

Active Noise Cancellation oder Aktive Geräuschauslöschung

Jörn Matthies

HAW Hamburg

1. Dezember 2006

Inhalt (1)

- 1 Praktische Anwendung der aktiven Geräuschauslöschung
 - Produkte und Einsatzgebiete
 - Tätigkeitsbereiche
- 2 „Active Noise Cancellation“
 - Das Prinzip der aktiven Geräuschauslöschung
 - ANC-Systeme
 - „Adaptive Feedback System“
 - „Adaptive Feedforward System“

Inhalt (2)

- 3 Ein einfaches ANC-System
 - Vorgaben und Randbedingungen
 - Systemmodellierung
 - Simulation des Systems mit Simulink
 - Nachteile des Systems

- 4 Ein ANC-System mit adaptivem Filter
 - Vorteile eines ANC-Systems mit adaptivem Filter
 - Adaptive Filterung
 - Das FIR-Filter
 - Der LMS-Adaptionsalgorithmus
 - Simulation des Systems mit Simulink

- 5 Ausblick

Existierende Produkte

- Kopfhörer mit aktiver Lärmkompensation
- Einige Hersteller:
 - Sennheiser
 - Sony
 - Philips
 - u.v.m

Einsatzgebiete

- Automobilindustrie
 - Innenraum
 - Accura RL
 - Honda Accord hybrid
 - Karosserievibrationen

Einsatzgebiete

- Automobilindustrie
 - Innenraum
 - Accura RL
 - Honda Accord hybrid
 - Karosserievibrationen
- Flugzeugindustrie
 - Flugzeuginnenraum
 - Geräuschkinderung an Triebwerken (NASA)

Einsatzgebiete

- Automobilindustrie
 - Innenraum
 - Accura RL
 - Honda Accord hybrid
 - Karosserievibrationen
- Flugzeugindustrie
 - Flugzeuginnenraum
 - Geräuschkinderung an Triebwerken (NASA)
- Überall wo störende Geräusche unterdrückt werden sollen
 - Klimaanlage
 - Gerätelüfter
 - u.ä.

Tätigkeit im Bereich Active Noise Cancellation

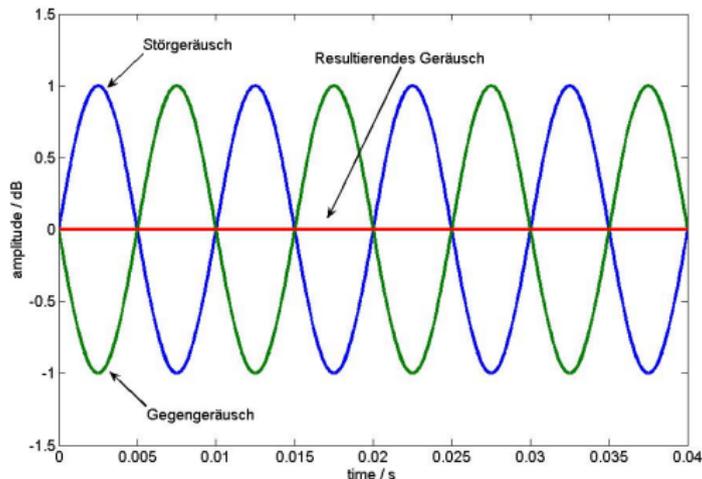
- Automobilindustrie:
 - BMW AG Automobil (Abteilung Forschung/Entwicklung)
 - Audi AG (Abteilung Forschung/Entwicklung)
 - DaimlerChrysler AG (Abteilung Forschung/Entwicklung)
 - u.a.

Tätigkeit im Bereich Active Noise Cancellation

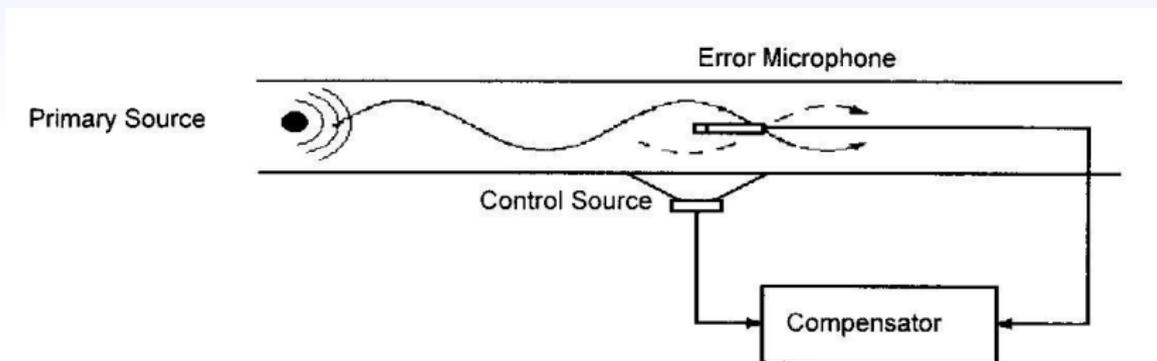
- Automobilindustrie:
 - BMW AG Automobil (Abteilung Forschung/Entwicklung)
 - Audi AG (Abteilung Forschung/Entwicklung)
 - DaimlerChrysler AG (Abteilung Forschung/Entwicklung)
 - u.a.
- Fluzeugindustrie:
 - Airbus / EADS
 - Boeing
 - General Electric
 - u.a.

Geräusch und Gegengeräusch

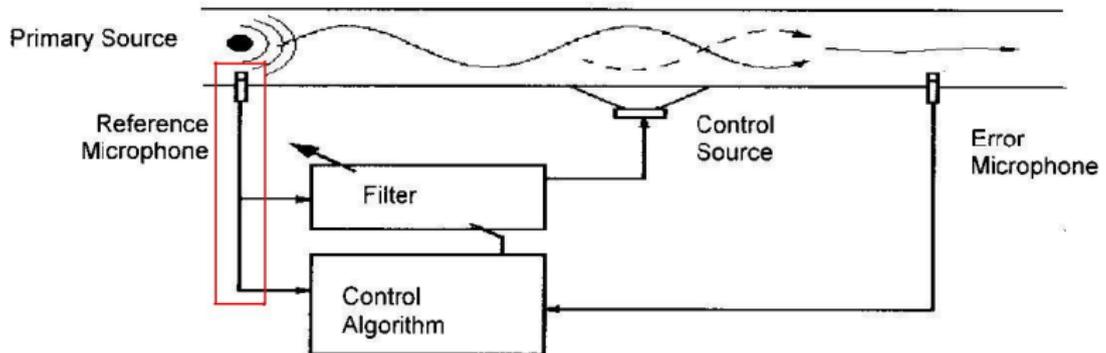
Gegengeräusch = Geräusch 180° phasenverschoben



Adaptive Feedback System



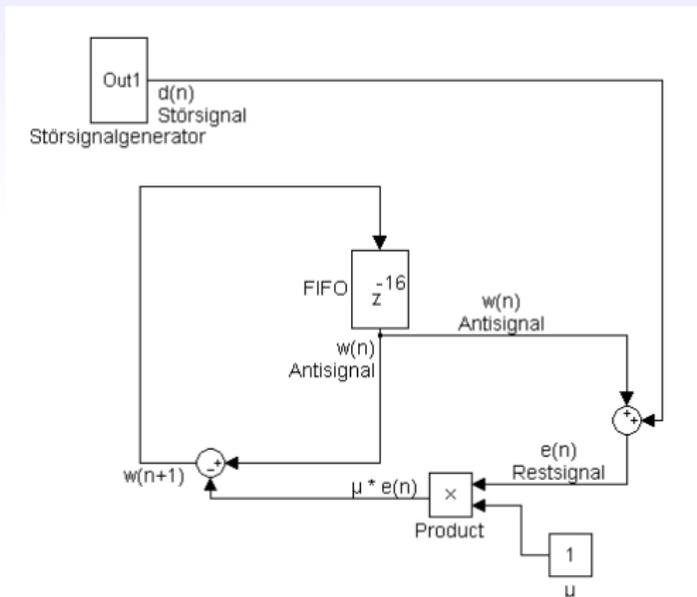
Adaptive Feedforward System



Vorgaben und Randbedingungen

- Signalumwandlung wird nicht berücksichtigt
- Die akustische Verzögerung wird vernachlässigt
- Das Störgeräusch besteht aus einer Grundfrequenz plus drei Obertönen
- Die Samplefrequenz entspricht dem Vierfachen der Frequenz des dritten Obertons

Einfaches ANC-System Systemstruktur (Matlab/Simulink)



Berechnung des Restsignals

Digitalisierte Signale

$$e(n) = d(n) + w(n)$$

$d(n)$: Sample n des Störsignals

$w(n)$: Sample n des Antisignals

$e(n)$: Sample n des Restsignals

Berechnung des Antisignals

Berechnung mit Sample des vorhergehenden Taktes

$$w(n) = w(n - 1) - \mu * e(n - 1)$$

$w(n)$: Sample n des Antisignals

$w(n - 1)$: Sample n-1 des Antisignals

μ : Schrittweitenfaktor

$e(n - 1)$: Sample n-1 des Restsignals

Simulationsdaten

Vorraussetzungen

- Störsignal $d(n)$: 100 Hz mit den drei nächsten Obertönen (200, 300 und 400 Hz)
- Abtastfrequenz f_s : 1600 Hz

Simulationsdaten

Vorraussetzungen

- Störsignal $d(n)$: 100 Hz mit den drei nächsten Obertönen (200, 300 und 400 Hz)
- Abtastfrequenz f_s : 1600 Hz

Berechnung der Größe des FIFOs

- Periodendauer der Grundfrequenz T_{f1} : 0,01s

Simulationsdaten

Vorraussetzungen

- Störsignal $d(n)$: 100 Hz mit den drei nächsten Obertönen (200, 300 und 400 Hz)
- Abtastfrequenz f_s : 1600 Hz

Berechnung der Größe des FIFOs

- Periodendauer der Grundfrequenz T_{f1} : 0,01s
- Anzahl Samples pro Periode N :
$$T_{f1} * f_s = 0,01s * 1600Hz = 16$$

Simulationsdaten

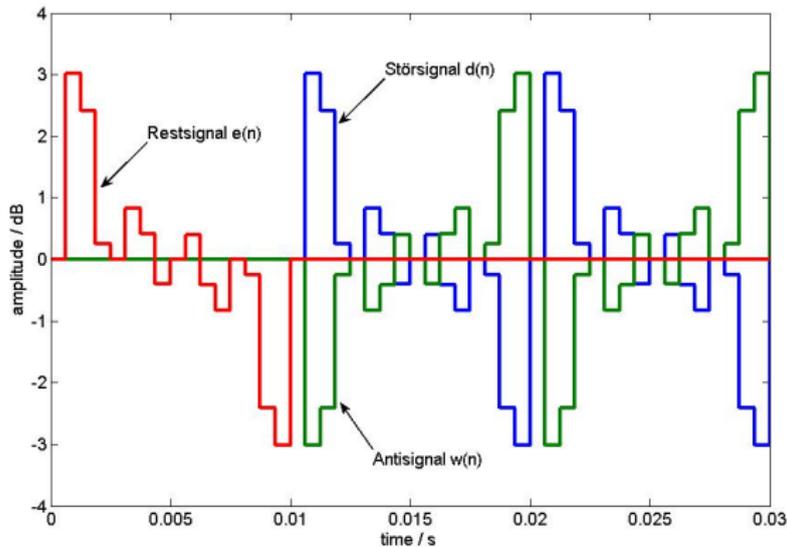
Vorraussetzungen

- Störsignal $d(n)$: 100 Hz mit den drei nächsten Obertönen (200, 300 und 400 Hz)
- Abtastfrequenz f_s : 1600 Hz

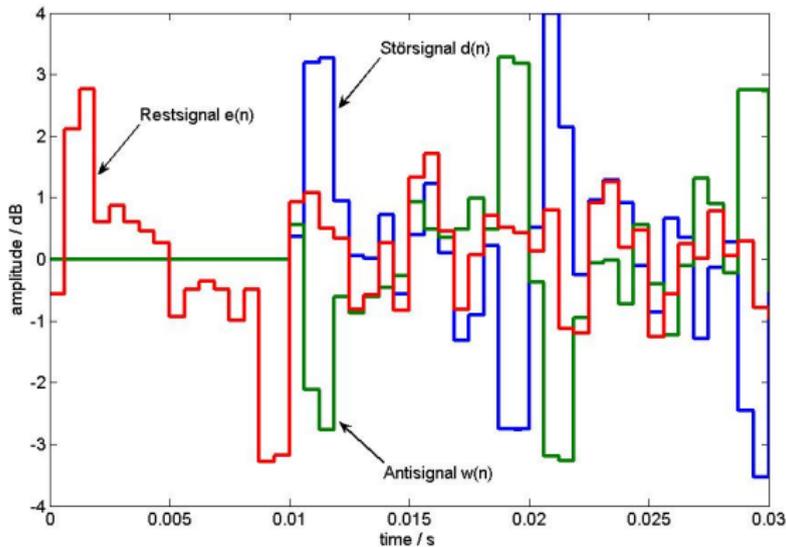
Berechnung der Größe des FIFOs

- Periodendauer der Grundfrequenz T_{f1} : 0,01s
- Anzahl Samples pro Periode N :
$$T_{f1} * f_s = 0,01s * 1600Hz = 16$$
- Größe des FIFOs N_{FIFO} : 16

Simulationsergebnisse



Simulation mit Rauschüberlagerung



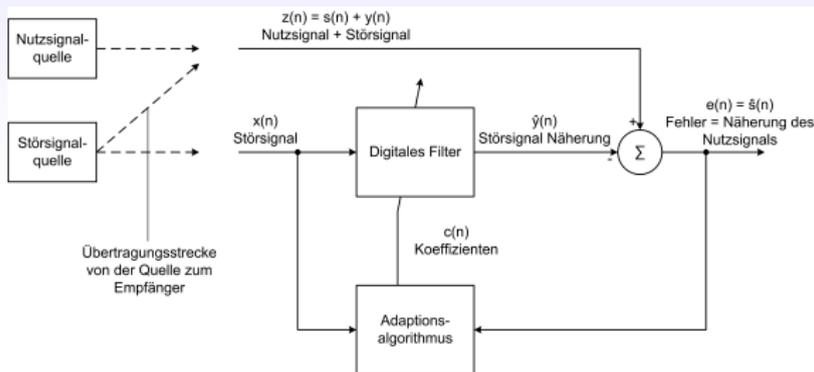
Nachteile des Systems

- Abtast- / Systemfrequenz ist Abhängig von der Grundfrequenz des Störgeräusches
- System funktioniert nur wenn die Grundfrequenz des Störgeräusches korrekt erkannt wird
- Nur Auslöschung der Grundfrequenz plus Obertöne
- Starke Einschränkung des auszulöschenden Frequenzbereiches
- Kaum praktische Einsatzmöglichkeiten

Vorteile eines Systems mit adaptivem Filter

- Keine Abhängigkeiten zwischen Systemfrequenz und Störgeräusch
- Auslöschung von Signalen die nicht nur aus einer Grundfrequenz plus Obertöne bestehen
- Realisierung als Adaptive Feedforward System
- System ist vielfältig einsetzbar

Adaptives Filter System



- Digitales Filter: FIR-Filter
- Adaptionsalgorithmus: LMS-Adaptionsalgorithmus

Finite Impulse Response Filter

Filterfunktion

$$\hat{y}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c(k)x(n-k)$$

$$\hat{y}(n) = \mathbf{c}^T(n)\mathbf{x}(n)$$

- $\hat{y}(n)$: Ausgangswerte = Beim Empfänger nachempfundenen Störgeräusch
- $c(k)$: Koeffizienten
- $x(n)$: Gespeicherte Eingangswerte = Störsignal an der Quelle
- $\mathbf{c}(n)$: Koeffizienten-Vektor
- $\mathbf{x}(n)$: Vektor der Eingangswerte

LMS-Adaptionsalgorithmus (1)

Fehlerberechnung

$$e(n) = z(n) - \hat{y}(n)$$

- $z(n)$: Primärsignal = Nutzsignal + Störsignal beim Empfänger
- $\hat{y}(n)$: Filter-Output = Beim Empfänger nachempfundenenes Störsignal
- $e(n)$: Fehlersignal = Näherung des Nutzsignals

LMS-Adaptionsalgorithmus (2)

Mittlerer quadratischer Fehler

$$\begin{aligned} J &= E[e(n)^2] = E[z(n)^2] - E[\widehat{y}(n)^2] \\ &= E[z(n)^2] - 2E[z(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{c}(n)] + E[\mathbf{c}^T(n)\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{c}(n)] \\ &= \sigma^2 + 2\mathbf{p}^T\mathbf{c}(n) + \mathbf{c}^T(n)\mathbf{R}\mathbf{c}(n) \end{aligned}$$

- $E[\]$: Erwartungswert
- $\sigma^2 = E[z(n)^2]$: Varianz von $z(n)$
- $\mathbf{p} = E[z(n)\mathbf{x}(n)]$: Kreuzkorrelations-Vektor der Länge N
- $\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n)]$: $N \times N$ Autokorrelations-Matrix

LMS-Adaptionsalgorithmus (3)

- Der MSE dargestellt in Abhängigkeit der Filterkoeffizienten ergibt die Leistungsoberfläche
- Gradient der Leistungsoberfläche:

$$\nabla_n J = \frac{dJ}{d\mathbf{c}(n)} = -2\mathbf{p} + 2\mathbf{R}\mathbf{c}(n)$$

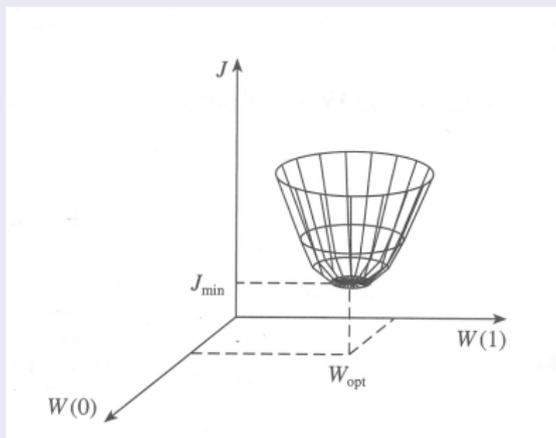
- Jeder Filterkoeffizienten-Satz entspricht einem Punkt auf der Oberfläche
- Am Minimum ist der Gradient 0 und der Filterkoeffizienten-Vektor ist optimal:

$$\mathbf{c}_{opt}(n) = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{p}$$

LMS-Adaptionsalgorithmus (4)

Beispiel im dreidimensionalen Raum mit einem Filter 2. Ordnung

Fehler Leistungsoberfläche



LMS-Adaptionsalgorithmus (5)

- Berechnung der optimalen Filterkoeffizienten nicht auf einmal, sondern Näherung von Sample zu Sample
- Kriterium des kleinsten mittleren quadratische Fehlers
- Der LMS-Adaptionsalgorithmus basiert auf der Methode des steilsten Abstiegs

Steepest-Descent-Algorithmus

$$\mathbf{c}(n+1) = \mathbf{c}(n) - \mu \nabla_n J$$

- $\mathbf{c}(n+1)$: Zu berechnender Filterkoeffizienten-Vektor
- $\mathbf{c}(n)$: Aktueller Filterkoeffizienten-Vektor
- $\nabla_n J$: Gradient des MSE
- μ : Schrittweitenfaktor

LMS-Adaptionsalgorithmus (6)

Für die Berechnung von $\nabla_n J$ werden statistische Eigenschaften des Signals (\mathbf{R} und \mathbf{p}) benötigt. Der LMS-Algorithmus nutzt die momentane Näherung des Gradienten

Widrow-Hopf LMS-Algorithmus

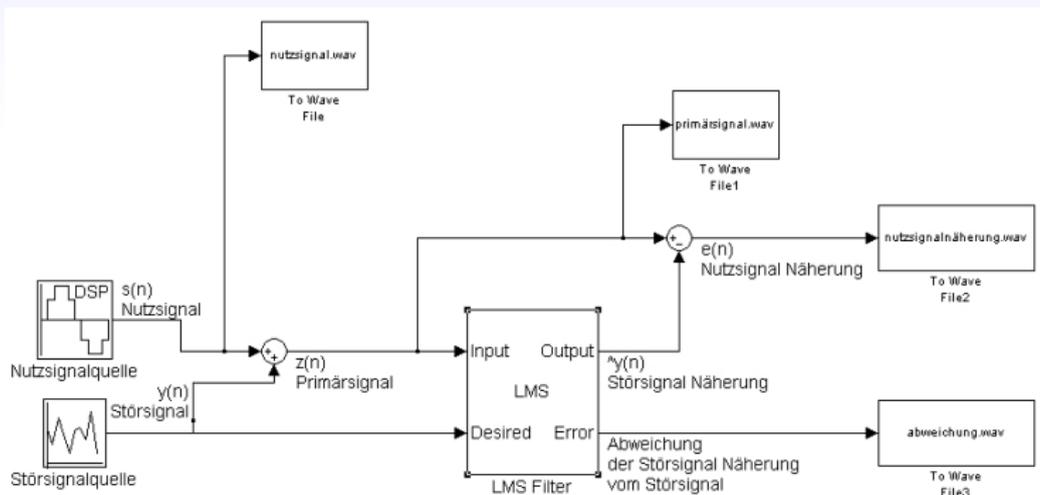
$$\mathbf{c}(n+1) = \mathbf{c}(n) + 2\mu e(n)\mathbf{x}(n)$$

- $\mathbf{c}(n+1)$: Zu berechnender Filterkoeffizienten-Vektor
- $\mathbf{c}(n)$: Aktueller Filterkoeffizienten-Vektor
- μ : Adaptions-Schrittweite
- $e(n) = z(n) - \mathbf{c}^T(n)\mathbf{x}(n)$: Berechneter Fehler
- $\mathbf{x}(n)$: Filter-Input-Vektor

Ablauf des Algorithmus

- 1 Filterkoeffizienten-Vektor $\mathbf{c}(n)$ initialisieren (z.B. mit 0)
- 2 Berechnen des Filter-Output $\hat{y}(n) = \mathbf{c}^T(n)\mathbf{x}(n)$
- 3 Berechnen des Fehlers $e(n) = z(n) - \hat{y}(n)$
- 4 Adaptieren der Filterkoeffizienten
$$\mathbf{c}(n + 1) = \mathbf{c}(n) + 2\mu e(n)\mathbf{x}(n)$$

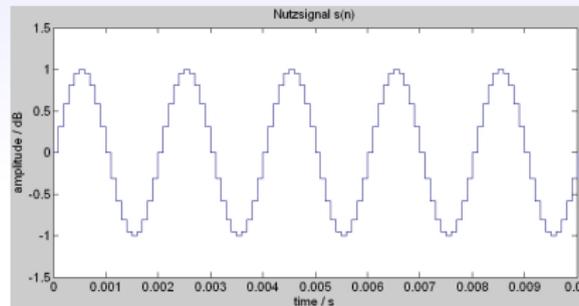
ANC-System mit adaptivem Filter Systemstruktur (Matlab/Simulink)



Simulationsdaten

- Nutzsinal: Sinuston 500 Hz / Sprache
- Störsinal: Random Noise
- Abtastfrequenz: 10 kHz
- Filter Ordnung: 256 / 512
- Schrittweite μ : 1/3000 / 1/500

Audiovisuelle Darstellung der Simulationsergebnisse (1)

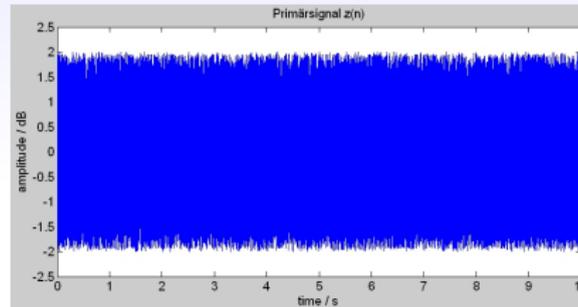


Abspielen des Nutzsignals $s(n)$

nutzsinal.wav

sprachsignal.wav

Audiovisuelle Darstellung der Simulationsergebnisse (2)



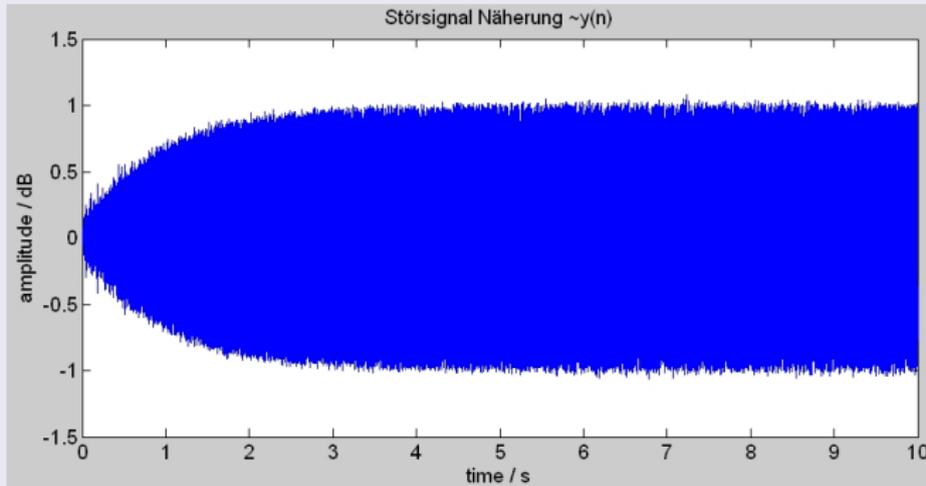
Abspielen des Primärsignals $z(n)$

primärsignal.wav

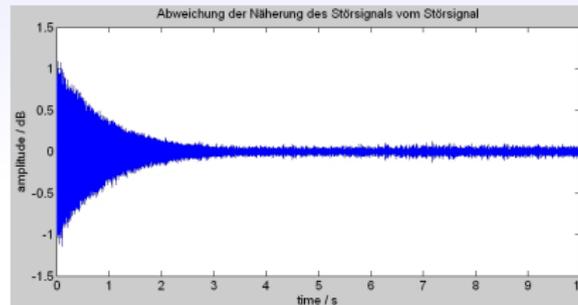
primärsprachsignal.wav

Audiovisuelle Darstellung der Simulationsergebnisse (3)

Näherung des Störsignals $\hat{y}(n)$



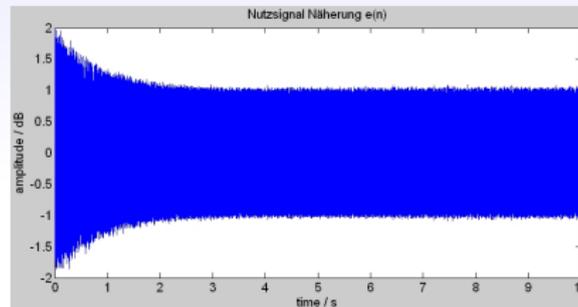
Audiovisuelle Darstellung der Simulationsergebnisse (3)



Abspielen der Abweichung der Störsignal Näherung vom
Störsignal

abweichung.wav

Audiovisuelle Darstellung der Simulationsergebnisse (4)



Abspielen der Nutzsignal Näherung $e(n)$

nutzsignalnäherung.wav

sprachsignalnäherung.wav

Ziel der Masterarbeit

Integration in das FAUST-Projekt

- Reference Mikrophon am Fahrzeug
- Wiedergabe der Näherung des Störgeräusches über Kopfhörer
- Fehlermikrophon im Kopfhörer
- Resultat: Träger des Kopfhörers nimmt keine/geringe Fahrzeuggeräusche wahr

Forschung & Umsetzung

- Alternative Filter und Adaptionalgorithmen bewerten
- Auswahl eines Systems
- Signalverarbeitung mit FPGA
- Modellierung des gewählten Systems mit Hardware-Modellierungssprache (VHDL)
- FPGA als Hardware zur Umsetzung paralleler Mathematik

Literatur (1)

-  E. C. Ifeachor, B. W. Jervis
Digital Signal Processing A Practical Approach (Second Edition)
Pearson Education Limited, ISBN 0201-59619-9, 2002
-  D. G. Manolakis, V. K. Ingle, S. M. Kogon
Statistical and Adaptive Signal Processing
McGraw Hill Higher Education, ISBN 0-07-040051-2, 2000
-  C. D. Kestell, C. H. Hansen
An Overview Of Active Noise Control
Safety Science Monitor: 3, 5, 1998
<http://monash.edu.au/muarc/ipso/vol3/oh5.pdf>

Literatur (2)



S. M. Kuo, D. R. Morgan

Active Noise Control: A Tutorial Review

PROCEEDINGS OF THE IEEE: 87, 6, 1999

<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/5/16546/00763310.pdf>



R. Hashemian, K. Golla, S. M. Kuo, A. Joshi

Design and Construction of an Active Periodic Noise Cancelling System Using FPGAs

Northern Illinois University: Electrical Engineering Department,
1993

<http://ieeexplore.ieee.org/iel2/1096/8013/00343211.pdf>

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit.