

# Kompensation akustischer Echos unter Einfluß von nichtlinearen Audiokomponenten

Der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
zur Erlangung des Grades

**Doktor-Ingenieur**

vorgelegt von

**Alexander K. E. Stenger**

Erlangen, 2000

Als Dissertation genehmigt von  
der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 10. Juli 2000

Tag der Promotion: 6. November 2000

Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. W. Kellermann

Prof. Dr.-Ing. E. Hänsler, Technische Universität Darmstadt

Berichte aus der Kommunikations- und Informationstechnik

Band 23

**Alexander Stenger**

**Kompensation akustischer Echos unter Einfluß  
von nichtlinearen Audiokomponenten**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Stenger, Alexander:*

Kompensation akustischer Echos unter Einfluss von  
nichtlinearen Audiokomponenten/Alexander Stenger.

Aachen: Shaker, 2001

(Berichte aus der Kommunikations- und Informationstechnik; Bd. 23)

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8675-1

Copyright Shaker Verlag 2001

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8675-1

ISSN 1432-489X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Kellermann für die intensive Betreuung der Arbeit, verbunden mit spannenden und lehrreichen Diskussionen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Hänsler möchte ich für sein Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des Korreferats danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Girod danke ich für die Gelegenheit, in einer hervorragenden Arbeitsgruppe die für mich weitgehend neuen Gebiete Nachrichtentechnik und digitale Signalverarbeitung kennenzulernen und für den Anstoß zu dieser Arbeit.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Kollegen Dr. Frank Heinle, Dr. Rudolf Rabenstein, Wolfgang Sörgel, Dr. Eckehard Steinbach und Peter Eisert für viele interessante Diskussionen und bei Klaus Stuhlmüller und Dr. Frank Heinle für das kritische Korrekturlesen der Arbeit. Allen Mitarbeitern des Laboratoriums für Nachrichtentechnik möchte ich für das freundschaftliche und spaßige Arbeitsklima danken.

Ebenfalls danken möchte ich Dr. Stephan Weiß und Dr. Robert W. Stewart für die unvergeßliche Zeit an der Strathclyde University, während der ein nicht unwesentlicher Teil der Arbeit entstand.

Nicht zuletzt danke ich Anja für ihr Verständnis und ihre Ermutigungen während des Verfassens der Arbeit.

## Kurzfassung

Heutige Freisprecheinrichtungen besitzen zur Reduktion akustischer Echos meist einen digitalen Kompensator mit linearem Echopfadmodell. Bei ausreichend linearen Audiokomponenten erreichen solche Kompensatoren unter realen Bedingungen eine Echoreduktion von etwa 20...30 dB. Durch den Einsatz kostengünstiger Audiokomponenten oder durch Übersteuerung des Wiedergabeverstärkers, z.B. aufgrund niedriger Batteriespannung in Mobilgeräten, entstehen nichtlineare Verzerrungen. Anhand eines Hörtests wird gezeigt, daß der Benutzer des Freisprechgeräts erhebliche derartige Verzerrungen bei Sprache toleriert bzw. nicht hört. Zum fernen Teilnehmer wird dadurch jedoch bei lauten Äußerungen ein störendes, verzerrtes Echo zurückgesendet, das oft nicht durch herkömmliche lineare Kompensation entfernt werden kann. Deshalb werden in dieser Arbeit neue Echokompensatoren mit nichtlinearem Echopfadmodell vorgeschlagen.

Es wird zwischen gedächtnislosen und gedächtnisbehafteten Nichtlinearitäten unterschieden und jeweils ein spezielles Modell eingesetzt. Erstere entstehen durch Übersteuern des Wiedergabeverstärkers. Für diesen Fall wird ein kaskadierter Kompensator mit gedächtnisloser Polynomial- oder Begrenzerkennlinie als Vorstufe für ein lineares FIR-Filter eingesetzt. Ein spezielles Adaptionungsverfahren erlaubt die gleichzeitige NLMS- bzw. RLS-Adaption der Vorstufe und NLMS-Adaption des FIR-Filters mit einem gemeinsamen Fehlerkriterium. Mit einem übersteuerten Ein-Chip-Verstärker und einem ausreichend dimensionierten Kleinlautsprecher wird bei 1.5...7-fachem Rechenaufwand die Echoreduktion gegenüber einem linearen Kompensator um bis zu 10 dB verbessert. Die Möglichkeit von recheneffizienten Frequenzbereichsrealisierungen ähnlich denen von linearen adaptiven Filtern wird aufgezeigt. Dominieren vom Lautsprecher verursachte gedächtnisbehaftete Nichtlinearitäten, so eignet sich zur Echokompensation ein Volterra-Filter zweiter Ordnung mit NLMS-Adaption. Durch Beschränkung auf relevante Koeffizienten kann mit etwa dreifachem Rechenaufwand im Vergleich zum linearen Kompensator die Echoreduktion um 5...8 dB verbessert werden, wie Experimente mit verschiedenen Kleinlautsprechern belegen.

Ein zentrales Problem bei Echokompensatoren ist die Steuerung der Adaptionsschrittweite in Abhängigkeit von Sprecheraktivität und Adaptionzustand. Basierend auf einer Steuerung für lineare Kompensatoren werden für die neuen Kompensatoren geeignete Erweiterungen entwickelt. Dadurch können obige Ergebnisse mit realistischen Gesprächsszenarien erreicht werden.

Für beide Modelle wird auf Ansätze zur Steigerung der Recheneffizienz verwiesen, die in Nachfolgearbeiten untersucht werden könnten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Linearer Echokompensator</b>	<b>5</b>
2.1	Bewertungsmaße	6
2.2	Adaptionsverfahren	8
2.3	Steuerung der Adaption	10
<b>3</b>	<b>Nichtlinearitäten im akustischen Echopfad</b>	<b>12</b>
3.1	Modell des Echopfads	12
3.2	Maße für nichtlineare Verzerrung	13
3.2.1	Klirrfaktor	14
3.2.2	Verzerrungsmaß auf Basis eines parametrischen Modells	15
3.2.3	Restverzerrungsleistung	15
3.2.4	Praktische Messung von Verzerrungen im Zusammenhang mit adaptiven Echokompensatoren	17
3.3	Hörbarkeit von nichtlinearen Verzerrungen	18
3.3.1	Bekannte Ergebnisse	19
3.3.2	Hörtests mit Sprachsignalen	20
3.4	Linearer Kompensator und nichtlinearer Echopfad	22
3.4.1	Stationäre Erregung	23
3.4.2	Instationäre Erregung	25
3.4.3	Konsequenzen für die Schrittweitensteuerung	26
3.5	Ansätze zur Berücksichtigung der Nichtlinearitäten	26
3.5.1	Inverse nichtlineare Vorverzerrung	27
3.5.2	Dynamik-Kompression	28
3.5.3	Nichtlinearer Echokompensator	29
3.5.3.1	Benötigte Abtastrate	29
3.5.3.2	Nichtlinearität mit Gedächtnis	36
3.5.3.3	Gedächtnislose Nichtlinearität	37
3.6	Zusammenfassung	38
<b>4</b>	<b>Gedächtnislose nichtlineare Vorstufe</b>	<b>40</b>
4.1	Adaption	41
4.1.1	Allgemeine parametrische nichtlineare Funktion	41

4.1.2	Polynom-Kennlinie . . . . .	43
4.1.2.1	Normierung der Adaptionsschrittweite der Vorstufe . . . . .	44
4.1.2.2	Initialisierung . . . . .	45
4.1.2.3	Schnellere Adaption durch Orthogonalisierung . . . . .	45
4.1.2.4	Schnellere Adaption durch RLS-Algorithmus . . . . .	47
4.1.3	Begrenzer-Kennlinie . . . . .	48
4.1.3.1	Normierung der Adaptionsschrittweite der Vorstufe . . . . .	50
4.1.3.2	Initialisierung . . . . .	52
4.2	Maße für den Adaptionszustand . . . . .	52
4.2.1	Systemabstand für die Polynom-Kennlinie . . . . .	53
4.2.2	Systemabstand für die Begrenzer-Kennlinie . . . . .	54
4.3	Steuerung der Adaption . . . . .	54
4.3.1	FIR-Filter . . . . .	54
4.3.2	Polynom-Kennlinie . . . . .	55
4.3.3	Begrenzer-Kennlinie . . . . .	57
4.4	Simulationen . . . . .	57
4.4.1	Realisierung der optimalen Schrittweiten . . . . .	58
4.4.1.1	Idealisierter Versuchsaufbau . . . . .	58
4.4.1.2	Steuerung des FIR-Filters . . . . .	59
4.4.1.3	Steuerung der Vorstufe . . . . .	61
4.4.1.4	Steuerung des RLS-Algorithmus . . . . .	63
4.4.2	Adaptionsgeschwindigkeit des Polynoms . . . . .	63
4.4.3	Eignung des nichtlinearen Modells . . . . .	64
4.4.4	Verhalten bei lokaler Störung . . . . .	66
4.5	Rechen- und Speicheraufwand . . . . .	69
4.6	Ausblick: Realisierung im Frequenzbereich . . . . .	71
4.6.1	Linearer AEC im Frequenzbereich . . . . .	71
4.6.2	Kombination von Frequenzbereichsverfahren und nichtlinearem Kompensator . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Volterra-Filter</b> . . . . .	<b>77</b>
5.1	Volterra-Filter als Echopfadmodell . . . . .	78
5.1.1	Modell des Lautsprechers . . . . .	78
5.1.2	Volterra-Kerne von Audio-Systemen . . . . .	78
5.1.3	Auswirkung der Kaskadenstruktur des Echopfads . . . . .	80
5.1.4	Messung realer Echopfade . . . . .	81
5.2	Adaption . . . . .	85
5.2.1	NLMS Algorithmus . . . . .	86
5.2.2	Systemabstand . . . . .	87
5.2.3	Konvergenzgeschwindigkeit . . . . .	88
5.2.4	Schrittweitensteuerung . . . . .	89
5.3	Ergebnisse . . . . .	91
5.3.1	Erforderliche Gedächtnislänge . . . . .	91
5.3.2	Adaption bei lokaler Störung . . . . .	92



---

5.3.3	Rechen- und Speicheraufwand . . . . .	95
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>96</b>
<b>A</b>	<b>Aspekte des LMS- und des NLMS-Algorithmus</b>	<b>99</b>
<b>B</b>	<b>Zusammenhang zwischen ERLE und Systemabstand</b>	<b>102</b>
B.1	Linearer AEC . . . . .	102
B.2	Kompensator mit Polynom-Kennlinie . . . . .	103
B.3	Kompensator mit Volterra-Filter . . . . .	105
<b>C</b>	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>107</b>
C.1	Abkürzungen . . . . .	107
C.2	Formelzeichen für den linearen Echokompensator . . . . .	108
C.3	Formelzeichen im Zusammenhang mit Nichtlinearitäten . . . . .	109
C.4	Formelzeichen für den Echokompensator in Kaskadenstruktur . . . . .	110
C.5	Formelzeichen für den Echokompensator mit Volterra-Filter . . . . .	112
C.6	Operatoren . . . . .	113
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>114</b>