

Modellierung und Kompensation nichtlinearer Effekte bei elektrodynamischen Lautsprechern

Zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTORINGENIEUR

vom Fachbereich

Elektrotechnik und Informationstechnik

der

Universität Paderborn

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Joachim Waßmuth

aus Medebach

Referent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Meerkötter

Korreferent: Prof. Dr.techn. Felix Gausch

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Februar 2000

Paderborn 2000

D 14 – 150

Berichte aus der Elektrotechnik

Joachim Waßmuth

**Modellierung und Kompensation nichtlinearer
Effekte bei elektrodynamischen Lautsprechern**

D 466 (Diss. Universität-GH Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Wassmuth, Joachim:

Modellierung und Kompensation nichtlinearer Effekte bei
elektrodynamischen Lautsprechern/ Joachim Wassmuth.

- Als Ms. gedr. - Aachen : Shaker, 2000

(Berichte aus der Elektrotechnik)

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-7373-0

Copyright Shaker Verlag 2000

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

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 3-8265-7373-0

ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Modellierung von Lautsprechern | 5 |
| 2.1 | Funktionsweise elektrodynamischer Lautsprecher | 6 |
| 2.2 | Ein äquivalentes Netzwerkmodell | 8 |
| 2.2.1 | Die nichtlineare Induktivität | 9 |
| 2.2.2 | Das Koppelnetzwerk | 13 |
| 2.2.3 | Modellierung der mechanischen Seite | 17 |
| 2.3 | Ankopplung an den akustischen Raum | 20 |
| 2.4 | Zustandsbeschreibung | 23 |
| 2.4.1 | Linearisierung im Arbeitspunkt | 24 |
| 2.4.2 | Erreichbarkeit | 27 |
| 2.4.3 | Beobachtbarkeit | 28 |
| 2.5 | Nichtberücksichtigte Effekte | 29 |
| 3 | Zeitdiskrete Modellierung - Wellendigitalrealisierung | 31 |
| 3.1 | Voraussetzungen | 31 |
| 3.2 | Realisierung | 33 |
| 3.2.1 | Bauelemente | 34 |
| 3.2.2 | Verbindungsnetzwerk | 37 |
| 3.3 | Die Bedeutung der Passivität | 41 |
| 3.3.1 | Passivitätseigenschaften von Wellendigitalrealisierungen | 41 |
| 3.3.2 | Berücksichtigung von Wortlängenbeschränkungen | 45 |
| 3.3.3 | Fazit | 46 |
| 3.4 | Wellendigitalrealisierung des Lautsprechermodells | 46 |
| 3.5 | Simulationsergebnisse | 51 |
| 3.5.1 | Vergleich zwischen Simulation und Messung | 51 |
| 3.5.2 | Einfluss der einzelnen Nichtlinearitäten | 52 |
| 4 | Parameterbestimmung | 55 |
| 4.1 | Linearisierung im Arbeitspunkt | 56 |
| 4.1.1 | Messverfahren | 59 |
| 4.1.2 | Auswertung der Messergebnisse | 62 |
| 4.1.3 | Konsequenzen | 67 |
| 4.2 | Approximation der Auslenkungsabhängigkeiten | 68 |
| 4.3 | Adaptive Parameterschätzung | 71 |
| 4.3.1 | Messergebnisse | 75 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5 | Linearisierung | 80 |
| 5.1 | Berechnung einer Zustandsrückkopplung | 81 |
| 5.2 | Untersuchungen zur Polvorgabe | 87 |
| 5.3 | Linearisierung mit Verstärker | 91 |
| 6 | Reduktion der nichtlinearen Verzerrungen | 99 |
| 6.1 | Gesamtkonzept | 100 |
| 6.2 | Simulations- und Messergebnisse | 103 |
| 6.3 | Anwendungsgebiete des Verfahrens | 115 |
| 6.4 | Probleme und Grenzen des Verfahrens | 115 |
| 7 | Zusammenfassung | 117 |
| A | Ableitungen von Funktionen mehrerer Veränderlicher | 119 |
| B | Verwendete Lautsprecher | 121 |