

Qualitätsoptimierung von Audiosystemen mit ELACOMP Filter (Electro Acoustic Compensation)

© Sound acoustics research 2013- All rights reserved

1. Einführung

Elektroakustische Bauelemente und Systeme weisen zum Teil erhebliche Qualitätsunterschiede auf. In den meisten Fällen ist die Impulsantwort dieser Systeme nicht ideal, wodurch deren Frequenzgang zum Teil starke Unebenheiten aufweist (Bild 1).

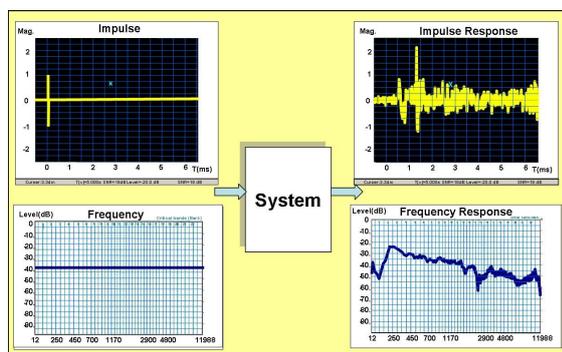


Bild 1: Übertragungsverhalten eines Systems

Die Wiedergabe klingt dumpf dröhnend oder zu grell, wodurch die Verständlichkeit insbesondere von Sprachsignalen erheblich verschlechtert und die Echoproblematik bei Telekommunikationssystemen drastisch erhöht sein kann. Eine exakte Kompensation des Übertragungsverhaltens eines Systems ist mit Hilfe bekannter Verfahren nur begrenzt möglich.

Dieser Bericht zeigt aktuelle Lösungsansätze mit Hilfe digitaler Filter auf und stellt die Eigenschaften eines neuen Verfahrens (ELAComp) gegenüber.

2. Aufgabenstellung

Die Kompensation der Übertragungsfunktion $H_x(\cdot)$ eines Systems kann mit Hilfe eines Filters mit inverser Übertragungsfunktion $H_y(\cdot) = 1/H_x(\cdot)$ erreicht werden (Bild 2).

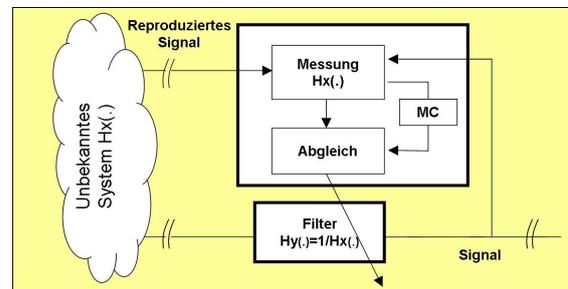


Bild 2: Kompensation der Übertragungsfunktion eines Systems

Eine korrekt durchgeführte Kompensation rekonstruiert einen einzigen Impuls aus der Impulsantwort des unbekanntes Systems und begründet damit den Frequenzgang. D.h. das Kompensationsfilter wirkt nach Bild 1 von rechts nach links dem System entgegen. Die Länge der Impulsantwort und die Frequenzauflösung eines Systems bestimmen die erforderlichen Filtereigenschaften und damit den notwendigen Hardware- und Rechenaufwand eines bestimmten Filtertyps.

Im Folgenden werden die nach dem Stand der Technik bekannten digitalen Filter diskutiert.

3. Kompensation mit FIR - Filter

Eine fast ideale Kompensation des Übertragungsverhaltens eines Systems lässt sich mit Hilfe eines FIR Filters erreichen, dessen Übertragungsfunktion $H_y(z)$ durch die Impulsantwort $hy(k)$ bestimmt wird.

$$H_y(z) = \sum_{k=0}^{M-1} hy(k)z^{-k} \quad G1$$

D.h. die Impulsantwort $hy(k)$, mit $M-1$ Abtastwerten, wird mit dem Nutzsignal gefaltet. Die für die Kompensation erforderliche Impulsantwort kann beispielsweise mit Hilfe der Echomethode nach Bild3 ermittelt werden.

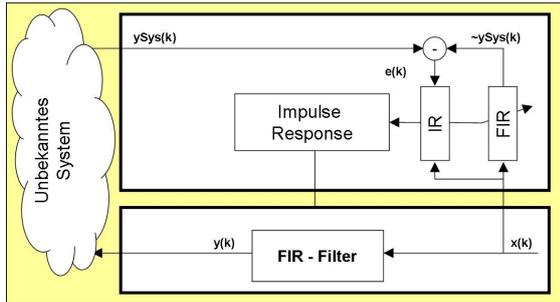


Bild 3: Kompensation mit FIR Filter

Die Kompensation von elektroakustischen Systemen benötigt eine Frequenzauflösung von < 10 Hz, um eine ausreichende Kompensation auch bei tiefen Frequenzen zu erreichen. D. h. die erforderliche Filterlänge mit 10% der Abtastrate führt zu einer so hohen Rechenleistung, dass diese Lösung bei den meisten Produkten aus Kostengründen ausgeschlossen ist. Die erforderliche Konvergenzzeit beträgt mit einem NLMS -Algorithmus mehrere Sekunden und reicht für ein echtzeitfähiges adaptives System nicht aus.

4. Kompensation mit IIR - Filter

IIR Filter nutzen Filterpole und Nullstellen zur Approximation an einen gewünschten Frequenzgang. Der Abgleich kann, wie in Bild 4 gezeigt, mit Hilfe der gemessenen Spektren durchgeführt werden. Versuche mit verschiedenen Berechnungsverfahren (e. g. Least Square) zeigen entweder unbefriedigende Ergebnisse, oder führen nur bei höherer Ordnung und damit auch nur bei hoher Rechenleistung zu brauchbaren Ergebnissen.

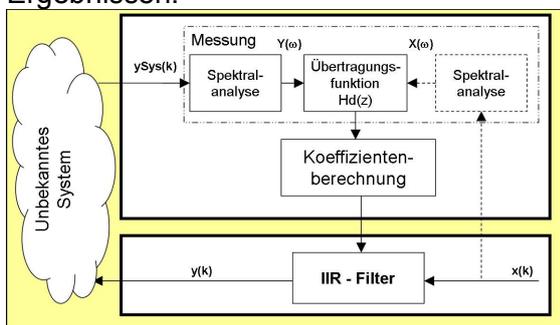


Bild 4: Kompensation mit IIR Filter

Um stabile Verhältnisse mit adäquatem SNR zu erreichen werden gerne biquadratische Filter eingesetzt. Die Übertragungsfunktion dieser Filter

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad G2$$

berücksichtigt jeweils zwei Pole und Nullstellen, womit immer nur eine Störstelle im Frequenzgang begrenzt kompensiert werden kann und damit eine Frequenzgangkompensation nur durch die Kaskadierung von N biquadratischen Filtern möglich ist. Eine einigermaßen brauchbare Begradigung des Frequenzgangs lässt sich bei $N \geq 100$ erreichen.

Generelle Probleme mit IIR Filtern betreffen die Gruppenlaufzeit, das Resonanzverhalten und deren Parametrierung.

Die Gruppenlaufzeit ist nicht konstant, da die Symmetriebedingung

$$H(z) = \pm z^{-N} H(z^{-1}) \quad G3$$

nicht eingehalten werden kann, weil die Filterpole der Spiegelabbildung außerhalb des Einheitskreises liegen und damit zu Instabilität führen.

Ferner weisen Filterpole nahe dem Einheitskreis unerwünschte Resonanzeigenschaften auf, die nicht exakt auf die zu kompensierenden Systeme parametrieren werden können.

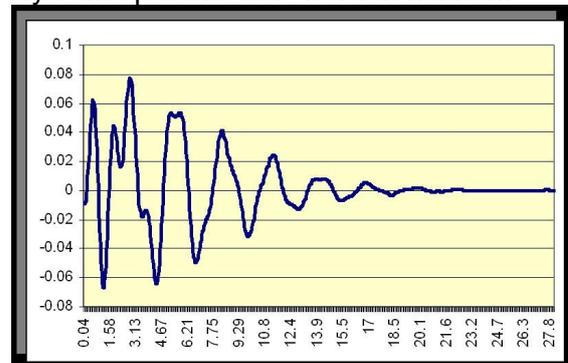


Bild 5: Nachschwinger durch Filterpole eines IIR Filters nach Abschalten eines Rauschsignals. D.h. mit stationärem Rauschsignal ergibt sich im eingeschwungenen Zustand eine gute Frequenzgangbegradigung, aber mit dynamischen Signalen sind Störungen durch Nachschwinger fast unvermeidbar.

5. Kompensation mit ELAComp - Filter

ELACOMP ist ein neues Filterverfahren welches die Kompensation einer nicht idealen Übertragungsfunktion bei geringer Rechenleistung ohne Latenz nahezu perfekt durchführt.

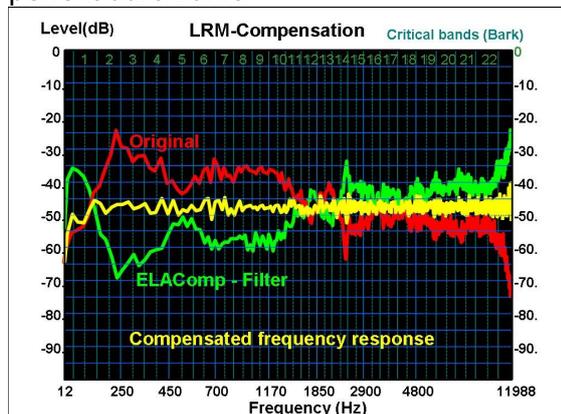


Bild 6: LRM - Kompensation mit ELAComp Filter für eine kristallklare Wiedergabe

Bild 6 zeigt den Frequenzgang eines LRM Systems (rot), den Frequenzgang des ELAComp – Filters (grün) und den resultierenden kompensierten Frequenzgang am Hörerort (gelb).

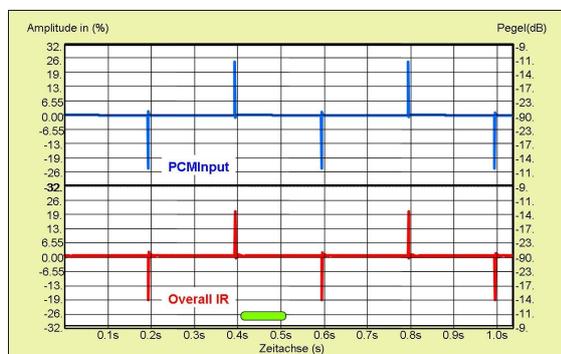


Bild 7: Optimale Rekonstruktion eines Impulses mit ELAComp Filter

Bild 7 zeigt die Rekonstruktion eines Impulses am Hörerort (rot) im Vergleich zum Originalsignal (Blau). Die Impulsantwort wurde am reproduzierten Signalausgang (Bild 2) gemessen

Der Rechenaufwand des ELAComp Filters ist auf ca. 220 MAC pro Abtastwert begrenzt. Der Abgleich des ELACompfilters erfolgt direkt aus der ermittelten Übertragungsfunktion des zu

kompensierenden Systems ohne Iteration und damit ohne Konvergenzzeit.

Das ELAComp – Verfahren wird hier nicht näher beschrieben (siehe Hinweis).

6. Kompensationsfilter im Vergleich

Für die Gegenüberstellung der diskutierten Filter wurden Simulationen mit PCM Testdaten mit unterschiedlichen Szenarien bei einer Abtastrate von 24 kHz durchgeführt.

	ELAComp	FIR	IIR
Abgleich	++	+	-
Stoßantwort	präzise	präzise	diffus
Gruppenlaufzeit	konstant	konstant	variabel
Latenz	0ms	10ms	variabel
Rechenaufwand in	220 MAC	2400 MAC	500 MAC

Tabelle 1: Kompensationsfilter im Vergleich
Tabelle 1 gibt einen groben Überblick über die Eigenschaften der Filter im Vergleich.

Der Abgleich des Filters auf die ermittelte Übertragungsfunktion eines unbekanntes Systems ist mit ELAComp absolut unkritisch und führt unmittelbar zu einer korrekten Kompensation mit einer gemittelten Restwelligkeit von < 1dB. Die Restwelligkeit wurde wegen der verwendeten Rauschanregung, welche naturgemäß keine gerade Linie auf der Frequenzachse erzeugt, auf die Frequenzgruppenbandbreite der Barkskala gemittelt.

Bei FIR – Filtern erfolgt die Abgleichprozedur mit Hilfe der NLMS – Echomethode iterativ und benötigt mehrere Sekunden, um die Restwelligkeit < 1dB zu erreichen. Wendet man eine modifizierte Frequenzabtastmethode zum Abgleich an, ist der Abgleich ohne Iterationen möglich.

Bei IIR – Filtern entstehen durch die Resonanzeigenschaften der Filterpole mit jeder zu kompensierenden Störstelle Restfehler. Diese Restfehler konnten nur durch mehrere Iterationsschritte reduziert werden. Die Restwelligkeit betrug dennoch >2dB.

Die Impulsantwort weist bei ELAComp Filtern ohne Latenz wie bei FIR Filtern mit

Sound acoustics

Research, Development, Implementation

einer Latenz von ca. 10 ms Reststörungen im Bereich von -40 dB auf. Dies wurde als präzise eingestuft. Dahingehend konnte mit IIR - Filtern keine eindeutige Impulsantwort gemessen werden.

7. ELAComp – Filter unter der Lupe

Es wurden Tests mit verschiedenen Wandlern unterschiedlicher Preisklasse bei 8, 24 und 48kHz Abtastrate durchgeführt. Untersucht wurde die Kompensation der Übertragungsfehler von Lautsprecher – Mikrofon- (LM), Lautsprecher- Raum- Mikrofon (LRM) und Raum- Mikrofon (RM) Systemen.

LM Kompensation

Die Wiedergabequalität eines Lautsprechersystems wird in den meisten Fällen durch das Produktdesign oder den Einbauort nachteilig beeinflusst. Gründe für Qualitätsverluste sind u. a., dass kostengünstige Plastikgehäuse mit teilweise auch zu kleinem Volumen verwendet werden, wodurch Resonanzen und frequenzabhängige Dämpfungen zu einem unbefriedigenden Frequenzgang führen. Mit der Kompensation der Übertragungsfunktion dieser "Billiglautsprechersysteme" kann die Qualität drastisch (>1 Punkt auf der 5 Punkte MOS Skala) erhöht werden.

LRM Kompensation

Werden Lautsprechersysteme ungünstig im Raum positioniert, treten Qualitätsverluste durch den Lautsprecher und die Raumakustik am Hörerort bzw. dem Messmikrofon auf.

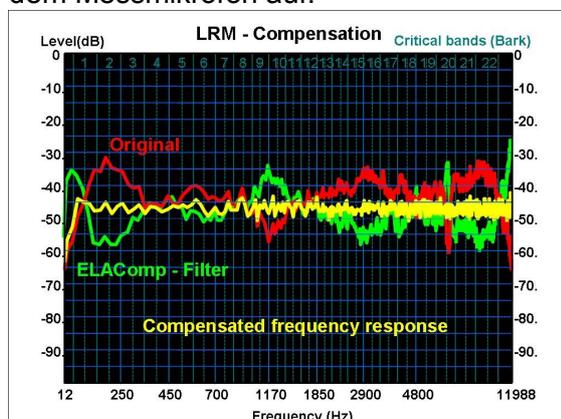


Bild 8: Kompensation eines Lautsprecher- Raum-Mikrofonsystems

Eine LRM - Kompensation ermöglicht die Qualitätsoptimierung am Hörerort und ist geeignet die akustische Wiedergabe ungünstig positionierter Lautsprechersysteme zu kompensieren. Die LRM Kompensation wird e. g. bei KFZ Beschallungsanlagen, Saalbeschallung oder Konferenzeinrichtungen benötigt, wenn die Schallwellen von Mittel- und Hochtonlautsprechern nicht direkt, sondern über Umwege zum Hörerort gelangen.

RM Kompensation

Die adaptive Kompensation des Raum-Mikrofonsystems arbeitet "blind" und ermöglicht eine Qualitätsverbesserung bei allen Produkten, die mit ungünstig positionierten Mikrofonen arbeiten.

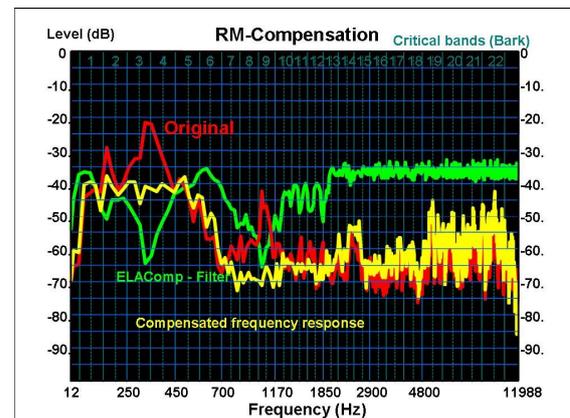


Bild 9: RM – Kompensation für eine bessere Übertragungsqualität

Anstelle des bei LRM und LM Kompensationen bekannten Nutzsignals, welches für die Berechnung der Übertragungsfunktion herangezogen werden kann, wird hier ein statistisches Modell verwendet (Bild 10).

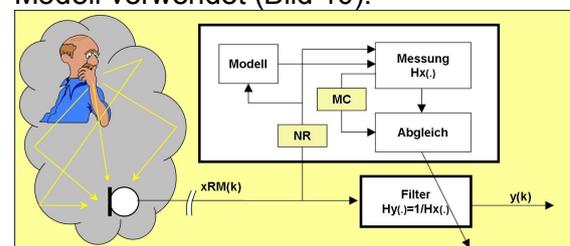


Bild 10: RM – Kompensation (blind) mit statistischem Modell zur Schätzung der Übertragungsfunktion

Mit Hilfe des Modells wird eine Interpolation zwischen fehlenden und vorhandenen Frequenzpunkten

durchgeführt, sodass Abweichungen vom idealen Spektrum erkannt und damit die geschätzte Übertragungsfunktion des RM-Systems für den Abgleich des Filters zur Verfügung steht.

Kompensation des Hörvermögens

Die Übertragungstrecke zwischen der subjektiven Wahrnehmung und einem akustischen Anregungssignal ist bei Menschen mit eingeschränktem Hörvermögen gestört. Hörhilfen werden heute mit Hilfe der ermittelten Ruhehörschwelle eines Patienten abgeglichen. Die Ermittlung der Ruhehörschwelle erfolgt hierbei mit einzelnen fest vorgegebenen Sinustönen deren Pegel langsam erhöht werden, bis der Patient diese wahrnimmt. Bezogen auf die natürliche Wahrnehmung wird das Hörvermögen nur in einem groben Frequenzraster erfasst.

Das ELAComp – Verfahren ist in der Lage direkt aus beliebigen Frequenzpunkten eine Kompensationskurve mit sehr hoher Frequenzauflösung abzubilden und das Ergebnis mit realen Signalen wieder zu geben. D.h. der Patient kann unmittelbar nach einer ersten Hörkurvenmessung feststellen, ob die Kompensation ausreicht. So kann beispielsweise mit Hilfe eines langsam gewobbelten Sinussignals (Sweep) festgestellt werden, ob der Patient frequenzabhängige Lautstärkeschwankungen wahrnimmt, auf die das Filter zusätzlich abgeglichen werden kann. Bei richtiger Anpassung an das zu kompensierende Gehör müsste die wahrnehmbare Impulsantwort exakt wieder einem Impuls entsprechen. (Vorausgesetzt der Hörverlust ist kompensierbar).

Ergebnisse der Untersuchungen

Objektive Messungen wurden mit Hilfe des HASQUE® – Verfahrens durchgeführt. Simulationen mit Testaufnahmen zeigen hierbei eine Erhöhung von bis zu 2 Punkten auf der MOS – Skala!

Bei den Tests konnten Unebenheiten in der Größenordnung von $> \pm 20$ dB mit Hilfe

des ELAComp - Filters auf ca. 1 dB begradigt werden.

Hörtests ergaben, dass grundsätzlich bei allen untersuchten Systemen eine hörbare Qualitätsverbesserung erreicht wird. Musik und Sprachsignale klingen natürlicher und klarer bei erhöhter Verständlichkeit.

8. Vorteile des Verfahrens

Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass die Korrektur einer nicht idealen Übertragungsfunktion bei geringer Rechenleistung und ohne Latenz nahezu perfekt durchgeführt wird. Dies ermöglicht eine drastische Qualitätserhöhung vieler Systeme trotz dem Einsatz von kostengünstigen Bauelementen und systembedingten Begrenzungen.

Stärken des Verfahrens:

- idealer Frequenzgang
- keine Latenz
- hohe Flankensteilheit
- Geringer Rechenaufwand
- schnelle Adaption

Vorteile für das Produkt:

- hohe Qualitätsoptimierung (bis zu 2 auf der MOS Skala)
- natürliche Sprach- und Musikwiedergabe bei Audioapplikationen
- Erhöhung der Verständlichkeit
- Kosteneinsparung durch Kompensation kostengünstiger Bauelemente
- Kosteneinsparung für Hardware bei aufwändigen Filteraufgaben

9. Produktanwendung

Das ELAComp - Filter ist als Klassenbibliothek für alle Abstraten, mit verschiedenen Schnittstellenformaten und für ein- und mehrkanalige Signalverarbeitungssysteme ausgelegt. Die Implementierung eines ELAComp Filters in bestehende SW-Produkte ist in den meisten Fällen mit nur drei Programmierzeilen möglich.

Evaluierung des ELAComp Filters

Für die Evaluierung des ELAComp - Filters steht das Windowsprogramm ELACDesign zur Verfügung.

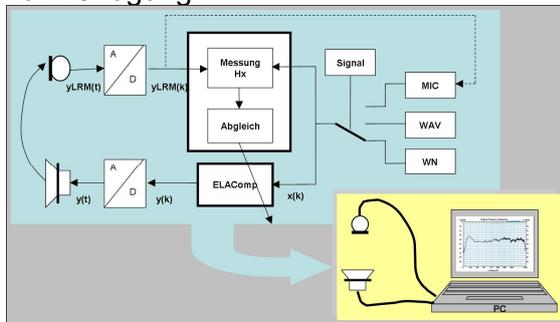


Bild 11: ELACDesign zur Evaluierung der Qualitätsoptimierung in Produkten

ELACDesign arbeitet mit jeder PC-Soundkarte, erwartet vom auswählbaren Eingangsgerät ein Mikrofonsignal und steuert über das ausgewählte Ausgangsgerät das zu optimierende Lautsprechersystem an. Mit Hilfe eines neuen Mess- und Abgleichverfahrens werden alle notwendigen Filterparameter automatisch berechnet. ELACDesign ermöglicht nach der Filterberechnung Hörvergleichstests (mit und ohne ELACOMP - Filter) mit Hilfe der Abspielfunktion von standardkonformen Testaufnahmen. D.h. mit wenig Aufwand lässt sich nachweisen, wie viel Qualitätsverbesserung dieses neue Filter bei einem unbekanntem elektroakustischen System bringt.

10. Anwendungsmöglichkeiten auf einen Blick

LM – Kompensation

Endgeräte: TV, Multimedia, PC
Lautsprechersysteme: Boxen,

LRM - Kompensation

Saal- und Raumbeschallung
KFZ- Beschallung
Konferenzsysteme - Wiedergabe
Gegensprechanlagen

RM – Kompensation

Mikrofonverzerrung
Konferenzsysteme – Aufnahme

LHA - Kompensation

Hörhilfen mit präziser
Übertragungsfunktion und Korrektur

Systemoptimierung:

- Echokompensation
- Active Noise Compensation
- Raumhallkompensation
- Korrektur von Codecs
- Optimierung der Erkennungsrate von Sprach- und Sprechererkennung

Sensoren und Wandler

Kompensation der Übertragungsfunktion
Optimierung des Einschwingverhaltens
Unterdrückung von Resonanzen

11. Hinweis

Die Offenlegung des Verfahrens geschieht nur in Verbindung mit einem NDA und einer Kaufabsichtserklärung. Das Verfahren ist geistiges Eigentum von Sound acoustics. Die Priorität ist notariell beglaubigt. Eine Patentanmeldung dieses Verfahrens im Namen des Erwerbers ist möglich und bleibt diesem mit allen Nutzungsrechten vorbehalten.