Lokale Dämpfung breitbandigen Lärms mittels adaptiver Mehrkanal-Steuerung

Julian D. Schiller[1], Christian Pape[1], Eduard Reithmeier[1]

[1] *Institut für Mess- und Regelungstechnik, 30167 Hannover, Deutschland, Email: schiller@imr.uni-hannover.de*

Einleitung

Seit mittlerweile mehr als 30 Jahren ist die aktive Lärmreduktion (Active Noise Control, ANC) Gegenstand der Forschung und findet seitdem in vielen unterschiedlichen Gebieten zunehmend praktische Anwendung [1]. Allgemein kann hierbei zwischen globalen und lokalen ANC-Lösungen unterschieden werden: Globale ANC-Systeme minimieren die gesamte potentielle Energie eines Schallfelds im Raum und erzielen somit globale Dämpfung. Dieser Ansatz ist allerdings nur unter bestimmten Voraussetzungen, wie z.B. einer harmonischen Anregung, sinnvoll und umsetzbar [2]. Bei allgemeineren Rahmenbedingungen ist es dagegen meist zielführender, mittels lokaler ANC-Systeme räumlich begrenzte Ruhezonen an fest definierten Positionen zu erzeugen. Diese sind prinzipbedingt allerdings immer an diejenigen (ortsfesten) Fehlermikrofone gebunden, die zur Messung des resultierenden Schallfelds verwendet werden. Da die Platzierung eines Fehlermikrofons am gewünschten Ort einer Ruhezone, bspw. das Ohr eines Menschen, in der Praxis daher selten ohne größeren Aufwand möglich ist, sind z.B. virtuelle Sensoren respektive Mikrofone einzusetzen. Entsprechende Virtual-Sensing-Algorithmen zur Verschiebung von Ruhezonen an beliebige Positionen im Raum können z.B. [3] entnommen werden. Ein Lösungsansatz stellt die Remote-Microphone-Technique (RMT) dar, wobei angenommen wird, dass das unerwünschte Störsignal an den virtuellen Mikrofonen mittels der Signale physischer Fehlermikrofone sowie einer zusätzlichen Beobachterfiltermatrix rekonstruiert werden kann [4]. Die Minimierung des rekonstruierten virtuellen Fehlersignals liefert dann eine Ruhezone an der Position des jeweiligen virtuellen Mikrofons.

Innerhalb dieses Beitrags wird ein Mehrkanal-ANC-System unter Verwendung virtueller Mikrofone entworfen und zur Erzeugung von Ruhezonen an einem im Raum platzierten Kunstkopf eingesetzt. Hierfür werden im Folgenden zunächst die Versuchsumgebung sowie der Aufbau des Prüfstands beschrieben. Nach einer daran anschließenden Erläuterung der angewandten Methoden zur Umsetzung der Steuerung erfolgt die experimentelle Validierung des ANC-Systems am Prüfstand durch die Auswertung der erzeugten Ruhezone. Daneben erlauben zusätzliche Mikrofone in den Gehörgängen des Kunstkopfes Rückschlüsse auf die vom Menschen wahrgenommene Dämpfung.

Versuchsumgebung

Um das ANC-System bestmöglich von äußerlichen Störquellen abzuschirmen und störende unerwünschte Effekte wie z.B. Schallreflexionen an Wänden zu reduzieren, wird der akustische bzw. elektroakustische Teil innerhalb einer reflexionsarmen Kabine montiert (vgl. Abbildung 1 oben). Der zu dämpfende Lärm wird im Folgenden stets mittels eines Lautsprechers erzeugt, der durch bandbegrenztes weißes Rauschen angesteuert wird. Da das generierte Quellensignal der ANC-Steuerung im Allgemeinen nicht zur Verfügung steht, wird ein Referenzmikrofon zur Lärmreferenzmessung benötigt. Das zur Lärmkompensation benötigte Sekundärschallfeld wird mittels zweier Sekundärquellen erzeugt und überlagert sich mit dem Lärmschallfeld zu einem Interferenzfeld, das von zwei Fehlermikrofonen messtechnisch erfasst wird. Wie Abbildung 1 unten zeigt, werden zwei zusätzliche virtuelle Mikrofone platziert, um den Lärm an einem Kunstkopf effektiv und wahrnehmbar dämpfen zu können. Die Steuerung des Systems zur Erzeugung der

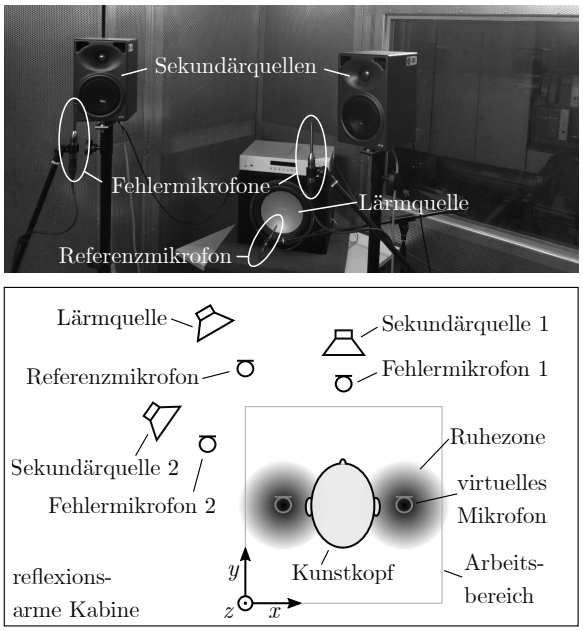

Abbildung 1: Aufbau des realen Mehrkanal-ANC-Systems in der reflexionsarmen Kabine (oben) und schematische Draufsicht aller Komponenten mit Kunstkopf (unten). Die Funktionalität des Systems wird in einem Arbeitsbereich der Größe 0,6 m × 0,6 m bei $z = 1{,}7\,\mathrm{m}$ untersucht.

Ruhezonen an den virtuellen Mikrofonen ist Gegenstand des folgenden Abschnitts.

Adaptive Mehrkanal-Steuerung

Prinzipiell kann die implementierte Mehrkanal-Steuerung in zwei grobe Schritte unterteilt werden, die iterativ nacheinander auszuführen sind:

1. Schätzung des virtuellen Fehlersignals,
2. Minimierung des virtuellen Fehlersignals.

Zur Schätzung des virtuellen Fehlersignals $\hat{\boldsymbol{e}}_\mathrm{v}(n)$ an den zwei virtuellen Mikrofonen (vgl. Abbildung 1 unten) wird

die in [4] entwickelte Remote-Microphone-Technique angewendet. Hierbei wird angenommen, dass das gesuchte Signal mit den Fehlersignalen ortsfester physischer Mikrofone $\boldsymbol{e}_\mathrm{p}(n)$ sowie der Kenntnis über raumakustische Eigenschaften bzw. die Verzerrung des Schalls durch die Luft zwischen Lautsprechern und Mikrofonen rekonstruiert werden kann. Diese Verzerrungen sind bspw. mittels FIR-Filter zu modellieren, in einer vorgelagerten Trainingsphase zu identifizieren und entsprechend zu hinterlegen. Eine vollständig durchgeführte Trainingsphase liefert die Filtermatrizen $\hat{\boldsymbol{S}}_\mathrm{p}$ und $\hat{\boldsymbol{S}}_\mathrm{v}$, die die Übertragung des Schalls von den zwei Sekundärquellen zu den zwei physischen bzw. virtuellen Mikrofonen beschreiben, sowie eine zusätzliche Beobachtermatrix $\hat{\boldsymbol{O}}$, die dazu analog die akustischen Strecken zwischen den physischen und den virtuellen Mikrofonen modelliert. Mit dem Steuerungssignal $\boldsymbol{y}(n)$ lässt sich dann auf das gesuchte virtuelle Fehlersignal schließen:

$$\hat{\boldsymbol{e}}_\mathrm{v}(n) = \hat{\boldsymbol{O}}(\boldsymbol{e}_\mathrm{p}(n) - \hat{\boldsymbol{S}}_\mathrm{p}\boldsymbol{y}(n)) + \hat{\boldsymbol{S}}_\mathrm{v}\boldsymbol{y}(n) \qquad (1)$$

Liegen aktuelle Schätzungen der virtuellen Fehlersignale vor, sind diese anschließend mittels des konventionellen Mehrkanal-FxLMS-Algorithmus aus [2] zu minimieren, wobei für jede Sekundärquelle ein zugehöriges adaptives Filter $W_k(z)$ mit $k = 1, 2$ eingeführt wird. Die entsprechenden Filterkoeffizenten $\boldsymbol{w}_k(n)$ sind dann mit der Schrittweite μ gemäß

$$\boldsymbol{w}_k(n+1) = \boldsymbol{w}_k(n) + \mu \sum_{m=1}^{2} \boldsymbol{x}'_{km}(n)\hat{e}_{\mathrm{v},m}(n) \qquad (2)$$

in jedem Zeitschritt zu aktualisieren, wobei $\boldsymbol{x}'_{km}(n)$ das aufbereitete Referenzsignal des Systems beschreibt. Dieses wird aus dem gemessenen Signal $u(n)$ des Referenzmikrofons gewonnen, das zunächst durch das Modell $\hat{\boldsymbol{F}}$ von Feedbackeffekten der Sekundärquellen zu befreien und anschließend mit dem virtuellen Sekundärstreckenmodell $\hat{\boldsymbol{S}}_\mathrm{v}$ zu filtern ist. Mit dem aufbereiteten Referenzsignal und den aktualisierten adaptiven Filtern kann dann das gesuchte Steuerungssignal $\boldsymbol{y}(n)$ zur Ansteuerung der Sekundärquellen respektive Erzeugung der gewünschten Ruhezonen berechnet werden.

Eine Übersicht des vollständigen RMT-basierten Mehrkanal-FxLMS-Algorithmus ist Abbildung 2 zu entnehmen. Um die Echtzeitfähigkeit der Steuerung zu gewährleisten, wird diese auf einem embedded Controller mit integriertem FPGA implementiert.

Experimentelle Validierung am Prüfstand

Im Folgenden soll das implementierte Mehrkanal-ANC-System untersucht und die Funktionalität am Menschen experimentell validiert. Hierzu wird die an einem Kunstkopf erzeugte Dämpfung sowohl spektral als auch hinsichtlich der geometrischen Ausbreitung ihrer zugehörigen Ruhezone betrachtet.

Der elektroakustische Teil des Prüfstands ist in Abbildung 1 unten skizziert, wobei die Lärmquelle durch bandbegrenztes weißes Rauschen im Bereich zwischen 100 Hz und 1 kHz angesteuert wird. Das sich in der Kabine

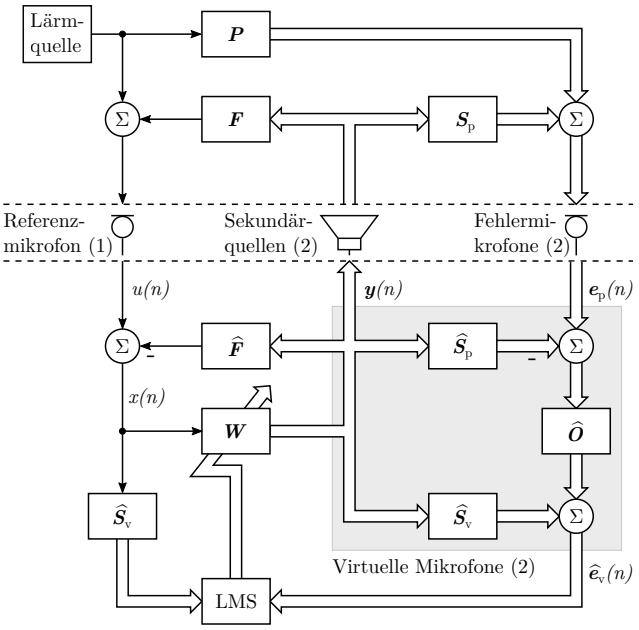

Abbildung 2: Blockschaltbild der adaptiven Mehrkanal-Steuerung. Der konventionelle FxLMS-Algorithmus wurde hierbei durch virtuelle Mikrofone unter Anwendung der Remote-Microphone-Technique erweitert.

bzw. im Arbeitsbereich einstellende Schallfeld kann Abbildung 3 links entnommen werden, wobei an äquidistant verteilten Positionen jeweils der energieäquivalente Dauerschallpegel $L_\mathrm{eq}(\mathrm{A})$ aufgenommen wurde. Die eingezeichneten Äquipotentiallinien weisen auf ein komplexes Schallfeld hin, was insbesondere auf Einflüsse des Kunstkopfes bzw. resultierender akustischer Effekte wie Reflexionen und Abschirmungen zurückzuführen ist. An den Ohren des Kopfes kann dabei ein absoluter Schallpegel von 86 dB(A) links bzw. 83 dB(A) rechts gemessen werden.

Um den Lärm in der Umgebung des platzierten Kunstkopfes zu dämpfen, wird der Schalldruck an den beiden virtuellen Mikrofonen aus Abbildung 1 unten gemäß dem im vorigen Abschnitt vorgestellten Verfahren minimiert. Nach dem Abklingen aller Einschwingvorgänge kann ein trichterförmiger Bereich um den Kunstkopf annähernd konstanten Schallpegels von 80 dB(A) festgestellt werden (vgl. Abbildung 3 rechts). Bezieht man die Schallpegelverteilung des gedämpften auf das

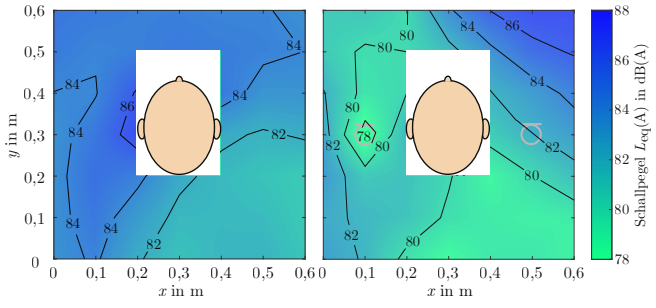

Abbildung 3: Energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_\mathrm{eq}(\mathrm{A})$ im Arbeitsbereich bei ungedämpftem Lärm (links) sowie nach Aktivierung der Mehrkanal-ANC-Steuerung (rechts).

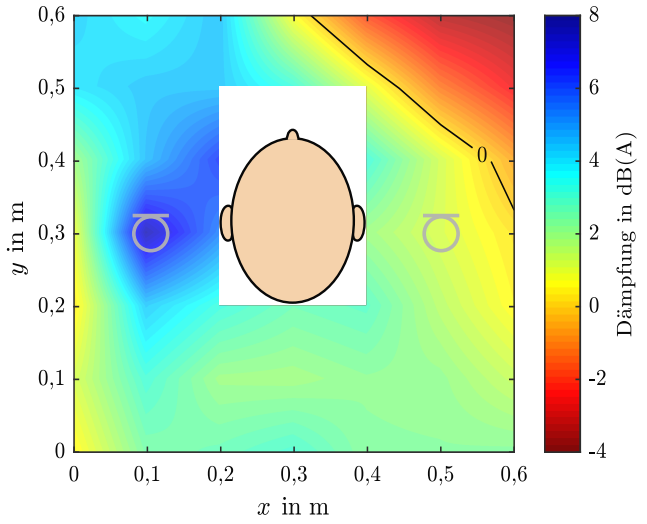

Abbildung 4: Positionsabhängige Dämpfung im Arbeitsbereich nach Aktivierung der Mehrkanal-ANC-Steuerung. Die eingezeichnete 0 dB(A)-Linie kennzeichnet die Grenze der erzeugten Ruhezone.

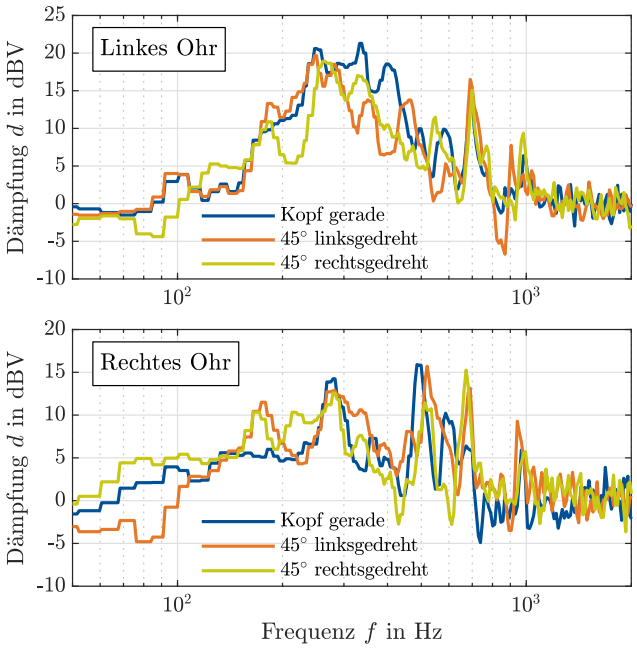

Abbildung 5: In den Gehörgängen des Kunstkopfes gemessene, frequenzabhängige Dämpfung bei unterschiedlichen Kopforientierungen.

ungedämpfte Lärmfeld, so erhält man die positionsabhängige Dämpfung im Arbeitsbereich, die sich nach Aktivierung der Steuerung einstellt (vgl. Abbildung 4). Die eingezeichnete 0 dB(A)-Linie kennzeichnet den Übergang von positiver zu negativer Dämpfung und stellt somit die Grenze der erzeugten Ruhezone dar. Analog zu Abbildung 3 rechts weist auch die Ruhezone eine trichterförmige Geometrie auf, wobei ihr Dämpfungsmaximum von 7 dB(A) am linken virtuellen Mikrofon lokalisiert werden kann. An den Ohren lässt sich daneben eine Dämpfung von 6 dB(A) links bzw. 3 dB(A) rechts ablesen.

Im Folgenden soll nun untersucht werden, wie sich Kopfdrehungen auf die erzeugte Lärmdämpfung auswirken. Da sich der gesamte Kunstkopf bei Drehungen um die körpereigene z-Achse stets vollständig in der Ruhezone befindet, wird vermutet, dass dieser Einfluss vernachlässigt werden kann. Um dies experimentell zu bestätigen, werden mittels der in den künstlichen Gehörgängen platzierten Mikrofone Frequenzgänge des ungedämpften sowie gedämpften Lärms im linken und rechten Ohr bei unterschiedlichen Kopforientierungen aufgenommen und ausgewertet. Abbildung 5 zeigt die daraus rekonstruierte frequenzabhängige Dämpfung in beiden Ohren für die Ausgangsposition (Kopf gerade) sowie nach einer 45°-Drehung des Kopfes nach links bzw. rechts. Sowohl im linken als auch im rechte Ohr zeigt sich hierbei, dass jeweils lediglich geringfügige, vom menschlichen Gehör kaum wahrnehmbare, Dämpfungsunterschiede über alle Orientierungen zu verzeichnen sind.

Es lässt sich also schlussfolgern, dass die implementierte Mehrkanal-ANC-Steuerung in Verbindung mit dem hier vorliegenden Versuchsaufbau die Erzeugung einer Ruhezone ermöglicht, deren Größe ausreicht, einen menschlichen Kopf vollständig zu umschließen. Wie die in diesem Rahmen durchgeführten Versuche zeigten, erlaubt dies bei einer entsprechenden Positionierung des Kopfes im Arbeitsbereich sogar die Vernachlässigung seiner Orientierung, sodass die absoluten Positionen der Ohren für die gewünschte Dämpfungswirkung nicht berücksichtigt werden müssen.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurde ein Mehrkanal-ANC-System auf Basis virtueller Mikrofone zur aktiven Lärmreduktion am Menschen im Raum implementiert. Die Erweiterung der konventionellen Feedforward-Steuerung durch die Remote-Microphone-Technique ermöglicht hierbei die Erzeugung von Ruhezonen, deren Positionen nicht auf ortsfeste Fehlermikrofone beschränkt sind. Dies erlaubt deren Verschiebung an beliebige Zielpositionen im Raum, sofern die resultierenden raumakustischen Eigenschaften a priori hinreichend genau identifiziert wurden. Experimentelle Versuche an einem Kunstkopf zeigten, dass die Platzierung von zwei virtuellen Mikrofonen ausreicht, eine Gesamt-Ruhezone zu erzeugen, die den Kopf vollständig umgibt. Messungen in den künstlichen Gehörgängen zeigten daneben, dass auch bei Änderungen der Kopforientierung ohne Anpassung von Steuerungsparametern stets wahrnehmbare Dämpfungen in den Ohren erzielt werden konnten.

Die Position der erzeugten Ruhezone ist hierbei jedoch durch die Positionen der ortsfesten virtuellen Mikrofone definiert und verhält sich somit ebenfalls ortsfest. Verlässt die Zielperson diesen Bereich, muss das System also entsprechend reagieren und die Ruhezone verschieben, um eine kontinuierliche Lärmreduktion zu gewährleisten. Hierfür ist wie in [5] z.B. auf ein Array virtueller Mikrofone zurückzugreifen, wobei dann ein geeigneter Algorithmus der jeweiligen Zielposition entsprechend eine optimale Auswahl virtueller Mikrofone aus dem Array treffen muss, die für die Schalldruckminimie-

rung verwendet werden sollen. Neben dem Identifikationsaufwand für jedes einzelne Array-Element ist für diesen Ansatz allerdings ein zusätzliches Bildverarbeitungssystem erforderlich, das die Zielperson erkennt, deren Position kontinuierlich verfolgt und der ANC-Steuerung zur Verfügung stellt.

Literatur

[1] Elliott, S. J., Nelson, P. A.: Active Noise Control. IEEE Signal Processing Magazine (1993), 12-35

[2] Kuo, S. M., Morgan, D. R.: Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996

[3] Moreau, B., Cazzolato, B. S., Zander, A. C., Hansen, C. H.: A Review of Virtual Sensing Algorithms for Active Noise Control. Algorithms (2008), 69-99

[4] Roure, A., Albarrazin, A.: The remote microphone technique for active noise control. Proceedings of ACTIVE 99 (1999), 1233-1244

[5] Höber, S., Pape, C., Reithmeier, E.: Positionsadaptive Lärmreduktion mittels Model-Lookup-Control, Fortschritte der 44. Jahrestagung für Akustik (2018), 567-570