

Dipl.-Ing. Andreas Baral, Kassel

**Entwicklung,  
Zustandsidentifikation  
und Regelung eines  
magnetisch gelagerten  
Hochgeschwindigkeits-  
antriebs**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

Nr. **649**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Lagerung von Maschinenelementen .....</b>	<b>5</b>
2.1 Das Wälzlager .....	5
2.2 Die Magnetlagerung .....	6
2.2.1 Die passive Magnetlagerung .....	7
2.2.2 Die aktive Magnetlagerung .....	9
<b>3 Historische Entwicklung und Einsatzgebiete von Magnetlagersystemen.....</b>	<b>11</b>
<b>4 Das Rotormodell .....</b>	<b>13</b>
4.1 Modell der elastischen Welle .....	13
4.1.1 Identifikation der Eigenfrequenzen mit Hilfe der FEM-Analyse .....	14
4.1.1.1 Die statische FEM-Analyse.....	15
4.1.1.2 Die dynamische FEM-Analyse .....	16
4.1.2 Die magnetisch gelagerte elastische Welle .....	21
4.1.3 Die experimentelle Modalanalyse .....	23
4.1.3.1 Bestimmung der Frequenzgangmatrix.....	24
4.1.3.2 Nichtparametrische Identifikation der experimentellen Frequenzgänge ....	27
4.1.3.3 Parametrische Identifikation der modalen Parameter .....	27
4.1.3.4 Verfeinerung des FEM-Modells.....	31
4.2 Modellreduktion.....	32
4.2.1 Modellreduktion mit Hilfe der balancierten Zustandsraumbeschreibung .....	32
4.2.2 Systemdarstellung einer starren Welle .....	37
4.2.3 Systemdarstellung als Masse-Feder-Dämpfungssystem .....	46

<b>5 Komponenten des Magnetlagersystems .....</b>	<b>48</b>
5.1 Das Magnetlager .....	49
5.1.1 Axiale und radiale Magnetisierung .....	49
5.1.2 Analytische Berechnung der magnetischen Zugkraft .....	52
5.1.3 Die Differenzansteuerung .....	59
5.1.4 Linearisierung der Kraftgleichung .....	62
5.1.5 Die numerische Magnetfeldberechnung .....	67
5.1.5.1 Die Finite-Differenzen-Methode (FDM) .....	67
5.1.5.2 Die Finite-Elemente-Methode (FEM) .....	69
5.1.6 Die Spannungsgleichung .....	76
5.1.6.1 Herleitung der Spannungsgleichung .....	76
5.1.6.2 Linearisierung der Spannungsgleichung .....	80
5.2 Die Meßtechnik .....	82
5.2.1 Weg- und Geschwindigkeitsmessung .....	82
5.2.2 Sensorposition .....	84
5.2.3 Strommessung .....	87
5.3 Der Leistungssteller .....	87
5.4 Das Signalprozessorsystem .....	89
5.4.1 Leistungsmerkmale des Signalprozessorsystems .....	90
5.4.2 Der Signalfilter .....	92
<b>6 Steuerungsarten des Magnetlagers .....</b>	<b>94</b>
6.1 Die Stromsteuerung .....	94
6.1.1 Stromregelkreis mit Pulsbreitenmodulation .....	96
6.1.2 Stromregelkreis mit Zweipunktregler .....	98
6.2 Die Spannungssteuerung .....	100
6.3 Die Kraftsteuerung .....	102
6.4 Die Steuerbarkeit und das Steuerbarkeitsgebiet .....	103
6.4.1 Steuerbarkeitsuntersuchung für das stromgesteuerte Magnetlager .....	106
6.4.2 Steuerbarkeitsuntersuchung für das spannungsgesteuerte Magnetlager .....	106
6.4.3 Steuerbarkeitsuntersuchung für das kraftgesteuerte Magnetlager .....	107

---

<b>7 Zeitdiskretisierung des Systems .....</b>	<b>108</b>
7.1 Das Adaptionsverfahren .....	110
7.2 Wahl der Abtastzeit .....	111
<b>8 Zustandsgrößenidentifikation des Magnetlagers .....</b>	<b>116</b>
8.1 Beobachtbarkeit .....	116
8.2 Der Luenberger Beobachter .....	117
8.3 Der reduzierte Beobachter .....	120
8.4 Der Störgrößenbeobachter .....	121
<b>9 Regelung des Magnetlagers.....</b>	<b>124</b>
9.1 Die analoge PID-Regelung des Magnetlagers .....	125
9.2 Die robuste Regelung .....	127
9.2.1 Das Polgebiet im Laplace-Bereich.....	128
9.2.2 Abbildung des Polgebietes in der z-Ebene .....	130
9.2.3 Abbildung des Polgebietes in der p-Ebene.....	132
9.2.3.1 Abbildung eines beliebigen Systems zweiter Ordnung .....	134
9.2.3.2 Abbildung eines beliebigen Systems dritter Ordnung.....	136
9.2.4 Abbildung des Polgebietes im k-Raum .....	138
9.3 Optimaler Zustandsregler mit Hilfe des quadratischen Gütekriteriums.....	144
9.3.1 Wahl der Bewertungsmatrizen .....	146
9.3.2 Abbildung im k-Raum.....	150
9.4 Die Störgrößenkompensation .....	151
<b>10 Simulation und Messung.....</b>	<b>153</b>
10.1 Simulation des Magnetlagers .....	153
10.2 Messung am Prüfstand .....	155
<b>11 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>160</b>
11.1 Zusammenfassung .....	160
11.2 Ausblick.....	161

<b>Anhang A1: Versuchsstand I.....</b>	<b>163</b>
<b>Anhang A2: Versuchsstand II.....</b>	<b>166</b>
<b>Anhang B: Zu Kapitel 5.4 - Das Signalprozessorsystem (Technische Daten).....</b>	<b>168</b>
<b>Anhang C: Zu Kapitel 4.1.1.2 - Dynamische FEM-Analyse.....</b>	<b>170</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>173</b>