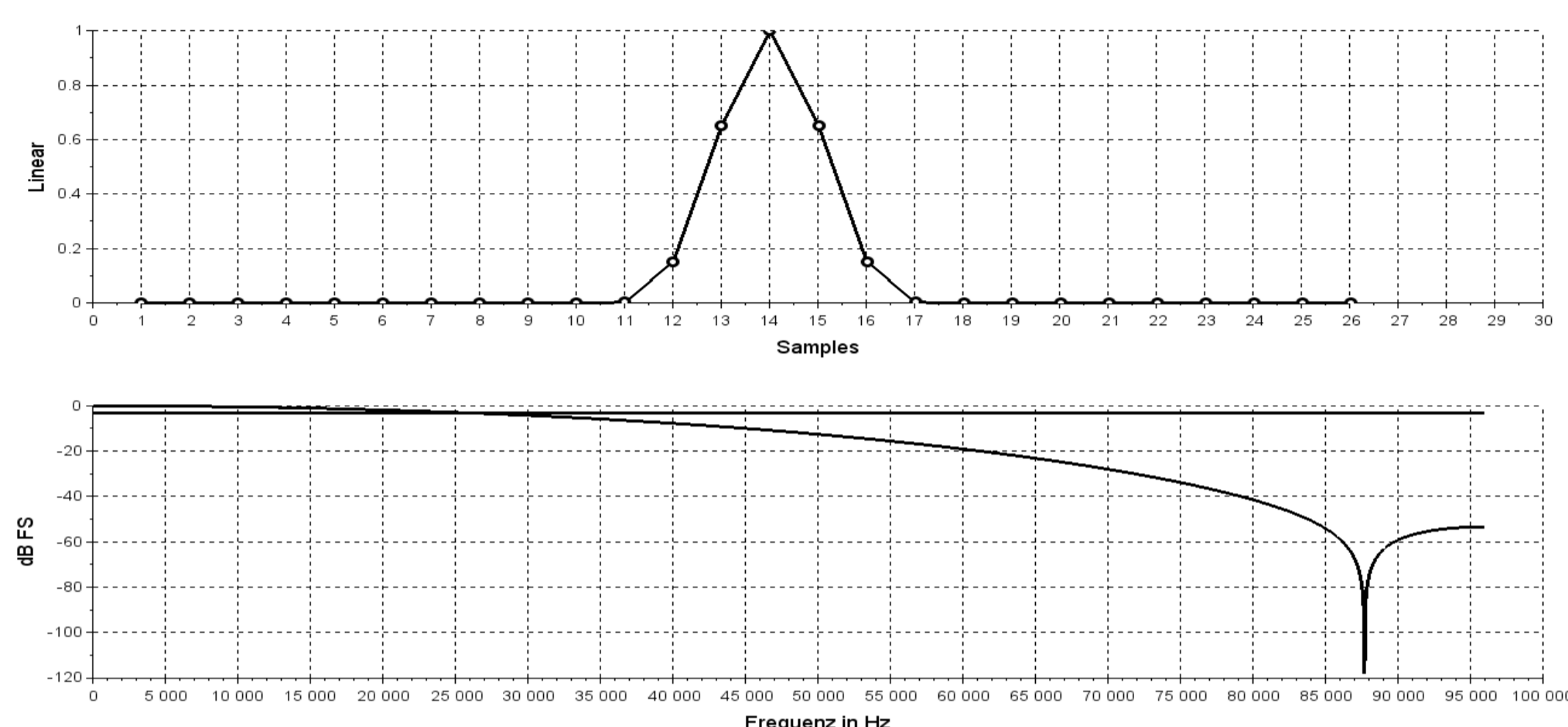


Impulstreue – Nicht nur sauber sondern rein! Entzerrung der Impulsantworten von Hochtton-Chassis

Ludwig Kollenz, Arnold Esper
Institut für Musikwissenschaft, Universität Wien

Hintergrund

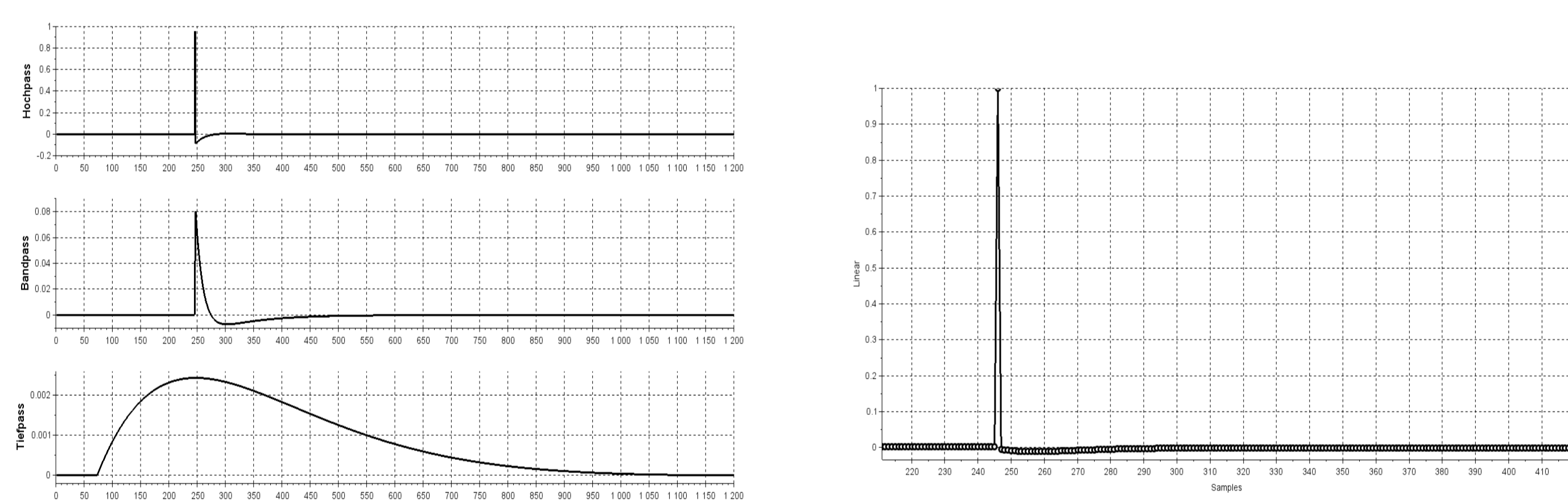
Bei Lautsprechern wird meist von Frequenzgängen gesprochen, viel seltener von der Impulstreue (Dickreiter et al. 2008). Dabei ist das menschliche Ohr ein Druckempfänger und Zwickers Arbeit verwies schon in den 1960ern auf die Empfindlichkeit des Gehörs im Zeitbereich (Zwicker, Feldtkeller 1967; Esper 2002). Ein Lautsprecher erfüllt innerhalb gewisser Betriebsparameter hinreichend die Kriterien eines linearen, zeitinvarianten Systems, das heißt er kann durch seine Impulsantwort charakterisiert werden (Weinzierl 2008). Ziel des Projekts ist es, Verzerrungen in der Impulsantwort mit digitaler Signalverarbeitung zu korrigieren. Ein 7-Punkte Kaiser-Bessel-Fenster dient als Zielfunktion; aufgrund des Zeit-Bandbreite-Produkts (Kiencke et al., 2008) ist sein Hauptlappen im Spektralbereich sehr breit. Damit wird ein linearer Frequenzgang mit -3dB bei 26,3kHz (bei 192kHz Abtastrate) erreicht.



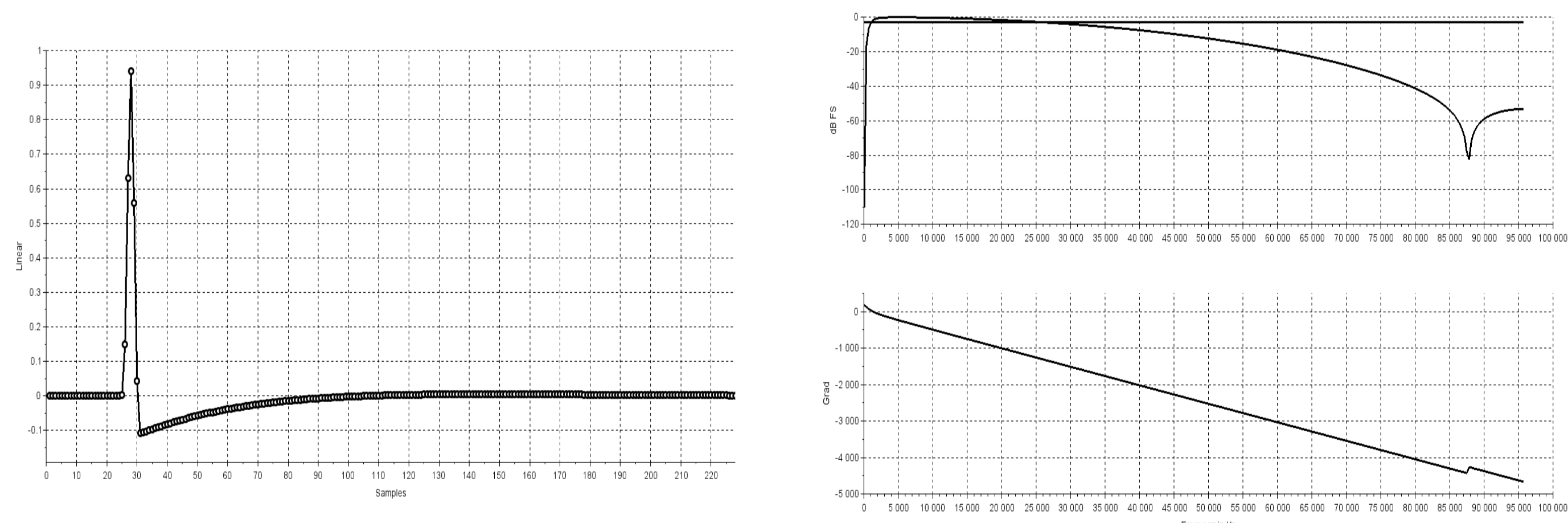
Ziel-Impulsantwort und ihr Amplitudenfrequenzgang; der Strich markiert -3dB.

Methoden

Eine Korrektur der Impulsantwort ist mit einem inversen Filter möglich. Die Impulsantwort selbst kann als Filter betrachtet werden und ein vorgeschaltetes inverses Filter macht alle Veränderungen durch das Chassis rückgängig, indem es das Signal vorverzerrt. Ein inverses Filter muss für eine gegebene Impulsantwort berechnet werden, wozu es verschiedene Ansätze gibt. Ehe diese besprochen werden, ist auf die Frequenzweiche zu verweisen: In einem Lautsprecher teilt sie das Signal für Tief-, Mitten- und Hochttonchassis auf. Die Summe ihrer Filterfunktionen müssen ebenfalls eine Annäherung an einen Stoß ergeben, sonst ist eine Entzerrung sinnlos. Von den Autoren wurde mit digitalen Bessel-Filtern (Stearns, David, 1988) ein entsprechendes Design erstellt. Wird der Hochpass mit dem Kaiser-Fenster gefaltet, wird die Frequenzweiche zu hohen Frequenzen hin begrenzt.



Links die Impulsantworten der Filter und rechts die Summen-Impulsantwort.



Der Bessel-Hochpass kombiniert mit dem Kaiser-Fenster. Rechts der Amplituden- und Phasengang. Der Strich markiert auch hier -3dB.

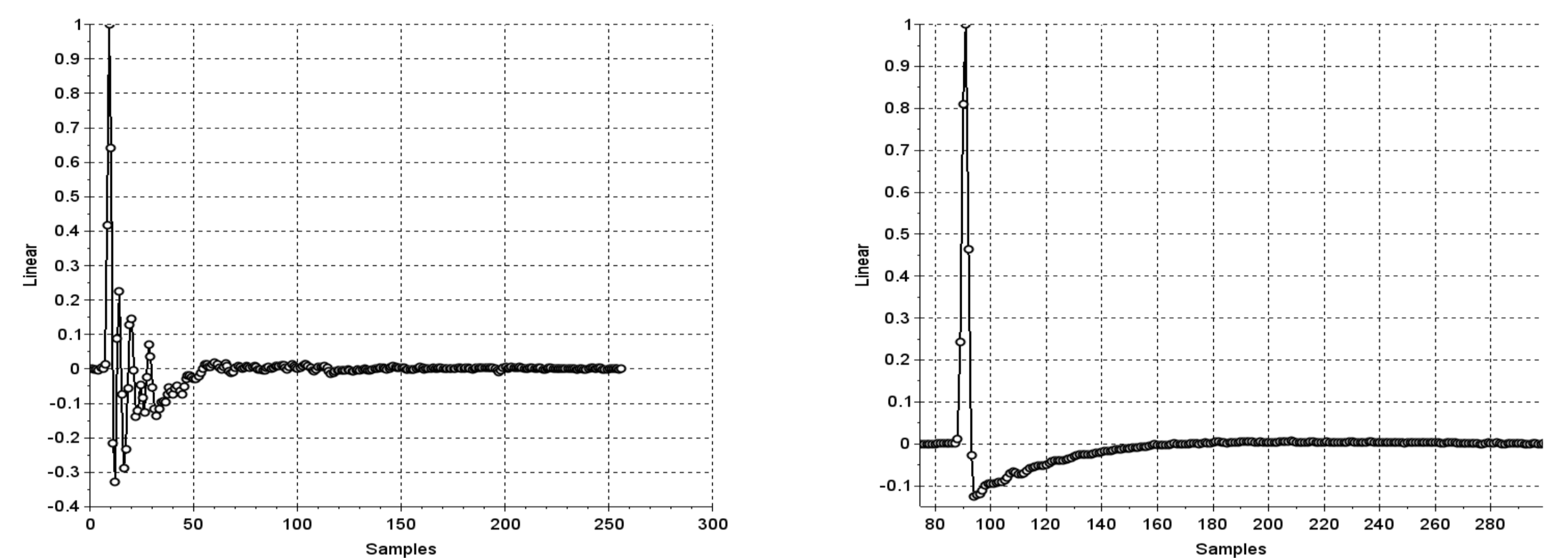
Von den Autoren wurden verschiedene Methoden der Entzerrung getestet und zwei aussortiert: Die Methode der kleinsten Quadrate (Roderer, Pecher, 2010) sowie adaptive Filter. Ersteres Verfahren bietet eine statische Lösung, letzteres passt das inverse Filter kontinuierlich an. Aus den verschiedenen Algorithmen für adaptive Filter wurde Decorrelated Normalized Least Mean Squares (DNLMS) (Doblinger, 2004) ausgewählt aufgrund seiner guten Konvergenz. Umgesetzt wurden alle Filter als FIR, da IIR zur Instabilität neigen, speziell bei adaptiven Lösungen. (Lokale Minima der Fehlerfunktion verhindern außerdem die Konvergenz gegen die optimale Lösung).

Ziele

Bisher wurden Hochtöner getestet, das Projekt soll auf einen gesamten Lautsprecher ausgedehnt werden. Die von Arnold Esper entwickelte KRO wird mit einem DSP ausgerüstet, der die Frequenzweiche und Entzerrung in sich vereint. Die Verbindung zu einem Computer erfolgt über ein LAN-Kabel mit UPnP AV als Protokoll. Für jedes Chassis wird ein Klasse D Verstärker genutzt. Dadurch wird ein Soundinterface eingespart und über ein HUB können mehrere Lautsprecher angeschlossen werden.

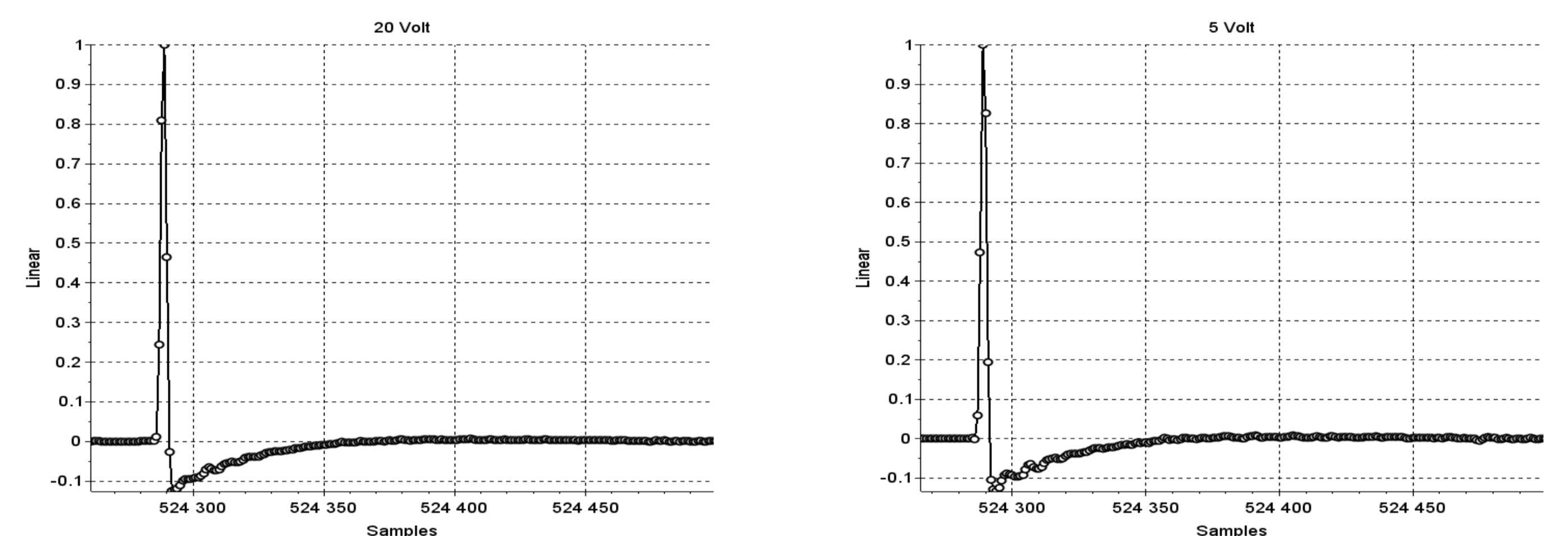
Ergebnisse

Verschiedenste Hochttonchassis (mit unterschiedlichen Wandlerprinzipien) wurden getestet. Dynamische Wandler zeigen ein besseres Verhalten als Bändchen-Wandler und Air Motion Transformer schnitten besonders schlecht ab.



Links die gemessene Impulsantwort, rechts die gemessene Impulsantwort bei aktivem inversen Filter, berechnet mittels kleinstem Fehlerquadrat.

Auch bei unterschiedlichen Lautstärken arbeitet die statische Entzerrung einwandfrei.

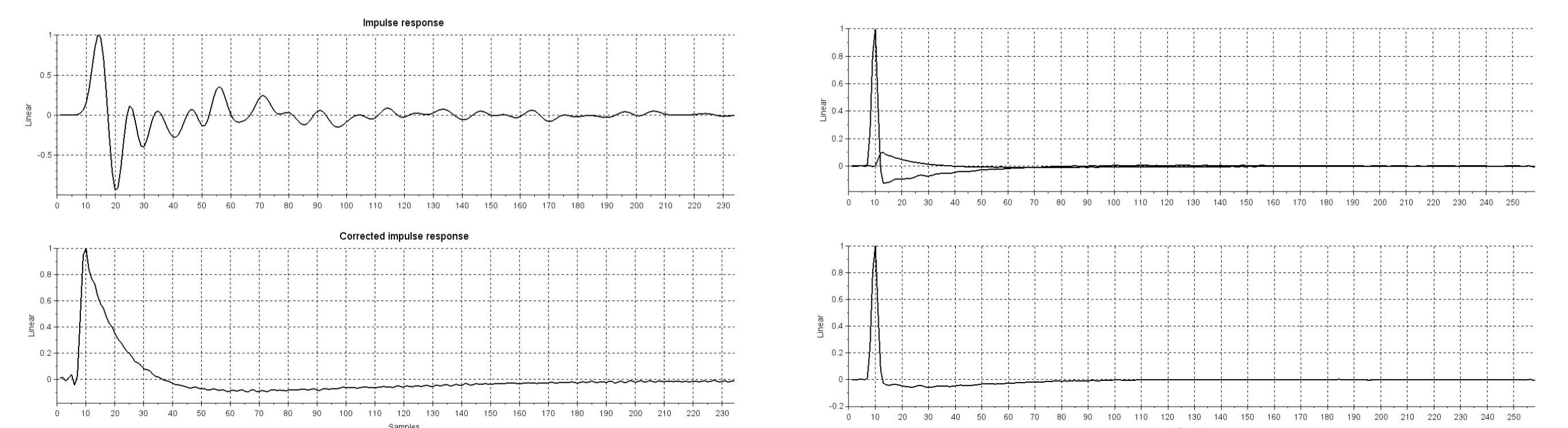


Links 20 Volt, rechts 5 Volt (peak to peak). Für beide Lautstärken wurde dasselbe inverse Filter verwendet, woraus folgt, dass sich die Impulsantwort durch die Lautstärke wenig ändert.

In der Simulation zeigen adaptive Filter die beste Entzerrung, jedoch stellt sich das Problem der Sensoren. Diese Filter benötigen eine Rückmeldung über das aktuelle Verhalten des Chassis um sich neu einstellen zu können. Eine Möglichkeit wäre die Rückwirkung der elektromotorischen Kraft an den Klemmen zu messen. (Klippel, o.J.)

Conclusio

Die Ergebnisse sind zufriedenstellend; es werden >60dB Dämpfung für die Verzerrungen erreicht, bei einer Latenz von 6,3ms. In der Simulation ist die Dämpfung mit >100dB deutlich besser, allerdings war in der Messung das SNR nur 60dB, daher lässt sich keine genauere Aussage treffen. Ein Test eines Hochtöners zusammen mit einem Mittenchassis zeigte, dass die Frequenzweiche mit der Entzerrung tatsächlich das Kaiser-Fenster ausgibt.



Links das Mittenchassis (Impulsantwort und Entzerrung), rechts ein Hochtöner zusammen mit dem Mittenchassis (bei aktiver Entzerrung und Frequenzweiche).

Literatur

Dickreiter, Michael; Dittel, Volker; Hoeg, Wolfgang; Wöhr, Martin: *Handbuch der Tonstudiotechnik*, K. G. Saur 2008. – Doblinger, Gerhard: *Signalprozessoren*, Schlembach 2004. – Esper, Arnold: *Hörbarkeit mikrozeitlicher Strukturen im Musiksignal*, Peter Lang 2002. – Kiencke, Uwe; Schwarz, Michael; Weikert, Thomas: *Signalverarbeitung*, Oldenbourg 2008. – Klippel, Wolfgang: *Nonlinear Adaptive Controller for Loudspeakers with Current Sensor*, Klippel GmbH. – Roderer, Helmut; Pecher, Alfred: *Digitale Signalverarbeitung*, Vogel 2010. – Stearns, Samuel D.; David, Ruth A.: *Signal Processing Algorithms*, Prentice-Hall 1988. – Weinzierl, Stefan: *Handbuch der Audiotechnik*, Springer 2008. – Zwicker, Eberhard; Feldtkeller, Richard: *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*, S. Hirzel 1967.