

Erfassung der Luftspaltinduktion aktiver Magnetlager auf Basis ultradünner, flexibler Hall-Sensoren

F. Bahr^{1,*}, M. Melzer², D. Karnaushenko², D. Makarov², G. Santiago C. Bermudez², O. G. Schmidt², W. Hofmann¹
¹Elektrotechnisches Institut, Technische Universität Dresden; ²Leibniz Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW Dresden), *falk.bahr@tu-dresden.de

Kurzfassung—Zur Verbesserung der dynamischen Steifigkeit und der Präzision der Rotorpositionierung aktiver Magnetlager wurden mehrfach flussbasierte Regelungen vorgeschlagen. Dabei besteht für einen Großteil der magnetgelagerten Antriebe die Schwierigkeit, konventionelle Magnetfeldsensoren in den kleinen Luftspalten von typischerweise 500 μm zu integrieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein flexibel verformbarer Bismut-Hall-Sensor mit einer Gesamtbauhöhe von 150 μm vorgestellt und die Leistungsfähigkeit der vollständig integrierten Sensoren an einem zweiachsig magnetisch gelagerten Rotor demonstriert.

Kennwörter—Hall-Sensoren, Flussdichtemessung, Flussregelung, Magnetlager.

I. EINLEITUNG

PRÄZISE Positionierung magnetgelagerter Rotoren ist durch die frequenzabhängige, geringe Steifigkeit begrenzt. Anhand flussbasierter Regelalgorithmen wird daher die Erhöhung dynamischer Lagerparameter und der Präzision verfolgt. Die Herausforderung zur Realisierung dieses Ansatzes liegt dabei im Design, der Herstellung sowie der Montage von Magnetfeldsensoren, die im Luftspalt (500 μm) zwischen Stator und Rotor integriert werden können. Ultradünne und flexible Sensorelemente hoher Zuverlässigkeit zur Erfassung magnetischer Luftspaltflussdichten bis 2,3 T sind hierfür zu entwickeln.

Während der vergangenen Jahre wurden flexible [Parkin1996, Chen2008, Barraud2010] und dehnbare [Melzer2011, Melzer2012a, Melzer2012b] magneto-resistive Elemente hergestellt. Diese Sensoren wurden dabei vorwiegend für Magnetfeldmessungen in der Sensorebene im mT-Bereich eingesetzt, sodass sie prinzipbedingt für den Einsatz in Magnetlagern ungeeignet sind. Zur Messung magnetischer Flussdichten im Bereich von bis zu 2 T sind Hall-Effekt basierte Sensoren vorzuziehen, da sie ein nahezu lineares Verhalten bis hin zu hohen Magnetfeldstärken aufweisen. In diesem Zusammenhang wurde kürzlich über die Herstellung flexibler metallbasierter Hall-Sensoren mit einer Gesamtbauhöhe von 280 μm berichtet [Bahr2012]. Die Kernidee der Technologie liegt dabei in der geschickten Kombination ultradünner Polyetheretherkethon (PEEK)-Membranen und hochempfindlicher metallbasierter Magnetfeldsensorelementen. Die Synergie beider Komponenten resultiert in Sensorelementen mit der verblüffenden Eigenschaft, dass diese nicht nur ultradünn, sondern darüber hinaus ebenso biegsam und in sich verdrehbar sind, ohne dabei eine Einschränkung bzgl. der Empfindlichkeit aufzuweisen. Die flexiblen Elemente ermöglichen bis zu einem minimalen Biegeradius von 5 mm eine zuverlässige Messung der magnetischen Flussdichte bis 2,3 T. Dennoch weisen diese Sensoren eine noch zu große Bauhöhe auf, um sie in Magnetlagern und elektrischen Maschinen zu integrieren und die erforderlichen Sicherheitsabstände zwischen den am Statorpol befestigten Sensoren und dem Rotor unter Beach-

tung des typischen Fanglagerspiels zu erfüllen. An dieser Stelle wird der Ansatz der vorangegangenen Arbeiten weiterverfolgt, indem nun Bismut(Bi-)-basierte Hall-Effekt-Sensoren auf kommerziell verfügbaren flexiblen Leiterplatten hergestellt werden. Dies ermöglicht eine Reduktion der Bauhöhe auf 150 μm einschließlich der Verdrahtung und Verkapselung. Die damit erzielten Sensoreigenschaften werden im vorliegenden Beitrag präsentiert und die Anwendung zur Messung der magnetischen Flussdichte in einem aktiven Magnetlager diskutiert.

II. ULTRADÜNNE, FLEXIBLE HALL-SENSOREN

Zur Herstellung der Sensorelemente werden Bi-Dünnschichten auf kommerziell verfügbaren 150 μm dünnen flexiblen Leiterplatten aus Polyimid durch eine Magnetron-Sputterbeschichtung bei Raumtemperatur abgeschieden (Abb. 1a,b).

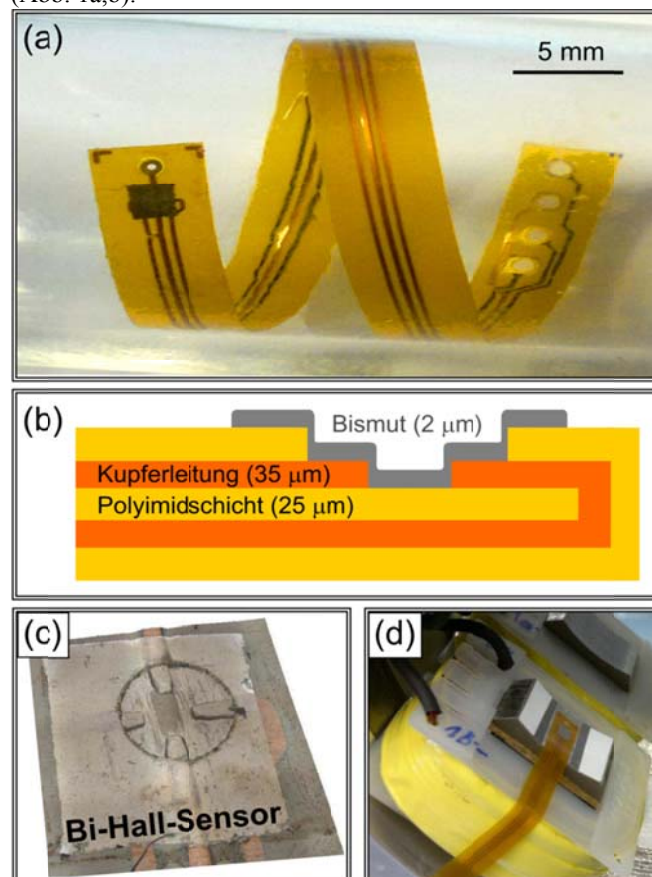


Abb. 1: a. Flexibler Bi Hall-Sensor; b. Schematischer Aufbau des Hall-Sensors; c. 3D-Mikroskopaufnahme des abgeschiedenen Bismut-Sensorelementes; d. Sensorintegration auf dem Statorpol eines Magnetlagers

Dieses Polymer zeichnet sich durch hohe mechanische, thermische sowie chemische Robustheit aus. Bi-Hall-Elemente sind eine interessante Alternative zu halbleiterbasierten Magnetfeldsensoren, da Bismut unter allen (Halb-)Metallen den höchsten Hall-Koeffizienten aufweist und zudem einfach herzustellen ist [Koseva2010, Koseva2012].

Zunächst wird eine 5 nm dünne Chrom-Haftschrift auf das Trägermaterial aufgebracht. Anschließend werden Bi-Schichten unterschiedlicher Dicke auf die freiliegenden Elektrodenenden des flexiblen Materials abgeschieden und die Leiterplatte prozessbedingt direkt kontaktiert. Somit wird die Bauhöhe der Sensorelemente von 150 μm maßgeblich durch das flexible Trägermaterial bestimmt. Auf diese Weise ist nicht nur die Kupferzuleitung (35 μm) sehr dünn und flexibel, sondern erstmalig auch das Hall-Element (Abb. 1c) selbst, das damit im nichtplanaren Luftspalt zwischen Rotor und Stator von Magnetlagern oder elektrischen Maschinen integriert werden kann. Abb. 1d zeigt die auf den gekrümmten Statorpoloberflächen angebrachten ultradünnen Hall-Sensoren.

Um die Sensorelemente zu charakterisieren, wurde deren Kennlinie sowohl für die verschiedenen Bi-Schichtdicken, als auch bei verschiedenen Temperaturen untersucht. Die Variation der Schichtdicke wurde dabei an ausgedehnten Filmen auf flexiblen Kunststoffsubstraten aus Polyetheretherkethon (PEEK) mit einem Kontaktabstand von 6 mm durchgeführt.

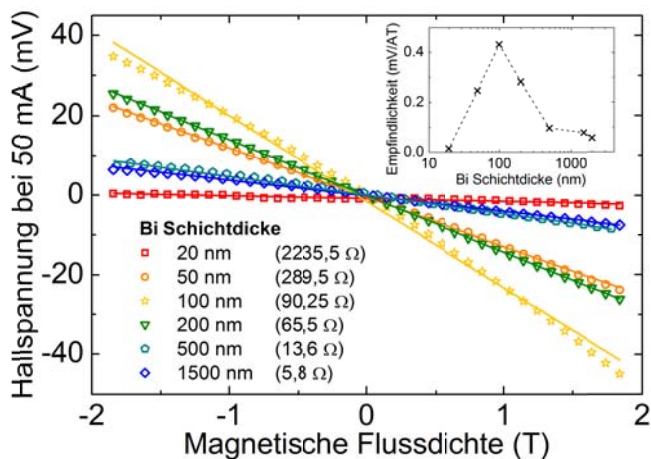


Abb. 2: Hall-Spannung bei verschiedenen Schichtdicken des Bismut-Films. Die Legende zeigt ergänzend den elektrischen Widerstand der Versorgungskontakte. Das eingefügte Diagramm fasst die Empfindlichkeit der Sensorelemente in Abhängigkeit der Schichtdicke zusammen.

In Abb. 2 ist zu erkennen, dass die Empfindlichkeit des Hall-Sensors maßgeblich von der Dicke der Bismut-Schicht abhängig ist. Da die Stromdichte im Sensorelement mit geringerer Schichtdicke zunimmt, steigt der Hall-Effekt und somit die Empfindlichkeit zunächst an. Für Schichtdicken kleiner 100 nm zeigt sich eine abrupte Absenkung der Empfindlichkeit. Im Bereich kleiner 100 nm bildet sich kein kontinuierlicher Bismut-Film aus (Abb. 3). Dieser Effekt resultiert in einem immensen Anstieg des elektrischen Widerstandes (Abb. 2). Sowohl in den Abb. 3a und 3b ist zu erkennen, dass die Ursache in der Filmqualität zu finden ist. Je geringer die

Schichtdicke, desto höher ist die Körnigkeit des Bi-Films (vgl. Abb. 3a mit 25 nm und 3b mit 100 nm Bismut-Schichtdicke), was einerseits zu Erhöhung des elektrischen Widerstandes und andererseits zur starken Reduktion der mechanischen Stabilität führt.

Obwohl das Maximum der Empfindlichkeit mit 400 mV/(AT) im Bereich von 100 nm erreicht wird, wurde für die Herstellung der Sensoren auf flexiblen Leiterplatten eine Bi-Schicht von 2 μm gewählt. Grund hierfür ist insbesondere die Stabilität und Zuverlässigkeit der Hall-Elemente, da derzeit die Gefahr des Kontaktbruches in Folge der Verbiegung für Schichtdicken kleiner 500 nm nicht ausgeschlossen und somit keine langlebige Kontaktierung garantiert werden kann.

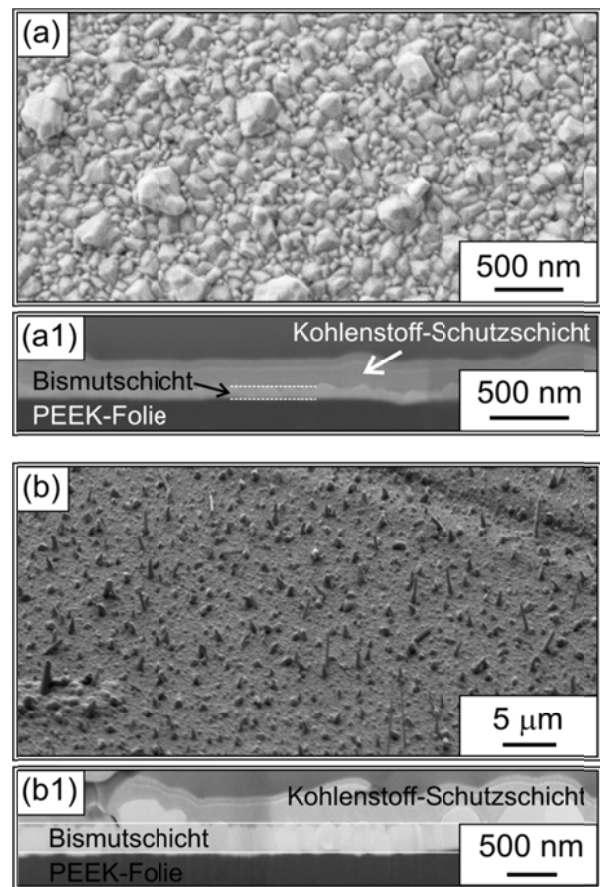


Abb. 3: Rasterelektronenmikroskopie (REM)-Aufnahme des Bismut-Films für Schichtdicken von 25 nm (a.) und 100 nm (b.). Die Unterabbildungen a1 und b1 zeigen die Querschnittaufnahmen (Schnitt hergestellt durch fokussiertes Ionenstrahlätzen). Für die REM-Aufnahme wurde die Probe mit einer zusätzlichen ca. 100 nm dicken Kohlenstoffschutzschicht abgedeckt.

Für die Verwendung in Magnetlagern und elektrischen Maschinen ist die Temperaturabhängigkeit eines Sensors von zentraler Bedeutung. Abb. 4 zeigt die Hall-Charakteristik eines der vorgestellten Bi-Sensorelemente bei verschiedenen Temperaturen. Wie für den Hall-Effekt zu erwarten, sinkt der Anstieg der Kennlinie mit höherer Temperatur aufgrund der sinkenden Ladungsträgermobilität ab. Auf den Messwerten

basierend ergibt sich der Temperaturkoeffizient für die Empfindlichkeit zu $-0,35 \text{ mV}/(\text{ATK})$.

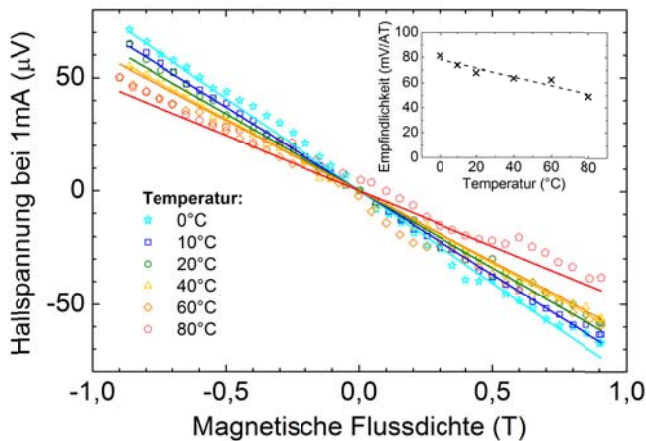


Abb. 4: Temperaturabhängigkeit des Bismut-Hall-Sensors. Das eingefügte Diagramm fasst die Empfindlichkeit in Abhängigkeit der Temperatur zusammen.

Um die Biegestabilität der vorgestellten Sensoren zu untersuchen, wurde ein Exemplar konform auf einen Adapter mit einer gekrümmten Oberfläche geklebt und anschließend erneut charakterisiert. Dabei zeigte sich eine Reduktion der Empfindlichkeit des gekrümmten Sensorelementes von lediglich 17 %. Somit sind die hergestellten Sensoren für die Verwendung in sehr kleinen und gekrümmten Luftspalten geeignet. Die mechanische Stabilität des Bi-Filmes lässt Biegungen mit Radien von bis zu minimal 2 mm ohne Beschädigung der elektrischen Kontaktierung bzw. des Sensorelementes selbst zu.

Tabelle I zeigt neben charakteristischen Abmessungen der entwickelten Sensoren die elektrischen Eigenschaften der $150 \mu\text{m}$ dünnen Hall-Elemente nach der Verstärkung der zunächst vergleichsweise geringen Hall-Spannung. Mit einem Verstärkungsfaktor von >1000 wird bei Raumtemperatur eine Sensorauflösung von ca. 25 mT im Messbereich bis 2 T erreicht. Zur Reduktion von Störungen, wurde der Versorgungsstrom im Versuchsaufbau auf 10 mA reduziert. Der Ursache der nichtlinear mit dem Hall-Strom ansteigenden Störspannung ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

TABELLE I
SENSORPARAMETER

Parameter	Zahlenwert	
Abmessungen	Sensorelementfläche	4 mm ²
	Aktivfläche	1x1 mm ²
	Bismut-Filmdicke	2 μm
	Bauhöhe	150 μm
Elektr. Parameter	Versorgungsstrom (Charakterisierung)	50 mA
	Versorgungsstrom	10 mA
	Interner elektr. Widerstand	(20...30) Ω
	Hall-Empfindlichkeit	$\approx 0,1 \text{ V}/(\text{A}\cdot\text{T})$
	Sensorauflösung	50 mT
	Signal-Rausch-Verhältnis	32 dB
Weitere Parameter	Betriebstemperatur	0 to 80 $^{\circ}\text{C}$
	Temperaturkoeffizient der Sensorempfindlichkeit	1 $\text{mV}/(\text{A}\cdot\text{T}\cdot\text{K})$
	Minimaler Biegeradius	2 mm

III. MONITORING UND FLUSSBASIERTE REGELUNG

Im Vergleich zur konventionellen strombasierten Regelung bieten flussbasierte Regelungsansätze die Vorteile reduzierter Einschwingzeiten, geringeren Überschwings, verbesserten Störverhaltens [Abdelfatha1993] und einer hohen Robustheit gegen Rauschen [Bleuler1994]. Weiterhin bietet die Flussdichtererfassung zusätzliche Möglichkeiten der Lagerüberwachung / Monitoring und der gegenseitigen Plausibilitätsprüfung verschiedener Messsysteme. Darüber hinaus zeichnen sich Algorithmen, die auf einer Regelung auf Basis der gemessenen oder beobachteten kraftbildenden Luftspaltinduktion beruhen, durch den Vorteil der kollozierten Messwerterfassung aus [Bleuler1994]. Letzterer Aspekt ist insbesondere hinsichtlich der Vermeidung von Mitkopplungen infolge biegekritischer Eigenanregungen flexibler Rotorstrukturen zu beachten [Schuhmann2006]. Weiter müssen die Hysterese und die nichtlineare Sättigung des Eisens aufgrund der direkten Flussdichtemessung bei flussbasierter Regelung nicht gesondert betrachtet werden [Gähler1998]. Ebenso wurden positionssensorlose Systeme mit integrierter Flussdichtemessung betrachtet, um kostenintensive Lagemesssysteme einzusparen. [Zlatnik1990]. Zur Realisierung experimenteller Aufbauten wurden jedoch meist kommerziell verfügbare halbleiterbasierte Hall-Sensoren in Luftspalten von 0,6 mm bis 2 mm eingesetzt. Ebenso wurden Untersuchungen zur Flussmessung im Rückschluss des Magnetkreises mit anschließender Rekonstruktion der Luftspaltinduktion durchgeführt [Imlach1998] und damit die Problematik der direkten Sensorintegration im Lagerluftspalt umgangen, wobei eine Erfassung homopolarer Vormagnetisierungen mit diesem Ansatz nicht möglich ist.

Mit Entwicklung der ultradünnen und flexiblen Hall-Sensoren eröffnet sich im Bereich Magnetlagertechnik eine neue Möglichkeit zur direkten Messung der Luftspaltinduktion in typischen Lagerluftspalten $<500 \mu\text{m}$. Die Kernidee einer Messung des Luftspaltmagnetfeldes weckt dabei besonderes Interesse, da die Flussdichte naturgemäß die magnetkraftbildende Systemgröße ist. Zur Überprüfung, inwiefern die neu entwickelten Sensoren für den Einsatz unter realen Bedingungen einsetzbar sind, erfolgt die Integration am Versuchsstand einer zweiachsigen Magnetlagerung (Abb. 5a). Das Radiallager besteht aus zwei vierpoligen Statorn mit heteropolarer Steuerflussführung und homopolarer PM-Vormagnetisierung (Abb. 5, Tab. II). An den Polen des Stators 1 wurde zunächst je ein flexibles Hall-Sensorelement ($d=150 \mu\text{m}$) zur Messung der Luftspaltflussdichte in den Lagerachsen integriert. Ein externes kapazitives Lagemesssystem liefert zudem die aktuelle Rotorposition der Lagerachsen mit einer Auflösung von ca. 50 nm. Vier NdFeB-Permanentmagnete zwischen den Statorblechpaketen erzeugen im Luftspalt (500 μm) zwischen Statorpol und Rotorblechpaket eine Vormagnetisierung von ca. 0.9 T. Zur Erzeugung der heteropolaren Steuerflussdichte von max. 0.9 T sind die Spulen einer Lagerachse differentiell in Reihe geschaltet. Insbesondere für die vorliegende Lagertopologie ist der Einsatz von Flussdichtesensorik hochinteressant, da sowohl die Steuerflussdichte B_x als auch die rotorpositionsabhängige Vormagnetisierung B_v , die zudem einer Temperaturabhängigkeit unterliegt, messbar sind.

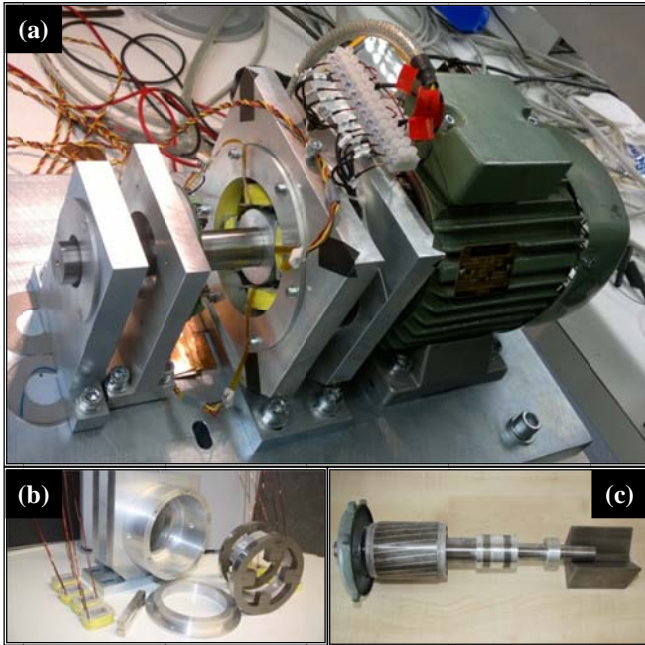


Abb. 5: Versuchsaufbau 2-achsiges Magnetlager (a), Statorkomponenten (b), Rotor mit Motor- und Lagerblechpaketen sowie Messspur des kapazitiven Positionsmesssystems (c).

Die 5 mm breiten Sensoren werden nach Abb. 6a jeweils formschlüssig am Statorpol montiert. Die flexible Bauform ermöglicht die Anpassung an die gekrümmte Poloberfläche und gestattet damit ebenso den Einsatz großflächiger Elemente. Für die dargestellte Anordnung bestimmt sich die Steuer magnetisierung B_x nach Gl. (1) durch Differenzbildung der Flussdichten B_+ und B_- gegenüberliegender Pole. Die Vormagnetisierung folgt nach Gl. (2) aus der Differenz von Gesamtluftspalt- und Steuerflussdichte.

$$B_x = \frac{1}{2}(B_+ - B_-) = \frac{1}{2}((B_V + B_x) - (B_V - B_x)) \quad (1)$$

$$B_V = B_{-/ +} \pm B_x \quad (2)$$

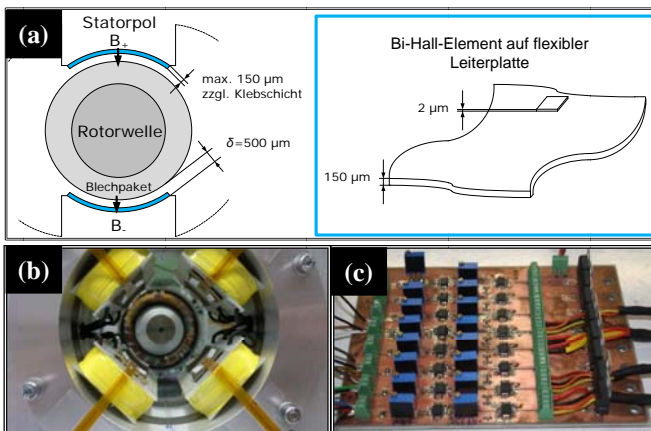


Abb. 6: Integration der Hall-Sensorik in den Luftspalt zwischen Statorpol und Rotor: Schematisch (a), Montage der 150 μm dünnen Sensorelemente (b) und Messsignal-Verstärker (zweistufiger Instrumentenverstärker) (c).

TABELLE II
PARAMETER DES MAGNETLAGERS

Parameter	Zahlenwert	
Abmessungen	Außendurchmesser Stator	115 mm
	Außendurchmesser Rotor	49 mm
	Luftspaltweite	500 μm
	Polbreite	12 mm
Vormagnetisierung	Polfläche	180 mm ²
	Anzahl NdFeB-PM	4
	Querschnittsfläche	200 mm ²
Steuerspulen	Koerzitivfeldstärke	860 kA/m
	Anzahl	8
	Windungszahl	50
Sonstige	Kraft-Weg-Faktor	1,6 N/μm
	Kraft-Strom-Faktor	85 N/A
	Nennkraft	460 N
	Maximalkraft	650 N

Die eingesetzten Hall-Sensoren unterliegen einem verformungsabhängigen Offset, sodass nach der Montage eine Korrektur in Form einer Vergleichskalibrierung mit einer permanent- oder elektromagnetischen Quelle vor dem Einbau des Rotors durchzuführen ist. Der vorliegende Beitrag zeigt zunächst die Erfassung bzw. das Monitoring der magnetischen Flussdichte. Für die Radiallagerstelle ist dabei in x- und y-Richtung eine Lageregelung mit unterlagerter Stromregelung implementiert. Abb. 7 zeigt einleitend die im Luftspalt vorherrschende Steuerflussdichte bei einer Rotorpositionierung im mechanischen Zentrum. Für den Rotor wird für eine Steifigkeit von $k=k_x=1,6 \text{ N}/\mu\text{m}$ und einen Dämpfungsgrad von $D=0,5$ eine Positioniergenauigkeit $\pm 0,25 \mu\text{m}$ erreicht. Anhand des gemessenen Flussdichtesignales lässt sich ein auf die Flussdichte umgerechnetes Rauschen von ca. $50 \text{ mT}_{\text{p-p}}$ ermitteln.

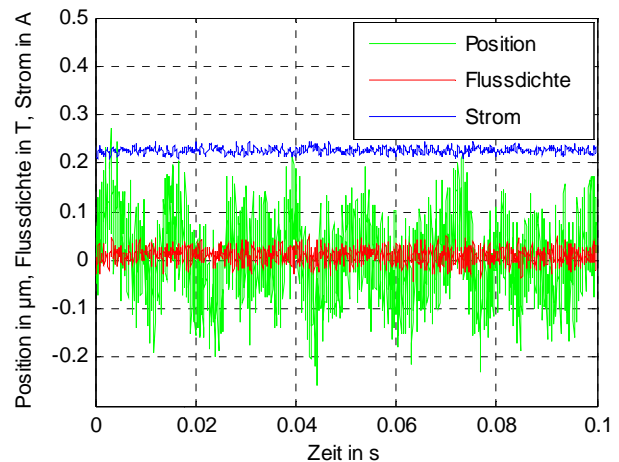


Abb. 7: Positionieren im mechanischen Zentrum (Lageregelung: Steifigkeit $k=k_x=1,6 \text{ N}/\mu\text{m}$, Dämpfungsgrad $D=0,5$)

Abb. 8 und Abb. 9 zeigen den Verlauf der magnetischen Flussdichte B und der Rotorposition x für verschiedene Rotorbewegungen bei deaktivierter Regelung. Sowohl bei rampenförmiger Änderung der Rotorposition (Abb. 8) als auch bei impulsförmiger Störkraftanregung (Abb. 9) verhält sich die Vormagnetisierungsflussdichte im Lagerluftspalt entsprechend der rampenförmigen Rotorlageänderung bzw. analog zur abklingenden Rotorschwingung.

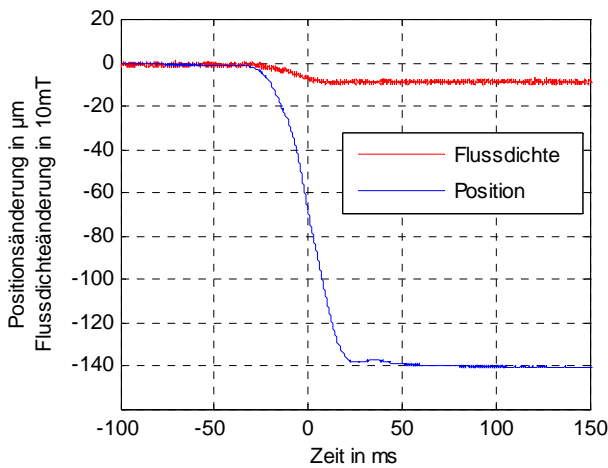


Abb. 8: Verhalten der magnetischen Vormagnetisierungsflussdichte bei rampenförmiger Rotorpositionsänderung

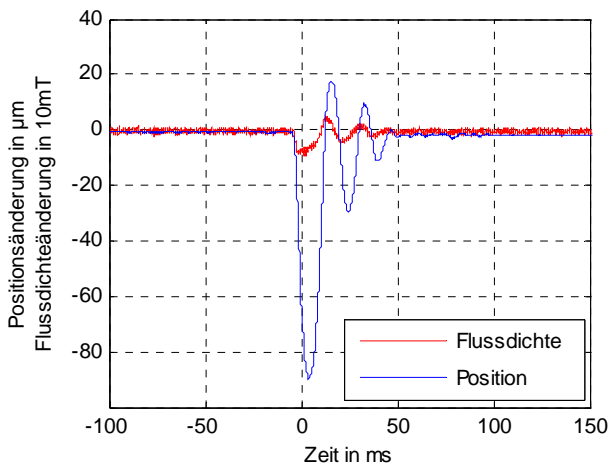


Abb. 9: Verhalten der magnetischen Vormagnetisierungsflussdichte bei impulsförmiger externer Krafteinwirkung

Im Ergebnis der experimentellen Untersuchungen wird deutlich, dass die vorgestellten Sensoren zur Erfassung der magnetischen Flussdichte in Magnetlagern grundsätzlich geeignet sind.

Im Folgenden soll nun eine lineare flussbasierte Regelstruktur betrachtet werden, die unter Nutzung der verfügbaren Sensoren den Grundstein für weitere Arbeitsschritte zur Realisierung einer flussbasierten Regelung bilden. Abb. 10 zeigt die Kaskadenstruktur einer konventionellen Magnetlagerregelung bestehend aus Lageregelung und unterlagerter Stromregelschleife. Die Regelstrecke besteht dabei aus dem Stellglied, der elektrischen Teilstrecke, der linearisierten Kraftbildung sowie der mechanischen Teilstrecke.

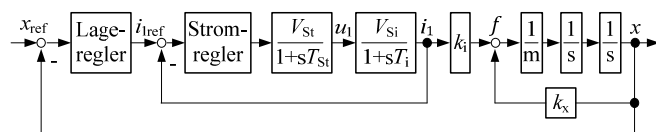


Abb. 10: Konventionelle Lageregelung mit unterlagerter Stromregelschleife

Das Modell der Stromregelstrecke wird in der Regel durch die Stellglieddynamik und ein PT1-Glied für die Steuerspulen beschrieben. Bei hoher Stellglieddynamik nimmt der Einfluss von Wirbelstromeffekten im Eisen zu. Zur Berücksichtigung des verzögerten Flussaufbaus wird die Strecke nach dem Ersatzschaltbild mit vereinfachtem Wirbelstromkreis in Abb. 11 modelliert. Die Spannung u_1 treibt den Strom i_1 durch die Steuerspulen des Magnetlagers. Der Hauptinduktivität L_h ist der Wirbelstromzweig, bestehend aus sekundärseitiger Streuinduktivität $L_{\sigma 2}'$ und elektrischem Widerstand der Wirbelstrombahn, parallel geschaltet. Damit fließt neben dem feldbildenden Magnetisierungsstrom i_μ im Hauptzweig der auf die Primärseite bezogene Wirbelstrom i_W' im sekundärseitigen Parallelzweig.

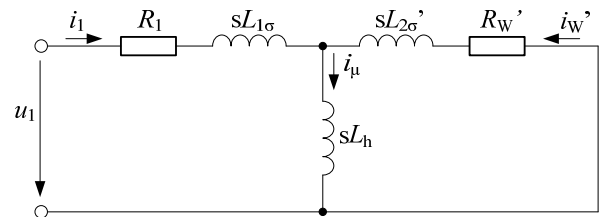


Abb. 11: Ersatzschaltbild der Stromregelstrecke mit vereinfachtem Wirbelstromkreis

Der Steuerstrom i_1 ergibt sich nach den Gln. (3) und (4) in Abhängigkeit der Spannung u_1 und der resultierenden Impedanz.

$$i_1 = \frac{1}{R_1 + sL_{1\sigma} + sL_h || (R_W' + sL_{2\sigma}')} u_1 \quad (3)$$

$$i_1 = \frac{1}{R_1} \frac{1 + sT_{2\sigma}}{1 + s(T_1 + T_{2\sigma}) + s^2 T_h T_{2\sigma}} u_1 \quad \text{mit} \quad (4)$$

$$T_1 = \frac{L_{1\sigma} + L_h}{R_1}, T_h = \frac{L_h}{R_1} \quad \text{und} \quad T_{2\sigma} = \frac{L_{2\sigma}'}{R_W'}$$

Der Magnetisierungsstrom i_μ lässt sich auf Basis der Stromteilerregel nach Gl. (5) in Abhängigkeit des Steuerstromes i_1 durch Gl. (6) beschreiben.

$$i_\mu = \frac{R_W' + sL_{2\sigma}'}{R_W' + sL_{2\sigma}'} i_1 \quad \text{mit} \quad L_{2\sigma}' = L_h + L_{2\sigma}' \quad (5)$$

$$i_\mu = \frac{1 + sT_{2\sigma}}{1 + sT_2} i_1 \quad \text{mit} \quad T_2 = \frac{L_{2\sigma}'}{R_W'} \quad (6)$$

Für eine vereinfachte Betrachtung des dynamischen Verhaltens der Regelstrecke sollen die im Vergleich zur Hauptinduktivität L_h sehr geringen Streuinduktivitäten $L_{\sigma 1}$ und $L_{\sigma 2}'$ vernachlässigt werden. Damit lässt sich das Verhalten von Steuer- und Magnetisierungsstrom vereinfacht anhand der Hauptfeldzeitkonstante T_1 und der Wirbelstromzeitkonstante T_W nach den Gln. (7) und (8) beschreiben.

$$i_1 = \frac{1}{R_1} \frac{(1 + sT_W)}{1 + s(T_1 + T_W)} u_1 \quad \text{mit} \quad T_W = \frac{L_h}{R_W'} \quad (7)$$

$$i_\mu = \frac{1}{1 + sT_W} i_1 \quad (8)$$

Zwischen Steuer- und Magnetisierungsstrom ist eine Phasendrehung um bis zur -90° für hohe Frequenzanteile entsprechend des vorliegenden PT1-Verhaltens festzustellen. Für die weitere Modellbildung erfolgt die Umformung von Gl. (8) über die Hauptflussverkettung ψ_h nach Gl. (9). Das Übertragungsverhalten der magnetischen Luftspaltflussdichte B_δ in Abhängigkeit des Steuerstromes i_1 beschreibt Gl. (10).

$$\psi_h = L_h i_\mu \text{ und } \psi_h = w \phi_\delta = w B_\delta A_\delta \quad (9)$$

$$B_\delta = \frac{L_h}{w A_\delta} \frac{1}{1 + sT_W} i_1 \quad (10)$$

Mit Kenntnis der Übertragungsglieder wird zunächst die flussbasierte Regelung nach Abb. 12 betrachtet. Die Kaskadenstruktur besteht aus einer Lageregelung mit unterlagerter Flussdichte- und Stromregelschleife. Für die überlagerte Lage-regelung ist konventionell ein PD-Regler zur Stabilisierung der instabilen mechanischen Regelstrecke einzusetzen. Abb. 13 zeigt die inneren geschlossenen Regelschleifen der magnetischen Flussdichte und des Steuerstromes. Die Stromregelstrecke $G(s) = I_1(s)/U_1(s)$ weist neben dem typischen PT1-Verhalten einen Vorhalte-Anteil im Zähler auf. Daher ist dem betragsoptimal auslegenden PI-Regler ein zusätzliches PT1-Glied hinzuzufügen, um die für den Steuerstrom i_1 vorhaltend wirkende Wirbelstromzeitkonstante zu kompensieren. Die überlagerte Flussdichteregelstrecke weist PT1-Verhalten auf und ist ebenfalls mit einem betragsoptimal ausgelegten PI-Regler für gutes Führungsverhalten zu stabilisieren.

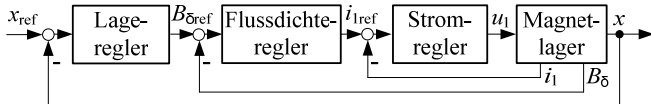


Abb. 12: Kaskadenstruktur aus Lage-, Flussdichte- und Stromregelschleife

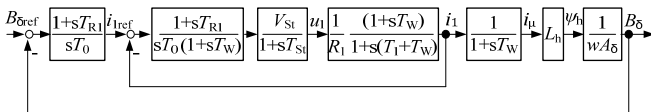


Abb. 13: Flussdichteregelung mit unterlagerter Stromregelschleife

Alternativ zur unterlagerten Stromregelung besteht ebenso die Möglichkeit einer direkten Sollspannungsausgabe durch einen dem Lageregler unterlagerten Flussdichteregler entsprechend Abb. 14 und 15. Anhand von Gl. (11) lässt sich das Verhalten der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit der Spannung u_1 nach Gl. (12) beschreiben.

$$\psi_h = L_h i_\mu = \frac{T_1}{1 + s(T_1 + T_W)} u_1 \quad (11)$$

$$B_\delta = \frac{1}{w A_\delta} \frac{T_1}{1 + s(T_1 + T_W)} u_1 \quad (12)$$

Die Flussdichteregelung vereinfacht sich dahingehend, dass die Strecke unter Vernachlässigung der Streuinduktivitäten nun durch ein PT1-Verhalten charakterisiert ist. Somit ist neben dem Lageregler ein PI-Flussdichteregler ohne zusätzliche Übertragungsglieder zur vollständigen Regelung der Magnet-lagerstrecke zu implementieren.

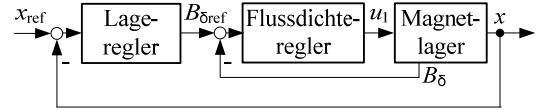


Abb. 14: Kaskadenstruktur aus Lageregelung mit unterlagerter Flussdichteregelung

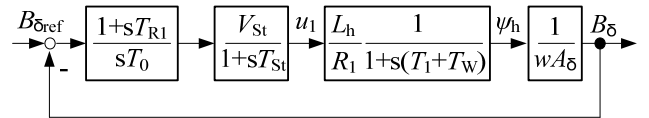


Abb. 15: Flussdichteregelung ohne unterlagerte Stromregelung

Der alleinige Einsatz eines Flussdichteregelkreises sorgt dafür, dass keine Funktion zur Überwachung des Steuerstromes vorhanden ist. Zum Schutz vor einer thermischen Überlastung der Spulen, einzelner Lagerkomponenten, des PM-Materials sowie der leistungselektronischen Bauelemente des Stromrichters ist eine zusätzliche Schutzfunktion auf Basis der Strommessung mit Begrenzung der auszugebenden Spannung sinnvoll zu ergänzen.

Für die beiden vorgestellten flussbasierten Regelungsverfahren mit und ohne unterlagerte Stromregelung ist für die übergeordnete Lageregelung eine Anpassung der Reglerverstärkung vorzunehmen. Dazu bietet sich die Einführung eines Kraft-Steuerflussdichte-Faktors k_B analog zum Kraft-Strom-Faktor k_i (vgl. konventionelle Lageregelung mit unterlagerten Stromregelung) während der stets durchzuführenden Systemlinearisierung an (Gl. (13)). Für das vorgestellte Radialmagnetlager mit Differenzansteuerung und permanentmagnetischer Vorspannung ergibt sich der Kraft-Steuerflussdichte-Faktor nach Gl. (14) in Abhängigkeit der Polfläche und der Vormagnetisierungsflussdichte B_V .

$$\Delta f = k_B \Delta B_\delta \quad (13)$$

$$k_B = 2 \frac{A_\delta B_V}{\mu_0} \quad (14)$$

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Erstmals stehen ultradünne Hall-Elemente in Form flexibler Sensoren zur Verfügung und werden im Luftspalt eines aktiven Radialmagnetlagers zur Flussdichtemessung integriert. Neben experimentellen Untersuchungen zur Erfassung der Luftspaltinduktion werden Ansätze und Möglichkeiten fluss-

basierter Regelungsalgorithmen zur Erhöhung der Präzision und zur Lagerüberwachung aufgezeigt.

Der Beitrag präsentiert dabei zunächst spezifische Eigenschaften der Bismut-Hall-Sensorik sowie deren thermische und mechanische Stabilität bis 80°C. Flexible Bi-basierte Hall-Sensoren sind dabei geeignet um die magnetische Flussdichte im Luftspalt aktiver Magnetlager zu erfassen. Mit einer Gesamtbauhöhe von 150 µm gelingt dabei die vergleichsweise einfache Integration der Sensorik direkt in typischen Luftspalten von 400 µm bis 500 µm. Da geringere Schichtdicken der Bismut-Sensorelemente zu einer deutlichen Erhöhung der Hall-Empfindlichkeit führen, kann deren Leistungsfähigkeit durch eine Anpassung des Sensordesigns, z.B. durch Verkapselung der Bismut-Schicht in der mechanisch neutralen Ebene der flexiblen Leiterplatte, weiter deutlich verbessert werden.

Mit Verfügbarkeit der Technologie ultradünner Magnetfeldsensorik mit einem Messbereich von über 2 T kristallisieren sich drei mögliche Anwendungsszenarien für Magnetlagersysteme heraus. Während die zusätzliche Integration der Flussdichtesensorik sowohl zur Erhöhung der Positioniergenauigkeit als auch zur Steigerung der Zuverlässigkeit durch Messsystemredundanz nutzbar ist, kann ebenso die Realisierung eines flussbasiert geregelten, positionsensorlosen aktiven Magnetlagersystems Bauraum- und Kostenvorteile für Zielanwendungen mit geringen und mittleren Positionieranforderungen bieten. In einem ersten Versuch wurden die auf flexiblem Leiterplattenmaterial entwickelten Sensoren auf dem Statorpol eines Heteropolarlagers mit homopolarer, permanentmagnetischer Vormagnetisierung integriert und deren Funktionsfähigkeit im Magnetlagersystem anhand des Führungsverhaltens nachgewiesen. Weiterführende Arbeiten zielen auf die Realisierung der flussbasierten Regelung mit Rückführung der gemessenen Luftspaltflussdichten ab. Darüber hinaus steht der Einsatz der präsentierten Hall-Sensoren in positionsensorlosen aktiven Radial- und Axialmagnetlagersystemen im Fokus zukünftiger Untersuchungen.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken C. Krien, D. Karnaushenko, J. I. Mönch (IFW Dresden) sowie E. Fleischer, M. Gaubig, A. Langer und G. Paul (TU Dresden) für deren Unterstützung. Die Arbeit wurde z.T. durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG (HO 1483/64-1, AOBJ: 600924 und SCHM 1298/15-1, AOBJ: 600922) sowie durch den „European Research Council“ im Rahmen des „European Union’s Seventh Framework Programme“ (FP7/2007-2013) / „ERC grant agreement no. 306277“ gefördert.

REFERENZEN

- [Abdelfatah1993] Mohamed M. Abdelfatah und F. P. Emad. A comparison between Current and Flux Control in Magnetic Bearing Systems. *Proceedings of the American Control Conference*, San Francisco, 1993.
- [Bahr2012] Falk Bahr, M. Melzer, D. Karnaushenko, D. Makarov, D.D. Karnaushenko, J. I. Mönch, D. Malane, O. G. Schmidt und W. Hofmann. Flux Based Control of AMBs Using Integrated Ultra-Thin Flexible Bismuth Hall Sensors. *Proceedings of the 11th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB)*, Nara, Japan, 2008.
- [Barraud2010] Clement Barraud, C. Deranlot, P. Seneor, R. Mattana, B. Dlubak, S. Fusil, K. Bouzehouane, D. Deneuve, F. Petroff und A. Fert. Magneto-resistance in magnetic tunnel junctions grown on flexible organic substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 96(7), 2010.
- [Bleuer1994] Hannes Bleuler, D. Vischer, G. Schweitzer, A. Traxler, und D. Zlatnik. New Concepts for cost-effective Magnetic Bearing Control. *Automatica*, Vol. 30, No. 5, S. 871-876, New Orleans, 1995.
- [Chen2008] Yuan-Fu Chen, Y. Mei, R. Kaltföfen, J. I. Mönch, J. Schumann, J. Freudenberger, H.-J. Klauß, and O. G. Schmidt. Towards flexible magneto-electronics: Buffer-enhanced and mechanically tunable GMR of Co/Cu multilayers on plastic substrates. *Adv. Mater.*, 20(17), 2008.
- [Gähler1998] Conrad Gähler. Rotor Dynamic Testing and Control with Active Magnetic Bearings. PhD thesis. ETH No. 12718. 1998. ETH Zürich.
- [Imlach1998] Joe Imlach und R. W. Kipp. Development of an Integrated Flux / Position Sensor. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB)*, Cambridge (Massachusetts), 1998.
- [Koseva2010] Radinka Koseva, J. I. Mönch, J. Schumann, K.-F. Arndt, und O. G. Schmidt. Bismuth Hall probes: Preparation, properties and application. *Thin Solid Films*, 518(17), 2010.
- [Koseva 2012] Radinka Koseva, J. I. Mönch, D. Meier, J. Schumann, K.-F. Arndt, L. Schultz, B. Zhao und O. G. Schmidt. Evolution of hillocks in Bi thin films and their removal upon nanoscale mechanical polishing. *Thin Solid Films*, 520, 2012.
- [Melzer2011] Michael Melzer, D. Makarov, A. Calvimontes, D. Karnaushenko, S. Baunack, R. Kaltföfen, Y. Mei, and O. G. Schmidt. Stretchable Magneto-electronics. *Nano Lett.*, 11(6), 2011.
- [Melzer2012a] Michael Melzer, D. Karnaushenko, D. Makarov, L. Baraban, A. Calvimontes, J. I. Mönch, R. Kaltföfen, Y. Mei und O. G. Schmidt. Elastic magnetic sensor with isotropic sensitivity for in-flow detection of magnetic objects. *RSC Adv.*, 2(6), 2012.
- [Melzer2012b] Michael Melzer, G. Lin, D. Makarov und O. G. Schmidt. Stretchable Spin Valves on Elastomer Membranes by Predetermined Periodic Fracture and Random Wrinkling. *Adv. Mater.* 24(48), 2012.
- [Parkin1996] Stuart S. P. Parkin. Flexible giant magneto-resistance sensors. *Appl. Phys. Lett.*, 69(20), 1996.
- [Schuhmann2006] Thomas Schuhmann, W. Hofmann und R. Werner. Adaptive Linear and Extended Kalman Filter applied to AMB with Collocated Position Measuring. *Proceeding of the 10th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB)*, Martigny, 2006, pp. 6.
- [Zlatnik1990] Daniel Zlatnik und Alfons Traxler. Cost-Effective Implementation of Active Magnetic Bearings. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB)*, Tokyo, 1990.