

Bernd Löhlein

**Mechatronische Antriebssysteme  
mit PM-Synchronmaschinen  
und ihr Entwurf**

Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik  
Band 20

**SHAKER  
VERLAG**



Technische Universität Kaiserslautern  
Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme

# **Mechatronische Antriebssysteme mit PM- Synchronmaschinen und ihr Entwurf**

Dr.-Ing. Bernd Löhlein  
geboren in Annweiler am Trifels

Vom Fachbereich Elektro- und Informationstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung der Lehrbefugnis im Fach  
Mechatronische Systeme und Werkstoffe der  
Elektrotechnik  
genehmigte Habilitationsschrift

Kaiserslautern, 2019

Datum des wissenschaftlichen Vortrags: 11. Juli 2018

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth  
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Nienhaus  
Prüfungsvorsitzende: Prof. Dr.-Ing. habil. Ping Zhang

Dekan des Fachbereichs: Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky



Kaiserslauterer Beiträge zur Antriebstechnik

Band 20

**Bernd Löhlein**

**Mechatronische Antriebssysteme mit  
PM-Synchronmaschinen und ihr Entwurf**

D 386 (Habil.-Schr. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag  
Düren 2021

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

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

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Habil.-Schr., 2019

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8144-2

ISSN 1866-5357

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

# Vorwort

Diese Habilitationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Rat und Oberingenieur am Lehrstuhl für Mechatronik und elektrische Antriebssysteme im Fachbereich Elektro- und Informationstechnik der Technischen Universität Kaiserslautern. Wenngleich das vorliegende Schriftstück von mir alleine verfasst wurde, so haben viele Menschen in meinem Arbeitsumfeld auf unterschiedlichste Art und Weise zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Allen Beteiligten möchte ich meinen herzlichen Dank aussprechen.

Meinem Mentor und Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Huth, danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit, sowie die umfassende fachliche Unterstützung und Diskussion. Zudem möchte ich mich für die tolle gemeinsame Zeit am Lehrstuhl bedanken - sie hat mir viel Freude bereitet!

Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Nienhaus, danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Des Weiteren möchte ich gerne den Mitarbeitern danken, die in den sieben Jahren nach meiner Promotion zu dem tollen Arbeitsklima an unserem Lehrstuhl beigetragen haben: Dr.-Ing. Frank Rettinger, Dr.-Ing. Klaus Kreckler, Prof. Dr.-Ing. Martin Hoffmann, Dr.-Ing. Hans-Georg Schirmer, Dr.-Ing. Carl-Henrik Fock und Dr.-Ing. Stefan Mathis danke ich für ihre Unterstützung in fachlichen Belangen. Herr Udo Oppermann gilt mein Dank für die projektbezogene Zuarbeit im Antriebslabor und die Ausdauer beim gemeinsamen Ausmisten und Renovieren des Laborbereichs. Frau Stephanie Jung als gute Seele des Lehrstuhls und Partnerin im Büro-Alltag war für mich stetige Hilfe für viele Belange der organisatorischen Arbeit. Meine beiden Kollegen Dr.-Ing. Patrick Hauck und Dr.-Ing. Ralf Fischer möchte ich besonders würdigen. Sie haben mich neben zahllosen fachlichen Diskussionen auch auf privater Ebene unterstützt und hatten stets für Probleme ein offenes Ohr. Schließlich ist es mir ein Anliegen, Herr Dr.-Ing. Thomas Samuel meinen Dank auszusprechen. Er hat mich bei vielen alltäglichen Arbeiten an allen Fronten entlastet und damit maßgeblich dazu beigetragen, dass ich mir die Zeit

zum Abfassen der Habilitationsschrift nehmen konnte. Zudem danke ich den Studierenden, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten und während ihrer HiWi-Tätigkeit zum Gelingen dieser Arbeit einen Beitrag geleistet haben für ihr Engagement und ihre Mitarbeit. Schließlich danke ich meinem lieben Kollegen Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Bernhard Hauck für die andauernde organisatorische Unterstützung seitens des Dekanats des Fachbereichs und letztlich für seine Anregung, das Thema Habilitation überhaupt anzugehen.

Abschließend ist es mir eine Herzensangelegenheit meiner Familie zu danken, der ich diese Habilitationsschrift widmen möchte. Meinen Eltern Gerhard und Ingrid Löhlein danke ich dafür, dass sie mich während des Studiums und der Promotion kontinuierlich ideell und materiell unterstützt haben. Dies öffnete mir erst den Weg, die Habilitation als finalen Ausbildungsschritt anzugehen und erfolgreich abzuschließen. Während dieser Zeit standen sie mir stets mit Rat und Tat liebevoll zur Seite. Schließlich gilt mein besonderer Dank meiner Frau Kim, die mich durch alle schwierigen Phasen begleitet hat. Besonders im letzten Jahr hat sie viel Frust und Sorge gemeinsam mit mir durchlebt und mir gleichzeitig die Kraft gegeben die Arbeit fertigzustellen. Liebe Kim, ich liebe Dich und freue mich auf die zukünftigen gemeinsamen Jahre.

Stelzenberg, im Herbst 2019

Bernd Löhlein

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Symbole und Abkürzungen</b>	<b>III</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Mechatronische Antriebssysteme mit PM-Synchronmotoren</b>	<b>7</b>
<b>3. Funktionsprinzip der feldorientiert betriebenen PM-SYM</b>	<b>17</b>
3.1. Grundlagen der feldorientierten Regelung . . . . .	19
3.2. Voraussetzungen . . . . .	23
3.3. PM-Synchronmotor . . . . .	23
3.3.1. Ständer des PM-Synchronmotors . . . . .	24
3.3.2. Läufer des PM-Synchronmotors . . . . .	30
3.4. Frequenzumrichter . . . . .	33
3.4.1. Leistungsteil des Frequenzumrichters . . . . .	34
3.4.2. Regelungsteil des Frequenzumrichters . . . . .	38
3.5. Gebersysteme . . . . .	45
<b>4. Neuartige Werkstoffe im Elektromaschinenbau</b>	<b>49</b>
4.1. Anforderungen an den Werkstoff aus Applikationssicht . .	50
4.2. Klassifizierung der elektrischen und magnetischen Stoffe .	56
4.3. Werkstoffe - Stand der Technik . . . . .	63
4.3.1. Werkstoffe für Wicklungen . . . . .	63
4.3.2. PM-Werkstoffe . . . . .	64
4.3.3. Werkstoffe für magnetische Aktivteile . . . . .	72
4.4. Vorstellung neuartiger Werkstoffe . . . . .	77
4.4.1. Nichtrostende, magnetisierbare Stähle . . . . .	79
4.4.2. Weichmagnetische Pulververbundwerkstoffe . . . .	90
4.4.3. Weichmagnetische Ferrite . . . . .	108
4.4.4. Einordnung der weichmagnetischen Werkstoffe . .	109
<b>5. Analytische Berechnung des Betriebsverhaltens</b>	<b>113</b>
5.1. Analytisches Modell . . . . .	113
5.1.1. Thermische Modellierung . . . . .	115
5.1.2. Elektromagnetische Modellierung . . . . .	119



5.1.3.	Stationäres Betriebsverhalten . . . . .	137
5.2.	Verluste . . . . .	141
5.2.1.	Wicklungsverluste . . . . .	143
5.2.2.	Reibungsverluste . . . . .	143
5.2.3.	Ummagnetisierungsverluste . . . . .	145
5.2.4.	Wirbelstromverluste in Permanentmagneten . . . . .	160
<b>6.</b>	<b>Numerische Berechnung</b>	<b>165</b>
6.1.	Modellbildung und -reduktion . . . . .	167
6.2.	Numerische Simulation . . . . .	172
6.2.1.	Simulationsvorbereitung . . . . .	172
6.2.2.	Lösen . . . . .	195
6.2.3.	Ergebnisaufbereitung . . . . .	197
<b>7.</b>	<b>Applikationsbeispiele aus der Praxis</b>	<b>219</b>
7.1.	Hochtourige Textil-Motorspindeln . . . . .	220
7.2.	Unterwasser-Motorpumpen . . . . .	227
7.3.	Hocheffiziente PSM mit Massivläufer aus nichtrostendem Stahl . . . . .	234
7.3.1.	PM-Spaltrohrmotoren . . . . .	235
7.3.2.	PM-Spindelmotoren mit Massivläufer . . . . .	242
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>251</b>
<b>A.</b>	<b>Anhang</b>	<b>255</b>
A.1.	Kraftdichte im elektromagnetischen Feld . . . . .	256
A.1.1.	Maxwellscher Spannungstensor . . . . .	256
A.1.2.	Allgemeine Lorentzkraft . . . . .	259
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>263</b>