

Aktives Wuchten eines in Magnetlagern überkritisch betriebenen Rotors

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Kai Adler

aus Welschneudorf

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Nordmann
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Richard Markert

Tag der Einreichung: 30.10.2007
Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2007

Darmstadt 2008

D17

Forschungsberichte Mechatronik & Maschinenakustik

Kai Adler

**Aktives Wuchten eines in Magnetlagern
überkritisch betriebenen Rotors**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2008

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7404-7

ISSN 1616-5470

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Mechatronik im Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt. Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes MAGFLY beschäftigte mich die Idee des Einsatzes aktiver Magnetlager in Flugtriebwerken. Zusammen mit mehreren Partnern kamen wir dem Ziel ein kleines Stück näher.

An erster Stelle möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Nordmann meinen herzlichen Dank aussprechen. Sein ruhiger, anständiger und menschlicher Umgang macht ihn zu einem tollen Chef. Er stellte mir, wie allen seinen Mitarbeitern, ein ideales Arbeitsumfeld zur Verfügung und unterstützte mich bei allen Problemchen mit denen ich mich an ihn gewandt habe.

Vielen Dank auch an Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Markert für die spontane Übernahme des Korreferats.

Wenn ich mit ein bisschen Wehmut an meine erste berufliche Tätigkeit an der Technischen Universität Darmstadt zurückdenke, dann liegt das maßgeblich an meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen. Insbesondere die Mädels des Fachgebiets werde ich vermissen, bei denen ich, als Kaffeepäuschen getarnt, mein Herz ausschütten durfte. Ihr habt mir damit sehr geholfen. Ebenso möchte ich mich bei Joachim, Simon, Alex, Martin, Thomas und Dirk für Anregung, Hilfe, Kritik und die freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Ich bin sehr froh, dass mir einige von Euch als Freunde erhalten bleiben.

Außerdem gilt mein Dank Christoph, Eric, Melanie und Achim, deren Studien- und Diplomarbeiten ich betreuen durfte. Ihr habt einen nicht unerheblichen Teil zum Entstehen der vorliegenden Arbeit beigetragen.

Meinen Laufpartnern Verena und Helmut kann ich nicht genug danken. Beim Laufen mit Euch kamen mir oft die besten Ideen und es gelang, den Ballast des Alltags abzuwerfen.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie danken, die die Grundlage meines Wirkens ist. Ich liebe Euch.

Ludwigsburg im Oktober 2007

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Stand der Technik | 3 |
| 1.1.1 | Aktive Magnetlager | 3 |
| 1.1.2 | Wuchten in aktiven Magnetlagern | 5 |
| 1.1.3 | Wuchten | 9 |
| 1.1.4 | Betriebswuchten | 11 |
| 1.1.5 | Aktives Wuchten | 11 |
| 1.2 | Motivation und Aufbau der Arbeit | 14 |
| 2 | Rotordynamische Grundlagen | 17 |
| 2.1 | Der Lavalläufer | 17 |
| 2.1.1 | Bewegungsgleichung in festen Koordinaten | 18 |
| 2.1.2 | Stationärer Drehzustand | 19 |
| 2.1.3 | Komplexe raumfeste Koordinaten | 20 |
| 2.1.4 | Freie Schwingung | 21 |
| 2.1.5 | Erzwungene Schwingung: Unwuchtanregung als Sonderfall der harmonischen Anregung | 21 |
| 2.1.6 | Gewichtseinfluss des horizontal gelagerten Rotors | 24 |
| 2.1.7 | Isotrope / Anisotrope Lagerung | 25 |
| 2.1.8 | Resonanzdurchfahrt | 26 |
| 2.2 | Gyroskopie | 27 |
| 2.2.1 | Bewegungsgleichung | 27 |
| 2.2.2 | Freie Schwingung | 30 |
| 2.2.3 | Erzwungene Läufer-schwingung | 32 |
| 2.3 | Elastische Rotoren in aktiven Magnetlagern | 34 |
| 2.3.1 | Bewegungsgleichung in aktiver Magnetlagerung bei PD-Rückführung | 34 |
| 2.3.2 | Freie Schwingung | 36 |
| 2.3.3 | Unwuchtanregung | 38 |
| 2.3.4 | Magnetlager- und Sensorpositionen | 38 |
| 2.4 | Wuchten elastischer Rotoren | 40 |
| 2.4.1 | Grundsätzliches zum Wuchten | 40 |
| 2.4.2 | Modales Wuchten elastischer Rotoren | 45 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.4.3 | Wuchten mit Einflusskoeffizienten | 51 |
| 2.4.4 | Gegenüberstellung modales Wuchten und Wuchten mit EK | 56 |
| 3 | Versuchsstand | 57 |
| 3.1 | Rotor | 57 |
| 3.1.1 | Konstruktiver Aufbau | 57 |
| 3.1.2 | Rotormodell: Dynamisches Verhalten | 59 |
| 3.2 | Aktives Magnetlager | 69 |
| 3.2.1 | Differenzansteuerung des aktiven Magnetlagers | 71 |
| 3.2.2 | Elektromagnetische Induktion | 74 |
| 3.2.3 | Frequenzabhängigkeit von Lagersteifigkeit und Dämpfung | 77 |
| 3.2.4 | Verwendetes Magnetlagersystem | 77 |
| 3.2.5 | Systemidentifikation mit Magnetlagern | 83 |
| 3.2.6 | Kräftefreier Lauf - UFRC | 84 |
| 3.3 | Wuchtaktuatoren | 87 |
| 3.3.1 | Auswahl | 87 |
| 3.3.2 | Aufbau und Funktionsweise | 88 |
| 3.3.3 | Redesign | 92 |
| 3.3.4 | Funktionstest | 94 |
| 3.3.5 | Dauer der Stellfähigkeit | 96 |
| 3.3.6 | Verstellstrategien | 97 |
| 3.3.7 | Fehleranalyse | 100 |
| 3.4 | Antrieb des Versuchsstands | 102 |
| 3.4.1 | Verlustbestimmung durch Auslaufversuch | 103 |
| 3.5 | Gesamtsystem | 104 |
| 3.5.1 | Bildung und Anpassung des Streckenmodells | 106 |
| 3.6 | Reglerentwurf für das Magnetlager | 107 |
| 3.6.1 | Anforderungen an die Regelung | 107 |
| 3.6.2 | Dezentrale Regelung | 108 |
| 3.6.3 | Regler | 109 |
| 3.7 | Hochlaufmessungen | 112 |
| 4 | Aktives Wuchten | 115 |
| 4.1 | Auswahl der Methode | 116 |
| 4.1.1 | Auswuchten | 117 |
| 4.1.2 | Nachwuchten | 121 |
| 4.2 | Anpassung der Methode | 122 |
| 4.2.1 | Auswuchten | 122 |
| 4.2.2 | Nachwuchten | 125 |
| 4.3 | Auswucht- und Betriebsprogramm | 127 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.3.1 | Programmstruktur | 128 |
| 4.4 | Aktives Wuchten unter Verwendung der UFRC | 129 |
| 4.4.1 | Auswuchten: Prinzipieller Funktionsnachweis | 129 |
| 4.4.2 | Fehleranalyse | 130 |
| 4.4.3 | Auswuchten: Kontinuierlicher Hochlauf | 137 |
| 4.4.4 | Nachwuchten: Prinzipieller Funktionsnachweis | 139 |
| 4.4.5 | Nachwuchten im Betrieb | 140 |
| 4.4.6 | Fazit | 141 |
| 4.5 | Aktives Wuchten bei unmittelbarer Verwendung der Sensorsignale | 142 |
| 4.5.1 | Signalverarbeitung | 142 |
| 4.5.2 | Analyse der Unwuchtindikatoren | 144 |
| 4.5.3 | Auswuchten: Kontinuierlicher Hochlauf | 147 |
| 4.5.4 | Nachwuchten im Betrieb | 149 |
| 4.5.5 | Fazit | 150 |
| 5 | Zusammenfassung und Ausblick | 151 |
| A | Anhang | 163 |
| A.1 | Modalanalyse | 163 |
| A.1.1 | Biegeeigenformen MO 1 (Rotor inkl. Kupplung) | 164 |
| A.1.2 | Biegeeigenformen MO 2 (Rotor an den Antrieb gekoppelt) | 166 |
| A.1.3 | Biegeeigenformen MO 3 (Rotor ohne Kupplung) | 168 |
| A.2 | Systemidentifikation | 170 |
| A.3 | Programmstruktur Nach- und Auchwuchten | 172 |
| A.4 | Funktion der Wuchtaktuatoren | 174 |