



Institut für Mess- und Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

Berechnungseffiziente Regelstrategien zur aktiven Lärmreduktion in Headsets

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieur

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.- Ing. Jens Graf

geboren am 28. Februar 1979, in Schlüchtern

2009



Institut für Mess- und Regelungstechnik
Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier
Institut für Mess- und Regelungstechnik
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. T. Ortmaier
Institut für Mechatronische Systeme
- Vorsitz: Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. H. K. Tönshoff
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen

Berichte aus dem Institut für Mess- und Regelungstechnik der
Leibniz Universität Hannover

Jens Graf

**Berechnungseffiziente Regelstrategien
zur aktiven Lärmreduktion in Headsets**

Shaker Verlag
Aachen 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2009

Umschlag:

Das Hintergrundbild zeigt eine Kollage vom Institutsgebäude an der Leibniz Universität Hannover aus verschiedenen Zeitepochen. Gestaltung: K. Salfeld

Copyright Shaker Verlag 2009

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8392-6

ISSN 1615-7184

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover. Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier gilt mein großer Dank für die wissenschaftliche Förderung sowie für die Übernahme des 1. Referats.

Weiter möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. T. Ortmaier, Leiter des Instituts für Mechatronische Systeme der Leibniz Universität Hannover für die Übernahme des Koreferats bedanken. Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. H. K. Tönshoff danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Außerdem möchte ich mich an dieser Stelle bei meinen Kollegen bedanken. Ihre Hilfsbereitschaft und moralische Unterstützung haben weite Teile dieser Arbeit fachlich und technisch geprägt. Vor allem meinem ehemaligen Kollegen Herrn Dr.-Ing. H. Foudhaili danke ich für die kreative und freundschaftliche Zusammenarbeit.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, durch deren Geduld und Beistand ich stets seelische und moralische Unterstützung erfuhr.

Hannover, Juli 2009

Jens Graf

Kurzfassung

Am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Leibniz Universität Hannover wurden bereits im Vorfeld dieser Dissertation Regelungskonzepte für ein digital-adaptives Headset zur aktiven Lärmreduzierung entwickelt. Aufbauend hierauf werden im Rahmen dieser Arbeit Regelungsstrategien vorgeschlagen, die im Hinblick auf die produktnahe Anwendung eine besonders Berechnungseffiziente Implementierung ermöglichen.

Die unterschiedlichen Regelungsstrategien verfolgen gleichermaßen das Ziel, die Leistung des Störlärms im Hörer des Headsets zu minimieren. Hierzu werden grundsätzlich die beiden Regelungskonzepte der Feedback-Reglung und der Feedforward-Regelung miteinander kombiniert. Die Regelungsansätze werden unterteilt in nicht-adaptive Regelsysteme und kombinierte Regelsysteme. Während die nicht-adaptiven Regelsysteme aus rein statisch implementierten Reglern bestehen, werden im Rahmen der kombinierten Regelsysteme nicht-adaptive Regler mit adaptiven Regelstrategien kombiniert.

Um eine adäquate Lärmreduzierung zu erzielen ist es in vielen Anwendungen ausreichend, leistungsstarke schmalbandige Komponenten des Störlärms zu dämpfen. Für diesen Anwendungsfall wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem es möglich ist schmalbandige dominante Störsignale effizient zu kompensieren. Das hierzu benötigte Referenzsignal wird im Gegensatz zu den aus der Literatur bekannten Methoden direkt aus dem Störschall generiert.

Zur breitbandigen Lärmreduktion wird zum einen ein Verfahren vorgestellt, dass eine teiladaptive Feedback-Feedforward-Reglerkombination realisiert und zum Anderen eine teiladaptive Feedback-Feedback-Reglerkombination. Hierbei besteht jeweils der teiladaptive Regler aus einer nicht-adaptiven sowie einer adaptiven Reglerkomponente. Durch die so erhaltene Reglerstruktur kann die Anzahl der adaptiven Parameter verringert werden, was eine erhebliche Reduktion des Berechnungsaufwandes zu Folge hat. Im Vergleich zur bekannten volladaptiven Regelung können so bis zu 50 Prozent der adaptiven Parameter eingespart werden.

Schlagworte:

Aktive Lärmkompensation/Lärmreduktion, ANC Headset, ANR Headset, teiladaptive Regelung, Kompensation dominanter Störfrequenzen.

Abstract

In the run-up to this thesis, control concepts for a digital adaptive headset for active noise reduction have already been developed at the Institute of Measurement and Automatic Control at the Leibniz Universität of Hanover. On the basis of this work computationally efficient control strategies that permit the saving of significant computational effort are developed.

The objective of the proposed control strategies is the minimization of the noise signal power inside the ear-cups of the headset. In order to accomplish this, two basic control approaches which are the feedback- and the feedforward-control approach are combined. The implemented combined control algorithms are subdivided into non-adaptive combined control systems and adaptive combined control systems. While in case of the first mentioned combined controllers purely non-adaptive controllers are implemented, the latter control strategies combine non-adaptive as well as adaptive control approaches.

In order to ensure adequate noise reduction, in many applications it is sufficient to reduce the narrowband components (tonal, dominant frequencies) of the disturbing noise. For such applications, a control approach is presented which effectively eliminates the dominant disturbing frequency. In contrast to well-known methods from the literature, in the framework of this approach the required reference signal directly is obtained from the disturbing noise.

For the reduction of broadband noise two combined control approaches are discussed: The partially adaptive feedback-feedforward-control approach and the partially adaptive feedback-feedback-control approach. Hereby, each partially adaptive controller basically consists of an adaptive as well as a non-adaptive control part. The partially adaptive control structure permits the decrease of the amount of adaptive parameters. This results in a significant reduction of the computational effort. In comparison to the fully adaptive control approach, up to 50 percent of the adaptive parameters can be saved.

Keywords:

Active noise control/reduction, ANC headset, ANR headset, partially adaptive control, compensation of dominant frequencies.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Schallbelastung und aktive Lärmreduzierung	1
1.2	Problemstellung	3
1.3	Zielsetzung	4
1.4	Gliederung der Arbeit	5
2	Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1	Anwendung von ANR-Headsets und Kopfhörern	7
2.1.1	Verfügbare ANR-Headsets und Kopfhörer	10
2.2	Das Prinzip der aktiven Lärmkompensation	12
2.2.1	Lärmkompensation mittels destruktiver Interferenz	12
2.2.2	Modellierung der akustischen Übertragungspfade	12
2.3	Nicht-adaptive Lärmkompensation	15
2.3.1	Feedback-Regelung nach dem Standard-Regelkreis	15
2.3.2	IMC-Feedback-Regelung	17
2.3.3	Feedforward-Steuerung	19
2.4	Adaptive Lärmkompensation - Breitbandiger Störlärm	20
2.4.1	Struktur des adaptiven Reglers	20
2.4.2	Lärmkompensation als Anpassungsproblem	23
2.4.3	Fehlerfläche und Optimalfilterung	24
2.4.4	Gradientenverfahren	26
2.4.5	Least Mean Squares (LMS) Algorithmus	28
2.4.6	Filtered-x Least Mean Squares (FxLMS) Algorithmus	28
2.4.7	Erweiterungen des FxLMS-Algorithmus	30
2.5	Adaptive Lärmkompensation - Schmalbandiger Störlärm	32
2.5.1	Adaptives Notch-Filter	33

2.6	Kombinierte ANR-Regelstrategien in der Forschung	35
2.6.1	IMC-Feedback- und adaptive Feedforward-Regelung	36
2.6.2	Standard Feedback- und adaptive Feedforward-Regelung	37
3	Berechnungseffiziente Regelstrategien	41
3.1	Kombination nicht-adaptiver Regelstrategien	41
3.1.1	Nicht-adaptive Feedback-Feedforward-Regelung	42
3.1.2	Richtungsabhängige Feedback-Feedforward-Regelung	46
3.2	Kombinierte nicht-adaptive und adaptive Regelstrategien	53
3.2.1	Nicht-adaptive Feedback-Feedforward-Regelung und adaptive Domi- nantenkompensation	54
3.2.2	Teiladaptive Feedback-Feedforward-Regelung	58
3.2.3	Teiladaptive Feedback-Feedback-Regelung	70
4	Experimenteller Aufbau und Messumgebung	79
4.1	Akustisches Frontend	79
4.2	DSP-Plattform	81
4.2.1	Verbindung der DSP-Plattform mit dem akustischen Frontend	82
4.3	Messaufbau zur Messung der Lärmreduzierungsleistung	85
4.3.1	Messsystem zur Messung der Lärmreduzierungsleistung	87
4.3.2	Messung der aktiven Lärmreduzierung	89
4.3.3	Beschallung des Headsets	89
5	Lärmreduzierung und Berechnungsaufwand	93
5.1	Bewertungstabelle	93
5.2	Nicht-adaptive Methoden zur Lärmreduzierung	95
5.2.1	Passive Dämpfung der Hörerkappen	95
5.2.2	Nicht-adaptive Feedback-Regelung	97
5.3	Nicht-adaptive kombinierte Regelstrategien	98
5.3.1	Nicht-adaptive Feedback-Feedforward-Regelung	99
5.3.2	Störschall-richtungsabhängige Feedback-Feedforward-Regelung	100
5.4	Kombinierte nicht-adaptive und adaptive Regelstrategien	102
5.4.1	Nicht-adaptive Feedback-Feedforward-Regelung und adaptive Domi- nantenkompensation	102
5.4.2	Teiladaptive Feedback-Feedforward-Regelung	104

5.4.3 Teiladaptive Feedback-Feedback-Regelung	107
6 Zusammenfassung	111
Literaturverzeichnis	115

Abbildungsverzeichnis

2.1	Links: Primärer Störschall (grau) und phaseninverser Gegenschall (schwarz) überlagern sich am Ort der Kompensation. Rechts: Die destruktive Überlagerung aus Störschall und Gegenschall am Ort der Kompensation aufgetragen über die Zeit.	13
2.2	Schematische Darstellung der Komponenten eines aktiv Lärm reduzierenden Kopfhörers in einer typischen Beschallungssituation.	13
2.3	Oben: Prinzipieller Aufbau einer Hörerkappe. Unten: Modellierte Übertragungsstrecken. Die Strecken $P_1(z)$ und $P_2(z)$ bilden die Übertragung des primären Störschalls zu den beiden Mikrofonen nach und werden als Primärstrecken bezeichnet. Die Strecke $S(z)$ wird als Sekundärstrecke bezeichnet.	14
2.4	a) Darstellung des Standard-Regelkreises wie aus der regelungstechnischen Literatur bekannt. b) Darstellung des Standard-Regelkreises wie in der Literatur für aktive Lärmkompensation verwendet.	16
2.5	Feedback-Regelung nach dem Prinzip des Internal Model Control (IMC). . .	18
2.6	Nicht-adaptive Feedforward-Steuerung.	19
2.7	Der Adaptionsalgorithmus verändert durch Minimierung eines auf dem Ausgangsfehler $e(n)$ basierenden Gütefunktional die Parameter des adaptiven Modells $W(z)$	21
2.8	Transversale Filterstruktur des FIR-Filters.	22
2.9	Analog zur Systemidentifikation erfolgt im Rahmen der aktiven Lärmkompensation die Anpassung der Parameter des Feedforward-Filter $W(z)$	24
2.10	Fehlerfläche in Abhängigkeit der Filterkoeffizienten. Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit existiert lediglich ein globales Minimum.	27
2.11	Blockschaltbild des adaptiven Regelkreises unter Berücksichtigung der Sekundärstrecke.	29

2.12 a) Signalsynthese in der komplexen Ebene. b) LMS-Anpassung der Amplituden $x_0(n)$ und $x_1(n)$ zur Realisierung eines adaptiven Notch-Filters.	33
2.13 ANR-System zur Kompensation von monofrequentem Störlärm	35
2.14 Kombinierte Regelstrategie zur Verbesserung der aktiven Lärmreduzierung: Verbindung der nicht-adaptiven IMC-Feedback-Regelung mit dem adaptiven Feedforward-Regler.	36
2.15 Kombinierte Regelstrategie: Verbindung des Standard Feedback-Regelkreises mit der adaptiven Feedforward-Regelung.	38
3.1 Nicht-adaptive Feedback-Feedforward-Reglerkombination.	43
3.2 Amplituden- und Phasengang des offenen Feedback-Regelkreises. Die Durchtrittsfrequenzen f_{d1} und f_{d2} sind durch vertikale Linien markiert. Der grau hinterlegte Bereich repräsentiert Phasenverschiebungen größer 180°	44
3.3 Amplituden- und Phasengang. Durch Messung ermitteltes, optimales Filter und entworfenen Feedforward-Filter.	45
3.4 a) Direkte Beschallung der linken Hörerkappe. b) Indirekte Beschallung der linken Hörerkappe aus entgegengesetzter Richtung.	47
3.5 a) Approximation des Beschallungswinkels φ auf Basis der Signalleistungen der Referenzmikrofone. b) In einer Messung ermittelte Gewichtung a_1 in Abhängigkeit des Beschallungswinkels φ	48
3.6 Von der Beschallungsrichtung abhängige Feedforward-Steuerung. Die nicht-adaptiven Filter $W_1(z)$ und $W_2(z)$ wurden für unterschiedliche Beschallungsrichtungen ausgelegt. Der Einfluss von $W_1(z)$ und $W_2(z)$ auf die Stellgröße $y_{FF}(n)$ wird mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren $a_1(\varphi)$ und $a_2(\varphi)$ durch den Anpassungsalgorithmus festgelegt.	50
3.7 Für verschiedene Beschallungswinkel ermittelter Koeffizient $a(\varphi)$. Dieser Koeffizient approximiert die Funktion $a_h(\varphi)$ und wird mit Hilfe von Gleichung 3.15 transformiert, um so die Gewichtungsfunktion nachzubilden.	51
3.8 Gewichtungsfunktionen in Abhängigkeit der Beschallungsrichtung.	52
3.9 Kombiniertes Regelkreis bestehend aus einem Feedback-Standard-Regelkreis in Verbindung mit einer von der Beschallungsrichtung abhängigen Feedforward-Steuerung.	53
3.10 Amplitudengang des verwendeten Bandpassfilters $F_{BP}(z)$ zur Filterung des Referenzsignals. Grenzfrequenzen: $f_{G1} = 80 \text{ Hz}$ und $f_{G2} = 120 \text{ Hz}$	55

3.11	Bodediagramm der Sekundärstrecke bestehend aus geschlossenem Feedback-Regelkreis und vorgeschaltetem Entfärbungsfilter.	56
3.12	Adaptives Notch-Filter zur Kompensation monofrequenter Störungen. Das Referenzsignal wird mit einem Bandpassfilter gefiltert, um so ein schmalbandiges Referenzsignal zu erhalten. Die schmalbandige Referenz ermöglicht eine Vereinfachung des Sekundärstreckenmodells.	57
3.13	Kombinierter Regelkreis mit adaptivem Notch-Filter. Die Reduzierung von breitbandigem Störlärm wird durch die nicht-adaptive Feedforward-Steuerung und den Feedback-Regelkreis gewährleistet. Eine weitere Reduktion der dominanten Störfrequenz wird durch das adaptive Notch-Filter erreicht.	58
3.14	a): Typische Pol- und Nullstellenverteilung eines Feedforward-Filters. b): Aufenthaltsorte von Pol- bzw. Nullstellen gleicher Grenzfrequenz sind durch unterbrochene Linien dargestellt. Frequenzen unter 1000Hz wurden grau hinterlegt.	60
3.15	Bodediagramm des nicht-adaptiven Teils der teiladaptiven Feedforward-Regelung.	61
3.16	Möglichkeiten der Zusammenschaltung von nicht-adaptivem und adaptivem Feedforward-Filter.	62
3.17	Verschiebung der Summationsstelle bei paralleler Zusammenschaltung. . . .	65
3.18	Links: Impulsantwort bei konventioneller Implementierung des adaptiven Filters $W(z)$ mit 140 adaptiven Parametern. Der grau hinterlegte Bereich verdeutlicht, dass die Impulsantwort bei Verwendung von lediglich 70 Parametern noch nicht hinreichend abgeklungen ist. Rechts: Impulsantwort des adaptiven Teils des teiladaptiven Feedforward Filters. Die Impulsantwort weist zwar ein deutliche Schwingung auf, ist aber hinreicht abgeklungen.	66
3.19	Kombinierter Regelkreis: nicht-adaptiver Standard Feedback-Regelkreis in Verbindung mit einer teiladaptiven Feedforward-Regelung.	68
3.20	Das Upsampling von 10kHz auf 20kHz erfolgt in zwei Schritten: Einfügen von Nullen zwischen zwei benachbarten Werten des 10kHz-Signals. Danach: Tiefpassfilterung zur Glättung des Signals.	69
3.21	Sekundärstrecke $S^*(z)$ der teiladaptiven Regelung.	70
3.22	a) Standard-Regelkreis mit adaptivem Regler $W(z)$. b) Adaptiver IMC-Feed-back Regelkreis.	71

3.23	Kombinierter Feedback-Regelkreis bestehend aus einer Zusammenschaltung aus nicht-adaptiver und adaptiver Feedback-Regelung.	72
3.24	Modifizierter, kombinierter Feedback-Regelkreis mit Neutralisierungsfiler. Die Sekundärstrecke wird vereinfacht durch $\hat{S}'(z) = -1$ modelliert.	74
3.25	Amplitudengang und Phasengang der Sekundärstrecke $S^*(z)$ und des Neutralisierungsfilters $F_{Neut}(z)$	76
3.26	Amplituden- und Phasengang der neutralisierten Sekundärstrecke $S'(z)$. Rechts: Kennzeichnung der Bereiche bei Divergenzgefahr des FxLMS-Algorithmus. .	77
4.1	ANR-Serienprodukt <i>HMEC 450</i> der Firma Sennheiser.	80
4.2	Links: DSP-Plattform. Rechts: Vereinfachtes Blockdiagramm mit den zentralen Komponenten der digitalen Hardware.	81
4.3	Anbindung des akustischen Frontends an die DSP-Plattform. Für jede Hörerseite werden zwei Eingänge für Mikrofone sowie einen Ausgang zur Anbindung des Kompensationslautsprechers benötigt.	83
4.4	Komponenten und Messung der Sekundärstrecke unter Verwendung eines zusätzlichen DSP-Einganges (hervorgehoben durch hell umrandete Boxen) . . .	84
4.5	Links: Schemazeichnung des Testkopfes. Rechts: Foto des Testkopfes.	85
4.6	Prototyp zur Verifikation der Regelalgorithmen.	86
4.7	Aufbau zur Messung der Lärmreduktion.	87
4.8	Frequenzgang des Störlautsprechers. Der relevante Frequenzbereich wurde grau hinterlegt.	88
4.9	Links: Amplitudengang des Equalizing-Filters. Rechts: Equalizierter Frequenzgang des Störlautsprechers (durchgezogene Linie). Zum Vergleich ist der nicht-equalizte Frequenzgang als unterbrochene Linie dargestellt.	88
4.10	Günstige Beschallungsrichtung für die rechte Hörerkappe, jedoch ungünstige für die linke Hörerkappe. Rechts: Umgekehrte Situation.	90
4.11	Links: Breitbandiges Störsignal. Rechts: Schmalbandiges Störsignal eines Propeller angetriebenen <i>Do228-212</i> Flugzeuges.	90
5.1	Bewertungstabelle zur qualitativen Bewertung der Leistungsfähigkeit von ANR-Algorithmen.	94
5.2	Links: Störspektrum, keine lärmreduzierenden Maßnahmen. Rechts: Passive Dämpfung der Hörerkappen.	96
5.3	Bewertungstabelle zur passiven Dämpfung der Hörerkappen	96

5.4	Links: Störspektren bei Feedback-Regelung nach dem Standard-Regelkreis. Rechts: Aktive Lärmreduzierung.	97
5.5	Feedback-Regelung nach dem Standard-Regelkreis. Oben: Charakteristische Eigenschaften der Regelung. Unten: Berechnungsaufwand.	98
5.6	ANR-Vergleich: Kombinierte nicht-adaptive Feedback-Feedforward-Regelung vs. nicht-adaptive Feedback-Regelung nach dem Standard-Regelkreis.	99
5.7	Kombinierte nicht-adaptive Feedback-Feedforward-Regelung. Oben: Charak- teristische Eigenschaften der Regelung. Unten: Berechnungsaufwand.	100
5.8	ANR-Vergleich: Kombinierte nicht-adaptive Feedback-Feedforward-Regelung vs. richtungsabhängige Feedback-Feedforward-Regelung.	101
5.9	Störschall-richtungsabhängige Feedback-Feedforward-Regelung. Oben: Cha- rakteristische Eigenschaften der Regelung. Unten: Berechnungsaufwand.	101
5.10	Nicht-adaptive Feedback-Feedforward-Regelung und adaptive Dominanten- kompensation. Oben: <i>Do228-212</i> Störlärm, Dominante bei 102 Hz. Unten: Breit- bandiger Störlärm.	103
5.11	Nicht-adaptive Feedback-Feedforward-Regelung und adaptive Dominanten- kompensation. Oben: Charakteristische Eigenschaften der Regelung. Unten: Berechnungsaufwand.	104
5.12	Teiladaptive Feedback-Feedforward-Regelung vs. volladaptive Feedback-Feed- forward-Regelung. Oben: <i>Do228-212</i> Störlärm, Dominante bei 102 Hz. Unten: Breitbandiger Störlärm.	105
5.13	Charakteristische Eigenschaften und Berechnungsaufwand. Oben: Teiladapti- ve Feedback-Feedforward-Regelung. Unten: Standard Feedback- und vollad- aptive Feedforward-Regelung.	106
5.14	Teiladaptive Feedback-Feedback-Regelung mit Neutralisierungsfilter vs. kon- ventioneller Implementierung. Oben: <i>Do228-212</i> Störlärm, Dominante Stör- frequenz bei 102 Hz. Unten: Breitbandiger Störlärm.	107
5.15	Charakteristische Eigenschaften und Berechnungsaufwand. Oben: Teiladapti- ve Feedback-Feedback-Regelung mit Neutralisierungsfilter. Unten: Konven- tionelle teiladaptive Feedback-Feedback-Regelung.	108
6.1	Gegenüberstellung der in dieser Arbeit vorgestellten Regelstrategien.	113

Formelzeichen und Abkürzungen

Buchstaben

$a_1(n)$	Gewichtung in Abhängigkeit des Beschallungswinkels (direkte Beschallung)
$a_2(n)$	Gewichtung in Abhängigkeit des Beschallungswinkels (indirekte Beschallung)
$a_h(\varphi)$	von der Beschallungsrichtung abhängige Hilfsfunktion
a_i	Nennerkoeffizienten eines Filters
b_i	Zählerkoeffizienten eines Filters
$d(n)$	am Fehlermikrofon erfasste Primärstörung
$D(z)$	z-Transformierte der Schallstörung
$Do(z)$	Übertragungsblock „Downsampling“
$e(n)$	Fehlersignal
$E(z)$	z-Transformierte des Fehlersignals
f_{d1}	Untere Durchtrittsfrequenz
f_{d2}	Obere Durchtrittsfrequenz
f_{G1}	untere Grenzfrequenz des Bandpass-Filters
f_{G2}	obere Grenzfrequenz des Bandpass-Filters
f_s	Abtastfrequenz
$F_{BP}(z)$	Übertragungsfunktion des Bandpass-Filters
$F_{Neut}(z)$	Übertragungsfunktion des Neutralisierungsfilters
$F_{Entf}(z)$	Entfärbungsfilter
$F_{Gew}(z)$	Übertragungsfunktion des frequenzselektiven Filters
$H(z)$	Störübertragungsfunktion
k	je nach Kontext: Zeitdiskrete Variable oder Konstante
L	Länge des Koeffizientenvektors eines FIR-Filters
L_{imp}	Länge der Impulsantwort
L_x	Signalleistung

$\hat{L}_x(n)$	Approximation der Signalleistung
$\hat{L}_{xl}(n)$	Approximation der Signalleistung des linken Referenzmikrofons
$\hat{L}_{xr}(n)$	Approximation der Signalleistung des rechten Referenzmikrofons
M	Anzahl der Zählerkoeffizienten
N	Anzahl der Nennerkoeffizienten
n	zeitdiskrete Variable für Signale, die mit 20 kHz abgetastet wurden
$\mathbf{p}_{dx}$	Kreuzkorrelationsvektor zwischen Störung und Referenzsignal
$\mathbf{p}_{dy}$	Kreuzkorrelationsvektor zwischen Störung und Ausgang $y_{na}(n)$
$P_1(z)$	Primärstrecke des Schalls von der Störquelle bis zum Referenzmikrofon
$P_2(z)$	Primärstrecke des Schalls von der Störquelle bis zum Fehlermikrofon
$P_{L1}(z)$	Primärstrecke zur linken Referenz, direkte Beschallung
$P_{L1'}(z)$	Primärstrecke zur linken Referenz, indirekte Beschallung
$P_{L2}(z)$	Primärstrecke zum linken Fehlersignal, direkte Beschallung
$P_{L2'}(z)$	Primärstrecke zum linken Fehlersignal, indirekte Beschallung
P_x	Leistung des Referenzsignals
P'_x	Leistung des gefilterten Referenzsignals
$R(z)$	Übertragungsfunktion eines Feedback-Reglers im allgemeinen Fall
$\mathbf{R}_{xx}$	Autokorrelationsmatrix der Referenz $x(n)$
$\mathbf{R}_{yy}$	Autokorrelationsmatrix des Signals $y_a(n)$
$s(n)$	Impulsantwort der Sekundärstrecke
$S(z)$	Sekundärstrecke (Kompensationslautsprecher zum Fehlersignal)
$\hat{S}(z)$	Modell der Sekundärstrecke $S(z)$
$S^*(z)$	Sekundärstrecke, welche den geschlossenen FB-Regelkreis enthält
$\hat{S}^*(z)$	Modell der Sekundärstrecke $S^*(z)$
$S'(z)$	neutralisierte Sekundärstrecke
$\hat{S}'(z)$	Modell der neutralisierten Sekundärstrecke
$st(n)$	an der Störschallquelle erfasste Störung
$St(z)$	z-Transformierte von $st(n)$
T_1	Zeitkonstante
T_s	Abtastzeit
$u(n)$	vom Kopfhörer-Lautsprecher gesendeter Schall im Fehlersignal
$U(z)$	z-Transformierte von $u(n)$
$Up(z)$	Übertragungsblock „Upsampling“
$\mathbf{w}(n)$	Koeffizientenvektor des adaptiven Filters

Formelzeichen und Abkürzungen

$w_0(n)$	adaptiver Parameter des Notch-Filters
$w_1(n)$	adaptiver Parameter des Notch-Filters
$w_i(n)$	Koeffizient i des Vektors $\mathbf{w}$
$\mathbf{w}_{opt}$	Optimaler Parametervektor des adaptiven FIR-Filters
$W(z)$	Übertragungsfunktion des adaptiven FIR-Filters
$W_1(z)$	entwurfenes Feedforward-Filter für direkte Beschallung
$W_2(z)$	entwurfenes Feedforward-Filter für indirekte Beschallung
$W'(z)$	entwurfenes Feedforward-Filter für indirekte Beschallung
$W_{na}(z)$	nicht-adaptives Filter der teiladaptiven Regelung
$x(n)$	Referenzsignal
$\mathbf{x}(n)$	Vektor abgetasteter Werte des Referenzsignals
$X(z)$	z-Transformierte des Referenzsignals
$x_0(n)$	Referenzsignal des adaptiven Notch-Filters
$x_1(n)$	zweites Referenzsignal des adaptiven Notch-Filters
$x'(k)$	gefiltertes Referenzsignal
$x'(n)$	gefiltertes Referenzsignal
$\mathbf{x}'(n)$	Vektor abgetasteter Werte des gefilterten Referenzsignals
$X'(z)$	z-Transformierte des gefilterten Referenzsignals
$X_L(z)$	z-Transformierte des linken Referenzsignals
$X_R(z)$	z-Transformierte des rechten Referenzsignals
$y(n)$	Stellgröße
$y_a(n)$	upgesampelte Variable
$y_{a'}(k)$	verwendete Variable beim Upsampling
$y_w(k)$	Ausgang des adaptiven Filters
$Y_w(z)$	z-Transformierte des Ausgangs des adaptiven Filters
$y(n)$	abgetastetes Signal der Stellgröße
$Y(z)$	z-Transformierte der Stellgröße
$y_{na}(n)$	Ausgang des nicht-adaptiven Filters $W_{na}(z)$
$y_{FF}(n)$	Stellgröße des Feedforward-Zweiges
$y_t(n)$	Ausgang des teiladaptiven Reglers
$Y_t(z)$	z-Transformierte von $y_t(n)$
α	konstanter Faktor beim NLMS-Verfahren
α_γ	Vorfaktor des Stellgrößenabhängigen Leak-Faktors

β	Vergessenfaktor beim NLMS-Verfahren
θ_1	Phasenverschiebung zwischen zwei monofrequenten Referenzen
θ_y	Phasenverschiebung zwischen $x_0(n)$ und $y(n)$
φ	Beschallungsrichtung
γ	feste Gewichtung der Stellgrößenleistung
$\gamma(n)$	Gewichtungsfunktion der Stellgrößenleistung
μ	Anpassungsschrittweite in der Update-Gleichung
v	fester Leakage-Faktor
$v(n)$	adaptiver Leakage-Faktor
$\xi(n)$	zu minimierendes Gütefunktional

Indizes

<i>Entf</i>	bezogen auf das Entfärbungsfilter
<i>FB</i>	bezogen auf den Feedback-Regler (allgemein)
<i>FF</i>	bezogen auf den Feedforward-Regler
<i>Gew</i>	bezogen auf das Frequenzselektive Filter
<i>IMC</i>	bezogen auf den IMC-Feedback-Regler
<i>L</i>	bezogen auf die linke Kopfhörerseite
<i>opt</i>	optimal
<i>R</i>	bezogen auf die rechte Kopfhörerseite
<i>x</i>	bezogen auf ein Referenzsignal

Operatoren und Symbole

$\frac{\partial}{\partial \cdot}$	partielle Ableitung
$\mathcal{Z}\{\cdot\}$	z-Transformierte
$\mathcal{Z}^{-1}\{\cdot\}$	inverse z-Transformation
$E[\cdot]$	Erwartungswert
$*$	Faltung
$\hat{\cdot}$	Schätzung/Modell
$\cdot^T$	transponiert

Abkürzungen

A/D	Analog/Digital
ANC	Active Noise Control
ANR	Active Noise Reduction
D/A	Digital/Analog
dB	Dezibel
DSP	Digital Signal Processor
FIR	Finite Impulse Response
FB	Feedback
FF	Feedforward
FxLMS	Filtered-x-Least-Mean-Square
Hz	Hertz
IIR	Infinite Impulse Response
IMC	Internal Model Control
LMS	Least Mean Square
MSE	Mean Square Error
NLMS	Normalized Least Mean Square
PGA	Programmable Gain Amplifier