

Hochschule für Telekommunikation Leipzig (HfTL)

Fachbereich Nachrichtentechnik

Institut für Grundlagen der Telekommunikationstechnik

**Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering**

Thema: Entwicklung einer Softwareumgebung zum
Kopfhörerausgleich und deren Anwendung auf reale
Messungen

Vorgelegt von: Peter Kölling
geboren am: 27.12.1982
in: Lübben (Spreewald)

Themensteller: Dr.-Ing. György Wersényi
Széchenyi István University
Egyetem tér 1.
H-9026 Győr

Erstprüfer: Dr.-Ing. György Wersényi, Széchenyi István University Győr

Zweitprüfer: Dipl.-Physiklehrer Michael Graf, Hochschule für Telekommunikation Leipzig

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis.....	5
Einleitung	6
1. Fachspezifische Einordnung des Themas und deren Ziele	8
1.1 Fachspezifischer Kontext.....	8
1.2 HRTFs zur Nachbildung von natürlichen Filterfunktionen.....	9
1.3 Störfaktor Kopfhörer und Außenohr bei der virtuellen Schallfeldsimulation	11
1.4 Ausgleich von systembedingten Übertragungseigenschaften.....	12
1.5 Ziele der bearbeiteten Themenstellung.....	14
2. Das Messen von Kopfhörerübertragungsfunktionen.....	15
2.1 Einflussfaktoren beim Messen der Gewichtsfunktion von Kopfhörer und Außenohr	15
2.2 Erläuterung zur Messumgebung	17
2.3 Die analysierten Messobjekte	19
2.4 Bestandteile und Aufbau der Messeinrichtung.....	20
2.5 Charakteristiken des Messsignal.....	22
2.6 Bestimmung des Frequenzspektrums vom Übertragungssystem	23
2.7 Durchführung der Messungen	23
2.8 Ergebnisse der Messungen	25
2.9 Probleme bei der Weiterverarbeitung der Messergebnisse und deren Lösung.....	27
3. Verarbeitung der eingelesenen Messdaten	30
3.1 Berechnung des durchschnittlichen Frequenzspektrums	30
3.2 Invertierung des Frequenzspektrums	32
3.3 Entwurf von digitalen Filtern auf Grundlage von Frequenzspektren	34
4. Aufbau und Funktionsweise der entwickelten Softwareumgebung	41
4.1 Grundlegende Vorgehensweise bei der Programmierung der Softwareumgebung.....	41
4.2 Erläuterung zu den einzelnen Komponenten der grafischen Benutzeroberflächen	43
4.3 Im Projektmodul implementierte Programmfunktionen.....	46
4.4 Im Bachelormodul ergänzte Softwarefunktionen	46
4.5 Programmstrukturplan der weiterentwickelten Softwareumgebung	52
4.6 Grundlegende Erläuterungen zur Arbeit mit dem Programm.....	53
4.7 Funktionstest der Software	54
5. Schlussbetrachtung	55
5.1 Resümee zu den gewonnenen Ergebnissen aus dem Bachelormodul.....	55
5.2 Ausblick zu anknüpfende Bearbeitungsmöglichkeiten.....	56
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	58
Selbstständigkeitserklärung.....	59
Anlage 1: Auszug aus einer gespeicherten Datei, die die mit LabShop ermittelten Messdaten enthält	60

Abkürzungsverzeichnis

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CD	Compact Disc
FFT	Fast Fourier Transformation
FIR	Finite Impulse Response
GUIDE	Graphical User Interface Development Environment
HRTF	Head-Related Transfer Function
HRTFD	Head-Related Transfer Function Difference
IIR	Infinite Impulse Response
ILD	Interaural Level Difference
ITD	Interaural Time Difference
LZI	Linear Zeitinvariant
MLS	Maximum Length Sequence
RIFF	Resource Interchange File Format

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.2.1: Kopfbezogenes Polarkoordinatensystem nach Blauert [4].....	10
Abbildung 1.3.1: Signalübertragungsstrecke im Freifeld und der bei der virtuellen Freifeldsimulation	11
Abbildung 1.3.2: Ergebnisse der Messungen mit einer Person zur Lokalisationsgenauigkeit bei der virtuellen Schallfeldsimulation mit und ohne Ausgleich der Kopfhörerübertragungsfunktion [9]	12
Abbildung 2.1.1: Unterschiede im Amplitudengang der ermittelten Kopfhörerfrequenzfunktion bei Neupositionierung desselben Kopfhörers an der gleichen Versuchsperson. [9].....	16
Abbildung 2.1.2: Unterschiede im Amplitudengang der ermittelten Kopfhörerfrequenzfunktion beim Messen an unterschiedlichen Versuchspersonen mit demselben Kopfhörer. [9]	17
Abbildung 2.1.3: Unterschiede im Amplitudengang der ermittelten Kopfhörerfrequenzfunktion bei der Verwendung verschiedener Kopfhörer des gleichen Modells an einer Versuchsperson. [9].....	17
Abbildung 2.2.1: a) Einfluss der Signalreflektionen auf die Messung, b) Absorptionsprinzip im schalltoten Raum.....	18
Abbildung 2.2.2: Einflüsse bei der Messung von Kopfhörergewichtsfunktion am Beispiel einer Kunstkopfmessung	19
Abbildung 2.3.1: HD580 [10].....	20
Abbildung 2.3.2: ATH-M40 fs [11].....	20
Abbildung 2.3.3: RP HV 154 E-K [12]	20

Abbildung 2.4.1: a) Kunstkopf mit Torso des Typs 4128, b) Aufbau des rechten Gehörsimulators vom Kunstkopf des Typs 4128 der Firma Brüel & Kjær [14].....	21
Abbildung 2.4.2: Aufbau der Messeinrichtung mit Kunstkopf (Ein = Eingang; Aus = Ausgang)	21
Abbildung 2.5.1: Zerlegung des Rauschsignals in zeitlichen Teilabschnitte (je 250 ms farblich getrennt) für die Bestimmung des durchschnittlichen Frequenzspektrums mit dem FFT-Algorithmus	22
Abbildung 2.7.1: a) Messungen mit dem Kunstkopf Typ 4128, b) individuelle Messung mit dem binauralen Mikrofon, c) verwendetes binaurales Messmikrofon Typ 4101 des Herstellers Brüel & Kjær	24
Abbildung 2.8.1: Amplitudengänge von 4 analysierten Frequenzspektren vom linken Audiokanal des Sennheiser HD580 nach jeweils Neupositionierung der Kopfhörers.....	26
Abbildung 2.8.2: Vergleich zwischen den Amplitudengänge bei der Messung mit dem Kunstkopf (blau) und der individuellen Messung mit dem binauralen Mikrofon (rot). (linker Audiokanal des Kopfhörers Sennheiser HD 580)	26
Abbildung 3.1.1: Phasengänge von 7 gemessenen Frequenzspektren (blau) des gleichen Kopfhörers ATH-M40 fs (linker Kanal) und der daraus berechnete durchschnittliche Phasengang (rot).....	32
Abbildung 3.2.1: Zerlegung des gesamten Übertragungssystem G_{ges} in Teilübertragungssysteme G_{fn}	32
Abbildung 3.3.1: Vergleich der Amplitudengänge von 3 YULEWALK-Filter unterschiedlicher Ordnung (magenta = 10, grün = 20, rot = 30) mit dem idealen Amplitudengang (blau)	35
Abbildung 3.3.2: Vergleich des Amplituden- (a) und Phasengangs (b) zwischen dem ideal Angestrebten (blau) und dem eines entworfenen YULEWALK-Filters (rot) mit einer Zähler- und Nennerordnung von 77, Berechnungszeit für die Filterkoeffizienten = 0,041s	39
Abbildung 3.3.3: Vergleich des Amplituden- (a) und Phasengangs (b) zwischen dem ideal Angestrebten (blau) und dem eines entworfenen INVREQZ-Filters (rot) mit einer Zählerordnung von 64 und einer Nennerordnung von 96, Berechnungszeit für die Filterkoeffizienten = 0,787s	39
Abbildung 3.3.4: Vergleich des Amplituden- (a) und Phasengangs (b) zwischen dem ideal Angestrebten (blau) und dem eines entworfenen FIR2-Filters (rot) mit einer Filterordnung von 4096, Berechnungszeit für die Filterkoeffizienten = 0,0331s	40
Abbildung 4.1.1: Verallgemeinerte Quellcode-Darstellung zum Aufruf und Aufbau einer Funktion	42
Abbildung 4.2.1: Grafische Benutzeroberfläche des Hauptprogramms <i>SAwIG</i>	44
Abbildung 4.2.2: Grafische Benutzeroberfläche des Unterprogramms <i>SAwIG-Filterdesign</i> . 45	
Abbildung 4.4.1: a) korrekte Wahl des Zeitfensters bei periodischen Signalen, b) Entstehung von Sprungstellen bei unpassender Lage des Zeitfensters während der Analyse von nicht periodischen Signalen	47
Abbildung 4.4.2: Wertigkeitsverlauf der Wichtungsfaktoren von den einzelnen im Programm wählbaren Fensterfunktionen, bei einer Anzahl von 8192 Abtastwerten	48

Abbildung 4.4.3: Amplituden- und Phasengang rechter Kanal: ideal und vom entworfenen Filter mit der Methode <i>invfreqz</i> bei einer Ordnung des Zählers von 64 und des Nenners von 96.....	49
Abbildung 4.4.4: Einheitskreisdarstellung der Pol- und Nullstellen eines Filters nach der <i>invfreqz</i> Entwurfsmethode	50
Abbildung 4.4.5: Anzeige des Ergebnisses der Testfilterung in Form von Amplituden- und Phasengang: blau = Frequenzgang des zu filternden Signals, grün = invertierter Frequenzgang des Filters, rot = Frequenzgang des gefilterten Signals	51
Abbildung 4.5.1: Programmstrukturplan der entwickelten Softwareumgebung (<i>SAwIG</i> und <i>SAwIG-Filterdesign</i>)	52
Abbildung 4.6.1: Auswahl des Arbeitsverzeichnisses und Starten von GUIDE unter MATLAB	53
Abbildung 4.6.2: Schaltfläche zum Starten der geöffneten grafischen Benutzeroberfläche unter GUIDE.	53
Abbildung 4.7.1: Beispiel für ein Ergebnis eines Testausgleichs mit einem Filter nach der Entwurfsmethode <i>invfreqz</i> : a) Amplitudengang des zu filternden Signals, b) Amplitudengang des Filters, c) Amplitudengang des resultierenden Signals nach einer inversen Filterung.....	55
Abbildung 5.2.1: Modulare Grundstruktur eines möglichen Gesamtkonzepts einer Software für die virtuellen Schallfeldsimulation	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.3.1: Übersicht der technischen Daten der drei analysierten Messobjekte.....	20
Tabelle 3.3.1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von IIR- und FIR-Filter.....	36
Tabelle 3.3.2: Entwicklungsfunktionen für IIR- und FIR-Multibandfilter die unter MATLAB zur Verfügung stehen	37

Einleitung

Der Begriff virtuelle Realität weckt stets bei Menschen unterschiedliche Gefühle und Assoziationen. Die Beziehung zu diesem Begriff reichen von Faszination, über Gleichgültigkeit bis hin zu vollständiger Ablehnung oder auch Unwissen über dessen Bedeutung. In Filmen aus Hollywood, wie zum Beispiel Matrix, werden virtuelle Realitäten meist als lebensfeindliche Illusion dargestellt. Doch was sind eigentlich virtuelle Realitäten und ihre Ziele und welcher Zusammenhang besteht zu dem Inhalt dieser Bachelorarbeit?

Virtualität ist eine Simulation von Eigenschaften einer real existierenden Sache mit dem Ziel, diese in ihren Wesen oder ihrer Wirkung vollständig zu gleichen, obwohl sie nicht in derselben Form existiert. Virtuelle Realitäten verfolgen das Ziel, die Wahrnehmung der Wirklichkeit mit ihren physikalischen Eigenschaften durch computergenerierte Umgebungen nachzubilden. Um eine für den Menschen realistisch wirkende Umgebung nachzubilden, müssen bei deren Simulation die fünf Wahrnehmungssinne des Menschen, Hören, Sehen, Riechen, Schmecken und Tasten, angesprochen werden. In Abhängigkeit des Einsatzgebietes werden in den virtuellen Realitäten diese Sinne unterschiedlich stark gefordert. So sind zum Beispiel Geschmackseindrücke für Piloten in einem Flugzeugsimulator weniger wichtig als die Simulation visueller oder akustischer Eindrücke. Aus diesem Grund gibt es bereits viele Forschungsgebiete, in denen gezielt an der Einbindung einzelner Wahrnehmungssinne in eine virtuelle Realität gearbeitet wird. Ein Schwerpunkt dieser Forschungsgebiete ist die Virtualisierung der akustischen Wahrnehmung, in der das Thema dieser Bachelorarbeit eingebettet ist.

In dieser Arbeit wird speziell das für die Virtualisierung der akustischen Wahrnehmung notwendige Wiedergabesystem mittels Kopfhörer mit seinen physikalischen Übertragungseigenschaften und die daraus resultierenden physikalischen Störeinflüsse bei der Virtualisierung der natürlichen Schallwahrnehmung betrachtet. Dabei wird gezeigt, wie diese Störeinflüsse während des Bachermoduls durch Messungen ermittelt und die Möglichkeit einer softwarebasierten Beseitigung dieser Einflüsse umgesetzt wurden.

Die Arbeit ist in 5 Kapitel gegliedert. In Kapitel 1 wird eine allgemeine fachspezifische Einordnung der Themenstellung vorgenommen. Neben einer Erläuterung zu dem zu Grunde liegenden Virtualisierungsverfahren und den dabei auftretenden Störfaktoren wird ein mögliches Ausgleichsverfahren dieser Störeinflüsse näher beschrieben. Es werden ebenso die im Bachelormodul verfolgten Ziele konkretisiert, die sich aus der betrachteten Thematik heraus ergeben hatten. Das Kapitel 2 befasst sich mit der Analyse der Störeinflüsse, die bei der Wiedergabe über Kopfhörer auftreten. Die dafür notwendigen und durchgeführten Messungen werden beschrieben und die daraus gewonnenen Ergebnisse dargestellt. Weiterhin wird auch auf die Probleme eingegangen, die bei der Weiterverarbeitung der Messergebnisse auftreten können. Die Möglichkeiten zur Verwendung der ermittelten Messdaten für den Ausgleich der Störfaktoren behandelt das Kapitel 3. Es wird zum einen auf die für die

Weiterverarbeitung notwendige Aufbereitung der Messdaten eingegangen und zum anderen Verfahren erläutert, mit denen ein Ausgleich der Störfaktoren realisiert werden kann.

Kapitel 4 stellt die entwickelte Software vor, die Messdaten von Störeinflüssen aufbereitet und in ein Format umwandelt, mit dem eine spätere Ausgleichskalkulation durchgeführt werden kann. Das Abschließende Kapitel 5 gibt noch einmal eine kurze Zusammenfassung zu den Ergebnissen und Erkenntnissen, die innerhalb der Bearbeitung der Themenstellung erreicht wurden. Das Kapitel endet mit einem Ausblick zu weiteren Bearbeitungsmöglichkeiten, welche sich an dieser Arbeit anschließen könnten.

1. Fachspezifische Einordnung des Themas und deren Ziele

In diesem Kapitel wird eine fachspezifische Einordnung der Themenstellung dieser Bachelorarbeit vorgenommen. Es erfolgt eine Beschreibung des Forschungsgebiets, aus deren Teilbereiche das Thema dieser Arbeit entstanden ist. In welcher Weise die Ergebnisse dieser Arbeit für den Gesamtkomplex des im Folgenden dargestellten Forschungsgebiets eine Rolle spielen, soll hier näher erläutert werden und dadurch die Ziele dieser Arbeit verdeutlichen.

Für dieses Kapitel wurden zum Teil Erläuterungen aus dem Projektbericht des vorangegangenen Projektmoduls entnommen. Dieses Projektmodul beschäftigte sich mit der gleichen Thematik und diente als Vorbereitung für die Durchführung dieser Bachelorarbeit. Die entnommenen Erläuterungen werden jedoch nicht extra hervorgehoben.

1.1 Fachspezifischer Kontext

Die virtuelle Schallfeldsimulation ist ein bedeutender Forschungszweig im Bereich der Akustik. Hierbei wird versucht, mit elektroakustischen Schallwandlern das räumliche Hören des Menschen nachzubilden und einen natürlichen akustischen Raumeindruck zu schaffen. Der Themenbereich dieser Bachelorarbeit gliedert sich in den Forschungsbereich der virtuellen Schallfeldsimulation mittels Kopfhörerwiedergabe ein. Im Gegensatz zur räumlichen Simulation im Freifeld, bei der der räumliche Eindruck durch die Ansteuerung mehrere Lautsprecher realisiert wird, steht bei der simulierten Wiedergabe über Kopfhörer für jedes Ohr nur ein Schallwandler zur Verfügung. Aufgrund des direkten Anliegens der Schallwandler am Außenohr können die natürlichen Übertragungsfaktoren der Freifeldübertragungstrecke, die für die räumliche Wahrnehmung ausschlaggebend sind, keinen Einfluss auf das akustische Signal ausüben. Diese Übertragungsfaktoren müssen durch geeignete Verfahren bestimmt werden, um die darin enthaltenen Informationen dem wiederzugebenden Signal hinzuzufügen zu können.

Die akustischen Signale, die beim Freifeldhören das Trommelfell erreichen, beinhalten neben der eigentlichen akustischen Nachricht, eine Vielzahl von zusätzlichen physikalischen Informationen, die für eine exakte räumliche Zuordnung des Schallereignisses notwendig sind. Zu den Wichtigsten zählen dabei die auf beide Ohren bezogenen Unterschiede in der Signallaufzeit (Interaural Time Difference, ITD) und dem Signalpegel (Interaural Level Difference, ILD), dem Signalnachhall bei Reflexionen in der Umgebung, sowie die durch Brechung, Beugung und Absorption an Kopf, Torso und Ohrmuscheln hervorgerufenen Klangverfärbungen des akustischen Signals.

Die Laufzeit- und Pegelunterschiede sowie der Nachhall lassen sich durch Signalverzögerung, Dämpfung und Rückkopplung leicht mit elektronischen Schaltungen nachbilden. Schwieriger wird es bei der Simulation der Klangverfärbung des Signals, die bei jedem Hörer aufgrund seiner individuellen Anatomie spezifisch geprägt wird und in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung sehr unterschiedlichen frequenzabhängigen Eigenschaften unterliegt. Diese Eigenschaften spielen bei der räumlichen Wahrnehmung eine sehr große Rolle und müssen bei der Kopfhörerwiedergabe möglichst genau simuliert werden.

Eine Lösung für die Simulation der Klangverfärbung ist die Verwendung von so genannten Außenohr-Übertragungsfunktionen, Head-Related Transfer Functions [1] (HRTFs), die vor der Kopfhörerwiedergabe auf das wiederzugebende akustische Signal angewendet werden müssen. Der folgende Abschnitt 1.2 geht etwas näher auf die HRTFs ein und soll ein gewisses Grundverständnis für die virtuelle Schallfeldsimulation vermitteln.

1.2 HRTFs zur Nachbildung von natürlichen Filterfunktionen

HRTFs sind komplexe Filterübertragungsfunktionen, die den frequenz- und richtungsabhängigen Einfluss der Übertragungsstrecke vom Freifeld bis zum Trommelfell auf das Schallereignis beschreiben. Eine HRTF wird aus der gemessenen Gewichtsfunktion $g(t)$ am Gehöreingang oder auch am Trommelfell von Personen (individuelle HRTF) bzw. eines Kunstkopfes (durchschnittliche HRTF) ermittelt. Der in dieser Arbeit oft verwendete Begriff Kunstkopf beschreibt ein Messinstrument, das der natürlichen Eigenschaften des menschlichen Gehörs, Kopfes und Torso in Form und Funktion nachbildet. Eine Darstellung eines solchen Messinstruments ist in Kapitel 2 in der Abbildung 2.7.1 a) zu sehen.

Die Gewichtsfunktion ist das Ausgangssignal eines linearen, zeitinvarianten Übertragungssystems (LZI-System), wenn am Eingang ein Einheitsimpuls $\delta(t)$ angelegt wird [2]. Linear bedeutet, dass zwischen Ein- und Ausgangsgröße stets Proportionalität herrscht. Die Zeitinvarianz sagt aus, dass das System zu jeder Zeit das gleiche Verhalten aufweist. Ein Einheitsimpuls ist ein Impulssignal mit einer sehr kurzen Dauer und einem großen Frequenzspektrum. Transformiert man die im Zeitbereich aufgenommene Gewichtsfunktion mittels der in Gl. (1.2.1) dargestellte Laplace-Transformation in den Bildbereich, erhält man die Übertragungsfunktion $G(p)$, bzw. durch die in Gl. (1.2.2) dargestellte Fourier-Transformation, die Frequenzgangfunktion $G(j\omega)$ des Systems.

$$HRTF(p) = L\{g(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot e^{-pt} dt \quad (1.2.1)$$

$$HRTF(j\omega) = F\{g(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (1.2.2)$$

Mit Hilfe der Übertragungsfunktion oder dem Frequenzgang lässt sich das Übertragungssystem vollständig mathematisch beschreiben. Dadurch ist es möglich, die Systemreaktion auf jedes beliebige Eingangssignal im Voraus mit entsprechenden Berechnungsverfahren zu bestimmen. Dabei beschreiben die Übertragungsfunktion und der Frequenzgang, wie die einzelnen Frequenzanteile eines Eingangssignals durch das System beeinflusst werden. Die HRTFs geben somit die frequenzspezifischen Eigenschaften des richtungsabhängigen Übertragungssystems, das aus Kopf, Torso und Ohrmuschel besteht, wieder.

Bei der Aufnahme der HRTFs wird im gleichen Abstand zur Kopfmitte für jede räumliche Position im unter Abbildung 1.2.1 dargestellten kopfbezogenen Polarkoordinatensystem die

Impulsantwort am Gehöreingang oder direkt am Trommelfell aufgenommen. Die Aufnahme direkt am Trommelfell ist aber nicht unbedingt nötig, da der zwischen Gehöreingang und Trommelfell befindliche Ohrkanal lediglich richtungsunabhängige Resonanzeigenschaften besitzt [3].

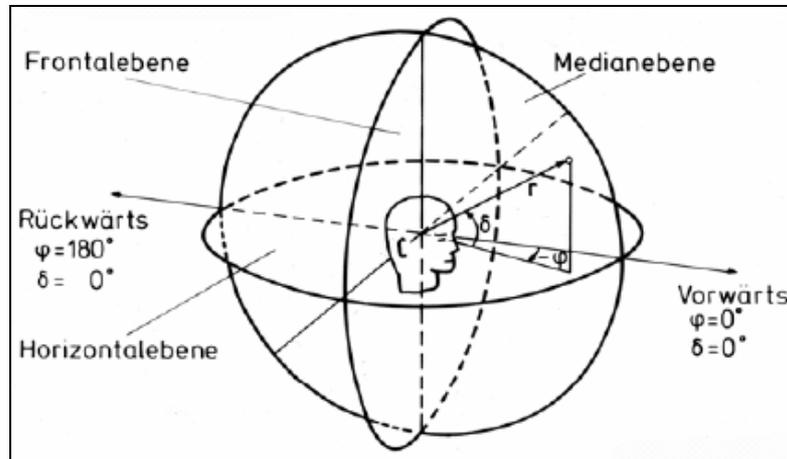


Abbildung 1.2.1: Kopfbezogenes Polarkoordinatensystem nach Blauert [4]

Untersuchungen im Bereich der räumlichen Auflösung haben ergeben, dass bei einer Ortsänderung eines Schallereignisses von 1° die kleinste für das Gehör wahrnehmbare Änderung liegt [5] [6]. Diese Auflösung ist der kleinstmögliche Wert und kann in Abhängigkeit von der Einfallrichtung des Schallereignisses auch verkleinern. Deshalb brauchen die HRTFs auch nur in diesen Schrittweiten aufgenommen werden, um das natürliche Abbild der Filterwirkung für jede Schalleinfallrichtung zu beschreiben

Für das Messsignal wird in der Praxis kein Einheitsimpuls verwendet, weil solche Signale nur sehr geringe Energieanteile bei den einzelnen Frequenzen besitzen und dadurch der Signal- zu Rauschabstand sehr gering ist. Stattdessen wird ein breitbandiges weißes Rauschen verwendet. Dieses hat über den gesamten Frequenzbereich verteilt, eine gleichmäßig hohe Energiedichte. Teilt man dann den Frequenzgang des aufgenommenen Signals durch den des Eingangssignals erhält man den Frequenzgang der HRTF.

Hat man für jede Einfallrichtung die jeweilige HRTF gemessen, besitzt man einen vollständigen Satz an HRTFs, die die gesamte Information für das gerichtete räumliche Hören enthalten. Werden diese, entsprechen der gewünschten zu simulierenden Schalleinfallrichtung, auf das wiederzugebende Signal angewendet, sollte bei der Wiedergabe über den Kopfhörer genau der räumliche Höreindruck entstehen, der sich auch beim Freifeldhören einstellen würde.

Hierbei müssen jedoch zwei entscheidende Faktoren beachtet werden. Zum einen ist dies die Signalbeeinflussung durch die Übertragungseigenschaften des Kopfhörers und Außenohrs. Aus dieser Problematik heraus hat sich auch das Thema dieser Bachelorarbeit entwickelt und wird im Abschnitt 1.3 und 1.4 näher vorgestellt. Der zweite zu beachtende Faktor ist der, dass die HRTFs von Mensch zu Mensch unterschiedlich sind. Eine wirklich realistische virtuelle Schallfeldsimulation kann dadurch nur mit den individuellen HRTFs der entsprechenden Person erreicht werden. Aufgrund des zeitintensiven und aufwändigen Messverfahrens von HRTFs werden für die virtuelle Schallfeldsimulation hauptsächlich solche verwendet, die mit

einem Kunstkopf ermittelte wurden. Diese repräsentieren lediglich Durchschnittswerte und besitzen nicht die Qualität von individuell ermittelten HRTFs. Derzeitige Forschungen in diesem Bereich beschäftigen sich deshalb mit Verfahren zur Individualisierung durchschnittlicher HRTFs. Hierfür werden zum Beispiel die Einflüsse von Haarlänge, Kopfbedeckung oder Kleidung auf die Charakteristiken der HRTFs hin untersucht [7] [8]. Als Ergebnis werden diese charakteristischen Unterschiede als HRTF Differenzen (HRTFD) gespeichert. Auf diese Problematik soll in dieser Arbeit nicht näher eingegangen, da diese nicht Bestandteil des Bachelorthemas war.

1.3 Störfaktor Kopfhörer und Außenohr bei der virtuellen Schallfeldsimulation

Jedes System bzw. Medium, das zur Übertragung von Signalen dient, besitzt physikalisch bedingte frequenzabhängige Übertragungseigenschaften, die das zu übertragende Signal linear oder nichtlinear beeinflussen. Man spricht hierbei von einem nicht idealen Übertragungssystem, da sich das Empfangssignal vom gesendeten Signal aufgrund der frequenzabhängigen Kanaldämpfung, Signallaufzeiten und Verzerrungen unterscheidet. Somit unterliegen die mittels HRTFs aufbereiteten Signale bei der Wiedergabe über Kopfhörern einer Beeinflussung durch die Übertragungseigenschaften des Kopfhörers, sowie durch die des Außenohrs. Man spricht hierbei auch von Filter- oder Verzerrungseigenschaften des Übertragungssystems. In Abbildung 1.3.1 wird mittels der Gegenüberstellung der einzelnen Übertragungssysteme innerhalb der Signalübertragungsstrecke im Freifeld und bei der virtuellen Freifeldsimulation, die Einflüsse auf das wiederzugebende Signal verdeutlicht.

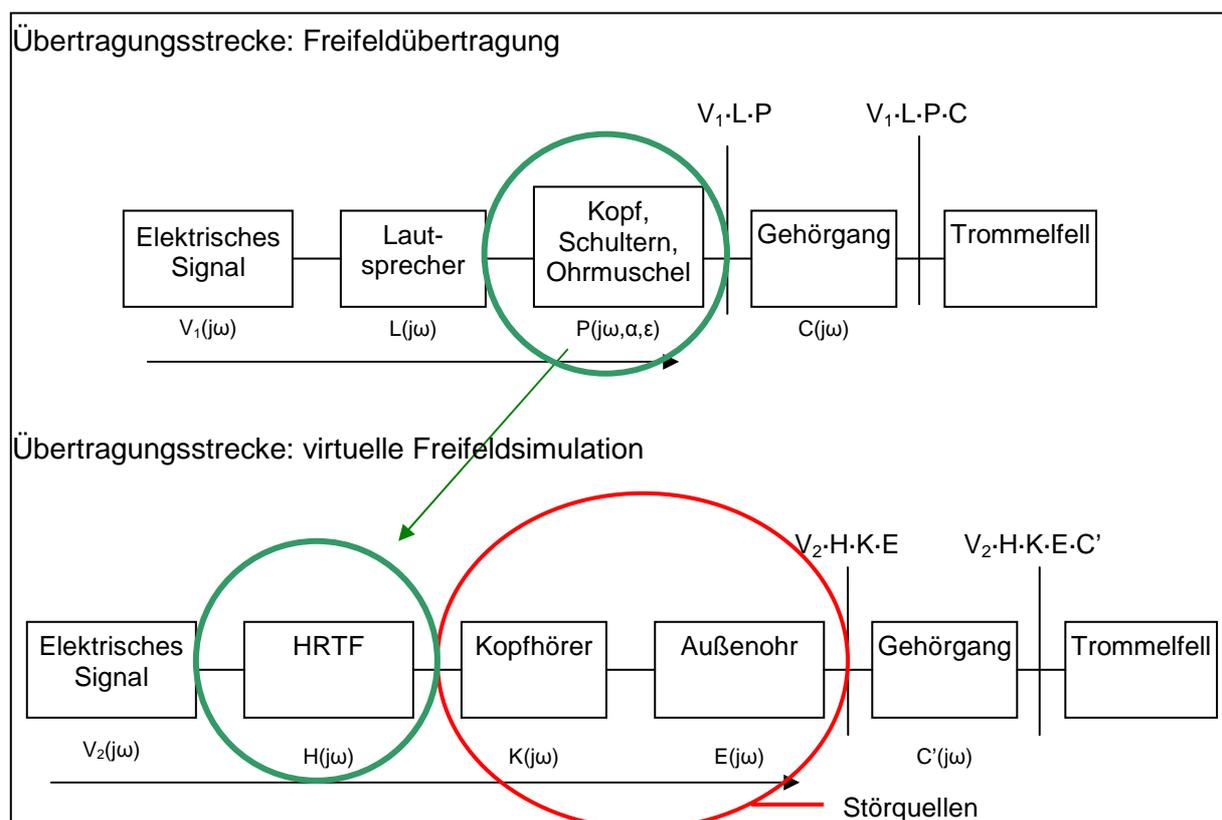


Abbildung 1.3.1: Signalübertragungsstrecke im Freifeld und der bei der virtuellen Freifeldsimulation

Die einzelnen Übertragungssysteme werden durch Blöcke und ihren Frequenzgangfunktionen symbolisiert. Der grün markierte Bereich stellt den Teil der Freifeldübertragung dar, der durch die HRTFs virtualisiert wird.

Anhand der Abbildung 1.3.1 kann man erkennen, dass bei der Kopfhörerwiedergabe zwei in der Freifeld nicht vorhandene Übertragungssysteme zusätzlich hinzukommen (rot markierter Bereich). Zum einen ist das der Kopfhörer mit seiner Frequenzgangfunktion $K(j\omega)$ und zum anderen das Außenohr mit dessen Frequenzgangfunktion $E(j\omega)$. Um eine möglichst realistische räumliche Simulation über Kopfhörer zu erreichen, müssen diese störenden Übertragungseigenschaften ausgeglichen, also beseitigt werden. Ohne Ausgleich entstehen nämlich deutlich messbare Ungenauigkeiten bei der Lokalisation der virtualisierten Schallquellen [9]. Abbildung 1.3.2 zeigt Ergebnisse aus Untersuchungen von Whitman und Kistler zu den Auswirkungen der Übertragungseigenschaften auf die Lokalisationsgenauigkeit.

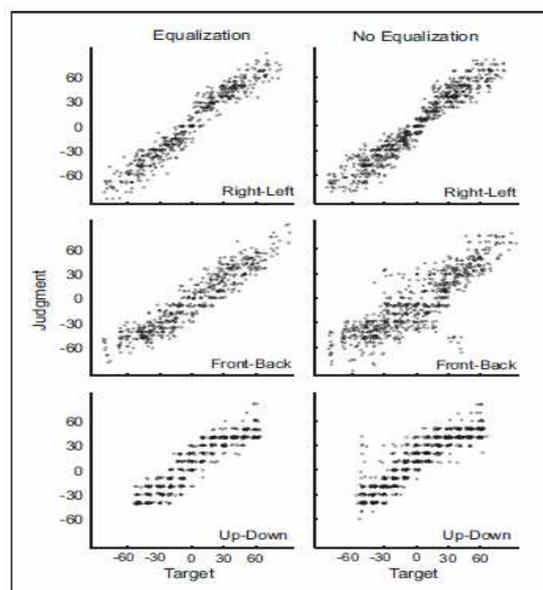


Abbildung 1.3.2: Ergebnisse der Messungen mit einer Person zur Lokalisationsgenauigkeit bei der virtuellen Schallfeldsimulation mit und ohne Ausgleich der Kopfhörerübertragungsfunktion [9]

In der Abbildung 1.3.2 kann man erkennen, dass vor allem im Bereich der Vorn-Hinten- und Oben-Unten-Lokalisation große Ungenauigkeiten bei nicht erfolgtem Ausgleich (No Equalization) auftreten. Die Notwendigkeit eines Ausgleichs für eine möglichst exakte Simulation des Freifeldhörens ist somit unumgänglich.

1.4 Ausgleich von systembedingten Übertragungseigenschaften

Dieser Abschnitt soll in mathematischer Form klären, was der Begriff Ausgleich von Übertragungseigenschaften in der Systemtheorie bedeutet und wie er realisiert wird. Grob kann man sagen, dass der Ausgleich einer Vorverzerrung bzw. Filterung des

wiederzugebenden Signals entspricht. Die Vorverzerrung muss dabei genau den entgegengesetzten Filtereigenschaften des in der Übertragungsstrecke auszugleichenden Übertragungssystems entsprechen. In der Praxis wird die Vorverzerrung durch die Filterung des Signals mit der invertierten Übertragungsfunktion realisiert. Passiert nun das vorverzerrte Signal die Übertragungsstrecke, heben sich idealerweise die Vorverzerrung und die Filtereigenschaften des entsprechenden Übertragungssystems gegeneinander auf. Am Ausgang entsprechen dann sämtliche Signaleigenschaften dem des Originalsignals ohne den Störeinflüsse des Übertragungssystems. Die Betrachtung des Ausgleichsvorgangs in diesem Kapitel beziehen sich auf die Übertragungssysteme Kopfhörer und Außenohr, welche in der Abbildung 1.3.1 rot markiert sind.

Der erste Schritt beim Ausgleich der Übertragungseigenschaften ist das Bestimmen der Übertragungsfunktion des Kopfhörers $K(p)$ und des Außenohrs $E(p)$. Dies erfolgt ähnlich wie bei der Bestimmung der HRTFs, durch das Messen der Gewichtsfunktion beider Systeme. Die Gewichtsfunktion muss theoretisch nur einmal gemessen werden, da von dem Kopfhörer und dem Außenohr keine richtungsabhängigen Informationen ausgehen. Nähere Erläuterungen zu den durchgeführten Messverfahren werden im Kapitell 2 aufgeführt.

Es folgt nun eine Beschreibung des Ausgleichsvorgangs mittels mathematischen Gleichungen. Bei den Gleichungen wird auf die Angabe des Arguments, $j\omega$, der Übertragungsfunktionen verzichtet, um eine bessere Übersicht zu gewährleisten. Die dabei durchgeführten Rechenoperationen sind nur für Übertragungsfunktionen im Bildbereich oder für Frequenzgangfunktionen im Frequenzbereich definiert. Die verwendeten Bezeichnungen der einzelnen Übertragungsfunktionen beziehen sich auf die Abbildung 1.3.1.

Die Übertragungsfunktion von Kopfhörer und Außenohr ergibt sich aus:

$$G_{KE} = K \cdot E \quad (1.4.1)$$

Die Übertragungsfunktion der gesamten Signalübertragungsstrecke im Freifeld lautet:

$$G_{V_1LPC} = V_1 \cdot L \cdot P(\alpha, \varepsilon) \cdot C \quad (1.4.2)$$

Die Übertragungsfunktion der Signalübertragungsstrecke im virtualisierten Freifeld lautet:

$$G_{V_2HKEC'} = V_2 \cdot H \cdot G_{KE} \cdot C' \quad (1.4.3)$$

Das Ziel ist, dass die Signalübertragungsstrecke des Freifelds vollständig durch die Signalübertragungsstrecke des virtualisierten Freifelds simuliert wird.

$$G_{V_1LPC} = G_{V_2HKEC'} \quad (1.4.4)$$

$$V_1 \cdot L \cdot P(\alpha, \varepsilon) \cdot C = V_2 \cdot H \cdot G_{KE} \cdot C' \quad (1.4.5)$$

Das vom Azimut α und der Elevation ε der Schallquelle abhängige Übertragungssystem P wird durch die HRTFs simuliert. Da die Übertragungssysteme C und C' , also der Ohrkanal,

keinen Einfluss auf das räumliche Hören ausüben, können diese vernachlässigt werden. Weiterhin sind die Übertragungseigenschaften des Übertragungssystems L ebenfalls richtungsunabhängig und können somit auch in der Gleichung ignoriert werden. Damit reduziert sich die Gl. (1.4.5) zu:

$$V_1 = V_2 \cdot G_{KE} \quad (1.4.6)$$

Stellt man Gl. (1.4.6) nach V_2 um, erhält man die Frequenzgangfunktion Gl. (1.4.7) des bei der virtuellen Freifeldsimulation zu verwendenden Signals V_2 , mit der die störenden Übertragungseigenschaften des Kopfhörers und des Außenohrs ausgeglichen werden können.

$$V_2 = \frac{V_1}{G_{KE}} = \frac{V_1}{K \cdot E} \quad (1.4.7)$$

Aus Gl. (1.4.7) geht hervor, dass vor der Wiedergabe eine Filterung des zu sendenden Signals $V_1(j\omega)$ mit dem Reziprok der Übertragungsfunktion des Kopfhörers und Außenohrs erfolgen muss. Die Übertragungsfunktion des zu verwendenden Filters lautet also:

$$G_{\text{Ausgleichsfilter}}(j\omega) = (G_{KE}(j\omega))^{-1} = (K(j\omega) \cdot E(j\omega))^{-1} \quad (1.4.8)$$

Nach der Filterung erhält man die Frequenzgangfunktion $V_2(j\omega)$ des zuzusendenden Signals. Vor dem Versenden muss das Signal mit der in Gl. (1.4.9) dargestellten Umkehrformel des Fourier-Integrals, in den Zeitbereich zurück transformiert werden.

$$v_2(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} V_2(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (1.4.9)$$

Die praktische Realisierung des Ausgleichs wird im Einzelnen unter Kapitel 3 beschrieben.

1.5 Ziele der bearbeiteten Themenstellung

Die verfolgten Ziele der Themenstellung lassen sich in zwei Aufgabenbereiche unterteilen. Der erste Aufgabenbereich umfasste die Analyse von Kopfhörer- und Außenohrübertragungsfunktionen. Dabei wurden mehrere Messungen an einem Kunstkopf und einer Versuchsperson durchgeführt. Als Messobjekte dienten Kopfhörer, die für eine spätere Anwendung bei der virtuellen Schallfeldsimulation verwendet werden sollen. Die durchgeführten Messungen und die daraus gewonnenen Ergebnisse sind unter Kapitel 2 beschrieben.

Der zweite Aufgabenbereich beinhaltete die Weiterentwicklung der Softwareumgebung *SAwIG*. *SAwIG* ist eine unter MATLAB geschriebene Software mit grafischer Benutzeroberfläche. Die Grundzüge der Software entstanden innerhalb des Projektmoduls, das vor dem Bachelormodul in Ungarn absolviert wurde. Die Abkürzung *SAwIG* steht für

Signalanalyser with Inverse Spectrumgenerator und bezeichnet im Groben die Grundfunktionen der entwickelten Software.

Die Weiterentwicklung der Software umfasste eine Erweiterung der Speicheroptionen sowie das Programmieren eines Unterprogramms, das aus der durchschnittlichen Frequenzgangfunktion softwarebasierte Digital-Filter generiert. Die Software soll die für einen späteren Ausgleich von Kopfhörer- und Außenohrübertragungsfunktionen notwendigen Filterfunktionen berechnen und diese auf die bei der virtuellen Freifeldsimulation wiederzugebende Audiosignale anwenden.

2. Das Messen von Kopfhörerübertragungsfunktionen

In diesem Kapitel wird der durchgeführte Messvorgang zum Bestimmen der Übertragungsfunktionen von Kopfhörer und Außenohr erläutert. Die Messungen fanden am Ende des dreimonatigen Auslandsaufenthalts in einem Akustiklabor in Budapest statt. Die Messungen wurden an einem Kunstkopf und einer Versuchsperson durchgeführt.

Im ersten Abschnitt 2.1 erfolgt eine allgemeine Übersicht über Faktoren, die auf die Ergebnisse der Messung Einfluss haben. In den darauf folgenden Abschnitten wird genauer auf die Messumgebung, den Messobjekten, die Messeinrichtung und das Messverfahren eingegangen. Im Abschnitt 2.8 werden die ermittelten Ergebnisse dargestellt. Im letzten Abschnitt des Kapitels geht es um Probleme, die bei der Weiterverarbeitung der aufgenommenen Daten entstehen können. Es werden dabei Lösungswege dargestellt, die diese Probleme beheben.

2.1 Einflussfaktoren beim Messen der Gewichtsfunktion von Kopfhörer und Außenohr

Beim Messen von Gewichtsfunktionen der aus Kopfhörer und Außenohr bestehenden Übertragungssysteme gibt es einige bedeutende Faktoren, die zu Differenzen in den Messergebnissen führen können. Die Unterschiede werden vor allem durch geringe Veränderungen der Kopfhörerposition, der individuellen Außenohrübertragungseigenschaften bei jedem Hörer sowie der Abweichungen zwischen den Gewichtsfunktionen gleicher Kopfhörermodelle des selben Herstellers hervorgerufen [9]. Es ist unausweichlich, dass für die Kompensation der beiden zu letzt erwähnten Faktoren individuelle Messungen durchgeführt werden müssen. Das heißt, dass eine gemessene Gewichtsfunktion nur für exakt einen Kopfhörer und der entsprechenden Person Gültigkeit besitzt. Der Faktor des Kopfhörermodells wurde bei den durchgeführten Messungen dahingehend berücksichtigt, dass nur die Kopfhörer analysiert wurden, die auch bei den weiteren Forschungsarbeiten bei der virtuellen Schallfeldsimulation verwendet werden. Die Bestimmung der individualisierten Gewichtsfunktionen wurde mit Hilfe einer Person durchgeführt, die auch in weiteren Forschungsarbeiten zu dieser Thematik als Versuchsperson zur Verfügung steht. Die Messungen hierbei wurden mit geschlossenem Ohrkanal und einem binauralen Mikrofon durchgeführt.

Bei der Kompensation des Einflusses durch die Position des Kopfhörers ist jedoch ein größerer Messaufwand nötig. Es müssen dabei mehrere Messungen an der Versuchsperson oder dem Kunstkopf durchgeführt werden, bei denen die Position des Kopfhörers vor jeder Messung neu ausgerichtet werden muss. Die Neupositionierung erfolgt dabei durch zufälliges Ab- und Aufsetzen des Kopfhörers. Damit werden verschiedene Trageszenarien der Kopfhörer simuliert. Aus den daraus gewonnenen Gewichtsfunktionen kann dann eine Auswahl der repräsentativsten Gewichtsfunktion erfolgen oder eine Berechnung der durchschnittlichen Gewichtsfunktion durchgeführt werden. Beide Verfahren erlauben jedoch nur eine Annäherung an die bei weiteren Versuchen sich tatsächlich einstellende Position des Kopfhörers. Die entwickelte Software unterstützt die Berechnung des Durchschnitts aus den einzeln gemessenen Gewichtsfunktionen, bzw. aus deren Frequenzgängen. Da sie die Messdaten einzeln einliest und die Frequenzgangfunktion in Form von Amplituden- und Phasengang anzeigt, ist auch eine Auswahl der repräsentativsten Messung möglich. Die drei folgenden Grafiken, Abbildung 2.1.1, Abbildung 2.1.2 und Abbildung 2.1.3, aus den Forschungsergebnissen von Whitman und Kistler [9] zu den Einflüssen der beschriebenen Faktoren, sollen noch einmal die auftretenden Unterschiede in den Messergebnissen verdeutlichen. Es werden dabei jeweils 5 gemessene Amplitudengänge der Frequenzgangfunktionen des linken Kanals eines Kopfhörers in einem Koordinatensystem gezeigt, die aus den einzelnen gemessenen Gewichtsfunktionen ermittelt wurden. Um die Unterschiede der einzelnen Messungen übersichtlicher darzustellen, sind die zwei oberen und zwei unteren Amplitudengänge in den Einzelbildern um jeweils ± 20 und ± 40 dB versetzt.

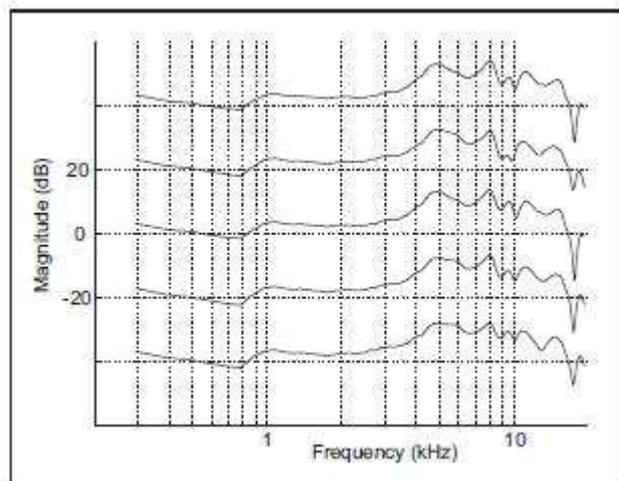


Abbildung 2.1.1: Unterschiede im Amplitudengang der ermittelten Kopfhörerfrequenzfunktion bei Neupositionierung desselben Kopfhörers an der gleichen Versuchsperson. [9]

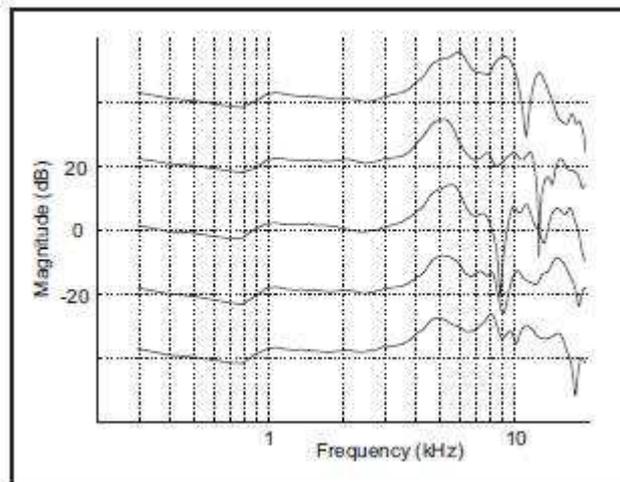


Abbildung 2.1.2: Unterschiede im Amplitudengang der ermittelten Kopfhörerfrequenzfunktion beim Messen an unterschiedlichen Versuchspersonen mit demselben Kopfhörer. [9]

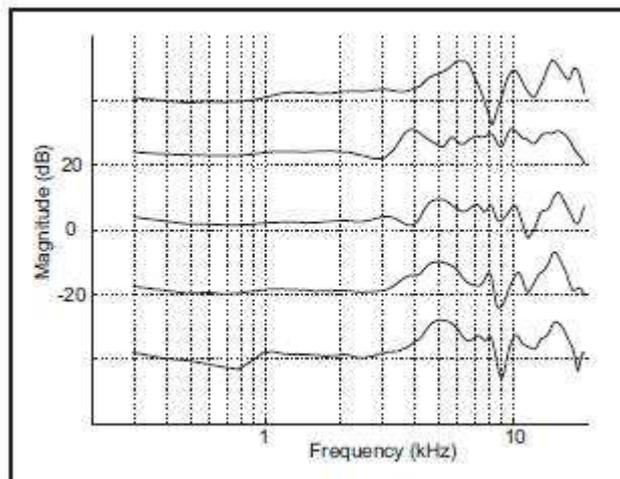


Abbildung 2.1.3: Unterschiede im Amplitudengang der ermittelten Kopfhörerfrequenzfunktion bei der Verwendung verschiedener Kopfhörer des gleichen Modells an einer Versuchsperson. [9]

In Abschnitt 2.8 werden die bei den eigenen Messungen aufgetretenen Unterschiede bei Neupositionierung dargestellt. Weiterhin erfolgt in diesem Abschnitt 2.8 eine Gegenüberstellung von den individuellen und den durch einen Kunstkopf ermittelten Frequenzgangfunktionen der Übertragungssysteme. Die Resultate der eigenen Messungen bestätigen die von Whitman und Kistler publizierten Forschungsergebnisse.

2.2 Erläuterung zur Messumgebung

In der Akustik werden Frequenzgangmessungen von Übertragungssystemen in geschlossenen reflexionsarmen Laborräumen durchgeführt. Innerhalb dieser Räume, die auch als schalltote Räume bezeichnet werden, sind die Wände, der Fußboden und die Decke so beschaffen, dass auftreffende Schallwellen an ihnen absorbiert werden und Störgeräusche von außerhalb des Raumes nicht eindringen können. Dadurch wird die für die Messung notwendige

Freifeldbedingung eingehalten. Die Reflexion des Messsignals an ebenen Oberflächen würde zu Überlagerungen mit dem eigentlich zu messenden Signal am Messmikrofon führen. Die reflektierten Signale resultieren zwar aus dem ausgesendeten Messsignal, treffen jedoch aufgrund der unterschiedlich langen Ausbreitungswege verzögert am Messmikrofon ein. Dadurch würden destruktive und konstruktive Interferenzen entstehen, die unter anderem als Nachhalleffekt in Erscheinung treten. Das am Messmikrofon aufgenommene Signal wäre somit verfälscht und würde keine repräsentative Aussage bezüglich dem Frequenzgang des Messobjekts zulassen, weil es gleichzeitig auch die Übertragungseigenschaften des Raumes beinhalten würde. In Abbildung 2.2.1 wird diese Problematik noch einmal grafisch verdeutlicht. Bild a) zeigt dabei die auftretende Reflexion und Beeinflussung des Messsignals (Direktschall) an nicht absorbierenden Oberflächen. Im Bild b) wird das Prinzip der Absorption von den nicht vollständig gerichteten Signalen an den Oberflächen eines reflexionsarmen Raums dargestellt.

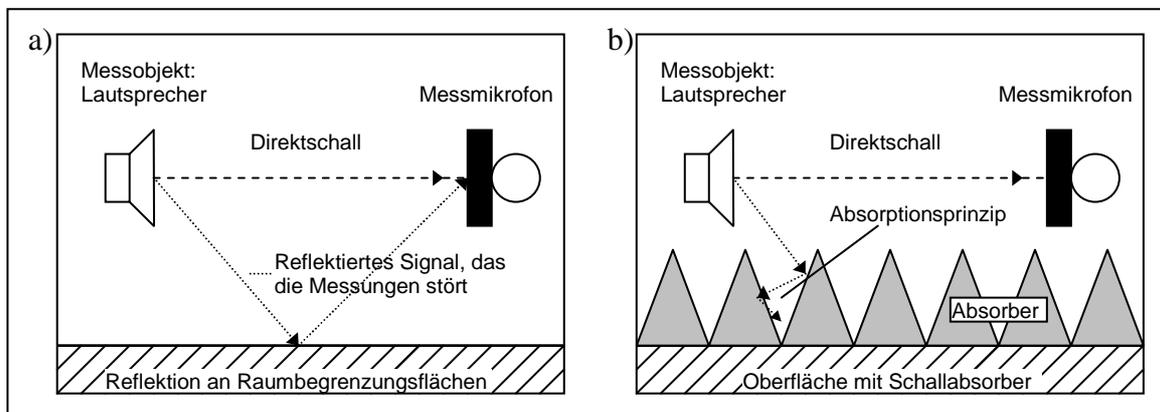


Abbildung 2.2.1:a) Einfluss der Signalreflexionen an ebenen Oberflächen auf die Messung, b) Absorptionsprinzip im schalltoten Raum

In schalltoten Räumen werden Frequenzgangfunktionen von Übertragungssystemen gemessen, bei denen ein Teil der Schallübertragung über die Luft erfolgt. Dazu zählt zum Beispiel das Bestimmen von HRTFs und Lautsprecher- oder Mikrofonfrequenzgängen.

Bei den Messungen von Kopfhörer- und Außenohrübertragungsfunktionen mit einem Kunstkopf oder binauralen Mikrofonen ist der Einfluss von Interferenzerscheinungen durch Reflexion des Messsignals in der äußeren Umgebung gar nicht oder nur gering vorhanden. Ursache hierfür ist vor allem das direkte und umschließende Anliegen der Muschelkopfhörer am Außenohr, das mit der Abbildung 2.2.2 verdeutlicht werden soll. Man spricht hierbei auch von geschlossenen Kopfhörern.

Die geringe Schalleistung P [W/m^2] bei Kopfhörern sorgt weiterhin für eine schnelle Abnahme der Schallintensität I mit größer werdendem Abstand von der Kopfhörermembran. Daher können nur Reflektionserscheinungen in der direkten Umgebung des Messobjekts auftreten. Sorgt man für einen ausreichenden Abstand von reflektierenden Oberflächen in der unmittelbaren Umgebung, kann deren Einfluss auf die Messergebnisse vernachlässigt werden.

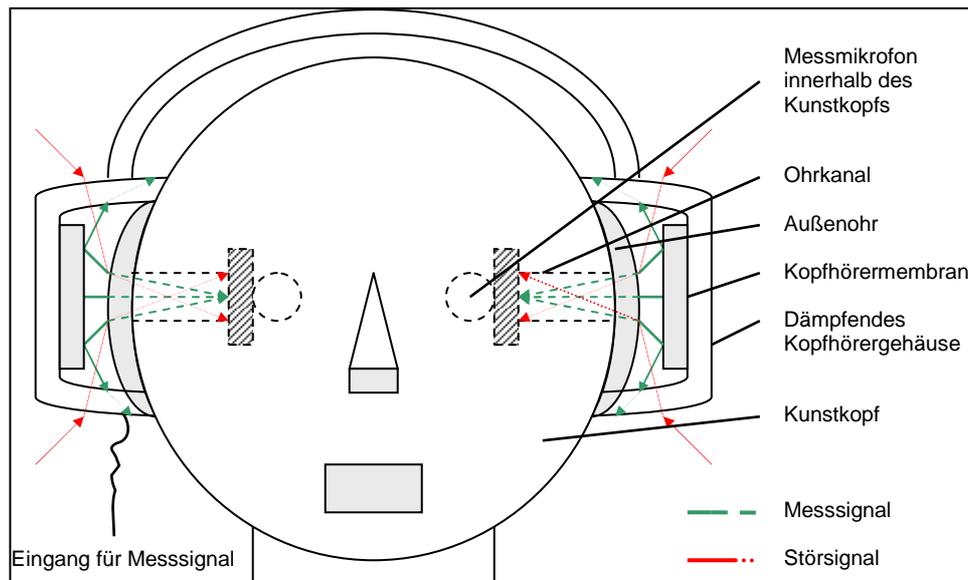


Abbildung 2.2.2: Einflüsse bei der Messung von Kopfhörergewichtsfunktion am Beispiel einer Kunstkopfmessung

Ein deutlich größerer Einfluss auf das gemessene Signal kann durch Störgeräusche in unmittelbarer Nähe zum Messobjekt hervorgerufen werden. Zwar decken die Muschelkopfhörer das Ohr vollständig ab und dämpfen somit die von außen einwirkenden Störgeräusche, jedoch ist dies nur bis zu einem gewissen Grad an Störgeräuschintensitäten gewährleistet. Verhindert man das Auftreten von äußeren Störeinflüssen und schafft ein ruhiges Messumfeld, erhält man bei der Gewichtsfunktionsmessung mit einem Kunstkopf auch außerhalb eines schalltoten Raums repräsentative Messergebnisse.

Die durchgeführten Messungen, auf die in diesem Kapitel eingegangen wird, fanden in einem Budapester Akustiklabor in einem ruhigen Messumfeld statt. Auf die Verwendung eines schalltoten Raums musste aufgrund von durchgeführten Umbaumaßnahmen verzichtet werden. Für die durchschnittlichen Messungen wurde ein Kunstkopf des Herstellers Brüel & Kjær und für die individuellen Messungen an einer Person ein binaurales Mikrofon des gleichen Herstellers verwendet.

2.3 Die analysierten Messobjekte

Als Messobjekte dienten zwei qualitativ hochwertige Muschelkopfhörer der Hersteller Sennheiser und Audio-Technica, sowie ein Ohrhörer des Herstellers Panasonic. Die beiden Muschelkopfhörer werden bei späteren Forschungsarbeiten an der virtuellen Schallfeldsimulation verwendet. Dabei soll ein voriger Ausgleich der Übertragungseigenschaften der Kopfhörer erfolgen. Die dafür nötigen Messungen und Analysen der Übertragungsfunktionen war das Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen Messdurchführungen. Die zusätzliche Analyse der Frequenzgangfunktion des Ohrhörers ist dahingehend interessant, dass bei der Wiedergabe die Übertragungsfunktion des Außenohrs fast keinen Einfluss ausübt. Das liegt daran, dass sich der Ohrhörer direkt vor dem Gehörgang befindet.

In Tabelle 2.3.1 werden die drei verwendeten Messobjekte aufgeführt und die technischen Daten der Muschelkopfhörer und des Ohrhörers gegenüber gestellt.

	 Abbildung 2.3.1: HD580 [10]	 Abbildung 2.3.2: ATH-M40 fs [11]	 Abbildung 2.3.3: RP HV 154 E-K [12]
Hersteller	Sennheiser	Audio-Technica	Panasonic
Typenbezeichnung	HD 580	ATH-M40 fs	RP HV 154 E-K
Wandlerradius [mm]	21	20	7,4
Impedanz [Ω /1kHz]	300	60	17
Empfindlichkeit [dB]	97	100	105
Frequenzgang [Hz]	12 – 38000	5 – 28000	10 – 25000
Magnet	Neodym	Neodym	Neodym

Tabelle 2.3.1: Übersicht der technischen Daten der drei analysierten Messobjekte

2.4 Bestandteile und Aufbau der Messeinrichtung

Die verwendete Messeinrichtung bzw. das Messsystem mit der Bezeichnung PULSE besteht aus drei zusammenhängenden Komponenten des dänischen Herstellers Brüel & Kjær [13], ein führenden Anbieter von Analyse- und Messsystemen im Bereich der Akustik. Das Messsystem PULSE ist modular aufgebaut und unterteilt sich in ein Softwaremodul und zwei Hardwaremodule.

Das Softwaremodul „PULSE LabShop“ ist ein Programm für den PC und beinhaltet das eigentliche Analyseprogramm, das die Hardwareeinrichtung für die jeweilige Messung vorkonfiguriert, die gemessenen Daten auswertet, diese in unterschiedlichen Darstellungsformaten grafisch präsentiert und das Speichern der analysierten Messergebnisse ermöglicht. Die verwendete Softwareversion von PULSE LabShop war Version 6.1.

Die beiden Hardwaremodule stellen das eigentliche Messsystem dar. Das eine Modul beinhaltet einen kombinierten Signalgenerator und Signalempfänger (4/2-ch. Input/Output Module - Type 3109) zum erzeugen und empfangen der Messsignale. Weiterhin bietet dieses Modul Kommunikationsschnittstellen für die Zusammenarbeit zwischen Software und Messsystem. Das zweite Modul ist der Kunstkopf (Head and Torso Simulator- Type 4128), der die Messmikrofone für die Aufnahme der jeweiligen zu messenden Signale beinhaltet. In Abbildung 2.4.1 wird unter a) der Kunstkopf mit Torso und unter b) der äußere und innere Aufbau des rechten Gehörsimulators vom Kunstkopf des Typs 4128 dargestellt. Aufgrund des modularen Aufbaus kann das Messsystems flexibel durch entsprechende Softwarekonfiguration und den jeweilig notwendigen Hardware-Baugruppen an unterschiedliche Messanforderungen angepasst werden.

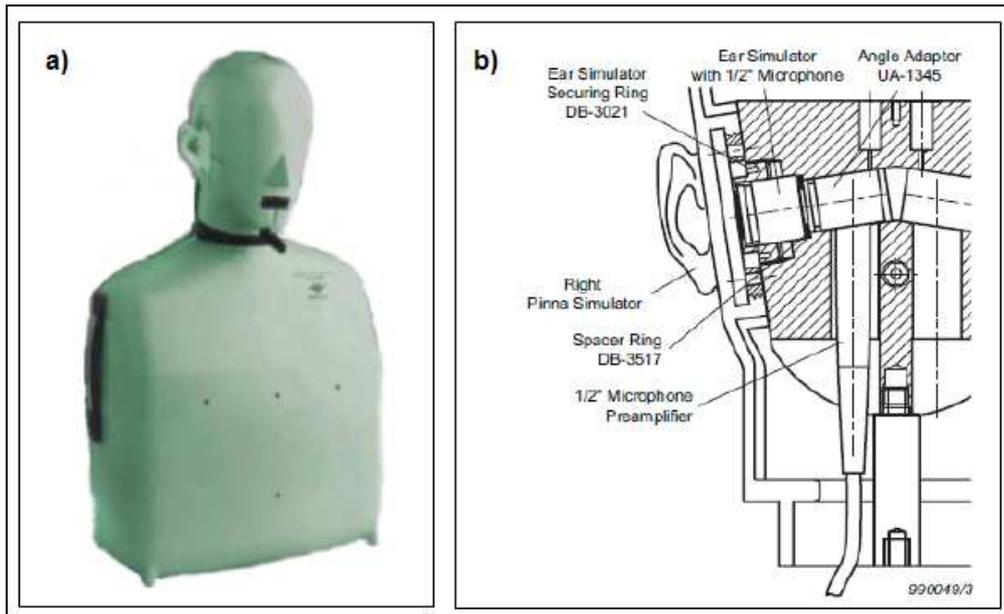


Abbildung 2.4.1: a) Kunstkopf mit Torso des Typs 4128, b) Aufbau des rechten Gehörsimulators vom Kunstkopf des Typs 4128 der Firma Brüel & Kjær [14]

Abbildung 2.4.2 zeigt den bei der Analyse der Frequenzgangfunktion des Kopfhörers und Außenohrs mit dem Kunstkopf verwendeten Aufbau der Messeinrichtung.

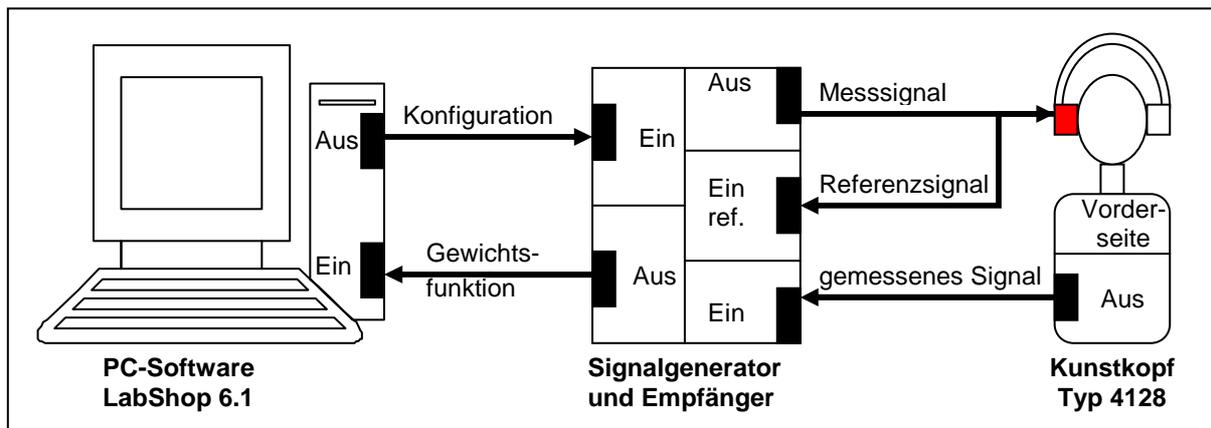


Abbildung 2.4.2: Aufbau der Messeinrichtung mit Kunstkopf (Ein = Eingang; Aus = Ausgang)

Bei den durchgeführten individuellen Messungen wurde der Kunstkopf durch ein binaurales Mikrofon mit der Typenbezeichnung 4101 von Brüel & Kjær ersetzt.

Die Vorkonfiguration des Systems und die Anpassung an die Messung von Gewichts- und Frequenzgangfunktionen wurden mit Hilfe eines Systembetreuers der Firma Brüel & Kjær vorgenommen. Dadurch wurde gewährleistet, dass die Messergebnisse mit den korrekten Messspezifikationen und Konfigurationsparametern ermittelt werden konnten. Die verwendeten Konfigurationsparameter sind unter der Datei *HAT1direct_response.pls* im Verzeichnis *headphonerresponse_measurements/labshop_configuration_file* auf der beigelegten CD gespeichert. Mit den Daten aus der Datei können die bei den Messungen verwendeten Parameter bei späteren Messungen exakt wiederhergestellt werden.

2.5 Charakteristiken des Messsignal

Das vom Generator erzeugte Messsignal ist weißes Rauschen. Es gibt verschiedene Verfahren zur künstlichen Erzeugung von weißem Rauschen, die als Golay code, Schroeder-Phase oder Maximum-Length-Sequence (MLS) bekannt sind. Alle Verfahren haben gemeinsam, dass das Rauschen aus pseudo-Zufallswerten generiert wird. Dadurch besitzt das Signal nicht wirklich zu jedem Zeitpunkt eine gleiche Energiedichte für jede Frequenz. Lediglich der Durchschnitt über eine bestimmte Signaldauer liefert eine gleichmäßige Energieverteilung über das gesamte Frequenzspektrum. Das hat zur Folge, dass eine bestimmte Messdauer nicht unterschritten werden darf. Bei der Analyse des Frequenzspektrums mit dem FFT-Algorithmus wird nämlich nur ein begrenzter Zeitabschnitt des zu analysierenden Signals betrachtet. Dieser Zeitabschnitt wird durch die gewünschte Frequenzauflösung vorgegeben und entspricht dem Reziprok der Frequenzauflösung. Die Frequenzauflösung ergibt sich nach der Gleichung (2.5.1) und gibt an, in welcher Schrittweite die einzelnen Frequenzanteile des analysierten Signals ermittelt werden.

$$\text{Frequenzauflösung}[\text{Hz} / \text{Abtastwert}] = \frac{\text{Abtastfrequenz}[\text{Hz}]}{\text{Abtastwertanzahl}} \quad (2.5.1)$$

Für die ermittelten Frequenzspektren ergibt sich eine Frequenzauflösung von 4 Hz/Abtastwert (51200Hz/12800) und eine analysierte Signaldauer von 250ms (1/(4Hz)). Diese Zeitdauer ist für eine repräsentative Ermittlung des Frequenzspektrums allerdings zu kurz. Deshalb werden das Messsignal und das aufgenommen Signal in Zeitabschnitten von 250ms unterteilt, die jeweils einer FFT unterzogen werden. Aus den einzelnen ermittelten Frequenzspektren wird dann der Durchschnitt gebildet, der sich bei zunehmende Analysedauer an das tatsächliche Frequenzspektrum annähert. In Abbildung 2.5.1 wird die Aufteilung eines Signals grafisch dargestellt, wobei die einzelnen farblich gekennzeichneten Bereiche, den mit der FFT analysierten Zeitabschnitten entsprechen.

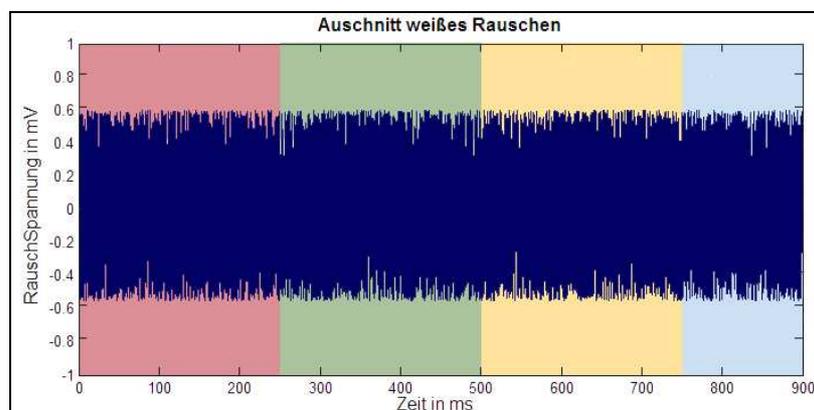


Abbildung 2.5.1: Zerlegung des Rauschsignals in zeitlichen Teilabschnitte (je 250 ms farblich getrennt) für die Bestimmung des durchschnittlichen Frequenzspektrums mit dem FFT-Algorithmus

Von der Dauer der Messung hängt nun die Genauigkeit des Frequenzspektrums ab. Bei den Durchgeführten Messungen wurde eine Messdauer von 30 Sekunden gewählt, wobei der

Durchschnitt aus 120 Frequenzspektren gebildet wird. Dies sollte als repräsentatives Ergebnis ausreichen. Während der Messung kann in Echtzeit die Ergebnisse der Durchschnittskalkulation in Form des Amplitudengangs unter LabShop verfolgt und gegebenenfalls die Messung vorzeitig beendet werden.

2.6 Bestimmung des Frequenzspektrums vom Übertragungssystem

Die Bestimmung der Übertragungseigenschaften eines Systems in der Praxis wird, wie bereits im Abschnitt 1.2 beschrieben, nicht notwendigerweise mit einem Impulssignal durchgeführt. Die Gründe hierfür wurden bereits erläutert. Bei der Frequenzgangmessung des Kopfhörers und Außenohrs wurde genauso wie bei den HRTFs ein weißes Rauschen als Messsignal verwendet. Das weiße Rauschen wird durch den Signalgenerator erzeugt und an den angeschlossenen Kopfhörer weitergegeben. Für die spätere Berechnung des Frequenzgangs mit der Analysesoftware LabShop ist es notwendig, das Messsignal gleichzeitig an einen der Eingänge des Empfängers anzukoppeln. Der Empfänger wandelt die in analoger Form vorliegenden Eingangssignale in digitale Signale um, damit sie von der Analysesoftware verarbeitet werden können. Die Mikrofone im Kunstkopf nehmen das durch den Kopfhörer wiedergegebene Messsignal auf und koppeln dieses ebenfalls in einen der Eingänge des Empfängers ein. Bei der Signalübertragung vom Generator zum Empfänger wurde das aufgenommene Signal durch die Übertragungseigenschaften des Kopfhörers, Außenohrs und Ohrkanals beeinflusst. Ziel ist es nun, aus den Unterschieden zwischen generierten und empfangenen Signal den Frequenzgang bzw. das Frequenzspektrum des Übertragungssystems für den späteren Ausgleich zu bestimmen. Dafür wird das originale Messsignal und das empfangene Signal an die Software LabShop in Echtzeit weitergegeben. Die Software transformiert nun mit dem Algorithmus der schnellen Fourier-Transformation (FFT) beide Signale aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich. Dadurch erhält man das Frequenzspektrum der Signale, woraus sich das gesuchte Frequenzspektrum und somit der Frequenzgang des Übertragungssystems ermitteln lässt. Gl. (2.6.1) zeigt, dass man das Frequenzspektrum des Übertragungssystems $G(j\omega T_A)$ nach dividieren des Frequenzspektrums des gemessenen Signals $X_a(j\omega T_A)$ durch das Spektrum des Messsignals $X_e(j\omega T_A)$ erhält.

$$G(j\omega T_A) = \frac{X_a(j\omega T_A)}{X_e(j\omega T_A)} \quad (2.6.1)$$

Aus dem resultierenden Frequenzspektrum kann dann der Frequenzgang des Übertragungssystems bestimmt werden.

2.7 Durchführung der Messungen

Die Messungen an den zwei Muschelkopfhörern und dem Ohrhörer erfolgten in einer ruhigen Messumgebung. Das Frequenzspektrum jedes Kopfhörerkanals wurde dabei separat mit dem

rechten Messmikrofon des Kunstkopfes aufgenommen. Dafür musste der Kopfhörer nach Beendigung der Messung eines Kanals, einmal um 180° in der Horizontalen gedreht werden. Die gleichzeitige Messung beider Kanäle war nicht möglich, da der Signalempfänger und die Software LabShop nur zwei Signale, das Messsignal und das aufgenommene Signal, verarbeiten konnte. Bei der individuellen Messung mit dem binauralen Messmikrofon, das in Abbildung 2.7.1 c) gezeigt wird, erfolgte die Messung ebenfalls nur kanalweise, wobei jedoch der Kopfhörer für die einzelnen Kanalmessungen nicht gedreht, sondern lediglich der Aufnahme kanal des Mikrofons geändert wurde. Dies ist nötig, da sich das linke und rechte Außenohr einer natürlichen Person unterscheiden und dementsprechend unterschiedlich auf die Übertragungseigenschaften auswirken. Die folgende Abbildung 2.7.1 zeigt im Teilbild a) und b) Fotos von der Messdurchführung und im Teilbild c) das binaurale Mikrofon des Typs 4101 vom Herstellers Brüel & Kjær.

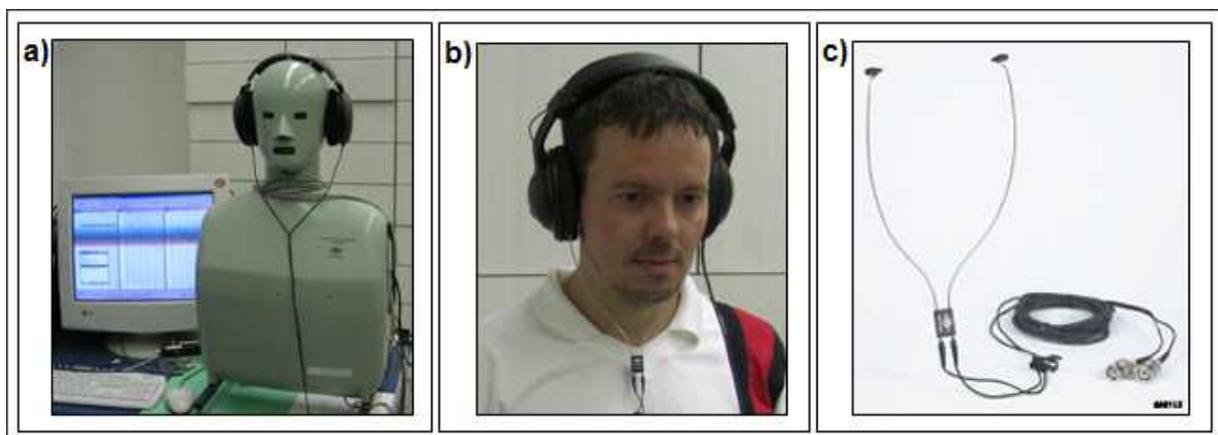


Abbildung 2.7.1: a) Messungen mit dem Kunstkopf Typ 4128, b) individuelle Messung mit dem binauralen Mikrofon, c) verwendetes binaurales Messmikrofon Typ 4101 des Herstellers Brüel & Kjær

Um eine spätere Durchschnittskalkulation aus den gemessenen Frequenzspektren für jeden Kopfhörerkanal durchführen zu können, wurden bei der Kunstkopfmessung für jeden Kanal der Muschelkopfhörer 10 und bei dem Ohrhörer 5 Frequenzspektren aufgenommen. Bei der Ermittlung der individuellen Frequenzspektren mit den Muschelkopfhörern beschränkte sich die Anzahl der durchgeführten Messungen auf drei je Kopfhörerkanal. Nach jeder Messung erfolgte eine Neupositionierung der Kopfhörer, die einem Absetzen und einem erneuten Aufsetzen entsprach. Nach jeder Messung wurde das ermittelte Frequenzspektrum mit LabShop als Text-Datei abgespeichert. Die Dateien der Kopfhörmessungen sind auf der beigelegten CD im Verzeichnis *Headphoneresponse_measurements/measurement_results* gespeichert. Die verwendeten Dateinamen haben folgende Struktur:

Dateinamen für die Kunstkopf-Messungen:

FRrightear_right_headphone_at1.txt

- ... verwendetes Messmikrofon des Kunstkopfs (hier rechts)
- ... gemessener Kanal des Kopfhörers (right oder left)
- ... Kopfhörertyp (at = Audio-Technica, sh = Sennheiser, ps = Panasonic)
- ... Laufindex für die einzelnen Messungen

Dateinamen für die individuellen Messungen:

FRleftear_ind_left_headphone_at1.txt

- ... verwendeter Aufnahmekanal des binauralen Mikrofons (FRleftear/ FRrightear)
- ... Kennzeichnung für die individuelle Messung

Im Gegensatz zur Kunstkopfmessung werden bei individuellen Messungen die Übertragungseigenschaften des Ohrkanals nicht mit aufgenommen. Dies liegt an der Position des binauralen Messmikrofons, das sich nicht am Trommelfell sondern am Gehöreingang befindet. Das erfordert eine Berücksichtigung beim späteren Vergleich der Messergebnisse. Theoretisch sind die Messungen ohne den Übertragungseigenschaften des Gehörgangs den der Kunstkopfmessungen mit Gehörgang vorzuziehen. Beim Ausgleich der Übertragungseigenschaften müssen nämlich die Übertragungseigenschaften des Gehörgangs nicht berücksichtigt werden, da sie keinen Einfluss auf die Qualität der virtuellen Schallfeldsimulation ausüben.

2.8 Ergebnisse der Messungen

Nach Abschluss der Messungen lagen das Frequenzspektrum für jeden Kopfhörer in Form von komplexen Werten vor. Es wurde jede Messung nach der Neupositionierung des Kopfhörers getrennt nach linken und rechten Audiokanal des Kopfhörers in separaten Dateien gespeichert. Für die Muschelkopfhörer entspricht das 10 Messdateien für jeden Audiokanal bei der Messung mit dem Kunstkopf, sowie 3 Messdateien für jeden Audiokanal bei der individuellen Messung mit dem binauralen Mikrophon. Für den Ohrhörer existieren je Audiokanal 5 Messdateien für die Messung mit dem Kunstkopf. Individuelle Messungen wurden mit dem Ohrhörer nicht durchgeführt.

Die Speicherung der analysierten Frequenzgangfunktionen erfolgte im PULSE-ASCII-Dateiformat, bei dem die Frequenzgangfunktionen als Frequenzspektren gespeichert werden. Aus diesen Werten kann der Amplituden- und Phasengang der Frequenzgangfunktion berechnet und dargestellt werden. Das Dateiformat wurde aufgrund der einfacheren Weiterverarbeitung mittels MATLAB ausgewählt. In Anlage 1 wird ein Auszug aus dem Inhalt einer solchen Datei dargestellt. Die für die weitere Verarbeitung mit der entwickelten Software *SAwIG* notwendigen Messparameter und Messwerte innerhalb der Dateistruktur sind dabei farblich hervorgehoben. Dazu zählen die Anzahl der Abtastwerte, die Centerfrequenz, die ein viertel der Abtastfrequenz entspricht und die komplexen Werte des Frequenzspektrums.

Die Analysesoftware LabShop ermöglichte nach jeder Messung die Anzeige des Amplituden- und Phasengangs der Frequenzgangfunktionen. Einige Darstellungen wurden als Bild gespeichert, um diese mit den unter der entwickelten Software *SAwIG* angezeigten Amplitudengängen zu vergleichen. Durch den Vergleich zwischen den dargestellten Amplitudengängen von LabShop und den von *SAwIG* angezeigten Amplitudengängen, konnte ein erfolgreiches Einlesen der Messdaten überprüft werden.

In der folgenden Abbildung 2.8.1 werden 4 Amplitudengänge der gemessenen Frequenzgangfunktionen vom linken Audiokanal des Kopfhörers Sennheiser HD580 dargestellt, die jeweils nach einer Neupositionierung des Kopfhörers aufgenommen wurden. Die einzelnen Amplitudengänge sind in den Farben Rot, Blau, Schwarz und Grün abgebildet.

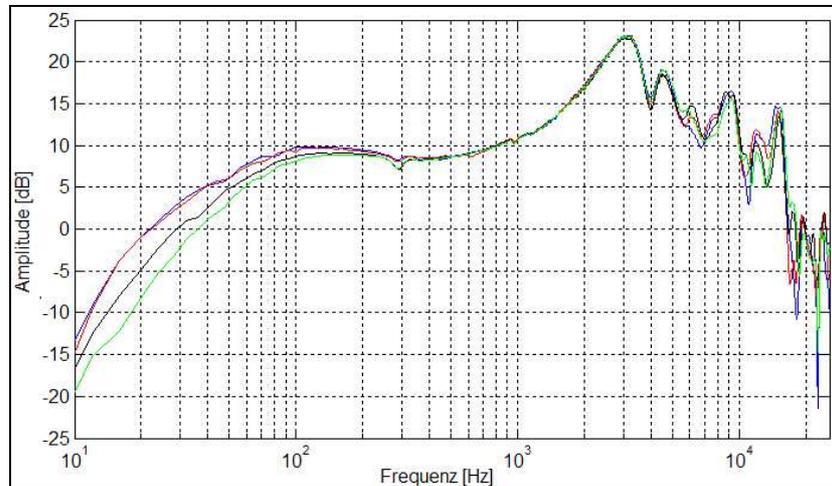


Abbildung 2.8.1: Amplitudengänge von 4 analysierten Frequenzspektren vom linken Audiokanal des Sennheiser HD580 nach jeweils Neupositionierung der Kopfhörers

Die ermittelten Messergebnisse bei der Neupositionierung des Kopfhörers bestätigen die Forschungsergebnissen von Whitman und Kistler [9]. In der Abbildung 2.8.1 kann man deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Amplitudengängen im Bereich zwischen 20 und 100 Hz und zwischen 5000 und 25000 Hz erkennen. Die entwickelte Software *SAwIG* bildet aus allen gemessenen und eingelesenen Frequenzspektren einen Mittelwert und benötigt deshalb eine gewisse Anzahl an Messdaten, um einen repräsentativen Durchschnitt bilden zu können.

Die zu erwartenden Unterschiede der Frequenzgangfunktionen zwischen den Messungen mit dem Kunstkopf und den individuellen Messungen mit dem binauralen Mikrofon werden in den unter Abbildung 2.8.2 dargestellten Amplitudengängen deutlich.

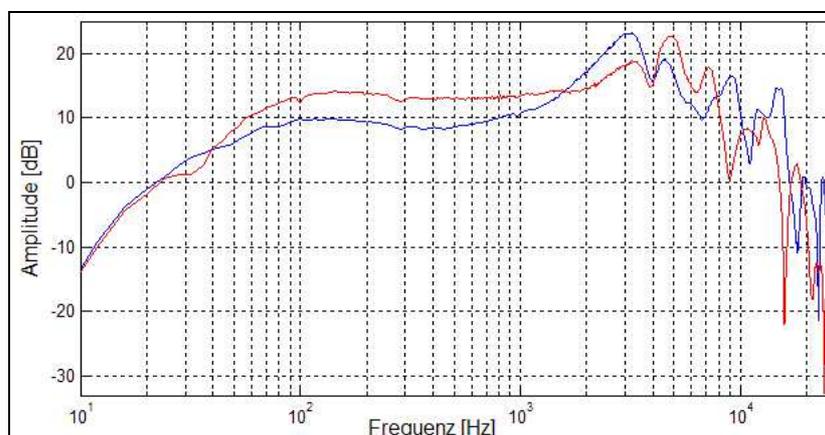


Abbildung 2.8.2: Vergleich zwischen den Amplitudengänge bei der Messung mit dem Kunstkopf (blau) und der individuellen Messung mit dem binauralen Mikrofon (rot). (linker Audiokanal des Kopfhörers Sennheiser HD 580)

Die starke Abweichung der Amplitudengänge in Abbildung 2.8.2 haben zwei grundlegende Ursachen. Eine Ursache ist der natürliche Unterschied in der Form des Außenohrs. Jedes Außenohr ist individuell geformt und hat dadurch seine ganz spezifischen Übertragungseigenschaften. Bei den Messungen mit dem Kunstkopf ist die Form des Außenohrs stets gleich. Das Außenohr ist dabei so geformt, dass es lediglich einen Durchschnitt der natürlich auftretenden Außenohrformen repräsentiert. Aus diesem Grund müssen Differenzen zwischen den Messergebnissen von individuellen und künstlichen Messungen auftreten.

Die zweite Ursache liegt im Messverfahren an sich. Wird bei den Messungen mit dem Kunstkopf die Übertragungseigenschaften des simulierten Ohrkanals mit einbezogen, entfällt deren Übertragungseigenschaft beim Messen mit dem binauralen Mikrofon, da dieses direkt am Ohrkanaleingang positioniert ist. Es handelt sich somit um Messergebnisse von zwei unterschiedlichen Übertragungssystemen. Aus den beiden Amplitudengängen kann deshalb kein wirklicher Vergleich zwischen individuellen und mit dem Kunstkopf durchgeführten Messungen hergestellt werden. Für einen Vergleich zwischen einer Kunstkopf- und Individual-Messung müssten die Messreihen am Kunstkopf ebenfalls mit einem binauralen Mikrofon ermittelt werden. Der Vergleich der Messergebnisse zeigt allerdings, dass geringe Änderungen im Versuchsaufbau erhebliche Auswirkungen auf die ermittelten Messergebnisse haben können.

2.9 Probleme bei der Weiterverarbeitung der Messergebnisse und deren Lösung

Bereits während der Messdurchführung wurden bei der Konfiguration der Messparameter zwei grundlegende Probleme für die spätere Weiterverarbeitung zum Ausgleich festgestellt. Zum einen war es die begrenzte Auswahl der Abtastwertanzahl und zum anderen die wählbaren Abtastfrequenzen. Die Mess- und Analyseinstrumente von Brüel & Kjær benutzen herstellerspezifische Parameter für die Datenermittlung, die jedoch nicht an die eigentlich gewünschten und für die weitere Verarbeitung günstigen Parameter angepasst werden konnten. Anstatt der bevorzugten Abtastfrequenz von 44,1 kHz und einer Anzahl von 4096 Abtastwerten musste die Messung und Signalanalyse mit einer Abtastfrequenz von 51,2 kHz und einer Anzahl von 12800 Abtastwerten durchgeführt werden. Da allerdings die bei der virtuellen Schallfeldsimulation zu verwendenden HRTFs und Audiosignale eine Abtastfrequenz von 44,1 kHz und eine Anzahl von 4096 Abtastwerten besitzen, ist die direkte Verwendung der analysierten Werte für die Ausgleichskalkulation nicht möglich. Aufgrund der unterschiedlichen Parameter haben die HRTFs und Kopfhörer- und Außenohrübertragungsfunktion zwei unterschiedliche Frequenzauflösungen, wodurch sie nicht miteinander verrechnet werden können. Die mit dem PULSE-Messsystem ermittelten Frequenzspektren haben eine Frequenzauflösung von 4Hz/Abtastwert ($51200\text{Hz} / 12800$ Abtastwerte). Die HRTFs, sowie die bei der virtuellen Schallfeldsimulation verwendeten Audiosignale haben eine Frequenzauflösung von ca. 10,7666 Hz/Abtastwert ($44100\text{Hz} / 4096$ Abtastwerte). Es existieren somit zwei unterschiedliche Bezugssysteme für die Übertragungsfunktionen. Ein weiteres Problem ist die größte analysierbare Frequenz im

gemessen Signal. Diese entspricht genau der Hälfte der Abtastfrequenz und wird als Nyquistfrequenz bezeichnet. Hieraus ergibt sich, dass die gemessenen Frequenzgangfunktionen einen größeren Frequenzbereich beschreiben (0-25,6 kHz), als die der HRTFs (0 – 22,05kHz).

Für die Lösung dieser Probleme gibt es einige Möglichkeiten, von denen im Folgenden zwei näher erläutert und deren Vor- und Nachteile dargestellt werden. Es handelt sich bei den betrachteten Lösungsansätzen zum einen um die Verarbeitung der Signale im Zeitbereich und zum anderen um das Ersetzen der Frequenzgangfunktion durch einen digitalen Filter.

- **Verarbeitung der Signale im Zeitbereich**

Der Vorteil bei der Bearbeitung im Zeitbereich ist der, dass das Problem mit der unterschiedlichen Anzahl an Abtastwerte eine geringere Rolle spielt. Lediglich die unterschiedlichen Abtastfrequenzen sind hier noch von Bedeutung. Im Zeitbereich gibt es aber einfach zu implementierende Verfahren, bei denen die Abtastfrequenz von Signalen durch Interpolation und Approximation an eine gewünschte Abtastfrequenz angepasst werden kann. (siehe Zölzer [15]).

Für die Verarbeitung im Zeitbereich müssen die im Frequenzbereich vorliegenden Frequenzspektren $X(j\omega T_A)$ der gemessenen Kopfhörer- und Außenohr-Übertragungsfunktionen in den Zeitbereich transformiert und an die Abtastfrequenz des bei der virtuellen Schallfeldsimulation wiederzugebenden Signals angepasst werden. Das durch die Transformation in den Zeitbereich erhaltene Signal entspricht der Gewichtsfunktion des Übertragungssystems Kopfhörer und Außenohr. Die Transformation erfolgt mit der in Gl. (2.9.1) dargestellten inversen Fouriertransformation für Abtastsignale, wobei T_A der Abtastperiode (1/Abtastfrequenz) entspricht.

$$\{x(kT_A)\} = \frac{T_A}{2\pi} \int_{-\pi/T_A}^{\pi/T_A} X(j\omega T_A) \cdot e^{jk\omega T_A} d\omega \quad (2.9.1)$$

Da es sich bei der hier erwähnten Signalverarbeitung stets um eine digitale Signalverarbeitung handelt, erhält man nach der Rücktransformation das zeit- und wertediskrete Signal $x(kT_A)$. Zeitdiskret bedeutet, dass nur zu den Zeitpunkten, die ein Vielfaches der Abtastperiode entsprechen, Werte für das Signal existieren. Im Gegensatz hierzu kann bei einem zeitkontinuierlichen Signal für jeden Zeitpunkt auch ein entsprechender Wert zugeordnet werden. Wertdiskret bedeutet, dass für die einzelnen Signalwerte nur eine begrenzte Anzahl an Wertigkeiten zur Verfügung steht.

Wird die Filterung des wiederzugebenden Signals im Frequenzbereich durch Multiplikation mit der jeweiligen Übertragungsfunktion durchgeführt, so entspricht diese Filterung im Zeitbereich der Faltung. Die Faltung zweier diskreter Signale ist eine mathematische Operation und wird durch das Symbol „*“ gekennzeichnet. Wird das diskrete Eingangssignal $x_e(kT_A)$ eines Systems mit dessen Gewichtsfunktion $g(kT_A)$ gefaltet, erhält man als Ergebnis das am Ausgang des System zu erwartende Signal $x_a(kT_A)$. Die entsprechende

mathematische Rechenvorschrift für die Faltung zeitdiskreter Signale wird in Gl. (2.9.2) angegeben.

$$x_a(kT_A) = x_e(kT_A) * g(kT_A) = \sum_{i=0}^k x_e[(k-i)T_A] \cdot g(iT_A) \quad (2.9.2)$$

Anhand der Gl. (2.9.2) kann man erkennen, dass das Eingangssignal und die Gewichtsfunktion dieselbe Anzahl von k-Werten aufweisen müssen. Meist ist das Eingangssignal allerdings länger als die Gewichtsfunktion, wodurch es in mehrere Abschnitte mit der Länge der Gewichtsfunktion unterteilt und diese Abschnitte stückweise gefaltet werden müssen.

Der Grund, warum dieser Verarbeitungsweg über die Faltung nicht weiter verfolgt wurde, liegt in der Interpolation und Approximation der Werte bei der Änderung der Abtastfrequenz. Hierbei entstehen Verluste bei der Anpassung der Zeitsignale, wodurch es zu nicht kalkulierbaren Signalverfälschungen kommen kann. Da der Ausgleich möglichst exakt erfolgen sollte, sind solche Signalverfälschungen nicht ohne weiteres tolerierbar.

- ***Ersetzen der Frequenzgangfunktionen durch digitale Filter***

Bei diesem Lösungsansatz genügt es, nur die aus den Messungen ermittelten Frequenzgänge zu betrachten. Ziel ist es hierbei, die Eigenschaften der Frequenzgänge mit Hilfe von digitalen Filtern zu simulieren. Dieser Lösungsansatz hat sich als sehr effektiv herausgestellt und wurde bei der Entwicklung der Software als Programmfunktion implementiert. Was Filter auszeichnet und welche Eigenschaften und Arten es gibt, sollen deshalb hier nicht näher erläutert werden, da sich das Kapitel 3 umfassend damit auseinandersetzt. In diesem Abschnitt soll nur eine kurze Erläuterung erfolgen, um die Idee hinter diesem Lösungsansatz zu verdeutlichen.

Ein Filter besitzt wie jedes Übertragungssystem einen spezifischen Frequenzgang und somit charakteristische Übertragungseigenschaften. Beim Entwurf eines Filters können diese Übertragungseigenschaften durch wählbare Parameter beliebig angepasst werden. Dadurch ist es zum Beispiel möglich, den Filter so zu gestalten, dass dessen Übertragungseigenschaften denen des Kopfhörers und Außenohrs entsprechen. Die dafür notwendigen Filtereigenschaften werden aus den gemessenen Frequenzgängen berechnet.

Der Vorteil der Filter besteht darin, dass sie unabhängig von Abtastfrequenzen und Abtastwerten auf jedes Signal angewendet werden können. Dadurch können die erwähnten Schwierigkeiten aufgrund des Messdatenformats beim Ausgleich der Übertragungseigenschaften umgangen werden.

Als Nachteile der Filter sind zum einen der zusätzliche Rechenaufwand beim Filterentwurf und zum anderen die begrenzte Annäherung des Frequenzgangs der Filter an den gewünschten Verlauf zu nennen. Diese Nachteile haben jedoch keine so große Gewichtung. Der zusätzliche Rechenaufwand entsteht nämlich nur einmal, und zwar nur dann, wenn der Filter entworfen wird. Die Annäherung an den gewünschten Verlauf des Frequenzgangs kann

wiederum mit den zur Verfügung stehenden Entwurfverfahren recht genau mit tolerierbaren Abweichungen durchgeführt werden.

Aufgrund der überwiegend vorteilhaften Eigenschaften der Filterentwurfsmethode hat sich dieses Verfahren als eine äußerst effektive Variante für den Ausgleich von Übertragungseigenschaften herausgestellt. Ein entscheidender Faktor hierfür waren auch die vielseitigen Entwicklungsmethoden für softwarebasierte digitale Filter, die von MATLAB als Programmfunktionen bereitgestellt werden. Dadurch war eine direkte Implementierung in die entwickelte Software möglich.

3. Verarbeitung der eingelesenen Messdaten

In diesem Kapitel werden die im Programm implementierten Berechnungen für den späteren Ausgleich der Übertragungseigenschaften der Kopfhörer und Außenohren dargestellt. Es wird dabei auf die Berechnung des durchschnittlichen Frequenzspektrums, die Invertierung dieses Frequenzspektrums und den daran optional anschließenden Filterentwurf eingegangen.

3.1 Berechnung des durchschnittlichen Frequenzspektrums

Verallgemeinert kann man sagen, dass die Durchschnittskalkulation in Form einer einfachen arithmetischen Mittelwertbildung realisiert wird. Dabei wird aus den jeweils gleichen Frequenzspektralanteilen der eingelesenen und berechneten Frequenzspektren ein Mittelwert gebildet. Die Aktualisierung des Durchschnitts erfolgt dabei nach jedem Einlesen eines Eingangssignals. Da jedoch die einzelnen Frequenzanteile der Spektren als komplexe Zahl vorliegen, sind einige Besonderheiten bei der Mittelwertbildung zu beachten. Aufgrund dieser Besonderheiten muss bei der Durchschnittskalkulation eine getrennte Betrachtung der Beträge und Phasen der komplexen Werte erfolgen. Nach der Durchschnittsberechnung von Betrag und Phase werden die Ergebnisse wieder zu einem komplexen Wert zusammengeführt. Im Folgenden werden die getrennten Berechnungen der Durchschnittswerte für die Beträge und Phasen anhand von Gleichungen und Beispielrechnungen näher erläutert.

- ***Berechnung des Durchschnitts der Beträge***

Die Berechnung der durchschnittlichen Beträge wird durch arithmetische Mittelwertbildung aus den Teilbeträgen der einzelnen Frequenzspektren durchgeführt. Dafür muss zuerst aus den komplexen Werten Gl. (3.1.1) jeweils der Betrag Gl. (3.1.2) aus dem Realteil (Re) und dem Imaginärteil (Im) gebildet werden.

$$C(f) = \text{Re}(C(f)) + \text{Im}(C(f)) \cdot i \quad (3.1.1)$$

$$|C(f)| = \sqrt{[\operatorname{Re}(C(f))]^2 + [\operatorname{Im}(C(f))]^2} \quad (3.1.2)$$

Die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts für jeden Frequenzanteil f_a im Spektrum erfolgt nach Gl. (3.1.3).

$$\overline{C(f_a)_{arithm}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n C(f_a)_i = \frac{|C(f_a)_1| + |C(f_a)_2| + \dots + |C(f_a)_n|}{n} \quad (3.1.3)$$

Die folgenden Beispielrechnungen mit den beiden komplexen Werten $C_1=2+1i$ und $C_2=-1+1i$ sollen zeigen, dass die Berechnung des Mittelwerts direkt aus den komplexen Werten zu falschen Durchschnittswerten für die Beträge führt.

$$\text{Durchschnitt direkt aus den Beträgen:} \quad \overline{C_{arithm}} = \frac{\sqrt{5} + \sqrt{2}}{2} \approx 1,82514 \quad (3.1.4)$$

$$\text{Durchschnitt aus den komplexen Werten:} \quad \overline{C_{arithm-k}} = \frac{1+2i}{2} = 0,5+1i \quad (3.1.5)$$

$$\text{Betrag des komplexen Durchschnitts:} \quad \overline{C_{arithm-k}} = \sqrt{0,25+1} \approx 1,11803 \quad (3.1.6)$$

Der Vergleich der beiden Beträge aus Gl.(3.1.4) und Gl.(3.1.6) zeigt, dass es bei der direkten Berechnung aus den komplexen Werten zu Abweichungen kommt. Da jedoch die Amplitudengänge von Frequenzspektren aus den Beträgen ermittelt werden, ist die korrekte Berechnungsvorschrift die in Gl.(3.1.3) dargestellte.

- **Ermittlung des Durchschnitts der Phasen**

Die Ermittlung des Durchschnitts der Phasen erfolgt auf fast identischer Weise wie bei den Amplitudenwerten. Auch hier wird der arithmetische Mittelwert aus den Phasenwerten mehrere Frequenzspektren berechnet. Dazu werden die Werte des Phasengangs mit dem Befehl *angle(komplexer wert)* aus dem Frequenzspektrum bestimmt. Die entwickelte Software unterstützt nur die Darstellung des durchschnittlichen Phasengangs. Mit der in MATLAB zur Verfügung stehenden Funktion *unwrap(phase)* wird eine Darstellung des Phasengangs erzeugt, bei der Sprünge um π im Verlauf unterdrückt werden. Dadurch entsteht ein kontinuierlicher Phasenverlauf. In Abbildung 3.1.1 werden die bei 7 Messungen ermittelten Phasengänge eines Kopfhörers (blau) und dem daraus gebildeten durchschnittlichen Phasengang (rot) dargestellt.

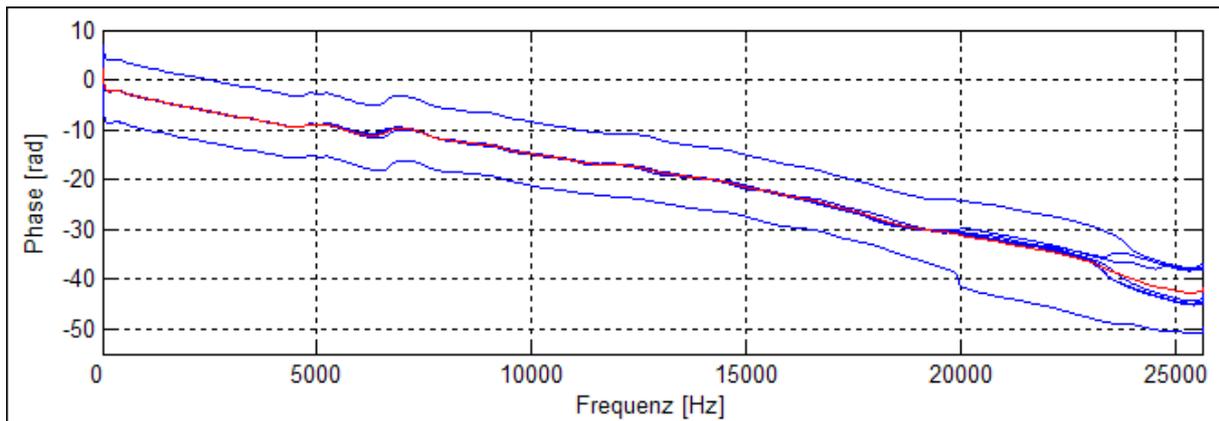


Abbildung 3.1.1: Phasegänge von 7 gemessenen Frequenzspektren (blau) des gleichen Kopfhörers ATH-M40 fs (linker Kanal) und der daraus berechnete durchschnittliche Phasengang (rot)

3.2 Invertierung des Frequenzspektrums

Die Invertierung des Frequenzspektrums bezieht sich auf die Ergebnisse der Durchschnittskalkulation. Sie ist die Grundlage für einen späteren Ausgleich von Übertragungseigenschaften, bei dem das Frequenzspektrum eines Audiosignals vor der Wiedergabe mit dem invertierten Frequenzspektrum des auszugleichenden Übertragungssystem multipliziert wird. Die Multiplikation entspricht einer Vorverzerrung des wiederzugebenden Signals, die von den Übertragungseigenschaften des Übertragungssystems idealerweise wieder ausgeglichen wird. Das invertierte Frequenzspektrum kann auch als Vorgabe für den Filterentwurf dienen, um daraus einen Ausgleichsfilter zu entwickeln.

Die Invertierung der Frequenzspektren wird bei *SAwIG* durch das bilden des Reziprok der komplexen Werte der einzelnen Frequenzanteile des Frequenzspektrums gebildet. Sie erfolgt also wie alle Berechnungen im Frequenzbereich. Möglich ist die Teilinvertierung der einzelnen Frequenzanteile deshalb, weil die einzelnen Frequenzanteile des Spektrums getrennt als Übertragungseigenschaften von mehreren Übertragungssystemen $G_{fn}(j\omega T_A)$ betrachtet werden können. Eine Verbindung der einzelnen Übertragungssysteme zu einer Übertragungskette (Reihenschaltung) führt dann zur selben Systemreaktion. Aus systemtheoretischer Sicht entspricht die Verbindung der Übertragungssysteme einer Multiplikation der Übertragungsfunktionen, die durch die Frequenzspektren repräsentiert werden. Abbildung 3.2.1 soll diesen Zusammenhang noch einmal grafisch erläutern.

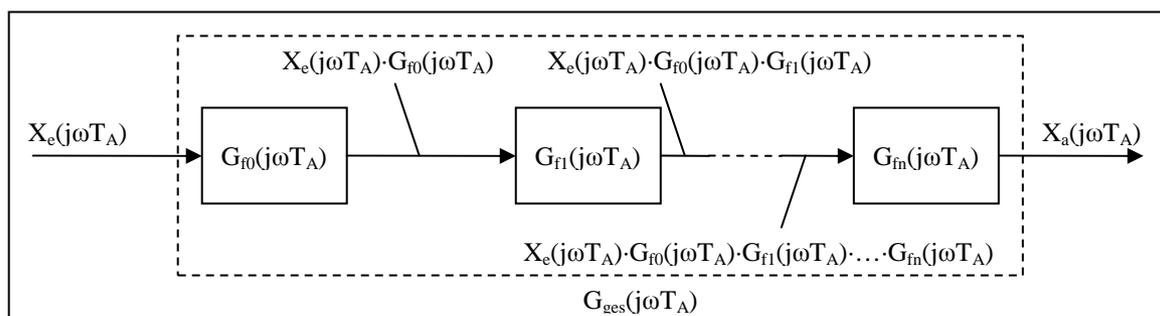


Abbildung 3.2.1: Zerlegung des gesamten Übertragungssystem G_{ges} in Teilübertragungssysteme G_{fn}

Gl.(3.2.1) stellt die aus der Abbildung 3.2.1 hervorgehende Gleichung für das gesamte Übertragungssystem dar.

$$G_{ges}(j\omega T_A) = \frac{X_a(j\omega T_A)}{X_e(j\omega T_A)} = G_{f0}(j\omega T_A) \cdot G_{f1}(j\omega T_A) \cdot \dots \cdot G_{fn}(j\omega T_A) \quad (3.2.1)$$

Nach der Invertierung ergibt sich somit für das Übertragungssystem die Gl.(3.2.2).

$$G_{ges-inverse}(j\omega T_A) = \frac{X_e(j\omega T_A)}{X_a(j\omega T_A)} = \frac{1}{G_{f0}(j\omega T_A)} \cdot \frac{1}{G_{f1}(j\omega T_A)} \cdot \dots \cdot \frac{1}{G_{fn}(j\omega T_A)} \quad (3.2.2)$$

Aus Gl.(3.2.2) geht hervor, dass die Invertierung des Frequenzspektrums durch die Reziprokbildung der einzelnen Frequenzanteile im Spektrum erfolgen kann.

Es müssen jedoch einige Problematiken bei der Invertierung beachtet werden. Dies betrifft vor allem den Gleichanteil der Frequenzspektren. Die durchgeführten Messungen ergaben, dass die Gleichanteile in den Frequenzspektren der Kopfhörer- und Außenohrübertragungsfunktionen einen sehr geringen Energieanteil besitzen. Die Invertierung der Gleichanteile führt in folge dessen zu Werten mit sehr hoher Energieanteilen. Dadurch kann es beim Ausgleich von Übertragungseigenschaften zu einer extremen Verstärkung des Signals kommen, die eine Beschädigung des Kopfhörers und des Gehörorgans verursacht. Zur Vermeidung dieses Problems wird der Gleichanteil der invertierten Frequenzspektren ab einer gewissen Grenze (zurzeit ab dem Wert 2) durch die entwickelte Software auf den Wert 1 gesetzt. Dadurch findet natürlich kein Ausgleich des Gleichanteils statt, allerdings wird dadurch auch eine extreme Verstärkung vermieden. Die durchgeführten Messungen haben jedoch gezeigt, dass die Gleichanteile stets sehr gering sind und deren Ausgleich somit nicht unbedingt notwendig ist. Sollen jedoch andere Daten mit der Software verarbeitet werden, ist eine eventuelle Anpassung der Grenze im Programmquellcode vorzunehmen. Die für die Anpassung des Gleichanteils verwendete Funktion im Programmcode heißt *adjust_inverse_dc_value*.

Ähnliche Probleme mit niedrigen Energieanteilen treten auch in den Frequenzbereichen auf, die von den Kopfhörern aufgrund deren physikalischen Eigenschaftenn nicht wiedergegeben werden können, aber bei den Messungen mit analysiert werden. Um auch hier eine zu große Verstärkung durch die Invertierung zu vermeiden, sollten die Signale vor der Wiedergabe entsprechend der Frequenzcharakteristik der Kopfhörer durch einen Bandpassfilter in ihren Frequenzbereich begrenzt werden. Diese Option bietet die entwickelte Software noch nicht und muss dementsprechend separat durchgeführt oder bei weiterführenden Arbeiten in die Software implementiert werden.

3.3 Entwurf von digitalen Filtern auf Grundlage von Frequenzspektren

Aus den in Abschnitt 2.9 erläuterten Problematiken bei der Weiterverarbeitung der Messergebnisse hat sich der Lösungsansatz ergeben, die Übertragungseigenschaften ausgleichender Systeme durch digitale Filter nachzubilden. In diesem Abschnitt 3.3 wird deshalb zum einen ein allgemeiner Überblick zu den Eigenschaften von Filtern gegeben und zum anderen die Umsetzung der Filterentwurfsoption in der entwickelten Software näher erläutert. Dabei werden die von MATLAB bereitgestellten Funktionen und Werkzeuge für den Entwurf von Filtern vorgestellt, sowie die drei in der Software zur Verfügung stehenden Entwurfsmethoden näher erläutert und deren typische Charakteristiken aufgezeigt.

- *Allgemeines zu Filter*

Der Begriff filtern umschreibt im Allgemeinen ein Prozess, bei dem die Eigenschaften eines vorliegenden Stoffs gezielt verändert, bzw. selektiert werden. Der Stoff kann dabei materiell (z.B. Wasser) als auch immateriell (z.B. Informationen) sein. Die gezielte Beeinflussung der Stoffeigenschaften wird zusammengefasst in einem Filter definiert, der einen Ein- und Ausgang besitzt. Wird der Stoff durch den Filter geleitet, werden bestimmte Anteile des Stoffes zurückgehalten oder verändert. Filter kommen in vielen Bereichen des täglichen Lebens vor, wie zum Beispiel der Kaffeefilter, der das Kaffeepulver zurückhält, oder der Inhalts-Filter von Web-Browsern, der bestimmte Inhalte aus den Gesamtinformationen des Internets ausselektiert.

Aus systemtheoretischer Sichtweise, in der die Filterbetrachtung in dieser Bachelorarbeit erfolgt, werden Filter in analoge und digitale Filter unterschieden. Dabei wird ein Filter stets als ein eigenständiges System angesehen. Analoge Filter sind frequenzabhängige Systeme, die bestimmte Frequenzbereiche von Eingangssignalen passieren lassen und andere Frequenzbereiche sperren. Digitale Filter hingegen bezeichnen einen auf einem digitalen System implementierten Algorithmus mit beliebig programmierbaren Eigenschaften. Das heißt, dass digitale Filter analoge Filter nachbilden können und eine Vielzahl von Filtereigenschaften ermöglichen, die mit analogen Filtern nicht realisierbar sind (z.B. Filterung von Informationen). Die Erläuterungen in diesem Abschnitt beziehen sich stets auf digitale Filter, da die Umsetzung der Filterentwurfsmethoden softwarebasiert auf einem digitalen System erfolgte.

Wie bei jedem digitalen System werden auch die Eigenschaften eines digitalen Filters durch dessen Übertragungsfunktion bestimmt. Diese setzt sich aus einem Zähler- und Nennerpolynom mit den filterspezifischen Koeffizienten zusammen. Sind die Koeffizienten bekannt, ist der Filter vollständig definierbar. Gl.(3.3.1) zeigt die allgemeine Darstellung der Filterübertragungsfunktion im z-Bereich, wobei $b(n)$ und $a(n)$ die Filterkoeffizienten repräsentieren.

$$G_{\text{filter}}(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b(1) + b(2) \cdot z^{-1} + b(3) \cdot z^{-2} + \dots + b(n) \cdot z^{n-1}}{a(1) + a(2) \cdot z^{-1} + a(3) \cdot z^{-2} + \dots + a(n) \cdot z^{n-1}} \quad (3.3.1)$$

Der Grad der Polynome gibt die so genannte Filterordnung und indirekt die Anzahl der Filterkoeffizienten an (Anzahl der Filterkoeffizienten = Filterordnung + 1). Dadurch erhöht sich mit steigender Filterordnung der benötigte Rechenaufwand für die Ermittlung der Koeffizienten, aber auch die Übereinstimmung des Filterfrequenzgangs mit dem angestrebten idealen Frequenzgang. Beim Entwurf muss also ein Kompromiss zwischen Rechenaufwand und tolerierbaren Abweichungen vom idealen Frequenzgang gefunden werden. Abbildung 3.3.1 zeigt den angestrebten idealen Amplitudengang und die Amplitudengänge von 3 Filtern nach der YULEWALK-Methode mit unterschiedlicher Filterordnung. Man kann erkennen, dass sich die Amplitudengänge der einzelnen Filter mit steigender Ordnung an den idealen Verlauf stetig annähern. Bereits bei einer Filterordnung von 30 ist eine gute Übereinstimmung zwischen 500 und 25600Hz gegeben. Testkalkulationen mit Filtern der anderen beiden Entwurfsmethoden haben ebenfalls ergeben, dass eine gute Annäherung im Frequenzbereich von 500 bis 25600Hz bereits bei einer relativ geringen Filterordnung erreicht wird und eine Erhöhung hauptsächlich für eine gute Anpassung des Frequenzgangs der Filter im Bereich von 0 bis 500Hz notwendig ist.

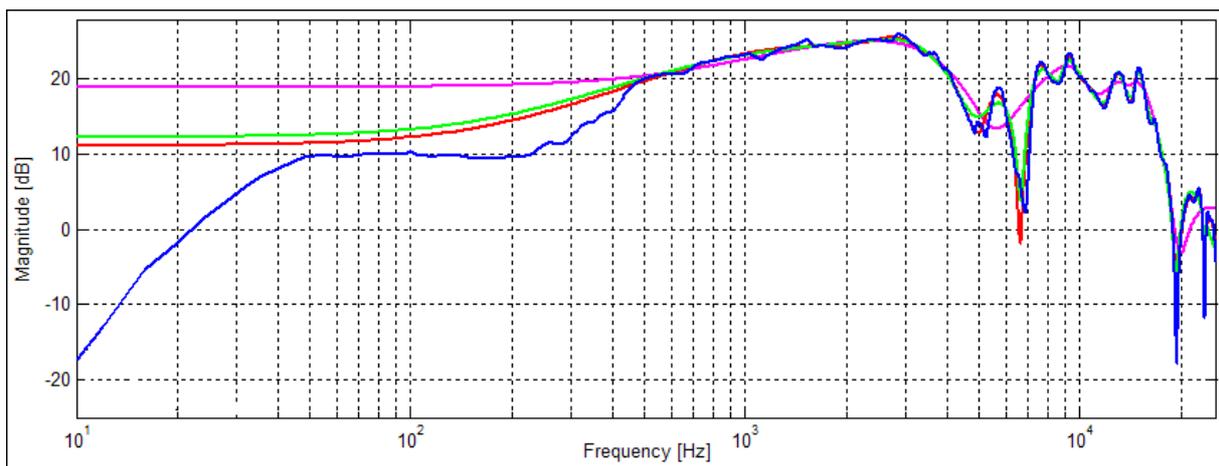


Abbildung 3.3.1: Vergleich der Amplitudengänge von 3 YULEWALK-Filter unterschiedlicher Ordnung (magenta = 10, grün = 20, rot = 30) mit dem idealen Amplitudengang (blau)

Auf der Grundlage ihrer Übertragungsfunktion können Filter auch durch ihre Null- und Polstellen charakterisiert werden. Die Nullstellen beziehen sich dabei auf das Zähler- und die Polstellen auf das Nennerpolynom. Mit den Polstellen kann eine Aussage über die Stabilität des Filters getroffen werden. Eine Möglichkeit der Stabilitätsbestimmung ist die Einheitskreisdarstellung, die auch von der entwickelten Software unterstützt wird. Befindet sich dabei mindestens eine Polstelle auf oder außerhalb des Einheitskreises, liegt eine Instabilität vor. Die Instabilität macht sich dadurch bemerkbar, dass bei Anregung durch entsprechende Frequenzkomponenten des Eingangssignals der Filter mit einer gegen unendlich strebenden Verstärkung, bzw. einem Oszillieren reagiert. Die Nullstellen haben hingegen keinen Einfluss auf die Stabilität des Filters. Liegen alle Nullstellen innerhalb des Einheitskreises, besitzt der Filter die Eigenschaften eines Minimalphasensystems. Ein Minimalphasensystem ist dadurch charakterisiert, dass es für einen vorliegenden Amplitudengang, die kleinstmöglich Phasenzunahme besitzt.

Zu beachten ist, dass bei einer Invertierung der Übertragungsfunktion des Filters die Nullstellen zu Polstellen werden und der zuvor stabile Filter nach der Invertierung instabiles Verhalten aufweisen kann, wenn er vor der Invertierung nicht die Eigenschaften eines Minimalphasensystems besaß.

- **Klassifizierung der Filter**

Filter lassen sich in verschiedene Klassifikationen unterteilen. Eine wesentliche Kategorie bildet hierbei die Unterscheidung in Infinite Impulse Response Filter (IIR-Filter) und Finite Impulse Response Filter (FIR-Filter).

IIR-Filter sind rekursive Filter, bei denen das Ausgangssignal auf den Filtereingang zurückgekoppelt wird. Wie der Name schon sagt, besitzen diese Filter eine unendlich lange Impulsantwort. Aufgrund der Rückführung haben IIR-Filterübertragungsfunktionen neben den Nullstellen auch frei wählbare Polstellen. Dadurch kann der Filter jedoch auch in seiner Stabilität eingeschränkt werden. Wird dies beim Entwurf berücksichtigt, ist ein wesentlicher Vorteil der IIR-Filter, dass sie eine gute Filterwirkung bereits bei einer geringen Filterordnung ermöglichen. Nachteilig ist, dass IIR-Filter meist einen nichtlinearen Phasengang haben. Dadurch können Verzerrungen von Impulsen aufgrund frequenzabhängiger Gruppen- und Phasenlaufzeiten entstehen.

FIR-Filter sind im allgemeinen rückkopplungsfrei und damit nicht rekursiv. Der Vorteil dabei ist, dass sie immer ein stabiles Verhalten aufweisen. Die Impulsantwort dieser Filter ist im Gegensatz zu den IIR-Filtern endlich. Aufgrund der Rückkopplungsfreiheit liegen die trivialen Polstellen der Übertragungsfunktion immer im Ursprung des Einheitskreises, wodurch beim Entwurf nur auf die Nullstellen Einfluss genommen werden kann. Es gibt zwar rekursive FIR-Filter, diese bilden jedoch seltene Ausnahmen für Spezialfälle. Ein wesentlicher Nachteil von FIR-Filter ist die erforderliche hohe Filterordnung, um eine mit den IIR-Filtern vergleichbare Flankensteilheit zu erreichen. Filter, die symmetrisch sind, besitzen eine lineare Phase.

Tabelle 3.3.1 stellt die wesentlichen Vor- und Nachteile von IIR- und FIR-Filter gegenüber.

IIR-Filter		FIR-Filter	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Unendliche Impulsantwort, es treten keine Überschwingungen an Sprungstellen auf	nicht immer stabil, Stabilität muss stets nachgeprüft werden, Schwingungsneigung	immer stabil, keine Schwingungsneigung	endliche Impulsantwort, es treten Überschwingungen an Sprungstellen auf
niedrigere Ordnung gegenüber FIR –Filter für gute Flankensteilheit nötig	variable Gruppenlaufzeit, nicht linearer Phasengang	konstante Gruppenlaufzeit, nicht linearer Phasengang	höhere Ordnung gegenüber IIR-Filter für gleiche Flankensteilheit nötig
kleinere Gruppenlaufzeiten	Ausgangssignal wird verfälscht	Ausgangssignal wird nicht verfälscht	große Gruppenlaufzeiten

Tabelle 3.3.1: Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von IIR- und FIR-Filter

- **Entwurf von digitale Filter unter MATLAB**

MATLAB bietet mehrere integrierte Kalkulationsmethoden für den Entwurf von digitale Filter. Die von MATLAB bereitgestellten Methoden kann man grundlegend in zwei Berechnungskategorien unterteilen. Bei der ersten Kategorie werden die Filter mit dem in MATLAB integrierten Entwicklungswerkzeugs *Filter Design & Analysis Tool (FDA Tool)* berechnet. Dieses Werkzeug ist ein eigenständiges Unterprogramm mit grafischer Benutzeroberfläche und bietet eine Vielzahl von Definitionsmöglichkeiten beim Filterentwurf.

Die zweite Kategorie wird dadurch bestimmt, dass die Filterentwurfsmethoden als eigenständige Funktionen in MATLAB vorliegen. Diese können mit den jeweils notwendigen Parametern für die verwendet Filterart direkt im 'Command Window' von MATLAB aufgerufen, oder in den Quelltext eines unter MATLAB entwickelten Programms implementiert werden. Bei der Umsetzung der Filterentwurfsoption für die entwickelte Software wurden die Möglichkeiten der zweiten Kategorie verwendet, da hierdurch eine direkte Integration in die Software realisierbar war.

Die für die Definition der Filtereigenschaften notwendigen Parameter hängen von dem gewünschten Frequenzgang des Filters ab. Man unterscheidet zum Beispiel Tiefpassfilter, Hochpassfilter oder Multibandfilter. Die für den Ausgleich benötigten Filter sind Multibandfilter, weil die Eigenschaften der zu entwerfenden Filter für einzelne Frequenzen in einem großen Frequenzbereich definiert werden müssen. Der Frequenzbereich umfasst hierbei den der gemessenen Frequenzspektren von Kopfhörer und Außenohr. Die Parameter für den Entwurf der Multibandfilter werden dementsprechend aus den gemessenen und gemittelten Frequenzspektren gewonnen. In Tabelle 3.3.2 werden die wichtigsten Entwicklungsfunktionen für IIR- und FIR-Multibandfilter aufgelistet, die MATLAB zur Verfügung stellt.

IIR-Filter		FIR-Filter	
Verfahren	Funktionsname	Verfahren	Funktionsname
Yule-Walker (Least-Square-Verfahren)	yulewalk	Frequenzabtastverfahren	fir2
Identify discrete-time Filter	invfreqz	Least-Square-Verfahren	firls, fircls
		Fenster-Verfahren	fir1
		Interpolationsfilter	intfilt
		Least-P-Norm-Verfahren	firlpnorm
		Nyquist-Filter	firnyquist

Tabelle 3.3.2: Entwicklungsfunktionen für IIR- und FIR-Multibandfilter die unter MATLAB zur Verfügung stehen

In der entwickelten Software wurden die drei Filterentwurfsfunktionen YULEWALK, INVREQZ und FIR2 implementiert. Alle drei Funktionen haben die Gemeinsamkeit, dass sie als Entwurfsergebnis die Filterkoeffizienten des Zähler- und Nennerpolynoms der Filterübertragungsfunktion liefern. Die Übertragungsfunktion und somit auch das Frequenzspektrum kann mit der MATLAB-Funktion *freqz* aus den Koeffizienten berechnet werden.

Weiterhin stützen sich die Entwurfsverfahren der drei Funktionen auf die Werte aus den durchschnittlichen Frequenzspektren von Kopfhörer und Außenohr. Im Folgenden werden die spezifischen Eigenschaften der drei Filterentwurfsmethoden näher erläutert. Dabei erfolgt für jede Methode eine vergleichende Darstellung zwischen den angestrebten idealen Amplituden- und Phasengang und dem des jeweils entworfenen Filters mit spezifischer Ordnung. Das für die drei Methoden als Berechnungsgrundlage dienende ideale Frequenzspektrum ist das mit dem Kunstkopf ermittelte Spektrum des rechten Kanals vom Kopfhörer ATH-M40 fs. Die angegebenen Berechnungszeiten für die Koeffizienten dienen dabei lediglich dem Vergleich des Aufwandsverhältnisses zwischen den einzelnen Methoden, da die Berechnungszeit abhängig von den zur Verfügung stehenden Hardwareressourcen ist.

YULEWALK:

Die Funktion YULEWALK berechnet auf der Grundlage der Werte des Amplitudengangs eines Frequenzspektrums die Zähler- und Nennerkoeffizienten der Übertragungsfunktion eines IIR-Filters. Der Phasengang des zugrunde liegenden Frequenzspektrums wird dabei nicht in die Berechnung einbezogen und berücksichtigt. Eine wesentliche Eigenschaft dieser Entwurfsmethode ist die identische Filterordnung für den Zähler und Nenner. Der wesentliche Vorteil von YULEWALK ist der, dass bereits mit einer geringen Ordnung eine sehr genaue Annäherung des Amplitudengangs vom Filter an den idealen Amplitudengang möglich ist. Weiterhin zeigte sich bei Testentwürfen mit unterschiedlicher Ordnung stets ein stabiles Verhalten des Filters. Dabei lagen auch die Nullstellen immer innerhalb des Einheitskreises. Eine Invertierung der Filterübertragungsfunktion führt daher ebenfalls zu einem stabilen Filter, was eine gute Voraussetzung für einen späteren Ausgleich ist.

Testkalkulationen haben ergeben, dass die wählbare Filterordnung durch die zur Verfügung stehenden Hardwareressourcen begrenzt ist. Höhere Ordnungen führen unter anderem zu Speicherüberläufen und dadurch zu falschen Ergebnissen bei den Berechnungen der Filterkoeffizienten. Das verwendete Testsystem erlaubte eine maximale Filterordnung von 77, mit der aber bereits akzeptable Ergebnisse erzielt wurden.

Abbildung 3.3.2 zeigt den Amplituden- und Phasengang einer YULEWALK-Filterübertragungsfunktion bei einer Filterordnung von 77 für Zähler und Nenner. Die Darstellung des Phasengangs (b) zeigt, dass der als Vorlage dienende ideale Phasengang bei dieser Entwurfsmethode nicht berücksichtigt wird.

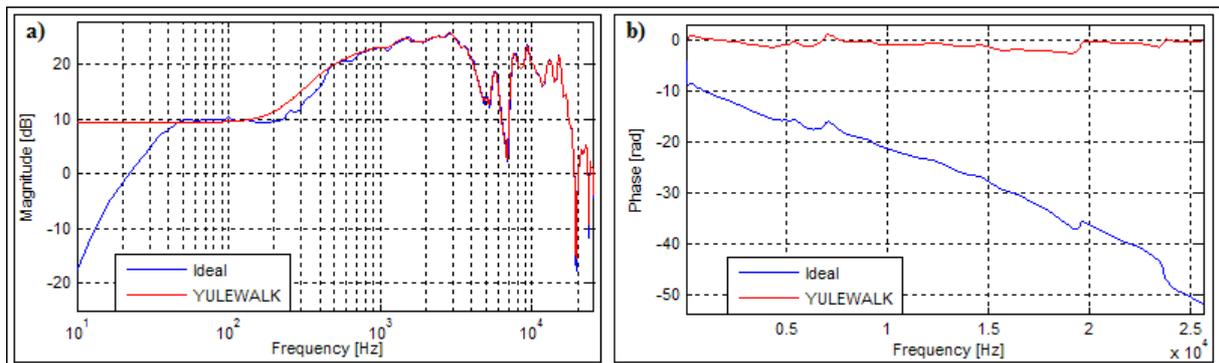


Abbildung 3.3.2: Vergleich des Amplituden- (a) und Phasengangs (b) zwischen dem ideal Angestrebten (blau) und dem eines entworfenen YULEWALK-Filters (rot) mit einer Zähler- und Nennerordnung von 77, Berechnungszeit für die Filterkoeffizienten = 0,041s

INVREQZ:

Die Funktion INVREQZ berechnet aus einem in komplexer Form vorliegenden Frequenzspektrum die Zähler- und Nennerkoeffizienten der Übertragungsfunktion eines IIR-Filters. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass beim Entwurf des Filters der Amplituden- und Phasengang von dem als Vorlage dienenden Frequenzspektrum berücksichtigt wird. Der Grad des Zähler- und Nennerpolynoms kann beim Entwurf unabhängig voneinander festgelegt werden. Als Nachteil dieses Entwurfsverfahren stellte sich bei Testentwürfen die öfters auftretende Instabilität des Filters heraus. Da eine Instabilität zu ungewollten Effekten beim Filtern führen kann aber nicht zwingend muss, ist eine Verwendung der entworfenen Filter trotzdem möglich. Im Vergleich zu den anderen beiden Entwurfsmethoden benötigt INVREQZ eine erheblich längere Rechenzeit bei der Ermittlung der Filterkoeffizienten.

Abbildung 3.3.3 zeigt den Amplituden- und Phasengang einer INVREQZ-Filterübertragungsfunktion bei einer Filterordnung von 64 für den Zähler und von 96 für den Nenner. Im Teilbild b) kann man deutlich erkennen, dass der Phasengang beim Filterentwurf mit berücksichtigt wird.

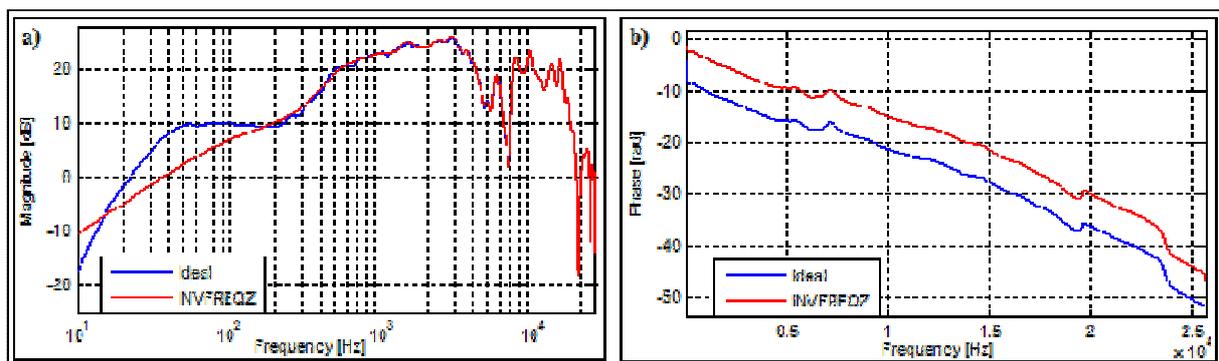


Abbildung 3.3.3: Vergleich des Amplituden- (a) und Phasengangs (b) zwischen dem ideal Angestrebten (blau) und dem eines entworfenen INVREQZ-Filters (rot) mit einer Zählerordnung von 64 und einer Nennerordnung von 96, Berechnungszeit für die Filterkoeffizienten = 0,787s

FIR2:

Wie aus dem Namen der Funktion bereits hervorgeht, dient sie zum Entwurf eines FIR-Filters. Deshalb erhält man als Entwurfsergebnis auch nur Koeffizienten für das Zählerpolynom. Der Nenner der Übertragungsfunktion ist eins. Die mit dieser Methode entwickelten Filter sind aus diesem Grund immer stabil, da alle Polstellen im Mittelpunkt des Einheitskreises liegen. Für den Entwurf werden nur die Werte des idealen Amplitudengangs verwendet, wodurch der Phasengang beim Entwurf unberücksichtigt bleibt. Die Filterordnung muss dabei immer einer geraden Zahl entsprechen. Um eine gute Annäherung des Frequenzgangs an den idealen Verlauf zu erhalten, ist eine bedeutend größere Filterordnung als bei den beiden IIR-Filtern nötig. Dies muss, bei der in der entwickelten Software bereitgestellten Stabilitätstestoption, berücksichtigt werden. Eine sehr hohe Filterordnung führt nämlich zu einer entsprechend langen Berechnungszeit der Nullstellen. Es ist daher von Vorteil, einen Ausgleichsfilter direkt aus dem invertierten Durchschnittsspektrums zu entwerfen, da eine Stabilitätsprüfung zum Teil sehr viel Zeit in Anspruch nimmt.

Abbildung 3.3.4 zeigt den Amplituden- und Phasengang einer FIR2-Filterübertragungsfunktion bei einer Filterordnung von 4096.

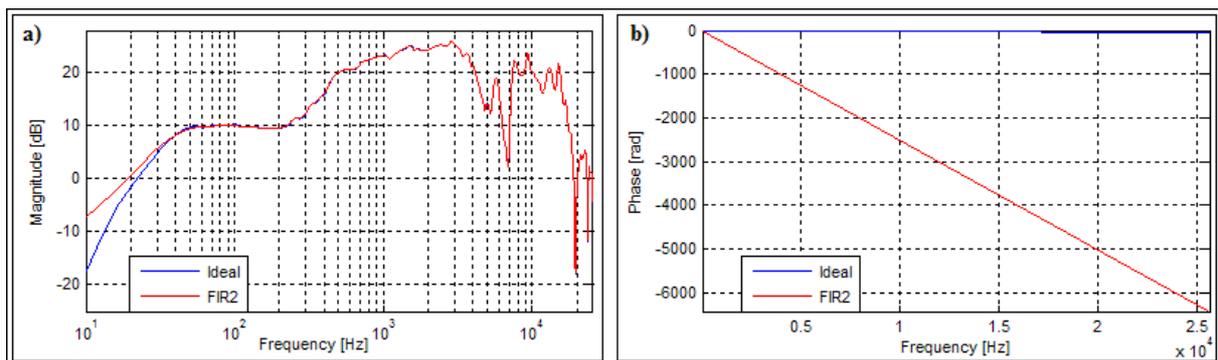


Abbildung 3.3.4: Vergleich des Amplituden- (a) und Phasengangs (b) zwischen dem ideal Angestrebten (blau) und dem eines entworfenen FIR2-Filters (rot) mit einer Filterordnung von 4096, Berechnungszeit für die Filterkoeffizienten = 0,0331s

Abschließend kann man sagen, dass die entworfenen Filter eine gute Möglichkeit darstellen, die Übertragungsfunktionen von Kopfhörer und Außenohr auszugleichen. Die Filter bieten zwar nur eine begrenzte Annäherung an den tatsächlichen Verlauf der Übertragungsfunktionen, können aber direkt auf verschiedene Signale angewendet werden. Sie sind dabei unabhängig von der Länge und der Abtastfrequenz des zu filternden Signals, da die Filterübertragungsfunktion aus den Werten des zu filternden Signals und den Filterkoeffizienten vor der Filterung stets neu berechnet wird. Hierfür dient der MATLAB befehl *freqz*, dessen kompletter Syntax in der MATLAB-Hilfe nachgeschlagen werden kann. Die zur Verfügung stehenden Entwurfsmethoden im entwickelten Programm können aufgrund des modularen Softwareaufbaus durch weitere Methoden ergänzt werden.

4. Aufbau und Funktionsweise der entwickelten Softwareumgebung

Kapitel 4 stellt das Ergebnis des zweiten praktischen Teils des durchgeführten Bachelormoduls dar. Das Ziel bestand darin, die während des zuvor absolvierten Projektmoduls entwickelte Softwareumgebung *SawIG* mit weiteren Programmfunktionen zu ergänzen. Die Entwicklung des Programms *SAwIG* und dessen Unterprogramm *SAwIG-Filterdesign* wurden unter MATLAB umgesetzt. Dabei beschreibt der bereits öfters erwähnte Begriff Softwareumgebung das gesamte Programm bzw. die Software. Die Vorgehensweise bei der Programmierung ist im Abschnitt 4.1 dargestellt und erläutert auch auf die zu beachtenden Vorgaben. Die bereits im Projektmodul implementierten Funktionen werden im Abschnitt 4.3 erläutert. Abschnitt 4.4 gibt eine Übersicht zu den im Bachelormodul ergänzten Softwarefunktionen. Auf eine detaillierte Beschreibung sämtlicher Programmoptionen soll allerdings verzichtet und nur ausgewählte und für die Umsetzung des thematischen Schwerpunkts elementare Funktion beschrieben werden. Für nähere Erläuterungen zu den einzelnen Programmoptionen steht zusätzlich eine umfassende Hilfe zur Verfügung. Diese ist direkt im Programm oder separat mit einem gängigen Webbrowser aufrufbar. Es gibt jeweils eine Hilfe zu dem Hauptprogramm *SAwIG* und dem Unterprogramm *SAwIG-Filterdesign*. Die Hilfe-Dateien befinden sich in der obersten Ebene des Programmordners *SAwIG* auf der beigelegten CD.

4.1 Grundlegende Vorgehensweise bei der Programmierung der Softwareumgebung

Die gesamte Softwareprogrammierung erfolgte mit der Entwicklungsumgebung GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*), ein in MATLAB integriertes Entwicklungswerkzeug zum Erstellung von grafischen Benutzeroberflächen. MATLAB ist ein plattformunabhängiges Softwarepaket des Unternehmens „The MathWorks“ und dient hauptsächlich zur Lösung von mathematischen Problemen und der grafischen Darstellung der Ergebnisse. Es stellt eine Vielzahl von Kalkulationsfunktionen und Entwicklungswerkzeugen bereit, die auch bei Problemlösungen in der Systemtheorie große Anwendung finden. Mittels GUIDE kann ein Programm mit grafischer Benutzeroberfläche erstellt werden, das ein Zugriff auf die verschiedensten Kalkulationsfunktionen über grafisch dargestellte Komponenten ermöglicht. Die in die Programmoberfläche einfach zu integrierenden Komponenten sind zum Beispiel Eingabefenster, Menüleisten oder Optionsschaltflächen. An ihnen sind Programmfunktionen gekoppelt, die bei Benutzerinteraktionen mit den Komponenten ausgeführt werden.

Vor der eigentlichen Programmierarbeit fand zunächst eine Analyse der zusätzlich notwendigen Programmfunktionen statt. Diese ergaben sich aus der Themenstellung und der Betrachtung des späteren Anwendungsbereichs der Software. Aufbauend auf die analysierten Grundfunktionen folgten eine grobe Skizzierung der zu erweiternden Struktur der Benutzeroberfläche und eine Auswahl der zusätzlich zu implementierenden Komponenten. Erst hiernach wurde mit der eigentlichen Programmierarbeit und Erweiterung der Programmoberfläche begonnen.

Dabei stellte sich bei der Weiterentwicklung der Software eine Abwärtsinkompatibilität zwischen der MATLAB Version 7.3 und 6.5 heraus. Die Programmierung der Grundstruktur der Software fand während des Projektmoduls an der Széchenyi István University in Győr/ Ungarn unter der MATLAB Version 7.3 statt. Bei der Weiterentwicklung der Software im Bachelormodul an der Hochschule für Telekommunikation Leipzig stand allerdings nur die MATLAB Version 6.5 zur Verfügung. Nach erstmaligem Versuch, die bereits entwickelte Software unter MATLAB 6.5 zu starten, kam dieses Problem zum ersten Mal zum Vorschein. MATLAB lieferte dabei eine Vielzahl von Fehlermeldungen und verweigerte den Start des Programms. Der Versionskonflikt beruhte hauptsächlich auf Unterschiede bei einzelnen Komponenten der grafischen Benutzeroberfläche und einen Teil der verwendeten Kalkulationsfunktionen. Somit bestand eine der Hauptaufgabe beim Beginn der Programmierarbeit darin, die Kompatibilität der im Projektmodul entwickelten Software zur MATLAB Version 6.5 herzustellen.

Die Programmierung mit GUIDE unterteilt sich in zwei Bereiche. Zum einen gibt es einen Bereich, in dem die grafische Benutzeroberfläche mit dessen Komponenten durch einfaches *Drag and Drop* gestaltet wird. Der zweite Bereich umfasst die Implementierung von Programmfunktionen für die eingefügten Komponenten in Form von Quellcode. Diese Unterteilung beim Softwareentwurf spiegelt sich auch in den Programmdateien wieder. Zu einem Programm gehören dabei immer eine *fig*-Datei, die die grafische Oberfläche beschreibt, und eine *m*-Datei, die den Quellcode für die einzelnen Programmfunktionen definiert. Eine Funktion innerhalb des Quellcode des Programms definiert eine festgelegte Verarbeitungsroutine, die während des Programmablaufs durch auftretende Ereignisse aufgerufen wird. Jede Funktion hat dabei einen eindeutigen Namen und kann frei definierbare Parameter beim Aufruf entgegen nehmen und ein Resultat zurückgeben. Durch das Funktionskonzept ist ein modularer und strukturierter Aufbau der Software möglich, wodurch eine Funktionserweiterung für die Software ohne großen Aufwand durchführbar ist. Eine verallgemeinerte Darstellung des Aufrufs und der Struktur einer Funktion innerhalb des Programmquellcodes wird in Abbildung 4.1.1 gezeigt.

```

... %weiterer Programmquelltext
...
Ergebnis = Funktionsname(parameter1, parameter2, ...);
           |_____| %Funktionsaufruf mit Parameterübergabe
           |_____| %Variablen im Hauptprogramm die den Funktionsrückgabewert erhält

           |_____| %Schlüsselwort: kennzeichnet die Funktionsdefinition im Quelltext
function Rückgabewert = Funktionsname(parameter1, parameter2, ... )
  Deklaration lokaler Variablen;

  Start der Verarbeitungsroutine mit den übergebenen Parametern:
  ...
  Rückgabewert = Ergebnis der Verarbeitungsroutine;
  %Ende der Funktion

... %weiterer Programmquelltext

```

Abbildung 4.1.1: Verallgemeinerte Quellcode-Darstellung zum Aufruf und Aufbau einer Funktion

Das Vorgehen bei der Programmierung der einzelnen Programmfunktion, wie zum Beispiel das Einlesen von externen Daten, die Berechnung der Durchschnittswerte oder die Ermittlung der Filterübertragungsfunktionen, gestaltete sich so, dass jede Funktion zuerst separat als eigenständiges Programm erstellt wurde. Dadurch können die einzelnen Funktionen vor der Integrierung in das eigentliche Hauptprogramm auf Fehler überprüft und gegebenenfalls optimiert werden. Dies erspart Später eine aufwendige Fehleranalyse im gesamten Programm bei auftretenden Programmabnormalitäten.

Für die Implementierung der Filterentwicklungsoption wurde ein eigenständiges Unterprogramm gestaltet. Die Umsetzung erfolgte zwar in Form eines separaten Programms mit dem Namen *SAwIG-Filterdesign*, allerdings kann es nur in Verbindung mit dem Hauptprogramm *SAwIG* ausgeführt werden, da es für die Ausführung die berechneten Durchschnittswerte der Frequenzspektren benötigt.

Während der Programmierphase und auch an dessen Ende fanden kontinuierlich Funktionstests mit der gesamten Software statt, um auftretende Fehler gleich zu erkennen und zu beheben. Die Ergebnisse der am Ende der Programmierarbeit durchgeführten Tests werden in Abschnitt 4.7 noch einmal genauer dokumentiert.

Eine sehr gute Unterstützung bei der Programmierarbeit war die in MATLAB integrierte Hilfe, die sehr gut dokumentierten Fehlerberichte bei auftretenden Programmfehlern, sowie eine Vielzahl von Web-Seiten im Internet, die sehr gute Dokumentation und Programmbeispiele bereitstellen.

4.2 Erläuterung zu den einzelnen Komponenten der grafischen Benutzeroberflächen

In diesem Abschnitt werden die grafischen Benutzeroberflächen des Hauptprogramms *SAwIG* und des Unterprogramms *SAwIG-Filterdesign* vorgestellt. Dabei werden die Funktionen der in den Abbildungen mit Nummern gekennzeichneten Programmoption kurz beschrieben. Nähere Erläuterung können in den Programmhilfen nachgeschlagen werden. Wie man sehen kann, ist die grobe Struktur der beiden Benutzeroberflächen identisch. Hierdurch soll eine erhöhte Benutzerfreundlichkeit bzw. ein schnelles Einlernen im Umgang mit dem Programm gewährleistet werden.

- **Das Hauptprogramm SAwIG**

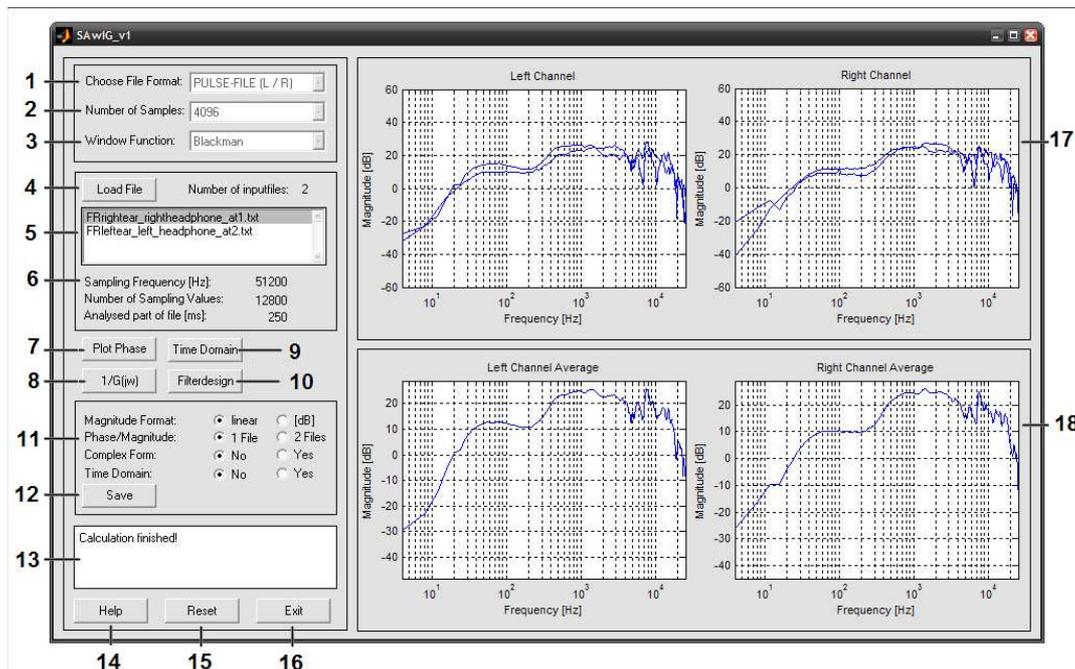


Abbildung 4.2.1: Grafische Benutzeroberfläche des Hauptprogramms SAwIG

1 File Format: Auswahl des Dateiformats der Eingangsdaten

2 Samples: Auswahl der Anzahl an Abtastwerten bei der FFT (nur bei WAV-Dateien)

3 Window Function: Auswahl einer Fensterfunktion zur Gewichtung der zeitdiskreten Eingangssignale (nur bei WAV-Dateien)

4 Load File: Einlesen der jeweiligen Eingangsdaten, 'Number of Inputfiles' gibt die Anzahl bereits geladener Eingangssignale

5 Load Status: Liste von Dateinamen der Eingangsdaten, die bereits eingelesen wurden

6 Parameter: Analyse-Parameter, die während eines Kalkulationszyklus unverändert bleiben

7 Plot Phase: Darstellung des Phasengangs des aktuellen durchschnittlichen Frequenzspektrums

8 1/G(jw): Invertierung des aktuellen durchschnittlichen Frequenzspektrums

9 Time Domain: Zeigt das durchschnittliche Frequenzspektrum im Zeitbereich an

10 Filterdesign: Startet das Unterprogramm SAwIG Filterdesign v.1

11 Speicherformat: Auswahl, in welcher Form das durchschnittliche Frequenzspektrum abgespeichert werden soll.

12 Save: Speichern des aktuellen durchschnittlichen

13 Programmstatusanzeige: Anzeige von Programmrückmeldungen (Fortschritt, Fehlermeldungen)

14 Help: Aufruf der Hilfe zum Programm

15 Reset: Zurücksetzen des Programms in den Startzustand

16 Exit: Beendet SAwIG und SAwIG-Filterdesign

17 Anzeige 1: Anzeige der Amplitudengänge sämtlicher Frequenzspektrums (separat für linken und rechten Kanal)

18 Anzeige 2: Anzeige des durchschnittlichen Amplitudengang

- **Das Unterprogramm SAwIG-Filterdesign**

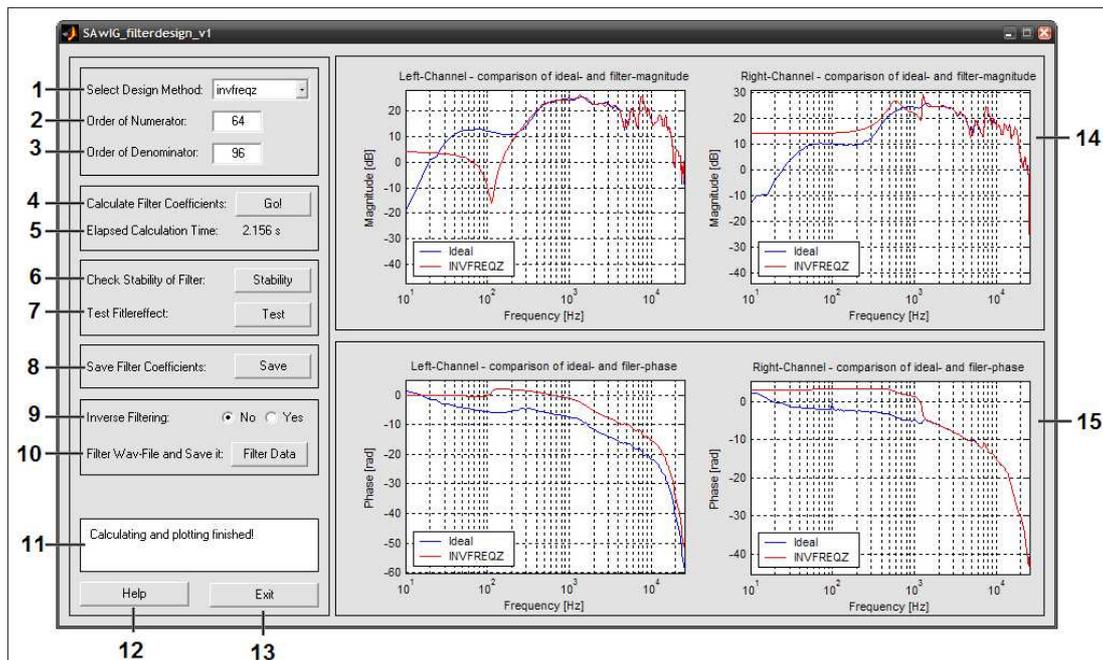


Abbildung 4.2.2: Grafische Benutzeroberfläche des Unterprogramms SAwIG-Filterdesign

1 Design Method: Auswahl der Entwurfsmethode für den Filter (3 Methoden)
2 Numerator Order: Festlegen der Ordnung des Zählerpolynoms
3 Denominator Order: Festlegen der Ordnung des Nennerpolynoms
4 Calculate Filter: Startet die Berechnung der Koeffizienten der Frequenzganggleichung des Filters
5 Calculation Time: Zeigt die für die Berechnung benötigte Zeit an
6 Stability Check: Überprüft das Stabilitätsverhalten des Filters und zeigt Ergebnis in der Einheitskreisdarstellung an
7 Test Filtereffect: Filtertest mit der als Vorlage dienenden Signalfrequenzfunktion in Form eines Ausgleichs; Ergebnisdarstellung in einem separate Fenster
8 Save Coefficients: speichert die berechneten Filterkoeffizienten für den Zähler

und Nenner in separaten Dateien für jeden Kanal

9 Inverse Filtering: Auswahl für die Filterart bei der Filterung mit einem externen Signal („Inverse Filtering: yes“ Filterung mit der invertierten Filterübertragungsfunktion)

10 Filter Data: Wendet den berechneten Filter auf ein beliebiges Signal im WAV-Format an und speichert das Ergebnis als WAV-Datei ab.

11 Programmstatusanzeige: Anzeige von Programmrückmeldungen (Fortschritt, Fehlermeldungen)

12 Help: Aufruf der Hilfe zum Programm.

13 Exit: Beendet SAwIG Filterdesign

14 Anzeige 1: Anzeige des Amplitudengangs vom idealen und vom Filterfrequenzgang

15 Anzeige 2: Anzeige des Phasengangs vom idealen und vom Filterfrequenzgang

4.3 Im Projektmodul implementierte Programmfunktionen

Während des Projektmoduls entstand das grundlegende Design der grafischen Oberfläche des Programms, deren Struktur auch im Bachelormodul weiterverwendet wurde. Die Gestaltung verfolgte das Ziel, Möglichkeiten für die spätere Ergänzungen von weiteren Programmoptionen zu berücksichtigen.

Eine grundlegende Programmfunktion aus dem Projektmodul ist das Einlesen von zu analysierenden Daten aus Messungen von Übertragungseigenschaften. Im Vordergrund stand das Auslesen von relevanten Messdaten aus den bei den durchgeführten Messungen erzeugten PULSE-ASCII-Dateien von LabShop. Vom Inhalt dieser Dateien interessierte hauptsächlich das komplexe Frequenzspektrum der Übertragungsfunktionen. Die Einlesefunktion musste bei der Anpassung des Programms an die MATLAB Version 6.5 allerdings grundlegend neu entwickelt werden.

Des Weiteren wurde auch das Einlesen von Audiosignalen im Zeitbereich umgesetzt, die als WAV-Datei im *Resource Interchange File* Format (RIFF) vorliegen müssen. Hierfür wurde ebenfalls eine Funktion zur Analyse deren Frequenzspektren mit dem FFT-Algorithmus bereitgestellt, sowie die dafür nötige Deklaration der Anzahl von Abtastwerten. Die Darstellung der Amplituden- und Phasengänge war ebenfalls schon möglich, sowie das Abspeichern der durchschnittlichen Frequenzspektren in unterschiedlichen Darstellungsformaten. Zum einen konnten die Spektren als Amplituden- und Phasengängen gespeichert werden und zum anderen in komplexer Form. Bei den gespeicherten Spektren werden ebenfalls die Werte für die sich aus der FFT ergebenden negativen Frequenzen berücksichtigt. Weiterhin wurden bereits die Kalkulation der Durchschnittswerte der Frequenzspektren und die Option zu deren Invertierung umgesetzt.

4.4 Im Bachelormodul ergänzte Softwarefunktionen

Neben den Ergänzungen von wichtigen Funktionen im Hauptprogramm konzentrierte sich die Weiterentwicklung der Software hauptsächlich auf die Realisierung der Filterentwurfsoption in Form eines separaten Unterprogramms. In diesem Abschnitt wird deshalb eine zwischen Hauptprogramm und Unterprogramm getrennte Erläuterung der ergänzten Softwarefunktionen vorgenommen. Zu einzelnen Funktionen erfolgen detaillierte Beschreibungen, da deren Eigenschaften wichtig für das Verständnis zur Arbeitsweise der Software sind. Wie bereits erwähnt, sind sämtliche Eigenschaften der Funktionen auch in den Hilfedateien zu den beiden Programmen dokumentiert.

- ***Ergänzungen im Hauptprogramm***

Anwendung von Fensterfunktionen auf zeitdiskrete Eingangssignale

Die Fensterfunktionen werden auf jedes geladene zeitdiskrete Signal vor der diskreten Spektralanalyse mit dem FFT-Algorithmus angewendet. Dadurch ist diese Programmoption

nur beim Laden von Dateien im WAV-Format aktiviert. Die PULSE-ASCII-Dateien beinhalten nämlich bereits ein analysiertes Frequenzspektrum. Die Notwendigkeit der Fensterfunktionen ergibt sich aus den Eigenschaften des FFT-Algorithmus. Wie bereits im Abschnitt 2.5 erwähnt, analysiert der FFT-Algorithmus nur einen zeitlich begrenzten Teil des zeitdiskreten Signals, dem so genannten Zeitfenster. Eine Problematik ist dabei die notwendige exakte Lage des Zeitfensters über eine ganze Anzahl von Perioden des Signals. Der Algorithmus setzt somit voraus, dass der Verlauf des Signals sich vor und nach dem betrachteten Zeitbereich periodisch fortsetzt. Die zu analysierenden Signalen sind jedoch hauptsächlich nichtperiodische Signale. Bei einer schlechten Wahl des Zeitfensters kommt es bei der Betrachtung der linken und rechten Grenze des Zeitfensters zu Sprungstellen im Signal. Im Spektrum macht sich dies durch zusätzliche Frequenzen bemerkbar, die eigentlich im analysierten Signal nicht vorkommen. In Abbildung 4.4.1 wird diese Problematik noch einmal verdeutlicht, indem das Bild a) die korrekte Lage des Zeitfensters bei einem periodischen zeitdiskreten Signal zeigt und das Bild b) das Entstehen von Sprungstellen bei nichtperiodischen Signalen verdeutlicht.

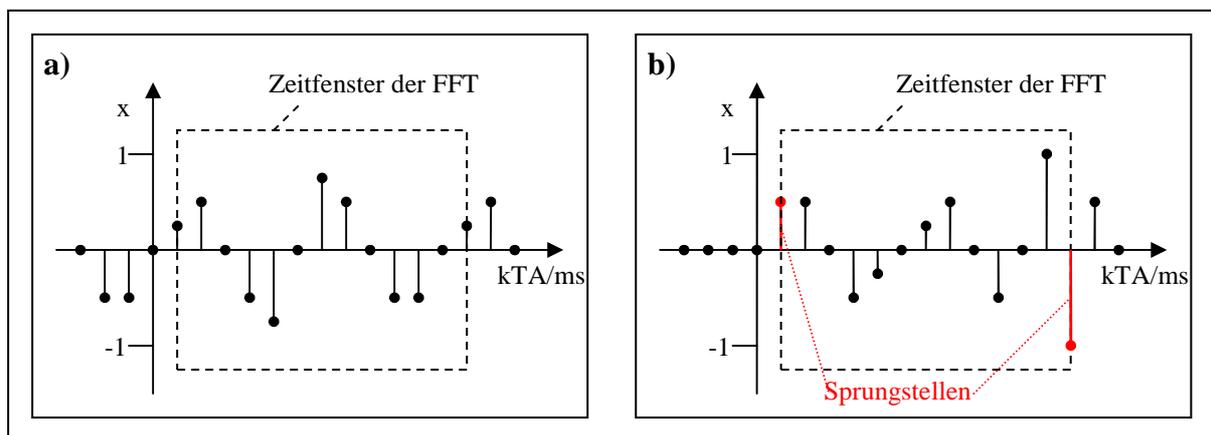


Abbildung 4.4.1: a) korrekte Wahl des Zeitfensters bei periodischen Signalen, b) Entstehung von Sprungstellen bei unpassender Lage des Zeitfensters während der Analyse von nicht periodischen Signalen

Das Auftreten von Sprungstellen kann durch die Verwendung von Fensterfunktionen vermindert werden. Fensterfunktionen führen eine Wichtung der Abtastwerte eines zeitdiskreten Signals durch, um weiche Übergänge an den Zeitfenstergrenzen zu schaffen und einen periodischen Verlauf vortäuschen. Dabei werden die einzelnen Abtastwerte des Signals mit Faktoren unterschiedlicher Wertigkeit multipliziert. Für die Wichtung gibt es verschiedene Fensterarten. Eine FFT ohne Wichtung entspricht zum Beispiel einer Multiplikation der Abtastwerte mit einer Rechteckfunktion. Die Wertigkeiten der Wichtungsfaktoren der im Programm zur Verfügung stehenden Fensterfunktionen werden in Abbildung 4.4.2 dargestellt. Der dargestellte Verlauf der Fensterfunktion würde sich einstellen bei einem gewichteten zeitdiskreten Signal einstellen, wenn es über den gesamten Wichtungsbereich eine gleich bleibende Amplitude besitzt.

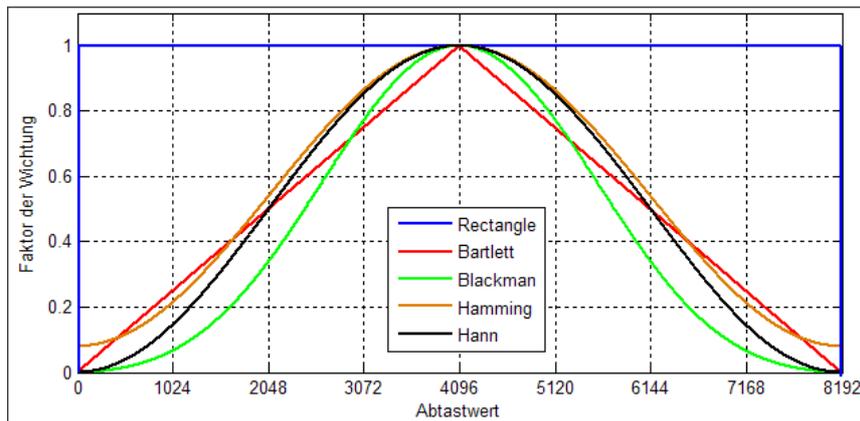


Abbildung 4.4.2: Wertigkeitsverlauf der Wichtungsfaktoren von den einzelnen im Programm wählbaren Fensterfunktionen, bei einer Anzahl von 8192 Abtastwerten

Darstellung des durchschnittlichen Frequenzspektrums im Zeitbereich

Diese zusätzliche Darstellungsoption erlaubt die Betrachtung des durchschnittlichen Frequenzspektrums im Zeitbereich. Dafür wird eine inverse FFT durchgeführt, wodurch man ein zeitdiskretes Signal erhält. Dieses Signal entspricht der durchschnittlichen Impulsantwort aus den eingelesenen Messwerten und Messsignalen. Diese Betrachtung ist auch von invertierten Frequenzspektren möglich.

Zusätzliche Speicheroption

Angelehnt an die Darstellung im Zeitbereich ist es in der weiterentwickelten Software nun auch möglich, die durchschnittlichen Frequenzspektren als zeitdiskrete Funktion abzuspeichern. Dabei werden die Werte der Zeitfunktion in einer TXT-Datei abgelegt und gleichzeitig aus ihnen eine WAV-Datei erzeugt, die ebenfalls unter demselben Namen im gleichen Verzeichnis abgespeichert wird. Die WAV-Datei wird, wie auch bei den anderen Speicheroptionen, für jeden Audiokanal separat erzeugt und gespeichert.

Weiterhin wurden Veränderungen und Optimierungen in der Benutzerfreundlichkeit und den Programminteraktionen durchgeführt. Eine wesentliche Erweiterung war auch die Filterentwurfsoption, dessen Implementierung mittels der Programmierung eines Unterprogramms umgesetzt wurde. Hierfür mussten einige Anpassungen im Hauptprogramm durchgeführt werden, deren Beschreibung allerdings zu sehr in die Quellcodeebene führen würde und hier nicht näher dargestellt werden soll. Die einzelnen Funktionen dieses Unterprogramms werden im Folgenden erläutert.

- ***Grundlegende Funktionen des entwickelten Unterprogramms SAwIG-Filterdesign***

Beim Start des Unterprogramms mit der Schaltfläche *Filterdesign* im Hauptprogramm wird das aktuelle durchschnittliche Frequenzspektrum vom Hauptprogramm an das Unterprogramm für die Weiterverarbeitung übergeben. Diese Werte dienen als Grundlage für

den Entwurf der Filter. Dabei wird das Ziel verfolgt, dass die Frequenzgänge der Filter sich an den übergebenen Werten so gut wie möglich annähern. Eine Aktualisierung der für den Entwurf nötigen Durchschnittswerte im Unterprogramm erfolgt durch erneutes Betätigen der Schaltfläche *Filterdesign* im Hauptprogramm. Es ist auch möglich, die invertierten Frequenzspektren als Vorlage für die Filterentwürfe zu übergeben.

Wie bei den Funktionsbeschreibungen des Hauptprogramms folgen nun Erläuterungen zu wichtigen Unterprogrammoptionen.

Auswahl der Filterentwurfsmethode und die Berechnung der Filterkoeffizienten

Als Filterentwurfsmethoden stehen drei Filterarten zur Auswahl. Eine Methode für den Entwurf eines FIR-Filters, FIR2, und zwei Methoden für den Entwurf von rekursive IIR-Filter, YULEWALK und INVREQZ. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Entwurfsmethoden und deren charakteristischen Eigenschaften wurden bereits im Kapitel 3 aufgeführt. Und werden hier nicht mehr näher erläutert.

Vor der Berechnung der Filterkoeffizienten in Abhängigkeit von der gewählten Entwurfsmethode ist es notwendig, die Ordnung des Zähler- und Nennerpolynoms der Filterübertragungsfunktion festzulegen. Die Ordnung bestimmt die Anzahl der zu berechnenden Filterkoeffizienten im Zähler sowie im Nenner. Je höher die Ordnung, desto genauer nähert sich die Frequenzgangfunktion des Filters an den angestrebten ideale Frequenzgangfunktion an, erhöht dadurch allerdings auch gleichzeitig den Rechenaufwand und die damit direkt zusammenhängende Berechnungszeit. Die Berechnung wird mit der Schaltfläche *Go!* initialisiert. Der resultierende Frequenzgang des berechneten Filters wird als Amplituden- und Phasengang in den Anzeigefenstern 1 und 2 dargestellt. In diesen Anzeigefenstern erfolgt auch eine gleichzeitige Darstellung des angestrebten idealen Amplituden- und Phasengangs, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen und gegebenenfalls die Ordnung und Entwurfsmethode bei nicht zufrieden stellender Übereinstimmung anzupassen. Abbildung 4.4.3 zeigt eine Darstellung des Amplituden- und Phasengangs für den rechten Kanal eines Filters nach der *invfreqz* Entwurfsmethode.

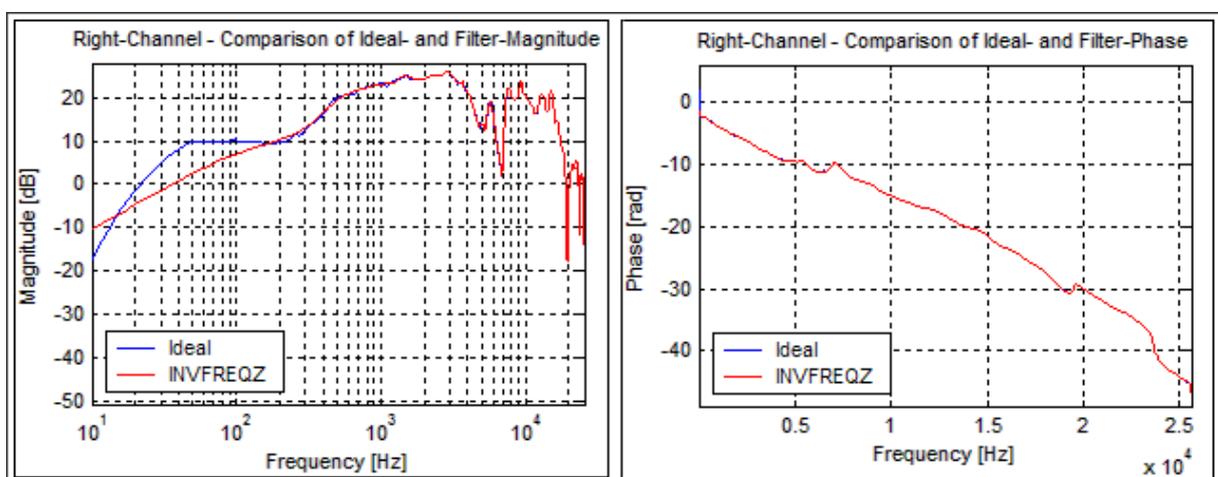


Abbildung 4.4.3: Amplituden- und Phasengang rechter Kanal: ideal und vom entworfenen Filter mit der Methode *invfreqz* bei einer Ordnung des Zählers von 64 und des Nenners von 96

Überprüfung der Stabilität des entworfenen Filters

Die Stabilität eines Filters ist von entscheidender Bedeutung für dessen Einsatz. Weist ein Filter ein instabiles Verhalten auf, kann er durch ein Eingangssignal zum Eigenschwingen angeregt werden. Dadurch kann ein unendliches und nicht vorher bestimmbares Ausgangssignal entstehen. Die Stabilität eines Filters kann durch die Berechnung der Null- und Polstellen vom Zähler- und Nennerpolynom der Filterübertragungsfunktion überprüft werden. Dabei kann aufgrund der Lage der Polstellen in der Einheitskreisdarstellung auf die Stabilität geschlussfolgert werden. Die Beträge der komplexen Polstellen müssen bei einem stabilen Verhalten innerhalb des Einheitskreises liegen. Die Nullstellen haben keinen Einfluss auf die Stabilität. Die Anzeige der Null- und Polstellen der Übertragungsfunktion für den linken und rechten Kanal des entwickelten Filters erfolgt in einem separaten Fenster in Form der Einheitskreisdarstellung (siehe Abbildung 4.4.4).

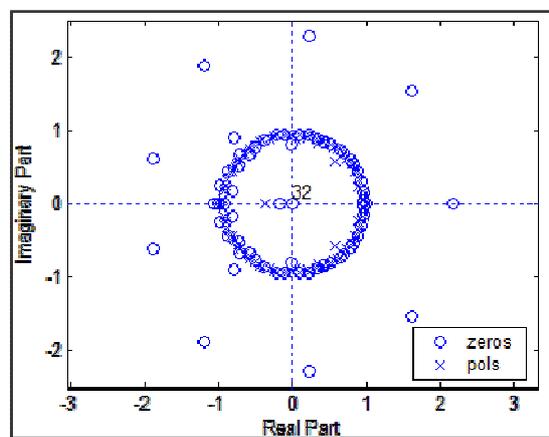


Abbildung 4.4.4: Einheitskreisdarstellung der Pol- und Nullstellen eines Filters nach der invfreqz Entwurfsmethode

Überprüfung der Filterwirkung von entworfenen Filtern

Um eine Aussage über die Filterqualität der entworfenen Filter zu ermöglichen, bzw. die Filterwirkung praktisch zu überprüfen, ist im Programm eine Filtertestoption integriert. Hierbei handelt es sich um eine Funktion, bei der das vom Hauptprogramm übergebene komplexe Frequenzspektrums im Zeitbereich mit dem entworfenen Filter invers gefiltert wird. Dies entspricht einer Simulation des Ausgleichs der Kopfhörer- und Außenohrübertragungseigenschaften. Das heißt, dass eine Invers-Filterung durchgeführt wird, deren Ergebnis im idealen Fall ein Signal ohne Phasenverschiebung und mit gleich bleibendem Amplitudengang über den gesamten Frequenzbereich des Signals ist. Die Ergebnispräsentation der Filterung wird durch die Darstellung des Frequenzspektrums in Form von Amplituden- und Phasengang des gefilterten Signals umgesetzt. Gleichzeitig werden auch die Frequenzspektren des zu filternden Signals und des Filters im selben Fenster dargestellt. Abbildung 4.4.5 ist ein Beispiel der Ergebnispräsentation einer Testfilterung. Anhand des Amplituden- und Phasengang des gefilterten Signals (roter Verlauf) kann man in

der Abbildung erkennen, dass im Frequenzbereich von 100 – 25600 Hz bereits ein sehr guter Ausgleich erfolgte.

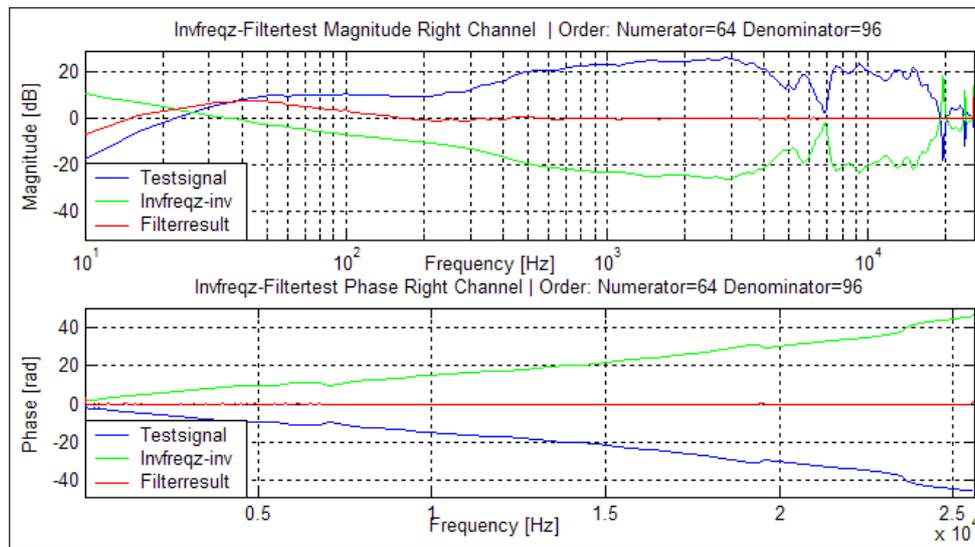


Abbildung 4.4.5: Anzeige des Ergebnisses der Testfilterung in Form von Amplituden- und Phasengang: blau = Frequenzgang des zu filternden Signals, grün = invertierter Frequenzgang des Filters, rot = Frequenzgang des gefilterten Signals

Speichern der berechneten Filterkoeffizienten

Mit der Schaltfläche *Save* wird eine Speicherung der Filterkoeffizienten eingeleitet. Die Koeffizienten des Zählers und Nenners werden dabei in separaten TXT-Dateien gespeichert. Damit kann der entsprechende digitale Filter jederzeit wieder initialisiert und weiterverwendet werden. Die Speicherung wird für jeden Kanal getrennt durchgeführt.

Filtern von Signalen

Das Unterprogramm bietet mit der Schaltfläche *Filter Data* eine Option, bei der externe Audiosignale mit dem aktuell entworfenen Filter gefiltert werden können. Es wird das Filtern von Audiosignalen mit einem Audiokanal (Mono), als auch mit zwei Audiokanälen (Stereo) unterstützt. Das gefilterte Signal wird als WAV-Datei im RIF-Format gespeichert. Zusätzlich kann zwischen der Filterung mit der invertierten oder nicht invertierten Filterübertragungsfunktion ausgewählt werden.

Nach dem Betätigen der Schaltfläche *Filter Data* erscheint zunächst eine Fenster, indem das zu filternde Signal ausgewählt wird. Danach erscheint ein weiteres Fenster, indem der Speicherort und Dateiname des gefilterten Signals festgelegt werden. Vor der Speicherung des gefilterten Signals führt das Programm eine Normalisierung der Signalwerte des gefilterten Signals durch, um die MATLAB internen Eigenschaften bei der WAV-Erzeugung zu berücksichtigen und das Abschneiden von hohen Amplitudenwerten zu unterbinden.

4.6 Grundlegende Erläuterungen zur Arbeit mit dem Programm

Vor dem eigentlichen Programmstart muss sichergestellt werden, dass sich sämtliche Programm- und Hilfedateien im selben Dateiverzeichnis befinden. Auf dem Computer, auf dem das Programm ausgeführt werden soll, muss eine MATLAB Version ab 6.5 mit der Entwicklungsumgebung GUIDE installiert sein. Dies ist notwendig, weil das entwickelte Programm nur in Verbindung mit GUIDE ausführbar ist. GUIDE bietet nämlich keine Option für die Kompilierung von MATLAB unabhängigen Programmen. Im Folgenden werden kurz die notwendigen Schritte zum Ausführen von *SAwIG* unter MATLAB erläutert:

1. Starten von MATLAB
2. Als Arbeitsverzeichnisses muss unter dem Menüpunkt 'Current Directory' das Verzeichnis gewählt werden, indem sich das Programm *SAwIG* befindet. (siehe Abbildung 4.6.1)
3. Der Start von GUIDE erfolgt durch die Eingabe des Befehls *guide* im 'Command Window'. (siehe Abbildung 4.6.1)



Abbildung 4.6.1: Auswahl des Arbeitsverzeichnisses und Starten von GUIDE unter MATLAB

4. In GUIDE wird dann die grafische Benutzeroberfläche, die sich als Datei *sawig_v1.fig* im Programmverzeichnis von *SAwIG* befindet, geöffnet.
5. Das Ausführen von *SAwIG* wird mit der Schaltfläche *RUN* in der oberen Menüleiste von GUIDE eingeleitet. (siehe Abbildung 4.6.2)

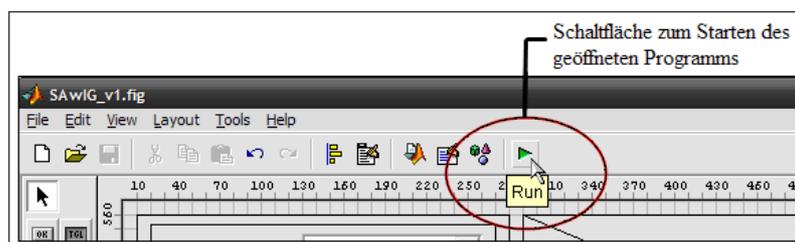


Abbildung 4.6.2: Schaltfläche zum Starten der geöffneten grafischen Benutzeroberfläche unter GUIDE.

Nach dem Start der grafischen Benutzeroberfläche kann mit *SAwIG* gearbeitet werden. Programmoptionen, die dabei temporär nicht anwählbar sind, stehen erst nach einem erstmaligen Laden einer Eingangsdatei zur Verfügung oder sind in der jeweiligen Analysekonfiguration (abhängig vom Datei-Typ) nicht anwendbar. Während der Arbeit mit dem Programm werden im Programmstatusfenster Information zu den Kalkulationsfortschritten und auch zu Eingabefehlern angezeigt. Bei schwerwiegenden Konflikten erscheinen zusätzliche Fehleranzeigen und deren Ursache in separaten Fenstern.

Kommt es trotzdem zu Programmabnormalitäten, deren Ursache sich nicht aus dem im Programm dargestellten Fehlermeldungen erschließen lässt, soll auf das 'Command Window' von MATLAB verwiesen werden, indem ebenfalls Fehler angezeigt werden.

Das Unterprogramm für den Entwurf von digitalen Filtern wird mit der Schaltfläche *Filterdesign* gestartet. Dies ist erst nach erstmaligen Laden eines Eingangssignals unter MATLAB möglich.

Für weitere Erläuterungen zu den einzelnen Programmoptionen kann jederzeit die Programmhilfe in den beiden Programmen mit der Schaltfläche *Help* aufgerufen werden. Die Darstellung erfolgt im 'Help-Browser' von MATLAB.

4.7 Funktionstest der Software

Am Ende der Programmierarbeit wurde ein ausgiebiger Test der gesamten Programmfunktionen durchgeführt. Hierbei lag der Hauptschwerpunkt auf der korrekten Analyse der Eingangsdaten, die Berechnung des invertierten Spektrums, die Ergebnisse der Filterentwurfsoption und der Benutzerfreundlichkeit. Aufgrund des modularen Aufbaus der einzelnen Funktionskomponenten fanden bereits während der Programmierung ausgiebige Fehleranalysen und Anpassungen für die einzelnen Funktionen statt. Dadurch lieferte der abschließende Funktionstest im überwiegenden Teil positive Ergebnisse. Ergänzungen und Optimierungen wurden hauptsächlich im Bereich der Programminteraktion vorgenommen, die den Benutzer im Umgang mit dem Programm unterstützen sollen. Dazu zählten Ergänzungen und Präzisierungen in den beiden Programmhilfen und die Erweiterungen in den während des Betriebs angezeigten Programmstatusmeldungen. Es erfolgten ebenfalls Testreihen, bei denen überprüft wurde, wie sich das Programm bei falschen Benutzereingaben verhält.

Es muss allerdings erwähnt werden, dass der eigentliche Ausgleich der Übertragungsfunktion von Kopfhörer und Außenohr mit den berechneten Filtern nicht getestet wurde. Hierfür gab es an der Hochschule für Telekommunikation Leipzig nicht die dafür notwendigen Messeinrichtungen. Die Qualität einer Ausgleichsfilterung mit den vom Programm kalkulierten Filterfunktionen kann deshalb nur zu einem späteren Zeitpunkt getestet werden. Die Filterwirkungen wurden lediglich mit selbständig generierten Testsignalen überprüft. Der Filterentwurf erfolgte dabei auf der Grundlage von Audiosignalen mit vordefinierten Frequenzanteilen. Diese entworfenen Filter wurden dann invertiert auf Audiosignale angewendet, die unter anderem diese Frequenzanteile beinhalteten.

Das Ergebnis eines solchen simulierten Ausgleichs für einen Audiokanal wird in den Teilbildern a), b), und c) der Abbildung 4.7.1 dargestellt. Es werden dabei die Amplitudengänge der Signale gezeigt, an denen die Filterwirkung erkennbar ist. Das zu filternde Signal mit dem in a) dargestellten Amplitudengang hatte Frequenzanteile von 100, 500, 1000, 2000, 5000, 8000, 16000 und 20000 Hz. Der Filter wurde aus dem Signal mit dem in b) dargestellte Amplitudengang und den Frequenzanteilen von 500, 1000, 5000 und 16000 Hz berechnet. Das Ziel der Testfilterung war eine Filterung des Signals a) mit dem aus dem Signal b) entworfenen IIR-Filter. Der Amplitudengang des resultierenden Signals aus der Inversfilterung wird unter c) dargestellt.

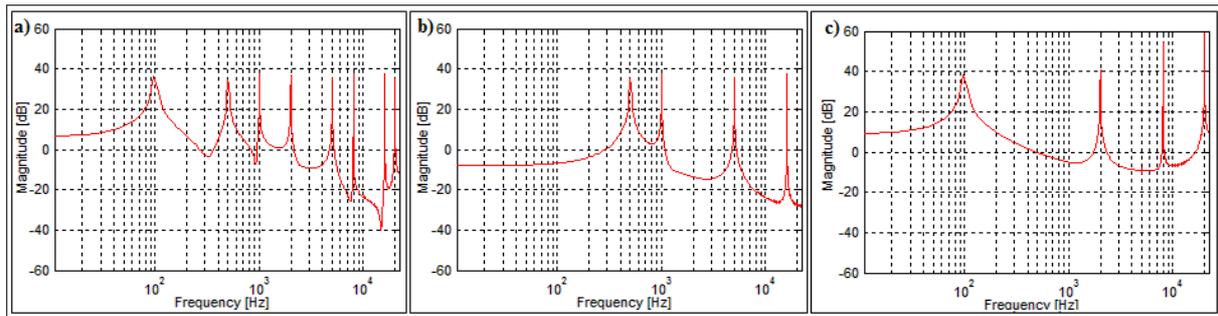


Abbildung 4.7.1: Beispiel für ein Ergebnis eines Testausgleichs mit einem Filter nach der Entwurfsmethode *invfreqz*: a) Amplitudengang des zu filternden Signals, b) Amplitudengang des Filters, c) Amplitudengang des resultierenden Signals nach einer inversen Filterung

Der Amplitudengang des gefilterten Signals c) in Abbildung 4.7.1 besitzt nur noch die gewünschten Frequenzanteile von 100, 2000, 8000 und 20000 Hz. Die restlichen Anteile wurden vom Filter ausgeglichen. Die Verstärkung der Amplituden des gefilterten Signals bei 8000 und 20000 Hz ist auf die nicht exakte Anpassung des Filterfrequenzgangs an den Amplitudengang b) zurückzuführen.

5. Schlussbetrachtung

5.1 Resümee zu den gewonnenen Ergebnissen aus dem Bachelormodul

Das bearbeitete Thema dieser Bachelorarbeit beschäftigte sich nur mit einem kleinen Bereich aus dem großen Forschungsgebiet der virtuellen Schallfeldsimulation mittels Kopfhörerwiedergabe. Die Forschungsarbeiten in diesem Gebiet sind schon weit voran geschritten und liefern bereits sehr gute Ergebnisse. Trotzdem gibt es auch weiterhin noch einige Fragen, die bis jetzt noch nicht zufrieden stellend geklärt sind. Dazu zählt zum Beispiel die Berücksichtigung der Bewegung des Kopfes, die einen wesentlichen Einfluss auf die Lokalisationsschärfe hat, oder die Individualisierung von durchschnittlichen HRTFs.

Bei der Auseinandersetzung mit dem Thema dieser Bachelorarbeit, dem Ausgleich der Übertragungseigenschaften von Kopfhörer und Außenohr, wurde deutlich, dass die systemübergreifende Verarbeitung von gewonnen Messdaten nicht immer reibungslos erfolgen kann. Die Messsysteme verschiedener Hersteller verwenden oft herstellerspezifische Parameter für die Aufnahme von Messdaten, wodurch eine Anpassung der Daten vor der Weiterverarbeitung in andern Systemen meist unausweichlich ist. Bei den durchgeführten Messungen mit dem System der Firma Brüel & Kjaer konnten nur Parameter für die Abtastfrequenz und der Anzahl der Abtastwerte gewählt werden, die nicht ideal für eine weitere Verarbeitung waren. Mit der Implementierung der Filterentwurfsoption in die zu entwickelnde Software wurde eine Möglichkeit für die Anpassung der Messdaten an das für den späteren Ausgleich notwendige Format gefunden. Dabei werden die gemessenen und auszugleichenden Übertragungseigenschaften mit Filter nachgebildet und können später auf verschiedene Eingangssignale angewendet werden.

Eine weitere Problematik die sich während den Programmierarbeiten zeigte, war die fehlende Abwärtskompatibilität zwischen den Versionen von MATLAB. Die Grundstruktur der entwickelten Software entstand bereits im Projektmodul unter der MATLAB Version 7.3. Die weiterführenden Arbeiten an der Software im Bachelormodul wurden jedoch unter der MATLAB Version 6.5 durchgeführt. Hierbei kam es zu Inkompatibilitäten einiger bereits implementierten Programmfunktionen, die vor der weiterführenden Programmierarbeiten an die Version 6.5 angepasst werden mussten.

Weiterhin wurde bei der Programmierung der Software schnell klar, dass sich MATLAB und somit auch die entwickelte Software nicht für eine Echtzeitsimulation eignet. Dies liegt vor allem auch daran, dass sich unter GUIDE entwickelte Software nicht als eigenständiges Programm kompilieren lässt. Dadurch ist stets im Hintergrund der Programmausführung MATLAB notwendig, wodurch zusätzliche Computerressourcen benötigt werden und deutlich registrierbare Latenzen auftreten. Da allerdings die Ausgleichsfilterung theoretisch nur einmal auf das wiederzugebende Signal angewendet werden muss, kann dies auch im Vorfeld einer angestrebten Echtzeitsimulation erfolgen. Sind die wiederzugebenden Audiosignale nicht vorhersehbar und rein zufällig, ist ein im Vorfeld stattfindender Ausgleich von Übertragungseigenschaften aber auch nicht möglich. Aus diesem Grund wurde die entwickelte Software *SAwIG* so konzipiert, dass die Berechneten Daten in externen Dateien abgespeichert werden können. Das betrifft zum einen die Durchschnittskalkulation der Frequenzspektren, sowie die Koeffizienten der entworfenen Filterübertragungsfunktionen. Die Daten können dann von anderen Programmen eingelesen werden, die eine Echtzeitanwendung unterstützen. Die entwickelte Software dient somit sehr gut für die Konvertierung von Messergebnissen von Übertragungseigenschaften in ein einheitliches Format.

Auf eine vollständige Darstellung des Quellcodes der entwickelten Softwareumgebung wurde verzichtet. Für eine Einsicht in den gesamten Quellcode wird auf die CD verwiesen, die dieser Arbeit beiliegt. Dort befindet sich der Quellcode im Ordner *SAwIG*.

Über die praktische Wirkung der berechneten Ausgleichsfilter können keine Angaben gemacht werden, da nach Abschluss der Programmierarbeiten die dafür notwendigen Messeinrichtungen nicht mehr zur Verfügung standen. Ausgleichssimulationen mit Testsignalen haben allerdings ergeben, dass die Übertragungseigenschaften von Kopfhörer und Außenohr mit den vom Programm entworfenen Filtern theoretisch ausgeglichen werden können. Eine praktische Überprüfung sollte sich an diese Arbeit trotzdem anschließen.

5.2 Ausblick zu anknüpfende Bearbeitungsmöglichkeiten

Die im Bachelormodul entwickelte Software kann als ein Teilmodul im Gesamtkomplex der virtuellen Schallfeldsimulation angesehen werden. Als Gesamtkomplex wird die komplette Signalverarbeitungsstrecke bei der virtuellen Schallfeldsimulation angesehen. Diese beginnt beim reinen Quellsignal und endet bei der Wiedergabe des aufbereiteten raumsimulierenden Signals. Die Verarbeitung erfolgt dabei stets für jeden Kanal getrennt. Zu den Verarbeitungsschritten während der Signalverarbeitung zählen dabei die

Ausgleichskalkulationen von Kopfhörer- und Außenohrübertragungseigenschaften, die Signalfilterung mit den richtungsabhängigen HRTFs, die Individualisierung mit den DHRTFs, Pegel- und Laufzeitanpassungen zwischen linken und rechten Audiokanal sowie die Zusammenführung des linken und rechten Audiokanals zu einem Stereosignal.

Derzeit werden die einzelnen Schritte getrennt von einander durchgeführt, wodurch für jeden Schritt ein separates Programm benutzt wird. Als weiterführende Bearbeitungsmöglichkeit in diesem Bereich der virtuellen Schallfeldsimulation bietet es sich an, diese einzelnen Schritte in einem Programm zu vereinen. Dieses Programm könnte dann auf bereits ermittelte Daten zugreifen und auf das wiederzugebende Signal anwenden. Beim Erstellen eines solchen Programms könnte dann auch eine Entwicklungsumgebung gewählt werden, die eine Echtzeitverarbeitung zulässt. In Abbildung 5.2.1 ist eine mögliche Grundstruktur des modularen Aufbaus eines solchen Programms dargestellt.

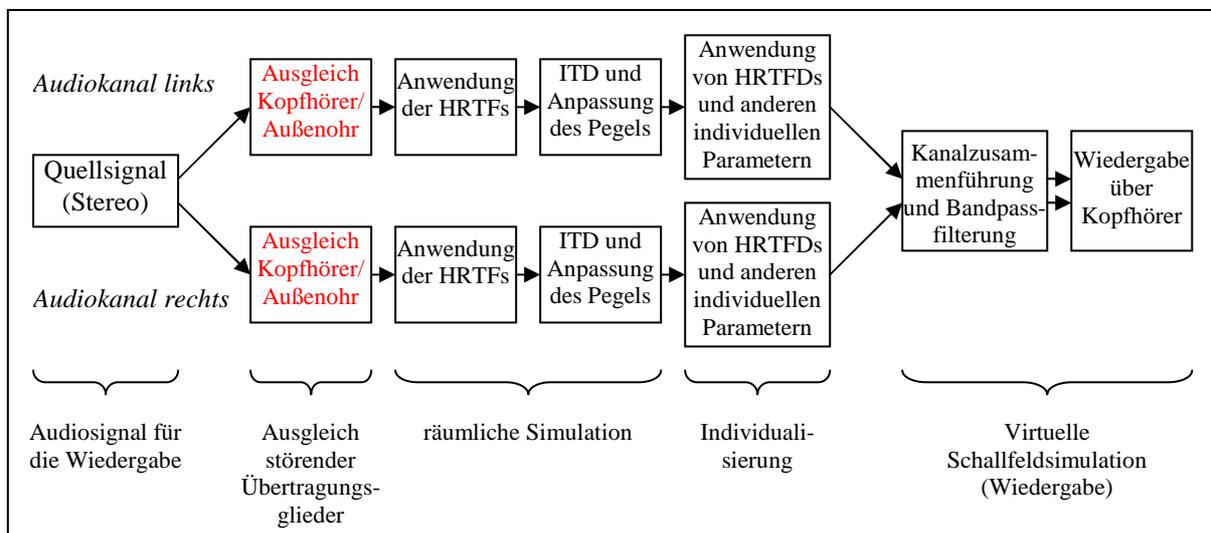


Abbildung 5.2.1: Modulare Grundstruktur eines möglichen Gesamtkonzepts einer Software für die virtuellen Schallfeldsimulation

Weiterhin wäre auch eine Erweiterung der entwickelten Software denkbar. Die Weiterentwicklung könnte sich mit einer Ergänzung der auswählbaren Eingangsdatenformate beschäftigen und eventuell zusätzliche Filterentwurfsverfahren im Unterprogramm ergänzen. Eine praktische Überprüfung des theoretisch funktionierenden Ausgleichs der Übertragungseigenschaften müsste ebenfalls in späteren Arbeiten erfolgen und bei auftretenden Problemen eine eventuelle Anpassung durchgeführt werden.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] György Wersényi: "HRTFs in Human Localization: Measurement, Spectral Evaluation and Practical Use in Virtual Audio Environment". Brandenburgische Technischen Universität Cottbus, Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, 2002, Dissertation
- [2] Anton Braun: „Grundlagen der Regelungstechnik: Kontinuierliche und diskrete Systeme“. Hanser Verlag, Kapitel 3.1.2, 2005. ISBN: 3446403051
- [3] Maria Fellner, Robert Höldrich: „Außenohr-Übertragungsfunktion - Messung und Datensätze“. IEM-Report 04/98
- [4] Jens Blauert, Jonas Braasch: „Räumliches Hören“, Beitrag für Handbuch der Audiotechnik (Stefan Weinzierl, Hrsg). Springer Verlag
- [5] György Wersényi: „Psychoakustische Messungen auf dem Gebiet der menschlichen Lokalisationsschärfe“. HU ISSN 1418-7108: HEJ Manuscript no.: EE-020110-A
- [6] Pablo F. Hoffmann und Henrik Moller: „Some Observations on Sensitivity to HRTF Magnitude“. J. Audio Eng. Soc., Vol. 56, No. 11, p. 572 – 582, (2008)
- [7] György Wersényi, András Illényi: „Differences in dummy-head HRTFs caused by the acoustical environment near the head“. Electronic Journal «Technical Acoustics» 2005, 1
- [8] William L. Martens: “Perceptual evaluation of filters controlling source direction: Customized and generalized HRTFs for binaural synthesis”. Acoust. Sci. & Tech. 24, 5 (2003)
- [9] Fred Whitman und Doris Kistler: „Measurement and Validation of Human HRTFs for Use in Hearing Research“. Acta Acoustica United with Acustica, Vol. 91, p. 429 – 439, (2005)
- [10] Sennheiser:
http://reviews.cnet.com/4507-6468_7-6899579.html?tag=mncol;psum
- [11] Audio-Technica:
<http://www.audio-technica.com/cms/headphones/0a6d0f94aa9944ae/index.html>
- [12] Panasonic:
http://www.panasonic.de/html/de_DE/Produkte/Kopfhörer/In-Ohr-Hörer/RP-HV154/Übersicht/1866181/index.html
- [13] Brüel & Kjær:
<http://www.bksv.com>
- [14] Brüel & Kjær: Product Data - Head and Torso Simulators Type 4128-C and 4128-D
<http://www.bksv.com/doc/bp0521.pdf>
- [15] Udo Zölzer: “Digitale Audiosignalverarbeitung”. Wiesbaden: Teubner Verlag, 2005, 3. Auflage

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Peter Kölling, dass ich die von mir an der Hochschule für Telekommunikation Leipzig (HfTL) eingereichte Abschlussarbeit zum Thema

„Entwicklung einer Softwareumgebung zum Kopfhörerausgleich und deren Anwendung auf reale Messungen“

vollkommen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Leipzig, den ...

Unterschrift

Peter Kölling

Anlage 1: Auszug aus einer gespeicherten Datei, die die mit LabShop ermittelten Messdaten enthält

```

Header Size:      78
Pulse Version:   42
Decimal Symbol:  .
Date Format:      'yyyy-MM-dd'
Time Format:      'HH:mm:ss.mmm'
Data Type:       Complex
Slice:           False
Z-Axis type:     Linear
Z-Axis size:     1
Z-Axis unit:
Z-Axis first value: 0.0000000000e+000
Z-Axis delta:    1.0000000000e+000
X-Axis type:     Linear
X-Axis size:     6401 ----- Anzahl der gespeicherten Abtastwerte
X-Axis unit:     Hz
X-Axis first value: 0.0000000000e+000
X-Axis delta:    4.0000000000e+000
AmplitudeUnit:  Pa/V
Analyzer:        FFT_Spectrum_Averaging
AnalyzerName:    FFT Analyzer Left and Right
Bipolar:         True
CenterFrequency: 1.2800000000e+004 ----- ¼ der Abtastfrequenz in Hz
Domain:          1
Function:        Frequency Response
MultiBufferName: Input
NBW:             1.5000000000e+000
OverlapFailed:  False
Overrun:         False
Power:           False
Ratio:           True
RecordLength:   2.5000000000e-001
ReducedSize:    True
Ref_Signal:     excitation
RefSignalUnit:  V
Signal:         ear
SignalUnit:     Pa
Title:          Frequency Response H1(ear,excitation) - Input
Title1: Working : Input : Input : FFT Analyzer Left and Right
ZoomOn:         False
TemplateName:   Working
MeasurementName: Input
MeasurementSlice: False
EnvelopeOn:     False
    
```

Dateikopf

```

Z-index:        1
Date:           '2009-04-29'
Time:           '12:57:12.890'
Relative time:  0.00000e+000
Z-axis:         0.0000000000e+000
1  0.0000000000e+000 -4.88565e-003 0.00000e+000
2  4.0000000000e+000 -1.98561e-002 3.36129e-003
3  8.0000000000e+000 -5.91947e-002 1.06242e-001
4  1.2000000000e+001 1.15769e-001 3.26985e-001
5  1.6000000000e+001 5.77254e-001 2.98242e-001
6  2.0000000000e+001 8.91269e-001 -3.94744e-002
7  2.4000000000e+001 9.99215e-001 -4.84961e-001
8  2.8000000000e+001 9.73830e-001 -9.32528e-001
9  3.2000000000e+001 8.70005e-001 -1.28788e+000
10 3.6000000000e+001 6.77564e-001 -1.55462e+000
11 4.0000000000e+001 4.62953e-001 -1.76856e+000
12 4.4000000000e+001 1.93294e-001 -1.87559e+000
13 4.8000000000e+001 -2.76858e-002 -1.93824e+000
14 5.2000000000e+001 -5.19959e-002 -2.11486e+000
15 5.6000000000e+001 -2.47342e-001 -2.29517e+000
16 6.0000000000e+001 -5.40369e-001 -2.35416e+000
17 6.4000000000e+001 -7.92332e-001 -2.44029e+000
18 6.8000000000e+001 -1.02154e+000 -2.48005e+000
19 ...
    
```

Imaginärteil
Realteil
Frequenz

Einzelne Werte des
Frequenzspektrums