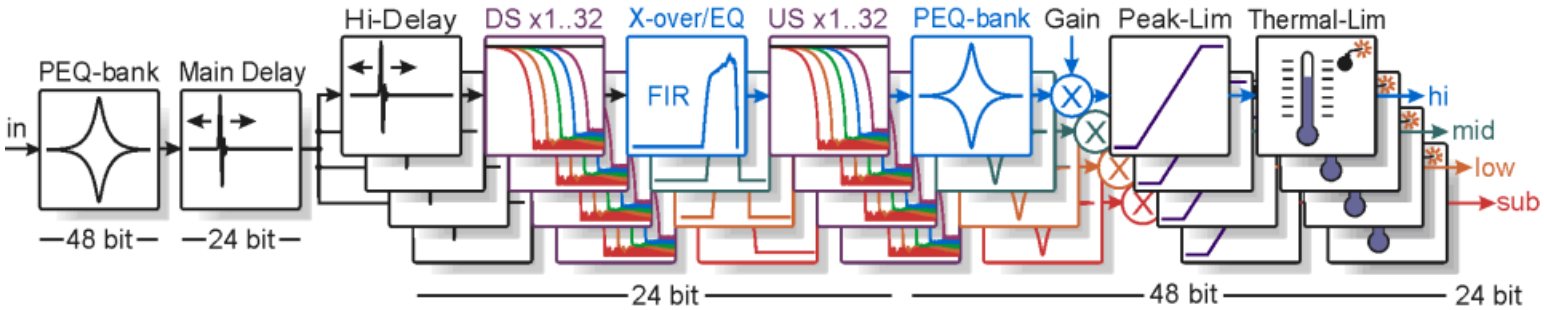
Linearphasiges Filterdesign und die daraus resultierenden Latenzen



FOURAUDIO

Anselm Goertz
Jochen Kleber
Michael Makarski
Rainer Thaden

Funktionen des Lautsprechercontrollers

- Schutzfunktionen
  - Endstufenlimiter, Peaklimiter und Thermolimiter für Lautsprecherwege
- Verwaltung von Lautsprechersetups und Kombinationen
  - Topteile für Fullrange und im Betrieb mit verschiedenen Subwoofern
  - Cluster von Topteilen und benötigte Coupling-filter
  - Line Arrays mit/ohne Subwoofer und benötigte Coupling Filter
- Routing und Delay
- X-over und Entzerrung
  - Breitbandentzerrung passiver Topteile
  - 2x4 Wege X-over + Entzerrung
  - 2x3 Wege X-over + Entzerrrung + Subwoofer
  - ...

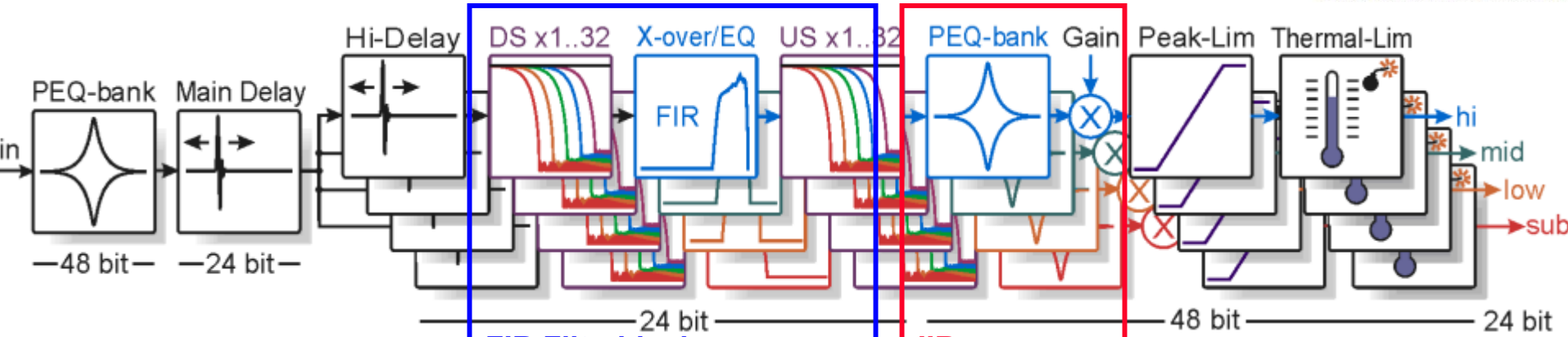
Ziele bei der Lautsprecherentzerrung

- Systemtheorie der Nachrichtentechnik
  - Entzerrter Lautsprecher soll sich wie ideales Übertragungssystem verhalten: perfekte Sprung- oder Impulsantwort, möglichst auch noch an allen Raumpunkten
  - Welche Latenzen müssen dafür bei der Umsetzung in Kauf genommen werden?

- Aus Anwendersicht
  - Hifi/High End/Studio
    - Latenzen sind unproblematisch, solange keine Synchronisation mit Bildwiedergabe erforderlich ist
    - Oberstes Ziel ist die perfekte Wiedergabe
  - Live Einsatz
    - Main PA: Latenzen bis 15ms je nach Situation unkritisch
    - Monitore: so geringe Latenz wie möglich
    - Delay Lines: unkritisch

- Systemgedanke
  - Entzerrung aller Lautsprecher eines Systems auf
    - Gleichen Frequenzgang mit Ausgleich der Sensitivity der Systeme
    - Gleiche Grundlatenz
    - Möglichst gleichen Phasengang

Werkzeuge zur Lautsprecherentzerrung



FIR Filterblock

- Downsampling
- Filterlänge
- Multipath + Downsampling

IIR

- EQs
- X-over
- Allpässe

Freie Programmierung von Betrag und Phase der Filterfunktionen

Abbildung analoger Filter aller Art

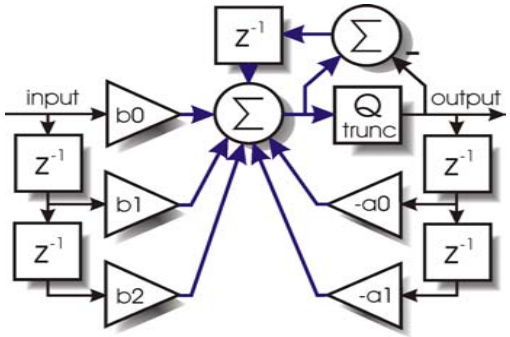
Kombinationen von FIR und IIR

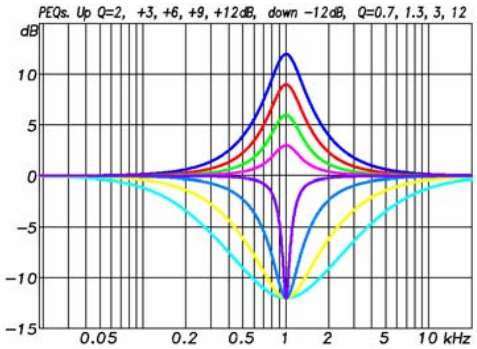
Beispiele für Entzerrungen

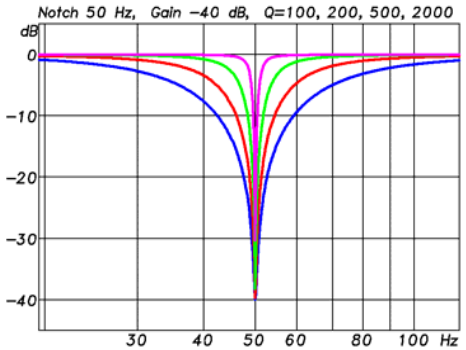
- 4 Wege System (18“ Sub, 12“ mit 2“ Koax Horn) mit IIR

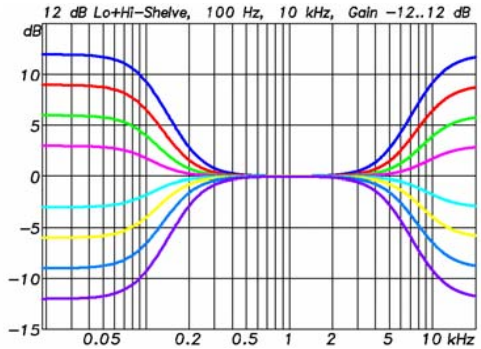
- 4 Wege System (18“ Sub, 12“ mit 2“ Koax Horn) mit FIR
  - Verschiedene linearphasige/gemischtphasige Setups unterschiedlicher Latenz

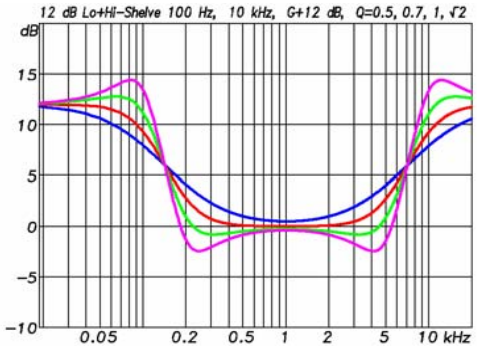
- Breitbandentzerrung 8“/1“ Topteil
  - 1 Wege Entzerrung
  - Gemischtphasige Multipath Entzerrung

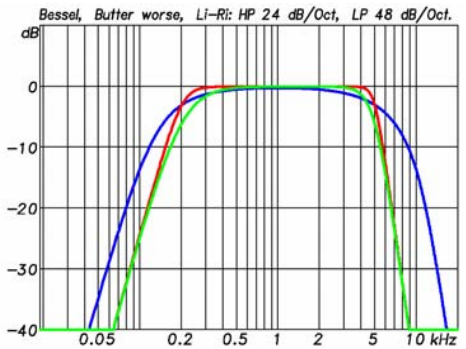

input
output
b0
b1
b2
-a0
-a1
Q
trunc
Σ
Σ
z-1
z-1
z-1
z-1
z-1

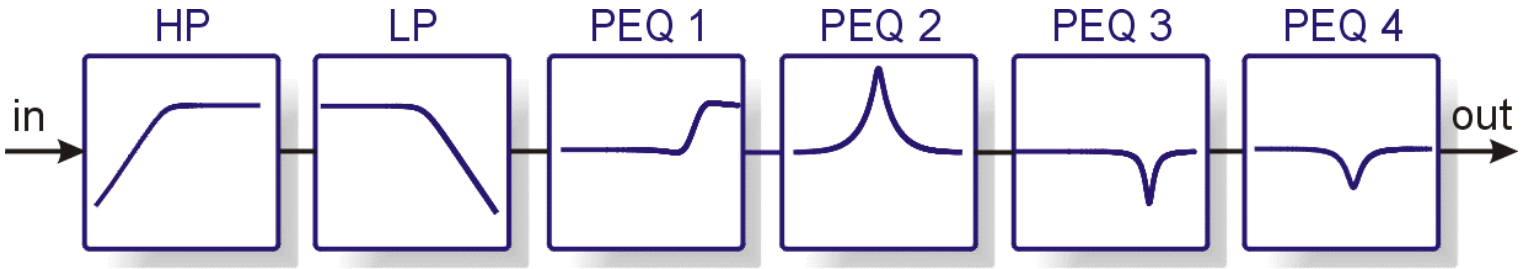

PEQs. Up Q=2, +3, +6, +9, +12dB, down −12dB, Q=0.7, 1.3, 3, 12
dB
10
5
0
−5
−10
−15
0.05
0.2
0.5
1
2
5
10 kHz


Notch 50 Hz, Gain −40 dB, Q=100, 200, 500, 2000
dB
0
−10
−20
−30
−40
30
40
50
60
80
100 Hz

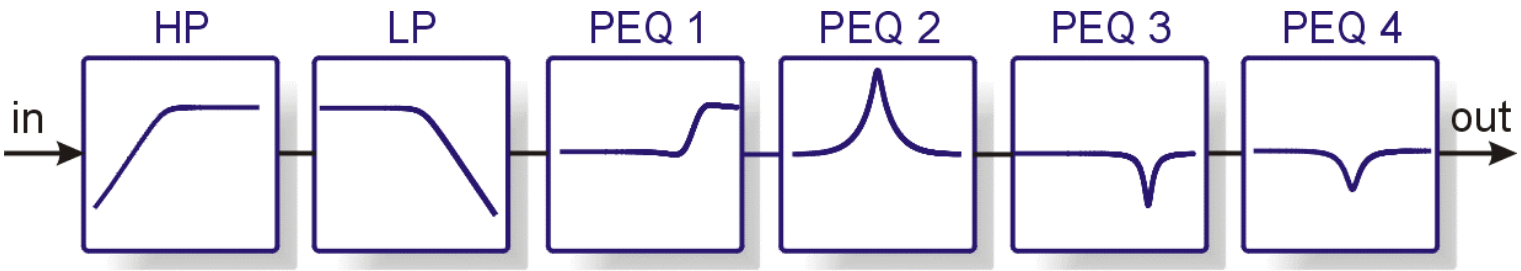

12 dB Lo+Hi−Shelve, 100 Hz, 10 kHz, Gain −12..12 dB
dB
10
5
0
−5
−10
−15
0.05
0.2
0.5
1
2
5
10 kHz


12 dB Lo+Hi−Shelve 100 Hz, 10 kHz, G+12 dB, Q=0.5, 0.7, 1, √2
dB
15
10
5
0
−5
−10
0.05
0.2
0.5
1
2
5
10 kHz

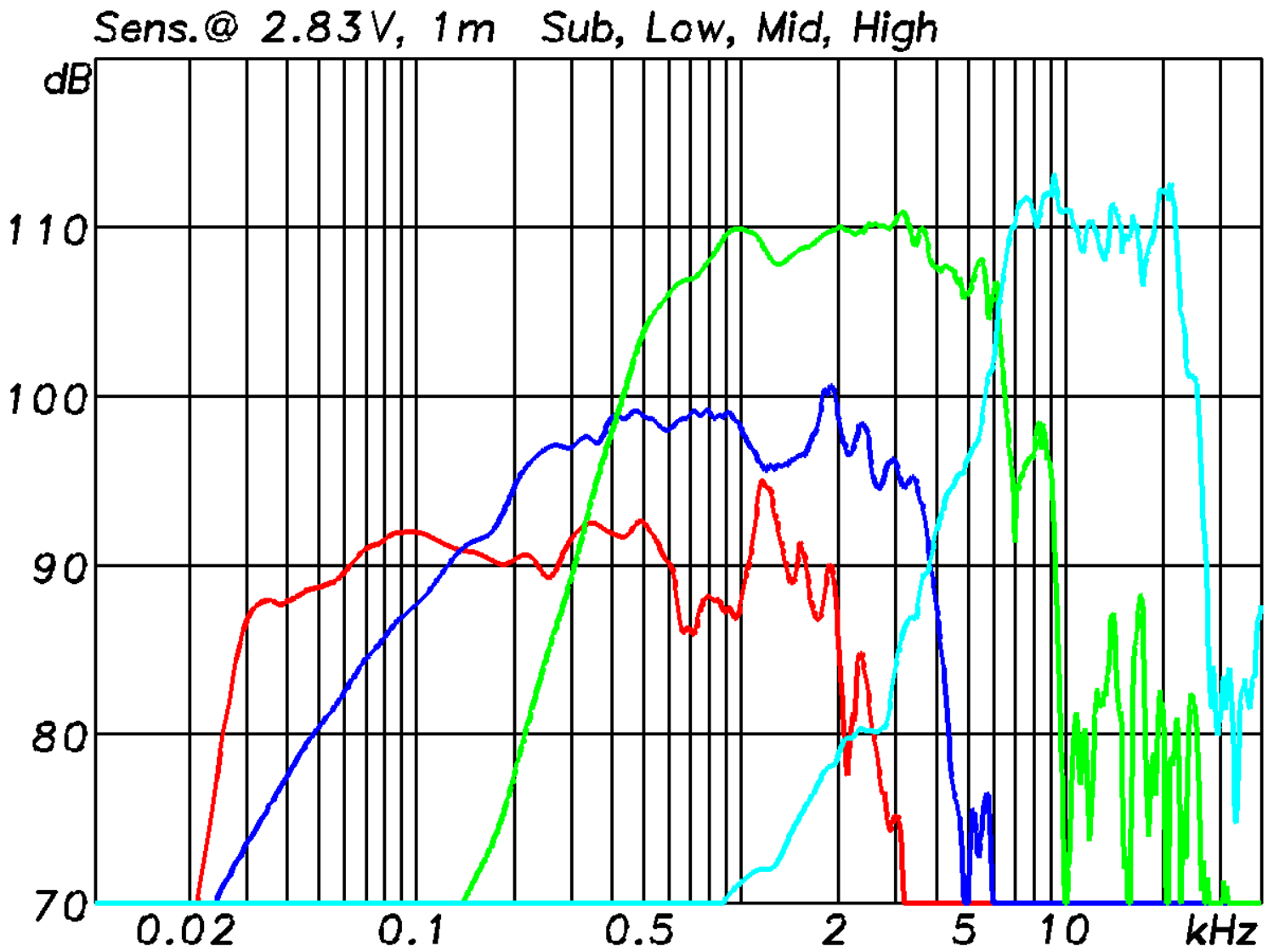

Bessel, Butter worse, Li−Ri: HP 24 dB/Oct, LP 48 dB/Oct.
dB
0
−10
−20
−30
−40
0.05
0.2
0.5
1
2
5
10 kHz


HP
LP
PEQ 1
PEQ 2
PEQ 3
PEQ 4
in
out

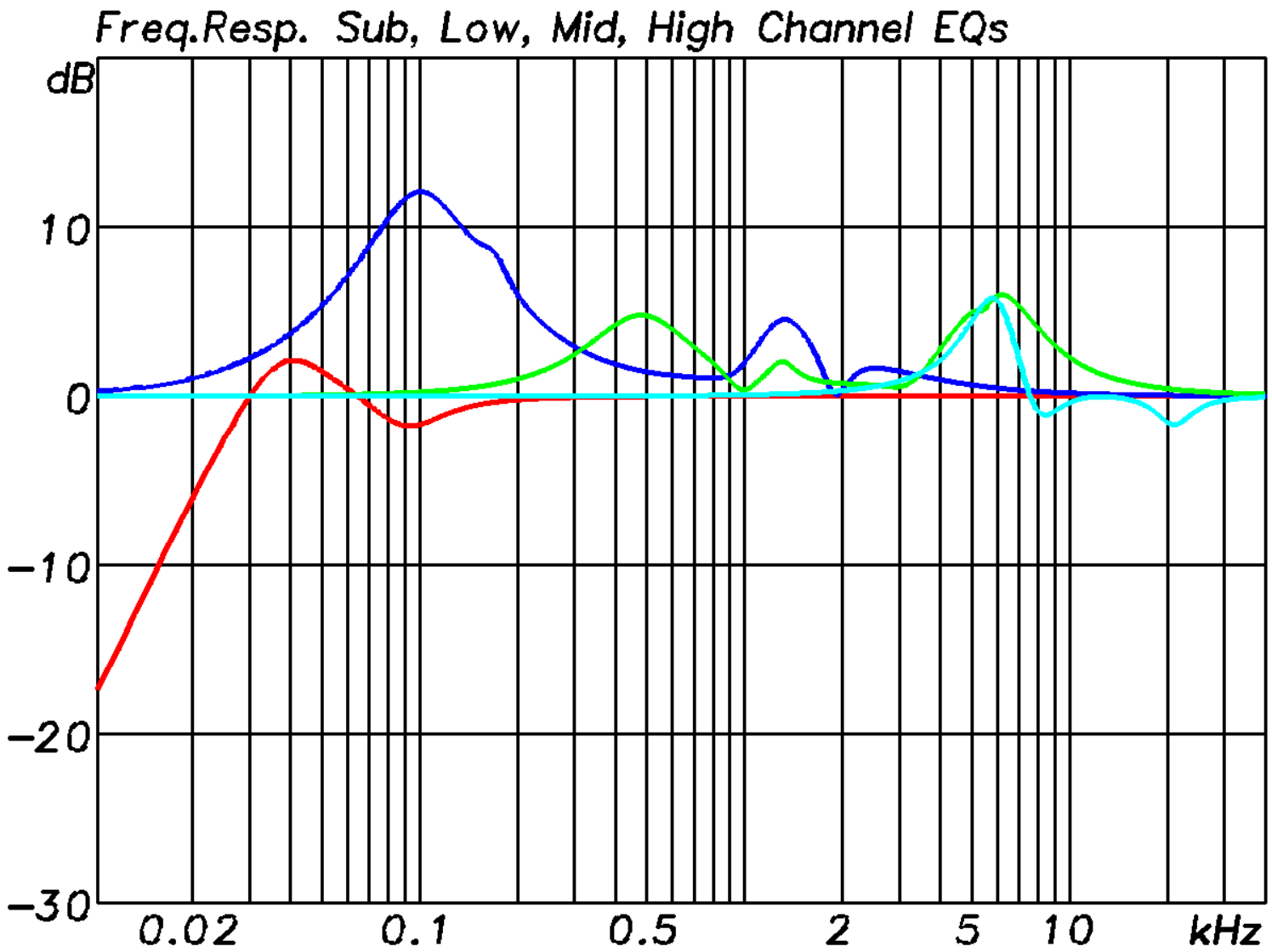
- Einzelne Wege mit PEQs bis ca. eine Oktave über die gewünschte Trennfrequenz hinaus entzerren, falls möglich !
- Pegel der einzelnen Wege zueinander anpassen
- Delays der einzelnen Wege zueinander anpassen
- Phasenlage mit Hilfe von Allpassfiltern anpassen
- Frequenzweichenfilter auswählen



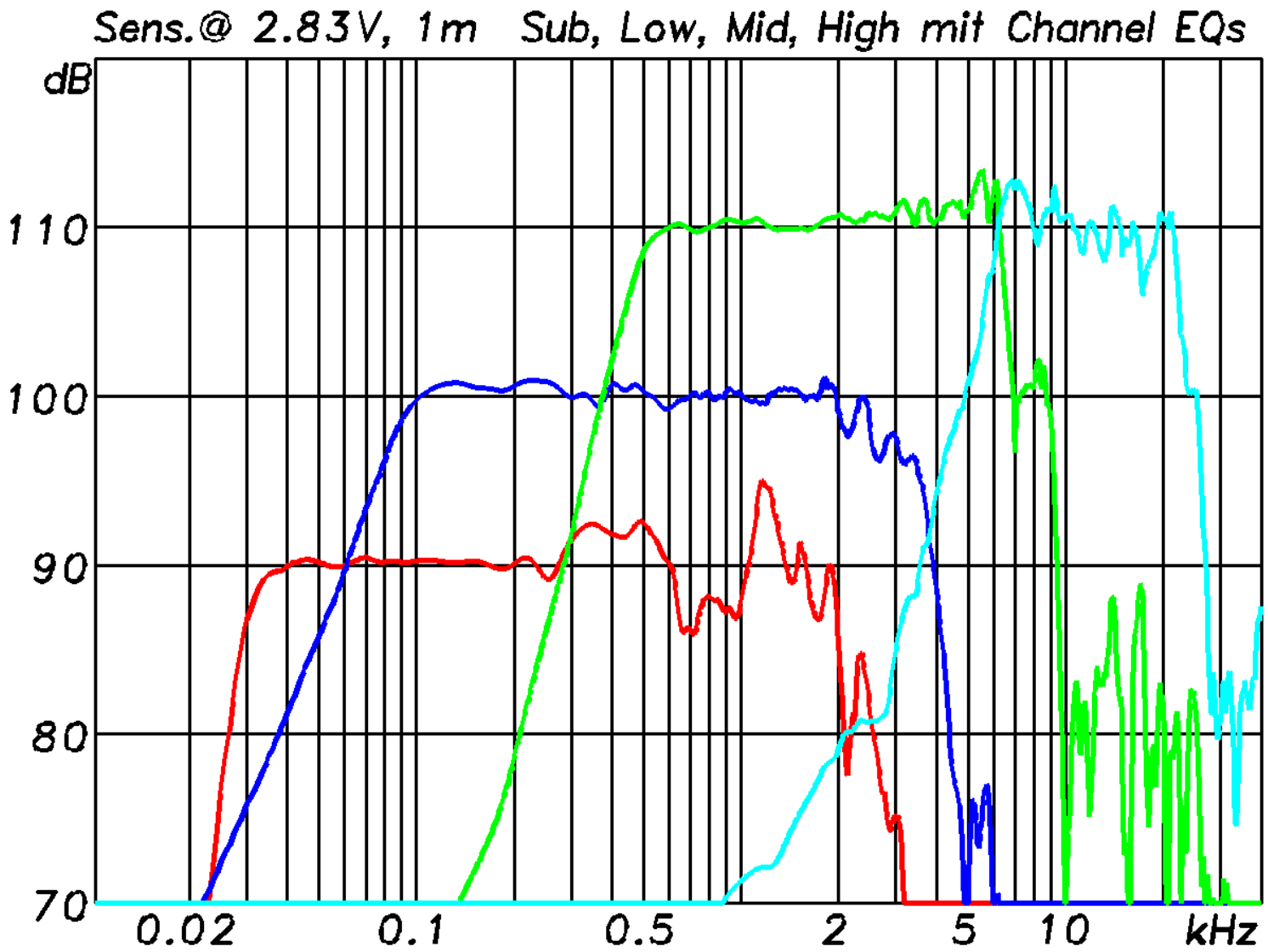
Basisdaten der einzelnen Wege



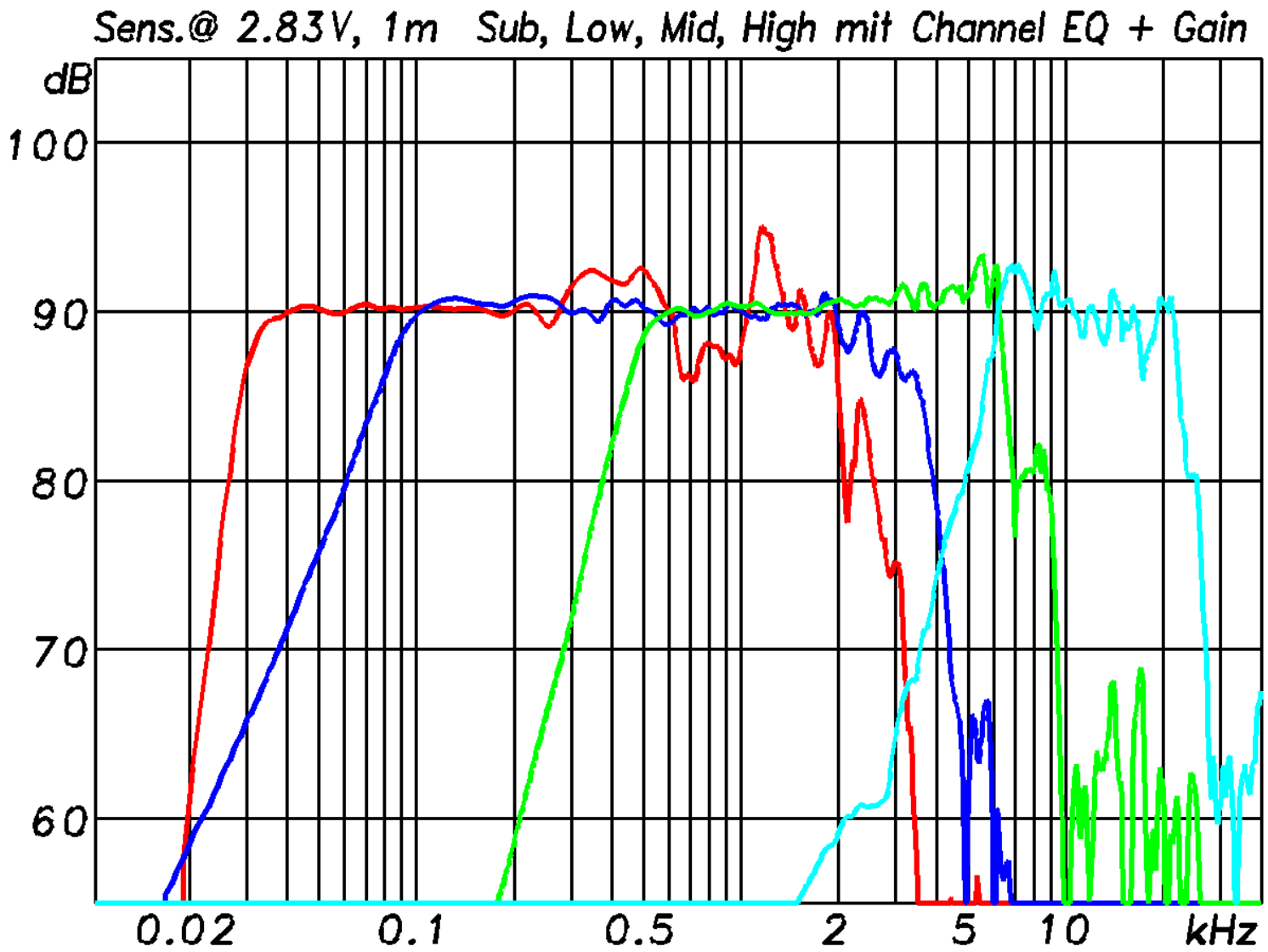
EQs der einzelnen Wege



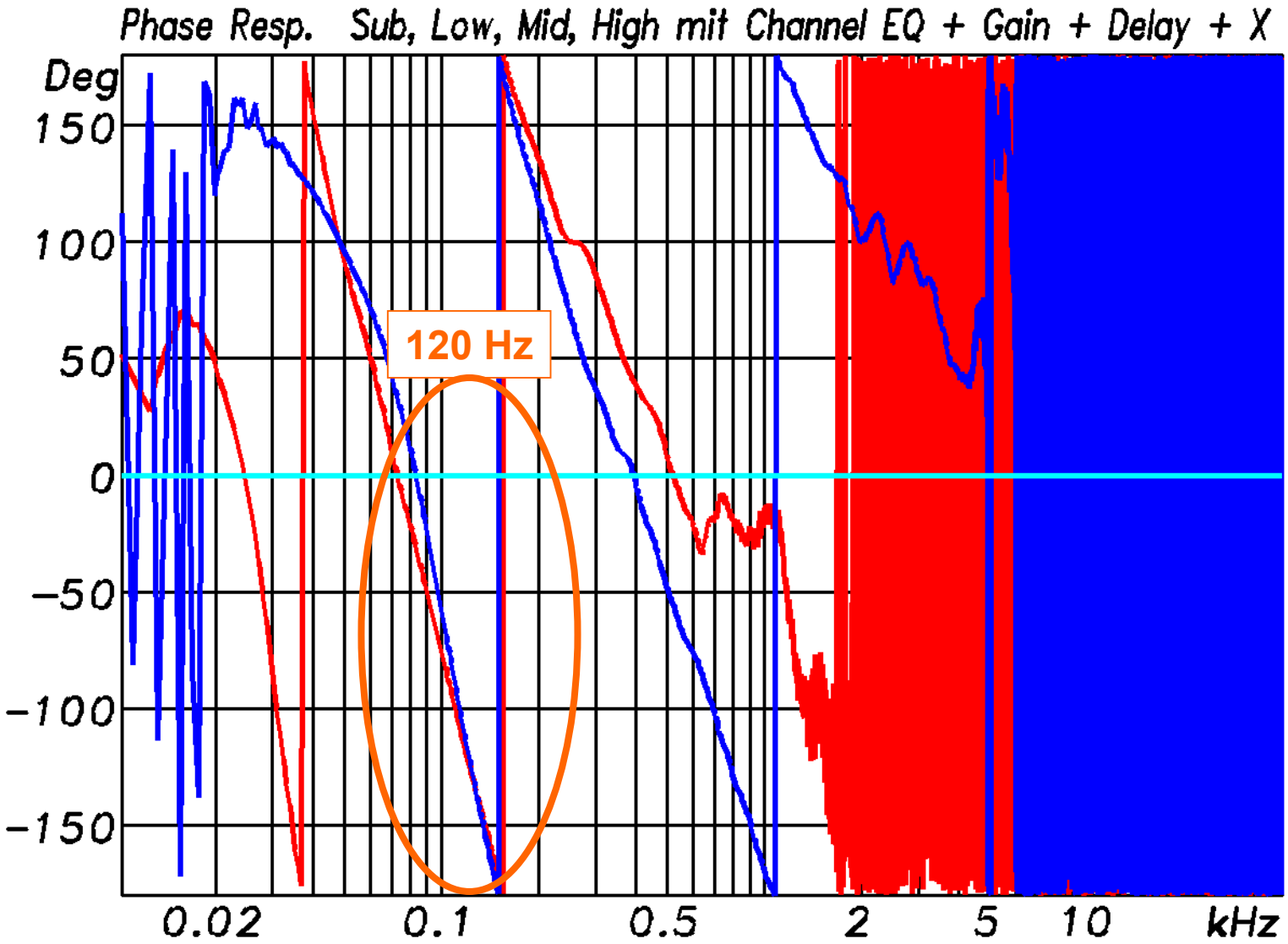
Lautsprecher mit EQs



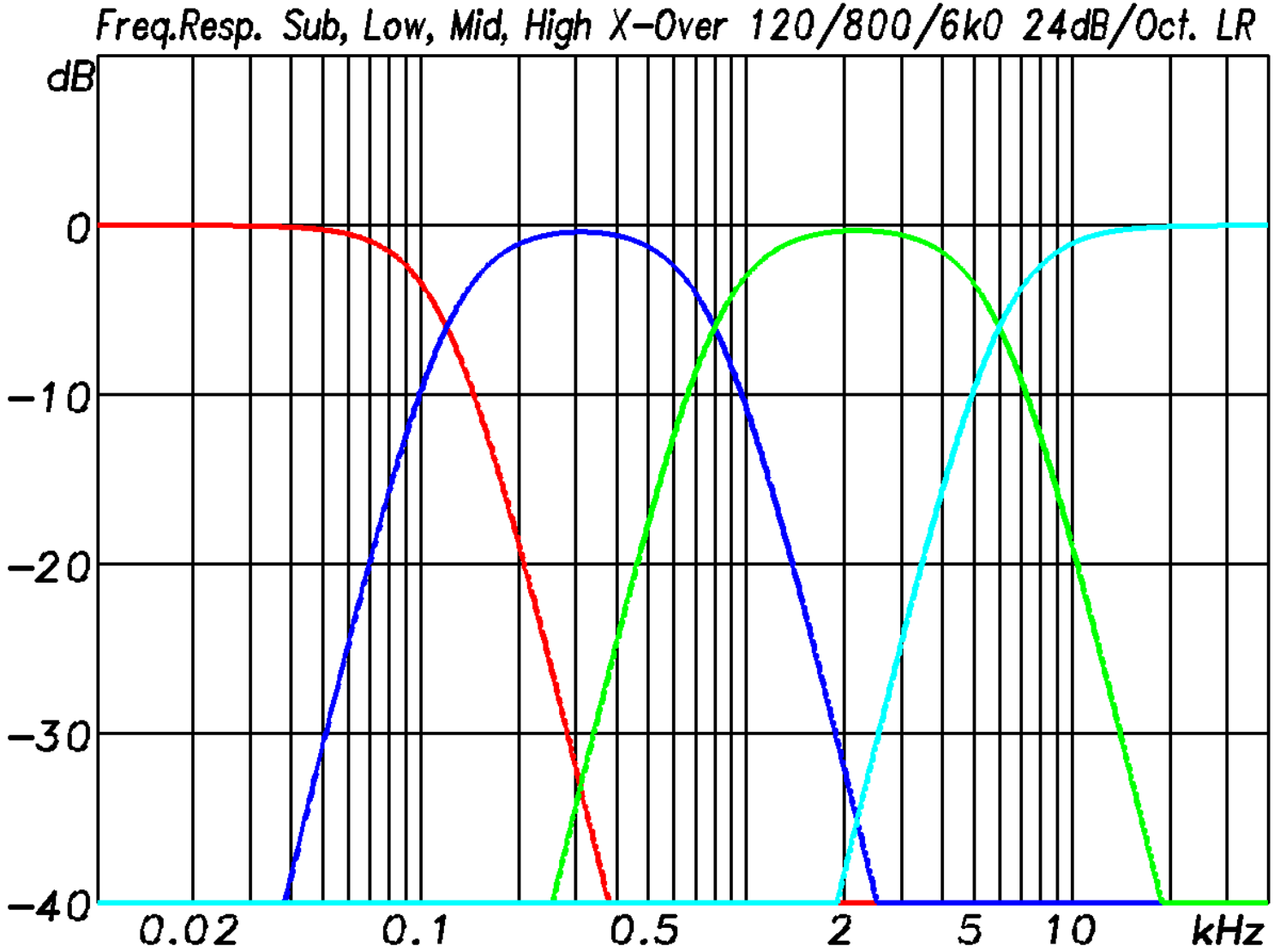
Lautsprecher mit EQs und Gain



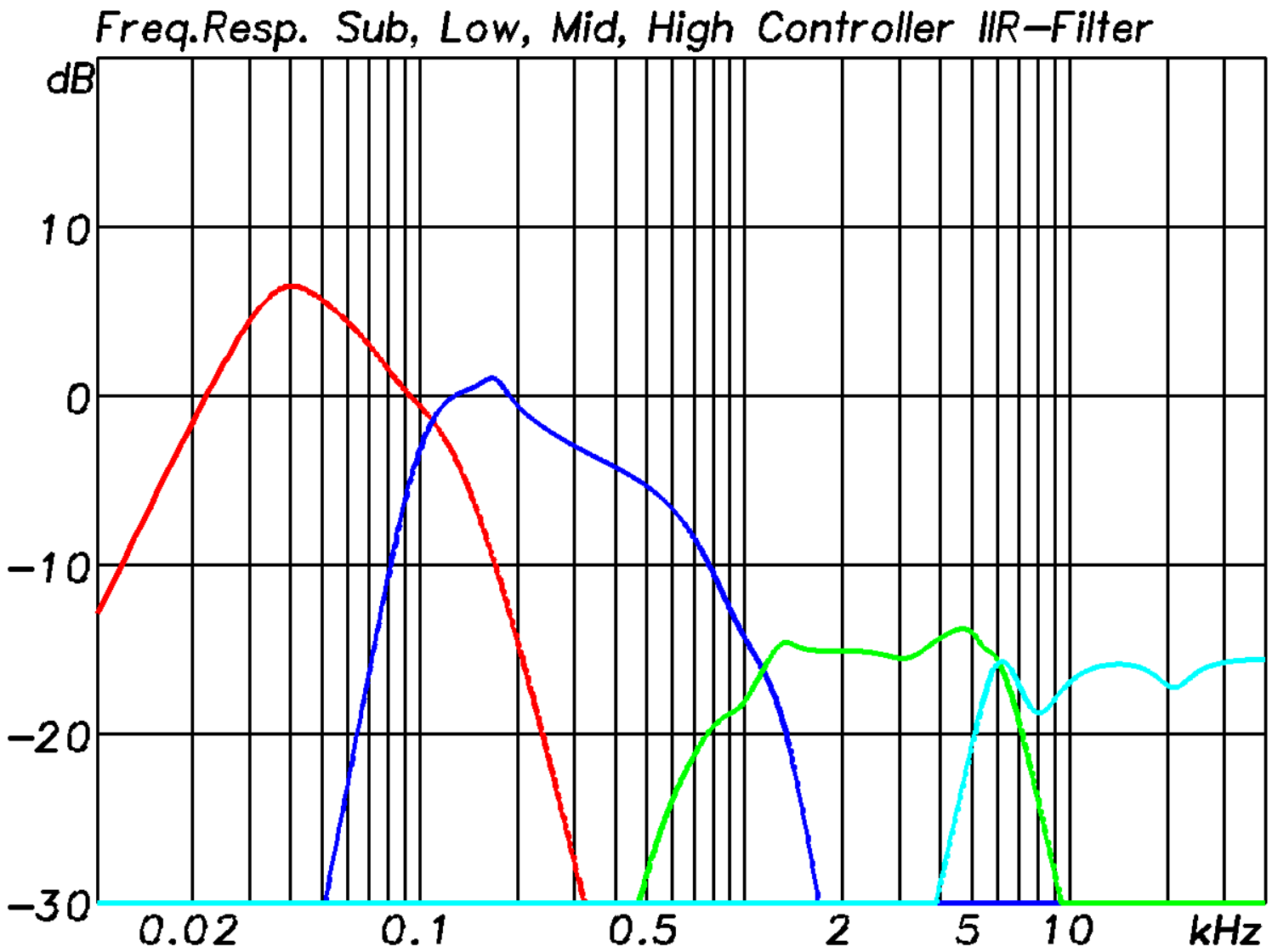
Übergang von Sub auf Low bei 120 Hz



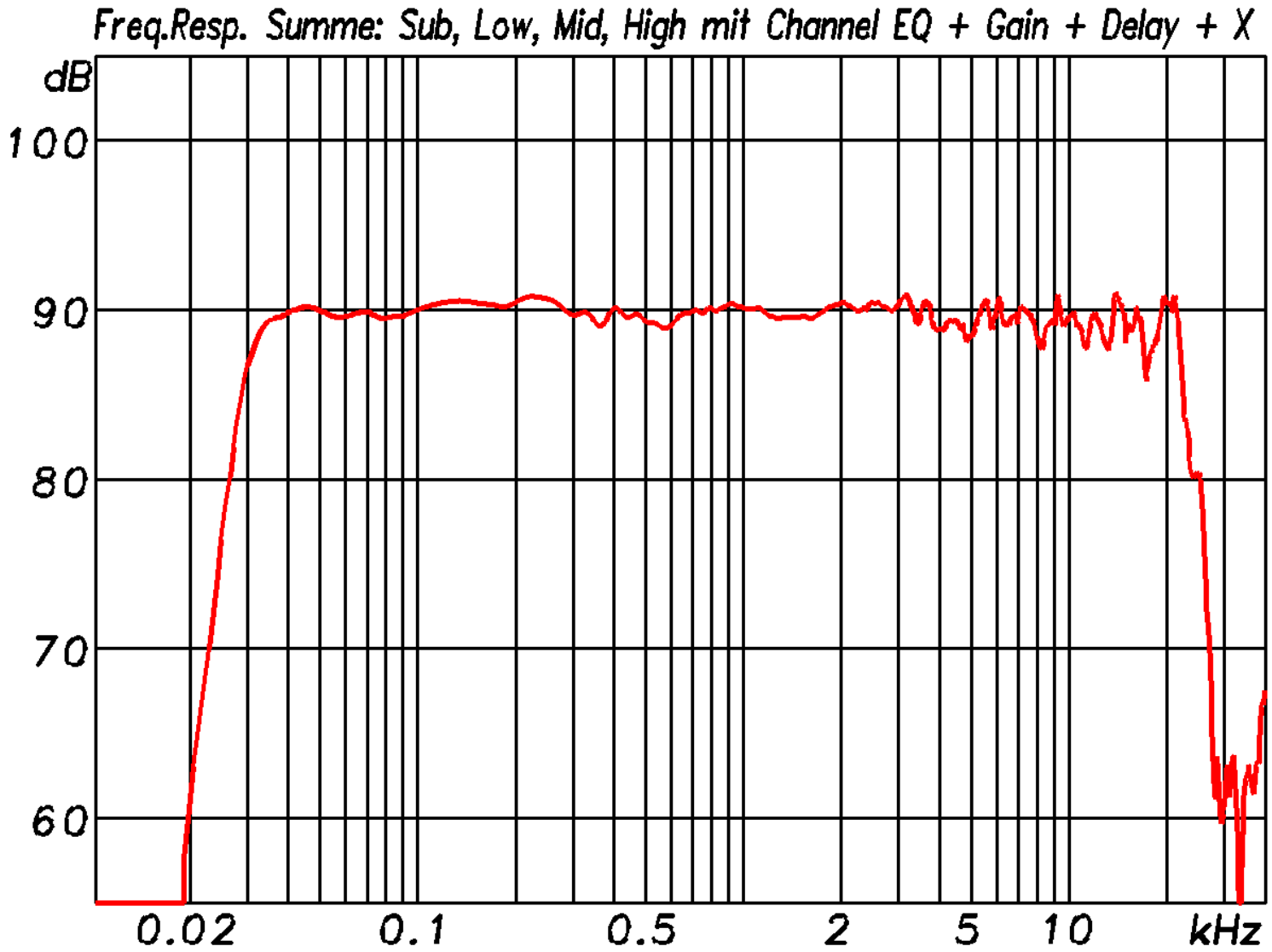
Filterfunktionen der Frequenzweiche



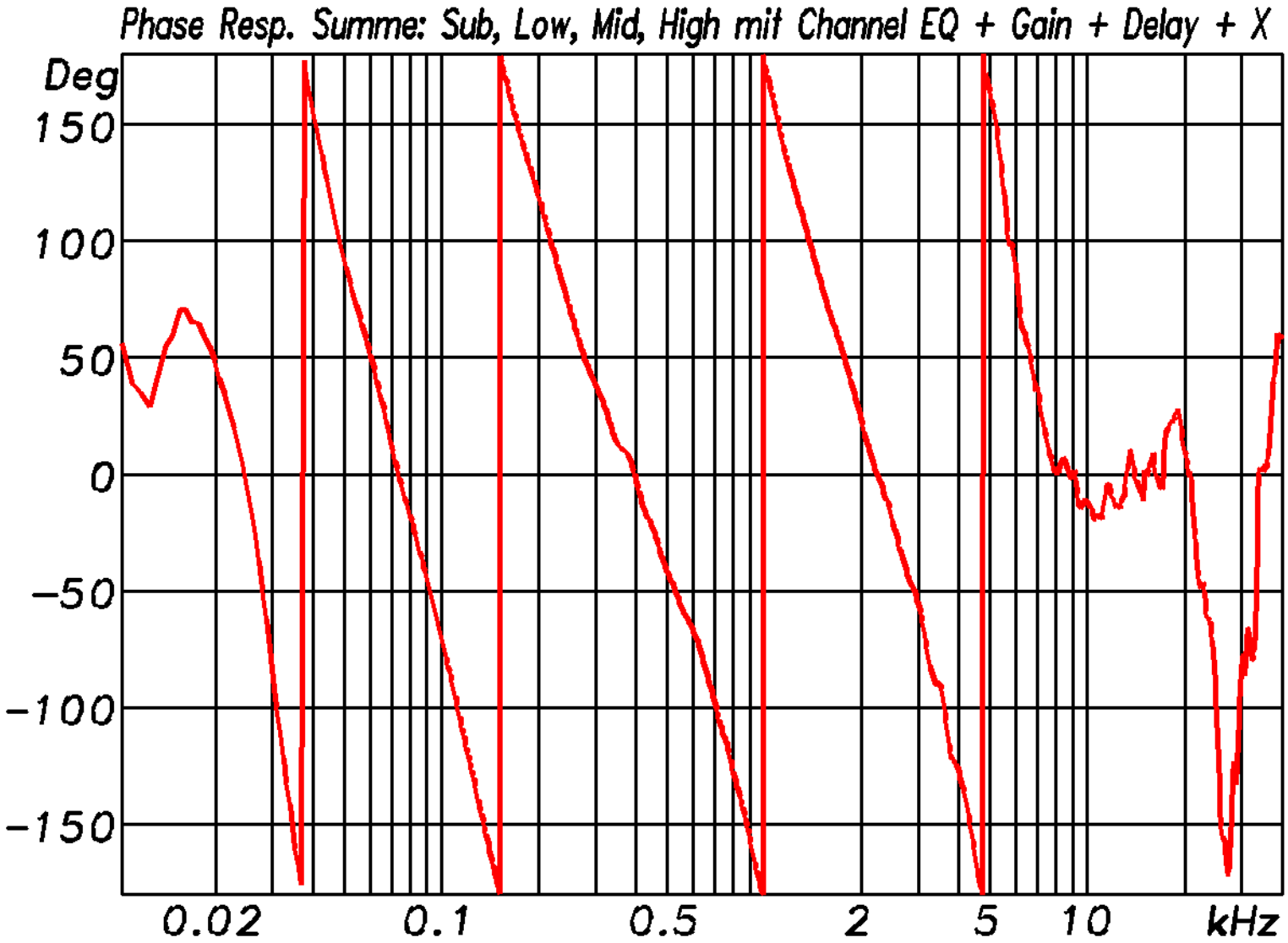
Filterfunktionen des Controllers



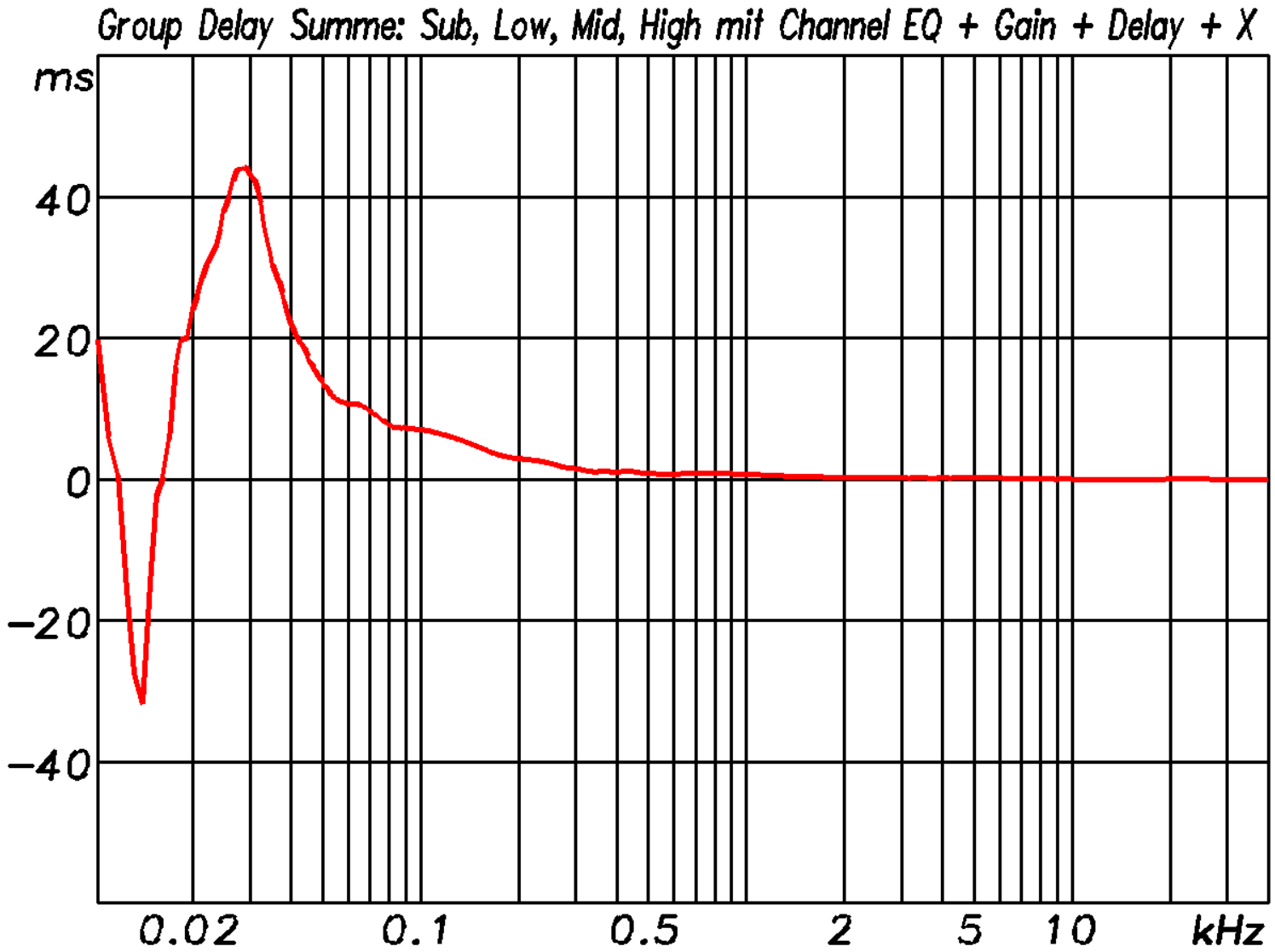
Frequenzgang des Systems mit allen Filtertypen



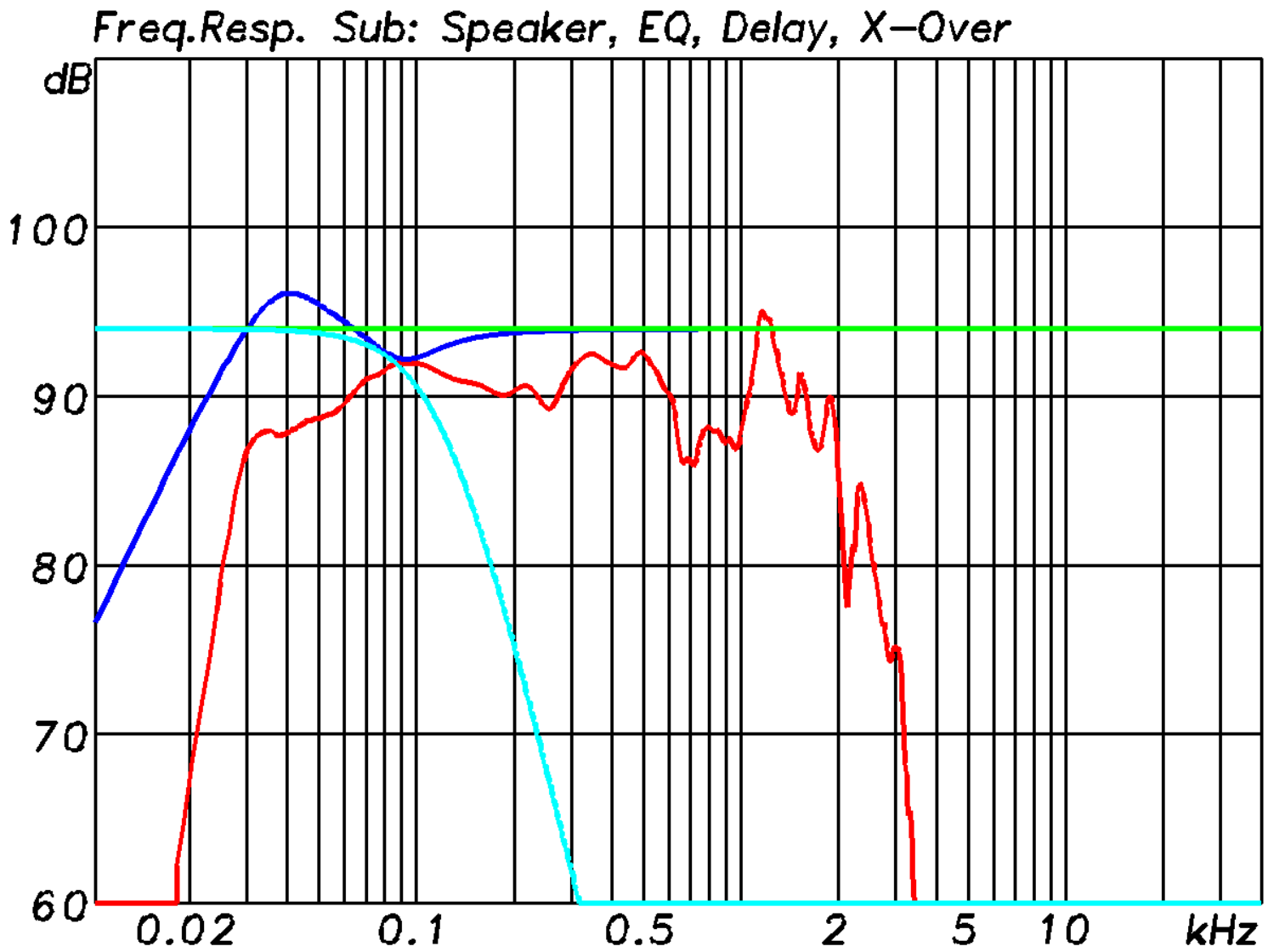
Phasengang mit minimalphasigen IIR-Filtern



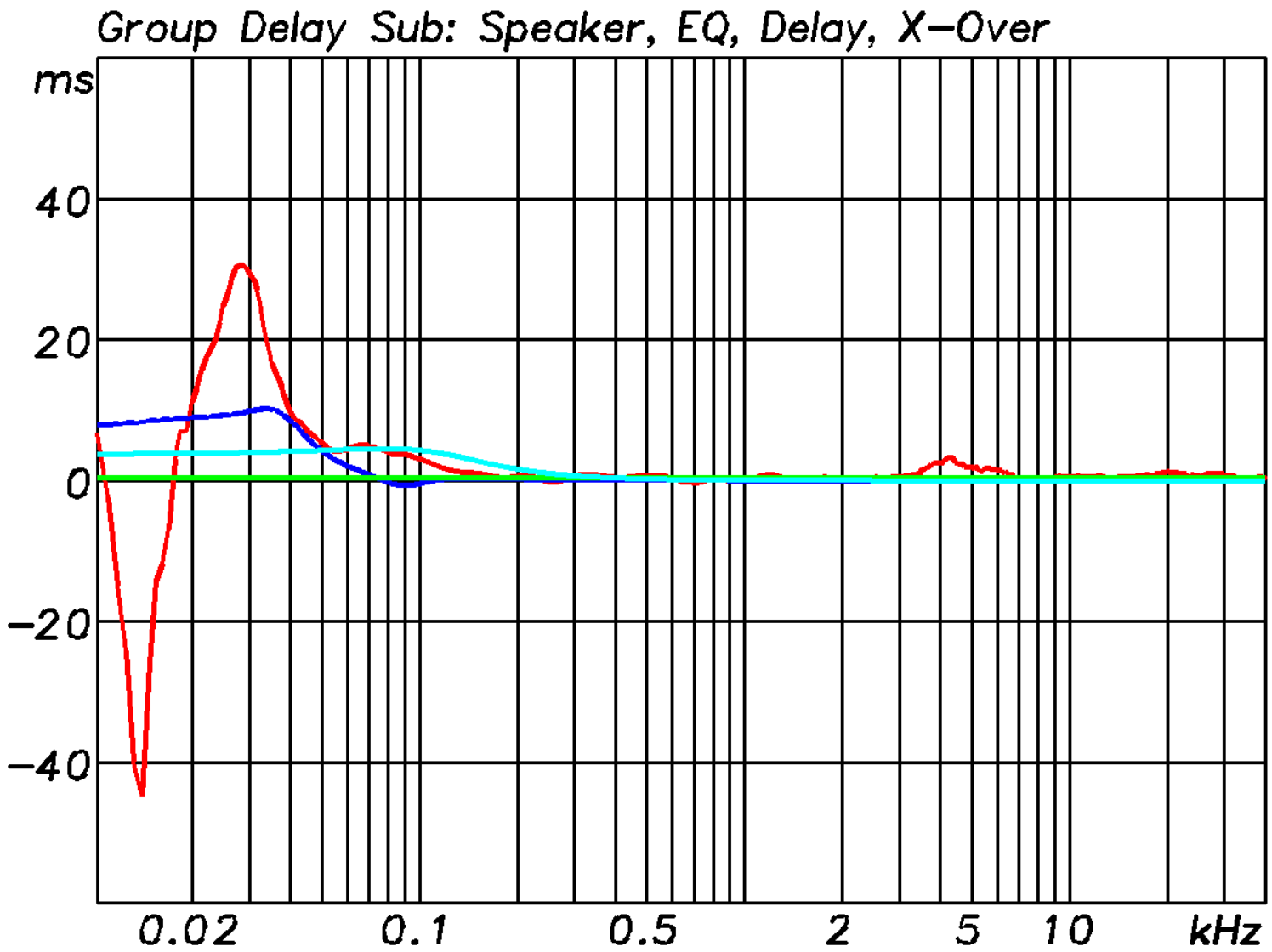
Laufzeitverhalten mit minimalphasigen IIR-Filtern



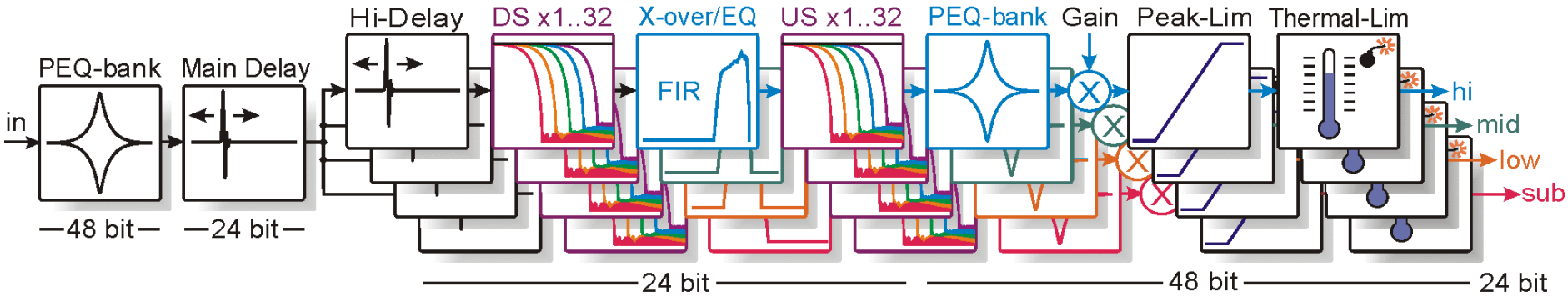
Zusammensetzung der Laufzeit



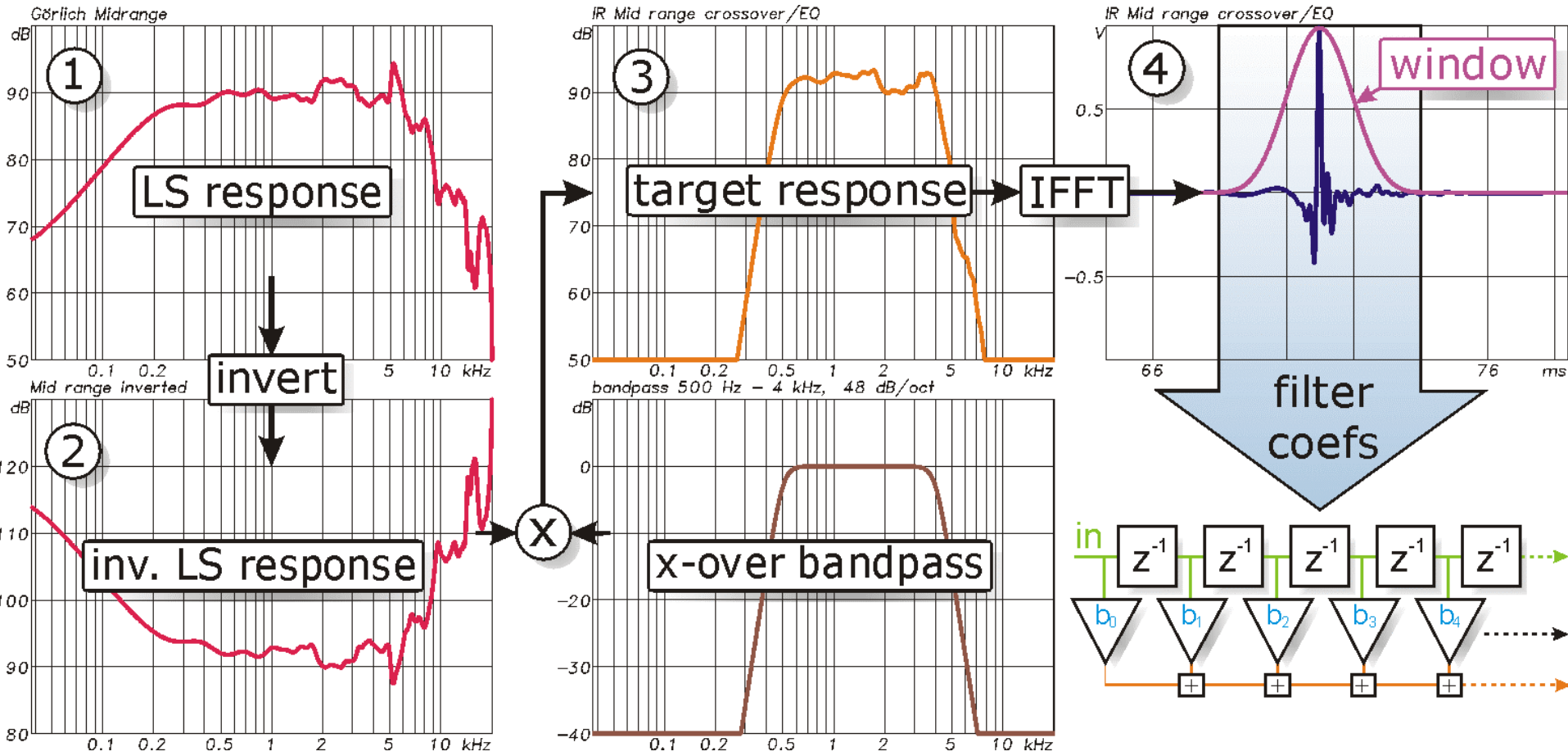
Zusammensetzung der Laufzeit



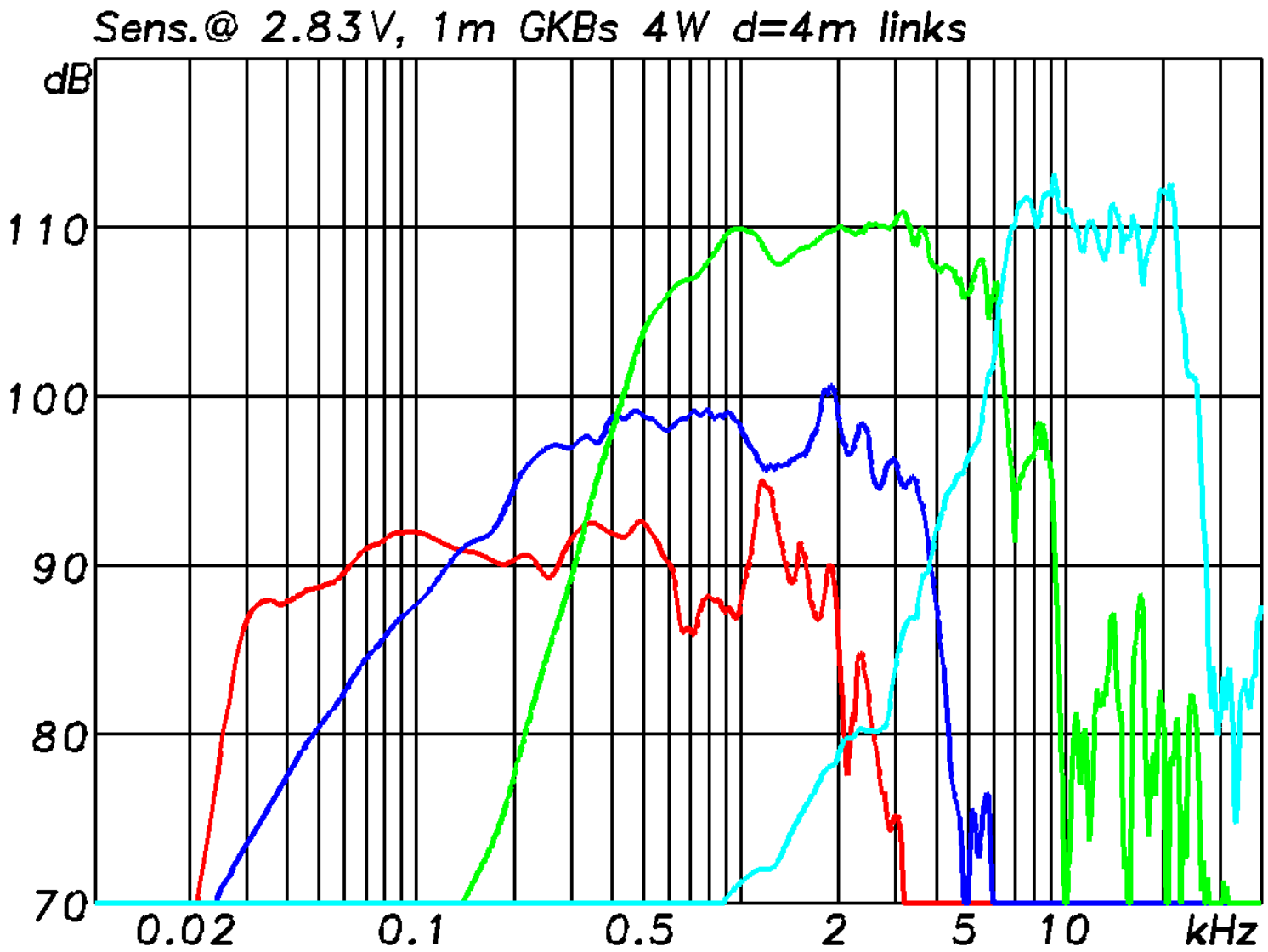
- Summenzielfunktion vorgeben
- Zielfunktionen der einzelnen Wege vorgeben
- Minimal- und linearphasige Bereiche vorgeben
- Das FIR Processing führt folgende Schritte aus
  - Pegel der einzelnen Wege zueinander anpassen
  - Delays und Phasenlage der einzelnen Wege zueinander anpassen
  - Frequenzweichenfilter auswählen
  - Filterfunktionen der Kanalfilter berechnen



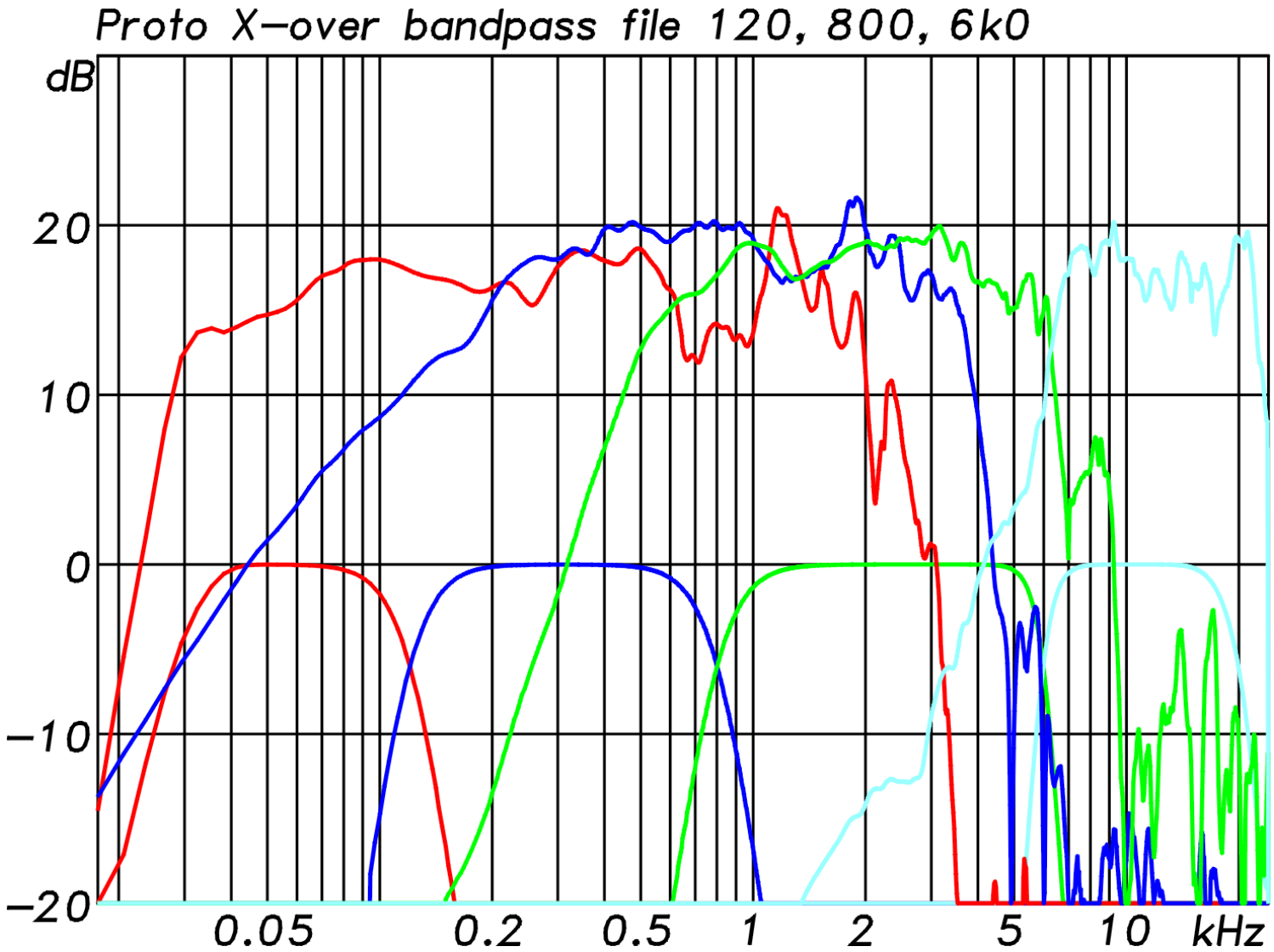
FIR-Koeffizientenberechnung



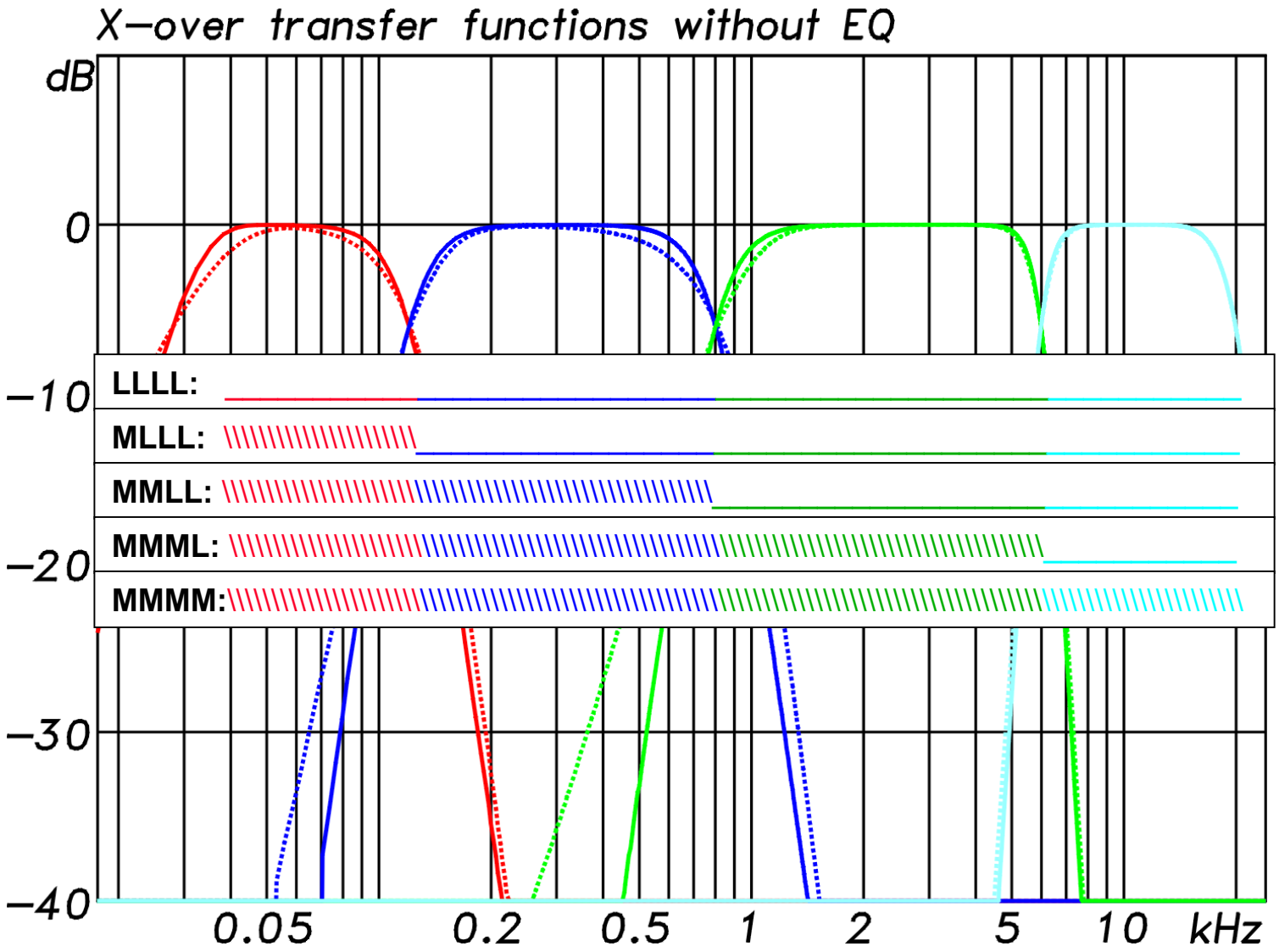
Basisdaten der Lautsprecher (Box-1)



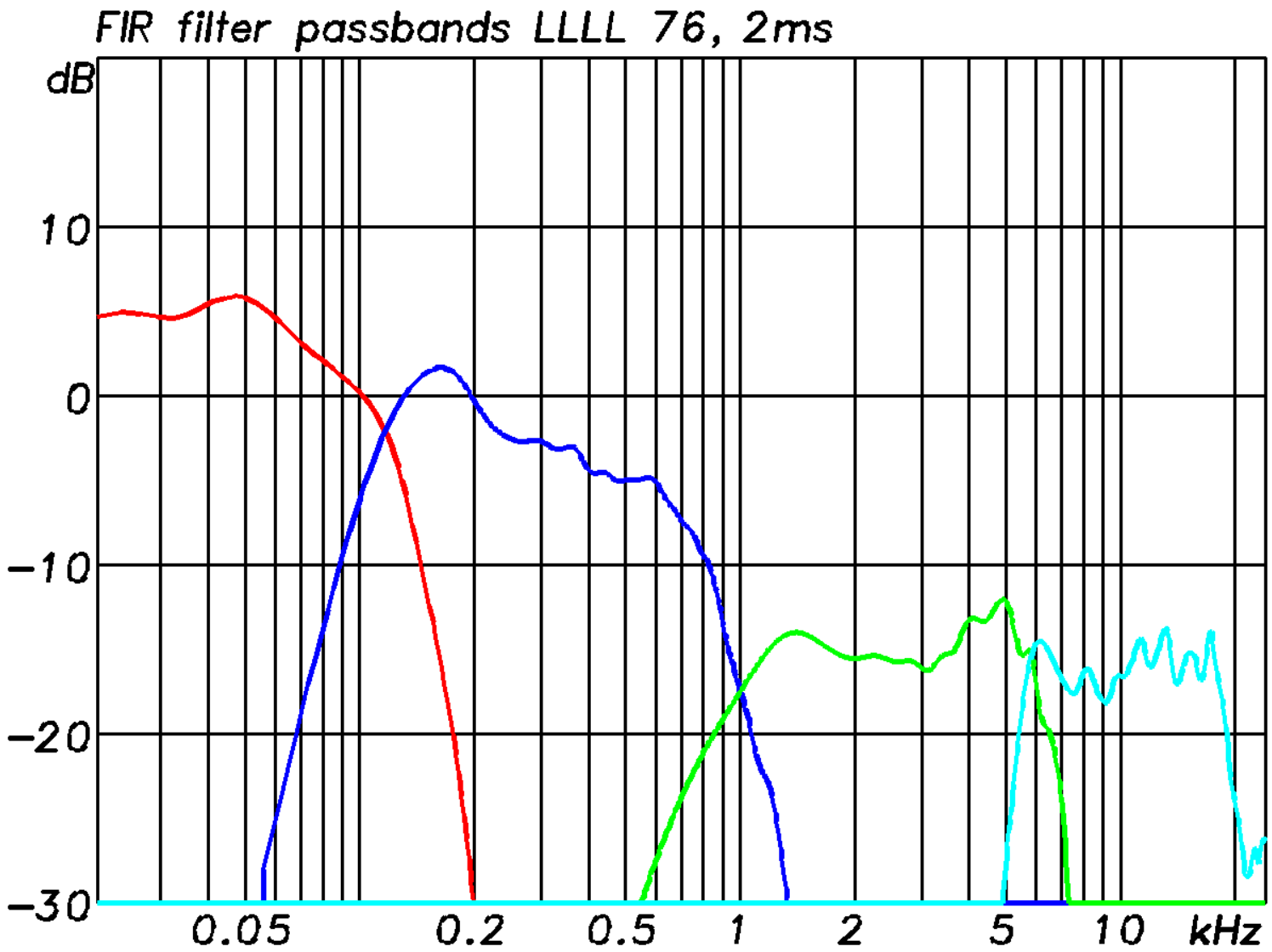
Zielfunktionen der einzelnen Wege



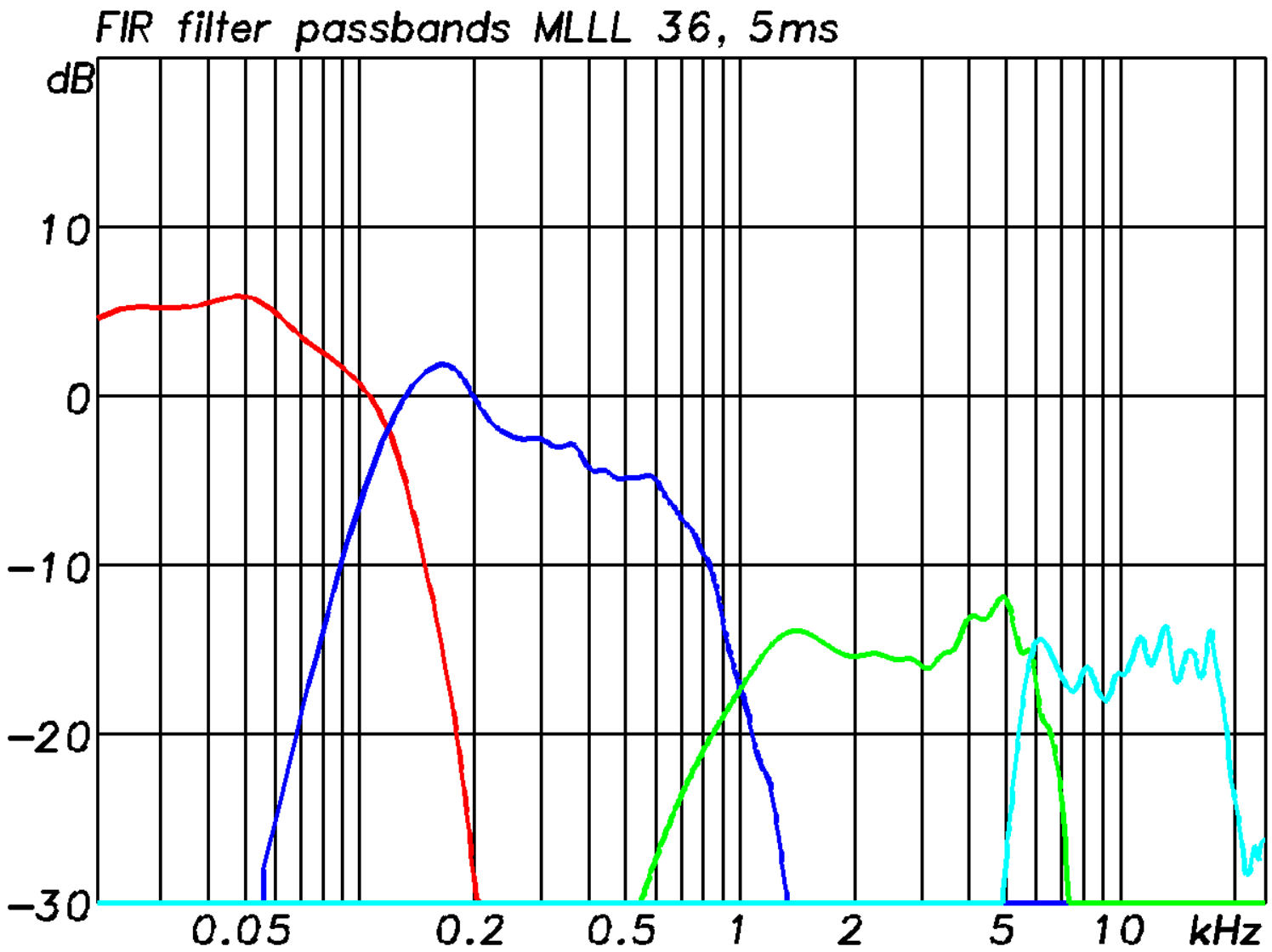
Zielfunktionen der einzelnen Wege



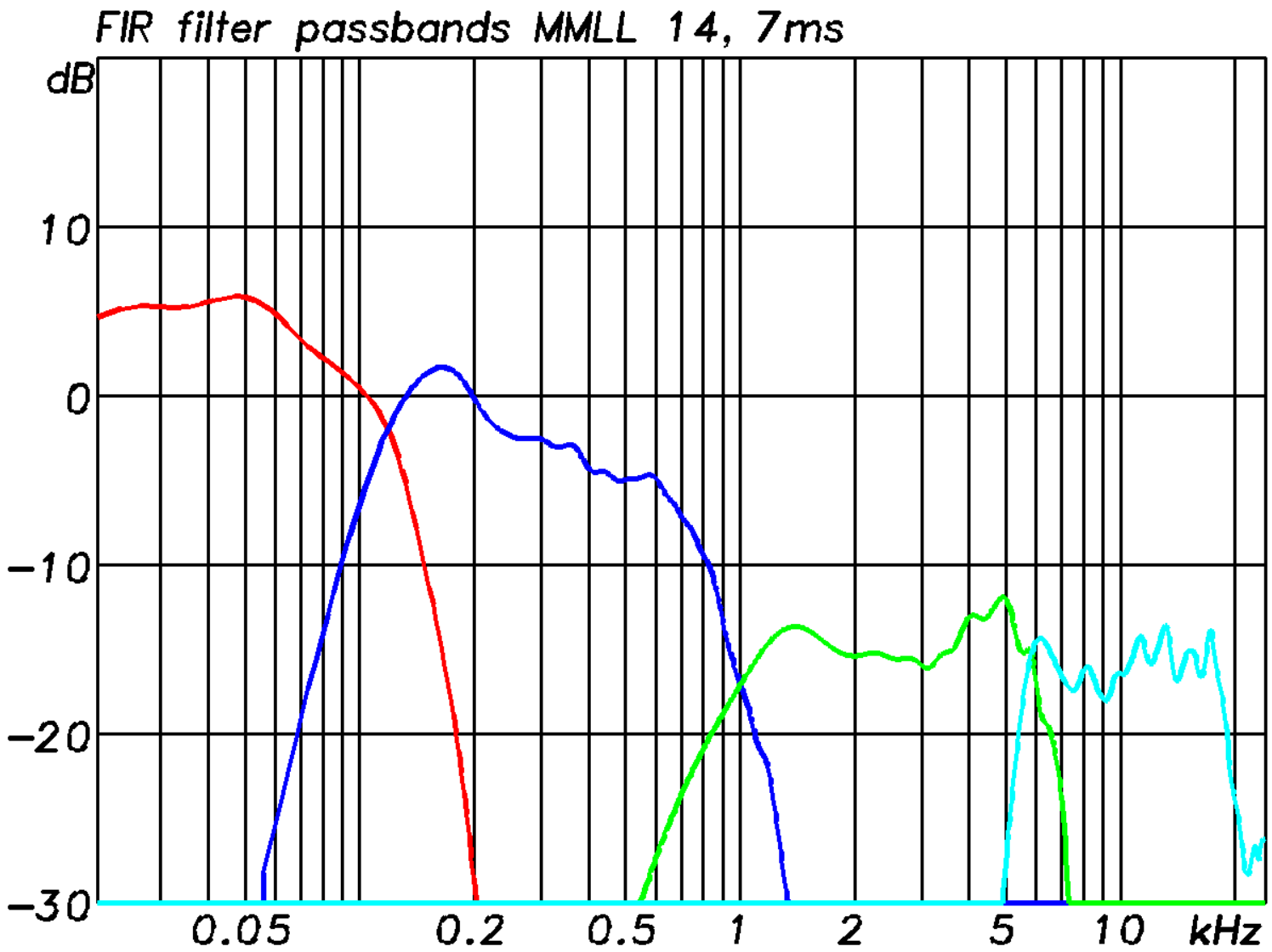
FIR-Filter komplett linearphasig mit 76,2 ms Latenz



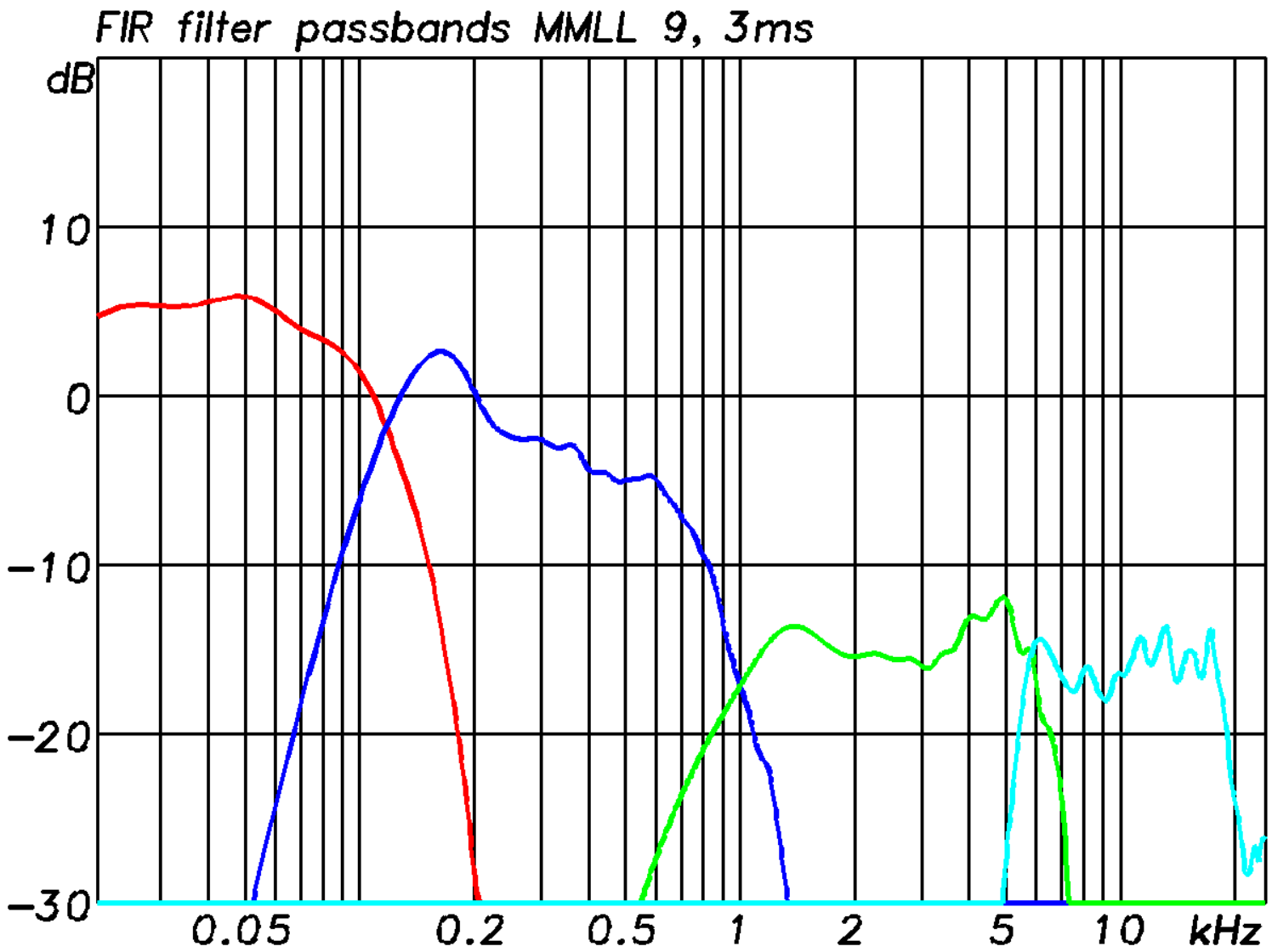
FIR-Filter linearphasig ab 120 Hz mit 36,5 ms Latenz



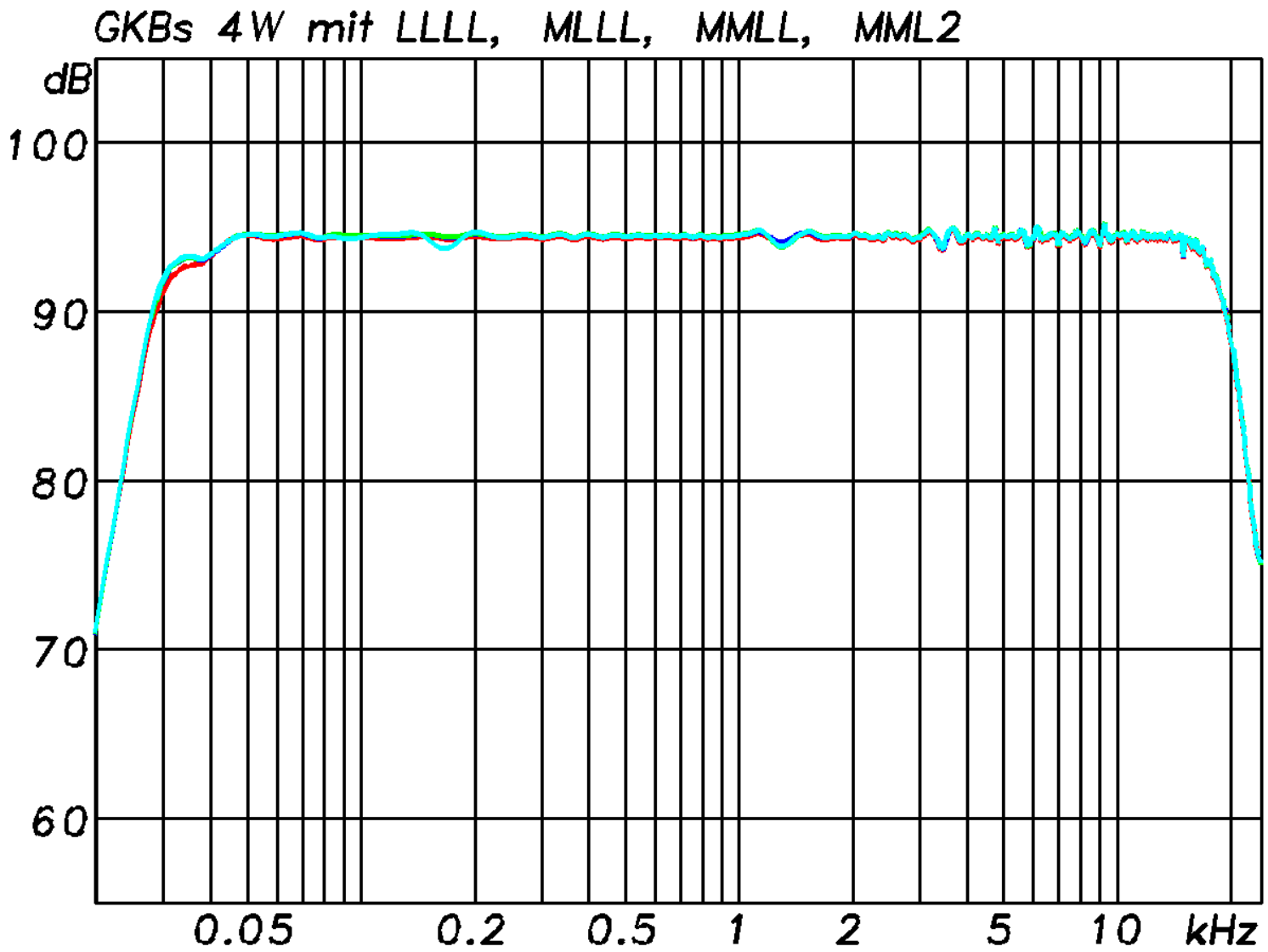
FIR-Filter linearphasig ab 800 Hz mit 14,7 ms Latenz



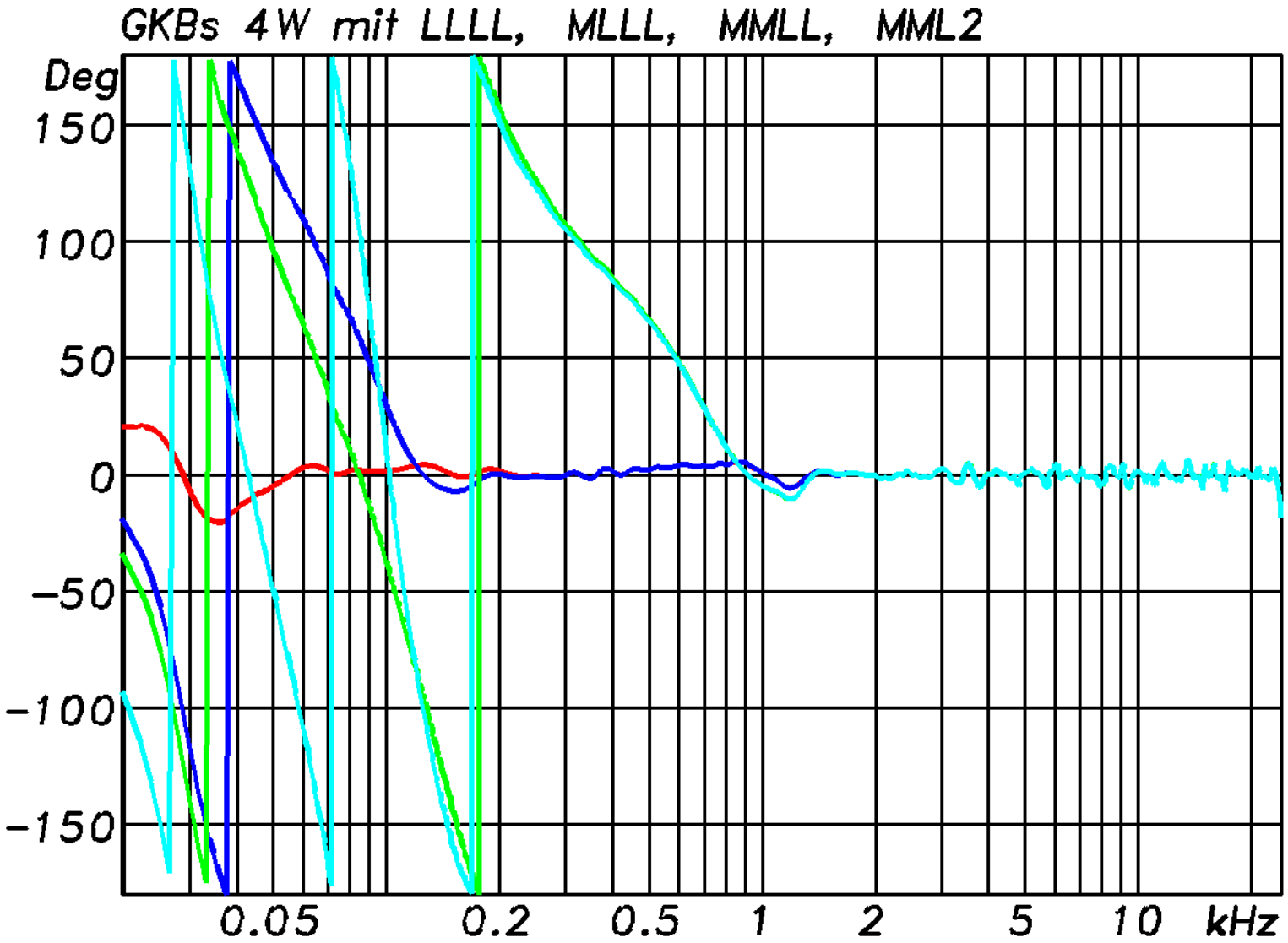
FIR-Filter linearphasig ab 800 Hz mit 9,3 ms Latenz



Frequenzgänge der Summenfunktionen



Phasengänge der Summenfunktionen



Latenzen in Digitalcontrollern mit FIR-Filtern

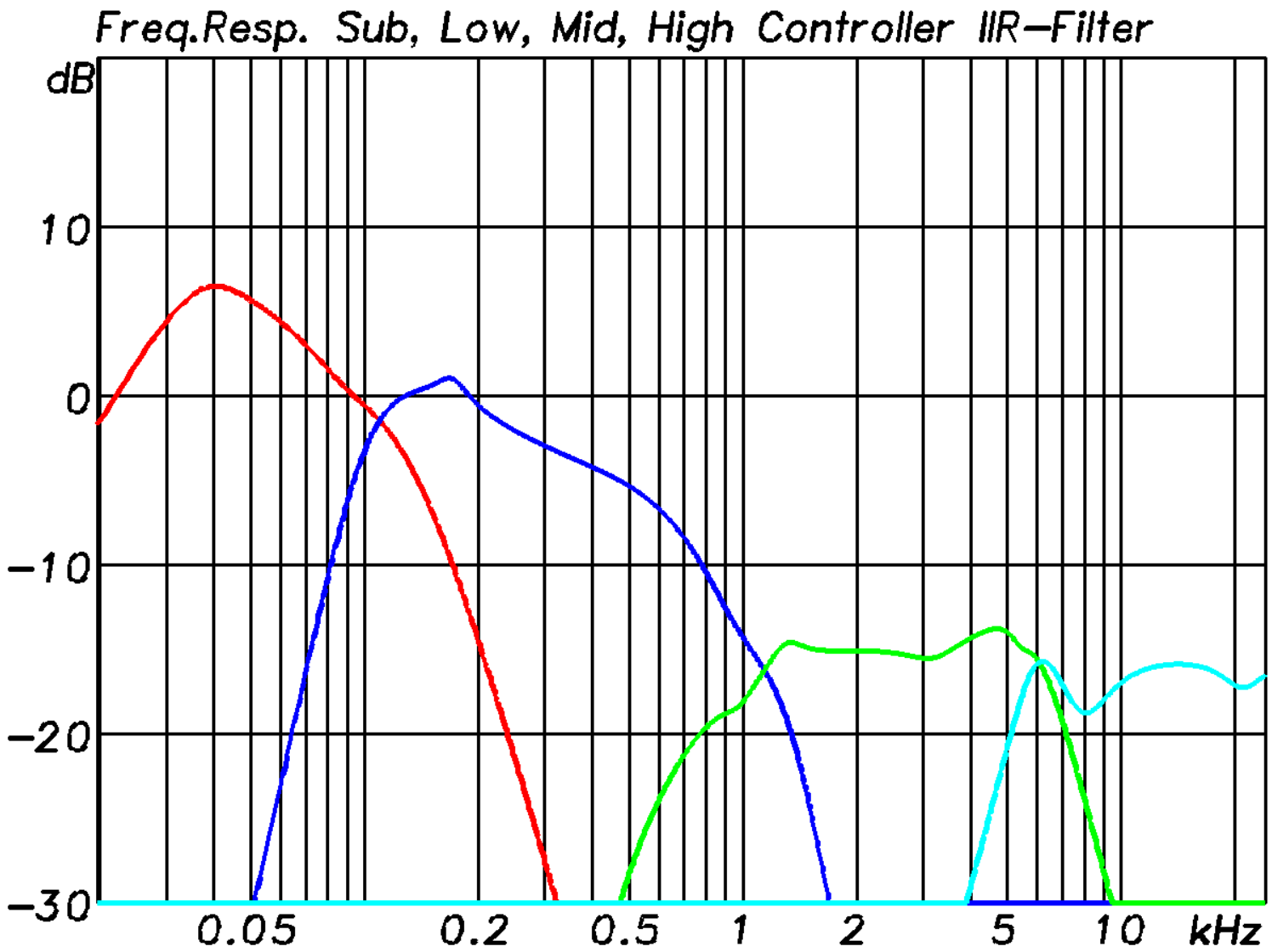
INSTITUT FÜR AKUSTIK UND AUDIOTECHNIK

Ursache (z.B. beim HD2)	Bei 96 kHz in ms	Bei 48 kHz in ms
ADC + DAC	1,24	2,48
Buffer	0,33	0,66
Vorausschauender Limiter	0,66	1,31
Stacked ADC	0,29	0,58
FIR-Prozessor	0,33	0,66
Summe	2.85	5.69
FIR komplett linearphasig	70,5	70,5
FIR linearphasig ab 120 Hz	30,7	30,7
FIR linearphasig ab 800 Hz	9,0	9,0
FIR linearphasig ab 800 Hz	3,6	3,6

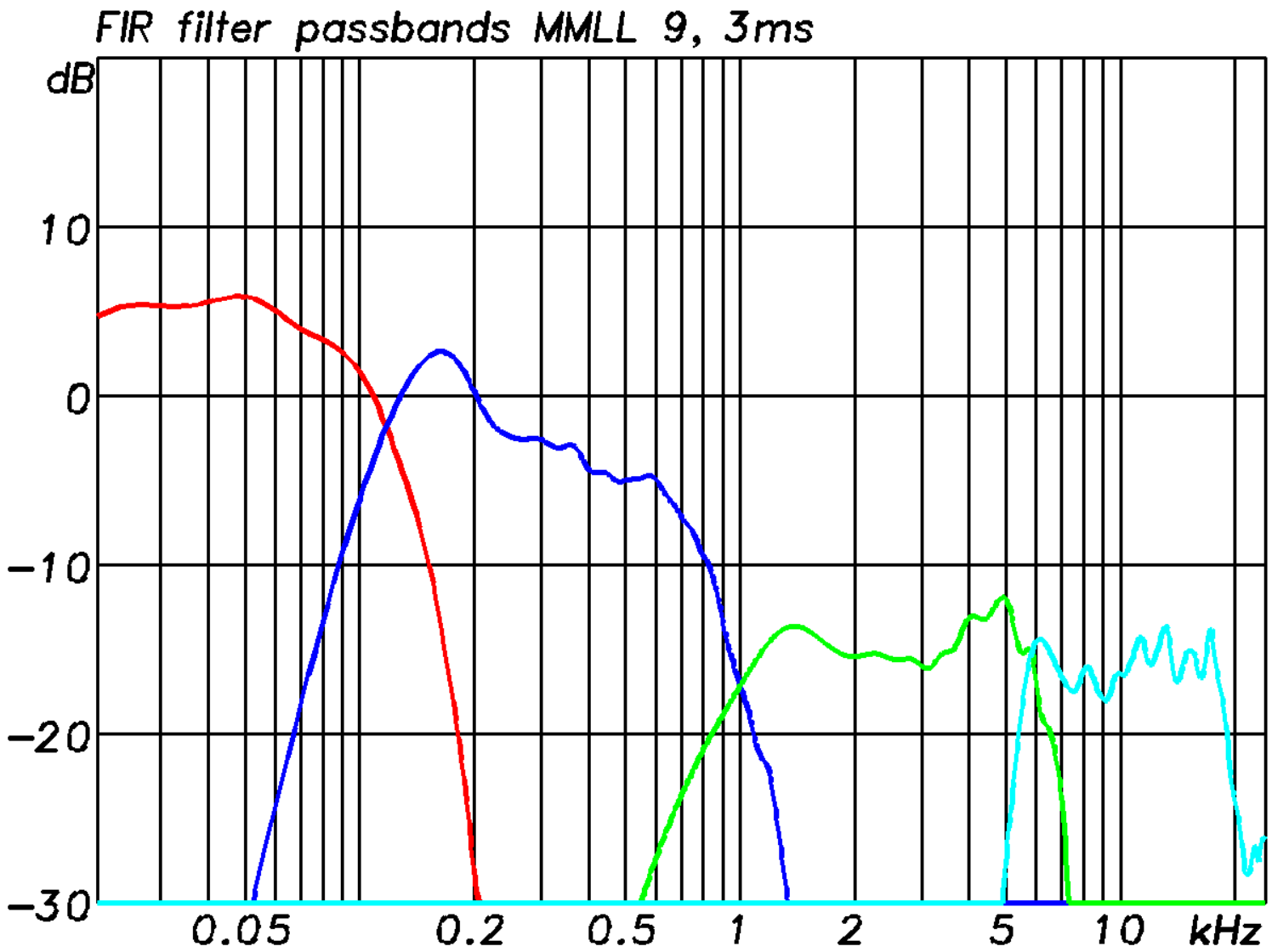
systemtheoretisches Ideal

Bester Kompromiss aus Latenz und Linearphasigkeit

Filterfunktionen des Controllers mit IIR-Filtern



Filterfunktionen des Controllers mit FIR-Filtern



Breitbandige Systementzerrung

- Entzerrung verschiedener passiver Topteile
  - Gleicher Frequenzgang mit Ausgleich der Sensitivity
  - Möglichst gleicher Phasengang
  - Gleiche Grundlatenz nach der Entzerrung

- Vorteile
  - Verbesserung der Clusterfähigkeit bei gemischten Systemen
  - Einfachere Kombination mit Subwoofern
    - Subwoofer – Topteil Matrix

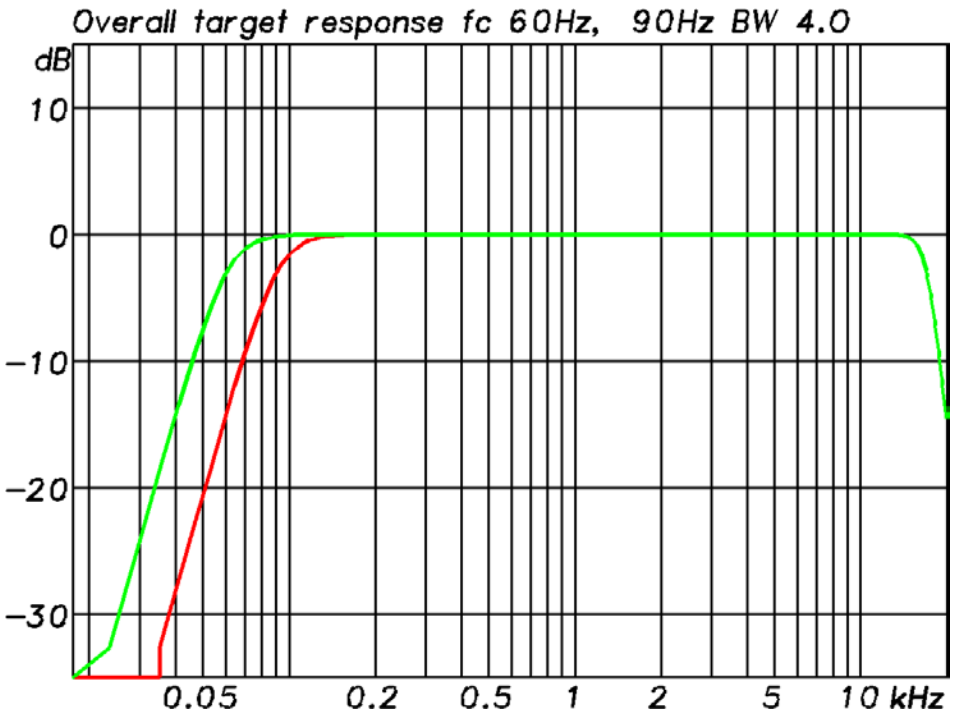
- Umsetzung
  - Multipath FIR-Filter (2 Wege mit Downsampling für das untere Band)
  - Breitband 1 Wege FIR-Filter in Kombination mit IIR
    - Wie viele Filterkoeffizienten werden benötigt?
    - Welche Latenzen müssen in Kauf genommen werden?

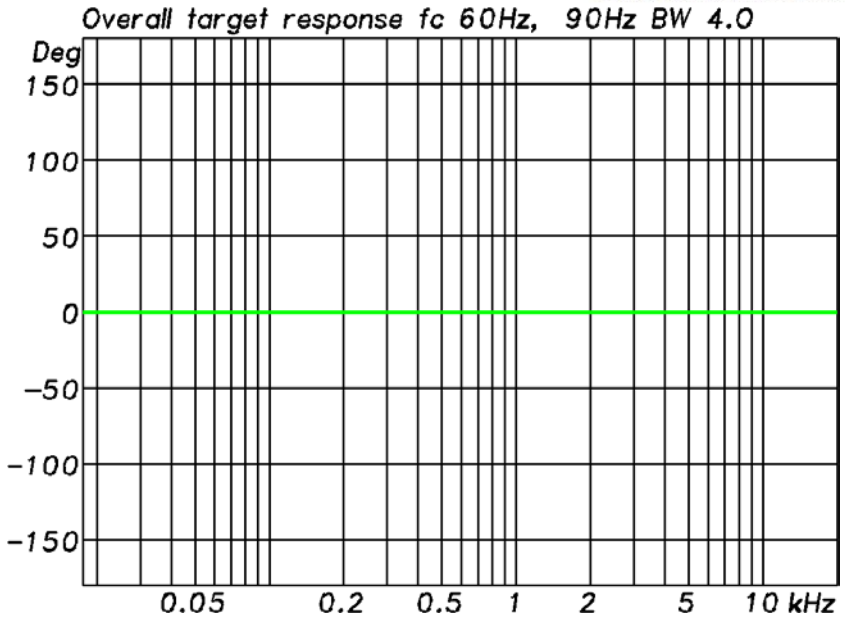
Definition der Zielfunktion des Basisfilters

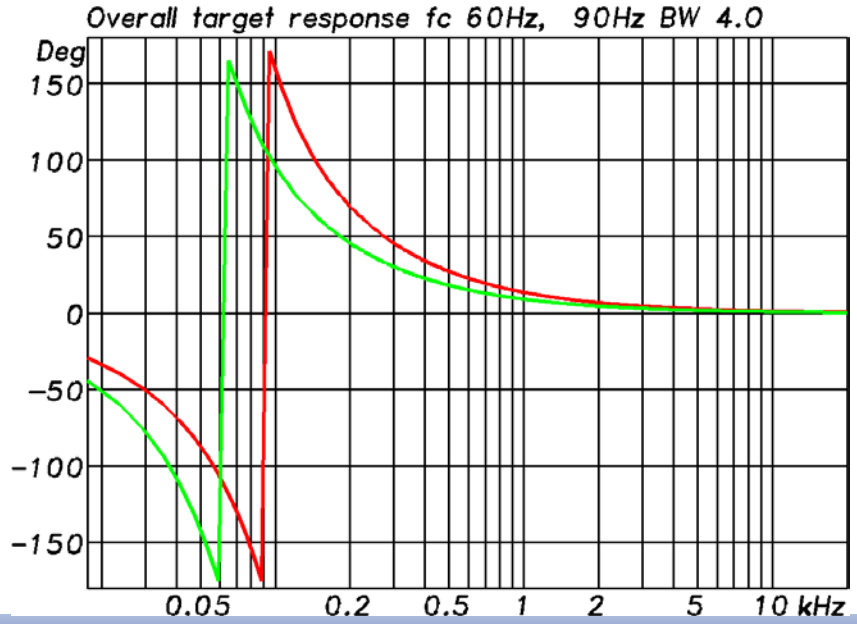
- Festlegung unterer (und oberer) Grenzfrequenz
  - Orientierung an der Abstimmung des Gehäuses
  - FIR Tiefpass + IIR Hochpass
  - ...

- Festlegung des Zielphasengangs
  - Möglichst linearphasig
  - Gemischt minimal- und linearphasig
    - Z.B. bis 800Hz minimalphasig, ab 800Hz linearphasig
  - Minimalphasiger Phasengang passend zum Betrag der Zielfunktion

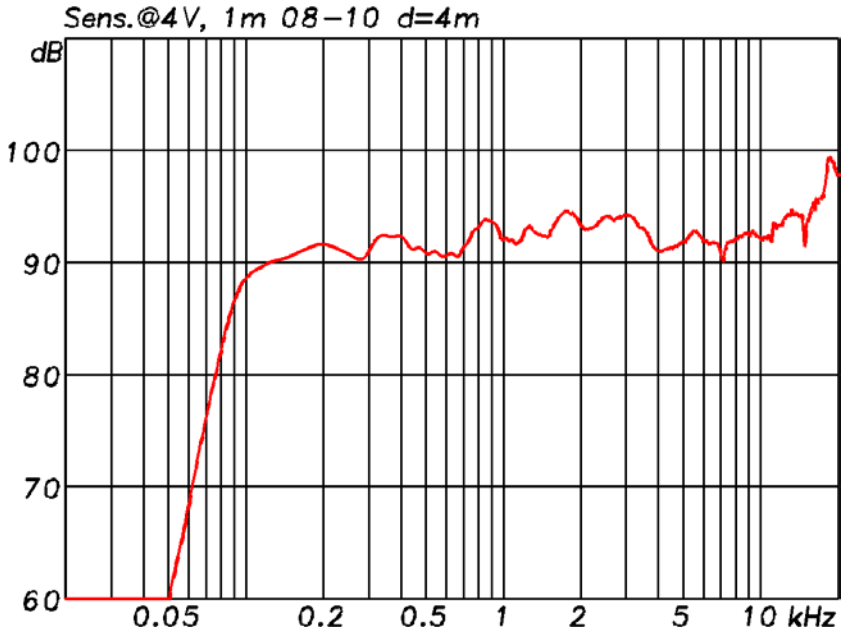
Zielfunktionen: „Phasenlos“ oder minimalphasig

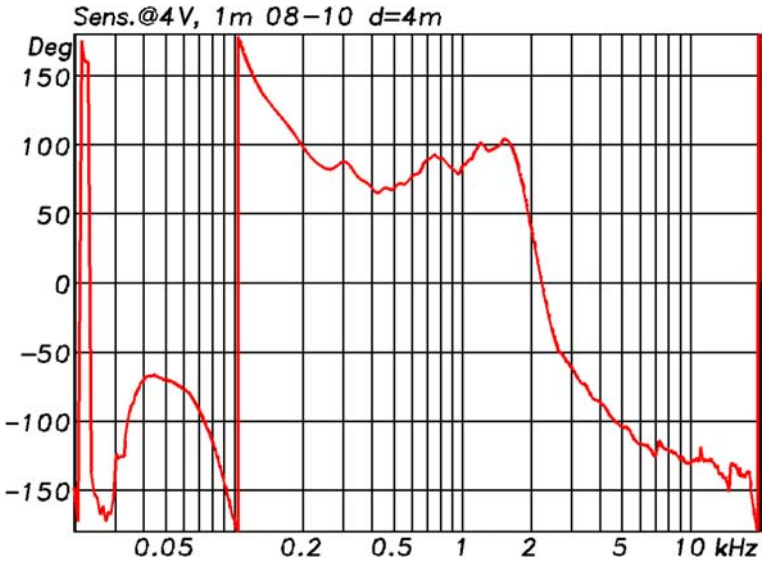


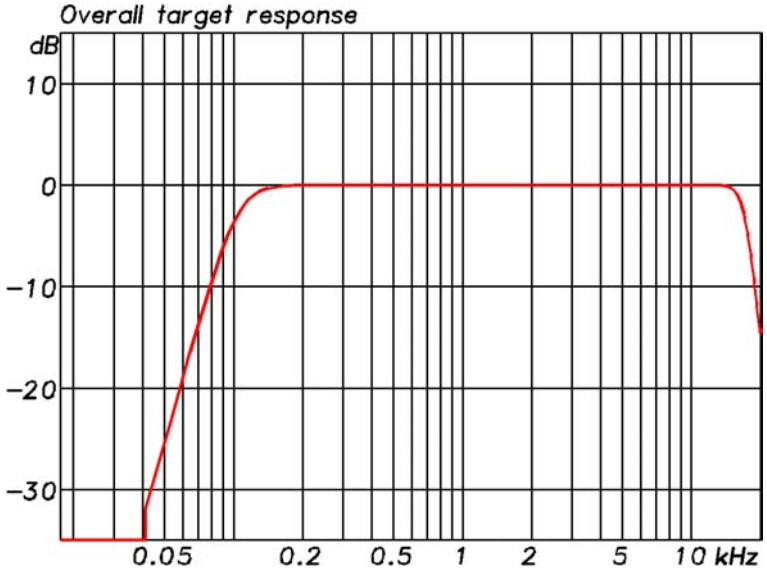




Beispiellautsprecher 8“/1“ 60x40 Horn, passive Weiche 2. O.

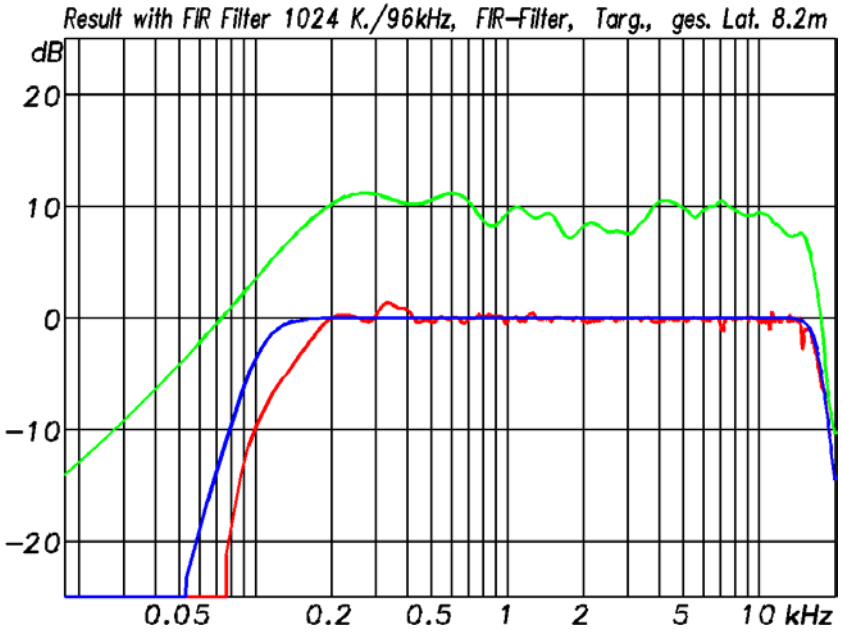


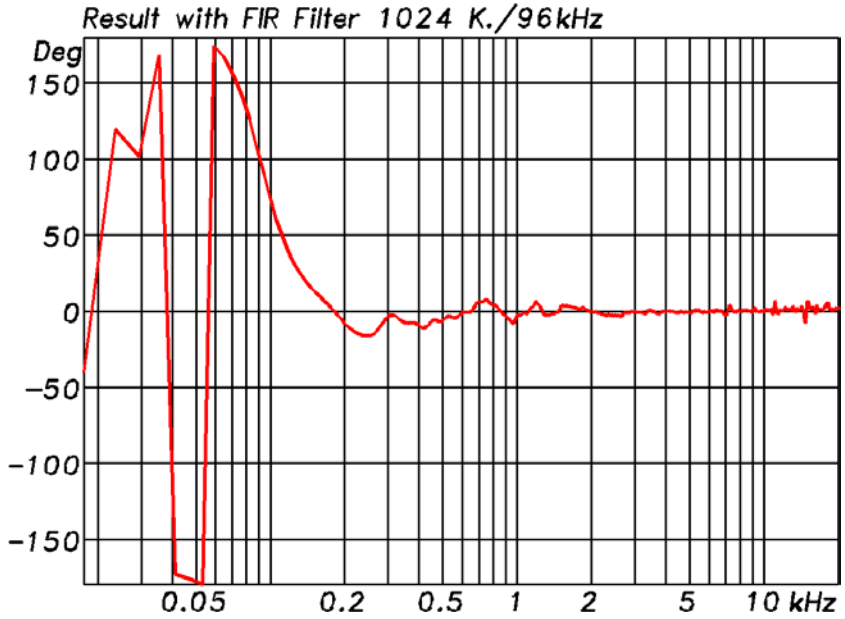




- Ziel der Entzerrung sei:
  - Möglichst wenig Latenz
  - Linearphasiges Ergebnis
  - Einsatz eines Breitbandfilters

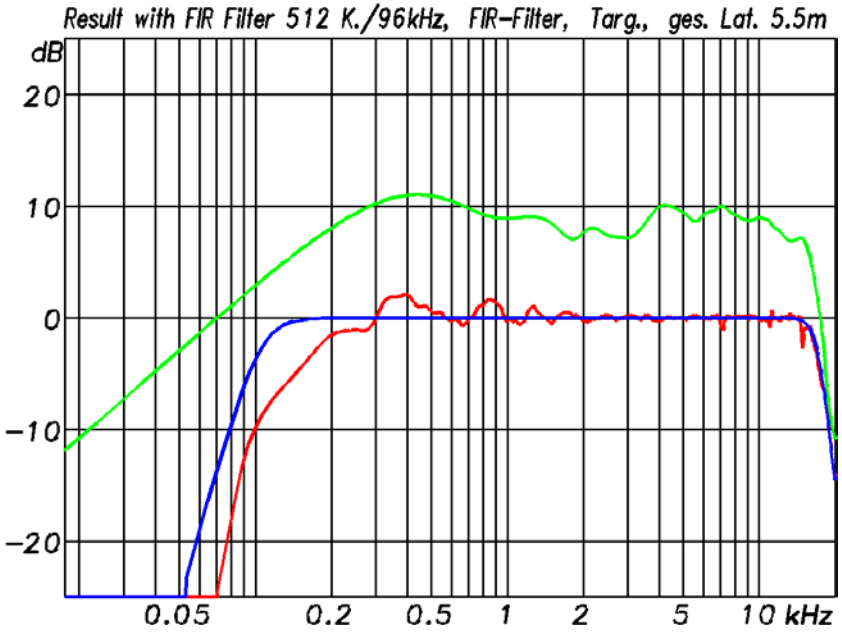
1-Wege Breitband FIR-Filter 1024 Koef. bei 96kHz

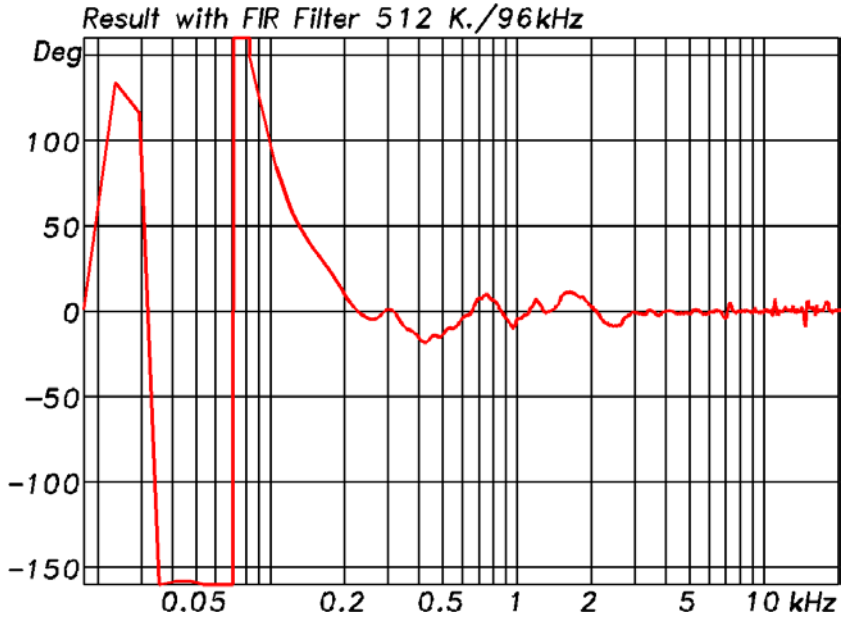




- Ab 200Hz ausreichend genaue Entzerrung
- Unter 200Hz wird das Verhalten von Filterlänge, Fenstertyp und DC-Verhalten des FIR-Filters bestimmt
- Latenz inkl. Controller 8.2ms

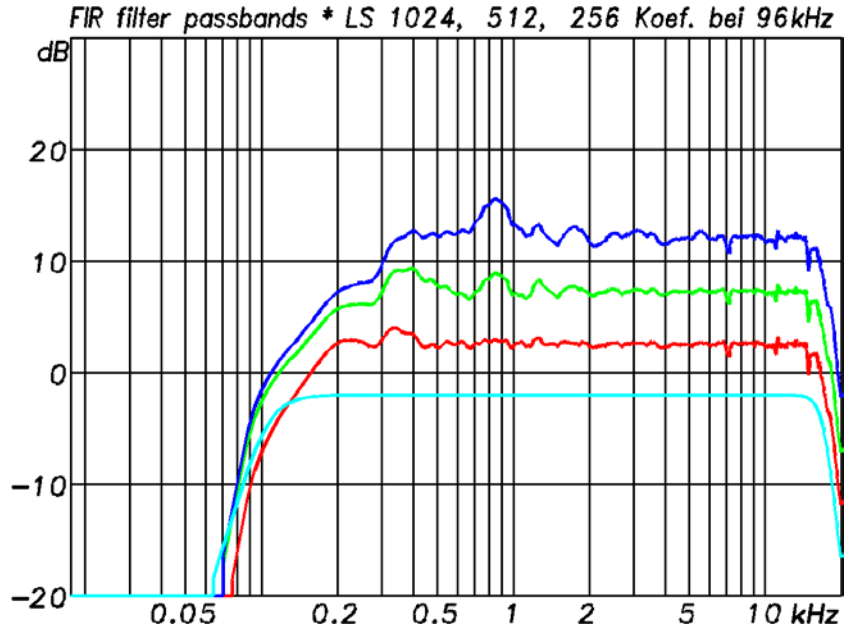
1-Wege Breitband FIR-Filter 512 Koef. bei 96kHz





- Ab 500Hz ausreichend genaue Entzerrung
- Unter 400Hz wird das Verhalten von Filterlänge, Fenstertyp und DC-Verhalten des FIR-Filters bestimmt
- Latenz inkl. Controller 5.5ms

1-Wege Breitband FIR-Filter bei 96kHz

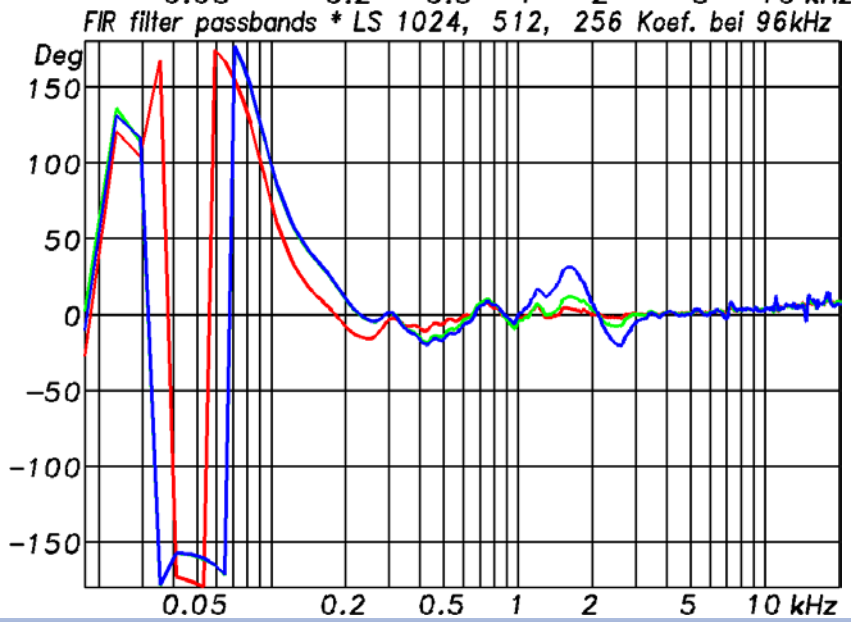


256 Koeff., Latenz inkl Controller: 4,2ms

512 Koeff., Latenz inkl. Controller: 5,6ms

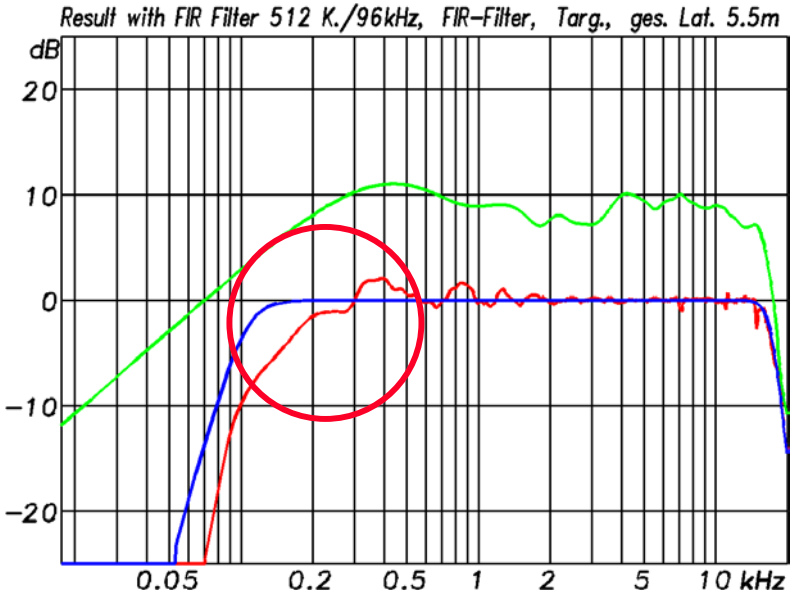
1024 Koeff., Latenz inkl. Controller: 8,2ms

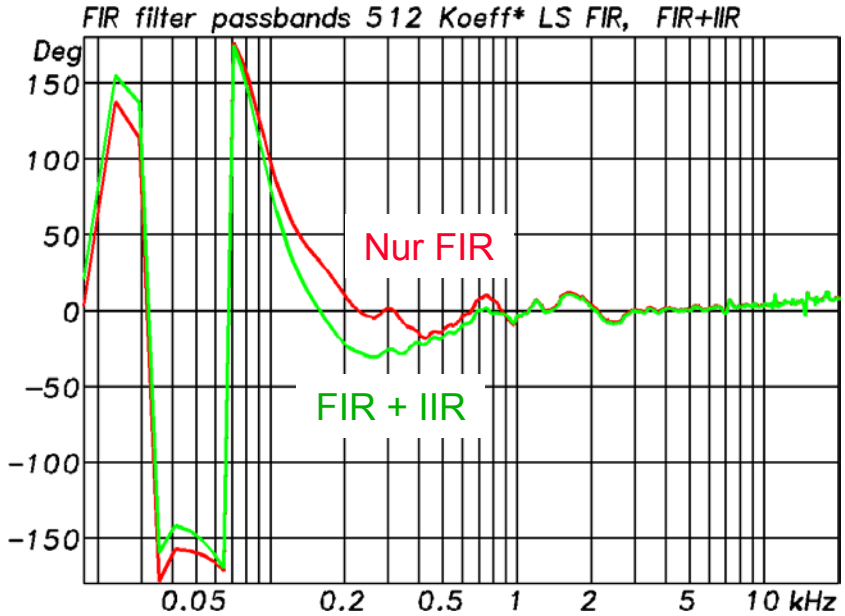
Target Response Butterworth 90Hz, 4.O.

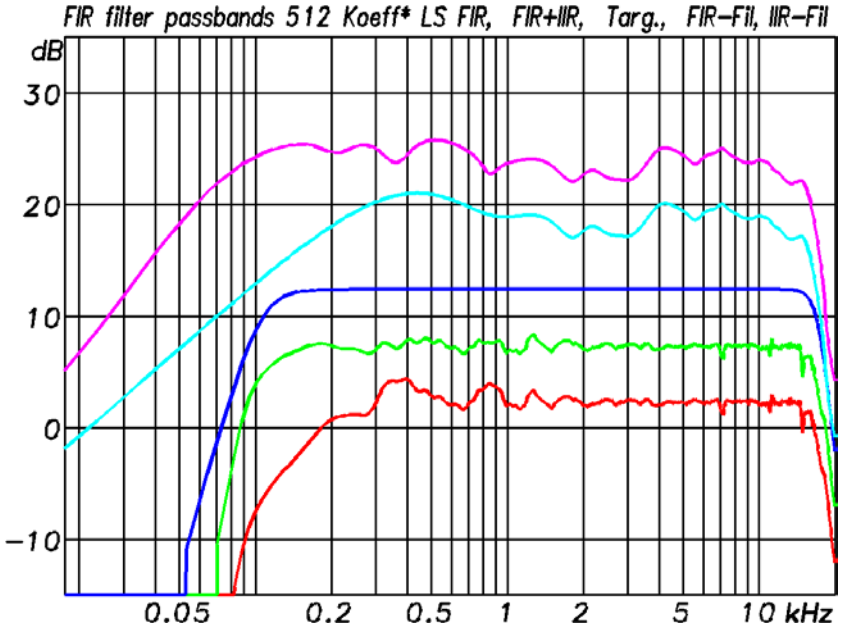


- Bei einer Filterlänge von 256 bei 96kHz wird keine zufrieden stellende Entzerrung mehr erreicht

1-Wege Breitband FIR-Filter 512 Koeff. bei 96kHz + IIR







FIR+IIR Filter

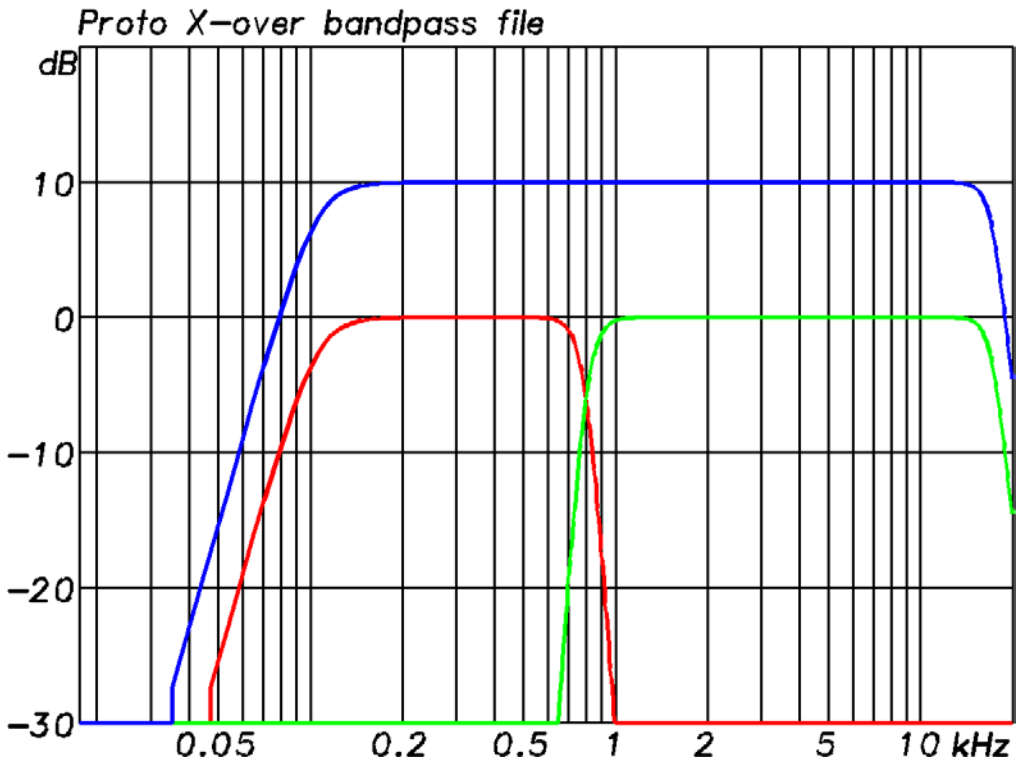
FIR Filter

Target Response Butterworth 90Hz, 4.O.

FIR + IIR, 512 Koeff., Latenz inkl. Controller: 5,6ms

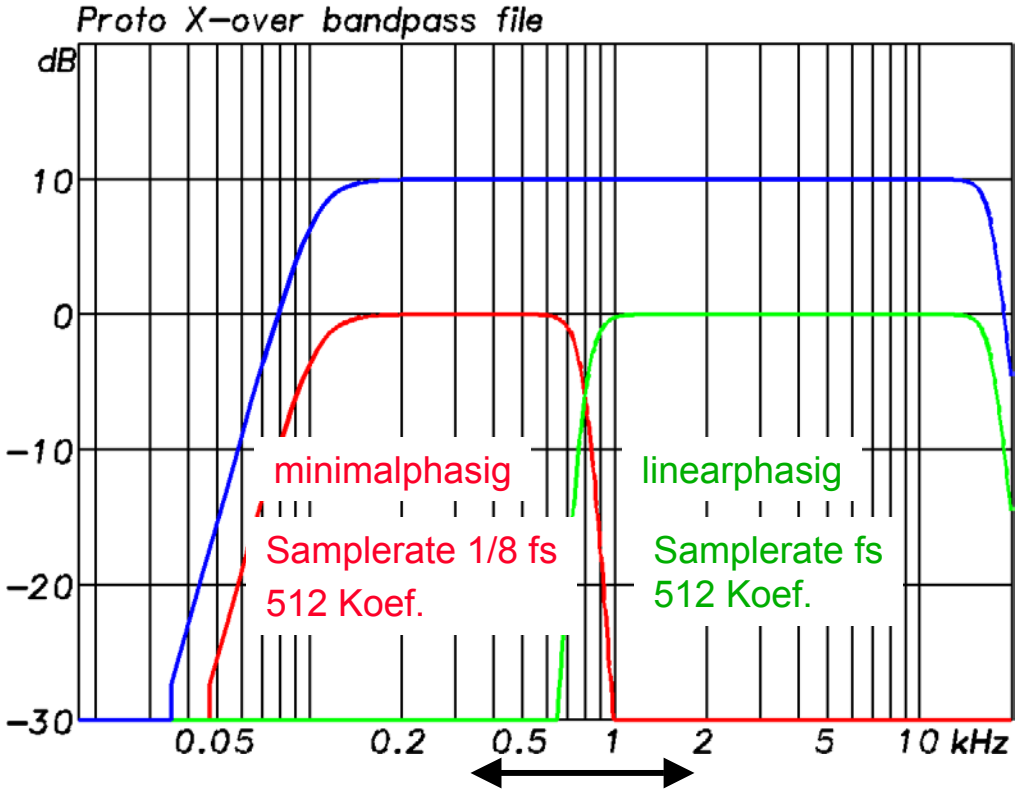
Nur FIR, 512 Koeff., Latenz inkl. Controller: 5,6ms

Idee des Multipath-Filters



- Aufteilung der Berechnung des Breitbandfilters in mehrere Bänder
- Berechnung der einzelnen Bänder „unabhängig“ voneinander
  - Anzahl der Filterkoeffizienten
  - Samplerate innerhalb der Bandes (Downsampling)
  - Phasigkeit des Filters (minimal oder linearphasig)

Anwendung von Mulipathfiltern für Breitbandentzerrung

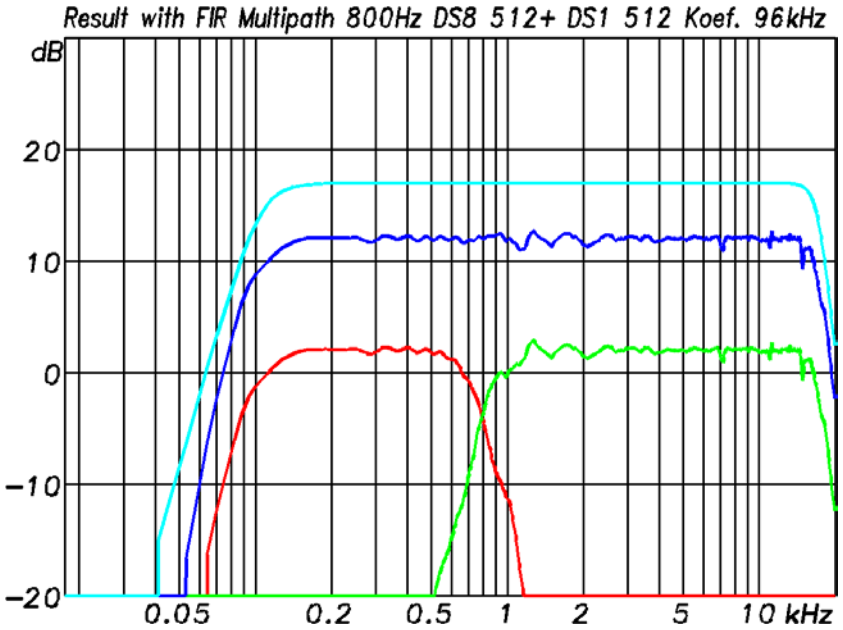


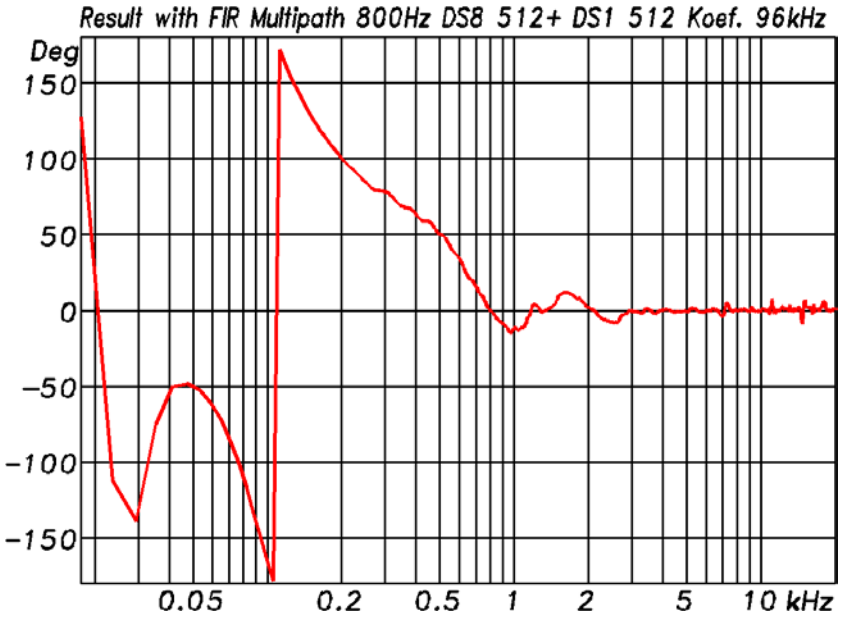
Target Response Butterworth 90Hz, 4.O.

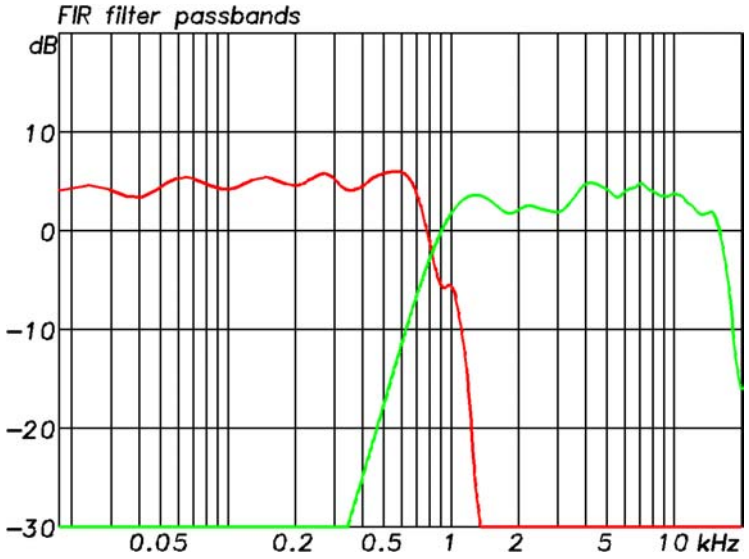
Grenze zwischen minimal und linearphasig 800Hz

- Erfordert kaum zusätzliche Rechenleistung
- Ziel: definierter Phasengang, bei geringer Latenz

8“/1“ Box mit Multipathfilter minimal/linearphasig







- Gesamtlatenz Filter + Controller: 6.2ms bei 96kHz
- Zum Vergleich: 1-Wege Entzerrung mit 512 Koef.: 5.5ms Latenz

Fazit

- Mehrwege Entzerrung
  - Bei gemischt linear/minimalphasiger Auslegung lassen sich sehr kurze Filterlatenzen von ca. 3ms erzielen
  - Gesamtlatenzen inklusive Controller liegen dann bei ca. 6ms
- 1-Wege Breitbandentzerrung
  - Grundsätzlich können in Kombination mit IIR-EQs gute Ergebnisse erzielt werden, auch bei sehr kurzen Latenzen
  - Suche des für die Anwendung besten Kompromisses aus
    - Genauigkeit der Entzerrung
    - Latenz
    - Rechenleistung für die FIR-Filter
- Breitbandentzerrung mit Multipathfiltern
  - Keine nennenswerte Erhöhung der Rechenlast
  - Definierter Übergang von minimal zu linearphasig
  - Hohe Genauigkeit der Entzerrung bei 6ms Gesamtlatenz