

# Aktive Schallreduktion mit elektrostatischen Flachlautsprechern

T. Kletschkowski, D. Sachau

*In der vorliegenden Arbeit werden experimentelle Ergebnisse zur aktiven Schallreduktion mittels elektrostatischer Flachlautsprecher vorgestellt. Untersuchungsgegenstand ist ein Transmissionsprüfstand, der aus einem Hallraum und einem schallarmen Raum besteht und das Studium rein passiver Schalldämmungen sowie die Identifikation derer Schwachstellen ermöglicht. Zur Unterstützung der passiven Maßnahmen wird für kritische Frequenzen ein adaptiver Regler angepasst, der die Gegenschallquelle, einen im Transmissionsweg angeordneten elektrostatischen Flachlautsprecher, ansteuert. Die Möglichkeiten zur aktiven Unterstützung einer lokalen Schallreduktion werden im Hinblick auf tonale Störungen diskutiert.*

## 1 Einleitung

Die zunehmende Industrialisierung resultiert in einer nicht zu vernachlässigenden Lärmbelastung, die auf den Menschen sowie dessen Umwelt einwirkt. Um den Schalldruckpegel eines störenden Lärmfeldes zu reduzieren, stehen sowohl passive als auch aktive Maßnahmen zur Verfügung.

Passive Maßnahmen basieren auf der Dissipation der eintreffenden Schallenergie. So wird in porösen Medien innerhalb enger Kanäle Luftschall übertragen, wobei aufgrund der Partikelgeschwindigkeit (Schallschnelle) der bewegten Luftteilchen Reibung entsteht, die zu einer Umwandlung der kinetischen Energie in Wärme führt. Bei luftdichter Oberfläche überträgt sich der Schall auf die schwingungsfähige Struktur und wird aufgrund deren dämpfender Eigenschaften vollständig oder, wie in den meisten Fällen, teilweise dissipiert. Der nach Passieren des Übertragungsweges verbleibende Körperschall wird an anderer Stelle wieder in Luftschall umgewandelt. Der Dissipationsgrad hängt in beiden Fällen von Material- und Strukturparametern, wie der Dicke einer Abtrennung, ihrer Porosität oder Dichte, aber auch der Frequenz des eintreffenden Luftschalls ab.

Passive Maßnahmen werden erfolgreich zur Reduzierung hochfrequenten Lärms ( $f \geq 1$  kHz) eingesetzt. Probleme bereitet jedoch insbesondere die Minderung niederfrequenten Schalls ( $f \leq 500$  Hz), da passive Schutzmaßnahmen im Bereich tiefer Frequenzen aufgrund der benötigten Menge schalldämmender Materialien an ihre Grenzen stoßen.

Im Gegensatz hierzu bieten aktive Maßnahmen, bei denen der störende Lärm einer primären Schallquelle durch sekundär erzeugten Gegenschall ausgelöscht wird, die Möglichkeit, den Schallpegel auch im niederfrequenten Bereich deutlich zu reduzieren.

Die Idee der aktiven Schallreduzierung (active noise reduction - ANR) besteht in der gezielten Überlagerung primärer und sekundärer Schallwellen, um durch destruktive Interferenz eine Auslöschung des störenden Primärschalls zu erreichen. Sie wurde erstmals 1933 patentiert, siehe Lueg (1933), und stellt heute ein gutes Mittel zur Unterstützung und Ergänzung passiver Maßnahmen dar, vergleiche Hansen et al. (1997) und Snyder (2000).

Gegenwärtig basieren aktive Schalldruckreduktionssysteme überwiegend auf konventionellen Tauchspulenlautsprechern, siehe Guicking (2005). Die industrielle Umsetzung ist aufgrund des Fehlens geeigneter Aktuatoren dieses Typs jedoch nicht in jedem Fall möglich, siehe Nykänen et al. (1999). Zu nennen sind insbesondere das teilweise hohe Eigengewicht der Sekundärquellen sowie die Größe der für die Tauchspulenlautsprecher benötigten Einbauvolumina, siehe Kirn (2005).

Gewichtssparende Flachlautsprecher, die aus elektromechanischen Folien gefertigt werden und auf dem Prinzip der elektrostatischen Lautsprecher, siehe Kuttruff (2004), basieren, bieten einen Ansatz, die oben genannten Schwierigkeiten zu umgehen. Als Beispiel sei der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendete Flachlautsprecher des finnischen Herstellers Panphonics, siehe Panphonics (2003), genannt.



Bild 1: Flachlautsprecher mit Mikrofonfeld (links) und Bestandteile des Lautsprechers (rechts)

Dieser besteht aus einem porösen Trägermaterial, vergleiche Bild 1 (links), dem eine Folie eingearbeitet ist. Diese metallbeschichtete Kunststofffolie ist über Klebungen in regelmäßigen Abständen mit dem Trägermaterial verbunden.

In Bild 1 (rechts) ist ein Ausschnitt eines Flachlautsprechers, dem das poröse Trägermaterial auf der Oberseite entfernt wurde, dargestellt. In diesem Bild sind das poröse Trägermaterial der Unterseite (im Bildhintergrund), die Klebungen und die Kunststofffolie zu erkennen. Das unter die Folie geschobene Streichholz verdeutlicht, dass die Folie lose auf dem Trägermaterial aufliegt und nur in den Klebungen mit diesem verbunden ist. Das am rechten Bildrand zu erkennende Maßband dient zur Veranschaulichung der Größenordnungen im inneren Aufbau des Flachlautsprechers.

In der neueren Literatur werden insbesondere die physikalischen und theoretischen Grundlagen, siehe Saarinen (1999), Paaajanen et al. (2000), Mellinger et al. (2001) und Gerhardt-Multhaupt (2002), Untersuchungen zur Richtcharakteristik, vergleiche Antila et al. (1999) und Antila et al. (2001), und spezielle Anwendungen von Flachlautsprechern zur Reduktion störenden Lärms mittels Gegenschall diskutiert, siehe Panphonics (2005).

Der Einsatz elektrostatischer Flachlautsprecher bietet jedoch insbesondere die bisher nicht diskutierte Möglichkeit, aktive und passive Schallreduktionsmaßnahmen in einem Element zusammenzufassen. Aufgrund seiner flächigen Ausmaße und seiner Biegsamkeit bietet er sich sowohl zur Bedeckung ebener Wände als auch zur Auskleidung zylindrischer Innenräume (z.B.: Flugzeugkabinen) an.

Die Bedeckung ebener Wände ermöglichte die bereits 1982 von Guicking und Kracher, siehe Kracher et al. (1982), vorgeschlagene aktive Beeinflussung der Wandimpedanz. Der Einsatz von Flachlautsprecher-technologien in Flugzeugkabinen bietet die Möglichkeit, das infolge passiver und aktiver Schallschutzmaßnahmen entstehende Zusatzgewicht erheblich zu reduzieren.

Die Notwendigkeit, tonale Störungen, die einem Hintergrundrauschen überlagert sind, mit Hilfe aktiver Maßnahmen zu reduzieren, besteht beispielsweise bei Flugzeugen mit Propellerantrieb, siehe Hansen et al. (1997) und Gerner (2005).

Die Anwendung eines Flachlautsprechers zur Reduktion derartiger Störungen erlaubt es hierbei, die für die aktive Verstärkung der passiven Dämmung aufzubringende akustische Leistung in schmalen Frequenzbändern zu konzentrieren, was die Wirksamkeit dieser Gegenschallquelle erheblich erhöht.

In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur Kombination aktiver und passiver Maßnahmen in einem Element diskutiert. Hierfür wird im Folgenden ein Prüfstandsaufbau zur Untersuchung der akustischen Übertragungseigenschaften vorgestellt, das im Experiment beobachtete akustische Verhalten eines speziellen Folienlautsprechers bei tonaler und breitbandiger Erregung analysiert sowie der mit einem Folienlautsprecher erreichbare Reduktionsgrad bei aktiver Beeinflussung monofrequenter Primärfelder diskutiert.

## 2 Prüfstands Aufbau und Betriebseigenschaften

Die gezielte Anwendung von Maßnahmen zur Lärmreduktion erfordert zunächst eine Analyse und Bewertung der Ausgangssituation. Daher wird zunächst der für die Untersuchung verwendete Prüfstand vorgestellt. Im Anschluss werden dessen Betriebseigenschaften diskutiert.

### 2.1 Beschreibung des Versuchsaufbaues

Der zur Untersuchung kombinierter Schallreduktionsmaßnahmen verwendete Prüfstand besteht, siehe Bild 2, aus einem Hallraum (HR) und einem reflektionsarmen Raum (RAR). Beide Räume sind durch einen Transmissionskanal miteinander verbunden, in den schwingungsfähige Strukturelemente oder sekundäre Schallquellen eingebracht werden können. Während der Hallraum zur Erzeugung eines diffusen Schallfeldes dient, werden im reflektionsarmen Raum durch das Einbringen von schallabsorbierenden Keilen unterschiedlicher Größe nahezu Freifeldbedingungen erzeugt.

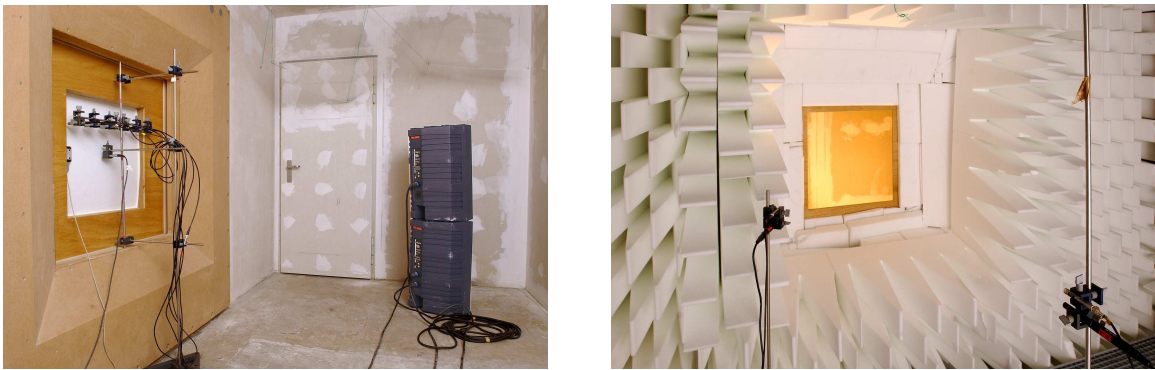


Bild 2: Prüfstand bestehend aus Hallraum (links) und reflektionsarmen Raum (rechts)

Ein ideales Diffusfeld zeichnet sich dadurch aus, dass zu einem beliebigen, aber festen Zeitpunkt  $t^*$  an jedem Punkt  $\mathbf{x}_k$  des Raumes der Zufluss an Schallenergie aus jeder Richtung identisch ist. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich die aus dem zeitlich gemittelten Produkt von Schalldruck  $p$  und Schallschnelle  $\mathbf{v}$  berechnete Schallintensität

$$\mathbf{I} := \frac{1}{T} \int_{t=t_0}^{t=T} p \cdot \mathbf{v} dt \quad (1)$$

in jedem Punkt des Raumes zu Null, da jedem Volumenelement über seine Grenzflächen genau soviel Energie zufließt, wie es selbst abgibt.

Die Richtlinien zur Ausführung von Hallräumen sind in den Normen DIN 52212 und DIN ISO 3742 vorgeschrieben. Details zur Einrichtung reflektionsarmer Räume können Henn et al. (1984) entnommen werden. Kirn (2005) führt aus, dass die für die nachfolgend erläuterten Versuchsreihen verwendeten Versuchsräume den Anforderungen der oben genannten Quellen entsprechen, sofern eine untere Grenzfrequenz von  $f_g = 240$  Hz nicht unterschritten wird und im Hallraum Schalldruckpegel von  $L_p \geq 80$  dB erzeugt werden.

Die Anordnung der für die Messung benötigten Sensoren (Mikrophone) und Aktuatoren (Lautsprecher) ist in Bild 3 skizziert. Zwei in einem Abstand von einem Meter zu den Raumecken des Hallraumes angeordnete Lautsprechersäulen mit je zwei Lautsprechern des Typs PAB-515/BL werden zur Erzeugung des primären Schallfeldes verwendet. Für die Vermessung der Übertragungseigenschaften dienen zwei Mikrophone der Serie Brüel & Kjaer 4188A. Das hallraumseitige Referenzmikrophon ist, siehe Bild 3, mittig vor der Öffnung des Transmissionskanals positioniert. Das Referenzmikrophon des reflektionsarmen Raumes wurde im Abstand von 2 m zur Öffnung des Transmissionskanals, ebenfalls zentriert, aufgestellt. Eine aus sechs Mikrophenen (Brüel & Kjaer 4188A) bestehende Mikrophenreihe, vergleiche Bild 2(links), ermöglicht zusätzlich die Vermessung des Schallaustritts auf der Hallraumseite bzw. des Schalleintritts auf der Seite des reflektionsarmen Raumes.

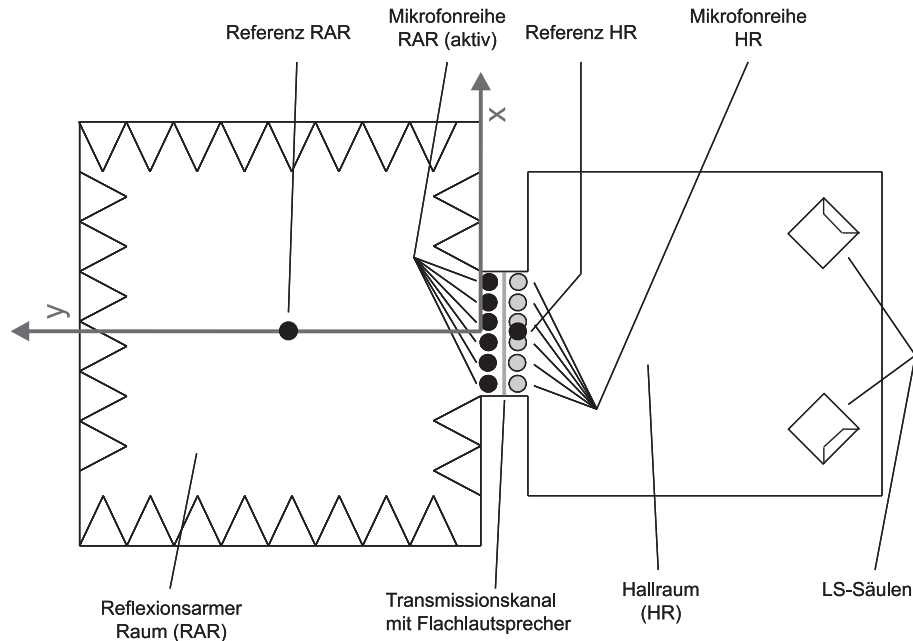


Bild 3: Positionierung von Mikrofonen und Lautsprechern

Die Ansteuerung der Primärquellen sowie die Messwerterfassung erfolgt unter Verwendung des Mess- und Analysesystems PULSE der Firma Brüel & Kjaer.

## 2.2 Betriebseigenschaften des Prüfstandes

Um die Betriebseigenschaften des oben beschriebenen Versuchsaufbaus in Abwesenheit passiver oder aktiver Schallreduktionsmaßnahmen zu bestimmen, wurde in einer ersten Versuchsreihe (V1) die Schallpegeldifferenz zwischen den Referenzmikrofonen im Hallraum und im reflektionsarmen Raum vermessen. Hierfür wurde der Hallraum mit frequenzbegrenztem Rauschen beaufschlagt, und zwar derart, dass am hallraumseitigen Referenzmikrofon ein Schalldruckpegel von  $L_p = 100$  dB anlag.

Bild 4 zeigt die im Frequenzbereich  $300 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$  aus dem Betrag der komplexen Übertragungsfunktion ermittelten Amplitudendifferenzen bei geöffnetem Transmissionskanal (graue Linie). Diese sind frequenzabhängig und schwanken um eine mittlere Abschwächung von  $-20$  dB. Für  $f = 333$  Hz und  $f = 377$  Hz verringert sich die Amplitudendifferenz auf näherungsweise  $-10$  dB; bei  $f = 346$  Hz auf  $-12,5$  dB.

Es existieren somit einzelne Frequenzen (in Bild 4 durch gestrichelte Linien hervorgehoben), für die eine Unterstützung der natürlichen Schalldämmung durch zusätzliche Maßnahmen notwendig erscheint, um auch für diese eine Schallreduktion zu erreichen, die dem Mittelwert der natürlichen Schalldämmung infolge des Impedanzsprunges entspricht.

## 3 Auswirkung passiver Maßnahmen und Identifikation kritischer Frequenzen

Die natürliche Schalldämmung des Prüfstandes wird zunächst durch das Verschließen des Transmissionskanals unterstützt. Hierfür wird ein elektrostatischer Flachlautsprecher des finnischen Herstellers Panphonics, siehe Panphonics (2003), verwendet, der jedoch zunächst nicht angesteuert wird.

Um die veränderten Betriebseigenschaften des oben beschriebenen Versuchsaufbaus unter Verwendung dieser passiven Schallreduktionsmaßnahmen zu bestimmen, wurde in einer zweiten Versuchsreihe (V2) die Schallpegeldifferenz zwischen den Referenzmikrofonen im Hallraum und im reflektionsarmen Raum erneut vermessen. Hierfür wurde der Hallraum wiederum mit frequenzbegrenztem Rauschen beaufschlagt. Am hallraumseitigen Referenzmikrofon wurde erneut ein Schalldruckpegel von  $L_p = 100$  dB erzeugt.

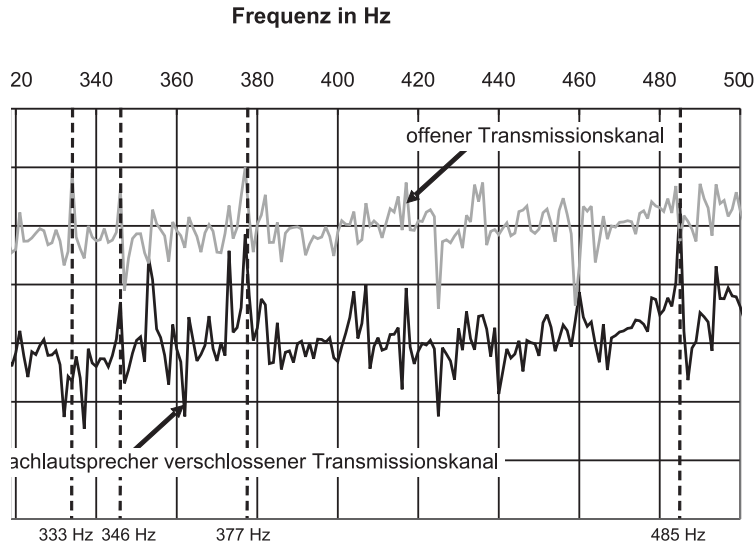


Bild 4: Betriebseigenschaften des Prüfstandes und Pegelabsenkung bei passiver Schalldämmung

Bild 4 zeigt die im Frequenzbereich  $300 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$  aus dem Betrag der komplexen Übertragungsfunktion ermittelten Amplitudendifferenzen für beide Versuchsreihen. Die infolge passiven Schallschutzes erzielten Pegelabsenkungen entsprechen der schwarzen Kurve.

Es bleibt festzustellen, dass durch den Verschluss des Transmissionskanals im Frequenzbereich von  $300 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$  eine mittlere Abschwächung von  $-40 \text{ dB}$  erreicht wird. Allerdings ist auch die passiv unterstützte Schallreduktion frequenzabhängig und es verbleiben auch in diesem Fall einzelne Frequenzen, bei denen die Abschwächung des Primärschalls über dem Pegel der mittleren Abschwächung liegt.

Die passive Unterstützung der natürlichen Abschwächung sorgt dafür, dass auch bei einer Anregung mit  $f = 333 \text{ Hz}$  eine der mittleren Amplitudendifferenz entsprechende Reduktion erreicht wird. Während aufgrund der passiven Dämmung für  $f = 346 \text{ Hz}$  eine Pegelreduktion von  $-32,5 \text{ dB}$  erreicht wird, was gegenüber der natürlichen Dämmung eine zusätzliche Reduktion von  $-20 \text{ dB}$  bedeutet, sind in Bild 4 für  $f = 377 \text{ Hz}$  ( $-21,5 \text{ dB}$ ) und  $f = 485 \text{ Hz}$  ( $-15,5 \text{ dB}$ ) weiterhin Minima der passiven Abschwächung zu erkennen. Insbesondere ist für  $f = 485 \text{ Hz}$  infolge der passiven Dämmung sogar eine Vergrößerung des primären Schallpegels zu verzeichnen. Diese beträgt  $6 \text{ dB}$ .

Für die Minima der passiven Abschwächung fallen die Amplitudendifferenzen deutlich geringer aus als die mittlere Abschwächung infolge passiver Dämmung. Der Unterschied beträgt  $18,5 \text{ dB}$  für  $f = 377 \text{ Hz}$  und  $24,5 \text{ dB}$  für  $f = 485 \text{ Hz}$ . Folglich ist es zweckmäßig, die passive Schallreduktion insbesondere bei einer Anregung mit  $f = 377 \text{ Hz}$  bzw.  $f = 485 \text{ Hz}$  zusätzlich aktiv durch geeignete Ansteuerung des elektrostatischen Flachlautsprechers zu verstärken. Der für diese Frequenzen bei tonaler Anregung erzielbare Regelungserfolg wird nachfolgend untersucht.

#### 4 Aktiv unterstützte Reduktion lokaler Schallpegel unter Einsatz eines elektrostatischen Flachlautsprechers

Für die im Abschnitt 3 identifizierten Frequenzen soll im Folgenden die passive Schalldämmung durch aktiven Gegenschall, erzeugt mit dem im Transmissionskanal befindlichen Flachlautsprecher, aktiv unterstützt werden.

Für diesen Zweck wird ein adaptiver Regler auf Basis des FxLMS-Algorithmus (engl.: Filtered Reference Least Mean Square) verwendet, der es erfordert, Fehlermikrophone geeignet im Raum zu platzieren. Daher wird für die zuvor identifizierten Fehlerfrequenzen die räumliche Ausbildung des Schallfeldes mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode simuliert, bevor die Regelung im Experiment erfolgt.

#### 4.1 Aufbau des adaptiven Reglers

##### A) Der adaptive LMS-Algorithmus

Zur Regelung komplexer physikalischer Systeme mit Hilfe digitaler Signalprozessoren bieten sich insbesondere adaptive Regler an, siehe Kuo et al. (1996). Diese basieren auf Filtern mit endlicher (FIR, finite impulse response) bzw. unendlicher Impulsantwort (IIR, infinite impulse response).

Während sich IIR-Filter auf die zuvor festgestellten Ausgänge  $\mathbf{y}$  des Systems beziehen, also nach einer definierten Anregung unendlich vom Signal durchlaufen werden können, bezieht sich das FIR-Filter auf die Systemeingänge  $\mathbf{x}$ .

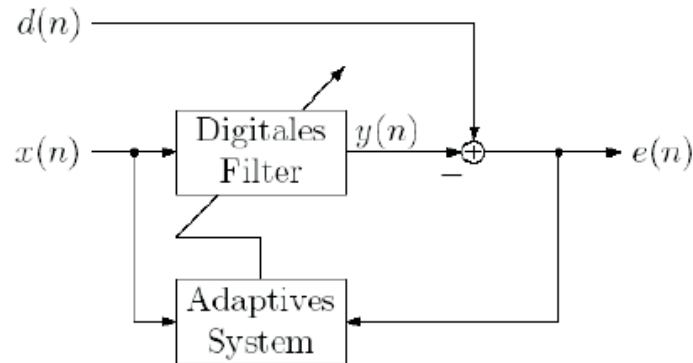


Bild 5: Blockdiagramm zum adaptiven LMS-Algorithmus, siehe Kuo et al. (1996)

Bild 5 illustriert den Signalfluss an einem adaptiven Filter anhand eines Blockdiagramms. Das digitale Filter approximiert mit Hilfe der Filterkoeffizienten  $w_i(n)$  die Antwort des Systems auf eine Erregung mit der Eingangsgröße  $x(n)$ , dem Referenzsignal.

Die Güte dieser Approximation kann beurteilt werden, wenn die Differenz aus tatsächlichem Störsignal  $d(n)$  und approximierter Systemantwort gebildet wird. Die Kenntnis des verbleibenden Fehlers  $e(n)$  ermöglicht durch Rückführung die Adaption der Filterkoeffizienten  $w_i(n)$ , und zwar derart, dass  $e(n)$  minimiert wird.

Wird ein System mit einer Eingangsgröße  $x$  und einer Ausgangsgröße  $y$  betrachtet, so lautet die Berechnungsvorschrift zur Darstellung des Systemausgangs  $y$  zum Zeitpunkt  $n$  mit Hilfe eines FIR-Filters

$$y(n) = \mathbf{w}(n) \cdot \mathbf{x}(n) = w_L x(n) + w_{L-1} x(n-1) + \dots + w_1 x(n-L+1) + w_0 x(n-L). \quad (2)$$

Von besonderer Bedeutung sind die Filterkoeffizienten  $w(n)$ , auch Taps genannt. Ihre Anzahl gibt die Filterlänge  $L$  an. Diese bestimmt neben der Abtastzeit  $T_s$  die Komplexität des Reglers.

Durch geeignete Änderungen der Koeffizienten ist es möglich, das Filter an eine weitreichende Anzahl von Problemstellungen anzupassen. Hierfür wird eine quadratische Kostenfunktion  $J$  in Abhängigkeit des Erwartungswertes  $E$  des Fehlers  $e$  eingeführt

$$J(n) = E[e^2(n)]. \quad (3)$$

Der Fehler  $e(n)$  berechnet sich aus der Differenz des Störsignals  $d(n)$  und des mit Hilfe des digitalen Filters approximierten Signals am Systemausgang  $y(n)$  zu

$$e(n) = d(n) - \mathbf{w}(n) \cdot \mathbf{x}(n). \quad (4)$$

Aus (4) folgt, dass die Kostenfunktion (3) quadratisch von den Filterkoeffizienten  $w_i(n)$  abhängt. Sie verfügt somit über ein eindeutiges Minimum, welches durch die Minimierung des Fehlerquadrates  $e^2(n)$  nach dem Verfahren des steilsten Abstieges, siehe Kuo et al. (1996), gefunden werden kann.

Die Minimierung der Kostenfunktion (3) führt auf folgende Berechnungsvorschrift für die Aktualisierung der im Vektor  $\mathbf{w}$  zusammengefassten Filterkoeffizienten

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu e(n) \mathbf{x}(n). \quad (5)$$

Die Konstante  $\mu$  kennzeichnet die Schrittweite des Anpassungsverfahrens. Sie bestimmt maßgeblich die Stabilität des Reglers, siehe Kuo et al. (1996). Da zur Berechnung der neuen Filterkoeffizienten  $\mathbf{w}(n+1)$  zum Zeitpunkt  $n+1$  nur die Filterkoeffizienten  $\mathbf{w}(n)$ , der Fehler  $e(n)$  und das Referenzsignal  $\mathbf{w}(n)$  zum Zeitpunkt  $n$  verwendet werden, handelt es sich um ein explizites Verfahren. Dieses ist mit dem zur Lösung von Anfangswertproblemen verwendeten expliziten Euler-Verfahren vergleichbar

$$\mathbf{y}^{t+\Delta t} = \mathbf{y}(t) + \Delta t \mathbf{f}(t) \quad (6)$$

und erfordert hinreichend kleine Schrittweiten  $\mu$ , um die Stabilität des Verfahrens zu gewährleisten.

### B) Der adaptive Leaky-FxLMS-Algorithmus

Sind zu viele Filterkoeffizienten  $w_i(n)$  zur Abbildung eines Systems im Einsatz, kann dies nach Kuo et al. (1996) zu Instabilitäten führen. Um diesen entgegenzuwirken, wird ein sogenannter Leckagefaktor  $\nu$  eingeführt, womit sich Gleichung (5) wie folgt schreibt

$$\mathbf{w}(n+1) = \nu \mathbf{w}(n) + \mu e(n) \mathbf{x}(n) \quad \text{mit } 0 < \nu \leq 1. \quad (7)$$

Für  $\nu = 1$  geht der durch Gleichung (7) beschriebene Leaky-LMS-Algorithmus in den zuvor behandelten LMS-Algorithmus über. Bei jeder nach Gleichung (7) vorgenommenen Neuberechnung der Filterkoeffizienten gerät somit ein Teil des letzten Koeffizientensatzes in Vergessenheit, wodurch sich die Verfahrensstabilität bei der Regelung tonaler Störungen entscheidend verbessert, vergleiche Kuo et al. (1996).

Eine weitere Erhöhung von Verfahrensstabilität und Konvergenzgeschwindigkeit ist erzielbar, wenn das Referenzsignal  $x(n)$  mit einem durch digitale Filter gebildeten Abbild der Sekundärstrecke modelliert wird.

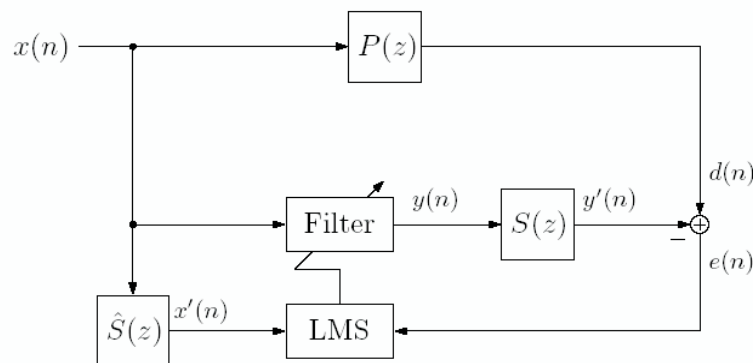


Bild 6: Blockdiagramm zum adaptiven FxLMS-Algorithmus, siehe Kuo et al. (1996)

Dieses Vorgehen ist in Bild 6 dargestellt. Es begründet sich aus der Tatsache, dass das Ausgangssignal des Reglers  $y(n)$  nicht unmittelbar mit dem Störsignal  $d(n)$  überlagert wird, da es zuvor noch weitere Elemente passieren muss und von deren Übertragungsverhalten beeinflusst wird. Diese Elemente, bei denen es sich im Falle der aktiven Schallfeldbeeinflussung um Lautsprecher, Verstärker, Antialiasingfilter und Digital-Analog-Wandler handelt, bilden die Sekundärstrecke  $S(z)$ . Diese verändert das Signal  $y(n)$  in Betrag und Phase. Besonders kritisch wirken sich infolge des Passierens der Sekundärstrecke einstellende Phasenfehler auf den Regelungserfolg aus.

Der FxLMS-Algorithmus löst dieses Problem durch eine Sekundärstreckenerkennung, mit deren Hilfe der Einfluss der Sekundärstrecke herausgerechnet wird. Zur Erstellung des hierfür benötigten Sekundärstreckenabbildes wird wiederum ein adaptives Filter herangezogen. Auf diese Weise ist das dem

adaptiven Regler zugeführte Referenzsignal  $x'(n)$  in gleicher Weise gewichtet wie das zur aktiven Schallreduktion nach Passieren der Sekundärstrecke vorliegende Signal  $y'(n)$ .

Der für die vorliegende Arbeit verwendete Regler, der auf dem in Gerner (2005) dokumentierten FxLMS-Verfahren basiert, wurde unter Matlab-Simulink ausgeführt und über eine Schnittstelle auf das Echtzeitregelungssystem dSpace übertragen.

Er verfügt in seiner ursprünglichen Form über die Möglichkeit, die Signale von acht Fehlermikrofonen zu verarbeiten, sieben Sekundärlautsprecher anzusprechen und drei separate Frequenzen simultan zu regeln. Zusätzlich bietet dieser Algorithmus die Möglichkeit, ein Online-Plant-Modelling (Erkennung der Sekundärstrecke während der laufenden Regelung) durchzuführen, die Ansteuerung der Sekundärlautsprecher automatisch zu begrenzen und eine A-Bewertung von Schallpegeln zu berücksichtigen.

Zur Anwendung auf die hier vorliegende Problemstellung wurde der Regler vereinfacht. Er verfügt nun noch über die Möglichkeit, zwei Fehlermikrophone in die Adaptierung einzubeziehen und eine Sekundärquelle (den Flachlautsprecher) anzusteuern. Die Limitierung der Ausgangsspannung wird unverändert beibehalten. Die Regelung beschränkt sich jedoch auf die Unterdrückung monofrequenter Störungen.

#### 4.2 Numerische Voruntersuchungen zur Positionierung der Fehlermikrophone

Um mit Hilfe des aktiv angesteuerten Flachlautsprechers einen deutlich messbaren Regelungserfolg zu erzielen, ist eine Platzierung von Fehlermikrofonen an Orten, die ein Druckminimum aufweisen, zu vermeiden. Daher wurde die räumliche Ausbildung des Schallfeldes bei tonaler Anregung im Rahmen numerischer Voruntersuchungen mit Hilfe des Finite-Elemente-Programms FEMLAB im Frequenzbereich analysiert.

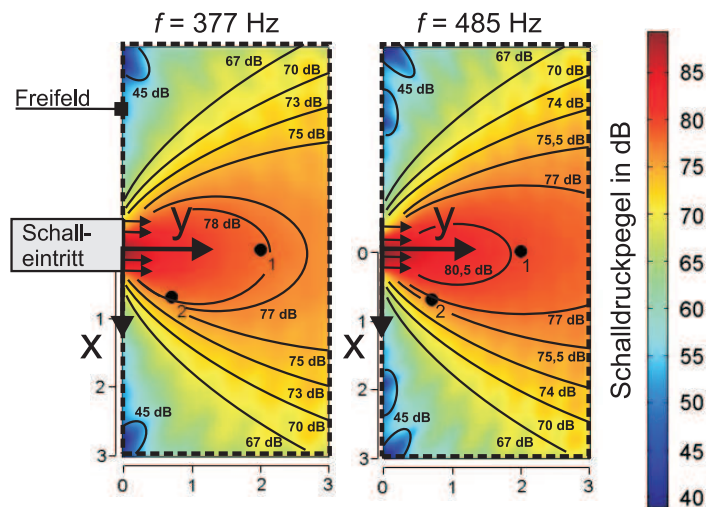


Bild 7: Numerische Voruntersuchung zur Positionierung der Fehlermikrophone

	Mikro	$L_{\text{FEM}}$ [dB]	$L_{\text{Messung}}$ [dB]	$\Delta_{\text{absolut}}$ [dB]	$\Delta_{\text{relativ}}$ [%]
$f = 377 \text{ Hz}$	1	78,95	77,3	-1,65	2,1
	2	78,36	77,6	-0,76	1,0
$f = 485 \text{ Hz}$	1	79,64	79,4	-0,24	0,3
	2	77,23	81,0	3,77	4,7

Tabelle 1: Vergleich berechneter und gemessener Schalldruckpegel



Die Berechnung wurde für eine 3 m breite und 6 m lange Ebene des reflektionsarmen Raumes auf Höhe des hallraumseitigen Referenzmikrophones (130 cm über Bodenhöhe) vorgenommen, wobei ein unstrukturiertes Netz, bestehend aus 1900 Dreieckselementen mit quadratischen Ansatzfunktionen für den Druck (3895 Freiheitsgrade), verwendet wurde.

Bis auf die 60 cm breite Linie des Schalleintritts (in Bild 7 durch kleine schwarze Pfeile symbolisiert), wurde die Impedanz des Freifeldes  $Z = \rho_0 \cdot c$  ( $\rho_0$  kennzeichnet die Ruhedichte und  $c$  die Schallgeschwindigkeit) als Randbedingung aufgeprägt. In Bild 7 sind die entsprechenden Ränder mit einer gestrichelten Linie hervorgehoben. Auf der Linie des Schalleintritts wurde jeweils eine Beschleunigung normal zum Rand vorgegeben, die einem Schnellepegel von  $L_v = 90$  dB entspricht.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Bild 7 dargestellt. In diesem Bild ist die Verteilung des Schalldruckes (angegeben in dB) innerhalb der Berechnungsebene für  $f = 377$  Hz (links) und  $f = 485$  Hz (rechts) dargestellt. Die Ausrichtung der Koordinatenachsen entspricht dabei dem in Bild 3 angegebenen Koordinatensystem.

An der Stelle des im reflektionsarmen Raum befindlichen Referenzmikrophons (1) wurde bei einer Anregung mit  $f = 377$  Hz ein Schalldruckpegel von 78,95 dB berechnet. Bei einer Anregung mit  $f = 485$  Hz ist nach den vorliegenden Berechnungen an dieser Stelle im Experiment ein Schalldruckpegel von 79,64 dB zu erwarten.

Für das neu aufzustellende zweite Fehlermikrophon (2) wird ein Winkel von  $45^\circ$  zur Mittelachse gewählt, um einerseits einen möglichst großen Winkelabstand zwischen den Mikrofonen zu erreichen, andererseits aber den Pegelabfall in den Randgebieten zu vermeiden. Auf dieser Achse wird im Abstand von  $x = 0,8$  m und  $y = 0,8$  m zum Koordinatenursprung ein jeweils von dem an der Position des Referenzmikrophones nur geringfügig abweichender Schallpegel von 78,36 dB für  $f = 377$  Hz und 77,23 dB für  $f = 485$  Hz berechnet. Daher wird dieser Ort für die Positionierung des zweiten Fehlermikrophones vorgesehen.

Tabelle 1 stellt die numerisch berechneten Schalldruckpegel den im Experiment bei tonaler Anregung mit  $f = 377$  Hz bzw.  $f = 485$  Hz an den Mikrofonen (1) und (2) ermittelten Daten gegenüber. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, wurde die Ansteuerung der Primärschallquellen im Hallraum derart gestaltet, dass an den beiden mittleren Mikrofonen der Mikrofonreihe im reflektionsarmen Raum (siehe Bild 3) jeweils ein Schalldruckpegel von 90 dB erreicht wurde.

Die in Tabelle 1 ebenfalls angegebenen absoluten und relativen Fehler belegen insbesondere für Mikrophon (1) eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und den experimentell ermittelten Schalldruckpegeln. Lediglich für Mikrophon (2) ist mit  $\Delta_{relativ} = 4,7\%$  bei einer Anregung mit  $f = 485$  Hz ein relativer Fehler von über 2,5% zu verzeichnen. Im Rahmen einer vereinfachten zweidimensionalen numerischen Voruntersuchung der dreidimensionalen Schallausbreitung im realen Prüfstand kann jedoch auch in diesem Fall von einer ausreichenden Übereinstimmung ausgegangen werden.

### 4.3 Aktive lokale Schallreduktion bei tonaler Erregung

Im Ergebnis der in Abschnitt 3 dargelegten Ausführungen soll die passive Schalldämmung für tonale Störungen mit den Frequenzen  $f = 377$  Hz und  $f = 485$  Hz aktiv unterstützt werden, da für diese Frequenzen Minima der rein passiven Schalldämmung vorliegen. Hierfür wird der oben erläuterte Leaky-FxLMS-Algorithmus zur Erzeugung lokaler Ruhezonan an den in Abschnitt 4.2, siehe Bild 7, festgelegten Mikrofonpositionen verwendet. Die Regelung erfolgt wahlweise unter Verwendung eines Fehlermikrophons oder der Einbeziehung beider Sensoren. Die Anregung wurde derart gestaltet, dass am hallraumseitigen Referenzmikrophon jeweils ein Schalldruckpegel von  $L_p = 100$  dB anlag.

Der Regelungserfolg wurde im Bezug zur passiven Schalldämmung bewertet. Daher sind in Bild 8 (A-B) die infolge der aktiven Schallreduktion zusätzlich erzielten Pegelabsenkungen dargestellt. Die in diesen Graphiken dokumentierten Ergebnisse belegen, dass durch die aktive Ansteuerung des Flachlautsprechers Pegelreduktionen von bis zu  $L_p = 25$  dB (bei Anregung mit  $f = 377$  Hz) und bis zu  $L_p = 35$  dB (bei Anregung mit  $f = 485$  Hz) erreicht werden können, wenn jeweils nur ein Mikrophon als Fehlersensor dient. Das bedeutet, dass durch den gezielten Einsatz aktiver Maßnahmen der Schalldruckpegel für eine lokale Ruhezone auch für kritische Frequenzen auf den mittleren, mit Hilfe rein passiver Maßnahmen erreichten, Schallpegel abgesenkt werden kann.

Der Schalldruckpegel am zweiten Mikrophon, das in diesem Fall nicht als Fehlersensor fungiert, wird ebenfalls unter den mit Hilfe rein passiver Maßnahmen erzielbaren Wert gesenkt. Die Reduktion fällt mit maximal 15 dB (bei Anregung mit  $f = 377$  Hz) und maximal 8 dB (bei Anregung mit  $f = 485$  Hz) jedoch deutlich geringer aus.

Der Regelungserfolg vergleichmäßig sich, siehe Bild 8 (A-B), wenn zwei lokale Ruhezone erzeugt werden. Dies ist der Fall, wenn beide im reflektionsarmen Raum positionierten Mikrophone als Fehlersensoren genutzt werden. Da bei hinreichend großen Wellenlängen die Überlappung lokaler Ruhezone die Möglichkeit zur globalen Reduktion von Lärmbelastungen bietet, wird dieser Fall ebenfalls diskutiert.

Die in Bild 8 (A-B) dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass der mittlere, durch die Erzeugung zweier lokaler Ruhezone, erzielbare Regelungserfolg die Reduktion des Schalldruckpegels übersteigt, die beim Erzeugen einer lokalen Ruhezone am nicht als Fehlermikrophon genutzten Sensor erreicht wird.

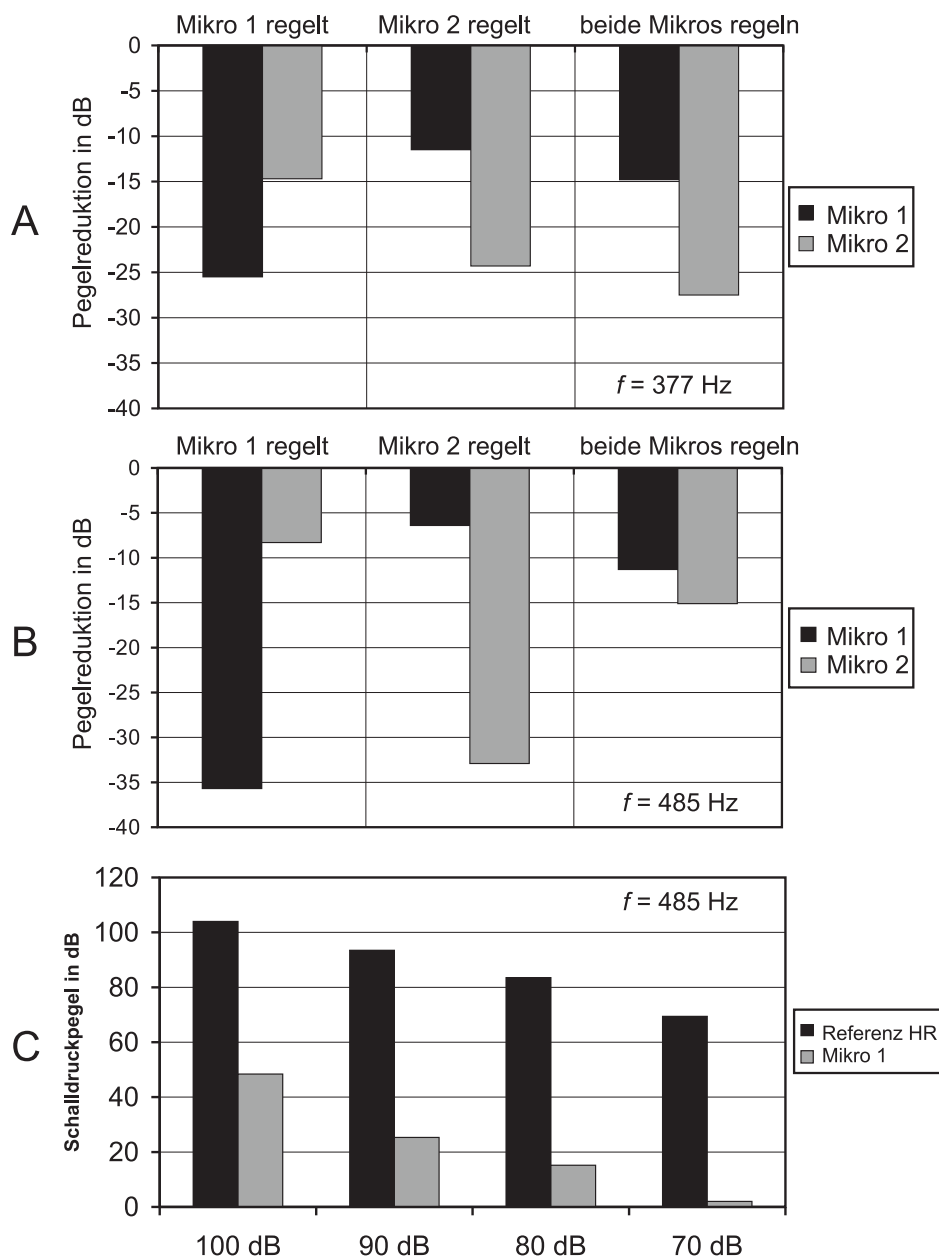


Bild 8: Pegelreduktion bei aktiv verstärkter Dämmung (A-B) und in Abhängigkeit der Anregung (C)

Die in diesem Fall an beiden Fehlersensoren gemessenen Pegelreduktionen fallen jedoch um bis zu 10 dB (bei Anregung mit  $f = 377$  Hz) und bis zu 25 dB (bei Anregung mit  $f = 485$  Hz) geringer aus, als die zuvor bei der Konzentration auf eine lokale Ruhezone erzielten Absenkungen. Bei günstiger Positionierung der Mikrophone kann jedoch auch eine geringfügige Verbesserung an der Stelle eines einzelnen Fehlersensors erzielt werden, wie Bild 8 (A) für die am Mikrophon (1) vermessene Pegelreduktion belegt.

In Bild 8 (C) ist der bei einer Anregung mit  $f = 485$  Hz durch die Kombination aktiver und passiver Schallreduktionsmaßnahmen erreichbare Regelungserfolg für unterschiedliche Schalldruckpegel der hallraumseitigen Anregung für den Fall einer um das Mikrophon (1) erzeugten lokalen Ruhezone dargestellt.

Die in diesem Bild gezeigten Ergebnisse verdeutlichen, dass sich der verbleibende Schalldruckpegel bei Verringerung des hallraumseitigen Anregungspegels verringert. Im vorliegenden Fall geschieht dies nahezu linear. Somit ist es selbst bei begrenzter Leistung der Sekundärquellen möglich, störenden Lärm lokal nahezu vollständig zu eliminieren, wenn die dem Störsignal zugrunde liegende Anregung moderat ausfällt beziehungsweise eine lokale Ruhezone erzeugt werden soll, die sich nicht in einem Druckmaximum des primären Schallfeldes befindet.

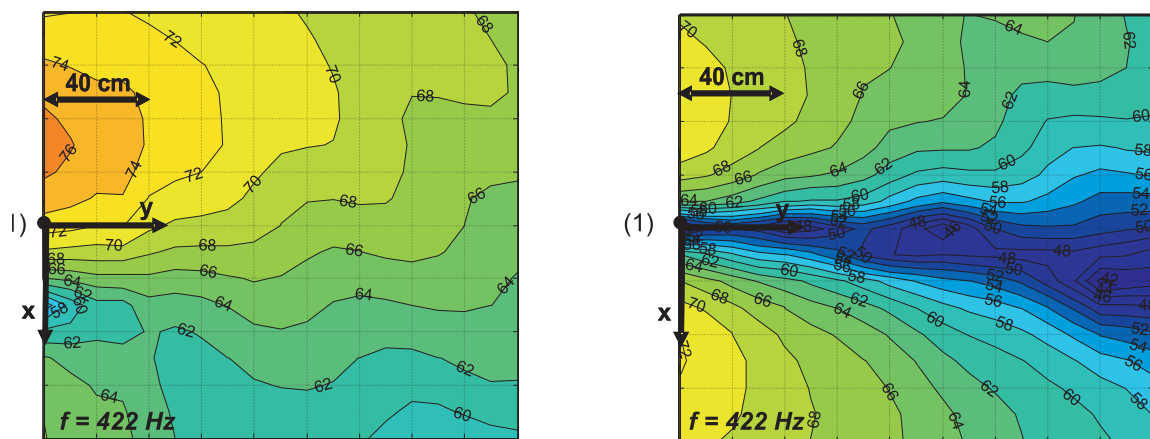


Bild 9: Kartierung des unregulierten (links) und regulierten (rechts) Schallfeldes

In Bild 9 ist eine Kartierung des Schallfeldes für eine 160 cm breite und 180 cm lange Ebene des reflektionsarmen Raumes (130 cm über Bodenhöhe) dargestellt. Angegeben sind die bei einer Anregung mit  $f = 422$  Hz vermessenen Schalldruckpegel des unregulierten Schallfeldes (links) und des regulierten Schallfeldes (rechts). Als Fehlersensor wurde Mikrophon (1) verwendet. Dessen Platzierung fällt mit dem Ursprung des in Bild 9 angegebenen Koordinatensystems zusammen.

Im Unterschied zum bisherigen Vorgehen wurde der Transmissionskanal für die Bild 9 zugrunde liegenden Messungen mit einem gebogenen Flachlautsprecher (Radius:  $r = 1250$  mm), siehe Kirn (2005) und Kletschkowski (2006), verschlossen. Die Auswahl einer Erregerfrequenz von  $f = 422$  Hz begründet sich in den Eigenschaften des auf diese Weise veränderten Systems, siehe Kletschkowski (2006).

Der Vergleich der in Bild 9 dargestellten Messdaten für das unregulierte und das regulierte Schallfeld belegt einerseits, dass die aktive Schallreduktion mit elektrostatischen Flachlautsprechern auch bei veränderten Randbedingungen erfolgreich umgesetzt werden kann. Andererseits verdeutlichen die in Bild 9 (rechts) dargestellten Ergebnisse die globalen Auswirkungen der lokalen und auf das Mikrophon (1) bezogenen Regelung.

Aufgrund der nahezu ungestörten Schallausbreitung im reflektionsarmen Raum, bildet sich nicht nur um den Fehlersensor, sondern auch hinter diesem eine Zone der Ruhe aus. Der Vergleich beider in Bild 9 enthaltenen Diagramme ergibt, dass selbst am Ende des Messgebietes (in einem Abstand von 180 cm zum Fehlermikrophon) Pegelreduktionen von bis zu 16 dB erreicht werden.

Lokale Ruhezone, die sich in geschlossenen Innenräumen mehr oder weniger kugelförmig um einen Fehlersensor ausbilden, erstrecken sich über ein deutlich kleineres Gebiet, dessen Begrenzungsradius

näherungsweise einem Zehntel der Wellenlänge der Störfrequenz entspricht, siehe Kuo et al. (1996). Bei einer Anregung mit  $f = 422$  Hz entspräche dies einem Radius von  $r_{gr} \approx 8$  cm, wenn die Schallgeschwindigkeit zu  $c = 343 \text{ ms}^{-1}$  angenommen wird.

Die in Bild 9 dokumentierten Ergebnisse belegen folglich, dass die Anwendung der aktiv verstärkten Schallreduktion auf die vorliegende Problemstellung der Lärmemission auch die Möglichkeit zur globalen Reduktion störender Schallpegel bietet.

## 5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Kombination passiver und aktiver Schallreduktionsmaßnahmen unter Verwendung eines elektrostatischen Flachlautsprechers diskutiert.

Die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen in einem Transmissionsprüfstand belegen, dass sich dieses Leichtbauelement insbesondere dazu eignet, für einzelne Frequenzen identifizierte Schwachstellen passiver Schallschutzmaßnahmen durch die Anwendung von Techniken der aktiven Schallreduktion zu kompensieren. Insbesondere wurde durch Regelung mit Hilfe eines Leaky-FxLMS-Algorithmus der primäre Schalldruckpegel lokal reduziert. Auf diese Weise wurde bei Verwendung eines als Fehlersensor dienenden Mikrofons punktuell und tonal eine Schallpegelreduktion von ca. 30 dB nur infolge der aktiven Maßnahmen erreicht.

In der vorliegenden Arbeit wurde somit nachgewiesen, dass passive und aktive Schallschutzmaßnahmen gezielt in einem Bauelement vereint werden können, um lokale Ruhezone zu erzeugen. Werden diese geeignet überlagert, besteht die Möglichkeit zur globalen Reduktion störenden Lärms.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Olt. Dipl.-Ing. Jochen Kirn für die im Rahmen seiner Diplomarbeit geleistete Unterstützung bei der Vorbereitung der vorliegenden Arbeit.

## Literatur

1. Antila, M.; Kataja, J.; Pissondes, B.: Controlled Directivity EMFI Panel Loudspeaker. *Active 99*, Fort Lauderdale, Florida, USA, (1999).
2. Antila, M.; Kataja, J.; Välimäki, V.: Sound Directivity Control using stripped Panel Loudspeaker. *110th Audio Eng. Convention*, Amsterdam, The Netherlands, (2001).
3. Gerhardt-Mulhaupt, R.: Less can be More - Holes in Polymers lead to a New Paradigm of Piezoelectric Materials for Electric Transducers. *IEEE Transition on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 9 No. 5, pp. 850-859, (2002).
4. Gerner, C.: *Optimale aktive Geräuschreduzierung in Flugzeugkabinen für hohe tonale Lärmpegel*, Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, (2005).
5. Guicking D.: GOPI - *Guicking's Online Patent Information Active Control of Sound and Vibration - A Patent Bibliography*, <http://www.guicking.de/software/gopi/index.en.html>, (2005).
6. Guicking D.: GORBI - *Guicking's Online Reference Bibliography Active Control of Sound and Vibration - Reference Bibliography*, <http://www.guicking.de/software/gopi/index.en.html>, (2005).
7. Hansen, C., H.; Snyder, S. D.: *Active Control of Noise and Vibration*. E & FN SPON, London, (1997).
8. Kirn, J.: *Einsatz elektromagnetischer Folien zur aktiven Schallfeldbeeinflussung*, Diplomarbeit, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, (2005).
9. Henn, H.; Sinambari, G., R.; Fallen, M.: *Ingenieurakustik*. Vieweg, (1984).
10. Kletschkowski, T.: Aktiv unterstützte Schallreduktion mit elektrostatischen Flachlautsprechern. *117. Norddeutsches Mechanik - Kolloquium*, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, (2006).
11. Kuttruff, H.: *Akustik eine Einführung*. S. Hinzl Verlag, Stuttgart, (2004).

12. Kuo, S., M; Morgan, D., R.: *Active noise control systems*. Wiley & Sons Inc., New York, (1996).
13. Lueg, P.: Verfahren zur Dämpfung von Schallschwingungen. *Deutsches Reichspatent Nr.: 655508*, (1933).
14. Mellinger, A.; Wegener, M.; Wirges, W.; Gerhardt-Multhaupt, R.: Thermally stable dynamic piezoelectricity in sandwich films of porous and nonporous amorphous fluoropolymer. *Appl. Physics Letters*, Vol. 79, pp. 1852-1854, (2001).
15. Panphonics: *Designer's Guide*. Panphonics Audio Innovations, <http://www.panphonics.fi>, (2003).
16. Panphonics: *Use Cases*. Panphonics Audio Innovations, <http://www.panphonics.fi>, (2005).
17. DIN 52212: Bestimmung des Schallabsorptionsgrades im Hallraum.
18. DIN ISO 3742: Ermittlung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen - Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1 für tonale und schmalbandige Quellen.
19. Nykänen, H; Antila, M.; Kataja, J.; Lekkala, J.; Usokainen; S.: Active Control of Sound based on utilizing EMFI-Technology. *Active 99*, Fort Lauderdale, Florida, USA, (1999).
20. Paaajanen, M.; Välimäki, H.; Lekkala, J.: Modelling the electromechanical film (EMFI). *J. of Electrostatics*, Vol. 48, pp. 193-2004, (2000).
21. Saarinen, A.: EMFI-actuator Vibro-acoustical considaration. Dissertation, *VTT Publications*, Finland, (1999).
22. Snyder, S. D.: *Active Noise Control Primer*. Springer, New York, (2000).

---

*Adressen:* Dr.-Ing. Thomas Kletschkowski und Prof. Dr.-Ing. Delf Sachau, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Fachbereich Maschinenbau, Professur für Mechatronik, Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg, [kletsch@hsuhh.de](mailto:kletsch@hsuhh.de).