

# Filterfunktionen bei Mehrwegern

---

## Inhalt

Motivation .....	2
Problem .....	3
1. Frequenzgang .....	3
2. Abstrahlverhalten.....	5
Lösungen .....	8
1. Zusätzliche Filter zur Anpassung der Phase .....	8
1.1. Zusätzliche Linearisierung der Phase .....	9
2. Linearphasige Trennung .....	10
3. Ausgleichen der Phasenverzerrung.....	11
Zusammenfassung.....	13

## Motivation

Der wiederzugebene Frequenzbereich eines Lautsprecher ist meist in mehrere Wege aufgeteilt. Die Frequenzweiche (passiv oder aktiv) sorgt dafür, dass den Treiber bestimmte Bandpässe zugeordnet sind. Diese Bandpässe werden in der Regel mit minimalphasigen Filtern mit begrenzter Steilheit realisiert.

Durch die begrenzte Steilheit gibt es zwischen den Bandpässen Überlappungsbereiche. Minimalphasige Filter haben die Eigenschaft, den Phasengang zu verzerren. Im Bereich der Eckfrequenz ist die Steigung der Phasenänderung am größten. Nun kommt es bei Mehrwegern durch die endliche Steilheit der Filter und die schmalen Frequenzbereiche der Wege dazu, dass sich mehr als zwei Wege in einem Frequenzbereich überlagern. Das hat zur Folge, dass die Phasenlage aller Bandpässe nicht mehr zusammenpasst und die Überlagerung nicht komplett konstruktiv stattfindet.

Ein Entzerren des Gesamtamplitudengangs hat zwei Nachteile. Zum einen geht durch die destruktive Interferenz Maximalpegel verloren und zum anderen kann das Abstrahlverhalten nicht korrigiert werden.

Im Folgenden wird an Hand von einem Beispiel gezeigt, welche Auswirkung diese Überlagerung auf den Gesamtfrequenzgang und das Abstrahlverhalten besitzt. Weiterhin werden Lösungsansätze aufgezeigt.

## Problem

### 1. Frequenzgang

Simuliert wurden die Bandpässe für einen 4-Weger. Als Filter wurden Linkwitz-Riley 4. Ordnung eingesetzt. Die Trennfrequenzen sind wie folgt.

	Tieftöner	Tiefmitteltöner	Mittelhochtöner	Hochtöner
Hochpass	-	200 Hz	800 Hz	2500 Hz
Tiefpass	200 Hz	800 Hz	2500 Hz	-

Die komplexen Frequenzgänge der Bandpässe sind im Folgenden dargestellt.

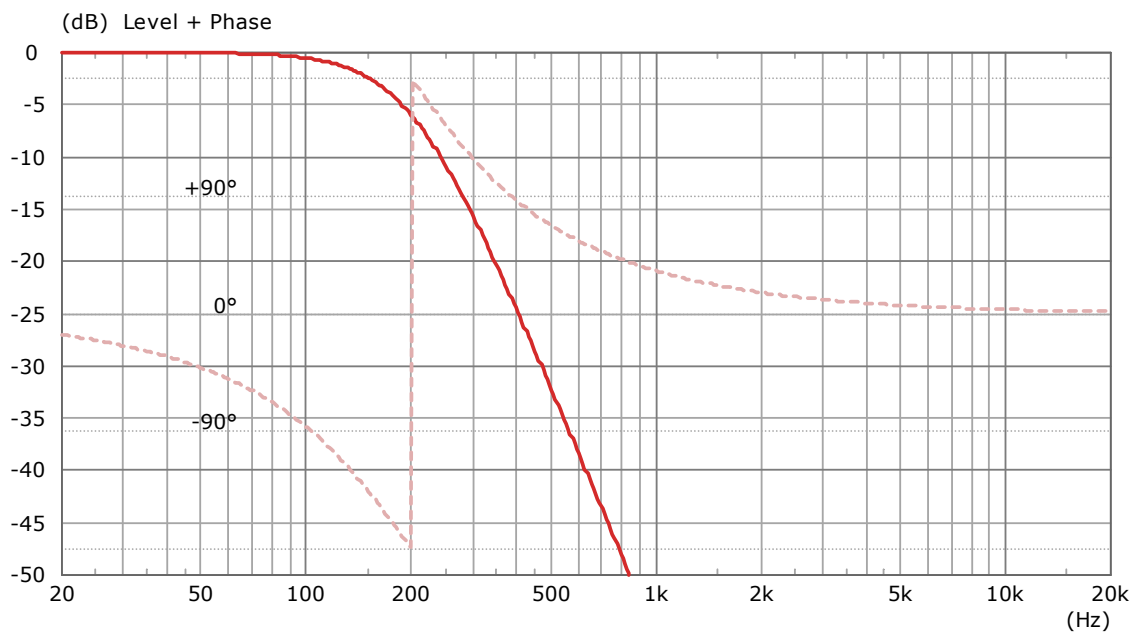


Abbildung 1: Tieftöner

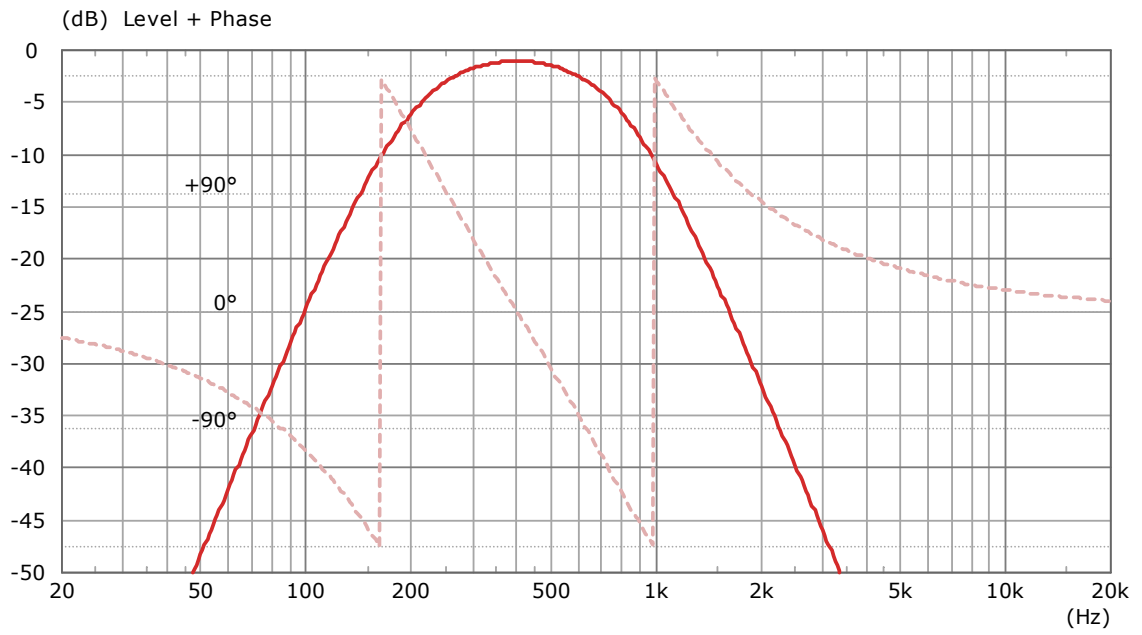


Abbildung 2: Tiefmitteltöner

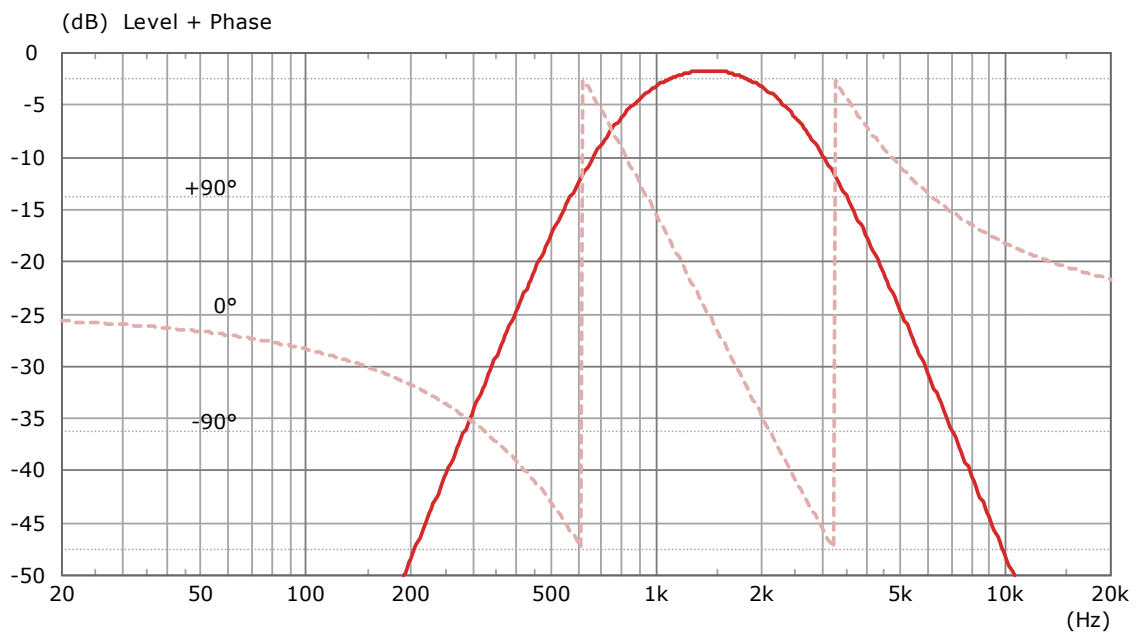


Abbildung 3: Mittelhoctöner

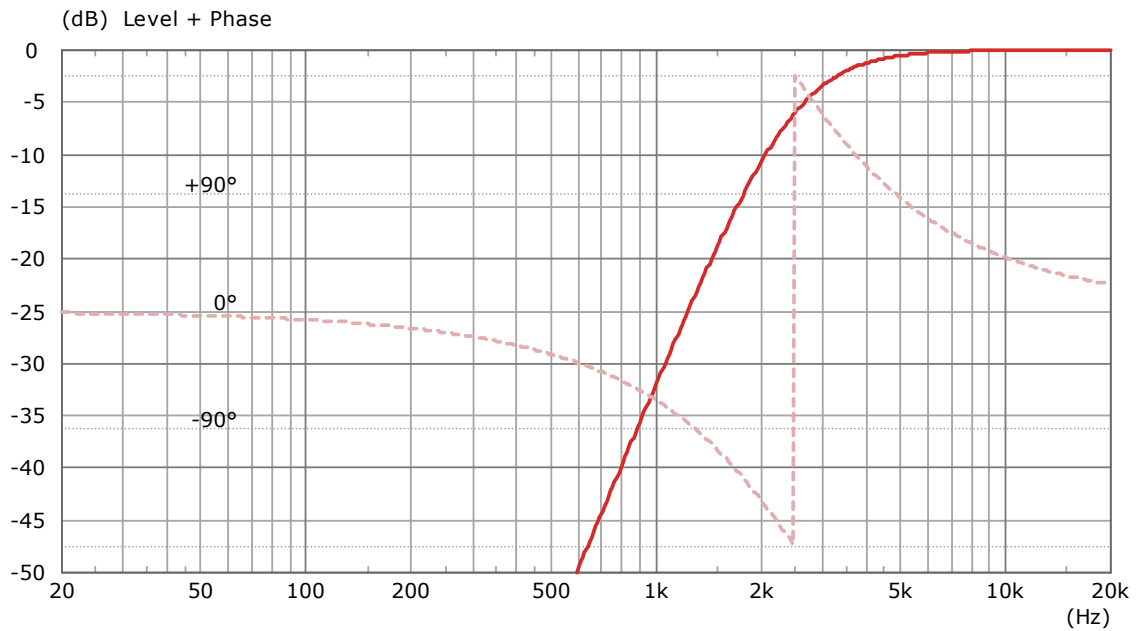


Abbildung 4: Hochtöner

Addieren sich die Wege kommt es zu folgendem Gesamtfrequenzgang. Wie zu sehen, ist die Überlagerung im Mittelton nicht rein konstruktiv. Es gibt einen relativ breitbandigen Einbruch im Frequenzbereich von ca. 200 – 2500 Hz.

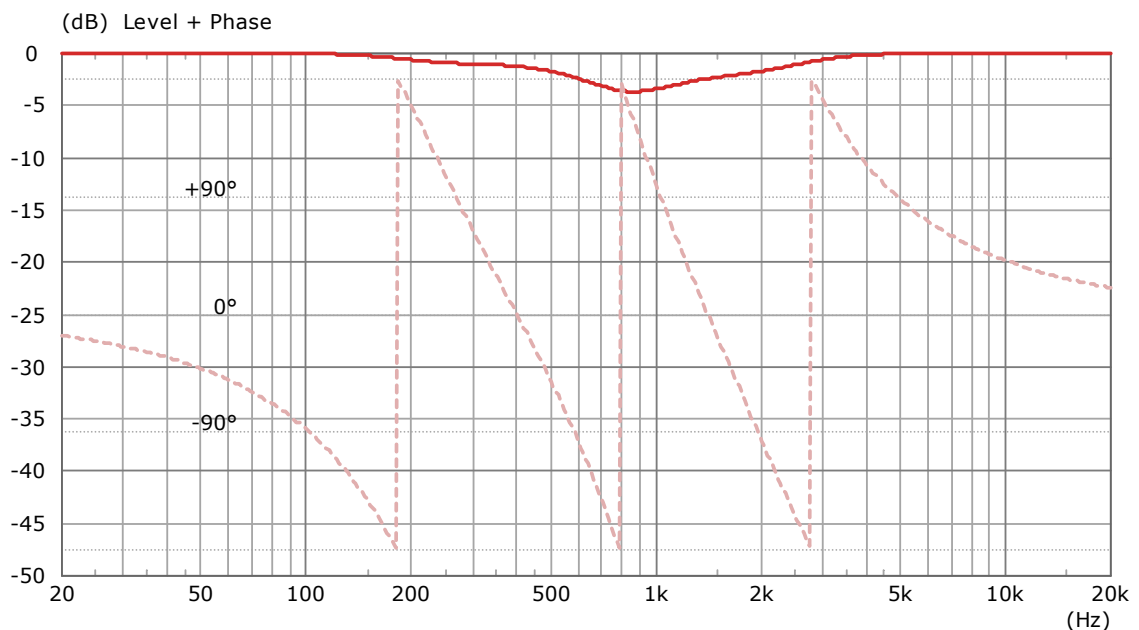


Abbildung 5: Gesamtfrequenzgang aller Wege

## 2. Abstrahlverhalten

Im Folgenden wird gezeigt, welchen Einfluss die unterschiedlichen Phasengänge auf das vertikale Abstrahlverhalten besitzen. Dafür wurde eine Anordnung von idealen Punktschallquellen simuliert, die mit Tief- und Hochpässen mit den obigen Eckfrequenzen beschaltet wurden.

Bei der Anordnung handelt es sich um vier Wege, die als Treiberpärchen vertikal symmetrisch um einen Hochtöner angeordnet sind (ausgehend vom Hochtöner: Mittelhochtöner, Tiefmitteltöner, Tieftöner). Beim Hochtöner wurden zwei Punktschallquellen simuliert, da für das resultierende vertikale Abstrahlverhalten ein Linienstrahler besser geeignet ist. Ziel ist ein möglichst konstantes vertikales Abstrahlverhalten zu erreichen. Die äußeren Schallquellen (Tieftöner) besitzen einen Abstand von 1,4 m.

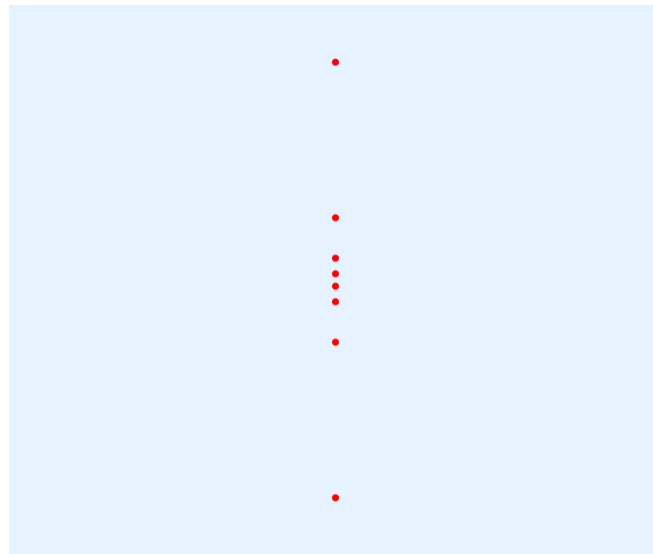


Abbildung 6: Idealisierter Lautsprecher aus Punktschallquellen

Zunächst wurden linearphasige Filter konfiguriert. Das heißt, dass der Phasengang komplett ignoriert wurde. Alle Wege besitzen also eine konstante Phase. Wie zu sehen ist das Abstrahlverhalten bis 5 kHz sehr gleichmäßig.

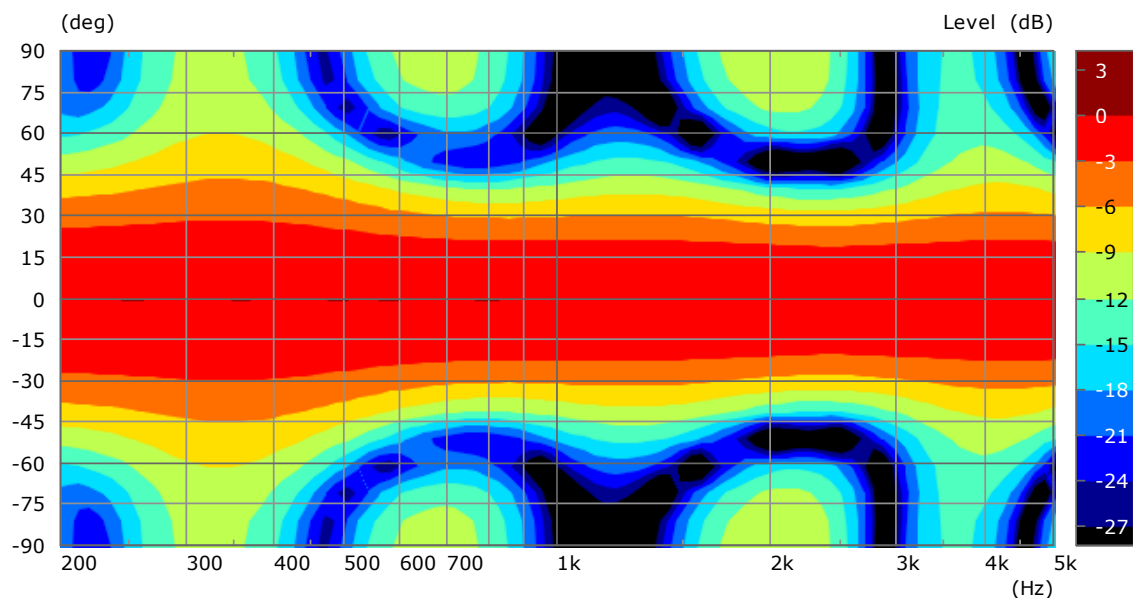


Abbildung 7: Lautsprecher mit linearphasigen Filtern

Als Nächstes wurden die minimalphasigen Filter konfiguriert. Durch die nicht rein konstruktive Überlagerung ergeben sich unter Winkeln starke Nebenkeulen. Das gleichmäßige Abstrahlverhalten

ist damit zerstört. Nicht simuliert sind hierbei jedoch die Treiberdimensionen, die durch ihre Richtwirkung ggf. die Nebenkeulen etwas abschwächen.

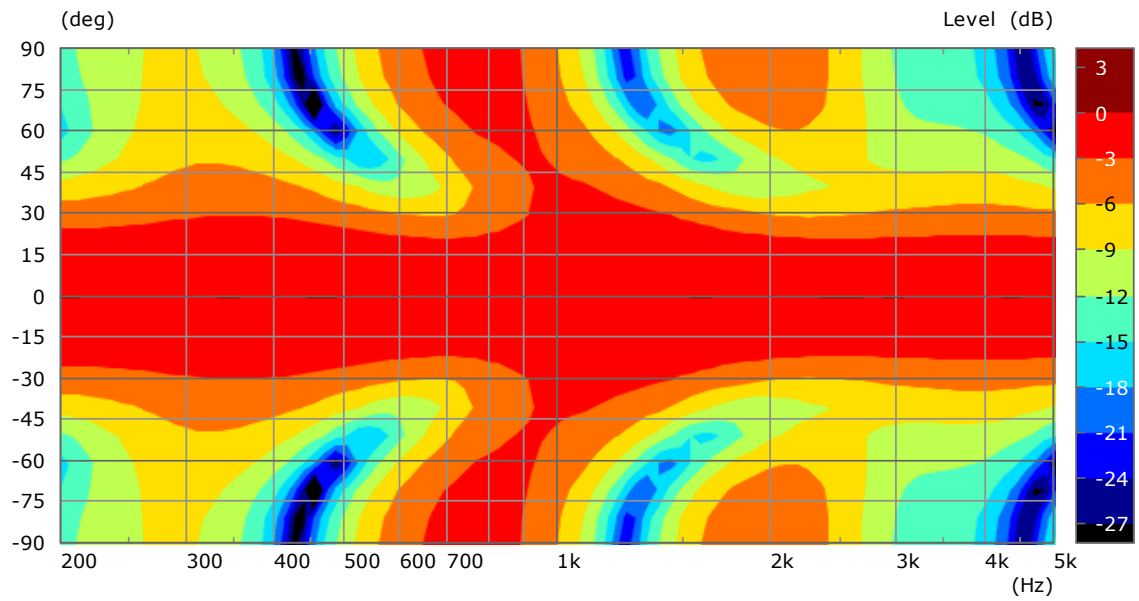


Abbildung 8: Lautsprecher mit minimalphasigen Filtern

# Lösungen

## 1. Zusätzliche Filter zur Anpassung der Phase

Das Problem der nicht rein konstruktiven Überlagerung lässt sich lösen, indem jedem Zweig die fehlenden Hoch- und Tiefpässe der anderen Wege hinzugefügt werden. Somit wird der Phasengang in allen Wegen auf dieselbe Weise verzerrt und es stellt sich eine rein konstruktive Überlagerung im gesamten Spektrum ein.

Das Verfahren funktioniert auch mit Allpässen statt Hoch- und Tiefpässen, da durch die geringe Amplitude praktisch nur die Phasenverzerrung relevant ist. Im folgenden wurden aber zusätzliche Hoch- und Tiefpässe hinzugefügt.

	Tieftöner	Tiefmitteltöner	Mittelhochtöner	Hochtöner
Zus. Hochpass	-	-	200 Hz	200 Hz
Zus. Hochpass	-	-	-	800 Hz
Zus. Tiefpass	800 Hz	-	-	-
Zus. Tiefpass	2500 Hz	2500 Hz	-	-

Wie zu sehen, stellt sich eine perfekte Überlagerung ein. Der Amplitudengang ist konstant.

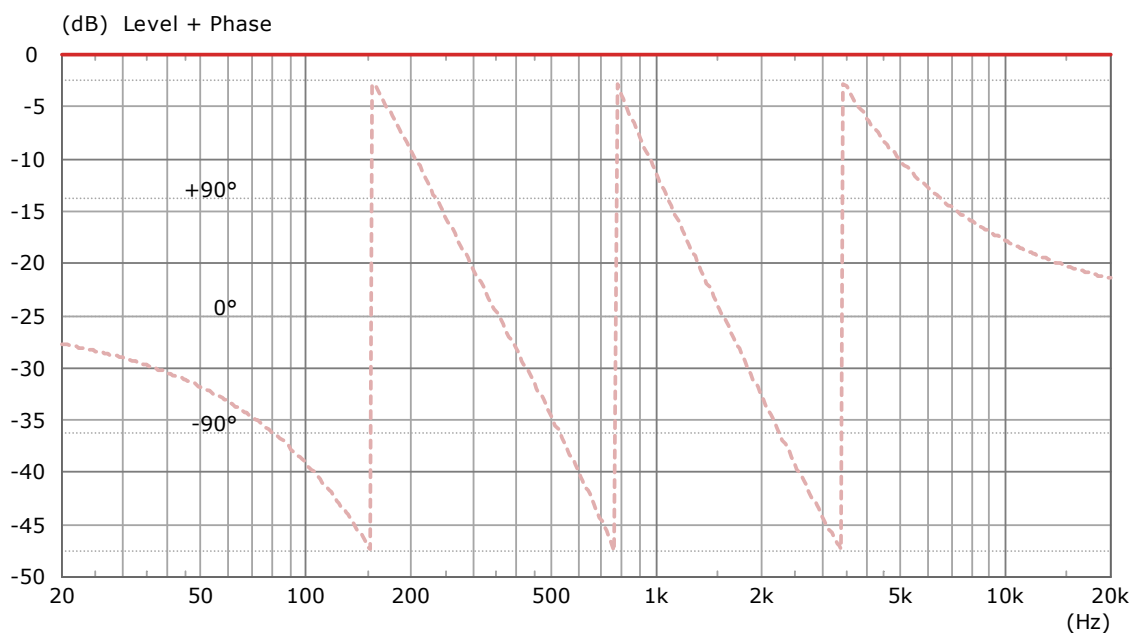


Abbildung 9: Gesamtfrequenzgang mit zusätzlichen Filtern

Durch die zusätzlichen Phasendrehungen erhöht sich die Gruppenlaufzeit leicht. Das betrifft vor allem den unteren Frequenzbereich.



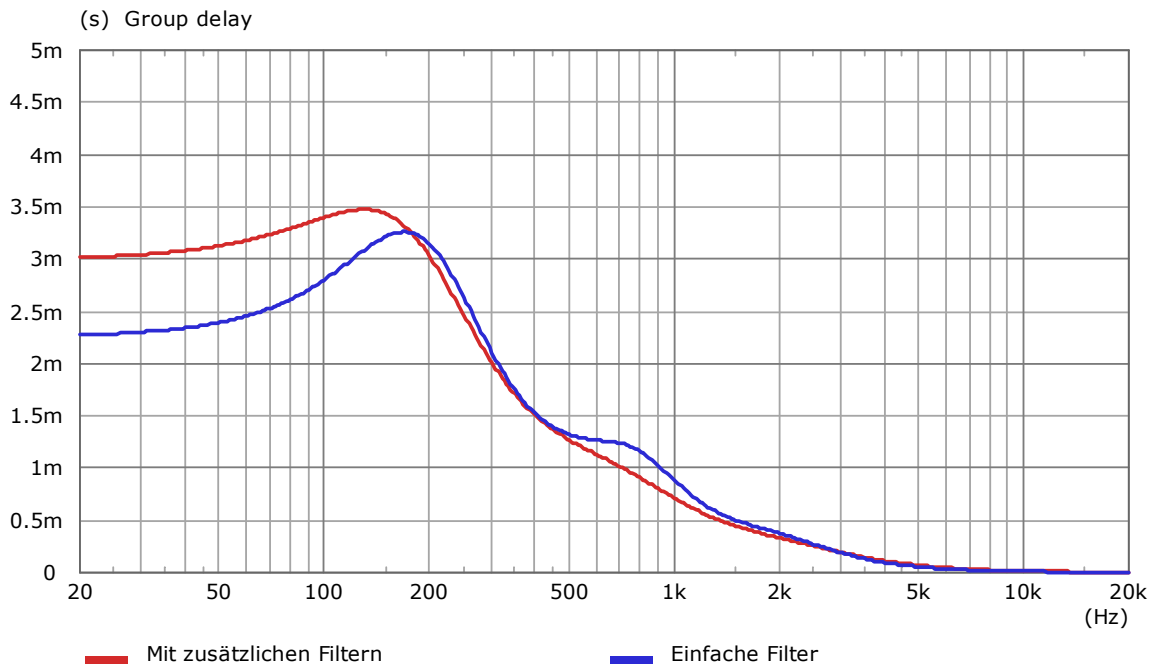


Abbildung 10: Gruppenlaufzeitverzerrung

Der Vorteil dieser Lösung ist, dass im Gegensatz zu linearphasigen FIR-Filtern keine frequenzneutrale Verzögerung hinzugefügt wird. Dafür ist die Gruppenlaufzeit nicht konstant und steigt zu niedrigen Frequenzen hin an.

### 1.1. Zusätzliche Linearisierung der Phase

Da die Phasengänge der Wege nun zueinander passen, kann der Gesamtphasengang mittels eines einzigen FIR-Filters komplett linearisiert werden. Allerdings wird die konstante Gruppenlaufzeit durch eine frequenzneutrale Verzögerung erkauft.

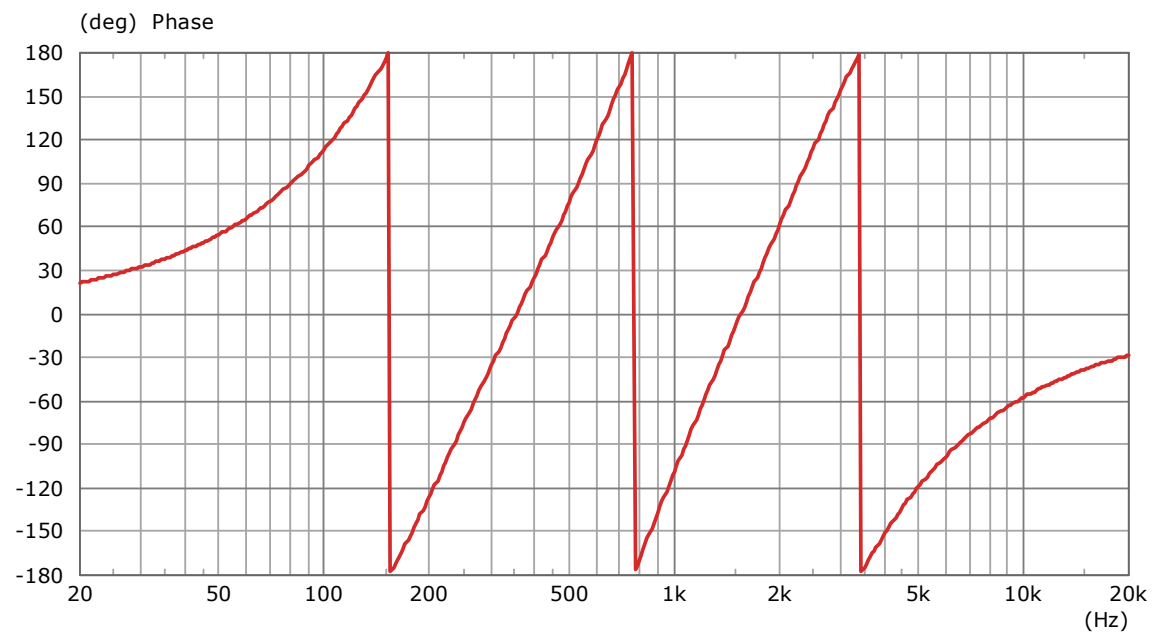


Abbildung 11: FIR-Korrekturfilter für den Gesamtphasengang

## 2. Linearphasige Trennung

Eine weitere Möglichkeit, das Problem zu umgehen, ist, die Hoch- und Tiefpässe als linearphasige FIR-Filter zu realisieren. Die Überlagerung ist damit im gesamten Frequenzbereich konstruktiv und die Gruppenlaufzeit ist konstant. Allerdings wird damit eine frequenzneutrale Verzögerung eingeführt, die in bestimmten Situationen nicht akzeptabel ist.

Folgendes Beispiel zeigt den Tiefmitteltöner, bei dem das FIR-Filter lediglich den Amplitudengang vorgibt, die Phase aber nicht beeinflusst.

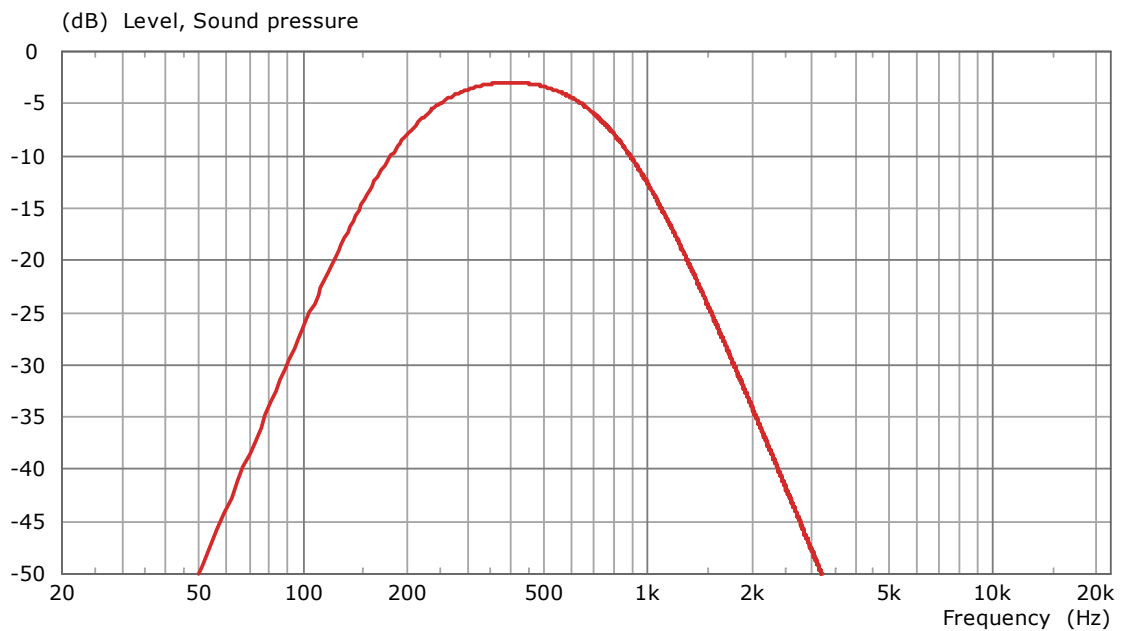


Abbildung 12: Beispiel für linearphasiges FIR-Filter

Diese Möglichkeit ist nur digital aktiv realisierbar und benötigt somit für jeden Zweig einen eigenen DSP- und Endstufenkanal.

### 3. Ausgleichen der Phasenverzerrung

Ein Vorteil von FIR-Filtern ist die Möglichkeit, Amplituden- und Phasengang getrennt voneinander zu behandeln. Dadurch steht eine weitere Möglichkeit offen:

- Trennung mit minimalphasigen IIR-Filtern, die die Phase verzerren
- Entzerrung der Phasengänge mittels FIR-Filtern

Die Reihenfolge der Filter ist dabei nicht relevant. Wichtig ist nur, dass der Phasengang jedes Weges einzeln entzerrt wird. Das heißt, es ist auch hier ein eigener DSP-Kanal für jeden Weg notwendig.

Eine konstante Gruppenlaufzeit und damit eine frequenzneutrale Verzögerung erzeugt auch diese Variante.

Das folgende Beispiel zeigt die Filter an Hand des Tiefmitteltöners. Zunächst wird der Amplitudengang über ein minimalphasiges Filter auf die Zielfunktion gebracht. Dieser verzerrt zunächst den Phasengang. Danach wird ein FIR-Filter angewendet, der nur die Phasenverzerrung ausgleicht.

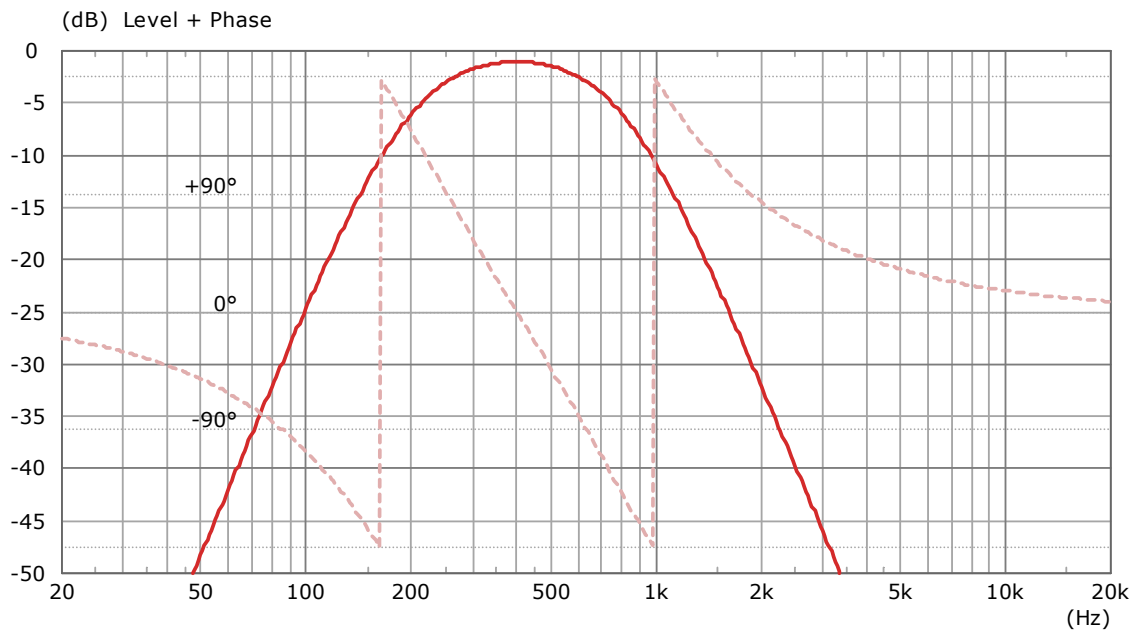


Abbildung 13: Minimalphasiges IIR-Filter für den Tiefmitteltöner

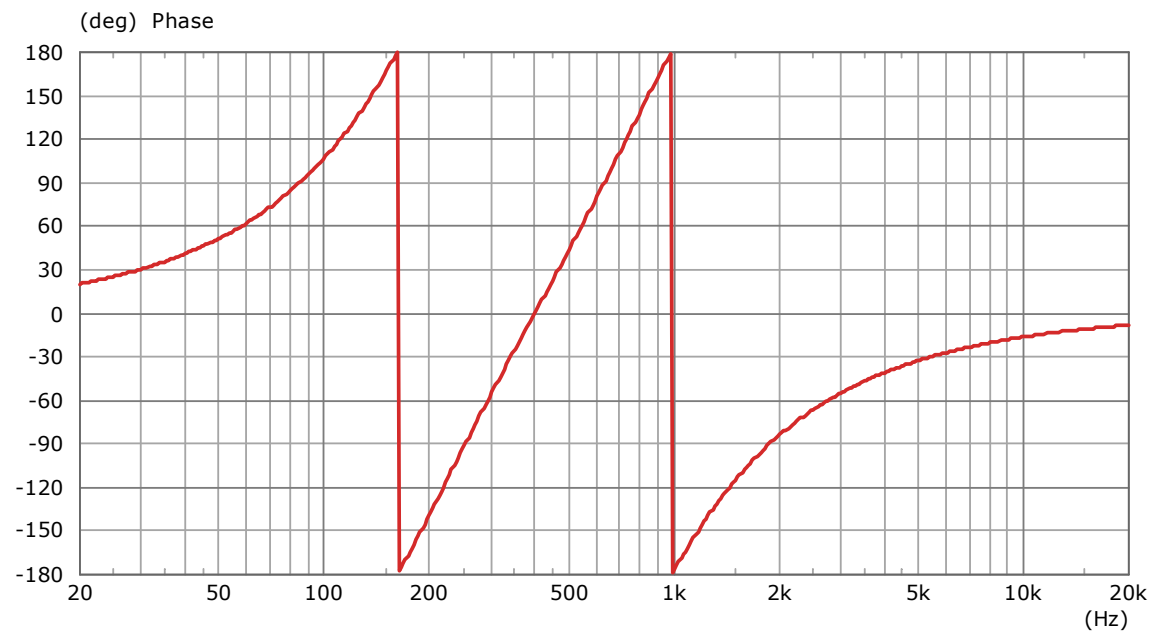


Abbildung 14: FIR-Kompensationsfilter für die Phasenverzerrung des IIR-Filters

Der Vorteil dieser Lösung ist, dass die FIR-Filter kleiner ausfallen können, da sie nur die Phase entzerren. Es können also ein DSP mit geringerem Speicher oder höhere Abtastraten eingesetzt werden, ohne dass die Filterfunktion signifikant einbricht.

## Zusammenfassung

Im Folgenden sind die Eigenschaften der verschiedenen Varianten tabellarisch zusammengefasst.

	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 1.1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>
<b>Gruppenlaufzeit</b>	frequenzabhängig	konstant	konstant	Konstant
<b>Kanäle für Faltung</b>	0	1	4	4
<b>Speicherbedarf im DSP</b>	sehr niedrig	niedrig	hoch	Mittel