



Dissertation

Entwicklung eines selbstzentrierenden homopolaren Reluktanzmagnetlagers

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
technischen Wissenschaften (Dr. techn.), eingereicht an der TU Wien, Fakultät für
Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, von

Dipl.-Ing. Manuel Stadler

Mat.Nr.: e01025617

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Friedrich Bleicher
Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien, E311

Wien, Juni 2021

Begutachtet von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Markus Haider

Institut für Energietechnik und

Thermodynamik

TU Wien

Getreidemarkt 9, 1060 Wien

Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Welf-Guntram Drossel

Institut für Werkzeugmaschinen und

Produktionsprozesse

TU Chemnitz

Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz

Eid

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Dissertation

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Ort, Datum

Unterschrift

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner mehrjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien der Technischen Universität Wien. Die Arbeit wurde unter der Leitung von Herrn Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Friedrich Bleicher durchgeführt, den an dieser Stelle mein großer Dank gebührt.

Für die Begutachtung meiner Arbeit möchte ich Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Haider von der Technischen Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel vom Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse der TU Chemnitz danken.

Meinen Kollegen Stefan Gössinger, Patrick Pelzmann und insbesondere Thomas Weiler danke ich für die fachlichen Diskussionen und die tatkräftige Unterstützung.

Der Firma EneRes Ltd. möchte ich für die unkomplizierte Bereitstellung der Sensor- und Messeinheit meinen Dank aussprechen.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Rosemarie und Markus Stadler, die mir als Lektoren zur Seite standen, sowie meiner Partnerin Isabella.

Kurzfassung

Die Entwicklung und prototypische Umsetzung eines selbstzentrierenden homopolaren Reluktanzmagnetlagers stellt das zentrale Thema der vorliegenden Dissertation dar. Neben der Erbringung des „Proof of Concept“ steht die umfassende Charakterisierung des Magnetlagers hinsichtlich seiner Eigenschaften im Vordergrund dieser Arbeit.

Das Magnetlager wird in axialer Richtung aktiv geregelt, während der zweite bis fünfte Freiheitsgrad eine passive Stabilisierung aufweisen. Die sechste vorhandene Achse stellt die Rotationsachse des Systems dar. Es erfolgt weder eine aktive noch passive Stabilisierung der sechsten Achse. Der aus kosten- und produktionstechnischen Gründen einfach gehaltene Aufbau des Magnetlagers besitzt neben einem Permanentmagnetring eine Spule. Je nach aktueller axialer Spalthöhe kann das Magnetfeld der Permanentmagneten mit Hilfe der Spule geschwächt oder verstärkt werden. Der vertikal zu lagernde Rotor wird dadurch axial in Schwebe gehalten. Die Stabilisierung in radialer Richtung erfolgt durch eine Reluktanzkraft, die einer möglichen Auslenkung entgegenwirkt. Durch die Verwendung von zwei Lagern kann einer Verkippung des Rotors im rechten Winkel zur Drehachse entgegengewirkt werden. Unter Einbeziehung der Gravitationskraft als gegenwirkende Kraft kann auf eine vorgespannte Magnetlageranordnung verzichtet werden, wodurch die Energieeffizienz des Systems positiv beeinflusst wird.

Auf Basis umfangreicher magnetostatischer Simulationen erfolgt eine genaue Begutachtung der unterschiedlichen wirkenden Kräfte und Steifigkeiten des Reluktanzlagers. Neben weiterführenden modalanalytischen Betrachtungen findet überdies eine thermische Betrachtung des gesamten Aufbaus statt. Die simulatorische Abbildung des gesamten mechatronischen sowie regelungs- und steuerungstechnischen Aufbaus schließt den theoretischen Teil der Arbeit ab. Die Wirkweise des Magnetlagers wird in einem eigens konzipierten Teststand ausführlich geprüft und der „Proof of Concept“ erbracht. Weiters wird der Teststand für die Verifizierung der durchgeführten Simulationen herangezogen. Beschleunigungsversuche zeigen, dass die kritischen Drehzahlen durchlaufen werden können und somit ein Betrieb im überkritischen Drehzahlbereich möglich ist. Die Ergebnisse der abschließenden Auslaufversuche sowie der äußerst geringe Strombedarf des Systems untermauern die Effizienz des Magnetlagers.

Abstract

The development and prototypical testing of the self-centering homopolar reluctance magnetic bearing concept is the central topic of this dissertation. Besides the proof of concept, the comprehensive characterization of the magnetic bearing properties is a main task of the present thesis.

The magnetic bearing is actively controlled in axial direction, while four other axes show a passive stabilization. The sixth existing axis represents the rotational axis of the system. The magnetic bearing mainly consists of a permanent magnetic ring, an electrical coil as well as core material. The design is kept simple for cost and manufacturing reasons. The actual gap size between the bearing and the rotor can be influenced by strengthen or weaken the magnetic field of the permanent magnets by energizing the coil. The vertical supported rotor, is thus hold in axial suspension. In case of a radial deflection a counteracting reluctance force occurs due to the geometry of the bearing. By using two identical magnetic bearings in one system an uncontrolled tilting of the rotor can be prevented. By using the force of gravitation, a magnetically preloaded bearing design can be neglected, which positively influences the energy efficiency.

Based on extensive magnetostatic simulations, the stiffness of the magnetic bearing is examined in detail. In addition, the natural frequency response of the spinning system is simulated and a thermal analysis of the entire structure is performed. The theoretical part of the work is completed by the set-up of a simulation model which represents the entire mechatronic as well as the control engineering structure. The operability of the magnetic bearing is extensively tested in a specially designed test rig and the proof of concept is provided. Moreover, the test rig is used for the verification of the performed simulations. Extensive acceleration tests show that the critical speed range can be passed and thus operation at supercritical speed is possible. The results of the final run-out test and the extremely low power consumption of the system demonstrate the efficiency of the magnetic bearing.

Abkürzungsverzeichnis

ADC	analog digital converter
AMB	active magnetic bearing
CLA	control law accelerator
CPU	central processing unit
DOF	degrees of freedom
EDB	electrodynamic bearing
EF	Eigenfrequenz
FEM	finite elemente methode
FES	flywheel energy storage
FES-System	flywheel energy storage system
FIR	finite impulse response
HTS	high temperature superconductor
IGBT	insulated-gate bipolar transistor
IIR	infinite impulse response
LTI	linear time-invariant
ODE	ordinary differential equation
PDE	partial differential equation
PHS	pumped-storage hydroelectricity
PID	proportional-integral-derivative
PMB	passive magnetic bearing
SC	supercapacitor
SMB	superconducting magnetic bearing
SMES	superconducting magnetic energy storage
TES-System	thermal energy storage system
USV	unterbrechungsfreie Stromversorgung

Glossar

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
B_R	Remanenzflussdichte	T
B_S	Sättigungsflussdichte	T
D_m	mittlerer Wirkdurchmesser der beiden Lager- rillen am Magnetlager	mm
E_{Rot}	Rotationsenergie	kW
F_G	Erdanziehungskraft	N
F_R	Reluktanzkraft	N
F_{ax}	wirkende Axialkraft	N
F_{rad}	Reluktanzkraft, radiale Rückstellkraft	N
H_C	Koerzitivfeldstärke	A/m
J_Z	Massenträgheitsmoment bezüglich Z-Achse	kg·m ²
L	Induktivität	H
$M_{B,Scheibe}$	Bremsmoment aufgrund des Luftwiderstandes	Nm
$M_{B,Zylinder}$	Bremsmoment aufgrund des Luftwiderstandes	Nm
M_{axial}	resultierendes Moment aufgrund der ungleich- mäßigen Anziehungskräfte bei Verkippung	Nm
M_{radial}	resultierendes Moment aufgrund der radial wirkenden Reluktanzkraft	Nm
N	Anzahl der Windungen einer Spule	-
$P_{Ver,Spule}$	ohmscher Verlust einer Spule	W
R_m	Reluktanz, magnetischer Widerstand	H^{-1}
R	elektrischer Widerstand	Ω
T_C	kritische Temperatur	K
U_{ind}	induzierte Spannung	V
U_m	magnetische Spannung	A
W_{mag}	Feldenergie	Ws
Φ	magnetischer Fluss	Wb
Θ	magnetische Durchflutung	A
α	Verkippungswinkel	°
$\dot{\omega}$	Winkelbeschleunigung	rad/s ²
ϵ	elektrische Permittivität	As/Vm

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
μ_0	magnetische Feldkonstante	$\approx 4\pi 10^{-7} \text{N/A}^2$
μ_R	Permeabilitätszahl, relative Permeabilität	—
μ	Permeabilität	H/m
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
ρ	elektrische Ladungsdichte	As/m ²
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
σ	elektrische Leitfähigkeit	1/($\Omega \cdot \text{m}$)
τ	Zeitkonstante, Stromanstiegszeit	ms
T	Maxwellscher Spannungstensor	-
n	Normaleneinheitsvektor	-
\vec{B}	magnetische Flussdichte	T
\vec{D}	elektrische Flussdichte	As/m ²
\vec{E}	elektrische Feldstärke	V/m
\vec{F}_L	Lorentzkraft	N
\vec{H}	magnetische Feldstärke	A/m
\vec{M}	Magnetisierung	A/m
\vec{j}	Stromdichte	A/m ²
\vec{v}	Geschwindigkeit	m/s ²
b_k	FIR Filterkoeffizient	-
b	Breite	mm
c_w	Strömungswiderstandskoeffizient	-
f_e	äquivalente elektrische Frequenz	Hz
g	Fallbeschleunigung, Schwerebeschleunigung	9.81 m/s ²
$h [k]$	Impulsantwort	-
k_{ax}	Steifigkeit in axialer Richtung aufgrund der Stromvariabilität	N/I
k_i	Steifigkeit in axialer Richtung	N/m
k_{rad}	Steifigkeit in radialer Richtung	N/m
k_y	Steifigkeit um die y-Achse	Nm/rad
m	Masse	kg
x_{ver}	radialer Versatz des Rotors	mm
z_S	Spaltgröße	mm
A	Querschnittsfläche	m ²
I	Strom	A
i(t)	zeitabhängiger Strom	A
l	Länge	mm
r	Radius	mm

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	v
Kurzfassung	vii
Abstract	ix
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	15
2.1 Grundlagen Magnetismus und Elektromagnetismus	15
2.1.1 Magnetismus	15
2.1.2 Anziehungskräfte eines Elektromagneten	17
2.1.3 Reluktanzkraft infolge einer Verschiebung tangential zum magnetischen Fluss	19
2.1.4 Earnshaw-Theorem	21
2.1.5 Hysterese-Kurve von ferromagnetischen Werkstoffen	21
2.2 Magnetlager - Stand der Technik	22
2.2.1 Aktiv geregelte Magnetlager	24
2.2.2 LC-Resonanz-Magnetlager	31
2.2.3 Permanentmagnetlager	31
2.2.4 Supraleitende Magnetlager	32
2.2.5 Elektrodynamische Lager auf Basis einer Relativgeschwin- digkeit	34
2.2.6 Wechselstromlager	36
2.2.7 Asynchronmaschine-AMB und Synchron- maschine-AMB-Kombination	37
3 Ziele der Arbeit	39
4 Funktionsweise und Entwurf des Lagers sowie des Lagersystems	45
4.1 Wirkprinzip und geometrischer Aufbau	45
4.1.1 Idealisierte Lagergeometrie	45
4.1.2 Reale Lagergeometrie	48
4.1.3 Verwendete Materialien	50
4.2 Mechanische Beschreibung des Lagersystems	52

5	Numerische Simulation des Lagersystems	57
5.1	Magnetostatische Simulationen	57
5.1.1	Magnetic Field Interface	57
5.1.2	Kraftberechnung mithilfe des Maxwellschen Spannungstensors	59
5.1.3	Abbildung der Materialien in der Simulationsumgebung . .	60
5.1.4	Angewendete Modellvereinfachungen	61
5.1.5	Validierung des Simulationsmodells	63
5.1.6	Axialkraft-Simulation	66
5.1.7	Radialkraft-Simulation	68
5.1.8	Berechnung der Lagersteifigkeit	70
5.2	Modalanalytische Betrachtung des Rotorsystems	73
5.3	Thermische Simulation der Magnetlager	77
6	Optisches Positions- und Geschwindigkeitsmesssystem	83
6.1	Anforderungen an das Messsystem	83
6.2	Systemaufbau und Beschreibung	84
7	Modellbasierte Auslegung des Lagerregelkreises	89
7.1	Systematische Beschreibung des Regelkreises	90
7.1.1	FIR-Filter	91
7.1.2	PID-Regler	93
7.1.3	Lookup-Tabelle zum positionsabhängigen Kraftausgleich .	94
7.1.4	Übergeordnete Führungsgrößenadaptierung	94
7.2	Beschreibung des mechatronischen Aufbaues	96
7.2.1	Bewegungsgleichung	96
7.2.2	Steuerlogik der H-Brücke	96
7.2.3	Sensorlose Spulenstromermittlung	98
7.2.4	Mikrocontroller	102
7.3	Systemabbildung in Matlab/Simulink	104
7.3.1	Modellabbildung H-Brücke und Magnetlager	105
7.3.2	Simulatorische Abbildung des Strom-Position-Kraft- Zusammenhanges	106
7.3.3	Modellabgleich	107
8	Experimentelle Untersuchung und funktionelle Validierung	109
8.1	Mechanischer Aufbau des Lagerteststandes	109
8.1.1	Sensorik zur Lagercharakterisierung	112
8.1.2	Rotor-Antrieb	113
8.1.3	Vakuumtechnik	114
8.2	Konstruktive Umsetzung und Fertigung der Magnetlager und des Teststandes	115
8.2.1	Magnetlager	115

8.2.2	Teststand	117
8.3	Schwebeversuche im stationären Zustand	118
8.4	Versuche bei drehendem Rotor	121
8.5	Auslaufversuche	125
9	Zusammenfassung und Ausblick	127
	Abbildungsverzeichnis	135
	Tabellenverzeichnis	139
	Literaturverzeichnis	141