

Cepstrale Techniken für die Lautsprechermessung

Bachelorarbeit

durchgeführt von

Michael Tauch

Institut für Breitbandkommunikation
der Technischen Universität Graz

Leiter: DI Holger Hiebel

Betreuer: Holger Hiebel

Graz, im Juni 2009

Zusammenfassung

In dieser Arbeit soll, neben einem kurzen Überblick über die Geschichte des Cepstrums, auf dessen Verwendung im Hinblick auf die Optimierung von gemessenen Lautsprecherimpulsantworten eingegangen werden. Ziel dieser Optimierung ist es, aus einer in einem nicht schalltoten Raum gemessenen Impulsantwort, die frühen Reflexionen in der Impulsantwort zu erkennen und deren Einfluss rechnerisch zu extrahieren bzw. zu minimieren, und somit eine Freifeldimpulsantwort anzunähern.

Nach einer Einführung in die verschiedenen Arten von Cepstren werden dabei die Stärken cepstraler Nachbearbeitung, gerade zu tiefen Frequenzen hin, aufgezeigt sowie aber auch die Grenzen und Probleme die dabei auftreten. Der schriftliche Teil dieser Arbeit stellt dabei eine Aufbereitung der bereits entworfenen Methoden und deren Ergebnisse dar, während in einem zweiten Teil eine programmtechnische Realisierung mit Matlab durchgeführt wird.

Abstract

This work contains a brief history of the Cepstrum followed by an overview of its application in the optimization of measured loudspeaker impulse responses. The goal of this optimization is to take an impulse response, measured in a non anechoic room, and to extract the influence of the early reflections mathematically, and therefore approximate the true anechoic (free field) impulse response of the loudspeaker.

After an introduction to the different kinds of Cepstra, it is discussed how powerful cepstral post-processing can be, especially to low frequencies, as well as its limitations and problems. The written part of this work offers an account of previous papers on methods of cepstral post-processing and its results, whereas in a second part a routine in matlab is implemented to execute the above task.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Das Cepstrum	5
2.1	Geschichte des Cepstrum	5
2.2	Die verschiedenen Cepstren	6
2.2.1	Das komplexe Cepstrum	6
2.2.2	Das reelle Cepstrum und das Phasen Cepstrum	7
2.2.3	Das Allpass Cepstrum und das minimalphasige Cepstrum	7
3	Cepstrale Nachbearbeitung	9
3.1	Einführendes Beispiel	9
3.2	Raum- und Gehäusereflektionen	12
3.3	Beispiele aus der Literatur	14
3.3.1	Beispiel 1	14
3.3.2	Beispiel 2	16
3.4	Zusammenfassung	17
4	MATLAB GUI	18
4.1	Documentation	18
4.1.1	Import and impuls response windowing	19
4.1.2	Cepstral editing	20
4.1.3	Results and export	21
4.2	Example	21
5	Literaturverzeichnis	24

1 Einleitung

Bei der Messung von Lautsprecherimpulsantworten steht man vor dem Problem, dass das Messergebnis erheblich durch den Messraum beeinflusst und verfälscht wird. Da ein schalltoter Raum nur sehr schwer und mit hohem finanziellen Aufwand realisierbar ist, gibt es seit langem verschiedene Herangehensweisen dieses Problem anders zu lösen. Ziel dabei ist es, die Messung in einem Raum mit normalen Abhörbedingungen durchführen zu können und trotzdem ein qualitativ und quantitativ aussagekräftiges Messergebnis zu erhalten.

Nimmt man eine Impulsantwort in einem nicht schalltoten Raum mit einem Mikrofon auf, so ist die gemessene Impulsantwort die Faltung der Raumimpulsantwort mit der Lautsprecherimpulsantwort, beziehungsweise die Superposition des Anregungssignals mit zeitlich verzögerten, gefilterten und gedämpften Kopien von sich selbst. Es ist daher nahe liegend lediglich den Teil der gemessenen Impulsantwort zu verwenden, der nur aus Direktschall besteht, also die Zeit vom ersten Impuls bis zur ersten Reflexion von Boden oder Decke und den Rest (frühe Reflexionen und Nachhall) einfach weg zu schneiden. Das Problem das sich dabei ergibt ist, dass die Zeit bis zu den ersten Reflexionen in einem normal großen Raum sehr kurz ist (wenige ms) und deshalb nicht ausreicht um den Frequenzgang zu tiefen Frequenzen hin korrekt zu ermitteln. Gäbe es eine Möglichkeit die ersten beiden Reflexionen von Decke und Boden aus der Impulsantwort zu entfalten, würde das ein größeres Zeitfenster und somit eine tiefere Grenzfrequenz für die Messung ermöglichen.

Da die Faltung zweier Signale einen mathematisch komplexen Vorgang darstellt ist die Bearbeitung im Zeitbereich sehr umständlich. Eine Faltung im Zeitbereich wird durch die Fouriertransformation zu einer Multiplikation im Frequenzbereich. Mit einer Möglichkeit diese Multiplikation in eine Addition zu überführen wäre es also möglich, die ursprüngliche Impulsantwort durch Addition bzw. Subtraktion zu entfalten. Dieser Grundgedanke liefert die Definition des komplexen Cepstrums als die inverse Fouriertransformierte des komplexen Logarithmus der Übertragungsfunktion eines Systems (Signals).

2 Das Cepstrum

2.1 Geschichte des Cepstrum

1963 stellten Bogart, Healy und Tukey auf dem „Symposium on Time Series Analysis“ ihren grundlegendem Artikel¹ mit dem Titel: „The quefrequency analysis of time series for echoes: Cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum, and saphe cracking“ vor. Ihre neue Erkenntnis war, dass ein Signal mit einem Echoanteil, also einem periodischen Anteil im Spektrum, einen Peak in der inversen Fourietransformation des logarithmierten Spektrums aufweist. Der Grund der für die Benennung (die Vertauschung der ersten Buchstaben des englischen Wortes spectrum) dieser neuen Signaldomäne verantwortlich war ist laut den Verfassern des Artikels: „In general, we find ourselves operating on the frequency side in ways customary on the time side and vice versa“¹.

Unabhängig von der Arbeit von Bogart et al. schrieb Al Oppenheim Anfang der sechziger Jahre an seiner Doktorarbeit mit dem Titel „Superposition in a Class of Nonlinear Systems“² Er entwickelte eine Theorie nichtlinearer Signalverarbeitung und Systeme, (die jedoch einer verallgemeinerten Auffassung von Linearität genügen) welche unter dem Überbegriff „Homomorphe Signalverarbeitung“ zusammengefasst wird. Darin finden sich mathematische Operationen wieder, die denselben algebraischen Anforderungen wie die Addition genügen. Dies ermöglicht Signale zu trennen die auf eine nicht additive Art und Weise verknüpft wurden, z.B. Multiplikation oder Faltung.

Mit der Veröffentlichung des Artikels „An Algorithm for the machine computation of complex Fourier series“³ von Cooley und Tukey, der den FFT Algorithmus vorstellte, waren die Weichen für eine rasche und effektive Entwicklung der Signaltransformation gestellt und es war nun möglich, bis dato theoretische Überlegungen praktisch zu verifizieren und zu implementieren.

¹ B.P. Bogart, M.J.R Healy, and J.W. Tukey, „The quefrequency analysis of time series for echoes: Cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum, and saphe cracking“ in *Time Series Analysis*, M. Rosenblatt, Ed. 1963, ch.15, pp. 209-243

² A.V.Oppenheim, „Superposition in a class of nonlinear systems, „Ph.D. dissertation, MIT, May, 1964

³ J.W.Cooley and J.W. Tukey, „An Algorithm fort the machine computation of complex Fourier series“ *Math. Computation*, vol. 19, pp.297-301, Apr. 1965.

Nach anfänglichem Einsatz in der Sprachsignalverarbeitung breitete sich die Verwendung des Cepstrums und der homomorphen Signalverarbeitung rasch auf die unterschiedlichsten Forschungsgebiete aus: Biomedizin (z.B. Ultraschall), Geologie/Seismik, Restauration alter Aufnahmen, Sonar... Einen Überblick findet man bei Oppenheim und Schaffer⁴

2.2 Die verschiedenen Cepstren

Im Folgenden werden verschiedene gebräuchliche Definitionen des Cepstrums hergeleitet. In dieser Arbeit wird nur der zeitdiskrete Fall behandelt.

2.2.1 Das komplexe Cepstrum

Eine diskrete stabile Folge $x[n]$ besitzt die Fouriertransformierte

$$\underline{X}(e^{j\theta}) = \left| \underline{X}(e^{j\theta}) \right| e^{j\angle \underline{X}(e^{j\theta})} \quad (2.1)$$

Der Begriff „komplexes Cepstrum“ soll verdeutlichen, dass zur Berechnung der komplexe Logarithmus verwendet wird und bezieht sich nicht auf die Komplexwertigkeit des Cepstrums. Prinzipiell kann für den Logarithmus jede beliebige Basis gewählt werden, es hat sich jedoch der natürliche Logarithmus mit der Basis e bewährt. Der komplexe Logarithmus einer komplexen Größe $\underline{X}(e^{j\theta}) = \left| \underline{X}(e^{j\theta}) \right| e^{j\angle \underline{X}(e^{j\theta})}$ ergibt sich als

$$\hat{\underline{X}}(e^{j\theta}) = \log_e \left[\left| \underline{X}(e^{j\theta}) \right| e^{j\angle \underline{X}(e^{j\theta})} \right] = \log_e \left| \underline{X}(e^{j\theta}) \right| + j\angle \underline{X}(e^{j\theta}) \quad (2.2)$$

Mit (2.2) definiert sich das komplexe Cepstrum $g_c[n]$ also als

$$\begin{aligned} g_c[n] &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \hat{\underline{X}}(e^{j\theta}) e^{j\theta n} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \log_e \left[\underline{X}(e^{j\theta}) \right] e^{j\theta n} d\theta \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [\log_e \left| \underline{X}(e^{j\theta}) \right| + j\angle \underline{X}(e^{j\theta})] e^{j\theta n} d\theta \end{aligned} \quad (2.3)$$

Der Index c soll dabei darauf hinweisen, dass es sich um das komplexe Cepstrum handelt. Im Folgenden werden zwei weitere Cepstren dargestellt, die sich aus der Definition des komplexen Cepstrums direkt ergeben. Das reelle Cepstrum und das Phasen Cepstrum.

⁴ A.V.Oppenheim and R.W. Schaffer, „Digital Signal Processing“ Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1975 Ch.12

2.2.2 Das reelle Cepstrum und das Phasen Cepstrum

Teilt man die Summe im Integral aus (2.3) in zwei Integrale erhält man das reelle Cepstrum $g_r[n]$

$$g_r[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [\log |\underline{X}(e^{j\theta})|] e^{j\theta n} d\theta \quad (2.4)$$

und das Phasen Cepstrum $g_\phi[n]$

$$g_\phi[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [j \angle \underline{X}(e^{j\theta})] e^{j\theta n} d\theta \quad (2.5)$$

Damit lässt sich das komplexe Cepstrum $g_c[n]$ darstellen als

$$g_c[n] = g_r[n] + g_\phi[n] \quad (2.6)$$

Vergleicht man Gleichung (2.4) mit Gleichung (2.3) erkennt man, dass es sich bei (2.4) um die Rücktransformation des Realteils von $\hat{X}(e^{j\theta})$ handelt. Daher rührt der Begriff reelles Cepstrum. Das reelle Cepstrum ist einfacher zu berechnen als das komplexe Cepstrum, es geht jedoch die Phaseninformation verloren. Für viele Anwendungen genügt das reelle Cepstrum. Wenn die Anwendung jedoch erfordert, dass nach der cepstralen Verarbeitung wieder das Ausgangssignal zurück gewonnen werden kann, so muss das komplexe Cepstrum verwendet werden, da vom reellen Cepstrum aufgrund der fehlenden Phaseninformation nicht mehr auf das original Signal zurück gerechnet werden kann.

Das reelle Cepstrum kann außerdem über den konjugiert symmetrischen Anteil des komplexen Cepstrums ermittelt werden:

$$g_r[n] = \frac{g_c[n] + g_c^*[-n]}{2} \quad (2.7)$$

Im Folgenden werden noch zwei weitere Cepstren definiert, die sich gerade im Bereich von cepstraler Nachbearbeitung von Impulsantworten bewährt haben, das Allpass Cepstrum und das minimalphasige Cepstrum.

2.2.3 Das Allpass Cepstrum und das minimalphasige Cepstrum

Wenn es sich bei der Eingangsfolge $x[n]$ um eine minimalphasige Folge handelt, ist die Folge reell-wertig, kausal, stabil und alle Pole und Nullstellen liegen innerhalb des Einheitskreises. Real- und Imaginärteil der Fouriertransformation dieser Folge hängen dann über die Hilberttransformation zusammen. Da es sich bei $\log_e |\underline{X}(e^{j\theta})|$ um den Realteil und bei $\angle \underline{X}(e^{j\theta})$ um den Imaginärteil von $\hat{X}(e^{j\theta})$ handelt (vgl. (2.2)), hängen im komplexen Cepstrum also Betrag und Phase über die Hilberttransformation zusammen. Dies bedeutet,

dass sich, für eine minimalphasige Folge, die Phase eines komplexen Cepstrums aus dessen Betrag ausrechnen lässt, und umgekehrt. Die Definition des komplexen Cepstrums garantiert dann das $g_c[n]$ kausal und reell ist. Da diese Eigenschaften die Berechnungen im cepstralen Bereich erhebliche vereinfachen ist es sinnvoll ein komplexes Cepstrum in ein minimalphasigen Anteil und einen Allpassanteil zu zerlegen. Die Begriffe Allpass Cepstrum und minimalphasiges Cepstrum wurden von Bauman et al.⁵ eingeführt.

Ein komplexes Cepstrum $g_c[n]$ lässt sich aufteilen in eine minimalphasige Komponente $g_{\min}[n]$ und in eine Allpasskomponente $g_{Ap}[n]$.

$$g_c[n] = g_{\min}[n] + g_{Ap}[n] \quad (2.8)$$

mit

$$g_{\min}[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [\log_e |X(e^{j\theta})| + \angle_{\min} X(e^{j\theta})] e^{j\theta n} d\theta \quad (2.9)$$

und

$$g_{Ap}[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} j[\angle X(e^{j\theta}) - \angle_{\min} X(e^{j\theta})] e^{j\theta n} d\theta \quad (2.10)$$

Den ersten Teil (2.9) erhält man aus dem minimalphasigen Äquivalent der Folge in der Zeitdomäne (gleicher Amplitudengang, minimalphasiger Phasengang). (2.10) ist lediglich die Transformation der „überschüssigen“ Phase und hat den Amplitudengang $|g_{Ap}[n]| = \text{const.} = 1$

Im cepstralen Bereich erhält man die Zerlegung (2.8) durch eine Kausalisierung von $g_r[n]$

$$g_{\min}[n] = \begin{cases} 0 & n < 0 \\ g_r[n] & n = 0 \\ 2g_r[n] & n > 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

wobei sich $g_r[n]$ aus $g_c[n]$ mittels (2.7) ergibt. Aus (2.8) erhält man schließlich

$$g_{Ap}[n] = g_c[n] - g_{\min}[n] \quad (2.12)$$

Damit sind die in der Literatur üblichen Varianten des Cepstrums genannt. Bei Oppenheim und Schaffer⁴ findet man folgende Zusammenfassung der Eigenschaften des komplexen Cepstrums als Ausgangspunkt für sämtlichen obigen Zerlegungen.

1. Das komplexe Cepstrum fällt mindestens mit $1/|n|$ ab.

⁵P. D. Bauman, S. P. Lipshitz, T. C. Scott, und J. Vanderkooy, „Cepstral Techniques for Transducer Measurement“, presented at the 76th Convention of the AES, New York, 1984 Oct. 8-11, *preprint No. 2127*

2. $g_c[n]$ wird von unendlicher Dauer sein, auch wenn $x[n]$ eine endliche Länge besitzt.
3. Wenn $x[n]$ reell ist, dann ist auch $g_c[n]$ reell.
4. Das komplexe Cepstrum ist genau dann kausal, d.h. $g_c[n] = 0$ für $n < 0$, wenn $x[n]$ minimalphasig ist, d.h. $X(z)$ besitzt nur Pole und Nullstellen innerhalb des Einheitskreises.
5. Das komplexe Cepstrum ist genau dann linksseitig, d.h. $g_c[n] = 0$ für $n > 0$, wenn $x[n]$ maximalphasig ist, d.h. $X(z)$ besitzt nur Pole und Nullstellen außerhalb des Einheitskreises.

Im folgenden Kapitel werden die Möglichkeiten cepstraler Nachbearbeitung von Lautsprecherimpulsantworten erläutert. Als Einstiegsoll ein einfaches numerisches Beispiel verdeutlichen, wie mittels cepstraler Nachbearbeitung ein Echo aus einer Impulsantwort „entfaltet“ werden kann.

3 Cepstrale Nachbearbeitung

3.1 Einführendes Beispiel

Ein einfaches Signal (bzw. Impuls) mit einem einzigen Echo (Reflexion) kann folgendermaßen dargestellt werden:

$$x[n] = h[n] + sh[n - k] \quad (3.1)$$

wobei $h[n]$ eine Impulsantwort, k die Verzögerung und s die Skalierung der Reflexion darstellen. Die Fouriertransformation von $x[n]$ lautet dann

$$\underline{X}(e^{j\theta}) = \underline{H}(e^{j\theta})[1 + se^{-j\theta k}] \quad (3.2)$$

Mit (2.2) ergibt sich $\hat{X}(e^{j\theta})$ zu

$$\begin{aligned} \hat{X}(e^{j\theta}) &= \log_e |\underline{H}(e^{j\theta})| + \log_e [1 + se^{-j\theta k}] \\ &= \log_e |\underline{H}(e^{j\theta})| + \log_e (\sqrt{1 + 2s \cos(\theta k) + s^2}) + j[\angle \underline{H}(e^{j\theta}) + \arctan \frac{-s \sin(\theta k)}{1 + s \cos(\theta k)}] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Man erkennt dass, die Wellenform von $\hat{X}(e^{j\theta})$ eine additive periodische Komponente mit der „Frequenz“ k beinhaltet.

Die nächsten Abbildungen sollen zeigen, wie ein solcher periodischer Anteil mit Hilfe des Cepstrums erkannt werden kann. Als Anregungssignal $h[n]$ soll eine exponentiell gewichtete Sinusschwingung dienen.

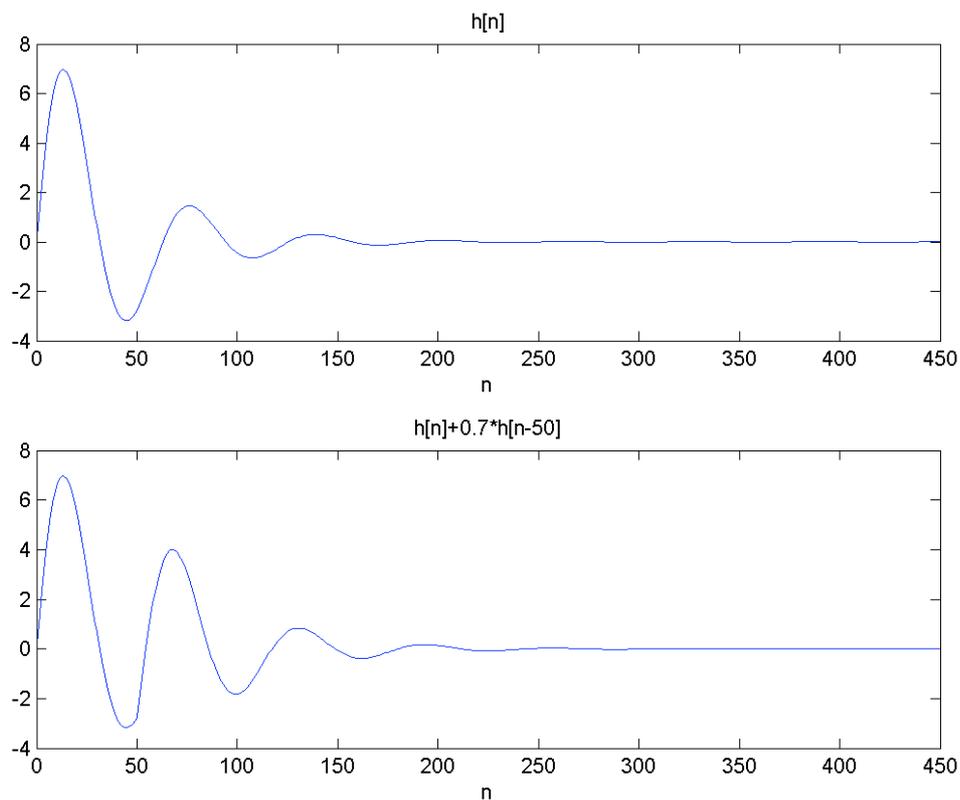


Abb.1 Impulsantworten $h[n]$ und $x[n]$ ($h[n]$ mit einer Reflexion)

Die Werte des Beispiels sind bewusst so gewählt, dass die Reflexion fast nicht erkennbar ist. Die nächste Grafik zeigt das logarithmierte Betragsspektrum von $x[n]$

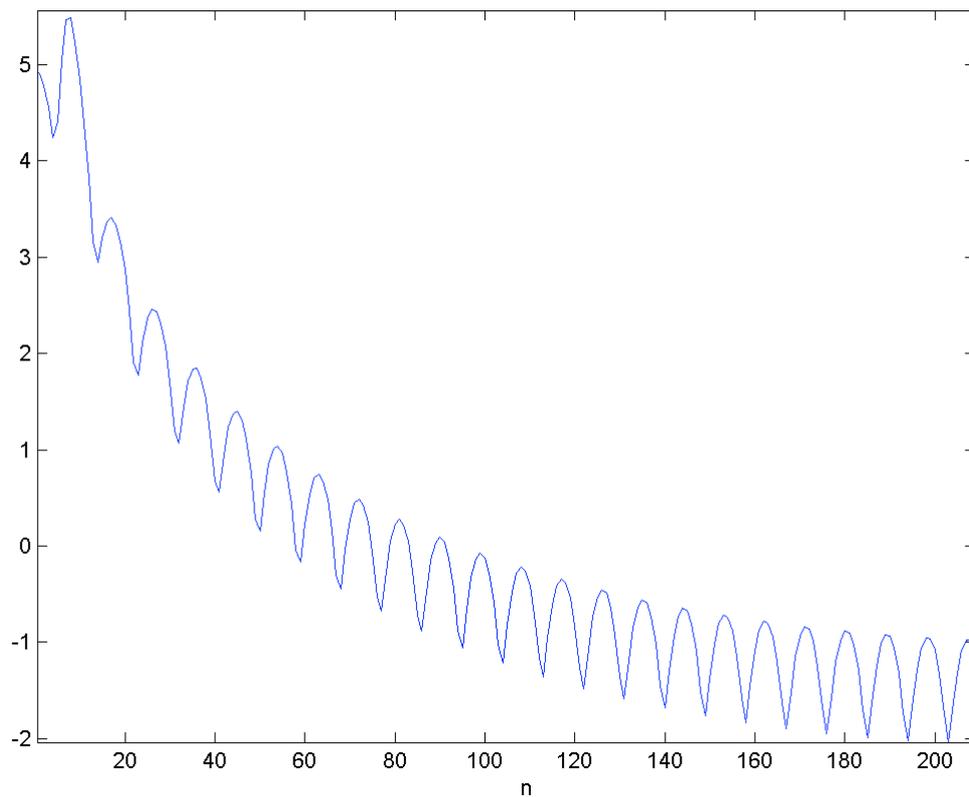
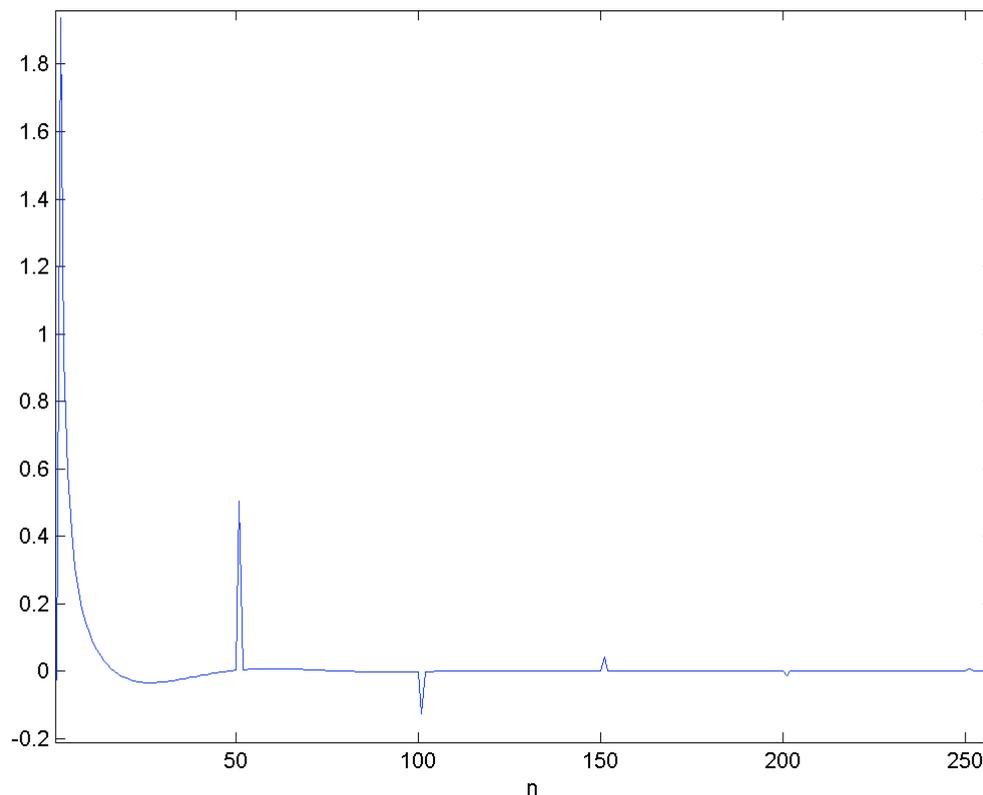


Abb.2 Logarithmiertes Betragsspektrum von $x[n]$

Man erkennt deutlich die in (3.3) bereits rechnerisch ermittelte Periodizität von $\hat{X}(e^{j\theta})$.

Unterzieht man $\hat{X}(e^{j\theta})$ der inversen Fouriertransformation so gelangt man in den cepstralen Bereich und man erkennt deutlich die Extrema bei Vielfachen von k .

Abb.3 Reelles Cepstrum $g_r[n]$

Die aus **Abb.1** nicht direkt ersichtliche „Verzögerungszeit“ k ist jetzt im Cepstrum deutlich zu sehen (Abb.3). Eine Möglichkeit die beiden Impulsantworten zu entfalten besteht nun darin, lediglich den Teil des Cepstrums bis zur ersten Reflexion zu verwenden und anschließend der Rücktransformation zu unterziehen. Das funktioniert, da eine minimalphasige Reflexion im Cepstrum kausal ist, d.h. für die Zeit vom Direktschall bis zur ersten Reflexion hat sie keinen Einfluss auf das Cepstrum⁴. Allerdings tritt oft der Fall auf, dass das Cepstrum des Direktschalls beim Eintreffen der ersten Reflexion noch nicht weit genug abgeklungen ist. In diesem Fall liefert die Glättung des Cepstrums durch einen Filtern bzw. „händisches“ Entfernen der cepstralen Peaks ein weitaus genaueres Ergebnis.

Die Möglichkeiten und Grenzen für die cepstrale Nachbearbeitung, die durch die technischen Randbedingungen gegeben sind, sollen im Folgenden dargestellt werden.

3.2 Raum- und Gehäusereflektionen

Wie in Kapitel 2.2.3 bereits erwähnt, ist die Eigenschaft der Minimalphasigkeit von Reflexionen äußerst vorteilhaft für die cepstrale Nachbearbeitung. Eine Nichtminimalphasigkeit äußert sich in grober Verzerrung des Cepstrums und verkompliziert

daher den Entfaltungsprozess erheblich. Von J. M. Kates⁶ wurde gezeigt, dass es sich bei Reflexionen am Gehäuse um minimalphasige Reflexionen handelt. Wie von Bauman et al.⁷ angeführt besteht bei Raumreflexionen für die Minimalphasigkeit ein Tradeoff zwischen unterer Messgrenzfrequenz und Messabstand zur Quelle. Wenn man mit der unteren Messgrenzfrequenz in den Bereich des Tiefen Roll-off's des Lautsprechers gelangt, führt dies aus folgendem Grund zu einer Aufweitung des Cepstrums. Für Signale die sich zeitlich langsam ändern fällt das Cepstrum sehr schnell, beziehungsweise schneller als die Impulsantwort ab. Eine Frequenzantwort eines Lautsprechers stellt ein solches Signal für tiefe bis mittlere Frequenzen dar. Die Welligkeit zu hohen Frequenzen hin ist eine Folge der Raumreflexionen und somit im Cepstrum nach rechts verschoben. Das Absinken der Frequenzantwort für Frequenzen höher als 20 kHz kann ebenfalls als langsame Änderung betrachtet werden, wenn man die logarithmische Darstellung in Betracht zieht. Im Bass Roll-off Bereich des Lautsprechers ändert sich die Frequenzantwort jedoch sehr schnell. Je mehr vom Hoch-pass-Verhalten des Lautsprechers in die Messung einfließt, desto größer ist die daraus resultierende Aufweitung des Cepstrums. Das Cepstrum des Direktschalls wird von den Cepstren der Reflexionen überschattet, was zusammen mit den Phasen Nichtlinearitäten des Roll-Off Bereichs die Nachbearbeitung erheblich erschwert. Weiters wurde von Bauman et al.⁷ gezeigt, dass es zu nicht minimalphasigen Reflexionen kommen kann wenn der Abstand vom Messmikrofon zur Quelle zu groß wird. Der Direktschall hat dann im Vergleich zu den Reflexionen zu wenig Energie. Der kritische Abstand wird dabei so definiert, dass die Gesamtenergie der Reflexionen nicht höher sein sollte als die des Direktschalls. Bei Salamouris et al.¹ findet man einen experimentell bestimmten kritischen Abstand von ca. 1,4 Metern. Eine weitere Möglichkeit der Messoptimierung besteht darin ein kürzeres Zeitfenster für die Messung zu wählen, was wiederum einer höheren unteren Grenzfrequenz entspricht und einen geringeren Nachhallanteil zur Folge hat. Solange also das Zeitfenster lang genug ist um die gewünschte untere Messfrequenz zu erreichen, und so lange nicht zu viele Reflexionen in die Messung mit einfließen, kann man von der Minimalphasigkeit des Messsignals ausgehen.

Bei Mehrweglautsprechern können die im Übergangsbereich von z.B. Tief- und Hochtöner auftretenden Phasen-Nichtlinearitäten zu einem nicht minimalphasigen Signal führen. Dies äußert sich im Cepstrum dadurch, dass die Allpasskomponente nicht mehr vernachlässigbar ist sondern das minimalphasige Cepstrum überlagert. Mit der unter 2.2.3 eingeführten Zerlegung lässt sich dieses Problem jedoch relativ gut in den Griff bekommen, da es möglich ist, lediglich den minimalphasigen Teil des Cepstrums zu bearbeiten und anschließend die Allpasskomponente wieder hinzuzufügen.

Auf die verschiedenen Möglichkeiten der Bearbeitung des Cepstrums soll im Folgenden eingegangen werden.

⁶ J. M. Kates, „Loudspeaker Cabinet Reflection Effects“, *AES Journal*, vol 27. pp. 338-350, 1979 March

⁷ P.D Bauman, S.P.Lipshitz, J.Vanderkooy, „Cepstral Techniques for Transducer Measurement: Part II“, presented at the 79th Convention of the AES, New York, 1985 October 12-16, *preprint No.2302*

3.3 Beispiele aus der Literatur

3.3.1 Beispiel 1

Bauman et al. führten in ihrem zweiten Paper⁷ folgendes Experiment durch. Die unten abgebildete Impulsantwort eines geschlossenen Zwei-Wege-Lautsprechers wurde gemessen.

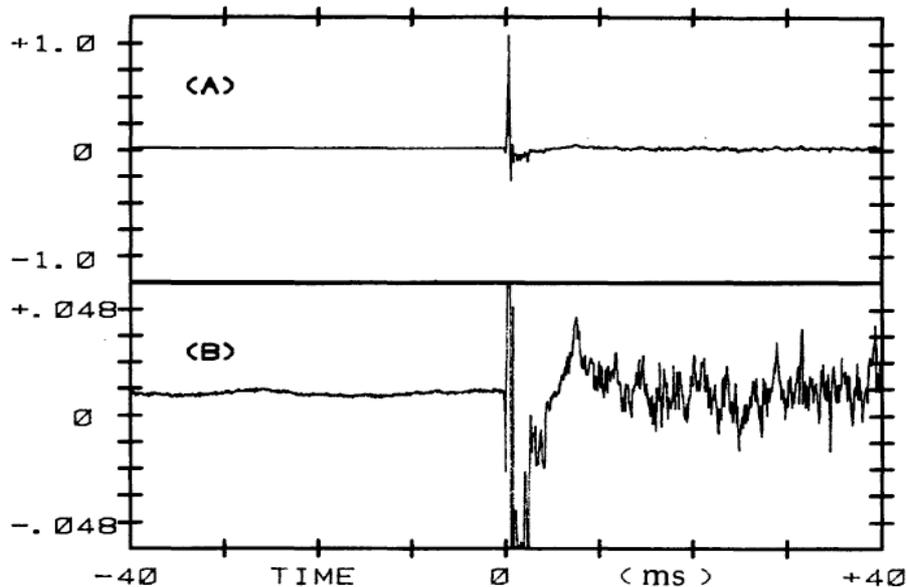


Abb. 4 Impulsantwort (oben) und Vergrößerung (unten)⁷

Kurve (A) in Abb.4 zeigt die normierte gemessene Impulsantwort, (B) die Vergrößerung eines Ausschnitts aus (A). Die erste Reflexion bei ca. 7 ms ist in (B) deutlich zu erkennen. In der nachfolgenden Abbildung (Abb.5) sind das minimalphasige Cepstrum (A) sowie das bearbeitete Cepstrum (B) dargestellt.

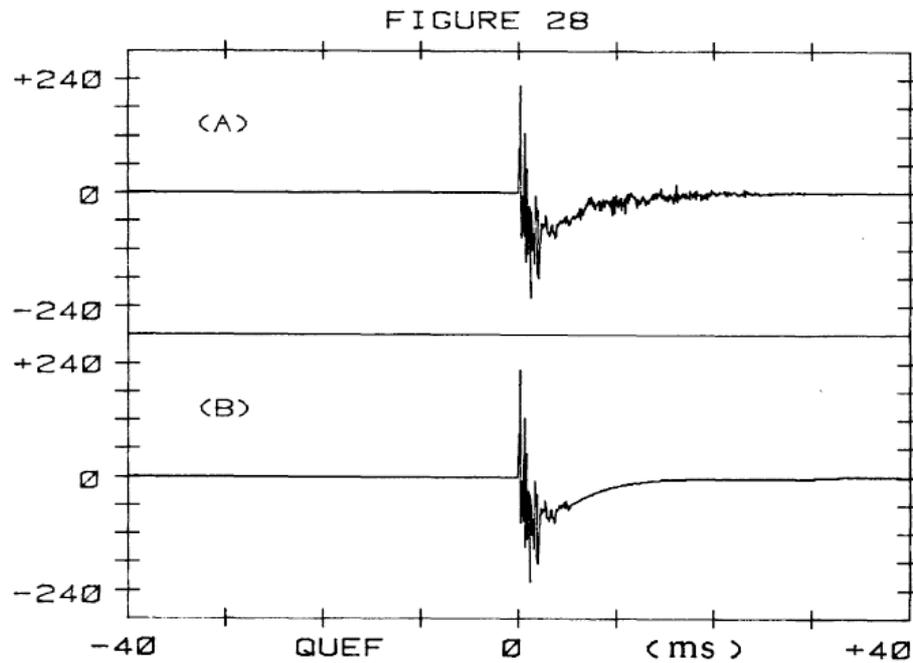


Abb. 5 minimalphasiges Cepstrum (oben) und bearbeitetes Cepstrum (unten)⁷

Bauman et al. wählten zur Glättung eine Least Square Ausgleichsfunktion 4. Grades für den Bereich ab der ersten Reflexion. Dabei werden die Messwerte mittels einer Funktion interpoliert bzw. angenähert, was einem händischen Entfernen der Peaks und anschließender Glättung gleich kommt. Die Rücktransformation des bearbeiteten Cepstrums liefert dabei folgendes Ergebnis:

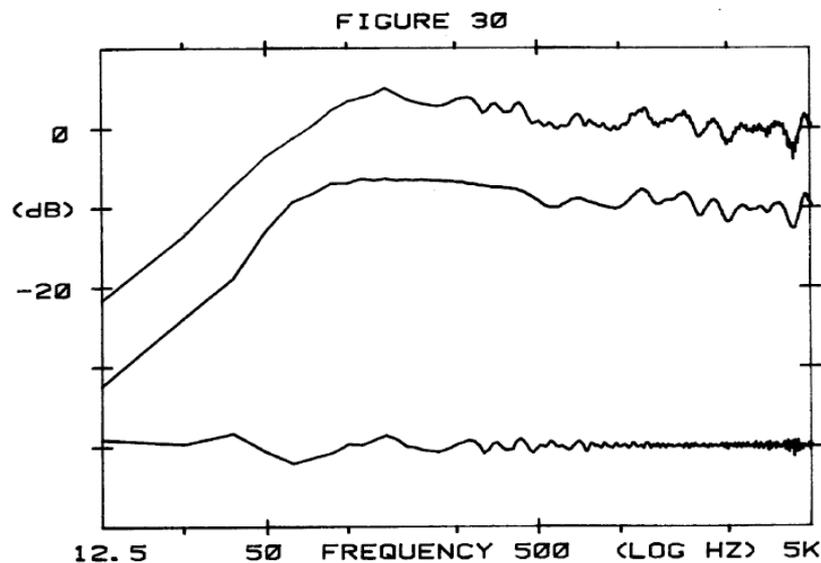


Abb.6 Gemessener Frequenzgang (oben) und rück-transformiertes Cepstrum (mitte)⁷

Abb.6 zeigt die ursprünglich gemessene Impulsantwort (oberste Kurve), und die durch Rücktransformation des Cepstrums erhaltene Impulsantwort (mittlere Kurve). Vergleicht man

die obere Kurve mit der mittleren, so sind die Glättung der Frequenzantwort und die Erweiterung des Messbereichs zu den tiefen Frequenzen hin eindeutig erkennbar.

Das nächste Beispiel soll zeigen, dass cepstrale Nachbearbeitung auch für den Fall von nicht minimalphasigen Reflexionen gute Ergebnisse liefern kann.

3.3.2 Beispiel 2

Im folgenden Experiment, durchgeführt von Salamouris⁸, wurde ein Zwei-Wege Bass-Reflex-Lautsprecher in einem Raum mit normalen Abhörbedingungen (8m x 5.5m x 2.6m) vermessen. Der Lautsprecher befand sich in der Mitte des Raumes und das Mikrophon hatte einen Abstand von einem Meter und war auf den Hochtöner gerichtet.

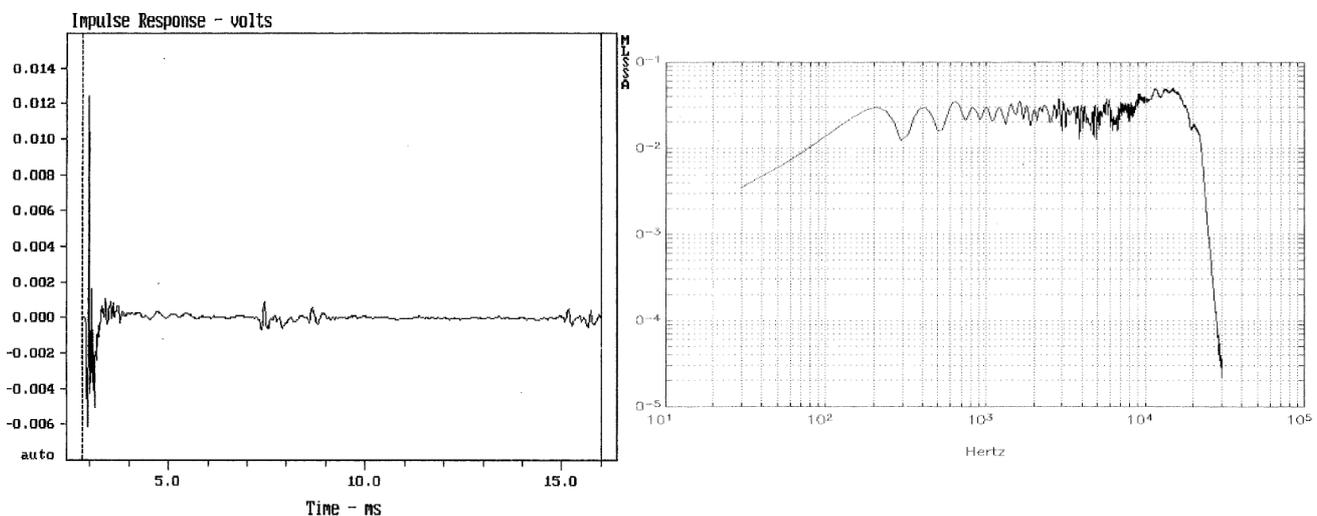


Abb. 7 Impulsantwort (links) und Frequenzgang (rechts) eines Zwei-Wege-Lautsprechers⁸

Deutlich in der Abbildung der Impulsantwort zu sehen (Abb.7, links) sind die beiden Reflexionen der Decke und des Bodens, bei etwa 7.5 ms und 9 ms. Die nächsten Reflexionen der Seitenwände treffen erst nach 15 ms ein. Durch erfolgreiches Entfernen der ersten beiden Reflexionen würde man einen erheblichen Zeitfenster-Zuwachs von 7.5 ms erreichen, was wiederum eine verbesserte Darstellung der tiefen Frequenzen ermöglicht. Für den Frequenzgang im rechten Bild wurden lediglich die ersten 657 Samples (einschließlich der beiden Reflexionen) gefenstert und anschließend mittels Zero-Padding auf eine Länge von 2048 Samples gestreckt. Das nächste Bild zeigt das komplexe Cepstrum auf der linken Seite und das mit einem 200-tap moving-average Filter geglättete Cepstrum auf der rechten.

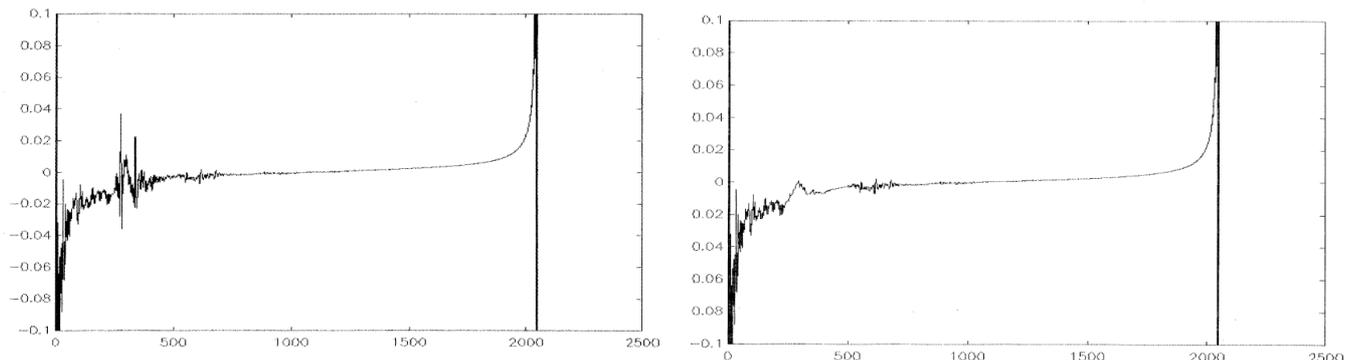
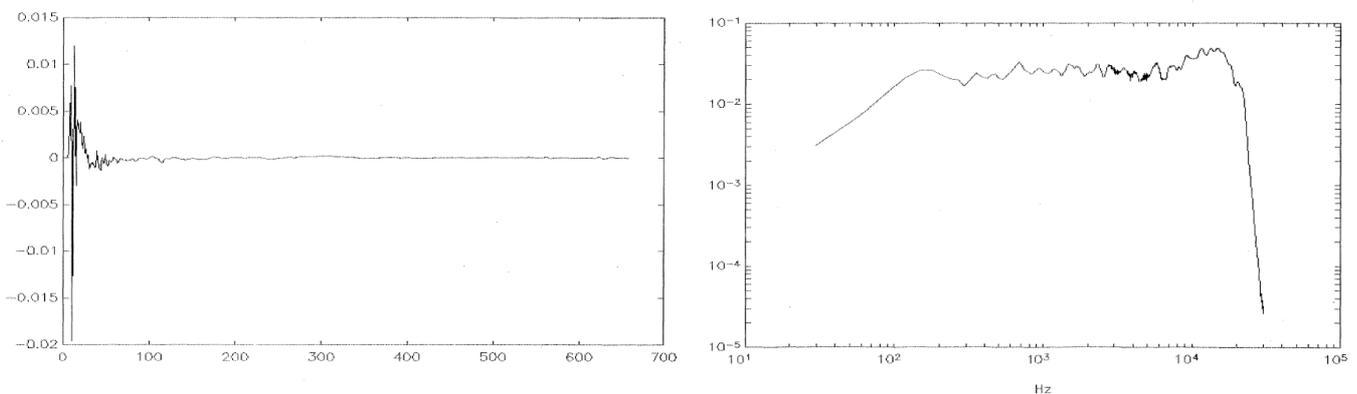


Abb. 8 komplexes Cepstrum (links) und geglättetes Cepstrum (rechts)⁸

Im komplexen Cepstrum kann man deutlich die Peaks der beiden Reflexionen erkennen. Für Glättungsfilter, deren Länge in etwa dem Abstand vom ersten Direktschall bis zur ersten Reflexion entspricht, lieferten die Experimente die besten Ergebnisse. Auffallend ist auch das nicht minimalphasige Verhalten des Lautsprechers, erkennbar an den von Null verschiedenen Werten für die „Queffrenzen“ von 1024-2048 Punkten. In diesem Experiment entstehen dadurch jedoch keine Probleme, da das Cepstrum des Direktschalls beim Eintreffen der ersten Reflexion praktisch abgeklungen ist. Nachfolgend (Abb.9) sind links die, durch Rücktransformation des bearbeiteten Cepstrums erhaltene, Impulsantwort und rechts der dazugehörige Frequenzgang abgebildet.

**Abb. 9 bearbeitete Impulsantwort (links) und Frequenzgang (rechts)⁸**

Vergleicht man Abb.9 links mit Abb.7 links, so erkennt man zwar, dass die beiden Reflexionen aus der Impulsantwort erfolgreich entfaltet werden konnten, eine Aussage über eine bessere Auflösung zu den tiefen Frequenzen hin erhält man jedoch erst wenn man die beiden Frequenzgänge vergleicht. Hier ist der Erfolg der cepstralen Glättung jedoch eindeutig. Die untere Grenzfrequenz hat sich um 50 Hz nach unten verschoben und der Frequenzgang weist weniger Welligkeit auf. Der durch die Bearbeitung im cepstralen Bereich ermittelte Frequenzgang kommt dem Freifeld-Frequenzgang des Lautsprechers damit deutlich näher als der gemessene.

3.4 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass cepstrale Nachbearbeitung von Impulsantworten eine wirkungsvolle Methode zur Entfaltung der ersten Reflexionen und damit zur besseren Darstellung der tiefen Frequenzen liefert. Die wichtigen Eigenschaften und Zusammenhänge zwischen dem cepstralen Bereich und dem Zeit- bzw. Frequenzbereich wurden angeführt und die grafischen bzw. mathematischen Methoden der cepstralen Bearbeitung in zwei Beispielen erläutert.

4 MATLAB GUI

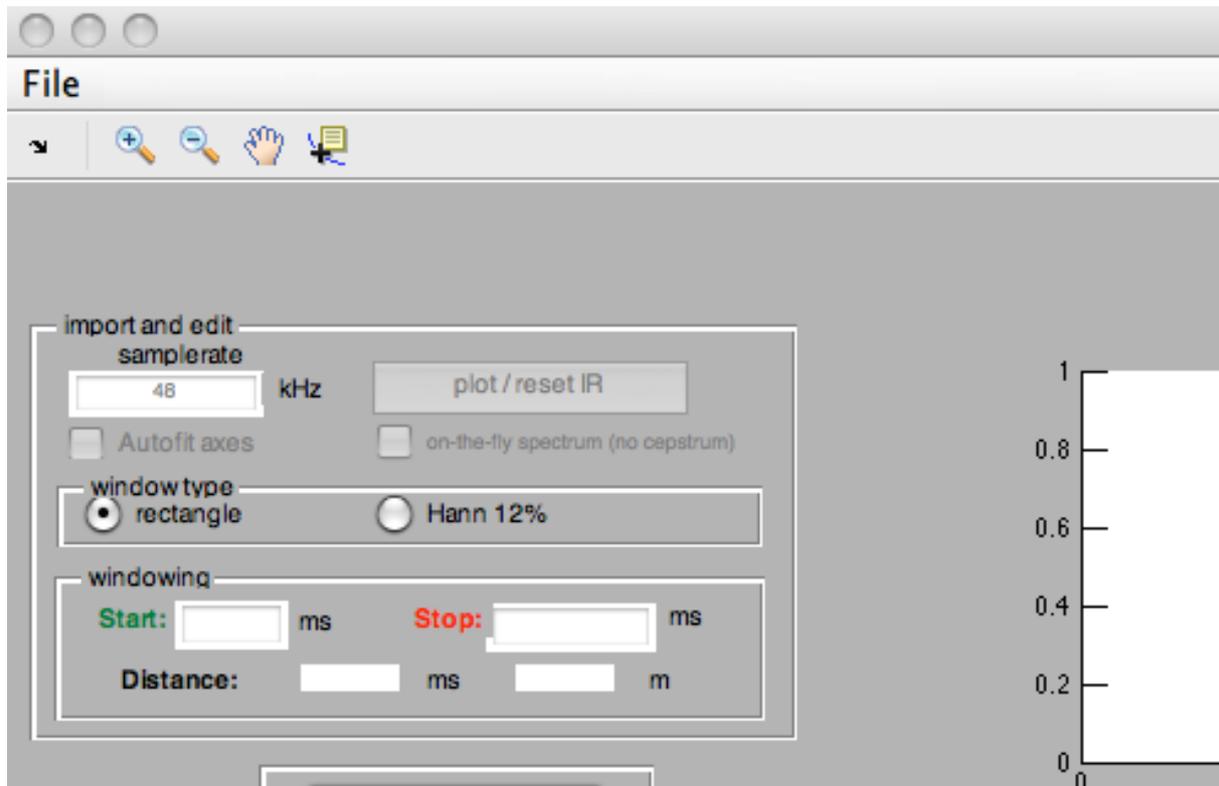
4.1 Documentation

The MATLAB GUI is supposed to provide an intuitive environment in which the user can try out different possibilities of cepstral editing of impulse responses. A visual feedback in form of graphs should enhance the understanding of basic principles of the cepstral domain as well as basic signal processing ideas (e.g. windowing).

The user can choose between two input formats, ARTA-PIR or standard ASCII, depending on the file type. After the import the impulse response is presented and the user can select the interval to be used later on for cepstral editing. The cepstrum is computed and shown in a second section. Different possibilities of liftering (i.e. different window types and lengths) can be explored.

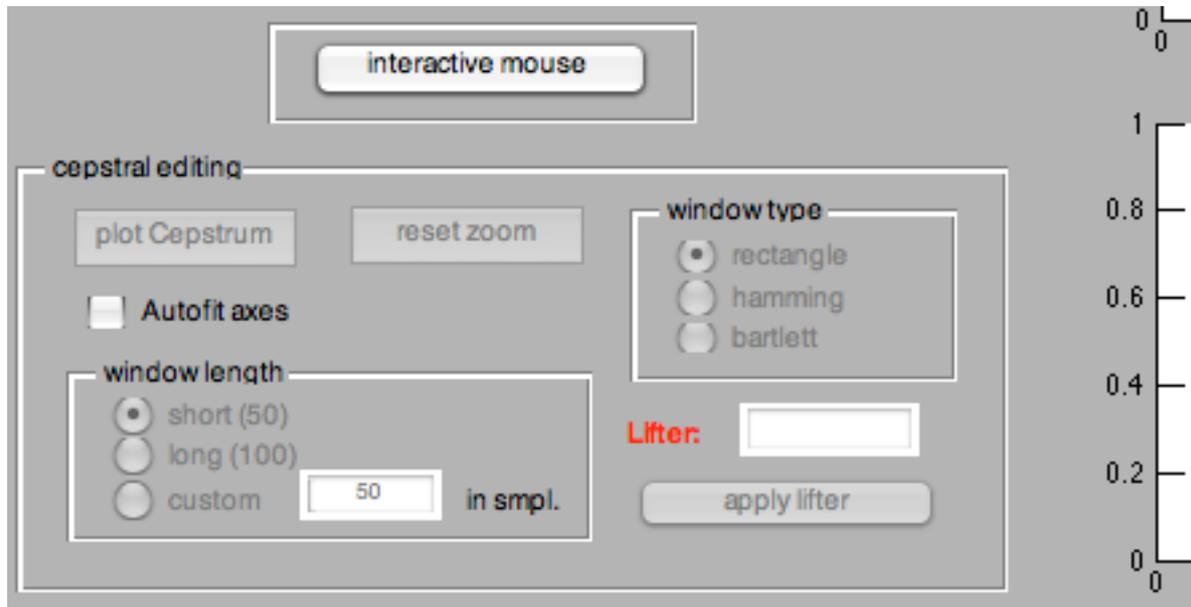
In the third section the resulting spectrum or impulse response is shown and can be directly compared to its unprocessed version. One may export the results to the MATLAB Workspace or to an ASCII file. Quick reference guide

4.1.1 Import and impuls response windowing



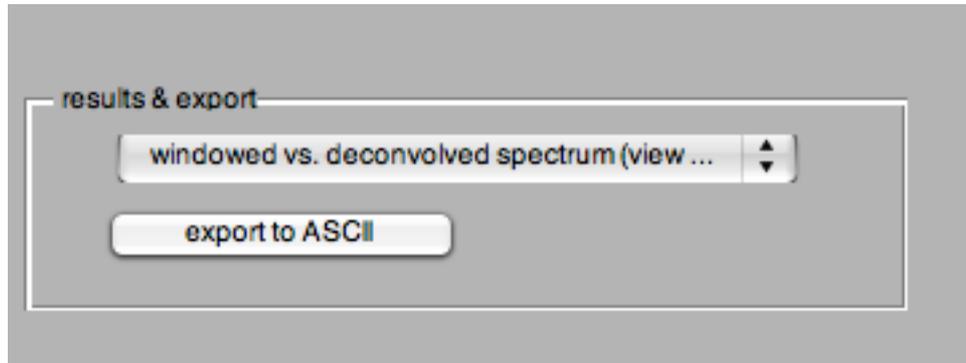
In the file menu you can choose to import between ARTA PIR file format or any other IR in ASCII format. If an ARTA PIR file was imported the sampling rate is detected automatically and the IR is plotted at once. For any other file type specify the sampling rate in the “samplerate” edit field and click plot/reset IR. If “Autofix axes” is being checked, the IR is plotted with automatic adjustment of the scaling. After the IR is being plotted you can move (drag&drop) a green and a red marker, representing the beginning and end of the window that defines the part of the IR to be transferred in the cepstral domain. You can also change the position of the markers by typing the respective value in the “Start” or “Stop” fields. The window type determines if the data, enclosed by the markers, is to be cut out, or if there is a smoothed transition at the end of the window. A half Hann window is used which smoothes the last 12% of the window specified with the markers. In the “distance” fields you see the time difference as well as the difference in meters of the markers (a sound velocity of 343 m/s is assumed). By checking the “on-the-fly” box, all subsequent calculations are computed on the release of the mouse (after dragging the markers). It is possible to distinguish the impact of window length and type on the spectrum “on-the-fly”. With extensive IR’s this will possibly lead to a reasonable delay of the plot depending on the hardware of your system.

4.1.2 Cepstral editing



The “interactive mouse” button turns your cursor into a multifunctional tool. You can drag and zoom in or out of an arbitrary axis. While enabled you cannot drag and drop any of the markers. Renewed click on the button toggles the cursor mode. The cepstrum is plotted automatically when you plot your IR. In this case as well you have the choice to use the “Autofix” option for a more convenient scaling of the axes. Displayed in the axes you will see the cepstrum of your IR and a default liftering window. Depending on the scaling of the axes the window may appear only as a red line. You can drag and drop the window with your mouse to the desired position, or you can specify a value in the “Lifter” field. In the “window length” field you can choose between predefined window lengths or you can enter a custom length. Three predefined window types can be chosen. With proper scaling you will see the shape and length of the window change according to your specification. After making all adjustments click “apply lifter” and the cepstrum is liftered with the specified window.

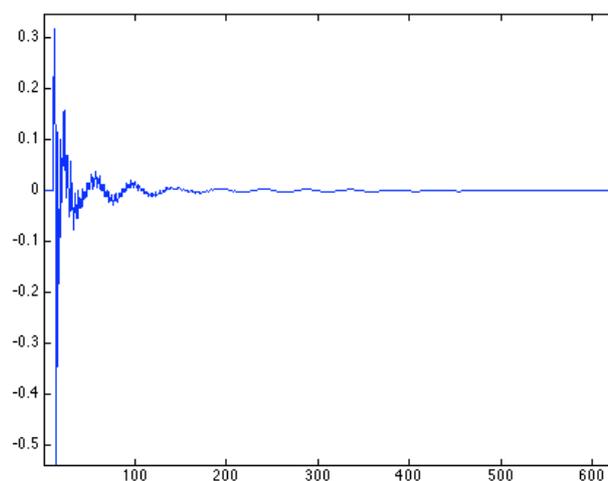
4.1.3 Results and export



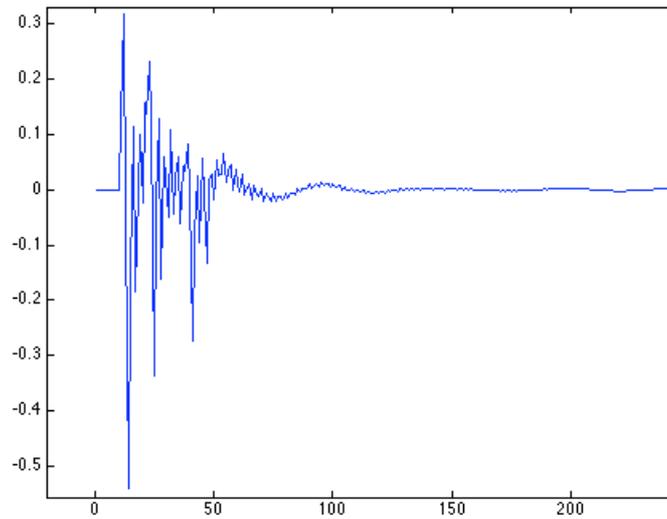
In the drop down menu you can choose the results you want to be plotted in the adjacent graph. You can either observe the IR or spectrum before and after cepstral editing alone or you can display the two IRs or spectra overlapping. An additional spectrum of the “un-windowed” IR is also available. If a single curve (IR or spectrum) is active you can export the respective data to an ASCII file or to the workspace.

4.2 Example

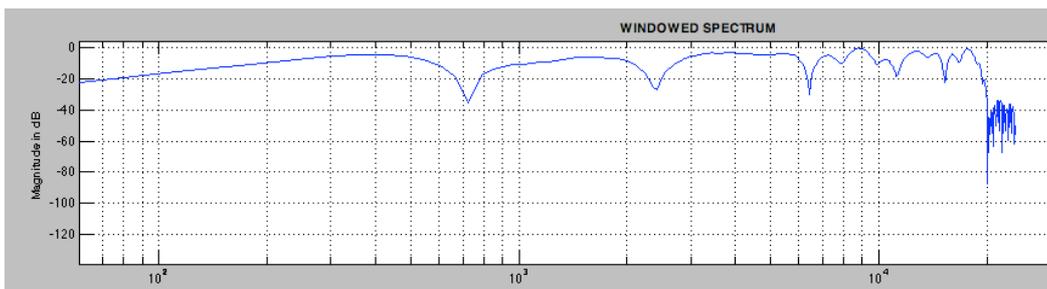
The filter design tool of MATLAB was used to implement a 12th-order IIR minimum-phase bandpass filter. The passband was designed to reach from 100Hz to 19kHz. This should suffice as a rough model of a loudspeaker. The impulse response of this bandpass is depicted in the figure below.



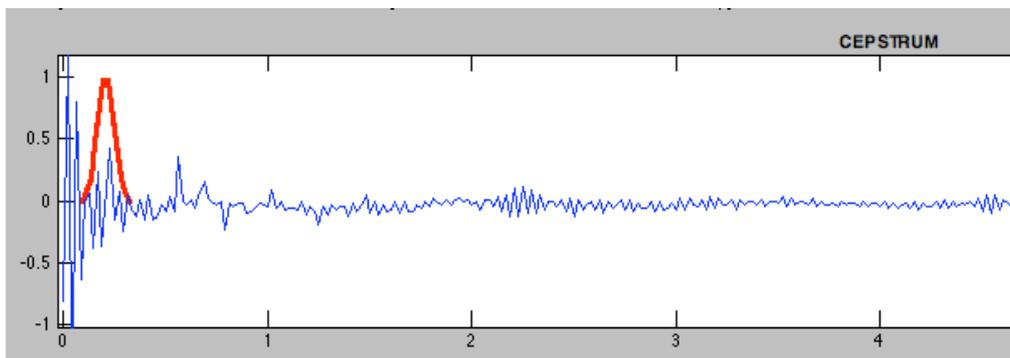
This IR was convolved with 3 closely spaced (after 15, 25 and 30 samples) and scaled (0.8, 0.6, 0.4) impulses to simulate 3 room reflections. The result is on the next page.



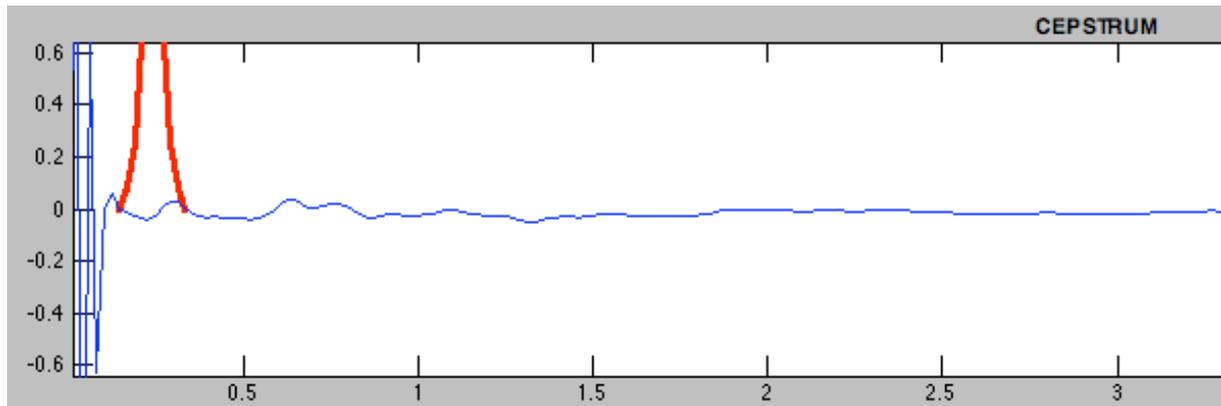
The spectrum of this distorted IR looks as follows



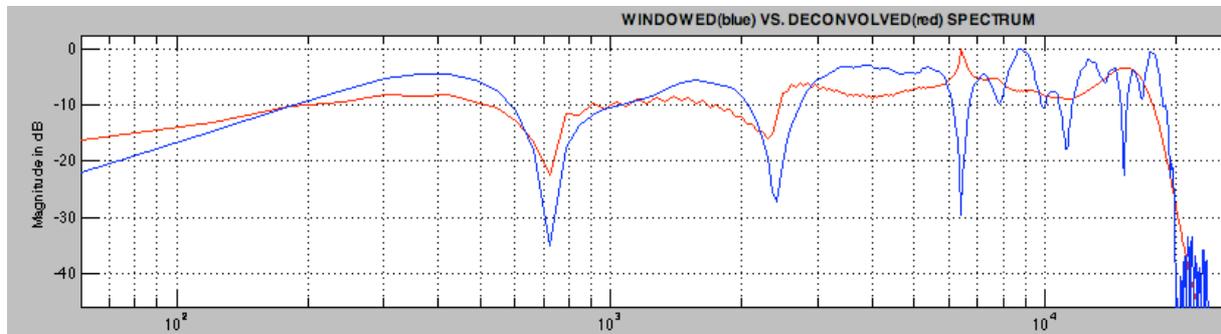
One can clearly distinguish the combfilter effect of the reflections. The next figure shows the cepstrum of the IR



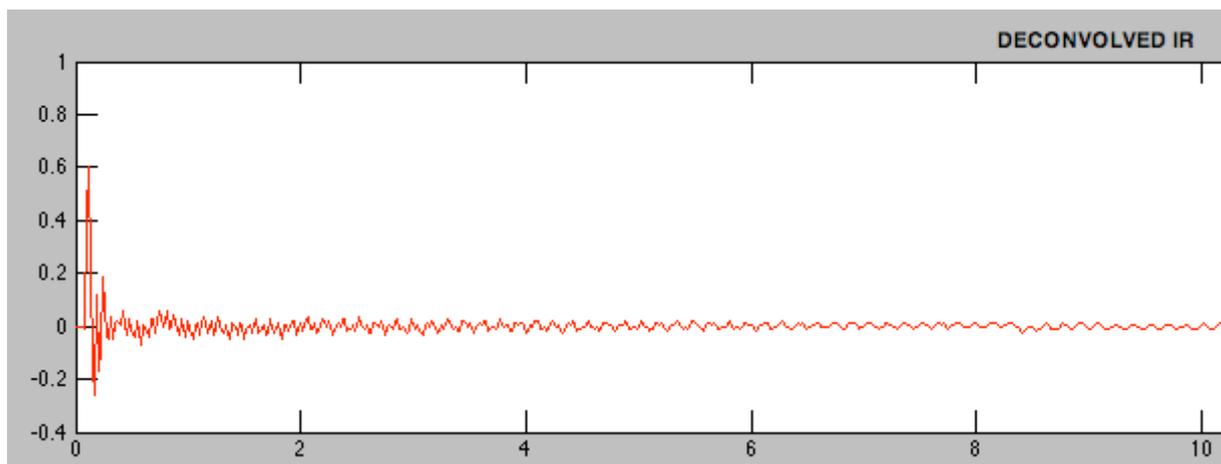
There are clearly distinguishable spikes that resemble the „reflections“. A Hamming window with length of 5 samples was used to smooth the cepstrum. The filtered cepstrum looks as follows.



Below you find the original/windowed spectrum compared to the deconvolved spectrum. The combfilter effect could be reduced significantly.



The deconvolved IR approximates the original IR. The effect of the reflections could be reduced, however to the cost of more ripple in the decaying part.



Cepstral editing worked fairly well, and the result is quite similar to the „dry“ IR

This remains an example however. The performance and the quality of the results with real measurements depends heavily on the circumstances of the measurement as well as the condition of the IR (minimalphase, noise,...). Enclosed to this document you find an ASCII file called „imptest.txt“ which contains the artificial IR from above.

5 Literaturverzeichnis

- [1] [BOGART] BOGART B. P., HEALY M. J. R., TUKEY J.W.: *The quefreny analysis of time series for echoes: Cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum, and saphe cracking in Time Series Analysis*, M. Rosenblatt, Ed. 1963
- [2] [OPPENHEIM 1] OPPENHEIM A. V.: *Superposition in a class of nonlinear systems*, Ph.D. dissertation, MIT, May 1964
- [3] [COOLEY] COOLEY J.W., TUKEY J.W.: *An Algorithm fort the machine computation of complex Fourier series* Math. Computation, vol. 19, pp.297-301, April 1965
- [4] [OPPENHEIM 2] OPPENHEIM A.V., SCHAFER R.W.: *Digital Signal Processing* Englewood Cliffs, NJ Prentice-Hall 1975
- [5] [BAUMAN 1] BAUMAN P. D., LIPSHITZ S. P., SCOTT T. C., VANDERKOOY J.: *Cepstral Techniques for Transducer Measurement, AES preprint No. 2127*, New York, October 1984
- [6] [KATES] KATES J.M.: *Loudspeaker Cabinet Reflection Effects, AES Journal vol 27*, March 1979
- [7] [BAUMAN 2] BAUMAN P. D., LIPSHITZ S. P., VANDERKOOY J.: *Cepstral Techniques for Transducer Measurement: Part II, AES preprint No. 2303*, New York, October 1985
- [8] [SALAMOURIS] SALAMOURIS Soterios I.: *A Method for Extending the Measured Response of a Loudspeaker towards the Low Frequencies, with the use of Cepstral Analysis, AES preprint No. 3233*, Vienna, March 1992