

GOERTZ, Anselm [RWTH AACHEN]

Rückkopplungsunterdrückung in Beschallungsanlagen mit automatisch optimierenden Digitalfiltern

1) Einleitung

Elektroakustische Beschallungsanlagen zur Verstärkung der Stimme oder von Instrumenten werden heute in den vielfältigsten Situationen eingesetzt. Da bei fast allen Installationen ein Teil des vom Lautsprecher abgestrahlten Schalls auf das Mikrofon zurückfällt, neigen diese Anlagen zu mehr oder weniger großen Instabilitätserscheinungen. Neben einigen nahezu selbstverständlich in jeder Beschallungsanlage angewandten stabilitätserhöhenden Maßnahmen, wie Lautsprecher und Mikrophone mit starker Richtwirkung, ist eine möglichst exakte frequenzabhängige Einstellung der Schleifenverstärkung mit automatischer Anpassung an die Randbedingungen anzustreben.

Im Zeitalter der digitalen Signalverarbeitung ist es naheliegend, diese Aufgaben mit einem digitalen Signalprozessorsystem zu bearbeiten. Hier soll nun ein bereits seit längerem bekanntes Verfahren [1] wieder aufgegriffen werden, indem ein zusätzliches Meßsignal von einem DSP-System in die Beschallungsanlage eingespeist und ausgewertet wird.

2) Problemstellung

Abbildung 1 zeigt einen Raum mit den einzelnen Komponenten einer Beschallungsanlage und den zugehörigen Übertragungsfunktionen [2]. Das Sprechersignal S_S gelangt hier einmal direkt zum Hörer mit der Übertragungsfunktion β_{SH} und mit der Übertragungsfunktion β_{SM} zum Mikrophon. Das vom Lautsprecher abgestrahlte Signal S_L läßt sich berechnen anhand des Mikrophonsignales S_M und des komplexen Verstärkungsfaktors der Beschallungsanlage, bestehend aus der Mikrophon- und Lautsprecherübertragungsfunktion, sowie den Verstärkungsfaktoren des Vorverstärkers und der Endstufe. Bei hinreichender Linearität der Anlage im Bereich des Nutzsignales kann hier mit einem einfachen Verstärkungsfaktor V (hier: $V = V_M \cdot V_L$) gerechnet werden. Das vom Lautsprecher abgestrahlte Signal erreicht den Hörer über

die Übertragungsfunktion β_{LH} und das Mikrophon des Sprechers mit der Übertragungsfunktion β_{LM} .

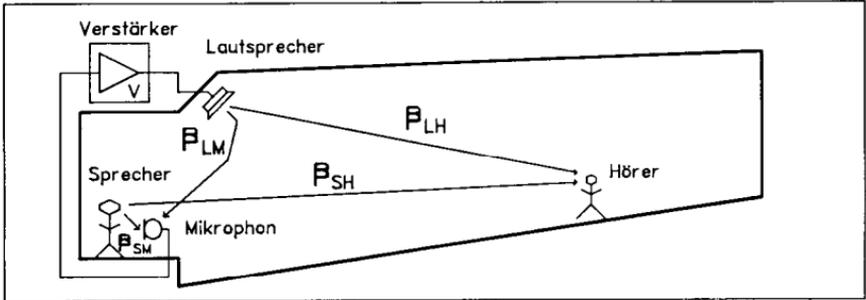


Abb.1 Beschallungsanlage in einem Raum

Ein Blockschaltbild dieser Anordnung ist in Abbildung 2 zu sehen. Aus ihr kann man das am Hörer eintreffende Signal ableiten:

$$S_H = S_S \beta_{SH} + S_S \beta_{SM} \frac{V_M V_L}{1 - \beta_{LM} V_M V_L} \beta_{LH} \quad (Gl.1)$$

Diese Gleichung beschreibt die Zusammensetzung des zum Hörer gelangenden Signals aus dem direkten Sprechersignal und dem Lautsprechersignal. Sie enthält eine einfache Rückkopplungsfunktion, deren Verlauf eine Aussage über die Stabilität der Anlage erlaubt. Sobald die Schleifenverstärkung $\beta_{LM} \cdot V_M \cdot V_L$ bei einer bestimmten Frequenz den Wert +1 (= 0dB) erreicht oder überschreitet, wird die Anlage instabil und schwingt mit dieser Frequenz.

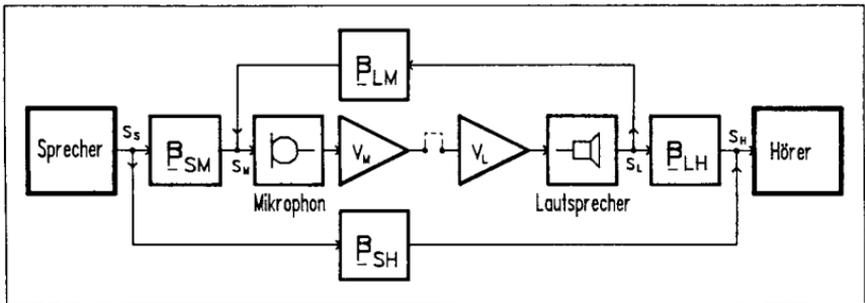


Abb.2 Blockschaltbild einer Beschallungsanlage

Zur breitbandigen Abstrahlung einer möglichst großen akustischen Leistung ist es somit wichtig, aus der Schleifenübertragungsfunktion herausragende Überhöhungen zu vermeiden. Ausschlaggebend ist dabei die Raumübertragungsfunktion β_{LM} zwischen Lautsprecher und Mikrofon, die eine sehr komplexe Struktur aufweist. Nach Kuttruff [3] können über Raumübertragungsfunktionen bestimmte statistische Aussagen getroffen werden. Ab einer Grenzfrequenz f_g , die meist an der unteren Grenze des für die Beschallungstechnik interessanten Bereichs liegt, läßt sich die Funktion aus einer Abfolge von Maxima und Minima beschreiben, deren Abstand etwa 2-4 Hz beträgt. Dabei liegen die größten Maxima 10-12 dB über dem Mittelwert der Funktion.

An das Meßsignal werden die sich widersprechenden Anforderungen gestellt, möglichst unhörbar zu sein und sich trotzdem hinreichend vom Stör- und Nutzsignal abzuheben. Der Meßfehler und die erreichte Frequenzauflösung stehen hier im direkten Zusammenhang mit der Mittelungsdauer einer Messung und dem Pegel des Meßsignales relativ zum Stör- und Nutzsignal.

3) Das Meßverfahren

Als Meßverfahren wurde das bereits aus der Lautsprechermeßtechnik bewährte Verfahren [4] [5] der Messung mit Maximalfolgen gewählt. Zur möglichst optimalen Anpassung des Maximalfolgenspektrums an die spektrale Zusammensetzung des Stör- und Nutzsignales können verschiedene spektrale Gewichtungsfunktionen gewählt werden. Nach der Mittelung über eine bestimmte Anzahl Messungen erfolgt die Auswertung über eine schnelle Hadamard- und Fourier-Transformation (FHT und FFT) mit anschließender Kompensation der Frequenzgewichtungsfunktion der Rauschfolge.

Maximalfolgen

Die Messung mit Maximalfolgen erreicht schon durch ihre deutlich höhere Energie des Testsignales eine wesentlich größere Meßdynamik gegenüber Einzelimpulsmessungen und erscheint daher besonders geeignet unter den oben genannten Anforderungen. Eine typische Folgenlänge von 4095 Werten erzielt einen Dynamikgewinn von 36 dB.

Dynamikgewinn durch Mehrfachmessung

Ein weiterer Dynamikgewinn kann durch das Mitteln über mehrere zeitlich aufeinander folgende Messungen erreicht werden. Sofern die Messung streng synchron zum ausgesandten Testsignal sind, addieren sich die zueinander korrelierten Testsignalanteile, während sich die unkorrelierten Störanteile immer weiter schwächen. Wird die Anzahl der Messungen verdoppelt, so steigt der Störabstand um 3 dB. Prinzipiell lassen sich so natürlich auch bei großen Störpegeln hinreichend genaue Messungen erzielen. Sehr lange Mittelungszeiten stehen hier allerdings im Widerspruch zu

der Anforderungen, sich den ständig ändernden Randbedingungen durch neue Meßergebnisse anpassen zu können.

Erste Versuche in einem kleineren Versammlungsraum mit einer einfachen Verstärkeranlage haben ergeben, daß die Rauschfolge mit einem Signalpegel von 25 dBA im Zuhörerbereich nicht mehr bemerkt wird. Solange kein Nutzsignal übertragen wurde, waren bei normalem Umgebungsgeräusch (hier 54 dBA Störpegel) für eine effektive Dynamik des Meßergebnisses von ca. 35 dB Mittelungszeiten von zwei Minuten notwendig. Dieses meßtechnisch gewonnene Ergebnis läßt sich rechnerisch nachvollziehen, indem zum vorhandenen Störabstand von -29 dB der Dynamikgewinn der 4k-Maximalfolge von 36 dB und ca. 30 dB durch die Mittelung über 1200 Einzelmessungen von je einer Folgenlänge (100 ms) addiert werden.

Die Dauer eines Meßvorganges von zwei Minuten erscheint bei nur langsam veränderlichen Rahmenbedingungen durchaus noch erträglich. In diesem speziellen Fall konnte so die Verstärkung der Anlage, nachdem eine Anzahl Zuhörer eingetroffen waren, in dem sonst sehr halligen Raum automatisch auf den optimalen Wert erhöht werden. Sobald aber durch einen Sprecher ein zusätzliches Nutzsignal mit sehr hohem Pegel gegenüber der Rauschfolge (Pegeldifferenz ca. 50 dB) übertragen wird, steigt die notwendige Mittelungsdauer auf ein bis zwei Stunden und wird somit untragbar.

Verdeckungseffekt

Um trotzdem ausreichend kurze Reaktionszeiten des Meßsystems zu erhalten, kann hier der Verdeckungseffekt beim Hören zweier unterschiedlicher Signale, z.B. der Sprach- und das Rauschsignal, zur Verbesserung des Verfahrens ausgenutzt werden. Ein leises Signal wird dabei umso mehr verdeckt, je näher es dem lauterem Signal in seiner spektralen Zusammensetzung kommt.

Spektrale Gewichtung des Testsignales

Die verwendeten Maximalfolgen können mit einer spektralen Gewichtung versehen werden, die derjenigen des Nutzsignales ähnlich ist. Hiermit wird vor allem in den kritischen Frequenzbereichen, in denen die Störungen durch das Nutzsignal besonders heftig sind, eine Verbesserung des Störabstandes erzielt, ohne daß eine Pegelerhöhung des Testsignales hörbar wird.

Pegelnachführung

Im Idealfall wäre es zusätzlich anzustreben, daß der Pegel des Testsignales ständig dem Nutzsignal angepaßt wird. Das Rauschsignal würde somit immer kurz unterhalb der Wahrnehmbarkeit dem Nutzsignal im Pegel nachgeführt. Die Verwendung von periodischen Rauschfolgen als Testsignal setzt aber ein lineares Verhalten des Übertragungsweges voraus und erlaubt daher innerhalb einer Periode keine Pegeländerungen. Abhängig von der Periodendauer kann es so zu mehr oder weniger starken

Rauschfahren durch eine Pegelnachführung kommen. Abhilfe wäre mit einer kürzeren Periodendauer (Länge einer Folge) zu erreichen, womit aber eine Verschlechterung der Frequenzauflösung einhergeht.

Unter den oben genannten Bedingungen wurden auch erste Versuche mit gewichtete Rauschfolgen und einer Pegelnachführung gemacht. Mit einem Sprechersignal konnte bei gewichteten Folgen die Dauer für eine Messung auf 30 min reduziert werden. Mit zusätzlicher Pegelnachführung war nochmal eine entscheidende Verbesserung auf 100 s zu erreichen. Für alle Messungen wurde als Bewertungskriterium eine maximale Abweichung von $\pm 3\text{ dB}$ von einer Referenzmessung erlaubt.

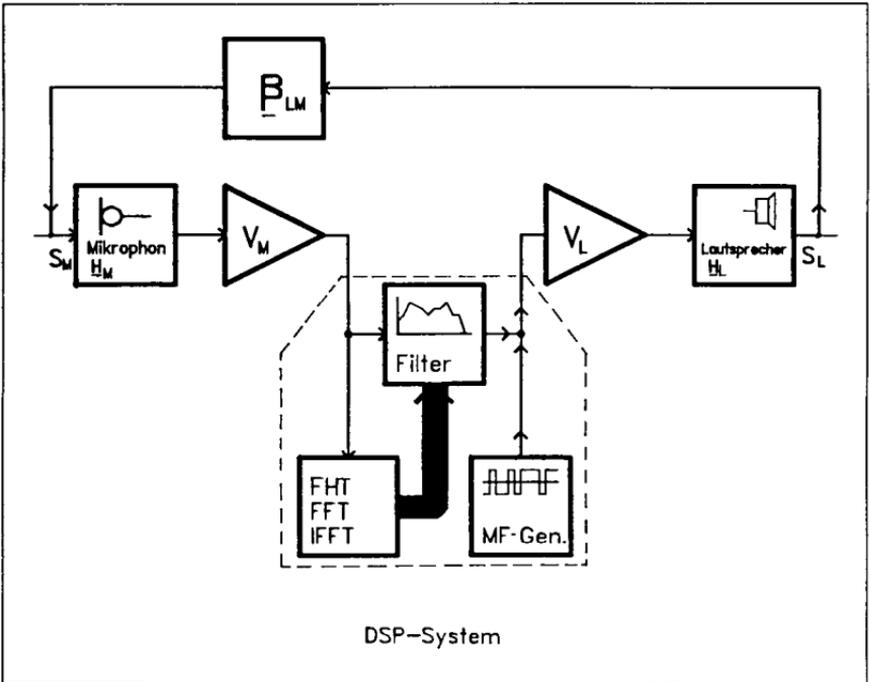


Abb.3 Schematischer Aufbau des Meßsystems mit Digitalfilter

4) Meßergebnisse

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen zum Vergleich zwei Messungen bei unveränderten Randbedingungen, aber mit unterschiedlichen Pegeln des Testsignales. Die Messung aus Abbildung 4 entstand als Referenzmessung mit 67 dBA Testsignalpegel am

Mikrophon bei einer Messdauer von 0.4 s. Für die Messung aus Abbildung 5 ist der Pegel auf 25 dBA abgesenkt und die Mittelungsdauer auf 12 s erhöht worden. Neben einigen tieffrequenten Störungen unterhalb von 100 Hz, einem Bereich der zur Betrachtung der Rückkopplungsstabilität bei Sprachübertragungsanlagen relativ irrelevant ist, wird die Struktur der Schleifenübertragungsfunktion noch hinreichend genau wiedergegeben. Eine Messung dieser Art wäre auch bei anwesendem Publikum schon in einer kurzen Sprachpause un bemerkt möglich.

Realisation und Erprobung des Meßverfahrens

Zusammenfassend kann nach einer großen Anzahl verschiedener Messungen zur Erprobung dieses Verfahrens [6], aus denen das vorab gezeigte Beispiel ausgewählt wurde, gesagt werden, daß in Verbindung mit entsprechenden Digitalfiltern sich dieses Verfahren zur automatischen Optimierung und Anpassung an langsam veränderliche Randbedingungen sehr gut eignet. Sowohl die Messeinrichtung als auch das Filter lassen sich bereits mit handelsüblichen Signalprozessoren (z.B. DSP 56001 von Motorola) in einfacher Weise realisieren. Abbildung 3 zeigt schematisch den Aufbau und die Implementierung in die Beschallungsanlage des für diese Messungen verwendeten Systems.

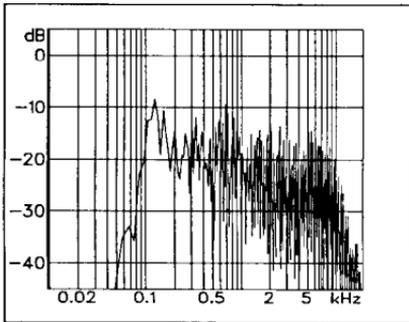


Abb.4 Referenzmessung

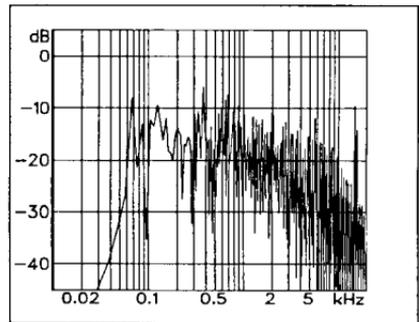


Abb.5 Messung mit 25 dBA

5) Filterfunktionen

Bereits vorab wurde erwähnt, daß neben dem eigentlichen Meßsystem für die Schleifenübertragungsfunktion auch das Korrekturfilter als Digitalfilter im DSP-System implementiert wird. Für erste Versuche ist das Filter als FIR-Filter (Filter ohne Rückkopplungswege mit endlicher Stoßantwort) auf einem bestehenden DSP-System mit 16 algorithmusspezifischen Filterprozessoren (DSP 56200) getestet worden. Die maximale Anzahl Koeffizienten beträgt hier 1920, entsprechend einer Länge der Filterimpulsantwort von ca. 50 ms. Die sich bei einer Abtastrate von 39 kHz ergebende

Frequenzauflösung von ca. 20 Hz ist für den fein strukturierten Verlauf der Raumübertragungsfunktion in den meisten Fällen jedoch nicht ausreichend.

Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit die gemessene Schleifenübertragungsfunktion zunächst soweit zu glätten, daß eine Filterfunktion mit invertiertem Verlauf bei der vorgegebenen Auflösung berechnet und realisiert werden kann. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen die Schleifenübertragungsfunktion und deren Verlauf nach der Glättung. Auch wenn es mit dieser Auflösung nicht gelingt, die Feinstruktur der Übertragungsfunktion zu linearisieren, so kann zumindest der grobe Verlauf der Funktion korrigiert werden. Selbst hier sind, wie Abbildung 7 zeigt, noch starke Schwankungen in der Größenordnung bis zu 15 dB zu erkennen.

Die Filterfunktion eines FIR-Filters mit 1920 Koeffizienten zeigt Abbildung 8 und die zugehörige Impulsantwort Abbildung 9. Mit diesem Filter ergibt sich eine ebenere Schleifenübertragungsfunktion (Abbildung 10) deren gemittelter Verlauf (Abbildung 11) weniger ausgeprägte Maxima aufweist. Das Maximum der Schleifenverstärkung liegt jetzt ca. 7 dB unterhalb der kritischen 0 dB Grenze. Mit eingeschleiftem Filter würde somit eine um 7 dB größere Schleifenverstärkung bei gleichbleibenden Stabilitätsverhältnissen erlaubt.

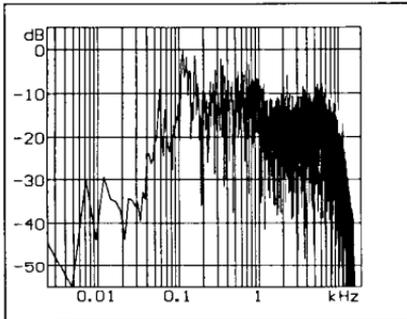


Abb.6 Schleifenübertragungsfunktion (SUF)

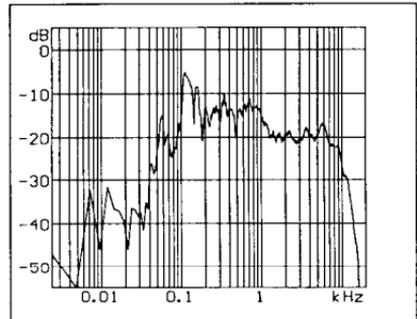


Abb.7 Geglätteter Verlauf der SUF

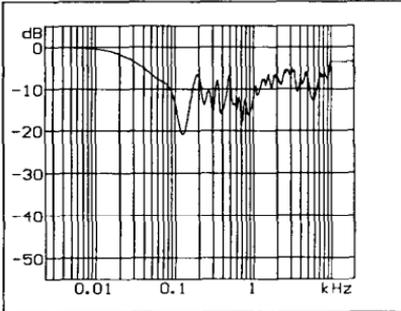


Abb.8 Filterfunktion

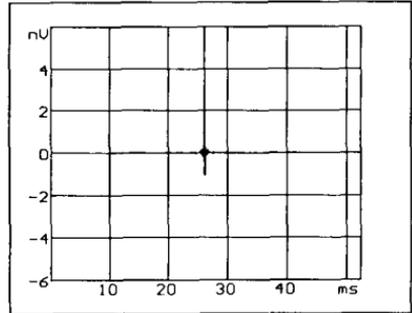


Abb.9 Impulsantwort des Filters

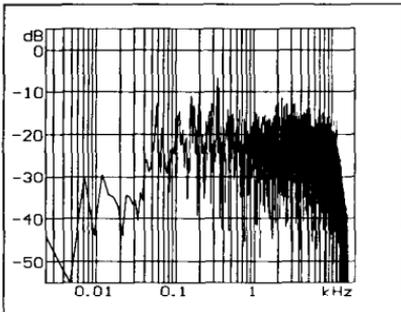


Abb.10 SÜF mit Filter

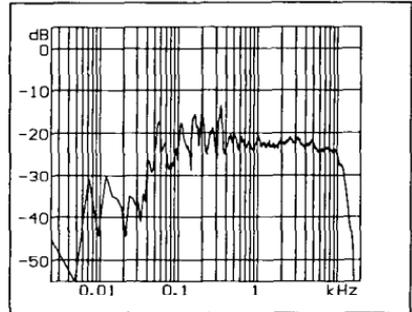


Abb.11 Geglätteter Verlauf der SÜF mit Filter

6) Anwendungen

Als Ergebnis erster Versuche mit dem digitalen Meß- und Filtersystem läßt sich festhalten, daß der Einsatz zur automatischen Optimierung der Schleifenübertragungsfunktion bei sich ändernden Randbedingungen zu guten Ergebnissen führt. Die Grenzen des Verfahrens liegen in der langen Zeitdauer der Meßvorgänge, die keine Reaktion auf schnelle Änderungen in der Raumübertragungsfunktion zwischen Lautsprecher und Mikrofon erlaubt und in der relativ geringen Frequenzauflösung des Filters.

Eine exakte Linearisierung der Schleifenübertragungsfunktion würde allerdings auch bei hinreichender Frequenzauflösung nicht zu befriedigenden Resultaten führen, da bereits bei geringsten Veränderungen der Mikrofonposition im Raum sich die nahe beieinander liegenden Maxima und Minima der Raumübertragungsfunktion ver-

schieben. Bei einem Sprecher, der sich mit seinem Mikrofon auf der Bühne bewegt, bedeutet das eine ständige Änderung in der Feinstruktur der Übertragungsfunktion, so daß bei den langen Reaktionszeiten des Meßsystems keine Verbesserungen mehr zu erzielen wären. Der reaktive Verlauf dagegen wird primär durch langsam veränderliche Randbedingungen (z.B. Publikumsmenge, offene oder geschlossene Vorhänge u.ä.) gegeben, so daß hier eine automatische Optimierung trotz langer Reaktionszeiten sinnvoll erscheint.

- [1] Fasbender, J.
Zur Kontrolle der akustischen
Rückkopplung in Beschallungsanlagen
Dissertation RWTH Aachen 1984
- [2] Ahnert, W. ; Reichardt, W.
Grundlagen der Beschallungstechnik S. 67
Hirzel Verlag Stuttgart 1981
- [3] Kuttruff, H.
On Frequency Response Curves in Rooms
JASA 34 (1962) S.76-80
- [4] Rife, D.D. ; Vanderkooy, J.
Transfer Function Measurement with MLS
JAES Vol.37, No.6, 1989
- [5] Goertz, A. ; Leckschat, D.
Digitale Lautsprecherentzerrung (Teil 2)
Production Partner, No.3, 1992
- [6] Grobel, K.
Aufbau eines signalprozessorgesteuerten Meßsystems zur
Ermittlung der Schleifenverstärkung von Beschallungsanlagen
Diplomarbeit am Institut für Technische Akustik,
RWTH Aachen 1992

Die Aussteuerungsgrenze einer Beschallungsanlage wird durch den Maximalwert der frequenzabhängigen Schleifenübertragungsfunktion der Anlage und des Raumes bestimmt. Einzelne herausragende Maxima können so die Aussteuerungsgrenze für einen stabilen Betriebszustand der Anlage weit herabsetzen. Ein in den Signalweg eingeschleiftes Digitalfilter mit hoher Frequenzauflösung ermöglicht hier eine Linearisierung der Schleifenübertragungsfunktion. Die Optimierung des Filters erfolgt automatisch mit einem integrierten Maximalfolgemeißsystem und erlaubt daher eine ständige Anpassung an sich ändernde Randbedingungen mit dem Ziel, eine möglichst große akustische Leistung breitbandig abstrahlen zu können.

The output level of a PA system is usually limited by the peak value of the open-loop transfer function for the system and the room. Even a single peak may therefore significantly reduce the stability limit. Feeding a digital filter of high frequency resolution into the signal path will result in linearizing the open-loop transfer function. The filter optimizes itself automatically and is controlled by an integrated maximum-length sequence measuring system. This system allows continuous adaptation to changes in the acoustical environment while concurrently ensuring high broad-band acoustical output.