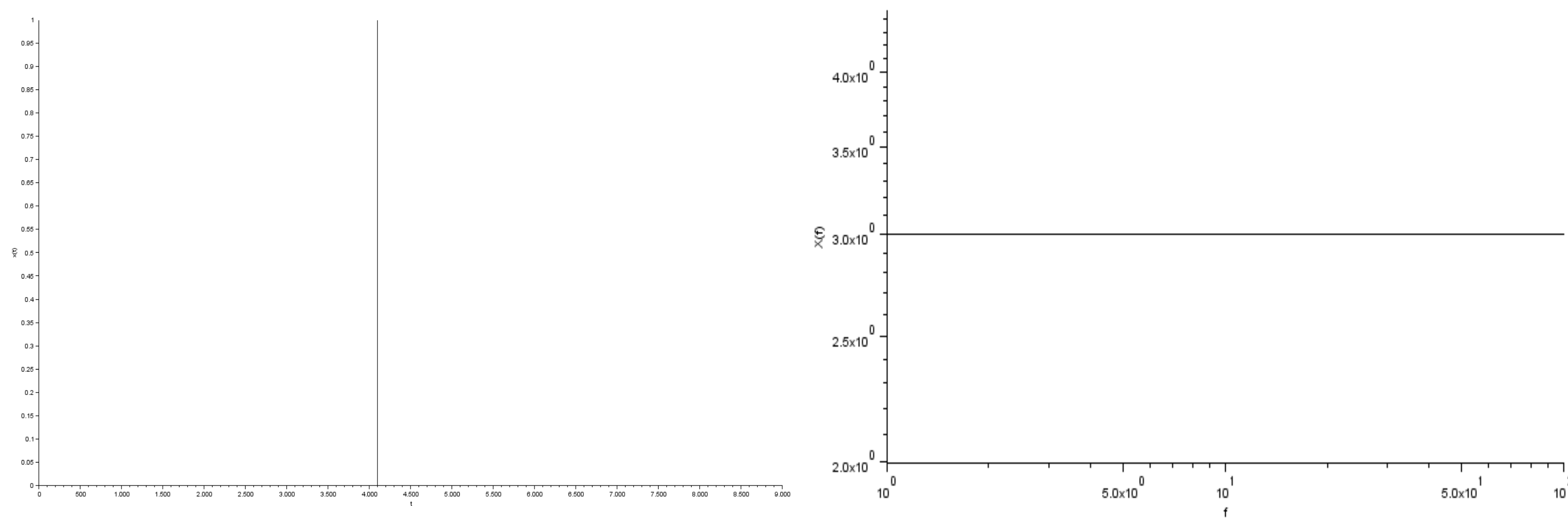


# Impulstreue macht den Klang zum Genuss: Entzerrung der Impulsantworten von Hochtönern

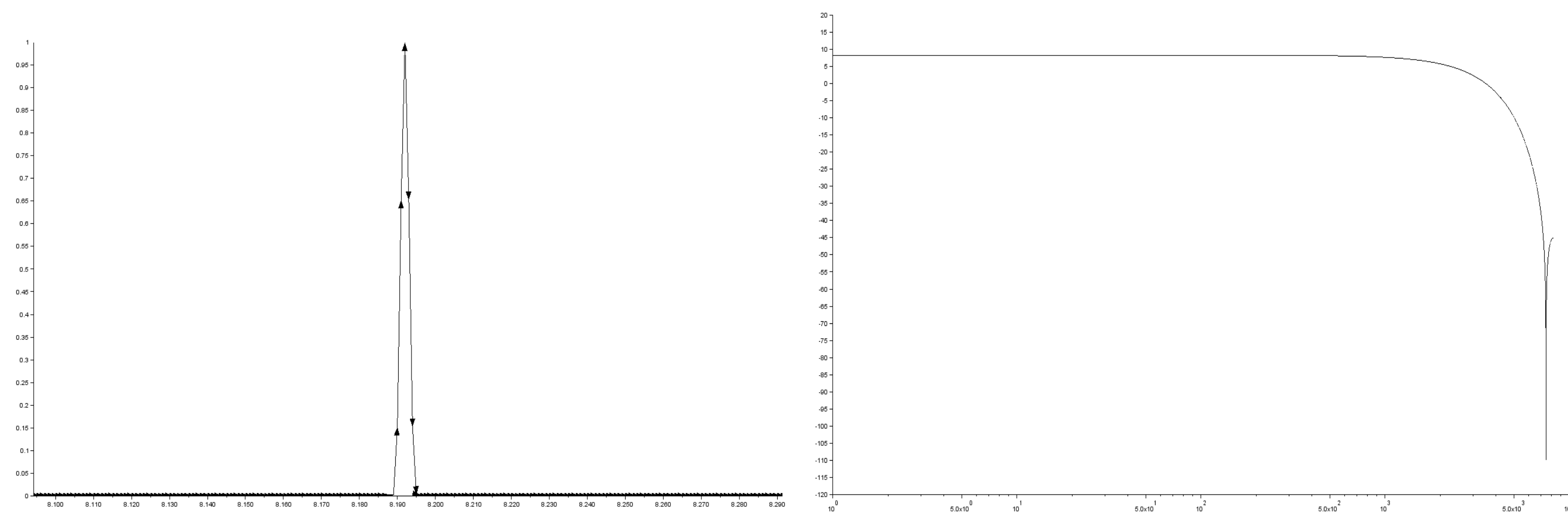
Ludwig Kollenz, Arnold Esper  
Institut für Musikwissenschaft, Universität Wien

## Hintergrund

Es wird bei Lautsprechern meist von Frequenzgängen gesprochen, viel seltener von der Impulstreue (Dickreiter et al. 2008). Dabei ist das menschliche Ohr ein Druckempfänger und besonders empfindlich im Zeitbereich (Zwicker, Feldtkeller 1967; Esper 2002). Ziel des hier vorgestellten Projekts ist es die Impulsantworten von Hochtonchassis zu entzerren. Ein Lautsprecher erfüllt innerhalb gewisser Betriebsparameter hinreichend die Kriterien eines linearen, zeitinvarianten Systems, das heißt er kann durch seine Impulsantwort charakterisiert werden (Weinzierl 2008). Werden die üblichen „Nachschwinger“ korrigiert und bleibt somit ein schmaler einzelner Impuls übrig, wäre dies eine Annäherung an eine sogenannte Dirac-Funktion. Zum einen würde der Lautsprecher im Zeitbereich weniger verzerren und zum anderen würde sein Frequenzgang linearer, denn ein Dirac hat ein weisses Spektrum (Grünigen 2008).



Links ein Dirac im Zeitbereich und rechts dessen Spektrum.

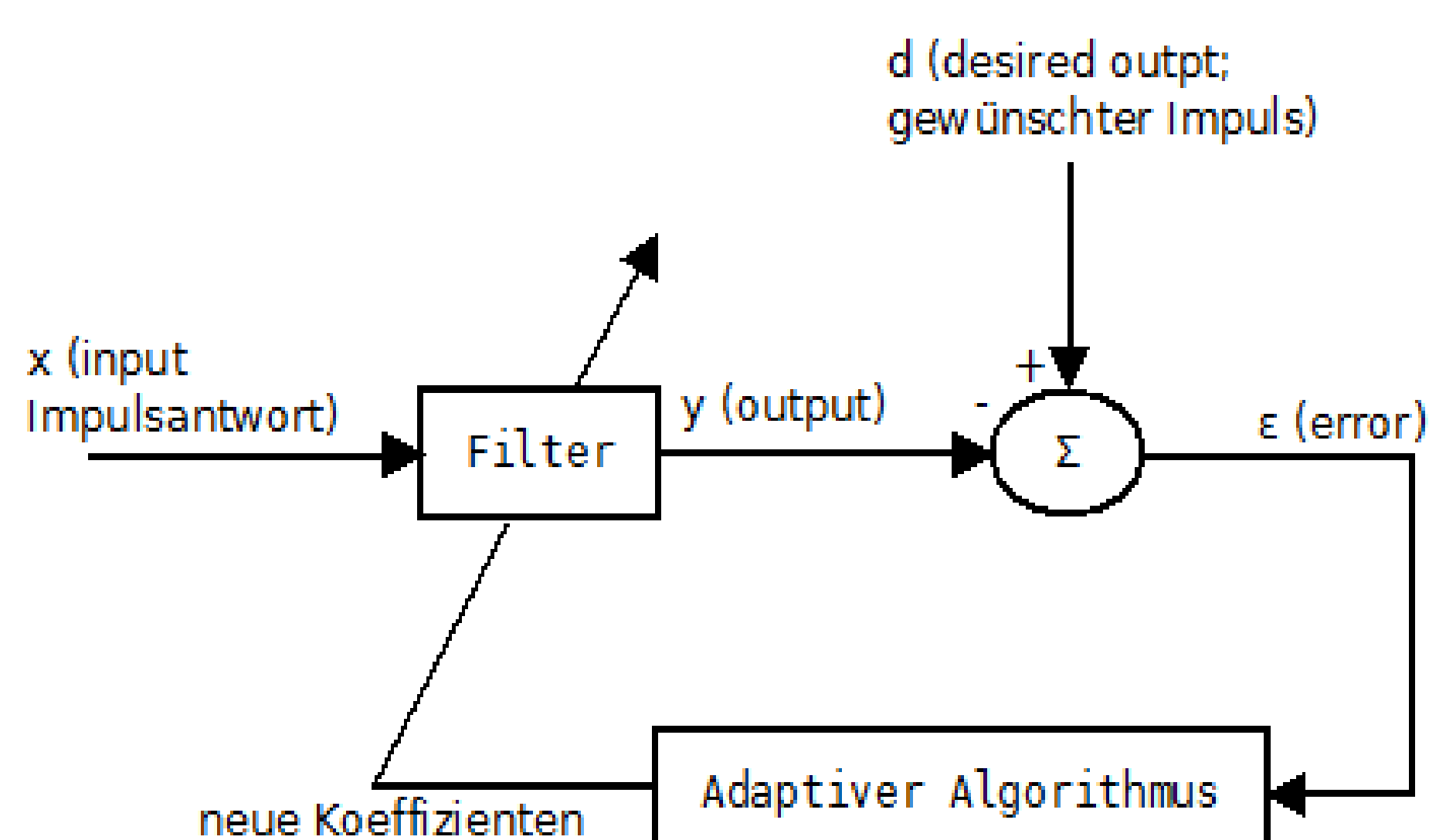


Verwendeter Stoß: Kaiser-Bessel-Funktion mit 7 Punkten Breite ( $\alpha=8$ ).  
FFT: Rechteck; 16384 Punkte; -3dB bei 26kHz, Zeitfunktion links, Spektrum rechts

## Methoden

Um eine Entzerrung der Impulsantwort zu erwirken wird ein inverses Filter eingesetzt, das unerwünschte Veränderungen durch die Übertragungsfunktion des Lautsprechers wieder aufhebt. Dazu gibt es zwei Methoden:

- 1) Jedes Signal, das ein lineares, zeitinvariantes System durchläuft, wird mit dessen Impulsantwort gefaltet. Nach den Faltungstheoremen entspricht eine Faltung im Zeitbereich einer Multiplikation im Frequenzbereich, daher kann das inverse Filter durch Polynomdivision des gewünschten Pulses durch die Impulsantwort errechnet werden. Es entsteht ein FIR-Filter (Smith 2003; Roderer, Pecher 2010).
- 2) Als zweiter Ansatz kann ein adaptives Filter eingesetzt werden. Die gefilterte Impulsantwort wird mit dem angestrebten Impuls verglichen und die Abweichung berechnet. Daraus ergibt sich eine Abänderung der Koeffizienten. Die Impulsantwort wird erneut gefiltert und der Vorgang wiederholt. Nach einer bestimmten Anzahl an Iterationen konvergieren die Koeffizienten um einen bestimmten Wert und die optimale Einstellung des Filters ist erreicht. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es im laufenden Betrieb eingesetzt werden kann (Stearns 1988; Danieli, Embree 1999; Kammeyer, Kroschel 2012).



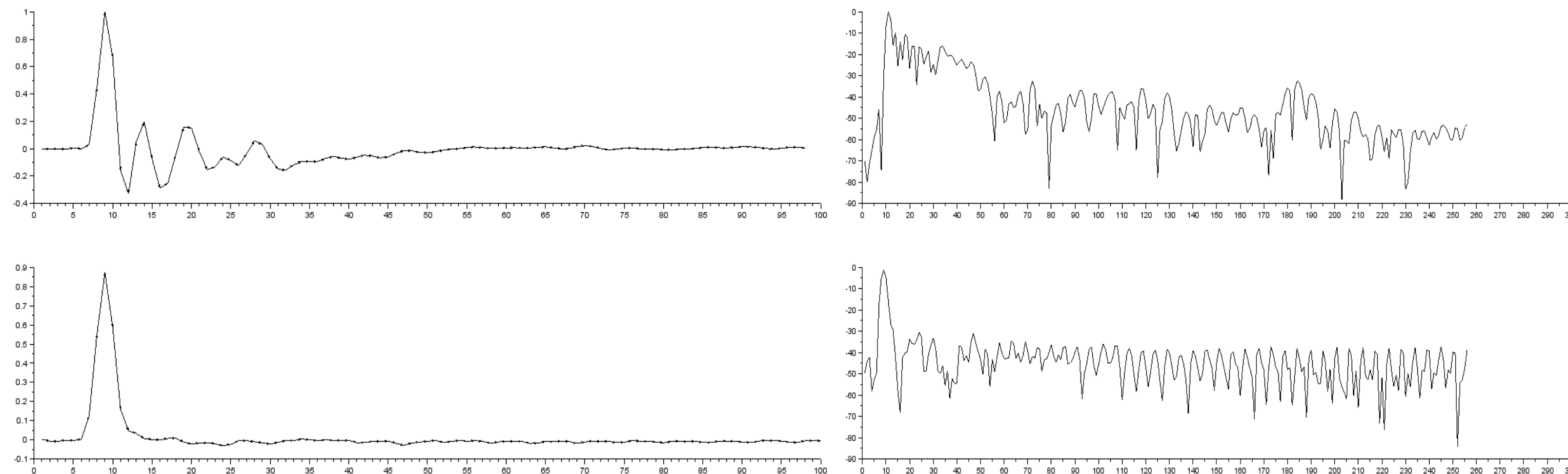
*Adaptives Filter: Bei Least Mean Squares wird die Impulsantwort gefiltert und die Abweichung zur gewünschten Impulsantwort berechnet. Daraus ergibt sich ein Gradient, mit dessen Hilfe die Koeffizienten abgeändert werden.*

## Ziele

In diesem Projekt wird nur die Entzerrung von Hochtönern getestet, jedoch ist in Folge geplant die Entzerrung auch auf Tieftöner auszudehnen und einen impulstreuen Lautsprecher zu schaffen. Die Grundlage dafür bietet die von Arnold Esper entwickelte KRO, welche mit einem DSP ausgerüstet werden soll, der sowohl als Frequenzweiche dient, als auch die inverse Filterung ausführt, in der auch eine Korrektur der Beugung am Rand der Box mit eingeschlossen ist.

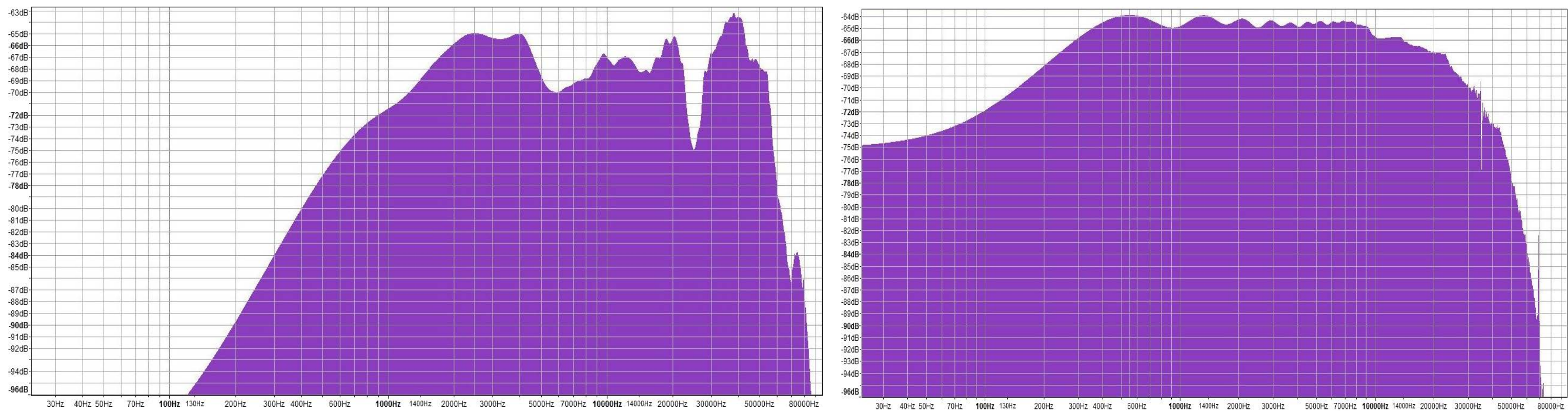
## Ergebnisse

Es wurden die Impulsantworten diverser Hochtonchassis gemessen: Bändchen und Air Motion Transformer zeigten stärkere Verzerrungen, während ein klassischer Kalotten-Hochtöner am besten abschnitt. In der Simulation liegt die Dämpfung der Verzerrungen durchschnittlich bei -80dB FS, bei der Messung des Kalotten-Hochtöners zeigten sich -40dB FS. Das geringe SNR wurde durch eine inadequate Endstufe bedingt, die Messung wird mit einer Klasse D Endstufe wiederholt werden.



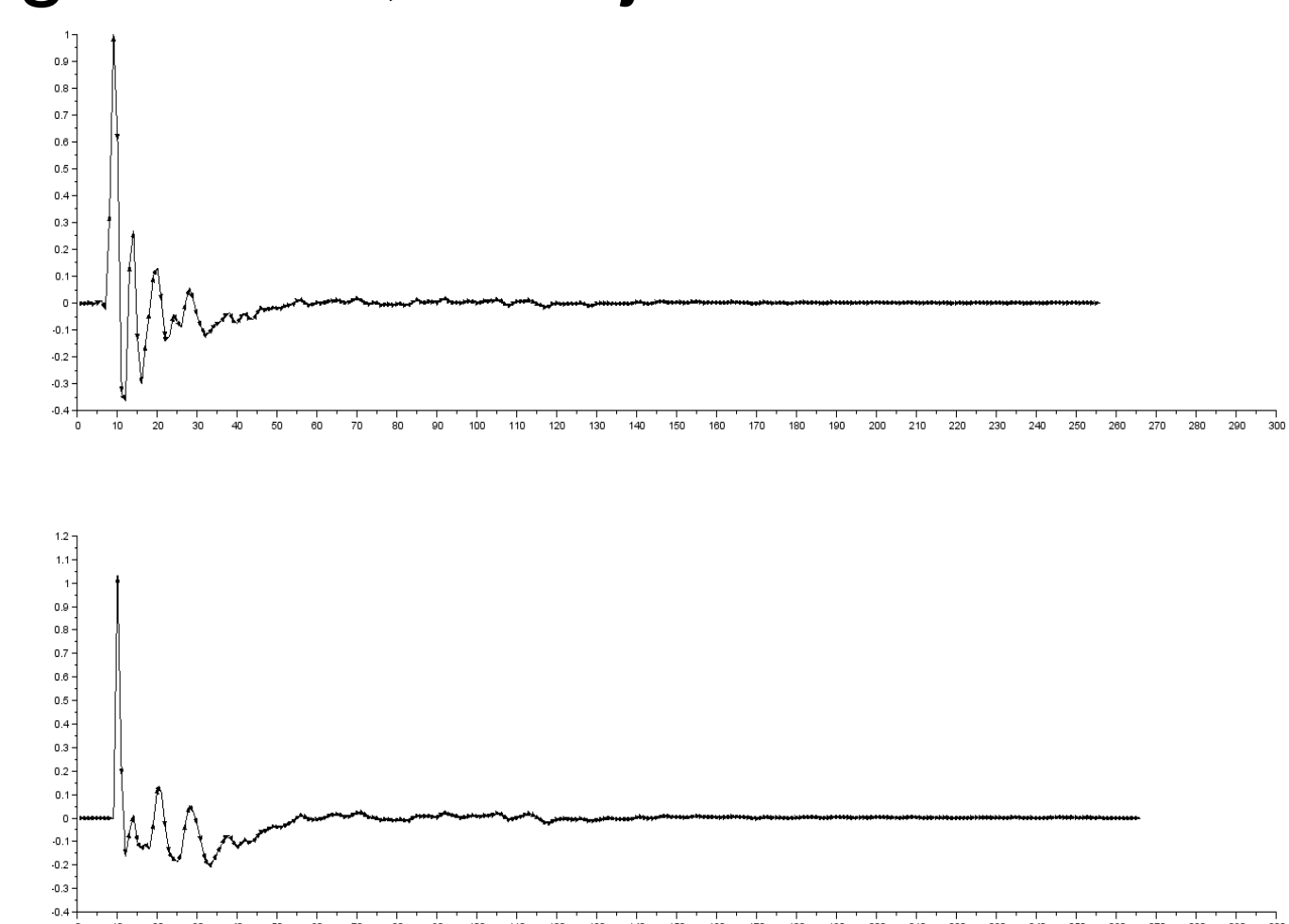
Oben die gemessene Impulsantwort, unten die gemessene Impulsantwort bei aktivem Filter. Links linear, rechts Betrag in dB FS.

Der Frequenzgang wird durch die inverse Filterung deutlich linearer. Es gibt, bedingt durch die Breite des Pulses, eine Einschränkung bei den Höhen, jedoch verbessert sich die Bandbreite zu den Tiefen hin.



Rechts der Frequenzgang nach der Filterung; -3dB bei 200Hz & ~24kHz  
FFT: Rechteck; 8192 Punkte

Zum zweiten Ansatz wurde bisher nur ein LMS-Script mit IIR-Filter entwickelt; dessen Ergebnisse, sind jedoch noch unzureichend.



Oben die gemessene Impulsantwort, unten die berechnete Impulsantwort bei aktivem Filter in der Simulation.

## Conclusio

Die Dämpfung der unerwünschten Signalanteile ist vielversprechend. Die hohe Filterordnung sorgt jedoch für eine entsprechende Signalverzögerung. Es gibt Techniken FIR- in IIR-Filter zu konvertieren, was die Filterordnung herabsetzt. Dieser Ansatz wird eventuell noch implementiert.

Die zweite Methode zeigt bis jetzt schlechtere Ergebnisse, das Skript bedarf noch einiger Verbesserung. Weitere Varianten, wie etwa Recursive Least Squares werden noch getestet.

## Literatur

Danieli, Damon; Embree, Paul M.: *C++ Algorithms for Digital Signalprocessing*, Prentice Hall 1999. - Dickreiter, Michael; Dittel, Volker; Hoeg, Wolfgang; Wöhr, Martin: *Handbuch der Tonstudioteknik*, K. G. Saur 2008. - Esper, Arnold: *Hörbarkeit mikrozeitlicher Strukturen im Musiksinal*, Peter Lang 2002. - Grünigen, Daniel Ch. von: *Digitale Signalverarbeitung*, Carl Hanser 2008. - Kammeyer, Karl-Dirk; Kroschel, Kristian: *Digitale Signalverarbeitung*, Springer Vieweg 2012. - Roderer, Helmut; Pecher, Alfred: *Digitale Signalverarbeitung*, Vogel 2010. - Stearns, Samuel D.: *Signal Processing Algorithms*, Prentice-Hall 1988. - Smith, Stephen W.: *Digital Signal Processing*, Newnes 2003. - Weinzierl, Stefan: *Handbuch der Audiotechnik*, Springer 2008. - Zwicker, Eberhard; Feldtkeller, Richard: *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*, S. Hirzel 1967.