

Feedback-Reglerauslegung für aktive Lärmkompensation bei In-Ear-Kopfhörern

Christoph Bruhnken¹, Sylvia Priese¹, Hatem Foudhaili², Daniel Voss²,
Eduard Reithmeier¹, Jürgen Peissig²

¹ Institut für Mess- und Regelungstechnik, 30167 Hannover, Deutschland, E-Mail: Christoph.Bruhnken@imr.uni-hannover.de

² Sennheiser electronic GmbH & Co. KG, 30900 Wedemark, Deutschland, E-Mail: Hatem.Foudhaili@sennheiser.com

Einleitung

Heutzutage wird in vielen Berufszweigen eine immer höhere Mobilitätsbereitschaft verlangt. Damit verbunden steigen die Häufigkeit und Dauer der Nutzung von Verkehrsmitteln, wie Flugzeug, Bahn oder PKW. Dies führt zu einer vermehrten Konfrontation mit Lärm. Eine passive Dämpfung dieses Lärms ist aufgrund des häufig dafür nötigen Zusatzgewichtes nur begrenzt möglich.

Eine Kombination aus passiver und aktiver Dämpfung bieten Kopfhörer mit aktiver Lärmreduzierung (engl. Active Noise Control (ANC)). Zurzeit sind vor allem ohrmschließende Produkte mit zum Teil sehr guten Dämpfungseigenschaften auf dem Markt zu finden. Jedoch ist die Baugröße für manche Benutzer nicht vertretbar, wodurch In-Ear-Kopfhörer besser in Frage kommen. Bei ANC-Kopfhörern wird der Störschall aufgenommen und darauf basierend eine Schallwelle ausgegeben, um den Lärm mittels destruktiver Interferenz am Trommelfell zu minimieren. Dieses Vorgehen basiert auf zwei Strategien: Der Feedforward-Filterung (FF), bei der der Referenzschall mit einem Außenmikrofon aufgenommen wird und der Feedback-Regelung (FB), bei der ein innenliegend eingebautes Fehlermikrofon verwendet wird [1, 2]. Im Weiteren liegt der Fokus ausschließlich auf der FB-Regelung. Zuerst wird prinzipiell auf den Reglerentwurf und die Analyse der Sekundärstrecke eingegangen. Danach wird eine Optimalregelung vorgestellt [2, 3]. Darauf aufbauend wird eine Lösung für ein wichtiges Problem bei In-Ear-ANC-Kopfhörern, ausgeprägte interpersonelle Varianzen der Sekundärstrecke, gegeben. Abgeschlossen wird mit einer Analyse der Performance des entwickelten Reglers.

Feedback-Regelung

Die FB-Regelung für ANC-Anwendungen mittels digitaler Filterung basiert auf dem prinzipiellen Aufbau, wie in Abbildung 1 dargestellt. Ziel der Regelung ist es, einen Störschall $st(n)$, der beispielsweise durch einen Motor verursacht wird, an einem Fehlermikrofon zu dämpfen. Der zugehörige Vorgang kann systemtheoretisch, wie in Abbildung 2 dargestellt, modelliert werden. Dabei wird der Lärm $st(n)$ durch die Primärstrecke $P(z)$ übertragen. Der daraus resultierende unbekannt Störschall $d(n)$, wird mit einem Gegenschall $y(n)$, der mit Hilfe eines digitalen Signalprozessors (DSP) erzeugt wird, am Fehlermikrofon überlagert. Durch Interferenz der Schallwellen entsteht dort die Regeldifferenz $e(n)$. Die Sekundärstrecke $S(z)$ beschreibt die akustische Übertragung unter Berücksichtigung aller

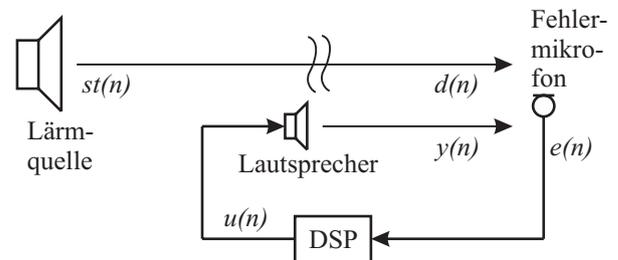


Abbildung 1: Prinzip der Feedback-Regelung zur aktiven Lärmreduktion

elektronischen Komponenten der DSP. $C(z)$ ist die Übertragungsfunktion des digitalen Reglers. Aus dieser Anordnung ergibt sich die Störübertragungsfunktion $F_z(z)$, mit der die ANC-Wirkung beschrieben werden kann:

$$F_z(z) = \frac{E(z)}{D(z)} = \frac{1}{1 + C(z) \cdot S(z)}. \quad (1)$$

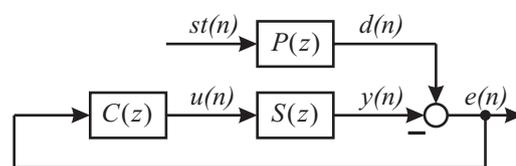


Abbildung 2: Blockdiagramm zur Feedback-Regelung

Für die Auslegung der FB-Regelung soll (1) optimiert werden. Dafür wird im ersten Schritt dieses regelungstechnische Problem vereinfacht: Jedes lineare, zeitinvariante, digitale Übertragungsglied $S(z)$ kann in einen minimalphasigen Anteil $S_{mp}(z)$ und einen Allpass $S_{ap}(z)$ zerlegt werden:

$$S(z) = S_{mp}(z) \cdot S_{ap}(z). \quad (2)$$

Der minimalphasige Anteil ist invertierbar. Wird nun ein Regler $C(z) = C^*(z) \cdot S_{mp}^{-1}(z)$ verwendet, so vereinfacht sich die Übertragungsfunktion (1) zu [3]:

$$F_z(z) = \frac{1}{1 + C^*(z) \cdot S_{ap}(z)}. \quad (3)$$

In einer Reihe von Messungen mit unterschiedlichen Probanden (siehe Abbildung 3) hat sich gezeigt, dass die großen interpersonellen Varianzen vor allem in $S_{mp}(z)$ vorkommen, während $S_{ap}(z)$ annähernd konstant ist.

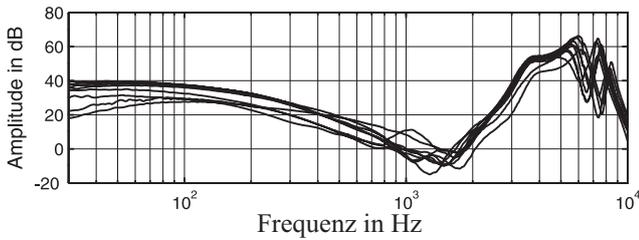


Abbildung 3: Gemessene Sekundärstrecken $S(z)$ des selben In-Ear-Kopfhörers bei unterschiedlichen Probanden

Bei einem konstanten Modell der Regelstrecke ist es möglich, die Strecke intern mit

$$C^*(z) = \frac{C_{IMC}(z)}{1 - C_{IMC}(z) \cdot \hat{S}_{ap}(z)} \quad (4)$$

nachzubilden, wie in Abbildung 4 dargestellt [2]. Dadurch ist es möglich, die zu minimierende Störung $d(n)$ durch $\hat{d}(n)$ abzuschätzen. Bei perfektem internen Modell

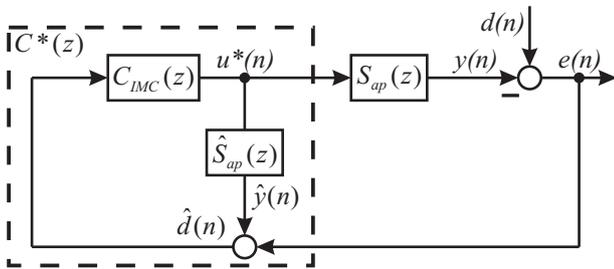


Abbildung 4: Einsatz eines internen Modells zur Vereinfachung der Regelung

$\hat{S}_{ap}(z) = S_{ap}(z)$ vereinfacht sich Formel (3) und aus dem FB- wird ein FF-Problem:

$$F_z(z) = 1 - C_{IMC}(z) \cdot S_{ap}(z). \quad (5)$$

Nun ist es möglich, den quadratischen Fehler $e(n)^2$ beispielsweise mit Hilfe des FxLMS-Algorithmus zu minimieren [1], um somit ein optimales Filter $C_{IMC}(z)$ und über Formel (4) einen Optimalregler zu bestimmen. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 5 dargestellt. Für ei-

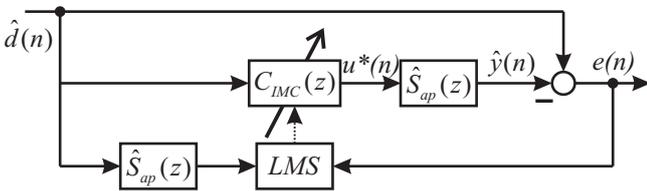


Abbildung 5: Optimierung des Reglers mit der quadratischen Minimierung des Fehlers $e(n)^2$ durch das FxLMS-Verfahren

ne feste Sekundärstrecke ergibt sich bei Vorgabe einer zu minimierenden Störung $d(n)$ der Optimalregler zu:

$$C(z) = S_{mp}^{-1}(z) \cdot \frac{C_{IMC}(z)}{1 - C_{IMC}(z) \cdot S_{ap}(z)}. \quad (6)$$

Um dieses Vorgehen auf mehrere Probanden zu erweitern, ist es möglich einen Kompromissregler mit Formel

(6) zu ermitteln, bei dem jedoch ein durchschnittliches inverses minimalphasiges Modell $\hat{S}_{mp}^{-1}(z)$ verwendet werden muss. Dieses kann beispielsweise durch Mittelung über mehrere Probanden geschehen.

Ergebnisse

Wird ein Kompromissregler auf die oben beschriebene Weise berechnet, so ergeben sich für eine Anregung $d(n)$ und die gemessenen Probanden (vgl. Abb. 3) die in Abbildung 6 dargestellten simulierten Dämpfungskurven. Auffällig ist dabei, dass die Wirkungsweise des Reglers zwar variiert, jedoch nicht in der Größenordnung wie die Sekundärstrecken $S(z)$. Das liegt vor allem daran, dass der Optimalregler vorwiegend im Frequenzbereich unterhalb von 700 Hz verstärkt, aber ist zum Teil auch auf die typischen Eigenschaft von Regelkreisen zurückzuführen, Varianzen der Regelstrecke auszugleichen.

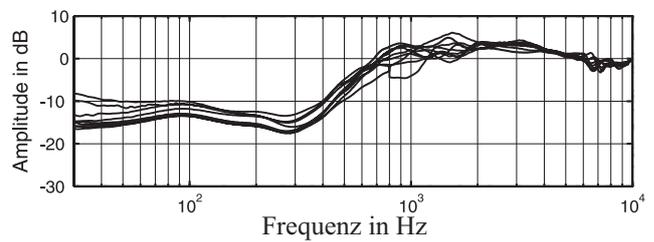


Abbildung 6: Dämpfung des Störschalls durch den Einsatz eines Kompromissreglers bei unterschiedliche Probanden

Zusammenfassung

In diesem Paper wurde ein Auslegungsmethode vorgestellt, mit der Optimalregler erstellt werden können. Dies wurde am Beispiel von ANC-Kopfhörern gezeigt, bei denen für einen Probanden und eine Störanregung $d(n)$ der Optimalregler berechnet werden kann. Da bei den verwendeten In-Ear-Kopfhörern starke interpersonelle Varianzen in der Sekundärstrecke das Auslegen von ANC-FB-Reglern erschweren, wurde diese Auslegungsmethode erweitert, so dass ein Kompromissregler ermittelt werden kann, der diese Varianzen mit Hilfe eines durchschnittlichen inversen minimalphasigen Modell zum Teil ausgleicht. Das führt in vielen Fällen dazu, dass die ANC-Wirkung bei allen Probanden ähnlich ist.

Das Projekt wird aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und des Landes Niedersachsen gefördert.

Literatur

- [1] Kuo S. M., Morgan D.: Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations. John Wiley & Sons, New York, 1995
- [2] Elliott S. J., Nelson P. A.: Active Noise Control. IEEE Signal Processing Magazine (1993), 12-35
- [3] Widrow B., Stearns S.: Adaptive signal processing. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1985