

Umsetzung eines Programms zur Sensibilisierung der auditiven Wahrnehmung in der Aufnahmetechnik

Klangfarbenbeeinflussung

Bachelorarbeit aus Aufnahmetechnik 1, SE

Martin Czuka

Betreuung: Dr. Alois Sontacchi

Graz, 22. Juni 2010



UNIVERSITÄT
FÜR MUSIK UND
DARSTELLENDEN KUNST
GRAZ - AUSTRIA

institut für elektronische musik und akustik



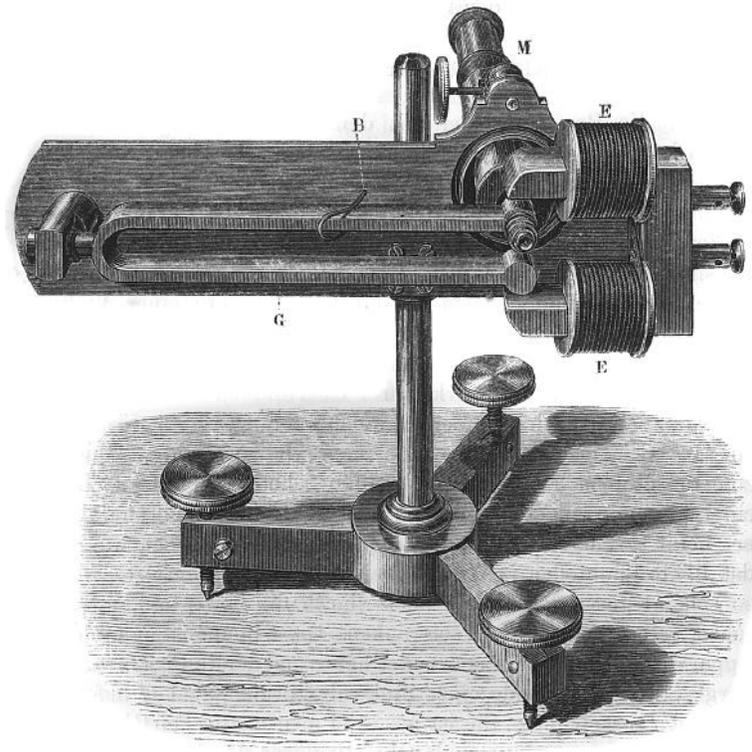
Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 22. Juni 2010



Martin Czuka



Vibrationsmikroskop, im Jahre 1860 entwickelt durch *Hermann von Helmholtz*. Bestehend aus einer Stimmgabel (G) und einem Elektromagneten (E), die an einer Metallplatte (M) befestigt sind, ist die Apparatur in der Lage, die Schwingungen von Saiteninstrumenten zu analysieren [1]

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to develop an interactive ear training software for sound engineers. A particular focus is on properties of music and sound that are relevant in sound-technical regard. These include the following three sub-areas:

- auditory perception of timbre control
- auditory perception of spatial aspects
- auditory perceptions of dynamic range

in audio signals.

In addition to evaluating a number of existing ear training applications like *Timbre Solfeggio* and *Timbral Ear Trainer*, the main part of the thesis deals with the perception of timbres in an audio signal. In this connection the theoretical foundations of analogue and digital filters as well as the term “timbre” were examined more closely. Based on this, the training application on the subject of “timbre” that has been developed within this thesis in *Matlab* and *Pure Data*, is explained together with its basis exercises.

Kurzfassung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, eine interaktive Hörtrainingssoftware für ToningenieurInnen zu entwickeln. Dabei wird der Fokus speziell auf die tontechnisch relevanten Eigenschaften von Musik und Klang gerichtet. Dazu gehören unter anderem die folgenden 3 Teilbereiche:

- auditive Wahrnehmung von Klangfarbenbeeinflussung
- auditive Wahrnehmung von räumlichen Aspekten
- auditive Wahrnehmung von Dynamikbeeinflussung

in Audiosignalen.

Neben der Evaluierung von verschiedenen bestehenden Hörtrainingsapplikationen wie *Timbre Solfeggio* und *Timbral Ear Trainer* beschäftigt sich der Hauptteil der Arbeit mit der Wahrnehmung von Klangfärbungen in einem Audiosignal. Hierbei werden die theoretischen Grundlagen von analogen und digitalen Filtern sowie der Begriff „Klangfarbe“ selbst einer genauen Betrachtung unterzogen. Aufbauend darauf wird die im Zuge der Arbeit in *Matlab* und *Pure Data* entwickelte Trainingsapplikation zum Bereich Klangfarbe mit ihren grundlegenden Übungen beschrieben

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	2
Abstract	4
Kurzfassung	5
1 Einleitung	8
1.1 Einführung, Problemstellung und Ziele	8
1.2 Struktur der Arbeit	10
1.3 Geschichtliche Entwicklung von Hörtrainingskursen.....	11
2 Die Klangfarbe	13
3 Analoge Filter	19
3.1 Systemgrundlagen.....	19
3.1.1 Linearität	21
3.1.2 Zeitinvarianz	22
3.1.3 Impulsantwort	23
3.1.4 Übertragungsfunktion	24
3.2 Filtergrundtypen.....	26
3.2.1 Tiefpass.....	27
3.2.2 Hochpass	30
3.2.3 Bandpass	31
3.2.4 Bandsperre	34
3.2.5 Allpass.....	36
3.2.6 Filter höherer Ordnung	36
4 Digitale Filter	38
4.1 Digitale Signalverarbeitung	38
4.1.1 Abtastung und Rekonstruktion	38
4.1.2 Grundlegende Rechenoperationen	39
4.2 Digitale Systemgrundlagen.....	40
4.3 Digitale Filtertypen.....	42
4.3.1 FIR-Filter	42
4.3.2 IIR-Filter	44

5	Gegenüberstellung vorhandener Gehörtrainingskurse und Software..	50
5.1	Timbre Solfeggio	50
5.1.1	Überblick.....	50
5.1.2	Zeitlicher Ablauf.....	53
5.2	Critical Listening Skills for Audio Professionals	54
5.3	Timbral Ear Trainer	57
5.3.1	Überblick.....	57
5.3.2	Übungstypen	60
5.3.3	Feedbackmöglichkeiten	61
6	Entwicklung der Software	63
6.1	Einleitung und Motivation	63
6.2	Funktionsübersicht der Programmversionen	64
6.3	Struktureller Aufbau der Gesamtsoftware	65
6.4	Aufbau des Bereiches Klangfarbe	68
6.4.1	<i>Figure t_main</i>	69
6.4.2	<i>Figure t_UE_choice</i>	70
6.4.3	<i>Figure t_UE_main</i>	71
6.4.4	<i>Figure t_UE_result</i>	73
6.4.5	<i>Pd-Patch timbre~.pd</i>	74
6.4.6	<i>Pd-Subpatch player</i>	76
6.5	Ausblick	77
7	Anhang	79
7.1	Beschreibung der Daten im File tutorx.txt.....	79
7.2	Beschreibung der Daten im File soundlibrary.txt.....	81
7.3	Beschreibung der Daten im File userdata.txt.....	81

1 Einleitung

1.1 Einführung, Problemstellung und Ziele

Das wohl wichtigste Werkzeug eines Toningenieurs / einer Toningenieurin ist das Gehör. Schon während der Ausbildung wird es darauf trainiert, Tonfolgen und Rhythmen zu erkennen. Dies befähigt einen Tontechniker / eine Tontechnikerin, musikalische Zusammenhänge zu verstehen und mit Musikern entsprechend zu kommunizieren. Eine große Hilfestellung zum Erlernen dieser Fähigkeiten bieten interaktive musikalische Gehörtrainingsprogramme am Computer.

Der ebenso wichtige Gegenpart zum musikalischen Gehör ist das tontechnische („*technical eartraining*“ [2]) Gehör. Dazu gehören unter anderem das Erkennen von störenden Frequenzbändern im Klangspektrum, sowie eine schnelle Frequenzzuordnung von Rückkopplungen. Diese Fähigkeiten können nur begrenzt während einer Livebeschallung oder im Studio trainiert werden. Umso wichtiger ist es, zu dieser Thematik eine effektive Übungsmöglichkeit auf Softwarebasis zu bieten. Und genau hier setzt diese Bachelorarbeit an.

Es soll der Grundstein für eine Software dieser Art mit den wichtigsten Basisübungen entwickelt werden. Besonderes Augenmerk wird auf die Praxisrelevanz der Trainingseinheiten, sowie auf die modulare Erweiterbarkeit der Übungen gelegt. Um eine nie endende Vielfalt an Übungsmöglichkeiten zu bieten, soll der / die Übende in der Lage sein, eigene Klangbeispiele in die Software zu laden – dadurch kann das Gehörtraining auf den individuellen musikalischen Arbeitsbereich (Genre, U-Musik, E-Musik) abgestimmt werden.

Als Basis für die softwaretechnische Entwicklung wird *Matlab* in Verbindung mit der graphischen Programmiersprache *Pure Data (PD)* verwendet. Erstere Entwicklungsumgebung übernimmt dabei die Funktion des Host, welcher dann die auf Echtzeitanwendungen spezialisierte Sprache *PD* für die notwendige Signalverarbeitung steuert.

Da es sich um ein Projekt größeren Umfanges handelt, sind die einzelnen Thematiken innerhalb des *tontechnischen Gehörtrainings* an folgende Personen aufgeteilt:

- Czuka Martin: Klangfarbenbeeinflussung
- Kapeller Raphael Dynamikbearbeitung [3]
- Kulmer Josef Räumliches Hören [4]

Für den Themenbereich „Klangfarbenbeeinflussung“ lassen sich daher **Problemstellungen** wie folgt formulieren:

- Welche Eigenschaften verbergen sich hinter dem Begriff Klangfarbe?
- In welcher Form können diese Eigenschaften technisch manipuliert werden?
- Wie können praxisrelevante Übungen zum Thema Klangfarbe didaktisch aufgebaut werden?
- Wie kann ein GUI¹ und die notwendige Signalverarbeitung für Übungen zum Thema Klangfarbe softwaretechnisch in *Matlab* und *Pd* implementiert werden?

Aus der Notwendigkeit einer klar definierten Richtung für die vorliegende Arbeit ergeben sich daraus **3 Zielsetzungen**:

- Vermittlung der notwendigen Theorie und Grundlagen im Bereich der analogen und digitalen Filter, sowie zum Begriff Klangfarbe selbst
- Recherche über bereits existierende tontechnische Gehörtrainingskurse für die Zusammenstellung eigener Übungen

¹ Graphical User Interface

- Implementierung der notwendigen Filter in *Pd*, welche über ein GUI in *Matlab* gesteuert werden können

1.2 Struktur der Arbeit

Die Arbeit wird in zwei große Bereiche gegliedert

1. Theoretische Grundlagen und Recherche
 - Kapitel 1.(3) Geschichtliche Entwicklung von Hörtrainingskursen
 - Kapitel 2: Die Klangfarbe
 - Kapitel 3: Analoge Filter
 - Kapitel 4: Digitale Filter
 - Kapitel 5: Gegenüberstellung vorhandener Hörtrainingskurse und Software

2. Implementierung und praktische Anwendung
 - Kapitel 6: Entwicklung der Software
 - Kapitel 7 Anhang

Im ersten Teil der Arbeit wird das notwendige Hintergrundwissen zu allen Fachbereichen vermittelt, welches als Basis für die Implementierung dient. Dieses Kapitel beginnt mit einem Abriss geschichtliche Entwicklung von Hörtrainingskursen. Anschließend wird in Kapitel 2 der Begriff „*Klangfarbe*“ mit seinen Facetten untersucht, gefolgt von der theoretischen Beschreibung *analoger Filter*. Der vierte Unterpunkt der Arbeit beschäftigt sich mit den Grundlagen *digitaler Filter*. Anschließend beschreibt Kapitel 5 ausgewählte Hörtrainingskurse bzw. Hörtrainingssoftware im Detail um daraus Erkenntnisse für die Gestaltung eigener Übungen zu finden. Im zweiten Teil der Arbeit werden die eigens realisierten Übungen technisch, als auch deren Bedienung, erklärt.

1.3 Geschichtliche Entwicklung von Gehörtrainingskursen

Zu Beginn dieses Exkurses in die geschichtliche Entwicklung des Gehörtrainingskurses soll angemerkt werden, dass hier immer die chronologischen Erstveröffentlichungen kurz umschrieben werden – eine genauere Betrachtung einzelner Trainingskurse in ihrer aktuellen Version² folgt in Kapitel 5.

Die Idee vom systematischen Training zur Unterscheidung von Klangattributen reicht bis in die siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts zurück, wo es noch unmöglich war, dies computergestützt zu realisieren. Damals entstand im Zuge immer komplexer werdender Technik, und den daraus folgenden neuen Möglichkeiten der Klanggestaltung, die Notwendigkeit für einen Trainingskurs für ToningenieurInnen. Deshalb wurde 1974 an der *Chopin Akademie der Musik* in Warschau ein Programm für TonmeisterInnen mit dem Namen „*Timbre Solfeggio* [2]“ ins Leben gerufen, der unter anderem die Sensibilität für Klangfarben(unterschiede) der TeilnehmerInnen fördern sollte. Der Lehrende des Kurses nimmt dabei an einer bestehenden Aufnahme mit Hilfe von technischem Equipment Änderungen im Klangspektrum vor. Die Studierenden müssen nun über das gleiche Equipment im A/B-Vergleich (A repräsentiert die Originalaufnahme und B die manipulierte) Aufnahme A so verändern, dass sie identisch zu B ist. Die Effizienz dieser Methode ist sehr hoch, da der Toningenieur / die Toningenieurin auch gleichzeitig lernt, mit den technischen Gerätschaften umzugehen. Auf der anderen Seite ist der Gesamtaufwand für ein Training dieser Art immens hoch – darum wurde 1982 von F.A. Everest [5] ein vollkommen unabhängiger Gehörtrainingskurs in Buchform mit beiliegenden Audiokassetten konzipiert. Auch für das Selbststudium geeignet, wird dabei das Hören von Klangfarbe- und Lautstärkeänderungen in aufbauender Form geschult.

1990 wurde an der *McGill Universität* [6] die Idee des *Timbre Solfeggio* fortgeführt. René Quesnel entwickelte eine computergesteuerte

² soweit verfügbar und zugänglich

Gehörtrainingsapplikation, welche weniger technische Ressourcen benötigt. Die Übungsmethoden basieren hierbei im Wesentlichen auf dem Kurs an der *Chopin Akademie*. Zu beachten ist, dass der Benutzer / die Benutzerin zwar über einen *Macintosh* die Applikation bedient, dieser jedoch noch keine einzige Audiosignalmanipulation intern berechnet. Ein ähnliches Projekt wurde 1993 von Brixen [7] am dänischen Institut für Akustik entwickelt. Auch hier werden über eine Software Midisteuersignale an die externen Signalprozessoren geschickt, welche die Audiosignalverarbeitung übernehmen. Im Gegensatz zu Quesnel [6] programmierte Brixen [7] jedoch die Bedienoberfläche für einen *Personal Computer*.

Im Jahr 1995 veröffentlichte Dave Moulton einen Gehörtrainingskurs [8] bestehend aus acht CDs, welcher die Themenbereiche Klangfarbe, räumliches Hören und Erkennung von Verzerrungen, Lautstärkenunterschiede, Kompression etc. behandelt. Der technische Aufwand zum Training wurde somit weiter reduziert.

Von Seite der Audioindustrie gab es 2001 die Vorstellung des firmeninternen Softwareprogramms „*So you want to be a Harmann Listener*“ durch Olive [9]. Ein entscheidender Fortschritt war hierbei die Ausführung der Signalverarbeitung im Computer selbst. Über ein Einstellungsmenü kann der Benutzer / die Benutzerin die Trainingsparameter selbst definieren und aus einer Liste von Musikstücken und rosa Rauschen wählen.

Anzumerken ist, dass nur die hier genannten Programme/Kurse kommerziell zugänglich sind: F.A. Everersts „*Critical Listening Skills for Audio Professionals*“ und Dave Moultons „*Golden Ears*“.

2 Die Klangfarbe

Heutzutage nehmen MusikerInnen, ToningenieurInnen, KomponistInnen, MusiktheoretikerInnen, Musikinteressierte – diese Liste könnte noch wesentlich länger sein – den Begriff Klangfarbe ohne zu zögern in den Mund und beschreiben damit allgemein den Charakter eines Klanges. Doch wie lautet eigentlich die Definition des Begriffes Klangfarbe? Bei einem Blick in die Literatur erhält man einen oft genannten Grundkonsens, zugleich erkennt man die Schwierigkeit, dieses Wort in seiner Gesamtheit zu beschreiben. Eine bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts [10] bekannte und gebräuchliche Definition, die 1960 von der *American Standards Association* (ASA) adaptiert wurde, lautet wie folgt:

„Klangfarbe ist jenes Merkmal eines Schallereignisses, wenn zwei Schallereignisse unter gleichen Umständen mit gleicher Lautheit und Tonhöhe erklingen und diese dennoch als unterschiedlich wahrgenommen werden“

American Standards Association 1960 [11]

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts nähert sich Hermann von Helmholtz in seinem Werk [12] mit folgendem Ansatz an den Begriff Klangfarbe heran:

„Wenn wir nun fragen, welcher äußeren physikalischen Verschiedenheit der Schallwellen die verschiedenen Klangfarbe entsprechen, so haben wir gesehen, dass die Weite der Schwingung, der Stärke, die Dauer der Schwingung der Tonhöhe entspricht. Von beiden kann die Klangfarbe nicht abhängig sein. Dann bleibt keine andere Möglichkeit übrig, als dass die Klangfarbe abhänge von der Art und Weise, wie die Bewegung innerhalb jeder einzelnen Schwingungsperiode vor sich geht“

Die Lehre von den Tonempfindungen 1863, Hermann von Helmholtz (Seite 31)

Anhand von Wasserwellen beschreibt Helmholtz sehr anschaulich, dass jeder Klang (Akustik)³ aus einer Grundschwingung und seinen ganzzahligen Vielfachen (harmonischen Obertönen) besteht. Dies entspricht aus mathematischer Sicht dem Prinzip der Fourierreihen, aufgestellt von dem französischen Physiker und Mathematiker Charles Fourier.

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cdot \cos(k2\pi f_0 t) + b_k \cdot \sin(k2\pi f_0 t)] \quad (2.1)$$

Musiktheoretisch ausgedrückt entspricht ein gespieltes c der Grundschwingung $f_0 = 130,8\text{Hz}$ und folgenden Obertönen:

- der erste Ton über dem c hat die 2-fache Frequenz des Grundtons. Dies entspricht einer Oktave und somit einem c'
- Multipliziert man die 130,8Hz mit dem Faktor 3, erhält man als Intervall eine Quint über der Oktave.
- Durch weitere Multiplikationen entstehen weitere (auch nicht reine) Intervalle. Je nach Klangfarbe stehen die Obertöne in bestimmten Amplitudenverhältnissen zueinander



Abbildung 2.1 Darstellung des Tones c und seiner natürlichen Obertöne

Carl Stumpf [10] erweitert diese Definition indem er betont, dass die Klangfarbe bei weitem nicht nur allein von der Stärke und Anzahl der Teiltöne abhängt

³ Die Definition von Klang in der Akustik divergiert von Begriff Klang in der Musik

„Zur Klangfarbe im weiteren Sinne gehören alle Eigenschaften, die dem Empfindungsmaterial als solches zukommen, also neben der Struktur aus Teiltönen auch die schon oben erwähnten äußeren aber darum doch keineswegs unwesentlichen Merkmale, vor allem die Art des Einsatzes und des Aushalten der Töne (man denke an das Klavier, an das eigentümlich schwerfällige Einsetzen des Horns u. a.), dann die zahlreichen Verschiedenheiten nach der Art des Streichens, Blasens, Zupfens (wobei auch die Stelle einen wesentlichen Unterschied macht) und die begleitenden Blase- Streich- und Anschlaggeräusche. Die Klangfarbe im engeren Sinne endlich ist objektiv identisch mit der Zusammensetzung aus Teiltönen, subjektiv mit der Gesamtheit der daraus entspringenden Komplexeigenschaften“

Die Sprachlaute: experimentell – phonetische Untersuchungen nebst einem Anhang über Instrumentalklänge, 1926, Carl Strumpf (S.390)

Anhand dieser Aussagen, die auf verschiedenen Experimenten [10, S.391, S.394] basieren, wird der Begriff Klangfarbe zu einer multidimensionalen Größe, da der zeitliche Verlauf der einzelnen Teiltöne ebenfalls ein entscheidender Faktor ist. Strumpf definiert außerdem die „Tonfarbe“, welche die Helligkeit, Breite und Stärke eines Schallereignisses umfasst.

Ausgehend von der 1960 eingeführten Definition der ASA [11], die einerseits als gültig angesehen werden kann – andererseits jedoch sehr allgemein formuliert ist, wurde die Bedeutung der Tonhöhe in einem Schallereignis (wenn vorhanden) außer Acht gelassen. Diese Annahme hat vor allem in der Klangfarbenforschung bei Musikinstrumenten Folgen. 1977 definiert Grey [13] einen Klangraum, in dem Instrumente nach drei Kriterien abgebildet werden:

Referenzklänge für diese Versuchsreihe untersucht werden. Damit alle Instrumente in äquivalenter Tonlage analysiert werden können, wurden die digital aufgenommenen Klangbeispiele entsprechend transponiert. Jener Vorgang hat auch einen Verschiebung der Formanten zur Folge.

Somit werden diese Ergebnisse immer wieder in Frage gestellt [14]. Deshalb soll an dieser Stelle noch eine weitere Definition für Eigenschaften der Klangfarbe von Schumann [15], in Form der *schumannschen Klangfarbengesetze* [16], aufgezeigt werden:

- **Formantenstreckengesetz**
Die charakteristische Klangfarbe eines Musikinstruments wird durch an feste Tonhöhen gebundene Frequenzbereiche (Formanten) bestimmt. Unabhängig von der Höhe des gespielten Grundtons weisen diese Frequenzregionen stärkere Partialtöne auf.
- **Akustisches Verschiebungsgesetz**
Umso höher die an einem Musikinstrument gespielte Intensität ist, desto weiter verschieben sich die Formantenbereiche in höhere Partialtöne.
- **Akustisches Sprunggesetz**
Bei sehr starker Tongebung springt der normalerweise untere Formantenbereich (wenn zwei vorhanden sind) in den höheren über und verstärkt diesen noch zusätzlich.
- **Formanten-Intervallgesetz**
Zusätzlich zu den fixierten Formantenbereichen ist das Intervall zwischen zwei Formantenbereichen mitentscheidend für den Klangfarbencharakter.

Der Begriff „Klangfarbe“ kann also weder mit allgemeinen, noch weitreichenden Definitionen in seiner Gesamtheit erfasst werden. Lediglich empirisch ermittelte

Gesetzmäßigkeiten, deren Ursprung oft viele Jahre zurückreicht, erfreuen sich allgemeiner Anerkennung.

3 Analoge Filter

Filter gibt es in nahezu jedem Gebiet der Naturwissenschaften – sie dienen im Allgemeinen zum Trennen, Aussieben oder Selektieren. Je nach Anwendungsbereich wird zum Beispiel in der Optik elektromagnetische Strahlung durch ein Filter so beeinflusst, dass nur das erwünschte Wellenlängenspektrum erhalten bleibt. Im Falle der Elektrotechnik werden bestimmte Signalfrequenzen in einem Strom- oder Spannungsverlauf angehoben oder abgesenkt. Im Folgenden bezieht sich diese Arbeit nur auf Filter im Bereich der Elektrotechnik. Dies bedeutet jedoch nicht, dass einige später erklärte Eigenschaften nicht auch auf Filter anderer Fachgebiete umgelegt werden können, da die Grundprinzipien immer gleich bleiben. Des Weiteren beschäftigt sich dieses Kapitel speziell mit analog realisierten Filtern, die heute noch weit verbreitet sind und oft als Vorbild für digitale Filter fungieren.

3.1 Systemgrundlagen

Jedes elektrische Netzwerk kann als *System* bezeichnet werden. Dabei wird im Normalfall die Spannung bzw. der Strom als *Eingangs- oder Ausgangsgröße* betrachtet, welche als *Signal* oder *Systemvariable* bzw. *Systemgröße* bezeichnet wird.

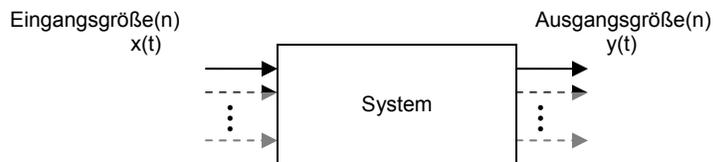


Abbildung 3.1 System mit seinen relevanten Größen

Ausgehend von der Annahme, dass die Zeit t jeden beliebig genauen Wert annehmen kann, sind alle Größen in einem System dieser Art zeitkontinuierlich. Erst durch Digitalisierung erfolgt der Übergang in ein zeitdiskretes System, welches in der behandelten Thematik auch wertediskret ist. Zur

Veranschaulichung des Systembegriffs werden zunächst zwei in der Audiotechnik relevante Beispiele herangezogen. Abbildung 3.2 zeigt ein Audiosignal vor und nach dem Durchlaufen eines Kompressors. Je nach Einstellung von Parametern wie *threshold* und *ratio* nimmt das System eine Dynamikeinengung vor, wodurch das Signal „verdichtet“ wird.

Bei der Abstrahlung von Schall in einem Raum wird durch die Reflektion der Wellen an Wand und Decke dem Direktschall ein Diffusanteil hinzugefügt. Misst man nun den Schalldruck mit einem Mikrophon sehr nahe an der Schallquelle und einem zweitem mitten im Raum, sehen die Signalverläufe wie in Abbildung 3.2 aus.

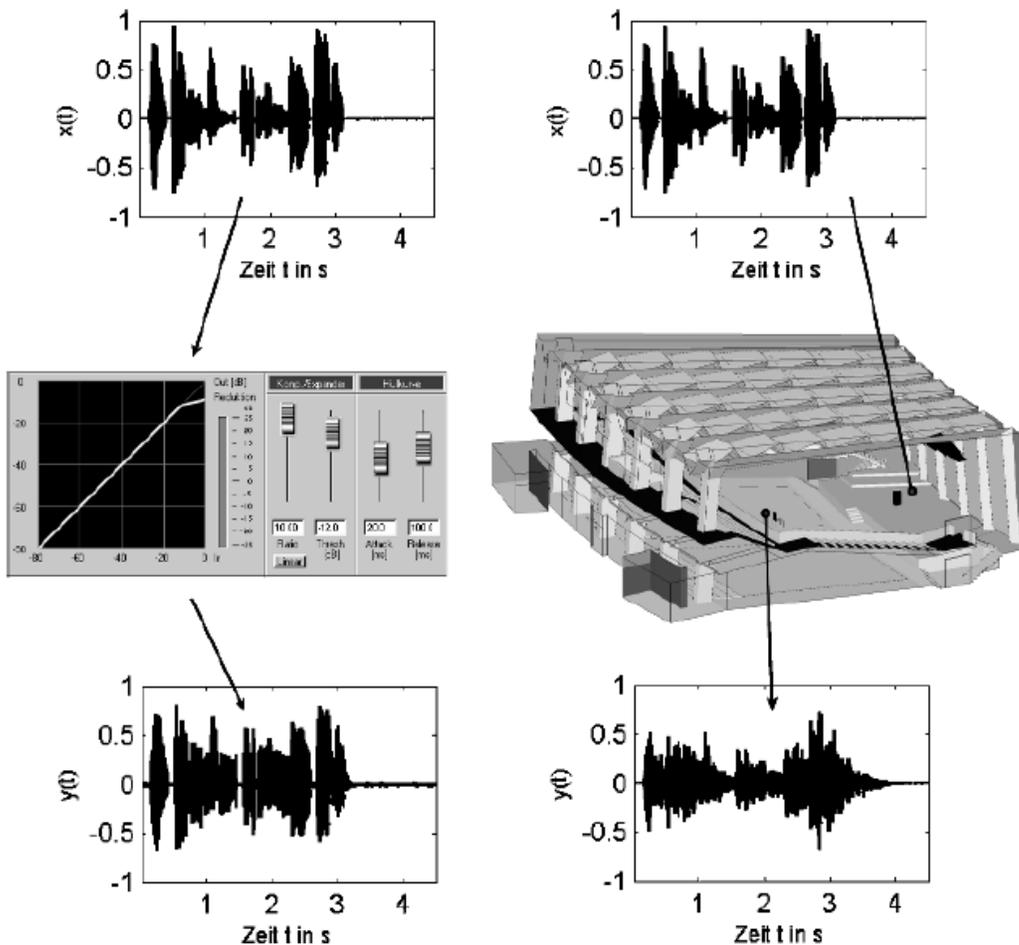


Abbildung 3.2 Links: Audiosignal vor (oben) und nach (unten) der Anwendung eines Kompressors
Rechts: Einfluss eines Raumes als System auf eine Schallquelle, bei Schalldruckmessung im Raum

In beiden Fällen handelt es sich um Systeme, denen jedoch andere Eigenschaften zuzuordnen sind, welche im Folgenden beschrieben werden.

3.1.1 Linearität

Dabei wird das zeitliche Verhalten aller relevanten Systemgrößen durch lineare mathematische Operationen beschrieben. Eine weitere Voraussetzung dafür ist die *Kausalität*. Diese legt fest, dass Ursache am Eingang und Wirkung am Ausgang direkt voneinander abhängig sind. Somit kann die Ausgangsgröße zum Zeitpunkt t nicht vom zukünftigen Verlauf der Eingangsgröße abhängig sein, sondern nur vom Signalverlauf aus der Vergangenheit. Aus diesen beiden Annahmen ergibt sich die Eigenschaft der Überlagerungsfähigkeit bzw. des *Superpositionsprinzips*, welches in Abbildung 3.3 graphisch dargestellt ist.

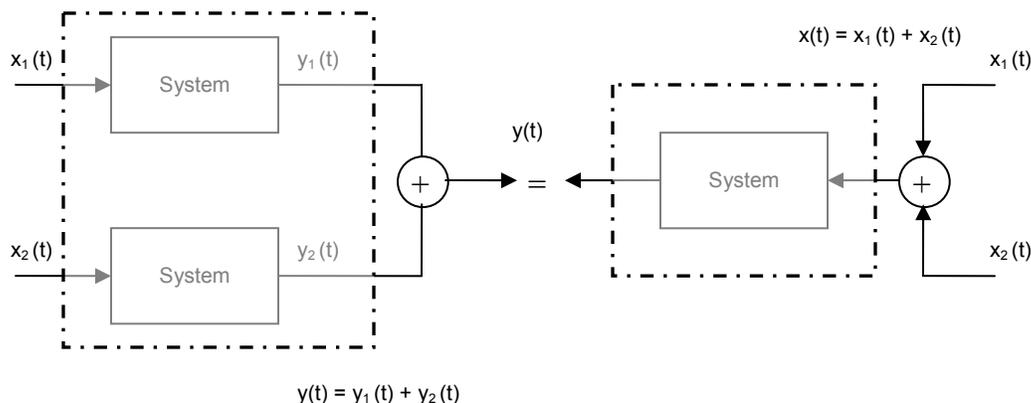


Abbildung 3.3 Superpositionsprinzip

Alle drei Systeme weisen hierbei exakt das gleiche Verhalten auf. Aus mathematischer Sicht kann dieser Sachverhalt folgendermaßen ausgedrückt werden.

$$\Gamma(x_1(t)) + \Gamma(x_2(t)) = \Gamma(x_1(t) + x_2(t)) \quad (3.1)$$

Der Γ - Operator entspricht der Abbildungsvorschrift des Systems am jeweiligen Ausgang.

Das zweite Merkmal der Linearität ist die „Proportionalität zwischen Ursache und Wirkung“. Wenn also an einem Leistungsverstärker ein um den Faktor α größeres Eingangssignal anliegt, dann erhält man an den Ausgangsklemmen ein ebenso um den Faktor α größeres Ausgangssignal.

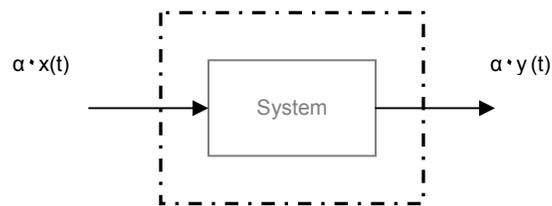


Abbildung 3.4 zur Proportionalität von LTI Systemen

$$\alpha \cdot y(t) = \Gamma(\alpha \cdot x(t)) \quad (3.2)$$

Im Falle des Audioverstärkers ist diese Linearität natürlich nur in einem gewissen Arbeitsbereich gegeben, da bei zu hohem Eingangspegel Verzerrungen auftreten. Wenn die beiden Eigenschaften nun zusammengefasst werden, entsteht folgende mathematische Beziehung:

$$\alpha \cdot \Gamma(x_1(t)) + \beta \cdot \Gamma(x_2(t)) = \Gamma(\alpha \cdot x_1(t) + \beta \cdot x_2(t)) \quad (3.3)$$

3.1.2 Zeitinvarianz

Wird ein *zeitinvariantes* System zum Zeitpunkt $t = t_0 + T$ durch ein Signal $x(t)$ angeregt, verhält es sich exakt gleich wie bei Anregung durch $x(t)$ zum Zeitpunkt t_0 .

$$\Gamma(x(t-T)) = \Gamma(x(t)) \quad (3.4)$$

Da nun die beiden Grundzüge eines LTI - Systems (*linear-timeinvariant*) bekannt sind, erfolgt an dieser Stelle die Klassifizierung der am Anfang des Kapitels angeführten Beispielsysteme.

Sobald ein Kompressor „arbeitet“, bildet er das Signal am Eingang nicht linear ab – dies ist natürlich auch im Sinne des Anwendungsprinzips. Ob nun ein Signal früher oder später am Eingang anliegt, spielt für den Kompressor keine Rolle. Deshalb liegt Zeitinvarianz vor.

Ein Raum hingegen ist näherungsweise ein klassisches LTI-System, wenn der Schalldruck nahe der Quelle oder im Raum gemessen wird.

Anhand der zwei genannten Beispiele erscheint es nun logisch, dass ein Filter zur Klangfarbenbeeinflussung ebenfalls linear und zeitinvariant ist (mit einigen Ausnahmen⁴). Somit kann ein Filter vollständig über seine Übertragungsfunktion oder Impulsantwort beschrieben werden.

3.1.3 Impulsantwort

Eine Möglichkeit zur Systembeschreibung besteht darin, einen Dirac-Impuls am Eingang anzulegen. Die Reaktion auf diesen (theoretisch) unendlich hohen und zeitlich unendlich schmalen Signalebene stellt die Impulsantwort $h(t)$ dar.

$$h(t) = \Gamma(\delta(t)) \quad (3.5)$$

Wenn $h(t)$ des Systems bekannt ist, lässt sich das Ausgangssignal über die Faltung des Eingangs mit der Impulsantwort berechnen.

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) \cdot h(t-\tau) \cdot d\tau \quad (3.6)$$

⁴ z. B. das Wah-Wah-Filter welches von einer E-Gitarre zur Klanggestaltung benutzt wird, ist ein zeitvariantes System

Beim Lösen des Faltungsintegrals handelt es sich um einen aufwändigen Berechnungsvorgang. Mit Hilfe der Digitaltechnik kann jedoch das Ergebnis der Faltungsoperation problemlos praktisch in Echtzeit berechnet werden. Ein klassisches Beispiel dafür ist ein Faltungshall, der heutzutage in fast jedem *Audiosequencer* integriert ist. Dabei wird das digitalisierte Audiosignal mit der Impulsantwort des Raumes gefaltet. Die Berechnung dabei erfolgt über die zeitdiskrete Faltungssumme (siehe Tabelle 4.1), die im Rahmen der digitalen Filter in Kapitel 4 behandelt wird.

3.1.4 Übertragungsfunktion

Unterwirft man die Gleichung (3.6) einer Fouriertransformation, erhält man

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega) \quad (3.7)$$

wobei $X(\omega)$ und $Y(\omega)$ die Fourier-Transformierten der Eingangs- bzw. der Ausgangsgröße sind. Die *Übertragungsfunktion* $H(\omega)$ entspricht dabei der fouriertransformierten Impulsantwort.

$$H(\omega) = F\{h(t)\} \quad (3.8)$$

Umgeformt erhält man folgende anschauliche Darstellung:

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{\text{"Ausgang"}}{\text{"Eingang"}} \quad (3.9)$$

Die *Übertragungsfunktion* eines Systems beschreibt im Allgemeinen den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße. Für die Systembeschreibung hat sich zwecks Einfachheit die Notation im Frequenzbereich etabliert. Durch die Fouriertransformation wird die

Faltungsoperation zweier Größen im Zeitbereich zu einer Multiplikation der transformierten Größen im Frequenzbereich.

Weiters hat sich das *Übertragungsmaß* in logarithmischer Form eingebürgert.

$$H(\omega)[dB] = 20 \cdot \log\left(\frac{Y(\omega)}{X(\omega)}\right) \quad (3.10)$$

Für die Audiotechnik hat sich die logarithmische Darstellung bewährt, da diese eher dem Reizempfinden des Ohres entspricht.

$H(\omega)$ liegt in der komplexen Zahlenebene vor, weshalb in der Beschreibung das *Betragspektrums* $|H(\omega)|$ und das *Phasenspektrums* $\arg\{H(\omega)\}$ verwendet wird.

$$|H(\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re}^2\{H(\omega)\} + \operatorname{Im}^2\{H(\omega)\}} \quad (3.11)$$

$$\arg\{H(\omega)\} = \arctan\left(\frac{\operatorname{Im}\{H(\omega)\}}{\operatorname{Re}\{H(\omega)\}}\right) \quad (3.12)$$

Über das *Betragspektrum* – auch *Frequenzgang der Amplitude* genannt⁵ - kann anhand eines kurzen Blickes das Frequenzverhalten eines Filters abgelesen werden. Das *Phasenspektrum* bzw. *Frequenzgang der Phase* beschreibt die Zeitverschiebung, die das Signal beim Durchlaufen des Systems erfährt. Daraus kann außerdem die *Phasenlaufzeit* $\tau_p(\omega)$ abgeleitet werden, die sich aus dem Quotienten von Phasenverschiebung zu Signalfrequenz ergibt.

$$\tau_p = -\frac{\arg\{H(\omega)\}}{\omega} \quad (3.13)$$

Darüber hinaus hat sich in der Audiotechnik noch die *Gruppenlaufzeit* $\tau_g(\omega)$ als Beschreibungsgröße eines Filters etabliert.

⁵ bezogen auf Systeme wird diese Bezeichnung am häufigsten angewandt

$$\tau_p = -\frac{d \arg\{H(\omega)\}}{d\omega} \quad (3.14)$$

Ist die Gruppenlaufzeit nicht konstant, werden unterschiedliche Signalfrequenzen zeitlich unterschiedlich durch das System verzögert. Eine konstante Gruppenlaufzeit ist zudem auch mit einem linearen Frequenzgang der Phase gleichzusetzen.

3.2 Filtergrundtypen

Wie bereits beschrieben, weisen Filter unter bestimmten Umständen lineares und zeitinvariantes Verhalten auf. Es gibt jedoch noch zahlreiche weitere Eigenschaften, durch die ein Audiofilter charakterisiert werden kann.

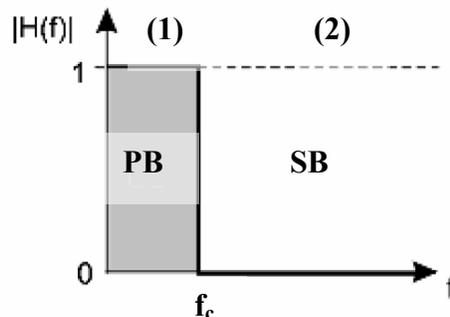


Abbildung 3.5 idealisiertes Tiefpass-Filter

Abbildung 2.1 zeigt ein idealisiertes Tiefpass-Filter, das in zwei Bereiche unterteilt ist. PB(1) stellt das sogenannte Passband dar, in dem Frequenzen bis f_c ungehindert „passieren“ können. Im Stopband (2) werden die entsprechenden Frequenzanteile ($f > f_c$) im Signal unendlich bedämpft. Darum handelt es sich hier um ein ideales Filter. In vielen technischen Fachrichtungen stellt dieses ein Optimum dar. Eine praktische Realisierung ist jedoch nicht möglich, da der perfekte Tiefpass eine *nichtkausale* Übertragungsfunktion besitzt. Für Klangbearbeitung ist ein ideales Filter eher selten erwünscht, da das Gehör steile Übergänge zwischen Pass- und Stopband als musikalisch sehr hart empfindet.

Deshalb trifft man in der Praxis auf Filter, die eine Übertragungsfunktion dieser Art (exemplarisch) aufweisen können.

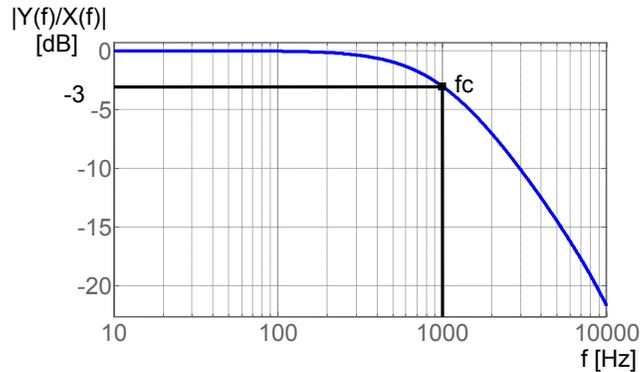


Abbildung 3.6 Übertragungsfunktion eines Tiefpass mit Butterworth-Charakteristik und einer Grenzfrequenz von $f_c = 1000\text{Hz}$

Abbildung 3.6 zeigt einen Tiefpass erster Ordnung mit *Butterworth*⁶ Charakteristik. Die *Grenzfrequenz (cutoff-frequency)* f_c definiert sich folgendermaßen:

$$\left| \frac{Y(f)}{X(f)} \right|_{f=f_c} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 \quad (3.15)$$

In ein Pegelmaß umgerechnet entspricht das den -3dB in der oberen Grafik. Wenn nicht anders vermerkt, gilt im Zusammenhang mit *Kreisgrenzfrequenz* bei allen *Übertragungsfunktionen*, die in dieser Arbeit behandelt werden.

$$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c \quad (3.16)$$

3.2.1 Tiefpass

Aus elektrotechnischer Sicht handelt es sich bei der einfachsten Realisierung⁷ um einen frequenzabhängigen Spannungsteiler, hier als RC-Glied ausgeführt.

⁶ wenn nicht extra angemerkt, weisen alle hier vorgestellten Filter Butterworth-Charakteristik auf

⁷ weitere Möglichkeiten wären z.B. über ein RL-Glied oder ein Switch-Capacitor-Filter

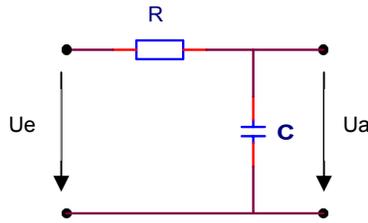


Abbildung 3.7 Tiefpass realisiert als RC-Glied

Mathematisch ausgedrückt besitzt ein *Tiefpass* 1. Ordnung die allgemeine frequenznormierte *Übertragungsfunktion* dieser Form:

$$H(\omega_n) = \frac{A_0}{1 + a_1 \cdot j\omega_n} \quad (3.17)$$

$$\text{mit } \omega_n = \frac{\omega}{\omega_c} \quad (3.18)$$

Bei einem passiven Filter ist die Gleichspannungsverstärkung $A_0 = 1$. Wird die *Übertragungsfunktion* über die *Spannungsteilerregel* gebildet, ergibt sich

$$H(\omega_n) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + RC\omega_c \cdot j\omega_n} \quad (3.19)$$

Wird zwischen (3.17) und (3.19) ein Koeffizientenvergleich durchgeführt, lässt sich folgende Beziehung ableiten

$$RC = \frac{a_1}{\omega_c} \quad \text{bzw.} \quad RC = \frac{a_1}{2\pi f_c} \quad (3.20)$$

Der *Filterkoeffizient* $a_1 = 1$ gilt für alle Filtertypen, wie der Koeffiziententabelle aus [17] entnommen werden kann. Aus (3.20) erhält man für die Grenzfrequenz

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.21)$$

Das *Betragspektrum* bzw. *Frequenzgang der Amplitude* ist bereits aus dem Einführungsbeispiel bekannt – da es sich um ein Filter 1.Ordnung handelt, beträgt die Absenkung über der *Grenzfrequenz* 20dB/Dekade bzw. 6dB/Oktave. Dies folgt aus den Eigenschaften des Kondensators, dessen Blindwiderstand mit steigender Frequenz f betragsmäßig absinkt und so den Spannungsteiler beeinflusst. Am *Frequenzgang der Phase* lässt sich leicht erkennen, dass mit zunehmender Frequenz im Verhältnis zur *Grenzfrequenz* die Phasenverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal zunimmt. Bei $f / f_c = 1$ liegt die Verschiebung genau bei $\pi / 4$.

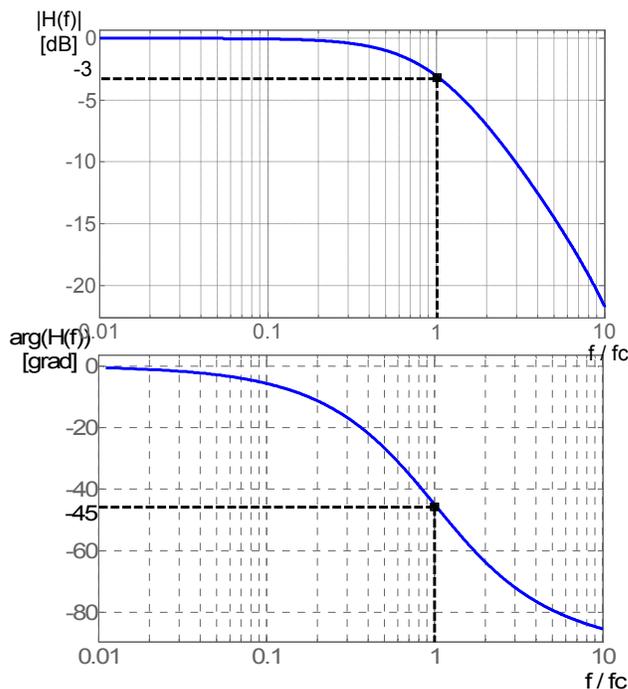


Abbildung 3.8

Betrags- und Phasenspektrum eines Tiefpass 1.Ordnung. Für eine allgemein gültige Aussage ist $H(f)$ über die horizontale Achse logarithmisch im Verhältnis zur Grenzfrequenz dargestellt. Für einen direkteren Bezug zu Audiotechnik anstatt der Kreisfrequenz ω die Frequenz f abgebildet, da diese direkt in eine Tonhöhe umgerechnet werden kann.

3.2.2 Hochpass

Als zweiter Filtergrundtyp kann der *Hochpass* ebenso einfach realisiert werden wie der Tiefpass. Abbildung 3.9 zeigt, dass Kondensator und Widerstand im Vergleich zu Abbildung 3.7 nur vertauscht sind.

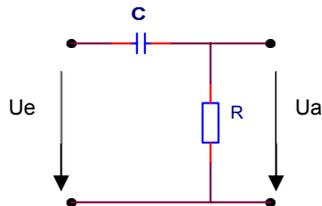


Abbildung 3.9 Hochpass in Form eines RC-Glieds

Beim Bilden der *Übertragungsfunktion* kann der *Amplitudengang* eines Tiefpass graphisch an der *Grenzfrequenz* f_c gespiegelt werden, was mathematisch der Ersetzung von $j\omega_n$ durch $1/j\omega_n$ entspricht⁸.

$$H(\omega_n) = \frac{A_0}{1 + a_1 \cdot \frac{1}{j\omega_n}} \quad (3.22)$$

$$H(\omega_n) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{RC\omega_c} \cdot \frac{1}{j\omega_n}} \quad (3.23)$$

Analog zum Tiefpass führt ein Koeffizientenvergleich von (3.22) und (3.23) zu:

$$RC = \frac{a_1}{2\pi f_c} \rightarrow f_g = \frac{1}{2\pi RC \cdot a_1} \quad (3.24)$$

Für $a_1 = 1$ haben Hoch- und Tiefpass die gleiche Formel für die *Grenzfrequenz*. Bei sehr tiefen Frequenzen eilt das Ausgangssignal aufgrund der kapazitiven Wirkung des Kondensators dem Eingang um 90° voraus. Im höheren

⁸ Dieses Verfahren wird in der Literatur [17] auch als Tiefpass-Hochpass-Transformation bezeichnet

Frequenzbereich wird die *Impedanz* des Spannungsteilers maßgeblich durch den Widerstand bestimmt, womit im Idealfall die beiden Signale in Phase sind. In der Audiotechnik findet man diesen Filtertyp mit einer *Grenzfrequenz* zwischen 60 – 120 Hz oft am Eingang eines Mischpultkanals, damit Trittschall abgedämpft werden kann, der vom jeweiligen Mikrofon aufgenommen wird.

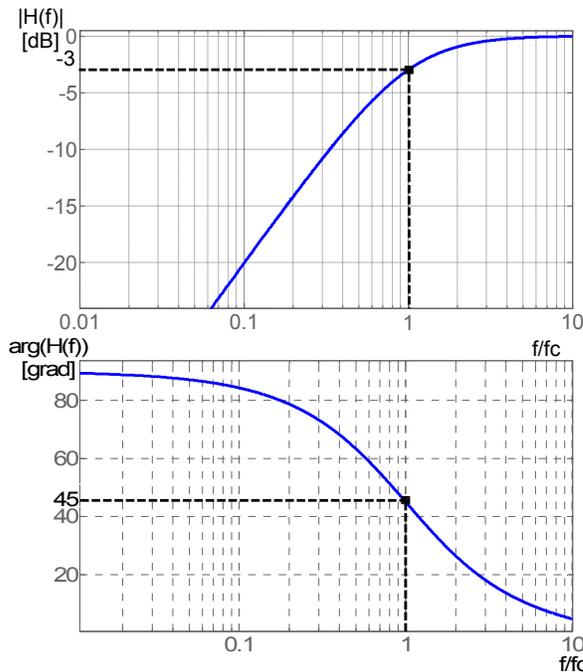


Abbildung 3.10
Betrags- und Phasenspektrum eines Hochpass 1.Ordnung

3.2.3 Bandpass

Wenn ein von oben und unten begrenzter Frequenzbereich im Signalspektrum erwünscht ist, wird ein *Bandpass* eingesetzt. Dabei wird das selektierte Frequenzband von $f_{c,l}$ und $f_{c,h}$ begrenzt. Theoretisch können diese beliebig gewählt werden, in der Praxis trifft man in der Audiotechnik oft auf ein Terz- oder Oktavfilter, mit den entsprechenden Zahlenverhältnissen realisiert. Die Mittenfrequenz f_r eines Bandpassfilters berechnet sich aus dem geometrischen Mittel.

$$f_r = \sqrt{f_{c,l} \cdot f_{c,h}} \quad (3.25)$$

Im Falle einer frequenznormierten Darstellung lässt sich damit die *normierte Bandbreite*

$$\Delta\omega_n = \omega_{n,l} - \omega_{n,h} \quad (3.26)$$

auf Basis von (3.18) angeben. Anhand der *Tiefpass-Bandpass-Transformation* wird in (3.17) $j\omega_n$ durch den Ausdruck

$$\frac{1}{\Delta\omega_n} \cdot \left(j\omega_n + \frac{1}{j\omega_n} \right)$$

ersetzt. Dabei erhält man eine *Übertragungsfunktion* folgender Form:

$$H(\omega_n) = \frac{A_0}{1 + \frac{1}{\Delta\omega_n} \cdot \left(j\omega_n + \frac{1}{j\omega_n} \right)} = \frac{A_0 \Delta\omega_n j\omega_n}{1 + \Delta\omega_n j\omega_n + (j\omega_n)^2} \quad (3.27)$$

Wenn nun analog zu einem Schwingkreis die *Güte* des Filters mit $Q = f_0 / B$ definiert wird, entsteht ein Zusammenhang mit

$$Q = \frac{f_r}{B} = \frac{f_r}{f_{c,h} - f_{c,l}} = \frac{1}{\omega_{n,h} - \omega_{n,l}} = \frac{1}{\Delta\omega_n} \quad (3.28)$$

Wird (3.28) in (3.27) eingesetzt und $A_0 = A_r$ gesetzt, folgt daraus

$$H(\omega_n) = \frac{(A_r / Q) j\omega_n}{1 + \frac{1}{Q} j\omega_n + (j\omega_n)^2} \quad (3.29)$$

Eine Möglichkeit zur Realisierung eines *Bandpass* ist die Serienschaltung aus *Tief-* und *Hochpass* 1.Ordnung. Um die Möglichkeit einer Beeinflussung des Tiefpassfilters durch nachfolgende Impedanzen auszuschalten, wird zwischen

den beiden Teilfiltern ein Operationsverstärker als Impedanzwandler eingebunden.

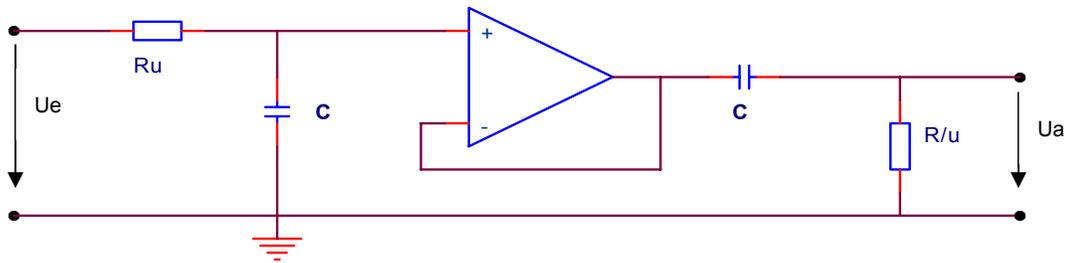


Abbildung 3.11 Bandpass aus Tief- und Hochpass erster Ordnung

Für einen *Bandpass* dieser Form ergibt sich die *Übertragungsfunktion* aus der Multiplikation von *Tief-* und *Hochpass*

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{1}{uj\omega RC}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{j\omega RC}{u}} = \frac{uj\omega RC}{1 + \frac{1+u^2}{u}j\omega RC + (j\omega RC)^2} \quad (3.30)$$

Die Normierung erfolgt hier auf die *Resonanzkreisfrequenz* $\omega_r = 1/RC$ wodurch man

$$H(\omega_n) = \frac{uj\omega_n}{1 + \frac{1+u^2}{u}j\omega_n + (j\omega_n)^2} \quad (3.31)$$

erhält. Mit $A_r = 1$ lässt sich über einen Koeffizientenvergleich mit (3.29) die Güte berechnen:

$$Q = \frac{u}{1+u^2} \quad (3.32)$$

Daraus lässt sich ableiten, dass mit einem passiven *Bandpass* in dieser Form eine maximale Güte von $Q = 0.5$ erreichbar ist. Eine schmalbandigere Filterung⁹ wird in der Regel mit Schwingkreisen oder RC-rückgekoppelten Operationsverstärkerschaltungen realisiert [17].

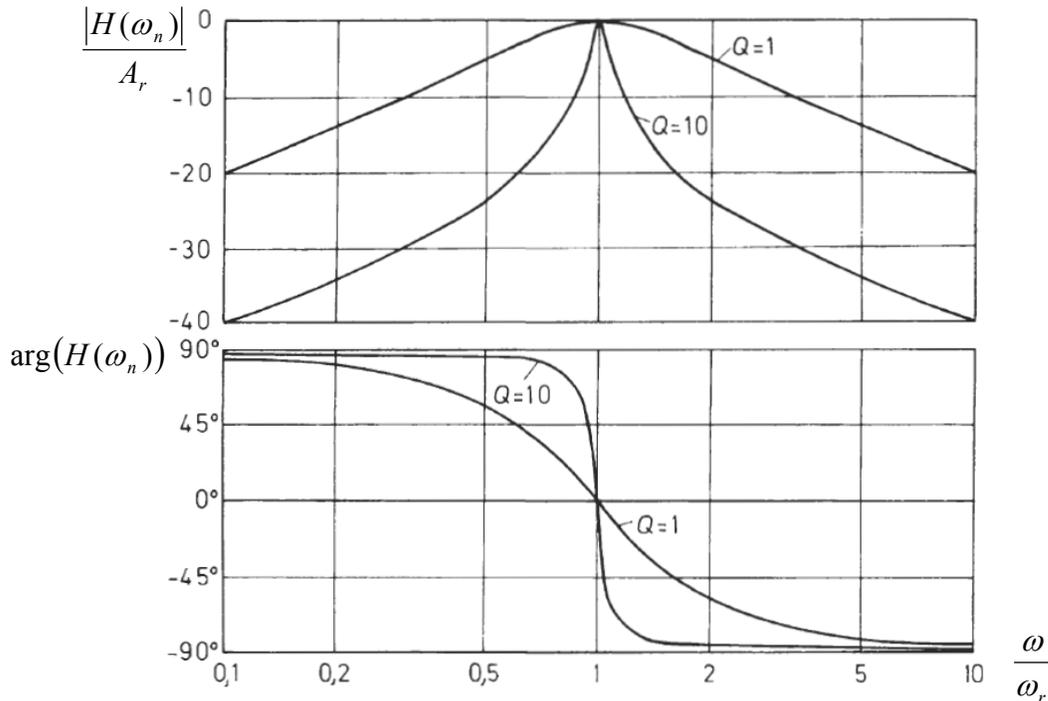


Abbildung 3.12 Amplituden- und Phasengang für Bandpassfilter 2. Ordnung mit einer Güte von $Q = 1$ und $Q = 10$

3.2.4 Bandsperre

Wird statt eines bestimmten Durchlassbereichs wie in Kapitel 3.2.3 ein selektiver Sperrbereich gefordert, spricht man von einem *Sperrfilter* oder *Bandsperre*. Über die *Tiefpass-Bandsperre-Transformation* kann aus einem Tiefpassfilter eine *Bandsperre* erzeugt werden. Der Ausdruck $j\omega_n$ wird dabei durch

$$\frac{\Delta\omega_n}{j\omega_n + \frac{1}{j\omega_n}}$$

⁹ Eine Güte $Q > 0.5$ bewirkt komplexe Nullstellen im Nenner von (3.29)

substituiert. Umso größer die Güte¹⁰ $Q = f_r / B$ aus Gleichung (3.28) ist, desto stärker fällt die Dämpfung um f_r herum aus. Beim Einsetzen des Substituts in (3.17) folgt daraus:

$$H(\omega_n) = \frac{A_0(1+(j\omega_n)^2)}{1+\Delta\omega_n j\omega_n + (j\omega_n)^2} = \frac{A_0(1+(j\omega_n)^2)}{1+\frac{1}{Q}j\omega_n + (j\omega_n)^2} \quad (3.33)$$

Da das Nennerpolynom aus (3.33) identisch mit jenem aus (3.29) ist, sind auch hier mit reellen Nullstellen keine Güten größer als $Q = 0.5$ zu erreichen. Eine schmalbandigere Filterung kann mit RLC-Schaltungen oder aktiven RC-Schaltungen realisiert werden.

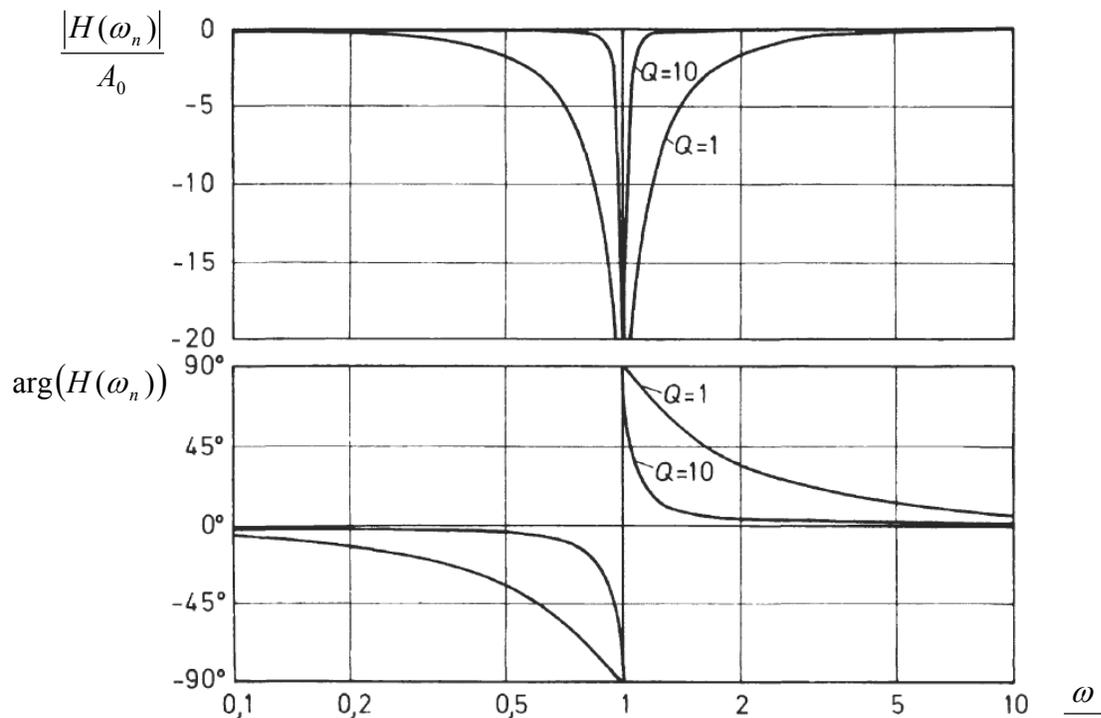


Abbildung 3.13 Betrags- und Phasenspektrum für Bandsperren 2. Ordnung mit einer Güte¹⁰ von $Q = 1$ und $Q = 10$

¹⁰ auch als *Unterdrückungsgüte* bezeichnet

3.2.5 Allpass

Dieser Filtertyp wird in der Audiotechnik meist nur in Kombination mit anderen Filtern eingesetzt¹¹. Sein digitales Gegenstück bildet die Basis für viele IIR-Filter, die in Kapitel 4 beschrieben werden.

Die allgemeine *Übertragungsfunktion* für einen *Allpass* 1. Ordnung lässt sich über (3.17) mit der Ersetzung von A_0 durch das konjugiert komplexe Nennerpolynom herleiten:

$$H(\omega_n) = \frac{1 - a_1 j \omega_n}{1 + a_1 j \omega_n} \quad (3.34)$$

Anhand von (3.34) ist die Forderung einer konstanten Verstärkung bereits erfüllt. Ein Nebeneffekt dabei ist die doppelte Phasenverschiebung im Verhältnis zu Abbildung 3.6. Die zweite Forderung an einen *Allpass* besteht darin, dass er in einem möglich großen Frequenzbereich eine konstante Gruppenlaufzeit¹² aufweist. Zu diesem Zweck wird *Grenzfrequenz* f_c nicht auf die -3dB-Grenze gesetzt, sondern so definiert, dass an ihr die Gruppenlaufzeit bei $\omega_n = 1$ auf das $1/\sqrt{2}$ -fache des Wertes¹³ bei niedrigen Frequenzen abgesunken ist. Dies kann mit dem Ansatz in [18] unter Bestimmung der Filterkoeffizienten erreicht werden.

3.2.6 Filter höherer Ordnung

Die in Kapitel 3.2 beschriebenen Filtertypen besitzen einen Ordnungsgrad von 1 oder 2. Soll nun ein Filter höhere Ordnung entworfen werden, gilt dafür folgender Ansatz:

$$H(\omega_n) = \frac{A_0}{\prod_i (1 + a_i j \omega_n + b_i (j \omega_n)^2)} \quad (3.35)$$

¹¹ wie zur Phasenzerrung oder zur Signalverzögerung

¹² wie in (3.14) definiert

¹³ bzw. bei 90° Phasenverschiebung im Fall eines Allpass 1. Ordnung

Es handelt sich dabei um die allgemeine *Übertragungsfunktion* eines Tiefpassfilters für beliebige Ordnungszahlen. Die bereits behandelten Filtertypen weisen alle $b_1 = 0$ auf, wie in [17, S. 854] entnommen werden kann. Bei Anwendung der entsprechenden Transformation des *Tiefpass* in einen anderen Filtertyp, kann somit ein beliebiges Filter höherer Ordnung realisiert werden.

4 Digitale Filter

Nachdem in Kapitel 3 die Grundlagen für Filter im analogen Bereich behandelt wurden, gilt es nun die Grundlagen und Realisierungsmöglichkeiten von digitalen Filtern aufzuzeigen.

4.1 Digitale Signalverarbeitung

4.1.1 Abtastung und Rekonstruktion

Soll ein analoges Signal $x(t)$ für die *digitale Signalverarbeitung* nutzbar gemacht werden, muss es mittels Analog/Digital-Umsetzer (*Analog/Digital-Converter*) zu diskreten Zeitpunkten abgetastet werden. Die *Abtastfrequenz* f_s muss dabei größer als die doppelte Bandbreite des Audiosignal sein¹⁴.

$$f_s > 2 \cdot (f_{\max} - f_{\min}) \quad (4.1)$$

In Folge der *A/D-Wandlung* wird das zeit- und wertkontinuierliche Signal $x(t)$ in ein zeit- und wertdiskretes Signal $x[n]$ umgewandelt. Dabei wird zu jedem Abtastzeitpunkt eine Quantisierung der am ADC anliegenden Größe vorgenommen. Je Nach Wortbreite erfolgt die Wandlung meist mit mindestens 16Bit, was eine Amplitudenunterteilung in 2^{16} Stufen möglich macht. Umgerechnet auf den Wertevorrat für die positive Elongation im Signal ergeben sich $(2^{16} / 2) - 1 = 32767$ Werte. Zur grafischen Veranschaulichung sind in *Abbildung 4.1 Abtastung, digitale Signalverarbeitung und Rekonstruktion* eines Audiosignals an einem einfachen Beispiel dargestellt.

¹⁴ auch als Nyquist-Shannon-Abtasttheorem bekannt

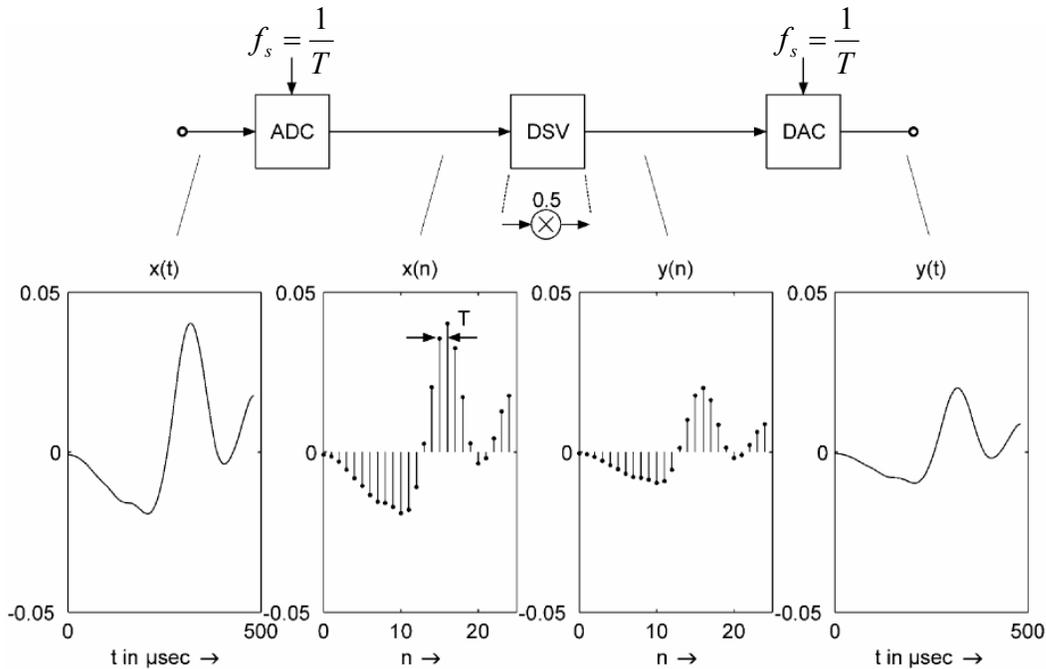


Abbildung 4.1 Abtastung, digitale Signalverarbeitung und Rekonstruktion eines Audiosignals [

4.1.2 Grundlegende Rechenoperationen

In der *digitalen Signalverarbeitung* gibt es drei Grundoperationen, die auf die einzelnen Elemente des Eingangssignals $x[n]$ angewendet werden können.

- *Gewichtung eines Signals*

Mit einem beliebigen Faktor α am Eingang multipliziert verhält sich der Ausgang mit $y[n] = \alpha \cdot x[n]$.

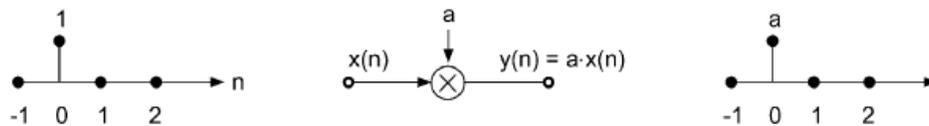


Abbildung 4.2 Gewichtung eines zeitdiskreten Signals $x[n]$ mit dem Faktor a

- *Summation von Signalen*

Dabei werden die einzelnen Element zweier Signale $x_1[n]$ und $x_2[n]$ addiert.

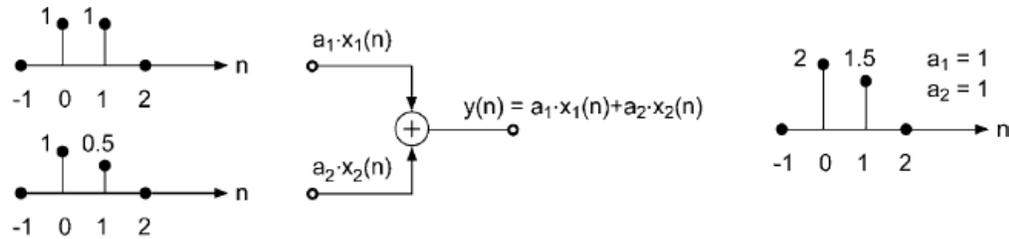


Abbildung 4.3 Summation von gewichteten Signalen

- *Verzögerung eines Signals*

Das Signal $x[n]$ wird im internen Speicher um M Stellen verschoben, wobei eine Speicherstelle einem Abtastzeitpunkt entspricht. Mathematisch ausgedrückt liefert das Ausgangssignal $y[n] = x[n - M]$.

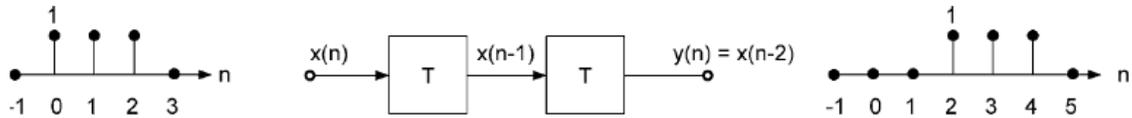


Abbildung 4.4 Verzögerung des Signals $x[n]$

Bei Abtastung mit $f_s = 44,1kHz$ entspricht die Verzögerung um ein Sample einer Zeitdauer von $t_s = 22,68\mu s$.

Diese 3 Grundoperationen lassen sich so kombinieren, dass über komplexe Rechenvorschriften *Filteralgorithmen* aller Art realisiert werden können. Eine Verknüpfung aller zuvor beschriebenen Verfahren zur Manipulation des Signals $x[n]$ wird als *Filteroperation* bezeichnet.

4.2 Digitale Systemgrundlagen

Analog zur Beschreibung eines analogen Filters als zeit- und wertekontinuierliches System kann ein digitaler Filter als zeit- und wertediskretes System dargestellt werden. Dabei kann das System ebenso Eigenschaften wie Linearität und Zeitinvarianz besitzen.

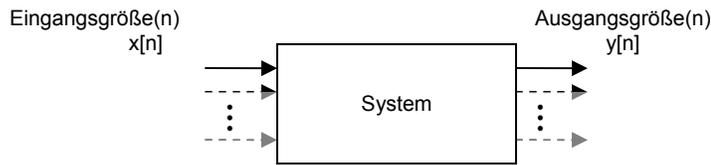


Abbildung 4.5 digitales System

Die in Kapitel 3.1 beschriebenen Systemgrößen haben in der zeitdiskreten Welt die gleichen Bedeutungen und sind in Tabelle 4.1 ihrem zeitkontinuierlichen Äquivalent gegenübergestellt.

	zeitkontinuierlich	zeitdiskret
Impulsantwort	$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega) e^{j\omega t} d\omega$	$h[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} X[f] e^{j2\pi f n / f_s} d\Omega$
Übertragungsfunktion	$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}$	$H[f] = \frac{Y[f]}{X[f]}$
Betragspektrum	$ H(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2\{H(\omega)\} + \text{Im}^2\{H(\omega)\}}$	$ H[f] = \sqrt{\text{Re}^2\{H[f]\} + \text{Im}^2\{H[f]\}}$
Phasenspektrum	$\arg\{H(\omega)\} = \arctan\left(\frac{\text{Im}\{H(\omega)\}}{\text{Re}\{H(\omega)\}}\right)$	$\arg\{H[f]\} = \arctan\left(\frac{\text{Im}\{H[f]\}}{\text{Re}\{H[f]\}}\right)$
Faltungsoperation	$y(t) = \int_0^t x(\tau) \cdot h(t - \tau) \cdot d\tau$	$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{m=0}^{N-1} h[m] \cdot x[n - m]$

Tabelle 4.1 Gegenüberstellung zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter Systemgrößen

Die *Übertragungsfunktion* $H[f]$ im diskreten Bereich basiert auf zeitdiskretem Eingangs- und Ausgangssignal – da im allgemeinen Fall ein aperiodisches Signal ein kontinuierliches Spektrum besitzt, müsste eigentlich $H(f)$ geschrieben werden. Um eine Verwechslung mit der *zeitkontinuierlichen*

Übertragungsfunktion zu vermeiden, wird diese (nicht ganz formelle) Beschriftung im Textfluss gewählt.

Das *Faltungsintegral* entspricht einer *Faltungssumme* im zeitdiskreten Bereich und wird damit zu einfach ermittelbaren Größe¹⁵, die grafisch in einem Blockschaltbild dargestellt werden kann.

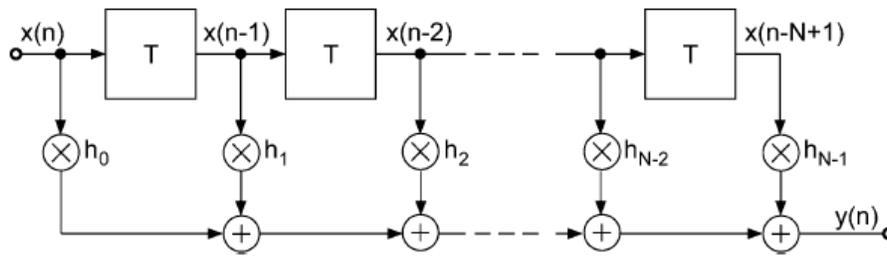


Abbildung 4.6 schematische Darstellung der Faltungssumme als Verzögerung und gewichtete Summation eines Signals

Ein System kann allgemein auch über die Faltungsoperation beschrieben werden. Somit ist es möglich einen digitalen Filter über eine *zeitdiskrete Faltungssumme* oder die äquivalente *Differenzgleichung* zu beschreiben.

Die *Impulsantwort* kann je nach Systemeigenschaften eine endliche oder unendliche Länge aufweisen. Man bezeichnet ein Filter mit ersterem als FIR-System (*Finite Impuls Response*) – besitzt $h[n]$ eine unendliche Länge, liegt ein IIR-System (*Infinite Impulse Response*) vor.

4.3 Digitale Filtertypen

4.3.1 FIR-Filter

Durch die *endliche Impulsantwort* $h[n]$ als Grundeigenschaft, ergibt sich das Ausgangssignal $y[n]$ über eine *endliche Faltungssumme*.

¹⁵ nur wenn N endlich ist

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{m=0}^{N-1} h[m] \cdot x[n-m] \quad (4.2)$$

Als beispielhaftes Blockschaltbild eines FIR-Filters kann Abbildung 4.6 herangezogen werden. Daraus ist ersichtlich, dass sich das Ausgangssignal nur aus Werten des Eingangssignals berechnen lässt. Es handelt sich somit um ein *rückkopplungsfreies* System.

Ein wesentlicher Vorteil eines FIR-Filters besteht darin, dass über spezielle Entwurfsverfahren (Zölzer 2005) *linearphasige* System entworfen werden können. Die *Impulsantwort* des Filters ist dann symmetrisch wie in Abbildung 4.7

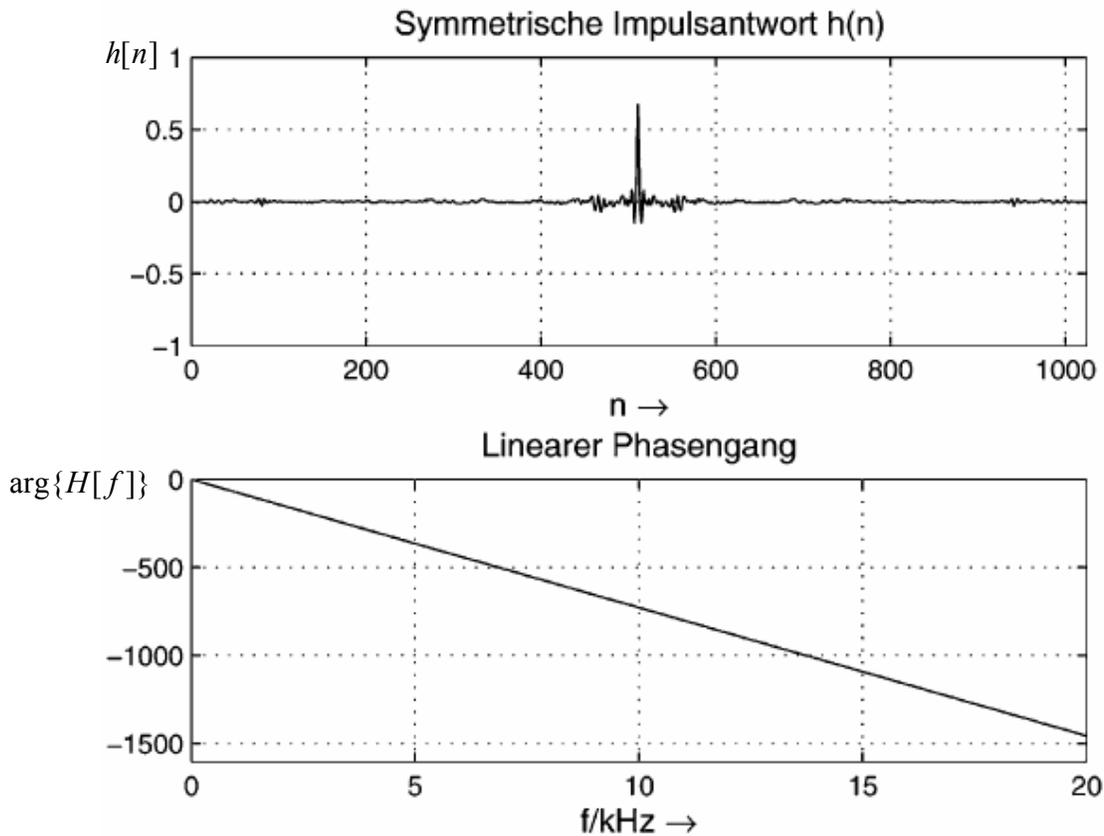


Abbildung 4.7 Impulsantwort und Phasenspektrum eines linearphasigen FIR-Filter mit der Länge $N = 1024$

Daraus lässt sich eine konstante Gruppenlaufzeit $\tau_g(\omega)$ ableiten, was eine frequenzunabhängige Verzögerung des Eingangssignals um $(N-1) \cdot T/2$ bedeutet

4.3.2 IIR-Filter

Die *unendliche Impulsantwort* $h[n]$ bewirkt eine *unendliche Faltungssumme*, welche auch über folgende *Differenzgleichung* beschrieben werden kann:

$$y[n] = \sum_{m=0}^{\infty} h[m] \cdot x[n-m] = \sum_{m=0}^{N-1} b[m] \cdot x[n-m] - \sum_{m=0}^{M-1} a[m] \cdot y[n-m] \quad (4.3)$$

Gleichung (4.3) lässt sich über die drei Grundoperationen der *digitalen Signalverarbeitung* in einem Blockschaltbild darstellen

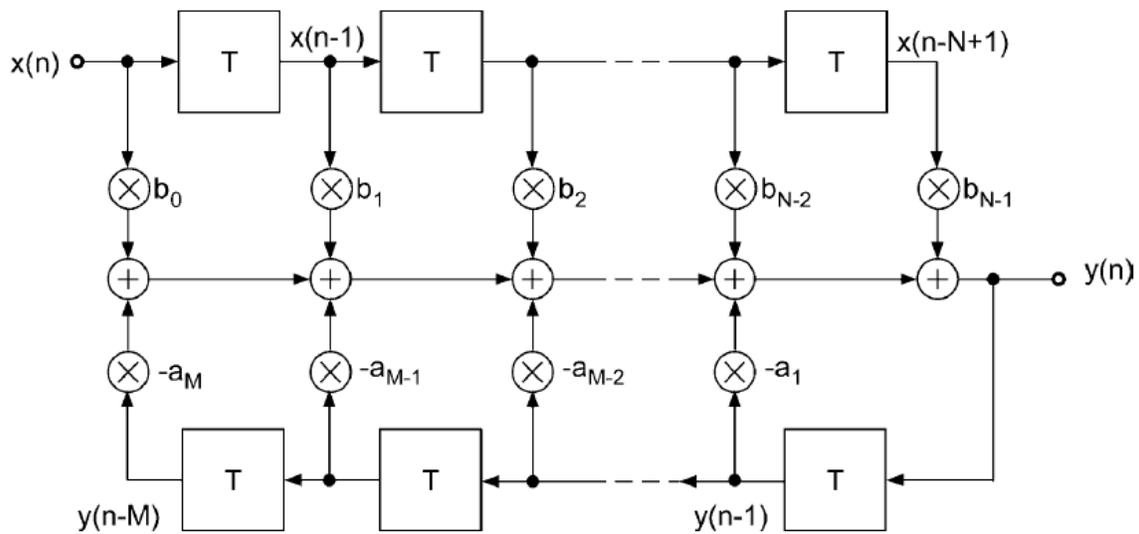


Abbildung 4.8 Blockschaltbild eines IIR-Filters der Ordnung $M > N-1$

Obwohl der IIR-Filter einen rekursiven Aufbau besitzt, kann es auch als eine Kombination von zwei FIR-Filtern interpretiert werden. Das Eingangssignal $x[n]$ wird mit einem vorwärtsgerichteten FIR-Filter gefaltet, zusätzlich wird $y[n]$ über ein rückwärtsgerichtetes FIR-Filter rückgekoppelt. Je nach Ordnung des

gewünschten Filters werden mehrere FIR-Systeme in Serie geschaltet. Bei einem Filter 2. Ordnung ergibt sich für die *Differenzgleichung* bzw. *Übertragungsfunktion*:

$$y[n] = b_0 \cdot x[n] + b_1 \cdot x[n-1] + b_2 \cdot x[n-2] - a_1 \cdot y[n-1] - a_2 \cdot y[n-2] \quad (4.4)$$

$$H[f] = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} b(n) e^{-j2\pi \cdot n f / f_s}}{1 + \sum_{n=1}^M a(n) e^{-j2\pi \cdot n f / f_s}} \quad (4.5)$$

Wird die DTFT aus Gleichung (4.5) in die *Z-Transformation* übergeführt, ergibt sich:

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (4.6)$$

Ein digitales Filter 2. Ordnung wird auch als *Biquadfilter* bezeichnet

Die im Folgenden beschriebenen Filtertypen basieren auf einer unendlichen Impulsantwort.

4.3.2.1 Allpass

Ein *digitaler Allpass* 1. Ordnung ist über die *Übertragungsfunktion* bzw. *Differenzgleichung* mit

$$A_1(z) = \frac{z^{-1} + c}{1 + cz^{-1}} \quad (4.7)$$

$$y[n] = cx[n] + x[n-1] - cy[n-1] \quad (4.8)$$

$$c = \frac{\tan(\pi f_c / f_s) - 1}{\tan(\pi f_c / f_s) + 1} \quad (4.9)$$

definiert. Auf ein Strukturbild umgelegt ergeben sich folgende zwei Möglichkeiten

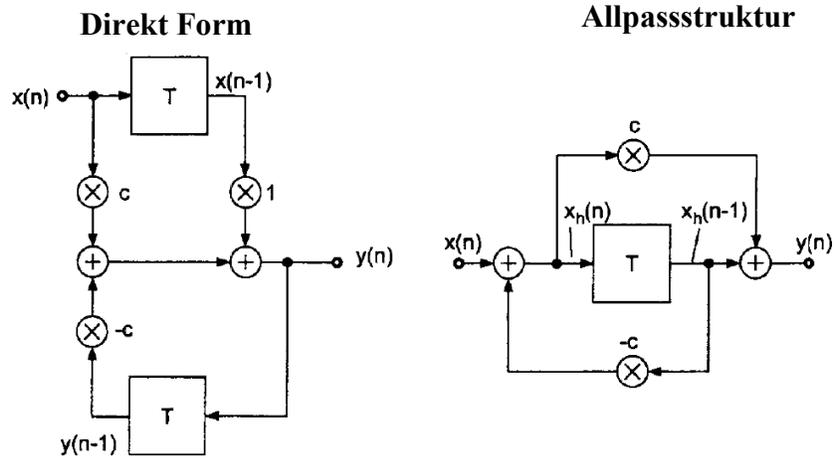


Abbildung 4.9 Blockschaltbild eines Allpass 1.Ordnung

Die Allpassstruktur in Abbildung 4.9 besitzt dabei folgende Differenzgleichungen:

$$x_h[n] = x[n] - cx_h[n-1] \quad (4.10)$$

$$y[n] = cx_h[n] + x_h[n-1] \quad (4.11)$$

Wie in Kapitel 3.2.5 bereits erwähnt, besitzt dieser Filtertyp einen konstanten *Frequenzgang der Amplitude* sowie die doppelte Phasenverschiebung eines *Tiefpass*. Neben der Darstellung der Gruppenlaufzeit werden die oben genannten Sachverhalte in Abbildung 4.10 verdeutlicht.

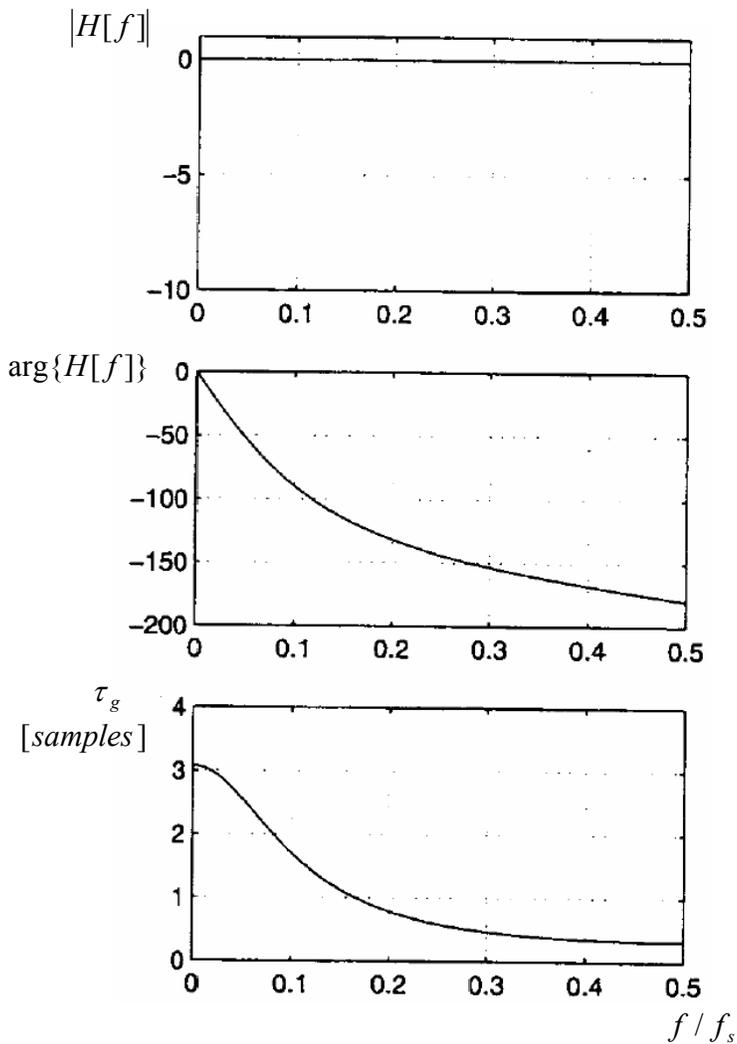


Abbildung 4.10 Amplituden-,
Phasengang und Gruppenlaufzeit
eines Allpass 1.Ordnung

Ausgehend von (4.6) lässt sich der *Allpass* 2.Ordnung definieren:

$$A_2(z) = \frac{-c + d(1-c)z^{-1} + z^{-2}}{1 + d(1-c)z^{-1} - cz^{-2}} \quad (4.12)$$

$$c = \frac{\tan(\pi f_b / f_s) - 1}{\tan(\pi f_b / f_s) + 1} \quad (4.13)$$

$$d = -\cos(2\pi f_c / f_s) \quad (4.14)$$

Neben der bereits bekannten *Grenzfrequenz* f_c für *Allpässe* aus Kapitel 3.2.5 gibt f_b die Steilheit des Phasenübergangs um f_c herum an.

4.3.2.2 Tiefpass / Hochpass

Mit dem *Allpass* 1. Ordnung als Grundelement, kann ein *Tief-* bzw. *Hochpass* 1. Ordnung über folgendes Blockschaltbild realisiert werden:

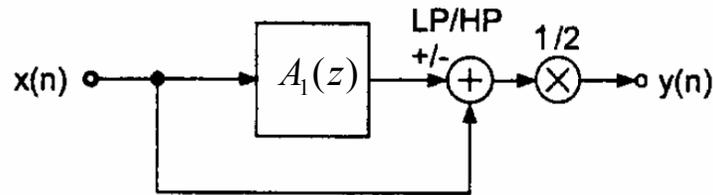


Abbildung 4.11 Tief- (LP) bzw. Hochpass (HP) mit einem Allpass realisiert

Wie in Abbildung 4.11 ersichtlich, wird das unveränderte Eingangssignal zusätzlich mit dem Ausgangs des *Allpass* summiert. Je nach Filtertyp wird $x[n]$ dabei addiert (*Tiefpass*) oder subtrahiert (*Hochpass*). Die *Übertragungsfunktion* lautet

$$H(z) = \frac{1}{2}(1 \pm A_1(z)) \quad (4.15)$$

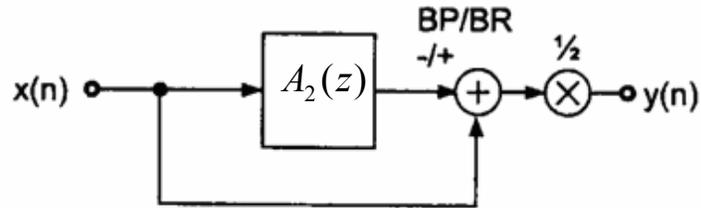
Die fehlenden Gleichungen zur Bestimmung aller benötigten Größen findet man in (4.7) und (4.9).

4.3.2.3 Bandpass / Bandsperre

Analog zum Prinzip in Kapitel 4.3.2.2 kann mit einem *Allpass* 2. Ordnung ein *Bandpass* bzw. eine *Bandsperre* erzeugt werden. Die *Übertragungsfunktion* dafür lautet:

$$H(z) = \frac{1}{2}[1 \pm A_2(z)] \quad (4.16)$$

Mit (4.12), (4.13) und (4.14) kann über eine Addition (*Bandpass*) oder Subtraktion (*Bandsperr*) mit dem Originalsignal $x[n]$ das entsprechende Filter gebildet werden.



4.12 Bandpass (PB) bzw. Bandsperr (BR) mit einem Allpass realisiert

5 Gegenüberstellung vorhandener

Gehörtrainingskurse und Software

Es folgt ein Überblick einiger in Kapitel 1.3 erwähnten Gehörtrainingsprogramme/-kurse. Wenn durch die vorhandene Literatur möglich, beinhaltet die Beschreibung eine möglichst genaue Darstellung der Übungen im Themenbereich Klangfarbe sowie des didaktischer Aufbaus.

5.1 *Timbre Solfeggio*

5.1.1 Überblick

Als erster offiziell initiiertes Gehörtrainingskurs [19] deckt dieser folgende Themenbereiche des *technischen Gehörtrainings* ab.

- Sensibilität und Gedächtnisentwicklung für Klangfarben
- Beurteilung von Klangfarbenqualität in Sprache und Musik
- Wahrnehmung von Lautheit in der Musik
- Zusammenhang zwischen Klangfarbe, Lautheit und Tonhöhe
- Maskierungseffekte
- Erkennen von Verzerrungen in Musikstücken
- Räumliches Hören
- Beurteilung der Qualität von Audioaufnahmen

Wie unschwer zu erkennen ist, handelt es sich dabei um ein umfangreiches Programm – deshalb erstreckt sich der Kurs insgesamt über 6 Semester. Dabei werden in den ersten beiden Jahren 1,5 Stunden pro Woche in einem speziell ausgestatteten Übungsraum [20] abgehalten, welcher ein Raumvolumen von 140m^3 mit einer Grundfläche von 40m^2 besitzt. Im dritten Jahr finden die Trainingseinheiten jede zweite Woche statt.

Abbildung 5.1 zeigt den schematischen Hardwareaufbau für die Durchführung der in [19] genannten Übungen.

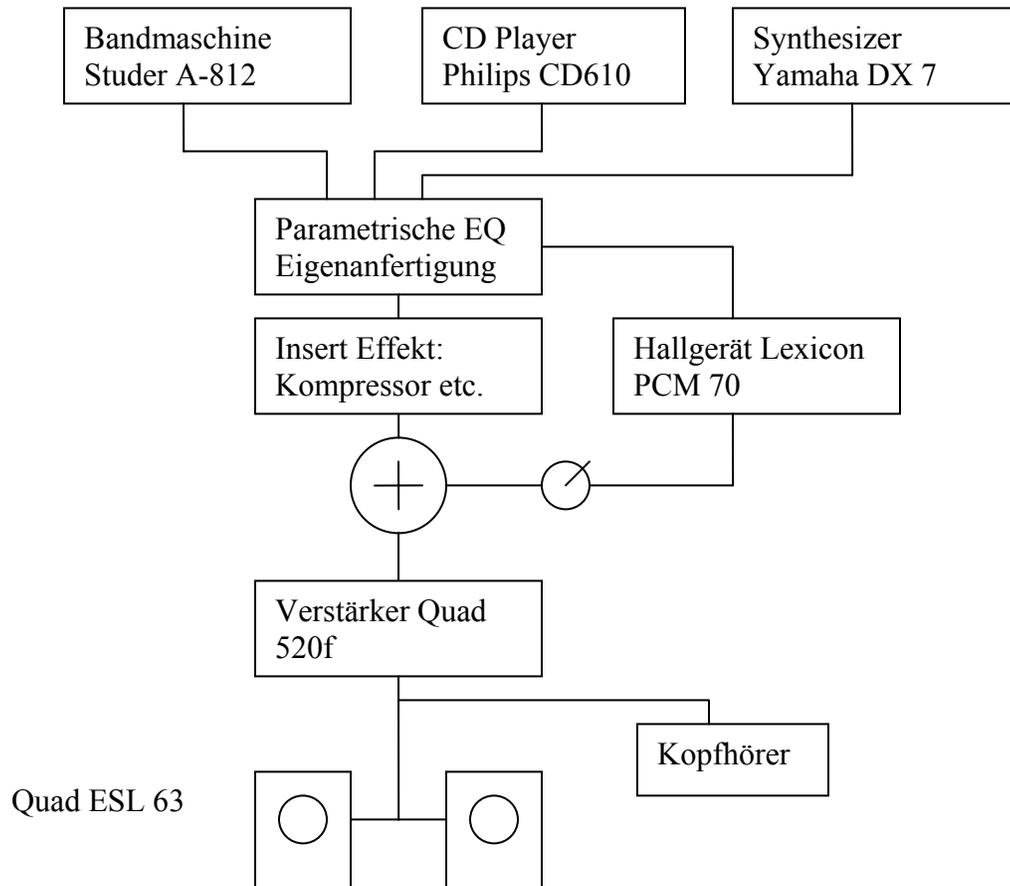


Abbildung 5.1 Hardwaresetup für Timbre Solfeggio

Als Klangstimuli dienen elektronisch erzeugte Signale (Rauschen, Töne), Sprachsignale, Soundeffekte und ein breites Spektrum an Musikaufnahmen. Bei (fast) allen in Folge beschriebenen Übungstypen von Timbre Solfeggio wird zwischen 2 Trainingsmodi unterschieden

Aktive Übungen:

Das Audiosignal wird an 2 identische elektroakustische Signalwege geschickt (im Folgenden A und B genannt). Der Lektor / die Lektorin nimmt bestimmte Einstellungen an Kanal A vor, die dem Studenten / der

Studentin unbekannt sind. Das Signal B ist bis jetzt noch unverändert. Nun muss der Übungsteilnehmer / die Übungsteilnehmerin die systematisch die Unterschiede zwischen Aufnahme A und B erhören und anschließend mit den verfügbaren Gerätschaften B so verändern, damit sie möglichst identisch wie A klingt. Somit wird die auditive Wahrnehmung von kleinsten Unterschieden im Audiosignal trainiert.

Passive Übungen:

Hier werden den Studierenden vorbereitete Signale mit charakteristischen Veränderungen ohne eine Referenz vorgespielt.

Die TeilnehmerInnen sollen zuerst selbst für sich das Gehörte verbal beschreiben – dann erfahren sie die Meinung des Vortragenden. Damit wird auf der einen Seite die Entwicklung eines Vokabulars für z. B. Klangfärbungen (scharf, dünn, mulmig etc.) gefördert, zum anderen gibt es eine (subjektive) Referenz eines erfahrenen Toningenieurs.

Zum Themenschwerpunkt Klangfarbe wird das Audiosignal zu Beginn des Kurses nur an 9 verschiedenen Frequenzpunkten (63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 und 16000Hz) manipuliert. Die genannten spektralen Punkte im Audiospektrum sind dem ISO-Standard entnommen und dienen als Grenzfrequenz/Mittenfrequenz für einen Hoch- bzw. Tiefpass oder entsprechenden Peakfilter. Änderungen an diesen Punkten im Signalspektrum sollen durch regelmäßiges Üben im Langzeitgedächtnis des Studenten gespeichert werden. Wie oben bereits erwähnt, kann einigen Frequenzen ein verbales Attribut zugeordnet werden. Eine Anhebung bei 4kHz wird zum Beispiel im Allgemeinen mit Schärfe [21] assoziiert.

Nachdem die 9 wichtigsten Frequenzen dauerhaft eingepägt sind, wird jedes Oktavband in Terzbänder (z.B. zwischen 500 und 1000Hz kommen 630 und 800Hz dazu) unterteilt. Damit sind alle Regler eines kompletten Terzbandequalizers abgedeckt. In Kombination mit dem Absenken/Anheben von mehreren Bändern entsteht eine sehr große Anzahl von

Manipulationsmöglichkeiten, was das Erraten einer Änderung praktisch unmöglich macht.

5.1.2 Zeitlicher Ablauf

Der Schwerpunkt im ersten Jahr liegt beim Erkennen und gedanklichen Speichern von Klangfarbeänderungen, basierend auf dem Prinzip der aktiven und passiven Übung. Zu Beginn werden maximal 2 Änderungen zum selben Zeitpunkt im Audiospektrum vorgenommen. Mit fortschreitender Dauer werden die Absenkungen/Anhebungen der Filter immer kleiner, und so gesetzt, damit sie schwerer wahrnehmbar sind

Zu Beginn des zweiten Jahres wird das Thema Lautheit in all seine Facetten behandelt. Die Studenten werden mit Demonstrationen zur Lautheitswahrnehmung konfrontiert und entwickeln im Laufe der Zeit eine Sensibilität für Lautheit, Lautheitssummation und ein auditives Gedächtnis für die Lautheit von Audiosignalen. Ein weiterer Teil ist das Verinnerlichen von Instrumentenklängen, die in verschiedenen Dynamikstufen spielen. Hier wird den Teilnehmern vermittelt, wie stark sich zum Beispiel ein Saxophon in seinem Klang verändert, wenn es eine musikalische Phrase einmal in *piano* und nachfolgend in *forte* spielt. Dadurch wird der Hörer befähigt, die tatsächlich gespielte Dynamik eines jeden Instruments in einer Aufnahme zu erkennen, unabhängig von der Wiedergabelautstärke des Audiomaterials.

Das nächste Aufgabengebiet beinhaltet die Tonhöhenenerkennung von komplexen Tönen. Dabei wird den Studenten das Thema *virtuelle Tonhöhe* [22] anhand elektronisch generierter Signale sowie an Instrumentenklängen näher gebracht. In einer praktischen Übung müssen die Teilnehmer die Frequenz eines Sinustones über einen Oszillator so einstellen, dass sie der wahrgenommenen Tonhöhe in dem gegebenen Instrumentalklangbeispiel entspricht. Die gehörten Ergebnisse werden anschließend in der Gruppe diskutiert.

Ein weiteres kleines Kapitel stellt der Maskierungseffekt in Audiosignalen dar. Auch hier wird die bereits gelernte Theorie an praktischen Hörbeispielen verdeutlicht.

Im vierten Semester sollen die Studenten die Qualität verschiedener (professioneller) Audioprodukte verbal bewerten, gefolgt von der Evaluierung von Musikaufnahmen. Dabei wird das Vokabular zur Beschreibung bestimmter Klangfarbenausprägungen trainiert.

Im dritten und letzten Jahr widmet sich der Kurs dem Thema „räumliches Hören“, worauf hier nicht näher eingegangen werden soll¹⁶.

5.2 Critical Listening Skills for Audio Professionals

Als autodidaktischer Kurs des mittlerweile verstorbenen Audiofachmanns F. Alton Everest erschien dieses Buch mit Audiokassetten bereits im Jahr 1982 zum ersten Mal – zur inhaltlichen Beschreibung wird jedoch die Version¹⁷ von 2007 [23]herangezogen. Insgesamt gliedert sich das Werk in zwei Bücher, wovon sich das erste mit folgenden Bereichen den Grundlagen des technischen Hörtrainings widmet. Das zweite Buch geht auf speziellere Themen wie Maskierungseffekte und Wahrnehmung von Delays ein. Dabei kann der Inhalt zu folgenden Themen zusammengefasst werden.

- auditive Wahrnehmung von Manipulationen im Klangspektrums
- auditive Wahrnehmung von Lautstärkeänderungen
- Beurteilung von Klangfarbenqualität an Klangbeispielen
- Erkennen von Verzerrungen und Rauschen in Musikstücken
- Räumliches Hören
- Maskierungseffekte

¹⁶ da es in Arbeit des Kollegen Kulmer näher behandelt wird

¹⁷ Welche den heutigen Bedürfnissen angepasst wurde

Die beiliegende CD dient aufgrund der begrenzten Anzahl der Klangbeispiele eher zur Demonstration von Übungsmöglichkeiten.

Der Themenbereich Klangfarbe wird beginnend mit dem Vorspielen von Sinustönen und bandbegrenztem Rosa Rauschen in *Lesson 1* gestartet. Durch einige Übungen sollen unerfahrene Hörer ein Gefühl bekommen, in welchem auditiven Segment sich welcher Frequenzbereich befindet. In *Lesson 3* werden zuerst Musiksignale, dann männliche oder weibliche Sprecher, mittels Hochpass und Tiefpass in ihrem Frequenzspektrum begrenzt. Anschließend erfolgt eine Einengung der Bandbreite von beiden Seiten. Ab *Lesson 4* werden Shelving-Peak- und Notchfilter auditiv vorgestellt und mit Übungen gefestigt.

Put your check mark where your estimate is:

No.	150 Hz		5 Hz	
	Peak	Dip	Peak	Dip
1				
2				
3				
4				
5				

Abbildung 5.2 Antwortblatt Übung für selektive Frequenzbandbeeinflussung [23, S.39]

Alle bisher beschriebenen Kapitel sind in eine „Talk“- und „Tech“-Spalte gegliedert wie in Abbildung 5.2 ersichtlich

It is easy to hear the difference, but deciding just what has happened is not as easy! Let's go through those five examples again but identifying the changes in response introduced.

First, Number 1. Number 1 has a 10-dB peak at 5000 Hz:

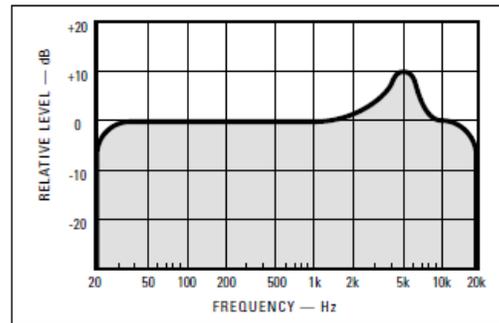


Abbildung 5.3 exemplarische Seite aus dem beiliegenden Buch [23, S.40]

Die im „Tech“-Bereich dargestellten Diagramme sind in den meisten Fällen als Klangbeispiel auf der CD enthalten. Neben Übungsanweisungen werden in der „Talk“-Spalte technisch-physikalische Hintergrundinformationen angeführt, um technisch wenig versierte Leser die Materie verständlich zu erklären.

Lesson 5 behandelt das Beurteilen von Klangfarbe verschiedener Musikinstrumente über ihre Obertöne. Der Umfang ist dabei eher begrenzt und dient als Anregung sich mit dem Thema weiter auseinanderzusetzen. Dem Aspekt von Klangfärbungen in Sprachsignalen widmet sich *Lesson 9*. Mittels Klangbeispielen die einen Sprecher in verschiedenen Distanzen zum Mikrofon und einer reflektierenden Wand abbilden, wird der Kammfiltereffekt sehr anschaulich erklärt. Am Ende des Kapitels finden sich Übungen, in denen die Verzögerung der Reflektion (welche die Klangfärbung erzeugt) zum Direktsignal bestimmt werden soll

The entire effect can be simulated for easy study by using a delay device. In the following example, a voice signal is combined with the same signal delayed one-half of a thousandth of a second (or one-half millisecond) with respect to the direct sound:

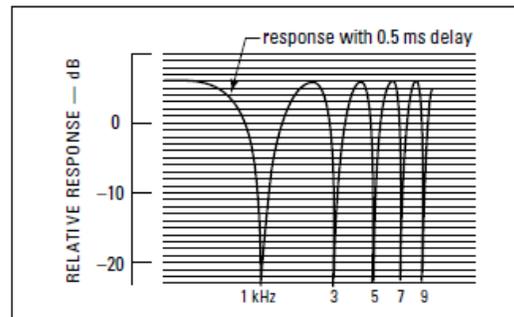
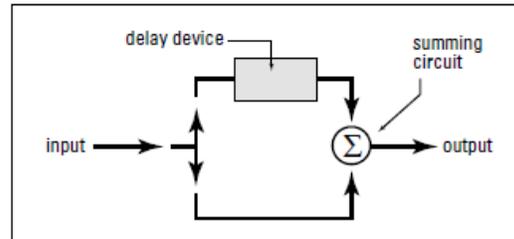


Abbildung 5.4 Beschreibung des Kammfiltereffekts [23, S.84]

5.3 *Timbral Ear Trainer*

5.3.1 Überblick

Entwickelt an der McGill University [24] unter der Leitung von René Quesnel, orientiert sich dieses computergesteuerte Trainingssystem an *Timbre Solfeggio* aus Kapitel 5.1. Es dient dortigen Studierenden als Übungsmöglichkeit zur Entwicklung eines kritischen Gehörs. Der Schwerpunkt der Applikation liegt wie im Namen erkennbar beim Thema Klangfarbe. Aus dem Hardwareaufbau aus Abbildung 5.5 geht hervor, dass der Computer (in Form eines Macs) den parametrischen EQ sowie das Mischpult über das MIDI-Protokoll steuert. Die Signalmanipulation findet also komplett extern in zwei digitalen Roland E660 Equalizern statt. Beim Mischpult handelt es sich um ein Yamaha DMP7D, welches zum umschalten zwischen den beiden Quellen (z. B für A/B Vergleiche) dient. Als Quelle für die Wiedergabe von Klangbeispielen dient ein Sony DTC-

1000DAT Abspielgerät. Über eine McIntosh 2100 Endstufe wird das Signal über zwei Boston Acoustics A70 Lautsprecher abgehört.

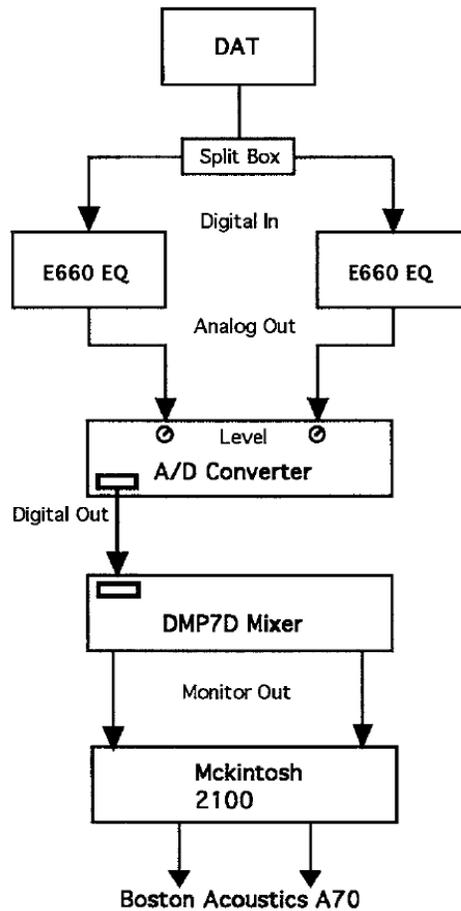


Abbildung 5.5 Hardware Setup

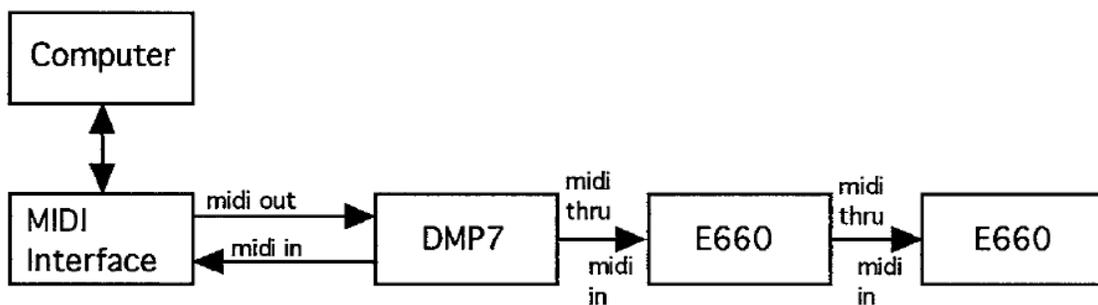


Abbildung 5.6 MIDI-Setup

Durch die Steuerung der Applikation am Computer ergeben sich folgende Vorteile:

- *Individuelle Anpassung*
Jeder Teilnehmer bringt andere Voraussetzungen mit und besitzt somit auch eine andere Aufnahmefähigkeit und Lerngeschwindigkeit. Durch die Bedienungssoftware ist es möglich, einem leicht fallende Übungen schneller zu überspringen und die Zeit zum ausgleichen von Defiziten zu nutzen.
- *Regelmäßige Übungsmöglichkeit*
Ein computergestütztes System erleichtert das tägliche Üben enorm stellt damit die Grundlage zum verbessern und erhalten der auditiven Fähigkeiten dar.
- *Interaktives Lernen*
Durch den multimedialen Aufbau der Software ist es möglich, die Übungen grafisch darzustellen (z.B. durch abbilden der aktuellen Übertragungsfunktion des Equalizers) und somit eine leicht nachvollziehbare Verbindung zwischen physikalischer Größe und daraus wahrgenommener psychoakustischer Empfindung zu schaffen.
- *Konstante und objektive Beurteilung*
Ein Computer beurteilt immer nach dem gleichen ihm vorgegeben Schema und bildet eine optimale und einfache Grundlage zur systematischen Evaluierung der Ergebnisse
- *Sammeln von wissenschaftlich Daten*
Die Ergebnisse und weitere Daten wie täglicher Übungsaufwand und dem damit verbundenen Fortschritt werden in einer Datenbank gesammelt und können wissenschaftlich verwertet werden.

5.3.2 Übungstypen

- *Comparative Listening* („Vergleichshören“)

Dabei handelt es sich um das gleiche Prinzip wie in den *aktiven Übungen* (vergleiche Kapitel 5.1.1) von *Timbre Solfeggio*. Am Roland E660 können folgende drei Filterparameter verändert werden, um die Beispiel B an Beispiel A anzugleichen:

- Mittenfrequenz f_r
- Güte Q
- Verstärkung/Dämpfung

- „Bring-To-Flat“

Diese Übung verhält sich invertiert zu Comparative Listening – anstelle eine Klangfärbung zu „kopieren“ gilt es hier die Resonanz oder Antiresonanz auszugleichen, damit Klang A sich wie das Original anhört (Klang B).

- *Absoluten Identifikation*

Bei einer Absoluten Identifikation wird lediglich ein bereits verändertes Klangbeispiel wiedergegeben. Anstelle von Manipulationsmöglichkeiten, steht dem User nun eine Anzahl von Frequenzen zur Auswahl, wovon eine die Mittenfrequenz des angewandten Filters ist. Anfangs ist ein Vergleich mit einer unveränderten Version noch möglich, mit steigendem Schwierigkeitsgrad entfällt diese Option jedoch. Die Anzahl der Antwortmöglichkeiten erhöht zudem mit zunehmendem Übungsfortschritt.

- *Assoziierung von Vokalen mit Klangfarben*

Klangfarben, die Resonanzen bei bestimmten Frequenzen aufweisen mit Selbstlauten assoziiert werden. Einem 1kHz wird zum Beispiel Vokal ‚a‘ zugeordnet. Aufgrund der Effektivität wird diese Methode bereits im *Timbre Solfeggio* Kurs angewandt. Die entsprechende

Übung basiert auf dem Modell der „Absoluten Identifikation“, es werden aber Vokale anstatt Frequenzen als Antwortmöglichkeiten gegeben.

5.3.3 Feedbackmöglichkeiten

Über das GUI (Graphical User Interface) bekommen die Studenten auf 3 Arten Feedback

- *Verbales Feedback*
Nach dem wählen einer Antwort erscheint über das Display „richtig“ oder „falsch“, je nach getroffener Auswahl. Ebenfalls angezeigt wird der aktuelle Fortschritt in der derzeitigen Übung.
- *Visuelles Feedback*
In den Comparative Listening Übungen werden Fader für Mittenfrequenz, Güte und Verstärkung der Filter angezeigt. Bei der Auflösung einer Frage stellen sich die Regler auf die Parameter der richtigen Antwort.
- *Aurales Feedback*
Die Fadereinstellungen im GUI werden in Echtzeit vom graphischen Equalizer übernommen. Des weiteren ist ein auraler Vergleich zwischen Klang A und B jederzeit möglich.

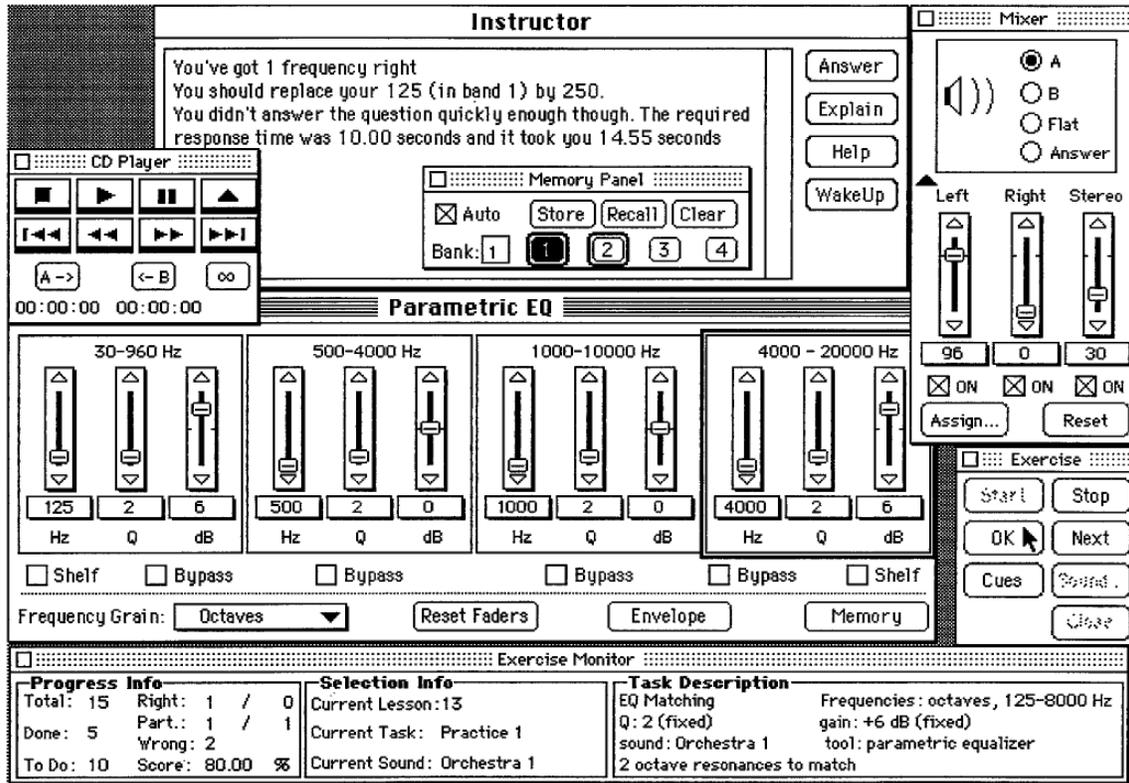


Abbildung 5.7 GUI von Timbral Ear Trainer

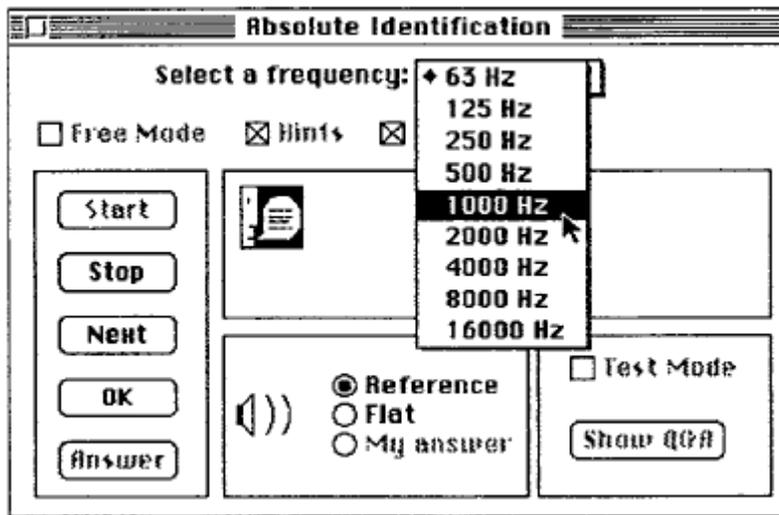


Abbildung 5.8 Übungstyp „Absolute Identification“

6 Entwicklung der Software

6.1 Einleitung und Motivation

Die Theorie aus den Kapiteln 2, 3 und 4 sowie die Analyse vorhandener Trainingsapplikationen im vorherigen Kapitel bilden die Basis für die erstellte Software.

Im Laufe der Entwicklung bildeten sich eine Komplettversion („Ambipure“ – beinhaltet den „Tonknechttrainer V.0.98“) und eine Standalone-Version („Tonknechttrainer V.1.0“) heraus. Deshalb folgt in diesem Kapitel nach einem kurzen Funktionsüberblick zuerst die Beschreibung der Gesamtsoftware mit anschließender Erklärung des Themenbereiches Klangfarbe. Der letztere Aspekt des Programms wird nur in seiner neuesten Version, implementiert im „Tonknechttrainer V.1.0“, behandelt.

Die Programmierung über die gewählte Entwicklungsumgebung *Pure Data* mit *Matlab* als Hostapplikation liegt insofern nahe, da das *Institut für elektronische Musik und Akustik* bereits aktuelle Projekte¹⁸ betreibt, die softwaretechnisch auf diese Art realisiert wurden. Außerdem sprechen folgende Argumente für die oben genannte Kombination

- *Pure Data* wird als gemeinnütziges *Open-Source-Projekt* betrieben. Dadurch fallen keine Lizenzgebühren für die Entwicklungsumgebung *Pd-extended* oder andere Versionen an. Zudem existiert eine aktive Mailing-Liste, an die man sich mit programmiertechnischen Problemen wenden kann.
- *Pure Data* bietet als graphische Programmiersprache eine sehr gute Echtzeitfähigkeit, welche für die Trainingsapplikation unerlässlich ist. Außerdem lässt sich Audiosignalverarbeitung darin problemlos realisieren.

¹⁸ bekannt unter dem Namen AAP Expert Listening Panel

- *Matlab* ist in der Lage über das TCP/IP-Protokoll mit *Pure Data* zu kommunizieren. Dadurch kann Datenverarbeitung, für die *Pd* weniger geeignet ist, ausgelagert werden.
- *Matlab* bietet einfache Möglichkeiten, ein *Graphical User Interface* (GUI) zu gestalten.

6.2 Funktionsübersicht der Programmversionen

- **Ambipure**
Tonknechttrainer V.0.98 (Klangfarbe)
 - 5 verschiedene Übungstypen (Quellen: rosa Rauschen, Audiofile, Sinuston)
 - Levelwahl mit zugehörigen Instruktionen, wobei die zuletzt angewählte Stufe in einem Textfile gespeichert wird
 - verbales Feedback bei Kontrolle der Antworten als auch die Möglichkeit, die eigene (falsche) Antwort auditiv wiederzugeben
 - unterstützte Dateitypen: .wav
- **Tonknechttrainer V.1.0**
bietet die gleiche Funktionalität mit folgenden Zusätzen
 - Auswahlmöglichkeiten zwischen mehreren internen Audiofiles
 - unterstützte¹⁹ Dateitypen: .wav, .ogg. und .mp3
 - Option zum Import eigener Audiofiles in bestimmte Übungen

¹⁹ die Formatunterstützung ist soweit gegeben, wie es die implementierten (aber nicht eigens entwickelten) *Pd-patches* „garantieren“

Vier der fünf angeführten Übungstypen beinhalten die absolute Identifikation von Oktavbandfiltern (Absenkung und Anhebung) mit den Mittenfrequenzen nach EN ISO 266, sowie die auditive Ermittlung der Grenzfrequenz eines Hoch- bzw. Tiefpass – wahlweise in einem Klangbeispiel oder in rosa Rauschen. Die letzte Übungsart lässt den Benutzer die Erkennung von Sinustonfrequenzen (nach oben genannter Norm) trainieren.

6.3 Struktureller Aufbau der Gesamtsoftware

Die in Kapitel 6.1 angeführten Argumente für den strukturellen Aufbau lassen sich über ein Blockschaltbild anschaulich darstellen

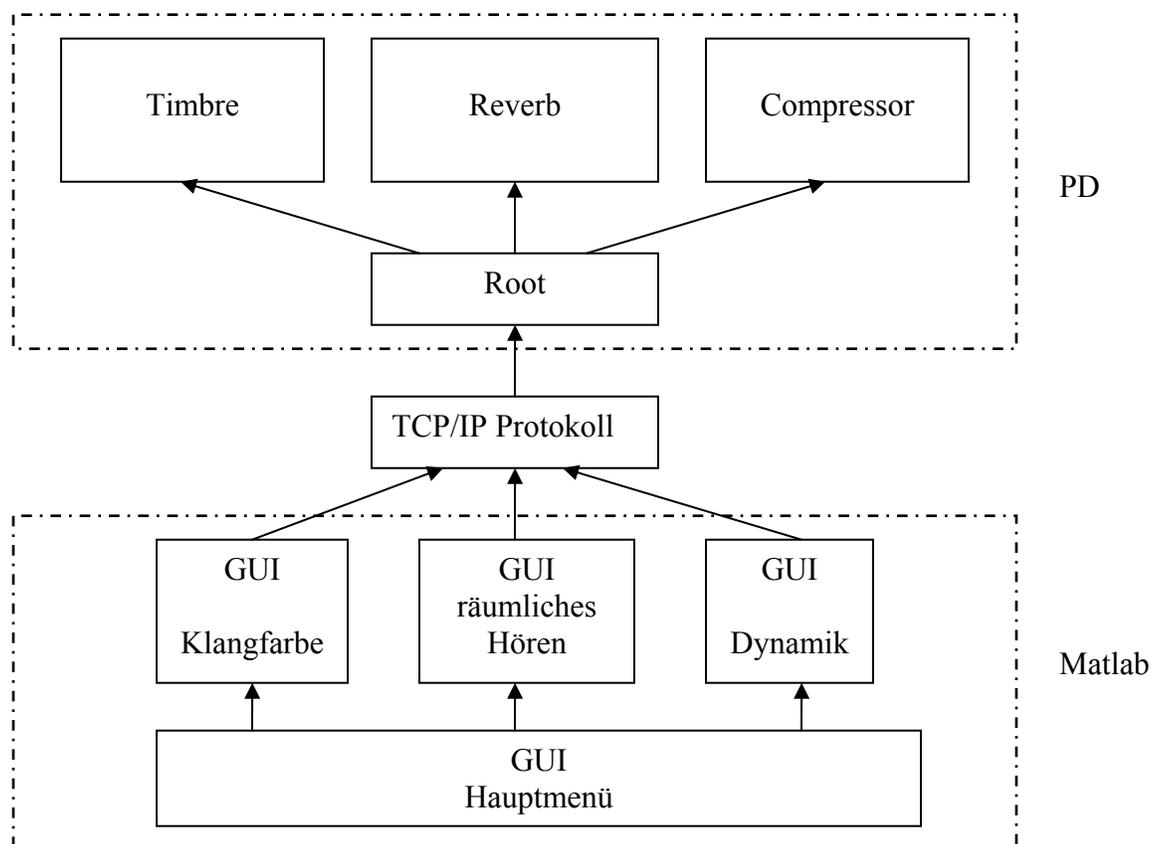


Abbildung 6.1 struktureller Aufbau der Trainingsapplikation

Über ein Hauptmenü in *Matlab* mit dem Namen „Ambipure“ gelangt der User zur Bedienoberfläche des spezifischen Themenbereichs.

Die Rolle des „Hauptverteilers“ übernimmt der *Patch* mit dem Namen *root~.pd*. Darüber erhalten die von den einzelnen Gruppenmitgliedern programmierten *Patches* genau jene Parameter, die sie benötigen.

Das TCP/IP-Protokoll als Schnittstelle wird in *Matlab* über folgende Befehle gesteuert:

<code>pd = tcpip('localhost',8434)</code>	definiert „pd“ als TCP/IP-Objekt mit den Input-Argumenten „remotehost“ und „portnumber“
<code>fopen(pd)</code>	Verbindungsaufbau zwischen dem Objekt und dem Host
<code>fwrite(pd,'tiefpass')</code>	sendet den String „tiefpass“ über den angegeben Port an <i>Pd</i>
<code>fclose(pd)</code>	Trennung der Verbindung

Tabelle 6.1 relevante TCP/IP-Befehle in Matlab

Für den Empfang von Daten über das Protokoll in *Pd* dient das Objekt „*netreceive*“ mit Angabe der gleichen Portnummer (siehe Abbildung 6.2).

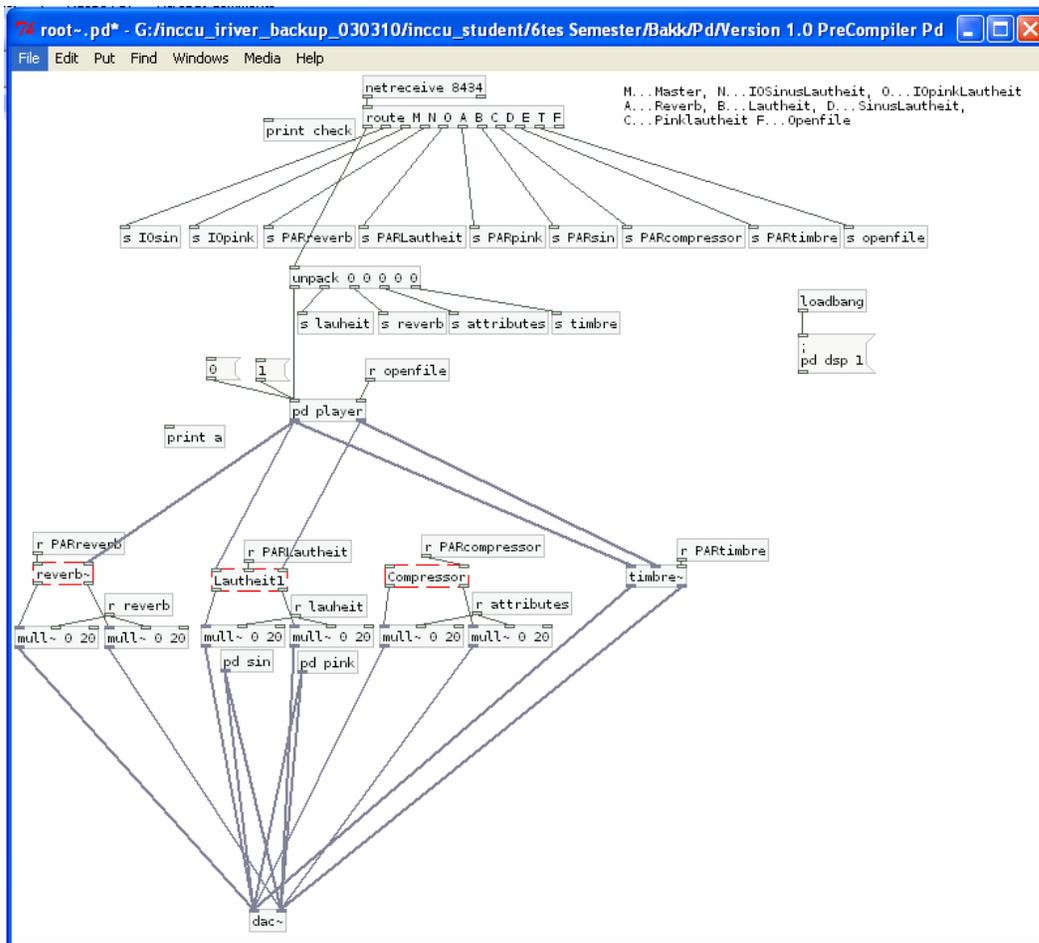


Abbildung 6.2 Aufbau des Patch *root~.pd*

Das Objekt „route“ übernimmt den ersten Schritt der Dekodierung der eigens definierten Übertragungsnachrichten nach dem Muster in Tabelle 6.2.

M...Master	Player – steuert Audiofilewiedergabe
N...IOSinuslautheit	Dynamik – Lautheit / Sinus Parameter
O...IOpinkLautheit	Dynamik – Lautheit / rosa Rauschen Parameter
A...Reverb	Räumliches Hören – Reverb Parameter / Wiedergabe
B...Lautheit	Dynamik – Compressor Wiedergabe
C...Pinklautheit	Dynamik – Lautheit / rosa Rauschen Wiedergabe
D...Sinuslautheit	Dynamik – Lautheit / Sinus Wiedergabe
E...IOCompressor	Dynamik – Compressor Parameter

T...Timbre	Klangfarbe – Filter Parameter / Wiedergabe
F...File open	Player – Pfad eingabe für Audiofile

Tabelle 6.2 Klassifizierung der unterschiedlichen Übertragungsnachrichten nach dem ersten Buchstaben

Der sich in *root~.pd* befindende *Subpatch* mit dem Namen *pd player* steuert die Wiedergabe der Wave-Files mit diesen Befehlen:

0	Stop
1	Wiedergabe Start
2	Wiedergabe unterbrechen
3	Wiedergabe fortsetzen

Tabelle 6.3 Steuerung des Wave-Players

6.4 Aufbau des Bereiches Klangfarbe

Ingesamt besteht das grafische User Interface aus vier verschiedenen *Figures*, deren Zusammenhang in Abbildung 6.3 gezeigt wird. Mit Ausführen der Datei *Tonknechttrainer.bat* wird die Datei *start.exe*²⁰ gestartet, die zuerst das Matlabskript *start.m* abarbeitet. In diesem File wird einerseits *Pd-Vanilla* ohne grafische Oberfläche geöffnet, sowie *t_main.m* ausgeführt.

Durch drücken der entsprechenden Buttons wie „Start“ oder „Zurück“ wird ein *Callback* hervorgerufen, der die aktuelle *Figure* schließt und die nächstbenötigte aufruft.

Müssen Daten zwischen verschiedenen *Figures* übergeben werden, geschieht dies mit dem Befehlen „setappdata“ bzw. „getappdata“.

²⁰ „start.exe“ ist die bereits kompilierte Version aller benötigten M-Files ,

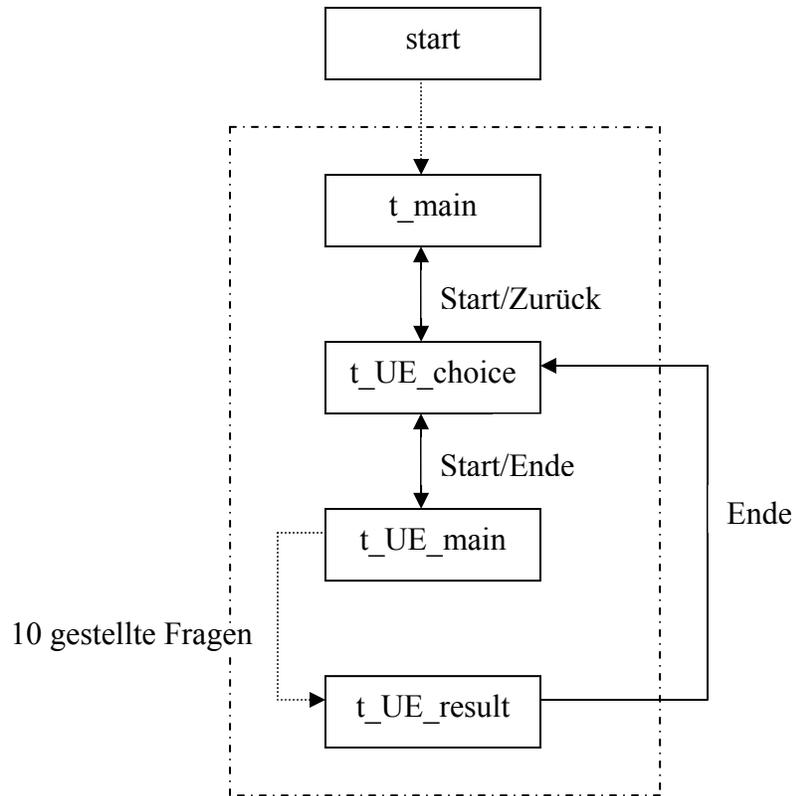


Abbildung 6.3 Zusammenhang zwischen den einzelnen *GUI-Figures*. Gewöhnliche Pfeile beschreiben den Verlauf beim Drücken des jeweiligen Buttons. Nach 10 gestellten Fragen wird automatisch das Endergebnis der Übung gezeigt (gepunkteter Pfeil)

6.4.1 *Figure t_main*

Beim Ausführen von *t_main.m* werden die gespeicherten Levelauswahlen aus dem File *userdata.txt* eingelesen. In zukünftigen Versionen der Software soll das Textfile für weitere userspezifische Daten wie Übungsstatistiken verwendet werden.

Wie in *Abbildung 6.4* ersichtlich, übernimmt *t_main* die Funktion des Hauptmenüs, in welchem zwischen den verschiedenen Übungstypen gewählt werden kann.

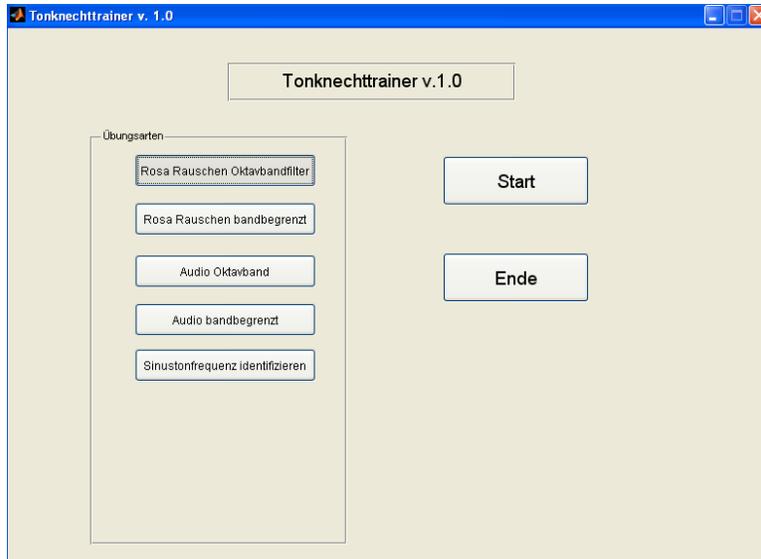


Abbildung 6.4 Hauptmenü

6.4.2 *Figure t_UE_choice*

Bevor die aktuelle *Figure* sichtbar wird, werden folgende Vorgänge abgearbeitet:

- Einlesen der benötigten übungstypspezifischen Daten aus dem entsprechenden Tutor-File.
- Einlesen der benötigten Pfade der Audiofiles aus der Datei „soundlibrary.txt“.

Der zweite Punkt erfolgt nur, wenn Audiodateien für die Übungen benötigt werden. Im File „*tutorx.txt*“ werden numerische Daten als auch übungsspezifische Fragestellungen, Übungstitel und Instruktionen gespeichert. Dadurch können nach Bedarf einzelne Übungsparameter unkompliziert geändert werden. Im Anhang dieser Arbeit befindet sich eine genaue Auflistung und Beschreibung der Parameter.

Die anwählbaren Audiofiles für die Übungen können ebenfalls einfach geändert werden. Es genügt eine relative (zu *root~.pd*) oder absolute Pfadangabe in dieser (beispielhaften) Form:

relative Pfadangabe: ../../mein Ordner/meinfile.wav
absolute Pfadangabe: X:/mein Ordner/mein Unterordner/meinfile.ogg

Tests haben ergeben, dass für Ogg-Files eine absolute Pfadangabe ratsam ist, da das Pd-Objekt „*oggread~*“ die Datei sonst nicht immer findet. Falls die Anzahl der Audiofiles geändert wird, muss die erste Zahl in Zeile fünf des *Headers* von *soundlibrary.txt* auf die neue Anzahl angepasst werden.

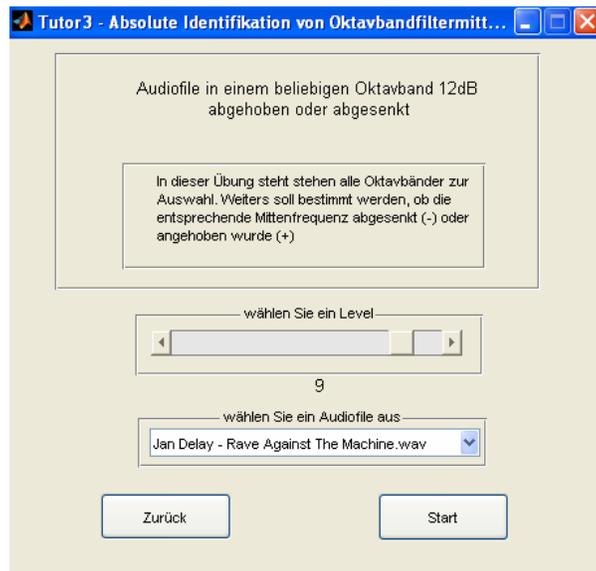


Abbildung 6.5 Figure von *t_UE_choice* mit Anzeige des Übungstitels und Anleitung. Bei dieser Übung kann zudem zwischen verschiedenen Audiofiles gewählt werden

Beim Anwählen einer Übung werden die aktuell benötigten Übungsparameter in separate Vektoren bzw. Cell-Arrays gespeichert, die anschließend an *t_UE_main.m* übergeben werden.

6.4.3 *Figure t_UE_main*

Diese *Figure* wird für den Trainingsvorgang jeder beliebigen Übung verwendet – dementsprechend wird das Erscheinungsbild angepasst.

Wenn die Übung eine zeitlich unbegrenzte Wiedergabe der Stimuli vorsieht, wird zusätzlich ein Audio-Player eingeblendet. Bei begrenzter Abspieldauer ist eine Zeitspanne von ca. vier Sekunden eingestellt. Je nach Wiedergabeart werden

außerdem *Pushbuttons* oder *Togglebuttons* für die Stimulifelder verwendet. Weiters benötigt jede Übung eine bestimmte Anzahl von Antwortmöglichkeiten in Form von Buttons.

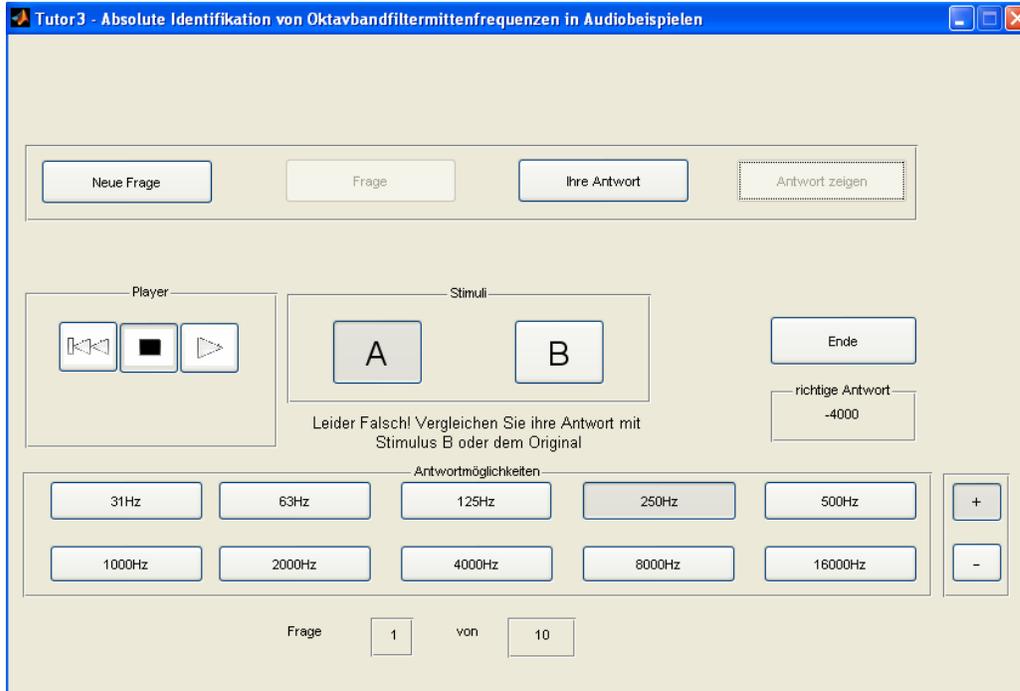


Abbildung 6.6 GUI einer Übung, die zeitlich unbegrenzte Stimuliwiedergabe vorsieht. Der Player ermöglicht das Anhalten und Fortsetzen der Wiedergabe sowie den Neustart des Files. Hier sind insgesamt 20 Antwortmöglichkeiten verfügbar (10 Frequenzen, sowie ob diese angehoben (+) oder abgesenkt(-) wurden).

Der Ablauf einer Fragestellung gestaltet sich bei zeitlich begrenzter/unbegrenzter Wiedergabe wie in Form des Flussdiagramms in Abbildung 6.7.

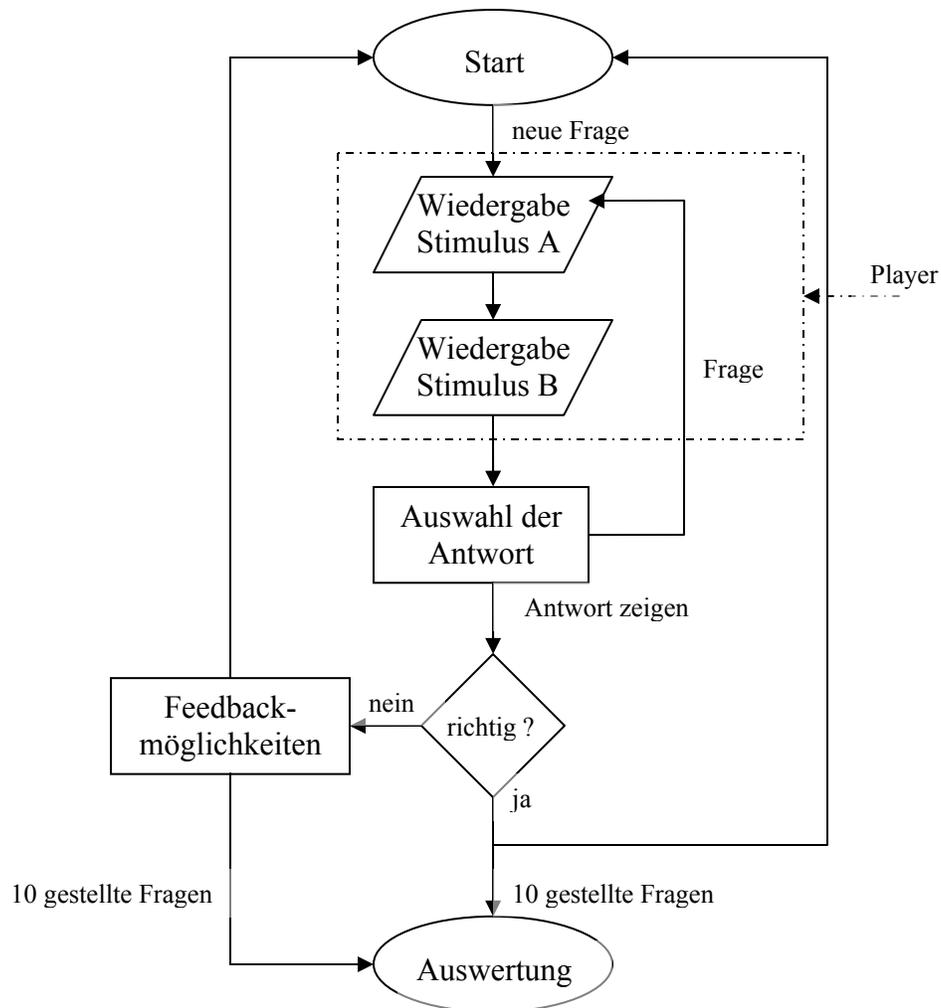


Abbildung 6.7 Ablauf einer Übung mit zeitlich begrenzter Stimuliwiedergabe. Bei zeitlich unbegrenzter Abspieldauer werden die Vorgänge im gepunkteten Kästchen durch die Playersteuerung sowie Togglebuttons für die Stimuli ersetzt.

6.4.4 Figure t_UE_result

Nach 10 gestellten Fragen wird in *t_UE_result.m* das Gesamtergebnis berechnet. In der aktuellen Version werden für jede richtige Antwort 10 Punkte verteilt. Bei einem Ergebnis von 20 Prozent oder weniger gibt das Programm eine Empfehlung ab, sich dem vorherigen Level nochmals zu widmen. Zwischen 21 und 79 Prozent wird der User dazu angehalten, in der aktuellen Stufe weiter zu trainieren. Ab 80 Prozent wird dem Benutzer geraten, den nächsten Level zu beginnen.

6.4.5 Pd-Patch *timbre~.pd*

Der *Patch* mit der Bezeichnung *timbre~.pd* übernimmt die Signalverarbeitung zu allen Übungen zum Thema Klangfarbe.

Die benötigten Filter sind dabei in folgender Weise implementiert worden:

- *Bandbreitenbegrenzung*
Über das Pd-Objekt *lp2c~.pd* bzw. *hp2c~.pd* wird ein gewöhnlicher Tief- oder Hochpass 2.Ordnung gesteuert. Das erste *Steuerinlet* dient zum Einstellen der Grenzfrequenz f_c des Filters.
- *Selektives Frequenzband absenken / anheben*
Hier wurde ein *Biquadfilter* nach Kapitel 4.3.2.3 von Thomas Musil²¹ adaptiert.

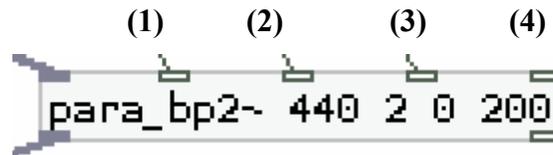


Abbildung 6.8 parametrischer Bandpass 2.Ordnung

Dabei hat das Objekt *para_bp2~.pd* Funktionen in der Form von:

- (1) *Frequenzinlet:*
Anhand dieses Inputs kann die Resonanzfrequenz f_r festgelegt werden
- (2) *Güteinlet:*
Je nachdem wie breitbandig die Filterung erfolgen soll, legt man hier die Güte Q fest

²¹ künstlerisch-wissenschaftlicher Mitarbeiter am IEM

(3) *Verstärkungsinlet:*

Mit dem Verstärkungsfaktor in dB wird bestimmt, ob sich das Filter wie ein *Bandpass* (positive Werte) oder eine *Bandsperre* (negative Werte) verhält.

(4) *Interpolationszeitinlet:*

Das letzte *Inlet* dient zum Einstellen der Interpolationszeit in Millisekunden, wenn ein Filterparameter geändert wird

Da es sich um einen IIR-Filter 2. Ordnung handelt, sei an dieser Stelle nochmals das Strukturbild und zugehörige Übertragungsfunktion angeführt:

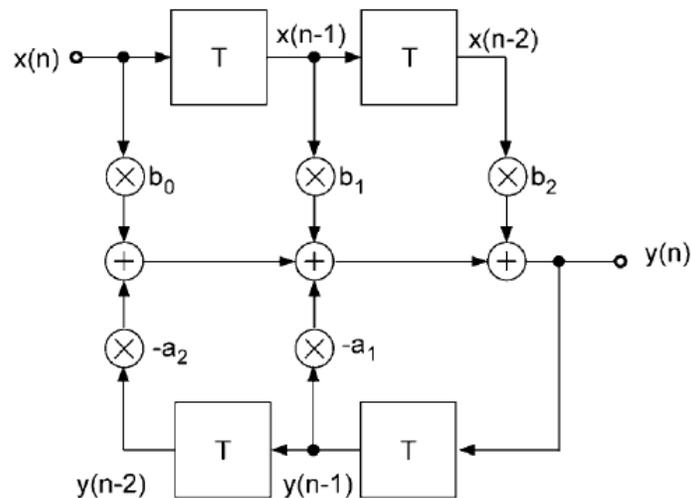


Abbildung 6.9 Blockschaltbild eines IIR-Filters 2. Ordnung

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (6.1)$$

Diesen zwei Filtertypen stellen den Kern dar, um den der Patch *timbre~.pd* herum erstellt wurde.

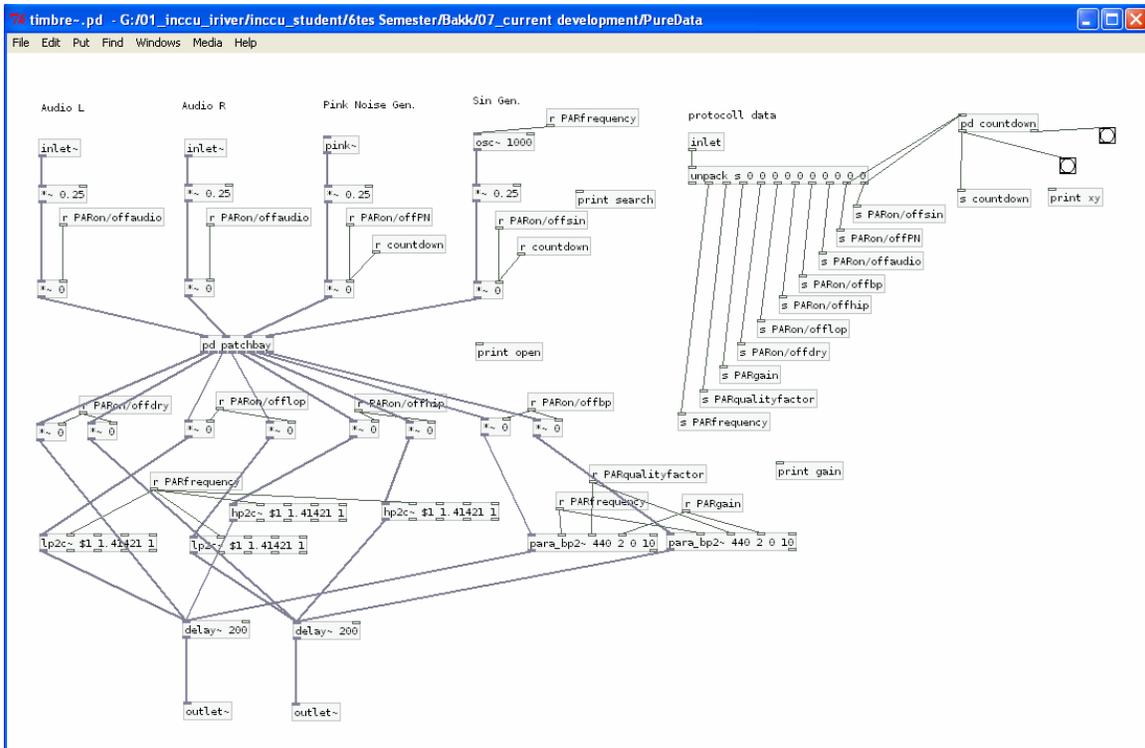


Abbildung 6.10 *timbre~.pd*

Des weiteren beinhaltet das File die Objekte *pink~* und *sin~*, um rosa Rauschen oder gewöhnliche Sinustöne als Quelle wählen zu können. Im rechten Teil befindet sich der *Subpatch* „*pd countdown*“, welcher einen rückwärtszählenden Timer beinhaltet. Über diesen wird auf der Seite von *Pd* die zeitlich begrenzte Stimulwiedergabe gesteuert. Die Bedeutung der einzelnen Steuerparameter kann Tabelle 7.1 im Anhang entnommen werden.

6.4.6 *Pd-Subpatch* player

Die Unterstützung von verschiedenen Audioformaten in Version 1.0 des „Tonknechttrainers“ benötigt den *Subpatch* aus Abbildung 6.11.

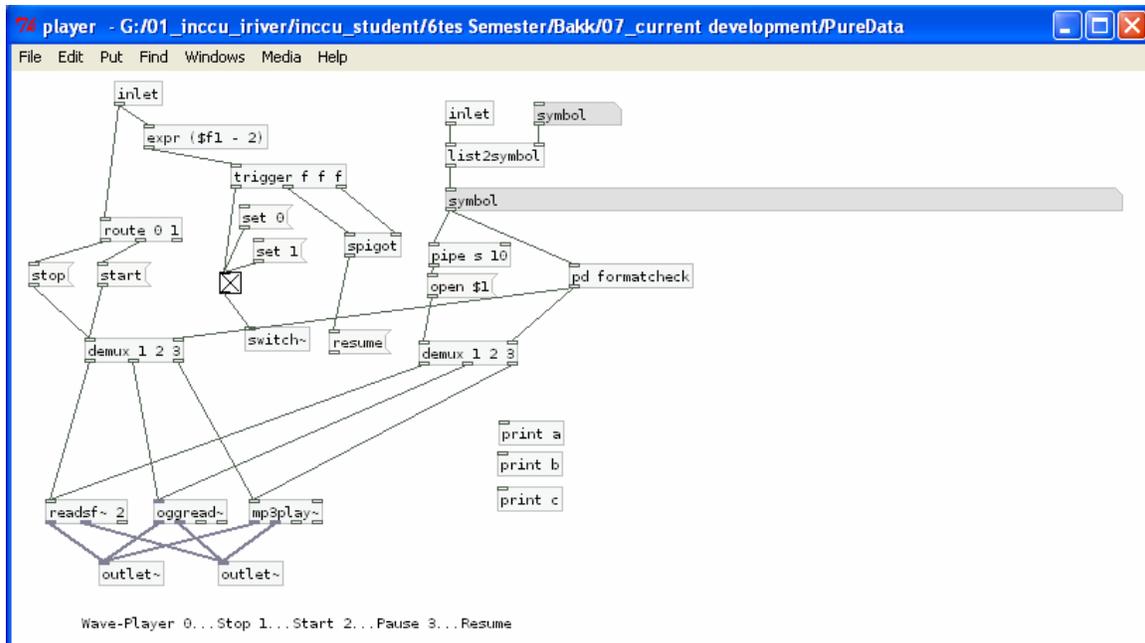


Abbildung 6.11 Subpatch Player

Neben den Steuerbefehlen aus Tabelle 6.3, die für alle abspielbaren Formate gelten, besitzt der Player noch eine automatische Filetyperkennung. In Kombination mit Objekt „*demux*“ werden die Steuernachrichten im Player immer an das richtige Objekt (*readsf~*, *oggread~* oder *mp3play~*) geleitet.

6.5 Ausblick

Eine Trainingsapplikation dieser Art bietet für Fachmänner in der Audiotechnik als auch für Musiker eine optimale Übungsgrundlage zur Verbesserung der auditiven Wahrnehmungsfähigkeit. Die im Zuge der Bachelorarbeit entwickelte Software bildete eine solide Basis an Trainingsmöglichkeiten, welche aber bei weitem noch nicht ausgereizt sind. Einige Ideen bzw. Verbesserungsmöglichkeiten für den „Tonknechttrainer“ wären:

- Implementierung eines Userdata-Files, welches Daten über die Übungszeiten und Trainingsergebnisse enthält. Damit kann der Benutzer seinen Fortschritt überprüfen. Weiters

können die gewonnen Daten wissenschaftlich genutzt und weiterverarbeitet werden.

- Erweiterung der Software um ein Menü, in welchem eigene Levels kreiert werden können und anschließend in einem Tutor-File abgespeichert werden. Somit wäre es einem Lektor möglich, seinen Studenten eigens zugeschnittene Übungen zu erstellen.
- Durchführung einer softwaretechnischen Optimierung des Programmcodes, um die Ladezeiten zu verkürzen. Ein weiterer Gedanke wäre die Portierung des Codes in eine andere Programmiersprache, welche weniger CPU-Ressourcen für sich beansprucht.
- Ausbau der vorhandener Übungstutoren und Entwicklung neuer Übungsmodi. Ein Beispiel wäre die Identifikation eines Kammfilters in rosa Rauschen sowie in Audiofiles.

7 Anhang

7.1 Beschreibung der Daten im File *tutorx.txt*

Zeile des .txt-Files	Bedeutung ()...Vektor „UE“ []...Vektor UE_pd
1-3	Header
4	Zeilenr. (n-1), in der Datensätze für Übungstitel [1], Übungsanleitung [2] und Fragestellungen [3] beginnen
5	Gesamtübungsanzahl im Tutor
8	(1) Nr. des Übungstutors
9	(2) Levelnr. im Tutor (103 = Tutor 1, Level 3)
10	(3) benötigte Antwortbuttons im Level (ohne +/-)
11	(4) Hilfsvariable zur Berechnung der Zufallsfrequenz
12	(5) 0...kein +/- 1...mit +/- als Antwortmöglichkeit
13	(6) Anzahl der benötigten Buttons im Stimulifeld
14	(7) Hilfsfrequenz zur Berechnung der Zufallsfrequenz
15	(8) Zeit, die in <i>Matlab</i> pausiert werden, wenn Stimuli 1 gestartet wird (zeitlich unbegrenzt = 0)
16	(9) Zeit, die in <i>Matlab</i> pausiert werden, wenn Stimuli 2 gestartet wird (zeitlich unbegrenzt = 0)
17	(10) 1...kennzeichnet letzte Übung im Tutor, sonst 0
18	(11) 0...zeitlich begrenzte- 1...zeitlich unbegrenzte Stimuliwiedergabe
19	(12) Prozentsatz, unter dem empfohlen wird, ein Level zurückzugehen
20	(13) Prozentsatz, ab dem empfohlen wird, ein Level aufzusteigen
21	(14) 0...benötigt keinen- 1...benötigt Player
22	(15) Hilfsvariable für Zufallszahl von -1 bis +1; setzt Untergrenze der Normalverteilung

23	(16) Hilfsvariable für Zufallszahl von -1 bis +1; setzt Obergrenze der Normalverteilung
24	(17) Input Argument für die Funktion „playstimulus“ (ASCII-Code als Dezimalzahl), Stimulus 1
25	(18) Input Argument für die Funktion „playstimulus“ (ASCII-Code als Dezimalzahl), Stimulus 2
29	[1] Klassifizierung der Übertragungsnachricht (ASCII -Code als Dezimalzahl), siehe Tabelle 6.2
30	[2] verwendetes Filter für die Übung B...Bandpass, T...Tiefpass, H...Hochpass (ASCII-Code als Dezimalzahl)
31	[3] wird temporär während Übungsvorgang beschrieben
32	[4] Güte des Filters
33	[5] Verstärkungsfaktor des Filters in dB, bei Absenkung und Anhebung immer numerisch größeren Faktor angeben
34	[6] on/off für „dryaudio“, wird während Übungsvorgang beschrieben
35	[7] on/off für Tiefpassfilter
36	[8] on/off für Hochpassfilter
37	[9] on/off für Bandpassfilter
38	[10] on/off für Audiofile
39	[11] on/off für rosa Rauschen
40	[12] on/off für Oszillator
Rest	Übungstitel, Übungsinstruktionen, Fragestellungen

Tabelle 7.1 Beschreibung der Daten in einem Tutor-File

7.2 Beschreibung der Daten im File *soundlibrary.txt*

Zeile des .txt-Files	Bedeutung
1-3	Header
4	Zeilennr. (n-1), in der Datensätze für Audiofiles beginnen
i	$i = (n-1) + (2*k-1)$ k...k-tes Audiofile, gibt relativen oder absoluten Pfad an
i + 1	$i + 1 = (n-1) + (2*k)$ Filename der Audiodatei

Tabelle 7.2 Beschreibung der Daten in einem Soundlibrary-File

7.3 Beschreibung der Daten im File *userdata.txt*

Zeile des .txt-Files	Bedeutung
i	Aktuell angewählter Level im i-ten Tutor

Tabelle 7.3 Beschreibung der Daten in einem Userdata-File

Abbildungsquellenverzeichnis

- Abbildung 2.1** Höldrich, R., „Musikalische Akustik 1 + 2“, Skriptum, pp.16
- Abbildung 2.2** Grey, J. M., 505606.pbworks.com/f/JohnGrey.pdf, pp. 3 (1272)
- Abbildung 3.1** Czuka, M.
- Abbildung 3.2** Weinzierl, S., Zölzer, U., “Handbuch der Audiotechnik”, Springer Verlag, pp. 15, 2008
- Abbildung 3.3** Czuka, M.
- Abbildung 3.4** Czuka, M.
- Abbildung 3.5** Weinzierl, S., Zölzer, U., “Handbuch der Audiotechnik”, Springer Verlag, pp. 824, 2008
- Abbildung 3.6** Czuka, M., Matlab Filter Design & Analysis Tool
- Abbildung 3.7** Czuka, M., Orcad Capture
- Abbildung 3.8** Czuka, M., Matlab Filter Design & Analysis Tool
- Abbildung 3.9** Czuka, M., Orcad Capture
- Abbildung 3.10** Czuka, M., Orcad Capture
- Abbildung 3.11** Czuka, M., Orcad Capture
- Abbildung 3.12** Tietze, U., Schenk, U., Halbleiterschaltungstechnik, 11.Auflage, Springer Verlag, pp. 872
- Abbildung 3.13** Tietze, U., Schenk, U., Halbleiterschaltungstechnik, 11.Auflage, Springer Verlag, pp. 880
- Abbildung 4.1** Weinzierl, S., Zölzer, U., “Handbuch der Audiotechnik”, Springer Verlag, pp. 814, 2008
- Abbildung 4.2** Weinzierl, S., Zölzer, U., “Handbuch der Audiotechnik”, Springer Verlag, pp. 815, 2008
- Abbildung 4.3** Weinzierl, S., Zölzer, U., “Handbuch der Audiotechnik”, Springer Verlag, pp. 815, 2008
- Abbildung 4.4** Weinzierl, S., Zölzer, U., “Handbuch der Audiotechnik”, Springer Verlag, pp. 816, 2008

- Abbildung 4.5** Czuka, M.
- Abbildung 4.6** Weinzierl, S., Zölzer, U., "Handbuch der Audiotechnik", Springer Verlag, pp. 817, 2008
- Abbildung 4.7** Weinzierl, S., Zölzer, U., "Handbuch der Audiotechnik", Springer Verlag, pp. 826, 2008
- Abbildung 4.8** Weinzierl, S., Zölzer, U., "Handbuch der Audiotechnik", Springer Verlag, pp. 826, 2008
- Abbildung 4.9** DAFX – Digital Audio Effects“, John Wiley & Sons Ltd. Verlag, pp. 40
- Abbildung 4.10** DAFX – Digital Audio Effects“, John Wiley & Sons Ltd. Verlag, pp. 39
- Abbildung 4.11** DAFX – Digital Audio Effects“, John Wiley & Sons Ltd. Verlag, pp. 40
- Abbildung 4.12** DAFX – Digital Audio Effects“, John Wiley & Sons Ltd. Verlag, pp. 43
- Abbildung 5.1** Czuka, M.
- Abbildung 5.2** Everest, F.A., "Critical Listening Skills for Audio Professionals", Thomson Course Technology, pp. 39, 2007
- Abbildung 5.3** Everest, F.A., "Critical Listening Skills for Audio Professionals", Thomson Course Technology, pp. 40, 2007
- Abbildung 5.4** Everest, F.A., "Critical Listening Skills for Audio Professionals", Thomson Course Technology, pp. 84, 2007
- Abbildung 5.5** Quesnel R, "Timbral Ear Trainer: Adaptive, Interactive Training of Listening Skills for the Evaluation of Timbre Differences", J. Audio. Eng. Soc., (Preprint), pp. 9, 1996
- Abbildung 5.6** Quesnel R, "Timbral Ear Trainer: Adaptive, Interactive Training of Listening Skills for the Evaluation of Timbre Differences", J. Audio. Eng. Soc., (Preprint), pp. 9, 1996
- Abbildung 5.7** Quesnel R, "Timbral Ear Trainer: Adaptive, Interactive Training of Listening Skills for the Evaluation of Timbre Differences", J. Audio. Eng. Soc., (Preprint), pp. 10, 1996

- Abbildung 5.8** Quesnel R, "Timbral Ear Trainer: Adaptive, Interactive Training of Listening Skills for the Evaluation of Timbre Differences", J. Audio. Eng. Soc., (Preprint), pp. 10, 1996
- Abbildung 6.1** Czuka, M.
- Abbildung 6.2** Czuka, M., „Tonknechttrainer V.1.0“, root~.pd, 2010
- Abbildung 6.3** Czuka, M.
- Abbildung 6.4** Czuka, M., „Tonknechttrainer V.1.0“, t_main.fig, 2010
- Abbildung 6.5** Czuka, M., „Tonknechttrainer V.1.0“, t_UE_choice.fig, 2010
- Abbildung 6.6** Czuka, M., „Tonknechttrainer V.1.0“, t_UE_main.fig, 2010
- Abbildung 6.7** Czuka, M.
- Abbildung 6.8** para_bp2.pd, screenshot
- Abbildung 6.9** Weinzierl, S., Zölzer, U., "Handbuch der Audiotechnik", Springer Verlag, pp. 828, 2008
- Abbildung 6.10** Czuka, M., „Tonknechttrainer V.1.0“, timbre~.pd, 2010
- Abbildung 6.11** Czuka, M., „Tonknechttrainer V.1.0“, root~.pd, 2010

Literaturquellverzeichnis

Kapitel 1:

- [1] Helmholtz, v. H., „Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik“, pp. 138, 1863
- [2] Letwoski T., „Development of Technical Listening Skills: Timbre Solfeggio“, J. Audio Eng. Soc. (Engineering Reports), Vol. 33, pp. 240-244, Apr. 1985
- [3] Kapeller, R., “Umsetzung eines Programms zur Sensibilisierung der auditiven Wahrnehmung in der Aufnahmetechnik – Dynamikbearbeitung“, Bachelorarbeit, IEM, 2010
- [4] Kulmer, J., “Umsetzung eines Programms zur Sensibilisierung der auditiven Wahrnehmung in der Aufnahmetechnik – Räumliches Hören“, Bachelorarbeit, IEM 2010
- [5] Everest F.A., “Instruction in Critical Listening“, J. Audio Eng. Soc., (Preprint), 1982
- [6] Quesnel R., Woszczyk W. R., “A Computer-Aided System for Timbral Ear Training, J. Audio. Eng. Soc., (Preprint), 1994
- [7] Brixen, E., “Spectral Ear Training“, J. Audio. Eng. Soc., (Preprint), 1993
- [8] Moulton, D., “Golden Ears“, [Online]
available: <http://www.moultonlabs.com/full/product01/>
- [9] Olive, S., “A new listener training software application“, J. Audio. Eng. Soc., (Preprint), 2001

Kapitel 2:

- [10] Stumpf, C., “Die Sprachlaute – experimentiell-phonetische Untersuchungen, [Online] available:

-
- <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHODocuView/template/overview?url=/mpiwg/online/permanent/library/Q05E572M/pageimg&mode=imagepath>
- [11] American Standards Association 1960
 - [12] Helmholtz, v. H., “Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik“, pp. 31-59, 1863
 - [13] Grey, J., “Multidimensional perceptual scaling of musical timbres”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 61, pp.1270-1277
 - [14] Reuter., C., “Wie und warum in der Geschichte der Klangfarbenforschung meistens am Klang vorbeigeforscht wurde”, [Online] available: <http://www.uni-koeln.de/phil-fak/muwi/fricke/293reuter.pdf>
 - [15] Mertens, P., „Die Schumannschen Klangfarbengesetze und ihre Bedeutung für die Übertragung von Sprache und Musik“, Verlag „Das Musikinstrument“
 - [16] Sander, M., “Pyhsik und die Schumannschen Klangfarbengesetze”, [Online], available: www.m-sandner.de/lehre/VL_pdf/Physik_und_Gesetze.pdf

Kapitel 3:

- [17] Tietze, U., Schenk, U., Halbleiterschaltungstechnik, 11.Auflage, Springer Verlag, pp. 839-900
- [18] Tietze, U., Schenk, U., Halbleiterschaltungstechnik, 11.Auflage, Springer Verlag, pp. 883 – 887
- Dourdoumas, N., Horn, M., „Regelungstechnik, Pearson Studium, pp. 18 - 21

Kapitel 4:

Zölzer, U., „DAFX – Digital Audio Effects“, John Wiley & Sons Ltd. Verlag, pp. 31- 84

Weinzierl, S., Zölzer, U., "Handbuch der Audiotechnik", Springer Verlag, pp.813-848, 2008

Kapitel 5:

- [19] Miśkiewicz, A., „Timbre Solfege: A Course in Technical Listening for Sound Engineers”, J. Audio Eng. Soc., Vol. 40, No. 7/8, 1992
- [20] Makowski W., Letowski T., “A Standard Listening Room at the Academy of Music in Warsaw (in polnisch), Zeszyty Naukowe PWSM, Vol. 6, pp. 113-126, 1979
- [21] von Bismarck G., “Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds”, Acoustica, pp.160-172, 1974
- [22] Terhardt E., “Akustische Kommunikation”, Springer Verlag, pp. 345, 1998
- [23] Everest, F.A., “Critical Listening Skills for Audio Professionals”, Thomson Course Technology, 2007
- [24] Quesnel R, “Timbral Ear Trainer: Adaptive, Interactive Training of Listening Skills for the Evaluation of Timbre Differences”, J. Audio. Eng. Soc., (Preprint), 1996