

Entwicklungsgeschichte der digitalen Controller für Lautsprecher-Systeme

A.Goertz, S.Müller, J.Kleber

Institut für Technische Akustik der RWTH Aachen

Die schnell fortschreitende Entwicklung digitaler Signalprozessoren hat in den letzten Jahren zu einem deutlichen Trend zur digitalen Verarbeitung von Audiosignalen geführt. Was zunächst in Anbetracht der hohen Kosten noch den größeren Studios vorbehalten war, hält heute mit digitalen Mischpulten, Effektgeräten und Frequenzweichen in weiten Bereichen Einzug.

Für die Anwendung als Lautsprechercontroller waren bis vor einigen Jahren nahezu ausschließlich analog arbeitende Geräte auf dem Markt erhältlich. Filter- und Limiterfunktion waren hier mit kostengünstiger und erprobter Schaltungstechnik leicht zu realisieren. Auch geringe Laufzeitkorrekturen konnten mit Hilfe analoger Allpässe schon durchgeführt werden.

Die ersten Digitalcontroller ahmten diese Filterfunktionen der analogen Geräte mit rückgekoppelten Digitalfiltern (IR-Filter) nach, deren großer Vorteil in der geringen Rechenleistung zu suchen ist. Der einfachen Bedienung und Anpassung dieser Geräte durch ein schnelles Nachladen neuer Filterkoeffizienten, standen der schwerwiegende Nachteil der unzureichenden Dynamik durch die AD- und DA-Umsetzer gegenüber, die keinen Limiter Headroom mehr ermöglichten und für anspruchsvolle Aufgaben nicht ausreichend Störabstand gewährleisten konnten. Durch das IIR-Filterkonzept konnte auch die Filterfunktion als solches gegenüber den analogen Filtern nicht verbessert werden.

Entwicklungsgeschichte

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte, die teilweise aus der Industrie gefördert wurden, entstand daher zunächst ein Multi-DSP-System zur breitbandigen Entzerrung von Lautsprechern mit FIR-Filtern. Mit der hohen Rechenleistung aus 16 algorithmusspezifischen Signalprozessoren (DSP 56200 von Motorola) konnte so zwar eine sehr exakte Entzerrerfunktion für einen Lautsprecher realisiert werden, was aber nicht die problematischen Interferenzerscheinungen in den Übernahmehereichen zwischen den einzelnen Wegen eines Lautsprechers verminderte. Folglich entstand eine zweite Gerätegeneration, die für jeden Weg des Lautsprechers ein Filter zur Entzerrung und für die Frequenzweichenfunktion zur Verfügung stellte. Diese mit nicht weniger als 32 DSPs realisierten Digitalfilter lieferten eine so hohe Auflösung, daß Flankensteilheiten von mehreren 100 dB/Oktave möglich wurden und Interferenzerscheinungen sich damit auf einen vernachlässigbar kleinen Frequenzbereich beschränkten. In Anbetracht des immensen Hardwareaufwandes und einer noch unzureichenden Dynamik von nur 85 dB blieb es auch bei der zweiten Generation des digitalen Controllers bei rein experimentellen und akademischen Anwendungen.

Ein grundsätzlicher Sprung in der Hardware stellte sich mit der dritten Generation ein, wo keine algorithmusspezifischen DSP's mehr zum Einsatz kamen und ein völlig neues DSP-System auf Basis des Motorola DSP56004 entstand. Neben einer flexibleren Konfiguration wurde so auch der Engpaß der maximal 16-Bit Datenbreite des DSP 56200 umgangen. Als weitere Funktionen wurden noch Limiter und thermische Schutzmechanismen für den Lautsprecher geplant. Der geringe Speicherplatz des DSP 56004 machte allerdings auch hier noch den Einsatz von insgesamt 7 DSP's für einen 4-Wege Mono-Controller notwendig. Die Filterauflösung konnte mit Hilfe eines 4-fachen bzw. 16-fachen Downsamplings für den Mittel- und Tieftonweg mit nur 192 Koeffizienten sogar noch geringfügig gegenüber der zweiten Generation gesteigert werden. Verbesserte AD- und DA-Umsetzer erlaubten in diesem Gerätetyp schon einen Dynamikumfang von 107 dB auf der AD-Seite und 110 dB auf der DA-Seite. Berücksichtigte man allerdings die für den Headroom des digitalen Limiters notwendigen 6-12 dB Dynamik auf der AD-Seite, so blieben nur immer noch bescheidene 95 dB nutzbarer Dynamik. Kritische Anwendung, z.B. in Theaterinstallationen, erfordern dagegen Werte von 110 dB und mehr, die von analogen Controllern bei verträglichem Kostenaufwand leicht übertroffen werden.

Aus dieser Notwendigkeit heraus wurde das Konzept des Zweibeinigen AD-Umsetzers mit zwei AD-Umsetzern pro Kanal einge-

führt, die eine nutzbare Dynamik von über 125 dB zulassen. Leistungsfähigere DSP's mit erhöhter Taktrate und 4-fachen (DSP 56007) bzw. 16-fachen (DSP56009) Arbeitsspeicher erlaubten zudem ein deutlich schlankeres Konzept eines digitalen Controllers, womit die vierte Geräte Generation geboren war. Mit nur 4 Signalprozessoren konnten jetzt insgesamt 8 Signalwege für einen Stereo 4-Wege Controller bearbeitet werden, wobei 2 der 4 DSPs nur zu einer kostengünstigen und hochwertigen Oversampler-Funktion eingesetzt werden.

Erst durch die verbesserten AD- und DA-Umsetzer sowie die deutlich leistungsfähigeren DSPs können heute die digitalen Controller in allen Disziplinen klare Vorteile gegenüber den analogen Geräten bieten. Von der hochauflösenden und in weiten Frequenzbereichen auch phasenkompensierende FIR-Filtern über die sehr störungsarm und vorausschauend arbeitenden Limiter mit bisher nicht gekanntem Headroom bis hin zur einfachen Bedienung und Fernsteuerung sprechen alle Gesichtspunkte für die digitalen arbeitenden Geräte. Selbst der kritische Wert der Eingangsdynamik erreicht mit mehr als 125 dB Werte, die mit analoger Schaltungstechnik kaum noch zu realisieren sind.

Controllerfunktionen

Die wichtigsten Funktionen eines Controllers für Lautsprecher-Systeme sind im Folgenden zusammenfassend aufgelistet. Im Anschluß daran folgt eine ausführliche Erläuterung des digitalen Konzeptes anhand des Blockschaltbildes in Abbildung 1, wo die einzelnen Funktionen in der Reihenfolge der Signalbearbeitung im Controller auftreten.

- Frequenzweichenfunktion
- Systementzerrung
- Delayfunktionen
- Spitzenwertlimiter
- Thermischer Limiter
- Filterfunktion für unterschiedliche Array-Konfigurationen
- Fernsteuerung und Fernabfrage der Systemparameter

Das Blockschaltbild zeigt beispielhaft das komplette Signalflußdiagramm. Der analoge Eingang führt mit einer analogen Preemphasis auf zwei unterschiedliche Verstärkerstufen, die auf die beiden Eingänge des 20-Bit Stereo AD-Umsetzers arbeiten (siehe auch Abbildung 7). Auf digitaler Seite wird im DSP die Umschaltung und Anpassung der beiden AD Kanäle ausgeführt und das Deemphasisfilter gerechnet. Das Digitalsignal steht danach einer weiteren Verarbeitung und einem digitalen Ausgang im 24-Bit AES/EBU Format zur Verfügung. Alternativ können die Audiosignale auch direkt über einen AES/EBU Digitaleingang eingespielt werden, der in Kombination mit dem Digitalausgang auch als digitales Insert benutzt werden kann.

Da bei den folgenden vier Kanälen zur weiteren Verarbeitung der Daten nur für den späteren Hochtongweg die maximale Bandbreite erforderlich ist, wird in den anderen Kanälen die Abtastrate durch Downsampling um den Faktor 2, 4, 8 oder 16 herabgesetzt. Bei gleichbleibender Anzahl Filterkoeffizienten wird durch das Herabsetzen der Abtastrate die Filterlänge um den diesbezüglichen Faktor verlängert bei gleichzeitig entsprechender Verringerung der notwendigen Rechenleistung.

Das Downsampling erfolgt hier zunächst durch einen als minimalphasiges FIR-Filter mit 64 Taps ausgelegten Tiefpaß mit einer Grenzfrequenz von 4 kHz bzw. 1 kHz. Nach der Tiefpaßfilterung kann das Signal dann mit der reduzierten Abtastrate weiter bearbeitet werden. Die Filtercharakteristik wurde für diese Anwendung auf optimale Sperrdämpfung (>120 dB) zur Vermeidung von Störungen durch Aliasing Produkte ausgelegt. Mögliche Welligkeiten im Durchlaßbereich werden in der folgenden Signalverarbeitung wieder kompensiert.

Im weiteren Signalweg folgen nun die Delays sowie das eigentliche Frequenzweichen- und Entzerrfilter für die einzelnen Wege. Im folgenden werden diese Filter als EQ-Filter bezeichnet. Durch die Verwendung von vier (maximal sechs) Motorola DSP56009/8

Prozessoren können für den Hochtonzweig FIR Filter mit bis zu 400 Taps, für den Mitteltonzweig mit bis zu 500 Taps und für den Tiefton- und Subwoofer-Kanal mit bis zu 880 Taps gerechnet werden. Zusammen mit der für den jeweiligen Kanal verwendeten Abtastrate ergeben sich hiernach Frequenzauflösungen von 110 Hz für den Hochtonzweig, von 22 Hz für den Mitteltonzweig und von 3 Hz für den Bass- und Subbass-Kanal. Die obere Grenzfrequenz der Tieftonwege ist dabei durch das Downsampling auf 1 kHz und des Mitteltonweges auf 4 kHz beschränkt.

Die vorab und auch im Blockschaltbild beschriebene Ausführung mit 4-fachem Downsampling im Mittelton- und 16-fachem Downsampling in den Tieftonkanälen ist nur als eine mögliche Variante exemplarisch beschrieben. Das Gerät kann ebenfalls im 2- oder 3-Wege Modus mit anderen Downsamplingfaktoren und Filterlängen konfiguriert und die Trennfrequenzen zwischen den einzelnen Wegen natürlich beliebig gewählt werden. Ebenso ist es möglich, wenn an einem Weg nicht nur ein Lautsprecher eines Aktivsystems, sondern eine Lautsprecherbox mit passiver Weiche betrieben werden soll, die Limiter und Schutzfunktionen für die Frequenzbereiche der einzelnen passiv getrennten Treiber individuell zu gestalten.

In der Signalverarbeitung folgt nach den EQ-Filtern die Limiterfunktion. Mit einem kurzen Delay von 2 ms konnte hier eine vorausschauende Arbeitsweise zur Spitzenwertbegrenzung realisiert werden, die durch einen RMS-Limiter zum Schutz vor thermischer

Überlastung der Lautsprecher ergänzt wird. Für jeden Treiber werden die thermischen Zeitkonstanten der Spule und des Magneten bei der Filterkoeffizienten-Erzeugung eingestellt, an Hand derer die Schwingspulentemperatur im Controller berechnet wird.

Nach den EQ-Filtern und Limitern sind die rechenleistungsinintensiven Schritte abgeschlossen und die Abtastrate kann mit einem oder zwei vierfach Oversamplern wieder auf ihren ursprüngliche Wert heraufgesetzt werden. Das Verfahren gestaltet sich in umgekehrter Reihenfolge zum Downsampling. Für den Bass und Subbass Kanal werden zwei Vierfach-Oversampler hintereinander geschaltet. Die Tiefpaßfilter sind analog zu den Downsamplern mit 64 Taps ausgeführt und auf maximale Sperrdämpfung sowie minimale Verzögerung hin optimiert.

Als DA-Umsetzer kommen 20-Bit Typen mit einer maximalen Abtastrate von 768 kHz zum Einsatz. Um den Einfluß der nachfolgenden Tiefpaßfilter im hörbaren Frequenzbereich möglichst gering halten zu können, wird für den Mittel- und Hochtonbereich die Abtastrate um den Faktor 8 und für die beiden Basskanäle um den Faktor 4 erhöht. Die nach dem Oversampling noch 48-Bit breiten Datenworte werden vor dem Abschneiden der vier LSBs mit einem Dither beaufschlagt. Ein zusätzlicher Noiseshaper verschiebt die Frequenzgewichtung des Quantisierungsrauschens noch in den für das Gehör unhörbaren hochfrequenten Bereich. Insgesamt kann so der durch das Abschneiden der unteren 28-Bits verursachte Quantisierungsfehler drastisch reduziert werden.

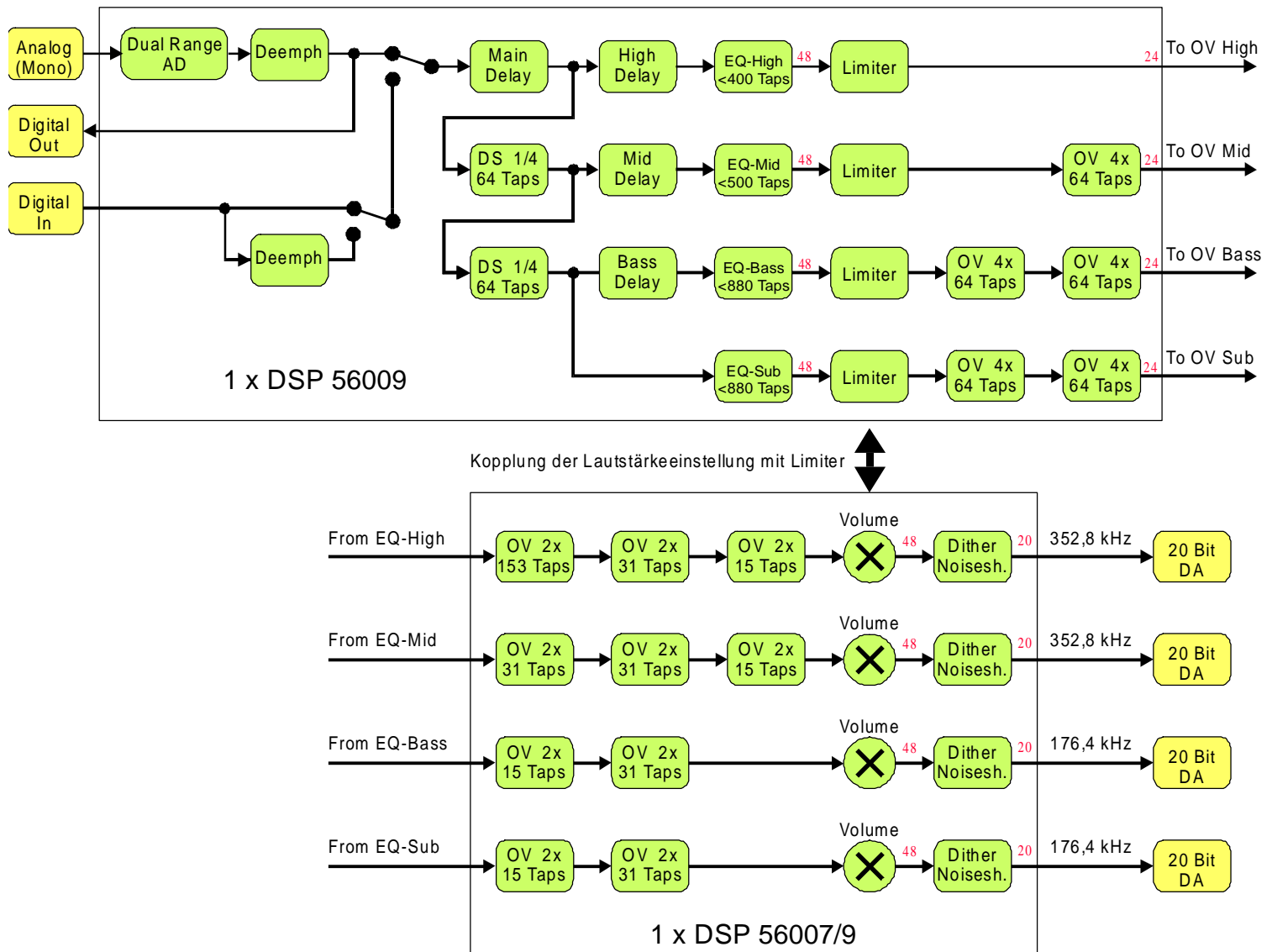


Abbildung 1 Blockschaltbild des digitalen Controllers mit 4 Wegen

Beispiel

Für einen typischen kleinen Beschallungslautsprecher im aktiven 3-Wege Betrieb soll die Frequenzweichenfunktion und Systemverzerrung einmal exemplarisch beschrieben werden. Abbildung 2

zeigt zunächst die Frequenzgänge der Einzelsysteme für den Tief-, Mittel- und Hochtöner. Die Darstellung wurde mit 1/6 Oktave Bandbreite geglättet. Für die Berechnung der Filter werden die Vorgaben einer Zielübertragungsfunktion mit unterer und oberer

Grenzfrequenz, die Übernahmefrequenzen zwischen den einzelnen Wegen sowie die thermischen Zeitkonstanten und Spitzenbelastbarkeiten für die Limitereinstellungen benötigt. Für den Fall, daß die Entzerrung nicht auf ein möglichst lineares Übertragungsverhalten hin erfolgen soll, können auch beliebige andere Verläufe und parametrische Equalizerfunktionen eingestellt werden.

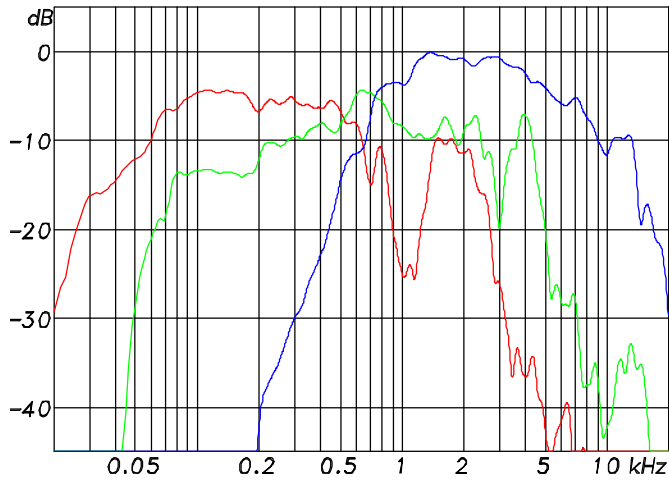


Abbildung 2 Frequenzgänge der Einzellauspecker für die Beispielmessung (Tieftöner 2x18“ ; Mitteltöner 1x12“ ; Hochtöner 1x2“ mit 100x60 Grad Horn)

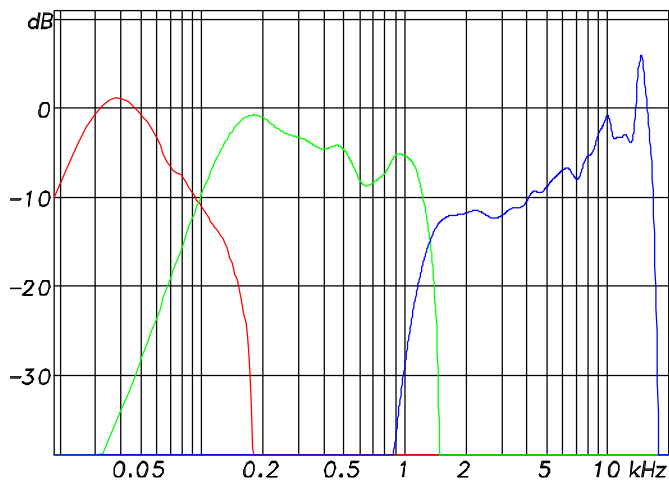


Abbildung 3 Filterfunktionen mit FIR-Filtern

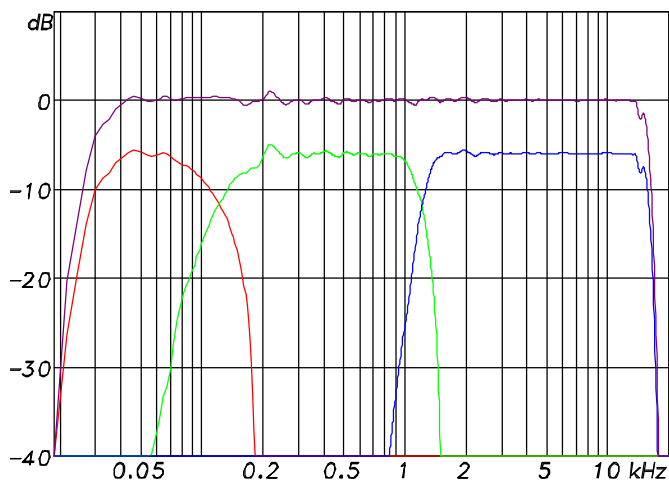


Abbildung 4 Frequenzgang der Einzelsysteme mit Filter und des Gesamtsystems mit Filter

Als typische Abweichung vom linearen Frequenzgang auf Achse wären hier Kompensationskurven aus einer Hallraummessung eines Lautsprechers zu nennen, die den Gesamtenergieeintrag des Lautsprechers in einem Raum berücksichtigen und für den Einsatz in normalen Räumen teilweise zu besseren Ergebnissen führen als die lineare Abstimmung der Übertragungsfunktion des

Lautsprechers auf Achse. Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die berechneten Filterkurven und die resultierenden Frequenzgänge der Lautsprecher mit Filter sowie die Gesamtübertragungsfunktion der 3-Wege Box mit diesen Filtern. Die Abweichungen im angestrebten Frequenzbereich von 40 Hz bis 15 kHz betragen hier weniger als ± 1 dB. Für die Entwicklung eines Lautsprechers, der für den Einsatz mit einem solchen Controller konzipiert wird, läßt sich daraus auch die Schlußfolgerung ziehen, daß primär auf ein sauberes räumliches Abstrahlverhalten geachtet werden sollte, um die Vorzüge der exakten Entzerrung optimal nutzen zu können.

Laufzeitbetrachtung

Für eine vollständige komplexe Entzerrung eines Lautsprechers in einem vorgegebenen Frequenzbereich müssen alle Signalanteile auf die größte hier vorkommende Laufzeit verzögert werden. Exemplarisch sei der Amplituden- und Laufzeitverlauf eines 18“ Tieftöners in einem Bassreflexsystem mit einer unteren Eckfrequenz von ca. 34 Hz betrachtet, der dort eine Gruppenlaufzeit von ca. 30 ms aufweist. Eine Entzerrung auf konstante Gruppenlaufzeit, d.h. linearphasiges Verhalten, ab 34 Hz würde hier eine Grundlaufzeit für alle Frequenzen von mindestens 30 ms bedingen, die im Live-Einsatz oder auch bei Synchronisationsaufgaben im Studio nicht akzeptabel ist.

Für diesen Fall kann unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz auf die Entzerrung zu einem linearphasigen System verzichtet werden. Leider geht damit aber auch einer der größten Vorteile der linearphasigen Entzerrung, keine Laufzeitfehler im Bassbereich zu verursachen, verloren.

Vergleichbare Komplikationen treten beim Entwurf steilflankiger Frequenzweichenfilter mit tiefen Eckfrequenzen auf. Zur Vermeidung von Laufzeitverzerrungen muß das Filter symmetrisch in der Impulsantwort ausgelegt werden, was eine konstante Gruppenlaufzeit entsprechend der halben Filterlänge bedingt. Sehr lange Filter, die eine hohe Auflösung ermöglichen, können so Laufzeiten von bis zu 100 ms erreichen. Alternativ dazu kann das Filter bei gleichem Amplitudenverlauf über eine Hilbert-Transformation minimalphasig berechnet werden. Abhängig von der Flankensteilheit treten dann mehr oder weniger starke Laufzeitverzerrungen im Übergangsbereich auf.

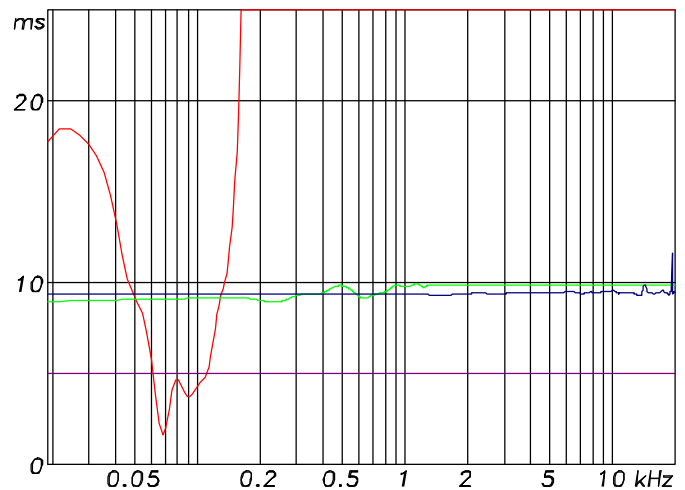


Abbildung 5 Laufzeitverhalten der Filter mit minimalphasiger Entzerrung im Tieftonkanal und linearphasiger Entzerrung im Mittel- Hochtonzweig

Abbildung 5 zeigt für das 3-Wege System einen möglich Kompromiß zwischen linearphasiger und minimalphasiger Entzerrung. Für den Tieftonkanal wird das Filter minimalphasig berechnet und für den Mittel- bzw. Hochtonzweig linearphasig. Zur Vermeidung von Sprungstellen im Laufzeitverhalten erfolgt dann eine Anpassung der linearphasigen Kanäle auf die Laufzeit des minimalphasigen Weges bei der Übernahmefrequenz. Für das Beispiel entsteht so durch die Filterung eine Grundlaufzeit von 9 ms zu der sich noch 5 ms Verarbeitungszeit der AD/DA-Umsetzer, Down- und Oversamplingfilter und Limiter addieren. Die insgesamt 14 ms Verzögerung können für alle Anwendungsfälle als unkritisch betrachtet werden. Abbildung 6 verdeutlicht diesen

Zusammenhang mit einer kombinierten Phasen- Laufzeitdarstellung mit einem nahezu konstanten Phasenverlauf oberhalb der Trennfrequenz von 140 Hz und dem minimalphasigen Ansatz für den Tieftonzweig. Dem Vorteil der geringen Grundlaufzeit steht dann allerdings die fehlende Laufzeitkompensation für tiefe Frequenzen gegenüber

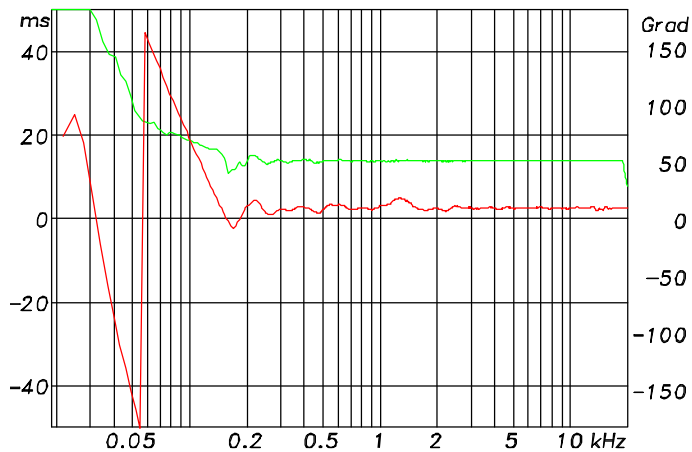


Abbildung 6 Phasengang und Laufzeitverhalten des entzerrten Gesamtsystems

Dynamikbetrachtung

Der wohl kritischste Punkt bei digitalen Controllern ist der Dynamikumfang. Der extrem hohe Wirkungsgrad und die hohe Belastbarkeit der bei PA-Lautsprechern verwendeten Treiber erlaubt maximale Schalldrücke von mehr als 140 dB in 1m Entfernung. Trotzdem muß gewährleistet sein, daß auch in ruhiger Umgebung, z.B. bei Theaterinstallationen, keine Störgeräusche auf den Zuhörerplätzen nahe den Lautsprecher zu vernehmen sind. Analoge Controller erreichen Dynamikwerte von mehr als 110 dB, die unter diesem Aspekt als unkritisch gelten können. Diese Anforderung einer über alles gesehenen Gesamtdynamik von mindestens 110 dB, wurde somit auch für den digitalen Controller gestellt.

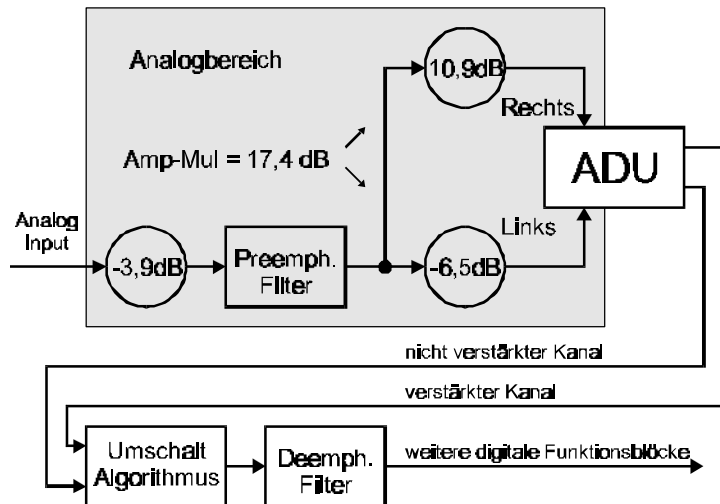


Abbildung 7 2-Bereichs AD-Umsetzer

Die Grafik in Abbildung 8 verdeutlicht den Zusammenhang der Dynamikbereiche der einzelnen Stufen im digitalen Controller. Ein einzelner 20-Bit AD-Umsetzer erreicht 107 dB Dynamik, so daß durch die gestufte Anordnung von zwei AD-Umsetzern (siehe auch Abbildung 7) mit einem Verstärkungsunterschied von 17,4 dB und durch eine zusätzliche 50/15 µs Preemphasis 127 dB Dynamikumfang im Eingang entstehen. Betrachtet man dagegen die 110 dB Dynamik des 20-Bit DA-Umsetzers, so scheint zunächst ein nicht nutzbarer Dynamiküberschuß auf der Eingangsseite zu bestehen. Nutzbar bleibt schließlich nur die Durchgangsdynamik, die vom schwächsten Glied der Kette, hier der DA-Umsetzer, vorgegeben wird. Erst durch ein Einbeziehen der Limiter in die Dynamikbetrachtung ist zu erkennen, daß der Überschuß an Dynamik für den Headroom des Limiters zwischen Eingang und

Ausgang zwingend notwendig ist. Über alles betrachtet bleibt so eine Gesamtdynamik von 110 dB bei mindestens 14 dB Headroom als Arbeitsbereich für die Limiter.

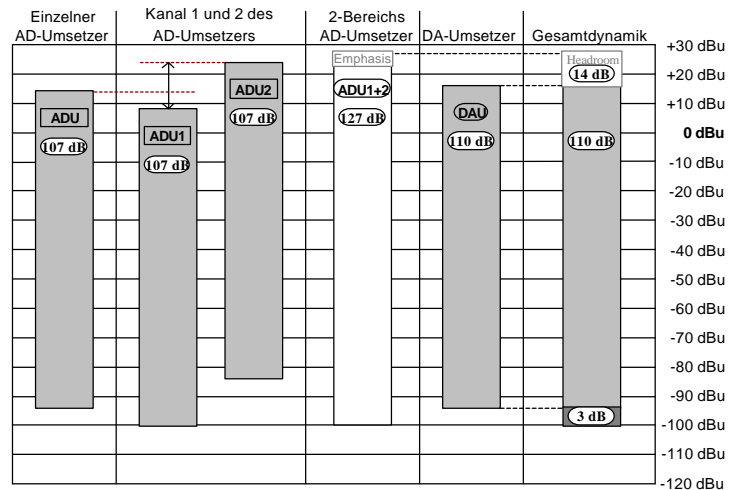


Abbildung 8 Dynamikbetrachtung für den digitalen Controller

Fazit

Als Fazit darf dem digitalen Controller der 4.Generation in dieser Entwicklungsschiene eine volle Praxistauglichkeit auch für sehr anspruchsvolle Aufgaben bescheinigt werden. Bezüglich der Durchgangsdynamik kann auch bei Lautsprechern, die Maximalpegel von über 140 dB erreichen, davon ausgegangen werden, daß im Ruhezustand keine Nebengeräusche störend auftreten. Ob die hochauflösende Entzerrung im praktischen Betrieb noch merkliche Vorteile ergibt, ist sicherlich stark von der akustischen Umgebung abhängig, wogegen wiederum die vorausschauenden Peaklimiter und thermischen RMS-Limiter eine deutlich sauberere Wiedergabe und höhere Betriebssicherheit im alltäglichen Betrieb einer Beschallungsanlage im Grenzlastbereich erlauben. Die sich hieraus ergebende effektivere Ausnutzung einer Lautsprecheranlage rechtfertigt mehrfach die zur Zeit noch höheren Kosten eines digitalen Controllers gegenüber analogen Geräten.

Literatur

- [1] Entzerrung von Lautsprechern mit einem Signalprozessorsystem in Echtzeit
A. Goertz ; D. Leckschat
Tagungsband DAGA 90
- [2] Digitale Lautsprecherentzerrung
A. Goertz ; D. Leckschat
Tagungsband VDT 90
- [3] Nichtlineare Entzerrung von Lautsprechern in Echtzeit mit einem Signalprozessor
A. Goertz ; D. Leckschat ; W. Klippel
Tagungsband DAGA 91
- [4] Vergleich verschiedener Verfahren zur digitalen Lautsprecherentzerrung
A. Goertz
Tagungsband DAGA 92
- [5] Einsatz digitaler Limiter in Beschallungsanlagen
A.Goertz ; S.Müller
Tagungsband DAGA 95
- [6] Optimierung der Entzerrerübertragungsfunktion für Lautsprechersysteme durch Berücksichtigung psychoakustischer Effekte
A. Goertz ; K.H. Pflaum
Tagungsband DAGA 96
- [7] Verbesserung der Wiedergabequalität von Lautsprechern mit Hilfe von Digitalfiltern
D.Leckschat
Dissertation an der RWTH Aachen 1992