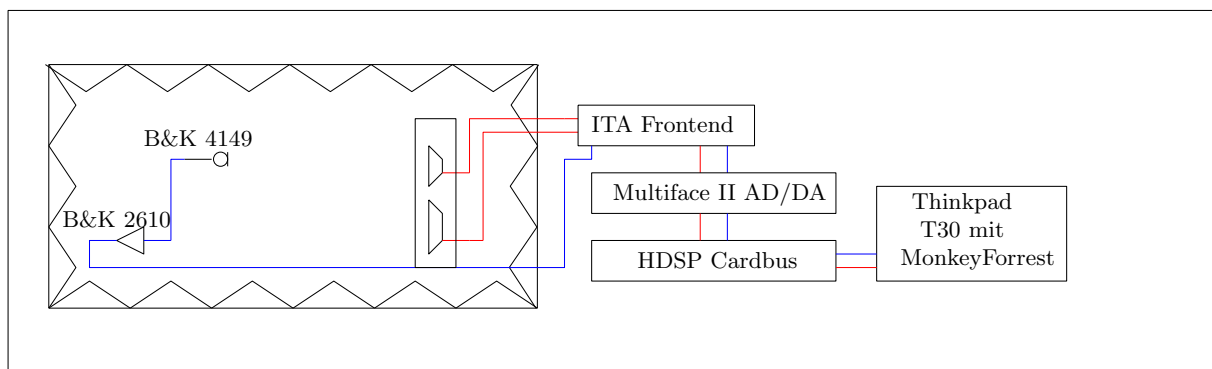
Obwohl die Messumgebung und der -aufbau eine Interaktion der Treiber mit Raum und Schallwand nahezu ausschließen, ist eine Nachbearbeitung (engl. Postprocessing) der gemessenen Impulsantworten ist nötig. Somit können nachträglich störende Reflexionen an Teilen des Messaufbaus, die nicht bedämpft werden können, sowie an den im RAR gespannten Netz eliminiert werden. Reflexionen führen in der Regel zu konstruktiven und destruktiven Schallüberlagerungen, infolge dessen es zu Kammfilter-artigen Einbrüchen im Spektrum kommt. Das Postprocessing kann einmal im Zeitbereich durch Überlagerung der gemessenen IR mit einem geeigneten Fenster geschehen. Zum einem sollte dabei das gewählte Fenster den Energiegehalt der IR vollständig erhalten. Weiterhin hat die Länge des Fenster Auswirkung auf die Bandbreite der IR. Fenster mit geringer Länge wirken sich unmittelbar auf die untere Grenzfrequenz des Amplitudenspektrums aus, womit es durch die Fensterung zu einer Verfälschung der unteren Flanke des Amplitudenfrequenzgangs kommt. Hochtöner schwingen aufgrund von Größe und Masse der Membran in der Regel schnell aus, Tieftöner hingegen haben zum Teil lange Ausschwingzeiten. Bei der Fensterung von Tieftöner muss demnach Rücksicht auf deren untere Grenzfrequenz genommen werden und die Länge des Fensters im Zeitbereich dementsprechend groß gewählt werden. Um auch Einschwingvorgänge zu berücksichtigen, muss das Fenster

entweder symmetrisch um die maximale Amplitude angewendet werden oder optional nur die rechte Flanke eines Fensters verwendet werden. Eine weitere Möglichkeit des Postprocessings besteht in einer Glättung der Amplitudenfrequenzgänge im Frequenzbereich. Dabei werden die Amplituden des Spektrums über einer vorher definierte spektrale Breite gemittelt. Wichtig bei der Mittelung ist, dass diese nicht Informationen, welche für die perzeptive Unterscheidung verschiedener Treiber nötig ist, "herausmittelt", was in der Regel durch zu hohe Mittelungsbandbreiten, wie etwa in Größe einer Oktave, passiert. Eine sechstel Oktavglättung, die spektrale Mittelung über eine halbe Terz, hat sich als praxistauglich erwiesen [Goe08].

### 3.3 Vermessung der Chassis

#### Aufbau

Die folgende Abbildung beschreibt den Aufbau, wie er für die Messung der Impulsantworten, der Verzerrungswerte sowie der elektrischen Impedanzen verwendet wurde. Für die Vermessung der Hochtöner war jeweils ein Hochtontreiber in Kom-



**Abbildung 3.2** – Schematischer Aufbau Fernfeldmessungen

bination mit dem Tiefmitteltöner (TMT) in der Schallwand verbaut. Bei der axialen Fernfeldmessung von Impulsantwort und Verzerrungswerten betrug der horizontale Abstand zwischen dem zu messenden Treiber und dem Mikrofon 2,7 m. Das geometrische Zentrum der Hochtöner befand sich durch einen Wechselrahmens in der Schallwand immer auf einer Höhe von 1,19 m, dass Mikrofon wurde axial auf dieses Zentrum ausgerichtet. Da unterhalb der Grenzfrequenz des RAR Raummoden die

Fernfeldmessungen des TMT's verzerren können, wir dieser zusätzlich im Nahfeld vermessen [Kee74], um Aufschluß über dessen tieffrequentes Verhalten zu bekommen. In diesem Fall wurde das Messmikrofon 2 cm axial vor der Membranmitte des TMT positioniert wurde.

Um eine mögliche Interaktion zwischen Hochtönern und Tieftönen, wurde die IR des Air-Motion-Transformer einmal mit eingebauten Tieftönen und einmal mit verschlossenen Tieftönerausschnitt gemessen. Eine Analyse der Amplitudenfrequenzgänge zeigte, dass es zu keinerlei Interaktion zwischen den Hoch- und Tieftönen kommt.

Allen Messungen ging eine Referenzmessung des ITA-Robotfrontends mit Hilfe der Messsoftware "MonkeyForrest" voraus, deren Ergebnisse zur Kompensation der Einflüsse des Messsystem dienten. Bei der Messsoftware handelt es sich um eine FFT-basierte Messumgebung, womit aus den gemessenen Spektren durch komplexe spektrale Division die Einflüsse von Anregesignal und Messsystem unmittelbar entfernt werden können. Damit konnte eine Verzerrung der Ergebnisse durch das Frontend und das Anregesignal ausgeschlossen werden.

Für die Messung der Impulsantworten wurde ein Sinussweep 15. Ordnung mit linearen Amplitudenspektrum verwendet, was bei einer Abtastrate von 48 kHz in einer Frequenzauflösung von 1,4648 Hz resultiert. Zur Glättung des Amplitudenspektren aller Hochtontreiber wurden diese in den Zeitbereich mit Hilfe der IFFT transformiert, und die Impulsantwort an ihrem Maximalwert symmetrisch mit einem 5. Term Albrecht-Fenster [Alb01] mit einer Länge von 10 ms überlagert. Im Falle des Tieftöners wurde nur die rechte Flanke des Albrechtfensters verwendet, welches wiederum der IR an ihrem Maximalwert überlagert wurde. Die Länge betrug 50 ms, um die angesprochene Verschiebung der unteren Grenzfrequenz zu verhindern.

Die Verzerrungswerte wurden im Bereich von 1 kHz und 10 kHz erfasst. Gemessen wurden die Pegel der zweiten bis fünften Oberwelle. Als Anregesignal wurde ein Sweep 13. Ordnung verwendet, die Mittelung der Messwerte erfolgt in 1/24 Oktav Schritten.

Die Messung der komplexen Impedanz erfolgte mit einem linearen Sweep 18. Ordnung. Im Vorfeld wurden die komplexen Impedanzen der Lautsprecherkabel erfasst und deren Gleichstromanteil als Offsetwert in MF eingetragen. Die Referenzmessung



erfolgte über einen, im Frontend integrierten, 10 Ohm Referenzwiderstand. Die anschließenden Vermessung der Chassis erfolgte über einen integrierten 1 Ohm Widerstand, per spektraler Division wurde wiederum der Einfluss von Messsystem und Anregesignal entfernt.

### 3.3.1 Zwischenergebnisse

#### Amplitudenspektren

Die unentzerrten Amplitudenspektren der Hochtöner lassen sich prinzipiell in zwei Gruppen teilen. Die drei elektrodynamischen Chassis weisen einen recht ausgewogenen und nahezu gleichen Verlauf zwischen 2 kHz und 17 kHz auf, was den, in den theoretischen Grundlagen angesprochenen, Sachverhalt, dass der axiale Amplitudenfrequenzgang nur von der Ausdehnung der Membran abhängig ist, bestätigt. Die Abweichungen aller drei Treiber von einem linearen Verlauf sind nie größer als 2,5 dB zwischen 2 kHz und 20 kHz. Eine Unterscheidung der drei Treiber am Klangbild ist deswegen wahrscheinlich auch ohne Entzerrung schwierig, in Abbildung ?? finden sich die 1/12-Oktav geglätteten Spektren. Die untere Grenze des Arbeitsbereich des

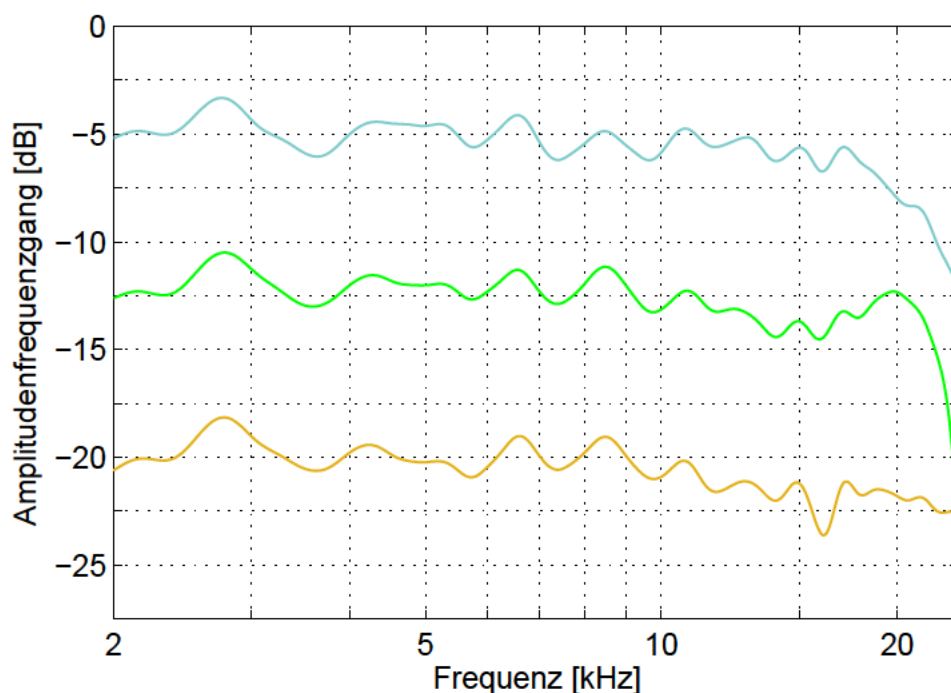
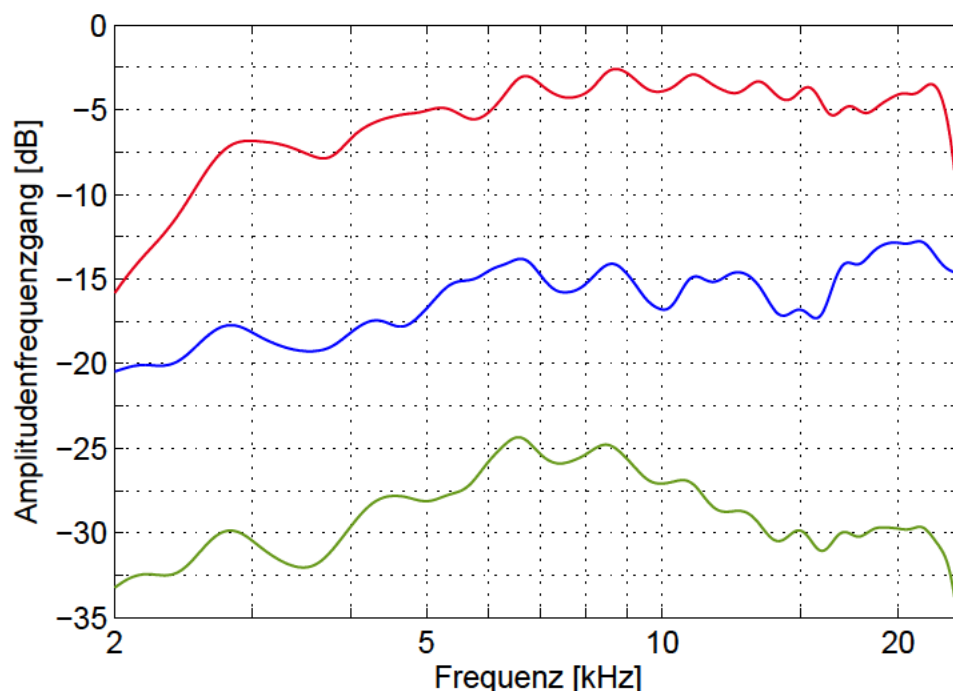


Abbildung 3.3 – Amplitudenspektren der unentzerrten elektrodynamischen Treiber v.o.n.u. Aluminiumkalotte, Ringstrahler, Gewebekalotte

X-Art Hochtöners liegt mit 2,5 kHz zwar deutlich höher als bei allen anderen Treibern, zwischen 3 kHz und 22 kHz weist jedoch auch er einen ausgeglichen Amplitudengangsverlauf innerhalb eines Korridors von  $\pm 2,5$  dB auf. Das Bändchen und der Magnetostat weisen im Gegensatz dazu einige ausgeprägten Schwankungen im Spektrum auf, deren Auswirkungen sich im unentzerrten Zustand durchaus im wahrgenommenen Klangbild festmachen lassen. Beim Bändchen treten Anhebungen im Bereich von 5-7 kHz und oberhalb von 16 kHz auf, die Abweichungen von einem linearen Verlauf bewegen sich im Bereich von  $\pm 4$  dB im Bereich von 2 kHz und 20 kHz. Auch der Magnetostat weist eine starke Anhebung des Amplitudengangs in der Größenordnung von  $\pm 5$  dB im Bereich zwischen 4 und 14 kHz auf. Da es sich hierbei um Resonanzen der Membran handelt, kann ausgeschlossen werden, dass die Klirrwerte in diesem Bereich keine unnatürliche Überhöhung zeigen, die über einen Klirrfaktor von 1% hinausgehen würde. Prinzipiell liegen auch beim Magnetostat alle Abweichungen in einem Korridor von  $\pm 4$  dB. Die Spektren der drei elektromagnetischen Treiber finden sich in Abbildung 3.4.

Auch der Tiefmitteltöner wurde an diesem Punkt im RAR vermessen, auch wenn



**Abbildung 3.4** – Amplitudenspektren der unentzerrten elektromagnetischen Treiber v.o.n.u. X-Art, Bändchen, Magnetostat

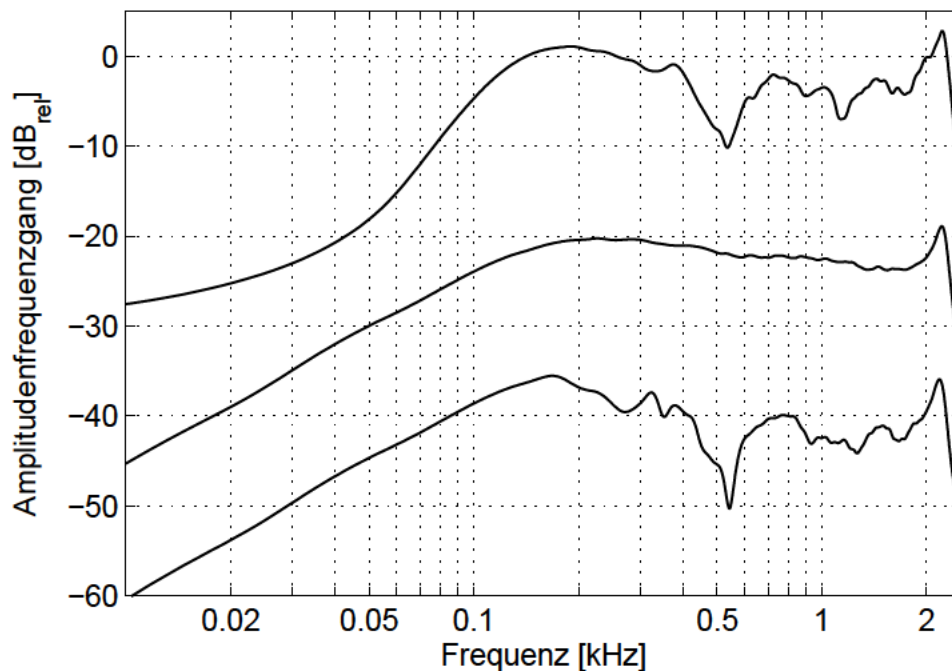
der Abstand zwischen Chassis und Mikrofon nicht in allen Punkten Fernfeldkriterien entsprach, wie sie im Abschnitt "Nahfeld- und Fernfeldevaluation" zu finden

sind. Unterhalb der Grenzfrequenz des RAR bilden sich zusätzlich Raummoden aus, wodurch die Fernfeldmessung in diesem spektralen Bereich nicht mehr repräsentativ ist. Aus diesem Grund wurde zusätzlich eine Nahfeldmessung angefertigt. Um ein geeignetes Amplitudenspektrum zu erhalten, welches das Übertragungsverhalten des TMT korrekt wiedergibt, müssen die Ergebnisse beider Messungen in einem spektralen Bereich kombiniert werden, in welchen beide Verläufe Gültigkeit besitzen. Für den Bereich  $ka \ll 1$  sind Nah- und Fernfeldfrequenzgang proportional zueinander [Kee74], zwischen den Schalldrücken gilt in diesen Bereich folgende Gleichung 3.6.

$$p_{nah} = \frac{4h}{R} p_{fern} \quad (3.6)$$

Die Ankopplung wurde unter Beachtung dieser Zusammenhänge bei 160 Hz vorgenommen, der resultierende Amplitudenfrequenzgang des Tiefmitteltöners, der später als Ausgangspunkt für dessen Entzerrung dienen wird, findet sich zusammen mit den Amplitudenspektren der Nah- und Fernfeldmessung in Abbildung 3.5.

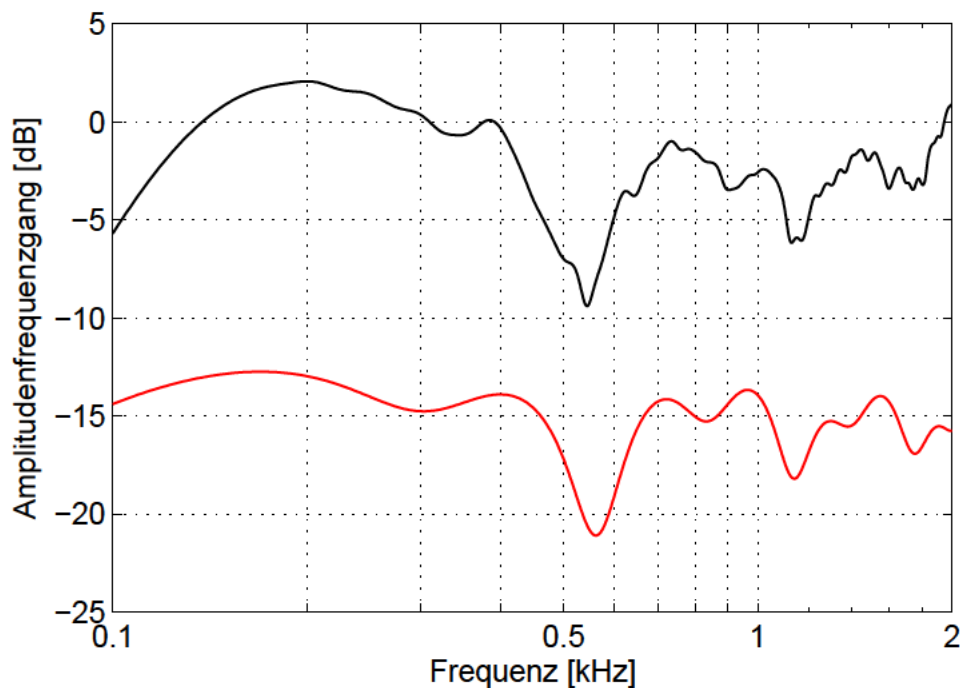
Der Tiefmitteltöner unterliegt, anders als die Hochtönlautsprecher, einer starken



**Abbildung 3.5** – Amplitudenspektren des unentzerrten Tiefmitteltöners  
oben: Fernfeldmessung, mitte: Nahfeldmessung  
unten: resultierendes Spektrum nach Kombination bei 160 Hz

Wechselwirkung mit der Schallwand, was sich deutlich in Einbrüchen des Amplitudenspektrums bei 537 Hz und 1,13 kHz zeigt (Abbildung 3.6). Eine rechnergestützte

Simulation des Tiefmitteltöners in einer Schallwand mit Hilfe der Software The Edge (v1.8, Tolvan Data, 2006) ergab den in Abbildung 3.6 rot gezeichneten Betragsfrequenzgang, dessen Verlauf den geäußerten Verdacht bestätigt. Offensichtlich gilt jedoch Zusammenhang aus Gleichung 3.1 im Fall des TMT nicht, da sonst Einbrüche des Spektrums bei tieferen Frequenzen aufgetreten wären. Die daraus resultierenden starken Schwankungen im Amplitudenspektrum des Chassis machen bei der Kompensation die Verwendung von zwei Frequenzweichenwegen notwendig.



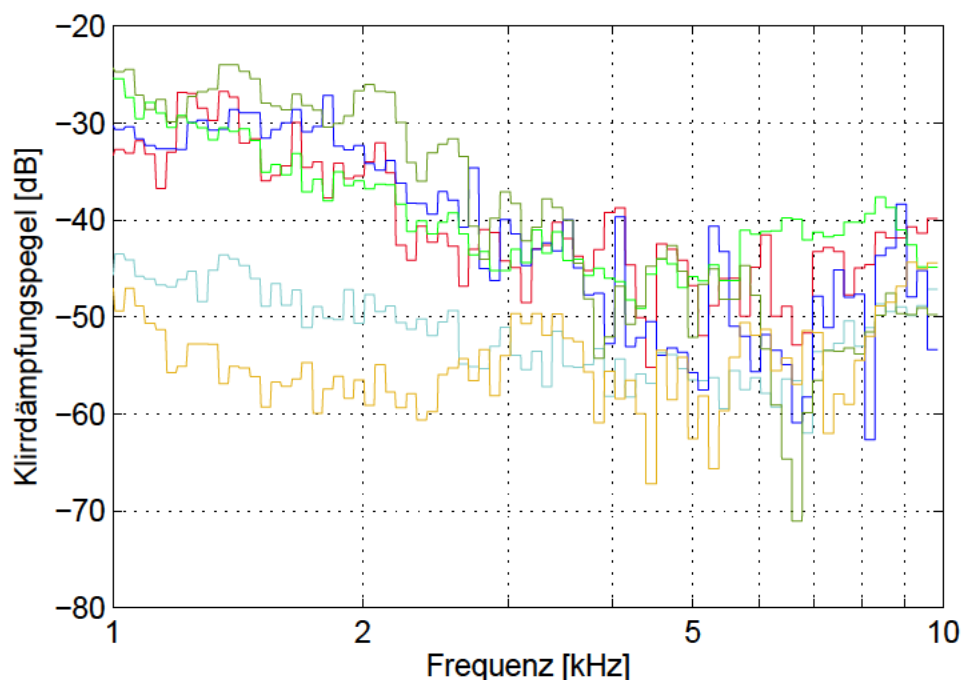
**Abbildung 3.6** – Betragsfrequenzgänge Tiefmitteltöner in Schallwand in 2,7m Entfernung  
schwarz: Messung im RAR, rot: Simulation

### Verzerrungswerte

Die Messung der Verzerrungswerte aller Lautsprecher hat auf die Erstellung der Filter und den weiteren Betrieb der Treiber keinerlei Einfluss. Sie wurden aufgenommen, um einen korrekten Betrieb aller Chassis sicherzustellen und im Vorfeld schon eventuelle Defekte an den Treibern aufzudecken. Prinzipiell werden alle Treiber im Laufe der Untersuchungen aber im linearen Bereich betrieben.

Die Klirrdämpfungspegel weisen die typischen Verläufe von Hochtonlautsprechern auf, und liegen ab 3 kHz bei allen Treibern unter -40 dB, was einem Klirrwert von 1% entspricht. Die geringsten Verzerrungen weisen die beiden Kalotten auf, wobei die Gewebekalotte noch weniger Verzerrungen produziert als die Aluminiumkalotte, was sich wohl aus dem Unterschied der inneren Dämpfung beider Membranmaterialien ergibt.

lien ergibt. Der Ringstrahler weist, trotz einer membran aus Gewebe ähnlich dem der Gewebekalotte, einen hohen Gesamtklirrwert auf, was einem hohen Pegel der zweiten Oberwelle zurückzuführen ist (siehe detaillierte Abbildung im Anhang Abschnitt "Verzerrungswerte"). Bei allen drei elektromagnetischen Hochtönern wurden Klirrdämpfungspegel gemessen, die 10 bis 20 dB über denen der Kalotten liegen. Ursache können einmal das resonanzanfällige Membranmaterial, die gleichmäßig Verteilung der Antriebskraft und die damit höhere Anzahl an sich ausbildenden Moden auf der Membran sowie eine allgemein unzureichende Bedämpfung der Membran sein. In Abbildung 3.7 finden sich die Gesamtklirrdämpfungspegel aller sechs Hochtönlautsprecher. Die detaillierten Verläufe der zweiten bis fünften Oberwelle sowie die Klirrdämpfungspegel des Tieftöners finden sich im Anhang im Abschnitt "Verzerrungswerte".



**Abbildung 3.7** – Gesamtklirrdämpfungspegel der sechs Hochtönlautsprecher  
beige - Gewebekalotte, hellblau - Aluminiumkalotte, rot - X-Art  
blau - Bändchen, grün - Magnetostat, hellgrün - Ringstrahler

### Elektrische Impedanz

Auch der Impedanzverlauf aller Treiber liegt im Rahmen der Erwartungen. Die elektrodynamischen Hochtöner, also Ringstrahler, Aluminium- und Gewebekalotte, weisen im Bereich zwischen 500 Hz und 1500 Hz das typische Impedanzmaximum der



mechanischen Resonanzfrequenz auf. Nach einem Absinken zurück auf den Wert der Gleichstromwiderstandes steigen die Impedanzen mit zunehmender Frequenz wieder langsam an, was auf den zunehmenden induktiven Widerstand der Schwingspule zurückzuführen ist.

Die Verläufe der elektromagnetischen Lautsprecher sind dagegen frei von Resonanzen. Magnetostat und X-Art weisen nahezu linear konstante Verläufe auf, was auf eine gut bedämpfte Resonanzfrequenz der Membran hinweist. Lediglich zu hohen Frequenzen hin zeigt sich auch hier ein leichter Anstieg der Impedanzen aufgrund des induktiven Widerstands der Schwingspule. Beim Bändchenhohtöner fällt der niedrige Gleichstromwiderstand (der Impedanzwert bei 0 Hz) auf, welcher auf die geringen Größe und Masse des schallerzeugen Bändchens zurückzuführen ist. Mit Hilfe eines Impedanzkonverters wird der Widerstand des Bändchen ab 200 Hz auf einen Wert angehoben, der den Anschluss an eine typische Frequenzweiche ermöglicht.

Der Impedanzverlauf des Tiefmitteltöners (siehe Anhang Abschnitt Impedanzen) entspricht prinzipiell dem der elektrodynamischen Hohtöner, nur dass die mechanische Resonanzfrequenz wesentlich tiefer auftritt und dass die Impedanzwerte wesentlich größer sind. Insbesondere der mit steigender Frequenz zunehmende induktive Widerstand der Schwingspule ist wesentlich größer, was seine Ursache in einer größeren Windungszahl und einem stärkeren Magnetfeld hat.

## **3.4 Entzerrung der Chassis**

Der folgende Abschnitt behandelt alle Schritte, welche zur Kompensation der Amplituden- und Phasenspektren aller Lautsprecher notwendig waren. Abschließend werden die Ergebnisse der monauralen Evaluationsmessung vorgestellt, welche die korrekte Funktionsweise der FIR-Filter belegen sollen.

### **3.4.1 Ziel der Kompensation**

Das Ziel der FIR-Entzerrung ist die Herstellung linearer Amplituden- und Phasenspektren bei allen Hohtonlautsprechern sowie dem Tiefmitteltöner. Da im späte-

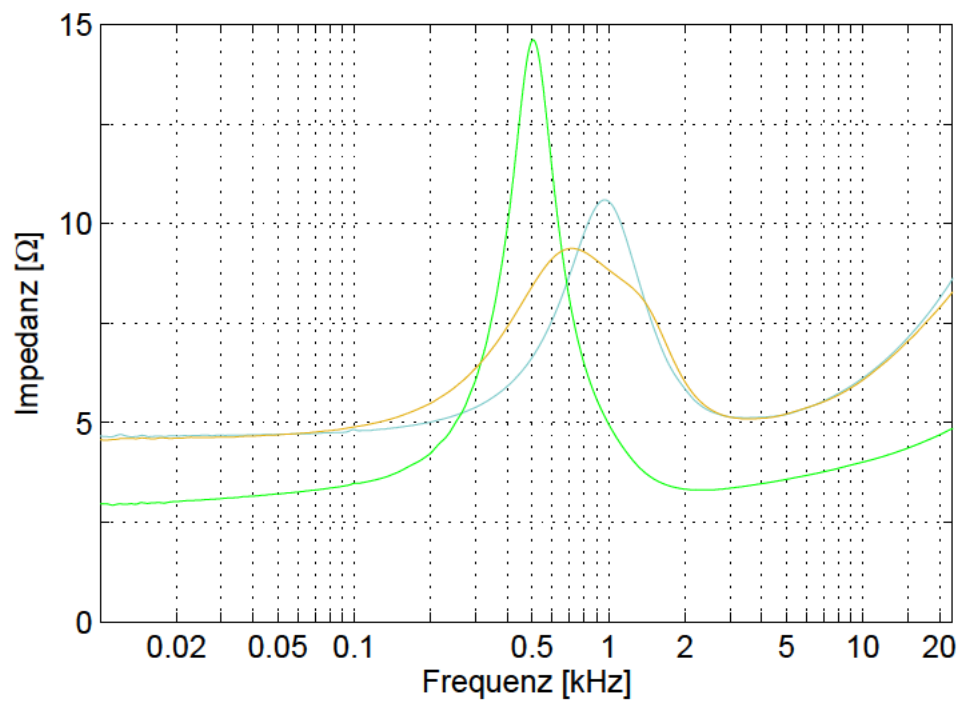


Abbildung 3.8 – Impedanzverläufe der elektrodynamischen Hochtöner  
hellgrün - Ringstrahler, beige - Gewebekalotte, hellblau - Aluminiumkalotte

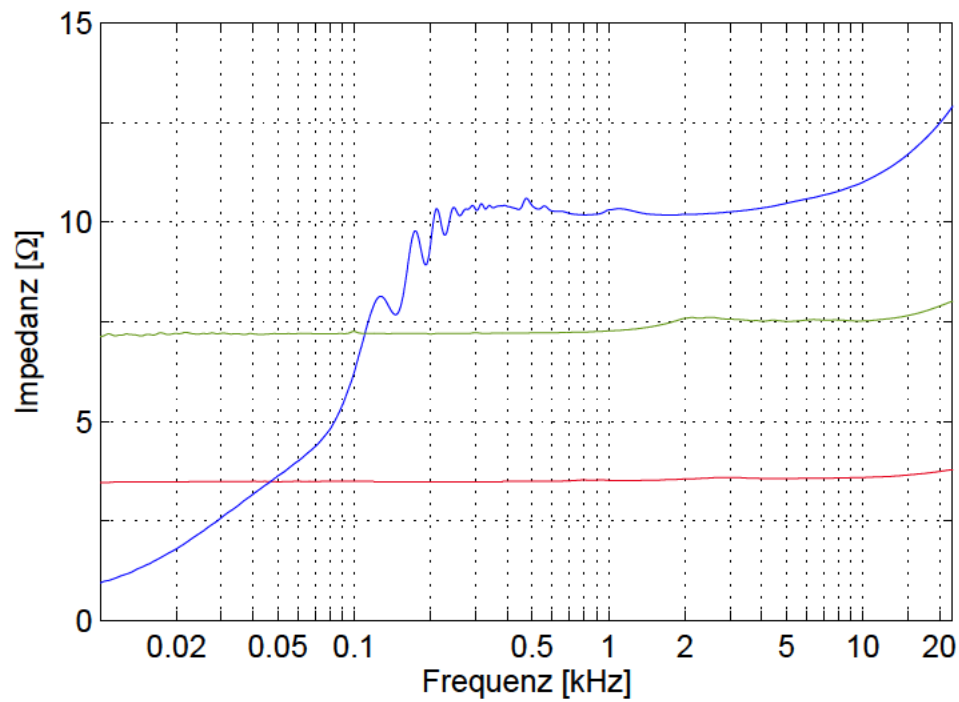


Abbildung 3.9 – Impedanzverläufe der elektromagnetischen Hochtöner  
rot - X-Art, grün - Magnetostat, blau - Bändchen

ren Hörversuch virtuelle 2-Wege-Regielautsprecher verglichen werden sollen, wird jeweils ein Hochtonlautsprecher in Kombination mit dem Tiefmitteltöner kompensiert. Die Trennfrequenz liegt bei 2 kHz. Die Hochton-/Tieftonkombination soll einen linearen Verlauf zwischen 50 Hz und 22 kHz aufweisen. Für jeden der ausgewählten Hochtonlautsprecher muss also ein passender FIR-Filter gefunden werden, welcher einem linearen Amplitudenfrequenzgang zwischen 2 kHz und 22 kHz sowie einen linearen Phasenverlauf einstellt. Entsprechendes gilt für den Tiefmitteltöner zwischen 50 Hz und 2 kHz. Die Abweichung der kompensierten Amplitudenspektren von einem linearen Amplitudenfrequenzgang soll  $\pm 1\text{dB}$  nicht überschreiten. Wichtig ist, dass die erstellten FIR-Filter nur am Messpunkt der Fernfeldfrequenzgänge eine kompensierende Wirkung haben werden.

### **3.4.2 Erstellung der FIR-Filter mit MonkeyForrest Express**

Bei der Generation der FIR-Filterkoeffizienten wird prinzipiell der Anleitung von Sven Müller [Mül99, 4. Kapitel] gefolgt, für eine ausführliche Begründung aller folgenden Schritte sei dieses Werk zur weiteren Literatur empfohlen. Die Amplitudenspektren die aus den folgenden Schritte resultieren finden sich im Anhang, Abschnitt Filterentwurf.

#### **1. Generelle Einstellungen**

Zu Beginn erfolgt die Festlegung der Abtastfrequenz (48 kHz), der FFT-Ordnung (15.Ordnung) sowie die Wahl des Fensters, mit dem später die Wunschbandpässe im Zeitbereich begrenzt werden (Kaiser-Bessel-Fenster). Weiterhin erfolgt die Definition der Frequenzweichenwege, welche später für die Entzerrung genutzt werden sollen. Jeder Weg entspricht einem FIR-Bandpass, dessen Länge und Abtastrate ebenfalls im Vorfeld festgelegt werden. Zur Entzerrung der Hochton-/Tieftonkombination werden drei Wege der digitalen Frequenzweiche verwendet, der untere und mittlere Weg zur Kompensation des Tiefmitteltöners, der obere Weg für den Hochtöner. Die Verwendung von zwei FIR-Bandpässen für den TMT ist nötig, da dessen Amplitudenspektrum (siehe Abbildung 3.5) aufgrund der Montage in der Schallwand starke Amplitudenschwankungen aufweist und so eine Entzerrung mit "nur" 1000 Koeffizienten nicht zum gewünschten konstanten Amplitudenspektrum führt. Die geringe Auflösung der Spektren im tieffrequenten Bereich ist ein weiterer Grund für die



Aufspaltung des Tieftonweges. Der untere Bandpass hat eine Länge von maximal 1000 Koeffizienten bei einer achtfachen Unterabtastung bezogen auf die volle Abtastfrequenz, der mittlere Bandpass hat eine Länge von maximal 496 Koeffizienten bei vierfacher Unterabtastung und der obere Bandpass hat eine Länge von maximal 512 Koeffizienten bei voller Abtastfrequenz.

## **2. Festlegung Zielamplitudenfrequenzgang**

Der Zielamplitudenfrequenzgang der Kombination Hochtöner-Tiefmitteltöner soll konstant zwischen 50 Hz und 22 kHz (-6 dB Grenze) sein. Die Begrenzung erfolgt durch die Kombination eines Besselhochpass erster Ordnung und eines Besseltiefpass erster Ordnung, was in einer oberen und unteren Flankensteilheit von -6 dB/Oktave resultiert. Die spektrale Begrenzung erfolgte durch eine Fensterung im Zeitbereich.

Die generelle Bandpassbegrenzung des Amplitudenspektrums soll verhindern, dass die Amplitudengänge der Treiber an Punkten kompensiert werden, die außerhalb ihres eigentlichen Arbeitsbereiches liegen und in denen ein Betrieb nicht mehr sinnvoll ist. Die untere Begrenzung beugt vor allem einer mechanischen Zerstörung des TMT vor, die durch zu hohen Membranhub aufgrund fehlenden Strahlungswiderstandes der umgebenden Luft eintritt. Die obere Begrenzung soll verhindern, dass eine Dämpfung durch den Oversampler-Tiefpass bei der halben Abtastfrequenz eine Fehlkonfiguration des Entzerrfilters bewirkt.

## **3. Definition der Prototypenbandpässe**

Im nächsten Schritt werden die Grenzfrequenzen der drei FIR-Bandpässe festgelegt. Die Grenzfrequenz zwischen oberen und mittleren Weg liegt bei der festgelegten Trennfrequenz von Hoch- und Tieftöner, also 2 kHz. Aus mehreren Probeentzerrungen des TMT wird als Trennfrequenz des unteren und mittleren Weges 1170 Hz gewählt. Dies soll vor allem eine korrekte Entzerrung des TMT bis zur Trennfrequenz sicherstellen. Die Flankensteilheiten der Prototypenbandpässe haben jetzt noch einen unendlich großen Wert, was in der Abbildung gut zu erkennen ist.

## **4. Realisierung der Bandpässe**

Realisierung meint in diesem Fall, dass die Bandpässe jetzt endliche, vorher definierte Flankensteilheiten erhalten. Dafür werden sie in Zeitbereich transformiert und nach Multiplikation mit einem passenden Kaiser-Bessel-Fenster wieder in den Frequenzbereich transformiert. Ergebnis sind drei Bandpässe mit Flankensteilheiten von -6

dB/Oktave. Die -6 dB-Grenzfrequenzen der Bandpässe liegen bei den in Schritt drei festgelegten Trennfrequenzen.

## 5. Generierung der Koeffizienten

Im letzten Schritt werden die Amplitudenspektren der zu entzerrenden Chassis ausgewählt. Für den unteren und mittleren Weg wird folglich die kombinierte Nahfeld-/Fernfeldmessung des Tiefmitteltöners verwendet, für den oberen Weg das Fernfeldamplitudenspektrum eines Hochtöners. Da bei der Evaluation der Filter ein externer Verstärker zum Einsatz kommt, müssen die für die Entzerrung bestimmten Amplitudenspektren mit denen der beiden Verstärkerkanäle multipliziert werden. Dies resultiert in einer Anhebung des Betragsfrequenzgangs um 32 dB bei allen Lautsprechern. Als letzter Schritt wird das gewünschte Phasenspektrum eines jeden Weges auf lineares Verhalten festgelegt. Für die Generierung der FIR-Koeffizienten aller Hochtön-/Tieftönkombinationen ist letztlich nur dieser Schritt von Bedeutung, alle bisher getätigten Einstellungen bleiben für die sechs Kombinationen gleich. Exemplarisch sind in Abbildung 7.26 die Amplitudenspektren der resultierenden Kompensationsbandpässe für die Kombination aus Tiefmitteltöner und X-Art Hochtöner abgebildet. MonkeyForrest FX generiert nun die der Hochtön-/Tieftönkombination

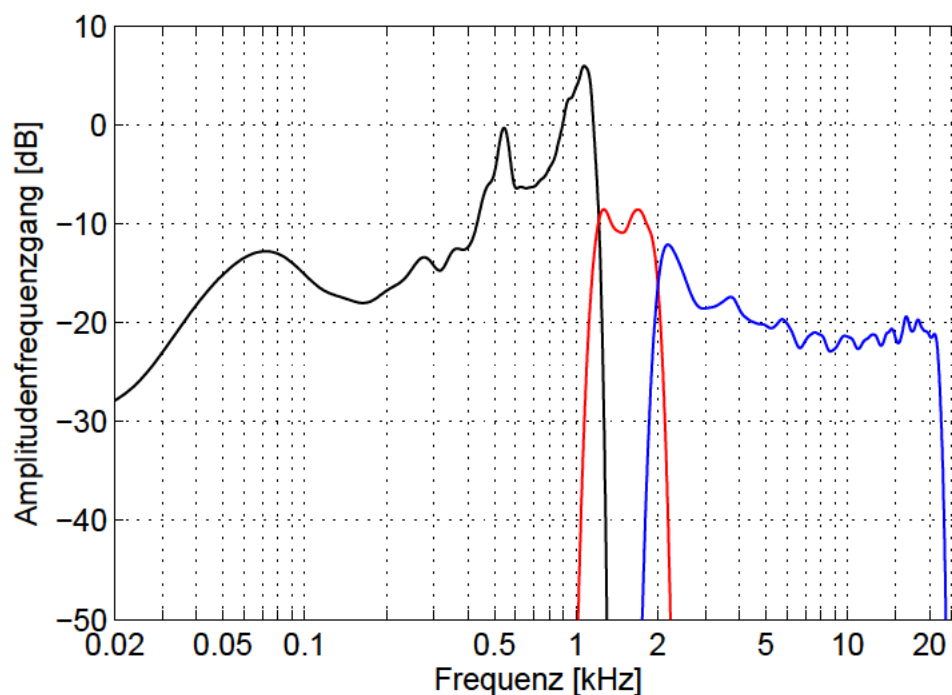
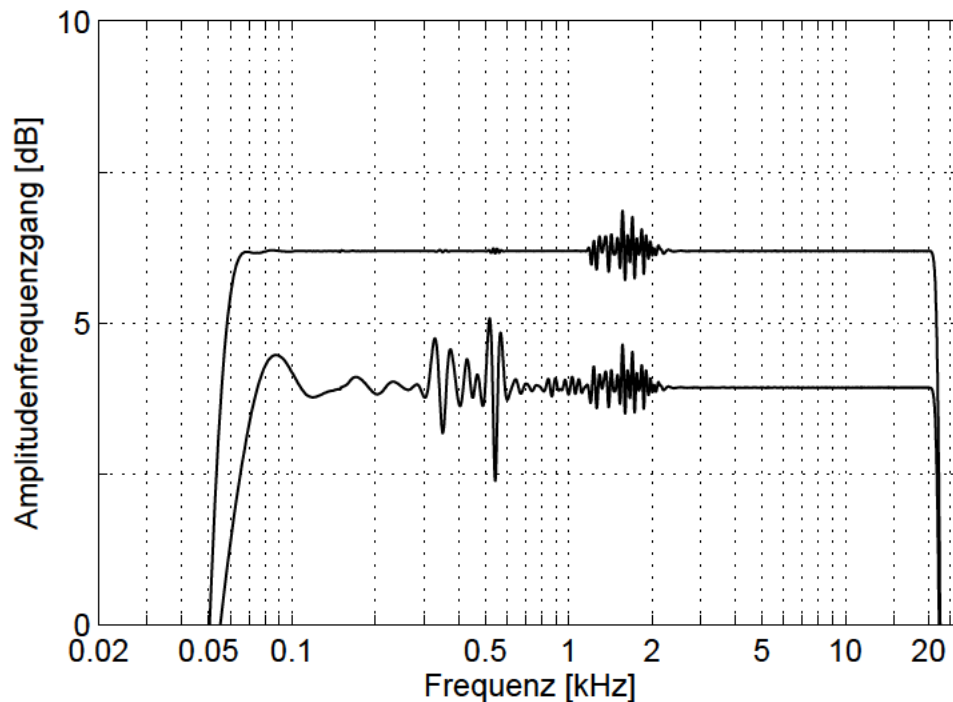


Abbildung 3.10 – Kompensationsfilter für die Kombination X-Art/Tiefmitteltöner

entsprechenden Koeffizienten, welche dann auf die digitale Frequenzweiche HD-2



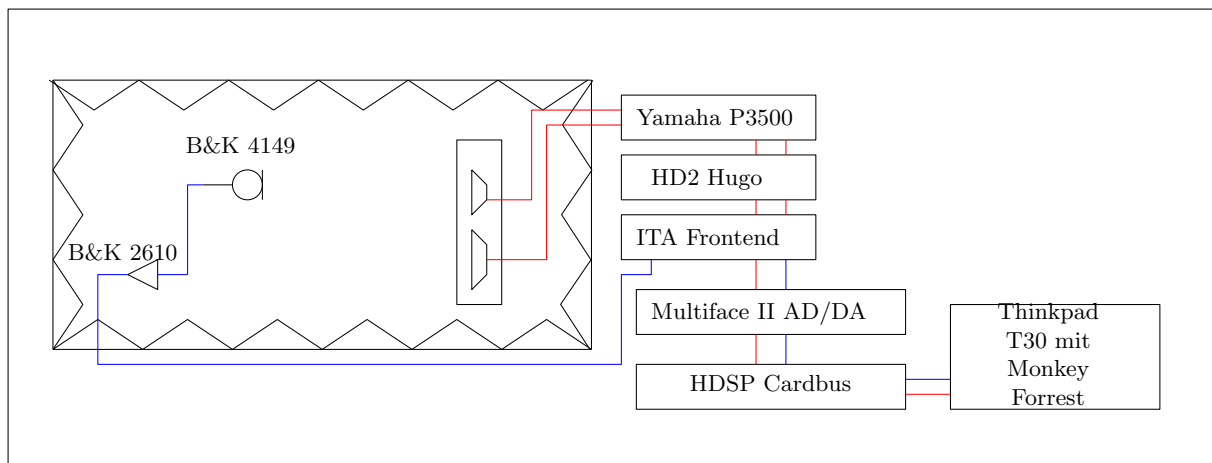
**Abbildung 3.11** – Theoretische Zielamplitudenspektren mit unterschiedlichen Bandpasslängen

oben: unterer Weg mit 1000 Koeffizienten  
 unten: unterer Weg mit 300 Koeffizienten

"Hugo" übertragen werden können.

### Einschränkungen bei der Koeffizientengenerierung

In Abbildung 3.11 sind die theoretischen Zielamplitudenfrequenzgänge zu sehen, wie sie sich aus der unmittelbaren Multiplikation der beiden Treiberamplitudenspektren mit den erzeugten Entzerrungsfiltren ergeben würden. Als erstes Problem fällt die schmale Bandbreite des mittleren Weges auf, die eine vollständige Kompensation der Abweichungen von der Zielfunktion nur schwer erlaubt. Dies äußert sich an den vielen geringen Ausschlägen im Bereich zwischen 1 kHz und 2 kHz. Die Abweichungen liegen jedoch noch immer im Rahmen der Zielvorgaben von Abweichungen im Bereich von  $\pm 1\text{dB}$ . Ein weiteres Problem sind die großen Laufzeiten von rund 90 ms durch die Frequenzweiche. Diese ergeben sich aus dem Wunsch eines linearen Phasengangs des Tiefmitteltöners sowie aus der hohen Anzahl der Koeffizienten im unteren Weichenweg. Abhilfe kann hier nur eine Verkürzung des FIR-Bandpass im unteren Weg schaffen, in Folge dessen bei allen Hochtון-/Tieftonkombinationen die



**Abbildung 3.12** – Schematischer Darstellung Evaluierungsmessung

Länge des unteren Kompensationsweges von 1000 Koeffizienten auf 300 Koeffizienten beschränkt wird. Dies hat allerdings eine Anhebung des Frequenzgang am unteren Ende des Wunschspektrums zur Folge, wie es in dem unteren Amplitudenspektrum in Abbildung 3.11 gut zu erkennen ist. Weiterhin prägen immer noch Welligkeiten den Amplitudengangsverlauf, deren Pegel zum Teil weit über dem gewünschten Korridor von  $\pm 1\text{dB}$  liegen. Inwieweit diese auch im realen Betrieb der Lautsprecher eine Rolle spielen, muss eine Evaluationsmessung zeigen.

### 3.5 Evaluation der Entzerrung

Für die Evaluationsmessung der FIR-Filter wurde im RAR exakt der Versuchsaufbau verwendet, der schon für die monaurale Fernfeldvermessung der Lautsprecher verwendet wurde. Der Unterschied zu den ersten Vermessungen bestand nur in dem externen Verstärker für die Lautsprecher, der hinter die Frequenzweiche geschaltet wurde und dessen Amplitudengangsverzerrung in den Ausgangsspektren für die Filtergeneration integriert wurden. Als Anregesignal wurde wiederum ein linearer Sinus-Sweep 15. Ordnung verwendet. Alle gemessenen Spektren wurde zur Glättung im Zeitbereich mit einem um das Maximum der IR symmetrischen 5. Term Albrecht-fenster mit einer Länge von 25 ms multipliziert. Abbildung 3.12 zeigt den Aufbau, wie er während der Messungen verwendet wurde. Ein Problem der generierten FIR-Filter ist, dass deren Fähigkeit zur Kompensierung der Amplituden- und Phasenspektren

nur an einer Stelle im Raum besteht, und zwar genau da, wo die Fernfeldspektren der Lautsprecher gemessen wurden. Schon leichte Abweichungen vom ursprünglichen Messstandort können zur Folge haben, dass beträchtliche Abweichungen von Zielamplituden- und Zielphasengang auftreten, welche über die Ergebnissprognose der theoretischen Entzerrung am Ende der Koeffizientengeneration hinausgehen.

### 3.5.1 Amplitudenspektren

Die Entzerrung der Hochtontreiber auf einen nahezu linearen Amplitudenfrequenzgang kann als gelungen bezeichnet werden. Wie die Darstellung 1/12-Oktav geglätteten Hochtון-/Tieftton-Spektren in Abbildung ?? zeigt, bewegen sich alle Hochtוןlautsprecher in einem Korridor von  $\pm 1$  dB zwischen 2 kHz und 20,5 kHz. Die größten Abweichungen von der linearen Zielfunktion weist in diesem Bereich der Magneto-stat mit einer maximalen Pegeldifferenz von 1,7 dB auf. Die geringsten Abweichungen treten bei der Aluminiumkalotte mit einer maximalen Pegeldifferenz von 1,14 dB auf. Die Welligkeiten im Spektrum zwischen 10 kHz und 20 kHz bei dem X-Art Hochtöner sind die Folgen eines Fehlers bei der Erstellung der Kompensationsfilter. Da die Abweichungen von der Zielfunktion jedoch auch hier maximal  $\pm 0,75$  dB betragen, kann auch hier die Entzerrung als gelungen betrachtet werden.

Die Entzerrung des Tiefmitteltöners unterlag der bereits genannten Einschränkung einer geringeren Anzahl von Koeffizienten im unteren Kompensationsweg. In Folge dessen verschob sich die untere Grenzfrequenz (-6 dB-Grenze) der Zielfunktion von 50 Hz auf 90 Hz. In einem Bereich zwischen 200 Hz und 2 kHz weist der entzernte Tiefmitteltöner in Kombination mit der Gewebekalotte eine Pegeldifferenz von  $\pm 0,36$  dB auf, in Kombination mit dem Magnetostat liegt die Pegeldifferenz bei  $\pm 0,58$  dB. Damit kann auch die Entzerrung des Tiefmitteltöners als prinzipiell gelungen betrachtet werden, dem durch die FIR-Filterung entstandenen Defizit einer früheren Ausblendung des unteren Spektrums wird später im Aufbau des Hörversuches kompensiert.

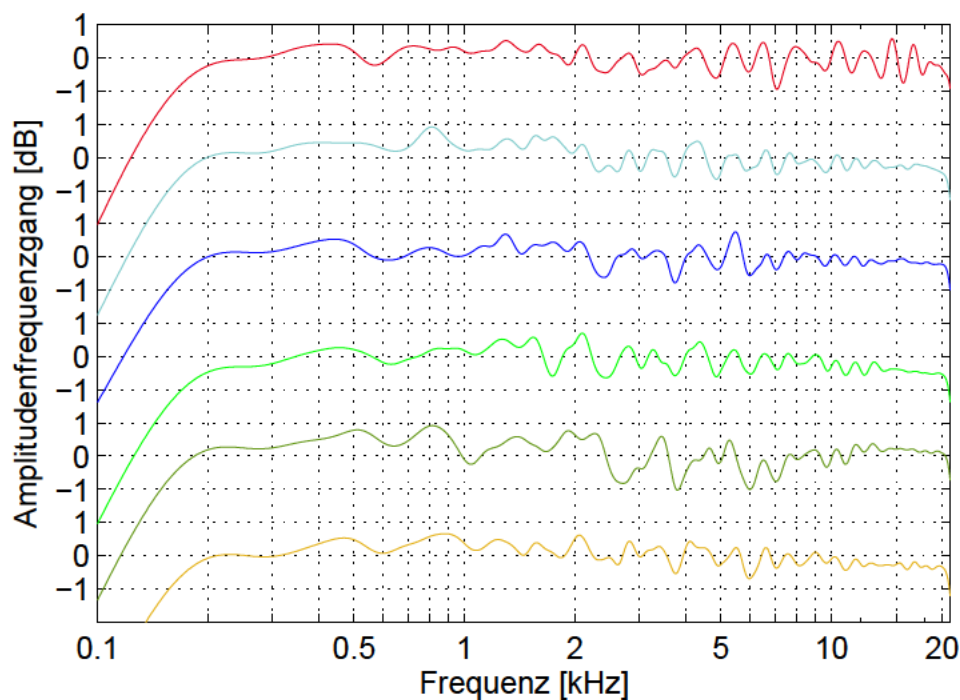


Abbildung 3.13 – Detaillierte Darstellung der sechs Amplitudenspektren (alle 1/12-Oktav geglättet)

### 3.5.2 Phasenspektren und Gruppenlaufzeiten

Auch die Phasenfrequenzgänge sowie die Gruppenlaufzeiten der Evaluationsmessungen zeigen die erwarteten Verläufe. Mit Ausnahme des X-Art und des Magnetostaten besitzen alle Hochtonlautsprecher exakt den gleichen nahezu linearen Phasenverlauf. Die ab 2 kHz abweichenden Phasenverläufe des X-Art (rot) und des Magnetostat (grün) haben ihre Ursache entweder in Fehlern bei der Generation der Filterkoeffizienten oder in einer versehentlichen Veränderung des Messaufbau hin. Ob der Bereich, in welchem die Phasenabweichungen auftreten, noch ausschlaggebend für das wahrgenommene Klangbild von dem Hochtöner ist, wird sich im Hörversuch zeigen. Die Darstellung der Gruppenlaufzeiten zeigt keinerlei Unterschiede zwischen den Hochtönern. Im Bereich der unteren Grenzfrequenz der Zielfunktion ist ein Anstieg der Gruppenlaufzeit zu beobachten, welche infolge des Begrenzungshochpass entsteht.

### 3.5.3 Impulsantworten

Auch die Impulsantworten bestätigen, dass die korrekte Entzerrung der sechs Hochton-/Tieftonkombinationen gelungen ist. In den Abbildungen 3.16 bis 3.18 sieht man die

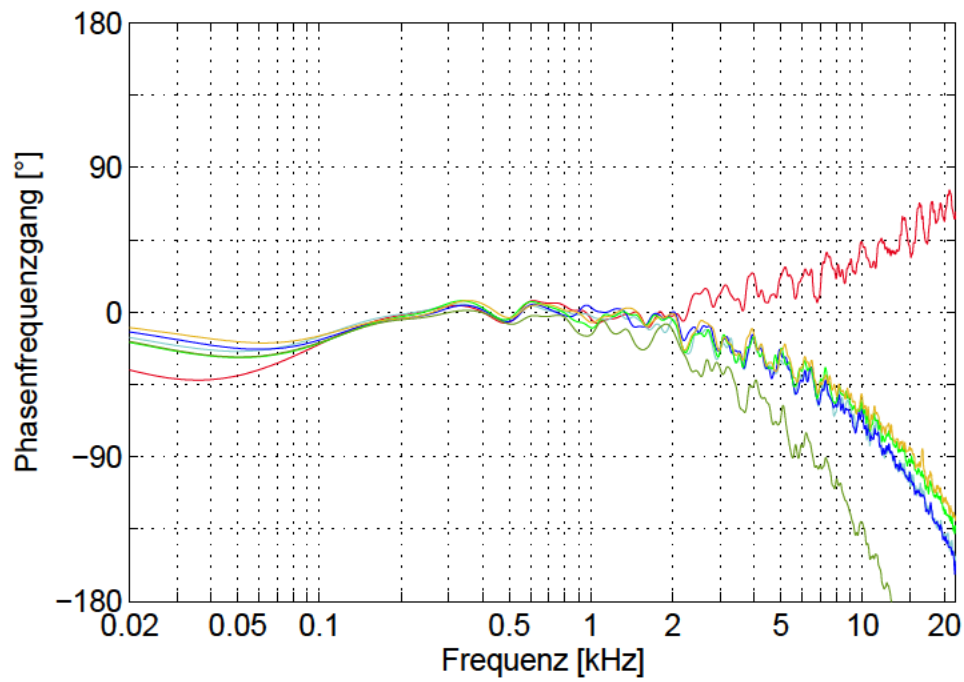


Abbildung 3.14 – Phasenspektren der kompensierten Hochtöner

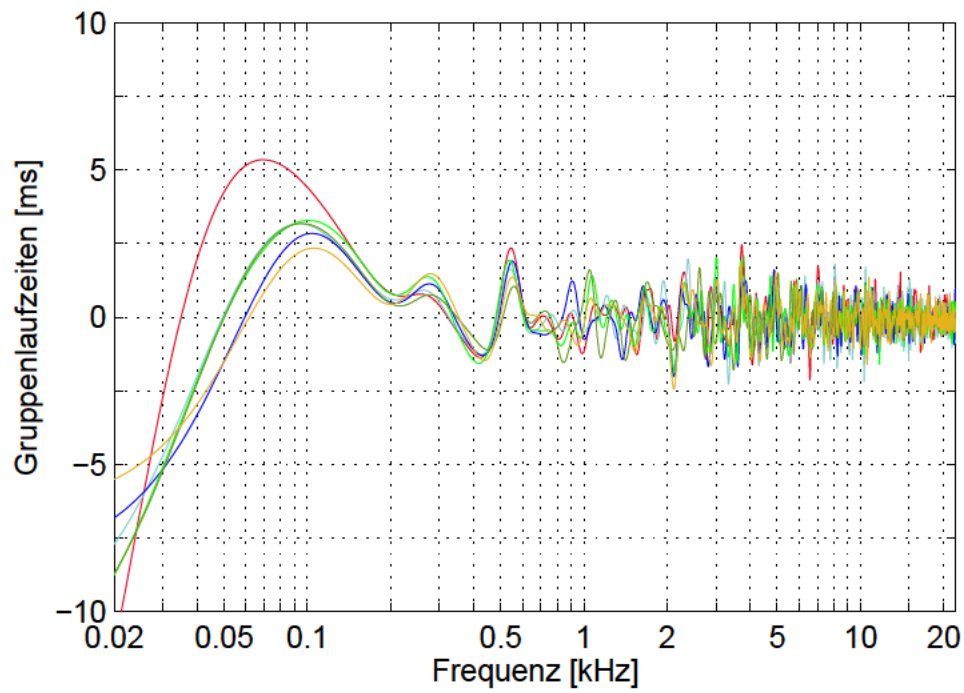
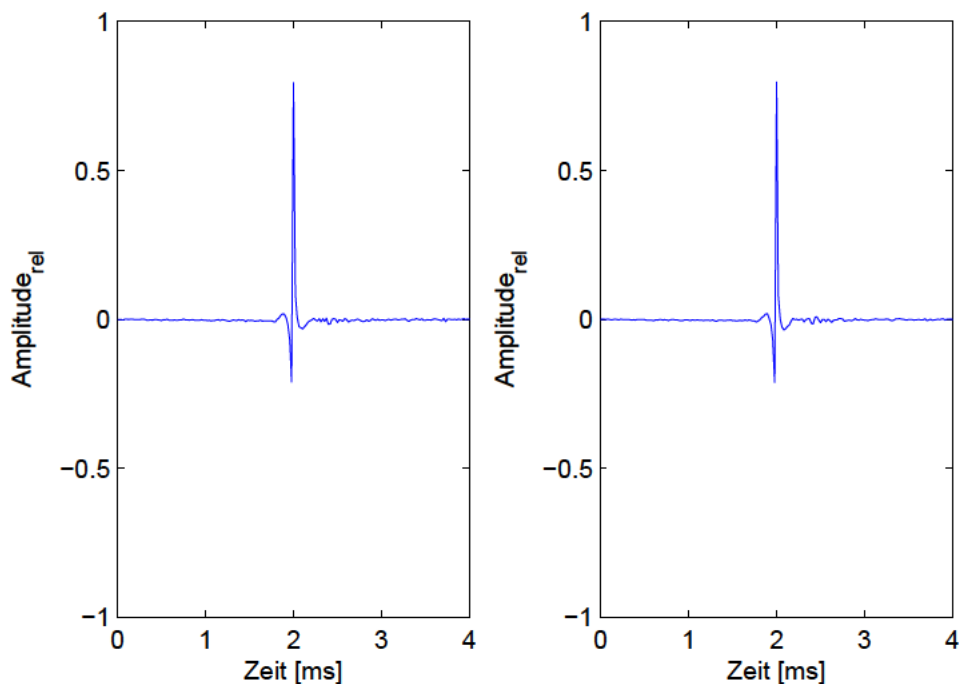


Abbildung 3.15 – Gruppenlaufzeiten der kompensierten Hochtöner



typischen Verläufe von in Betrag und Phase entzerrten Lautsprechern. Längere Ein- und Ausschwingvorgänge, wie sie noch bei den unentzerrten Treibern zu sehen waren, sind hier nahezu vollständig verschwunden. Die Impulsantwort der Kombination X-Art/Tieftöner weist eine leichte zeitliche Verzerrung auf, deren Ursache ein Laufzeitunterschied zwischen dem Hochtongang und dem Tieftongang sein kann. Die Verzögerung von  $250\mu\text{s}$  entspricht einem Schallumweg von 9 cm, womit als weitere Ursache auch eine Reflexion in unmittelbarer Nähe des Hochtöners, etwa am Tieftöner, in Frage kommt. Der Pegel der Reflexion ist um 25 dB niedriger bezogen auf den Maximalpegel der IR, womit diese aufgrund der Unhörbarkeit den Klangeindruck des Hochtöners kaum verfälschen sollte. Wie sich auch bei den Amplitudenspektren zeigt, erzeugt sie lediglich eine leichte Welligkeit im Bereich von 10 kHz bis 20 kHz, die im direkten Vergleich aller Hochtöner wohl eher nicht hörbar ist [Mül99, S.230].

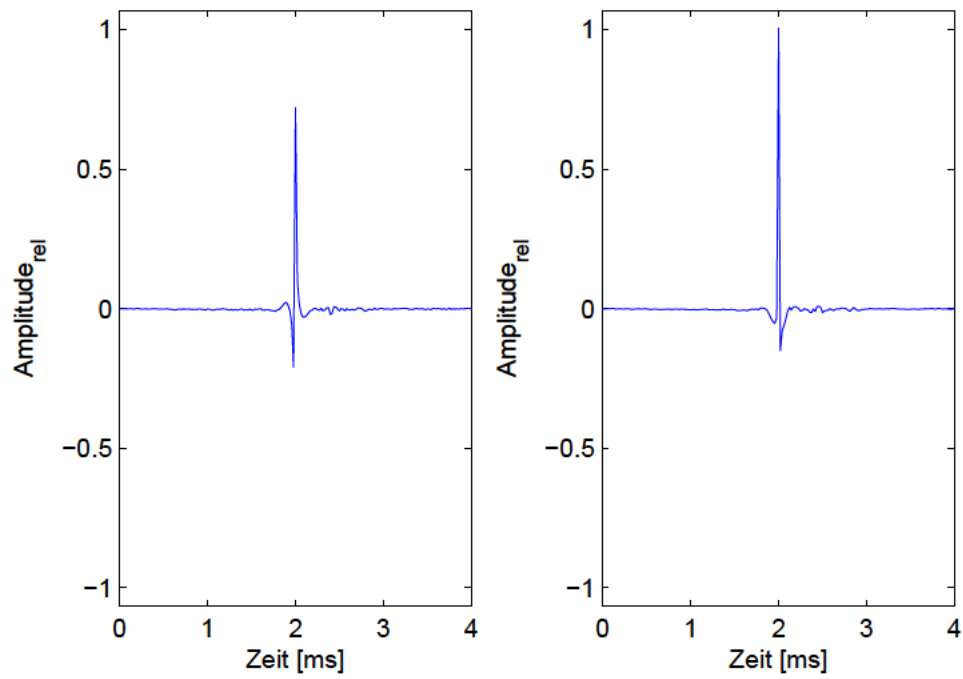


**Abbildung 3.16** – Impulsantworten der Hochtong-/Tieftongkombination nach der Entzerrung  
links: Aluminiumkalotte & TMT, rechts: Bändchen & TMT

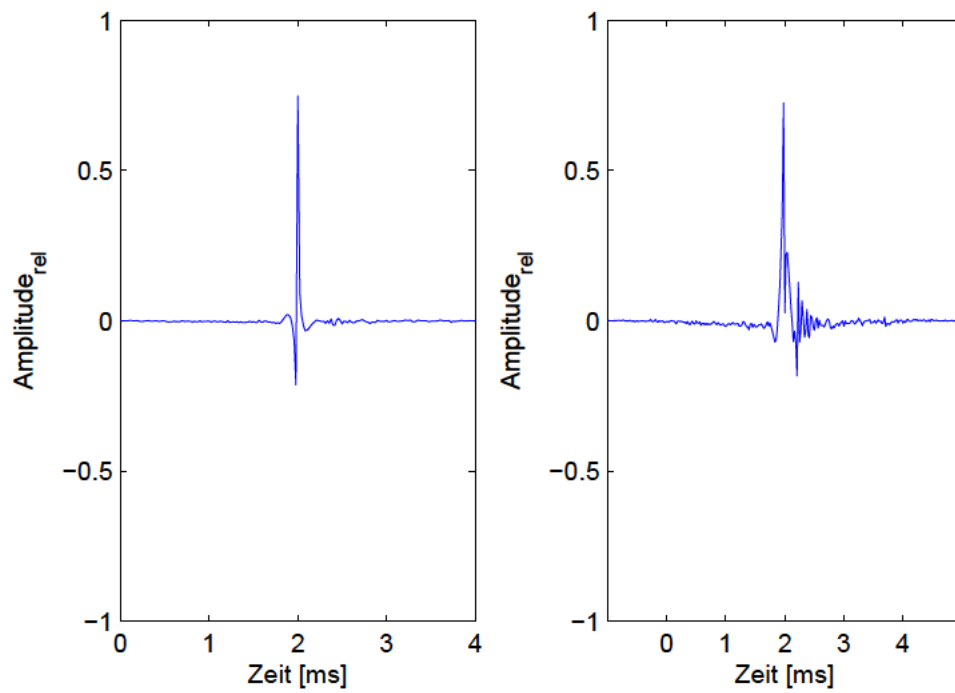
## 3.6 Zusammenfassung

Es wurden monauralen Messungen an allen Treibern im Fernfeld vorgenommen, wobei das Spektrum des Tiefmitteltöners durch eine Messung im Nahfeld ergänzt wurde. Die Messergebnisse bildeten die Grundlage bei der Erstellung von FIR-Filtern, welche





**Abbildung 3.17** – Impulsantworten der Hochton-/Tieftonkombination nach der Entzerrung  
links: Gewebekalotte & TMT, rechts: Magnetostat & TMT



**Abbildung 3.18** – Impulsantworten der Hochton-/Tieftonkombination nach der Entzerrung  
links: Ringstrahler & TMT, rechts: X-Art & TMT

die hochtönerspezifischen Verzerrungen des Amplituden- und Phasenfrequenzgangs im Bereich zwischen 2 kHz und 22 kHz kompensieren sollten. Die Ergebnisse der Evaluierung bestätigten den Erfolg der Entzerrung, die Amplitudenspektren aller Hochtöner wiesen nach der Filterung einen linearen Verlauf in einem Korridor zwischen  $\pm 1$  dB auf. Auch die Phasenverläufe wurden linearisiert. Durch eine zu hohe Gesamtlaufzeit kamen bei der Entzerrung des Tiefmitteltöners Filter mit geringeren Längen zum Einsatz, womit die Verzerrung des Treibers nicht vollständig kompensiert werden konnte. In Folge dessen kam es zu einer Verschiebung der unteren Grenzfrequenz auf 90 Hz. Die Ergebnisse der Vermessung der binauralen Impulsantworten im folgenden Kapitel werden objektiven Aufschluß darüber geben, in welchem Maße die Entzerrung die kopf- und torsobezogenen Schallfelder beeinflusst.



# Kapitel 4

## Akquise der binauralen Impulsantworten

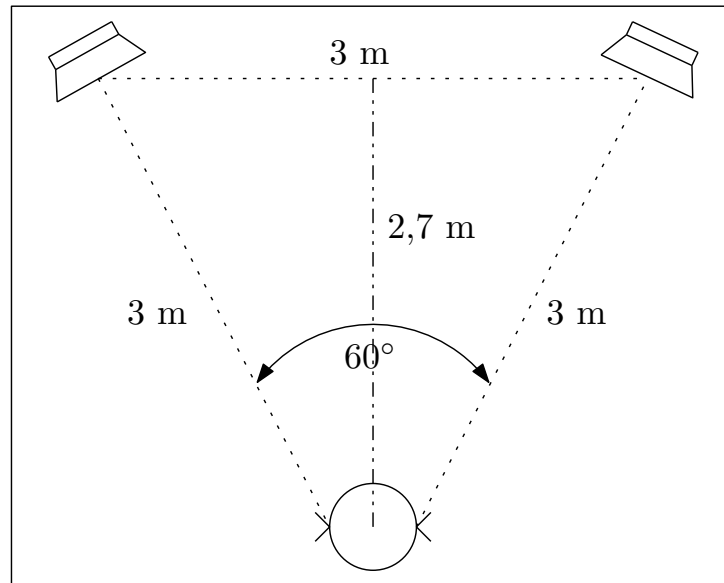
Im folgenden Kapitel soll die Erfassung der binauralen Impulsantworten (BIR) der sechs amplituden- und phasengangsentzerrten Hochtöner/Tieftöner Kombinationen erläutert werden. Sie sind die Grundlage der später im Hörversuch erfolgenden Auralisation einer stereophonen Abhörsituation, in welchem der direkte Vergleich der sechs Lautsprecherkombinationen erfolgen soll. Bei der Akquise der BIR wird der F.A.B.I.A.N. HATS (Head and Torso Simulator, dt. Kopf und Torso Simulator) verwendet, der im Rahmen der Arbeit von Alexander Lindau [Lin06] entstanden ist. Dieser erlaubt die automatisierte Erfassung von räumlich hochaufgelösten BIR in zwei Dimensionen, wobei BIR entsprechend von Kopfdrehungen im Bereich von maximal  $\pm 90^\circ$  aufgenommen werden können. Die somit entstehenden Sets von winkelabhängigen BIR's eröffnen später die Möglichkeit einer dynamischen Auralisierung der Lautsprecherkombinationen. Am Ende des Kapitels erfolgt eine qualitative Auswertung der BIR's, aus welcher Schlüsse für den daran anknüpfenden Hörversuch gezogen werden.

### 4.1 Ziel der binauralen Vermessung der Lautsprecher

Die Hochtönlautsprecher in Kombination mit dem Tiefmitteltöner entsprechen Lautsprecherkombinationen, wie sie in der Regel bei Nahfeldregielautsprechern zu finden sind. Der Unterschied zu einem realen Lautsprechergehäuse besteht in der Dimen-

sionierung der Schallwand, welche ja aus "Sicht" des Hochtöners quasi unendlich ist, und dem Fehlen einer Bassreflexöffnung.

Die Vermessung der Lautsprecherkombinationen mit Hilfe des HATS hat als Ziel Reihen von binauralen Impulsantworten, die einmal dem linken und einmal dem rechten Lautsprecher einer Stereoanordnung gemäß Abbildung 4.1 entsprechen. Von



**Abbildung 4.1** – Stereoanordnung von Lautsprechern nach DIN 15996

jeder Lautsprecherkombination und für jede Stereoposition (links oder rechts) werden dabei BIR's gemessen, die horizontalen Kopfstellungen zwischen  $-80^\circ$  und  $+80^\circ$  entsprechen, was bei einer verwendeten Auflösungsgenauigkeit von  $1^\circ$  in 161 verschiedenen BIR's pro Lautsprecher und Seite resultiert. Durch die hohe Auflösung können bei der späteren Auralisation Artefakte ausgeschlossen werden, da laut Untersuchungsergebnissen von Lindau et. al [Lin08] bereits eine Auflösung von  $2^\circ$  in der horizontalen Ebene ausreicht, um artefaktfreie Simulationen zu erzeugen. Bei der Vermessung werden alle Hochtöner und der Tiefmitteltöner über die digitale Frequenzweiche mit den individuellen Kompensationsfiltern betrieben, welche im vorhergehenden Kapitel erstellt wurden. Die Echtzeitfaltung einer Reihe "linker" BIR's und einer Reihe "rechter" BIR's mit beliebigen Klangmaterial erlaubt später die binaurale, dynamische, also einer Kopfbewegung folgende, akustische Simulation eines Paares virtueller Nahfeldregielautsprecher.

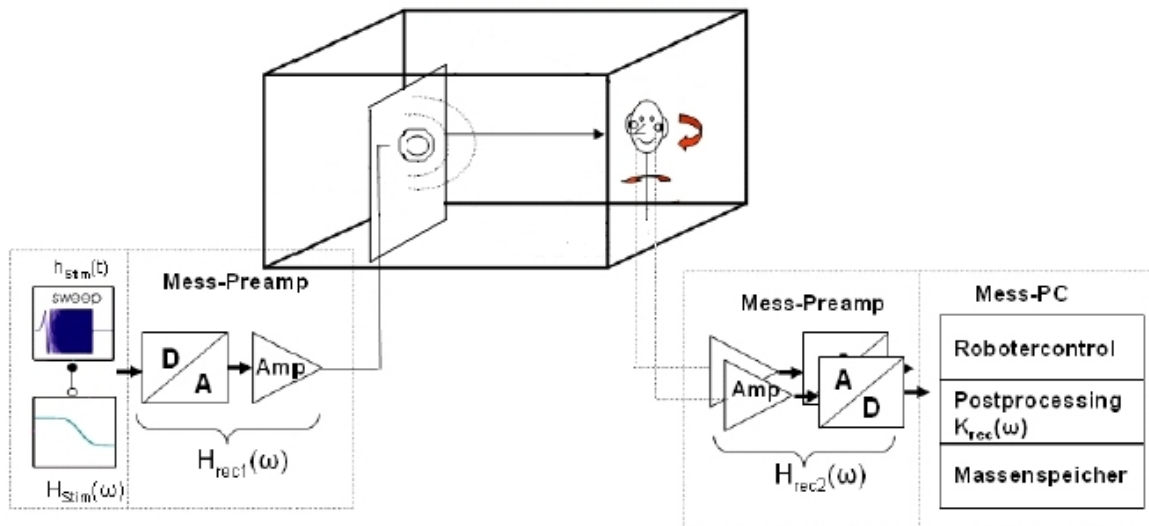


Abbildung 4.2 – Schematischer Aufbau der BIR-Messung (aus [Lin06], verändert)

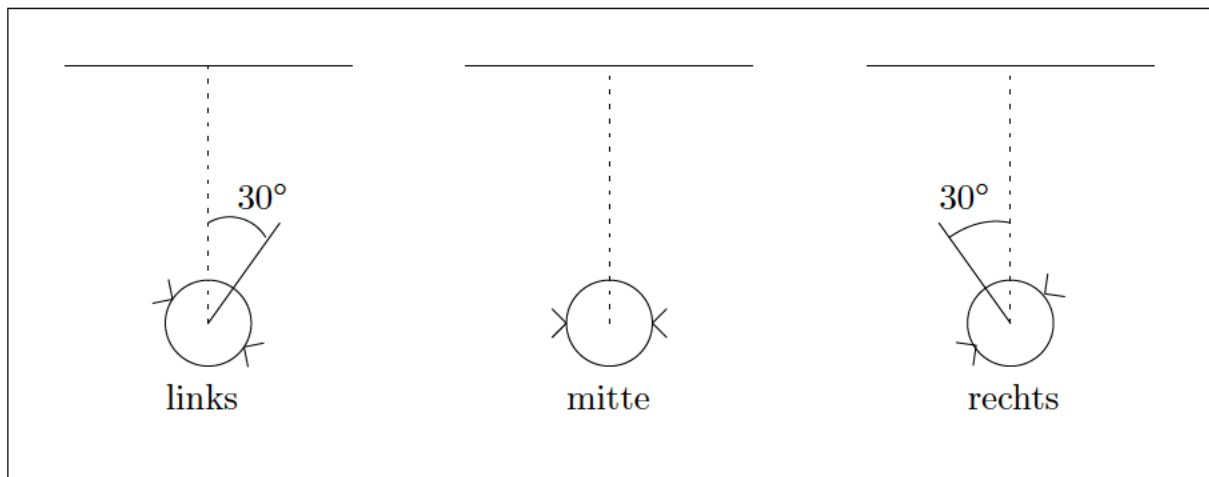
## 4.2 Durchführung der Messung

### 4.2.1 Aufbau

Für die Vermessung wurde das Messmikrofon und der Aufbau der monauralen Messungen entfernt, die Schallwand mit der Hochtöner/Tieftöner Kombination verblieb an dem Punkt. Der HATS wurde so positioniert, dass sich der Punkt der monauralen Fernfeldmessungen genau in der Kopfmittle befand. Der Abstand Kopfmittle-Schallwand betrug 2,7 m, die Höhe der Ohrkanaleingänge lag bei 1,13 m über dem Gitterrost. Infolge einer fehlerhaften Höhenberechnung lagen die Ohrkanaleingänge 8 cm unter der Achse des akustischen Zentrums der Hochtöner und damit unterhalb des Punktes, für welchen die Kompensationsfilter erstellt wurden. Ein schematische Darstellung des Aufbaus findet sich in Abbildung 4.2. Im Fall des verwendeten HATS liegen die Messmikrofone am Eingang des Ohrkanals. Deren leichte Emphase im hochfrequenten Bereich wird durch Kompensationsfilter während der Messung ausgeglichen. Die technische Spezifikation der weiteren Messtechnik, also AD/DA Wandler, Verstärker sowie dem Drehgelenk im HATS findet sich im Anhand D der Arbeit von Alexander Lindau [Lin06].

Aufgrund der Verfügbarkeit nur einer Schallwand musste zur Erfassung der unterschiedlichen BIR-Reihen entsprechend einem links, rechts und zentral platzierten

Lautsprecher, eine zweimalige Umpositionierung des HATS mit Hilfe eines Drehtellers erfolgen. Prinzipiell wurde dabei dessen Position relativ zur fest positionierten Schallwand geändert, was weniger Fehler beim Umbau nach sich zog, als wenn die Position der Schallwand relativ zu einem fest positionierten Kunstkopf geändert worden wäre. Abbildung 4.3 zeigt eine schematische Ansicht der drei HATS Positionen.



**Abbildung 4.3** – Positionen des HATS relativ zur Schallwand

## 4.3 Durchführung

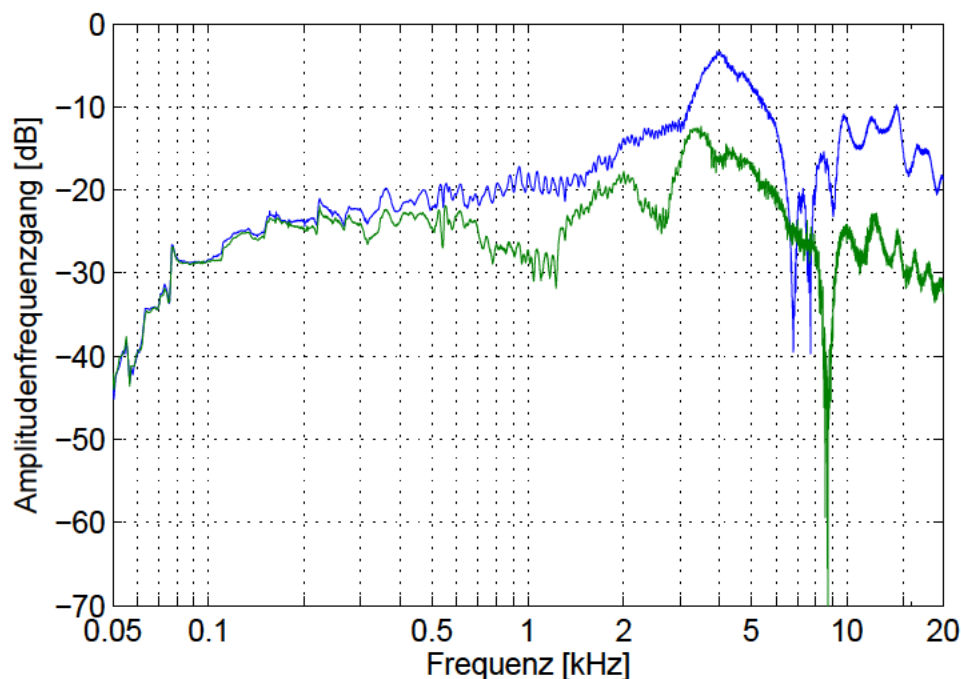
Im Vorfeld der Erfassung der BIR's wurde eine Referenzmessung der Messkette ohne Kunstkopfmikrofone vorgenommen. In dem aus der Messung resultierenden Spektrum steckt neben den Amplitudenverläufen der Wandler und Verstärker auch das Spektrum des zu kompensierenden Anregesignals, womit nach der Referenzmessung eine Kompensation der Messkette und des Anregesignals möglich ist, was Verzerrungen der Messergebnisse durch Wandler, Verstärker und Anregesignal verhindert.

Für die Messung der BIR's wurden Sinus-Sweeps 16. Ordnung mit Bassemphase verwendet, die Abtastrate betrug 44,1 kHz, womit in den kopfbezogenen Übertragungsfunktionen (HRTF engl. Head-Related Transfer Function) der Lautsprecherkombinationen eine spektrale Auflösung von 1,34 Hz erreicht wurde. Die niedrigere Abtastfrequenz stellt in Anbetracht der Bandbreite der menschlichen Wahrnehmung (20 Hz - 20 kHz) sowie der oberen Grenzfrequenz der Kompensationsfilter von 22 kHz keine Verringerung der Qualität dar, sieht man von der minimalen Verkleinerung des

Signal-Rausch-Abstand einmal ab. Die Auflösung des AD Wandlers betrug 24 bit. Jede der sechs Lautsprecherkombinationen wurde einmalig in drei Positionen vermessen, pro Position wurden 161 binaurale Impulsantworten erfasst, woraus sich insgesamt 2898 BIR's ergaben.

## 4.4 Auswertung

Für die Evaluation der gemessenen BIR's und den dazu korrespondierenden HRTF's bieten sich verschiedene Darstellungsformate an. Die einfachste Variante ist in Abbildung 4.4 dargestellt, welche ein Paar HRTF's bei einem azimuthalen Einfallswinkel von  $30^\circ$  zeigt. Die Position entspricht der des linken Lautsprechers in Abbildung 4.1 bei nach vorn ausgerichteten Kunstkopf. Die Darstellung weist den typischen Ver-



**Abbildung 4.4** – HRTF der Kombination X-Art/TMT bei 30 Grad  
blau: linkes Ohr, grün: rechtes Ohr

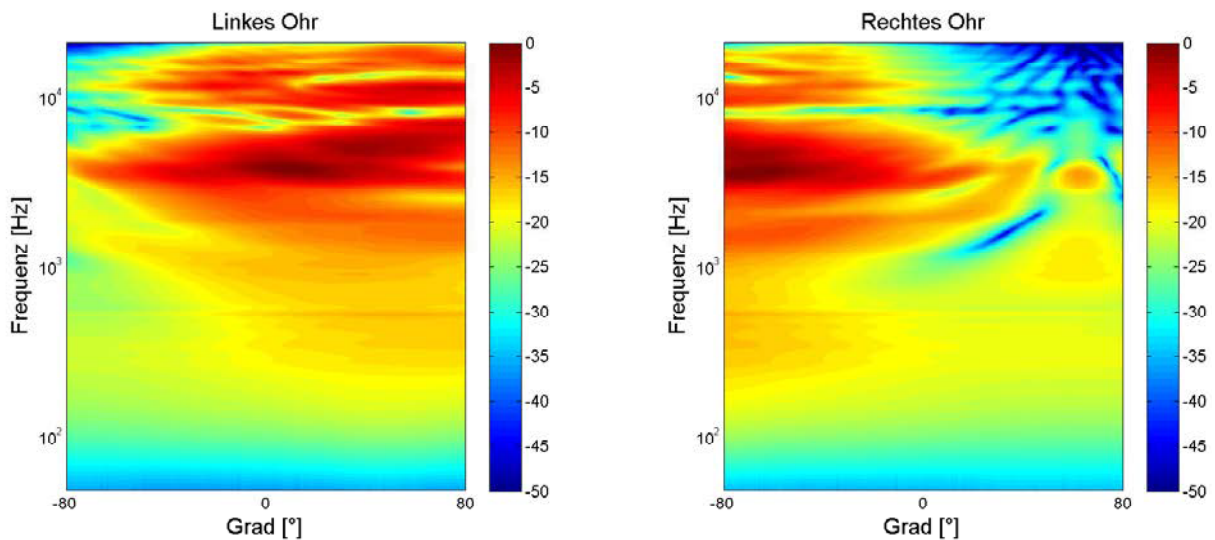
lauf eines Paares von HRTF bei seitlichen Schalleinfall auf. Der höhere Pegel auf dem linken, dem Lautsprecher zugewandten Ohr, der ab 200 Hz zu beobachten ist, hat seine Ursache in der aus Reflexionen am Kopf und Ohrmuschel resultierenden Schalldruckerhöhung [Moe95]. Im Bereich tiefer Frequenzen ist kaum ein Pegeldifferenz zwischen linken und rechten Ohr zu beobachten, da in dem Bereich der Kopf und der Torso nicht mit dem Schallfeld interagieren. Die prinzipielle Dämpfung auf dem rech-



ten Ohr, vor allem im Bereich hoher Frequenzen, ist auf die abschattende Wirkung des Kopfes zurückzuführen. Das Amplitudenmaximum auf beiden Ohren im Bereich von 2-5 kHz ergibt sich aus der Grundresonanz der Ohrmuschelhöhle (Cavum Conchae). Die charakteristischen Einbrüche auf beiden Ohren im Bereich zwischen 6 kHz und 10 kHz sind Auswirkungne von Antiresonanzen in der Ohrmuschelhöhle.

Um auch Aufschluß über das Wellenfeld einer Lautsprecherkombination in Relation zur horizontalen Kopfstellung zu erhalten, bietet sich eine Darstellung der HRTF über den Winkel an, wie sie in Abbildung 4.5 zu sehen ist. Prinzipiell ist der Schalldruckpegel auf der, den Lautsprechern zugewandten Seite, um 10 dB höher als auf der abgewandten Seite, was nicht aus der Darstellung hervorgeht. Wichtigste Auffälligkeit in dieser Abbildung ist die abschattende Wirkung des Kopfes, die auf dem rechten Ohr zwischen  $0^\circ$  und  $80^\circ$  auftritt und im Bereich über 5 kHz für einen Abfall des Schalldruckpegels sorgt. Die starken winkelabhängigen Pegel einbrüche auf dem linken Ohr, die im Bereich von zwischen 8 kHz und 12 kHz auftreten, sind auf die bereits erwähnten Antiresonanzen in der Ohrmuschelhöhle zurückzuführen.

Um jedoch auch eine objektive Aussage über die Unterschiede zwischen allen Hoch-

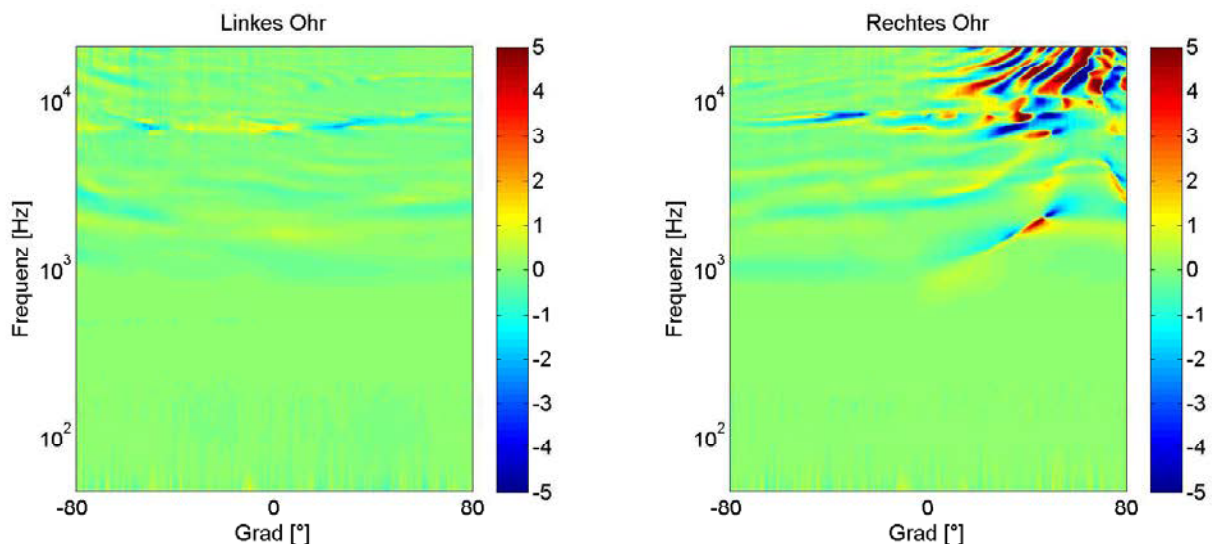


**Abbildung 4.5** – HRTF über einen Winkel von  $161^\circ$  eines linken Lautsprechers (X-Art/TMT) zwischen 50 Hz und 22 kHz

töner/Tieftöner Kombinationen zu erhalten, müssen die Differenzen zwischen den HRTF's für alle möglichen 15 Hochtönerpaare  $\binom{6}{2}$  bestimmt werden. Hierzu bietet es sich an, die HRTF-Differenzen ebenfalls über den Winkel darzustellen. Von den daraus resultierenden 30 Abbildungen (jeweils 15 Vergleiche des linken und rech-

ten Lautsprechers) sollen hier die Paare mit den größten und den geringsten Abweichungen zwischen den HRTF entsprechend dem linken Lautsprecher gezeigt werden. Abbildung 4.6 zeigt die Differenzen zwischen Gewebekalotte und Ringstrahler, dem Paar mit den geringsten Unterschieden. Die Unterschiede zwischen den kopfbezogenen Schallfeldern bewegen sich auf der Lautsprecher zugewandten Seite im Rahmen von  $\pm 1$  dB, die wenigen Einbrüche im Bereich von 8 kHz sind auf Antiresonanzen zurückzuführen. Auf dem rechten Ohr sind bei hohen Frequenzen wiederum die Auswirkungen der Kopfabstimmung zu sehen, die bei den Lautsprechern zur unterschiedlichen Verteilung von Resonanzen und Einbrüchen führt. Die geringen Unterschiede im Arbeitsbereich der Hochtöner zwischen 2 kHz und 22 kHz sind wohl in der starken baulichen Ähnlichkeit der Treiber zu suchen und bestätigen die in der Theorie geäußerte Vermutung, dass die axiale Schallabstrahlung nur von der Größe der Membran abhängt. Da beide Hochtöner mit dem gleichen Tiefmitteltöner vermessen wurden, ist im Bereich bis 2 kHz nahezu keinen Unterschied zwischen den HRTF zu beobachten. An dieser Stelle kann festgehalten werden, dass der auditive Unterschied zwischen beiden Lautsprechern, wenn überhaupt feststellbar, äußerst gering ausfällt.

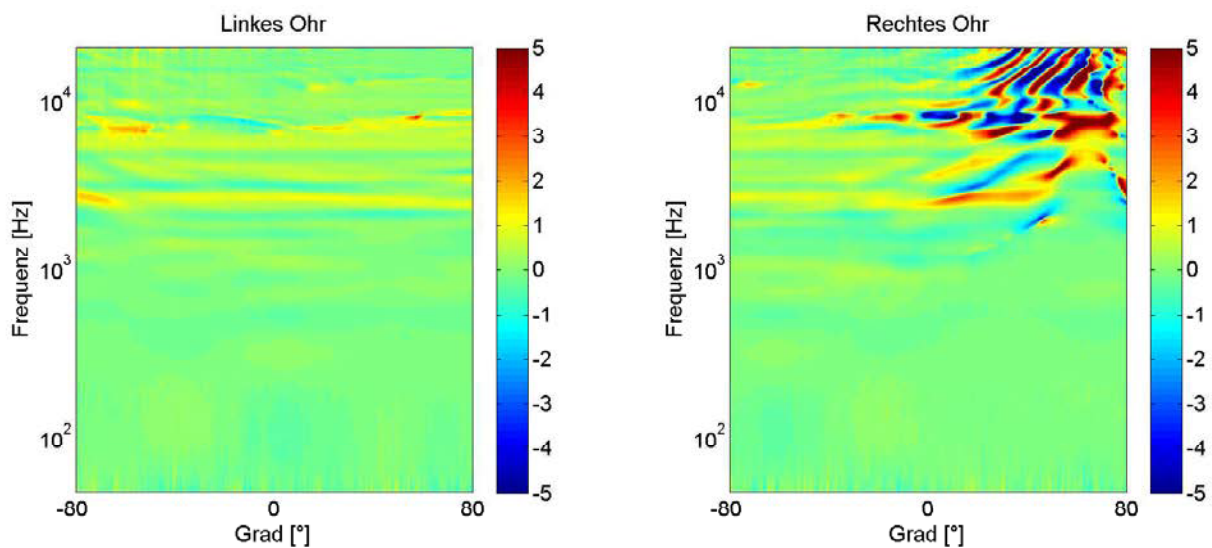
Abbildung 4.7 zeigt die Differenzen zwischen Magnetostat und Ringstrahler, das



**Abbildung 4.6** – Differenz-HRTF für das Hochtönerpaar Ringstrahler und Gewebekalotte zwischen 50 Hz und 22 kHz

Paar mit den größten Abweichungen im kopfbezogenen Schallfeld. Sieht man von den wenigen Einbrüchen durch Antiresonanzen ab, bewegen sich die Pegelunterschiede

de im Arbeitsbereich der Hochtöner zwischen  $-1$  dB und  $+1,5$  dB. Prägnant auf dem linken Ohr sind vor allem die über den ganzen Winkel konstanten Abweichungen bei 2,5 kHz und 5,6 kHz, deren Ursache in den marginal unterschiedlichen Ergebnissen der FIR-Entzerrung liegt (siehe dazu auch Abbildung 3.13). Im Bereich unterhalb von 2 kHz sind, aufgrund des gleichen Tiefmitteltöners, wiederum keine Abweichungen zu erkennen. Aufgrund der geringen Differenzen wird wohl eine Unterscheidung der Hochtöner am Klangeindruck auch hier sehr schwer fallen.



**Abbildung 4.7** – Differenz-HRTF für das Hochtönerpaar Ringstrahler und Magnetostat

## 4.5 Zusammenfassung

Die binaurale Vermessung der sechs FIR-Filter entzerrten Hochtöner/Tieftöner Kombinationen hatte als Ziel die Erfassung von binauralen Impulsantworten, welche denen eines linken und eines rechten Lautsprechers in einer typischen Stereoabhörordnung entsprechen. Die BIR wurden für Kopfpositionen im Bereich von  $\pm 80^\circ$  aufgezeichnet. Zusätzlich wurden BIR entsprechend einer frontalen Positionierung des Lautsprechers aufgezeichnet. Der Vergleich der am Kopf bezogenen Schallfelder aller Hochtöner ergab, dass nach der Entzerrung nur noch marginale objektive Differenzen existieren, was die Vermutung erlaubt, dass eine auditive Unterscheidung der Lautsprecherkombination auch im direkten Vergleich kaum mehr möglich ist.

# Kapitel 5

## Perzeptive Evaluation

Die subjektive Evaluation der entzerrten Hochtönsysteme stellt den letzten und zentralsten Punkt dieser Arbeit dar. Die im vorangegangenen Kapitel vorgenommene objektive Auswertung der binauralen Impulsantworten und kopfbezogenen Übertragungsfunktionen konnte zwar bereits Aufschluss über noch vorhandenen Unterschiede zwischen den einzelnen Hochtönern geben. Allerdings lässt sich aus den Darstellungen nicht ableiten, welchen Einfluss die verbliebenen Unterschiede auf die subjektiv-individuelle Wahrnehmung haben. Um herauszufinden, ob überhaupt noch ein perzeptiver Unterschied zwischen den entzerrten Hochtönern besteht, wurde zunächst ein perzeptiver Vergleich von allen sechs virtuellen Lautsprecherpaaren vorgenommen. Als Ergebniss dieses Vorversuches wurde zunächst nur mit einer Paarung Hochtöner ein Hörversuch in Form eines A/B/X-Vergleiches durchgeführt. Der Versuch und seine Ergebnisse sollen im folgenden vorgestellt werden.

### 5.1 Vorversuch

Um zunächst die Frage zu beantworten, welche Unterschiede in der Perzeption der Hochtöner die verbliebenen objektiven Differenzen überhaupt noch erzeugen, wurde ein direkter Vergleich zwischen allen sechs virtuellen Lautsprecherpaaren vorgenommen. Dies geschah mit Hilfe einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI), die in "pure-data" entwickelt wurde und welche über das OSC-Protokoll mit der Faltungssoftware "fwonder" [LHW07] kommunizierte. Sie ermöglichte sowohl die latenzfreie Wahl eines Lautsprecherpaares als auch die latenzfreie Wahl von einem Stimuli, welcher

virtuell durch diese Lautsprecherpaar wiedergegeben werden sollte. Es standen zehn verschiedene Stimuli zur Verfügung, deren ausführliche Vorstellung im Abschnitt Versuchsdurchführung erfolgt. Der Vergleich wurde ohne Protokollierung der Ergebnisse durch Mitarbeiter des Fachgebietes Audiokommunikation, Klaus Heinz sowie den Autor der Arbeit vorgenommen.

Die perzeptiven Eindrücke aller Personen bestätigten die bereits bei der objektiven Evaluation geäußerte Vermutung. Im direkten Vergleich konnte von keinem der Probanden ein klanglicher Unterschied zwischen den sechs Lautsprecherpaaren in Abhängigkeit von Stimuli und horizontaler Stellung des Kopfes festgestellt werden. Es wurde daraufhin beschlossen, zunächst die verbliebenen perzeptiven Unterschiede zwischen dem Paar Hochtöner zu untersuchen, welches in der objektiven Evaluation die größten Differenzen in den HRTF aufwies. Der im folgenden beschriebene Hörversuch bezieht sich somit auf den Vergleich von Ringstrahler und Magnetostat beide in Kombination mit dem gleichen Tiefmitteltöner.

## **5.2 Versuchsbeschreibung**

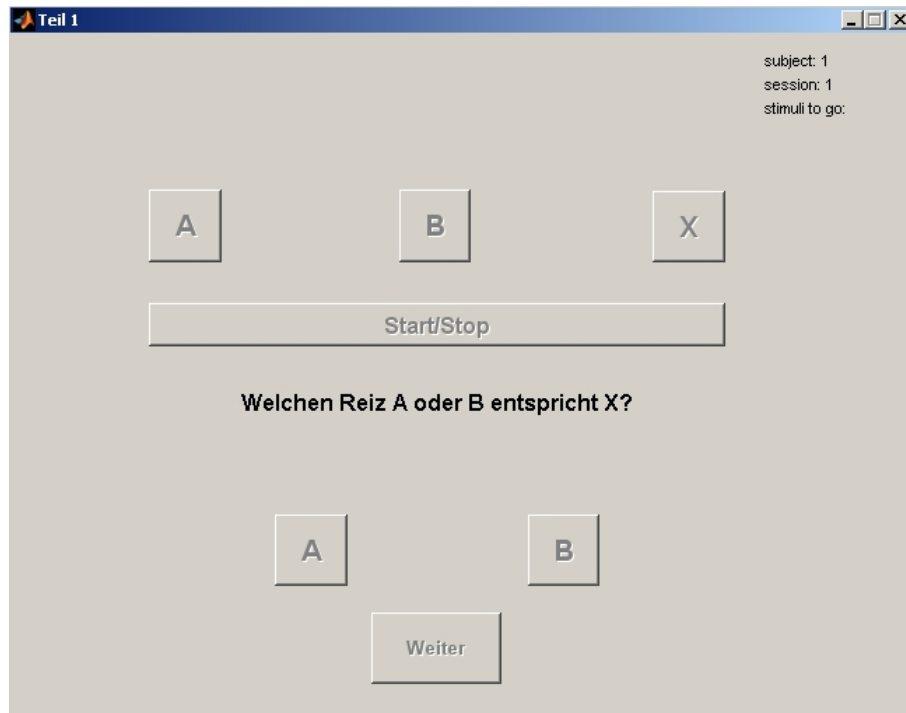
Prinzipiell soll im folgenden Hörversuch die Frage geklärt werden, ob Versuchspersonen überhaupt noch einen Unterschied zwischen den beiden Hochtonlautsprechern mit den größten Differenzen in den HRTF wahrnehmen. Als Instrument zur Findung von marginalen Unterschieden hat sich in der Audioevaluation der ABX-Vergleich [Cla82] bewährt, der, bei korrekter Wahl der Versuchsparameter, ein Ergebniss liefert, dass signifikant und statistisch sicher ist. Ob diese Resultate deswegen auch Anerkennung finden, steht auf einem anderem Blatt, was sich vor allem an der "Großen Debatte" zeigen läßt, die seit Anfang der 80er in den Reihen der Audio Engineering Society geführt wird [Nou90].

### **5.2.1 Methodik**

Bei dem ABX-Vergleich handelt es sich um ein Forced-Choice Verfahren, bei welchem Probanden drei Reize dargeboten bekommen. Die Reize A und B sind dabei verschieden, der dritte Reiz X ist entweder mit A oder B identisch. Die Aufgabe des Probanden

ist es, dass identische Reizpaar zu identifizieren und dem Reiz X den entsprechenden Reiz A oder B zuzuordnen, womit sich als mögliches Ergebnis eine objektiv richtig bzw. falsche Antwort ergibt. Die Zuordnung der Reize A und B erfolgt dabei zufällig und doppelblind, wie es die AES Recommendation 20 [AES96] für subjektive Vergleiche und Evaluationen von Lautsprecher empfiehlt.

Die Anzahl der Wiederholungen des Versuches (Trials) ist nicht genau festgelegt, in



**Abbildung 5.1** – Grafische Benutzeroberfläche des ABX-Versuches

der Regel liegen sie im Bereich von 10 bis 20 Wiederholungen [Lev86]. Durch die Wahl eines Signifikanzniveaus in Höhe von 5% oder 10% wird die Menge an korrekten Antworten bestimmt, ab welchem die Alternativhypothese angenommen wird. In einer methodischen Analyse des ABX-Vergleiches durch Leventhal [Lev86] stellte dieser fest, dass eine geringe Anzahl an Versuchswiederholungen bei diesen Signifikanzniveaus aufgrund der prinzipiellen Chance von 50%, einen korrekten Treffer zu erzielen, ein hohes Risiko von Typ 2 Fehlern produziert, welches dem Versuchsschluß "Hörbare Unterschiede sind nicht hörbar" entspricht. Er leitete daraus ab, dass die Anzahl der Wiederholungen  $n$  eines ABX-Versuches aus dem Signifikanzniveau  $\alpha$ , der statistischen Sicherheit  $\beta$ , der Nullhypothese  $H_0$  und der Alternativhypothese (Effektgröße)  $H_1$  bestimmt werden müsse, Burstein [Bur88] liefert dazu die entsprechenden Näherungsformeln (siehe dazu Gleichung 5.1).

$$n = \left[ \frac{z(\alpha)\sqrt{H_0(1-H_0)} + z(\beta)\sqrt{H_1(1-H_1)}}{H_1 - H_0} \right]^2 \quad (5.1)$$

Berücksichtigt man diese Erkenntnisse, ergeben sich für kleine Alternativhypothesen, wie sie in diesem Fall der marginalen klanglichen Unterschiede zwischen den kompensierten Hochtönen vorliegen, hohe Wiederholungszahlen, die in zeitlich langen Hörversuchen von 45 min und mehr resultieren. Dies kann eine Verzerrung der Ergebnisse durch Demotivation oder einsetzende Ermüdung des Probanden zur Folge haben.

Aus diesem Grund wurde die Alternativhypothese zu 75% angesetzt, was bei einem nicht signifikanten Ergebnis des Hörversuches der Formulierung "Unterschiede konnten überwiegend nicht gehört werden" entspräche. Das Signifikanzniveau wurde zu 5% und die statistische Sicherheit zu 95% festgelegt, was in 40 Wiederholungen pro Versuchsperson resultierte.

### 5.3 Versuchsaufbau und -durchführung

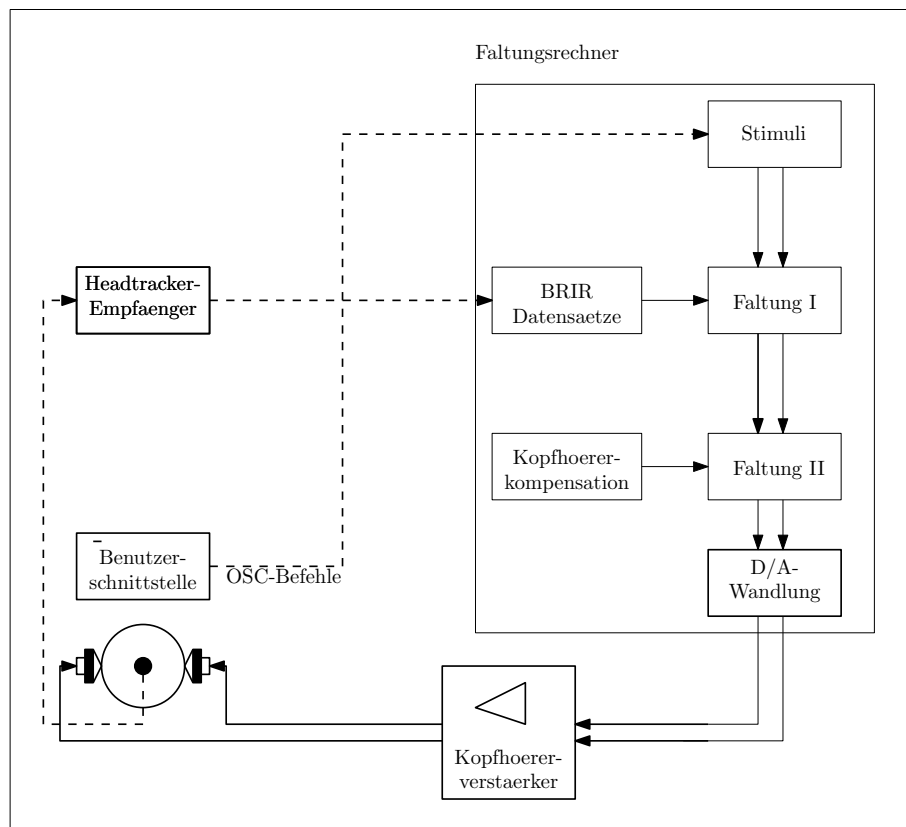
Der Hörversuch fand im kleinen Studio des Fachgebietes Audiokommunikation der Technischen Universität Berlin statt. Abbildung 5.2 zeigt den dortigen technischen Aufbau. Die Benutzerschnittstelle wurde durch das ABX-Modul der Hörversuchsumgebung Whisper [CW09] auf einem Notebook mit Mathworks Matlab® bereitgestellt. Das Modul sendet in Abhängigkeit vom gewählten Reiz A, B oder X OSC-Steuerdaten über eine Netzwerkverbindung an den Faltungsrechner. Durch Drücken eines der drei oberen Buttons in 5.1 wurde das aktuelle Klangbeispiel mit den binauralen Impulsantworten von einem der beiden virtuellen Lautsprecherpaare gefaltet. Nach einer weiteren Faltung mit den Kompensationsfiltern für den Kopfhörer wurde das Klangmaterial über einen elektrostatischen Kopfhörer STAX Lambda Pro der Versuchsperson dargeboten.

Im Vorfeld eines jeden Versuches wurde von dem ABX-Modul die Reihenfolge der Klangbeispiele zufällig festgelegt. Das jeweils aktuelle Klangbeispiel wurde auf dem Faltungsrechner mit den BIR-Daten von beiden Lautsprecherpaaren parallel gefaltet. Als Lautsprecherpaar soll hier die Kombination von BIR-Daten eines virtuell links

und eines virtuell rechts platzierten Lautsprechers verstanden werden. Je nach gewählten Reiz wurde jeweils das nicht aktivierte Lautsprecherpaar stumm geschaltet. Die Realisierung der OSC-Schnittstelle im Faltungsrechner, die Wiedergabe und das Senden der Klangbeispiele an die Faltungseingabe sowie die automatische Stummschaltung erfolgte in puredata [pur10].

Der Headtracker war zur Feststellung der Kopfposition des Probanden direkt am Kopfhörerbügel befestigt. Er sendete fortlaufend magnetische Positionsdaten an einen Empfänger, der wiederum Informationen an das Faltungsrechner zur korrekten Wahl eines zur Kopfrichtung des Probanden passenden BIR-Paares von einem "linken" und einem "rechten" Lautsprecher übermittelt, wo diese dann parallel gefaltet wurden.

Aus Rücksicht auf den zeitlichen stark begrenzten Speicher des auditiven Gedächtnis



**Abbildung 5.2** – Versuchsaufbau Evaluation, durchgezogene Linien kennzeichnen Audiodaten, gestrichelte Linien Steuerdaten

nis und die Marginalität der Unterschiede wurde die Wiedergabe des Klangbeispiels bei einem Wechsel des Reizes nicht unterbrochen und neu gestartet, sondern fortgesetzt. Die bereits angesprochenen ständig parallele Faltung beider Lautsprecherpaare ermöglichte dabei ein artefaktfreies Umschalten zwischen beiden Paaren. Die Wieder-



gabe des aktuellen Klangbeispiels konnte vom Probanden jederzeit gestoppt werden, und durch erneutes Drücken der Buttons A, B oder X gestartet werden.

### **5.3.1 Stimuli**

Das Klangmaterial bildet eine wichtige Grundlage für die Bewertung, da dieses während des Hörversuches mit den binauralen Impulsantworten gefaltet wird, quasi also über die virtuellen Lautsprecherpaare wiedergegeben wird. Da es um die Findung von marginalen Unterschieden ging, mußte ein breites Spektrum an Material ausgewählt werden, dass sich untereinander sowohl in der zeitlichen und spektralen Zusammensetzung als auch in der räumlichen Abbildung deutlich unterscheidet.

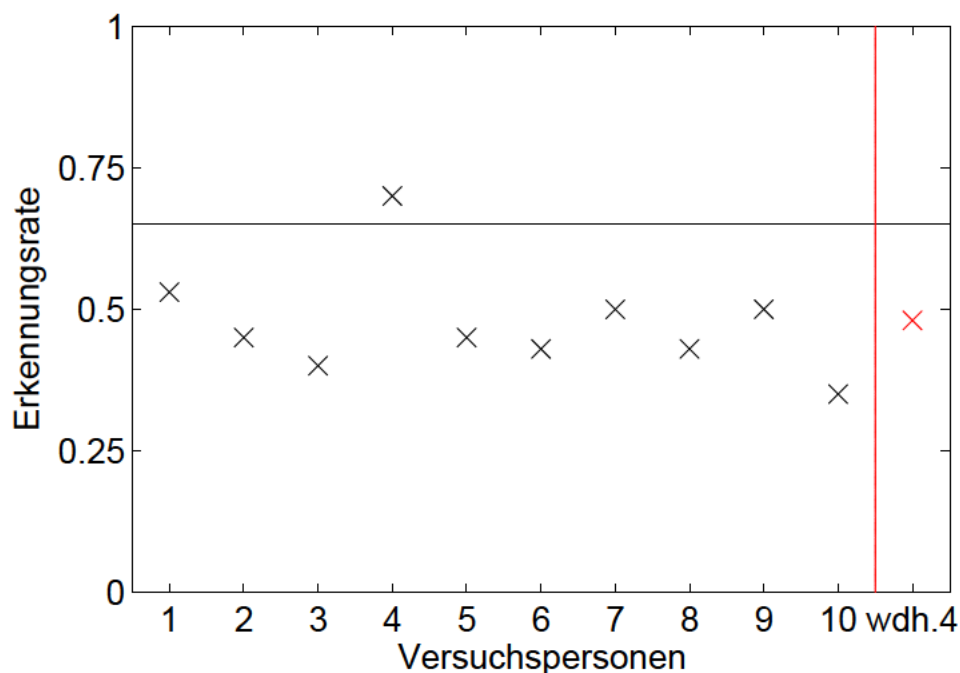
Insgesamt wurden zehn Klangbeispiele mit einer Länge von zwanzig bis dreissig Sekunden ausgewählt. Bei 40 Wiederholungen pro Versuchsperson wurde jedes Stück also viermal zufällig dargeboten. Neben Rosa Rauschen als einem Reiz, der sich bei der Aufdeckung von geringen Unterschieden bewährt hatte, wurden zwei nachhallfreie Aufnahmen von deutschen Sprechern, einem weiblichen und einem männlicher, verwendet. Desweiteren kamen ein klassischer Ausschnitt (Amadeus Quartet), vier Stücke aus dem Bereich Rock/Pop (Tears for Fears, 2x Sting, Jennifer Warnes), ein Stück aus dem Bereich Jazz (Dave Brubeck Quartet) sowie ein Stück aus dem Bereich Weltmusik (Dead can Dance) zum Einsatz.

### **5.3.2 Probanden**

Insgesamt nahmen zehn Probanden an dem Hörversuch teil, wobei der Hörversuch einer Person wiederholt wurde (siehe Auswertung). Das Durchschnittsalter aller Personen lag bei 31 Jahren. Sieben der Personen waren entweder Angestellte oder Magistranten am Fachgebiet Audiokommunikation oder stammten aus dessen Umfeld und waren mit der Durchführung von Hörversuchen sowie mit der Bewertung von Unterschieden in akustischen Simulationen vertraut. Drei der Personen hatten keinerlei Erfahrung mit Hörversuchen, wiesen aber eine musikalische Ausbildung auf.

## 5.4 Auswertung

Abbildung 5.3 fasst die Erkennungsraten aller Versuchspersonen zusammen, Abbildung 5.4 zeigt die Erkennungsraten gemittelt über alle Stimuli. Neun von zehn Probanden erzielten kein signifikantes Ergebnis. Sie liegen mit ihren Trefferquoten alle im Bereich von 50%, was der Chance auf einen Treffer beim zufälligen Raten der Antwort entspricht. Alle Probanden gaben an, keinerlei auditorischen Anhaltspunkt



**Abbildung 5.3** – Ergebnisse des Hörversuches gemittelt über alle Versuchspersonen, horizontale Linie entspricht dem Signifikanzniveau

gefunden zu haben, an welchem sie einen der beiden Hochtöner hätten identifizieren können. Versuchsperson zehn erzielte eine besonders niedrige Quote von 35%, womit sie nach Leventhal [Lev88] absichtlich falsch geraten haben muss. Da alle Versuchspersonen ausdrückliche Instruktionen bezüglich der Aufgabenstellung erhielten und der Versuch zudem doppelblind durchgeführt wurde, kann dies jedoch ausgeschlossen werden. Versuchsperson vier erzielte ein signifikantes Ergebnis, gab aber an, keinerlei Unterschiede wahrgenommen zu haben. Bei einer Wiederholung des Versuches am folgenden Tag konnte dieser Proband sein signifikantes Ergebnis nicht erneut herstellen. Prinzipiell muss bei einem Signifikanzniveau von 5% in zwanzig Wiederholungen eines Versuches ein signifikantes Ergebnis auftreten. Die in Folge des ersten Hörversuches getätigten Aussagen des Probanden zur Nichthörbarkeit von Unterschieden

erklären dieses Ergebnis zu einen Teil der statistischen Routine. Im Falle der Stimuli wurde kein signifikantes Ergebnis erzielt. Auch hier liegen alle Treffer im Bereich 50%, was auf mehr oder weniger willkürliches Raten der Versuchspersonen infolge von nicht feststellbaren Unterschieden schließen läßt. Das Resultat bei der Auswertung der Trefferraten über alle Versuchspersonen wird damit quasi bestätigt.

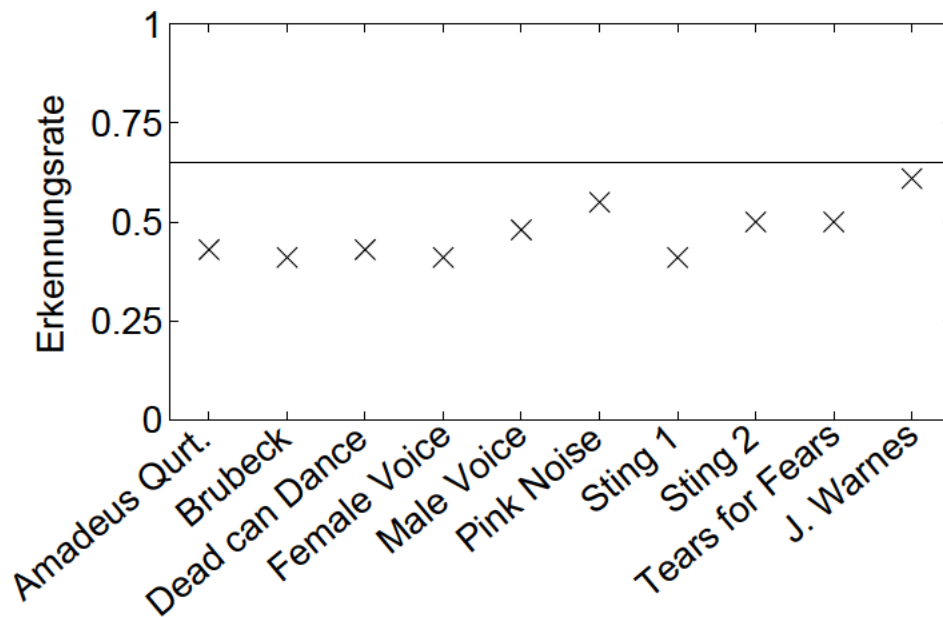


Abbildung 5.4 – Ergebnisse des Hörversuches gemittelt über alle Stimuli, horizontale Linie entspricht dem Signifikanzniveau

## 5.5 Zusammenfassung

Die statistische Auswertung belegt, dass sich für die Hochtönlautsprecher mit den größten objektiven Differenzen keine subjektiv-perzeptiven Unterschiede ergeben. Aufgrund der Größe der Alternativhypothese kann davon ausgegangen werden, dass die "Unterschiede überwiegend nicht hörbar waren". Extrapoliert man dieses Ergebnis auf die 14 verbliebenen Hochtönerpaarungen, welche alle geringere Unterschiede in den HRTF aufwiesen, kann davon ausgegangen werden, dass bei einem direkten Vergleich dieser Paare ebenfalls kein signifikantes Ergebnis erzielt worden wäre. Den Hochtönlautsprechern wurden durch die FIR-Entzerrung damit alle, für ein individuelles Klangbild beim Hörer notwendigen Anhaltspunkte, entzogen. Dies kann auch durchaus als Bestätigung der Theorie verstanden werden, dass bei einer Hörposition

auf Achse zum Lautsprecher und bei Betrieb des Lautsprechers im linearen Bereich und in reflexionsfreier Umgebung der Amplitudenfrequenzgang das wichtigste Kriterium für die Wahrnehmung darstellt [Too86].



# Kapitel 6

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersuchte die im Volksmund weitverbreitete Meinung, dass die subjektiven Klangeindrücke von Hochtönlautsprecher eindeutig im Zusammenhang mit dem Antriebsprinzip, dem verwendeten Membranmaterial und der geometrischen Ausdehnung der Membran stehen. Dafür wurden sechs typischerweise in aktuellen Lautsprechern zum Einsatz kommende Hochtöner ausgewählt, welche sich sowohl im Wandlerprinzip, ihrer Geometrie als auch in dem schallerzeugenden Material der Membran unterschieden.

Um typische Verfärbungen des Klangbildes durch eine Interaktion mit dem umgebenden Raum als auch mit der Schallwand eines Lautsprechergehäuses auszuschließen, wurde alle Treiber in einer quasi unendlichen Schallwand in einer reflexionsfreien Umgebung untersucht. Um Verfärbungen des Klangbildes zu vermeiden, die sich allein aus den treiberspezifische Verzerrungen des Amplituden- und Phasenganges ergeben, wurden alle Treiber mit Hilfe einer digitalen Frequenzweiche auf Basis von FIR-Filtern für einen Punkt im Raum entzerrt. Das Ziel der Kompensation war ein linearer Amplitudengang im Bereich von 2 kHz bis 22 kHz mit maximalen Abweichungen von  $\pm 1$  dB sowie ein linearer Phasengang.

Nach erfolgreicher Entzerrung aller Treiber wurden von diesen in Kombination mit einem ebenfalls kompensierten Tiefmitteltöner binaurale Impulsantworten erfasst. Die Messung der BIR erfolgte in Positionen relativ zu den Treiber, die einem linken und einem rechten Lautsprecher in einer typischen Stereoanordnung entsprachen. Um bei einem späteren Vergleich eine dynamische Simulation der Lautsprecherpaare zu ermöglichen, wurden die BIR in einem Radius von typischen Kopfbewegungen aufge-

zeichnet.

In einem abschließend durchgeführten Hörversuch wurden die beiden virtuellen Lautsprecherpaare verglichen, welche bei der Analyse der Binauraldaten die größten Abweichungen voneinander aufwiesen. Anhand der binauralen, dynamischen Simulationen der Lautsprecherpaare sollte von zehn Versuchspersonen herausgefunden werden, ob überhaupt noch ein, am subjektiven Klangbild festzumachender, Unterschied zwischen den Hochtönlautsprechern existiert. Das Ergebnis des Versuches erlaubt den Schluß, dass zwischen den Hochtönen perzeptiv keinerlei Unterschied mehr besteht. Abschließend kann festgehalten werden, dass im Fall von ausgeschlossener Interaktion mit Raum und Schallwand, bei axial in Amplitude und Phase linearisierten Treibern im linearen Betrieb keinerlei Differenz mehr zwischen Lautsprechern mit unterschiedlichen Wandlerprinzip, unterschiedlichen Membranmaterial oder -ausdehnung besteht. Der verbreitete Volksmund kann damit zumindest unter diesen Bedingungen als widerlegt betrachtet werden.

Weitere binaurale Vermessungen und Simulationen können nun durchgeführt werden, um die Auswirkungen von anderen Parametern wie beispielsweise der Richtcharakteristik und der daraus resultierenden treiberspezifischen Interaktion mit dem Raum festzustellen. Ebenso können die Unterschiede untersucht werden, die sich aus treiberspezifischen Interaktionen mit der Schallwand ergeben oder die aus einem Betrieb der Hochtöner im nicht-linearen Bereich resultieren.

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                        |    |
|------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | Aufbau Kunstkopfmessungen von Monitorenpaaren . . . . .                | 9  |
| 2.1  | Aufbau einer elektroakustischen Übertragungskette . . . . .            | 12 |
| 2.2  | Theoretischer Betragsgang eines Lautsprecher im Nah- und Fernfeld . .  | 14 |
| 2.3  | Schnittbild durch einen elektrodynamischen Konuslautsprecher . . . .   | 17 |
| 2.4  | Aufbau Hochtönerkalotte und Kalotte mit fixierter Membranmitte . . . . | 18 |
| 2.5  | Betragsfrequenzgänge Gewebekalotte . . . . .                           | 20 |
| 2.6  | Aufbau Aluminiumbändchen/Funktionsprinzip X-Art . . . . .              | 22 |
| 2.7  | Impulsantwort Aluminiumkalotte/ETC-Kurve . . . . .                     | 26 |
| 2.8  | Amplitudenspektrum Regielautsprecher/Chassis in Schallwand . . . .     | 27 |
| 2.9  | Isobarenkurve Beschallungslautsprecher . . . . .                       | 29 |
| 2.10 | Zusammenhang Membranauslenkung/Lorentzkraft bzw. Induktivität .        | 31 |
| 2.11 | Schema digitaler Filter . . . . .                                      | 34 |
| 2.12 | Koeffizientengewinnung in Monkey Forrest Express . . . . .             | 36 |
| 2.13 | Akustische Szenen, Diffusfeld/Freifeld . . . . .                       | 38 |
| 3.1  | Zusammenhang Messbandbreite, Strahlergröße und Messabstand . . .       | 46 |
| 3.2  | Aufbau monaurale Fernfeldmessungen . . . . .                           | 50 |
| 3.3  | Amplitudenspektren elektrodynamische Treiber . . . . .                 | 52 |
| 3.4  | Amplitudenspektren elektromagnetische Treiber . . . . .                | 53 |
| 3.5  | Amplitudenspektren des unentzerrten Tiefmitteltöners . . . . .         | 54 |
| 3.6  | Amplitudenspektrum Tiefmitteltöner in Schallwand . . . . .             | 55 |
| 3.7  | Gesamtklirrdämpfungspegel . . . . .                                    | 56 |
| 3.8  | Impedanzverläufe elektrodynamische Hochtöner . . . . .                 | 58 |
| 3.9  | Impedanzverläufe elektromagnetische Hochtöner . . . . .                | 58 |
| 3.10 | Beispiel Kompensationsfilter . . . . .                                 | 61 |



|      |                                                                                                                                   |     |      |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|
| 3.11 | Theoretische Zielamplitudenspektren . . . . .                                                                                     | 62  |      |
| 3.12 | Aufbau Evaluationsmessung . . . . .                                                                                               | 63  |      |
| 3.13 | Amplitudenspektren kompensierte Hochtöner . . . . .                                                                               | 65  |      |
| 3.14 | Phasenspektren kompensierte Hochtöner . . . . .                                                                                   | 66  |      |
| 3.15 | Gruppenlaufzeiten kompensierte Hochtöner . . . . .                                                                                | 66  |      |
| 3.16 | Impulsantworten Alukalotte/Bändchen . . . . .                                                                                     | 67  |      |
| 3.17 | Impulsantworten Gewebekalotte/Magnetostat . . . . .                                                                               | 68  |      |
| 3.18 | Impulsantworten Ringstrahler/X-Art . . . . .                                                                                      | 68  |      |
| 4.1  | Stereoanordnung nach DIN 15996 . . . . .                                                                                          | 72  |      |
| 4.2  | Aufbau BIR Messung . . . . .                                                                                                      | 73  |      |
| 4.3  | Positionen HATS . . . . .                                                                                                         | 74  |      |
| 4.4  | HRTF X-Art/TMT . . . . .                                                                                                          | 75  |      |
| 4.5  | HRTF X-Art/TMT über Winkel . . . . .                                                                                              | 76  |      |
| 4.6  | Differenz-HRTF Ringstrahler/Gewebekalotte . . . . .                                                                               | 77  |      |
| 4.7  | Differenz-HRTF Ringstrahler/Magnetostat . . . . .                                                                                 | 78  |      |
| 5.1  | Benutzeroberfläche ABX-Modul . . . . .                                                                                            | 81  |      |
| 5.2  | Versuchsaufbau Evaluation . . . . .                                                                                               | 83  |      |
| 5.3  | Ergebnisse Hörversuch über VP . . . . .                                                                                           | 85  |      |
| 5.4  | Ergebnisse Hörversuch über Stimuli . . . . .                                                                                      | 86  |      |
| 7.1  | Frontalansicht der Schallwand, alle MaßAngaben in mm . . . . .                                                                    | III |      |
| 7.2  | Freifeldimpulsantwort des X-ART ohne Kompensation,<br>metrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms . . . . .            | IV  | sym- |
| 7.3  | Freifeldimpulsantwort der Aluminiumkalotte ohne Kompensation,<br>metrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms . . . . . | IV  | sym- |
| 7.4  | Freifeldimpulsantwort des Bändchen ohne Kompensation,<br>metrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms . . . . .         | V   | sym- |
| 7.5  | Freifeldimpulsantwort des Ringstrahler ohne Kompensation,<br>metrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms . . . . .     | V   | sym- |
| 7.6  | Freifeldimpulsantwort des Magnetostat ohne Kompensation,<br>metrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms . . . . .      | VI  | sym- |

|      |                                                                                                                                                                                                                                             |      |              |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------|
| 7.7  | Freifeldimpulsantwort der Gewebekalotte ohne Kompensation,<br>metrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms . . . . .                                                                                                              | VI   | sym-         |
| 7.8  | Fernfeldimpulsantwort des Tiefmitteltöners ohne Kompensation,<br>metrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 50 ms . . . . .                                                                                                           | VII  | sym-         |
| 7.9  | Amplitudenfrequenzgang des X-Art ohne Kompensation . . . . .                                                                                                                                                                                | VII  |              |
| 7.10 | Amplitudenfrequenzgang der Aluminiumkalotte ohne Kompensation .                                                                                                                                                                             | VIII |              |
| 7.11 | Amplitudenfrequenzgang des Bändchen ohne Kompensation . . . . .                                                                                                                                                                             | VIII |              |
| 7.12 | Amplitudenfrequenzgang des Ringstrahler ohne Kompensation . . . . .                                                                                                                                                                         | IX   |              |
| 7.13 | Amplitudenfrequenzgang des Magnetostat ohne Kompensation . . . . .                                                                                                                                                                          | IX   |              |
| 7.14 | Amplitudenfrequenzgang der Gewebekalotte ohne Kompensation . . . .                                                                                                                                                                          | X    |              |
| 7.15 | Amplitudenfrequenzgänge des Tiefmitteltöners ohne Kompensation,<br>Kombination von Nahfeld- und Fernfeldmessung bei 160 Hz,<br>te: axiale Nahfeldmessung in 2 cm Entfernung, unten:<br>axiale Fernfeldmessung in 2,7 m Entfernung . . . . . | X    | oben<br>mit- |
| 7.16 | Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel des X-Art . . . .                                                                                                                                                                     | XI   |              |
| 7.17 | Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel<br>Aluminiumkalotte . . . . .                                                                                                                                                         | XI   | der          |
| 7.18 | Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel des Bändchen .                                                                                                                                                                        | XII  |              |
| 7.19 | Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel des Ringstrahler                                                                                                                                                                      | XII  |              |
| 7.20 | Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel des Magnetostat                                                                                                                                                                       | XIII |              |
| 7.21 | Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel der Gewebeka-<br>lotte . . . . .                                                                                                                                                      | XIII |              |
| 7.22 | Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel des Tiefmittel-<br>töner . . . . .                                                                                                                                                    | XIV  |              |
| 7.23 | Amplitudenspektrum des Zielbandpass . . . . .                                                                                                                                                                                               | XIV  |              |
| 7.24 | Amplitudenspektren der Prototypenbandpässe . . . . .                                                                                                                                                                                        | XV   |              |
| 7.25 | Amplitudenspektren der realen Bandpässe . . . . .                                                                                                                                                                                           | XV   |              |
| 7.26 | Amplitudenspektren der Bandpässe nach Multiplikation mit den<br>berspektren . . . . .                                                                                                                                                       | XVI  | Trei-        |
| 7.27 | Theoretische Amplitudenspektren der Treiber nach der Kompensation<br>mit den generierten Filtern . . . . .                                                                                                                                  | XVI  |              |
| 7.28 | Differenzen zwischen X-Art und Alukalotte für linken Lautsprecher . .                                                                                                                                                                       | XVII |              |

|      |                                                                                            |       |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 7.29 | Differenzen zwischen X-Art und Alukalotte für rechten Lautsprecher .                       | XVII  |
| 7.30 | Differenzen zwischen X-Art und Bändchen für linken Lautsprecher . .                        | XVIII |
| 7.31 | Differenzen zwischen X-Art und Bändchen für rechten Lautsprecher . .                       | XVIII |
| 7.32 | Differenzen zwischen X-Art und Ringstrahler für linken Lautsprecher .                      | XIX   |
| 7.33 | Differenzen zwischen X-Art und Ringstrahler für rechten Lautsprecher                       | XIX   |
| 7.34 | Differenzen zwischen X-Art und Magnetostat für linken Lautsprecher .                       | XX    |
| 7.35 | Differenzen zwischen X-Art und Magnetostat für rechten Lautsprecher                        | XX    |
| 7.36 | Differenzen zwischen X-Art und Gewebekalotte für linken Lautsprecher                       | XXI   |
| 7.37 | Differenzen zwischen X-Art und Gewebekalotte für rechten Lautsprecher                      | XXI   |
| 7.38 | Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Bändchen für linken Lautsprecher . . . . .       | XXII  |
| 7.39 | Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Bändchen für rechten Lautsprecher . . . . .      | XXII  |
| 7.40 | Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Ringstrahler für linken Lautsprecher . . . . .   | XXIII |
| 7.41 | Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Ringstrahler für rechten Lautsprecher . . . . .  | XXIII |
| 7.42 | Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Magnetostat für linken Lautsprecher . . . . .    | XXIV  |
| 7.43 | Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Magnetostat für rechten Lautsprecher . . . . .   | XXIV  |
| 7.44 | Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Gewebekalotte für linken Lautsprecher . . . . .  | XXV   |
| 7.45 | Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Gewebekalotte für rechten Lautsprecher . . . . . | XXV   |
| 7.46 | Differenzen zwischen Bändchen und Ringstrahler für linken Lautsprecher                     | XXVI  |
| 7.47 | Differenzen zwischen Bändchen und Ringstrahler für rechten Lautsprecher . . . . .          | XXVI  |
| 7.48 | Differenzen zwischen Bändchen und Magnetostat für linken Lautsprecher                      | XXVII |
| 7.49 | Differenzen zwischen Bändchen und Magnetostat für rechten Lautsprecher . . . . .           | XXVII |

|      |                                                                                        |        |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 7.50 | Differenzen zwischen Bändchen und Gewebekalotte für linken Laut-<br>sprecher . . . . . | XXVIII |
| 7.51 | Differenzen zwischen Bändchen und Gewebekalotte für rechten<br>sprecher . . . . .      | XXVIII |
| 7.52 | Differenzen zwischen Ringstrahler und Magnetostat für linken<br>sprecher . . . . .     | XXIX   |
| 7.53 | Differenzen zwischen Ringstrahler und Magnetostat für rechten<br>sprecher . . . . .    | XXIX   |
| 7.54 | Differenzen zwischen Ringstrahler und Gewebekalotte für linken<br>sprecher . . . . .   | XXX    |
| 7.55 | Differenzen zwischen Ringstrahler und Gewebekalotte für rechten<br>sprecher . . . . .  | XXX    |
| 7.56 | Differenzen zwischen Magnetostat und Gewebekalotte für linken<br>sprecher . . . . .    | XXXI   |
| 7.57 | Differenzen zwischen Magnetostat und Gewebekalotte für rechten<br>sprecher . . . . .   | XXXI   |



# Tabellenverzeichnis

|     |                                             |    |
|-----|---------------------------------------------|----|
| 3.1 | Übersicht der verwendeten Chassis . . . . . | 42 |
| 3.2 | Übersicht der verwendeten Geräte . . . . .  | 48 |



# Literaturverzeichnis





# Kapitel 7

## Anhang

### 7.1 Abmessungen Schallwand

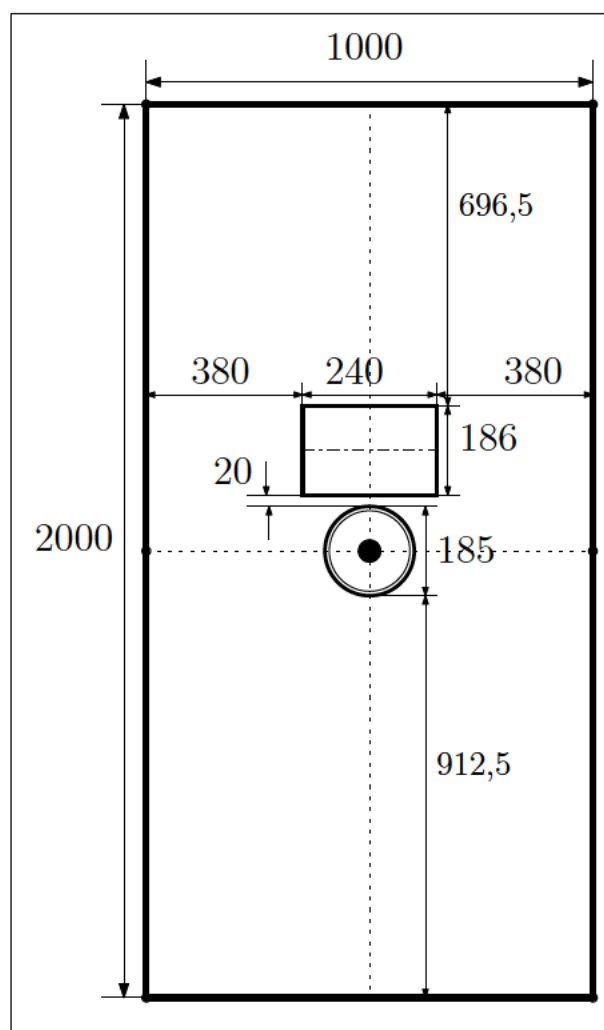


Abbildung 7.1 – Frontalansicht der Schallwand, alle MaßAngaben in mm

## 7.2 Monoaurale Messungen

### 7.2.1 Impulsantworten

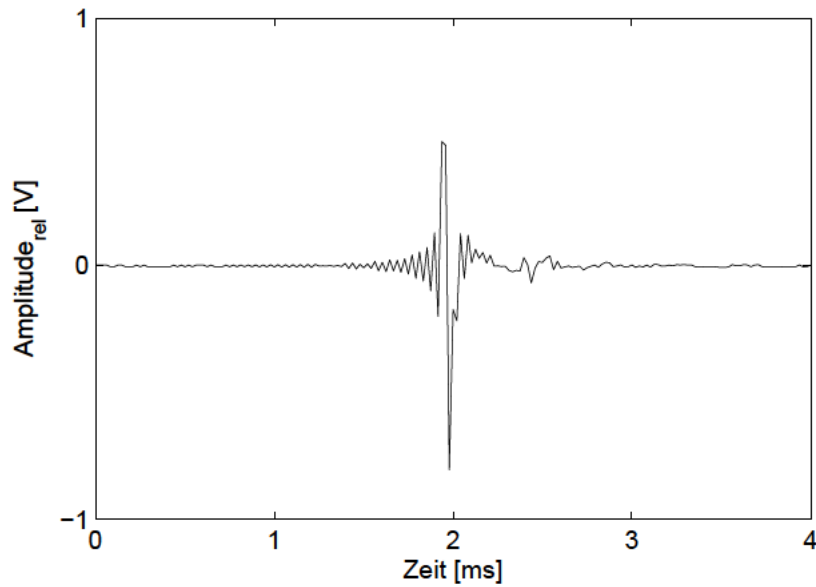


Abbildung 7.2 – Freifeldimpulsantwort des X-ART ohne Kompensation, symmetrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms

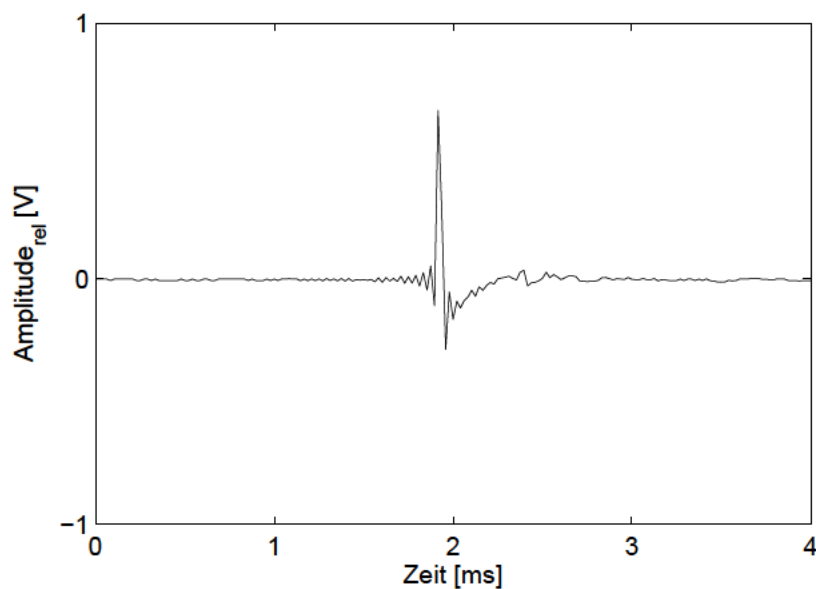
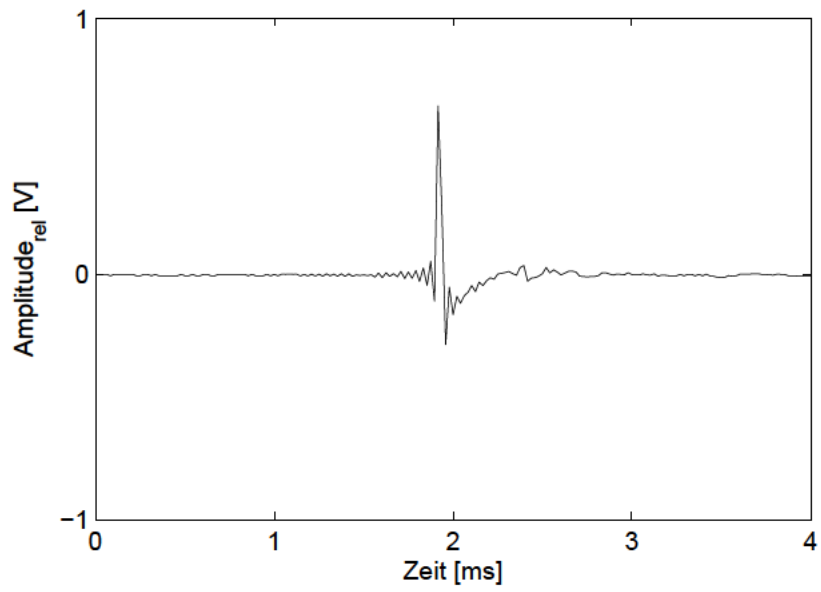
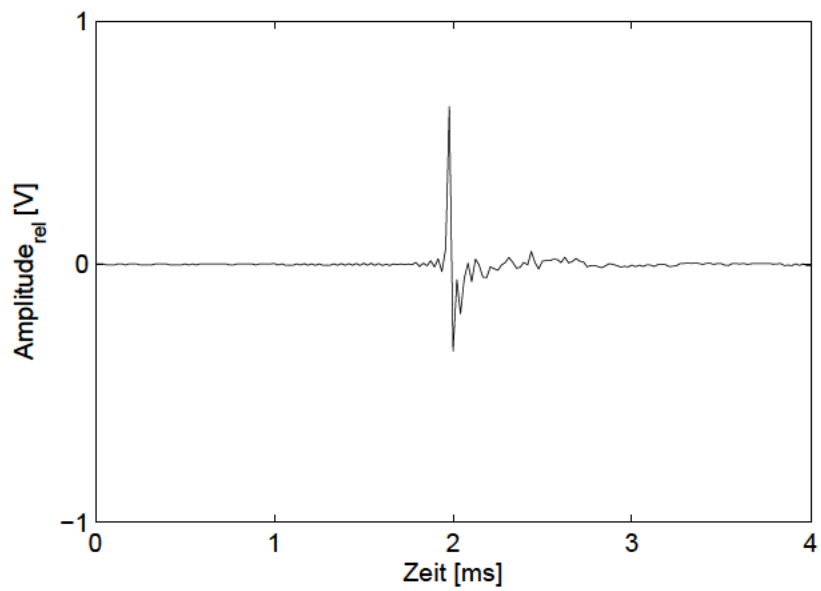


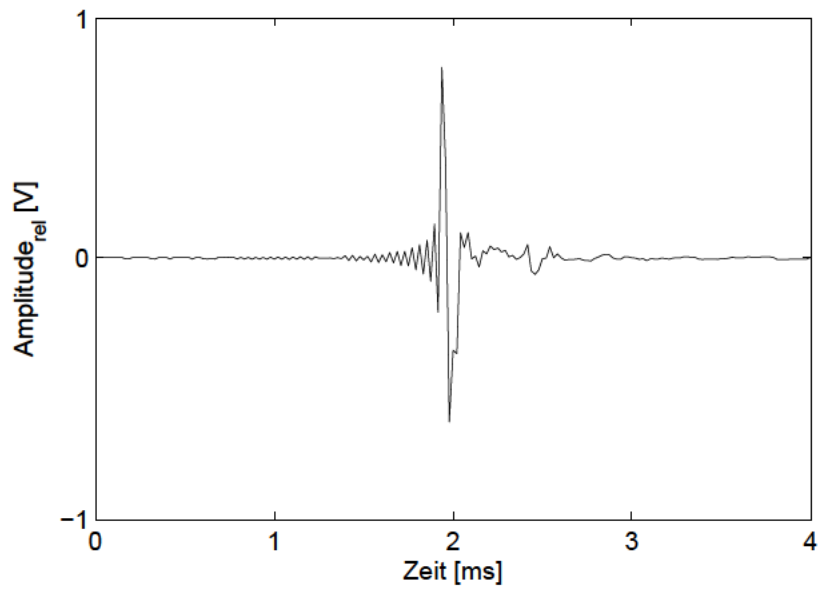
Abbildung 7.3 – Freifeldimpulsantwort der Aluminiumkalotte ohne Kompensation, symmetrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms



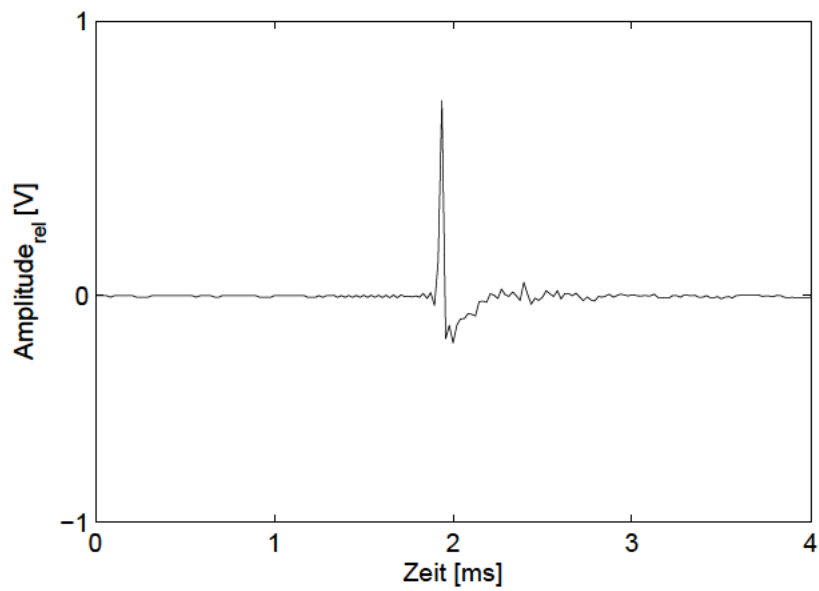
**Abbildung 7.4** – Freifeldimpulsantwort des Bändchen ohne Kompensation, symmetrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms



**Abbildung 7.5** – Freifeldimpulsantwort des Ringstrahler ohne Kompensation, symmetrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms



**Abbildung 7.6** – Freifeldimpulsantwort des Magnetostat ohne Kompensation, symmetrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms



**Abbildung 7.7** – Freifeldimpulsantwort der Gewebekalotte ohne Kompensation, symmetrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 25 ms

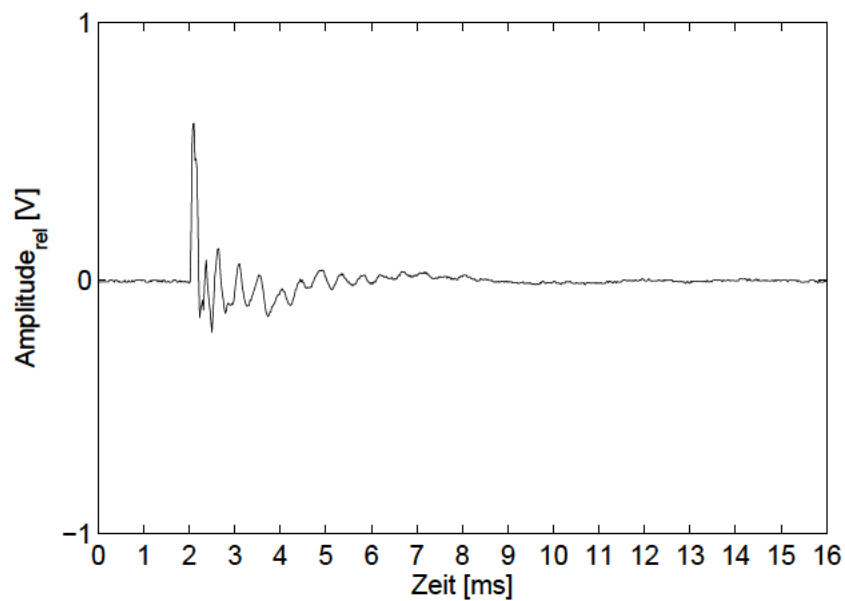


Abbildung 7.8 – Fernfeldimpulsantwort des Tiefmitteltöners ohne Kompensation, symmetrisch gefenstert mit 5.Term-Albrecht-Fenster, 50 ms

## 7.2.2 Amplitudenfrequenzgänge

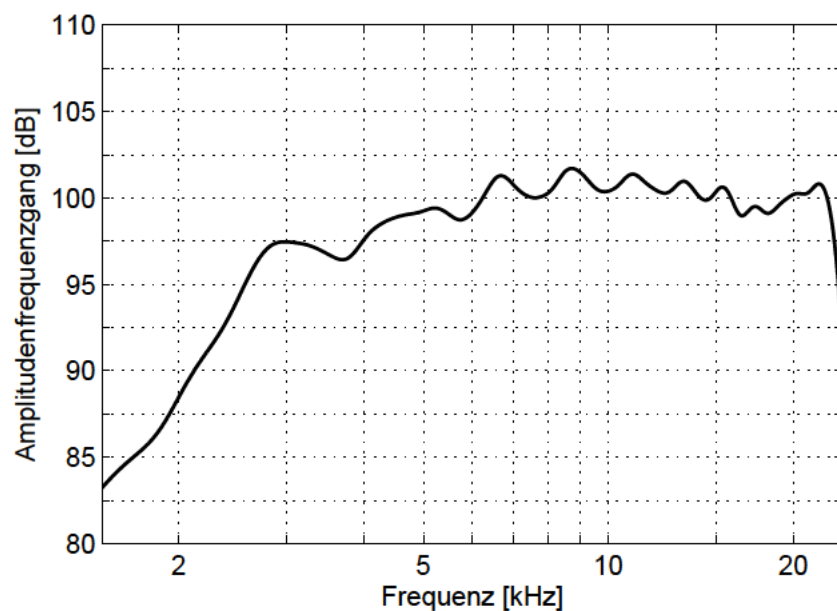


Abbildung 7.9 – Amplitudenfrequenzgang des X-Art ohne Kompensation

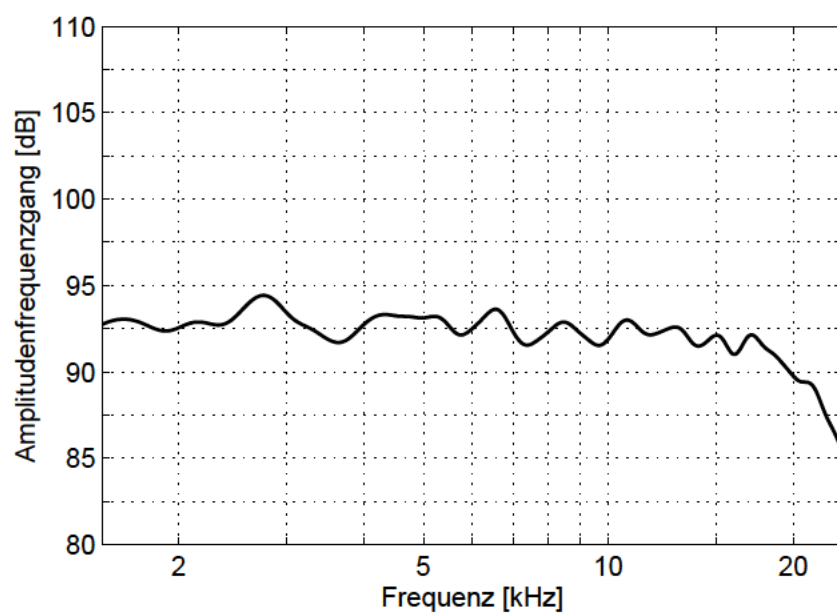


Abbildung 7.10 – Amplitudenfrequenzgang der Aluminiumkalotte ohne Kompensation

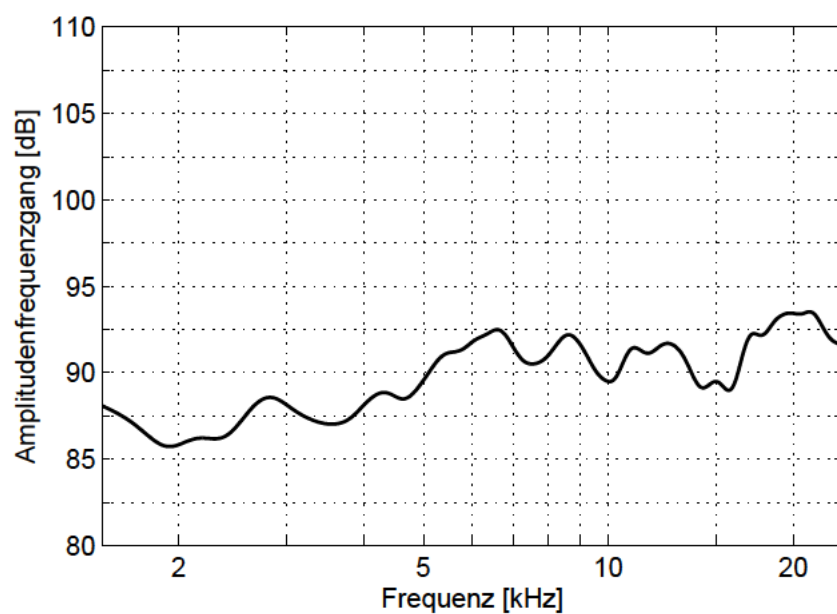


Abbildung 7.11 – Amplitudenfrequenzgang des Bändchen ohne Kompensation

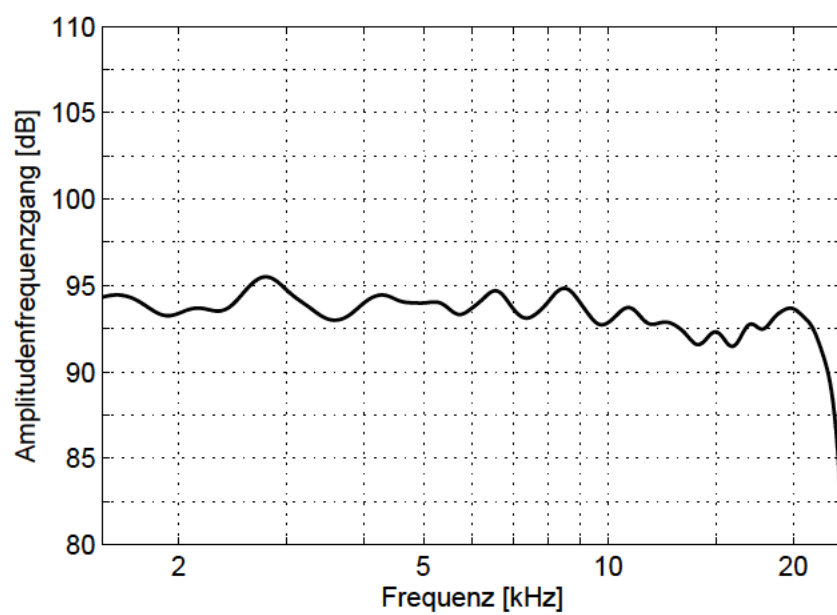


Abbildung 7.12 – Amplitudenfrequenzgang des Ringstrahler ohne Kompensation

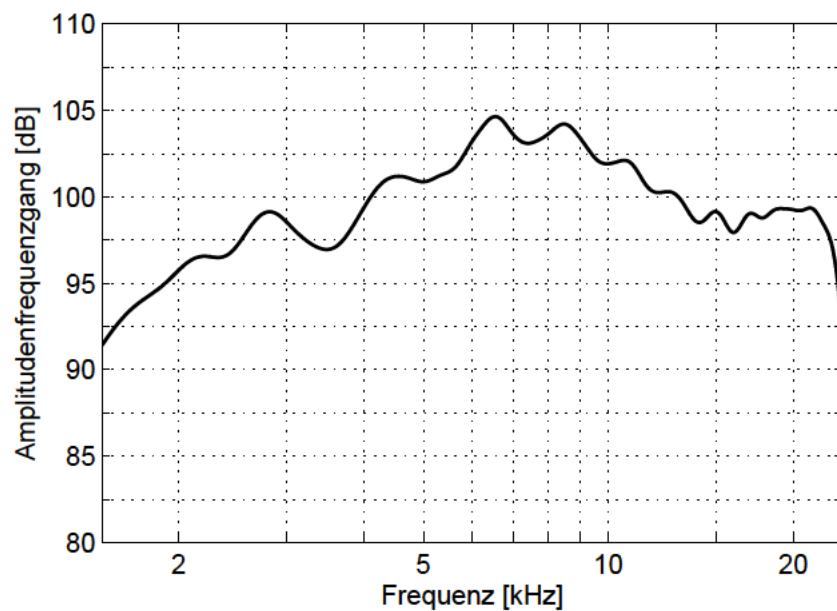


Abbildung 7.13 – Amplitudenfrequenzgang des Magnetostat ohne Kompensation



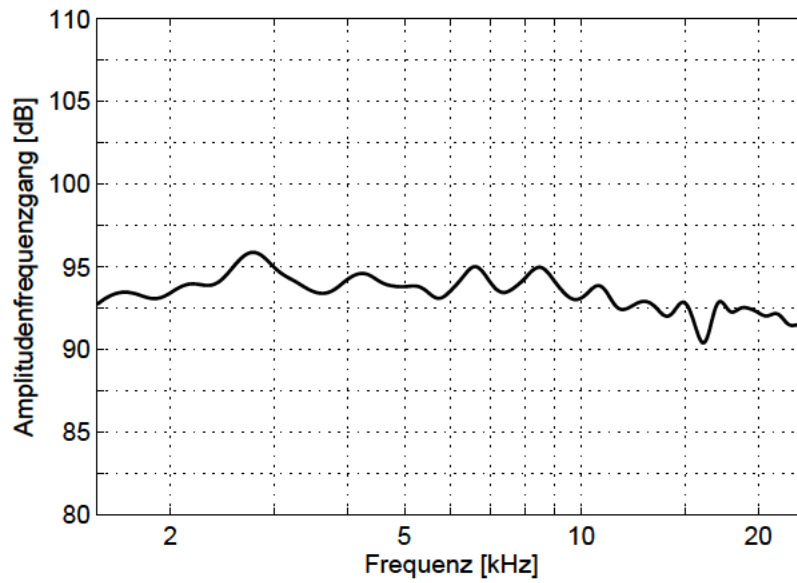


Abbildung 7.14 – Amplitudenfrequenzgang der Gewebekalotte ohne Kompensation

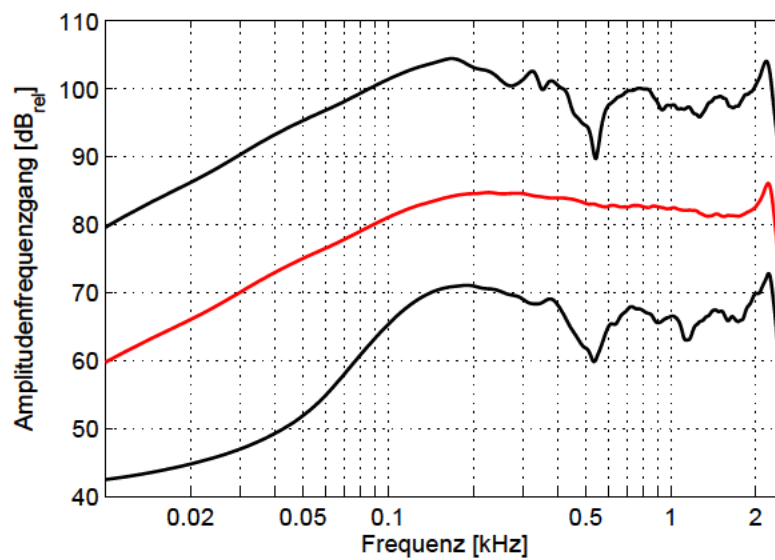


Abbildung 7.15 – Amplitudenfrequenzgänge des Tiefmitteltöners ohne Kompensation,  
oben: Kombination von Nahfeld- und Fernfeldmessung bei 160 Hz,  
mitte: axiale Nahfeldmessung in 2 cm Entfernung,  
unten: axiale Fernfeldmessung in 2,7 m Entfernung

### 7.2.3 Klirrpegel

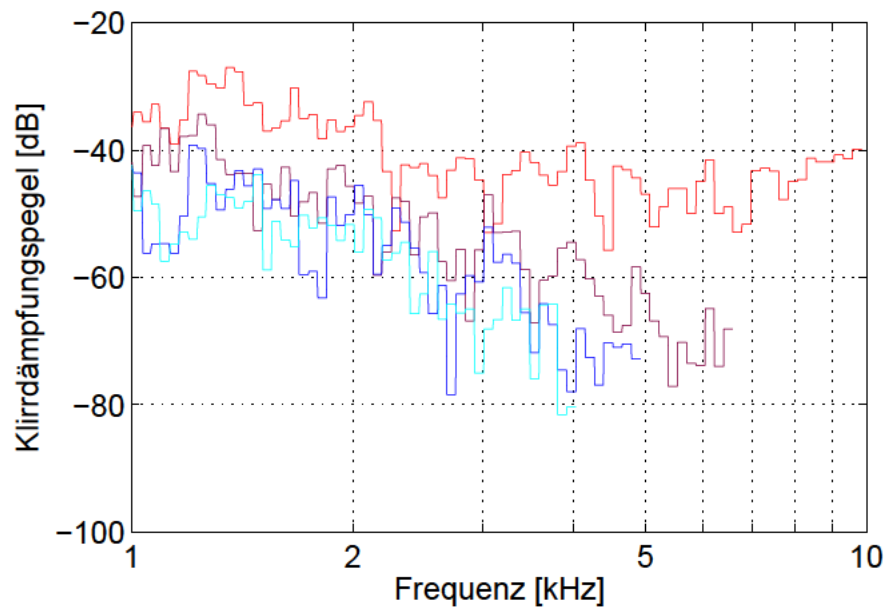


Abbildung 7.16 – Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel des X-Art

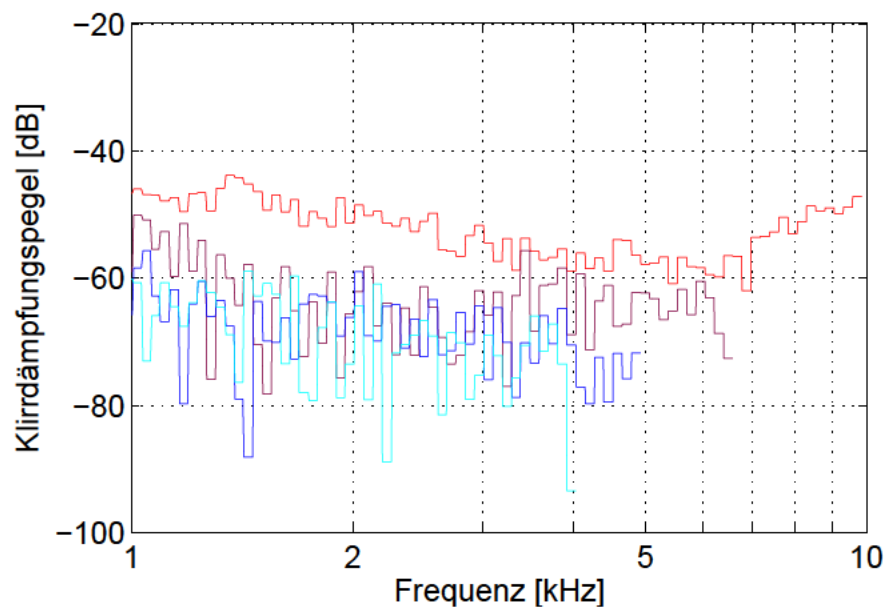


Abbildung 7.17 – Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel der Aluminiumkalotte

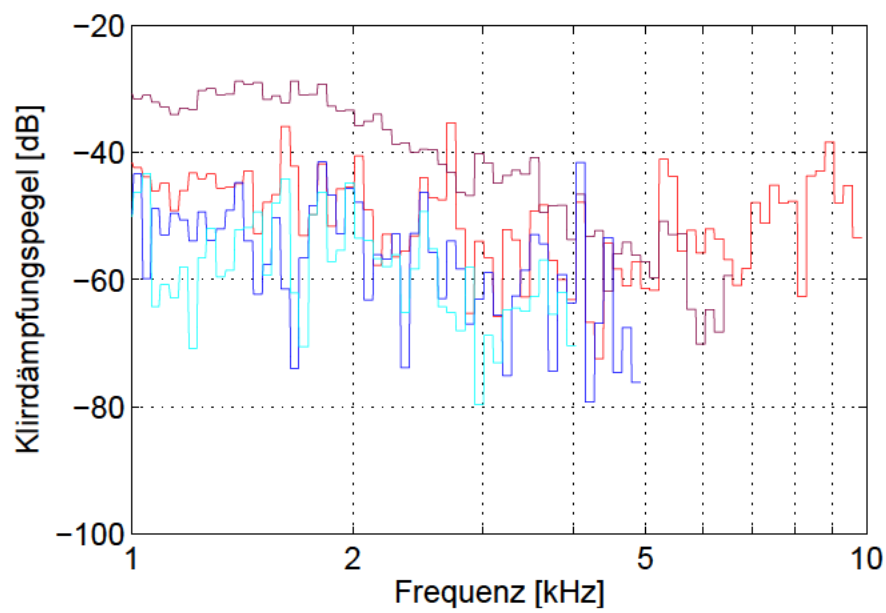


Abbildung 7.18 – Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel des Bändchen

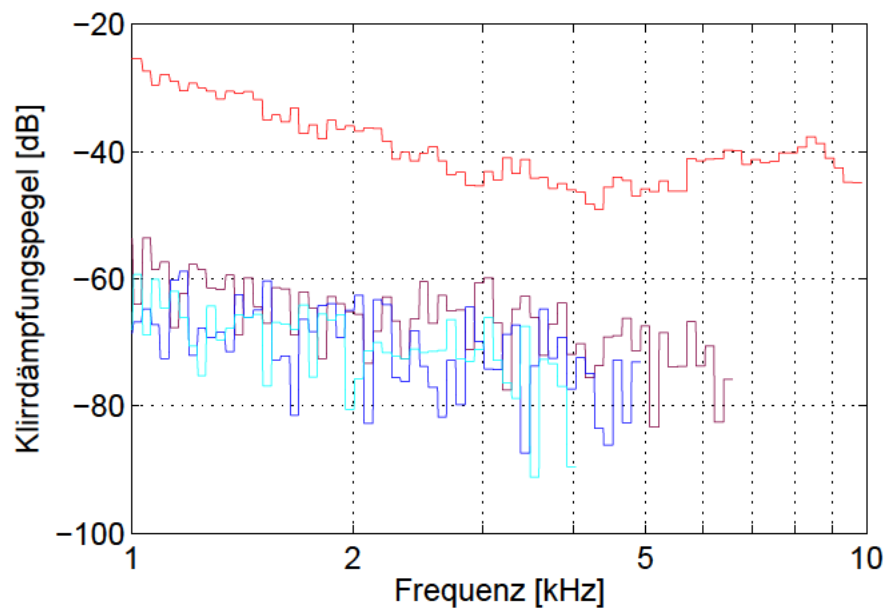


Abbildung 7.19 – Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel des Ringstrahler

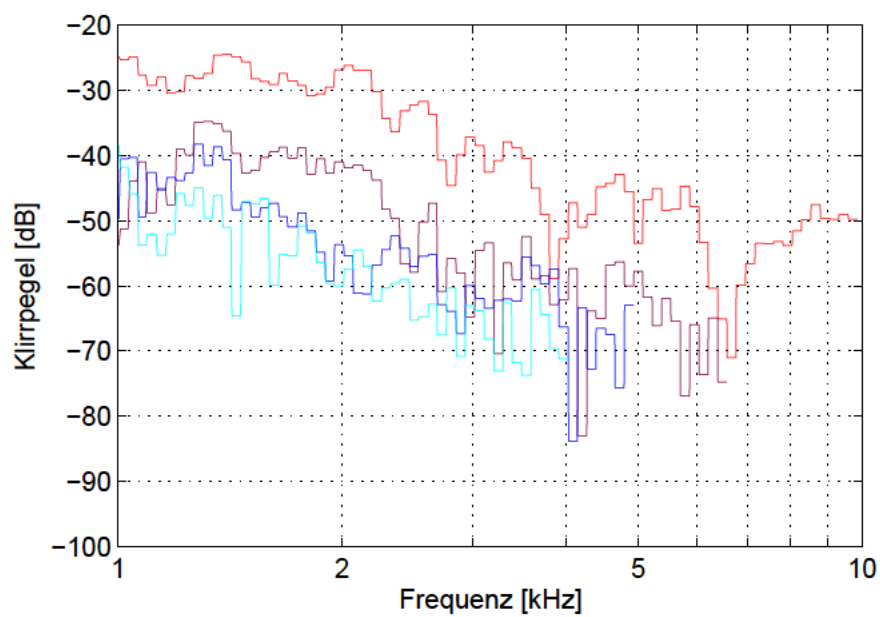


Abbildung 7.20 – Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel des Magnetostat

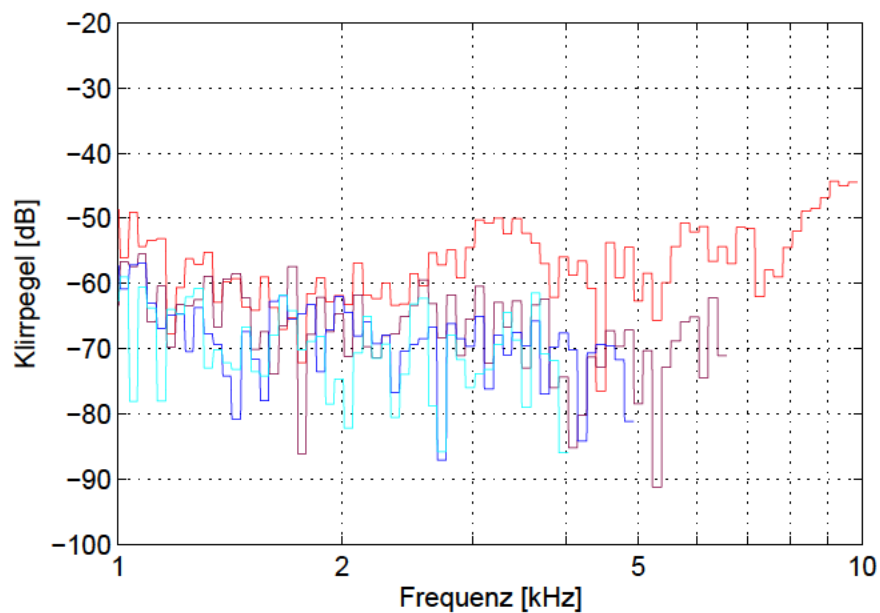


Abbildung 7.21 – Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel der Gewebekalotte

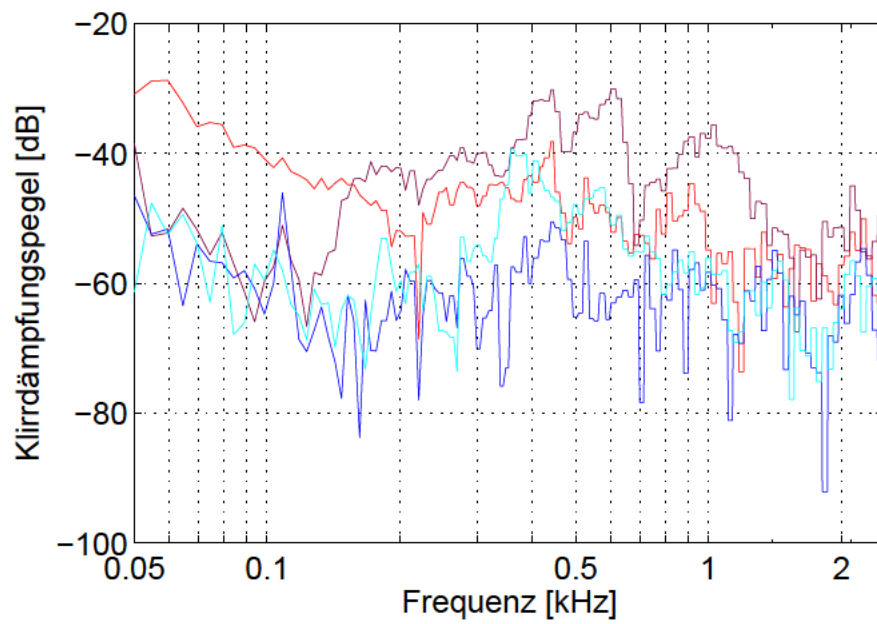


Abbildung 7.22 – Pegel der 2. bis 5. Harmonischen und Gesamtklirrpegel des Tiefmitteltöner

### 7.3 Erstellung der Kompensationsfilter

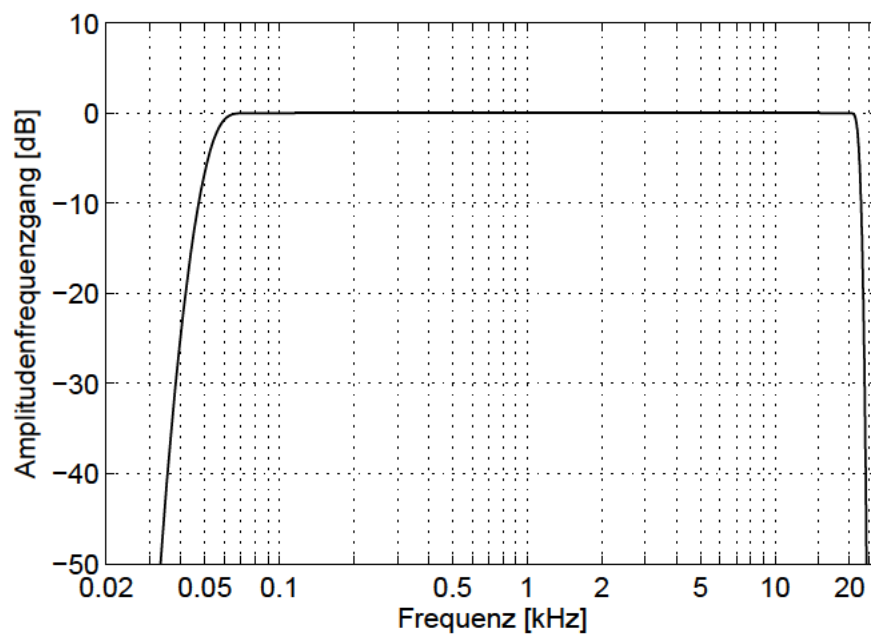


Abbildung 7.23 – Amplitudenspektrum des Zielbandpass

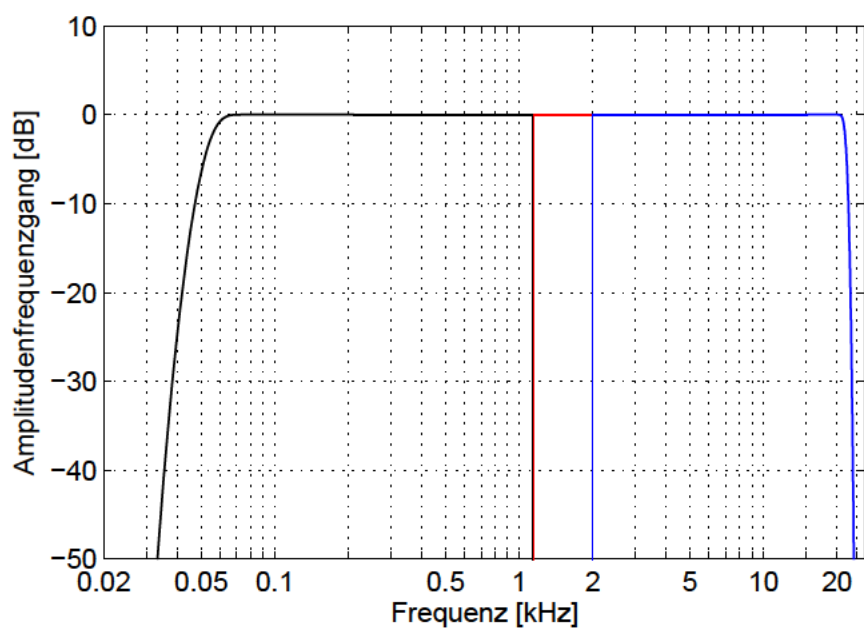


Abbildung 7.24 – Amplitudenspektren der Prototypenbandpässe

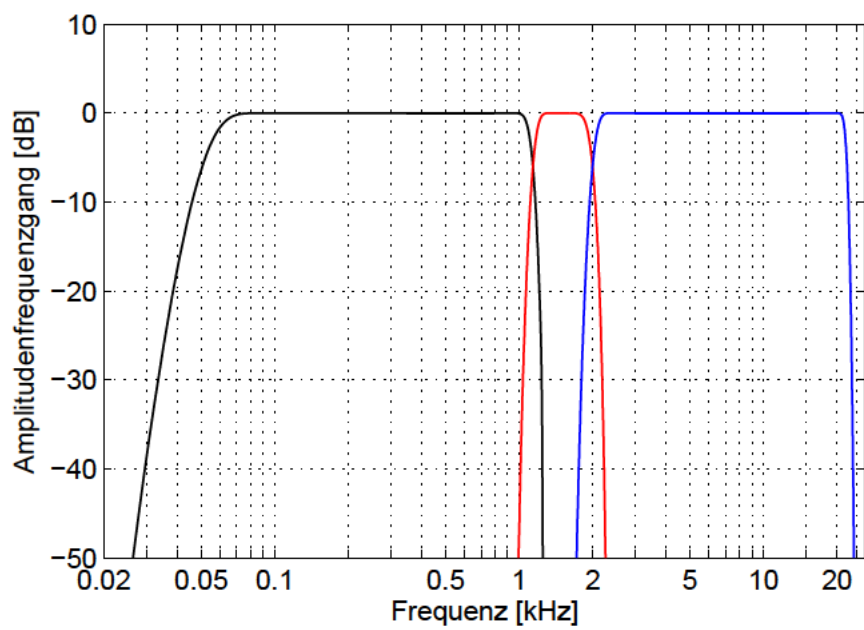


Abbildung 7.25 – Amplitudenspektren der realen Bandpässe

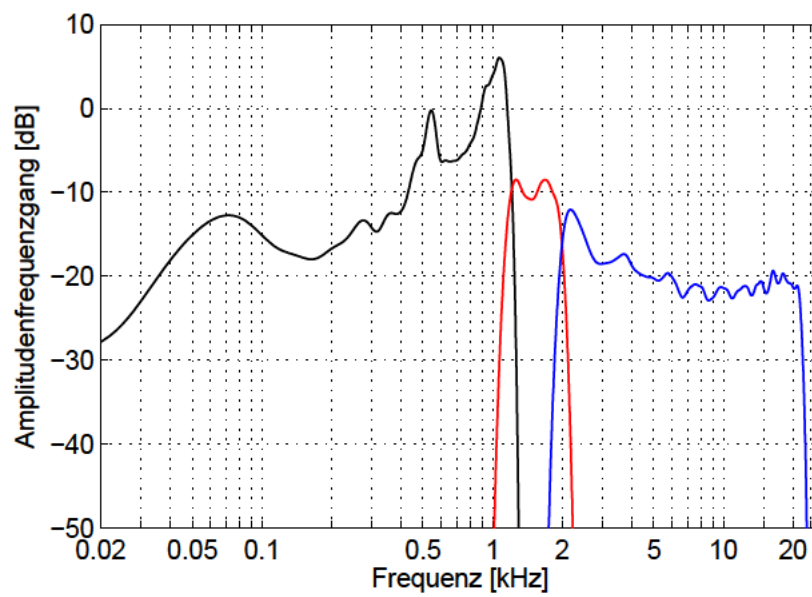


Abbildung 7.26 – Amplitudenspektren der Bandpässe nach Multiplikation mit den Treiberspektren

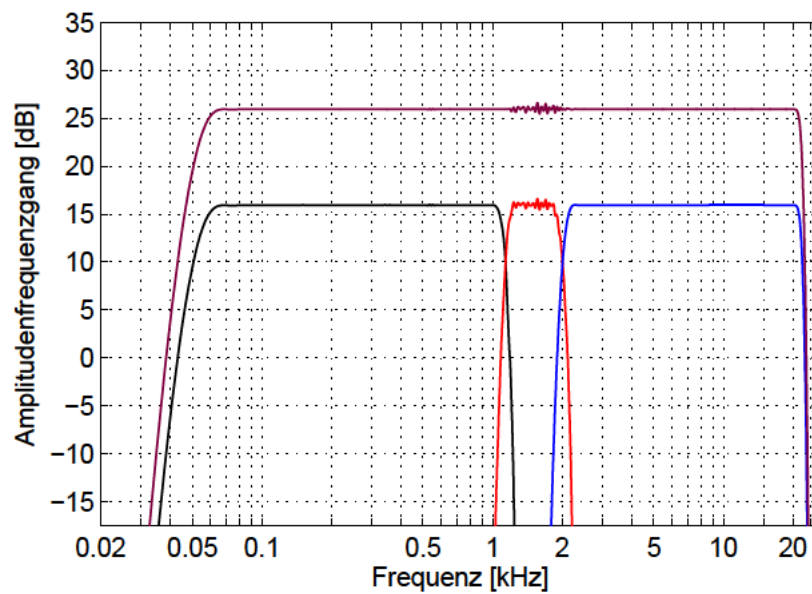


Abbildung 7.27 – Theoretische Amplitudenspektren der Treiber nach der Kompensation mit den generierten Filtern

## 7.4 HRTF-Differenzen

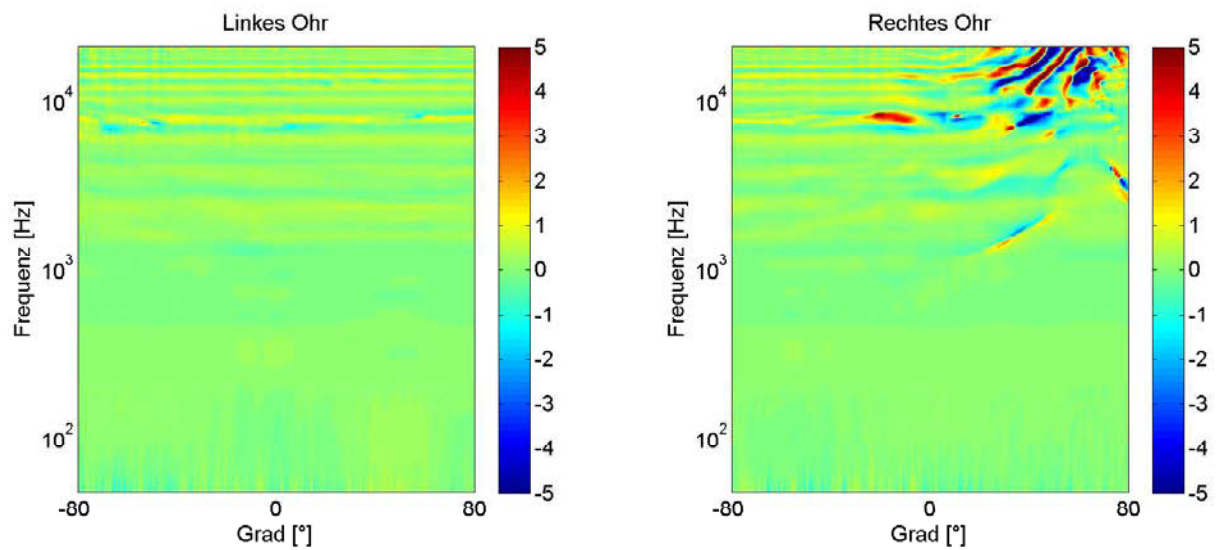


Abbildung 7.28 – Differenzen zwischen X-Art und Alukalotte für linken Lautsprecher

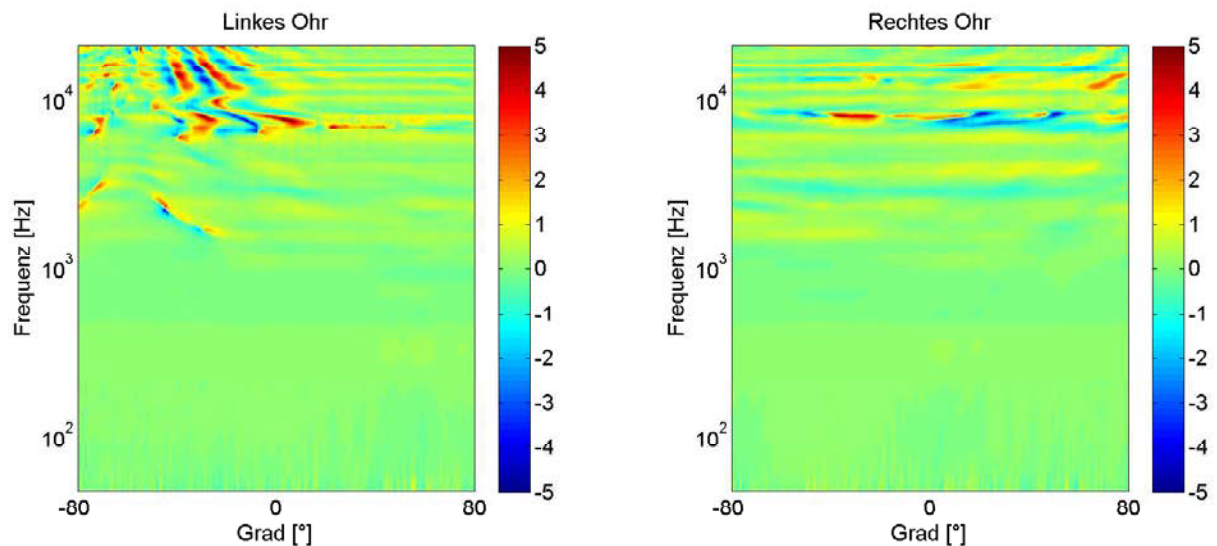


Abbildung 7.29 – Differenzen zwischen X-Art und Alukalotte für rechten Lautsprecher



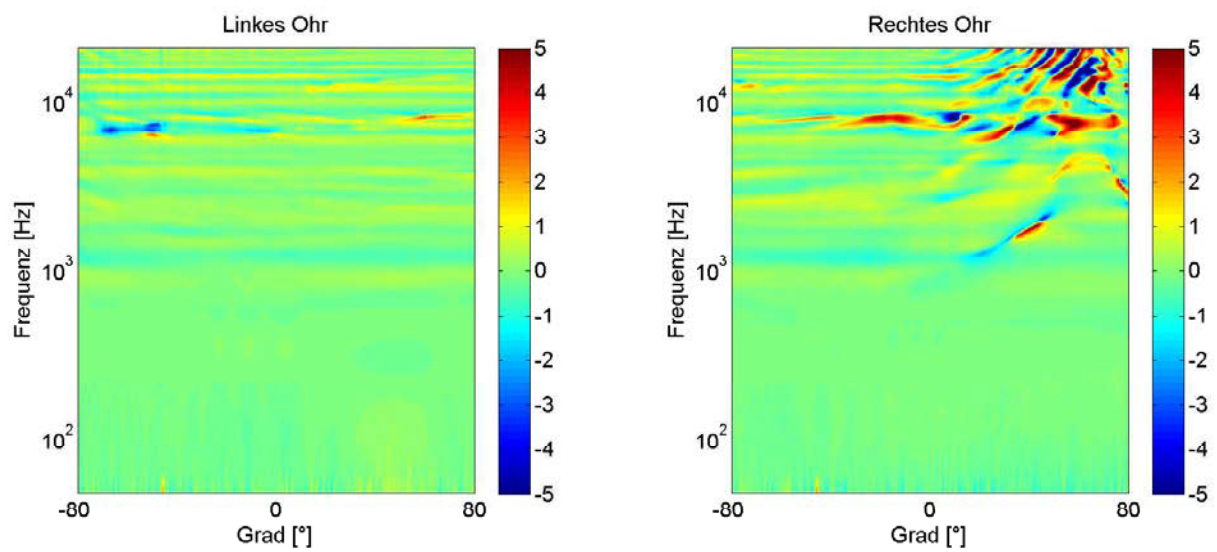


Abbildung 7.30 – Differenzen zwischen X-Art und Bändchen für linken Lautsprecher

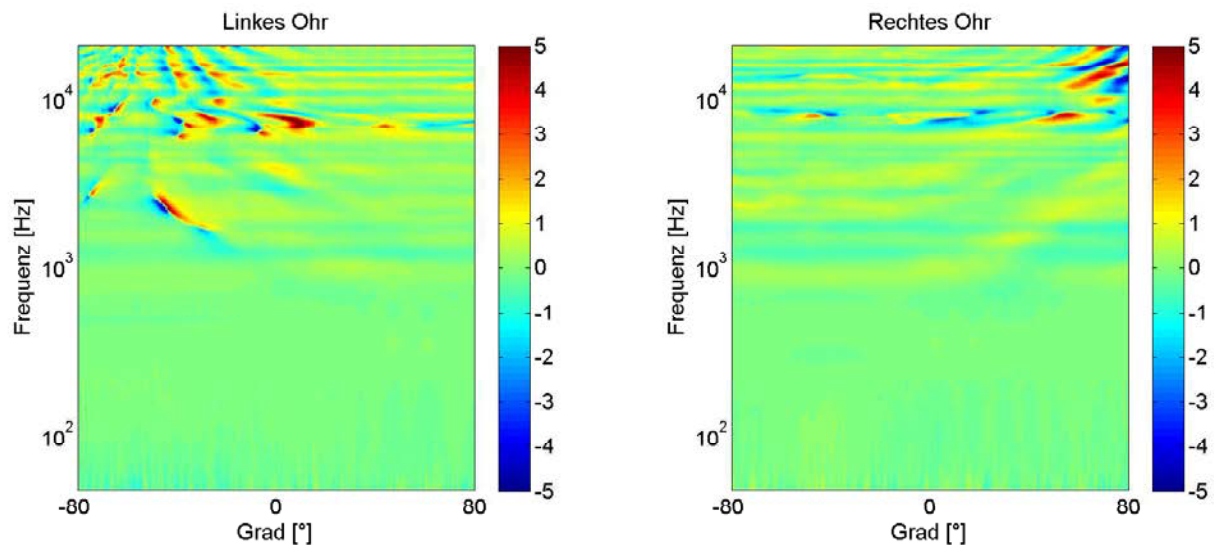
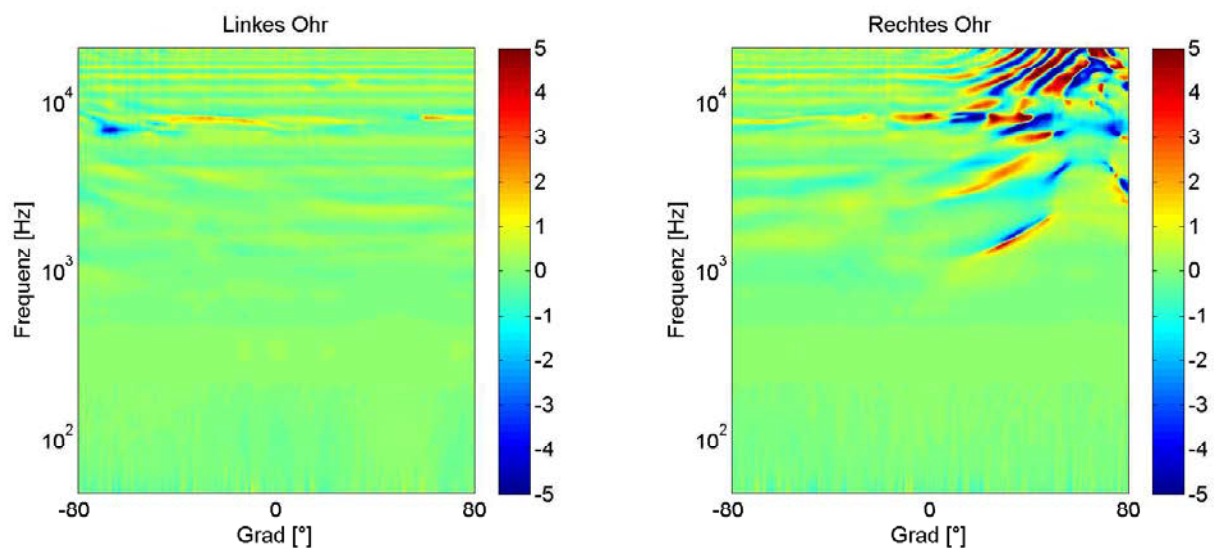
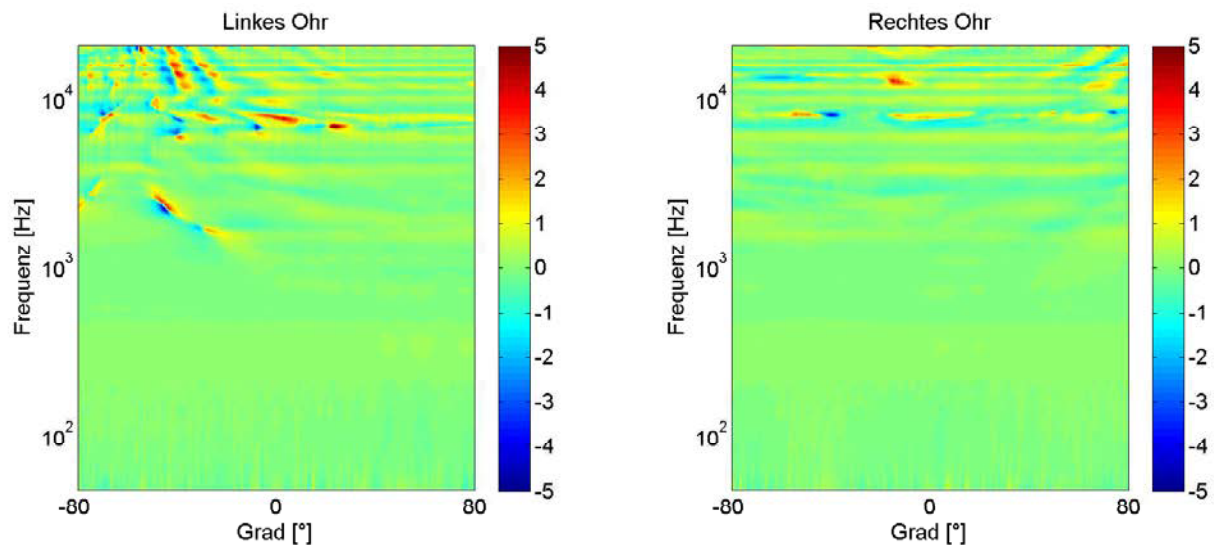


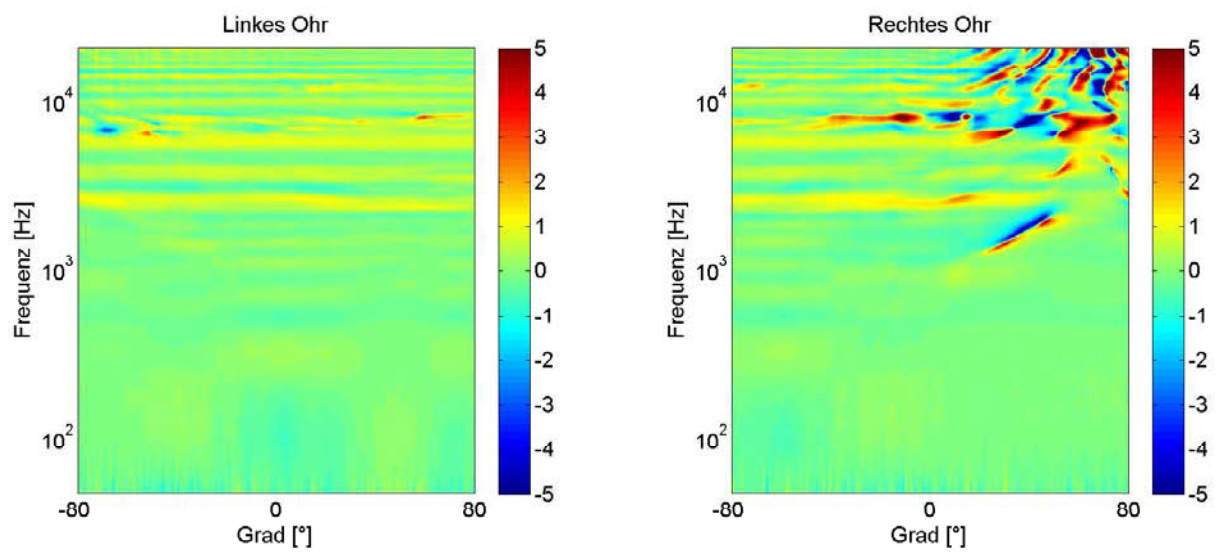
Abbildung 7.31 – Differenzen zwischen X-Art und Bändchen für rechten Lautsprecher



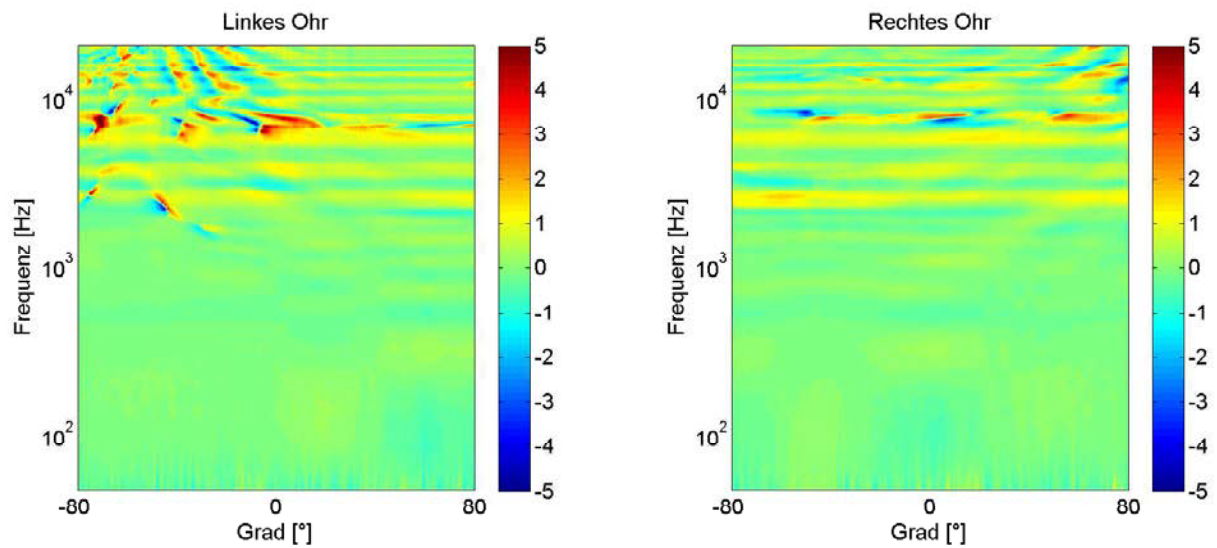
**Abbildung 7.32** – Differenzen zwischen X-Art und Ringstrahler für linken Lautsprecher



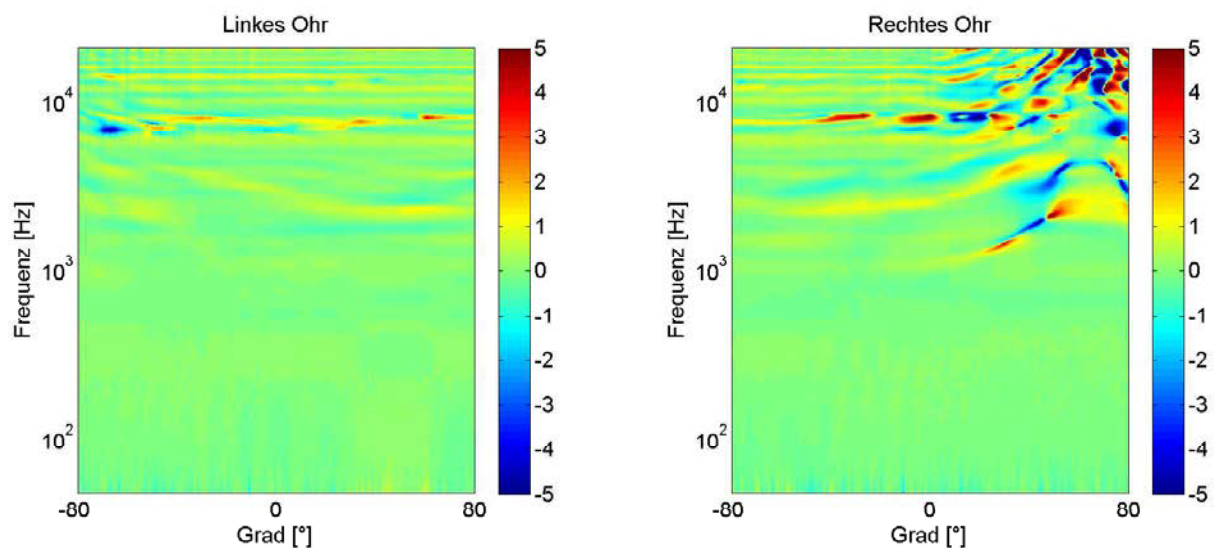
**Abbildung 7.33** – Differenzen zwischen X-Art und Ringstrahler für rechten Lautsprecher



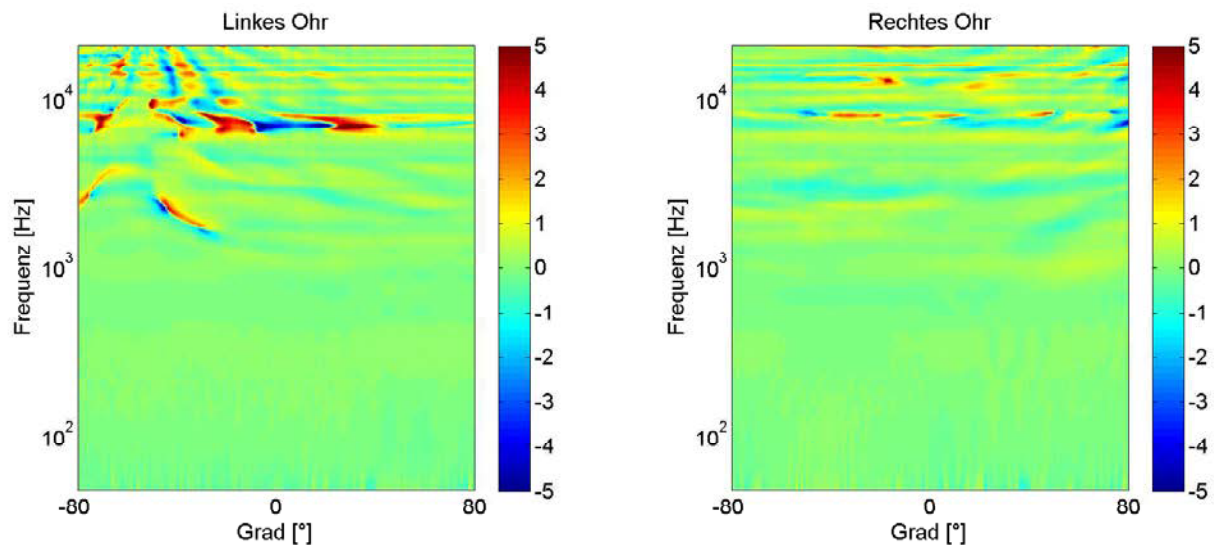
**Abbildung 7.34** – Differenzen zwischen X-Art und Magnetostat für linken Lautsprecher



**Abbildung 7.35** – Differenzen zwischen X-Art und Magnetostat für rechten Lautsprecher

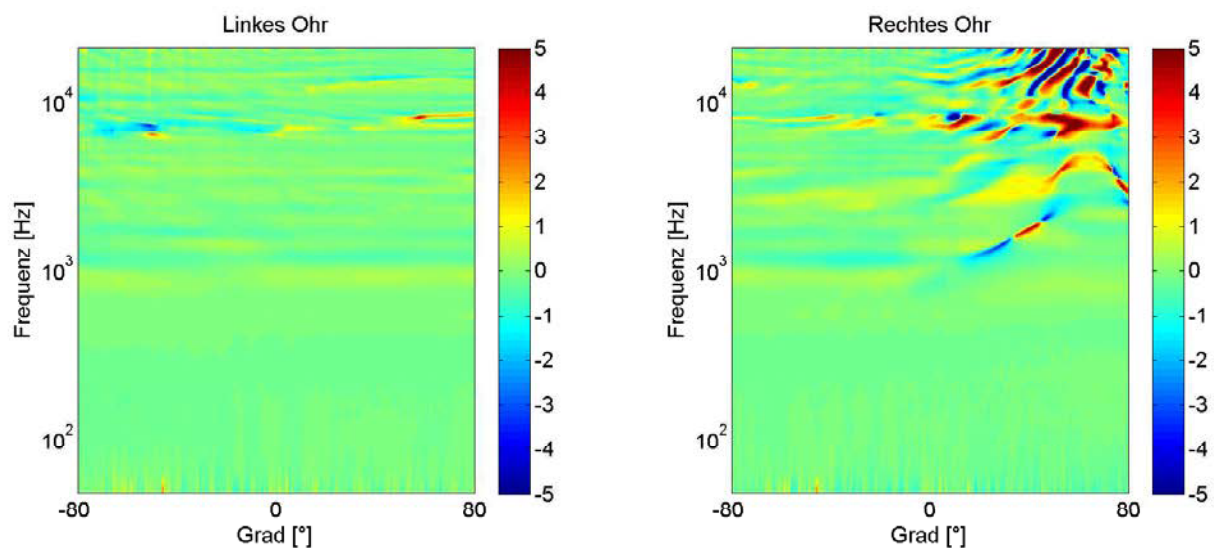


**Abbildung 7.36** – Differenzen zwischen X-Art und Gewebekalotte für linken Lautsprecher

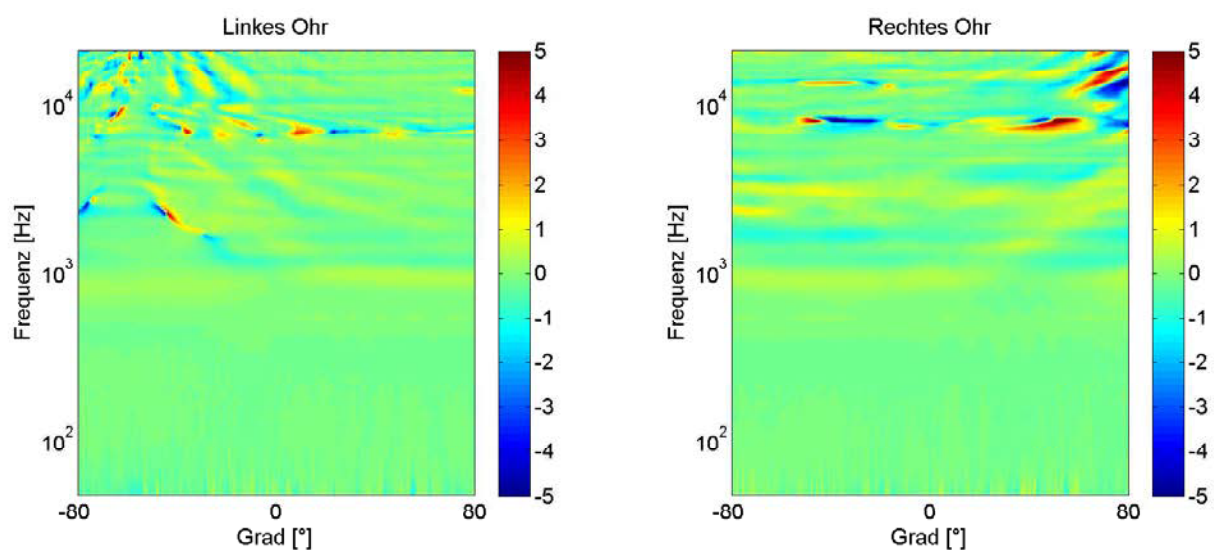


**Abbildung 7.37** – Differenzen zwischen X-Art und Gewebekalotte für rechten Lautsprecher

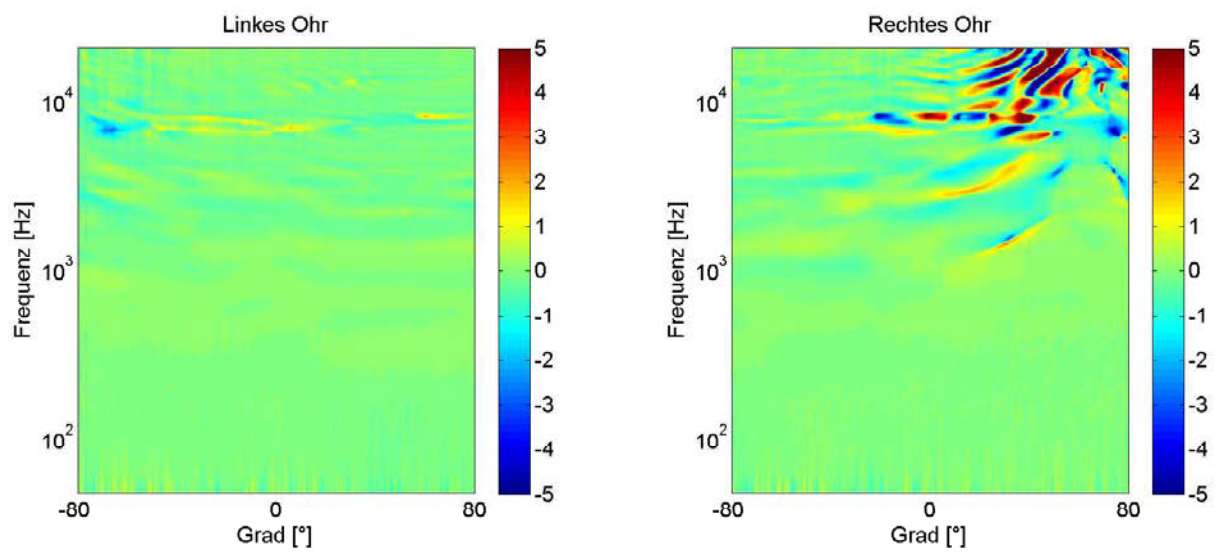




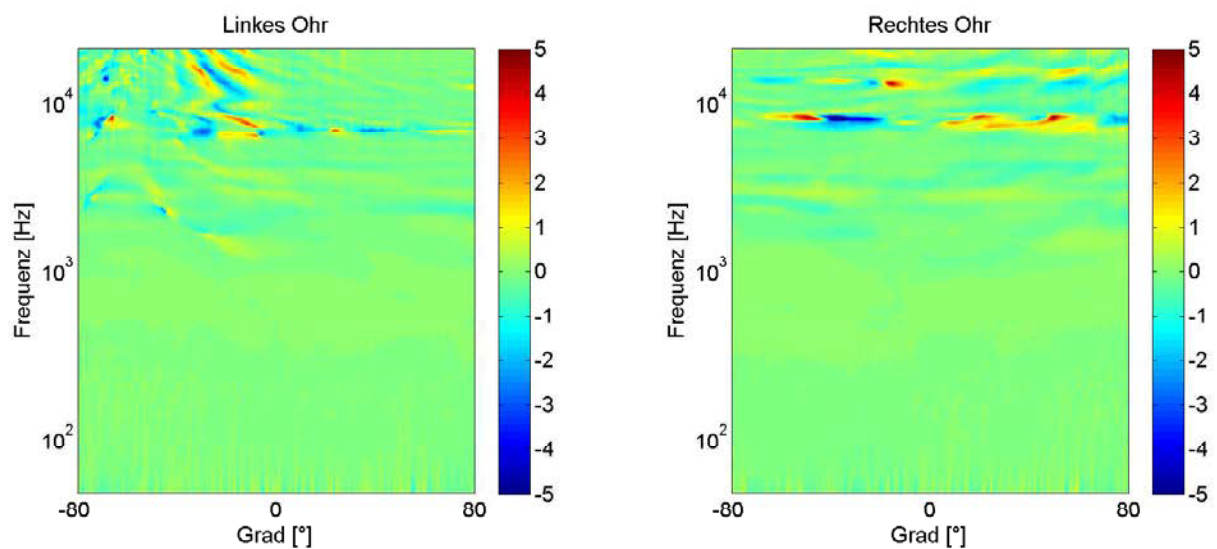
**Abbildung 7.38** – Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Bändchen für linken Lautsprecher



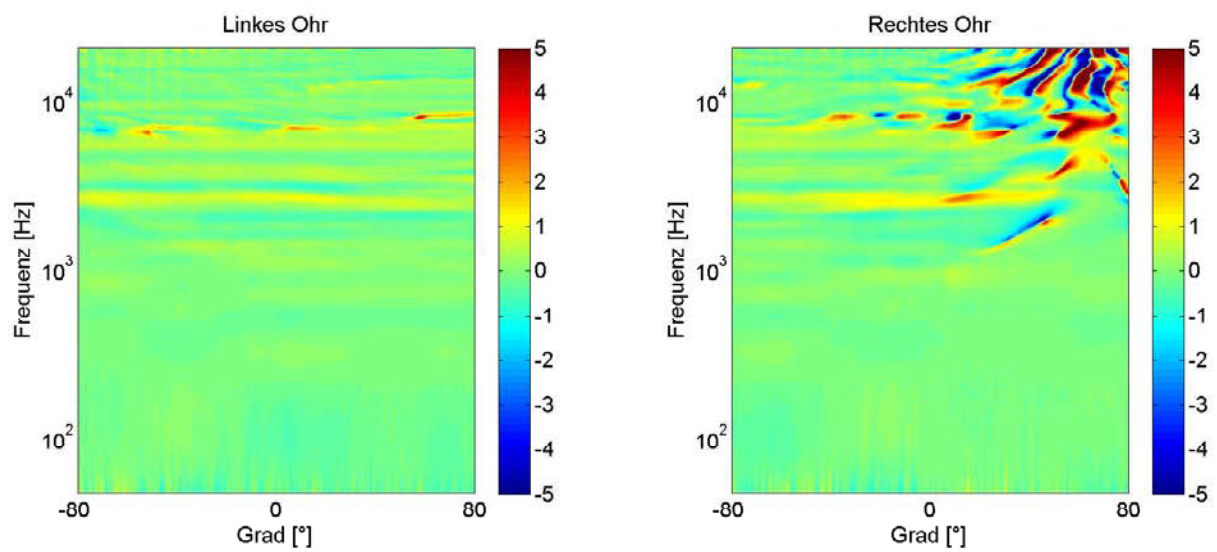
**Abbildung 7.39** – Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Bändchen für rechten Lautsprecher



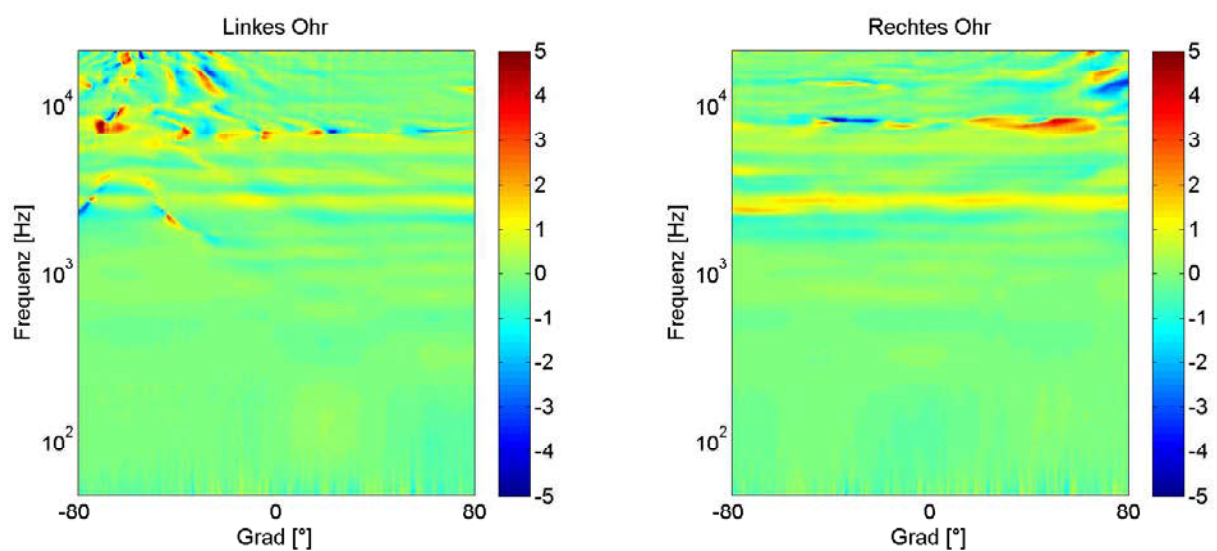
**Abbildung 7.40** – Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Ringstrahler für linken Lautsprecher



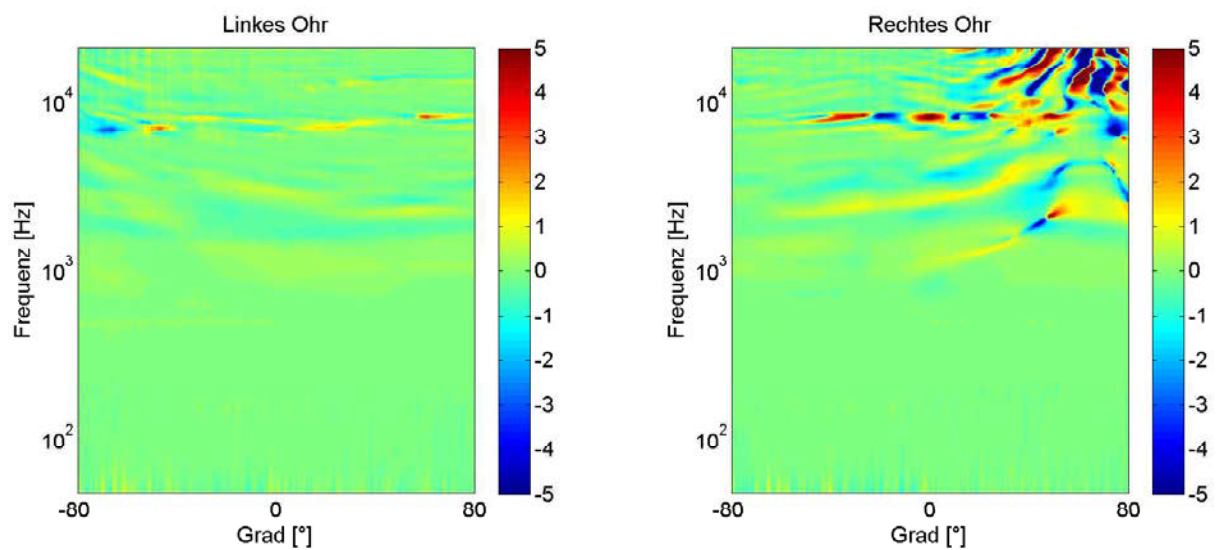
**Abbildung 7.41** – Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Ringstrahler für rechten Lautsprecher



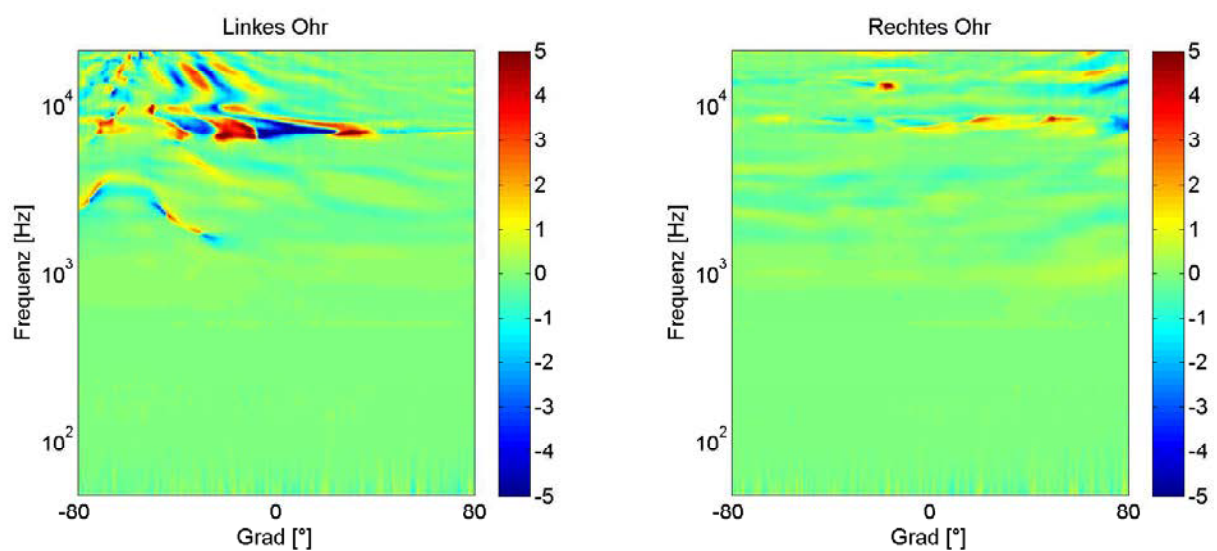
**Abbildung 7.42** – Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Magnetostat für linken Lautsprecher



**Abbildung 7.43** – Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Magnetostat für rechten Lautsprecher



**Abbildung 7.44** – Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Gewebekalotte für linken Lautsprecher



**Abbildung 7.45** – Differenzen zwischen Aluminiumkalotte und Gewebekalotte für rechten Lautsprecher



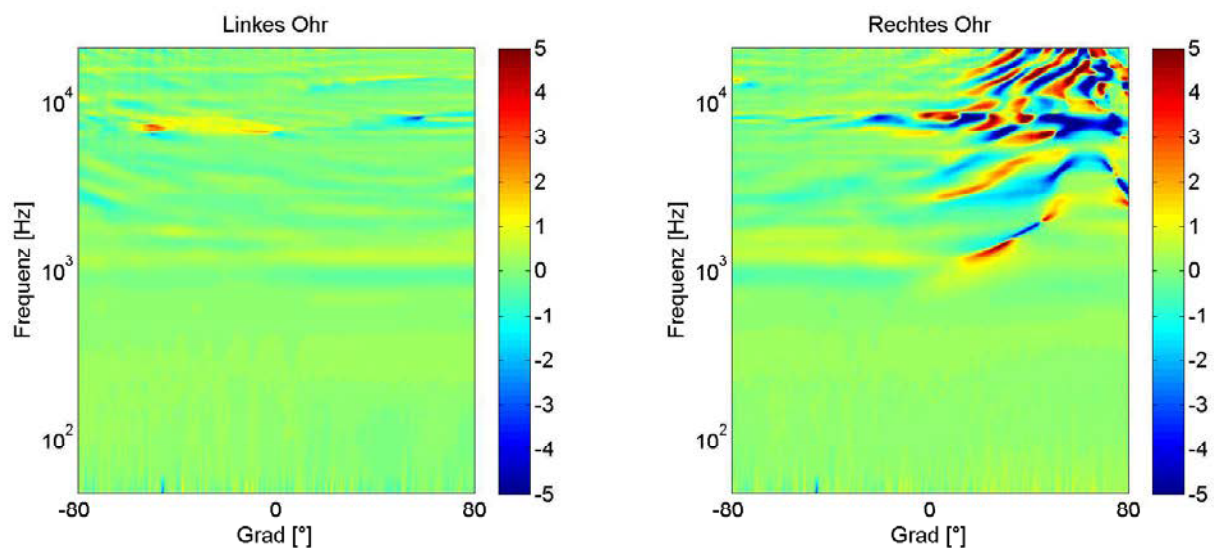


Abbildung 7.46 – Differenzen zwischen Bändchen und Ringstrahler für linken Lautsprecher

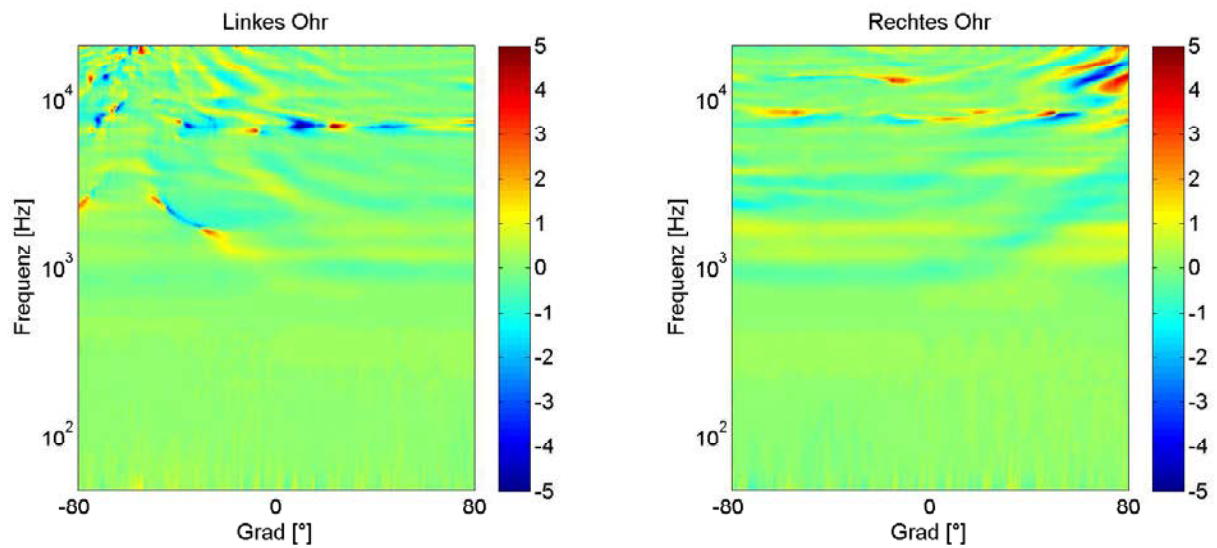


Abbildung 7.47 – Differenzen zwischen Bändchen und Ringstrahler für rechten Lautsprecher

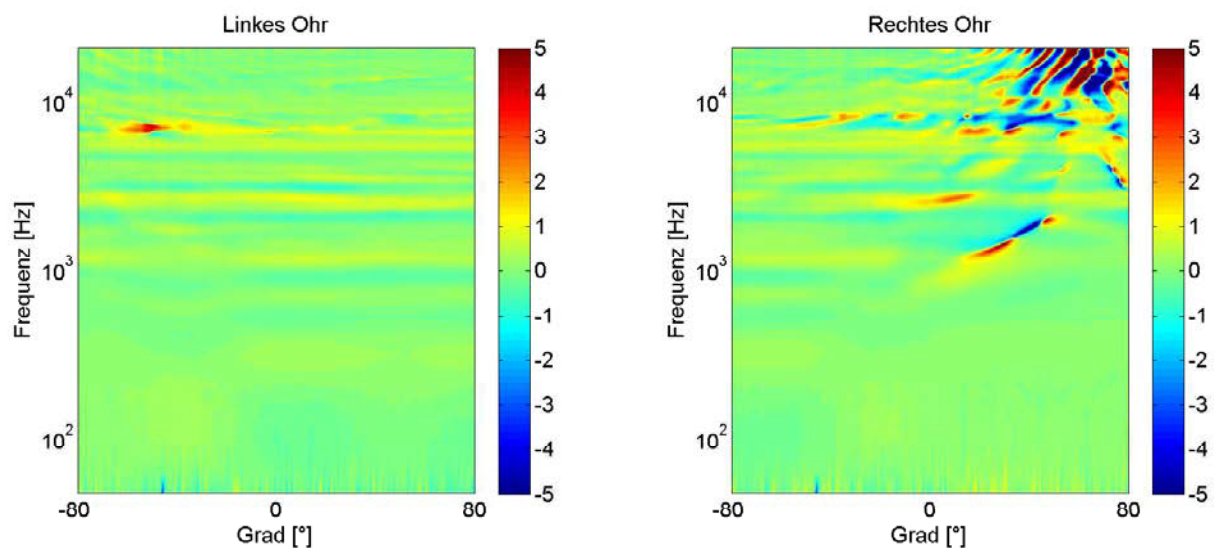


Abbildung 7.48 – Differenzen zwischen Bändchen und Magnetostat für linken Lautsprecher

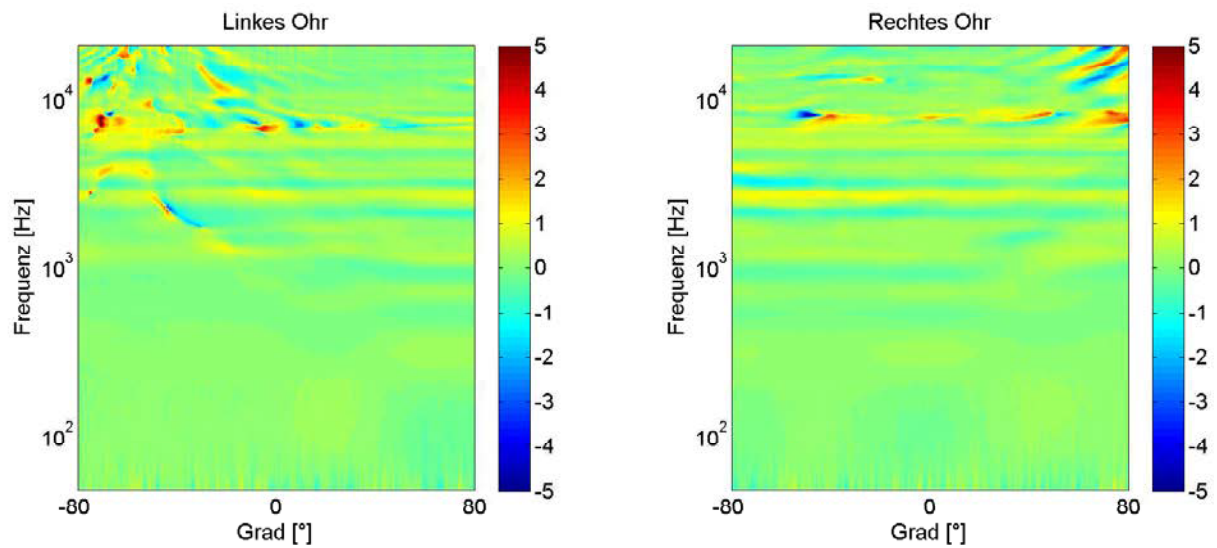
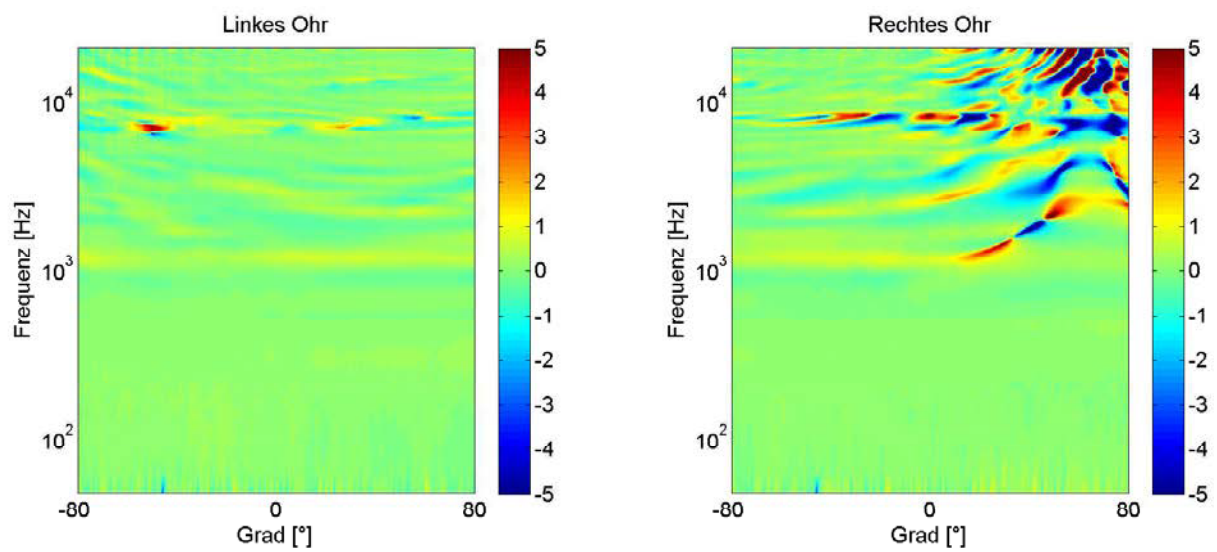
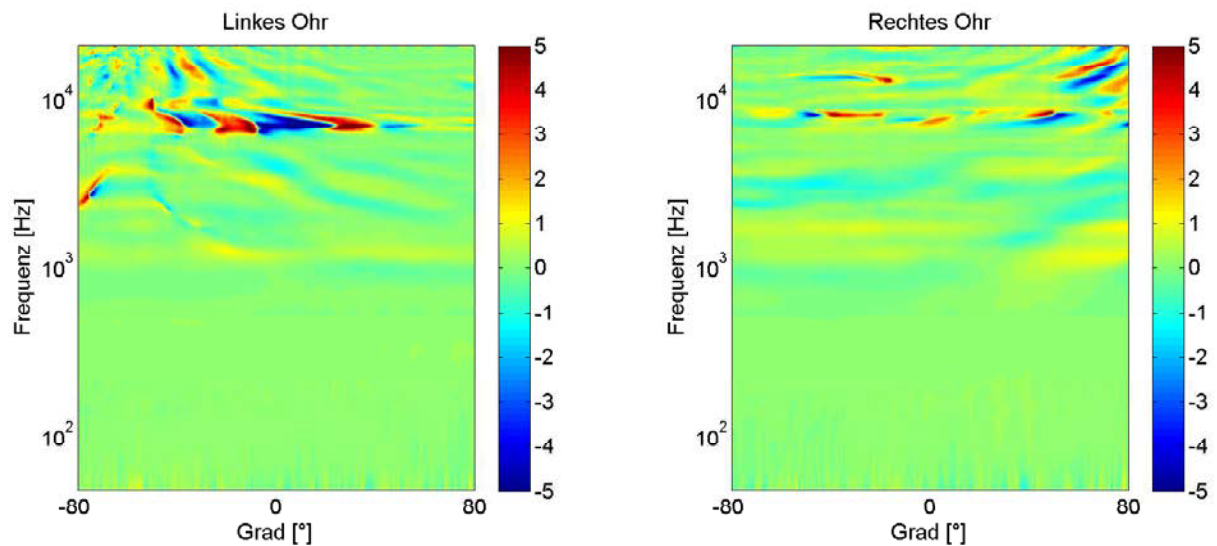


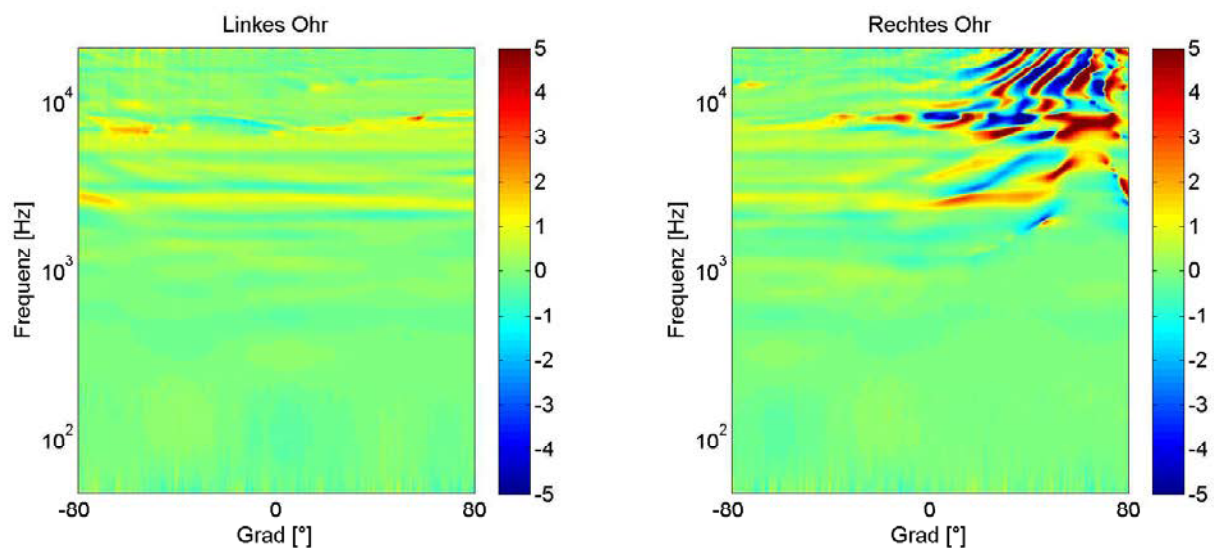
Abbildung 7.49 – Differenzen zwischen Bändchen und Magnetostat für rechten Lautsprecher



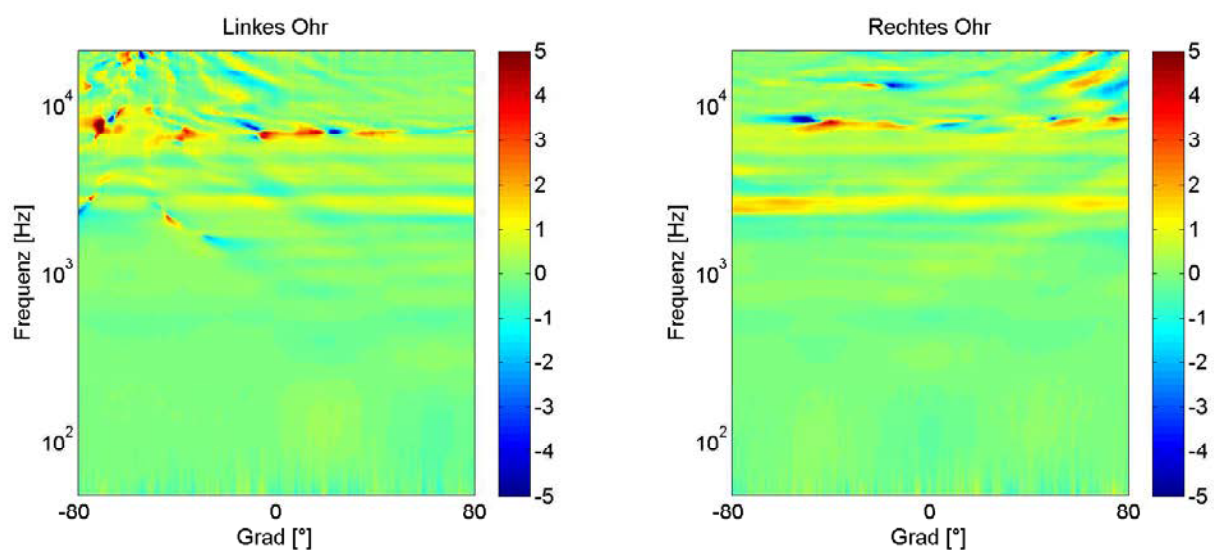
**Abbildung 7.50** – Differenzen zwischen Bändchen und Gewebekalotte für linken Lautsprecher



**Abbildung 7.51** – Differenzen zwischen Bändchen und Gewebekalotte für rechten Lautsprecher

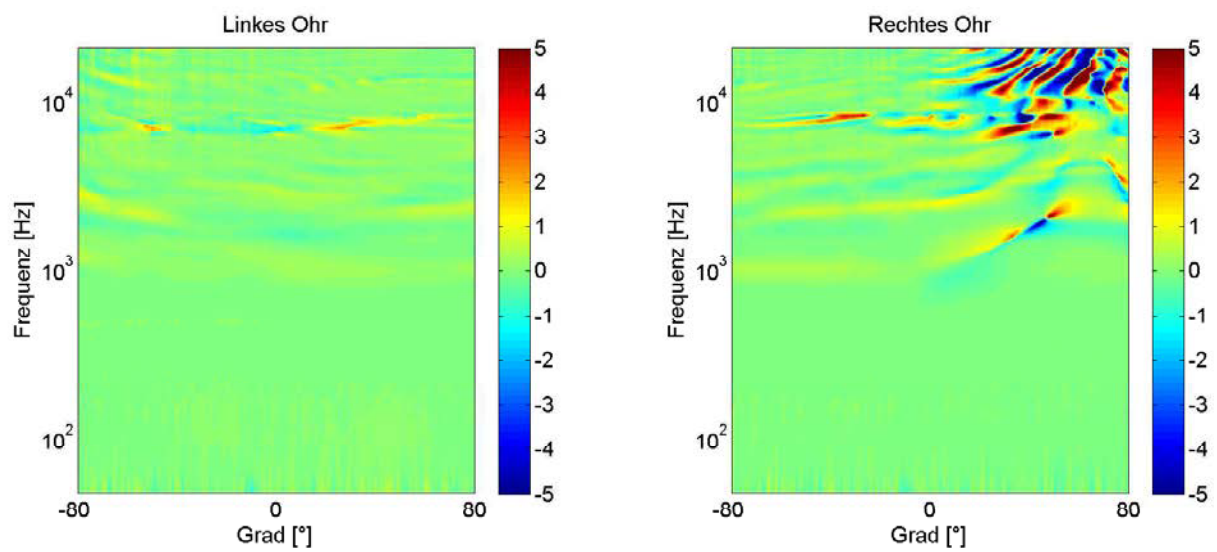


**Abbildung 7.52** – Differenzen zwischen Ringstrahler und Magnetostat für linken Lautsprecher

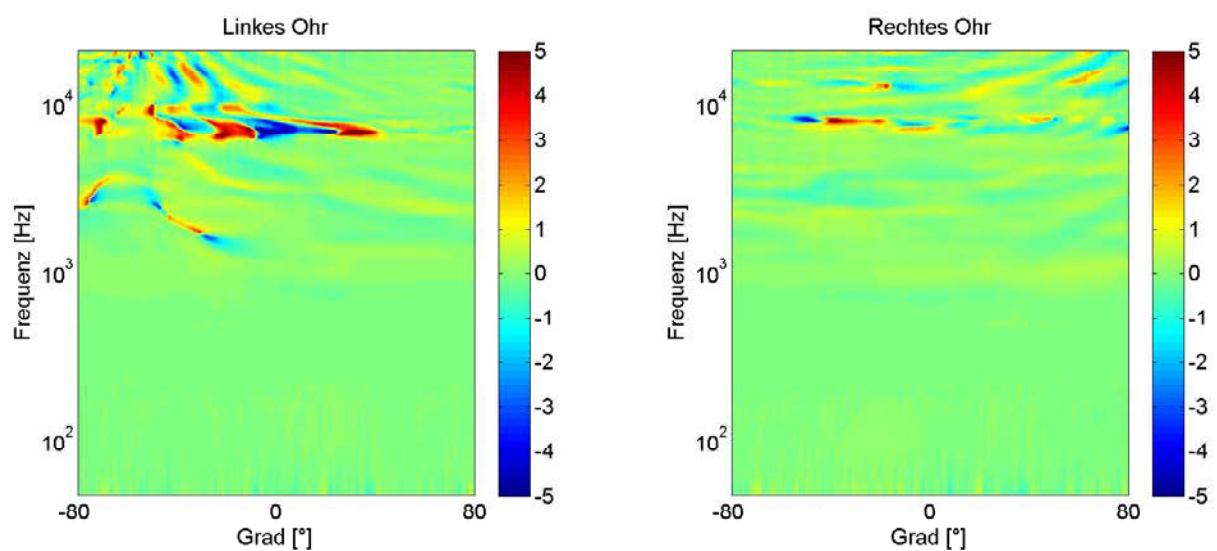


**Abbildung 7.53** – Differenzen zwischen Ringstrahler und Magnetostat für rechten Lautsprecher

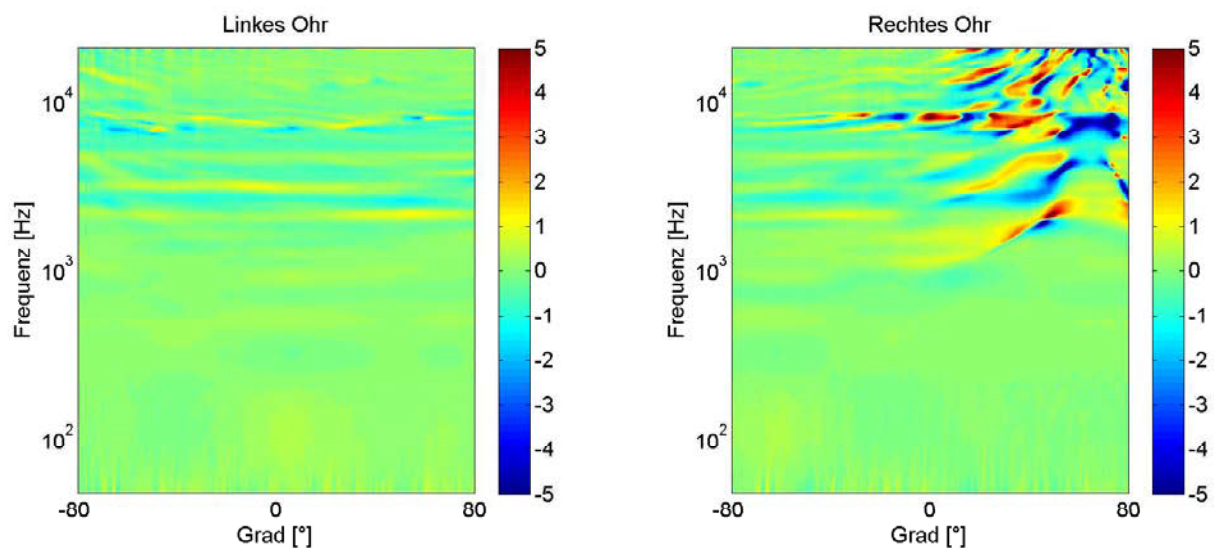




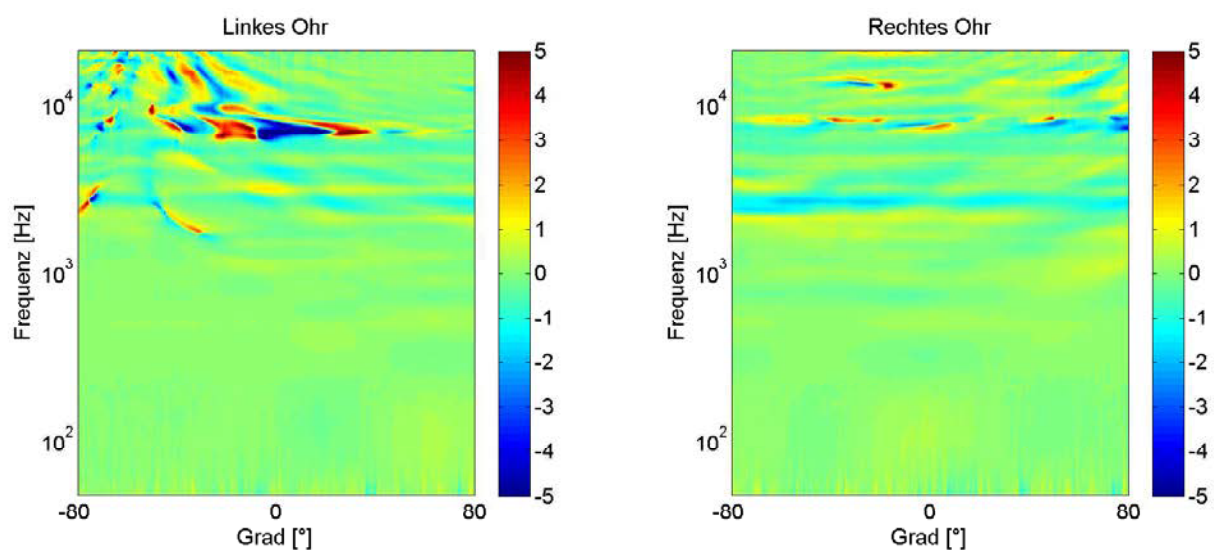
**Abbildung 7.54** – Differenzen zwischen Ringstrahler und Gewebekalotte für linken Lautsprecher



**Abbildung 7.55** – Differenzen zwischen Ringstrahler und Gewebekalotte für rechten Lautsprecher



**Abbildung 7.56** – Differenzen zwischen Magnetostat und Gewebekalotte für linken Lautsprecher



**Abbildung 7.57** – Differenzen zwischen Magnetostat und Gewebekalotte für rechten Lautsprecher