

Linearphasiges Filterdesign für Lautsprecher und die daraus resultierenden Latenzen

Michael Makarski¹, Anselm Goertz², Alfred Schmitz³

¹ Institut für Akustik und Audiotechnik, Aachen, E-Mail: michael.makarski@ifaa-akustik.de

² Institut für Akustik und Audiotechnik, Aachen, E-Mail: anselm.goertz@ifaa-akustik.de

³ Institut für Akustik und Audiotechnik, Aachen, E-Mail: alfred.schmitz@ifaa-akustik.de

Einleitung

Durch konsequente Anwendung moderner Digitalcontroller zur Lautsprecherentzerrung kann mit heutigen Rechenleistungen das Ideal des linearphasigen Übertragungsverhaltens in nahezu allen Fällen angenähert werden. Dabei müssen bei der komplett linearphasigen Entzerrung allerdings, je nach Lautsprechertyp, relativ große Filterlatenzen in Kauf genommen werden. Für viele Anwendungen im Live-Bereich ist dies aus praktischen Gründen nicht möglich, so dass im Filterdesign ein bestmöglicher Kompromiss aus Filterlatenz und Linearphasigkeit des Ergebnisses gesucht werden muss.

Linearphasige Lautsprecherentzerrung

FIR-Filter sind seit etwa 20 Jahren im professionellen Beschallungsbereich in Form von kommerziellen Geräten verfügbar. Neben der komfortablen und bei Bedarf auch sehr detaillierten Entzerrung des Betragsganges eines Lautsprechers oder Lautsprecherweges, sind auch komplexe Entzerrungen von Betrag und Phase, sowie linearphasige X-over-Funktionen damit realisierbar. Darüber hinaus ermöglichen quasi alle FIR-fähigen Controller auch die Anwendung von IIR-Filtern, so dass neben reinen IIR oder FIR-Filtern auch Kombinationen von FIR+IIR-Filtern zur Lautsprecherentzerrung und Umsetzung der X-over-Funktionen genutzt werden können.

Der linearphasige Filterentwurf für FIR-Filter erfolgt in mehreren Schritten, die in Abbildung 1 für einen Lautsprecherweg exemplarisch gezeigt sind. Ausgangspunkt des Verfahrens ist der gemessene Frequenzgang des Lautsprechers. Da alle folgenden Berechnungen auf diesem basieren, muss die Messung frei von Reflexionen, Verzerrungen oder sonstigen Störungen sein. Dieser wird zunächst invertiert und mit dem linearphasigen Zielbandpass multipliziert. Das Ergebnis stellt bereits den Frequenzgang des Entzerrungsfilters einschließlich des X-over Bandpasses dar. Nach IFFT liegt die Impulsantwort des Filters vor, die dann nach geeigneter Fensterung als FIR-Koeffizientensatz in den Controller geladen werden kann.

Die Latenz des endgültigen Filters ist im Wesentlichen eine Funktion des linearphasigen Bandpasses, dessen Impulsantwort immer symmetrisch ist und so einen Latenzbeitrag der halben Filterlänge beisteuert. Je tiefer die untere Grenzfrequenz des Bandpasses und je steiler die Flanke, desto mehr Koeffizienten sind zur Darstellung der Bandpassimpulsantwort nötig. Eine komplett linearphasige

Entzerrung eines Bassreflexlautsprechers erfordert in der Praxis, abhängig von der Abstimmung des Gehäuses, ein Filter mit resultierenden Latenzen der Größenordnung 20 – 80 ms. Im Studio oder HiFi-Bereich ist das je nach Anwendung tolerierbar, aber für Live-Anwendungen muss die Latenz deutlich reduziert werden muss.

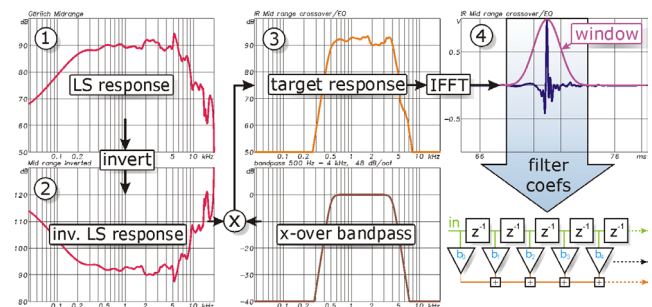


Abbildung 1: FIR Koeffizientenberechnung. Erläuterungen: 1. Gemessener komplexer Lautsprecherfrequenzgang 2. Invertierter Frequenzgang 3. Invertierter Frequenzgang multipliziert mit Zielbandpass (target response) 4. Impulsantwort der target response

Linearphasige Filter geringer Latenz

Um die Filterlatenz auf praxistaugliche Werte zu reduzieren muss in Kauf genommen werden, dass eine Linearphasigkeit des Gesamtergebnisses erst ab einer gewissen Frequenz erreicht werden kann. Je geringer die zugelassene Filterlatenz, desto höher wird im Resultat diese Frequenz liegen. Beim Filterentwurf können verschiedene Ansätze zur praktischen Umsetzung gewählt werden.

Breitbandfilter mit fester Koeffizientenzahl

Ein besonders einfacher Ansatz, der bereits in verschiedenen Geräten zur Anwendung kommt, ist es die Filterlänge auf einen festen Wert pro Controller-Weg zu begrenzen. Ein typischer Zahlenwert ist z. B. 512 Koeffizienten bei einer Abtastrate von 96 kHz. Damit lassen sich Filterimpulsantworten bis zu einer Länge von 5,3 ms abbilden. Ein linearphasiges Filter führt damit immer zu einer fixen Grundlatenz von 2,65 ms. Zur breitbandigen Entzerrung reicht die Filterlänge oft nicht aus, so dass bei diesem Konzept immer eine Kombination von FIR+IIR Filtern zum Einsatz kommt. Als Beispiel soll hier ein einfacher passiver 2-Wege Lautsprecher mit 8“ Tieftöner und 1“-Hornhoctöner dienen (Abbildung 2). In Abbildung 3 sind Ergebnisse einer linearphasigen, breitbandigen Entzerrung des Lautsprechers bei 256, 512 und 1024 Koeffizienten bei 96 kHz Samplerate gezeigt. Es ist deutlich

im Ergebnis zu erkennen, dass bei zu kurzer Filterlänge keine ausreichende Entzerrung, weder des Betrags- noch des Phasenganges, erreicht werden kann. Die Latenzen (inklusive der gesamten Controllerlatenz) der 3 Beispiele liegen bei 4,4 ms (256 Koeff.), 5,6 ms (512 Koeff.) und bei 8,2 ms (1024 Koeff.). Einen praxistauglichen Kompromiss stellt in diesem Beispiel das Ergebnis für 512 Koeffizienten dar. Bei einer Gesamtlatenz von 5,6 ms geht der Phasengang ab 500 Hz in einen linearphasigen Verlauf über und die Abweichung vom Zielbandpasses kann mit wenigen IIR-Eqs kompensiert werden.

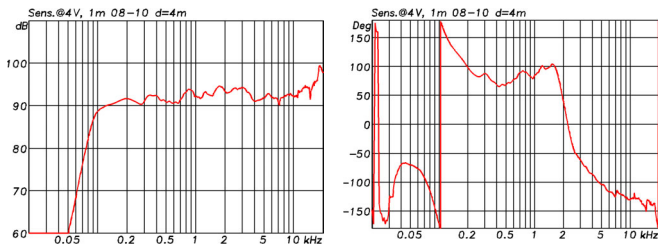


Abbildung 2: Betrag (links) und Phasengang (rechts) des 8°/1° Beispiellautsprechers

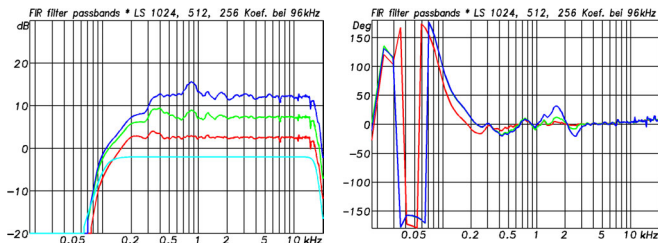


Abbildung 3: Entzerrungsergebnis (links Betrag und rechts Phase) bei 256 Koeff. (blau), 512 Koeff. (grün), 1024 Koeff. (rot) und Zielbandpass (türkis) bei 96 kHz Samplerate. Die Gesamtlatenzen der Filter inkl. Controllerlatenz sind 4,2 ms, 5,6 ms und 8,2 ms.

Multirate/multipath Processing mit gemischtphasigem Ergebnis

Die Nachteile des einfachen Breitbandentzerrers können durch ein Mehrwege-Processing umgangen werden. Dabei wird der einzelne Lautsprecherweg in zwei Einzelwege aufgeteilt. Für jeden Einzelweg kann nun ein separater Bandpass berechnet werden. Um die Filterlatenz gering zu halten wird der tieffrequente Zielbandpass minimalphasig umgesetzt und der obere Frequenzbereich linearphasig (Abbildung 4). Die resultierende Filterlatenz wird auch hier vom linearphasigen Bandpass dominiert, dessen Filterlänge aber aufgrund der hohen Übergangsfrequenz ohne Einbußen an Entzerrungsgenauigkeit recht kurz gehalten werden kann. Für das in Abbildung 5 gezeigte Ergebnis der Entzerrung wurde die Übergangsfrequenz zwischen dem minimal- und linearphasigen Bereich bei 800 Hz definiert. Beide Bandpässe wurden mit 512 Koeffizienten umgesetzt, wobei der untere Bandpass bei 1/8 der Samplerate eingesetzt wird, so dass die effektive Länge der Filterimpulsantwort um den Faktor 8 vergrößert wird. In dieser Konfiguration wird eine Gesamtlatenz (inklusive Controllerlatenz) von 6,2 ms erreicht. Das Ergebnis der Entzerrung entspricht in Betrag und Phase sehr genau dem Zielbandpass, so dass keine weiteren IIR-Filter eingesetzt werden müssen.

Bemerkenswert ist, dass die benötigte Rechenleistung zur Umsetzung des Filters nur geringfügig höher ist, als bei der Breitbandentzerrung, obwohl das resultierende Filter die 8-fache Impulsantwortlänge hat und damit auch eine wesentlich höhere Auflösung. Grundsätzlich wäre es auch möglich ein einfaches Breitbandfilter mit entsprechend mehr Koeffizienten zu rechnen, was in diesem Beispiel die 8-fache Anzahl wäre, und die Latenz des Ergebnisse durch eine Vorgabe des Zielphasenganges zu steuern. Das würde zu identischen Ergebnissen führen, aber ca. 7-8 mal mehr Rechenleistung erfordern und damit die Hardwarekosten pro Controllerkanal erhöhen.

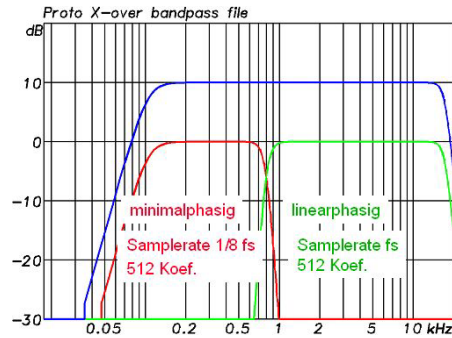


Abbildung 4: Aufteilung des Zielbandpasses in einen minimalphasigen Bereich unter 800 Hz und einen linearphasigen Bereich ab 800 Hz. Beide Bandpässe werden mit jeweils 512 Koeffizienten berechnet, wobei der niederfrequente Bandpass mit 1/8 der vollen Samplerate umgesetzt wird.

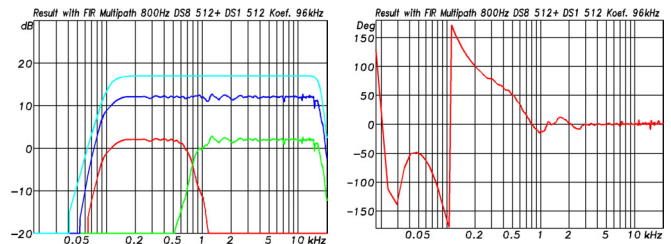


Abbildung 5: Entzerrungsergebnis (links Betrag, rechts Phase) des gemischtphasigen Filters mit Definition nach Abbildung 4

Fazit

Linearphasige FIR-Filter mit kurzen Latenzen lassen sich durch verschiedene Ansätze berechnen. Der Anwender kann durch Wahl der Parameter bei der Filterberechnung steuern ab welcher Frequenz das Ergebnis linearphasig wird und welche Genauigkeit das Entzerrungsergebnis hat. Besonders wenig Rechenleistung in Bezug zur Filterlänge benötigen Multiratenansätze, so dass hier ohne weiteren Einsatz von IIR Filtern sehr hohe Entzerrungsgenauigkeiten bei geringer Filterlatenz erreicht werden.

Literatur

[1] Müller, Swen.: Digitale Signalverarbeitung für Lautsprecher. (1999), Dissertation, RWTH Aachen
 [2] Thaden, Rainer et al.: A Loudspeaker Management System with FIR/IIR Filtering, 32nd International AES Conference, (2007), Hillerod