

**Entwurf  
elektromagnetischer Aktoren  
unter Berücksichtigung von  
Hysterese**

Sören Rosenbaum



Universitätsverlag Ilmenau  
2011

## Impressum

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 23. Dezember 2010

1. Gutachter: Dr.-Ing. Tom Ströhla  
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Eberhard Kallenbach  
(Steinbeis Transferzentrum Mechatronik Ilmenau)

3. Gutachter: Prof. Dr. techn. Klaus Janschek  
(Technische Universität Dresden)

Tag der Verteidigung: 17. Juni 2011

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### **Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

### **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

[www.mv-verlag.de](http://www.mv-verlag.de)

ISSN 2193-0007 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-86360-008-2 (Druckausgabe)

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011000261

---

Titelfoto: Sören Rosenbaum

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XVII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XXI</b>
<b>Verzeichnis verwendeter Symbole und Abkürzungen</b>	<b>XXIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Einordnung in den Entwurfsprozess</b>	<b>3</b>
2.1 Stand der Technik . . . . .	3
2.2 Aktuelle Problemstellungen beim Entwurf elektromagnetischer Antriebe . . . . .	9
2.3 Benötigte Entwurfsstrategien . . . . .	13
2.4 Das Programmsystem SESAM . . . . .	15
<b>3 Präzisierung der Aufgabenstellung</b>	<b>19</b>
<b>4 Physikalische Grundlagen</b>	<b>23</b>
4.1 Vollständiges Ersatzschaltbild des Elektromagneten . . . . .	23
4.2 Hysterese und Remanenz . . . . .	27
<b>5 Energie- und Kraftberechnungen bei Elektromagneten mit Hysterese</b>	<b>33</b>

<b>6</b>	<b>Hysteresis-Modelle</b>	<b>41</b>
6.1	Übersicht über bekannte Hysteresis-Modelle . . . . .	41
6.1.1	Phänomenologische Modelle . . . . .	41
6.1.2	Physikalische Modelle . . . . .	47
6.2	Gegenüberstellung der Hysteresis-Modelle . . . . .	51
6.3	Invertierung und Diskretisierung des Jiles-Atherton-Modells . . . . .	54
6.3.1	Inverses Modell . . . . .	54
6.3.2	Diskrete Modelle . . . . .	56
6.4	Berechnungsaufwand . . . . .	58
<b>7</b>	<b>Parameteridentifikation des Jiles-Atherton-Modells</b>	<b>63</b>
7.1	Ermittlung der Parameter aus Messwerten . . . . .	63
7.2	Optimierung des Parametersatzes . . . . .	66
7.2.1	Evolutionäre Optimierung . . . . .	68
7.2.2	Simplex-Verfahren . . . . .	74
7.2.3	Sequentielle Einzelparameteroptimierung . . . . .	78
7.2.4	Schwellenakzeptanzoptimierung . . . . .	83
7.3	Auswertung und Vergleich der Optimierungsverfahren . . . . .	89
7.4	Berechnungsaufwand . . . . .	94
<b>8</b>	<b>Implementation des Jiles-Atherton-Modells in Simulationsprogramme</b>	<b>97</b>
8.1	Experimentalumgebung . . . . .	97
8.2	Simulationsumgebung SESAM . . . . .	100
8.2.1	Parameteridentifikationswerkzeug . . . . .	100
8.2.2	Jiles-Atherton-Modell für Knotenspannungsanalyse . . . . .	101
8.2.3	Inverses Jiles-Atherton-Modell für Maschenstromanalyse . . . . .	103

<b>9</b>	<b>Simulationsbeispiele</b>	<b>107</b>
9.1	Modellbasierte Neukurvenberechnung . . . . .	107
9.2	Statische Simulation von Elektromagneten . . . . .	110
9.2.1	Berechnung der Fluss- und Krafthysteresen . . .	110
9.2.2	Berechnung von Remanenz . . . . .	115
9.2.3	Verifikation mit Messdaten . . . . .	120
9.3	Statische Optimierung von Elektromagneten . . . . .	123
9.4	Dynamische Simulation und Schaltzeitberechnung . . . .	126
<b>10</b>	<b>Anwendung für Regelungsaufgaben</b>	<b>133</b>
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>143</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>149</b>