

Linear Phase EQ

Schriftliche Ausarbeitung von Alexander Niederleithner
Tonseminar Wintersemester 22/23

Matrikelnummer: 42148

Inhaltsverzeichnis

Allgemeine Erklärung	3
Funktionsweise analoger Equalizer	3
Digitale Filter	4
Infinite Impuls Responses	5
Finite Impulse Responses	6
Konfigurierung von FIR Filtern zu linearphasigen Filtern	7
Probleme von linearphasigen Filtern	8
Anwendungsmöglichkeiten für linearphasige Equalizer	9
Quellenangabe	10

Allgemeine Erklärung

¹Ein linearphasiger Equalizer ist ein Signalverarbeitungsfilter. Der Begriff "linearphasig" bezieht sich auf die Eigenschaft des Filters, keine Veränderung in der Phasenlage der verschiedenen Frequenzen zueinander im Signal zu erzeugen. Im Gegensatz zu anderen Equalizern, die die Amplitudenreaktion des Signals auf verschiedene Frequenzen anpassen, verwendet ein linearphasiger Equalizer einen Filter mit einer Phasencharakteristik, die linear ist. Das bedeutet, dass die Phasenverschiebung des Signals bei verschiedenen Frequenzen proportional zur Frequenz ist.

Linearphasige Equalizer finden Anwendung in vielen Bereichen, wie z.B. in der Audio- und Videobearbeitung und in der Telekommunikation. Sie können verwendet werden, um Signale zu glätten, Verzerrungen zu korrigieren und Interferenzen zu reduzieren. Bevor jedoch auf die Funktionsweise linearphasiger Filter eingegangen werden kann, müssen erst ein paar grundlegende Begriffe des Equalizers geklärt werden.

Funktionsweise analoger Equalizer

Ein analoger Equalizer besteht aus einer Reihe von Filtern, die bestimmte Frequenzbereiche des Signals verstärken oder abschwächen können. Jeder Filter besteht aus einer Spule, einem Kondensator und einem Widerstand, die in einer bestimmten Konfiguration miteinander verbunden sind. Die Kombination dieser Bauteile bildet einen resonanten Schwingkreis, der auf eine bestimmte Frequenz abgestimmt ist. Phasenverschiebung tritt auf, wenn ein Signal durch einen Filter geleitet wird, da der Filter eine bestimmte Zeit benötigt, um auf das Signal zu reagieren. Diese Verzögerung in der Signalverarbeitung führt zu einer Änderung der Phase des Signals. Wenn nun das phasenverschobene Signal mit dem Originalsignal kombiniert wird, hat dies einen veränderten Frequenzgang zur Folge.

¹ Arthur. "The Complete Guide To Linear Phase Equalization/EQ." *My New Microphone*, 10 Feb. 2021, <https://mynewmicrophone.com/the-complete-guide-to-linear-phase-equalization-eq/#What-Is-Linear-Phase-Equalization?>

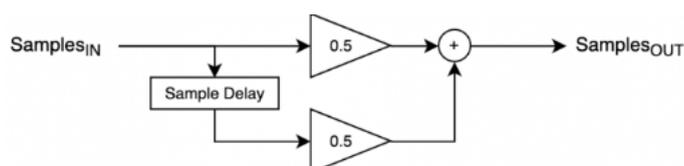
²Analoge Equalizer nutzen also Phasenverschiebung, um den Frequenzgang eines Signals zu verändern. Jeder Frequenzbereich im Signal hat eine bestimmte Phase, die mit ihm einhergeht. Durch die Anwendung von Filtern auf das Signal wird die Phase des Signals in jedem Frequenzbereich geändert. Die Änderung der Phase des Signals durch den Filter führt zu einer Änderung des Frequenzgangs des Signals.

Digitale Filter

Digitale Filter sind Signalverarbeitungsbausteine, die dazu verwendet werden, um unerwünschte Frequenzen aus einem Audio-Signal herauszufiltern oder gezielt bestimmte Frequenzen hervorzuheben. Im Gegensatz zu analogen Filtern, die aus elektronischen Bauteilen wie Widerständen, Kondensatoren und Spulen bestehen, arbeiten digitale Filter auf Basis von mathematischen Algorithmen.

Ein digitaler Filter erhält ein Audiosignal als Eingabe und wendet eine Filterfunktion auf das Signal an, um unerwünschte Frequenzen herauszufiltern oder gezielt bestimmte Frequenzen zu verstärken.

³Die Funktionsweise digitaler Filter kann man durch einen einfachen LowPass-Filter am besten veranschaulichen: Hierbei ist $y(n) = x(n)/2 + x(n-1)/2$ die Filterfunktion. Wenn nun zwei Samples durch diesen Filter gesendet werden, ist das Ergebnis an Stelle n das Mittel aus dem Sample an Stelle n und dem Sample an Stelle n-1. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Filter mehr eingreift, je größer der Unterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Samples ist. Das heißt, dass tiefe Frequenzen, durch die Tatsache, dass hier die Unterschiede zwischen aufeinanderfolgenden Samples klein sind, weniger oder gar nicht von dem Filter betroffen sind. Hohe Frequenzen hingegen, bei denen die



Unterschiede zwischen einzelnen Samples groß sind, werden durch den Filter stärker beeinflusst. Dies ist

² *Equalizers and Phase Shift*. <https://ethanwiner.com/EQPhase.html>. Accessed 27 Feb. 2023.

³ *Definition of the Simplest Low-Pass*.

https://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/Definition_Simplest_Low_Pass.html. Accessed 27 Feb. 2023.

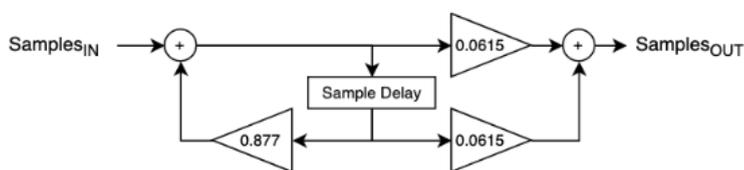
natürlich nur ein Beispiel für einen einfachen digitalen Filter. Durch andere und längere Algorithmen kann eine Vielzahl an Filtertypen erstellt werden.

Digitale Filter können in zwei Kategorien unterteilt werden: Finite-Impuls-Response- (FIR-)Filter und Infinite-Impuls-Response- (IIR-)Filter. FIR-Filter sind linearphasig und haben eine endliche Impulsantwort, während IIR-Filter nicht-linearphasig sind und eine unendliche Impulsantwort haben.

Infinite Impuls Responses

Infinite Impulse Responses (IIR) sind digitale Filter, die aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften in vielen Anwendungen in der digitalen Signalverarbeitung eingesetzt werden.

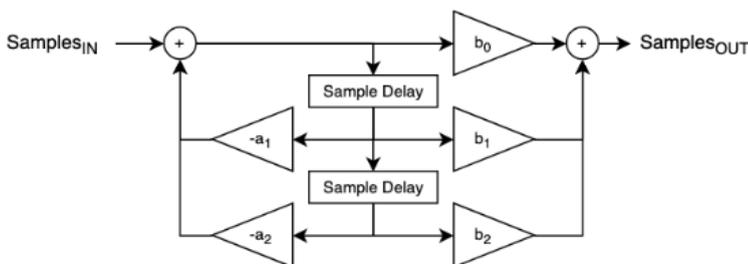
⁴IIR-Filter arbeiten durch die Rückkopplung der Ausgangsdaten zurück in den Eingangskanal,



wodurch das Ausgangssignal beeinflusst wird. Dies bedeutet, dass das Ausgangssignal nicht nur vom aktuellen Eingangssignal

abhängt, sondern auch von früheren Eingangssignalen und Ausgangssignalen.

IIR-Filter können als Kaskade von biquadratischen Filtern dargestellt werden, die auch als Second Order Sections (SOS) bezeichnet werden. Eine einzelne SOS besteht aus zwei Polen und zwei Nullstellen, die auf den Frequenzgang des Filters Einfluss nehmen. Hier zu sehen ist



IIR biquad filter flowchart. (Direct-form 2)

ein einzelner quadratischer Filter. IIR-Filter sind jedoch aufgrund ihrer nicht-linearen Phasenantwort weniger

June 2019,

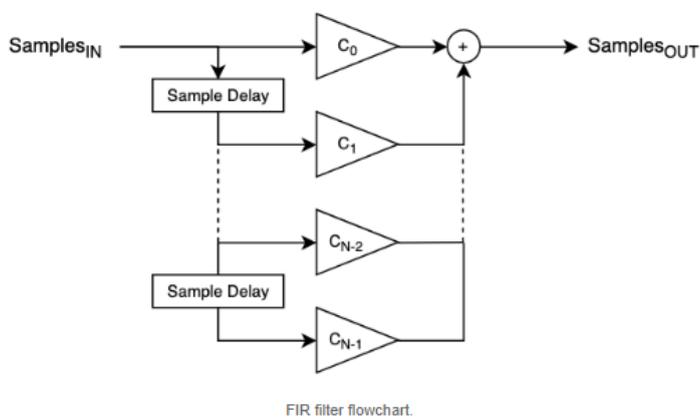
<https://eclipseaudio.com/fir-filter-guide/>.

geeignet, wenn eine lineare Phase erforderlich ist.

Finite Impulse Responses

Ein Finite Impulse Response (FIR) Filter ist ein digitaler Filter, der in der Lage ist, bestimmte Frequenzkomponenten eines Signals zu unterdrücken oder zu verstärken. FIR-Filter zeichnen sich dadurch aus, dass die Impulsantwort des Filters endlich ist, was bedeutet, dass die Filterantwort auf eine Eingabe nur für eine begrenzte Zeit stattfindet.

⁵Die Funktionsweise eines FIR-Filters beruht auf der linearen Kombination der aktuellen Eingangswerte und früheren Eingangswerte, die durch eine Kombination von Koeffizienten und Verzögerungselementen berechnet werden. Jeder der Eingangswerte wird mit einem entsprechenden Koeffizienten multipliziert und dann aufsummiert, um das Ausgangssignal zu erzeugen. Die Koeffizienten werden so gewählt, dass sie das Signal in einer bestimmten Art und Weise filtern, indem sie Frequenzkomponenten verstärken oder abschwächen.



Ein wichtiger Vorteil von FIR-Filtern ist ihre Stabilität. Da sie eine endliche Impulsantwort haben, wird das Ausgangssignal nicht durch Rückkopplungseffekte beeinflusst, die bei IIR-Filtern auftreten können. IIR-Filter sind

im Vergleich zu FIR-Filtern in der Lage, mit weniger Rechenaufwand eine höhere Filtersteilheit zu erreichen, was in einigen Anwendungen vorteilhaft sein kann. Allerdings kann es bei IIR-Filtern auch zu Instabilitäten kommen, insbesondere bei hochwertigen Filtern mit steilen Flanken.

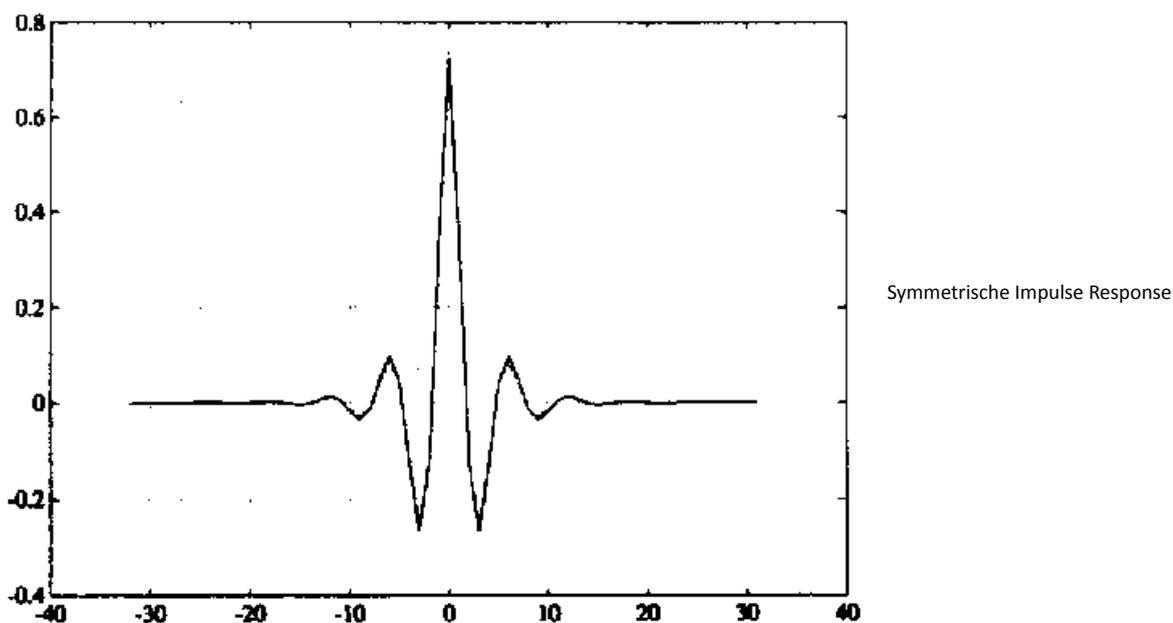
⁵ *FIR Digital Filters*. https://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/Finite_Impulse_Response_Digital.html. Accessed 27 Feb. 2023.

⁶Da FIR-Filter ohne Rückkopplung arbeiten, ist ihre Fähigkeit, tiefe Frequenzen zu kontrollieren direkt proportional zu ihrer Länge, beziehungsweise der Anzahl der sogenannten "Taps". Der auf der letzten Seite gezeigte FIR-Filter hat vier Koeffizienten, also vier Taps. Ein typischer FIR-Filter, zum Beispiel für die Benutzung in einem Speaker Processor Output Channel, hat 2048 Taps.

Da die Impulsantwort endlich ist, können FIR-Filter so konfiguriert werden, dass sie eine lineare Phasencharakteristik aufweisen. Dies ist insbesondere in der Audiotbearbeitung wichtig, da eine Phasenverschiebung zu unerwünschten Klangverfälschungen führen kann.

Konfigurierung von FIR Filtern zu linearphasigen Filtern

⁷Um einen linearphasigen FIR-Filter zu erstellen, müssen die Koeffizienten des Filters so berechnet werden, dass die Impulsantwort des Filters symmetrisch ist. Wenn die Impulsantwort symmetrisch ist, bedeutet dies, dass der Filter eine lineare Phasenverzögerung aufweist. Um eine symmetrische Impulsantwort zu erhalten, müssen die Koeffizienten so gewählt sein, dass sie symmetrisch sind, also jeweils der erste und letzte



⁶ "The Complete FIR Filter Guide for Loudspeakers & Audio." *Eclipse Audio*, 4 June 2019, <https://eclipseaudio.com/fir-filter-guide/>.

⁷ "Symmetric Linear-Phase Filters." *Introduction to Digital Filters*, https://www.dsprelated.com/freebooks/filters/Symmetric_Linear_Phase_Filters.html. Accessed 27 Feb. 2023.

Koeffizient den gleichen Wert haben, sowie der zweite und der vorletzte den gleichen Wert haben und so weiter.

⁸Da die Impulsantwort des Filters nun aber in der negativen Zeitachse beginnt, muss das komplette Signal verzögert werden. Diese Verzögerung wird als "Group Delay" bezeichnet. Ein Group Delay ist ein wichtiges Konzept bei der Analyse und dem Design von linearphasigen Filtern. Es gibt an, wie lange jede Frequenzkomponente eines Signals durch den Filter verzögert wird. Wenn der Filter linearphasig ist, bedeutet dies, dass alle Frequenzkomponenten des Signals in Phase verzögert werden, was bedeutet, dass das Signal nach dem Filtern eine gleichmäßige Verzögerung aufweist, die nicht von der Frequenz abhängt.

Der Group Delay kann mathematisch als negative Ableitung der Phasenverschiebung des Filters über der Frequenz definiert werden. Mit anderen Worten: Das Group Delay ist die Steigung der Phasenverschiebungsfunktion des Filters.

Probleme von linearphasigen Filtern

Trotz des offensichtlichen Vorteils von linearphasigen Filtern in Situationen, in denen die Phase von besonderer Bedeutung ist, werden linearphasige Filter eher in speziellen Situationen verwendet, da sie andere Nachteile aufweisen, die ihre erfolgreiche Anwendung erschweren.

⁹Eines der Hauptprobleme bei der Verwendung von linearphasigen Equalizern sind die sogenannten Pre-Ringing-Artefakte. Diese entstehen durch die lineare Phasenverschiebung, die beim Durchlaufen des Equalizers auftritt. Pre-Ringing-Artefakte treten auf, wenn das Signal eine abrupte Änderung aufweist, wie zum Beispiel bei einem Schlagzeuganschlag oder einem scharfen Übergang zwischen verschiedenen Instrumenten. In diesem Fall wird ein Teil

⁸ "Group Delay." *Introduction to Digital Filters*, https://www.dsprelated.com/freebooks/filters/Group_Delay.html. Accessed 27 Feb. 2023.

⁹ "FabFilter Learn - Equalization." *Linear Phase EQ*, <https://www.fabfilter.com/learn/equalization/linear-phase-eq>. Accessed 27 Feb. 2023.

des Signals, der dem Übergang vorausgeht, verzögert und kann zu einem hörbaren “Einschwingen” vor dem eigentlichen Signal führen.

Zusätzlich kann die Verwendung von linearphasigen Equalizern aufgrund der erforderlichen Prozessorleistung und des damit verbundenen Rechenaufwands eine Herausforderung darstellen. Insbesondere bei Echtzeitanwendungen, wie beispielsweise bei der Live-Produktion von Musik, ist die Verwendung von linearphasigen Equalizern nicht möglich, da durch das Group Delay zwangsläufig eine Verzögerung auftritt.

Anwendungsmöglichkeiten für linearphasige Equalizer

Trotz der Nachteile gibt es für linearphasige Equalizer eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten, wie z.B. das Mastering, bei dem linearphasige Equalizer eingesetzt werden können, um die Tonalität und Frequenzbalance zu verbessern, ohne die Phase des Signals zu beeinträchtigen. Auch Speaker bzw. Endstufen Processing Channels haben oft einen linearphasigen Equalizer, um zum Beispiel einen raumspezifischen Filter auf das Ausgangssignal zu legen.¹⁰In der Musikproduktion ist es sinnvoll, einen linearphasigen EQ zu verwenden, wenn ein Instrument mit mehreren Mikrofonen aufgenommen wird, wie dies bei einem Schlagzeug zum Beispiel üblich ist. Dadurch können Phasenverschiebungen zwischen den Drum-Mikrofonen vermieden werden. Bei der Frequenzbearbeitung von einem Kanal eines Signals, das zusätzlich durch Parallel Processing bearbeitet wird, kann es auch sinnvoll sein, einen linearphasigen Equalizer zu verwenden.

¹⁰ “Übersicht Über Den Linear Phase EQ in Logic Pro.” *Apple Support*, <https://support.apple.com/de-de/guide/logicpro/lgcef1edd389/mac>. Accessed 28 Feb. 2023.

Quellenangabe

Arthur. "The Complete Guide To Linear Phase Equalization/EQ."

My New Microphone, 10 Feb. 2021,

<https://mynewmicrophone.com/the-complete-guide-to-linear-phase-equalization-eq/#What-Is-Linear-Phase-Equalization?>. Accessed 27. Feb. 2023.

Definition of the Simplest Low-Pass.

https://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/Definition_Simplest_Low_Pass.html.

Accessed 27. Feb. 2023.

"Der Unterschied Zwischen IIR- Und FIR-Filtern: Ein Praktischer Leitfaden."

Advanced Solutions Nederland, 9 Oct. 2020,

www.advsolned.com/unterschied-zwischen-iir-und-fir-filtern-ein-praktischer-leitfaden/.

Accessed 27. Feb. 2023.

Equalizers and Phase Shift. <https://ethanwiner.com/EQPhase.html>. Accessed 27 Feb. 2023.

"FabFilter Learn - Equalization." *Linear Phase EQ*,

<https://www.fabfilter.com/learn/equalization/linear-phase-eq>. Accessed 27. Feb. 2023.

FIR Digital Filters.

https://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/Finite_Impulse_Response_Digital.html.

Accessed 27. Feb. 2023.

"Group Delay." *Introduction to Digital Filters*,

https://www.dsprelated.com/freebooks/filters/Group_Delay.html. Accessed 27. Feb. 2023.

"Symmetric Linear-Phase Filters." *Introduction to Digital Filters*,

https://www.dsprelated.com/freebooks/filters/Symmetric_Linear_Phase_Filters.html.

Accessed 27. Feb. 2023.

“The Complete FIR Filter Guide for Loudspeakers & Audio.” *Eclipse Audio*, 4 June 2019,
<https://eclipseaudio.com/fir-filter-guide/>. Accessed 27. Feb. 2023

“Übersicht Über Den Linear Phase EQ in Logic Pro.” *Apple Support*,
<https://support.apple.com/de-de/guide/logicpro/lgcef1edd389/mac>.
Accessed 28. Feb. 2023.