

Headset mit aktiver Schallreduktion für Hubschrauberpiloten

Florian Ernst¹, Sten Böhme², Delf Sachau³

¹ Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Professur Mechatronik, E-Mail: ernstf@hsu-hh.de

² Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, E-Mail: sten.boehme@haw-hamburg.de

³ Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Professur Mechatronik, E-Mail: delf.sachau@hsu-hh.de

Einleitung

Hubschrauberpiloten sind im Cockpit einer hohen Lärmbelastung ausgesetzt, die sich aus quasistationären tonalen Anteilen indiziert durch Triebwerk und Rotor sowie breitbandigen Anteilen anderer Systeme zusammensetzt. In der Regel werden die Grenzwerte des Arbeitsschutzes dabei deutlich überschritten. Um die Lärmbelastung zu reduzieren, wird im Flugbetrieb passiver Lärmschutz in Form von Headsets oder Helmen mit Sprechgarnitur eingesetzt. Oft wird sogar ein zusätzlicher Gehörschutz im Gehörgang getragen. Aufgrund der lärmbelasteten Umgebung werden andere akustische Signale von Funk und Intercom stark verstärkt, um die Sprachverständlichkeit zu erhöhen.

Um die Lärmbelastung zu reduzieren, wird ein aktives Gegenschall (engl. Active Noise Control) – System für ein Piloten-Headset entworfen und untersucht. Das System besteht aus zwei Referenzmikrofonen an den Außenseiten und zwei Fehlermikrofonen in den Kopfhörermuscheln des Headsets. Zur Geräuschminimierung wird ein hybrider adaptiver Algorithmus mit Steuerung (engl. Feedforward-Control) und Regelung (engl. Feedback-Control) verwendet. Die Regelung minimiert die dominanten tonalen Komponenten, während die adaptive Steuerung zur Minimierung der breitbandigen Lärmanteile verwendet wird.

Es werden der Algorithmus, die Synthese des Primärfelds und die experimentellen Ergebnisse mit einem Labordemonstrator vorgestellt. Das Primärfeld entspricht dabei in spektraler Verteilung dem erwarteten Schallfeld in einem Hubschrauber. Zuletzt erfolgt ein Vergleich mit kommerziell verfügbaren Kopfhörern.

Adaptiver Algorithmus

Digitale ANC Systeme berechnen ein Stellsignal aus einem gemessenen Referenz- oder Störsignal und geben dieses über Lautsprecher aus, so dass sich Lärm und Gegenschall überlagern und das verbleibende Residuum minimiert wird.

Zur Minimierung des Störschalls wurde ein digitaler adaptiver Algorithmus verwendet. Dabei handelt es sich um eine modifizierte Version des Least Means Squares (LMS) Algorithmus, der um eine normalisierte Schrittweite und einen Leakage-Faktor erweitert wurde und zusätzlich den Sekundärpfadeinfluss kompensiert.

Zur Ermittlung eines optimalen Aufbaus wurde eine Feedforward-, Feedback- und eine hybride Variante implementiert. Das Blockschaltbild des Hybriden-Filters ist in Abbildung 1 dargestellt. Es handelt sich dabei um einen parallelen Betrieb von Feedforward- und Feedback-Filter, die jeweils in der Abbildung zu erkennen sind. Beide Filter sind ähnlich aufgebaut, das Feedforward-Filter verwendet jedoch

ein zum Abtastzeitpunkt n gemessenes Referenzsignal $x(n)$ zur Berechnung des Stellsignals $y(n)$ und zur Adaption der Koeffizienten, während das Feedback-Filter hierzu ein geschätztes Störsignal $\hat{d}(n)$ aus dem Fehlersignal $e(n)$ berechnet. Damit die Einflüsse vom Feedforward-Anteil nicht die Berechnung des Störsignals beeinflussen, werden die Stellsignale vom Feedforward- und Feedback-Filter beim Hybrid-System in $y(n)$ zusammengeführt und nach der Faltung mit dem Sekundärstreckenmodell $\hat{S}(z)$ mit dem Fehlersignal $e(n)$ addiert.

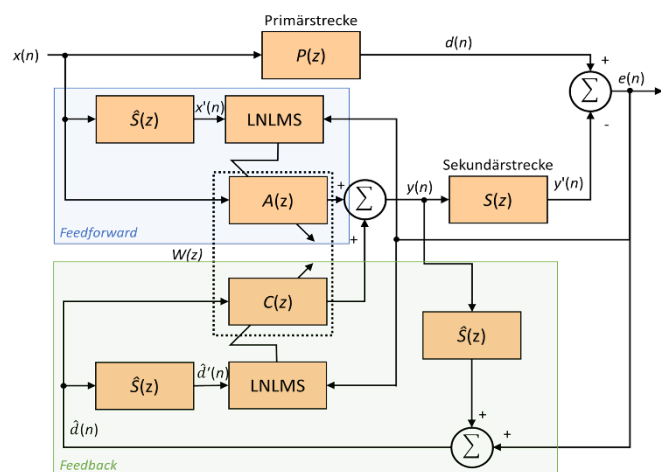


Abbildung 1: Blockschaltbild des Hybrid-FxLNLMS-Filters [1].

Integration von Sensoren und Aktuatoren

Um das Gegenschallsystem betreiben zu können, wurden zusätzliche Fehler- und Referenzmikrofone in den Kopfhörer integriert. Als Aktuatoren kamen die im Kopfhörer verbauten Lautsprecher zum Einsatz. Verwendet wurde der Kopfhörer GXT 414 der Marke Trust Gaming.

Die Position des Fehlermikrofons in der Kopfhörermuschel hat einen großen Einfluss auf die erzielbare Reduktion. Untersuchungen von Kuo et al. zufolge liegt die optimale Position für das Fehlermikrofon im geschlossenen Kopfhörer vorn unten in der Ohrmuschel [2]. An dieser Stelle fallen die Abweichungen zwischen dem Fehlermikrofon und einem im Gehörgang platzierten Monitormikrofon am geringsten aus. Diese Mikrofonposition wurde im Demonstrator übernommen und ist in Abbildung 2 rechts zu sehen.

Versuchsaufbau und -durchführung

Die Messungen wurden in einem reflexionsarmen Raum (nach DIN EN ISO 3745, Genauigkeitsklasse 1, $f_u \leq 100$ Hz) durchgeführt. Für die Signalverarbeitung wurde das Rapid Prototyping System MicroLabBox von dSPACE verwendet. Dieses System verfügt über einen Prozessor zur Signalverarbeitung sowie über 16-Bit A/D- und D/A-Wandler

für die Signalaufzeichnung und -ausgabe. Die Modellentwicklung erfolgte mit Matlab Simulink.

Der Labordemonstrator wurde an einem Kunstkopf HME III der Firma Head Acoustics getestet, dessen integrierte Ohrkanalmikrofone Aussagen über die tatsächlichen am Ohr vorliegenden Reduktionen ermöglichen (s. Abb. 2).

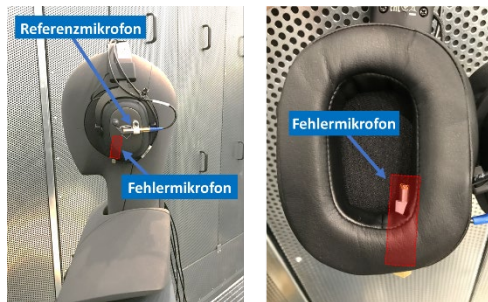


Abbildung 2: Labordemonstrator am Kunstkopf Head Acoustics HME III. Die Positionen des linken Referenzmikrofons außen (links) und des Fehlermikrofons innen (rechts) sind dargestellt. [1]

Der verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Primärfeld wird auf dem dSPACE-System synthetisiert und über einen 2 kHz Rekonstruktions-Tiefpassfilter und einen nachfolgenden Verstärker über einen Lautsprecher vom Typ IMG Stage LinePAB-515/BL ausgegeben. Die Referenz-, Fehler und Monitormikrofone sind über 2 kHz Antialiasing-Tiefpassfilter an das dSPACE-System angeschlossen. Das Gegenschallsignal wird vom dSPACE-System berechnet und über einen 2 kHz Rekonstruktions-Tiefpassfilter an die Kopfhörerlautsprecher übertragen. Die Abtastrate beträgt 4096 Hz.

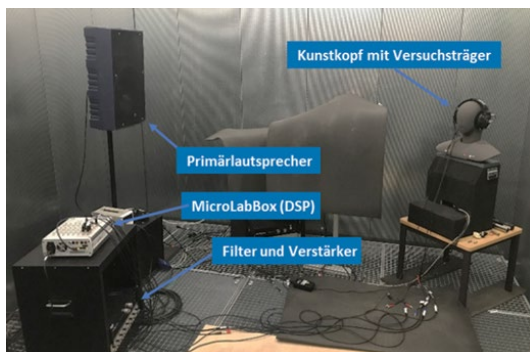


Abbildung 3: Messaufbau mit verwendeten Komponenten im Schallmessraum [1]

Verwendetes Primärfeld

Für die Analyse der Reduktion vom Labordemonstrator wird ein Primärfeld verwendet, welches in tonaler Färbung dem erwarteten Schallfeld in einem Hubschrauber entspricht. In einer Studie von Johansson et al. [3] wurde das Schallfeld im Hubschrauber „Super Puma“ untersucht. Dabei wurden mehrere dominante tonale Frequenzen identifiziert, die sich aus der Blattfolgefrequenz des Hauptrotors sowie der Höherharmonischen zusammensetzen. Zusätzlich liegen rauschförmige Anteile bis etwa 300 Hz vor, die von den

tonalen Spitzen überlagert werden. Im Flugzustand liegt die Blattfolgefrequenz bei 17,7 Hz und somit im Infraschall-Bereich. Diese Frequenzen sind vom menschlichen Gehör nicht wahrnehmbar, können aber u.a. zu Kopfschmerzen, Ermüdung, Schwindel und Übelkeit führen [4].

Das Schallfeld wurde in der Untersuchung auf Grundlage dieser Analyse erstellt. Es besteht aus einem bandbegrenzten Rauschen, überlagert von mehreren tonalen Frequenzen. Hierzu wurden 10 Terzmittenfrequenzen zwischen 50 und 400 Hz verwendet, die von rauschartigen Anteilen im Bereich 100 – 300 Hz überlagert werden. Das Primärfeld entspricht somit grundsätzlich den im Hubschrauber vorherrschenden Bedingungen. In Abbildung 4 ist das Frequenzspektrum des Schallfeldes dargestellt, gemessen am Referenz- und Fehlermikrofon des Labordemonstrators sowie am Monitormikrofon des Kunstkopfes. Der Schalldruckpegel wird im Gesamtbereich bis 2048 Hz und im angeregten Teilbereich 45-405 Hz bestimmt. Er beträgt in beiden Bereichen ca. 91 dB am Referenz-, Fehler- und Monitormikrofon. Die passive Reduktion durch den Kopfhörer nimmt ab 200 Hz Einfluss. Dies macht sich aufgrund der tieffrequenten Anteile des Primärfeldes aber nicht im Gesamtschalldruckpegel bemerkbar.

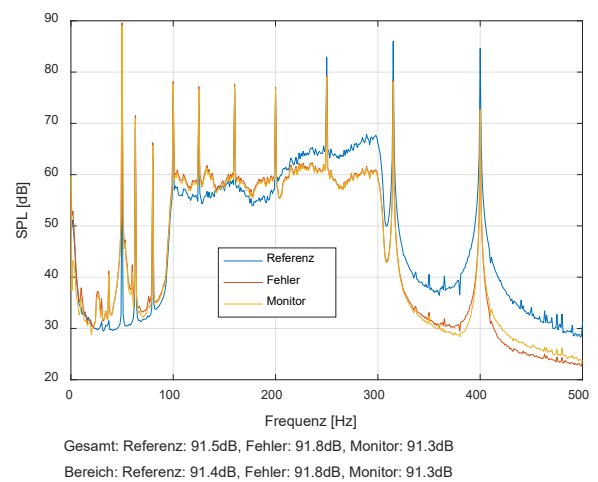


Abbildung 4: Primärschallfeld [1]

Experimentelle Bestimmung optimaler Parameter

Die drei Filtervarianten wurden in Messreihen mit variierenden normalisierten Schrittweiten α und verschiedenen Filterlängen analysiert. Zur Berechnung der Reduktionen wurden zu Beginn Messungen ohne ANC durchgeführt und das Spektrum am Fehlermikrofon als Referenz verwendet. Die Messungen wurden anschließend mit eingeschaltetem ANC wiederholt. Aus der Differenz des am Fehlermikrofon gemessenen Schalldruckpegels ohne und mit ANC ergibt sich die Reduktion in dB. Je höher dieser Reduktionswert ausfällt, desto besser ist das ANC-System.

Die Ergebnisse der Messreihen sind in Tabelle 1 unter Angabe der Parameter für das Feedforward-, Feedback- und Hybrid-Filter dargestellt. Die Werte sind dabei mit einer Farbskala hinterlegt, bei der hohe Reduktionen grün und niedrige Werte

rot dargestellt sind. Messungen mit instabilem Verhalten wurden mit 0 dB Reduktion angegeben.

Tabelle 1: Erzielte Reduktionen am Fehlermikrofon (Angaben in dB) [1]

taps	alpha	Reduktion [dB], Bereich (45-405 Hz)		
		Feedforward	Feedback	Hybrid (FF & FB)
64	0,01	5,5	11,6	23,2
64	0,025	5,3	0	24,4
64	0,05	4,9	0	25,2
64	0,075	4,5	0	25,4
64	0,1	4	0	25
128	0,01	14,8	12,6	25,5
128	0,025	15,9	14,5	26,9
128	0,05	15,8	15,9	26,5
128	0,075	15,4	0	26,2
128	0,1	14,9	0	24,9
256	0,01	21,1	13,1	25
256	0,025	25,7	15,2	26,8
256	0,05	26,1	16,7	27,9
256	0,075	26,1	17,1	27,8
256	0,1	25,9	17,2	26,6
512	0,01	23,3	13,2	23,7
512	0,025	25,6	15,2	26,4
512	0,05	26,7	16,6	27,7
512	0,075	27,3	17,1	27,8
512	0,1	27,4	17,3	25,8
768	0,01	22,1	12,6	22,4
768	0,025	25	14,5	25,3
768	0,05	26,3	15,8	26,5
768	0,075	26,9	16,4	26,7
768	0,1	27,4	16,8	22,8
1024	0,01	21,2	12,2	21,4
1024	0,025	24,2	14	24,2
1024	0,05	25,8	15,4	25,5
1024	0,075	26,3	15,9	25,7
1024	0,1	26,8	16,1	18,2

In den Ergebnissen ist der Parametereinfluss auf den Reduktionserfolg der Filter zu erkennen. Das Hybrid-Filter erzielt über alle Filterlängen hinweg über 20 dB Reduktion, während das Feedforward-Filter erst ab 256 Taps Reduktionen im Bereich oberhalb von 20 dB erreicht. Das Feedback-Filter erzielt über alle Filterlängen ähnliche Reduktionswerte, eine stabile Regelung ist jedoch erst ab 256 Taps über alle Schrittweiten hinweg möglich. Die Ergebnisse vom Feedback-Filter liegen mit bis zu 17 dB allgemein deutlich unter denen vom Feedforward- und Hybrid-Filter.

Das Hybrid-Filter erreicht im synthetisierten Schallfeld des Hubschraubers mit über 27 dB die beste Reduktion. Der Feedback-Anteil des Hybrid-Filters ermöglicht zudem ein stabileres Verhalten bei Veränderungen im Primärfeld, beispielsweise durch die Kopfbewegung des Piloten. Der Hybrid-Ansatz wurde daher für den Labordemonstrator gewählt. Als Parameter wurden eine Filterlänge von 512 Taps und eine normalisierte Schrittweite von $\alpha = 0,075$ gewählt.

Das ermittelte Schallspektrum am Referenz- und Fehlermikrofon des Labordemonstrators mit und ohne ANC sind in Abbildung 5 dargestellt. Die tonalen Anteile des Primärfelds sind im Spektrum des Fehlermikrofons nicht mehr zu erkennen. Die gemessene Reduktion am Fehlermikrofon beträgt 25,9 dB im Gesamtbereich und 27,8 dB im angeregten Bereich (45-405 Hz). In Abbildung 6 ist die Reduktion pro Frequenz als Differenz der Spektren am Fehlermikrofon dargestellt. Im Bereich des bandbegrenzten Rauschens sind im Schnitt 20 dB Reduktion zu erkennen. Es kommt jedoch auch zu einzelnen Verstärkungen von bis zu -

10 dB, insbesondere im Bereich unter 50 Hz. Über 400 Hz ist keine Reduktion mehr zu erkennen.

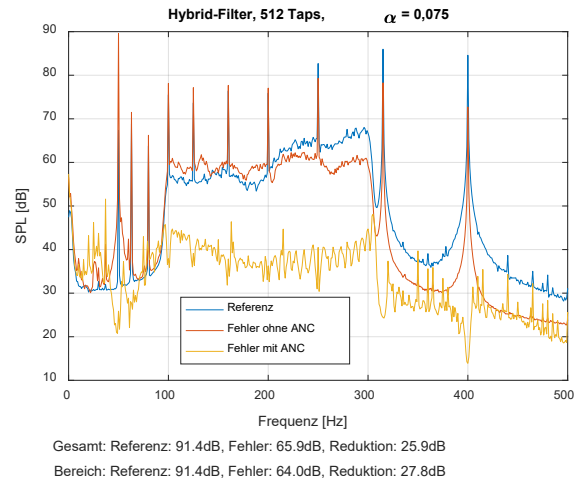


Abbildung 5: Schallspektrum am Referenz- und Fehlermikrofon, mit und ohne ANC [1]

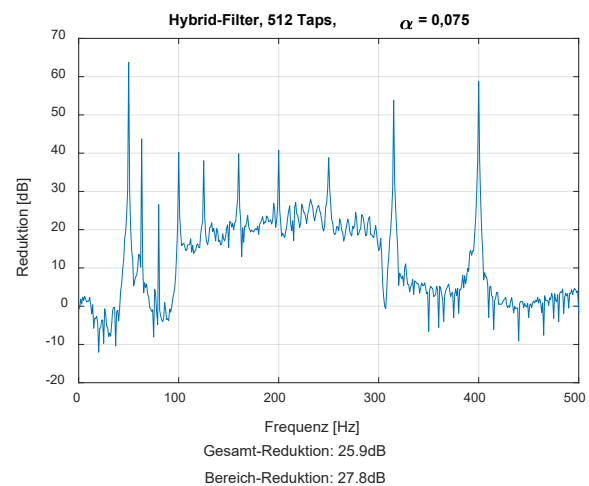


Abbildung 6: Reduktion am Fehlermikrofon [1]

Vergleichstest mit kommerziell verfügbaren Systemen

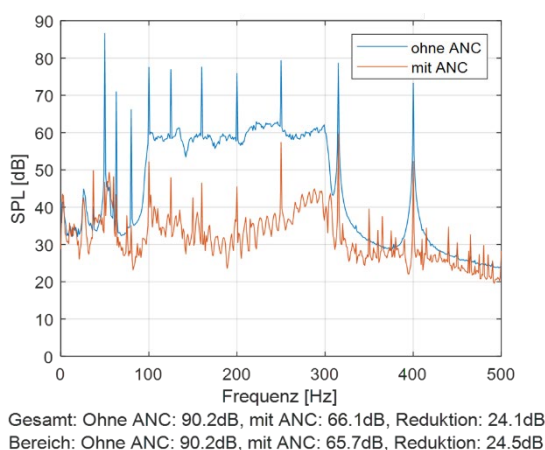
Der Labordemonstrator wurde abschließend mit kommerziell verfügbaren Systemen verglichen. Die Kopfhörer wurden dabei im selben Testaufbau im gleichen Schallfeld jeweils mit und ohne eingeschalteter ANC-Funktion gemessen. Die Messung erfolgte am Monitormikrofon des Kunstkopfes, um vergleichbare Bedingungen bei den Messungen zu gewährleisten.

Bei den im Test verwendeten kommerziellen ANC-Kopfhörern handelt es sich um ein Consumer-Headset aus dem Jahr 2018 (Kopfhörer 1) und einem Consumer-Kopfhörer aus dem Jahr 2009 (Kopfhörer 2), die jeweils zu den besten Modellen der Zeit gehören. Zusätzlich wurde ein Luftfahrt-Headset mit analogem ANC aus dem Jahr 2010 (Kopfhörer 3) verwendet. Die erzielten Reduktionen sind in Tabelle 2 jeweils im Gesamtbereich 0-2048 Hz und im angeregten Bereich 45-405 Hz dargestellt.

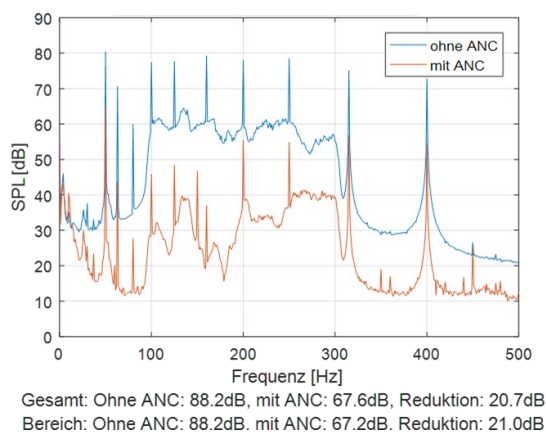
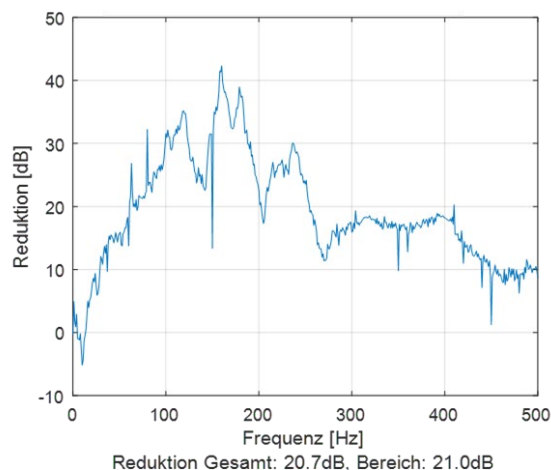
Tabelle 2: Erzielte Reduktionen der Kopfhörer in dB [1]

	Gesamt 0-2048 Hz	Bereich 45-405 Hz
Labordemonstrator	24,1	24,5
Kopfhörer 1	20,7	21
Kopfhörer 2	16,8	16,9
Kopfhörer 3	10,7	10,7

Im synthetisierten Primärfeld des Hubschraubers erzielt der Labordemonstrator mit Hybrid-Filter im Vergleich die höchsten Reduktionen im Test. Die Reduktionswerte liegen dennoch um 3 dB niedriger als in Tabelle 1. Das Schallspektrum am Monitormikrofon ist in Abb. 7 dargestellt. Im Gegensatz zu Abb. 5 sind hier die tonalen Anteile noch deutlicher zu erkennen, was auf den akustischen Pfad zwischen Fehler- und Monitormikrofon zurückzuführen ist. Die Einführung eines virtuellen Mikrofons stellt hier einen möglichen Ansatz zur Kompensation dar.

**Abbildung 7:** Schallspektrum mit und ohne ANC vom Labordemonstrator am Monitormikrofon [1]

Zum Vergleich ist das Schallspektrum am Monitormikrofon vom Kopfhörer 1 in Abb. 8 sowie die Reduktion pro Frequenz in Abb. 9 dargestellt. Die tonalen Schallfeldanteile sind noch deutlich zu erkennen. Im Vergleich zum Labordemonstrator ist jedoch eine bessere Reduktion von bis zu 18 dB im breitbandigen Bereich, insbesondere oberhalb von 300 Hz, zu erkennen.

**Abbildung 8:** Schallspektrum mit und ohne ANC vom Kopfhörer 1 am Monitormikrofon [1]**Abbildung 9:** Gemessene Reduktion vom Kopfhörer 1 am Monitormikrofon [1]

Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, dass ein preiswerter Kopfhörer eine geeignete Grundlage für einen ANC-Kopfhörer darstellen kann. Das Verhalten von Feedforward-, Feedback- und hybriden adaptiven Filtern konnte im Rahmen einer Testreihe bei verschiedenen Filterlängen und normalisierten Schrittweiten charakterisiert werden. Im synthetisierten Schallfeld des Hubschraubers erzielt das Hybrid-Filter eine Reduktion bis zu 27 dB bzw. 20 dB(A) und übertrifft damit kommerziell verfügbare ANC-Modelle. Insbesondere die tonalen Anteile, die im Schallfeld des Hubschraubers dominant vorliegen, konnten gut reduziert werden. Die in der Messung zwischen Fehler- und Monitormikrofon erkennbaren Differenzen beeinträchtigen die Reduktion am Ohr. Dies lässt sich durch die Einführung eines virtuellen Mikrofons kompensieren. Weiterhin wird vermutet, dass eine höhere Abtastfrequenz eine verbesserte Reduktion der breitbandigen Anteile ermöglicht.

Danksagung

Diese Veröffentlichung ist im Rahmen des dtec.bw Projekt MissionLab entstanden. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Ernst, F.: *Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchssträgers für den Einsatz von digitaler aktiver Geräuschunterdrückung bei Pilotenkopfhörern*. Hamburg, Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2021
- [2] Kuo, S. M., Mitra, S., & Woon-Seng, G.: Active noise control system for headphone applications. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* (vol. 14, no. 2), 2006
- [3] Johansson, S., Winberg, M., Lagö, T., & Claesson, I.: A New Active Headset for a Helicopter Application. In: *Proceedings of the 5th International Congress on Sound and Vibration*, 1997
- [4] Borgmann, R.: *Leitfaden „Nichtionisierende Strahlung“*. Infraschall. Fachverband für Strahlenschutz, FS-05-136-AKNIR, 2005