

FIR en IIR cross-over filters en pre/post-ringing

Introductie

Ik heb een actieve twee-weg systeem gemaakt, dat gebruikt maakt van FIR filters voor de cross-over. Ik heb hierover ook gespard met Gerhard, die me verwees naar een artikel van Grimm (<https://www.grimmaudio.com/wordpress/wp-content/uploads/speakers.pdf>).

In dit whitepaper staan een aantal interessante dingen, zoals o.a. waarom ze voor een brede behuizing hebben gekozen en dat je moet oppassen dat je niet diffractie effecten aan het corrigeren ben. Je maakt het dan wellicht beter voor een bepaalde luister positie, maar je kan het tevens veel slechter maken voor andere posities.

Verder wordt het probleem van pre-ringing aangestipt. Voor diegene die even een opfriscursus willen hebben over pre-ringing, verwijs ik o.a. naar:

<https://cravedsp.com/blog/linear-phase-eq-explained>

Via google zijn ook de andere nodige bronnen te vinden.

Nu is er het nodige debat over hoe hoorbaar pre-ringing is, maar onder bepaalde omstandigheden, is het zeker hoorbaar. Een mooi voorbeeld is te vinden op:

<https://www.youtube.com/watch?v=UFrbKqRuKxI&app=desktop>

Bij 5 minuten begint het relevante stuk, waar je duidelijk pre-ringing kunt horen.

Een ander interessant stuk leesvoer is “Perceptual Study of Loudspeaker Crossover Filters”:

<http://lib.tkk.fi/Dipl/2008/urn011933.pdf>

Hierin worden wat verschillende cross-over technieken uitgediept wat betreft mogelijke hoorbare artefacten. En duidelijk is dat hoe steiler de “lineaire fase” filters hoe sterker de pre-ringing en dus de mogelijke hoorbaarheid hiervan.

Verder is ook “Pre- and Post-ringing Of Impuls Response” interessant, gaat over Temporal Masking en wanneer de pre en/of post-ringing hoorbaar zijn.

http://www.bodziosoftware.com.au/Pre_Post_Ringing_IR_And_Pulses.pdf

Hier kom ik later op terug en verifieer een aantal cross-over filters tegen deze temporal masking curve.

Even voor de duidelijkheid een FIR-filter geeft **niet** per definitie pre-ringing, het is ook mogelijk om “minimum fase” filters te implementeren met een FIR filter en dit zal dan geen pre-ringing geven. Of dit verstandig is, is een andere zaak. FIR-filters zijn vrij duur wat betreft resources en hetzelfde kan dan vaak via de IIR-filter route met biquads met minder resources bereikt worden. Echter als er toch al een FIR-Filter aanwezig is, voor b.v. een cross-over, dan kan je in hetzelfde filter ook gelijk andere correcties doen.

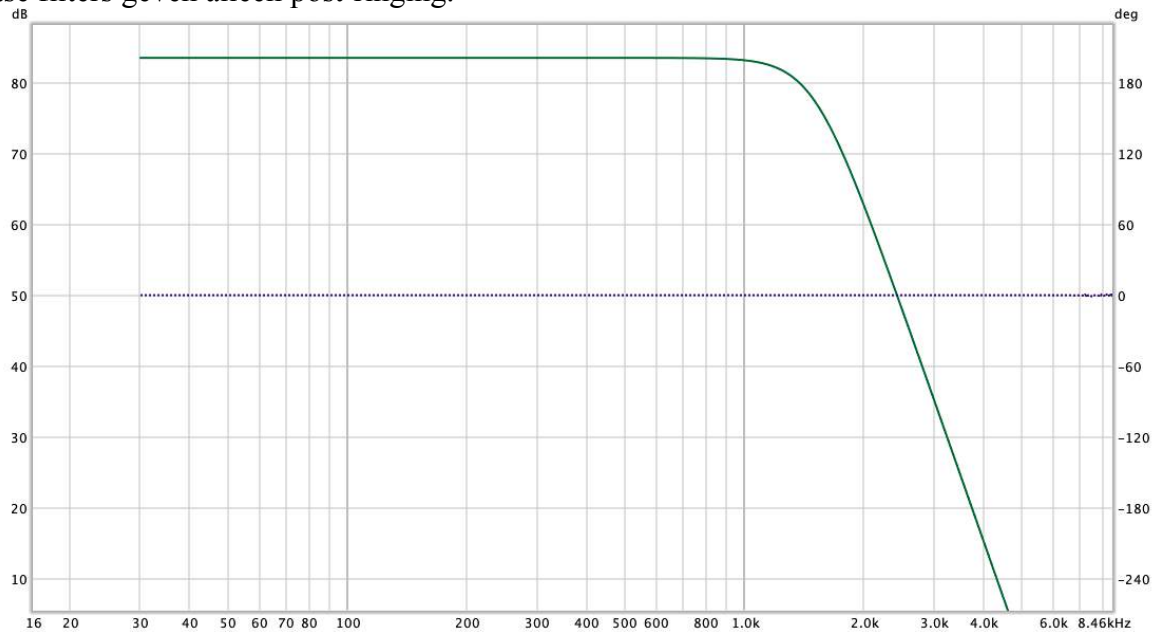
Naast b.v. een lineair fase hoog doorlaat filter voor de tweeter, kan je ook frequentie correcties doen met minimum fase filters. Of fase aanpassingen zodat fase verloop in overname gebied beter gelijkloopt met de woofer, of een delay zodat looptijd van tweeter gelijk is met woofer.

Nu gaat “Perceptual Study of Loudspeaker Crossover Filters” voor FIR-filters alleen uit van zogenoemde brick-wall filters en word er gekeken naar twee verschillende lengtes hiervan. Dit is een beetje jammer want je hoeft natuurlijk niet per se een lineair fase brick-wall filter te maken met een FIR. Je kan ook een wat minder steil lineair fase filter maken, dat zal minder

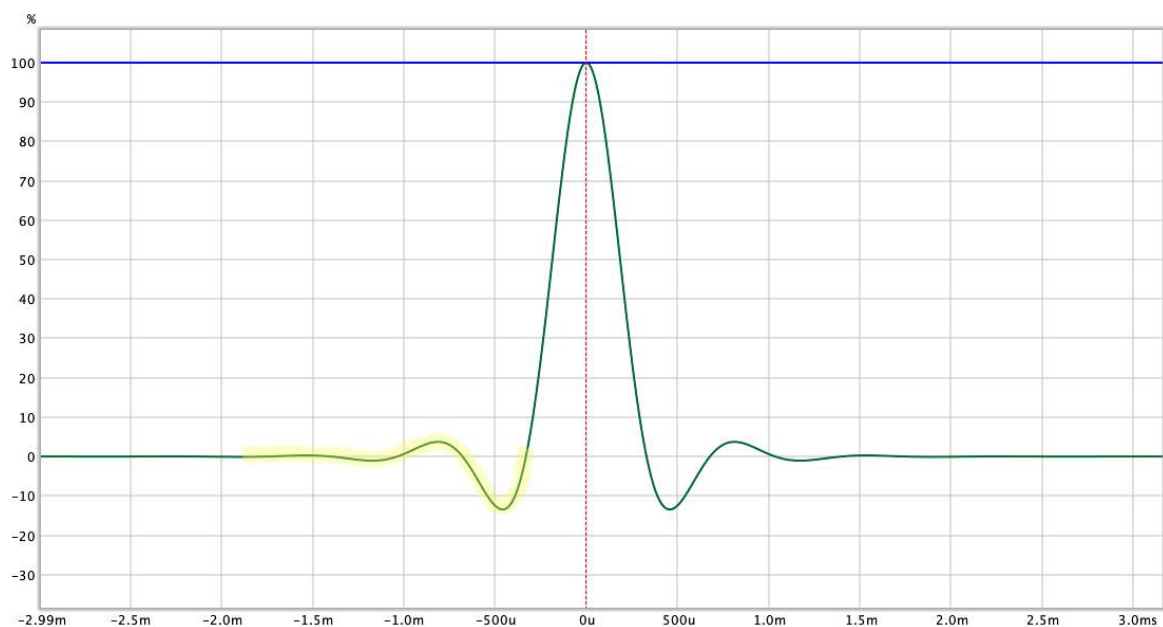
pre-ringing geven. Hoe langer het FIR-filter hoe steiler een brick-wall zal worden en dus hoe meer pre-ringing.

Lineaire fase vs Minimum fase filters

Aan de impuls response van een hoog doorlaat of laag doorlaat filter kun je duidelijk zien of er pre-ringing aanwezig is. Lineaire fase filters geven zowel pre als post-ringing. Minimum fase filters geven alleen post-ringing.



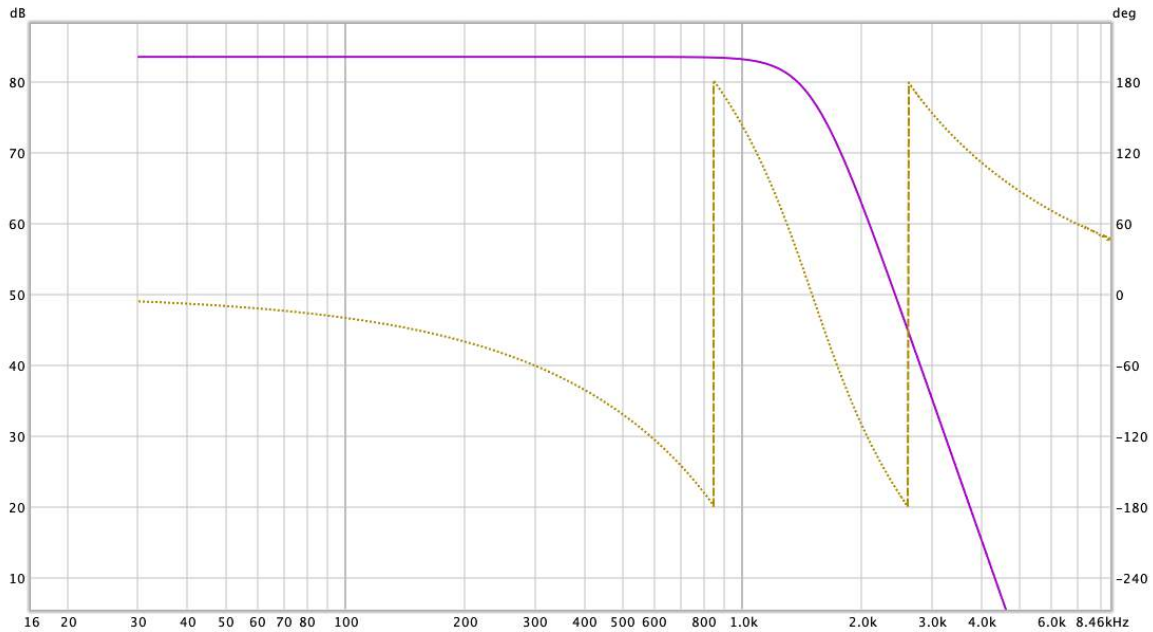
Figuur 1 Frequentie en fase response van een 48dB/oct Linkwitz-Riley, lineair fase filter



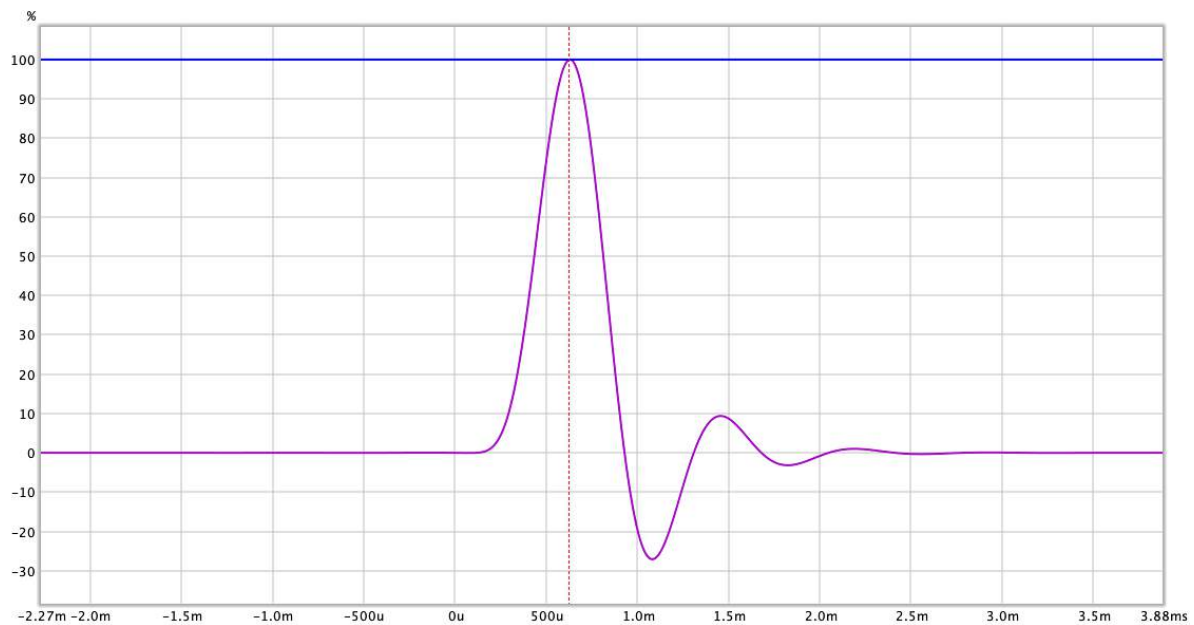
Figuur 2 Impuls response van een LR_48 lineair fase filter, in geel is pre-ringing gedeelte gemarkeerd

In Figuur 1 en Figuur 2 zijn de relevante responses van een 48dB/oct Linkwitz-Riley lineair fase weergegeven. In de impuls response is duidelijk pre-ringing te zien. Voor de feitelijke gebeurtenis, zie je al effecten van deze gebeurtenis. Omdat dit van nature wat vreemd is, is dit beter waarneembaar dan post-ringing.

Er komen van nature geluiden voor die er ineens zijn, denk met name aan percussie geluiden, maar geluiden die ineens stoppen zijn zeldzamer. Dus post-ringing wordt ook veel meer gemaskeerd door geluid, dan dat pre-ringing gemaskeerd zal worden (simultaneous masking). De temporal masking curves zijn voor pre-masking duidelijk anders dan voor post-masking, ook dat maakt dat pre-ringing eerder hoorbaar zal zijn dan post-ringing.



Figuur 3 Frequentie en fase response van een 48dB/oct Linkwitz-Riley, minimum fase filter

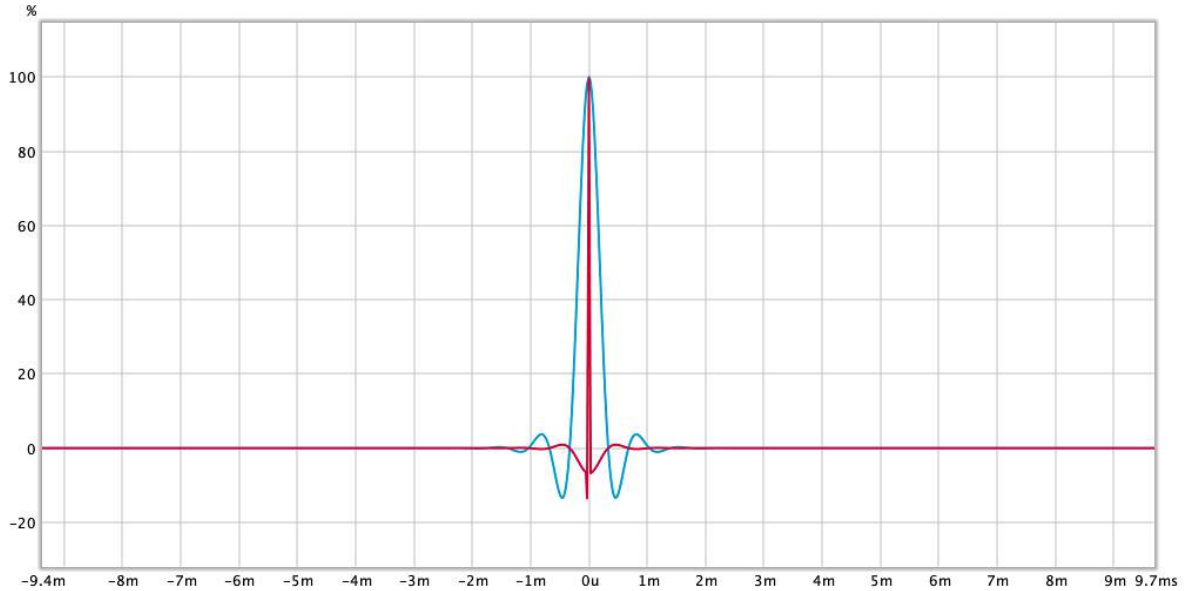


Figuur 4 Impuls response van een LR_48 minimum fase filter

De filter steilheid is bij beide implementaties 48dB/oct en ook verloop is gelijk (Linkwitz-Riley). Verschil tussen een lineair fase en minimum fase filter is het fase verloop en door het fase verloop recht te maken, wissel je post-ringing is voor pre-ringing.

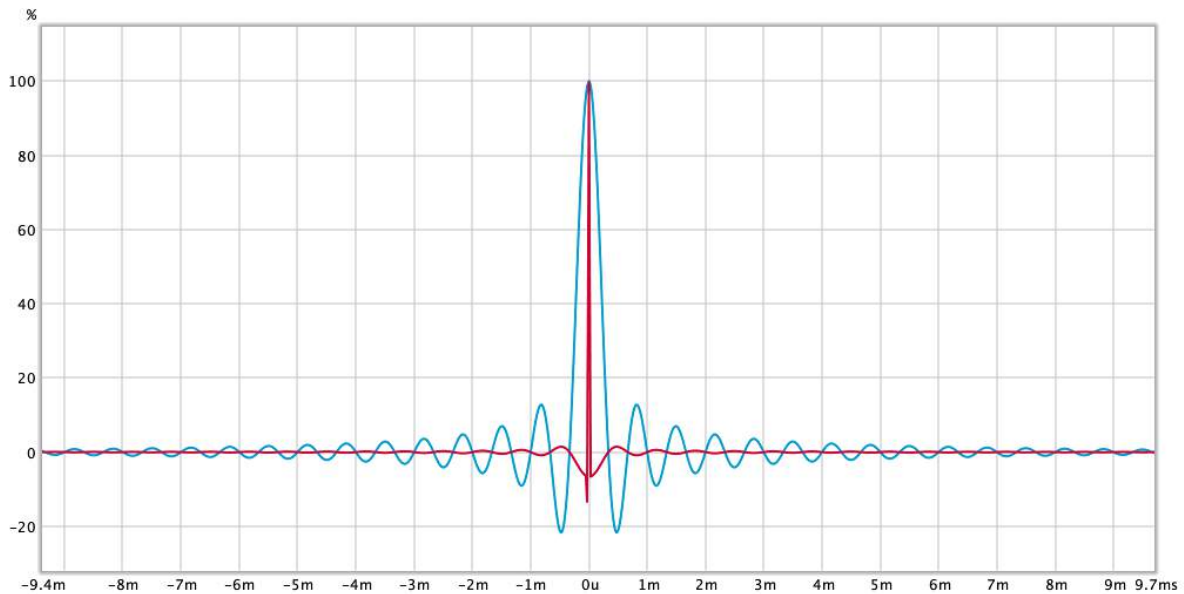
Steilheid van lineair fase filter

Als we kijken naar de steilheid van filters dan zien we een duidelijk effect hiervan op de hoeveelheid pre en post-ringing. In Figuur 5 zien we de impuls responses van een cross-over filter met een 48dB/oct Linkwitz-Riley verloop. Binnen ongeveer 2ms zijn zowel de pre als post-ringing uitgestorven.



Figuur 5 De impuls response van een LR_48 lineair fase hoog en laag doorlaat filter (cross-over)

In Figuur 6 zien we hetzelfde, maar nu voor een brick-wall filter, binnen 10ms is het pre en post-ringing nog steeds niet uitgestorven. In beide gevallen was de FIR-filter lengte 3200 taps. De cross-over frequentie lag op 1.5kHz. Voor een 48dB/oct Linkwitz-Riley filter op 1.5kHz zou een korter FIR-filter lengte ook kunnen volstaan.



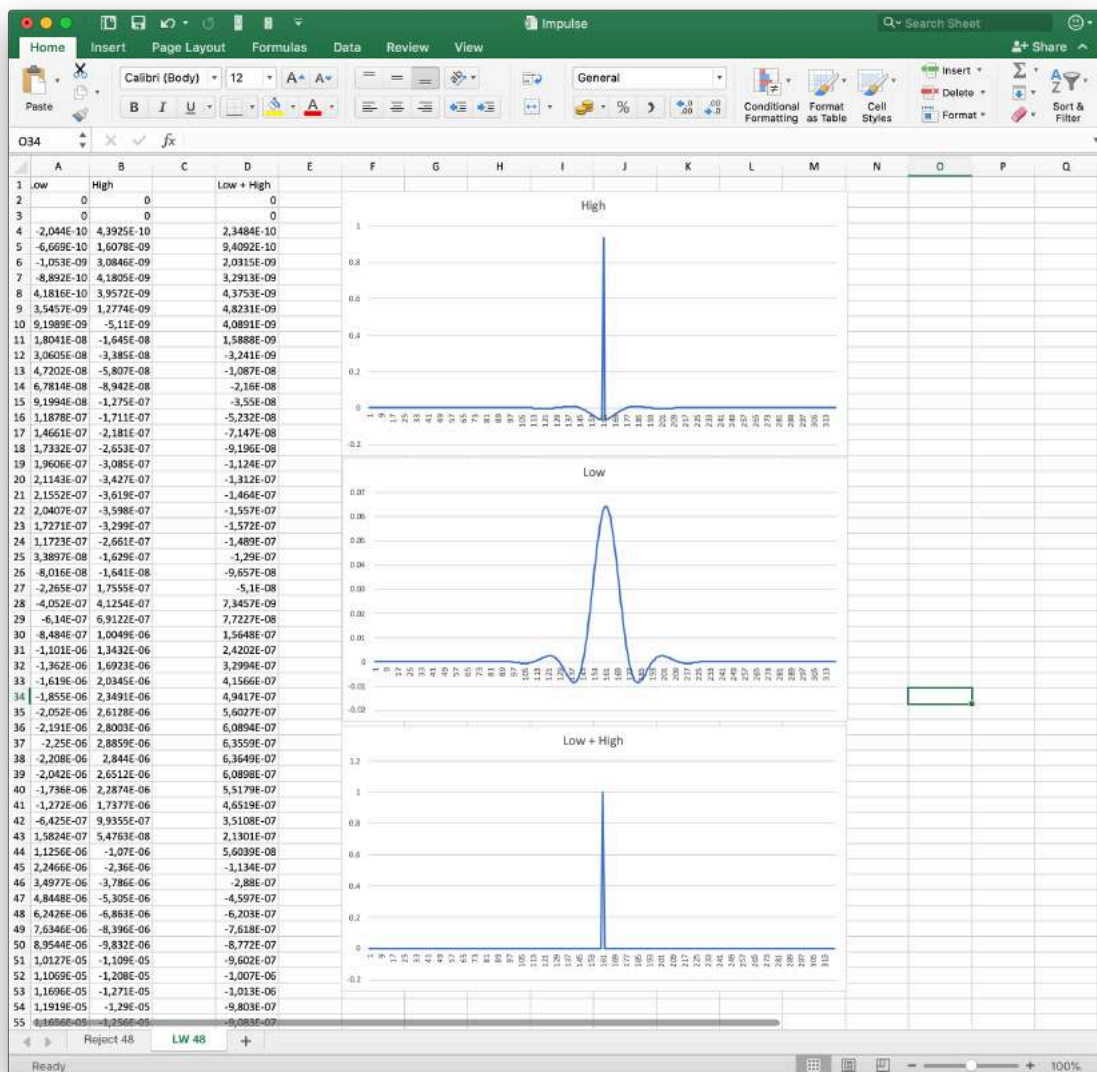
Figuur 6 De impuls response van een brick-wall lineair fase hoog en laag doorlaat filter (cross-over)

Hou er rekening mee dat de schaal in Figuur 5 en Figuur 6 procentueel zijn. De werkelijke hoogte van de blauwe laag-doorlaat grafiek is lager dan die van de rode hoog doorlaat grafiek.

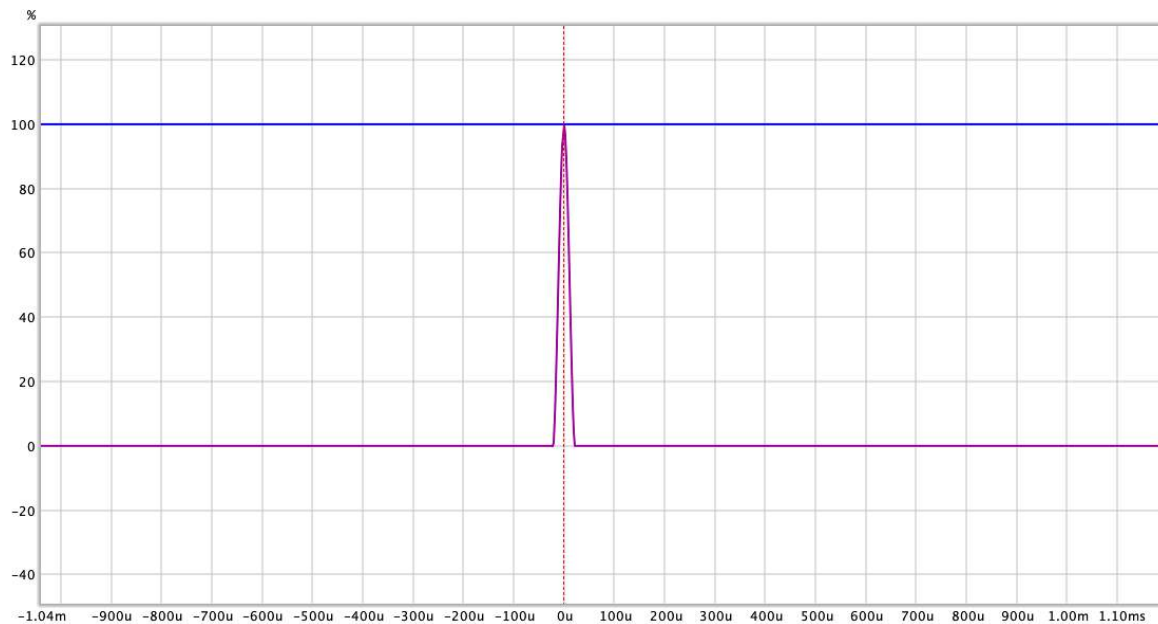
Sommatie effect van de impuls responses

Nu lijkt het ringing effect, zeker in geval van het brick-wall filter enorm te zijn, maar de situatie is wat genuanceerder. Je kijkt nu naar het effect van het laag- en hoog-doorlaat filter afzonderlijk. In werkelijkheid neem je beide responses tegelijk waar, elk via een aparte driver. Als je ze in de ideale situatie sommeert, dan kom je voor beide gevallen uit op de “perfecte” impuls response.

Als je bij een FIR filter, beide kanten van een lineair fase filter hetzelfde type geeft, dan zullen de coëfficiënten van beide FIR-filters opgeteld, de “perfecte” impuls response geven. Dit is eenvoudig na te gaan door b.v. met *Rephase* een hoog en laag doorlaat filter te maken. De coëfficiënten stop je in een spreadsheet en je tel de twee kolommen op en maak hiervan een nieuwe kolom. Maak voor elke kolom een grafiek en je zal zien dat het resultaat een “perfecte” impuls response wordt, zie ook Figuur 7.



Figuur 7 De sommatie van een 320 tabs LR48 lineair fase hoog- en laag-doorlaat FIR-filter in spreadsheet



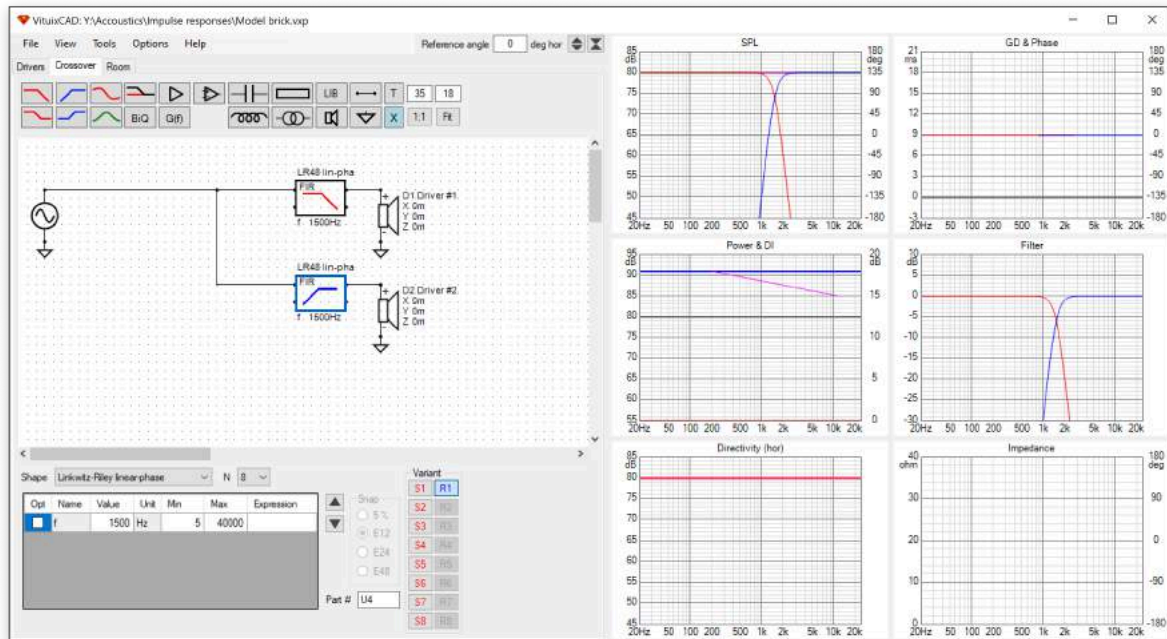
Figuur 8 De impuls response van de sommatie brick-wall linear fase hoog- en laag-doorlaat FIR-filter in REW

Vanuit REW ziet de sommatie eruit zoals zichtbaar in Figuur 8, deze is van de brick-wall, maar die van de Linkwitz-Riley 48dB/oct is identiek en het is niet zinvol om die hier ook te plaatsen.

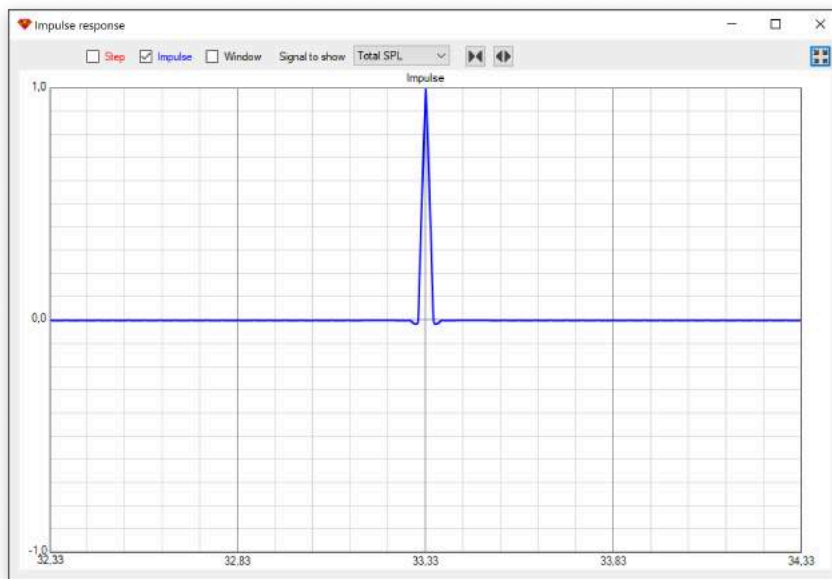
Nu lijkt het alsof de keuze van de steilheid van een linear fase filter geen verschil maakt wat betreft pre of post-ringing, maar dat komt omdat er gekeken is naar de ideale sommatie situatie. In de werkelijkheid van alledag, is de sommatie natuurlijk niet ideaal en zal er een niet ideale sommatie plaats vinden.

Simulatie van niet ideale sommatie

De sommatie zal niet ideaal verlopen en dat zullen we simuleren met *VituixCAD2* (<https://kimmosaunisto.net/>).



Figuur 9 Test opstelling in VituixCAD met LR48 linear fase cross-over FIR-filters

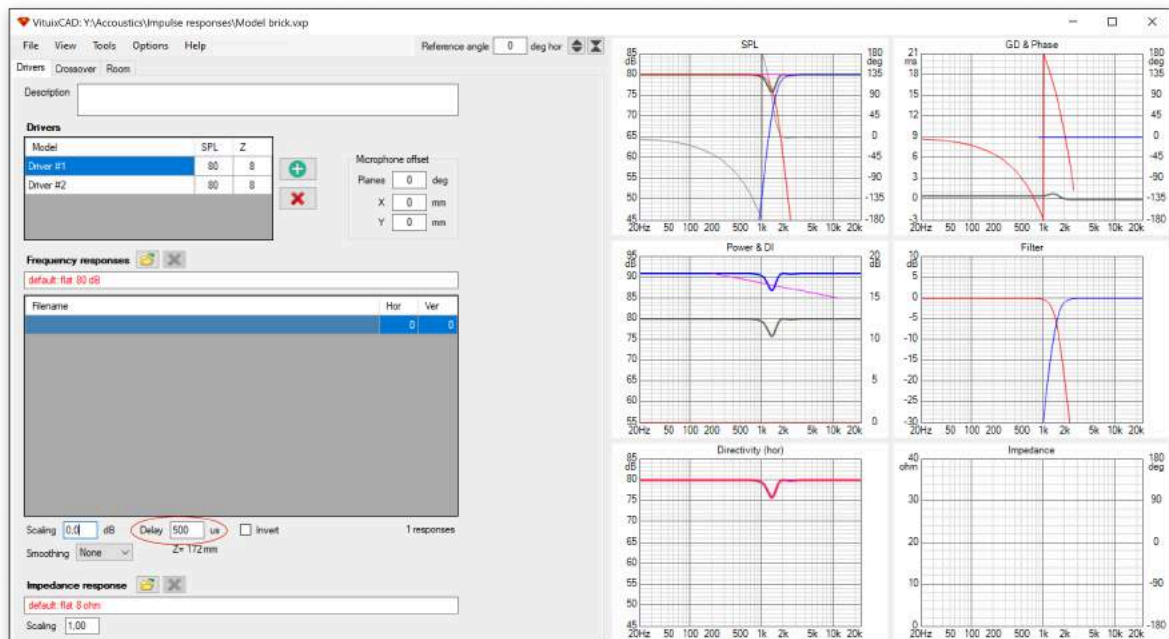


Figuur 10 Impuls response in VituixCAD van LR48 linear fase cross-over FIR-filters met "ideale" sommatie

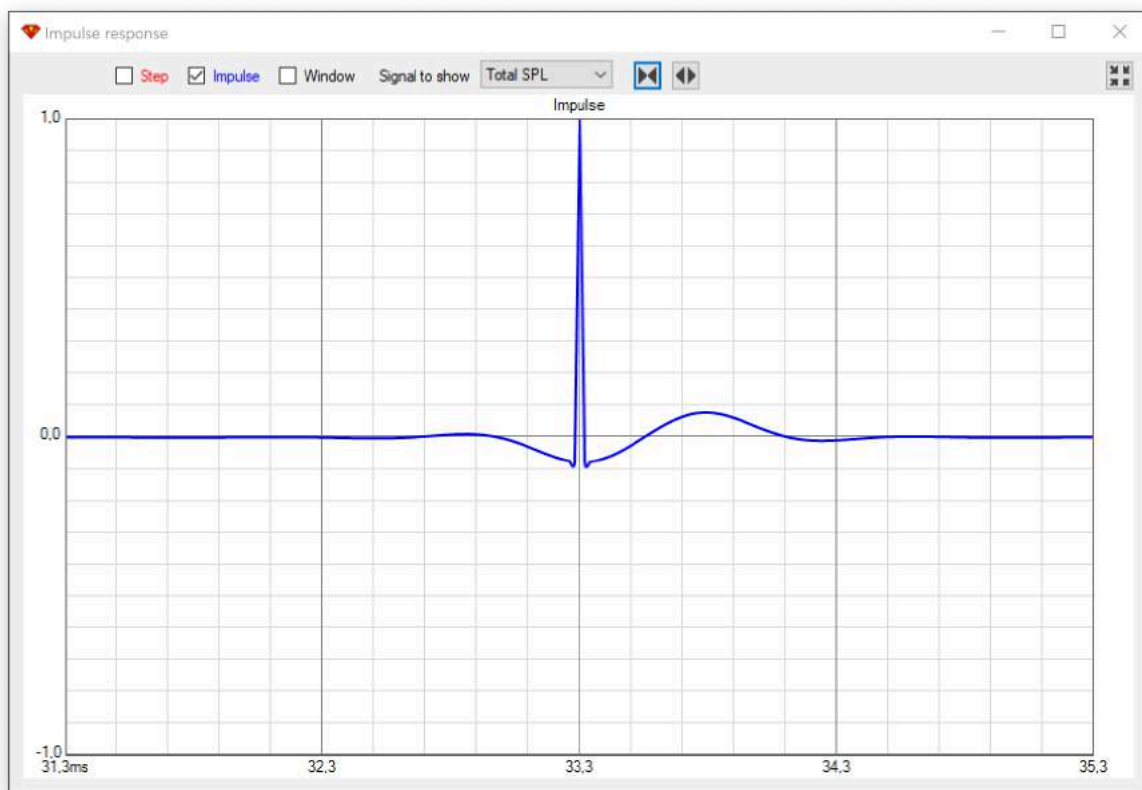
In Figuur 9 zien we de simulatie test opstelling in VituixCAD en in Figuur 10 de resulterende impuls response in geval van de ideale situatie.

Van een aantal afwijkende scenario's zullen we bekijken wat het globale effect zal zijn op de resulterende impuls response. In Figuur 6 is duidelijk te zien dat de ringing slingerbeweging van het hoog en laag doorlaat filter in tegen fase is. Als we dus een verschuiving in tijd aanbrengen tussen deze twee signalen, dan zal de sommatie zeker geen "perfecte" impuls response zijn.

In geval dat beide drivers boven elkaar gemonteerd zouden zijn, dan komt dit overeen met een verplaatsing van de luister positie in het verticale vlak. We vertragen het signaal naar de woofer met 0.5ms en kijken wat het effect is.



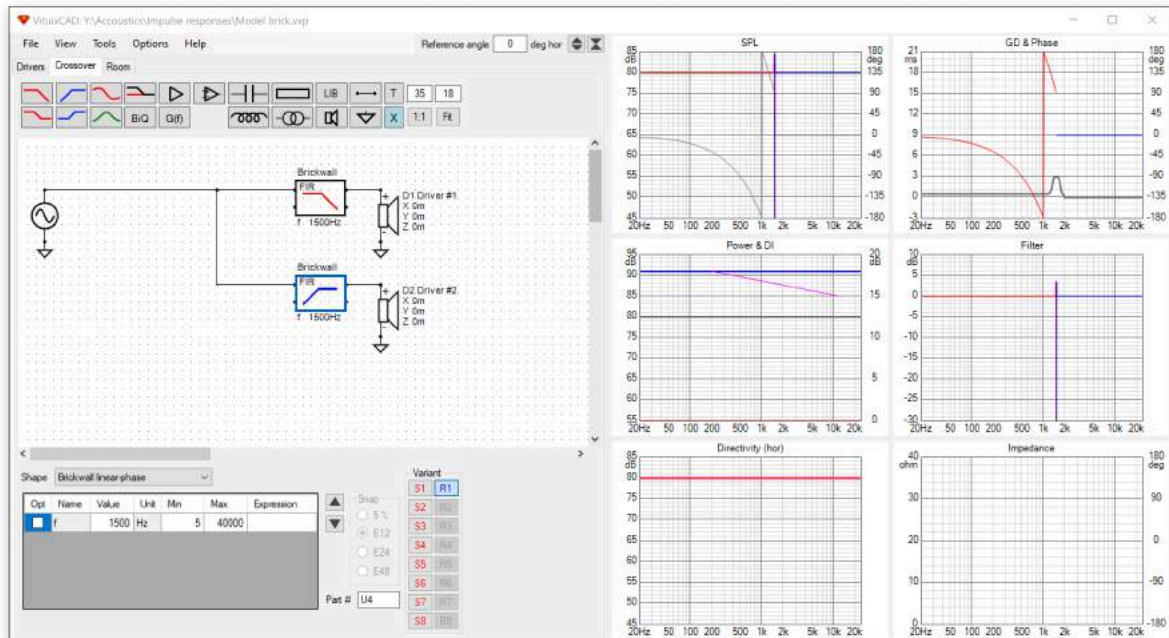
Figuur 11 Aanbrengen van een vertraging in signaal pad van de woofer



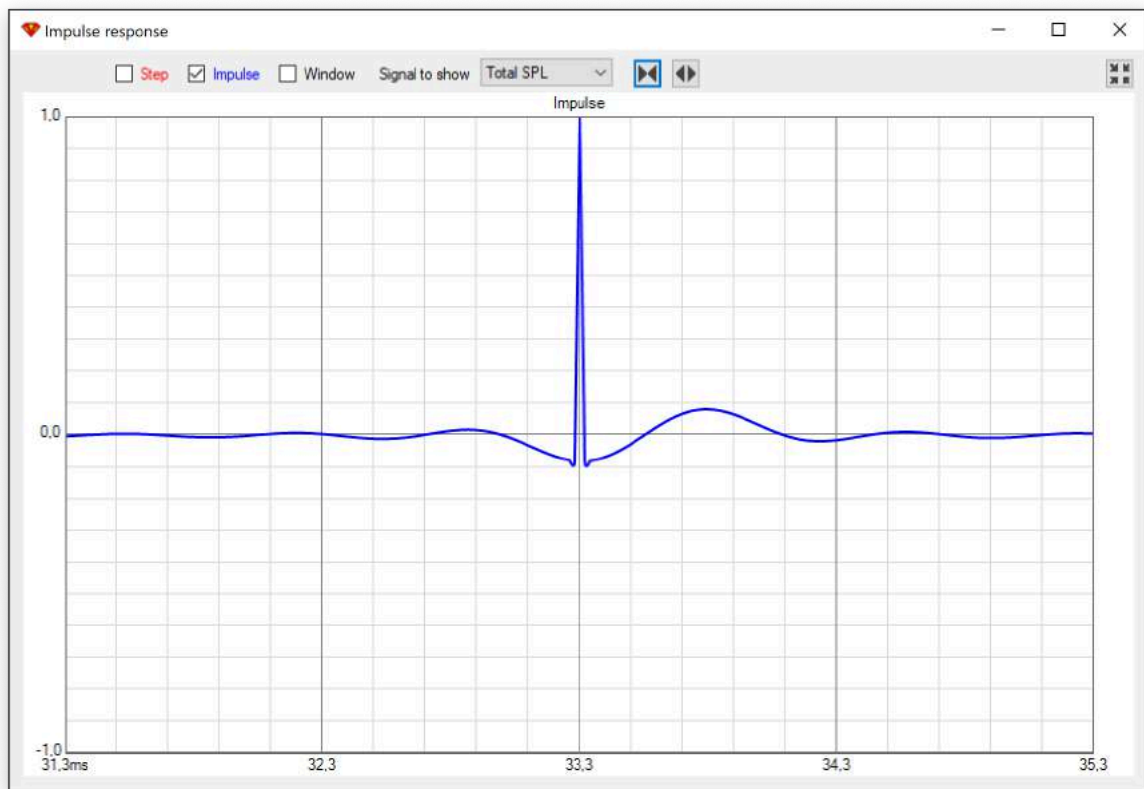
Figuur 12 Effect op impuls response van LR48 lineair fase filter met 0.5ms tijdsverschil tussen de drivers.

In Figuur 11 en Figuur 12 zien we het effect van 0.5ms vertraging in signaal pad van de woofer. Er komt een dipje in de frequentie response rond de cross-over en de impuls response gaat tekenen vertonen van pre en post-ringing.

Nu gaan we kijken wat het effect is bij een steil brick-wall filter.



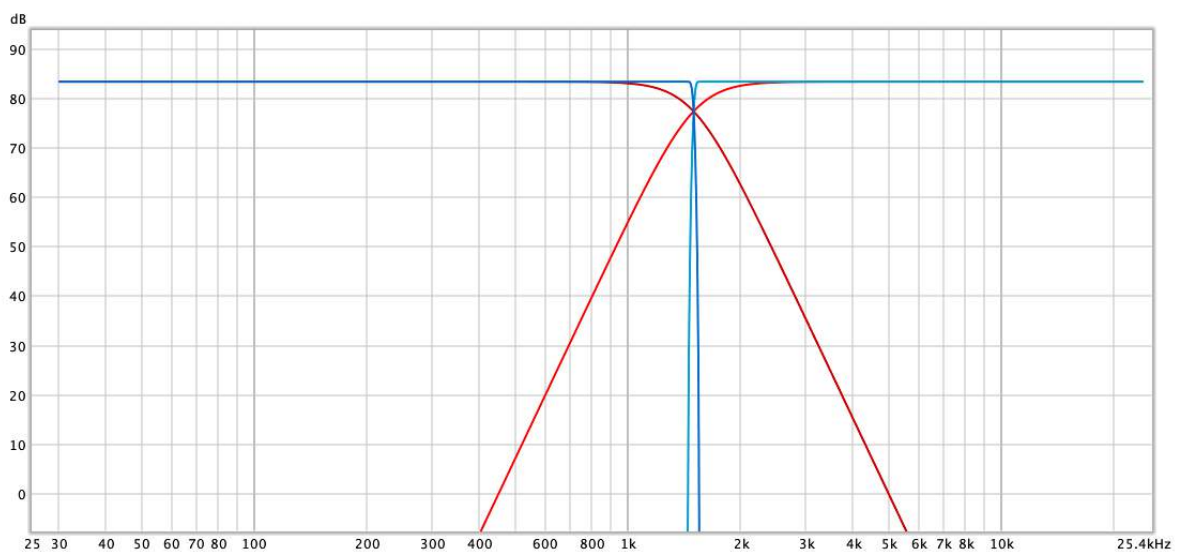
Figuur 13 In geval van brick-wall filter is effect op frequentie response erg klein



Figuur 14 Effect op impuls response in geval van brick-wall filter

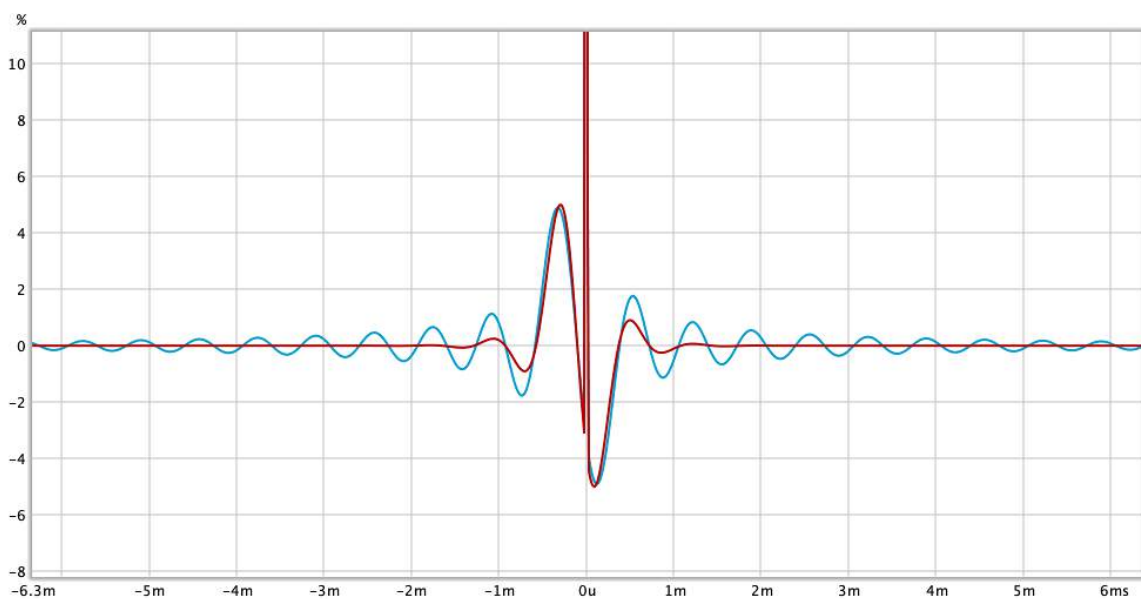
In Figuur 13 kunnen we zien dat versturende effect bij een brick-wall filter op de frequentie response erg gering is, dit komt door het smalle overgangsgebied van de cross-over. Echter is de fase sprong daardoor wel ineens erg abrupt, wat zich ook vertaalt in een duidelijk hogere group delay. Figuur 14 laat zien dat het ringing effect duidelijk meer is, dan met het Linkwitz-Riley 48d/Oct filter. In Figuur 12 lijkt pre-ringing na 1 ms zo goed als weg, maar in Figuur 14 is na 2 ms nog duidelijk pre-ringing aanwezig.

Nu is effect in impuls response direct in VituixCAD niet goed zichtbaar, omdat je niet kan inzoomen op de response magnitude, alleen wat op de tijd as. Tevens is een verschil van 0.5ms een lengteverschil van 17cm in afstand tot drivers, wat best veel is. Voor de duidelijkheid maken we impuls response ook zichtbaar via REW, waarbij je wel kunt inzoomen en je ook twee impuls responses tegelijkertijd in een grafiek kunt afbeelden, waardoor verschil goed zichtbaar is.



Figuur 15 In blauw cross-over van brick-wall met FIR-lengte van 3200 en in rood die van LR48 filter

In Figuur 15 is duidelijk het verschil te zien in de cross-over helling tussen een brick-wall van een FIR-filter met lengte 3200 en een LR48 filter.

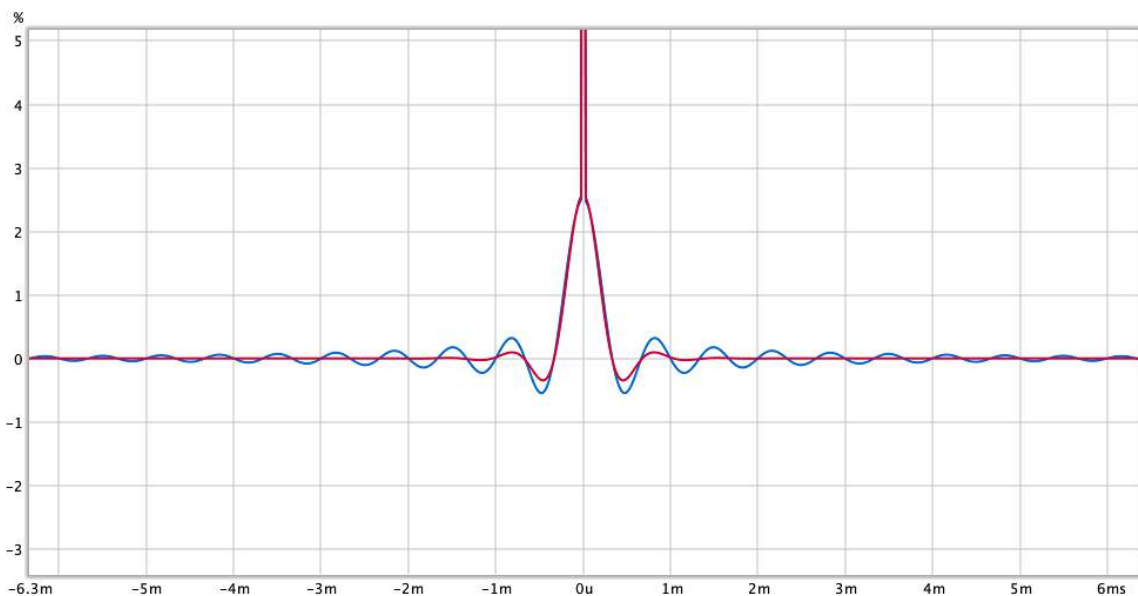


Figuur 16 Verskil in impuls responses tussen LR48 (rood) en brick-wall (blauw) met woofer 0.2ms vertraagd

Figuur 16 laat ingezoomd verschil zien in impuls response tussen een lineair Link-Riley 48dB/oct filter en een brick-wall met FIR-lengte 3200. Waar nu effect binnen 2 ms weg is in geval van een LR48 filter, is dat duidelijk meer in geval van het brick-wall filter. Gesimuleerd via zowel de VituixCAD als via Rephase/REW, is duidelijk dat in geval van een verschil in looplengte er een duidelijke pre en post-ringing gaat optreden.

Om de impuls response in REW te importeren, maak je een FIR-filter met Rephase, deze voorzie je van een bepaalde header, zodat REW die als een impuls response kan inlezen. Vervolgens via de “Parametric Sum” optie kan je delay aanbrengen of een verschil in gain aanbrengen. Dus via die route kun je ook bepaalde niet ideale sommatie situaties simuleren.

Een andere mogelijk niet ideale sommatie situatie, is een geluidsniveau verschil van de drivers. Dit kan komen doordat frequentie response niet helemaal vlak is, door hetzij de driver zelf, diffractie effecten of afstraal gedrag. Om effect hiervan te kunnen zien op impuls response is signaal van de woofer 3dB hoger gemaakt in de simulatie. De verschillen in impuls response tussen een lineair fase Linkwitz-Riley 48d/oct en een brick-wall filter van met lengte 3200 is te zien in Figuur 17.



Figuur 17 Verschil in impuls response tussen LR48 (rood) en brick-wall (blauw) filter als woofer 3 dB gain heeft.

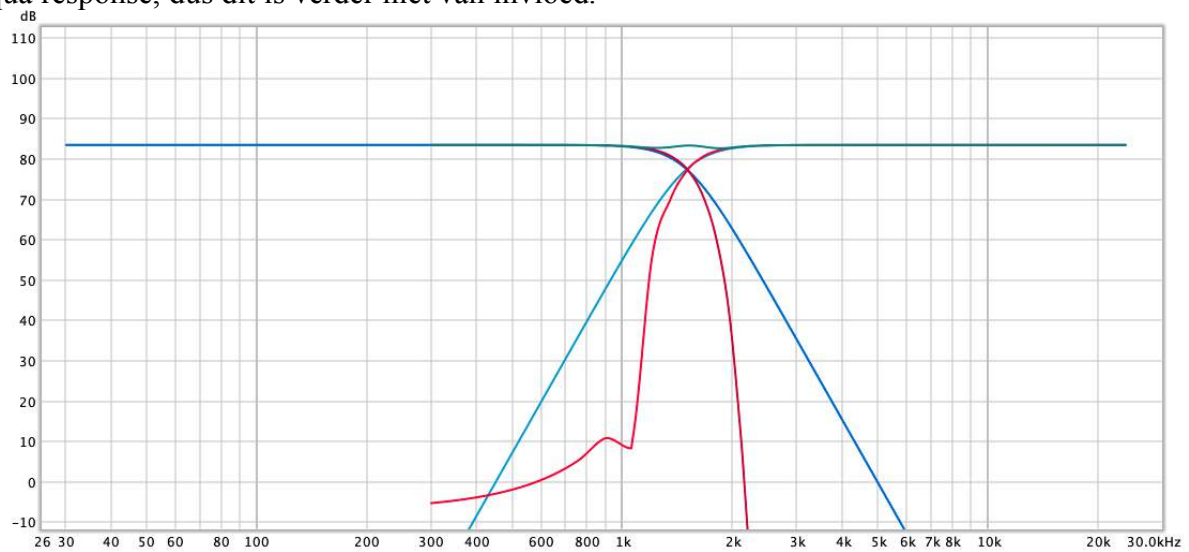
Het lijkt me duidelijk dat steile lineaire fase filters meer pre en post-ringing geeft als minder steile filters. Steilere filters hebben wel minder last van interferenties op frequentie response, omdat overgangsgebied smaller is. Wat betreft pre-ringing kun je dus het beste hele steile brick-wall achtige filters vermijden. Een lineair fase Linkwitz-Riley filter van 48dB/oct lijkt gezien de simulaties redelijk beperkte effecten te geven wat betreft pre-ringing.

Filter zoals gebruikt in mijn project

Nu heb ik voor mijn project geen gebruik gemaakt van Linkwitz-Riley filters en ook niet van een brick-wall filter. Nu zou een brick-wall filter met een FIR-filter lengte van 320 niet heel steil uitvallen. Maar ik heb binnen Rephase een filter type “Reject” gebruikt. Deze verloopt in het eerste stuk ongeveer als een Linkwitz-Riley en word daarna steiler.

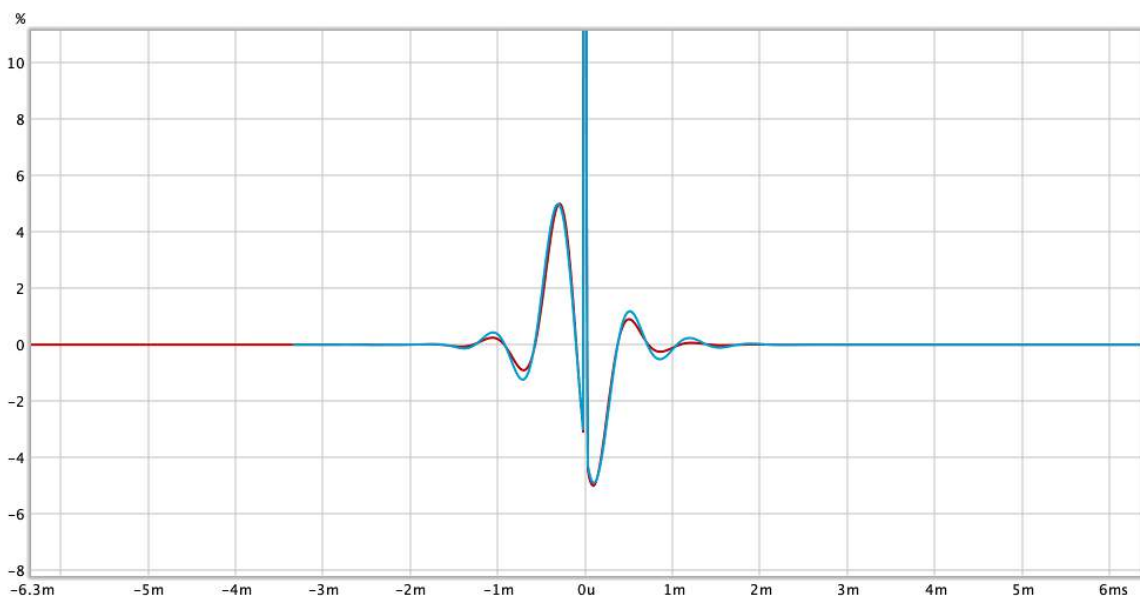
In Figuur 18 is te zien dat de frequentie response in overgangsgebied van de Reject 48 cross-over niet helemaal vlak verloopt. Maar dat curves uiteindelijk wel een stuk steiler verlopen

als de Linkwitz-Riley 48dB/oct filter. Beneden 1100Hz loopt de curve niet meer verder af, dit heeft te maken hebben met lengte van FIR-filter dat voor deze frequenties te kort is om deze goed te beïnvloeden. Signaal is dan al 70dB verzwakt en driver zal zelf ook gaan wegvallen qua response, dus dit is verder niet van invloed.



Figuur 18 In blauw de hoog en laag doorlaat filters met LR48 curve, in rood de Reject 48, in cyaan de sommatie van de twee Reject curves

Als we kijken naar Figuur 19 waar het ringing effect vergeleken wordt met een Linkwitz-Riley 48dB/oct filter dan zien we dat duur van ringing effect ongeveer gelijk is en dat op sommige plekken de magnitude wel meer is. Dus mocht het nodig zijn om steiler te filteren, om b.v. een driver zeker niet aan te sturen in een bepaald gebied, dan is dit zeker een geschikte cross-over curve. Het verslechteren van de ringing t.o.v. LR48 is beperkt en filter is toch flink steiler.

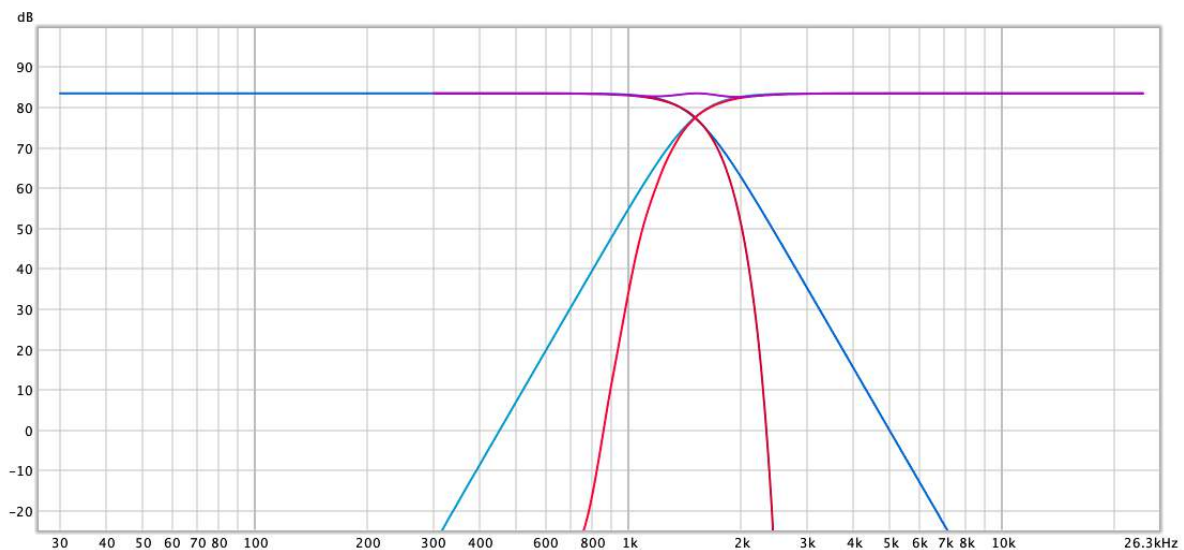


Figuur 19 De impuls responses met 0.2ms looptijd verschil, in rood de LR48 en in blauw voor de Reject 48 cross-over.

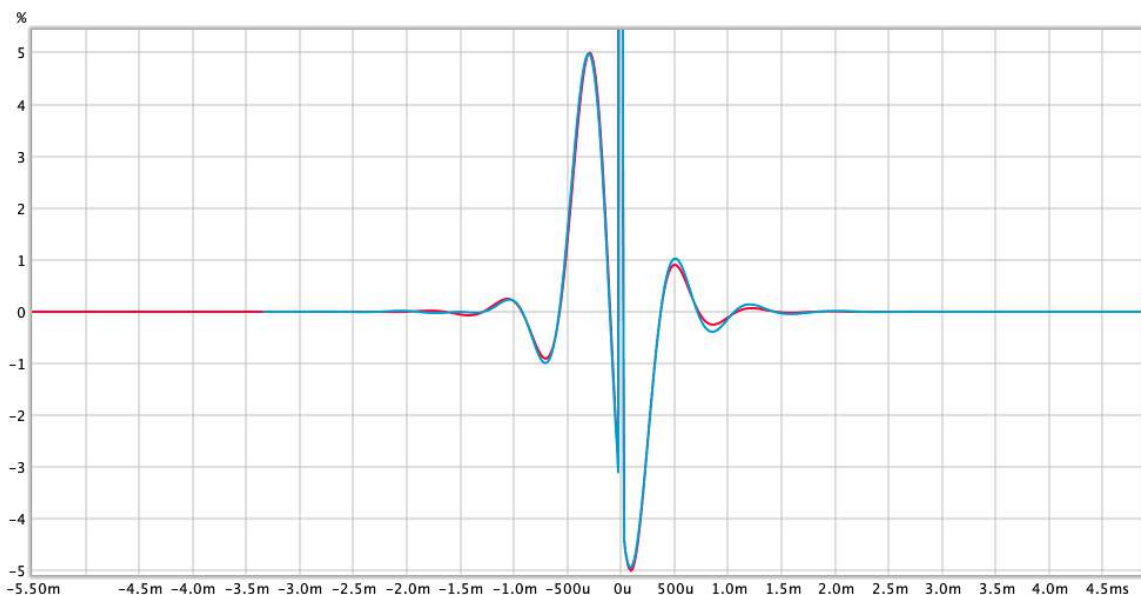
Andere mogelijke filter keuzes

Aangezien de Reject Low/High filter met parameter 48 het helemaal zo slecht niet doet wat betreft pre en post-ringing, vraag je je af wat effect zou zijn als je de filters met Reject wat minder steil zou maken. Die zou nog steeds steiler zijn als LR48 cross-over en wellicht nog dichter bij de LR48 wat betreft ringing.

Als we in Rephase met de Reject Low/High 36 setting filters genereren, dan lijkt dat heel bruikbare filters op te leveren. Filters zijn steiler als Linkwitz-Riley 48dB/oct, maar verschil in pre-ringing is zo goed als verwaarloosbaar. Wel is frequentie response in overgangsgebied minder vlak als met LR48 filter.



Figuur 20 Frequentie responses van LR48 in blauw en Reject 36 cross-over filters in rood, in paars de sommatie van Reject 36



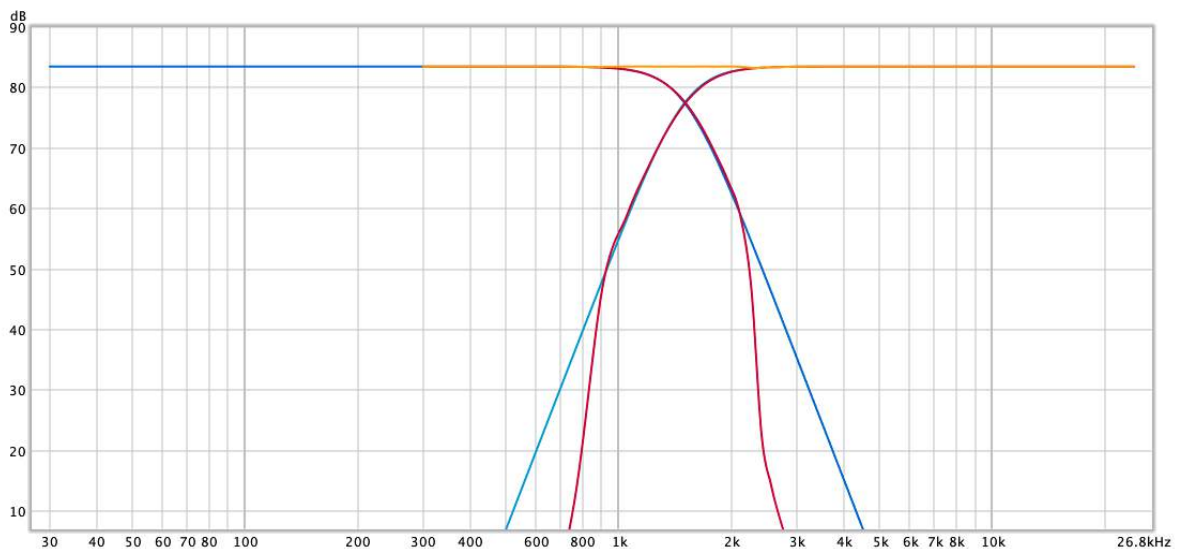
Figuur 21 De impuls responses met 0.2ms looptijd verschil, in rood de LR48 en in blauw voor de Reject 36 cross-over.

In Figuur 20 en Figuur 21 zie je de frequentie response en impuls response afgezet tegen de LR48 implementatie. Er zijn duidelijke verschillen in de frequentie response, maar de impuls responses zijn behoorlijk vergelijkbaar.

Je kunt in Figuur 20 zien dat verloop van de cross-over curves van de Reject 36 eerst vrijwel gelijklopen met die van de LR48 filters, om vervolgens steiler af te vallen. Tevens maakt Figuur 21 duidelijk dat de impuls responses vrijwel gelijke pre en post-ringing laten zien. Je vraagt je af of de hoeveelheid ringing niet met name afhangt van de steilheid van filter aan het begin. Dus een rustig verloop eerst en daarna mag het best steiler worden.

Aangezien je met een FIR-filter feitelijk zonder extra kosten filters kunt stappelen kan je ook een cross-over in twee stappen doen. Hiermee kunnen we kijken of je inderdaad verder van de cross-over frequentie steiler kunt gaan filteren, zonder een duidelijke verslechtering van met name de pre-ringing.

We gaan een cross over doen met een LR48 op 1.5kHz en vervolgens een brick-wall laagdoorlaat op 2.2kHz en een hoog doorlaat op 900Hz (alles lineaire fase). Zie Figuur 22 voor de resulterende filter curves. Let op deze Filter combinatie is gemaakt met een FIR-lengte van 320, dus de brick-wall is in dit geval duidelijk minder steil dan de eerder getoonde brick-wall met een FIR-lengte van 3200.



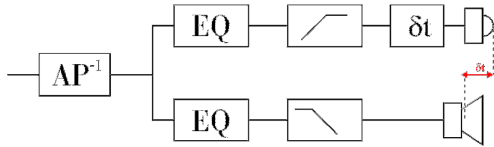
Figuur 22 In rood een combinatie van een LR48 en een brick-wall filter, in oranje de sommatie, in blauw LR48 ter referentie

De pre en post-ringing resultaten van deze cross-over filter in twee stappen, zijn identiek als die van het LR48 filter. Het heeft daarom geen zin om deze identieke figuren te laten zien, je kan dus gewoon naar de rode grafieken in Figuur 16, Figuur 17 en Figuur 19 kijken.

Dus mocht een Linkwitz-Riley 48dB/oct lineair fase filter niet steil genoeg zijn, dan is de Reject Low/High 36 een goed alternatief, waarbij je weinig inlevert wat betreft pre en post-ringing. De tweetraps aanpak geeft identiek pre en post-ringing resultaten, waarbij na bepaald punt de filters toch steiler worden. Moet het steiler dan is de Reject High/Low 48 van Rephase een goed alternatief, de pre-ringing blijft nog heel redelijk.

White paper Grimm Audio

Terug naar de aanpak zoals beschreven in de white paper van Grimm audio, waar Gerhard me naar doorverwees. Zij hebben een iets afwijkende aanpak van hoe ze hun DSP configureren, zie Figuur 23. Als er FIR-filters worden gebruikt, dan is dat vaak om er lineaire fase cross-over filters mee te implementeren.



Figuur 23 Block diagram van de DSP in de LS1 van Grim Audio

Bij Grimm audio hebben ze een andere aanpak, ze doen de cross-over met een minimum fase Linkwitz-Riley filters. En gebruiken ze een FIR-filter op ingang om optioneel de fase draaiing van de IIR LR filters “terug” te draaien. Er werd gesuggereerd, of althans zo begreep ik het, dat door de aanpak met de fase linearisatie met FIR-filter op ingangssignaal en de IIR-filters voor de cross-over er minder pre-ringing zou zijn.

De vraag is, of dit wat betreft pre/post-ringing een wezenlijk ander resultaat geeft, dan het implementeren van de cross-over in FIR-filters wat voor sommigen misschien meer voor de hand ligt.

We zullen uitgaan van block diagram van Figuur 23 en dit gaan simuleren en dit stap voor stap ombouwen richting een andere configuratie en kijken of er ergens iets veranderd wat betreft resultaat.

Voor het gemak zijn er geïdealiseerde luidspreker modellen gebruikt. Zodat de EQ blokken niet nodig zijn. Een golvende frequentie response leidt ook af, van waar het om gaat en afwijkingen van een strakke rechte lijn vallen ook meer op.

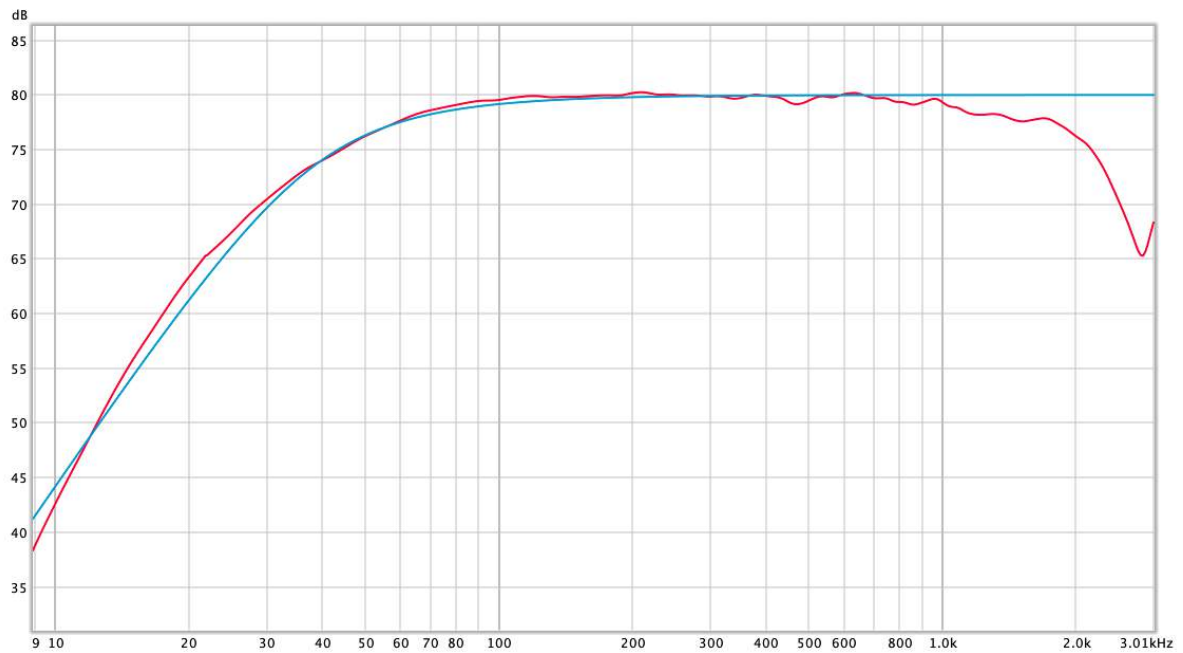
Omdat fase verloop van drivers wel enigszins van belang is in cross-over gebied, hebben de gebruikte luidspreker modellen in de simulatie wel een laag afval en een daarbij behorende fase draaiing.

De gebruikte simulatiemodellen

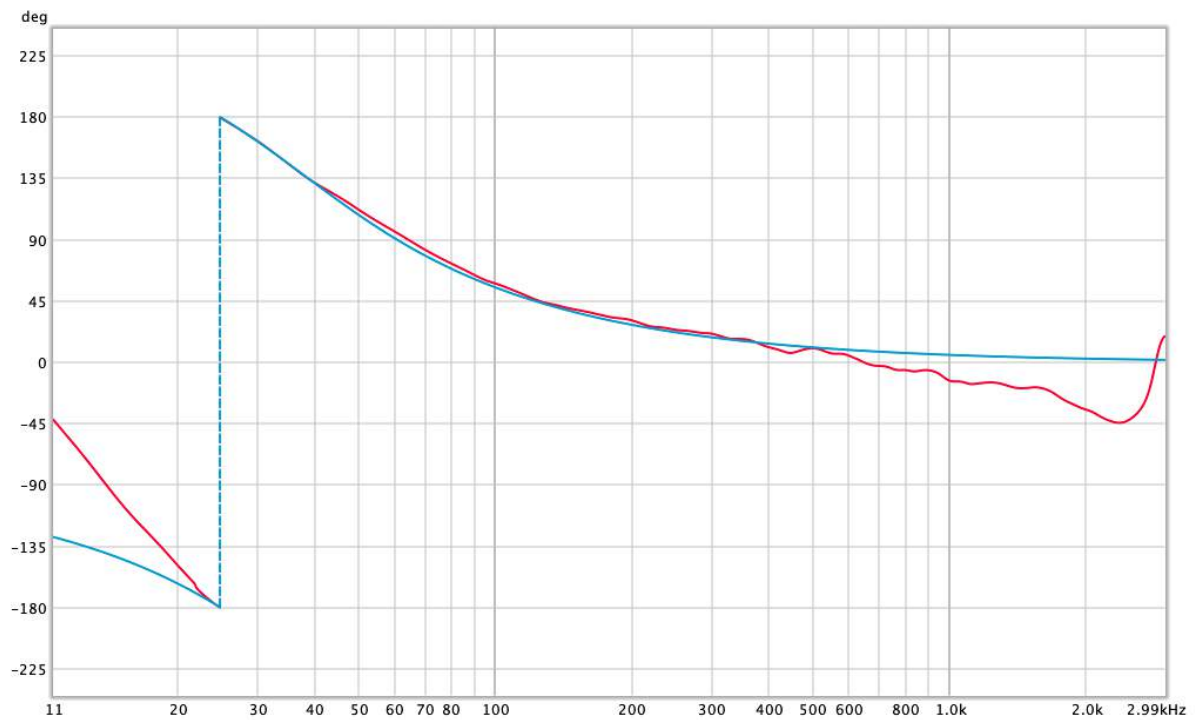
Ben voor opstellen van een wat geïdealiseerd model van de drivers uitgegaan van de drivers van mijn recente project. Dit zijn de Dayton Audio RS180-4 voor de woofer en de SB Acoustics SB26ADC-C000-4 voor de tweeter.

De drivers zijn verder niet echt relevant, het gaat er meer om dat er met een enigszins realistisch model gewerkt wordt, zonder de afleiding van de schommelingen van een echte frequentie response. Tot een bepaalde hoogte zal je de frequentie response vlak proberen te maken met een minimum fase EQ.

Vanwege de vlakke response in het werkgebied van de driver modellen, kunnen we block diagram dus vereenvoudigen en de EQ-blokken weglaten uit de simulatie van de Grimm Audio aanpak. Tevens kan delay compensatie van de tweeter weggelaten worden in dit geïdealiseerd model.

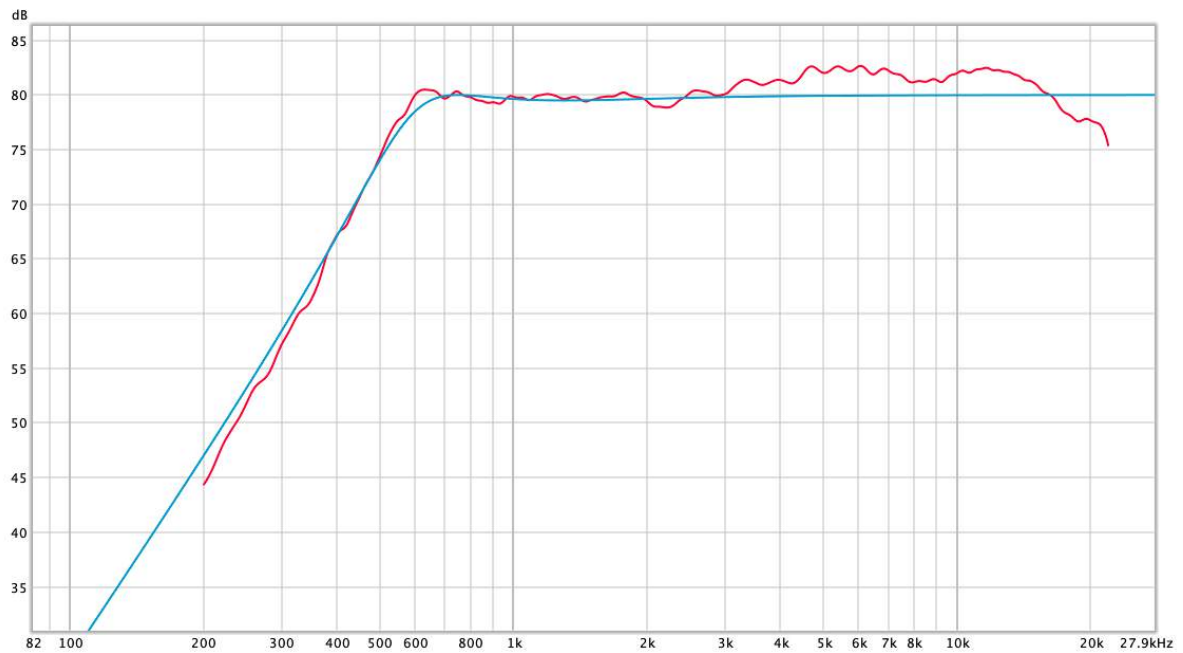


Figuur 24 In rood de frequentie response van een dichtbij meting van de RS180-4 en in blauw het model dat gebruikt gaat worden

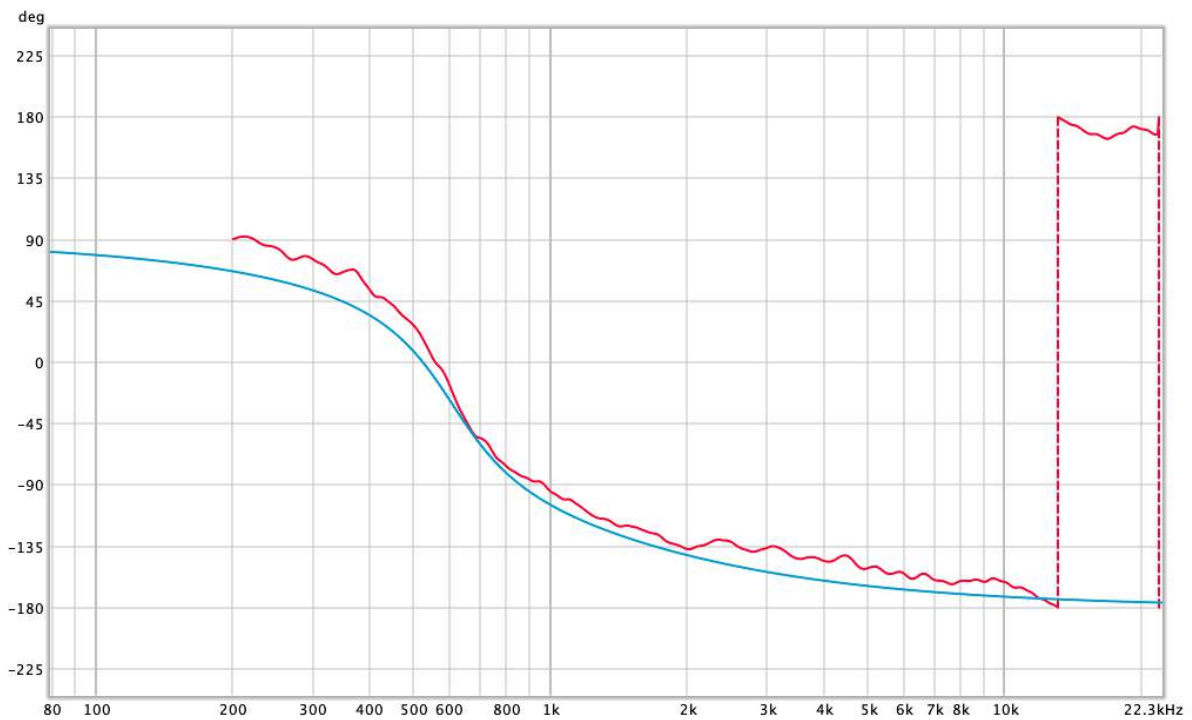


Figuur 25 De gemeten fase response van RS180-4 in rood en model in blauw

In Figuur 24 en Figuur 25 zie we de dichtbij meting van de RS180-4 en het afgeleide model, dat gebruikt gaat worden in de simulatie. Boven de 600Hz wijkt de gemeten fase af van model, maar de frequentie response ook. Als met minimum fase EQ de frequentie response vlakker wordt gemaakt, dan zal de fase ook vrijwel met die van model overeen gaan komen.



Figuur 26 In rood de frequentie response van een meting van de SB26ADC-C004 en in blauw het model dat gebruikt gaat worden



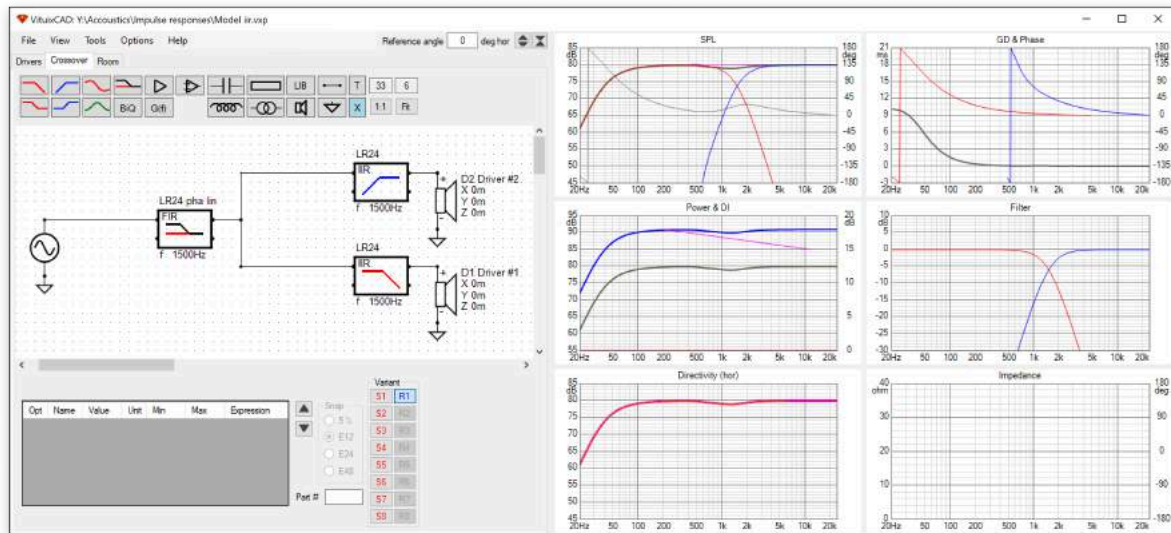
Figuur 27 De gemeten fase response van SB26ADC-C004 in rood en model in blauw

Figuur 26 en Figuur 27 laten de metingen van een tweeter zien en het “ideale” afgeleide model. Ook hier geldt dat minimum fase EQ de grafieken dichtter bij elkaar zal brengen.

De echte metingen zijn alleen maar gebruikt ter referentie, zodat de gebruikte modellen voor de simulatie een enigszins realistisch fase verloop hebben. Het kunnen omgaan met fase verloop en het op elkaar afstemmen hiervan, is hoe dan ook een ding om bij een cross-over rekening mee te houden. Vandaar dat dit aspect wel meegenomen wordt in de simulaties.

De simulaties

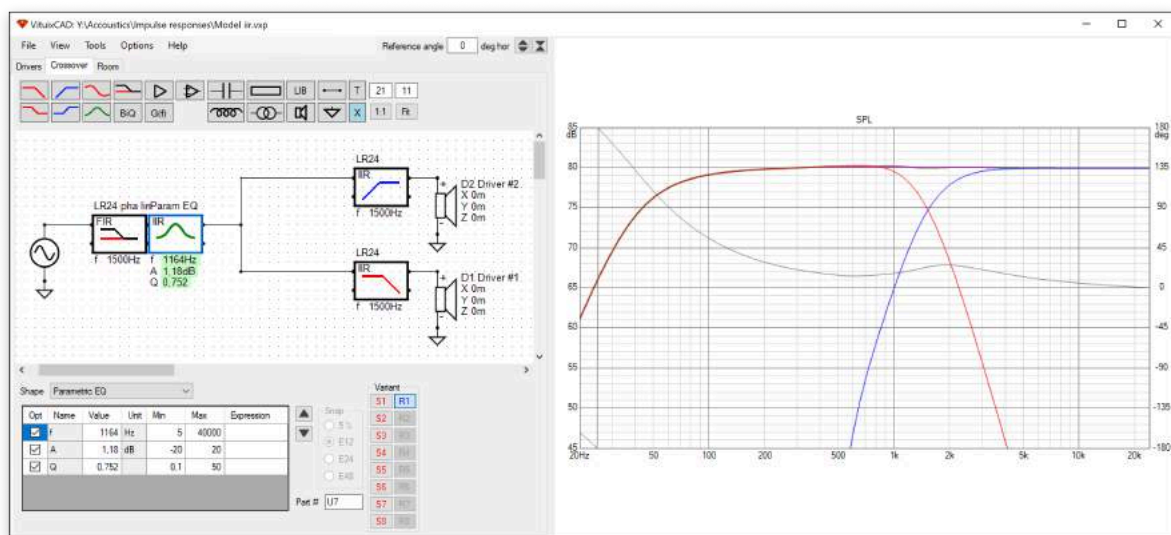
De simulaties zijn gedaan in VituixCAD, wat betreft simulaties voor cross-over filters, actief of passief is dit programma zeker aan te bevelen.



Figuur 28 De uitgangssituatie die vergelijkbaar is met die van Grimm audio

In Figuur 28 zien we schema wat overeenkomt met de aanpak van Grimm Audio. De EQ-blokken zijn weggelaten, omdat we werken met een geïdealiseerd model voor de drivers. Tevens is er in deze ideale omgeving geen looptijd compensatie nodig voor de tweeter.

Er is een dipje rond de overname frequentie, dit komt omdat de fase van de drivers niet t.o.v. elkaar zijn afgestemd rond de overname frequentie. Het zou zomaar kunnen dat Grimm Audio hier wel een voorziening voor heeft. Maar om verhaal eenvoudiger te houden hebben weggelaten uit blokdiagram.

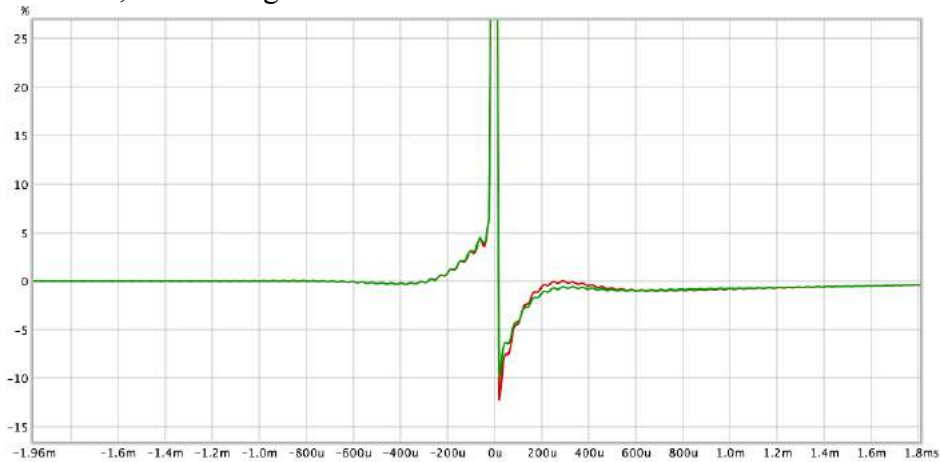


Figuur 29 Met een Parametrisch EQ kan dipje worden recht getrokken

In Figuur 29 is met een EQ de onregelmatigheid in de frequentie response vlakker gemaakt. De parameters die in groen zijn weergegeven en waar dus een vinkje in de “opt” kolom staat kun je automatisch laten bepalen/optimaliseren door VituixCAD, dit is een handige optie.

Aan fase verloop kun je nog steeds zien dat er iets is rond de cross-over ook al is de frequentie response hier redelijk vlak.

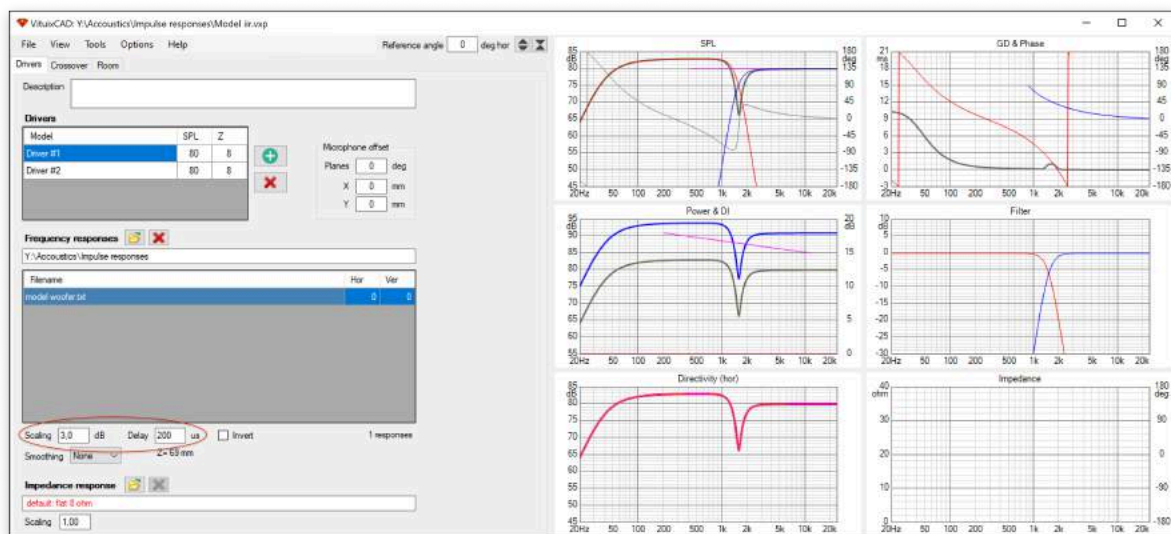
We hebben hiervoor al gezien dat als beide kanten van een symmetrische cross-over goed optellen, dat je dan een ‘perfecte’ impuls response krijg. Doordat fase verloop van drivers onderling, in cross-over niet goed gelijkloopt, is er pre en post-ringing. De EQ trekt wel de frequentie response recht, maar is een minimum fase filter en zal alleen het post-ringing stuk veranderen, zie ook Figuur 30.



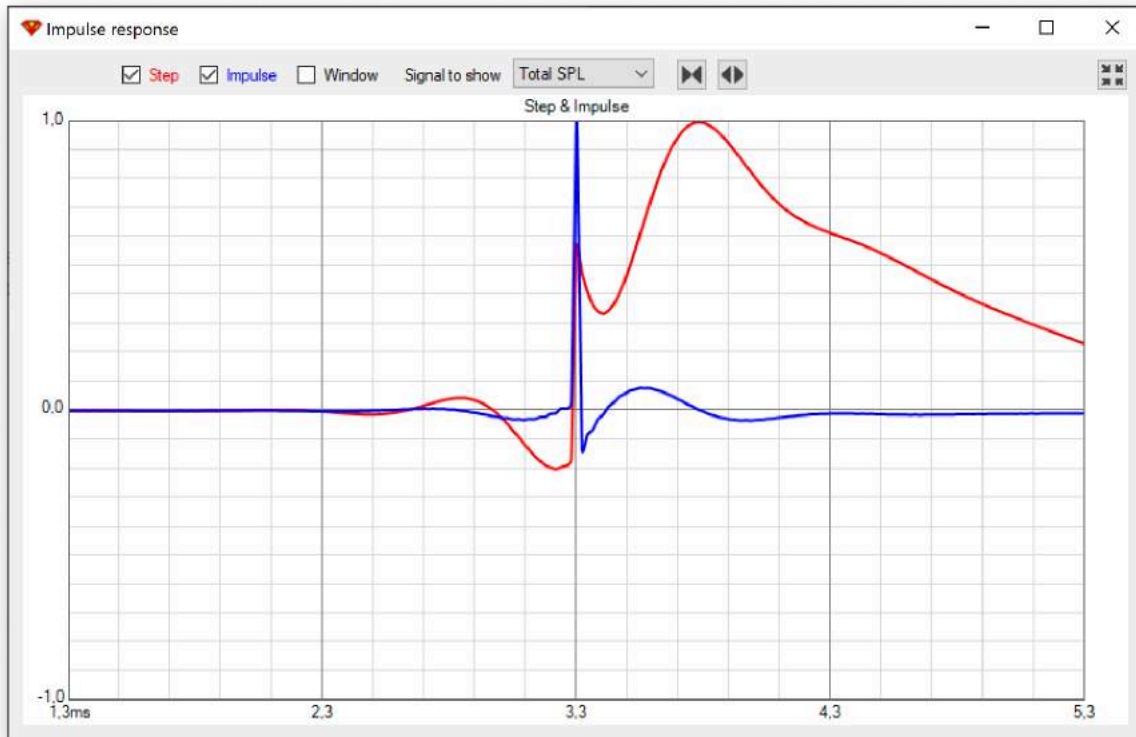
Figuur 30 Impuls response, rood zonder correctie cross-over dip, groen met correctie

Het EQ-blokje wordt verder weggelaten, we willen onderzoeken of er iets is in de opzet van de FIR en IIR-filters van Grim Audio, waardoor het effect van pre-ringing anders/minder zou zijn dan die van cross-over met twee FIR-filters.

Om pre/post-ringing wat zichtbaarder te maken, worden de LR24 filters veranderd in LR48 en ook de fase compensatie in FIR-filter van LR24 naar LR48. Als pre/post-ringing beter zichtbaar is, dan is ook sneller te merken of er een verschil optreedt als schema aangepast wordt. De woofer krijgt een delay van 200uS en een gain van 3dB, zodat er duidelijk pre/post-ringing is, het verloop hiervan dan kan gemonitord worden. Dit simuleert een slechte luisterpositie, waarbij de ringing effecten in impuls response zichtbaar moeten zijn.



Figuur 31 De beginsituatie, waarbij pre/post-ringing zichtbaar zijn, gain en delay van woofer driver aangepast

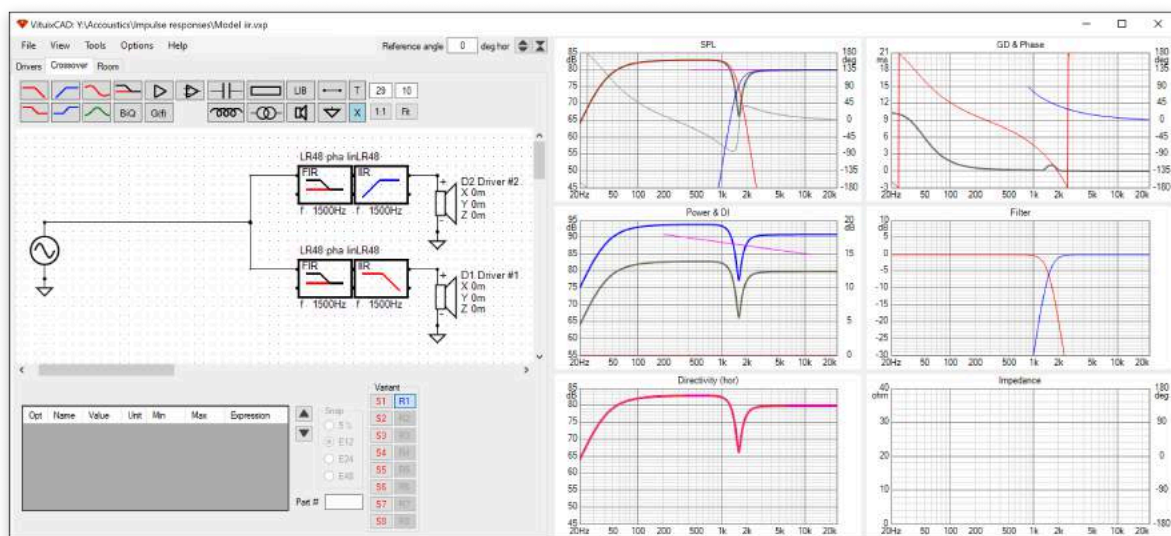


Figuur 32 De impuls en step response van de beginsituatie zoals VituixCAD laat zien

Figuur 32 laat zien dat door het aanbrengen van delay en gain in signaal pad van woofer dat er duidelijk pre en post-ringing is, dat we kunnen monitoren.

Naar mijn gevoel hebben FIR en IIR-filters net als getallen commutatieve en associatieve eigenschappen. Dus $A+B=B+A$ en $C(A+B)=AC+BC$ etc. We gaan hiermee aan de slag om block diagram aan te passen en kijken of er iets aan de response veranderd.

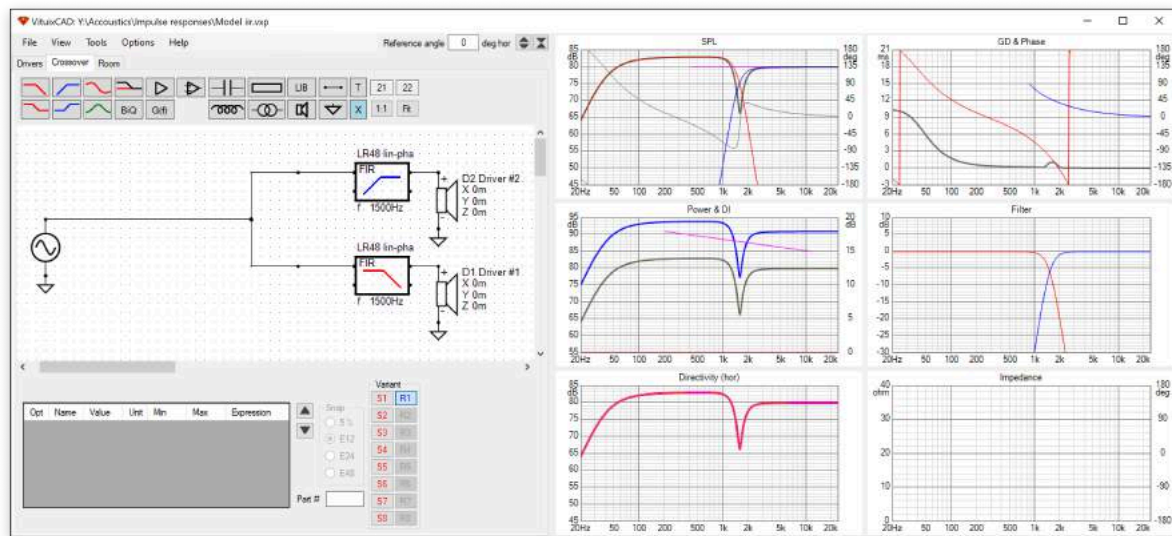
Eerst verplaatst het FIR-filter dat de fase linearisatie doet voorbij de signaal splitsing.



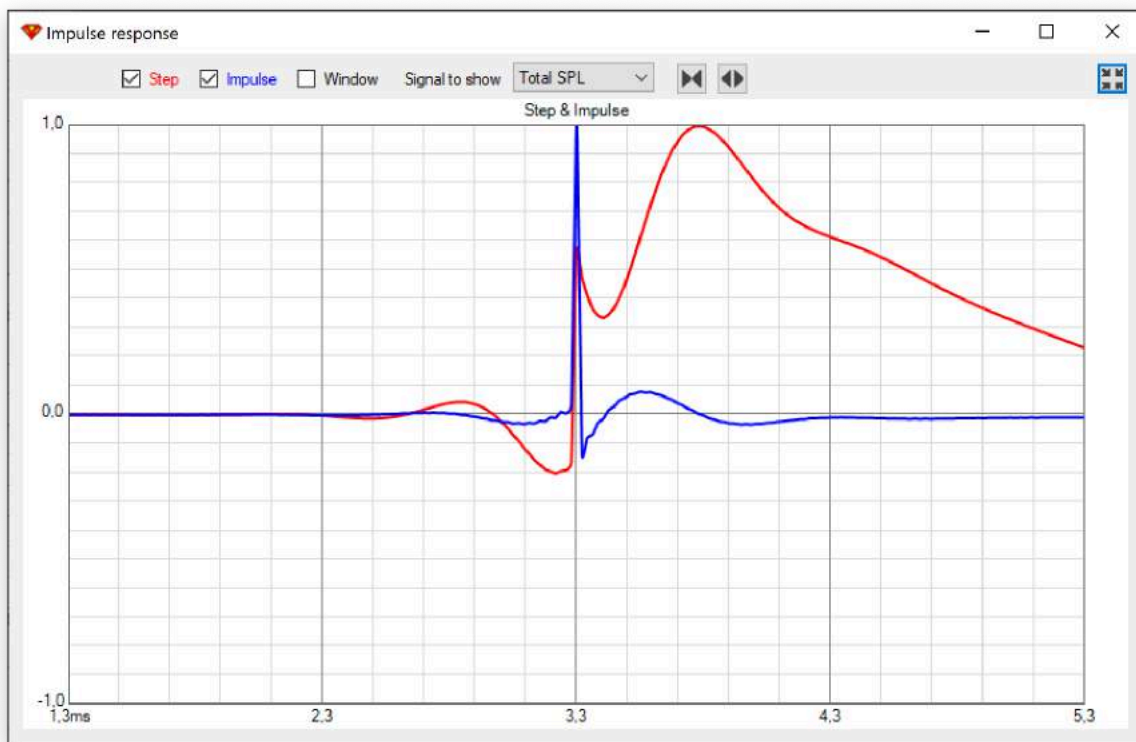
Figuur 33 De eerste stap van de aanpassing

De impuls en step response van deze aanpassing worden achterwege gelaten, want die zijn geheel volgens de verwachting ongewijzigd.

De volgende stap is om de combinatie van FIR-filter met fase linearisatie en IIR-filter met LR48 cross-over te vervangen door een FIR-filter met een lineaire fase LR48 cross-over filter.



Figuur 34 De volgende stap in het ombouwen van blockdiagram



Figuur 35 De impuls en step response na de ombouw van FIR+IIR filter naar FIR-filter

Het lijkt me duidelijk dat het gebruik van alleen een fase linearisatie FIR-filter op de ingang en IIR-filters voor de cross-over niets brengt wat betreft pre/post-ringing. Na de ombouw van dit schema naar een equivalent schema met twee FIR-filters blijft de impuls en step response identiek.

Wat bijdraagt aan het beperken van de pre-ringing is het gebruik van een beperkte steilheid van cross-over filter. Dit is verder een goede aanpak er zijn bepaalde curves voor pre-masking en een lineair fase LR48 blijft daarbinnen en een LR24 zal daar zeker binnen vallen. Hierdoor is niet te verwachten dat de geringe pre-ringing hoorbaar zou zijn.

Het relatief steile Reject 48 cross-over filter valt ook nog binnen de pre-masking hoorbaarheids drempel. Een brick-wall filter met FIR-lengte van 3200 niet. Dit komt min of meer overeen met de conclusies die getrokken worden in: "Perceptual Study of Loudspeaker Crossover Filters"

"...Hence, pursuing of the "ideal" reproduction of a signal seems to be good on the paper, but perceptual tests, with headphone simulation and a real loudspeaker, show that hearing clearly perceives ringing degradations in the audio quality with both analytical and real life signals. Rough safety limits according to both test methods would be to keep the order of a linear phase FIR crossover filter under 600 at higher frequencies (1 and 3 kHz) to prevent from the ringing phenomenon producing audible errors. At low frequencies, such as 100 Hz and 300 Hz, the order may be up to thousands, and still no audible errors will occur....."

Hoe er rekening mee dat in deze studie er alleen gewerkt werd met brick-wall filters en dat de steilheid werd gevarieerd door de lengte van een FIR-filter te veranderen. Een brick-wall filter met FIR-lengte van 600 is steiler dan een Reject 48 filter. Dus als dat filter niet hoorbaar is, dan zijn de Reject 48, LR48 en LR24 zeker niet hoorbaar.

Is daarmee de Grimm Audio aanpak niet goed? Naar mijn mening zeker niet! Door FIR-filter alleen op ingangssignaal toe te passen bespaar je duidelijk op DSP-resources. Als je bepaalde frequenties wil beïnvloeden met FIR-filter, dan is daar een bepaalde lengte voor nodig. Stel dat een lengte van 500 nodig is gegeven de cross-over frequentie, dan is in de Grim aanpak maar één FIR-filter van die lengte nodig. Als je de cross-over in de FIR-filter onderbreng, dan zijn er twee van die lengte nodig.

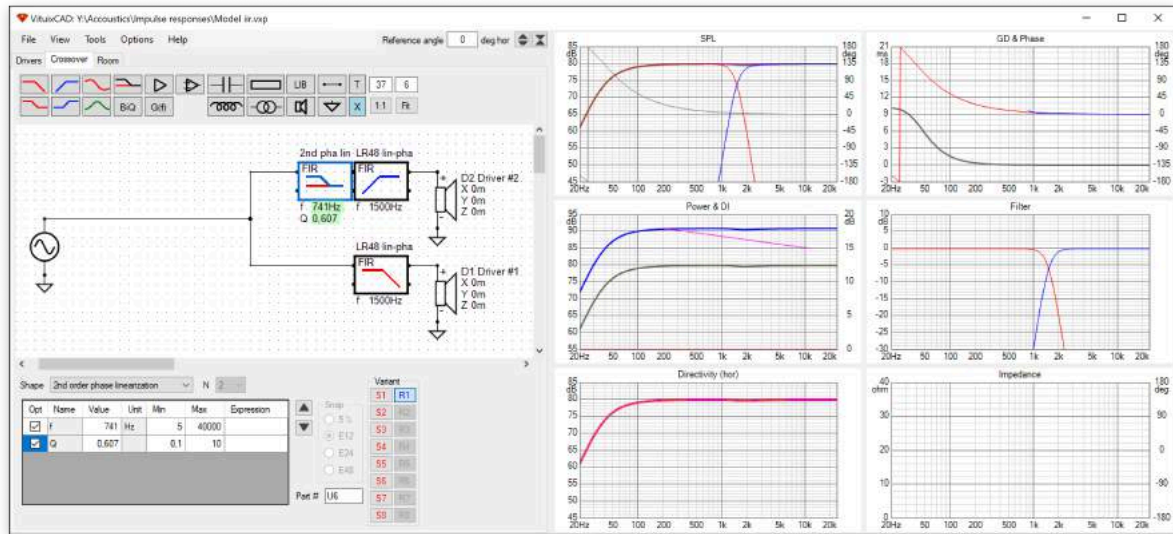
Een IIR-filter om de cross-over te doen kost maar een paar biquads en is dus veel goedkoper in resources dan een extra FIR-filter. Voor de tweeter zou je ook de minimum fase EQ-correctie en delay compensatie in FIR-filter kunnen onderbrengen, maar zelfs dat weegt niet op tegen het extra FIR-filter dat nodig zou zijn.

Dus vanuit resource oogpunt is het een hele goede en slimme aanpak. De aanpak heeft ook een ander voordeel. Een FIR-filter geeft altijd een vertraging en dat is niet altijd wenselijk. Door deze aanpak kun je het FIR-filter optioneel overslaan en heb je nog steeds een erg goed werkend systeem zonder de additionele delay.

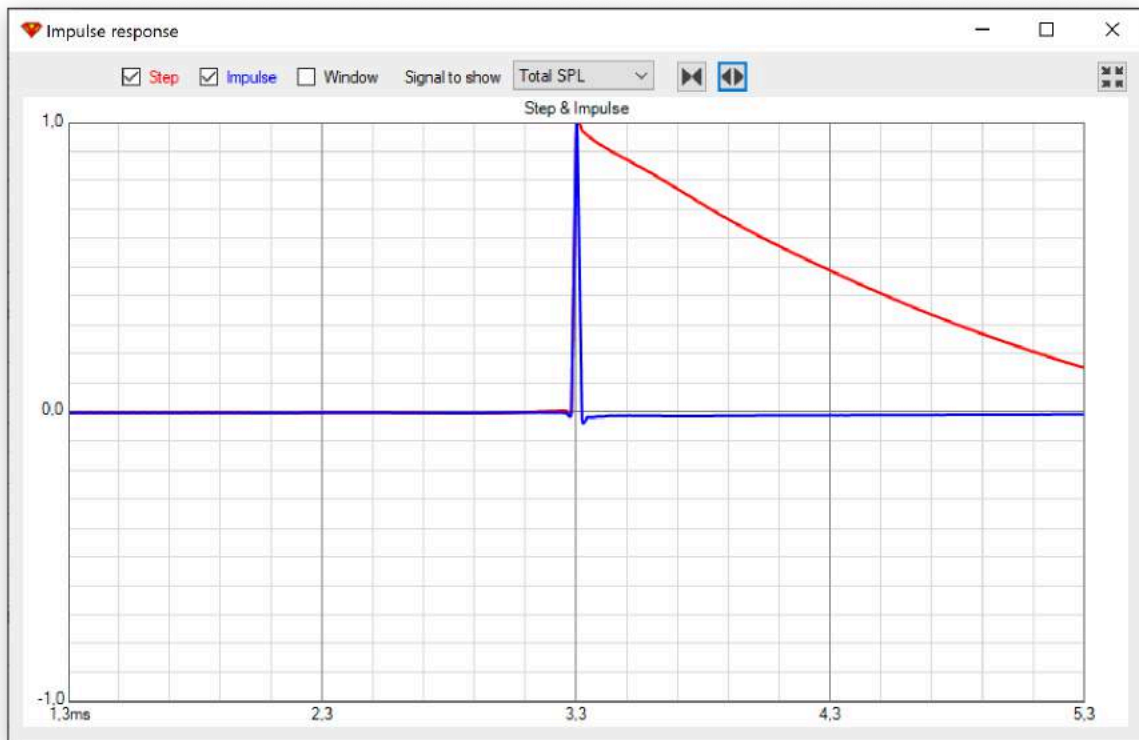
Het is dus een hele goede aanpak, maar het brengt niet iets wat betreft pre-ringing (als de fase linearisatie ingeschakeld is). Het gedraagt zich dan identiek als een systeem met een lineair fase cross-over in twee FIR-filters, met hetzelfde type heling.

Fase afstemming in cross-over gebied

Wat nu als we de fase in cross-over gebied op elkaar afstemmen.

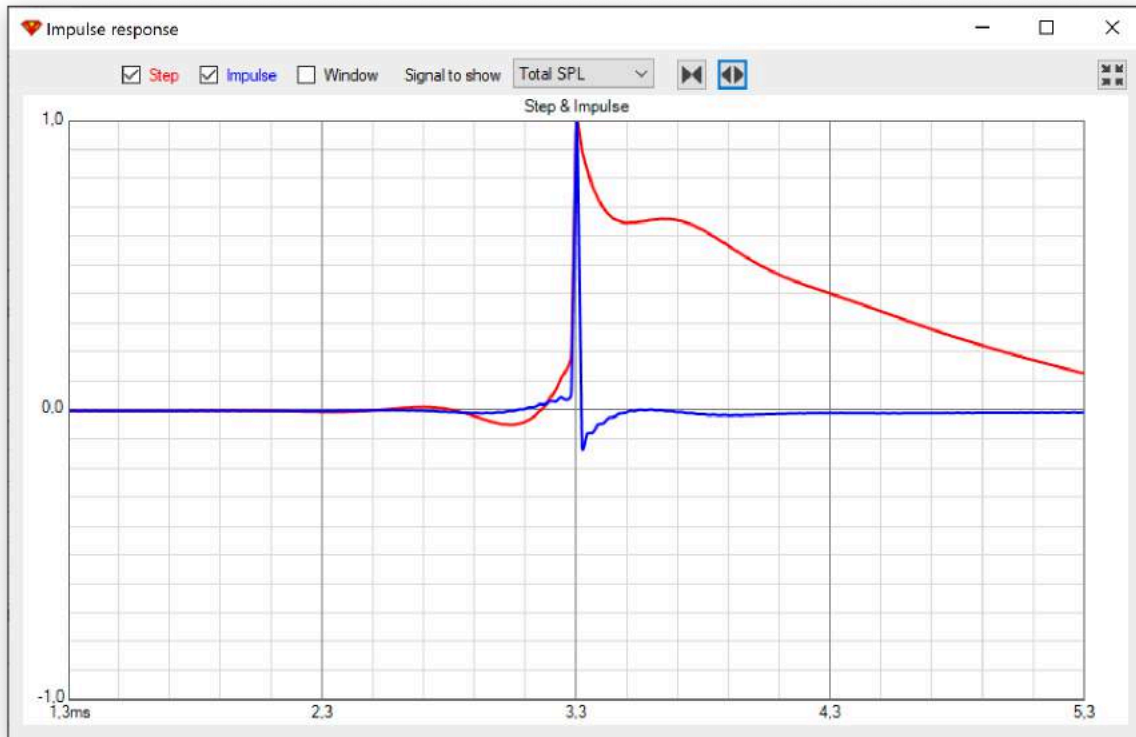


Figuur 36 De fase van tweeter aangepast op verloop woofer



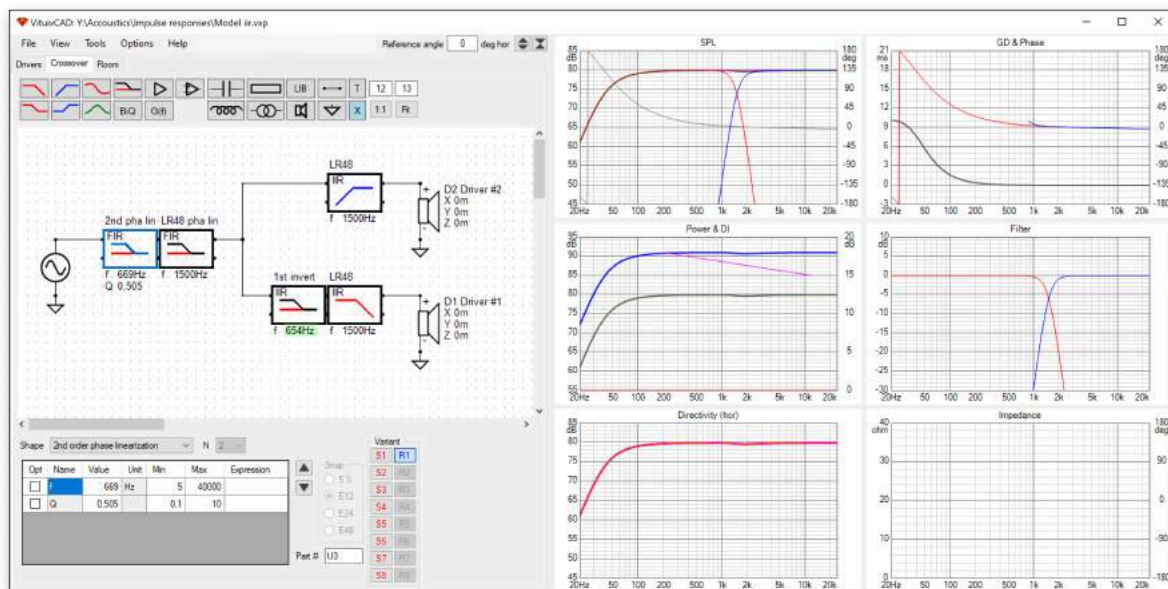
Figuur 37 De impuls en step response na fase aanpassing

Bij de implementatie met twee FIR-filters voor cross-over is het eenvoudig om in filter van tweeter zowel de cross-over als fase aanpassing te doen. In VituixCAD zijn het twee blokken, maar in de praktijk kan het gewoon samen in hetzelfde FIR-filter. De impuls en step response van Figuur 37 kan je vergelijken met Figuur 38 en ook met Figuur 30.



Figuur 38 De impuls en step response zonder de fase correctie van tweeter

Als we de fase correctie van tweeter met de cross-over in twee FIR-filters willen vertalen naar een enkel FIR-filter, zoals Grimm Audio ons laat zien, dan komen we uit op volgende schema.



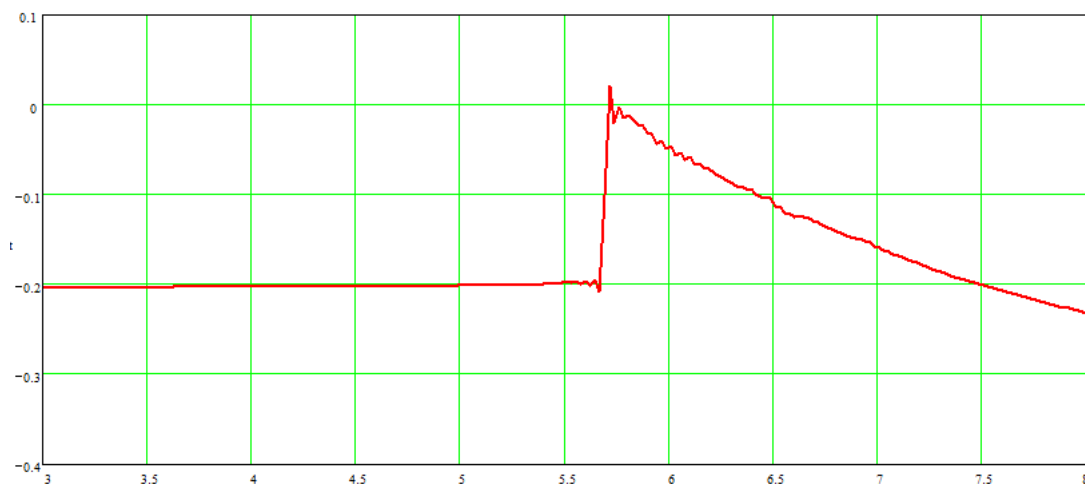
Figuur 39 Afstemming van fase verloop tussen woofer en tweeter

Als we geen FIR-filter kunnen gebruiken om fase van tweeter naar die van de woofer te brengen, dan moeten we een IIR “all pass” filter toepassen. Een “all-pass” filter kan de fase niet “terug” draaien, maar alleen “heen”. De aanpassing verplaatst zich dus naar de woofer, zodat die zich aanpast aan de tweeter. Verder wordt deze fase verdraaiing eventueel weer teruggedraaid in het FIR-filter aan de input.



Figuur 40 De impuls en step response met afgestemde fase in cross-over gebied.

Gezien de gepubliceerde step response in de whitepaper van Grimm Audio vermoed ik dat er een fase correctie toegepast is. Want de response, zie Figuur 41, lijkt veel meer op het ideale plaatje van Figuur 40 dan op Figuur 38. Vermoedelijk is dit detail voor het gemak en leesbaarheid weggelaten uit het whitepaper.

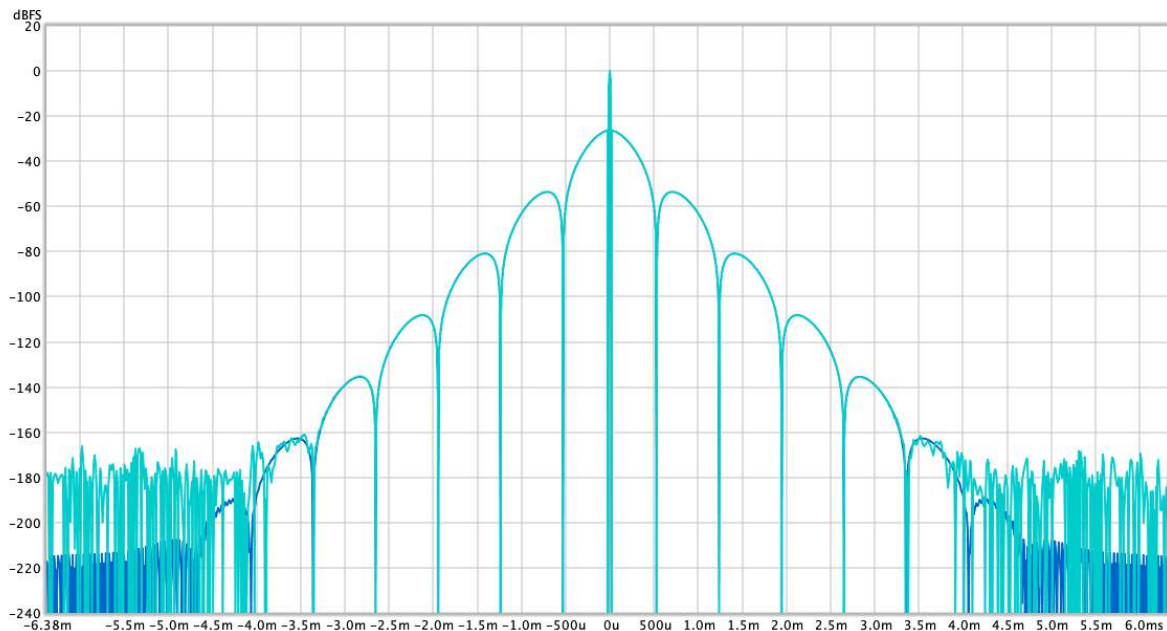


Figuur 41 Step response zoals gepubliceerd in Grimm Audio whitepaper

Alternatieve verificatie omzetting FIR + IIR = FIR

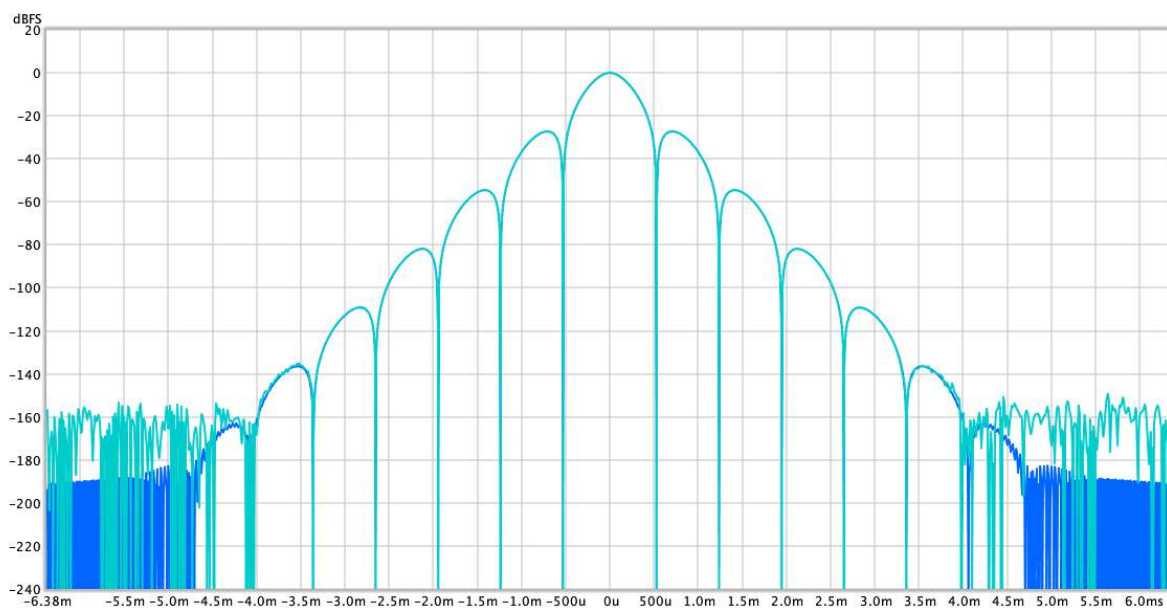
Als alternatieve verificatie genereren we een minimum fase Linkwitz-Riley 24dB/oct hoog doorlaat FIR-filter en een fase linearisatie FIR filter voor dezelfde cross-over frequentie. Deze twee filters importeren we in REW en daar nemen we de convolutie van (A*B).

Tevens maken we een lineair fase Linkwitz-Riley 24dB/oct hoog doorlaat FIR-filter en importen deze tevens in REW en we vergelijken de impuls responses hiervan met de gegenereerde impuls response (A*B).



Figuur 42 Vergelijk van twee impuls responses, in lichtblauw de minimum fase convolutie met de fase linearisatie, in donkerblauw de LR24 linear fase filter

Pas beneden de -160dB zijn er verschillen te zien, dit is ver beneden enige hoorbaarheid drempel en komt door afronding verschijnselen. Bij zelfde handeling voor laag doorlaat filter zijn er verschillen rond de -160dB en er iets boven.



Figuur 43 Zelfde als vorige figuur, maar nu voor laag doorlaat filter i.p.v. hoog doorlaat filter

Verificatie met Temporal Masking curves

In “Pre- and Post Ringing Of Impulse Response”

http://www.bodziosoftware.com.au/Pre_Post_Ringing_IR_And_Pulses.pdf

Wordt gekeken aan de hand van de impuls response en temporal masking curve of er hoorbare artefacten te verwachten zijn van bepaalde filters.

De temporal masking curves zijn ontleend aan:

<http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/373398B-01/svaconcepts/svtimeMask/>

Deze curves zijn ooit in onderzoek bepaald zijn en hebben ongeveer de volgende vorm:

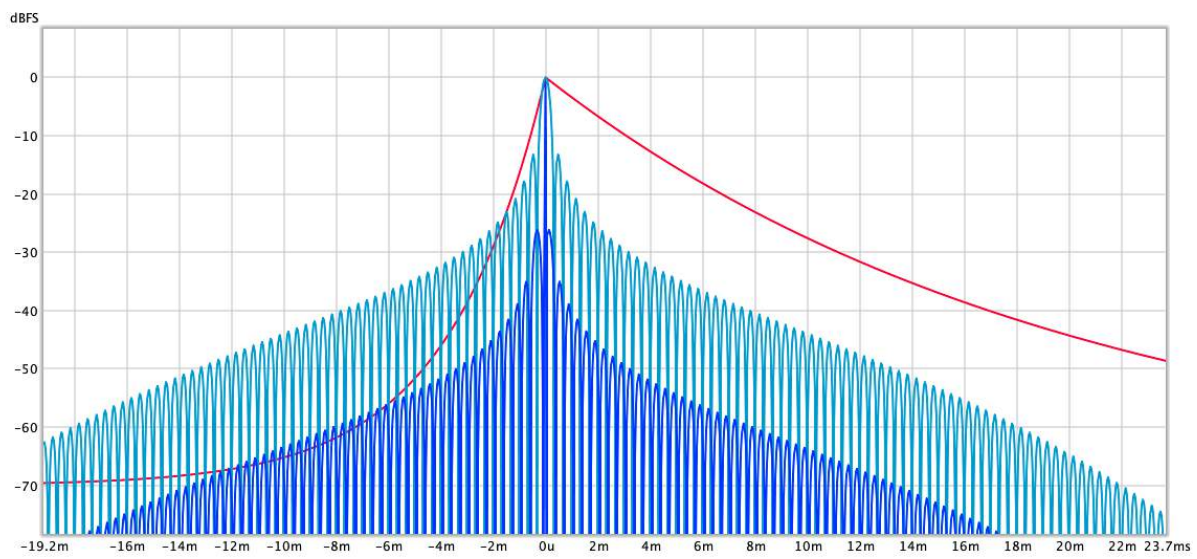
$$Y_{dB\ pre_mask} = -50 \times (1 - e^{270 \times t})$$
$$Y_{dB\ post_mask} = -50 \times (1 - e^{-50 \times t})$$

In “Pre- and Post Ringing Of Impulse Response” zijn deze curves verder naar beneden bijgesteld om een extra veiligheidsmarge aan te brengen en hebben de volgende vorm:

$$Y_{dB\ pre_mask} = -70 \times (1 - e^{270 \times t})$$
$$Y_{dB\ post_mask} = -70 \times (1 - e^{-50 \times t})$$

Die curves heb ik nagebouwd en als impuls response in REW gebracht en via de overlay functie is dan snel te verifiëren of er problemen te verwachten zijn met een bepaald filter.

Brick-wall lineaire fase filter, FIR-lengte 3200



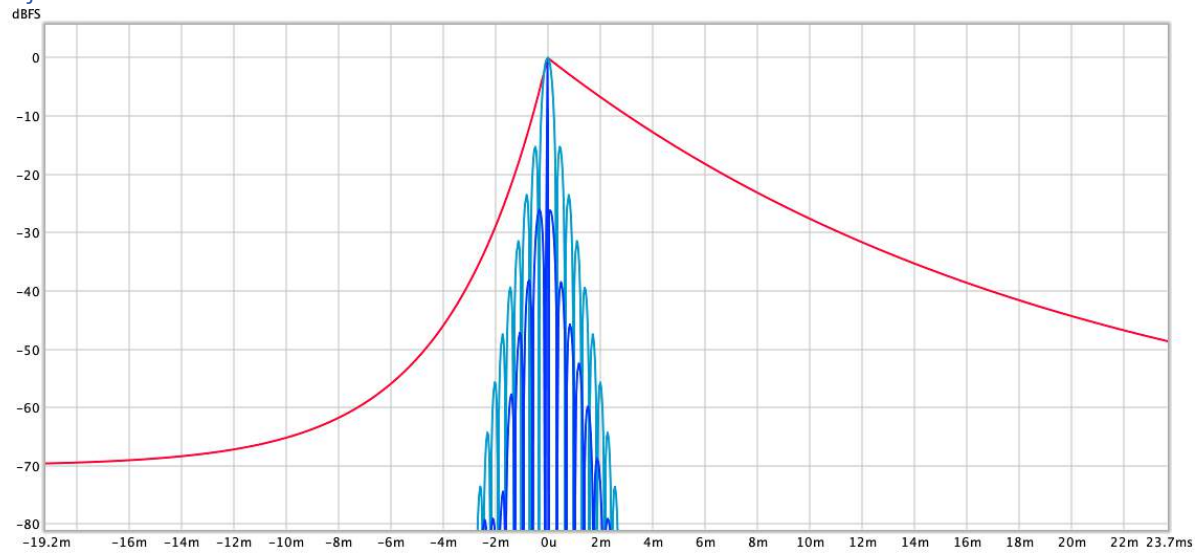
Figuur 44 Het brick-wall FIR-filter in blauw en in rood de temporal masking curve

In Figuur 44 is in licht blauw de impuls response van het laagdoorlaat filter gedeelte van een 3200 lang brick-wall FIR-filter. Het hoog doorlaat filter heeft lagere pre en post-ringing en laten we dus weg. In donkerblauw de impuls response van een niet optimale sommatie van hoog en laag doorlaat filter samen. Signaal naar woofer is 0.2ms vertraagd in deze simulatie.

Dit is maar een bepaalde simulatie er zijn misschien andere niet ideale sommaties mogelijk die slechter uitvallen in de praktijk. Vandaar dat het ook van belang is te kijken naar gedrag van laag doorlaat filter, dit geeft een beetje de maximale mogelijk fout aan.

Het is dus duidelijk dat de pre-ringing van een 3200 lang brick-wall FIR-filter een probleem kan opleveren.

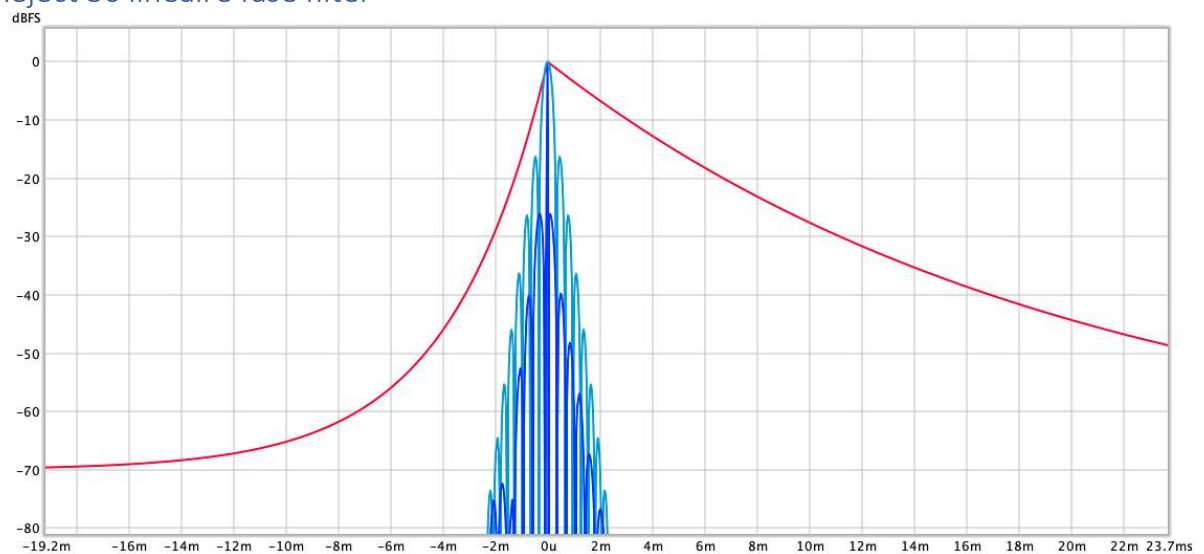
Reject 48 lineaire fase filter



Figuur 45 Reject 48 filter in blauw en in rood de temporal masking curve

Volgens Figuur 45 zal het pre-masking en post-masking effect de pre en post-ringing maskeren en dus niet hoorbaar zijn. Ook nu weer het laagdoorlaat filter in lichtblauw en een foute sommatie simulatie in donkerblauw (vertraging woofer 0.2ms). In de volgende grafieken zal dit ook weer zo zijn, zodat grafieken goed vergeleken kunnen worden.

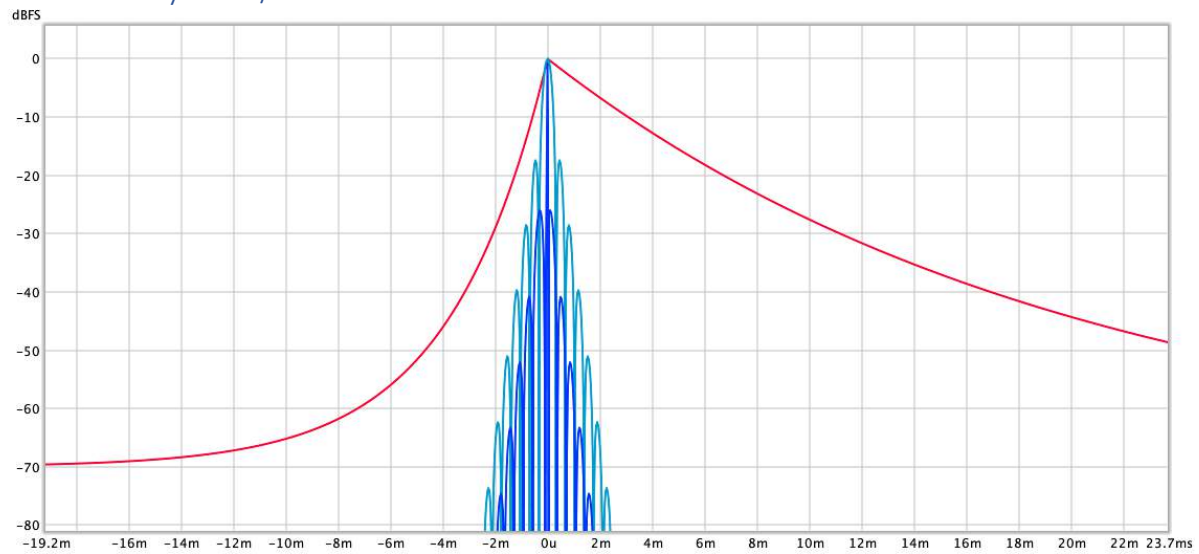
Reject 36 lineaire fase filter



Figuur 46 Reject 36 filter in blauw en in rood de temporal masking curve

Het Reject 36 filter blijft nog wat verder weg van gevarenzone.

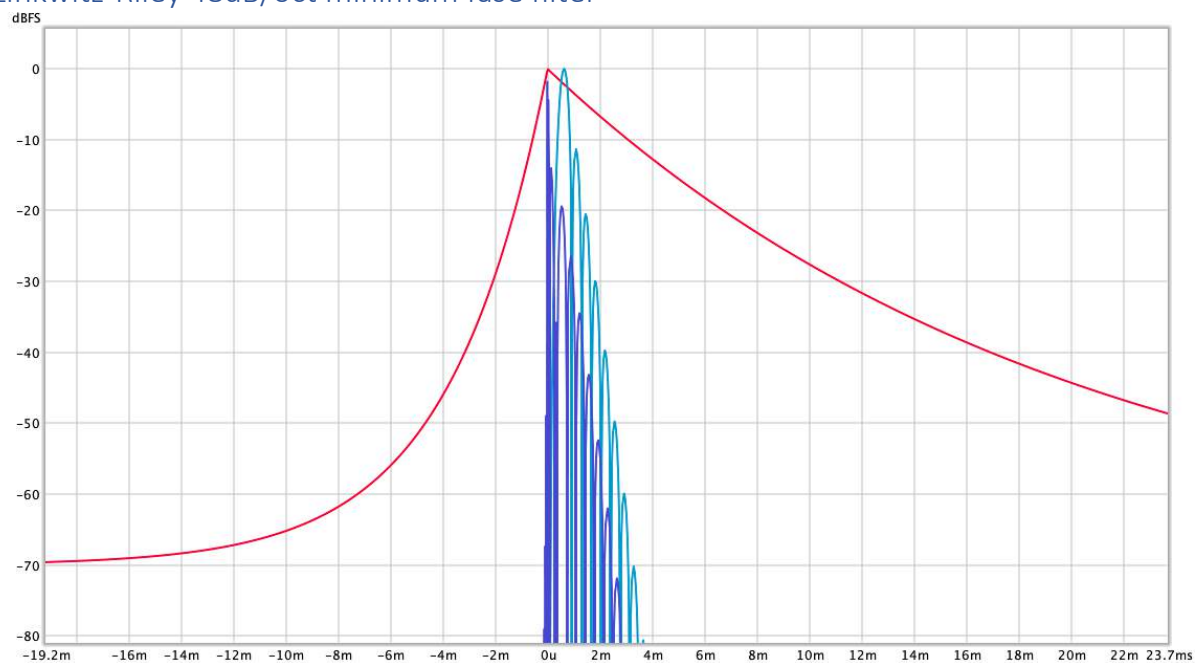
Linkwitz-Riley 48dB/oct lineaire fase filter



Figuur 47 Linkwitz-Riley 48d/oct filter in blauw en in rood de temporal masking curve

Zoals al eerder opviel, is ook nu met de dBFS schaal, het LR48 filter wat betreft ringing vrijwel gelijk aan het Reject 36 filter, hoewel die uiteindelijk steiler filtert.

Linkwitz-Riley 48dB/oct minimum fase filter

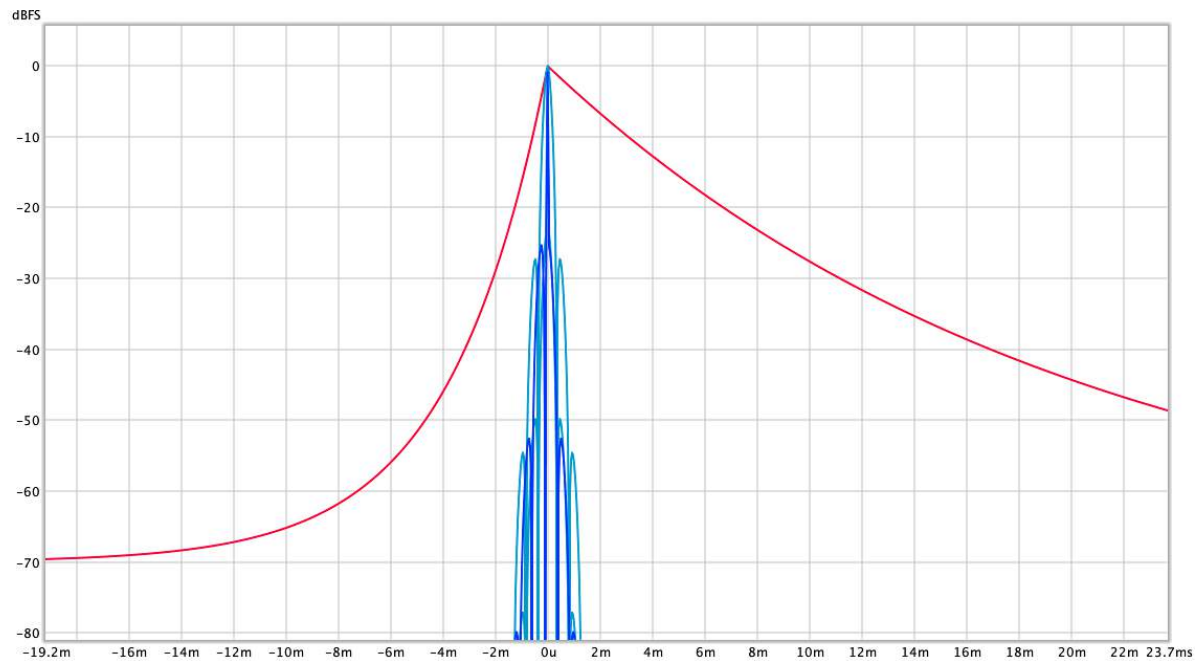


Figuur 48 Linkwitz-Riley 48d/oct minimum fase filter in blauw en in rood de temporal masking curve

Het laagdoorlaat filter alleen, zou net wat hoorbare effecten kunnen geven volgens de masking curves. De sommatie lijkt veiliger te zijn. De schijnbare pre-ringing, komt door tijdsverschil, tussen woofer en tweeter, wat de fout simulatie is in de sommatie.

Pre-ringing is hoorbaarder dan post-ringing, dat is ook aan verloop van de temporal masking curves te zien. Minimum fase filters hebben geen pre-ringing, maar de post-ringing is veel heftiger. Ook met minimum fase filters kun je dus te steil gaan en met een minimum fase Linkwitz-Riley 48dB/oct lijkt je dus tegen die grens aan te komen.

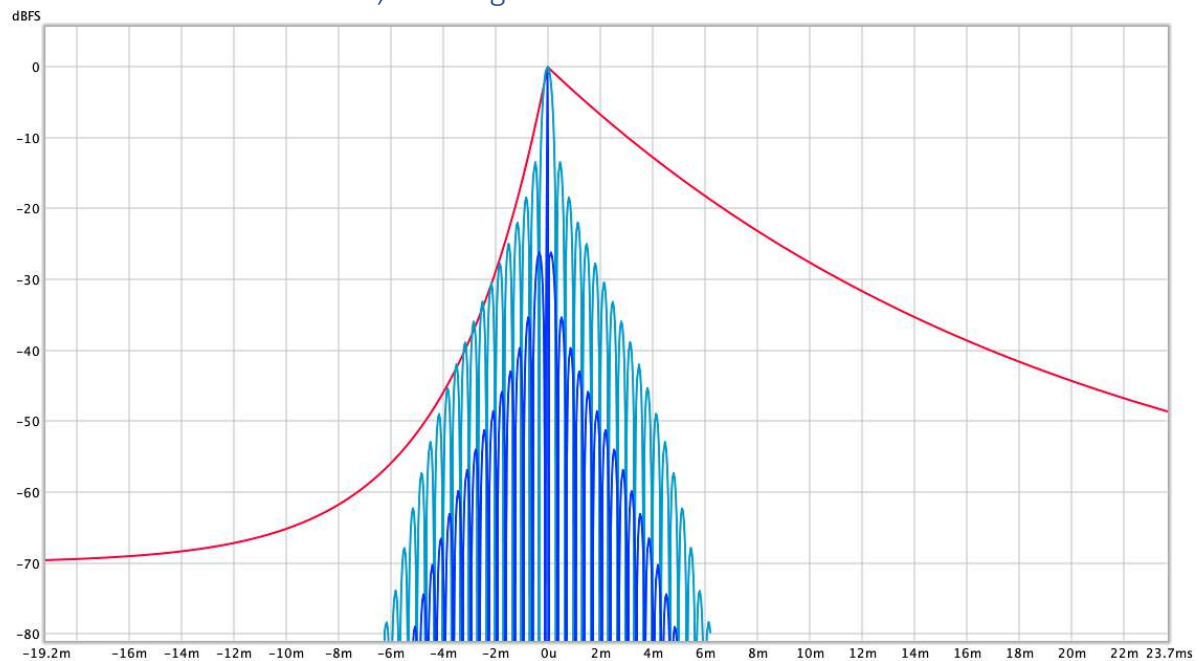
Linkwitz-Riley 24dB/oct lineaire fase filter



Figuur 49 Linkwitz-Riley 24dB/oct filter in blauw en in rood de temporal masking curve

Omdat Grimm audio feitelijk via een omweg Linkwitz-Riley 24dB/oct lineaire fase filters gebruikt, zijn ook deze voor de volledigheid tegen de temporal masking curve uitgezet. Het mag duidelijk zijn dat hoorbare effecten van zowel pre als post-ringing niet te verwachten zijn.

Brick-wall lineaire fase filter, FIR-lengte 600



Figuur 50 Het brick-wall FIR-filter in blauw en in rood de temporal masking curve

In "Perceptual Study of Loudspeaker Crossover Filters":

<http://lib.tkk.fi/Dipl/2008/urn011933.pdf>

Wordt gesteld dat voor cross-over tussen 1-3 kHz een lineair fase brick-wall filter van lengte 2000 hoorbare pre-ringing effecten geeft, maar dat een brick-wall met lengte 600 geen hoorbare ringing effecten geeft.

Figuur 50 lijkt die bewering te staven, een brick-wall filter met lengte 600 lijkt in de slechtste situatie met alleen laagdoorlaat filter, tegen de hoorbaarheidsgrens aan te zitten. In de wat meer normale niet ideale sommatie situaties zoals getoond in donkerblauw blijft filter er duidelijk onder.

Dus inderdaad lijkt het dat een brick-wall FIR-filter van lengte 600 (nog net) veilig gebruikt kan worden, echter zijn andere filters die meer marge hebben en steil genoeg zijn eerder aan te bevelen.

C++ Source code programma Impuls Response Temporal Masking curve

```
#include <iostream>
#include <cmath>

using namespace std;

long double PreMask(long double x)
{
    return (-70*(1 - exp(270*x)));
}

long double PostMask(long double x)
{
    return (-70*(1 - exp(-50*x)));
}

int main(int argc, char **argv)
{
    long double sRate = 48000.0;    // Sampling rate
    long double start = -25.0/1000.0; // -25ms
    long double stop = 100.0/1000.0; // 100ms
    long double peakValue = 100.0;  // The value to peak at

    int cnt = int((stop-start)*sRate);
    int peak = int(-start*sRate);

    // Print header
    // The minimum header so REW reads the file
    cout.precision(16);
    cout << "* Impulse Response data saved by REW" << endl;
    cout << peakValue << "\t// Peak Value" << endl;
    cout << peak << "\t// Peak Index" << endl;
    cout << cnt << "\t// Response length" << endl;
    cout << 1.0/sRate << " // Sample interval (seconds)" << endl;
    cout << start << "\t// Start time (seconds)" << endl;
    cout << "* Data start" << endl;
    cout.precision(6);

    for (int i = 0; i < cnt; i++)
    {
        long double dB = 0.0;
        long double t = start + i/sRate;
        if (i < peak)
        {
            dB = PreMask(t);
        }
        else if (i > peak)
        {
            dB = PostMask(t);
        }
        cout << peakValue*pow(10.0, dB/20.0) << endl;
    }

    return 0;
}
```

De impuls response file met de temporal masking curve is ook te downloaden via:
https://www.dropbox.com/s/7sw1jgtj14rm3oc/TemporalMasking_IR.txt?dl=1