Automatische Bestimmung parametrischer EQ-Einstellungen

Seminararbeit aus Algorithmen in Akustik und Computermusik 2

Patrick Ziegler
Fabio Perathoner

Betreuung: Dr. Franz Zotter, Dr. Matthias Frank

Graz, 19. Mai 2014

kunst uni graz

institut für elektronische musik und akustik

Zusammenfassung

In dieser Arbeit soll ein Algorithmus in MATLAB entwickelt werden, der es erlaubt, aus einem gegebenen Amplitudengang die Parameter von Equalizern automatisch einzustellen, um diesen zu entzerren. Weiterhin wird untersucht, in welchem Maße eine Entzerrung von Lautsprechern im Raum möglich ist und ob repräsentative Ergebnisse erzielt werden können. Nach Überprüfung des Algorithmus soll dieser anhand einer Beispielmessung zunächst messtechnisch überprüft und anschließend perzeptiv bewertet werden. Die Bewertung umfasst zum Einen, ob die Variation der Filteranzahl psychoakustisch sinnvoll erscheint und zum Anderen, ob die ermittelten Werte für den parametrischen Equalizer verwendbar berechnet wurden und die Entzerrung ist.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **4**

2 Ermittlung der Entzerrkurve **5**

2.1 Inversion und Terzbandglättung 5

2.2 Mittelwertausgleich und Begrenzung 6

3 Berechnung der EQ-Parameter **8**

3.1 Einteilung des Frequenzbereichs 8

3.2 Ermittlung von Verstärkung und Mittenfrequenz 9

3.2.1 Maximale Filterverstärkung 9

3.3 Berechnung der Filtergüte 9

3.3.1 Polynomregression 9

3.3.2 Geradenregression 11

3.3.3 Güte bei Kuhschwanzfiltern 12

3.3.4 Bandbreitekorrekturfaktor 12

3.4 Synthese der Entzerrfilter 13

3.4.1 Mathematische Beschreibung 13

3.5 Parameteroptimierung 15

3.5.1 Minimierung des Fehlerquadrats 15

3.5.2 MATLAB-Funktion *lsqcurvefit* 16

3.5.3 Parametervergleich 17

4 Pure Data **18**

4.1 Messung der Impulsantwort mit Pure Data 20

5 Schlussfolgerung und Ausblick **21**

1 Einleitung

Es gibt viele Anwendungen im Bereich Akustik in denen die automatische Entzerrung eines Lautsprechers oder einer Raumantwort wünschenswert ist. Beispielsweise kann eine automatisierte Entzerrung eine Hilfe für Tontechniker im Live-Betrieb, oder für Ingenieure bei der Entzerrung eines Konzertsaals oder eines PKW Innenraumes sein. In den folgenden Kapiteln wird detailliert auf die Bestimmung von Equalizer-Parametern zur Entzerrung eines beliebigen Amplitudengangs eingegangen. Anschließend dient ein Praxistest zur Veranschaulichung und Bewertung des entworfenen Algorithmus. Als Programmierumgebung für den Algorithmus wird die Software MATLAB verwendet. Mithilfe dieser Programmierumgebung wird zunächst der zu entzerrende Amplitudengang bestimmt, anschließend der Amplitudengang des Entzerrfilters (Entzerrkurve) ermittelt und schließlich die Parameter zur Synthese des Entzerrfilters berechnet. Für den anschließenden Praxistest dient die echtzeitfähige, graphische Programmierumgebung Pure Data [PD] als Hilfsmittel.

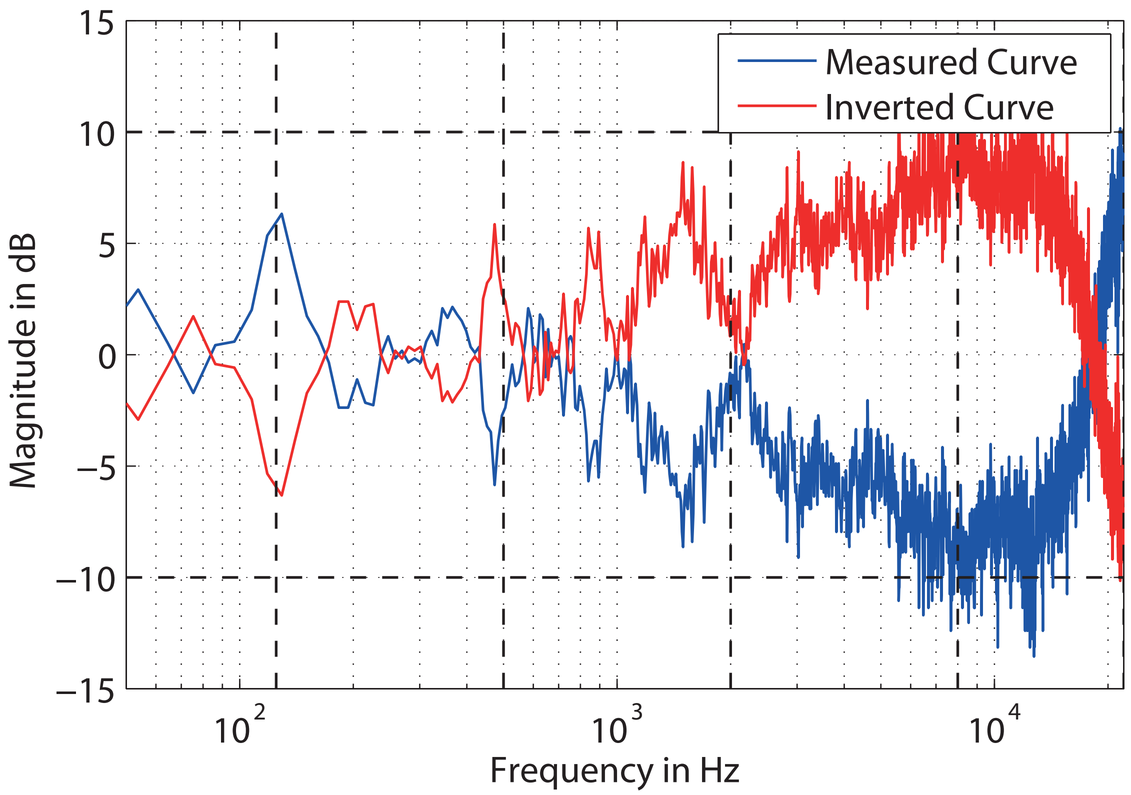

Abbildung 1: Messkurve und deren Invertierte

2 Ermittlung der Entzerrkurve

In diesem Abschnitt werden alle einzelnen Schritte zur Ermittlung der Entzerrkurve aufgezeigt. Man geht hierbei von einer gemessenen Impulsantwort eines Beschallungssystems (im Raum) aus, deren Fouriertransformierte den Frequenzgang des zu entzerrenden Systems darstellt. Im Folgenden soll der Amplitudengang des betrachteten Systems als Messkurve bezeichnet werden.

2.1 Inversion und Terzbandglättung

Eine Inversion der Messkurve nach der Gleichung $L(j\omega)_{inv} = 1/L(j\omega)$ entspricht theoretisch einer idealen Entzerrung, da die invertierte Messkurve multipliziert mit der Messkurve dem wert 1 (=0dB) entspricht. (siehe Abbildung 1).

Aufgrund der hohen Anzahl an Kammfiltereffekten im Amplitudengang ist es allerdings nur mit einer sehr großen Anzahl an Filtern mit hohen Güten möglich eine ideale Entzerrung zu realisieren. Zudem ist es wegen der Frequenzselektivität des menschlichen Gehörs auch nicht notwendig die ideale Entzerrung umzusetzen. Die Bark Skala unterteilt den Hörbereich des Menschen in 24 Frequenzgruppen, deren Frequenzgruppenbreite oberhalb von 500Hz einer Terz entspricht.

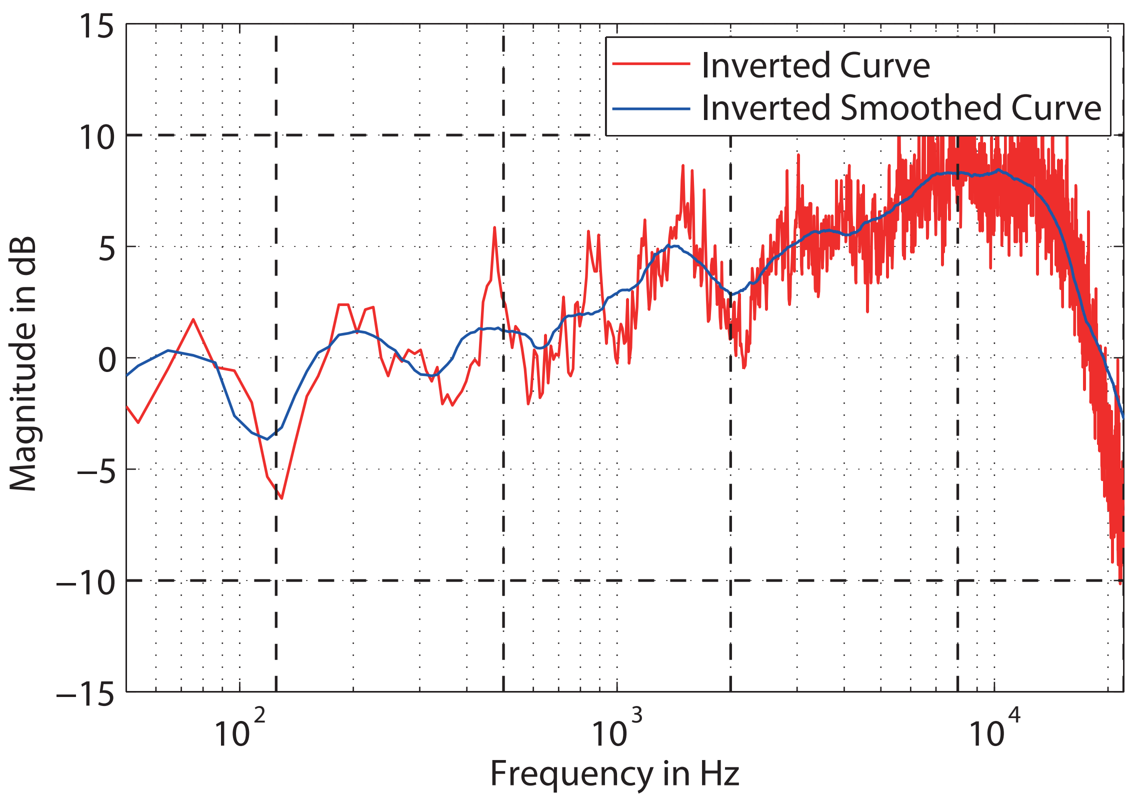

Abbildung 2: Invertierte und terzbandgeglättete Messkurve

Berücksichtigt man diese Auflösung des menschlichen Gehörs, genügt es lediglich die terzbandgeglättete, invertierte Messkurve heranzuziehen. Diese kann anschließend durch typische Audiofilter (parametrische Equalizer) mit deutlich geringeren Güten und niedrigeren Gruppenlaufzeitverzerrungen im Vergleich zur idealen Entzerrkurve angenähert werden. Zur Terzbandglättung wird jeder Amplitudenwert am Frequenzpunkt f durch einen Mittelwert ersetzt, der sich aus dem arithmetischen Mittel der Amplitudenwerte des Frequenzverhältnisses einer halben Terz ($2^{-\frac{1}{6}}$) unterhalb und oberhalb dieses Frequenzpunktes zusammensetzt. Gleichung 1 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

$$H_{terzgl}(f) = \sum_{f}^{f \cdot 2^{-1/6} \leq f < f \cdot 2^{1/6}} H(f) / \sum_{f}^{f \cdot 2^{-1/6} \leq f < f \cdot 2^{1/6}} 1 \tag{1}$$

Zudem sei hierbei bemerkt, dass es sich anbietet die Terzbandglättung *vor* der Inversion durchzuführen, da kerbartige Effekte durch die Glättung verschmiert werden während Resonanzeffekte angenähert werden. Deshalb ist nachstehend in Abbildung 2 neben der invertierten Messkurve auch die entsprechende terzbandgeglättete, invertierte Messkurve dargestellt (Glättung vor der Inversion).

Die, aufgrund der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Frequenzselektivität, irrelevanten Kammfiltereffekte werden durch die Terzbandglättung ausgeblendet. Eine Annäherung an die Entzerrkurve durch typische Audiofilter wird durch die Terzbandglättung erleichtert.

2.2 Mittelwertausgleich und Begrenzung

Bei der Messung einer beliebigen Impulsantwort ist die Signalamplitude von entscheidender Bedeutung. Wird beispielsweise ein Impuls gemessen, dessen mittlere Signalamplitude etwa aufgrund von zu gering gewählter Mikrofonverstärkung nur einem Zehntel des Eingangsimpulses entspricht, so findet sich der mittlere Pegel im Frequenzbereich bei $20 * \lg(\frac{1}{10}) = -20$ dB. Sämtliche Filter für die Entzerrung würden aus diesem Grund mindestens eine Verstärkung von 20 dB besitzen, was zu einer Übersteuerung der Audiosignale führen kann. Die Entzerrung soll deshalb nur die frequenzabhängige relative Anhebung- bzw. Absenkung berücksichtigen. Die Entzerrung soll demnach unabhängig von einer Fehleinstellung der Signalverstärkung in der Messkette arbeiten. Dazu wird ein Mittelwertausgleich durchgeführt, indem man den geglätteten Frequenzgang um den Mittelwert k zur 0-dB Linie verschiebt. Aufgrund der logarithmischen Frequenzeinteilung bietet sich ein logarithmisch gewichtetes Mittel als optimalen Mittelwertausgleich an. Dieses kann durch Gleichung 2 [Log] bestimmt werden:

$$M_{\mathsf{lm}} = \exp\left(\frac{\ln(x_1) + \ln(x_2) + \ln(x_3) + ... + \ln(x_n)}{n}\right) \tag{2}$$

Weiterhin ist die Mikrofonposition bei der Messung einer Impulsantwort ein wichtiger Gesichtspunkt. Variiert die Position nur um wenige Zentimeter können durch Interferenzen verursachte, schmalbandige Frequenzüberhöhungen auftreten, die in keiner Beziehung zu den Überhöhungen vor der Neupositionierung stehen. Um die Entzerrung stabiler in

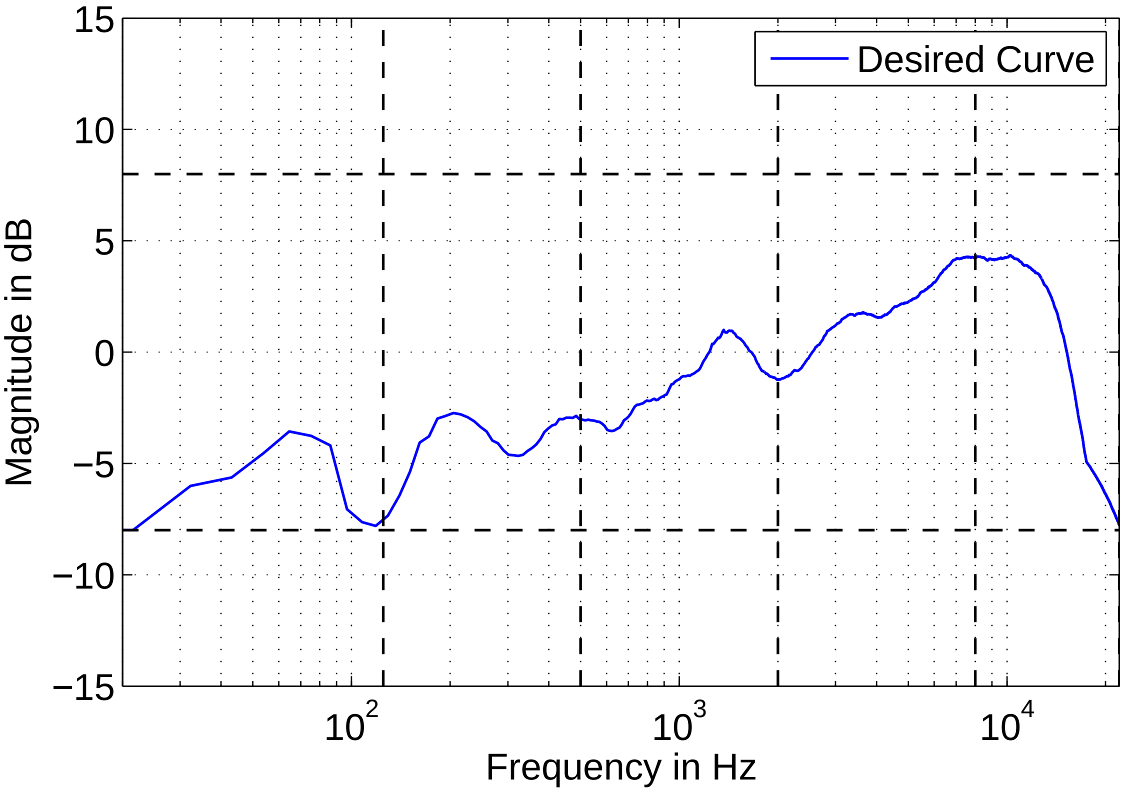

Abbildung 3: Entzerrkurve deren Annäherung angestrebt wird

Bezug auf die Mikrofonposition gestalten zu können, wird eine statische Grenze für die Summenverstärkung der Entzerrfilter von ± 8 dB festgelegt. Die Begrenzung ist zudem der letzte Schritt zur Ermittlung der Entzerrkurve, wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist.

3 Berechnung der EQ-Parameter

Die im vorherigen Kapitel ermittelte Entzerrkurve soll nun durch mehrere hintereinander geschaltete Equalizer (Kuhschwanzfilter und Resonanz- oder Kerbfilter) nachgebildet werden. Die folgenden Abschnitte beschreiben die einzelnen Schritte zur Berechnung der Filterparameter, die als Startwerte für die Parameteroptimierung in Abschnitt 3.5 dienen.

3.1 Einteilung des Frequenzbereichs

In dieser Arbeit werden, angelehnt an praktische Gegebenheiten, fünf Equalizer für den gesamten Frequenzbereich verwendet. Eine Anpassung der Filteranzahl kann gegebenenfalls leicht durchgeführt werden. Eine Erhöhung der Filteranzahl wird allerdings als redundant erachtet. Die Verwendung von fünf Equalizern impliziert die Aufteilung des gesamten Hörbereichs von 20 - 20000Hz in fünf (logarithmisch) gleich große Teilbereiche (Abbildung 4). An den Randbereichen werden jeweils ein Tiefenkuhschwanzfilter 1. Ordnung für den unteren Frequenzbereich und ein Höhenkuhschwanzfilter für den oberen Frequenzbereich eingesetzt. In den drei übrigen mittleren Bereichen arbeiten jeweils parametrische Resonanz- oder Kerbfilter. Die Parameter der angegebenen Filter sollen in den folgenden Kapiteln anhand mathematischer Methoden ermittelt werden.

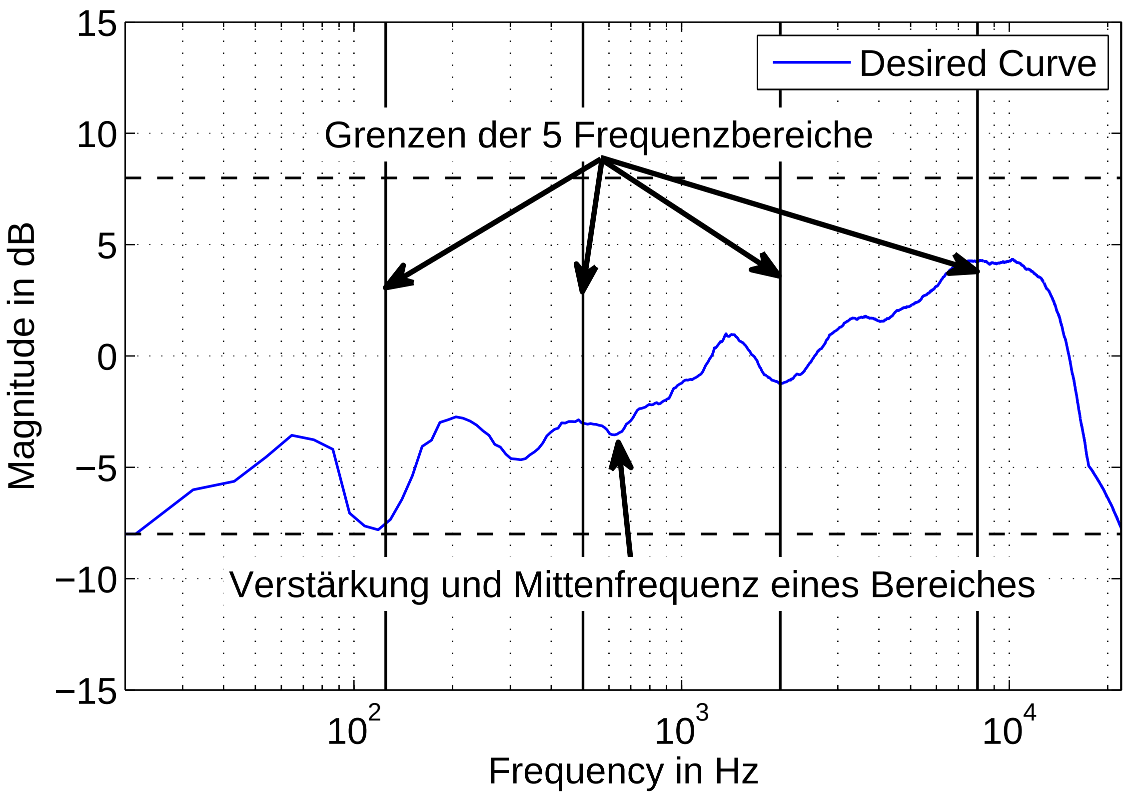

Abbildung 4: Filterfrequenzbereiche sowie deren Maximum und Mittenfrequenz

3.2 Ermittlung von Verstärkung und Mittenfrequenz

Anhand des absoluten Maximums beziehungsweise Minimums in einem der fünf Teilbereiche kann die Mittenfrequenz und die Verstärkung des jeweiligen Filters ermittelt werden. Es wird demzufolge der größte Betragswert in einem Bereich gesucht. Man geht davon aus, dass die Entzerrung dieses Frequenzpunktes eine Annäherung mit kleinstmöglichem Fehler an einen konstanten Frequenzverlauf bietet.

3.2.1 Maximale Filterverstärkung

An dieser Stelle sei zusätzlich erwähnt, dass eine maximale Filterverstärkung festgelegt wurde, welche die Anhebung/Absenkung der verwendeten Equalizer auf einen für Standardaudiofilter realistischen Wert von ± 15dB begrenzen soll. Diese Begrenzung entspricht nicht dem Begrenzungswert der Entzerrkurve (siehe Kapitel 2.2).

Da eine bereichsübergreifende Beeinflussung nicht auszuschließen ist, kann ein Filter beispielsweise eine Absenkung von 12dB aufweisen, während der nachstehende Filter eine Anhebung von 12dB besitzt. Je nach Stärke des Bereichsübergriffs entsteht dadurch eine deutlich geringere Gesamtverstärkung als 12dB. Aus diesem Grund kann die maximale Filterverstärkung höher sein als der Begrenzungswert der Entzerrkurve. Es ist demnach nötig die Verstärkung einzelner Filter heraufzusetzen, um eine Gesamtverstärkung in einem Frequenzband erreichen zu können, die dem Begrenzungswert der Entzerrkurve entspricht.

3.3 Berechnung der Filtergüte

Die Filtergüte ist ein weiterer wichtiger Parameter, der vor allem für die Resonanz- und Kerbfilter von entscheidender Bedeutung ist. Eine Methode zur Bestimmung der Filtergüte ist der Weg über die Bandbreite. Dabei wird von der Mittenfrequenz ausgehend jener Frequenzpunkt gesucht, an dem die Amplitude um 3dB abgefallen/angestiegen ist. Der doppelte Frequenzunterschied ergibt die Bandbreite des Filters, woraus über folgende Gleichung einfach die Filtergüte Q berechnet werden kann:

$$Q = \frac{f_m}{f_b} \tag{3}$$

wobei f_m die Mittenfrequenz und f_b die Filterbandbreite sind.

3.3.1 Polynomregression

Da die Entzerrkurve einen arbiträren Verlauf besitzt, gestaltet es sich schwierig eine Bandbreite festzulegen. Angenommen die betrachtete Entzerrkurve (in einem Teilbereich) weist vor der Amplitudenabsenkung von 3dB (ausgehend von der Mittenfrequenz) einen Kurvenverlauf in entgegengesetzter Richtung nach oben auf, kann kein 3dB-Abfall detektiert werden. Zur Lösung dieses Problems verwendet man eine zweifache Polynomregression. Zunächst ist es notwendig die Entzerrkurve in einem Bereich durch eine einfache mathematische Funktion anzunähern, um Aussagen über die tendenzielle Steigung machen zu können. Eine Polynomfunktion 3. Ordnung eignet sich hierfür gut, da die Entzerrkurve in diesem Bereich ausreichend angenähert wird und die Wendepunkte später zur Bestimmung der Filtergüte herangezogen werden können.

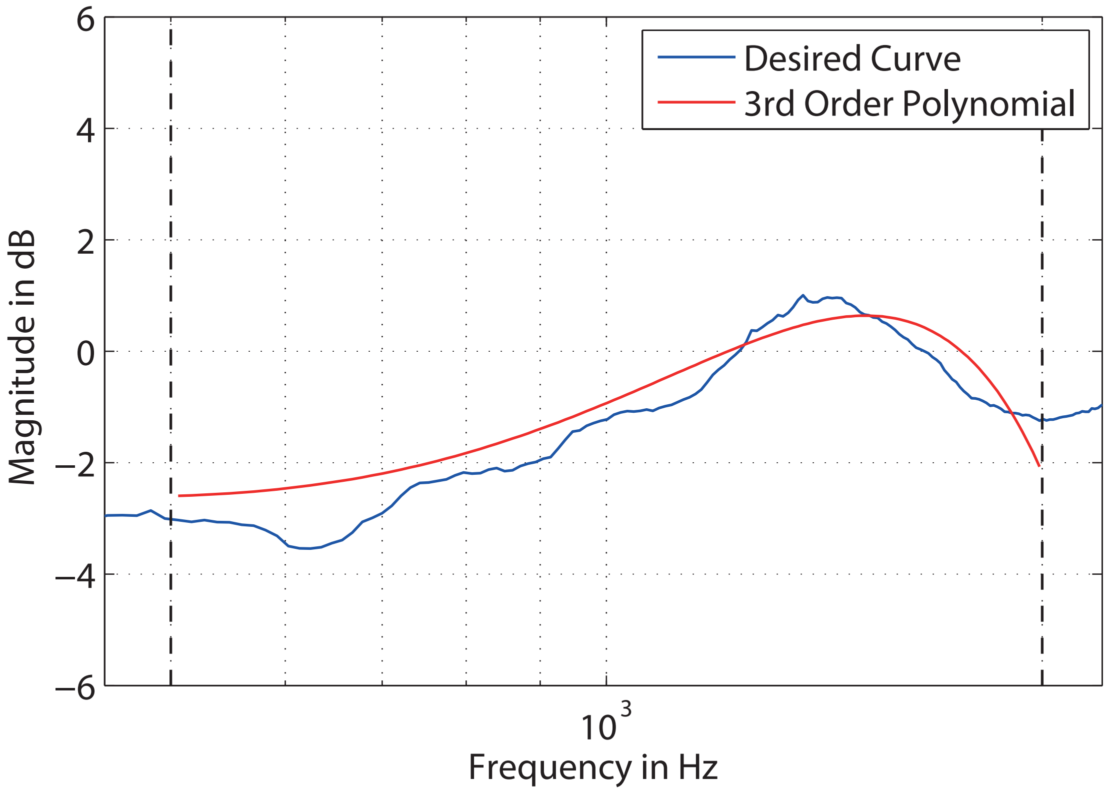

Abbildung 5: Funktionsannäherung durch Polynom 3. Ordnung

Wie in Abbildung 5 ersichtlich, ist nicht sichergestellt, dass ein 3dB-Abfall vom Maximum ausgehend an der Polynomfunktion 3. Ordnung detektiert werden kann. Der Wendepunkt der Funktion grenzt den Wertebereich links vom Maximum ein. Interpoliert man allerdings ein zweites mal mit einer Polynomfunktion 2. Ordnung (nachfolgend EQ-Polynom genannt), ist es möglich anhand des nun nicht mehr begrenzten Wertebereich einen 3dB-Abfall zu detektieren.(Abbildung 6) Es wird allerdings nur bis zum Wendepunkt der Polynomfunktion 3. Ordnung angepasst, also jenen Punkt, der die Steigung der anzunähernden Kurvenform charakterisiert.

Ist ein Frequenzpunkt gefunden, an dem ein 3dB-Abfall detektiert wurde, kann dieser zur Berechnung der Bandbreite durch nachfolgende Gleichung herangezogen werden:

$$f_b = 2 \cdot f_{3dB} \tag{4}$$

Die damit erhaltene Bandbreite kann nach Multiplikation mit einem Korrekturfaktor (siehe Kapitel 3.3.4) zur Berechnung der Güte verwendet werden.

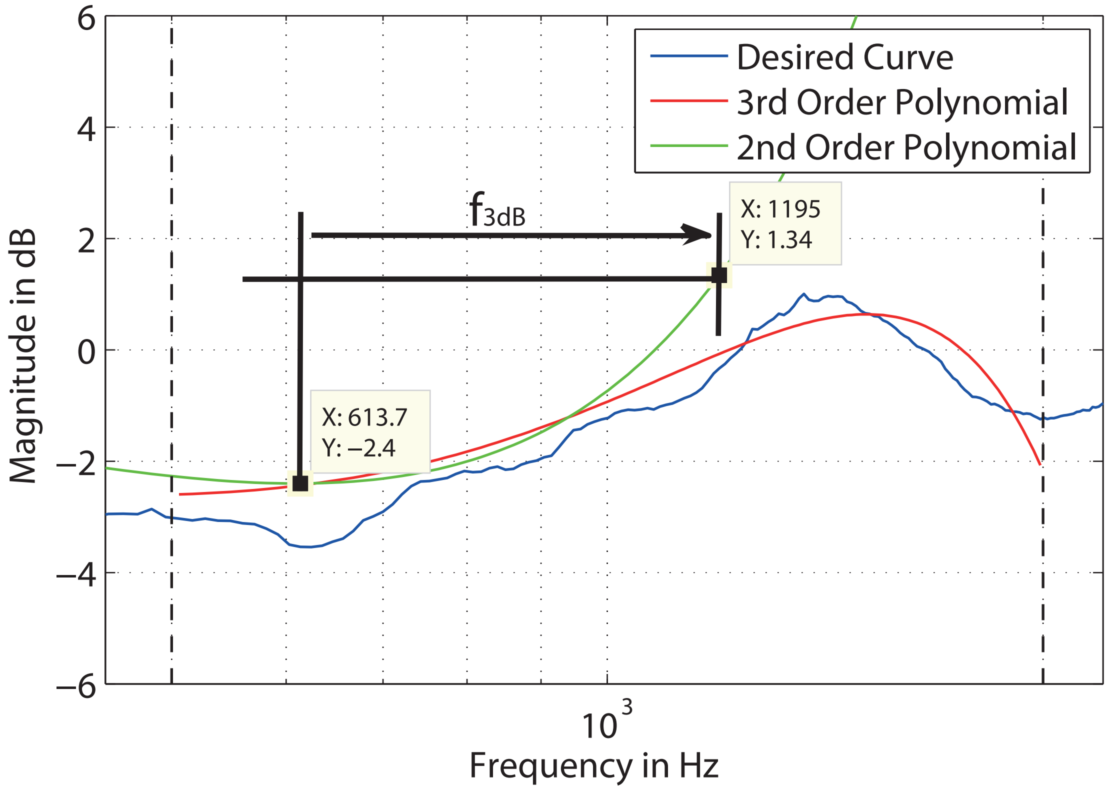

Abbildung 6: Bandbreitebestimmung durch Polynom 2. Ordnung (EQ-Polynom)

3.3.2 Geradenregression

Zwei Spezialfälle der Polynomregression treten auf, wenn die Amplitude in dB an einem Maximum negativ ist (EQ-Polynom verläuft konkav) oder die Amplitude an einem Minimum positiv ist. (EQ-Polynom verläuft konvex). Abbildung 7 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Die Resonanz- oder Kerbfilter müssen eine Grundverstärkung von 0dB aufweisen, damit die Bedingung der relativen Verstärkung beibehalten wird. Resonanzfilter steigen demzufolge von der 0-dB Linie ausgehend an und Kerbfilter fallen ab, weshalb bei Resonanzfiltern die „-3dB Frequenz „und Kerbfiltern die „+3dB Frequenz“gefunden werden muss. Betrachtet man allerdings Abbildung 7, so ist dies wegen dem invertierten Funktionsverlauf des EQ-Polynoms nicht möglich. Tritt einer der beiden Spezialfälle auf, so wird statt des EQ-Polynoms eine Gerade verwendet, um einen 3dB Anstieg oder Abfall festzustellen und die Bandbreite des Filters ermitteln zu können In Abbildung 8 ist eine Geradenregression dargestellt, wobei wegen der logarithmischen Frequenzeinteilung die Gerade gekrümmt erscheint.

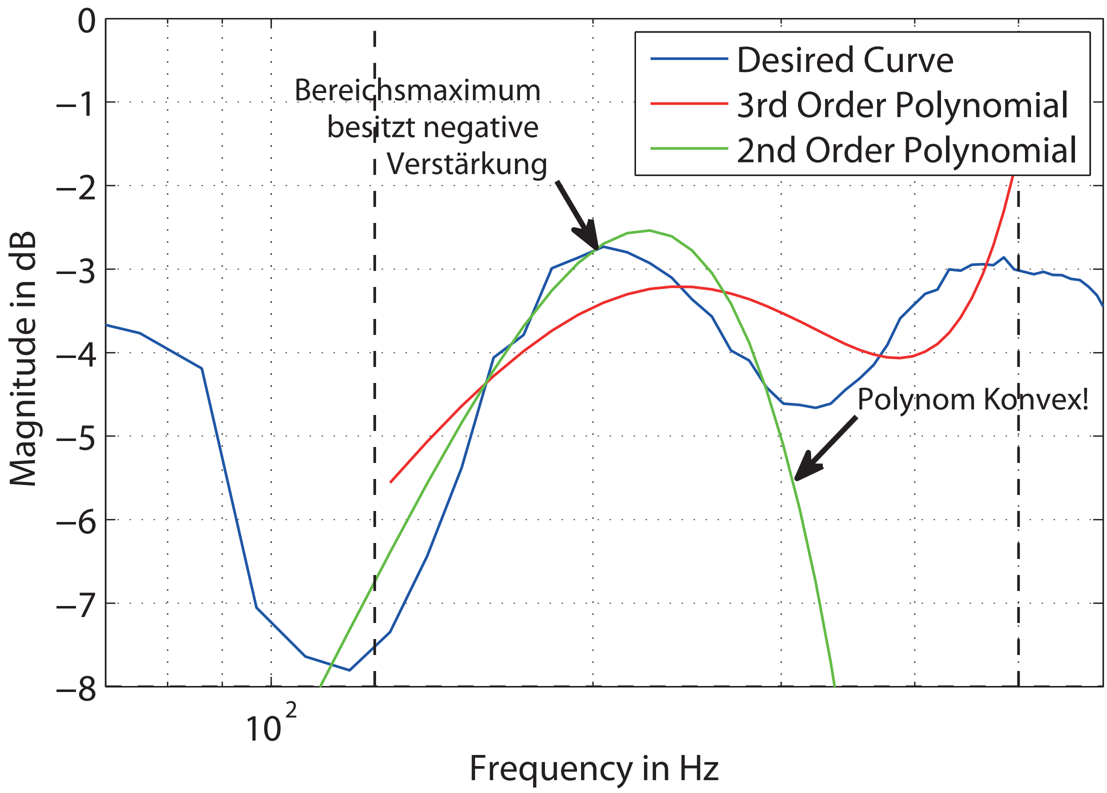

Abbildung 7: Spezialfall der Polynomregression

3.3.3 Güte bei Kuhschwanzfiltern

Bei der Verwendung von Kuhschwanzfiltern entfällt die Güteberechnung, da Kuhschwanzfilter 1. Ordnung lediglich die Anhebung- bzw. Absenkung und die Grenzfrequenz als Filterparameter besitzen. Eine Implementierung von Kuhschwanzfiltern höherer Ordnung abhängig von der Entzerrkurve wurde in dieser Arbeit nicht durchgeführt.

3.3.4 Bandbreitekorrekturfaktor

Zur Güteberechnung wird, wie im oberen Abschnitt beschrieben, eine Polynomfunktion oder eine Gerade herangezogen, an deren Verlauf die Bandbreite des Filters bestimmt wird. Die Polynomfunktion 2. Ordnung nähert die Funktion eines parametrischen Resonanz- oder Kerbfilters verglichen mit anderen Polynomfunktionen am Besten an. Jedoch entspricht diese Funktion nicht einer Filterfunktion, was einen Fehler in der Ermittlung der Bandbreite mit sich führt. Es wird ein Korrekturfaktor festgelegt mit dem die Bandbreite gewichtet werden soll. Auf Basis empirischer Tests mit verschiedensten Frequenzgängen wurde ein Faktor von 0.85 als optimal angesehen. Eine genauere Analyse oder eine Entwicklung einer Regressionsfunktion, die einer Filterfunktion exakt entspricht wurde aufgrund der durchgeführten Optimierung (siehe Kapitel 3.5) nicht als notwendig erachtet.

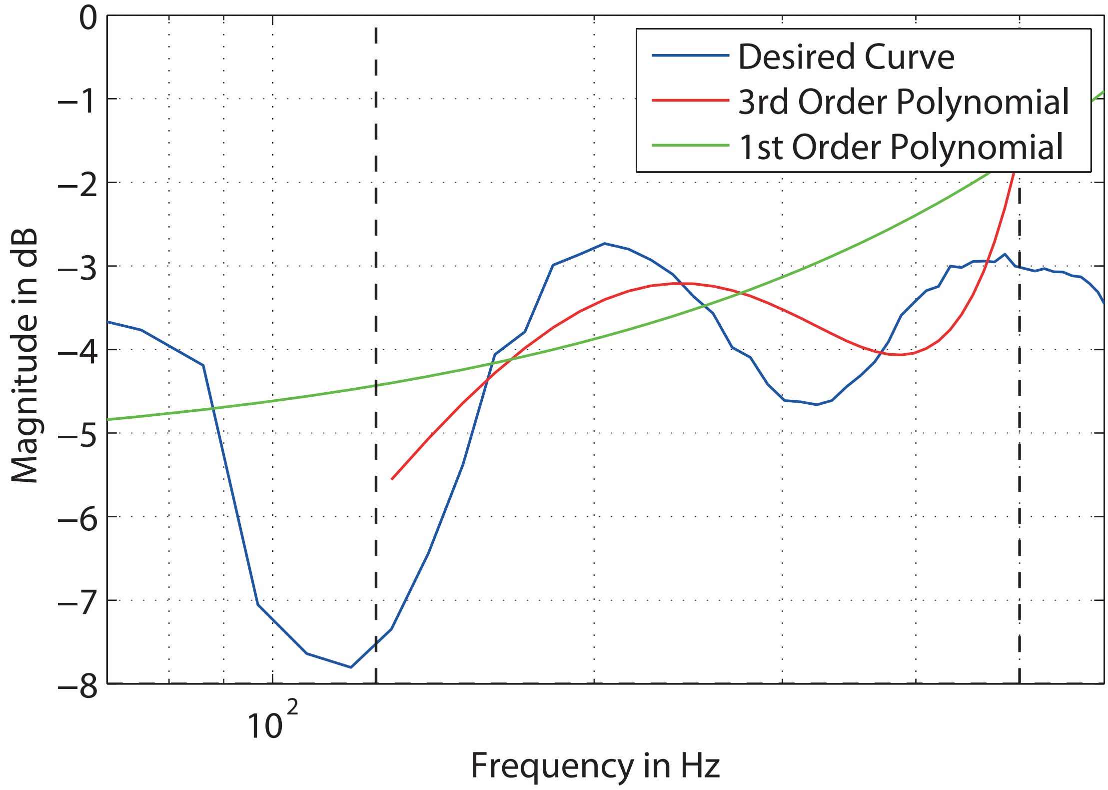

Abbildung 8: Annäherung durch Geradenregression

3.4 Synthese der Entzerrfilter

3.4.1 Mathematische Beschreibung

Die verwendeten Filtertypen zur Entzerrung sollen in Pure Data (siehe Kapitel 4) als IIR-Biquad-Filter implementiert werden. Der Vorteil an IIR-Filtern ist unter Anderem, dass sie direkt aus den analogen Äquivalenten entworfen werden können. Um die berechneten Parameter der Entzerrfilter darzustellen, werden die allgemeinen Gleichungen analoger Allpass-Filter-Strukturen aus [Zoe] verwendet.

Tabelle 1 stellt eine Übersicht über die verwendeten Gleichungen dar. Es handelt sich hierbei und auch in den nachfolgenden Betrachungen immer um die Betragsfunktion. Die Phaseninformation wird bei der Entzerrung nicht behandelt.

Filtertyp	Gleichung	Parameter
Low Shelving	$\sqrt{\frac{1+V^2+V^2\Omega_m^2+\Omega_m^4}{1+2\Omega_m^2+\Omega_m^4}}$	V, Ω_m
High Shelving	$\sqrt{\frac{1+V^2+(1+V^2)\Omega_m^2+V^2\Omega_m^4}{1+2\Omega_m^2+\Omega_m^4}}$	V, Ω_m
Peak Equalizer	$\sqrt{\frac{(1-\Omega_m^2)^2+(\frac{(1+2V)\Omega_m}{Q})^2}{(1-\Omega_m^2)^2+(\frac{\Omega_m}{Q})^2}}$	V, Q, Ω_m
Notch Equalizer	$\sqrt{\frac{(1-\Omega_m^2)^2+(\frac{\Omega_m}{Q})^2}{(1-\Omega_m^2)^2+(\frac{(1+2V)\Omega_m}{Q})^2}}$	V, Q, Ω_m

Tabelle 1: Verwendete Gleichungen der vier Filtertypen mit $\Omega_m = \frac{f_m}{f}$

Anhand dieser Gleichungen und den ermittelten Filterparametern können die einzelnen Filter für alle Bereiche in MATLAB berechnet und dargestellt werden. Abbildung 9 zeigt die einzelnen Filter und das Gesamtfilter, welches aus der Kettenschaltung der fünf Subband-Filter besteht.

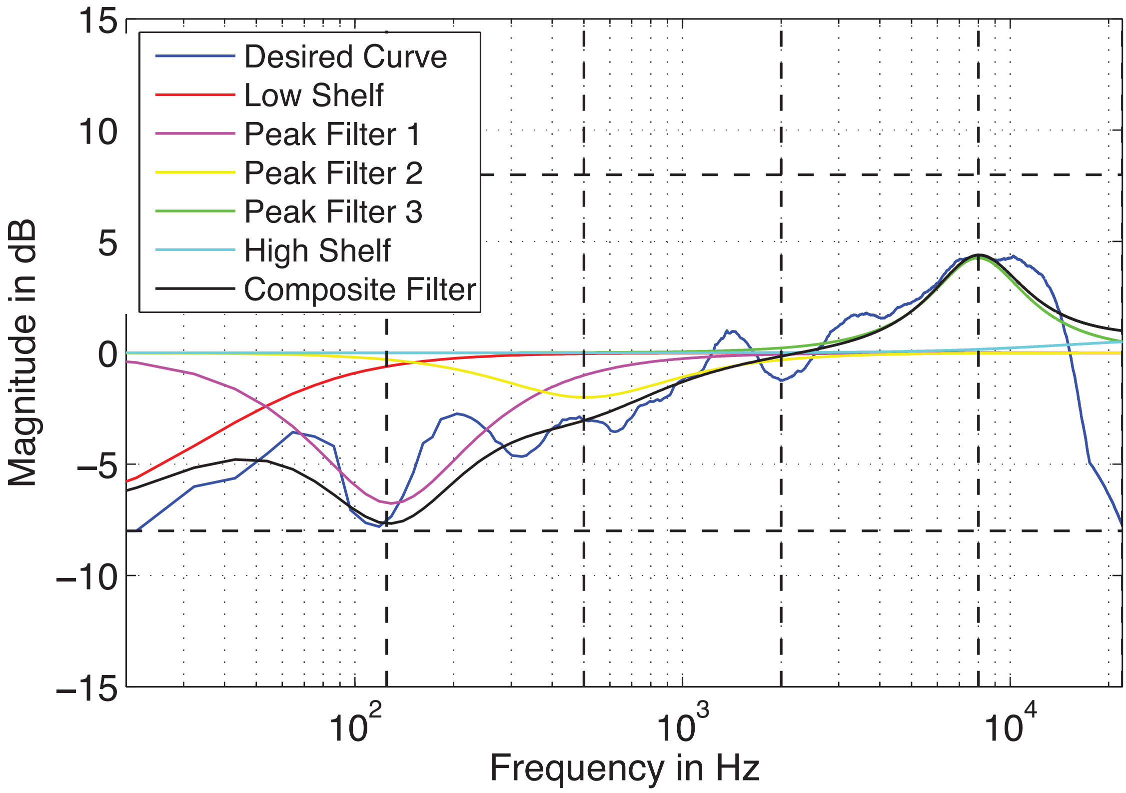

Abbildung 9: Parametrische Filter und deren Summenfunktion

Aus der Grafik werden die Schwachstellen der Berechnung der Filter sichtbar. Ein möglicher Fehler entsteht durch das Setzen der Mittenfrequenz und Verstärkung auf den Punkt des Maximums/Minimums in einem Frequenzbereich. Dadurch, dass benachbarte

Punkte unberücksichtigt bleiben, ist nicht sichergestellt, dass das Maximum/Minimum im betrachteten Bereich der ideale Punkt für die Mittenfrequenz und die Verstärkung ist. Durch eine nachfolgende Optimierung kann dieser Fehler behoben werden. Eine weitere Abweichung entsteht durch die Wechselwirkung zwischen den Subbändern. Der Einfluss eines vorhergehenden (d.h. tieferen) Filters in einem Bereich wird von der Zielkurve subtrahiert. Allerdings wird die Wirkung eines nachstehenden Filters nicht berücksichtigt, da dessen Parameter noch unbekannt sind. Es wäre möglich den Einfluss eines nachstehenden Filters nach der Berechnung seiner Parameter zu berücksichtigen, allerdings müssten sich dann die Parameter des vorherigen Filters ändern, was die Wechselwirkung zwischen den Teilbereichen hervorruft. Dieser komplexe Zusammenhang stellt ein Problem dar, welches durch die Optimierung im folgenden Abschnitt gelöst werden soll.

3.5 Parameteroptimierung

Um sämtliche im vorherigen Punkt aufgeführten Berechnungsfehler zu kompensieren, soll abschließend eine Optimierung der Filterparameter erfolgen, um die Filter optimal der Entzerrkurve anzupassen und den Gesamtfehler zu minimieren. Die in MATLAB zur Verfügung stehende Funktion *lsqnonlin* dient zur nichtlinearen Optimierung einer Funktion nach der Methode der kleinsten Quadrate. Die in dieser Arbeit verwendeten Funktion *lsqcurvefit* basiert auf *lsqnonlin*, erleichtert aber die Eingabe der Parameter und die Definition der zu optimierenden Funktion.

3.5.1 Minimierung des Fehlerquadrats

"Die Methode der kleinsten Quadrate ist das mathematische Standardverfahren zur Ausgleichungsrechnung. Dabei wird zu einer Datenpunktwolke eine Kurve gesucht, die möglichst nahe an den Datenpunkten verläuft." [MLS] Die Datenwolke aus dem Zitat entspricht den einzelnen Frequenzpunkten der Entzerrkurve. Die gesuchte Kurve muss eine parameterabhängige, problemangepasste Funktion sein und entspricht den in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Filterfunktionen. Mathematisch gesehen versucht diese Methode die Summe der Quadrate der Differenz aus der Datenwolke und der gesuchten Modellkurve/Filterfunktion zu minimieren. Als mathematische Formel [MLS] ergibt das:

$$\min_{\alpha} ||\mathbf{f} - \mathbf{y}||_{\mathbf{2}}^{\mathbf{2}} = \min_{\alpha} \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} (\mathbf{f}(\mathbf{x_i}, \alpha) - \mathbf{y_i})^{\mathbf{2}} \tag{5}$$

$\mathbf{y_i}$ entspricht der Datenwolke, d.h. den einzelnen Punkten unserer Entzerrkurve. $f(\mathbf{x_i}, \alpha$ ist die Zusammengefasste Filterfunktion, bestehend aus der Multiplikation der einzelnen Filter aus Tabelle 1. $\mathbf{x_i}$ sind die Abtastpunkte, in diesem Fall also die Frequenzen, denen man einen eindeutigen Wert $\mathbf{y_i}$ zuordnen kann. α ist ein Vektor bestehend aus den veränderbaren Parametern durch deren Änderung die Minimierung der Fehlerquadrate erfolgen soll.

3.5.2 MATLAB-Funktion *lsqcurvefit*

Die in dieser Arbeit verwendete Funktion *lsqcurvefit* basiert auf der Funktion *lsqnonlin* und benutzt die im vorherigen Kapitel 3.5.1 erläuterte Methode und Gleichung (5), um eine Kurve an eine Datenwolke anzupassen. Sie erleichtert im Gegensatz zu *lsqnonlin* die Eingabe der Parameter und der Funktion, die es zu optimieren gilt, mathematisch sind diese aber identisch und rechnen mit dem gleichen Algorithmus. Standardmäßig ist das der "trust-region-reflective"-Algorithmus [MH], der jedoch bei Bedarf geändert werden kann. Die Eingabe der wichtigsten Ein- und Ausgangsargumente erfolgt laut MATLAB-Definition mit:

x = lsqnonlin(fun, x0, xdata, ydata, lb, ub, options)

Der Übergabeparameter *fun* ist die zu optimierende Funktion, der die Parameter und die x-Werte der Funktion übergeben werden müssen. Sie muss zusätzlich als gleichnamige Funktion definiert sein und sollte nur die zu optimierende mathematische Funktion beinhalten, um die schnellste Optimierung zu erhalten. Startwerte sind in der Parametermatrix **x0** gespeichert. **xdata** entspricht den x-Werten der Funktion (nicht mit der Variable *x* zu verwechseln), also an welchen Stellen der Funktion y-Werte vorhanden sind, welche wiederum in **ydata** übergeben werden. Ziel der Funktion ist es, durch Verändern der Parametermatrix **x0** die Summe des quadratischen Fehlers zwischen *fun* und **ydata** an den Stellen **xdata** zu minimieren.

Je geringer der quadratische Fehler bereits bei den Startwerten ist, desto weniger Iterationen sind für die Funktion nötig, weshalb eine möglichst genaue Parameterbestimmung in den Kapiteln 3.2 und 3.3 wichtig ist. Möglichst genaue und gute Anfangsbedingungen sind auch notwendig, da die Funktion *lsqcurvefit* nach lokalen Minima sucht. Die aufwändige Suche nach Startwerten für den Algorithmus soll verhindern, dass nicht ein lokales, sondern im Idealfall ein globales Minimum (Optimum) gefunden wird. Weiterhin können Randbedingungen für die Optimierung mit *lb* (lower bound) und *ub* (upper bound) festlegt werden. Beispielsweise soll die Güte in einem Bereich von 0.5 bis 4.8 für Resonanz- oder Kerbfilter liegen. Der Absolutbetrag der Verstärkung soll unter der maximalen Filterverstärkung von $\pm 15dB$ liegen. Mittenfrequenzen müssen physikalisch bedingt über 0Hz gehalten werden. Zusätzlich kann der Funktion die maximale Anzahl an Iterationen, eine maximale Auflösung und weitere Rechenbedingungen über die *optimset*-Funktion an *options*, übergeben werden. Das Ausgangsargument *x* beinhaltet die optimierte Parametermatrix. Weitere Optionen und Ausgangsargumente können in der MATLAB-Hilfe nachgelesen werden.

3.5.3 Parametervergleich

In Abbildung 10 ist zum Vergleich das Gesamtfilter mit den Startwerten und den optimierten Parametern dargestellt. In Abbildung 11 ist die dazugehörige Fehlerfunktion (= Differenz zwischen Entzerrkurve und Gesamtfilter) dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die bessere Annäherung des optimierten Filters an die Entzerrkurve mit den optimierten Parametern. Was außerdem auffällt ist, dass der Filter vor allem zu hohen Frequenzen eine wesentlich bessere Annäherung liefert, was auf die logarithmische Einteilung zurückzuführen ist.

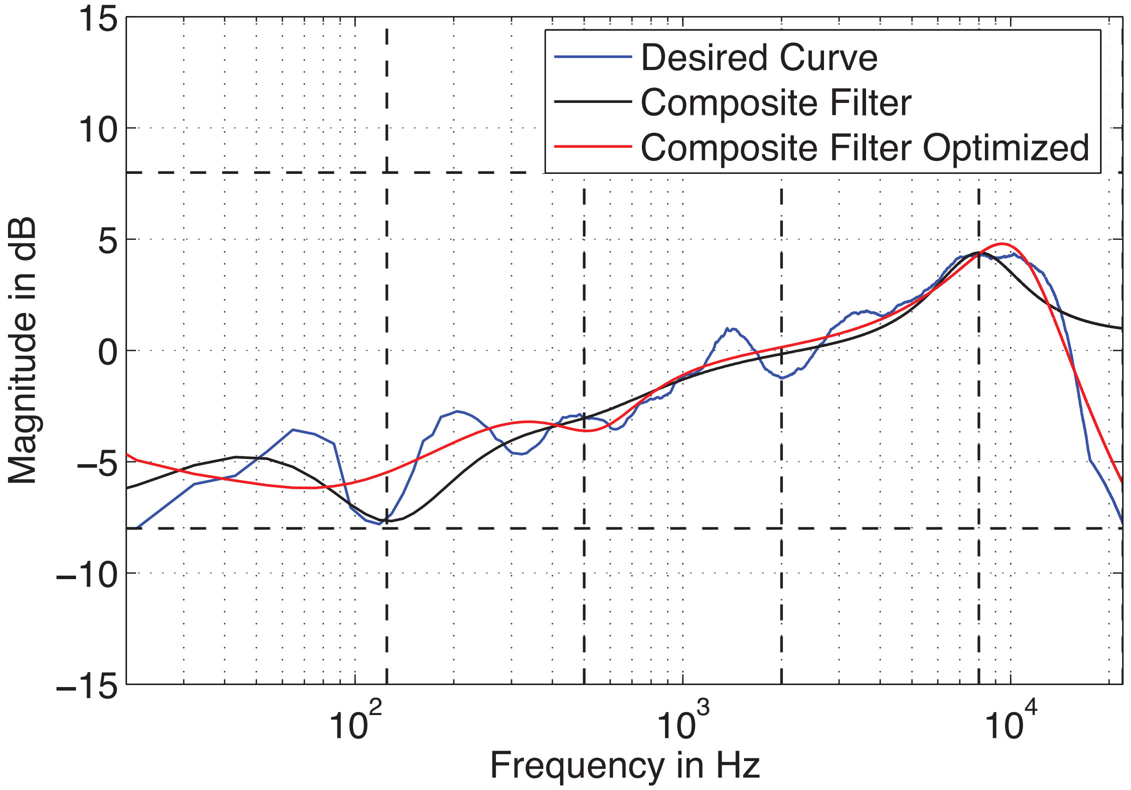

Abbildung 10: Spektrum mit berechneten und optimierten Parametern

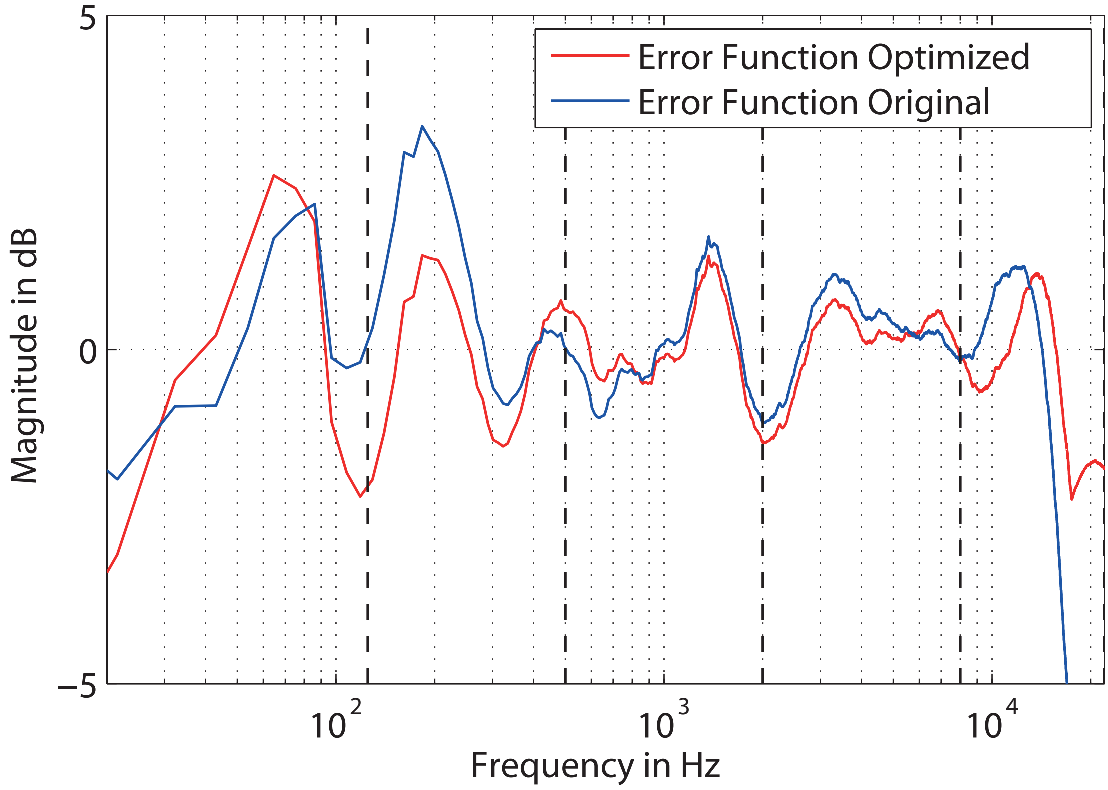

Abbildung 11: Fehlerfunktion mit berechneten und optimierten Parametern

4 Pure Data

Pure Data (PD) ist eine freie, grafische Programmieroberfläche, welche auf die Echtzeitbearbeitung von Audiosignalen optimiert wurde. Sie wurde in den 90ern von Miller Puckette erfunden und wird zurzeit aktiv, u.a. am Institut für Elektronische Musik und Akustik in Graz, weiterentwickelt [PD].

Zentraler Baustein eines PD-Programms ist das Hauptprogramm, in welchem die einzelnen Objekte eingefügt werden und kommunizieren können. In Abbildung 12 ist das in diesem Projekt verwendete Hauptprogramm dargestellt. Um die Übersicht zu verbessern, können neue Objekte als Subpatches erstellt werden. Abbildung 13 zeigt das Objekt "para_bp2", einen parametrischen Equalizer, als Subpatch des Hauptprogramms. Mit Hilfe dieser Elemente, können sehr effektiv Audiosignale von einer Quelle (z.B. Mikrofon am ADC-Eingang) über verschiedene Knoten und Funktionen zu einer Senke (z.B. Lautsprecher am DAC-Ausgang) geleitet werden. Pure Data arbeitet standardmäßig im 32-Bit Gleitkomma-Format mit einer Abtastrate von 44100 Hz.

Die hier verwendete und zuletzt getestete Version von PD ist "0.43.4-extended".

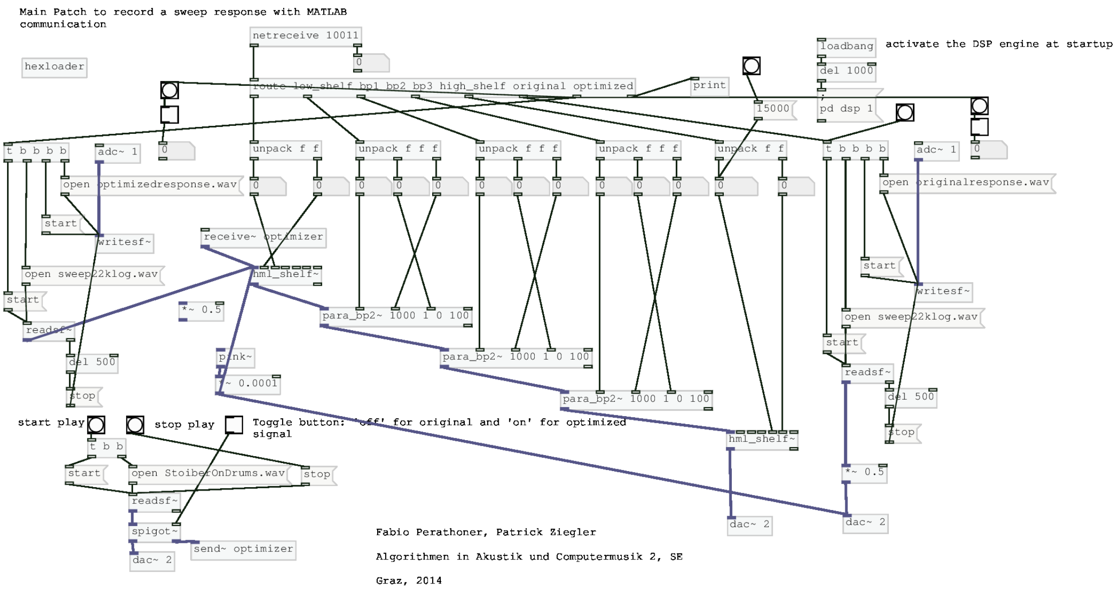

Abbildung 12: PD-Hauptprogramm mit Eingang, mehrere Filter und Ausgang

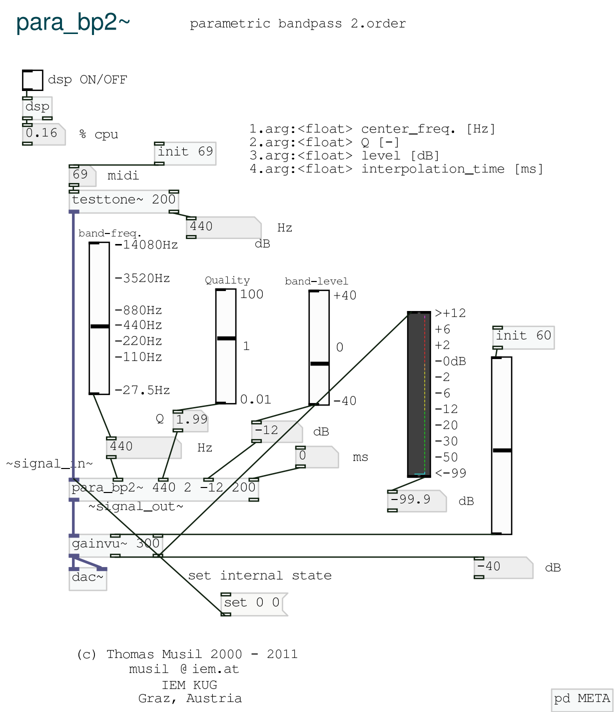

Abbildung 13: Beispiel für ein Subpatch anhand des para_bp2-Objektes

4.1 Messung der Impulsantwort mit Pure Data

Das PD-Programm aus Abbildung 12 wird direkt von MATLAB aus gestartet und spielt zunächst die Audiodatei "sweep22klog.wav", einen logarithmischen Sinussweep der Dauer von 1s, über den Ausgang ab (dargestellt am rechten Rand des Patches). Die Sweepantwort wird über ein Mikrofon am Eingang aufgenommen und als Audiodatei in "originalresponse.wav" gespeichert. Aus dieser Datei wird in MATLAB die Übertragungsfunktion der Lautsprecher im Raum berechnet [MS01]. MATLAB erweitert dabei die Länge des Sweeps auf die Länge der gemessenen Datei und bildet daraus das Spektrum mittels FFT. Im Frequenzbereich wird das Spektrum der Sweepantwort durch das Spektrum des Eingags-Sweeps dividiert und somit der Frequenzgang des Systems gebildet.

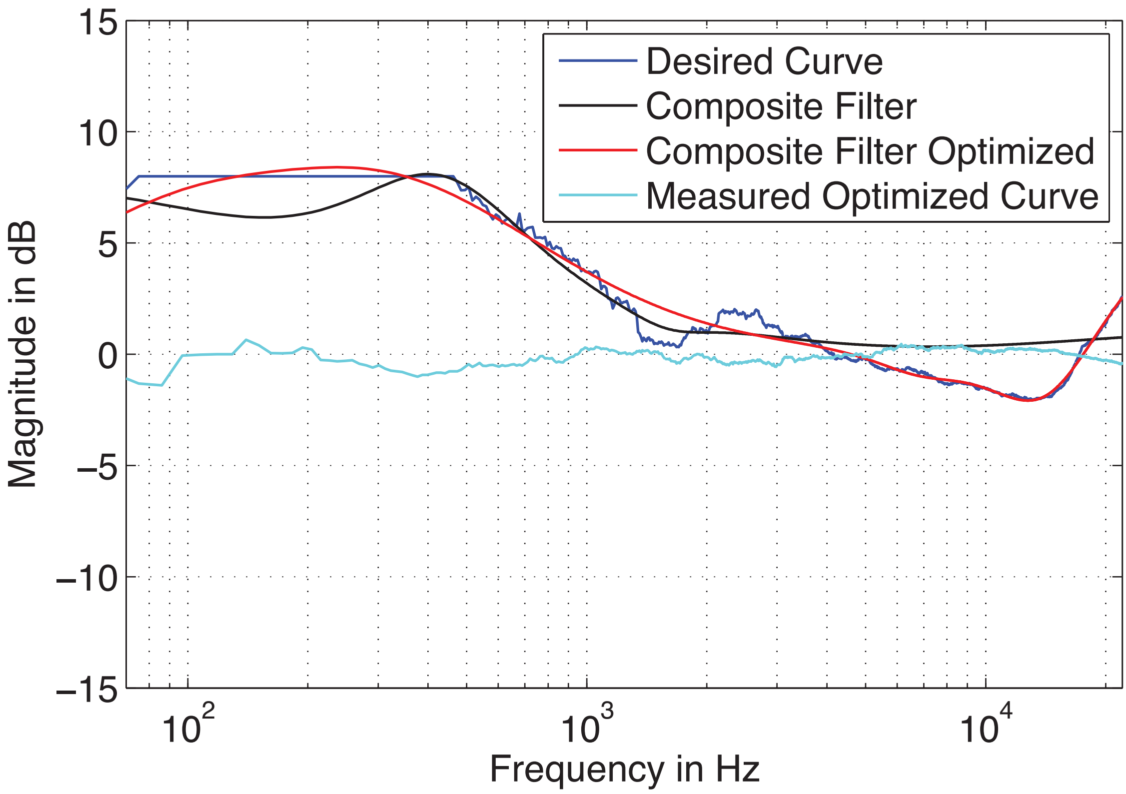

Abbildung 14: Messung des optimierten Frequenzgangs eines Lautsprechers

Der Frequenzgang dient nun dem Algorithmus als Eingangsgröße aus der die Entzerrkurve berechnet wird. Diese soll anschließend zur Entzerrung der Übertragungsfunktion genutzt werden. Die Bestimmung der Parameter erfolgt wie in Kapitel 3 beschrieben. Die ermittelten, optimierten Parameter "Verstärkung", "Mittenfrequenz" und "Bandbreite" der EQs werden von MATLAB vollautomatisch dem jeweiligen Filter (Resonanz-, Kerb- und Kuhschwanzfilter) in PD übergeben. Anschließend wird nochmals ein logarithmischer Sweep von Pure Data abgespielt, welcher die gesamte Kette an Entzerrungsfiltern durchläuft und das Ergebnis in die Datei "optimizedresponse.wav" schreibt (dargestellt am linken Rand des Patches). Diese Audiodatei wird in MATLAB entsprechend in den Frequenzbereich überführt. Ein Beispiel einer solchen automatischen Messung ist in Abbildung 14 dargestellt. Da reale Lautsprecher nicht weit unter 70Hz kommen, wurde bei dieser Messung und Optimierung nur der Bereich oberhalb von 70Hz betrachtet.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die automatische Bestimmung von Filter-Parametern hat gezeigt, dass schon mit einer sehr geringen Filteranzahl eine sinnvolle Annäherung an eine beliebige Entzerrkurve erzielt werden kann. Notwendig hierfür ist allerdings eine Optimierung der Parameter, da die entworfenen Methoden zur Berechnung der Filterparameter Schwachstellen aufweisen. Weiterhin könnte der Berechnungsalgorithmus in seiner Komplexität erhöht werden, indem beispielsweise eine dynamische Anpassung der Filterordnung für Kuhschwanzfilter implementiert wird. Diese könnte je nach Steilheit der Entzerrkurve eine bessere Annäherung an den Grenzbereichen liefern. Ebenso eine dynamische Anpassung der Anzahl der Filter je nach Komplexität der Entzerrkurve kann die Genauigkeit verbessern und die Berechnung durch das Finden der minimalen Filteranzahl optimieren. In dieser Arbeit bleiben weiterhin Phaseninformationen bzw. die Gruppenlaufzeit unberücksichtigt. In professionellen Audioanwendungen können diese aber von entscheidender Bedeutung sein.

Unabdingbar für die Weiterentwicklung des Algorithmus wären allerdings entsprechende Hörversuche und Testreihen für die jeweiligen Entwicklungsschritte, um die Repräsentativität der Neuerungen zu gewährleisten.

Probleme bei einer automatischen Entzerrung von Systemen treten allerdings auch schon bei der Messung der Übertragungsfunktion auf. So kann die Messung an einer Position in einem Raum beispielsweise keine genaue Aussage über den Frequenzverlauf des Schallfeldes im gesamten Raum treffen. Auch Raummoden oder Reflexionen können trotz in Kapitel 2 beschriebener Maßnahmen nicht völlig von der Entzerrung abgekoppelt werden.

Subjektiv betrachtet kann eine wahrnehmbare Klangveränderung festgestellt werden, wenn der beschriebene Algorithmus verwendet wird. Verändert man beispielsweise bewusst die Parameter eines Equalizers an einem analogen Mischpult, welches im betrachteten System eingebettet ist, kann der Algorithmus diese Veränderungen detektieren und entsprechend eliminieren.

Ein händisches, zeitaufwändiges Einstellen von EQ-Parametern wird dadurch erleichtert. Die automatische Einstellung liefert brauchbare Voreinstellungen auf denen ein Techniker aufbauen kann. Weiterhin bietet es eine gute Grundlage für Feineinstellungen an Beschallungssystemen für beliebige Anwendungen.

Literatur

[Log] "Logarithmisches mittel," http://de.wikipedia.org/wiki/Logarithmisches_Mittel.

[MH] MATLAB-Hilfe, "lsqcurvefit," http://www.mathworks.de/de/help/optim/ug/lsqcurvefit.html, 14.05.2014.

[MLS] "Methode der kleinsten quadrate," http://de.wikipedia.org/wiki/Methode_der_kleinsten_Quadrate.

[MS01] M. P. Mueller S., "Transfer function measurement with sweeps," in *J. Audio Eng. Soc. 49(6):443-471*, 2001.

[PD] "Pure data open source visual programming language," http://puredata.info/.

[Zoe] U. Zoelzer, *DAFX Digital Audio Effects*.