

## Aktive Schallreduktion mit Ohrkanalhörern

Sylvia Priese<sup>1</sup>, Christoph Bruhnken<sup>1</sup>, Daniel Voss<sup>2</sup>, Hatem Foudhaili<sup>2</sup>,  
Eduard Reithmeier<sup>1</sup>, Jürgen Peissig<sup>2</sup>

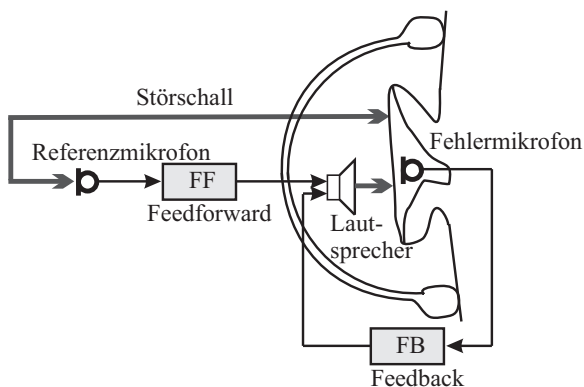
<sup>1</sup> LUH- Institut für Mess- und Regelungstechnik, 30167 Hannover, Deutschland, E-Mail: Sylvia.Priese@imr.uni-hannover.de

<sup>2</sup> Sennheiser electronic GmbH & Co. KG, 30900 Wedemark, Deutschland, E-Mail: Daniel.Voss@sennheiser.com

### Einleitung

Lärm kann stören, belasten oder sogar gesundheitsschädlich sein. Kopfhörer mit aktiver Schallreduktion (ANC-Active Noise Control) können insbesondere auf Reisen einen erheblichen Komfortgewinn erzielen. Im Flugzeug, in der Bahn, auf der Straße oder auch am Arbeitsplatz bieten sie die Möglichkeit den umgebenden Lärm zu reduzieren.

Ende der 80er Jahre brachten Bose und Sennheiser unabhängig voneinander die ersten Pilotenkopfhörer mit ANC auf den Markt [1]. Daraufhin folgten bei den ohrumschließenden und ohraufliegenden Kopfhörern im Professional-Bereich auch verschiedenste Consumer-Produkte. Darin finden zwei grundlegende Regelstrategien, einzeln aber auch in Kombination miteinander, Verwendung: Feedback und Feedforward, siehe Abbildung 1. Bei der Feedback-Regelung wird der Störschall mit einem Fehlermikrofon im Inneren des Kopfhörers aufgenommen und auf den Lautsprecher zurückgeführt. Im Gegensatz dazu wird für die Feedforward-Regelung Umgebungslärm mit einem Referenzmikrofon außen am Kopfhörer aufgenommen und zu einem gegenphasigen Kompensationschall weiterverarbeitet [1].



**Abbildung 1:** Kombinierte Feedback- und Feedforward-Regelung bei ohrumschließendem Kopfhörer.

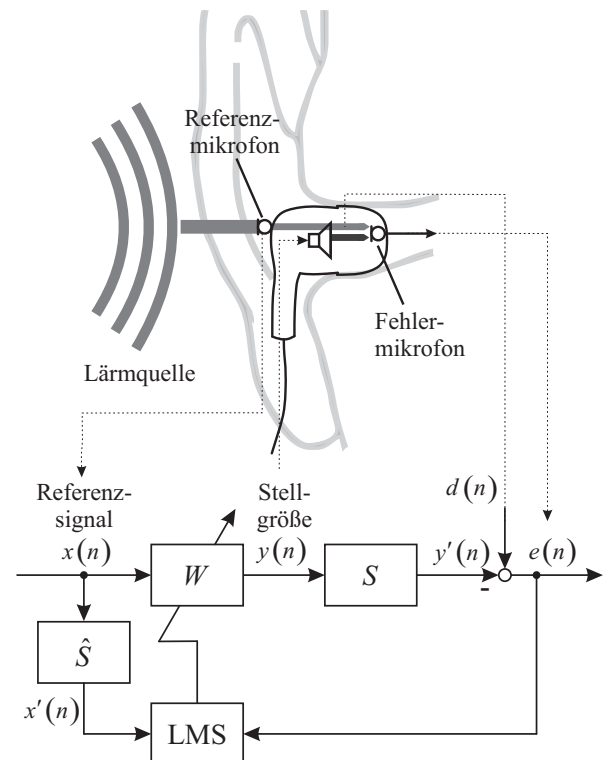
In den letzten Jahren wurde das Sortiment der ANC-Kopfhörer auch auf Ohrkanalhörer (In-Ear) erweitert. Diese weisen eine gute passive Dämpfung auf und sind zusätzlich mit einer Feedforward-Regelung zur aktiven Schallreduktion ausgestattet. Die kleine und leichte Bauweise findet insbesondere im Consumer-Bereich Verwendung. Besonders gute Dämpfungsergebnisse werden mit digitalen, manuell einstellbaren oder teiladaptiven Regelungen erzielt. Diese verfügen über mehrere voreingestellte ANC-Filter unterschiedlicher Wirkung, die automa-

tisch abhängig vom Umgebungslärm oder manuell vom Benutzer ausgewählt werden, wie der MDR-NC300D von Sony oder der CXC 700 von Sennheiser. Zudem lassen sich auch beide Kopfhörer durch manuelle Einstellung an die Ohrgeometrie des Nutzers anpassen.

Eine volladaptive Feedforward-Regelung für ohrumschließende Kopfhörer wird schon seit einiger Zeit erforscht [1] und fand 2011 erstmalig Verwendung in dem Pilotenheadset S1 Digital von Sennheiser.

Im Folgenden wird die volladaptive Umsetzung für In-Ear-Kopfhörer erprobt und hinsichtlich der oft verwendeten statischen Filter analysiert.

### Adaptive Feedforward-Regelung für In-Ear-Kopfhörer



**Abbildung 2:** Modellbildung und Struktur der Signalverarbeitung einer adaptiven Feedforward-Regelung für In-Ear-Kopfhörer

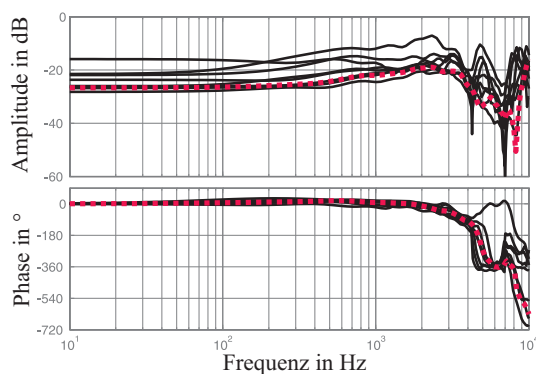
Abbildung 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines In-Ear-Kopfhöreres mit Referenz- und Fehlermikrofon und den für eine adaptive Feedforward-Regelung notwendigen Signalfluss [2]. Das Fehlermikrofon nimmt das Signal  $e(n)$  auf, welches sich aus der Überlagerung der Störung  $d(n)$

mit dem Gegenschall  $y'(n)$  ergibt. Die Sekundärstrecke  $S$  entspricht dem Übertragungsverhalten vom Filter  $W$  zum Fehlermikrofon und beinhaltet neben dem akustischen Weg der Schallübertragung ins Ohr auch alle notwendigen Signalwandlungen. Der Filter  $W$  ist ein FIR-Filter (Finite-Imulse-Response) mit den Filterkoeffizienten  $\bar{w}(n)$ , welcher das Referenzsignal  $x(n)$  zur Ausgabe auf den Lautsprecher weiterverarbeitet. Die Filterkoeffizienten werden mit einem FxLMS-Algorithmus (filtered- $x$ -least-mean-square) fortlaufend optimiert [2].

Diese Regelung wurde für einen Prototypenkopfhörer mit integrierten Mikrofonen auf einem SHARC-Prozessor mit Gleitkommaarithmetik umgesetzt.

## Analyse der adaptiven Regelung

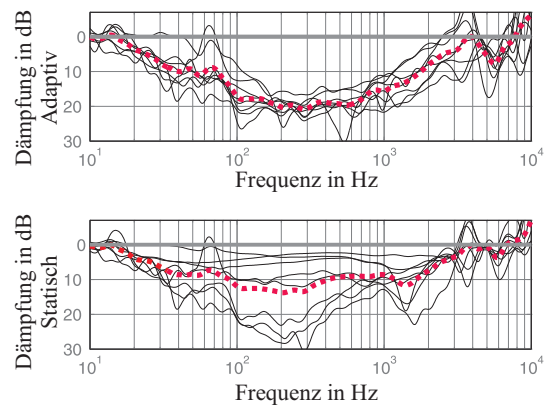
Die auf dem Markt befindlichen In-Ear-ANC-Kopfhörer sind üblicherweise mit einer rein statischen Feedforward-Regelung ausgestattet. Jedoch zeigten schon erste Messungen der Sekundärstrecke große Varianzen, welche auf verschiedene Ohrgeometrien und unterschiedliche Sitzigenschaften zurückzuführen sind [3],[4]. Deshalb ist es interessant die Dämpfung eines statischen Kompromissfilters im Vergleich zum adaptiven Filter zu untersuchen. Dafür wurde mit Hilfe des adaptiven Algorithmus für verschiedene Probanden bei einer stationären Störangregung, der sich einstellende optimale Filter bestimmt und die dabei resultierende aktive Dämpfung am Fehlermikrofon gemessen. Die unterschiedlichen sich einstellenden Filter sind in Abbildungen 3 in schwarz dargestellt. Die gestrichelte rote Kurve zeigt einen statischen Kompromissfilter, welcher so ausgelegt ist, dass die beste mittlere Kompensation über alle Probanden erzielt wird.



**Abbildung 3:** Schwarz: Bodediagramm des optimalen Filters des FxLMS-Algorithmus bei einer Anregung für unterschiedliche Probanden; Rot gepunktet: Statischer Kompromissregler

Die aktive Dämpfung variiert dabei stark, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. So übertreffen die adaptiven Filter den statischen Filter in der Dämpfung deutlich, speziell im Bereich 100 bis 1000 Hz.

Zusätzlich zu dem Ausgleich der interpersonellen Varianzen liegt ein weiterer Vorteil der adaptiven Filterung in der Anpassung an das Spektrum des Umgebungslärms und die gezielte Dämpfung dominanter Schallanteile.



**Abbildung 4:** Vergleich der aktiven Dämpfung des adaptiven Filters im Vergleich zum mittleren statischen Filter bei unterschiedlichen Probanden in schwarz mit mittlerer Dämpfung in rot gepunktet; Oben: adaptiv; Unten: statisch

## Zusammenfassung

Statische Filter, wie sie vorrangig für In-Ear-ANC-Kopfhörer verwendet werden, zeigen je nach Nutzer stark variierende Dämpfungsergebnisse. Bei den digitalen, teiladaptiven Kopfhörern können diese personenbedingten Unterschiede teilweise schon durch Einstellparameter ausgeglichen werden. Zudem stehen mehrere ANC-Filter für unterschiedliche Störspektrum zur Verfügung. Ein volladaptiver Algorithmus, dessen Umsetzung hier gezeigt wurde, findet automatisch für jeden Nutzer und jede beliebige Störangregung das optimale Filter und nicht nur für vordefinierte Störspektren. Insbesondere dominante schmalbandige Störanteile können damit effektiv bekämpft werden. So werden mit adaptiven Filtern meist bedeutend bessere Dämpfungsergebnisse erzielt als mit statischen Filtern. Da zudem keine manuelle Personenanpassung mehr erforderlich ist, ist der adaptive Filter auch nutzerfreundlicher.

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

## Literatur

- [1] Foudhaili, H.: Kombinierte Feedback- und adaptive Feedforward-Regelung für aktive Lärmreduktion in einem Kommunikations-Headset, Shaker Verlag, Aachen, 2008
- [2] Kuo, S.M.; Morgan, D.R.: Active Noise Control Systems Algorithms and DSP Implementation, Wiley-Interscience, New York, 1996
- [3] Poldy, C.: Headphone fundamentals. Tutorial AES 120th Convention, Paris, 2006
- [4] Valente, M.; Potts, Lisa G.; Valente, L. Maureen; Vass, W.; Goebel, J.: Intersubject variability of real-ear sound pressure level: conventional and insert earphones, Hearing Aid Research, 1994