

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

**Bewegungsgrößenerfassung in magnet-  
gelagerten Antrieben mit berührungslosen  
magnetischen Sensoren**

Von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur**

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Marco Schramm

geb. am 05.04.1978 in Gera

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. R. Werner, TU Chemnitz

Tag der Einreichung: 07.12.2009

Tag der Verteidigung: 22.09.2010



Dresdner Schriftenreihe zu elektrischen Maschinen und Antrieben

Band 2

**Marco Schramm**

**Bewegungsgrößenerfassung in  
magnetgelagerten Antrieben mit  
berührungslosen magnetischen Sensoren**

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**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.

Zagl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9572-1

ISSN 1869-8190

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe der Technischen Universität Chemnitz sowie am gleichnamigen Lehrstuhl der Technischen Universität Dresden.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Hofmann, für die Anregung zu dieser Arbeit, für die Unterstützung und die Betreuung während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter sowie für die Übernahme eines Gutachtens. Durch neue Ideen und Lösungsansätze ermöglichte er die kontinuierliche Bearbeitung der wissenschaftlichen Thematik über mehrere Jahre.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Werner von der TU Chemnitz für die Übernahme eines Gutachtens sowie für das Interesse, die freundlichen Hinweise und die bereichernden fachlichen Diskussionen zu den zentralen Kapiteln dieser Arbeit.

Ich danke weiterhin allen Kollegen und Mitarbeitern der beiden Lehrstühle für die anregenden Diskussionen, Hilfestellungen in Sachfragen und die gute Zusammenarbeit. Den Mitarbeitern der Werkstätten in Chemnitz und Dresden danke ich für die Unterstützung bei der praktischen und technischen Realisierung meiner Versuchsstände.

Der LEViTEC GmbH möchte ich für die kooperative Zusammenarbeit danken, die gewonnenen Messergebnisse haben die Arbeit maßgeblich bereichert.

Mein abschließender Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die durch ihre finanzielle Förderung diese Dissertation erst ermöglicht hat.

Dresden, im Dezember 2009

<b>Vorwort</b>	<b>3</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>6</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>15</b>
1.1 <i>Motivation und Zielstellung der Arbeit</i>	15
1.2 <i>Aufbau der Arbeit</i>	18
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>19</b>
2.1 <i>Sensoren für die Lagemessung in magnetischen Lagern</i>	19
2.2 <i>Regelungsstrukturen für sensorgesteuerte Magnetlager</i>	25
<b>3 Konzept und Modellierung magnetischer Lagesensoren</b>	<b>27</b>
3.1 <i>Wirkprinzip eines magnetischen Lagesensors</i>	27
3.2 <i>Analytischer Entwurf über ein Reluktanzmodell</i>	30
3.3 <i>Berechnung und Optimierung mittels FEM-Analyse</i>	38
3.4 <i>Entwicklung eines Sensorprototypen</i>	40
3.5 <i>Aufbau eines Versuchsstandes zur Radiallagemessung</i>	45
3.6 <i>Messungen von Radiallage und Auslenkgeschwindigkeit</i>	46
3.6.1 <i>Einfluss der Drehzahl</i>	49
3.6.2 <i>Einfluss der magnetischen Eigenschaften der Messspur</i>	52
<b>4 Skalierbarer Sensor für Radial- und Winkellagemessung</b>	<b>59</b>
4.1 <i>Entwurf eines skalierbaren Sensors</i>	59
4.2 <i>Auswahl des Magnetwerkstoffes</i>	61
4.3 <i>Numerische Berechnung mit 3D-FEM-Modell</i>	62
4.3.1 <i>Einfluss des Messobjektdurchmessers</i>	64
4.3.2 <i>Einsatzmöglichkeit für größere Luftspalte</i>	65
4.4 <i>Prototypentwicklung eines radial skalierbaren Sensors</i>	67
4.5 <i>Radiallagemessung am Luftlagerversuchsstand</i>	68
4.5.1 <i>Drehzahlabhängigkeit des Lagesignals</i>	69
4.5.2 <i>Verwendung einer SMC-Messspur</i>	71
4.6 <i>Lagemessung an magnetgelagerten Antrieben</i>	72

---

<b>5</b>	<b>Messung der Winkellage mittels inkrementaler Messspur</b>	<b>81</b>
5.1	<i>Stand der Technik bei Winkellage- und Drehzahlgebern</i>	81
5.2	<i>Entwurf eines inkrementalen Messsystems</i>	87
5.2.1	Theoretischer Entwurf mit FEM-Simulation	89
5.2.2	Fertigung einer ausgewählten Messspur	90
5.3	<i>Messergebnisse</i>	91
<b>6</b>	<b>Magnetlagerregelung mit magnetischen Sensoren</b>	<b>94</b>
6.1	<i>Beschreibung des Versuchsaufbaus</i>	94
6.2	<i>Reglerentwurf für eine aktive, radiale Magnetlagerstelle</i>	100
6.2.1	PIDT <sub>1</sub> -Regler	101
6.2.2	Kaskadierter Lage- und Geschwindigkeitsregler	103
6.2.3	Zustandsregler mit vollständiger Zustandsgrößenmessung	104
6.2.4	Zustandsregler ohne Geschwindigkeitsmesssystem	106
6.3	<i>Messergebnisse und Vergleich der untersuchten Regler</i>	107
<b>7</b>	<b>Fehlereinflüsse auf das Messsystem</b>	<b>110</b>
7.1	<i>Einkopplung von Störungen in Sensor und Elektronik</i>	110
7.2	<i>Fremdfeldempfindlichkeit</i>	112
7.3	<i>Temperaturabhängigkeit</i>	114
7.4	<i>Fertigungstoleranzen, Justageungenauigkeiten</i>	115
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>116</b>
<b>9</b>	<b>Thesen</b>	<b>118</b>
	<b>Anhang</b>	<b>120</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>129</b>

## Nomenklatur

### *Verzeichnis der Formelzeichen*

$A$	Systemmatrix
$A_0$	Systemmatrix des geschlossenen Systems
$A_{\perp}$	Querschnittsfläche senkrecht zum Luftspaltfluss
$A_p$	Polfläche
$b_m$	Magnetbreite
$b_s$	Blechpaketbreite
$b_w$	Breite des magnetischen Flusses in der Messspur
$b_Z$	Zahnbreite
$b_{sf}$	Sensorfußbreite
$B$	Eingangsmatrix
$B$	magnetische Induktion (Magnetische Flussdichte)
$B_m$	maximale Induktion vor einer Ummagnetisierung
$B_O$	maximale Induktion an der Messspuroberfläche
$B_r$	Remanenzinduktion
$c_M$	Konstante für Einfluss des Magnetkreises auf $I_K$
$d$	Dicke der Hallplatte, Blechdicke
$d_{aM}$	Außendurchmesser der Messspur
$d_i$	Innendurchmesser der Luftspule
$f$	Frequenz, Kraft
$f_{Stör}$	Störkraft
$f_{Tr}$	Trägerfrequenz
$f_u$	Ummagnetisierungsfrequenz
$f_w$	Wirbelstromgrenzfrequenz (nach Wolmann)
$f_{xs}$	Kraft des Rotorschwerpunktes in x-Richtung
$f_{ys}$	Kraft des Rotorschwerpunktes in y-Richtung
$F$	Rückführmatrix
$G_{Mv}(s)$	Übertragungsfunktion des Geschwindigkeitsmesssystems
$G_{Mx}(s)$	Übertragungsfunktion des Lagemesssystems
$G_R(s)$	Übertragungsfunktion des Reglers
$G_S(s)$	Übertragungsfunktion der Strecke
$G_{St}(s)$	Übertragungsfunktion des Stromregelkreises

---

$h_m$	Höhe des Permanentmagneten
$h_s$	Blechpakethöhe
$h_{sf}$	Sensorfußhöhe
$H$	Magnetische Feldstärke
$H_c$	Koerzitivfeldstärke
$H_{cB}$	Koerzitivfeldstärke der Induktion
$H_{cJ}$	Koerzitivfeldstärke der Polarisation
$H_m$	maximale magn. Feldstärke vor einer Ummagnetisierung
$H_O$	maximale magn. Feldstärke an der Messspuroberfläche
$i_{soll}$	Stromsollwert
$i, I$	Strom
$I_K$	Kompensationsstrom
$I_{Kmax}$	maximaler Kompensationsstrom
$I_{Knenn}$	Kompensationsnennstrom
$i_s, I_S$	Steuerstrom der Magnetlagerwicklung
$i_v, I_V$	Vormagnetisierungsstrom der Magnetlagerwicklung
$J_{xx}$	Trägheitsmoment um die x-Achse
$J_{yy}$	Trägheitsmoment um die y-Achse
$k_M$	Übertragungsfaktor des Messglieds
$k_R$	Reglerverstärkung
$k_i$	Kraft-Strom-Faktor
$k_{St}$	Verstärkungsfaktor des Stromregelkreises
$k_x$	Kraft-Weg-Faktor
$K_v$	Geschwindigkeitsverstärkung des Zustandsreglers
$K_x$	Lageverstärkung des Zustandsreglers
$l_w$	Länge des magnetischen Flusses in der Messspur
$m_R$	Rotormasse
$m$	reduzierte Rotormasse
$m_0$	Periodenzahl der inkrementalen Messspur
$M_z$	Zahnmodul
$n$	Drehzahl
$n_{nenn}$	Nenn Drehzahl
$n_{max}$	Maximaldrehzahl
$P_w$	Wirbelstromverlustleistung
$P_{v,S}$	spektrale Nutzsignalleistung
$P_{v,N}$	spektrale Rauschleistung

## Nomenklatur

---

$r$	Radius
$r_a$	Außenradius der Messspur
$r_i$	Innenradius der Messspur
$r_w$	Wellenradius
$R$	ohmscher Widerstand
$R_H$	ohmscher Widerstand des Hall-Elements
$R_{ma}$	magnetischer Widerstand des Messzweigs
$R_{mFeM}$	magnetischer Widerstand des Blechpakets (Magnetzweig)
$R_{mErsatz}$	magnetischer Ersatzwiderstand
$R_{mi}$	magnetischer Widerstand im inneren Zweig
$R_{mK}$	magnetischer Widerstand des Kurzschlusszweigs
$R_{mM}$	magnetischer Widerstand des Permanentmagneten
$R_{mMstr}$	magnetischer Streuwiderstand des Magneten
$R_{mSF}$	magnetischer Widerstand des Sensorfußes
$R_{mstr}$	magnetischer Streuwiderstand zwischen den Sensorfüßen
$R_{mW}$	magnetischer Widerstand der Messspur
$R_{m\delta}$	magnetischer Widerstand des Luftspalts
$R_{m\delta h}$	magnetischer Widerstand des Luftspalts ohne Streuanteil
$R_{m\delta str}$	magnetischer Streuwiderstand des Luftspalts
$s$	komplexe Frequenz
$t_m$	Tiefe des Permanentmagneten
$t_s$	Blechpaketdicke
$t_w$	Tiefe des magnetischen Flusses in der Messspur
$T$	Zeitkonstante
$T_{ink}$	Periodendauer eines Inkrements
$T_{rot}$	Periodendauer einer Rotation
$T_M$	Zeitkonstante des Messglieds
$T_N$	Nachstellzeit
$T_{St}$	Zeitkonstante des Stromregelkreises
$T_V$	Verzugszeit
$T_1$	Verzögerungszeitkonstante
$u_0$	Erregerspannung
$\mathbf{u}$	Eingangsvariablenvektor
$U$	Spannung
$U_H$	Hall-Spannung
$U_{OH}$	Offset-Spannung des Hall-Elements

---

$U(v)$	geschwindigkeitsabhängige Spannung
$U(x)$	lageabhängige Spannung
$v$	Geschwindigkeit, Zustandsgröße
$v_{\text{soll}}$	Geschwindigkeitssollwert
$\dot{v}$	Zeitableitung der Geschwindigkeit (Beschleunigung)
$V_m$	magnetische Spannungsabfall
$w_k$	Windungszahl der Kompensationswicklung
$w_s$	Windungszahl der Steuerwicklung
$w_v$	Windungszahl der Vormagnetisierungswicklung
$W_u$	Ummagnetisierungsarbeit
$x$	Lage, Zustandsgröße, Achsenbezeichnung in x-Richtung
$x_{\text{soll}}$	Lagesollwert
$\hat{x}$	Lageamplitude
$x^*$	Lage in transformierter Koordinatenachse
$\mathbf{x}$	Zustandsvektor (enthält Zustandsgrößen $x$ und $v$ )
$\dot{x}$	Zeitableitung der Lage (Geschwindigkeit)
$\dot{\mathbf{x}}$	Zeitableitung des Zustandsvektors
$\ddot{x}$	zweite Zeitableitung der Lage (Beschleunigung)
$y$	Ausgangsvariable, Achsenbezeichnung in y-Richtung
$z$	Verschiebungsoperator, Achsenbezeichnung in z-Richtung
$ü$	Übersetzungsverhältnis
$\alpha$	Transformationswinkel Magnetkraft eines Poles
$\alpha$	Winkel der Rotation um die x-Achse
$\beta$	Winkel der Rotation um die y-Achse
$\delta$	Luftspatllänge
$\Delta$	Differenzoperator
$\varepsilon$	Drehwinkel
$\varphi$	Winkel
$\varphi_s$	Phasenverschiebung
$\Phi$	magnetischer Fluss im Messzweig
$\Phi_K$	magnetischer Fluss im Kompensationszweig
$\Phi_M$	magnetischer Fluss im Permanentmagnetzweig
$\Phi_{\text{Mstr}}$	magnetischer Streufluss

$\Phi_{MK}$	magnetischer Fluss des Permanenten im Kurzschluss
$\Phi_{\delta}$	magnetischer Fluss im Luftspalt
$\lambda$	Eigenwert
$\mu$	magnetische Permeabilität (absolute Permeabilität)
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante (Vakuumpermeabilität)
$\mu_a$	relative Amplitudenpermeabilität
$\mu_i$	Anfangspermeabilität
$\mu_r$	relative Permeabilität
$\mu_{rm}$	relative Permeabilität des Permanentmagneten
$\mu_{rNi}$	relative Permeabilität der Nickelschicht
$\mu_{rs}$	relative Permeabilität des Sensorblechs
$\mu_{rw}$	relative Permeabilität der Messspur
$\nu$	RAYLEIGH-Konstante
$\nu$	Querkontraktionszahl (Poissonzahl)
$\mathcal{O}_K$	magnetische Durchflutung der Kompensationsspule
$\mathcal{O}_M$	magnetische Leerlaufdurchflutung des Permanentmagneten
$\omega$	Kreisfrequenz

### *Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen*

bzw.	beziehungsweise
C15-Stahl	ferromagnetischer Stahl mit 0,15 % Kohlenstoffgehalt
const.	konstant
d. M.	des Messbereichs
Fa.	Firma
FEM	Finite Elemente Methode
RMS	Effektivwert (Root Mean Square)
SMC	Pulververbundwerkstoff (soft magnetic composite)
SNR	Signal-Rausch-Abstand (signal-to-noise ratio)

---

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1.1:	Funktionsprinzip einer aktiven magnetischen Lagerung	15
Abbildung 1.2:	Modell eines magnetgelagerten Rotors im Raum	16
Abbildung 2.1:	Sensorprinzipien für berührungslose Lagemessung	20
Abbildung 2.2:	Aufbau von Lagesensoren (Quelle: MICRO-EPSILON)	22
Abbildung 2.3:	Magnetischer Weg-Geschwindigkeits-Sensor [Schw-93]	24
Abbildung 3.1:	Messprinzip eines Kompensationsstromwandlers	27
Abbildung 3.2:	Frequenzgang von Kompensationsstromwandlern	28
Abbildung 3.3:	Entstehung der Hall-Spannung	28
Abbildung 3.4:	Prinzipdarstellung eines magnetischen Lagesensors	29
Abbildung 3.5:	Reluktanzmodell des Lagesensors	30
Abbildung 3.6:	Vereinfachtes Reluktanzmodell des Lagesensors	31
Abbildung 3.7:	Magnetisierter Permanentmagnet in Rechteckform	32
Abbildung 3.8:	Reluktanzmodell des Lagesensors (mit Streuung)	34
Abbildung 3.9:	vereinfachtes Reluktanzmodell (mit Streuung)	35
Abbildung 3.10:	Übertragungskennlinie (Reluktanzmodell)	37
Abbildung 3.11:	Resultierendes B-Feld bei Flusskompensation	38
Abbildung 3.12:	a) Resultierendes H-Feld b) Feldlinienverteilung	39
Abbildung 3.13:	Prototyp eines magnetischen Lagesensors (heteropolar)	40
Abbildung 3.14:	Geometrische Ermittlung der Luftspatllänge	41
Abbildung 3.15:	Versuchsaufbau zur Bestimmung der statischen Übertragungskennlinie	42
Abbildung 3.16:	Abhängigkeit des Kompensationsstromes vom Abstand	43
Abbildung 3.17:	Differentialanordnung zur radialen Rotorlageerfassung	44
Abbildung 3.18:	Linearisiertes Lagesignal in Differentialanordnung	44
Abbildung 3.19:	Luftlagerversuchsstand zur Bestimmung der dynamischen Sensoreigenschaften	45
Abbildung 3.20:	Zeitverläufe von Radiallage und Geschwindigkeit	48
Abbildung 3.21:	Zeitverläufe von Radiallage und extern integriertem Geschwindigkeitssignal	48
Abbildung 3.22:	Vergleich der Lagesignale bei Hochlauf auf $10\,000\text{ min}^{-1}$	49
Abbildung 3.23:	Drehzahlabhängigkeit der Lagesignale	50
Abbildung 3.24:	Hystereseschleifen von C15-Stahl bei verschiedenen Frequenzen	54
Abbildung 3.25:	Drehzahlabhängigkeit der Lage mit SMC-Messspur	56

Abbildung 4.1:	Prinzipdarstellung eines magnetischen Lagesensors	59
Abbildung 4.2:	Übertragungskennlinie (Reluktanzmodell homopolar)	60
Abbildung 4.3:	Induktionsverteilung bei Flusskompensation	62
Abbildung 4.4:	Induktions- und Feldstärkeverteilung in der Messspur	63
Abbildung 4.5:	Einfluss des Messobjektradius auf die statische Übertragungskennlinie (3D-FEM-Simulation)	64
Abbildung 4.6:	Induktionsverteilung bei einem Luftspalt von 0,5 mm links) $r_w = 15$ mm rechts) $r_w = 7$ mm	65
Abbildung 4.7:	Erweiterte Übertragungskennlinie für große Luftspalte (3D-FEM-Simulation)	66
Abbildung 4.8:	Prototyp eines skalierbaren Lagesensors (homopolar)	67
Abbildung 4.9:	Statische Übertragungskennlinie (homopolarer Sensor)	68
Abbildung 4.10:	Vergleich der Lagesignale bei Hochlauf auf $10\,000\text{ min}^{-1}$	69
Abbildung 4.11:	Drehzahlabhängigkeit der Lage (Stahlmessspur)	70
Abbildung 4.12:	Lagedrift im Vergleich mit SMC-Messspur (DC-Anteil)	71
Abbildung 4.13:	Lagedrift im Vergleich mit SMC-Messspur (AC-Anteil)	72
Abbildung 4.14:	Radiallagemessung an einer magnetgelagerten Welle	73
Abbildung 4.15:	Übertragungskennlinien der kalibrierten Sensoren	74
Abbildung 4.16:	Lage und Geschwindigkeit bei $100\mu\text{m}$ Sollwertsprung	74
Abbildung 4.17:	Lage, Geschwindigkeit und $\int v \cdot dt$ bei ca. $2000\text{ min}^{-1}$	75
Abbildung 4.18:	Radiale Magnetlagerstelle mit magnetischen Sensoren	77
Abbildung 4.19:	Amplitudenerhöhung bei konstanter Frequenz (50 Hz)	78
Abbildung 4.20:	Frequenzerhöhung bei konstanter Amplitude ( $25\mu\text{m}$ ) <sup>1</sup>	78
Abbildung 4.21:	Lage- und Hall-Signale bei $4800\text{ min}^{-1}$ [LEV-09]	79
Abbildung 4.22:	Lage- und Hall-Signale bei $12\,000\text{ min}^{-1}$ [LEV-09]	80
Abbildung 5.1:	Ersatzschaltbild und Ausgangssignale eines Resolvers	82
Abbildung 5.2:	Analoge/digitale Signale von Inkrementalgebern	83
Abbildung 5.3:	Ausführungen magnetischer Inkrementalgeber	84
Abbildung 5.4:	Photoelektrischer Inkrementalgeber [HEID-08]	84
Abbildung 5.5:	Messsystem zur Erfassung der relativen Winkelposition	87
Abbildung 5.6:	Kombinierte Erfassung von Radial- und Winkellage	88
Abbildung 5.7:	FEM-Simulation der inkrementalen Messspur	89
Abbildung 5.8:	Prototyp einer inkrementalen Messspur	90
Abbildung 5.9:	Lagesignale einzelner Sensoren in x- und y-Richtung bei Verwendung einer inkrementalen Messspur	91
Abbildung 5.10:	Winkellagesignale zweier um $90^\circ$ versetzten Sensoren	92

---

Abbildung 5.11:	Resultierende Lagesignale in x- und y-Richtung	93
Abbildung 6.1:	Versuchstand zur Regelung einer radialen Magnetlagerstelle mit magnetischen Sensoren	94
Abbildung 6.2	Aufbau und Wicklungsschema des 8-poligen, heteropolaren Radiallagers	95
Abbildung 6.3:	Lageregelkreis mit PIDT <sub>1</sub> -Regler	101
Abbildung 6.4:	Kaskadenregelung für Lage- und Geschwindigkeit	103
Abbildung 6.5:	Zustandsregelung mit vollständiger Zustandsgrößenmessung	106
Abbildung 6.6:	Zustandsregler ohne Geschwindigkeitsmesssystem	106
Abbildung 6.7:	Vergleich von Führungs- und Störgrößenverhalten zwischen PIDT <sub>1</sub> -(oben) und Kaskadenregler (unten)	107
Abbildung 6.8:	Vergleich von Führungs- und Störgrößenverhalten eines Zustandsreglers; oben) mit Lage- und Geschwindigkeit unten) nur mit Lagemessung	108
Abbildung 7.1:	Lage und Geschwindigkeit bei Stillstand der Welle	110
Abbildung 7.2:	Fremdfeldeinfluss auf das Lagesignal	112
Abbildung 7.3:	Temperaturabhängigkeit des Lagesignals	114

