

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

Jonas Gorgis

Simulation von Schallfeldern in urbanen Trans-
portsystemen mit einem Lautsprecherarray

Jonas Gorgis

Simulation von Schallfeldern in urbanen Trans-
portsystemen mit einem Lautsprecherarray

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Mechatronik
an der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Kletschkowski
Zweiter Prüfer: Dipl.-Ing. Jochen Sommer

Abgegeben am 11. November 2014

Jonas Gorgis

Thema der Bachelorthesis

Simulation von Schallfeldern in urbanen Transportsystemen mit einem Lautsprecherarray

Stichworte

Lautsprecherarray, elektronisches Schwenken, DSP, Audio-Filter, C6713, DSK_AUDIO4

Kurzzusammenfassung

In dieser Bachelorthesis wird das Konzept eines Systems zur Beschallung eines Automodells entwickelt und umgesetzt. Das System ist in der Lage die Richtwirkung mit Hilfe des elektronischen Schwenkens zu ändern. Ein Digitaler Signalprozessor wird zur Implementierung verschiedener Filter eingesetzt.

Jonas Gorgis

Title of the paper

Simulation of sound fields in urban transport systems with a loudspeaker array

Keywords

loudspeaker array, beam tilting, DSP, audio filter, C6713, DSK_AUDIO4

Abstract

In this bachelor thesis the concept of a public address system is developed and implemented. The system is able to change the directivity by the use of phase shifting. A digital signal processor is used to implement various filters.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
1.1	Motivation.....	5
1.2	Aufgabenstellung.....	5
1.3	Stand der Technik.....	6
2	Theoretische Grundlagen.....	7
2.1	Lautsprechergehäuse.....	7
2.2	Elektronisches Schwenken.....	11
2.3	Digitale Audio-Filter.....	13
3	Lösungsidee / Entwurf.....	15
3.1	V-Modell.....	15
3.2	Anforderungen.....	16
3.3	Systementwurf.....	17
4	Domänenspezifische Entwicklung.....	18
4.1	TMS320C6713 DSK Tochterkarte.....	18
4.1.1	Einleitung zur Tochterkarte.....	18
4.1.2	Einrichtung der Tochterkarte in Code Composer Studio v5	19
4.2	Lautsprecher.....	20
4.3	Verstärker.....	25
4.4	Software/Programmierung.....	29
4.4.1	Elektronisches Schwenken.....	29
4.4.2	Filterung.....	32
5	Ergebnisse.....	35
6	Zusammenfassung / Ausblick.....	39
	Quellenverzeichnis.....	40
	Anhang A: Schaltplan der Verstärkerbox.....	41
	Anhang B: C-Programm zum elektronischen Schwenken mit Filterung.....	42
	Anhang C: *.cof-Datei mit Filterkoeffizienten.....	48
	Anhang D: Daten CD.....	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Fahrzeugprüfstand am Fraunhofer Institut für Bauphysik...	6
Abbildung 2.1: Akustischer Kurzschluss durch Auslöschung des Gesamtschalldrucks W_3 in Folge destruktiver Interferenz [Sta03, S. 107]	7
Abbildung 2.2: Membranbewegung nach dem Abschalten eines Signals in Abhängigkeit vom Q-Faktor (A: $Q_{tc} = 0,3$; B: $Q_{tc} = 0,7$; C: $Q_{tc} = 1,2$; D: $Q_{tc} = 2,2$) [Sta03, S. 113]	9
Abbildung 2.3: Schalldruckpegel eines Lautsprechers in Abhängigkeit von seinem Q-Faktor (f =Resonanzfrequenz) [Sta03, S. 110] ..	9
Abbildung 2.4: Lautsprecherzeile mit Verzögerungslinie zum elektronischen Schwenken [Mös12, S. 103]	11
Abbildung 2.5: IIR Filter 4. Ordnung mit zwei Direkt Form II Sektionen in Kaskade [Cha08, S. 216]	14
Abbildung 2.6: Kaskadenförmige IIR Filterstruktur [Cha08, S. 215]	14
Abbildung 3.1: V-Modell als Makrozyklus [VDI04, S. 29]	15
Abbildung 3.2: Signalfluss der Teilsysteme	17
Abbildung 4.1: DSK_AUDIO4 Tochterkarte [Edu10, S. 3]	18
Abbildung 4.2: VISATON FRS 8	20
Abbildung 4.3: Impedanzmessung des Lautsprechers	21
Abbildung 4.4: Lautsprecher Innenansicht	22
Abbildung 4.5: Lautsprecher Vorderseite	23
Abbildung 4.6: Lautsprecher Rückseite	23
Abbildung 4.7: Frequenzgang des Lautsprechers im geschlossenen Gehäuse	24
Abbildung 4.8: Verstärkermodul M034N (Quelle: Conrad.de)	25
Abbildung 4.9: Anordnung der Verstärkermodule im Gehäuse	26
Abbildung 4.10: Verstärker Vorderseite	27
Abbildung 4.11: Verstärker Rückseite	27
Abbildung 4.12: Grafische Oberfläche zum Schwenken	30
Abbildung 4.13: Flussdiagramm zum Schwenken	31
Abbildung 4.14: Grafische Oberfläche zur Erstellung von EQs	33
Abbildung 4.15: Flussdiagramm Filterung	34
Abbildung 5.1: Messungen der Filter	35
Abbildung 5.2: Direktivität des Lautsprecherarrays	36
Abbildung 5.3: Direktivität des um -35° geschwenkten Lautsprecherarrays	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Anforderungen an das Gesamtsystem	16
Tabelle 4.1: Technische Daten des Lautsprechers	20
Tabelle 4.2: Technische Daten des Verstärkermoduls.....	25
Tabelle 5.1: Eigenschaftsabsicherung des Gesamtsystems	38

Glossar und Abkürzungen

CCS	Code Composer Studio
DSK	DSP Starter Kit
DSP	Digitaler Signalprozessor
EQ	Equalizer
Hi-Fi	High Fidelity
HSF	High-Shelving-Filter
IIR	Infinite Impulse Response (unendliche Impulsantwort)
LSF	Low-Shelving-Filter
TI	Texas Instruments

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ein im Hinblick auf Sicherheit, Komfort und Privatsphäre ansprechendes Sound-Management in Transportsystemen erfordert, insbesondere im Bereich der urbanen Elektromobilität, die infolge der neuartigen Antriebskonzepte gegenüber konventionellen Verkehrsmitteln veränderten Schallphänomene bereits in einer frühen Phase des Designs zu berücksichtigen. Vielfach ist es notwendig, die in realen Verkehrssituationen auftretenden Lärmbelastungen unter Laborbedingungen mit Hilfe von Lautsprechersystemen und unter Verwendung von Konzepten der digitalen Nachrichtentechnik realitätsnah reproduzieren zu können.

1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Bachelorthesis ist die Ausarbeitung und Umsetzung eines Konzepts zur Beschallung eines Automodells, mit Hilfe eines Lautsprecherarrays. Dazu ist zunächst eine Einarbeitung in die theoretischen/ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen der relevanten Themengebiete notwendig. Der Konzeptentwurf beinhaltet die Messung des Schalldrucks mit Hilfe von Mikrofonen, Lautsprechern zur Schallerzeugung und einem digitalen Signalprozessor (DSP) zur Signalverarbeitung. Das Beschallungssystem wird aufgebaut, in Betrieb genommen und kalibriert. Des Weiteren werden Messungen zur Charakterisierung des Systems durchgeführt und bewertet.

1.3 Stand der Technik

Die Entwicklung neuartiger Antriebskonzepte und deren veränderte Schallphänomene im Bereich der Fahrzeugakustik stellen auch an die Akustiklabore und Fahrzeugprüfstände neue Herausforderungen. Da im Bereich der Elektromobilität die Schallemissionen des Antriebsstrangs stärker in den Hintergrund treten, kommen besonders die Einflüsse von Fahrtwind und Abrollgeräusche der Reifen immer mehr in den Fokus der Untersuchungen. Des Weiteren erfordern die zunehmende Leichtbauweise zur Gewichtsreduzierung und die dadurch veränderten Schwingungsphänomene Beachtung bei der akustischen Betrachtung in der Fahrzeugentwicklung.

Häufig finden die Messungen dazu in Instituten oder an Universitäten statt, die, in Kooperation mit der Industrie, in ihren Laboren und auf ihren Prüfständen Versuche an neuen Prototypen durchführen. Das Fraunhofer Institut für Bauphysik betreibt z.B. in der Abteilung Akustik einen Allrad-Rollenprüfstand, der unter anderem mit Hilfe von 32 Mikrofonen je Seite eine Vorbeifahrt des untersuchten Fahrzeugs simulieren kann.



Abbildung 1.1: Fahrzeugprüfstand am Fraunhofer Institut für Bauphysik

2 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erläutert, die zum Verständnis der Arbeit nötig sind. Dazu gehören wesentliche Betrachtungen zum Bau eines geschlossenen Lautsprechergehäuses, Erläuterungen zum elektronischen Schwenken und in dieser Arbeit verwendete Arten von digitalen Audio-Filtern.

2.1 Lautsprechergehäuse

Um einen akustischen Kurzschluss zu verhindern, ist es wichtig, Lautsprecher in ein Gehäuse einzubauen. Ein akustischer Kurzschluss entsteht bei Lautsprechern ohne Gehäuse durch die von Membranvorderseite und -rückseite gegenphasig induzierten Schallwellen, die in Summe zu einer (teilweise) Auslöschung des Schalls führen. Des Weiteren kann mit der Auswahl des Gehäuses die Impulsantwort, sowie der Frequenzgang speziell im Bereich der Grenzfrequenz und die Grenzfrequenz selbst beeinflusst werden.

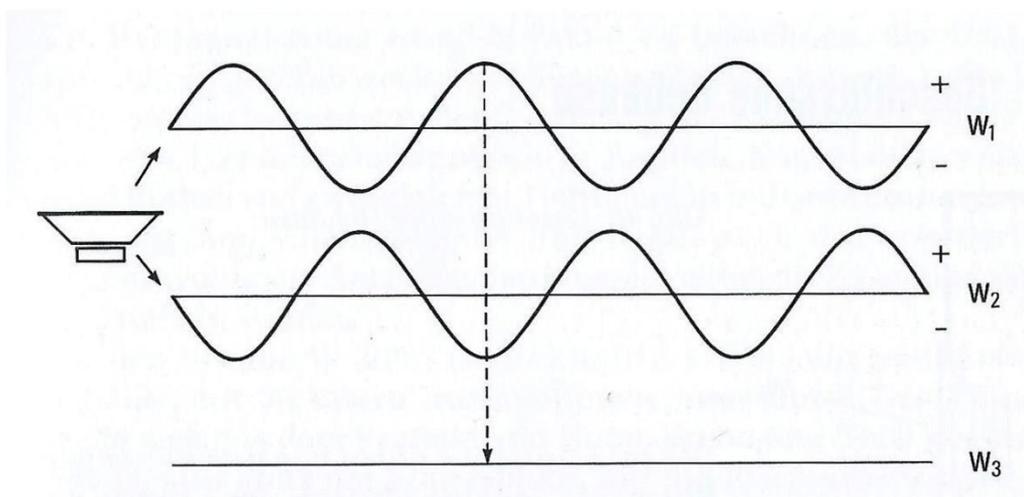


Abbildung 2.1: Akustischer Kurzschluss durch Auslöschung des Gesamtschalldrucks W_3 in Folge destruktiver Interferenz [Sta03, S. 107]

Lautsprechergehäuse gibt es in unterschiedlichsten Formen und Ausprägungen. Das Bassreflex-Gehäuse nutzt z.B. den von der Rückseite der Lautsprechermembran induzierten Schall, um Frequenzen im Bassbereich zu verstärken. Da in dieser Arbeit keine besonderen Anforderungen an die Tiefton- bzw. Basseigenschaften der Lautsprecher gestellt und auf einfache Realisierbarkeit geachtet wurde, wird hier nur das geschlossene Gehäuse behandelt. Dabei ist der Lautsprecher in einer einfachen Box angebracht, die verhindert, dass der von der Membranrückseite abgestrahlte Schall nach außen gelangt und so ein akustischer Kurzschluss entsteht. Die im Gehäuse eingeschlossene Luft hat dabei eine Federwirkung auf die Membran. Aus diesem Grund ändern sich die Lautsprecherkennwerte im eingebauten Zustand. Die Einbauresonanz f_c im geschlossenen Gehäuse berechnet sich nach [Sta03, S. 109] mit

$$f_c = f_s * \sqrt{0,87 * (1 + \frac{V_{as}}{V_g})} \quad (2.1)$$

wobei: f_s = Freiluftresonanz des Lautsprechers

V_{as} = äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen in Litern (Kennwert des Lautsprechers)

V_g = Nettovolumen des geschlossenen Gehäuses in Litern

Durch Einsetzen von Q_{tc} für f_c und Q_{ts} für f_s erhält man

$$Q_{tc} = Q_{ts} * \sqrt{0,87 * (1 + \frac{V_{as}}{V_g})} \quad (2.2)$$

zur Berechnung des totalen Q-Faktors Q_{tc} im eingebauten Zustand. Q_{ts} ist dabei der Gesamt-Q-Faktor des Lautsprechers. Er setzt sich aus mechanischen und elektromagnetischen Einflussfaktoren zusammen. Der Q-Faktor, auch Gütefaktor genannt, ist ein Maß für die Dämpfung des Systems. Er ist der Kehrwert der des Verlustfaktors (Dämpfung). Abbildung 2.2 verdeutlicht dies Anhand des Ausschwingverhaltens der Membran.

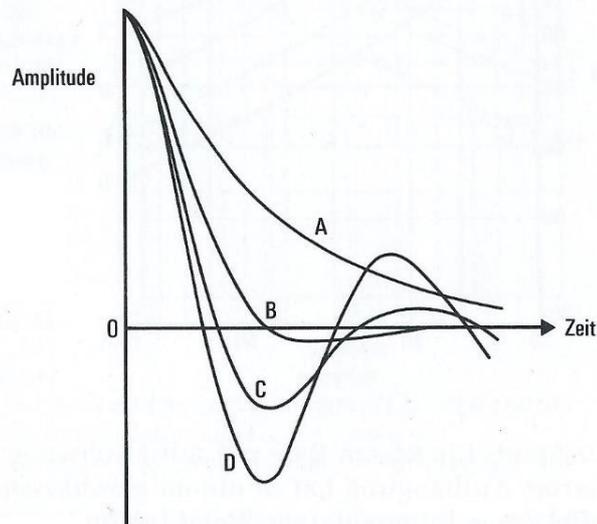


Abbildung 2.2: Membranbewegung nach dem Abschalten eines Signals in Abhängigkeit vom Q-Faktor (A: $Q_{tc} = 0,3$; B: $Q_{tc} = 0,7$; C: $Q_{tc} = 1,2$; D: $Q_{tc} = 2,2$) [Sta03, S. 113]

Abbildung 2.3 zeigt den Einfluss des Q-Faktors (eng. quality factor) auf den Schalldruckpegel im Bereich der Resonanzfrequenz. Er ist ein Maß für die Schärfe der Resonanzüberhöhung in Abhängigkeit der Dämpfung.

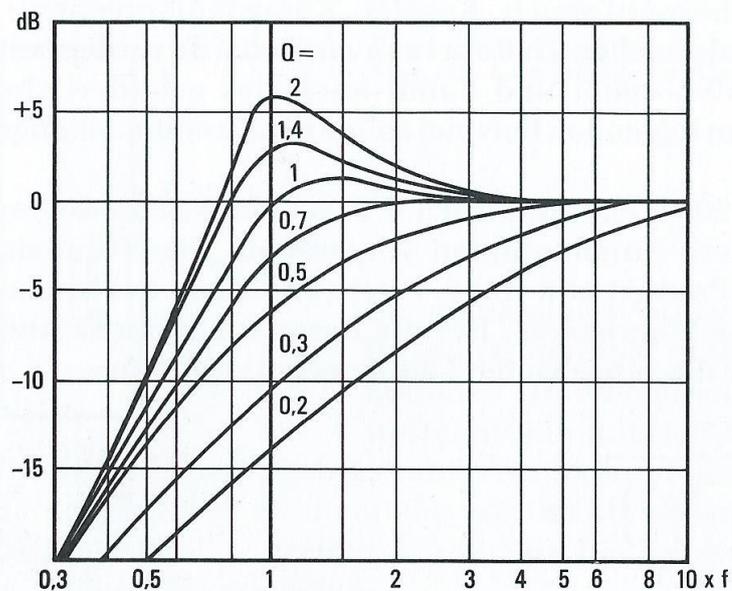


Abbildung 2.3: Schalldruckpegel eines Lautsprechers in Abhängigkeit von seinem Q-Faktor (f =Resonanzfrequenz) [Sta03, S. 110]

Ein hoher Q-Faktor führt also zu einem höheren Schalldruckpegel im Tieftonbereich des Lautsprechers. Allerdings lässt er diesen, durch die geringere Dämpfung, bezogen auf den subjektiven Höreindruck, auch unpräziser wirken [Sta03, S.113].

Zur Verringerung von stehenden Wellen und anderen Innenreflexionen werden Lautsprechergehäuse mit Dämmmaterial gefüllt. Dabei ist zu beachten, dass diese Materialien die Schallgeschwindigkeit verringern und dadurch das Gehäusevolumen effektiv vergrößern, da der Schall länger braucht um sich durch das Dämmmaterial fortzupflanzen. Die Zunahme des Gehäusevolumens beträgt bei einer üblichen mittleren Dämpfung (siehe Abbildung 4.4) ca. 20%. Bei einem vollständig gefüllten Gehäuse dagegen bis zu 40%. [Sta03, S. 114]

2.2 Elektronisches Schwenken

Eine wichtige Anforderung an das hier entwickelte Beschallungssystem ist die Möglichkeit die Richtcharakteristik der Hauptkeule um einen Winkel ϑ_H in die entsprechende Richtung abzulenken. Eine Möglichkeit wäre das mechanische Drehen des Lautsprecherarrays um diesen Winkel. Dabei stellt diese Drehung in größeren Entfernungen nur eine Laufzeitänderung des abgestrahlten Schalls der einzelnen Quellen dar [Mös12, S. 101]. Die Drehung bzw. das Schwenken des Arrays kann also auch durch Einstellen geeigneter Verzögerungszeiten realisiert werden. Abbildung 2.4 zeigt den schematischen Aufbau eines Lautsprecherarrays mit einer entsprechenden Verzögerungslinie.

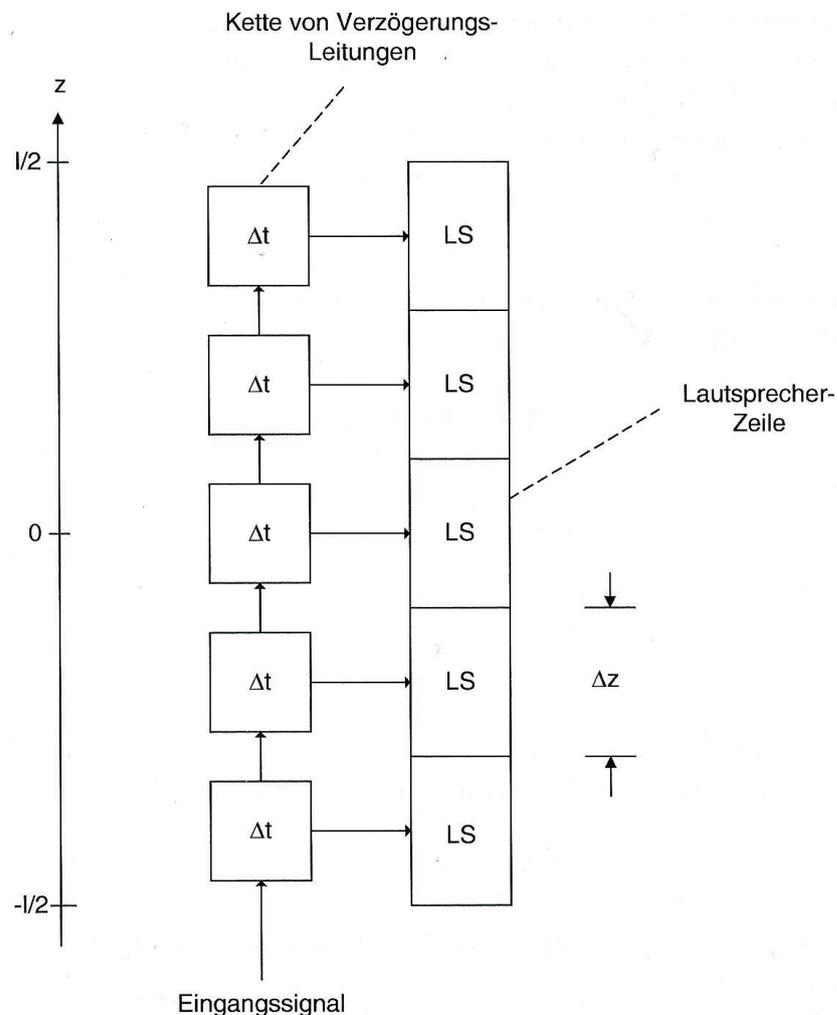


Abbildung 2.4: Lautsprecherzeile mit Verzögerungslinie zum elektronischen Schwenken [Mös12, S. 103]

Nach [Mös12, S. 106] und [Ols91, S. 37] ergibt sich der Hauptabstrahlwinkel ϑ_H aus

$$\sin \vartheta_H = \frac{c * \Delta t}{\Delta z} \quad (2.3)$$

($\Delta z, \Delta t$: Abstand und Verzögerungszeit zweier Elemente, c : Schallgeschwindigkeit in der Luft)

Soll ein Lautsprecherarray um einen gegebenen Winkel ϑ_H elektronisch geschwenkt werden, empfiehlt es sich die Gleichung nach der Verzögerungszeit Δt aufzulösen:

$$\Delta t = \sin \vartheta_H * \frac{\Delta z}{c} \quad (2.4)$$

Die Verzögerungslinie kann nun entsprechend Abbildung 2.4, z.B. auf einem DSP, implementiert werden.

2.3 Digitale Audio-Filter

Die Anpassung des Frequenzgangs von Audiosignalen mit Hilfe von digitalen Filtern ist ein wichtiges Werkzeug in der Audio-Signalverarbeitung. Zur Realisierung von digitalen Filtern auf einem zeitdiskreten System, wie einem DSP, werden zwei unterschiedliche Arten von Filtern verwendet.

Nichtrekursive Filter enthalten keine Rückkopplung. Sie können als linearphasige Filter realisiert werden. Dies kann für bestimmte Anwendungen, wie z.B. das Zusammenwirken verschiedener Lautsprecher bei einer speziellen Beschallungsaufgabe, von Vorteil sein. Allerdings haben sie meist eine sehr hohe Ordnung und benötigen dadurch auch verhältnismäßig lange Rechenzeiten.

Rekursive Filter, zu denen Infinite Impulse Response (IIR) Filter gehören, enthalten Rückkopplungen. Daher sind nicht alle diese Filter stabil. Allerdings benötigen sie bei gleichen Approximationsanforderungen eine wesentlich geringere Ordnung und somit auch geringere Rechenzeiten als nichtrekursive Filter [Zöl05], zudem kann auf das breite Wissen über analoge Filter zurückgegriffen werden. Die Übertragungsfunktion eines analogen Filters im s -Bereich lässt sich mit Hilfe der bilinearen Transformation in eine z -Übertragungsfunktion $H(z)$ überführen.

In dieser Arbeit wurden rekursive Filter verwendet, da sie zur Realisierung von Audio-Filtern, auf Grund ihrer Analogien zu analogen Filtern und der geringen Koeffizienten-Anzahl, gut geeignet sind. Die Filterkoeffizienten einer Übertragungsfunktion $H(z)$ für digitale Audio-Filter lassen sich mit Hilfe einer Berechnungssoftware wie *MATLAB* oder durch Entwurfsverfahren (z.B. aus [Zöl05]) direkt berechnen. Bei der Implementierung mehrerer Filter der Form

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (2.5)$$

auf einem DSP, bietet sich der Übersichtlichkeit halber die Umsetzung der sogenannten Direkt Form II Sektionen in Kaskade (Abbildung 2.5) an.

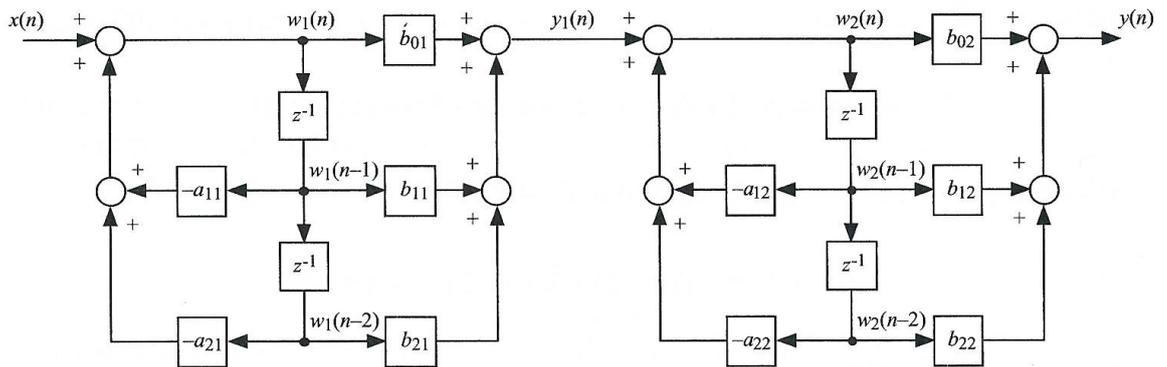


Abbildung 2.5: IIR Filter 4. Ordnung mit zwei Direkt Form II Sektionen in Kaskade [Cha08, S. 216]

Daraus ergibt sich für den, in Abbildung 2.5 dargestellten, IIR Filter 4. Ordnung die Übertragungsfunktion

$$H(z) = \frac{(b_{01} + b_{11}z^{-1} + b_{21}z^{-2})(b_{02} + b_{12}z^{-1} + b_{22}z^{-2})}{(1 + a_{11}z^{-1} + a_{21}z^{-2})(1 + a_{12}z^{-1} + a_{22}z^{-2})} \quad (2.6)$$

Durch die kaskadenförmige Struktur lassen sich einfach zusätzliche Filter $H(z)$ dem Signalweg hinzufügen oder auch wieder entfernen.

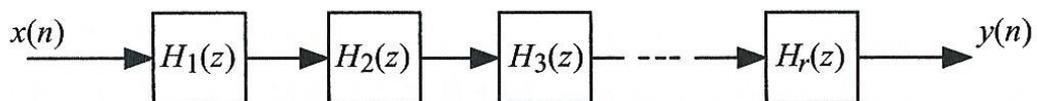


Abbildung 2.6: Kaskadenförmige IIR Filterstruktur [Cha08, S. 215]

3 Lösungsidee / Entwurf

Beim domänenübergreifenden Entwickeln eines mechatronischen Systems kann es von Vorteil sein, Vorgehen und Arbeitsweisen zu strukturieren, um eine möglichst große Übereinstimmung von den Anforderungen zu den Eigenschaften des fertigen Produkts sicherzustellen. Methoden und Werkzeuge dafür bietet unter anderem die Richtlinie VDI 2206 [VDI04].

3.1 V-Modell

Das V-Modell bietet ein allgemeingültiges Modell zum Entwurf mechatronischer Systeme. Anhand der Anforderungen wird ein Systementwurf erstellt bei dem das Gesamtsystem in Teilsysteme untergliedert wird. Im domänenspezifischen Entwurf werden die Lösungskonzepte der Teilsysteme konkretisiert. Diese werden dann wieder in das Gesamtsystem integriert. Durch eine ständige Eigenschaftsabsicherung wird die Erfüllung der Anforderungen sichergestellt. Dabei wird mit zunehmender Produktreife bis zur Fertigstellung des finalen Produkts der Makrozyklus häufig mehrfach durchlaufen.

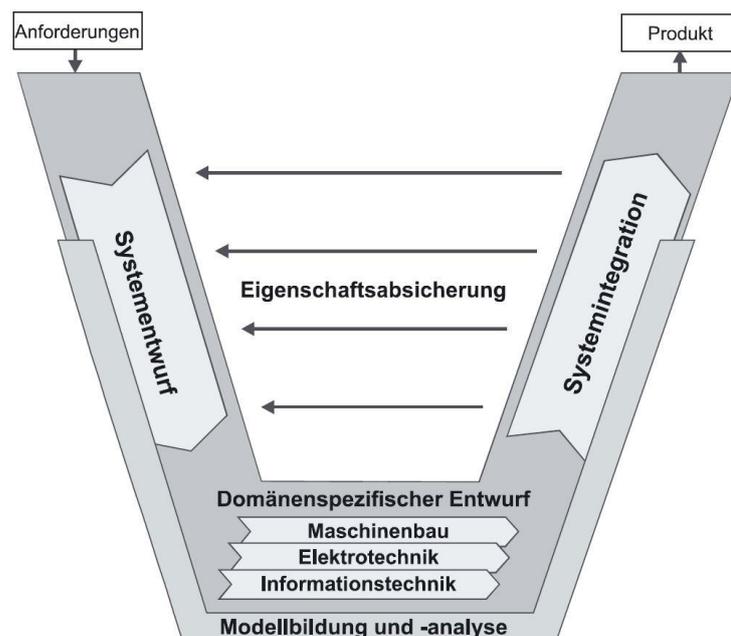


Abbildung 3.1: V-Modell als Makrozyklus [VDI04, S. 29]

3.2 Anforderungen

Das Beschallungssystem soll in der Lage sein, ein Automodell (Maßstab ca. 1:10) mit unterschiedlichen Signalen aus dem Frequenzbereich von 200 Hz bis 20 kHz zu beschallen. Dabei soll sowohl die Beschallung mit Sinus und Rauschen als auch mit Umgebungs- und Fahrtgeräuschen möglich sein. Das Signal lässt sich durch Anheben oder Absenken verschiedener Frequenzbänder manipulieren und so an eine spezielle Beschallungsaufgabe anpassen. Dabei lässt sich der Schalldruck an unterschiedlichen Positionen messen. Das Gesamtsystem soll dabei möglichst kostengünstig sein und einen kompakten Aufbau haben.

Tabelle 3.1: Anforderungen an das Gesamtsystem

Anforderungsliste	
A1	gerichtete Beschallung eines Automodells (Maßstab ca. 1:10)
A2	Frequenzbereich: 200 Hz – 20 kHz
A3	Simulation von Umgebungs- bzw. Fahrtgeräuschen
A4	Beschallung mit Sinus oder Rauschen
A5	Anheben oder Absenken verschiedener Frequenzbänder
A6	Ändern der Richtcharakteristik mit Hilfe von elektronischem Schwenken
A7	Kompakter Aufbau
A8	Messung des Schalldrucks
A9	Kostengünstiges Gesamtsystem

3.3 Systementwurf

Der Systementwurf beschreibt nach [VDI04, S. 29f] die Festlegung eines domänenübergreifenden Lösungskonzepts, welches, durch Zerlegung des Gesamtsystems in wesentliche Teilsysteme, physikalische und logische Wirkungsweisen des zukünftigen Produkts beschreibt.

Bezogen auf das hier zu entwickelnde Beschallungssystem kann, unter Beachtung der Anforderungsliste, die Zerlegung des Gesamtsystems in die Teilsysteme Signalverarbeitung, Verstärkung, Signalausgabe und Messung vorgenommen werden. Abbildung 3.2 zeigt den schematischen Aufbau.

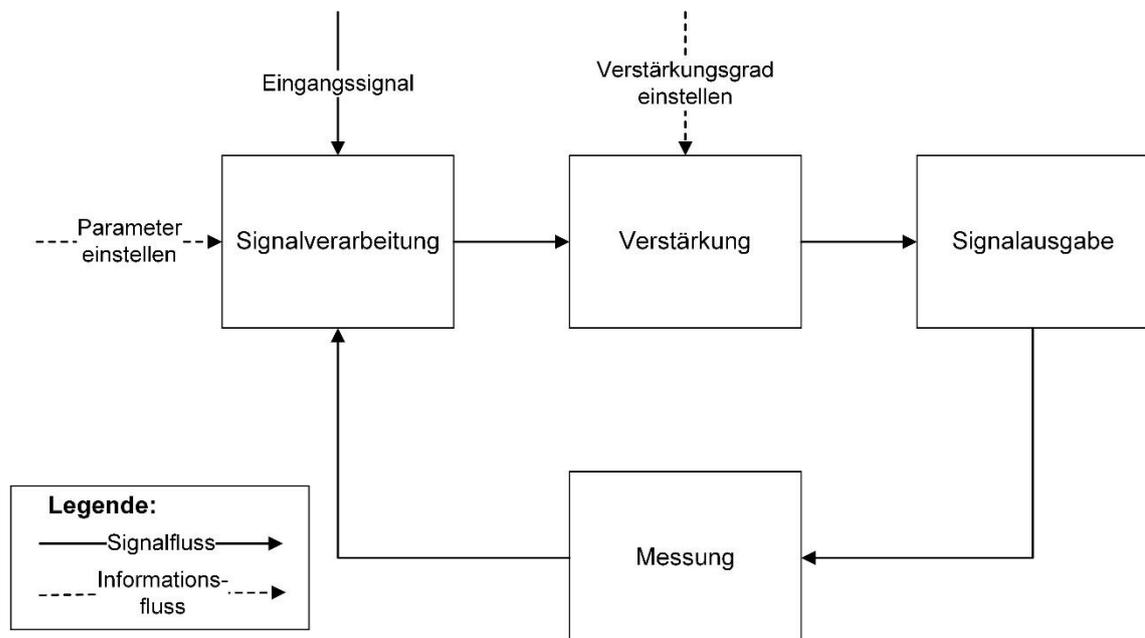


Abbildung 3.2: Signalfluss der Teilsysteme

4 Domänenspezifische Entwicklung

Im folgenden Kapitel werden der Aufbau eines vierkanaligen Beschallungssystems, mit Verstärker und Lautsprechern, sowie die Programmierung des DSP-Boards beschrieben.

4.1 TMS320C6713 DSK Tochterkarte

4.1.1 Einleitung zur Tochterkarte

Die Tochterkarte *DSK_AUDIO4* von *Educational DSP, LLC*, die für diese Arbeit zur Verfügung steht, stellt jeweils vier 16-bit Ein- und Ausgangskanäle für das DSP-Board *TMS320C6713 DSP Starter Kit (DSK)* von *Texas Instruments (TI)* bereit. Sie wird an das „External Peripheral Interface“ des TI-Boards angeschlossen. Bei den Eingängen kann, für „codec 0“ und „codec 1“ separat, zwischen „stereo line in“ und den Mikrofonkanälen gewählt werden. Die Mikrofonkanäle verfügen zudem über eine 20 dB Vorverstärkung.

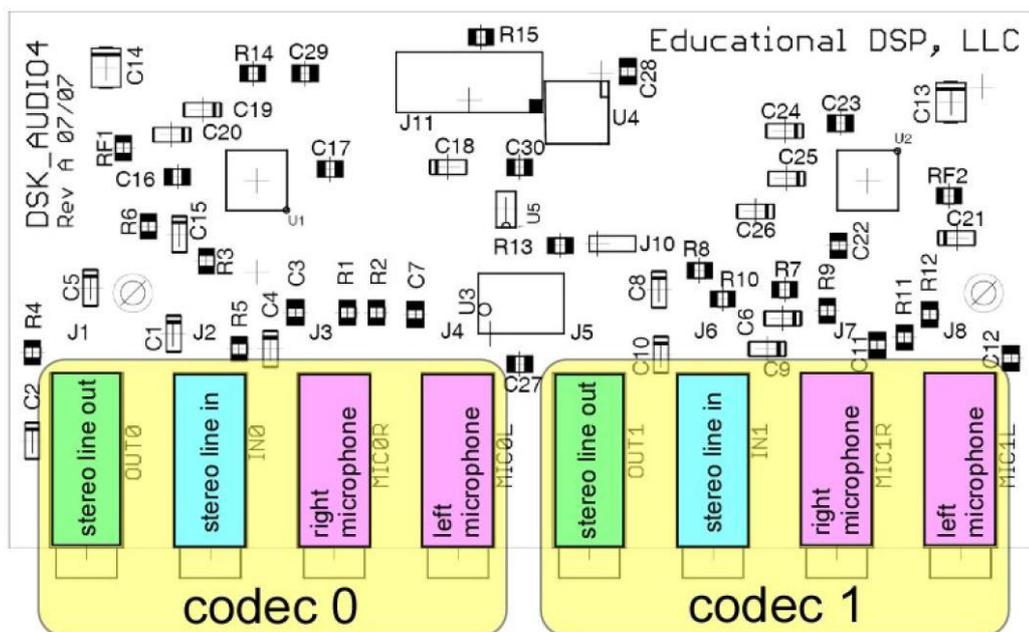


Abbildung 4.1: DSK_AUDIO4 Tochterkarte [Edu10, S. 3]

4.1.2 Einrichtung der Tochterkarte in Code Composer Studio v5

Bei den Hinweisen zur Erstellung eines Projekts für die Tochterkarte *DSK_AUDIO4* in Code Composer Studio (CCS) v5 wird davon ausgegangen, dass bereits ein Projekt für das DSP-Board *TMS320C6713 DSK* in CCS v5 nach [Gor14] besteht.

Zum Einbinden der Tochterkarte müssen folgende Dateien zu dem bestehenden Projekt hinzugefügt werden:

- codec.c
- codec.h
- dsk_audio4.c
- dsk_audio4.h
- dsk_audio4_hal_dsk6713.c
- vectors1rx.asm
- Ink6713.cmd

Die Dateien stehen auf der Webseite http://www.educationaldsp.com/stockproduct_dsk_audio4.htm des Herstellers zum freien Herunterladen zur Verfügung. Für diese Arbeit wurden die in [Käs08] angepassten Dateien „codec.c“ und „codec.h“ verwendet. Sie bieten vier zusätzliche Funktionen zur Nutzung der Ein- und Ausgänge und ermöglichen eine, dem AIC23 Codec des DSK-Boards, sehr ähnliche Syntax.

Um Konflikte durch den Zugriff auf dieselben Ressourcen zu vermeiden, sollten, falls sie im bestehenden Projekt vorhanden sind, folgende Dateien entfernt werden:

- C6713dsk.cmd
- Vectors_intr.asm / Vectors_poll.asm

Auf Grund der unterschiedlichen Initialisierungsdateien (z.B. *.asm) für die Ansteuerung der Register (MCBSP) ist es in dieser Konfiguration nicht möglich die Ein- und Ausgänge des TI-Boards und die der Tochterkarte gleichzeitig zu verwenden [Käs08, S. 6]. Es stehen also maximal vier einzeln ansteuerbare Kanäle für die Ausgabe zur Verfügung.

4.2 Lautsprecher

Um den geforderten Übertragungsbereich von 200 Hz – 20 kHz abzudecken, wird ein Breitbandlautsprecher der Firma *VISATON* ausgewählt. Der Lautsprecher *FRS 8* hat in diesem Bereich laut Hersteller einen linearen Frequenzgang und, verglichen mit anderen Lautsprechern, eine gute Nennbelastbarkeit. Es wird die Variante mit 4 Ω Nennimpedanz gewählt, da diese mehr Leistung umsetzt als die 8 Ω Variante und bei einem Lautsprecher je Verstärkerkanal besser geeignet ist.



Abbildung 4.2: VISATON FRS 8

Tabelle 4.1: Technische Daten des Lautsprechers

Technische Daten	
Nennbelastbarkeit	30 W
Nennimpedanz	4 Ω
Übertragungsbereich (-10 dB)	100 – 20 kHz
Mittlerer Schalldruckpegel	82 dB (1 W/1 m)
Resonanzfrequenz f_s	120 Hz
Gesamt-Q-Faktor Q_{ts}	0,69

Der hier betrachtete Frequenzbereich liegt oberhalb der Freiluftresonanz f_s des Lautsprechers. Bei der Auswahl eines Gehäuses ist zu beachten, dass sich die Resonanzfrequenz im eingebauten Zustand in Abhängigkeit des Gehäusevolumens verschiebt (siehe Gleichung 2.1). Bei der Resonanzfrequenz hat die Impedanzkurve des Lautsprechers ein Maximum. Aus diesem Grund ist es oft vorteilhaft den Lautsprecher oberhalb dieser Frequenz zu betreiben.

Unter zusätzlicher Berücksichtigung einer üblichen mittleren Dämpfung ($V_g + \text{ca. } 20\%$), ergeben sich bei einem Gehäusevolumen $V_g = 1,5 \text{ l}$ mit einer Einbau-
resonanz f_c von

$$f_c = 120 \text{ Hz} * \sqrt{0,87 * \left(1 + \frac{1 \text{ l}}{1,5 \text{ l} * 1,2}\right)} \approx 140 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

und einem Q-Faktor Q_{tc} im eingebauten Zustand von

$$Q_{tc} = 0,69 * \sqrt{0,87 * \left(1 + \frac{1 \text{ l}}{1,5 \text{ l} * 1,2}\right)} \approx 0,8 \quad (4.2)$$

gute Werte für die hier betrachtete Beschallungsaufgabe. Die Resonanzfrequenz liegt unterhalb des Arbeitsbereiches und der Q-Faktor Q_{tc} führt zu einem guten Ausschwingverhalten (vgl. Abbildung 2.2).

Die Messung der Impedanz (Abbildung 4.3) zeigt, dass die Resonanzfrequenz des Lautsprechers mit 147 Hz nah an dem berechneten Wert liegt.

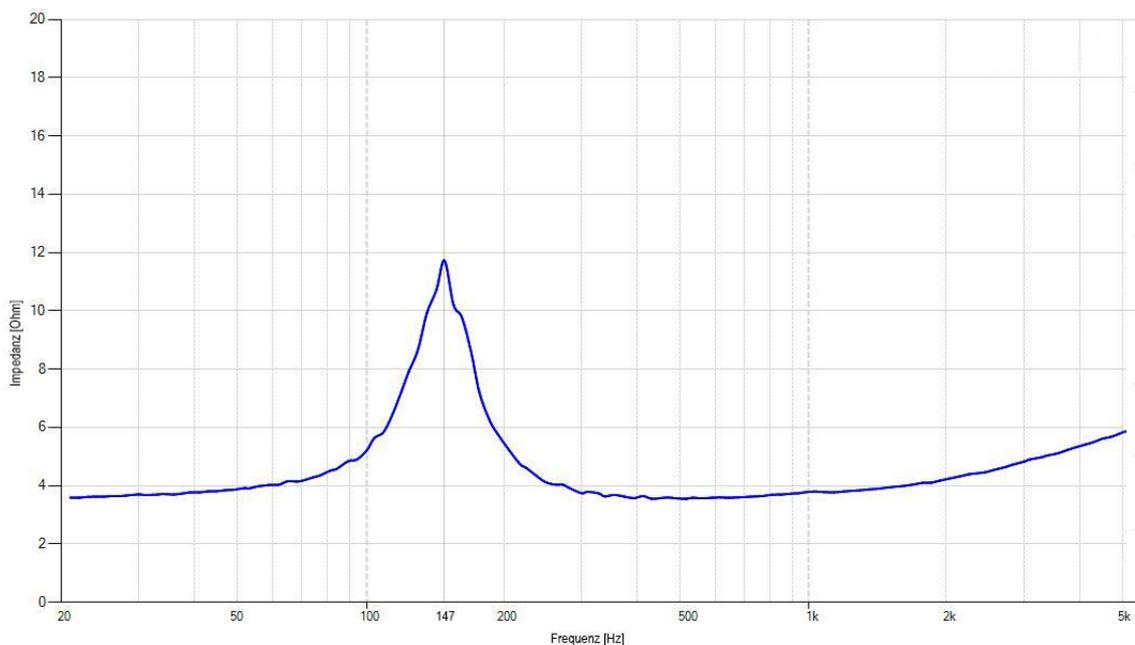


Abbildung 4.3: Impedanzmessung des Lautsprechers



Abbildung 4.4: Lautsprecher Innenansicht

Abbildung 4.4 zeigt die Füllung des Lautsprechers mit Dämmmaterial. Dies entspricht einer nach [Sta03, S. 117] normalen mittelstarken Dämpfung.

Die Form des Gehäuses wird mit den Innenmaßen 10 cm x 12 cm x 12,5 cm so gewählt, dass ein einfacher Aufbau möglich ist, aber gleichzeitig stehende Wellen nicht durch eine kubische Form begünstigt werden. Der Mittelpunkt des Lautsprechers hat zur linken und rechten, sowie zur oberen Kante den gleichen Abstand (6,5 cm), sodass er an diesen Seiten gut mit anderen Lautsprechern kombiniert werden kann. Denn in vielen Beschallungsaufgaben, wie z.B. dem Aufbau eines Arrays, ist der Abstand der Mittelpunkte der Lautsprecher von entscheidender Bedeutung. Die Seitenwände haben eine Wandstärke von 15 mm und sind aus dem Material *Multiplex Birke*. Die Gehäuseteile wurden verleimt und an den Anschlüssen mit Silikon abgedichtet.



Abbildung 4.5: Lautsprecher Vorderseite



Abbildung 4.6: Lautsprecher Rückseite

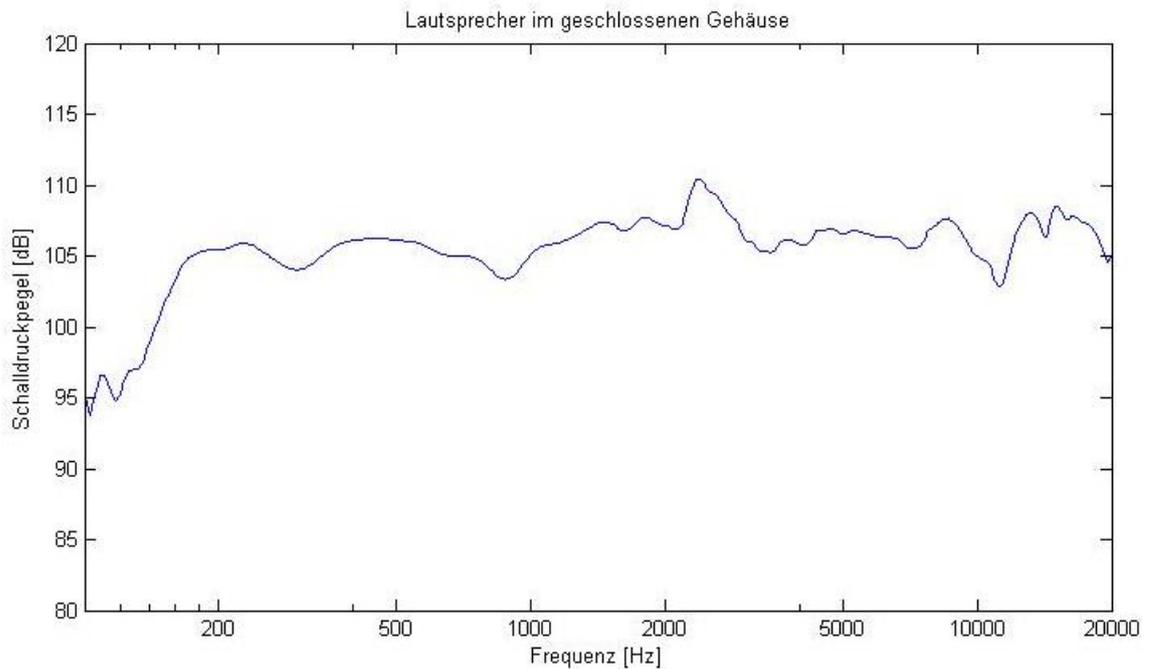


Abbildung 4.7: Frequenzgang des Lautsprechers im geschlossenen Gehäuse

Der Frequenzgang von einem der Lautsprecher ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Er wurde in 1 m Entfernung mit einem Messmikrofon (*Audix TM1*) mit Hilfe einer Grenzflächenmessung aufgenommen. Bei einer Grenzflächenmessung befinden sich Mikrofon und Lautsprecher möglichst nah an einer schallharten Grenzfläche. Sie liegen z.B., wie in diesem Fall, auf einem Betonboden. Dadurch kommen der Direktschall und die erste Reflexion nahezu zeitgleich am Mikrofon an und verstärken durch konstruktive Interferenz das Messsignal.

4.3 Verstärker

Um ein Signal über die Lautsprecher ausgeben zu können, muss es zunächst verstärkt werden. Zur Umsetzung des elektronischen Schwenkens wird, auf der Signalverarbeitungsebene, jeder der vier Lautsprecher mit einer spezifischen Verzögerungszeit belegt. Aus diesem Grund werden auch vier einzeln ansteuerbare Verstärkerkanäle benötigt.

Auf Grund des kompakten kostengünstigen Designs wurde, unter Berücksichtigung der Nennimpedanz und –belastbarkeit des Lautsprechers, das Verstärkermodul *M034N* der Firma *Kemo* ausgewählt.



Abbildung 4.8: Verstärkermodul M034N (Quelle: Conrad.de)

Tabelle 4.2: Technische Daten des Verstärkermoduls

Technische Daten	
Lautsprecherimpedanz	4 – 8 Ω
Frequenzbereich	ca. 20 Hz – 25 kHz
Ausgangsleistung	40 W
Betriebsspannung	6 – 16 V/DC
Stromaufnahme	4000 mA

Um die gewünschte Anzahl von Verstärkerkanälen bereit zu stellen, werden vier *M034N* Verstärkermodule in einem Gehäuse verbaut. Zur Ableitung der Wärme ist pro Modul je ein Kühlkörper vorgesehen.

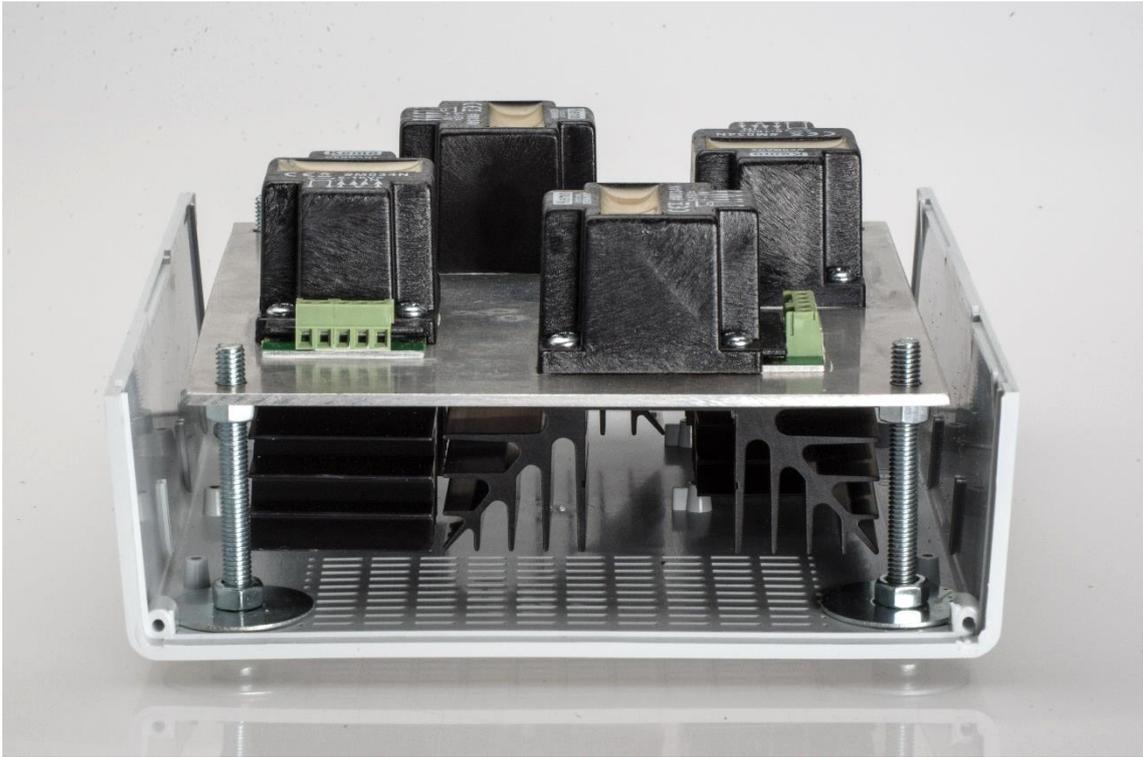


Abbildung 4.9: Anordnung der Verstärkermodule im Gehäuse

An der Vorderseite der Verstärkerbox (Abbildung 4.10) befinden sich für jeden Kanal ein Ein-/Ausmacher und ein Potentiometer zur Regelung der Lautstärke. Die Anschlüsse sind auf der Rückseite (Abbildung 4.11) angebracht. Links oben sind die Buchsen für die Spannungsversorgung aller Module mit 6 – 16 V und einer maximalen Stromaufnahme von 16 A. In der Praxis hat sich allerdings gezeigt, dass die Stromaufnahme bei 15 V und unter Verwendung der Lautsprecher aus Kapitel 4.2, selbst bei Betrieb der Lautsprecher an ihrer Leistungsgrenze, nicht über 4 A steigt. Unter der Spannungsversorgung befinden sich die Eingänge in Form von je einer Clinch-Buchse pro Kanal. Auf der rechten Seite sind die Ausgänge, zum Anschließen der Lautsprecher, angebracht.

Die Verbindungen innerhalb der Verstärkerbox wurden entsprechend des Schaltplans im Anhang A hergestellt.



Abbildung 4.10: Verstärker Vorderseite



Abbildung 4.11: Verstärker Rückseite

Zur Spannungsversorgung der Verstärkerbox wird das Labor-Netzgerät *LRP-1205* der Firma *Voltcraft* verwendet. Es liefert eine geregelte Spannung mit einer Restwelligkeit von 30 mV. Diese ist bei Akustiksaltungen wichtig, da sonst ein deutlich hörbares Grundrauschen entstehen kann.

In der Verstärkerbox sind alle Signalmassen mit der Versorgungsmasse verbunden (siehe Anhang A). Dies ist notwendig, da die Verstärkermodule jeweils nur über einen gemeinsamen Masseanschluss, für das Signal und die Spannungsversorgung, verfügen. Würde man die Massen nicht miteinander verbinden, könnten sich Potentialunterschiede aufbauen, die sich z.B. in einem, am Lautsprecher Ausgang deutlich hörbaren, Netzbrummen (50 Hz) äußern würden. Allerdings entsteht durch das Zusammenlegen der Massen ein Übersprechen der einzelnen Kanäle. Es kann durch den Einsatz von Glättungskondensatoren, die parallel zur Eingangsspannung der Verstärkermodule verbaut sind, reduziert werden. Zur Messung des Übersprechens wird der Signal-zu-Rausch-Abstand bestimmt. Dafür wird an einem Eingang ein Signal mit Pink Noise angelegt und an den Ausgängen der anderen Kanäle der Pegel gemessen. Vergleicht man nun den Signal-zu-Rausch-Abstand des Grundrauschens (bei Betrieb eines einzelnen Verstärkerkanals), mit dem Signal-zu-Rauschabstand des Übersprechens (z.B. Signal an Eingang 3 – Messung des Rauschens an Ausgang 1), lässt sich die Auswirkung des Übersprechens erkennen.

- Signal-zu-Rauschabstand (Grundrauschen): 54 dB
- Signal-zu-Rauschabstand (Übersprechen): 41 dB

Dabei variiert die Stärke des Übersprechens je nach Kanal um $\pm 2,5$ dB.

4.4 Software/Programmierung

4.4.1 Elektronisches Schwenken

Zur Umsetzung des elektronischen Schwenkens (C-Programm aus Anhang B) wurde die Funktion „winkel_delay“ geschrieben, die zu einem gegebenen Winkel nach Gleichung 2.4 eine Verzögerungszeit berechnet. Diese Verzögerungszeit wird, durch Multiplikation mit der Abtastfrequenz des DSP-Boards und anschließendem Runden, als ein Vielfaches der Abtastzeit ausgedrückt und von der Funktion zurückgegeben.

Programmcode:

```
int winkel_delay(int winkel){
    float delta_t=0;
    int x=0;

    delta_t=sin(winkel*(PI/180))*(0.13/343); //Berechnen des Delays
    x=(delta_t*abtastfreq)+0.5; //Runden auf volle Abtastschritte

    return x;
}
```

Dadurch ergibt sich, bei der hier verwendeten Abtastfrequenz von 48 kHz, für das elektronische Schwenken eine Auflösung von:

$$\min(\vartheta_H) = \sin^{-1} \frac{c * \Delta t}{\Delta z} = \sin^{-1} \frac{343 \frac{m}{s} * \frac{1}{48000} s}{0,13m} \approx 3,15^\circ \quad (4.3)$$

Das CCS Tool *GUI Composer™* wird verwendet, um eine einfache grafische Oberfläche zu erstellen, in der das elektronische Schwenken ein- bzw. ausgeschaltet und der Schwenkwinkel geändert werden kann (siehe Abbildung 4.12). Dabei muss allerdings beachtet werden, dass die Manipulation der Variablen des DSPs nur erfolgen kann, wenn das Programm pausiert wird. Bei der Fortsetzung werden die Änderungen umgesetzt. Dies gilt nicht nur für die Verwendung der

grafischen Oberfläche, sondern für Manipulationen von Variablen allgemein auf diesem DSP-Board.

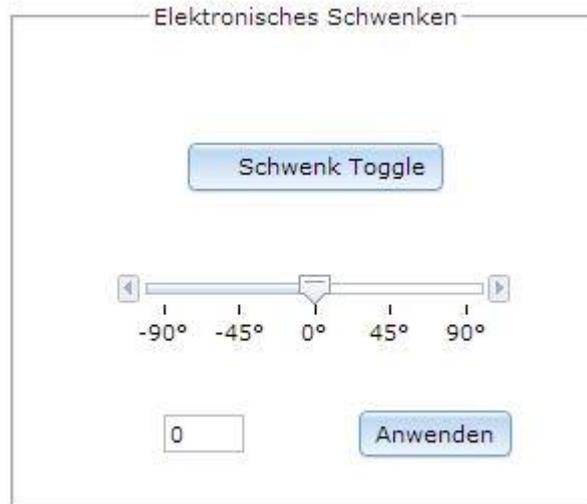


Abbildung 4.12: Grafische Oberfläche zum Schwenken

Der Programmablauf auf dem DSP-Board verläuft interrupt-gesteuert. Das Programm läuft nach der Initialisierung in eine Endlosschleife, von der aus nach jedem Abtastschritt ein Hardware Interrupt ausgelöst wird. Innerhalb dieses Interrupts finden alle Signalverarbeitungsaufgaben, wie z.B. die Ein- und Ausgabe oder verschiedene Berechnungen, statt.

Das Flussdiagramm aus Abbildung 4.13 stellt den Programmteil zum elektronischen Schwenken des Programms aus Anhang B dar. Dieser wird bei jedem Abtastschritt einmal durchlaufen. Dabei wurde, aus Gründen der Übersichtlichkeit, der Programmteil zur Filterung weggelassen. Dieser wird in Kapitel 4.4.2 beschrieben. Es kann hier davon ausgegangen werden, dass im Array „buffer[]“ die letzten Ausgabewerte zwischengespeichert werden.

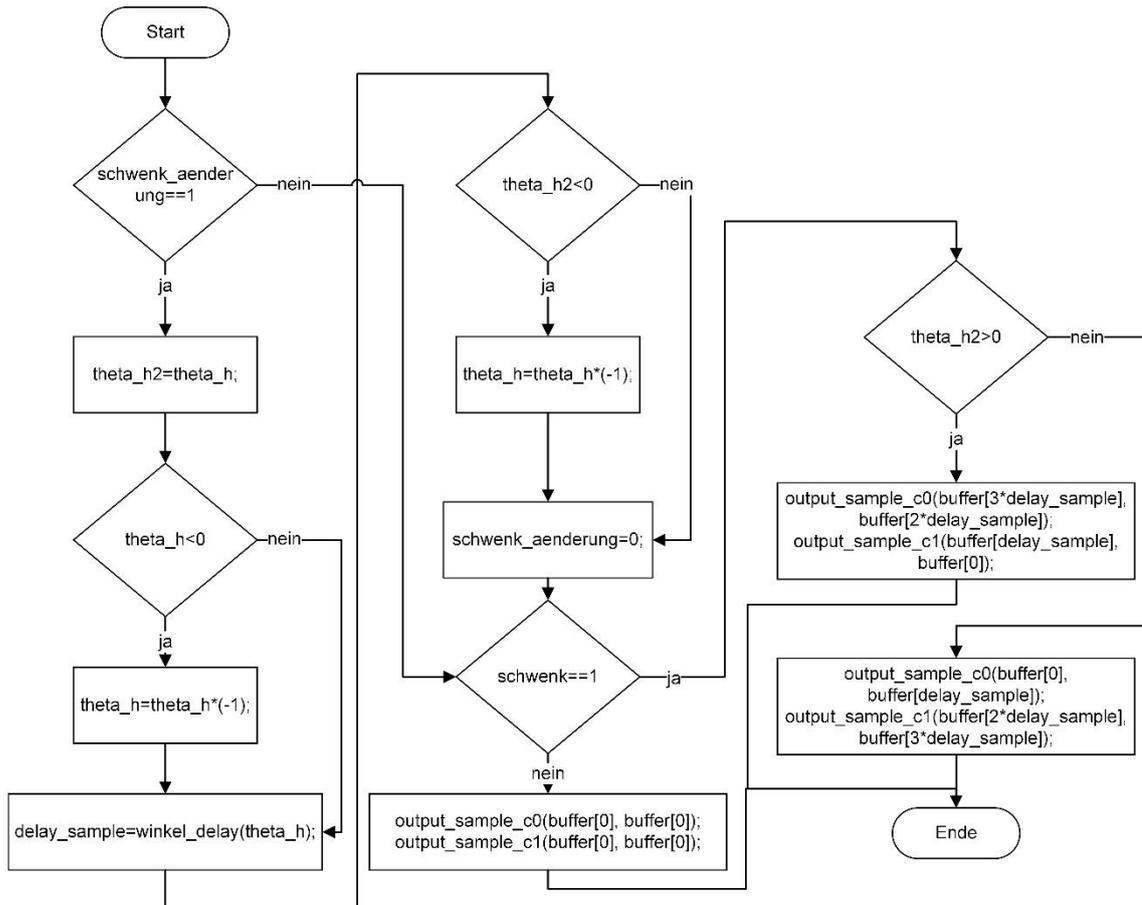


Abbildung 4.13: Flussdiagramm zum Schwenken

Durch den Schieberegler und das Eingabefeld aus der grafischen Oberfläche lässt sich die Variable „theta_h“ direkt verändern. Der Button „Anwenden“ setzt die Variable „schwenk_aenderung“ auf „1“ und mit dem Button „Schwenk Toggle“ wird die Variable „schwenk“ von „1“ auf „0“ bzw. von „0“ auf „1“ gesetzt.

4.4.2 Filterung

In den meisten Audioanwendungen ist die Manipulation des Frequenzgangs mit sogenannten *Equalizern* (EQs) eines der wichtigsten Werkzeuge zur nachträglichen Anpassung des Klangs an die vorgesehene Beschallungsaufgabe. Dabei werden sie in Hi-Fi-Geräten genauso eingesetzt wie in Mischpulten oder professionellen Beschallungssystemen. Aus diesem Grund wurden verschiedenen EQs auf dem DSP implementiert.

Zur Umsetzung von IIR Filtern auf dem DSP (C-Programm in Anhang B) wird die, in Kapitel 2.3 erläuterte, kaskadenförmige Struktur verwendet. Damit können auf übersichtliche Weise mehrere unterschiedliche Filter in Reihe umgesetzt werden. Die jeweiligen Filterkoeffizienten sind in der Datei aus Anhang C gespeichert. Dabei entspricht eine Zeile der Matrix „b“ bzw. „a“ den Koeffizienten eines IIR Filters 2. Ordnung oder anders gesagt einer Sektion aus Abbildung 2.5.

Programmcode:

```
//HP_LP_Filter_Peak.cof
//Filter Koeffizienten

#define NUM_SECTIONS 8

// ---- b-Koeffizienten ----
float b[NUM_SECTIONS][3] = {
{9.92446882E-01, -1.98489376E+00, 9.92446882E-01},//Sektion 1 Hochpass 150 Hz
{9.82089338E-01, -1.96417868E+00, 9.82089338E-01},//Sektion 2 Hochpass 150 Hz
{7.83161279E-01, 1.56632256E+00, 7.83161279E-01},//Sektion 1 Tiefpass 20 kHz
{6.38201876E-01, 1.27640375E+00, 6.38201876E-01},//Sektion 2 Tiefpass 20 kHz
{ 1.0,  0.0,  0.0},    // EQ 1
{ 1.0,  0.0,  0.0},    // EQ 2
{ 1.0,  0.0,  0.0},    // EQ 3
{ 1.0,  0.0,  0.0} };  // EQ 4

// ---- a-Koeffizienten ----
float a[NUM_SECTIONS][2] = {
{-1.98470244E+00, 9.85085085E-01},    // Sektion 1 Hochpass 150 Hz
{-1.96398935E+00, 9.64368002E-01},    // Sektion 2 Hochpass 150 Hz
{1.45386566E+00, 6.78779458E-01},    // Sektion 1 Tiefpass 20 kHz
{1.18476209E+00, 3.68045419E-01},    // Sektion 2 Tiefpass 20 kHz
{ 0.0,  0.0},    // EQ 1
{ 0.0,  0.0},    // EQ 2
{ 0.0,  0.0},    // EQ 3
{ 0.0,  0.0} };  // EQ 4
```

In den ersten vier Sektionen sind zwei IIR Filter 4. Ordnung implementiert. Ein Butterworth Tiefpass bei 20 kHz, um den Lautsprecher vor unerwünschten hochfrequenten Ausschlägen zu schützen, sowie ein Butterworth Hochpass bei 150

Hz, der Leistungsverluste im, hier nicht benötigten, tieffrequenten Bereich verhindert. Diese Filterkoeffizienten wurden mit *MATLAB* berechnet.

Wie man sieht, enthalten die letzten vier Sektionen keine Filter. Hier ist nur der Koeffizient $b_0 = 1$, um das Signal unbeeinflusst durchzuschleifen. Diese „freien“ Sektionen ermöglichen es dem Benutzer, je nach Anwendung, eigene Filter hinzu zu fügen. Dazu wurde die grafische Oberfläche aus Kapitel 4.4.1 um eine EQ Sektion erweitert.

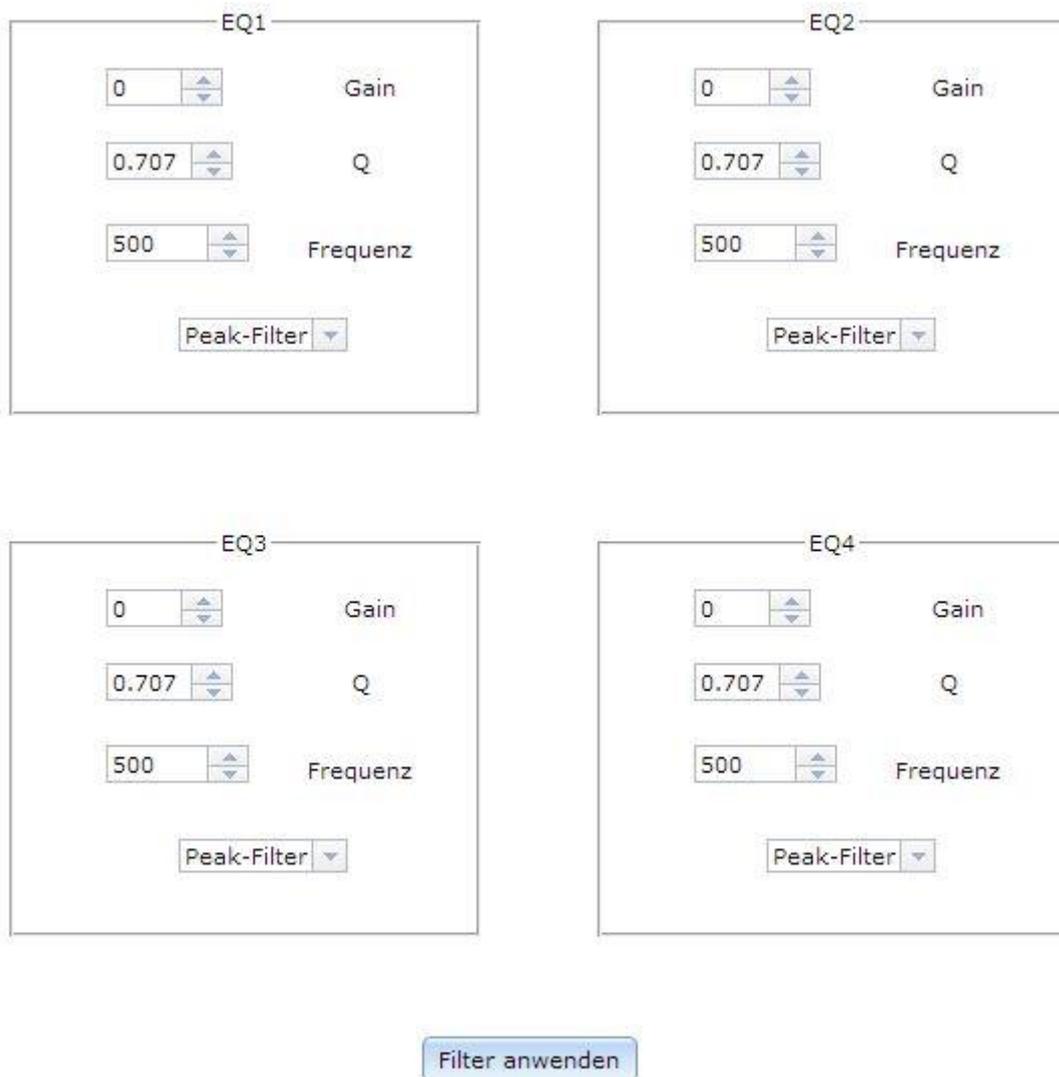


Abbildung 4.14: Grafische Oberfläche zur Erstellung von EQs

Ausgewählt werden können Peak-Filter, Low-Shelving-Filter (LSF) und High-Shelving-Filter (HSF) (siehe [Zöl05]). Dabei können jeweils Verstärkung (Gain), Frequenz und, für die Peak-Filter, auch die Filtergüte Q eingestellt werden. Die Berechnungen der Koeffizienten übernimmt dabei der DSP mit Hilfe der Funktion

„create_EQ“. Dieser Funktion werden die, in der grafischen Oberfläche eingestellten, Werte der Filter mitgegeben. Sie berechnet dann mit den Formeln zum Filterentwurf nach [Zöl05, S. 136f] die entsprechenden Koeffizienten und setzt diese in die Matrizen „b“ und „a“ ein.

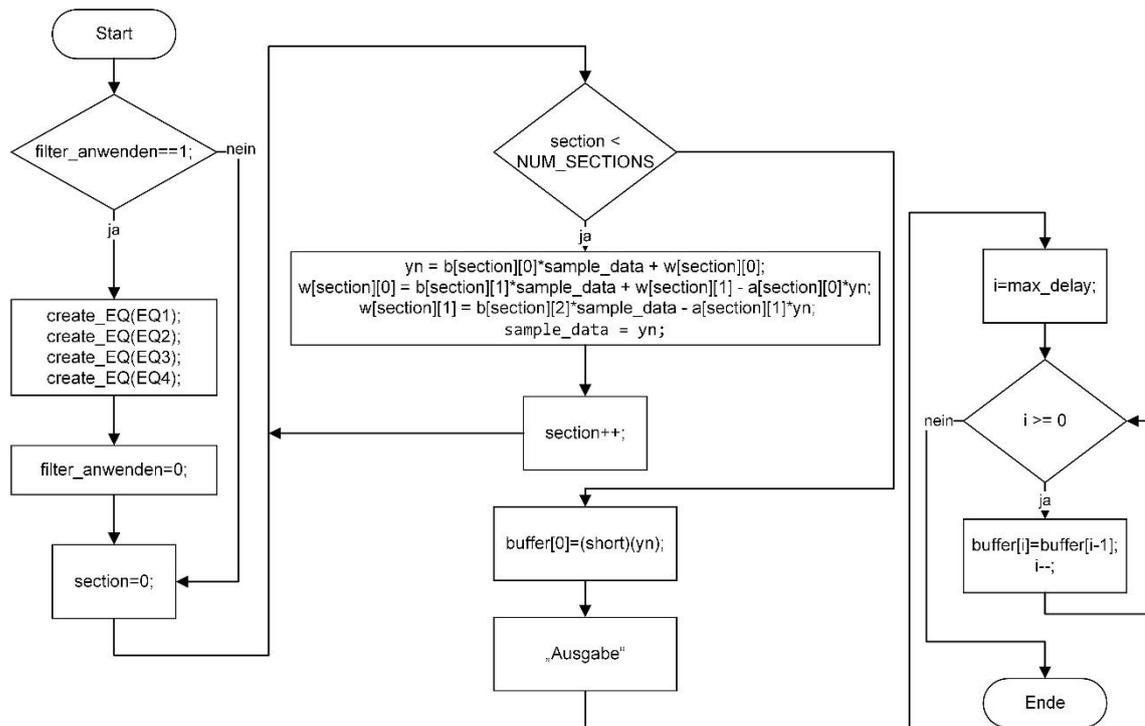


Abbildung 4.15: Flussdiagramm Filterung

Im Flussdiagramm aus Abbildung 4.15 ist der Programmteil des DSP-Programms aus Anhang B zur Filterung eines Eingangssignals über einen Abtastschritt dargestellt. Dabei ist davon auszugehen, dass „sample_data“ den aktuellen Wert des Eingangssignals des DSP-Boards enthält. Zu Beginn des Programms wird abgefragt, ob die Filterdaten z.B. über die grafische Oberfläche geändert wurden. Ist das der Fall, werden die Filterkoeffizienten der neuen Filter durch die Funktion „create_EQ“ ermittelt und in die entsprechenden Sektionen der Variablen „a“ und „b“ geschrieben. Die Filter Anwendung erfolgt dann nach [Cha08, S. 224]. Die Ausgabe des aktuellen Abtastschrittes ist wiederum abhängig von den Einstellungen zum elektronischen Schwenken aus Kapitel 4.4.1 und hier nur durch „Ausgabe“ dargestellt. Anschließend wird noch die Verzögerungsleitung um einen Abtastschritt verschoben.

5 Ergebnisse

Für die folgenden Messungen werden die vier Lautsprecher in einer Reihe nebeneinander auf den Boden (Beton) platziert.

Abbildung 5.1 zeigt die Auswirkungen einiger, auf dem DSP implementierter, Filter auf den Frequenzgang. Die Kurven stellen die Differenz zwischen dem Frequenzgang eines Signals mit Anwendung eines Filters und ohne Filterung dar. Auf diese Weise wird die Wirkung der Filter deutlich. Die Messungen wurden auf der Hauptabstrahlachse des Lautsprecherarrays mit einem Messmikrofon (*Audix TM1*) in 2 m Entfernung als Grenzflächenmessung vorgenommen. Die Filter haben die erwarteten bzw. gewünschten Auswirkungen und können für zukünftige Beschallungsaufgaben eingesetzt werden.

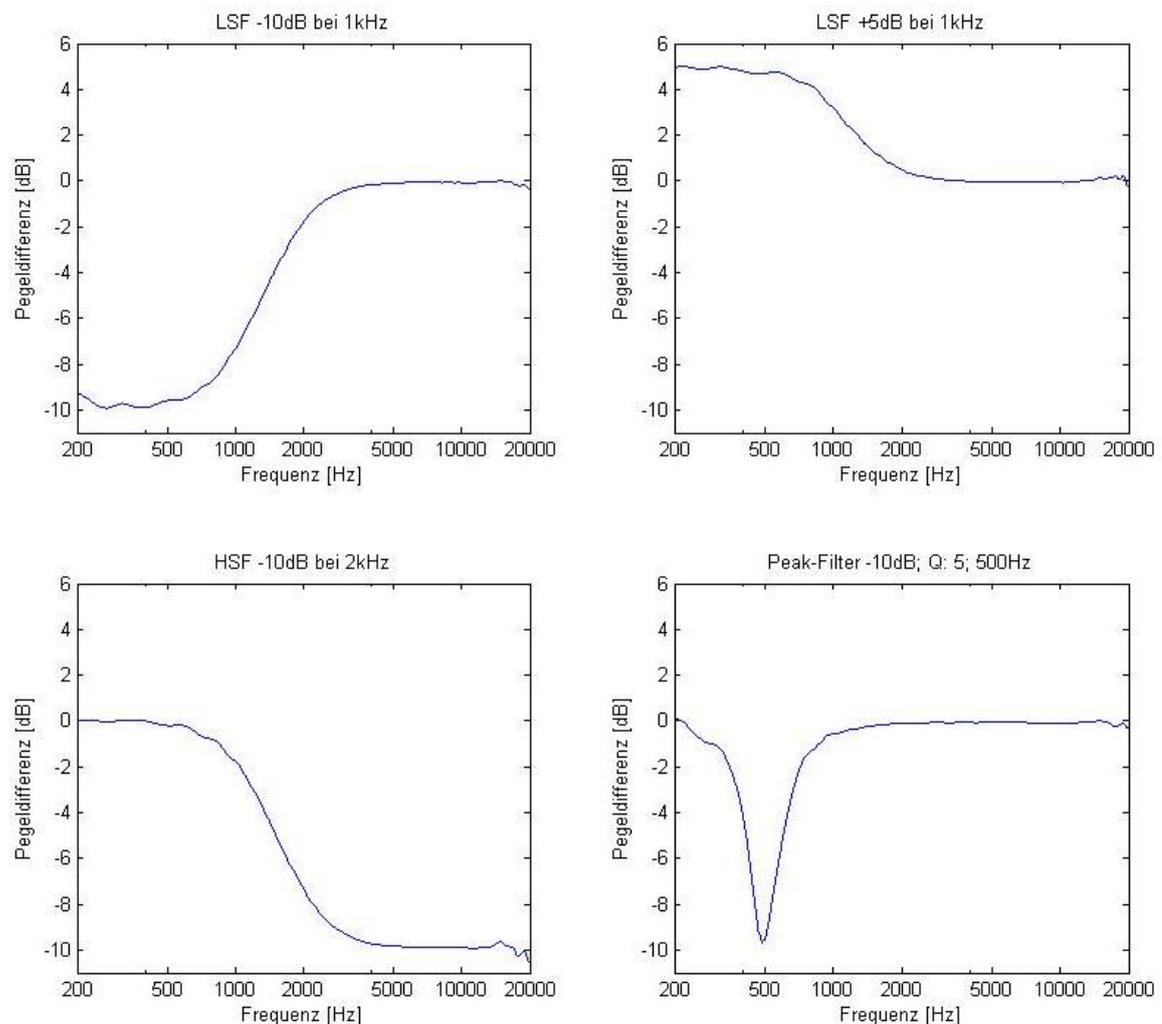


Abbildung 5.1: Messungen der Filter

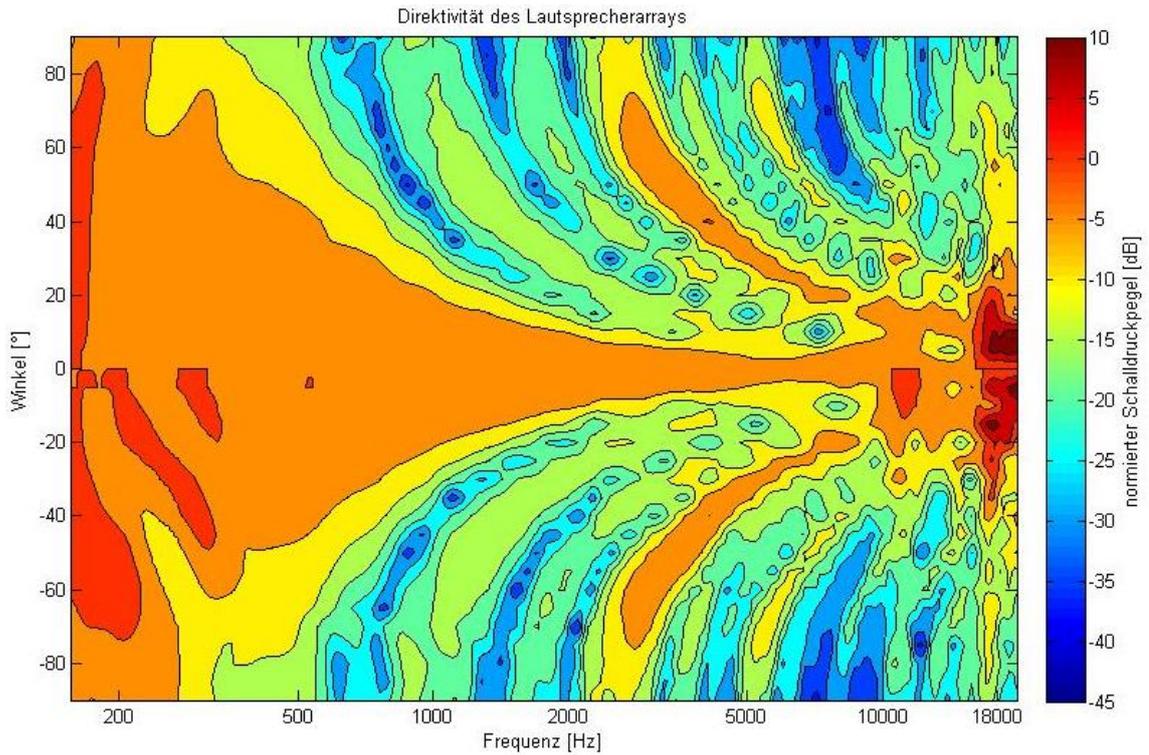


Abbildung 5.2: Direktivität des Lautsprecherarrays

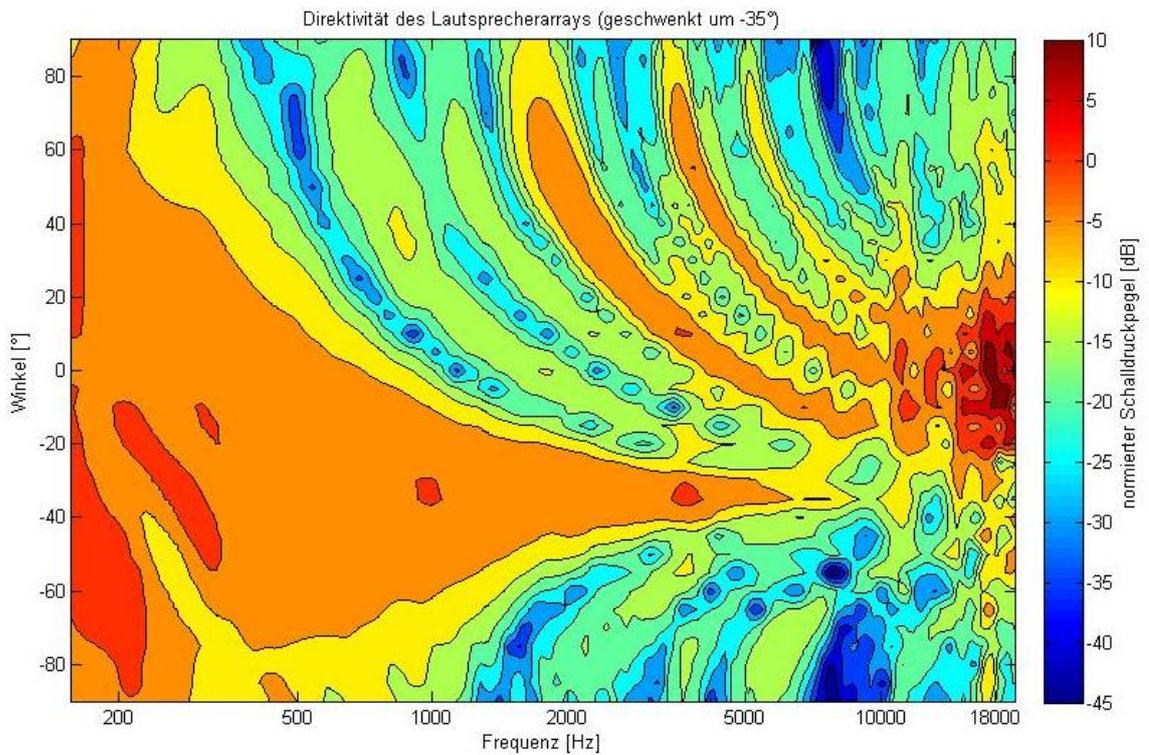


Abbildung 5.3: Direktivität des um -35° geschwenkten Lautsprecherarrays

In Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 ist die Richtwirkung des Lautsprecherarrays im ungeschwenkten und im um -35° geschwenkten Zustand abgebildet. Die Messungen wurden auf einen Halbkreis, mit dem Radius 2 m und dem Mittelpunkt auf der halben Länge des Arrays, in 5° Schritten als Grenzflächenmessung vorgenommen. Dabei wurde für jeden Messpunkt jeweils der Frequenzgang mit einem Messmikrofon (*Audix TM1*) aufgenommen. Die Abbildungen zeigen also je 37 Frequenzgänge, die in einem bestimmten Winkel (Y-Achse) zur Hauptabstrahlrichtung aufgenommen wurden. Die Schalldruckpegel der beiden Graphen sind auf die Hauptabstrahlachse (0°) des ungeschwenkten Systems normiert.

Deutlich zu erkennen sind, neben der Hauptkeule, die Minima (blau) und dazwischen unterschiedlich stark ausgeprägte Nebenkeulen bzw. Nebenmaxima. In Abbildung 5.3 kann man erkennen, dass das Schwenken der Hauptkeule noch bis ca. 6 kHz recht gut funktioniert. Allerdings werden hochfrequenten Anteile über 10 kHz kaum vom Schwenk beeinflusst.

In Tabelle 5.1 werden die Eigenschaften des Gesamtsystems mit den Anforderungen aus Kapitel 3.2 abgeglichen und bewertet. Dabei werden die meisten Anforderungen vollständig erfüllt. Bei einer zukünftigen Beschallungsaufgabe sollte das DSP-Programm allerdings noch um, auf das konkrete Problem zugeschnittene, Messfunktionen erweitert werden.

Tabelle 5.1: Eigenschaftsabsicherung des Gesamtsystems

Erfüllung der Anforderungen		
A1	++	gerichtete Beschallung eines Automodells (Richtwirkung frequenzabhängig; siehe Abbildung 5.2)
A2	++	Frequenzbereich: 200 Hz – 20 kHz
A3 + A4	++	Nutzung des Eingangs am DSP-Board zur Beschallung mit beliebigen Signalen (z.B. Sinus, Rauschen oder Fahrtgeräuschen)
A5	++	Anheben oder Absenken verschiedener Frequenzbänder durch den Einsatz von EQs
A6	++	Ändern der Richtcharakteristik mit Hilfe von elektronischem Schwenken
A7	++	Kompakter Aufbau
A8	+	Messung des Schalldrucks durch Anschließen von Mikrofonen an das DSP-Board möglich
A9	++	Kostengünstiges Gesamtsystem durch Eigenentwicklung der Teilsysteme (Lautsprecher und Verstärkerbox)
++ =: vollständig erfüllt; + =: nahezu/qualitativ erfüllt		

6 Zusammenfassung / Ausblick

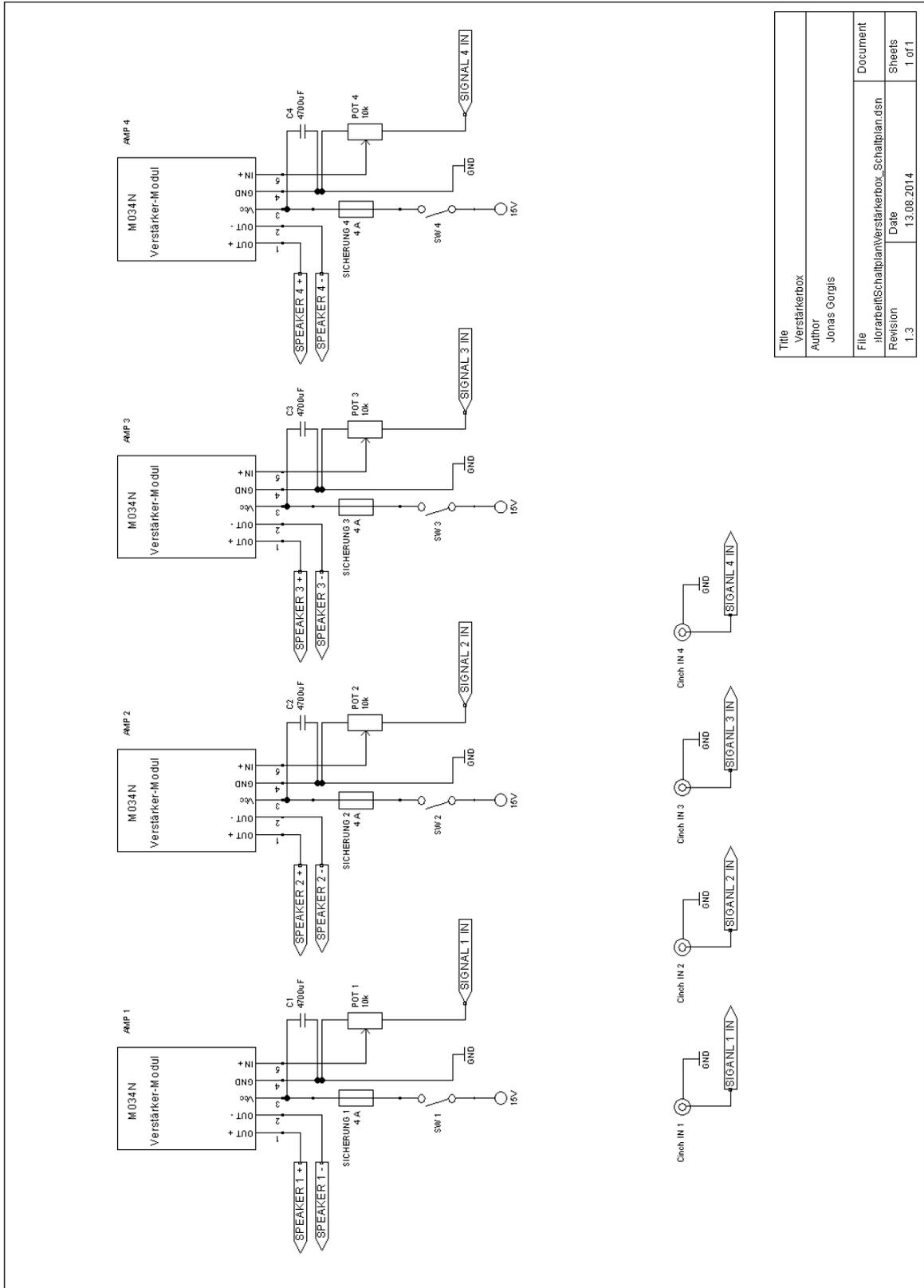
Das in dieser Bachelorthesis entwickelte Beschallungssystem, bestehend aus vier Lautsprechern, einer vierkanaligen Verstärkerbox und einem DSP-Board, lässt sich elektronisch Schwenken und mit Hilfe von EQs im Frequenzgang anpassen. Die Einstellungen zum Schwenken, sowie zu den EQs werden über eine graphische Oberfläche vorgenommen. Das Schwenken der Hauptkeule funktioniert bis zu einer Frequenz von ca. 6 kHz. Hochfrequente Anteile über 10 kHz können allerdings nicht geschwenkt werden. Auf dem DSP-Board sind vier Plätze für je einen HSF, LSF oder Peak-Filter implementiert. Diese können durch die kaskadenförmige Struktur leicht, durch kleine Anpassungen der Software, auf eine größere Filteranzahl erweitert werden.

Das DSP-Board eignet sich gut dazu, es um zusätzliche Messfunktionen zu erweitern. Es können bis zu 4 mono Mikrofone angeschlossen werden. Die Daten werden in Echtzeit vom DSP-Board weiterverarbeitet und gespeichert. Dadurch bieten sich für zukünftige konkrete Beschallungsaufgaben weitere Anpassungsmöglichkeiten.

Quellenverzeichnis

- [Cha08] R. Chassaing, D. Reay: *Digital Signal Processing and Applications with the C6713 and C6416 DSK Second Edition*, Wiley, 2008
- [Edu10] DSK_AUDIO4 Four-Channel Audio Daughtercard, Dokumentation, Dokumentation, Educational DSP, LLC, 2010
- [Gor14] J. Gorgis: *Digitale Signalverarbeitung mit einem Fließkomma-DSP*, Studienarbeit, HAW-Hamburg, 2014
- [Käs08] J. Käsbach: *Abschlussbericht C6713 DSK und Code Composer Studio v3.1*, Dokumentation, Helmut Schmidt Universität, 2008
- [Mös12] M. Möser: *Technische Akustik*, Springer, 2012
- [Ols91] H. F. Olson: *Acoustical Engineering*, Professional Audio Journals, Inc, 1991
- [Sta03] B. Stark: *Lautsprecher-Handbuch*, Pflaum, 2003
- [VDI04] *Richtlinie VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*, VDI, 2004
- [Zöl05] U. Zölzer: *Digitale Audiosignalverarbeitung*, Teubner, 2005

Anhang A: Schaltplan der Verstärkerbox



Titel	Verstärkerbox
Author	Jonas Gorgis
File	:\lorabett\Schaltplan\Verstärkerbox_Schaltplan.dsn
Revision	1.3
Date	13.08.2014
Document	Document
Sheets	1 of 1

Anhang B: C-Programm zum elektronischen Schwenken mit Filterung

```

#include <c6x.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include "c6x11dsk.h"
#include "codec.h"
#include "dsk_audio4.h"           // Tochterkarte
#include <math.h>
#include "DSK6713_AIC23.h"       // codec support

//----- Filterkoeffizienten einbinden -----
//#include "HP_150Hz.cof"         // HP bei 150Hz
//#include "LP_20kHz.cof"        // LP bei 20kHz
//#include "HP_LP_Filter.cof"     // HP bei 150Hz; TP bei 20kHz
#include "HP_LP_Filter_Peak.cof"  // HP, LP + 4 Filter über GUI

Uint32 fs=DSK6713_AIC23_FREQ_48KHZ; // Abtastfrequenz setzen

#define LEFT 0
#define RIGHT 1

#define EQ_TYPE_PEAK 0
#define EQ_TYPE_LSF 1
#define EQ_TYPE_HSF 2

//#define PI 3.14159265358979

#define BUFSIZE 1024           // Bufferlänge
#define abtastfreq 48000       // Abtastfrequenz für Berechnungen
#define max_delay 57          // größte verwendete Verzögerungszeit in Sample Anzahl (bei 90 Grad)

union {Uint32 uint; short channel[2];} AIC23_data;

short buffer[max_delay+1];     // Inputbuffer
//int bufindex = 0;           // Bufferindex
short i;
short schwenk = 0;
short schwenk_aenderung = 0, filter_anwenden = 0;
int delay_sample = 0;
int theta_h = 0;
int theta_h2 = 0;
float EQ4_GAIN=0.0, EQ4_Q=1.0, EQ4_FREQ=500;
float EQ5_GAIN=0.0, EQ5_Q=1.0, EQ5_FREQ=500;
float EQ6_GAIN=0.0, EQ6_Q=1.0, EQ6_FREQ=500;
float EQ7_GAIN=0.0, EQ7_Q=1.0, EQ7_FREQ=500;
int EQ4_TYPE=0, EQ5_TYPE=0, EQ6_TYPE=0, EQ7_TYPE=0;

```

```

int winkel_delay(int winkel);
void create_EQ (int EQ_TYPE, float EQ_GAIN, float EQ_Q, float EQ_FREQ, int
EQ_SECTION);

float w[NUM_SECTIONS][2] = {0};

interrupt void McBSP1_Rx_ISR()
{
float sample_data;           // input to each section
int section;                // index for section number
float yn;                   // output values in each stage
if(filter_anwenden==1){

    create_EQ(EQ4_TYPE, EQ4_GAIN, EQ4_Q, EQ4_FREQ, 4); //EQ1 berechnen
    create_EQ(EQ5_TYPE, EQ5_GAIN, EQ5_Q, EQ5_FREQ, 5); //EQ2 berechnen
    create_EQ(EQ6_TYPE, EQ6_GAIN, EQ6_Q, EQ6_FREQ, 6); //EQ3 berechnen
    create_EQ(EQ7_TYPE, EQ7_GAIN, EQ7_Q, EQ7_FREQ, 7); //EQ4 berechnen
    filter_anwenden = 0;
}

if (schwenk_aenderung==1) // falls Winkeländerung (Schwenken)
{
    theta_h2 = theta_h;
    if (theta_h<0) theta_h = theta_h*(-1); //für negative Schwenkwinkel
    delay_sample = winkel_delay(theta_h); //Berechnung von delay_sample
    if (theta_h2<0) theta_h = theta_h*(-1);
    schwenk_aenderung = 0;
}

AIC23_data.uint = input_sample_c0(); //read Data from codec 0
sample_data = (float)(AIC23_data.channel[LEFT]); // input sample einlesen

// ----- Verarbeitung -----

// -- Anwendung der Filter --
for (section=0 ; section< NUM_SECTIONS ; section++)
{
    yn = b[section][0]*sample_data + w[section][0];
    w[section][0] = b[section][1]*sample_data + w[section][1] - a[sec-
tion][0]*yn;
    w[section][1] = b[section][2]*sample_data - a[section][1]*yn;
    sample_data = yn; // output der aktuellen Sektion wird input der nächsten
}

buffer[0] = (short) (yn); // Daten in Buffer speichern

```

```

if (schwenk==1)
{
    if (theta_h2>0)
    {
        // ----- Ausgabe mit positivem Schwenkwinkel -----
        output_sample_c0(buffer[3*delay_sample], buffer[2*delay_sam-
ple]);
        output_sample_c1(buffer[delay_sample], buffer[0]);
    }
    else
    {
        // ----- Ausgabe mit negativem Schwenkwinkel -----
        output_sample_c0(buffer[0], buffer[delay_sample]);
        output_sample_c1(buffer[2*delay_sample], buffer[3*delay_sam-
ple]);
    }
}

else
{
    // ----- Ausgabe ohne Schwenken -----
    output_sample_c0(buffer[0], buffer[0]);
    output_sample_c1(buffer[0], buffer[0]);
}

for (i=max_delay; i>=0; i--)
{
    buffer[i] = buffer[i-1];           //Verschieben der Delay-Line
}

// if(++bufindex >= BUFSIZE) bufindex = 0; // Buffer Index um 1 erhöhen;
// wenn Buffergröße erreicht Index 0 setzen

return;
}

void main()
{
    //Initialisieren des Buffers
    for(i=0; i<max_delay+1; i++)
    {
        buffer[i] = 0;
    }

    //comm_intr();                       // DSK initialisieren
    DskAudio4_Init();                   //Tochterkarte initialisieren

    /*Inits for daughtercard*/
    CSR=0x100;                          // disable all interrupts
    IER=1;                               // disable all interrupts except NMI
}

```

```

*(unsigned char *)0x90080006 = 0x03; // McBSPs to J3

*(unsigned volatile int *)IMH = 0x08203DC3; // assign McBSP1 to
INT11/12

// configure serial port 1 as the master on the I2S connection
// to the PCM3794 codec(s). The McBSP generates the bit clock and L/R
clock
// by dividing down the master clock sent to it from the daughtercard
Init_McBSP(McBSP1_Base, 1); // I2S master
Init_McBSP(McBSP0_Base, 0); // I2S slave

IER |= 0x1002; // enable McBSP1 Rx interrupt (12)
ICR = 0xffff; // clear all pending interrupts
CSR |= 1; // set GIE

while(1); // Endlosschleife
}

int winkel_delay(int winkel){ // Berechnung des Delays in Abtast-
// schritten
float delta_t=0; // aus einem gegebenen Winkel
int x=0;

delta_t=sin(winkel*(PI/180))*(0.13/343); // Berechnen des Delays
x=(delta_t*abtastfreq)+0.5; // Runden auf volle Abtast-
// schritte

return x;
}

void create_EQ (int EQ_TYPE, float EQ_GAIN, float EQ_Q, float EQ_FREQ, int
EQ_SECTION){
float K=0.0, K2=0.0, omega_g=0.0, V0=0.0, a0=1.0, a1=0.0, a2=0.0,
b1=0.0, b2=0.0;
float wurzel2=0.0, wurzel2V0=0.0, wurzel2dV0=0.0, tmp=0.0;

if(EQ_GAIN!=0){
omega_g = 2*PI*EQ_FREQ;
K = tan((omega_g)/(2*abtastfreq));
K2 = pow(K,2);
wurzel2 = sqrt(2);

switch(EQ_TYPE) {
case EQ_TYPE_PEAK: // Filterentwurf für Peak-Filter 2. Ordnung
if(EQ_GAIN>0){
V0 = pow(10, (EQ_GAIN/20));
a0 = (1+((V0*K)/EQ_Q)+K2)/(1+(K/EQ_Q)+K2);
a1 = (2*(K2-1))/(1+(K/EQ_Q)+K2);
a2 = (1-((V0*K)/EQ_Q)+K2)/(1+(K/EQ_Q)+K2);
b1 = a1;
b2 = (1-(K/EQ_Q)+K2)/(1+(K/EQ_Q)+K2);
}
if(EQ_GAIN<0){
V0 = pow(10, (-EQ_GAIN/20));
}
}
}

```

```

        a0 = (1+(K/EQ_Q)+K2)/(1+(K*V0/EQ_Q)+K2);
        a1 = (2*(K2-1))/(1+(K*V0/EQ_Q)+K2);
        a2 = (1-(K/EQ_Q)+K2)/(1+(K*V0/EQ_Q)+K2);
        b1 = a1;
        b2 = (1-(K*V0/EQ_Q)+K2)/(1+(K*V0/EQ_Q)+K2);
    }
    break;
case EQ_TYPE_LSF: //Filterentwurf für Tiefen-Shelving-Filter 2.
                  Ordnung
    if(EQ_GAIN>0){
        V0 = pow(10, (EQ_GAIN/20));
        tmp = 2*V0;
        wurzel2V0 = sqrt(tmp);
        tmp = 2/V0;
        wurzel2dV0 = sqrt(tmp);
        a0 = (1+wurzel2V0*K+V0*K2)/(1+wurzel2*K+K2);
        a1 = (2*(V0*K2-1))/(1+wurzel2*K+K2);
        a2 = (1-wurzel2V0*K+V0*K2)/(1+wurzel2*K+K2);
        b1 = (2*(K2-1))/(1+wurzel2*K+K2);
        b2 = (1-wurzel2*K+K2)/(1+wurzel2*K+K2);
    }
    if(EQ_GAIN<0){
        V0 = pow(10, (-EQ_GAIN/20));
        tmp = 2*V0;
        wurzel2V0 = sqrt(tmp);
        tmp = 2/V0;
        wurzel2dV0 = sqrt(tmp);
        a0 = (1+wurzel2*K+K2)/(1+wurzel2V0*K+V0*K2);
        a1 = (2*(K2-1))/(1+wurzel2V0*K+V0*K2);
        a2 = (1-wurzel2*K+K2)/(1+wurzel2V0*K+V0*K2);
        b1 = (2*(V0*K2-1))/(1+wurzel2V0*K+V0*K2);
        b2 = (1-wurzel2V0*K+V0*K2)/(1+wurzel2V0*K+V0*K2);
    }
    break;
case EQ_TYPE_HSF: //Filterentwurf für Höhen-Shelving-Filter 2.
                  Ordnung
    if(EQ_GAIN>0){
        V0 = pow(10, (EQ_GAIN/20));
        tmp = 2*V0;
        wurzel2V0 = sqrt(tmp);
        tmp = 2/V0;
        wurzel2dV0 = sqrt(tmp);
        a0 = (V0+wurzel2V0*K+K2)/(1+wurzel2*K+K2);
        a1 = (2*(K2-V0))/(1+wurzel2*K+K2);
        a2 = (V0-wurzel2V0*K+K2)/(1+wurzel2*K+K2);
        b1 = (2*(K2-1))/(1+wurzel2*K+K2);
        b2 = (1-wurzel2*K+K2)/(1+wurzel2*K+K2);
    }
    if(EQ_GAIN<0){
        V0 = pow(10, (-EQ_GAIN/20));
        tmp = 2*V0;
        wurzel2V0 = sqrt(tmp);
        tmp = 2/V0;
        wurzel2dV0 = sqrt(tmp);
        a0 = (1+wurzel2*K+K2)/(V0+wurzel2V0*K+K2);
        a1 = (2*(K2-1))/(V0+wurzel2V0*K+K2);
        a2 = (1-wurzel2*K+K2)/(V0+wurzel2V0*K+K2);
        b1 = (2*(K2/V0-1))/(1+wurzel2dV0*K+K2/V0);
        b2 = (1-wurzel2dV0*K+K2/V0)/(1+wurzel2dV0*K+K2/V0);
    }

```

```
        }
        break;
    default:
        break;
    }
}

// ---- Filterkoeffizienten in Sektionen schreiben ----
b[EQ_SECTION][0]=a0;
b[EQ_SECTION][1]=a1;
b[EQ_SECTION][2]=a2;
a[EQ_SECTION][0]=b1;
a[EQ_SECTION][1]=b2;

}
```

Anhang C: *.cof-Datei mit Filterkoeffizienten

```
//HP_LP_Filter_Peak.cof
//Filter Koeffizienten

#define NUM_SECTIONS 8

// ---- b-Koeffizienten ----
float b[NUM_SECTIONS][3] = {
{9.92446882E-01, -1.98489376E+00, 9.92446882E-01},//Sektion 1 Hochpass 150 Hz
{9.82089338E-01, -1.96417868E+00, 9.82089338E-01},//Sektion 2 Hochpass 150 Hz
{7.83161279E-01, 1.56632256E+00, 7.83161279E-01},//Sektion 1 Tiefpass 20 kHz
{6.38201876E-01, 1.27640375E+00, 6.38201876E-01},//Sektion 2 Tiefpass 20 kHz
{ 1.0,  0.0,  0.0},    // EQ 1
{ 1.0,  0.0,  0.0},    // EQ 2
{ 1.0,  0.0,  0.0},    // EQ 3
{ 1.0,  0.0,  0.0} };  // EQ 4

// ---- a-Koeffizienten ----
float a[NUM_SECTIONS][2] = {
{-1.98470244E+00, 9.85085085E-01}, // Sektion 1 Hochpass 150 Hz
{-1.96398935E+00, 9.64368002E-01}, // Sektion 2 Hochpass 150 Hz
{1.45386566E+00, 6.78779458E-01}, // Sektion 1 Tiefpass 20 kHz
{1.18476209E+00, 3.68045419E-01}, // Sektion 2 Tiefpass 20 kHz
{ 0.0,  0.0},    // EQ 1
{ 0.0,  0.0},    // EQ 2
{ 0.0,  0.0},    // EQ 3
{ 0.0,  0.0} };  // EQ 4
```

Anhang D: Daten CD

