Aktive Regelung der akustischen Kopfhörerimpedanz

zur Minimierung des Okklusionseffekts

Benjamin Pries¹, Roman Schlieper¹, Stephan Preihs¹, Jürgen Peissig¹

¹ Institut für Kommunikationstechnik, Leibniz Universität Hannover

 $Email:\ pries@ikt.uni-hannover.de$

Einleitung

Die okklusionsbedingt gestörte Wahrnehmung der eigenen Stimme stellt beim Tragen von akustisch geschlossenen Kopfhörern bis heute ein Problem dar. Bei der Nutzung digitaler Signalverarbeitung zur Okklusionsminimierung ist ein hybrider Ansatz notwendig, der die beiden wesentlichen Aspekte des Okklusionseffekts separat behandelt: Erstens, der Einfluss der passiven Dämpfung des Kopfhörers wird durch ein Feedforward Hear-Through System minimiert. Und zweitens, der Verstärkung der Körperschallkomponente wird mit einem für diesen Zweck optimierten Feedback Active Noise Control (FB-ANC) System entgegengewirkt. In bisherigen Veröffentlichungen wurde die Auslegung der Feedback Filter stets auf Grundlage von im Gehörgang gemessenen Schalldruckspektren vorgenommen, deren Bestimmung aufwändige Messungen an Probanden erfordert. In diesem Beitrag wird ein neues Vorgehen vorgestellt, das sich auf die Ursache der Schalldruckanhebung, die durch die Okklusion bedingte Änderung der akustischen Impedanz aus Sicht des Gehörgangs, bezieht.

Kopfhörer Prototyp

Zur Echtzeitimplementierung der entwickelten Filterentwurfsroutine wurde ein Prototyp auf Grundlage eines Apple AirPods Max entwickelt. Die insgesamt acht verbauten Mikrofone wurden an den Originalpositionen jeweils durch Infineon IM73A135 MEMS Mikrofone ersetzt, während die werksseitig verbauten Lautsprecher auch im Prototyp genutzt werden. Der Anschluss des Prototyps an weitere Hardware erfolgt über zwei 15-polig D-Sub Stecker, über die neben den Lautsprechersignalen auch die Versorgungsspannung für die MEMS Mikrofone bereitgestellt wird. Ebenfalls liegen hier die differentiellen Mikrofonsignale an. Abbildung 1 zeigt den Prototyp und die Positionen der verbauten Mikrofone. Die Referenzmikrofone (FF-Mic) werden im Rahmen dieses Beitrags nicht genutzt.



Abbildung 1: Kopfhörer Prototyp auf Basis eines modifizierten Apple AirPods Max.

Systemaufbau

Abbildung 2 zeigt das Hardware Setup, an das der Prototyp angeschlossen wird. Die Echtzeitimplementierung der digitalen Signalverarbeitung für den Prototyp geschieht auf einem dSPACE SCALEXIO Echtzeitsystem mit A/D- und D/A-Wandler Erweiterungskarten (DS6221, DS6241). Um die Dynamikbereiche der D/Aund A/D-Wandler des dSPACE Systems (jeweils ± 10 V mit 16 Bit Auflösung) bestmöglich zu nutzen und um den negativen Einfluss von Quantisierungsrauschen insbesondere bei geringen Signalamplituden zu minimieren, werden ein Lake People G109 Kopfhörerverstärker und ein RME OctaMic II Mikrofonvorverstärker über ein eigens hierfür entworfenes Patchterminal in den Signalpfad eingebunden.



Abbildung 2: Systemkomponenten und Anschlussmöglichkeiten des Patchterminals.

Ferner kommt im Entwurfsprozess bei der Impedanzoptimierung des Feedback-Filters ein Hochfrequenz-Impedanzmessrohr [1] zum Einsatz (Abbildung 5), das anders als kommerziell erhältliche Impedanzmessrohre, die Bestimmung akustischer Parameter über den gesamten für den Menschen hörbaren Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz mit einer einzelnen Messung ermöglicht.

Mixed-Sensitivity \mathcal{H}_{∞} Reglerentwurf

Das Filterentwurfsverfahren zur aktiven Regelung der akustischen Kopfhörerimpedanz basiert auf einem von Liebich et al. [2] präsentierten Vorgehen zur Nutzung des robusten Mixed-Sensitivity \mathcal{H}_{∞} Reglerentwurfs [3] für ein FB-ANC System in Kopfhörern. Das Blockschaltbild eines solchen FB-ANC Systems ist in Abbildung 3 dargestellt. Durch Rückkopplung des am Feedback Mikrofon aufgenommenen Fehlersignals e(t) über ein Feedback Filter K(s) und anschließende Übertragung über den akustischen Sekundärpfad G(s) vom Lautsprecher zum Feedback Mikrofon, wird der Einfluss des Störsignals d(t) auf das Fehlersignal e(t) geregelt.



Abbildung 3: Blockschaltbild eines Feedback ANC Systems mit dem Sekundärpfad G(s) und dem Feedback Filter K(s).

Allgemein gilt beim \mathcal{H}_{∞} Reglerentwurf, dass das Feedback Filter K(s) so entworfen wird, dass die folgende \mathcal{H}_{∞} -Norm minimiert wird, wodurch die Energieübertragung von der Störgröße d(t) auf den gewichteten Ausgangsvektor $\mathbf{z}(t) = [e(t) * w_1(t), y(t) * w_2(t), u(t) * w_3(t)]^T$ minimal wird:

$$\min_{K(s)} \|\mathbf{T}_{\mathbf{zd}}(s)\|_{\infty} = \min_{K(s)} \left\| \begin{array}{c} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{array} \right\|_{\infty} = \min_{K(s)} \gamma \quad (1)$$

Die Sensitivität S(s) und die komplementäre Sensitivität T(s) des geschlossenen Regelkreises (Abbildung 3) sind dabei wie folgt gegeben:

$$S(s) = \frac{E(s)}{D(s)} = \frac{1}{1 + G(s)K(s)}$$
(2)

$$T(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)K(s)}{1 + G(s)K(s)}$$
(3)

Das Verfahren bietet den Vorteil, dass Unsicherheiten im Sekundärpfad G(s), die durch interpersonelle Unterschiede oder unterschiedlichen Sitz des Kopfhörers zustande kommen, in $W_3(s)$ berücksichtigt werden können und gleichzeitig über $W_1(s)$ ein Optimierungsziel für die Sensitivität S(s) des geschlossenen Regelkreises vorgegeben werden kann. Die Gewichtsfunktion $W_2(s)$ wird bei Signalverarbeitungsanwendungen in der Regel zu Null gesetzt [3].

Ergibt sich mit dem entworfenen Filter K(s) ein Wert $\gamma < 1$, so werden die über die Gewichtsfunktionen gestellten Entwurfsanforderungen vollständig erfüllt und es gilt: $|S(s)| < \left|\frac{1}{W_1(s)}\right|$ sowie $|T(s)| < \left|\frac{1}{W_3(s)}\right|$.

Wahl der Gewichtsfunktionen

Die größte Herausforderung bei der Nutzung des Mixed-Sensitivity \mathcal{H}_{∞} Reglerentwurfs stellt die Wahl geeigneter Gewichtsfunktionen dar. Bei der Wahl der Gewichtsfunktion $W_3(s)$ wurde sich am Vorgehen von Liebich et al. [2] orientiert. Ausgehen von einem Datensatz, der insgesamt 62 Sekundärpfadmessungen mit dem Prototyp auf einem GRAS KEMAR Kunstkopf, einem Neumann KU100 Kunstkopf, an menschlichen Probanden (mit und ohne Brille) und in unterschiedlichen Handling Fällen umfasst, wurde zuerst ein nomineller Sekundärpfad $G_{\rm N}(z)$ bestimmt. Bei Skogestad et al. [3] finden sich verschiedenen Ansätze einen nominellen Pfad zu wählen, z.B. die Berechnung eines mittleren Pfads oder eines Pfads, der zur kleinsten maximalen multiplikativen Unsicherheit $W_{\rm M}(j\omega)$ (Gleichung 4) gegenüber allen Pfaden $G_{\rm P}(j\omega)$ aus dem Datensatz führt.

$$W_{\rm M}(j\omega) = \max_{G_{\rm P}} \left| \frac{G_{\rm P}(j\omega) - G_{\rm N}(j\omega)}{G_{\rm N}(j\omega)} \right| \tag{4}$$

In diesem Beitrag wird eine Kombination aus diesen zwei Ansätzen genutzt, wobei der nominelle Sekundärpfad $G_{\rm N}(z)$ so gewählt wird, dass er im Frequenzbereich von f = 20 Hz bis f = 1 kHz, der für das FB-ANC System von besonderer Bedeutung ist, zwar zu einer möglichst geringen multiplikativen Unsicherheit führt, aber ebenfalls möglichst ähnlich zum mittleren Sekundärpfad bei dichtem Sitz des Kopfhörers ist.

Da der Reglerentwurf in Matlab Zustandsraum-Repräsentationen in der kontinuierlichen s-Domäne erfordert, der gewählte nominelle Sekundärpfad aber als zeitdiskrete Messung vorliegt, wird ein Zustandsraummodell $G_{\rm N}(z) \rightarrow G_{\rm N}(s)$ berechnet. Das nominelle Sekundärpfadmodell ist 28. Ordnung und wird zusammen mit dem Sekundärpfad Datensatz in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Sekundärpfad Datensatz des vorgestellten Prototyps und Modell des nomineller Sekundärpfads $G_{N}(s)$.

Aus der nach Gleichung 4 bestimmten maximalen multiplikativen Abweichung wurde wie bei Liebich et al. [2] durch Glättung und Anhebung der Werte bei hohen und tiefen Frequenzen ein minimalphasiges Modell $W_3(s)$ 10. Ordnung in Zustandsraumdarstellung bestimmt. Ziel hierbei ist, die zur Einhaltung des Bode Sensitivitätsintegrals zur Kompensation der tieffrequenten Dämpfung notwendige Verstärkung bei hohen Frequenz über einen breiten Frequenzbereich zu strecken und einen schmalbandigen Overshoot mit extremer Verstärkung zu verhindern.

Während bei Liebich et al. [2] die gewünschte Sensitivität $W_1^{-1}(s)$ zur Minimierung des Okklusionseffekts auf

Grundlage von im Gehörgang gemessenen Schalldruckspektren leicht zu bestimmen ist, stellt in diesem Beitrag nicht die Sensitivität, sondern die auf einem modifizierten Impedanzmessrohr gemessene akustische Impedanz des Kopfhörers aus Sicht des Gehörgangs, bzw. der daraus berechnete Okklusionsindex (OI) [4], das Ziel der Optimierung dar. Die Gewichtsfunktion $W_1(s)$ stellt entsprechend nur die benötigte Eingriffsmöglichkeit zur Beeinflussung des Reglerentwurfsverfahren dar, sie kann aber aufgrund des komplexen Zusammenhangs zwischen der gemessenen akustischen Impedanz und der Sensitivität des FB-ANCs nicht trivial bestimmt werden.



Abbildung 5: Modifiziertes Impedanzmessrohr [1] zur Bestimmung der akustischen Kopfhörerimpedanz.

Zur Bestimmung der akustischen Impedanz des Kopfhörers aus Sicht des Gehörgangs sind, wie in [4] beschrieben, zwei Messungen auf einem mit einer anthropometrischen Pinna abgeschlossenen Impedanzmessrohr nötig (Abbildung 5). Bei der ersten Messung wird die von innen gesehene akustische Impedanz des unokkludierten Ohrs \underline{Z}_{OE} gemessen, die im weiteren als Referenzimpedanz angenommen wird. Bei der zweiten Messung wird das Ohr durch den Kopfhörer Prototyp okkludiert, was zu der veränderten Impedanz \underline{Z}_{OE}^{HP} führt. Die akustische Impedanz des Kopfhörers Z_{HP} ist wie folgt definiert:

$$Z_{\rm HP} = \frac{|\underline{Z}_{\rm OE}^{\rm HP}|}{|\underline{Z}_{\rm OE}|} \tag{5}$$

Ausgehend von diesen ersten Messungen wird eine erste Gewichtsfunktion $W_1(s)$ 8. Ordnung mit Hilfe von vier Shelving Filtern definiert.

Nachbearbeitung des entworfenen Filters Mit dem Modell des nominellen Sekundärpfads $G_{\rm N}(s)$ und den Gewichtsfunktionen $W_1(s)$ und $W_3(s)$ wird der \mathcal{H}_{∞} Reglerentwurf durchgeführt. Zur Echtzeitimplementierung des so erhaltenen Filters sind weitere Schritte notwendig. Das Entwurfsverfahren liefert eine Zustandsraumdarstellung in der kontinuierlichen s-Domäne, sodass zuerst eine Transformation in die zeitdiskrete z-Domäne durchgeführt wird. Die Filterordnung ist beim \mathcal{H}_{∞} Reglerentwurf durch die Summe der Ordnungen von $G_{\rm N}(s), W_1(s)$ und $W_3(s)$ bestimmt und beträgt hier 28 + 10 + 8 = 46, was für eine Echtzeitimplementierung noch zu groß ist. Deshalb wird die Filterordnung über die Hankel Singularitätswerte so reduziert, dass 99% der Systemenergie erhalten bleibt. In einem letzten Schritt wird das Filter aus der Zustandsraumdarstellung in mehrere Biquad Filterstufen überführt.

Anschließend wird das Filter für den Prototyp implementiert und eine erneute Messung der akustischen Kopfhörerimpedanz durchgeführt, aus der nach Gleichung 6 der Okklusionsindex im Frequenzbereich von $f_1 = 60 \text{ Hz}$ bis $f_2 = 800 \text{ Hz}$ berechnet wird.

$$OI = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} \left| \frac{\underline{Z}_{OE}^{HP} - \underline{Z}_{OE}}{\underline{Z}_{OE}} \right|^2} + 1 \right)$$
(6)

Diese Vorgehen wird unter manuellem Tuning der Sensitivitätsgewichtsfunktion $W_1(s)$ so oft wiederholt, bis ein ausreichend geringer Okklusionsindex erzielt wird.

Ein Prozessdiagramm des Entwurfsverfahren findet sich in Abbildung 6.



Abbildung 6: Prozessdiagramm für den impedanzoptimierten Filterentwurf zur Erzielung eines minimalen Okklusionsindex.

Ergebnisse des Filterentwurfs

Die inversen Gewichtsfunktionen $W_1^{-1}(s)$ und $W_3^{-1}(s)$ sind in Abbildung 7 zusammen mit den sich theoretisch ergebenden Sensitivitäts- und komplementären Sensitivitätsfunktionen S(s) und T(s) dargestellt, die aus den Gleichungen 2 und 3 mit dem final entworfenen Filter K(s) und dem nominellen Sekundärpfadmodell $G_N(s)$ berechnet werden können.



Abbildung 7: Sensitivität S(s) und komplementäre Sensitivität T(s) zusammen mit den Inversen der jeweiligen Gewichtsfunktionen $W_1(s)$ und $W_3(s)$.

Es wird deutlich, dass die Vorgaben durch die Gewichtsfunktionen nicht vollständig eingehalten werden, was sich auch im Wert der \mathcal{H}_{∞} -Norm $\gamma = 2.507$ für das finale Filter K(s) widerspiegelt. In der Praxis erwies sich das Filter als ausreichend robust gegenüber Änderungen im Sekundärpfad. Aufkommende Instabilitäten können über zusätzliche Maßnahmen, die nicht Teil dieses Beitrags sein sollen, abgefangen werden.

Der Frequenzgang des entworfenen Filters K(s) ist zusammen mit dem Frequenzgang der diskreten Näherung mit verringerter Ordnung $K_d(z)$ in Abbildung 8 zu finden. Die Verläufe weisen in Betrag und Phase über einen weiten Frequenzbereich trotz der Verringerung der Filterordnung von 46 auf 22 sehr gute Übereinstimmungen auf. Erst oberhalb von f = 5 kHz kommt es zu kleinen Abweichungen, wobei der grundsätzliche Verlauf aber erhalten bleibt.



Abbildung 8: Entworfenes Filter K(s) zusammen mit der zeitdiskreten Näherung mit verringerter Ordnung $K_d(z)$.

Abschließend sind in Abbildung 9 die Ergebnisse der Messungen der akustischen Kopfhörerimpedanz mit aktiviertem und deaktiviertem FB-ANC dargestellt. Durch das optimierte Rückkopplungsfilter zeigt sich für Frequenzen f > 50 Hz eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der akustischen Impedanz im okkludierten und unokkludierten Fall, sodass der Kopfhörer aus Sicht des Gehörgangs akustisch verschwindet. Der Okklusionsindex beträgt 0.56 dB und ist damit Vergleichbar zu akustisch offenen Kopfhörern [4], sodass keine signifikante Verstärkung von Körperschall zu erwarten ist. Ein Vergleich mit dem Originalprodukt zeigt jedoch, dass dort die Kopfhörerimpedanz insbesondere bei tiefen Frequenzen noch etwas besser approximiert wird.



Abbildung 9: Akustische Kopfhörerimpedanz bei aktiviertem Feedback-ANC im Vergleich zur passiven Nutzung und zum Originalprodukt (relativ zur akustischen Impedanz des offenen Ohrs).

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein bekanntes Verfahren zum Entwurf eines Feedback Active Noise Control Systems so modifiziert, dass eine aktive Regelung der akustischen Kopfhörerimpedanz aus Sicht des Gehörgangs ermöglicht wird. Der große Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sich die akustische Kopfhörerimpedanz als Maß für die Okklusion messtechnisch einfacher und reproduzierbarer ermittelt lässt als Schalldruckspektren im menschlichen Gehörgang bei Nutzung der eigenen Stimme als Anregungssignal. Es wurde gezeigt, dass mit einem impedanzoptimierten FB-ANC die im okkludierten Fall gemessenen Impedanz über einen weiten Frequenzbereich der Impedanz des unokkludierten, offenen Ohrs angenähert werden kann. In einem nächsten Schritt soll dieses System um ein Transparenzfunktion erweitert werden, um der passiven Dämpfung des Luftschalls entgegenzuwirken, um so den Okklusionseffekt bestmöglich zu minimieren. Probandenstudien müssen zeigen, wie sich die verbleibende akustische Kopfhörerimpedanz in einem solchen hybriden System auf die wahrgenommene Okklusion auswirkt und welche Unterschiede in der Kopfhörerimpedanz signifikanten Einfluss auf den Okklusionseffekt haben. Um in zukünftigen Arbeiten die Wahl der Gewichtsfunktionen zu automatisieren, ist weiterhin der Einsatz eines genetischen Algorithmus, wie bereits in [5] erprobt, denkbar.

Literatur

- R. Schlieper, S. Li, J. Peissig und S. Preihs: *High-frequency acoustic impedance tube based on MEMS microphones*. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (2021), 4724–4732, doi: 10.3397/IN-2021-2810
- [2] S. Liebich und P. Vary: Occlusion Effect Cancellation in Headphones and Hearing Devices—The Sister of Active Noise Cancellation. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing 30 (2022), 35–48, doi: 10.1109/TASLP.2021.3130966
- [3] S. Skogestad und I. Postlethwaite: Multivariable feedback control: Analysis and design. Wiley, Chichester, 2005, isbn: 978-0-470-01168-3
- [4] R. Schlieper, S. Li, S. Preihs und J. Peissig: Estimation of the Headphone "Openness" Based on Measurements of Pressure Division Ratio, Headphone Selection Criterion, and Acoustic Impedance. 145th AES Convention New York. 2018. url: https://www.aes. org/e-lib/inst/browse.cfm?elib=19825
- [5] R. Schlieper, S. Li, S. Preihs und J. Peissig: *Psychoa-coustic optimization of a robust feedback active noise controller for headphones*. JASA Express Letters 1 (12) (2022), 124801, doi: 10.1121/10.0009061