

**Regelungsverfahren für sensorlose elektromagnetische
Umschwing-Aktuatoren
– Anwendungen im Kraftfahrzeug –**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines

Doktor-Ingenieurs

**der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
an der Ruhr-Universität Bochum**

von

Christian Gunselmann

aus Erlangen

Bochum 2005

SCHRIFTENREIHE DES INSTITUTS FÜR ELEKTRONIK
RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
HEFT NR: 051/1

Dissertation eingereicht am: 15. März 2005
Tag der mündlichen Prüfung: 9. Dezember 2005
1. Berichter: Prof. Dr.-Ing. J. Melbert
2. Berichter: Prof. Dr.-Ing. A. Steimel

Berichte aus der Elektrotechnik

Christian Gunselmann

**Regelungsverfahren für sensorlose
elektromagnetische Umschwing-Aktuatoren**

– Anwendungen im Kraftfahrzeug –

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4926-5

ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

meinen Eltern gewidmet

*Wenn sich das Rätsel
auf zwei Beine erhebt
ohne gelöst zu werden
ist die Reihe an uns*

Jostein Gaarder
(Ursprung: Griechische Mythologie)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Eigenschaften und Anwendungen von Doppelhubmagneten	5
2.1	Klassifizierung	5
2.2	Anwendungskriterien	6
2.3	Aufbau und Funktionsweise	6
2.4	Charakterisierung	7
2.4.1	Kraftverhältnisse	7
2.4.2	Magnetische Eigenschaften	8
2.4.3	Elektrische Eigenschaften	14
2.5	Elektrische Ansteuerung	16
2.6	Bewegungsverhalten	18
2.6.1	Ablösevorgang	19
2.6.2	Umschwingvorgang	19
2.6.3	Ankeraufprall	20
2.6.4	Begrenzung der Aufsetzgeschwindigkeit	20
2.7	Aktuator-Modell	21
2.8	Regelung	22
2.8.1	Störgrößen	24
2.8.2	Stromverlauf für sanftes Ankeraufsetzen	25
2.8.3	Sensorbehafte Regelsysteme	26
2.8.4	Sensorlose Regelsysteme	27
3	Erweiterte sensorlose Regelung für elektromagnetische Doppelhubmagnete	31
3.1	Ablösephase	32
3.1.1	Elektromagnetische Wechselwirkung zwischen Anker und Spule	33
3.1.2	Verfahren 1: Auswertung der Spannung der Ablösespule	35
3.1.3	Verfahren 2: Auswertung des Stroms der Ablösespule	42
3.1.4	Verfahren 3: Auswertung des Stroms der Fangspule	43
3.1.5	Beurteilung der Detektionsverfahren	44
3.2	Umschwing- und Annäherungsphase	46
3.2.1	Regelalgorithmus	48
3.3	Aufprallphase	48
3.3.1	Zusammenhang zwischen Strom- und Bewegungsverlauf	50
3.3.2	Bewegungsgleichungen für das Festhalten des Ankers	54
3.3.3	Detektion der Regelabweichung	54
3.3.4	Regelalgorithmus	59

4	Reduzierung der Energieaufnahme	63
4.1	Ursachen für Verluste	63
4.2	Idealer Stromverlauf in der Umschwingphase	65
4.3	Reduzierte Energieaufnahme in der Umschwingphase	67
4.4	Reduzierte Energieaufnahme in der Aufprallphase	69
4.5	Reduzierte Energieaufnahme in der Haltephase	73
5	Sensorlose Regelung für Gaswechselventile	75
5.1	Überblick	75
5.2	Potenziale	76
5.2.1	System-Anforderungen	79
5.2.2	Störeinfluss durch Zylinderdruckvariationen	81
5.3	Sensorlose Regelung	83
5.3.1	Ablöseregelung	84
5.3.2	Annäherungsregelung	88
5.3.3	Minimale Aufsetzgeschwindigkeit	89
5.4	Energieaufnahme	92
5.5	Messstand	95
5.6	Kompaktes Steuergerät	96
6	Sensorlose Regelung für die Impulsaufladung	99
6.1	Überblick	99
6.2	Potenziale der Impulsaufladung	100
6.3	Funktionsweise der Ladungssteuerung	101
6.3.1	Impulsladerventil	102
6.4	Sensorlose Regelung	104
6.4.1	Störgrößen	105
6.4.2	Ablöseregelung	108
6.4.3	Aufprallregelung	108
6.4.4	Robustheit	109
6.4.5	Energieaufnahme	109
6.5	Betrieb des Impulsladers am Motorprüfstand	111
6.6	Zusammenfassung	114
7	Steuergerät für die Impulsaufladung	115
7.1	Schaltungskonzept	115
7.1.1	Leistungsendstufe	116
7.1.2	Analoge Signalverarbeitung	117
7.1.3	Digitale Signalverarbeitung	118
7.1.4	Schnittstellen	119
7.1.5	Schutzfunktionen	120
7.2	Realisiertes Steuergerät	120
8	Zusammenfassung und Ausblick	121
	Literaturverzeichnis	123
	Stichwortverzeichnis	131