

Anselm Goertz und Dieter Lekschat - RWTH Aachen

Digitale Lautsprecherentzerrung

0. Einleitung

Das hier vorgestellte Verfahren soll einen neuen Weg zur Verbesserung des Lautsprecherübertragungsverhaltens aufzeigen. Mit der Entwicklung von digitalen Aufzeichnungs- und Übertragungsgeräten wurde der Wunsch nach Lautsprechern mit vergleichbarer Qualität verständlicherweise immer größer. Konstruktiv bedingte Mängel von Lautsprechern durch eine Vorab-Entzerrung des Signals zu kompensieren ist dabei nicht neu. Der Analogtechnik sind hier allerdings enge Grenzen gesetzt, insbesondere bei der Korrektur von Phasenverzerrungen und Laufzeitunterschieden.

Zur komplexen Entzerrung eines nicht minimalphasigen Systems, wie es ein Mehrwege-Lautsprecher darstellt, ist im Idealfall ein Filter mit frei wählbaren und voneinander unabhängiger Amplituden- und Phasengängen notwendig. Die Realisierung als Digitalfilter ist daher zwar naheliegend, aber im Echtzeitbetrieb wegen der hohen Rechenleistung außerordentlich problematisch. Erst die für digitale Filter algorithmusspezifischen Signalprozessoren erlauben den Aufbau eines Echtzeitsystems, das eine Entzerrung auf annähernd idealen Amplituden- und Phasengang gestattet. Damit werden Klangverfärbungen nahezu ausgeschaltet und eine bisher nicht gekannte Impulstreue erreicht.

1. Entzerrung von Lautsprechern mit Digitalfiltern

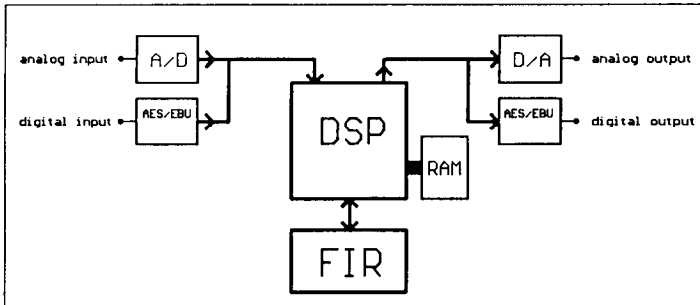
Während selbst bei der Fertigung von Regielautsprechern heute noch Equalizer zur Linearisierung des Frequenzgangs eingesetzt werden, ermöglichen Digitalfilter eine gezielte Verbesserung des Amplituden- sowie Phasengangs. Dazu ist es erforderlich, mit Hilfe erweiterter Testmethoden beides korrekt zu messen.

Mit dem zu entwerfenden digitalen Filter ist der dazu inverse Verlauf einzustellen. Der Entzerrfrequenzgang und der Lautsprecher-Frequenzgang ergänzen sich dann zu dem in Abb. 1c dargestellten Verlauf; ebenso gilt dies für den Phasengang (s. Abb. 2c).

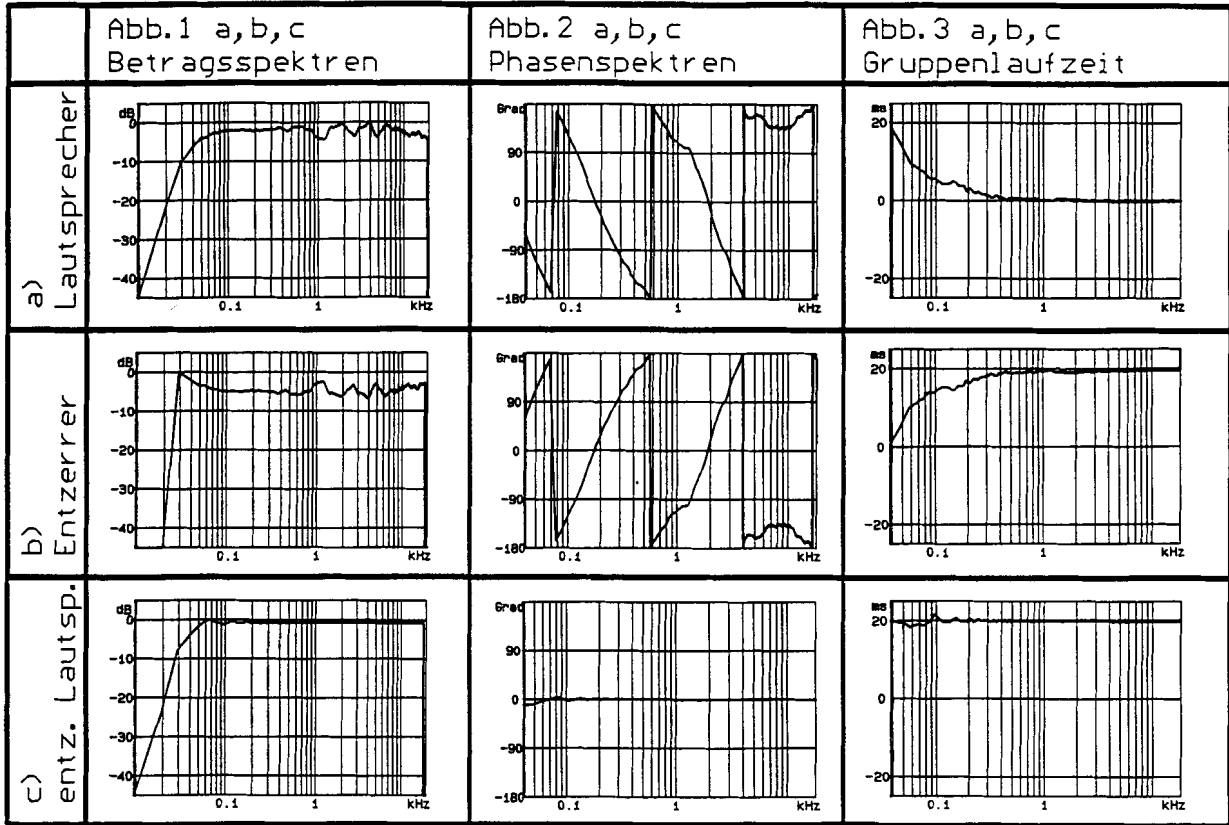
Bei Digitalfiltern mit FIR-Struktur lassen sich dabei - im Gegensatz zu analogen Filtern - der Amplituden- und Phasengang getrennt voneinander einstellen. Durch die hohe Frequenzauflösung können selbst sehr schmalbandige Abweichungen vom Idealverlauf bis auf typischerweise $\pm 0,5$ dB ausgeglichen werden. Auch dies ist als Vorteil gegenüber analogen Equalizern anzusehen. - Der linearisierte Phasengang hat auch ein stark verbessertes Impulsverhalten zur Folge, wie der Vergleich von Abb 4a mit Abb. 4b zeigt. Dies läßt sich auch im Rechteck-Übertragungsverhalten ablesen, s. Abb. 5a und 5b.

2. Realisierung des digitalen Filterkonzeptes

Das Blockschaltbild zeigt die einzelnen Komponenten eines digitalen Entzerrers.



Dieser kann in der Praxis in den Signalweg eingeschleift werden. Für den Betrieb mit analogen Eingangs- und Ausgangssignalen verfügt das Gerät über 16-bit A/D- und D/A-Wandler; da diese Schnittstellen modular aufgebaut sind, können sie im Bedarfsfall gegen solche mit höherer Auflösung (bis zu 24 bit) ausgetauscht werden. Ebenso ist ein Einschleifen auf digitaler Ebene über AES/EBU-Schnittstellen möglich.



Während der im Blockschaltbild mit "DSP" bezeichnete Hauptprozessor für den Datentransfer und die Programmsteuerung verantwortlich ist, erfolgt die eigentliche Berechnung der FIR-Filter mittels algorithmusspezifischer Signalprozessoren. Diese Art von Filtern zeichnet

sich durch absolute Stabilität aus, da keine Rückkopplungswege in ihrer Struktur enthalten sind; weiterhin sind sie recht einfach zu programmieren.

Je nach geforderter Genauigkeit der Entzerrung kann die Rechenleistung durch Kaskadierung mehrerer Prozessoren im "FIR"-Block gesteigert werden. Das hier vorgestellte Gerät erreicht im zweikanaligen Betrieb bei einer Frequenzauflösung von etwa 10 Hz eine Rechenleistung von 150 Millionen Multiplikationen und ebenso vielen Additionen pro Sekunde.

Im Speicher des Systems sind u.a. die Filterparameter abgelegt, so daß die Anpassung an unterschiedliche Lautsprecher durch Austausch von Speicherchips geschehen kann.

3. Grenzen des Verfahrens

Trotz aller Fortschritte muß beachtet werden, daß durch die digitale Entzerrung die physikalischen Unzulänglichkeiten eines Lautsprechers nicht völlig beseitigt werden können. So setzt beispielsweise der maximal mögliche Membranhub einer Entzerrung zu tiefen Frequenzen hin Grenzen. Bei extremer Anhebung einzelner Frequenzbereiche kann es außerdem zu einem Anstieg der nichtlinearen Verzerrungen kommen.

Ein weiterer Punkt ist das Richtverhalten einer Lautsprecherbox, welches durch die Entzerrung natürlich nicht verändert wird. Von der Abstrahlrichtung abhängige Änderungen des Frequenzganges können durch die Entzerrung nur für eine Hörposition exakt korrigiert werden. Eine Mittelung über mehrer Raumpunkte kann, je nach verwendetem Lautsprecher, dennoch zu befriedigenden Ergebnissen führen.

Das Laufzeitverhalten eines Lautsprechers zeigt zu tiefen Frequenzen hin einen starken Anstieg (Abb. 3a). Die tieffrequenten Anteile werden daher um die Gruppenlaufzeit verzögert gegenüber den mittel- und hochfrequenten Anteilen abgestrahlt, so daß eine Korrektur nur dann möglich ist, wenn alle anderen Frequenzanteile so weit verzögert übertragen werden (Abb. 3b), daß ein resultierendes System aus Lautsprecher und Entzerrer für alle Frequenzen eine konstante Laufzeit aufweist (Abb. 3c). In Abhängigkeit vom maximalen noch auszugleichenden Laufzeitfehler entsteht so eine Verzögerung durch das Gesamtsystem. Aus physikalischen Gründen läßt sich diese Verzögerung nur dann gering halten, wenn im Tiefbaßbereich noch Laufzeitfehler in Kauf genommen werden.

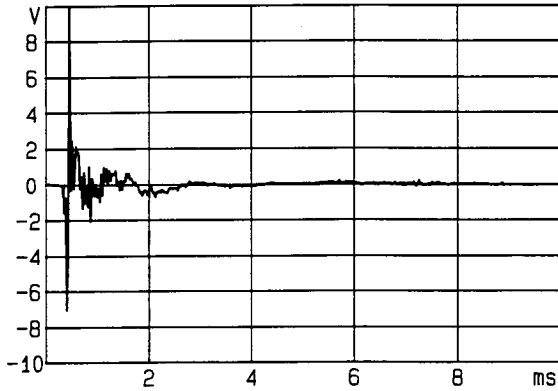


Abb. 4a: Impulsantwort des Lautsprechers

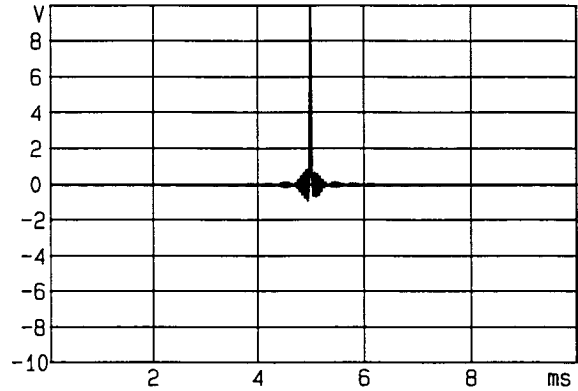


Abb. 4b: Impulsantwort des entzerrten Lautsprechers

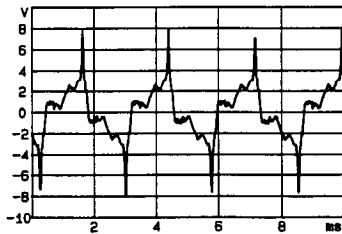


Abb. 5a: Rechteckübertragungsverhalten des Lautsprechers bei 350 Hz

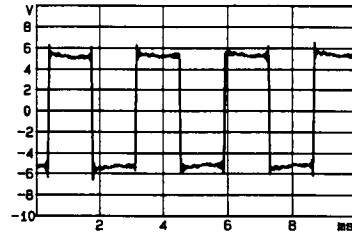


Abb. 5b: Rechteckübertragungsverhalten des entzerrten Lautsprechers bei 350 Hz

4. Anwendungsbeispiele

Die Anwendung der digitalen Entzerrung wird in den nächsten Jahren noch auf qualitativ hochwertige Lautsprecher beschränkt bleiben. Von der Kostenseite her günstig ist sie dann, wenn ohnehin auf digitaler Ebene gearbeitet wird und so die recht teuren A/D- und D/A-Wandler entfallen können. Im Bereich der Regielautsprecher, wo höchste Ansprüche an die Tonreproduktion gestellt werden, ist ein Einsatz schon heute denkbar. Ein weiteres Anwendungsgebiet sind Beschallungsanlagen, die den Vorteil aufweisen, daß sämtliche Lautsprecher gleichen Typs über einen einzigen Entzerrer laufen können. Eventuell gewünschte Verzögerungen zwischen einzelnen Lautsprechergruppen könnten im Entzerrer mitrealisiert und so externe digitale Verzögerungsgeräte eingespart werden.

Auch bei Lautsprechern aus dem PA-Bereich konnten schon meßtechnisch und gehörmäßig starke Verbesserungen erzielt werden. Abb. 6 zeigt in selben Diagramm den Frequenzgang einer PA-Kombination einmal mit und einmal ohne Entzerrung. Es fällt nicht schwer, sich den klanglichen Unterschied vorzustellen.

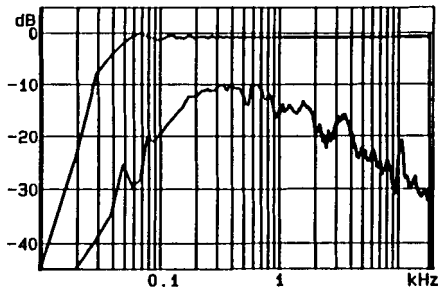


Abb. 6: Entzerrung eines PA-Lautsprechers

Das Referat wurde im Rahmen des Neuheitenforums gehalten.