

Beitrag zur Untersuchung von passiven planaren
Hochgeschwindigkeitsmagnetlagern für die Anwendung
in der Mikrosystemtechnik

Markus Klöpzig

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt

der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Ilmenau

am 17.09.2001

Berichterstatter

Prof. Dr.-Ing. habil. H. Wurmus, TU Ilmenau
Prof. Dr.-Ing. habil. E. Kallenbach, TU Ilmenau
Prof. Dr.-Ing. habil. R. Werthschützky, TU Darmstadt

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 25.07.2002

Berichte aus der Mikromechanik

Markus Klöpzig

**Beitrag zur Untersuchung von passiven planaren
Hochgeschwindigkeitsmagnetlagern für die
Anwendung in der Mikrosystemtechnik**

Shaker Verlag
Aachen 2003

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Klöpzig, Markus:

Beitrag zur Untersuchung von passiven planaren Hochgeschwindigkeitsmagnetlagern für die Anwendung in der Mikrosystemtechnik / Markus Klöpzig.

Aachen : Shaker, 2003

(Berichte aus der Mikromechanik)

Zugl.: Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2002

ISBN 3-8322-1090-3

Copyright Shaker Verlag 2003

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1090-3

ISSN 0947-2398

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

Zusammenfassung - Abstract

Diese Arbeit behandelt die folgenden Punkte zum Thema passive Hochgeschwindigkeitsmagnetlager:

- Erläuterung des Standes der Technik für rotatorische und translatorische Magnetlager
- Darstellung der Zielstellung der Arbeit auf Basis des Standes der Technik
- Ableitung der analytischen Zusammenhänge zum Entwurf von passiven Magnetlagern
- Diskussion von Konstruktionsvarianten und Erläuterung der realisierten Konstruktion
- Durchführung der Modellierung des elektromechanischen Systems und Ableitung von Schlußfolgerungen zur Weiterentwicklung des Lagersystems
- Erläuterung der Vor- und Nachteile beim Einsatz der Mikrosystemtechnik für ausgewählte Lagerkomponenten und Vorschlag eines Polygonspiegelarrays

This thesis investigates the following items on high speed magnetic bearings:

- Discussion on the state of technology of rotational and translational passive magnetic bearing systems
- Presentation of thesis objectives based on the state of the technology
- Derivation of analytical formulas for the design of passive magnetic bearings
- Discussion on design variations and explanation of the actual mechanical design
- Derivation of an analytical model for the electro-mechanical system and conclusions for further development of the bearing system
- Analysis of the advantages and disadvantages of applying micro-mechanical components in bearing systems and proposals for the application of magnetic bearings in miniaturized polygonal mirrors

INHALTSVERZEICHNIS

1	Stand der Technik Motivation und Aufgabenstellung	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Begriffsdefinitionen	4
1.3	Stand der Technik	5
1.3.1	Passive rotatorische Magnetlager	6
1.3.2	Passive lineare Magnetlager	11
1.3.3	Passive mikrotechnische Magnetlager	14
1.4	Vergleich und Bewertung der passiven Magnetlager	16
1.5	Ableitung der Zielstellung der Arbeit	19
2	Entwurf und Konstruktion von passiven Magnetlagersystemen	23
2.1	Physikalische Grundlagen passiver Magnetlager	23
2.1.1	Reduktion der Anzahl der instabilen Freiheitsgrade durch geeignete Geometrien	24
2.1.2	Vollständige Stabilisierung des Systems	28
2.2	Herleitung der Zusammenhänge für den magnetischen Grobentwurf	28
2.2.1	Prinzip zur Ermittlung der Lagersteifigkeitsmatrix	29
2.2.2	Rotatorisch passive Magnetlager	31
2.2.3	Translatorische passive Magnetlager	36
2.2.4	Zusammenfassung der Lagercharakteristiken	42
2.3	Herleitungen der Zusammenhänge für den magnetischen Feinentwurf	43
2.3.1	Herleitung Biot-Savartsches Gesetz	43
2.3.2	Elementarstromtheorie für Permanentmagnete	45
2.3.3	Ableitung von Berechnungsroutinen	46
2.3.4	Alternative Methoden und Vor- und Nachteile der Methoden	52
2.4	Diskussion der Materialeigenschaften permanentmagnetischer Werkstoffe	53
2.5	Analyse von Konstruktionsvarianten	59
2.5.1	Auslegung der passiven Lagerkomponente	60
2.5.2	Auslegung der aktiven Lagerkomponente	64
2.5.3	Weitere Lagerkomponenten	70
2.6	Konstruktive Realisierung eines Designs	71
2.6.1	Auswahl der realisierten Variante und konstruktive Umsetzung	71

2.6.2	Berechnungs- und Meßergebnisse	73
3	Modellierung des passiv magnetgelagerten Antriebssystems	79
3.1	Modellbildung für das elektromechanische System	79
3.1.1	Einführung	79
3.1.2	Herleitung des allgemeinen Modells für das Magnetlager- system	80
3.2	Ableitung von Sonderfällen	87
3.2.1	Bewegungen in der xy-Ebene	87
3.2.2	Berechnung des Einflusses der radialen Unwuchtanregung .	87
3.2.3	Simulation des Antriebs	90
3.2.4	Simulation der Antriebsrückwirkung	95
3.2.5	Simulation der Bewegung in der z-Achse	101
3.2.6	Simulation der Systemreaktion auf Verkipfung	103
3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der mechanischen Modellbildung	105
4	Technologische Realisierung in Mikrosystemtechnik	107
4.1	Einleitung	107
4.2	Vor- und Nachteile beim Einsatz der Mikrosystemtechnik	107
4.2.1	Vor- und Nachteile der mikrotechnischen Herstellung von Spulensystemen	107
4.2.2	Vor- und Nachteile der mikrotechnischen Herstellung von Permanentmagnetschichten	109
4.3	Mikrotechnischer Lösungsvorschlag	112
5	Zusammenfassung und Ausblick	117
A	Symbolverzeichnis	129