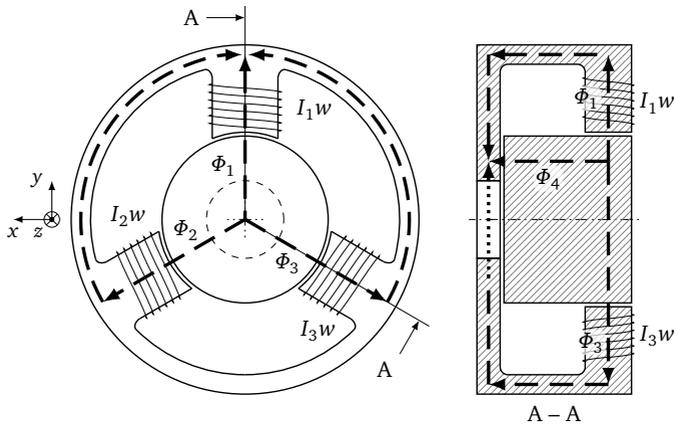


Erik Fleischer

Entwurf, Modellierung und nichtlineare Regelung eines integrierten Radial-Axial-Magnetlagers



Technische Universität Dresden

**Entwurf, Modellierung und nichtlineare
Regelung eines integrierten
Radial-Axial-Magnetlagers**

Dipl.-Ing. Erik Fleischer

An der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann
Prof. Dr. sc. techn. Wolfgang Amrhein

Einreichung: 28. Oktober 2016

Verteidigung: 8. September 2017

Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und
Antrieben

Band 14

Erik Fleischer

**Entwurf, Modellierung und nichtlineare Regelung
eines integrierten Radial-Axial-Magnetlagers**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5934-2

ISSN 1869-8190

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

FÜR WOLFGANG

Ein Schriftsteller des Alterthums nannte Arithmetik und Geometrie die beiden Flügel der Mathematik; ich glaube, man kann in der That ohne Uebertreibung sagen, diese beiden Wissenschaften bilden das Fundament und den Kern aller Wissenschaften, die es überhaupt mit Grössen zu thun haben. Doch sie sind nicht bloss das Fundament, sie bilden auch so zu sagen noch das Dach; denn hat man irgend ein Resultat aufgefunden, so muss man es, um Gebrauch davon machen zu können, entweder in Zahlen oder in Linien darstellen. Um es auf Zahlen zu übertragen, hat man die Hülfe der Arithmetik nöthig; um es in Linien zu übersetzen, muss man sich der Geometrie bedienen.

JOSEPH-LOUIS DE LAGRANGE

Aus *Lagrange's Mathematische Elementarvorlesungen*, 1795.
Deutsche Übersetzung von H. Niedermüller (1880).

Vorwort

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Elektrotechnischen Institut der Technischen Universität Dresden entstanden. Ohne die Unterstützung zahlreicher Personen wäre das Vorhaben nicht durchführbar gewesen und Ihnen allen möchte ich an dieser Stelle herzlich danken:

- Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann für die Anregung des Themas, die langjährige Betreuung und die Schaffung eines Arbeitsumfeldes, das stets aufs Neue Anregungen für meine wissenschaftliche Tätigkeit geliefert hat.
- Herrn Prof. sc. techn. Wolfgang Amrhein für seine konstruktiven Hinweise zur Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens.
- Allen Kolleginnen und Kollegen der Lehrstühle für elektrische Maschinen und Antriebe der Technischen Universitäten Chemnitz und Dresden für ein hervorragendes Arbeitsklima, die zahlreichen Diskussionen und die vielen Anregungen.
- Der Vielzahl an Studenten, deren Abschlussarbeiten ich betreuen durfte und die wesentliche Beiträge zum Gelingen des Vorhabens geliefert haben; ein besonderer Dank gilt den Herren Dipl.-Ing. Falk Bahr und Dipl.-Ing. Stefan Tröger für wesentliche Beiträge zum experimentellen Teil.
- Den Mitarbeitern der Werkstätten und Labore der Technischen Universität Dresden für deren Unterstützung beim Aufbau der Versuchstechnik.
- Dem Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie für die Möglichkeit den Kraftmessprüfstand des Instituts zu nutzen und die Unterstützung bei den daran durchgeführten Messungen.
- Der DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT für die Förderung des Vorhabens im Rahmen des Projekts „Verlustarme Magnetlagerung“.

IV

- Den Firmen LEVITEC GmbH, HÖGANÄS GmbH und ATS-ELBTALWERK GmbH für die Unterstützung beim Aufbau der Versuchsstände.
- Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Schuhmann für die langjährige Begleitung meiner Tätigkeit.
- Meiner Familie, für die langjährige Unterstützung und den Beistand in den letzten Jahren. Besonders möchte ich meinem Vater Wolfgang danken, der mir so Vieles mit auf den Weg gegeben hat und dem ich diese Arbeit widmen möchte.

Flöha, im Sommer 2016

Erik Fleischer

Kurzfassung

Die Lagerung zueinander beweglicher Körper im magnetischen Feld erlaubt einen Betrieb ohne mechanischen Kontakt und somit frei von Schmiermitteln und Abrieb-Partikeln. Dieser wesentliche Vorzug trägt dazu bei, dass Magnetlager für Vakuumanwendungen prädestiniert sind. Obwohl kein mechanischer Kontakt vorliegt, entstehen dennoch Verluste im Rotor in Form von Ummagnetisierungsverlusten durch die Rotation in einem örtlich feststehenden Magnetfeld. Die so entstehende Wärme kann bei einem Betrieb im Vakuum nur in geringem Maße abgeführt werden. Insbesondere für schnell laufende Rotoren resultiert daraus die Gefahr einer Überhitzung im Dauerbetrieb.

Es stehen nur wenige Maßnahmen zur Verfügung um die Kühlung von Rotoren im Vakuum zu verbessern. Somit muss von vornherein auf geringen Wärmeeintrag in den Rotor geachtet werden.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Entwicklung aktiver Magnetlager leisten, die sich durch einen besonders niedrigen Wärmeeintrag in den Rotor auszeichnen. Zu diesem Zweck wird vorgeschlagen Pulververbundwerkstoffe im Rotor einzusetzen und eine dafür geeignete Magnetlagerstruktur entworfen. Dabei werden die besonderen Anforderungen des Werkstoffes beachtet und gezielt dessen Vorzüge ausgenutzt. Zugleich wird die Topologie im Hinblick auf minimale Verluste im Rotor optimiert.

Für die daraus resultierende Struktur des dreipoligen Kombilagers wird beispielhaft ein Labormuster mit Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit einem vorhandenen konventionellen magnetischen Lager entworfen. Dies erlaubt eine Analyse hinsichtlich der aus dem verwendeten Werkstoff resultierenden besonderen Eigenschaften.

Die neue Lagerstruktur erfordert den Entwurf und die Verifikation angepasster Regelungsstrategien. Da Letzteres soweit wie möglich anhand eines Simulationsmodells mit guter Genauigkeit erfolgen sollte, wird eine domänenübergreifende Modellierungsmethodik auf Basis des LAGRANGE-Formalismus vorgestellt. So können die Wandlereigenschaft aktiver Magnetlager und Kreisel-effekte in das Modell eingearbeitet werden.

Den Abschluss bilden der Entwurf und die Diskussion zweier Regelungsstrategien, eine lineare basierend auf einer Transformationsmatrix und eine nichtlineare auf Basis exakter Ein-/Ausgangs-Linearisierung. Letztere bietet die Möglichkeit das erarbeitete Lager mit minimalen Flussdichten im Luftspalt und somit optimal hinsichtlich der Verluste im Rotor zu betreiben. Der Vergleich beider Ansätze im Zeit- und Frequenzbereich zeigt, dass trotz des Betriebes ohne magnetische Vorspannung mit der Methode der exakten Linearisierung ein ebenbürtiges oder teilweise besseres Verhalten der Lagerung im Vergleich zum Betrieb mit Vorspannung und der linearen Regelung erreicht werden kann.

Die spezielle Struktur des Lagers erlaubt einen Betrieb mit minimalen Flussdichten und Strömen in den Wicklungen. Somit erhält man ein rein elektrisch betriebenes Lager, dessen Kupferverluste in den Bereich permanentmagnetisch vorgespannter Lager reichen und das dennoch wesentlich geringere Verluste im Rotor verursacht.

Abstract

The magnetic suspension of rotating objects allows an operation without any mechanical contact and free of lubrication and particles. Thus, magnetic bearings are a highly attractive choice in vacuum applications. Although there is no mechanical contact in the bearing nevertheless losses are generated in the rotor due to the changing magnetization of the iron, as the active rotor part is rotating in a stationary magnetic field. This generates heat in the rotor which is difficult to dissipate in vacuum and thus can cause an overheating of the rotor in continuously running high speed machines.

There are only a very limited number of options available to improve heat dissipation for rotors running in vacuum. So magnetic bearings for such applications should be designed with low rotor losses in mind.

This thesis aims at contributing to the development of active magnetic bearings optimized for low rotor losses. Therefore, the application of Soft Magnetic Composites (SMC) in both rotor and stator is proposed and based on the special properties of these materials a suitable bearing structure is designed. Special attention is thereby given to the characteristics of these materials. At the same time the bearing structure is optimized for minimal rotor losses.

This leads to the proposed three pole combined bearing structure for which a prototype is designed. The main parameters have been chosen in order to facilitate a comparison to an available conventional bearing. The prototype is then analyzed especially with regards to the special properties, which have been attained by the application of Soft Magnetic Composites.

The new bearing structure requires the design and the verification of a new suitable control strategy. Before it can experimentally be tested, it needs to be verified in simulations which in turn depends on an accurate model of the magnetic suspension system. Therefore, LAGRANGES formalism is applied in order to derive a bearing model as an electromagnetic energy transducer.

Based on the proposed design and the modeling two control strategies are designed and analyzed. One is based on a linear transformation while the other applies feedback linearization to the new structure. Thus, it is possible to operate the bearing at minimal flux densities in the air gap in order to further

VIII

reduce rotor losses. The analysis is complemented by a comparison of both strategies in the time and the frequency domain.

The new bearing structure in combination with the proposed control strategy allows an operation both with minimal flux densities and low currents. Thus, one obtains a bearing with copper losses comparable to permanent magnet biased bearings combined with very low rotor losses.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grenzen konventioneller Lager	1
1.2	Entstehung und Bedeutung von Rotorverlusten	4
1.3	Beweggrund und Zielsetzung	6
1.4	Struktur der Arbeit	6
2	Entwurf eines dreischenkligen Kombilagers	9
2.1	Grundformen aktiver Magnetlager	9
2.2	Lager mit integrierter Radial- und Axialkraftherzeugung	10
2.3	Weichmagnetische Werkstoffe in Magnetlagern	11
2.3.1	Metallische Werkstoffe	11
2.3.2	Pulververbundwerkstoffe	13
2.3.3	Weichmagnetisch hochgefüllte Kunststoffe	16
2.3.4	Kombination unterschiedlicher Werkstoffe	17
2.4	Struktur eines dreischenkligen Kombilagers	18
2.4.1	Einzelne Lagerstelle	18
2.4.2	Fünfsichtige Magnetlagerung	20
2.5	Analytische Kraftberechnung	21
2.5.1	Magnetisches Netzwerk	21
2.5.2	Bestimmung der magnetischen Widerstände	22
2.6	Realisierung eines Labormusters	25
2.7	Analyse des realisierten Lagers	27
2.7.1	Fehlerbetrachtung zum magnetischen Widerstand der Luftspalte	27
2.7.2	Verifikation des analytischen Modells	29
2.7.3	Erzielbare radiale und axiale Lagerkräfte	32
2.7.4	Durchflutungsbedarf	35
2.7.5	Positionsabhängigkeit der Lagerkraft	37
2.7.6	Untersuchungen zur Feldverzögerung durch Wirbelströme	39
2.7.7	Hysterese in der Kraft-Strom-Kennlinie	43

3	Modellierung als elektromechanischer Wandler	45
3.1	Systemanalyse	45
3.1.1	Überblick über die wesentlichen Effekte	45
3.1.2	Spannungsinduktion infolge der Rotorbewegung	47
3.2	Methoden der Modellbildung	49
3.2.1	Modellierungsparadigmen	49
3.2.2	Modellierungsmethoden für aktive Magnetlager	50
3.2.3	LAGRANGE-Formalismus für elektromechanische Modelle	52
3.3	Mechanisches Rotormodell	53
3.3.1	Kinetische Koenergie	54
3.3.2	Potentielle Energie	57
3.3.3	Lagerkräfte	57
3.3.4	Bewegungsgleichungen	59
3.3.5	Unwucht und Lagemessung	61
3.4	Elektromechanisches Modell	62
3.4.1	Wahl der Koordinaten	62
3.4.2	Magnetische Energie	65
3.4.3	Bewegungsgleichungen	67
3.4.4	Berechnung der Wicklungsströme	70
3.4.5	Reihenschaltung von Wicklungen	71
3.4.6	Permanentmagnete	72
3.5	Rechentechnische Umsetzung	73
3.6	Experimentelle Verifikation	73
3.7	Bewertung der Methodik	75
4	Regelung eines dreischenkigen Kombilagere	77
4.1	Regelungsverfahren für kombinierte Lager	77
4.2	Lineare Regelung	81
4.2.1	Transformation der Wicklungsströme	81
4.2.2	Analyse der radialen Kräfte	84
4.2.3	Analyse der axialen Kräfte	88
4.3	Nichtlineare Regelung mit minimaler Vorspannung	89
4.3.1	Überblick	89
4.3.2	Nichtlineare Zustandsgleichungen in Q-Koordinaten	91
4.3.3	Methode der exakten Ein-/Ausgangs-Linearisierung	94
4.3.4	Bestimmung eines Rückführgesetzes in Q-Koordinaten	96
4.4	Ermittlung des Offsets zum magnetischen Zentrum	101
4.5	Bestimmung der Reglerparameter	103

4.6	Charakterisierung und Vergleich der Regelungsansätze	109
4.6.1	Überblick	109
4.6.2	Einfluss der Nichtlinearität in der Kraft-Strom-Kennlinie	111
4.6.3	Magnetische Kopplung zwischen den Achsen einer Lagerstelle	114
4.6.4	Robustheit	115
4.6.5	Verhalten bei drehendem Rotor	117
4.7	Bestimmung eines Rückführgesetzes in Ψ -Koordinaten	118
4.7.1	Ansatz	118
4.7.2	Zustandsraummodell in Ψ -Koordinaten	119
4.7.3	Rückführgesetz für die radialen Lagerachsen	120
5	Zusammenfassung und Ausblick	125
A	Ergänzungen	129
A.1	Bestimmung konkaver Hüllkurven	129
A.2	Kardanwinkel	129
A.3	Magnetische Netzwerke	131
A.4	Behandlung in Reihe geschalteter Wicklungen – ein Beispiel	131
B	Technische Daten und Zeichnungen	135
B.1	Daten des ausgelegten dreischenkligen Kombilagers	135
B.2	Reglerparameter	137
B.3	Versuchsstände	139
B.3.1	Fünffachsige Magnetlagerung mit dreischenkligen Kombilagern	139
B.3.2	Weitere Versuchsstände	143
C	Thesen	145
	Literaturverzeichnis	149