

Einsatz von digitalen Filtern zur Vermeidung der akustischen Rückkopplung in Beschallungsanlagen

A.Goertz *Institut für Technische Akustik der RWTH Aachen*

Die Vermeidung der akustischen Rückkopplung gehört beim Einsatz von Verstärkeranlagen, bei denen sich Mikrophone und Lautsprecher in einem Raum befinden, zu den wichtigsten Aufgaben. Unvermeidlich fallen vom Lautsprecher abgestrahlte Anteile des Schalls auf das Mikrophon zurück, womit sich über die Raumübertragungsfunktion vom Lautsprecher zum Mikrophon in der Verstärkeranlage eine Rückkopplungsschleife schließt. Entscheidend für die Stabilität der Schleife mit Hinsicht auf die Rückkopplungsneigung ist die frequenzabhängige Verstärkung der aufgeschnittenen Schleife. Dort, wo die offene Scheifenverstärkung den Wert 1 überschreitet, beginnt die Anlage zu schwingen und pfeift. Es ist daher anzustreben, daß die sogenannte Schleifenübertragungsfunktion (SÜF) keine herausragenden Spitzen aufweist und einen insgesamt möglichst gleichmäßigen Verlauf zeigt. Sämtliche Elemente der Schleife, d.h. Mikrophon, Verstärker, Lautsprecher und die Raumübertragungsfunktion tragen zu deren Übertragungsfunktion bei, wobei die ausgeprägte Feinstruktur primär durch die Raumübertragungsfunktion entsteht. Ein Beispiel für eine SÜF aus einem Hörsaal für ca. 250 Personen zeigt Abbildung 1.

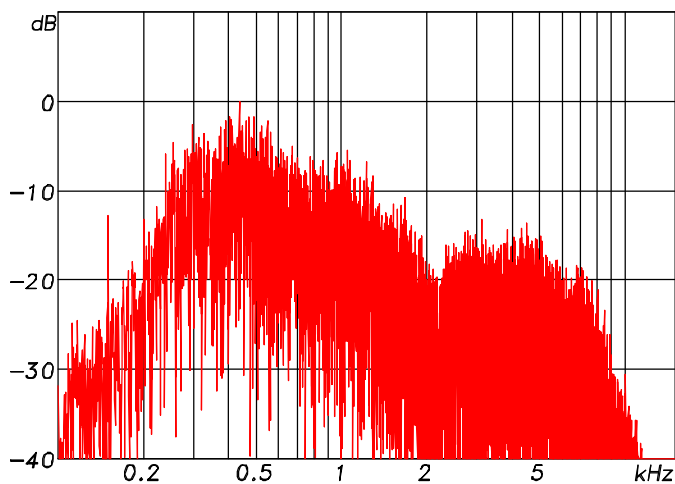


Abbildung 1 Beispiel einer Schleifenübertragungsfunktion

Raumübertragungsfunktionen

Der Weg des Schalls vom Lautsprecher zum Mikrophon verläuft neben dem direkten Weg (Direktschallanteil) über eine Vielzahl von Wand-, Boden-, Decken- und anderen Reflexion. Die unterschiedlichen Laufzeiten dieser Wege führen so zu einem sehr ausgeprägten Interferenzmuster in der Raumübertragungsfunktion. Hier ist auch die Ursache der starken Abhängigkeit der Schleifenübertragungsfunktion von der räumlichen Position des Lautsprechers oder Mikrophones zu finden. Schon geringfügige Änderungen der Mikrophonposition führen so zu einer Verschiebung der sehr schmalen Maxima und Minima in der Schleifenübertragungsfunktion. Der mittlere Verlauf der SÜF wird dagegen eher von den grundsätzlichen akustischen Beschaffenheiten des Raumes bestimmt. Als Beispiel wäre hier die Abhängigkeit vom Besetzungsgrad durch das Publikum in einem Saal zu nennen.

Elektrische Filter

Wenn es gelingt, mit durchdachten Lautsprecher- und Mikrophonkonstruktionen, ein nahezu frequenzunabhängiges Übertragungsverhalten zu erreichen, wie es bei Verstärkern moderner Bauart schon länger üblich ist, so kann der Einfluß der elektrischen und elektroakustischen Teile der Schleife auf ihre Übertragungsfunktion nahezu vernachlässigt werden. Auch dann bleibt aber aus oben genannten Gründen die gesamte SÜF sehr ungleichmäßig und stark strukturiert. Es liegt nun nahe, mit dem Ziel einer gleichmäßigen und hohen Schleifenverstärkung, den Verlauf mit Hilfe eines zusätzlichen elektrischen Filters dort, wo die Verstärkung kritische Werte erreicht, einzuebnen. Zwei dominante Probleme treten dabei in den Vordergrund: Es wird eine sehr hohe Filterauflösung im Frequenzbereich verlangt und die Filterfunktion muß in der Lage sein, sich der veränderlichen SÜF entsprechend schnell anzupassen. Beide Aspekte sprechen für den

Einsatz digitaler Filter. Auch hier müssen allerdings gewisse Einschränkungen in der Filterauflösungen hingenommen werden, die eine vollständige Kompensation nicht realistisch erscheinen lassen. Die hierfür notwendige Auflösung im Frequenzbereich läge bei ca. 0,5 Hz und würde somit als FIR-Filter bei einer Samplingfrequenz von 44,1 kHz Rechenleistungen in der Größenordnung von 2000 MIPS erfordern. Ebenso wäre eine automatische Adaption nicht in der Lage die Filterfunktion entsprechend der sehr schnellen Veränderung der vielen feinen Maxima und Minima, die z.B. durch Mikrophonbewegungen entstehen, anzupassen. Es erscheint daher sinnvoll, sich auf die Kompensation des mittleren Verlaufes und derjenigen Bereiche, in denen besonders hohe Verstärkungswerte innerhalb der Schleife auftreten, zu beschränken. Im Rahmen, der dieser Übersicht zugrunde liegenden Arbeit [1], wurden unter diesem Aspekt drei digitale Filtertypen untersucht und praktisch erprobt.

Glättungsfiler

Der Einsatz und die Berechnung eines Glättungsfilters setzt die Kenntnis der momentanen Schleifenübertragungsfunktion voraus. Deren Messung kann mit Hilfe des eigentlichen Nutzsignales der Anlage erfolgen oder besser noch mit Unterstützung eines zusätzlich eingespeisten breitbandigen Hilfssignales mit guten Korrelationseigenschaften. In ihrer Frequenzgewichtung dem Nutzsignal und Umgebungsgeräusch angepaßte Maximalfolgen haben sich hier als günstig herausgestellt. Unter der Voraussetzung, daß ein Hilfssignal weitgehend unhörbar sein muß, sind entsprechend viele Mittelungen notwendig um ausreichende Störabstände in den Messungen zu erreichen. Schon die hieraus resultierende Dauer einer Messung von einigen Sekunden unter optimalen Bedingungen bis zu typischerweise einigen Minuten, erlaubt nicht die Erfassung der schnell veränderlichen Feinstruktur (siehe auch Abschnitt Raumübertragungsfunktionen), sondern nur die Erfassung des mittleren Verlaufes der SÜF. Abbildung 2 zeigt eine Filterfunktion, die aus der in Abbildung 1 gezeigten SÜF berechnet wurde und die daraus resultierende SÜF mit Filter. Das Filter wurde mit einem 4096 Taps FIR-Filter bei einer Abtastrate von 32 kHz auf einem Multi-DSP-System realisiert und erreichte ca. 8 dB Stabilitätsgewinn. Langsame Veränderungen in der mittleren SÜF, z.B. durch Änderung der Publikumsmenge können hiermit ausreichend schnell erfaßt werden. Schnelle Veränderungen der Mikrophonposition dagegen, z.B. durch eine sich mit dem Mikrophon bewegenden Sprecher, oder sehr große Nutzsignalpegel, führen häufig zu Fehlanpassungen des Filters, so daß dieser Filtertyp primär für Sprachübertragungsanlagen mit fester Mikrophonstellung in Betracht gezogen werden sollte.

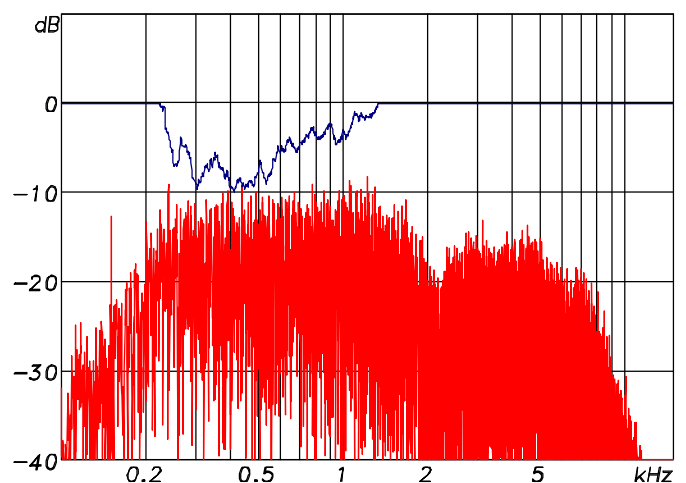


Abbildung 2 Filterfunktion (obere Kurve) und resultierende Schleifenübertragungsfunktion (ohne Filter siehe Abbildung 1)

Sperrfilter

Im Gegensatz zum vorab besprochenen Glättungsfilter, dessen Funktion präventiver Art ist, setzt das Sperrfilter erst dann ein, wenn tatsächlich eine Rückkopplung oder zumindest ein Nachschwingen der Verstärkeranlage auftritt. Durch eine ständige Analyse des Signales in der Schleife kann eine mögliche Schwingfrequenz erkannt werden [2] [3]. Anschließend wird auf diese Frequenz ein schmalbandiges Sperrfilter gesetzt und somit die Verstärkung hier soweit reduziert, daß die Schwingneigung verschwindet. Die Reaktionszeit dieser Sperrfilter liegt im Bereich einiger 100 ms und ist daher hervorragend für kritische Situation mit schnellen Änderungen der Mikrofonposition, z.B. bei Bühnenmonitoren, geeignet. Der erzielbare Stabilitätsgewinn liegt in Größenordnungen von 2-6 dB. Es ist dabei abzuwägen, wie breitbandig die Sperrfilter ausgelegt werden können, ohne klangliche Verfälschung des Nutzsignales zu verursachen. Für Sprache kann aus Erfahrungswerten eine Bandbreite von 1/5 Oktave und für Musik von einer 1/10 Oktave als maximal angesetzt werden. Ein breiterer Sperrbereich hat den Vorteil, daß die Dämpfung auch dann noch wirksam bleibt, wenn sich die Maxima in der SÜF geringfügig verschieben. Ein solches Sperrfilter kann mit mehreren kaskadierten IIR-Filtern (typischerweise 2.Ordnung) und der FFT-Signalanalyse in einfacher Weise auf einem preisgünstigen DSP mit geringer Rechenleistung (ca. 10 MIPS) implementiert werden.

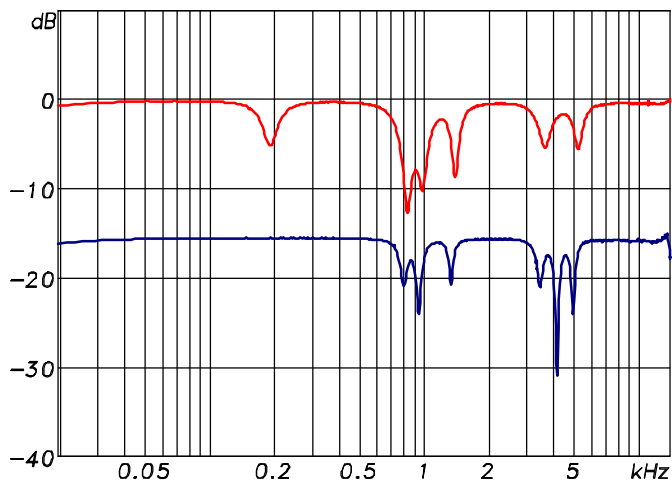


Abbildung 3 Filterfrequenzgänge eines Sperrfilters mit 6 kaskadierten IIR-Filtern 2.Ordnung bei 1/5 Oktave (obere Kurve) und 1/10 Oktave Bandbreite

Subtraktionsfilter

Mit einem Subtraktionsfilter werden diejenigen Signalanteile, die bereits einmal die Schleife der Beschallungsanlage durchlaufen haben, teilweise vom Signal subtrahiert. Das Filter besteht, vergleichbar einer Echounterdrückung bei Freisprechanlagen, aus einer Nachbildung der Schleifenelemente Mikrophon, Vor-, Endverstärker, Lautsprecher und der Raumübertragungsfunktion durch ein FIR-Filter und einem Subtrahierer. Im Gegensatz zum Glättungsfilter wird keine Korrekturfunktion in das FIR-Filter geladen, sondern die direkt aus der Messung oder einer Adaption an die Schleifenübertragungsfunktion hervorgehende Impulsantwort der Schleife. Abhängig von der Koeffizientenzahl des Filters und der Länge der Schleifenimpulsantwort gelingt eine mehr oder weniger gute Nachbildung der Schleife. Wird jetzt das Filterausgangssignal vom Eingangssignal subtrahiert, kommt es zu einer Auslöschung nur derjenigen Signalanteile, die bereits einmal die Schleife durchlaufen haben und wieder auf das Mikrophon zurückgefallen sind. Zur Unterstützung des Adaptionsprozesses bei Subtraktionsfiltern mit automatischer Anpassung der Filterfunktion kann auch hier dem Nutzsignal ein Hilfssignal mit guten Korrelationseigenschaften unterlegt werden. Der Pegel des Hilfssignales wird in Abhängigkeit vom Mikrophonpegel gesteuert. Die Filteradaption kann über den hinreichend bekannten NLMS-Algorithmus erfolgen, womit, solange kein Nutzsignale über die Anlage übertragen wird, Adaptionszeiten von einigen Sekunden möglich sind. Sobald ein Nutzsignal, z.B. durch einen Sprecher, vorliegt, ist die Adaption derartig stark gestört, daß über eine sogenannte Nutzsignalerkennung der Adaptionsprozeß eingefroren

werden muß, woraus sich starke Einschränkungen im praktischen Betrieb ergeben.

Tritt tatsächlich eine Rückkopplung oder auch nur ein Nachschwingen auf, so zeigt das Subtraktionsfilter die günstige Eigenschaft, wegen der hohen Signalenergie sofort bei genau dieser Frequenz zu adaptieren und die Rückkopplung zu unterdrücken. Für den praktischen Betrieb bedarf dieses Filter einiger Schutzfunktion, die eine Instabilität und Schwingung des Filters selber bei Fehladaptationen vermeiden.

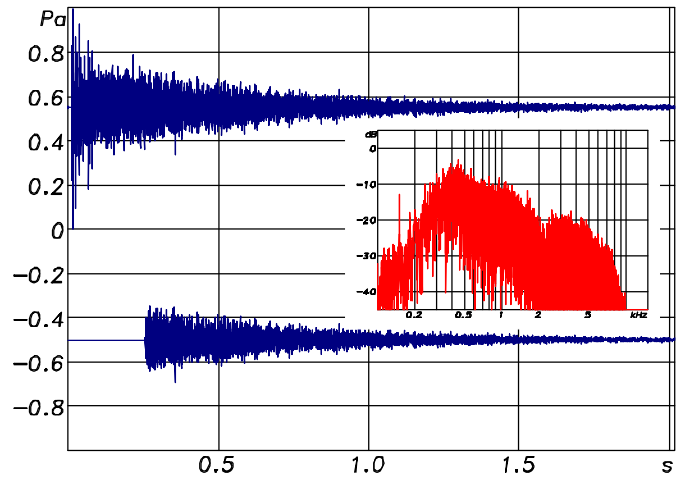


Abbildung 4 Wirkungsweise eines Subtraktionsfilters erläutert anhand der Schleifenimpulsantwort: Obere Impulsantwort ohne Filter Untere Impulsantwort mit 260 ms Filterlänge und optimaler Adaption (die zugehörige SÜF zeigt das kleine Bild mit einem Maximum bei -5 dB)

Fazit

Text hierzu ...

Literatur

- [1] A.Goertz
Einsatz von digitalen Filtern zur Vermeidung der akustischen Rückkopplung in Beschallungsanlagen
Dissertation an der RWTH Aachen (1996)
- [2] M.P. Lewis
Microprozessor Controlled Feedback Extermination and Method for Suppressing Acousical Feedback
US-Patent No.: 7,537,774 (1990)
- [3] M.P. Lewis, T.J. Tucker, D.M. Oster
Method and Apparatus for Adaptive Audio Resonant Frequency Filtering
US-Patent No.: 5,245,665 (1993)