

Vergleich adaptiver Regelungskonzepte für eine aktive Kopfstütze

Jan Buck¹, Sergej Jukkert¹, Delf Sachau¹

¹ Professur für Mechatronik, 22043 Hamburg, E-Mail: jan.buck@hsu-hh.de

Einleitung

Sowohl im Privaten als auch im Arbeitsumfeld sind Menschen verschiedenen Lärmquellen ausgesetzt, was zu einer Belastung führt. Daher werden aktive Gegenschallmaßnahmen (engl. Active Noise Control, ANC) zur lokalen Schallreduktion im Kopfbereich (aktive Kopfstütze) erforscht.

Die grundlegende Idee der aktiven Kopfstütze wurde 1953 von Olson und May [5] vorgestellt. Seitdem wurden viele verschiedene Konfigurationen von aktiven Kopfstützen erforscht. Insbesondere ist die von Pawelczyk [2] vorgestellte adaptive Kopfstütze von Bedeutung, welche von Pabst [3] für bandbegrenzte Störungen im Personalruhebereich eines Passagierflugzeugs weiterentwickelt wurde.

In diesem Beitrag werden drei Regelungskonzepte experimentell miteinander verglichen. Betrachtet wird die erzielte Schallreduktion am Ohr, die Größe der Ruhezone mit einer Dämpfung ≥ 10 dB (10 dB-Ruhezone) und die Anzahl benötigter Berechnungsoperationen pro Abtastschritt der Algorithmen.

Versuchsaufbau

Für die Untersuchung wird eine aktive Kopfstütze bestehend aus 2 Gegenschalllautsprechern SPH-100C von Monacor, 2 Fehlermikrofonen EMY-602N von Ekulit mit angepasster Operationsverstärker-Schaltung MK136 von Velleman und einem Kunstkopf HMS III.0 von HEAD-acoustics verwendet. Es werden keine analogen Tiefpassfilter als Antialiasing- und Rekonstruktionsfilter eingesetzt. Stattdessen werden die Tiefpasseigenschaften der Fehlermikrofone und Gegenschalllautsprecher genutzt. Die Fehlermikrofone besitzen eine Eckfrequenz $f_c = 6$ kHz und eine Steigung von -12 dB/Okt. Die Eckfrequenz der Gegenschalllautsprecher beträgt $f_c = 9$ kHz bei einem Abfall von mindestens 12 dB/Okt. Die Fehlermikrofone sind oberhalb der Gegenschalllautsprecher im Abstand von 6 cm zur Mitte der Lautsprechermembran positioniert. Die Gegenschalllautsprecher haben einen Abstand von 17 cm zu den Ohren des Kunstkopfes, siehe Abbildung 1. Die Ausführung der Algorithmen erfolgt auf einem Echtzeitsystem DS1006 von dSpace mit einer Abtastfrequenz von 20 kHz. Als Störsignal wird ein Bandpass gefiltertes Rauschsignal im Bereich 200 Hz bis 300 Hz verwendet, welches zusätzlich durch den Raum ($18 \text{ m} \times 5.2 \text{ m} \times 4.9 \text{ m}$) gefärbt wird (Abb. 6 bis 8). Das Störsignal wird von einem Lautsprecher des Typs E12/E15X-SUB von d&b Audiotechnik erzeugt, welcher 4.5 m vor dem Kunstkopf aufgestellt ist. Die Auswertung der erzielten Schallreduktion im Kopfbereich erfolgt mit 50 Monitormikrofonen.

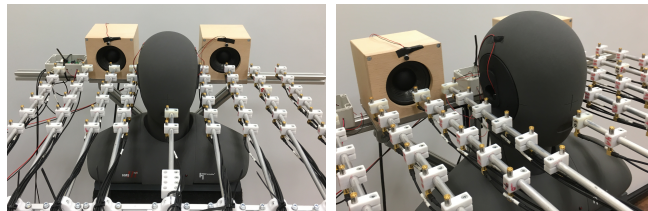


Abbildung 1: Aktive Kopfstütze mit 2 Gegenschalllautsprechern, 2 Fehlermikrofonen, einem Kunstkopf und 50 Monitormikrofonen

Regelungskonzepte

Es werden eine Eingrößenregelung (engl. single-input single-output, SISO), eine Mehrgrößenregelung (engl. multiple-input multiple-output, MIMO) sowie eine CICO-Regelung (engl. combined-input combined-output, CICO) untersucht und verglichen.

Es gilt die folgende Notation:

- $e_i(n)$: i -te Fehlersignal
- $d_i(n)$: i -te Störsignal
- $y_i(n)$: i -te Stellsignal
- $S(z)$: Übertragungsfunktion der Sekundärstrecke
- $W(z)$: Übertragungsfunktion des adaptiven Filters
- $(\dots)_v$: virtuell
- $(\hat{\dots})$: Modell
- n : Diskreter Zeitschritt
- z : Komplexe Frequenzvariable

Im Falle des SISO-Reglers (Abb. 2) wird für jedes Ohr ein Eingrößenregler verwendet. Die Stellsignale $y_i(n)$ werden dabei aus den jeweiligen Fehlersignalen $e_i(n)$ berechnet, für $i = 1, 2$.

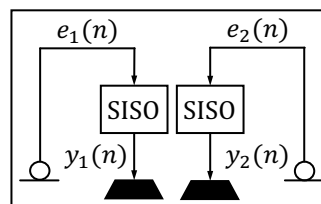


Abbildung 2: Konzept SISO-Regler

Der MIMO-Regler (Abb. 3) benutzt die Signale beider Fehlermikrofone, um die Stellsignale für die Gegenschalllautsprecher zu berechnen. Dabei werden die Kreuzübertragungstrecken S_{12} und S_{21} zwischen den

Stellsignalen der Gegenschalllautsprecher und den Fehler-signalen der Fehlermikrofone berücksichtigt.

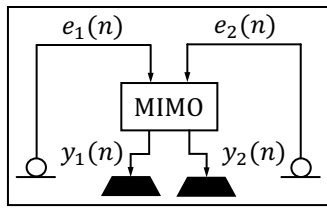


Abbildung 3: Konzept MIMO-Regler

Im Falle des CICO-Reglers (Abb. 4) werden die Fehler-signale $e_1(n)$ und $e_2(n)$ addiert und als ein Fehlersignal betrachtet. Beide Gegenschalllautsprecher erhalten das gleiche Stellsignal $y(n)$ [1].

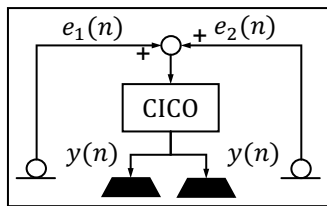


Abbildung 4: Konzept CICO-Regler

Fehlermikrofone können in der Kopfstütze nicht direkt am Ohr platziert werden. Daher wird die Methode der virtuellen Mikrofone implementiert, welche die Ruhezone in den Bereich der Ohren verschiebt [2, 4]. In Abbildung 5 ist die Methode für den SISO-Regler dargestellt. Die Adaption des Reglers erfolgt mit dem FxLMS-Algorithmus (engl. filtered x least mean square). Für die Adaption des FIR-Filters $W(z)$ wird in der Trainingsphase ein temporäres Fehlermikrofon am Ohr des Kunstkopfes platziert. In der Regelphase wird die Adaption der Koeffizienten angehalten und das Fehlermikrofon am Ohr entfernt (virtuelles Mikrofon).

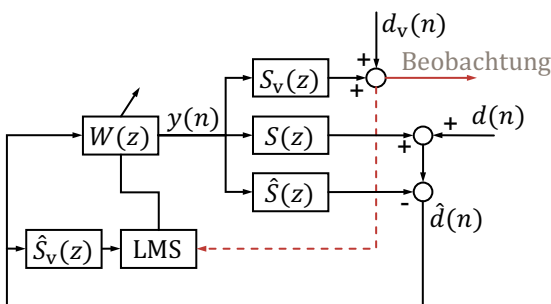


Abbildung 5: Darstellung eines SISO-Reglers mit virtuellen Mikrofonen (Änderung Trainingsphase zu Regelphase in rot)

Ergebnisse

In Abbildung 6 bis 8 ist die Reduktion des Schalldruckpegels für die drei Reglerkonzepte an beiden Ohren des Kunstkopfes dargestellt. Die durch die Lüftung hervorgerufene Überhöhung im Bereich 16 Hz wird mit einem Kerbfilter im Regelkreis gedämpft, um ein nichtlineares Verhalten der Lautsprecher zu vermeiden.

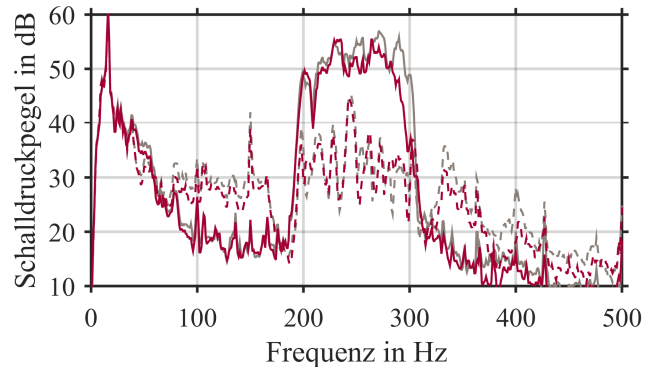


Abbildung 6: Amplitudenspektrum (RMS) an den Ohren des Kunstkopfes (grau → rechts / rot → links) mit und ohne MIMO-Regler (— ohne / --- mit)

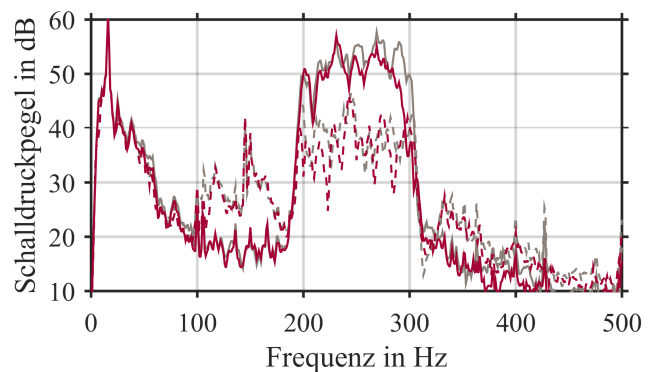


Abbildung 7: Amplitudenspektrum (RMS) an den Ohren des Kunstkopfes (grau → rechts / rot → links) mit und ohne SISO-Regler (— ohne / --- mit)

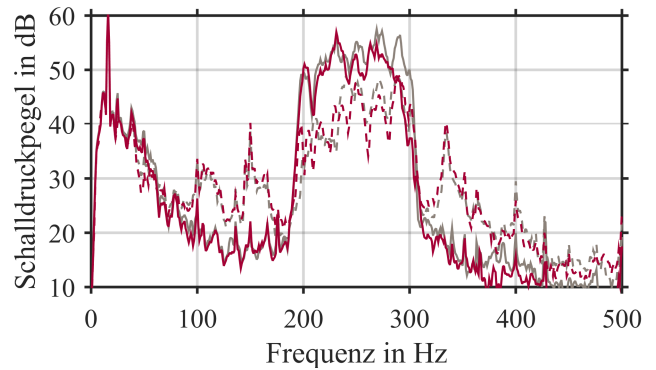


Abbildung 8: Amplitudenspektrum (RMS) an den Ohren des Kunstkopfes (grau → rechts / rot → links) mit und ohne CICO-Regler (— ohne / --- mit)

Für die Reduktion des Summenpegels im Bereich 200 Hz bis 300 Hz ergibt sich für die drei Regelungskonzepte die in Abbildung 9 bis 11 dargestellte Dämpfung im Bereich des Kopfes. Für die Modellierung der Sekundärstrecken $\hat{S}(z)$ und $\hat{S}_v(z)$ wurden FIR-Filter mit $N_S = 300$ Koeffizienten und für das Filter $W(z)$ $N_W = 400$ Koeffizienten verwendet. Die modellierten Übertragungstrecken sind in Abbildung 12 bis 14 dargestellt. Die Amplitude der Kreuzübertragungstrecken ist dabei um 20 dB geringer als die der direkten Übertragungstrecken S_{11}

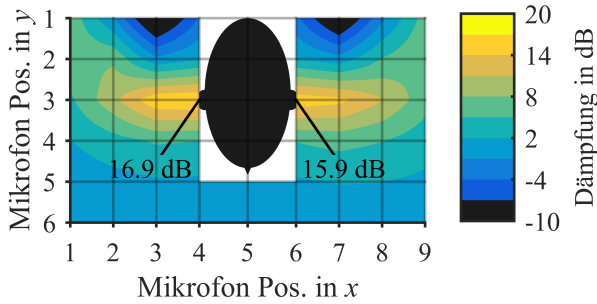


Abbildung 9: Reduktion des Summenpegels im Bereich 200 Hz bis 300 Hz mit MIMO-Regler

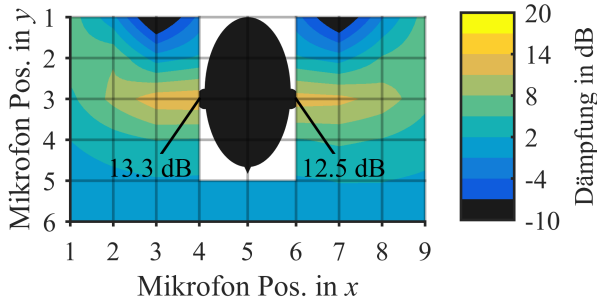


Abbildung 10: Reduktion des Summenpegels im Bereich 200 Hz bis 300 Hz mit SISO-Regler

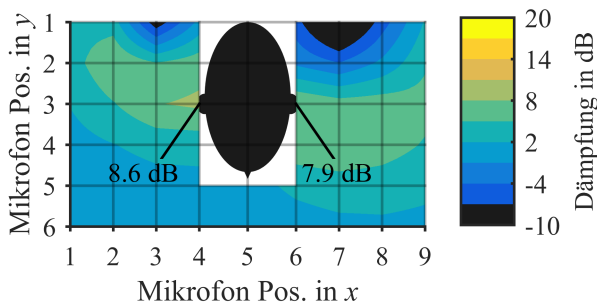


Abbildung 11: Reduktion des Summenpegels im Bereich 200 Hz bis 300 Hz mit CICO-Regler

und S_{22} . Keine Übertragungsstrecke weist merkliche Überhöhungen oder Einbrüche im Bereich > 100 Hz auf.

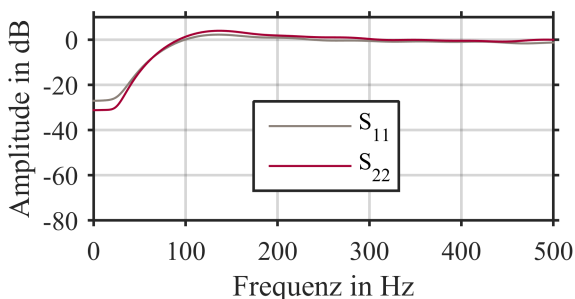


Abbildung 12: Amplitudenspektrum der modellierten Übertragungsstrecken S_{11} und S_{22}

Für alle Regelungskonzepte wird die Ruhezone in den Bereich der Ohren verschoben. Im Falle des CICO-Reglers ist die Form der Ruhezone jedoch nicht symmetrisch und es wird keine Dämpfung ≥ 10 dB erreicht. Dies ist auf

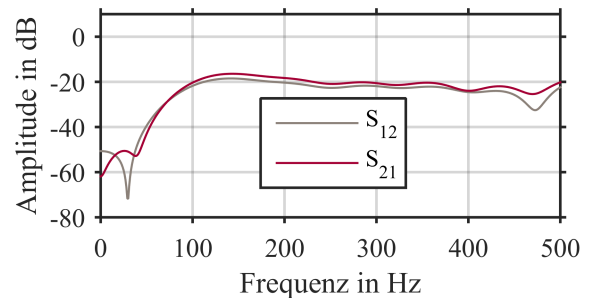


Abbildung 13: Amplitudenspektrum der modellierten Kreuzübertragungsstrecken S_{12} und S_{21}

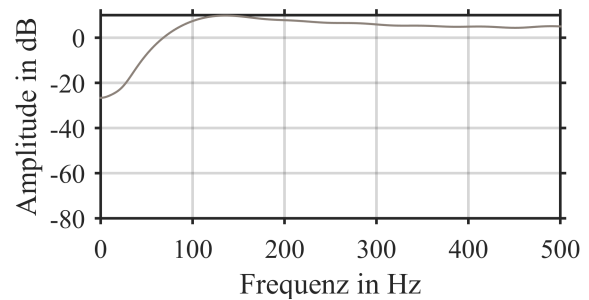


Abbildung 14: Amplitudenspektrum der modellierten Übertragungsstrecke S_{1+2} des CICO-Reglers

die Verwendung des selben Stellsignals für beide Gegenschalllautsprecher zurückzuführen. Die größte Ruhezone wird durch den MIMO-Regler erzeugt. Die Größe der 10 dB-Ruhezone in x -Richtung beträgt 16 cm am rechten und 17 cm am linken Ohr. Für den SISO-Regler beträgt die Größe 14 cm am rechten und 15 cm am linken Ohr.

Tabelle 1: Anzahl Berechnungsoperationen pro Abtastschritt der einzelnen Regelungskonzepte

	MIMO	SISO	CICO
Adapt. Filter	4	2	1
Multipl.	$12N_S + 12N_W$	$2(2N_S + 2N_W)$	$2N_S + 2N_W$
Multipl. abs.	8400	2800	1400
Multipl. rel.	100 %	33,3 %	16,7 %

Der Berechnungsaufwand der einzelnen Regelungskonzepte ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Hierbei wird nur die Anzahl Multiplikationen pro Abtastschritt berücksichtigt. Den größten Berechnungsaufwand besitzt der MIMO-Regler aufgrund der berücksichtigten Kreuzübertragungsstrecken bei der Adaption der Filterkoeffizienten.

Zusammenfassung

Der MIMO-Regler erzeugt die größte Ruhezone und die größte Reduktion des Summenpegels am Ohr, besitzt jedoch auch den größten Berechnungsaufwand. Insgesamt ist der Berechnungsaufwand umso höher, je größer der Regelungserfolg und die Größe der Ruhezone ist.

Literatur

- [1] A. Siswanto/C. Chang/S. M. Kuo: „Active noise control for headrests“, in: Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), 2015, S.688–692
- [2] M. Pawelczyk: „Adaptive noise control algorithms for active headrest system“, in: Control Engineering Practice 12.9 (2004), S. 1101–1112
- [3] O. Pabst: Entwurf eines Systems zur breitbandigen Lärminderung in Ruhebereichen von Flugzeugen, Dissertation, Helmut Schmidt Universität, UniBwH, 2011
- [4] D. Moreau u. a.: „A Review of Virtual Sensing Algorithms for Active Noise Control“, in: Algorithms 1.2 (2008), S. 69–99
- [5] H. F. Olson/E. G. May: „Electronic Sound Absorber“, in: The Journal of the Acoustical Society of America 25.6 (1953), S. 1130–1136