

# Neue Methoden zur Anpassung von Studiomonitoren an die Raumakustik mit Hilfe digitaler Filterkonzepte (Teil 1)

Anselm Goertz ; Audio & Acoustics Consulting Aachen  
 Markus Wolff ; Klein + Hummel GmbH Ostfildern

Der erste Blick bei einer Lautsprechermessung gilt meist dem Frequenzgang, der als eine Art Fingerabdruck eines jeden Systems gesehen werden kann. Daneben gibt es dann für den Lautsprecher als komplexe Übertragungsstrecke noch den Phasengang. Beide zusammen ergeben die komplexe Übertragungsfunktion im Frequenzbereich, die das Verhalten des Systems vollständig charakterisiert. Verzerrungen und andere Nichtlinearitäten sollen hier einmal außer Acht gelassen werden. Im Gegensatz zum allgegenwärtigen Frequenzgang fristet der Phasengang allerdings eher ein Schattendasein. Das mag nun daran liegen, dass seine Kurven nur schwer zu deuten sind und dass die klassische Lehre besagt, dass Phasenunterschiede im allgemeinen nicht hörbar sind. Aus der Phase lässt sich über eine Ableitung nach der Frequenz noch die Gruppenlaufzeit errechnen, die anschaulich gesprochen die frequenzabhängige Signalverzögerung beschreibt.

Neben dem komplexen Frequenzgang gibt es aber auch noch den Zeitbereich, der ebenfalls die vollständige Beschreibung des Übertragungsverhaltens über die Impuls- oder Sprungantwort erlaubt. Wie der Name es schon besagt, ist die Impulsantwort die Reaktion des Systems (hier des Lautsprechers) auf einen sehr kurzen scharfen Impuls. Die Sprungantwort ist dem entsprechend die Reaktion auf einen steilen Sprung im Signal. Rechnerisch betrachtet geht die Impulsantwort via inverser FFT aus dem komplexen Frequenzgang hervor. Integriert man die Impulsantwort, so entsteht die Sprungantwort. Umgekehrt ist der Weg über eine Ableitung der Sprungantwort zur Impulsantwort bzw. eine FFT zum Übergang in den Frequenzbereich zu gehen. Alle drei Ergebnisse, d.h. Sprungantwort, Impulsantwort und komplexer Frequenzgang können daher zur Beschreibung des Systems Lautsprecher herangezogen werden und sagen das selbe aus.

Anhand der unterschiedlichen Möglichkeiten der Systementzerrung, sollen die Zusammenhänge für den O500C Studiomonitor von K+H einmal näher erläutert werden. Dem System Lautsprecher wird zur Entzerrung das System elektrisches Filter vorgeschaltet. Beide zusammen ergeben eine neue Übertragungsfunktion, die sich durch Multiplikation der beiden einzelnen Übertragungsfunktionen im Frequenzbereich ergibt. Digitale FIR-Filter, so wie sie im O500C auch eingesetzt werden, erlauben es als einziger Filtertyp, einen weitgehend voneinander unabhängigen Amplituden- und Phasenverlauf einzustellen. FIR sind somit ideal zur komplexen Entzerrung eines Lautsprechers. Das Filter wird dabei so eingestellt, dass Amplitude und Phase des Lautsprechers in bestimmten Grenzen vollständig kompensiert oder auf eine Wunschfunktion eingestellt werden können. Als Resultat erhält man so z.B. einen Hochtöner mit vorgeschaltetem FIR-Filter, der von 2 kHz bis 20 kHz nicht nur einen absolut geraden Frequenzgang haben kann, sondern auch eine völlig konstante Phase. Beide Entzerrungen sind natürlich nur im Rahmen der sinnvollen Möglichkeiten des Lautsprechers und Auflösung des Filters möglich. Im Vergleich zur klassischen Filterung mit analogen oder digitalen IIR-Filtern, ergeben sich aber schon sehr viel weitreichendere Möglichkeiten. Neu ist insbesondere die Möglichkeit auf Basis einer Messung des Lautsprechers ein einziges Filter für die vollständige komplexe Entzerrung zu berechnen, was mit analogen Filtern nicht möglich ist. Hier wird meist eine schrittweise Optimierung im Amplitudenverlauf vorgenommen und bestenfalls eine Phase angenähert dem minimalphasigen Anteil der Einzelsysteme und Weichenfunktion eingestellt. Für ein 3-Wege System wie dem O500C kommt dann ein FIR-Filter pro Weg zum Einsatz, das zur Systementzerrung und Frequenzweichenfunktion eingesetzt

werden kann. Aus Filtern und Lautsprechern zusammen ergeben sich dann drei linearphasige Bandpässe, die sich zu einem ebenfalls linearphasigen Gesamtsystem addieren. Einziger Nachteil dieses Verfahrens ist die dabei entstehende hohe Grundlaufzeit, die nicht für alle Anwendungen tolerabel ist.

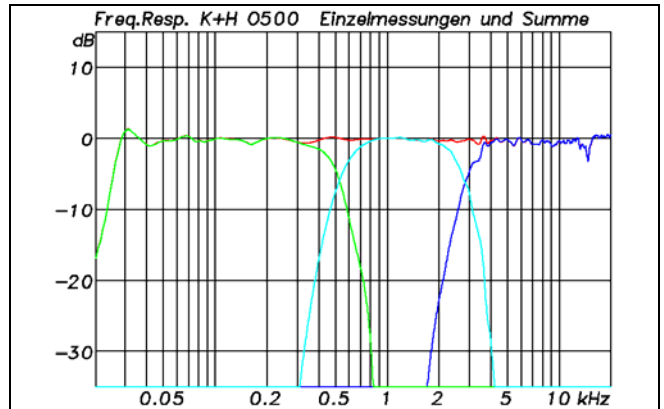


Abb. 1 Frequenzgang des Gesamtsystem und der drei einzelnen Wege

So bietet sich die Möglichkeit an, nicht die gesamte Box linearphasig einzustellen, sondern z.B. nur den Mittel- und Hochtöner, da der größte Anteil der Grundlaufzeit bei der Filterung des Tieftöners entsteht. Diese beiden Fälle und eine Entzerrung, die vollständig minimalphasig ist, zeigen die Abbildungen des Phasenganges und der Sprungantwort im Zeitbereich. Alle Filterfunktionen können völlig problemlos über die FIR-Filter eingestellt werden, die, wie ja bereits erwähnt, fast beliebige Kombinationen aus Amplituden- und Phasenverläufen zulassen.

Der Frequenzgang ist in allen drei Fällen völlig identisch und nahezu ideal gerade zwischen 30 Hz und 20 kHz. Die Unterschiede zwischen den drei Filter Setups sieht man dagegen in den Phasenverläufen.

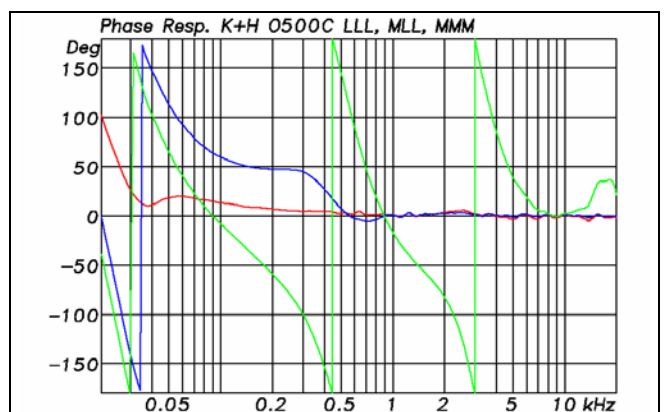
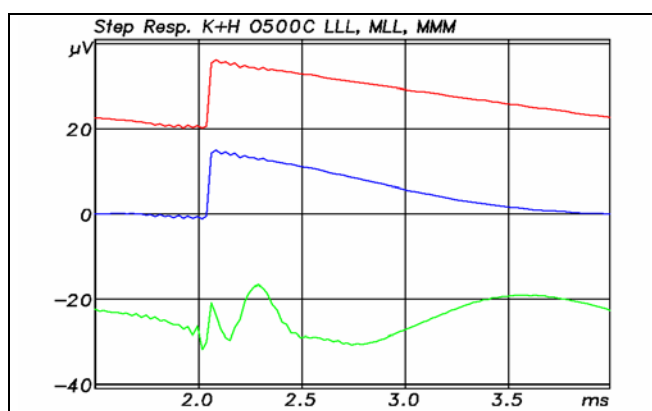


Abb. 2 Phasengänge bei minimalphasiger (gr), linearphasiger (rt) und gemischter Entzerrung (bl)

Die grüne Kurve zeigt die vollständig minimalphasige Variante, die ähnlich auch mit einer analogen Filterung entstehen würde. An den Übergangsstellen zwischen den Wegen dreht sich die Phase jeweils um  $360^\circ$  entsprechend einem Filter 4. Ordnung. Der Tieftöner als Bassreflexsystem ist ein HP 4. Ordnung, der

nochmals eine Phasendrehung von  $360^\circ$  am unteren Ende des Frequenzspektrums bewirkt. Die rote Kurve zeigt im Vergleich die vollständig linearphasige Einstellung, wo der Phasengang über den gesamten Frequenzbereich konstant ist. Der leichte Anstieg bei sehr tiefen Frequenzen unterhalb von 40 Hz bleibt zurück, da das FIR-Filter hier an seine Grenzen stößt. Die blaue Kurve in der Phasendarstellung zeigt die gemischt linear- und minimalphasige Form, bei der Mittel- und Hochtöner auf eine konstante Phase hin entzerrt sind. Der Tieftöner behält seinen minimalphasigen Verlauf. Die Grundlaufzeiten, die bei diesen drei Filtervarianten entstehen, sind 80ms, 20ms und 15ms. Die 80ms für die vollständig linearphasige Form wären aus Sicht des Filters nicht unbedingt erforderlich, wo dieses Ergebnis auch schon mit 50ms zu erzielen wäre. Der Wert wurde mit Absicht zu 80ms gewählt, da so eine leichte Anpassung zu bildverarbeitenden Systemen über eine Verzögerung von 2 Bildern möglich ist. In der Darstellung der Phase sind diese Grundlaufzeiten bereits abgezogen.

Betrachtet man nun diese drei Varianten im Zeitbereich mit der zu Beginn angesprochenen Sprungantwort, so zeigen sich hier trotz der völlig identischen Frequenzgänge recht unterschiedliche Bilder. Das minimalphasige Zeitsignal (grüne Kurve) zerläuft und weicht sichtbar vom idealen Verlauf ab.



**Abb. 3 Sprungantwort bei minimalphasiger (gr), linearphasiger (rt) und gemischter Entzerrung (bl)**

Die Ursache liegt klar auf der Hand, da hier nicht mehr alle Frequenzanteile in Phase eintreffen, wird der Sprung entsprechend verzerrt. Ein wenig verwunderlich mag es jedoch auf den ersten Blick erscheinen, dass die rote und blaue Kurve sich kaum unterscheiden, obwohl das rote Zeitsignale von der vollständig linearphasigen Einstellung stammt und das blaue von der gemischt linear- minimalphasigen. Die Energieverteilung in einer Impuls- oder Sprungantwort sieht nun so aus, dass sie über alle Frequenzen gleich verteilt ist, d.h. der Anteil des Frequenzbereiches unterhalb von 500 Hz, wo hier die Unterschiede zwischen den beiden Kurven liegen, macht gerade einmal 2,5% der Gesamtenergie eines Bandpassspektrums von 30 Hz bis 20 kHz aus. Der Einfluss auf den Kurvenverlauf ist entsprechend gering, so dass die Unterschiede in dieser Darstellung nicht zu erkennen sind. Vergleichbar wären die Folgen, wenn Frequenz- und Phasengang nicht über einer logarithmischen sondern über einer linearen Frequenzachse dargestellt würden, wo dann der Bereich unterhalb von 500 Hz auch verschwindend klein würde und kaum noch zu erkennen wäre. Der Grund für die logarithmische Darstellung ist recht einfach, da letztendlich auch die menschliche Tonhöhenempfindung logarithmisch angelegt ist.

Etwas vorschnell könnte man aus den Zeitsignalen folgern, dass die gemischte Einstellung mit linearphasiger Entzerrung ab ca. 500 Hz ein optimaler Kompromiss wäre, zudem sich die Übergangsfrequenz abhängig vom Lautsprecher auch noch weiter nach unten verschieben lassen würde, ohne dass die Grundlaufzeit allzu sehr ansteigt. Ausgiebige Hörversuche zu diesem Thema hatten allerdings wiederholt zum Ergebnis, dass Phasenzerrung besonders relevante Unterschiede vor allem im Bassbereich zu

Tage fördern, wo die Laufzeit ohne Entzerrung auf Werte zu tiefen Frequenzen hin von 10 bis 40ms ansteigt. Oberhalb von 200 Hz waren dagegen nur filigrane Unterschiede zwischen linear- und minimalphasigen Lautsprechern zu hören, es sei denn, es wurden pathologische Einstellungen mit extremen Filtern, z.B. Frequenzweichen mit 96 dB/Oct als minimalphasige Filter gewählt. Daraus sind zwei Schlussfolgerungen zu ziehen:

- 1) Zeitsignale in Form von Impulsen, Sprüngen oder Rechtecken sind kaum geeignet um eine umfassende Schlussfolgerungen auf das klangliche Verhalten einer Box zu ziehen. Die grundsätzliche, hörrelevante Information ist hier zwar enthalten, aber nur schwerlich oder gar nicht zu erkennen. Eine getrennte Darstellung von Amplituden- und Phasenverlauf bzw. der Gruppenlaufzeit ist dagegen wesentlich anschaulicher.
- 2) Das dominante Kriterium für den Höreindruck ist der Amplitudenverlauf. Phasengänge werden dagegen deutlich weniger kritisch wahrgenommen. Der drastische Unterschied, der z.B. in den Zeitsignalen und im Phasengang der blauen und grünen Kurve erscheint, spiegelt nicht den Unterschied im Höreindruck wieder. Schon minimale Änderungen im Amplitudenverlauf sind dagegen deutlicher wahrnehmbar, obwohl sie weder in der Impuls- noch in der Sprungantwort erkennbar sind.

Für den Studiomonitor O500C stehen nun alle drei Filtervarianten zur Auswahl, so dass der Anwender ganz nach Bedarf eine linear- oder minimalphasige oder eben eine gemischte Einstellung wählen kann. Alle Varianten sind klanglich sehr ausgewogen und auf höchstem Niveau angesiedelt. Die gemischt linearphasige Einstellung bringt für kritische Ohren einige Details mehr ans Tageslicht. Die vollständig linearphasige Wiedergabe hebt sich dann vor allem durch eine präzisere Basswiedergabe ab, die insbesondere bei elektronischer Musik stark ins Gewicht fällt.

Das Fazit könnte demnach lauten, so viel Linearphasigkeit wie möglich, aber der große Durchbruch kommt erst mit der vollständig linearphasigen Entzerrung eines Lautsprechers. Diese Aussage birgt die Gefahr in sich, mutwillig zu schlussfolgern, dass ein solcher Lautsprecher erst in der vollständig linearphasigen Einstellung wirklich gut ist. Dem ist keinesfalls so! Richtig wäre vielmehr, dass sich durch diese Entzerrung neue Perspektiven der Wiedergabe über das bisher bekannte hinaus eröffnen können.

## Literatur

- [1] Entzerrung von Lautsprechern mit einem Signalprozessorsystem in Echtzeit  
A. Goertz ; D. Leckschat  
Tagungsband DAGA 90
- [2] Vergleich verschiedener Verfahren zur digitalen Lautsprecherentzerrung  
A Goertz  
Tagungsband DAGA 92
- [3] Optimierung der Entzerrerübertragungsfunktion für Lautsprechersysteme durch Berücksichtigung psychoakustischer Effekte  
A Goertz ; K.H. Pflaum  
Tagungsband DAGA 96
- [4] Verbesserung der Wiedergabequalität von Lautsprechern mit Hilfe von Digitalfiltern  
D. Leckschat  
Dissertation an der RWTH Aachen 1992
- [5] Digitale Signalverarbeitung für Lautsprecher  
S. Müller  
Dissertation an der RWTH Aachen 1999

Weitere Informationen sowie ein Download dieses Textes und des zugehörigen Vortrages als PDF-Files finden sich auf der Homepage unter:

[www.anselmgoertz.de](http://www.anselmgoertz.de) und [www.klein-hummel.de](http://www.klein-hummel.de)