

Untersuchung des Übertragungsverhaltens eines aktiven Magnetlagers mit Flussdichtemessung im Luftspalt

R. Liebfried, W. Hofmann

Technische Universität Dresden

Professur für Elektrische Maschinen und Antriebe

Helmholtzstraße 9, 01062 Dresden, Germany

Tel.: +49 351 463-35052, Fax: +49 351 463-33655

Email: robin.liebfried@tu-dresden.de

Abstract

Die kaskadierte Lageregelung aktiver Magnetlager wird für gewöhnlich mit unterlagertem Stromregelkreis ausgeführt. Aufgrund der für Magnetlager typischen Mitkopplung hat die Sprungantwort einer Lageänderung trotz Polkompensation stets ein großes Überschwingen. In dieser Arbeit wird das Übertragungsverhalten eines alternativen Ansatzes mit unterlagertem Flussdichte- statt Stromregelung vorgestellt, welcher auf der Messung der Luftspaltflussdichte basiert. Es zeigt sich, dass durch die Berücksichtigung der Mitkopplung im inneren Regelkreis das Führungsverhalten deutlich verbessert werden kann, ohne dabei das Störungsverhalten nennenswert zu verschlechtern.

1 Einleitung

Aktive Magnetlager (AMB) sind seit mehreren Jahrzehnten Forschungsgegenstand und gewinnen in den letzten Jahren auch zunehmende Bedeutung in industriellen Anwendungen. Ein naheliegender und weit verbreiteter Regelungsansatz ist dabei eine kaskadierte Lageregelung mit unterlagertem Stromregelkreis. Als Alternative wurde bereits früh eine unterlagerte Flussdichteregelung untersucht [1]. Im Gegensatz zum Strom, ist die Flussdichte im Luftspalt direkt kraftbildend und berücksichtigt somit inhärent Störgrößen wie Wirbelströme und Sättigung [2]. Die zur Regelung benötigte Flussdichte kann durch Beobachter [3] oder Messungen bestimmt werden. Letzteres bietet dabei eine Möglichkeit die Kosten für AMBs zu reduzieren, da auf teure Positionsmesssysteme verzichtet werden kann [4]. Trotz dieser Vorteile, konnten sich flussdichtebasierte Regelungen in der Praxis bisher nicht durchsetzen. Ein Grund dafür

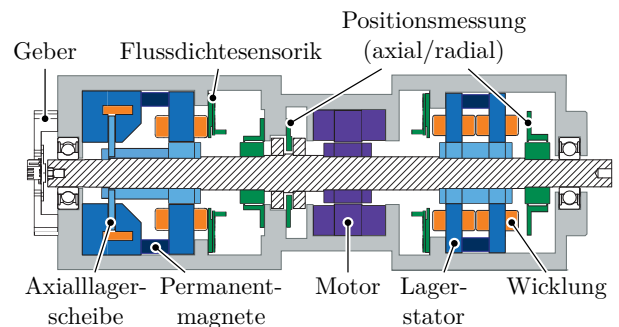


Abb. 1: Versuchsanordnung mit 5-Achsen-Magnetlagerung bestehend aus Unipolarmagnetlager (rechts) und Kombilager (links), radial jeweils mit homopolarem PM-Vormagnetisierungsfluss und heteropolarem Steuerfluss, axial rein homopolarmagnetisch.

ist die Dicke üblicher Hall-Sensoren von über 500 μm , welche den ausnutzbaren Luftspalt aufzehren.

Neben Untersuchungen zur Berechnung der Flussdichte mit Hilfe von fraktionalem Flussdichteschätzern [5] zeigt die Forschung auf dem Gebiet ultradünner Hall-Sensoren mit einer Dicke von ca. 100 μm vielversprechende Ergebnisse [6]. Während in [7] die Modellierung beschrieben und einen Überblick zu alternativen, nicht kaskadierten Regelungsverfahren gegeben wird, fokussiert sich diese Arbeit auf die Untersuchung des Führungsverhaltens sowie des Störübertragungsverhaltens bei kaskadierter Regelung und die Unterschiede zur klassischen Stromregelung anhand der Topologie, wie in Abb. 1 dargestellt.

Dazu wird in Abschnitt 2 der Stand der Technik kurz umrissen und der Lageregelkreis mit unterlagertem Stromregelkreis als Referenzanordnung vorgestellt. In Abschnitt 3 werden die Unterschiede der Flussdichteregelung mit Fluss-

messung und deren regelungstechnische Konsequenzen vorgestellt, worauf in Abschnitt 4 ein Vergleich der Eigenschaften folgt. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weitere Untersuchungen in Abschnitt 5.

2 Positionsregelung eines AMB mit unterlagertem Stromregelkreis

Die klassische, kaskadierte Regelungsstruktur aktiver Magnetlager basiert auf Lage- und Strommessung und entsprechend einem unterlagerten Strom- und überlagertem Lageregelkreis [8]. Diese Konfiguration ist in Abb. 2 dargestellt.

2.1 Modellierung

Die Modellierung basiert für die untersuchte Lageranordnung auf der quasi-linearen Beziehung zwischen Kraft und Steuerfluss, da der Vormagnetisierungsfluss Φ_v und der Steuerfluss Φ_x nach dem Differenzenprinzip orientiert sind, wie Abb. 3 zeigt. Dies führt zur linearisierten Kraftgleichung

$$F(i, x) = k_i \cdot i + k_x \cdot x \quad (1)$$

und ermöglicht den Einsatz linearer Regler. Während die innere Regelstrecke durch einen PI-Regler geregelt wird, ist zur Stabilisierung der Lage ein PID-Regler notwendig. Grund dafür ist die doppelte Integration im Block „Mechanik“. Zusätzlich wird die Regelung durch die Mitkopplung erschwert, auf welche der Fokus gerichtet wird.

Die eingezeichnete Mitkopplung trägt dem für Magnetlager typischen Effekt Rechnung, dass eine Auslenkung des Rotors in eine Richtung zu einer stärkeren Kraft in eben diese Richtung durch mechanischen Zug führt. Wie in Abb. 2 zu erkennen ist, wird diese Kraft als positionsabhängige Störgröße im äußeren Regelkreis modelliert. Der unterlagerte Stromregelkreis kann somit nicht zum Ausregeln beitragen.

Zusätzlich sei erwähnt, dass bei der Stromregelung häufig vereinfachend angenommen wird,

dass der gemessene Strom i_{mess} gleich dem kraftbildenden Strom i_{uh} ist [8]. Dies gilt nur bei vollständiger Vernachlässigung der Wirbelströme im Magnetkreis, was für Radiallager¹ zu geringen, für Axiallager aber zu erheblichen Fehlern führt und die Dynamik reduziert. Dieser, im weiteren Verlauf vernachlässigte Sachverhalt ist in Abb. 2 durch das Ausrufezeichen in der Rückführung symbolisiert und wird für ein Axiallager in [5] genauer untersucht.

2.2 Innerer Regelkreis

Stellglied und Stromregelstrecke liefern im Pol-Nullstellenplan einen Pol bei $s_1 = -1/T_t$ und einen bei $s_2 = -R_{Cu}/L_h$. Es handelt sich folglich um eine stabile Strecke, für welche gewöhnlich ein PI-Regler G_{Ri} angewendet wird

$$G_{Ri}(s) = K_{pi} \left(1 + \frac{1}{sT_{Ni}} \right). \quad (2)$$

Die Auslegung erfolgt nach dem Betragsoptimum für dämpfungsoptimales Führungsverhalten. Folglich wird zur Kompensation der größeren Zeitkonstante $T_{Ni} = L_h/R_{Cu}$ gewählt. Außerdem gilt

$$K_{pi} = \frac{T_{Ni}}{2V_{Si}T_{\sigma}} \quad \text{und} \quad V_{Si} = \frac{V_t}{R_{Cu}} \quad (3)$$

sowie $T_{\sigma} = T_t$. Für die Übertragungsfunktion des offenen Stromregelkreises G_{io} ergibt sich somit

$$G_{io}(s) = \frac{1/2}{sT_t + s^2T_t^2} \quad (4)$$

und für den geschlossenen Regelkreis

$$G_{ic}(s) = \frac{1}{1 + s2T_t + s^22T_t^2}. \quad (5)$$

2.3 Äußerer Regelkreis

Für die Stabilisierung der Lage ist ein PD-Regler erforderlich. Um zusätzlich die bleibende Regelabweichung auszuregeln, wird ein PID-

¹Die Radiallager sind im Gegensatz zu Axiallagern in der Regel geblecht ausgeführt, Wirbelströme werden somit stark reduziert.

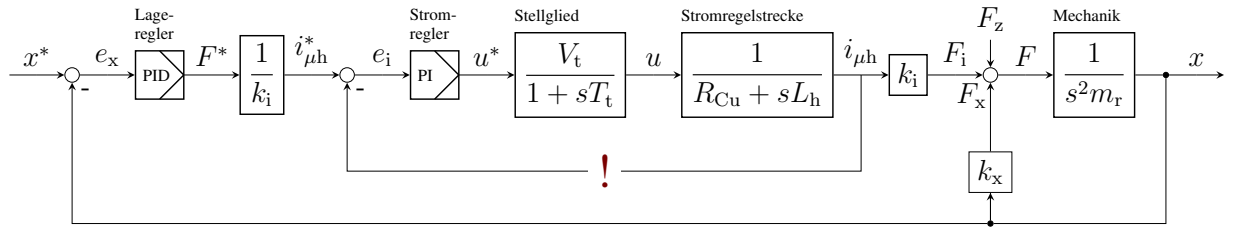


Abb. 2: Signalfussplan für klassische Lageregelung mit unterlagertem Stromregelkreis unter der Annahme $i_{\text{mess}} = i_{\text{uh}}$ — V_t, T_t : Verstärkung, Zeitkonstante des Stellgliedes; R_{Cu} : Spulenwiderstand; L_h : Hauptinduktivität; m_r : wirksame Rotormasse

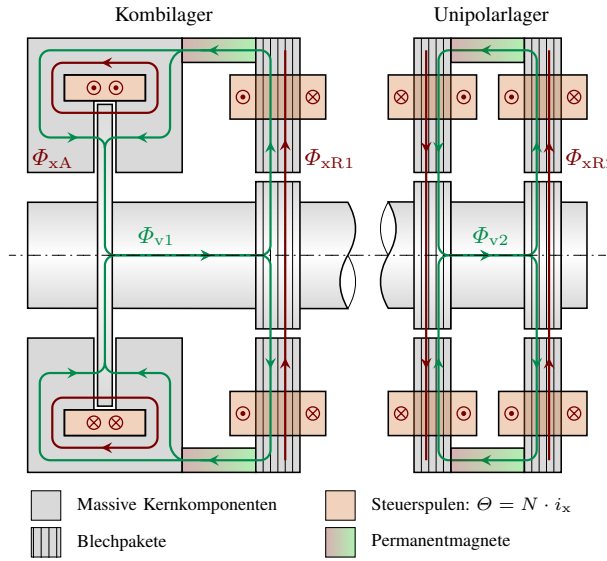


Abb. 3: Darstellung der Flüsse für den Versuchsaufbau nach Abb. 1 mit Vormagnetisierungsflüssen Φ_v und Steuerflüssen Φ_x

Regler verwendet². Die Auslegung erfolgt anhand einer Feder-Dämpfer-Analogie [8] durch Wahl der Dämpfung d und der Lagersteifigkeit k :

$$G_{\text{Rx}}(s) = (k + k_x) \left(1 + \frac{1}{sT_{\text{Nx}}} + s \frac{d}{k + k_x} \right) \quad (6)$$

$$= K_{\text{px}} \left(1 + \frac{1}{sT_{\text{Nx}}} + sT_{\text{Vx}} \right) \quad (7)$$

$$= K_{\text{px}} \cdot \frac{s^2 T_{\text{Vx}} T_{\text{Nx}} + sT_{\text{Nx}} + 1}{sT_{\text{Nx}}} \quad (8)$$

²In der Praxis kommt für gewöhnlich ein PIDT2 Regler zum Einsatz. Die zusätzliche Zeitkonstante wird so gewählt, dass Messrauschen kompensiert wird [7]. Für die hier vorgestellten Analysen besteht kein Unterschied zum PID-Regler, weshalb dieser aus Gründen der Einfachheit vorgestellt wird.

Die Dämpfung $d = 2D\sqrt{k \cdot m_r}$ kann dabei über das Lehr'sche Dämpfungsmaß D bestimmt werden. Der Kraft-Strom-Faktor k_i sowie der Kraft-Weg-Faktor k_x ergeben sich aus der Modellierung der Kraft gemäß (1) und sind geometrieabhängig [7]. Die Lagersteifigkeit k wird häufig als ein Vielfaches von k_x gewählt. Die Nachstellzeit T_{Nx} sollte so klein wie möglich gewählt werden. Da ein sehr kleines T_{Nx} allerdings die Resonanz ΔK_{Res} erhöht, sollte für $\omega_{\text{N}} = 1/T_{\text{N}}$ und Resonanzkreisfrequenz $\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{k/m_r}$ die Beziehung $10 \cdot \omega_{\text{N}} \leq \omega_0$ gelten, da das System anderenfalls instabil wird.

Zum Auswerten des Führungsverhaltens werden die Mitkopplung F_x und die Übertragungsfunktion der Mechanik zu

$$G_{\text{m}}(s) = \frac{x}{F_i - F_z} = \frac{1}{s^2 m_r - k_x} \quad (9)$$

zusammengefasst. Damit folgt für die Führungsübertragungsfunktion des offenen Lageregelkreises mit Stromregelung

$$G_{\text{xio}}(s) = G_{\text{Rx}}(s) \cdot \frac{1}{k_i} \cdot G_{\text{ic}}(s) \cdot k_i \cdot G_{\text{m}}(s), \quad (10)$$

welcher sich über den bekannten Zusammenhang $G_{\text{xic}}(s) = G_{\text{xio}}(s)/(1 + G_{\text{xio}}(s))$ schließen lässt.

Mit den vorgestellten Gleichungen lässt sich außerdem die Störübertragungsfunktion des geschlossenen Lageregelkreises mit unterlagertem Stromregelung bestimmen:

$$G_{\text{zi}}(s) = \frac{G_{\text{m}}(s)}{1 + G_{\text{m}}(s) \cdot G_{\text{Rx}}(s) \cdot G_{\text{ic}}(s)} \quad (11)$$

Im Folgenden wird die Lageregelung mit unterlagertem Stromregelkreis mit Strommessung verkürzt als I-Regelung bezeichnet.

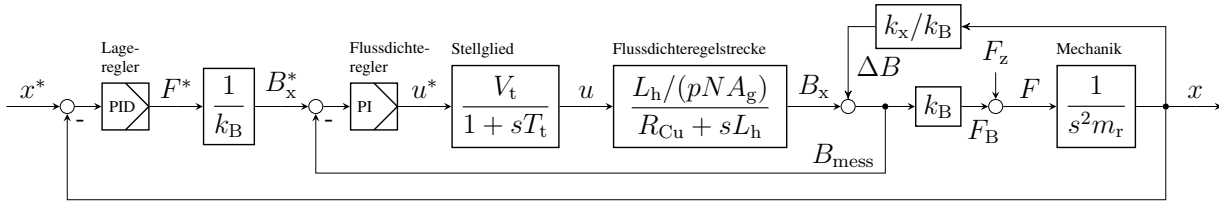


Abb. 4: Signalflussplan bei Flussdichtemessung im Luftspalt mit linearem AMB Modell $F = k_B(B_x + \Delta B(x))$ – $p = 2$ für das Unipolarlager, $p = 1$ für das Kombilager – V_t, T_t : Verstärkung, Zeitkonstante des Stellgliedes; L_h : Hauptinduktivität; R_{Cu} : Spulenwiderstand; N : Windungszahl der Steuerspule; A_g : Luftspaltfläche eines Pols; m_r : wirksame Rotormasse

3 Direkte Flussregelung durch Flussmessung

Abweichend zur unterlagerten Stromregelung aus Abschnitt 2 basiert die hier vorgestellte Flussregelung auf einer direkten Messung der Flussdichte im Luftspalt des Lagers. Dazu lässt sich das Modell nach Abb. 2 in die Darstellung aus Abb. 4 überführen. Dabei wird statt dem Kraft-Strom-Faktor k_i ein Kraft-Flussdichte-Faktor k_B eingeführt. Statt (1) gilt nun

$$F(B_x, x) = k_B \cdot B_x + k_x \cdot x. \quad (12)$$

Die positionsabhängige Störkraft $F_x = k_x \cdot x$ wird nun über eine Flussdichteänderung ΔB realisiert, was die Position der Mischstelle ändert. Die Verschiebung der Mischstelle vor die Rückführung des inneren Regelkreises erschwert die Untersuchung des Übertragungsverhaltens, da die Trennung zwischen innerem und äußerem Regelkreis verloren geht. Durch äquivalente Umformung des Signalflussplans aus Abb. 4 kann die Trennung der Regelkreise wiederhergestellt werden. Im Folgenden wird die Lageregelung mit unterlagertem Flussdichteregelkreis mit Flussdichtemessung im Luftspalt verkürzt als B-Regelung bezeichnet.

3.1 Führungsübertragungsfunktion

Zur einfacheren Darstellung werden zunächst Abkürzungen für die einzelnen Übertragungsböcke aus Abb. 4 eingeführt. Diese sind zusammen mit denen aus Abschnitt 2 in Tabelle 1 zusammengefasst.

Zur Berechnung der Führungsübertragungsfunktion des inneren Kreises ist ein naheliegender

Tab. 1: Benennung der Übertragungsfunktionen

Zeichen	Beschreibung
G_{Ri}	Stromregler
G_{RB}	Flussdichteregler
G_{Rx}	Lageregler
G_t	Stellglied
G_{Bs}	Flussdichteregelstrecke
G_{mech}	Mechanik
G_m	Mechanik inkl. Mitkopplung (MK)
G_i	Stromregelkreis
G_{mit}	Darstellung der MK im Vorwärtszweig
G_B	Flussdichteregelkreis
G'_B	Flussdichteregelkreis mit MK
G_{xi}	LRK mit I-Regelung (Führungszü.)
G_{zi}	LRK mit I-Regelung (Störü.)
G_{xB}	LRK mit B-Regelung (Führungszü.)
G_{zB}	LRK mit B-Regelung (Störü.)

Die Indizes o bzw. c, geführt als letzter Index, stehen bei Übertragungsfunktionen von Regelkreisen für „offen“ bzw. „geschlossen“. Alle Übertragungsfunktionen sind Funktionen von s . LRK: Lageregelkreis

Ansatz, die Mitkopplung als unverzögerte Störung zu behandeln und somit für die Berechnung des inneren Kreises zu vernachlässigen. Der Flussdichteregler $G_{RB}(s)$ wird als PI-Regler analog zu Abschnitt 2.2 ausgelegt – lediglich mit angepasster Streckenverstärkung

$$V_{SB} = \frac{V_t \cdot L_h}{p \cdot N \cdot A_g \cdot R_{Cu}}. \quad (13)$$

Das resultierende Übertragungsverhalten für das radiale Unipolarlager (UPL) ist zusammen mit

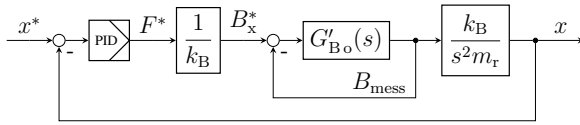


Abb. 5: Signalflussplan für das Führungsübertragungsverhalten der Konfiguration nach Abb. 4 mit $G'_{B_o}(s)$ nach (16)

dem des Stromregelkreises aus Abschnitt 2.2 in Abb. 6 dargestellt. Die Frequenzgänge sind bis auf minimale Abweichungen deckungsgleich, da in den Blechpaketen der Radiallager kaum Wirbelströme auftreten.

Die B-Regelung in der Form nach Abb. 4 kann nicht in inneren und äußeren Regelkreis getrennt werden. Dieser Strukturunterschied der Regelkreise wird eliminiert, indem der B-Regelkreis so umgeformt wird, dass ein geschlossener innerer und ein geschlossener äußerer Regelkreis entstehen. Die Mitkopplung ist entsprechend in den Übertragungsfunktionen zu berücksichtigen.

Für das Führungsverhalten gilt $F_z = 0$. Somit lässt sich die vierte Mischstelle eliminieren und k_B als Faktor in die Mechanik $G_{\text{mech}}(s)$ aufnehmen. Die Mitkopplung kann nun vor die Mechanik gezogen werden. Es entsteht ein Rückwärtszweig mit dem Term $k_x / (s^2 m_r)$ von B_{mess} auf die dritte Mischstelle. Diese Mitkopplung kann als

$$G_{\text{mit}}(s) = \frac{s^2 m_r}{s^2 m_r - k_x} \quad (14)$$

in den Vorwärtszweig verschoben werden. Aus dem offenen inneren Flussdichteregelkreis

$$G_{B_o}(s) = G_{RB}(s) \cdot G_t(s) \cdot G_{B_s}(s) \quad (15)$$

entsteht der offene innere Flussdichteregelkreis mit Berücksichtigung der Mitkopplung

$$G'_{B_o}(s) = G_{B_o}(s) \cdot G_{\text{mit}}(s), \quad (16)$$

wobei für den Flussdichteregeler $G_{RB}(s)$ weiterhin der Ansatz mit PI-Regler gilt. Es resultiert der Signalflussplan aus Abb. 5. Der Frequenzgang des offenen und geschlossenen in-

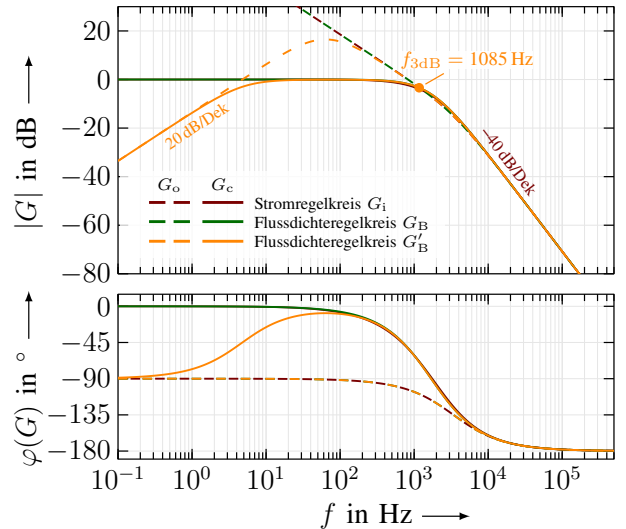


Abb. 6: Führungsfrequenzgang des offenen und geschlossenen inneren Stromregelkreises im Vergleich zum Führungsfrequenzgang des inneren Flussdichteregelkreises vor (G_B) und nach (G'_B) der Umformung beschrieben in Abschnitt 3.1

neren Regelkreises ist zusammen mit den bereits in Abschnitt 2.2 eingeführten Übertragungsfunktionen in Abb. 6 dargestellt. Das Verhalten des offenen Flussdichteregelkreises entspricht dem der Stromregelung ab ca. 200 Hz, die Verläufe der geschlossenen Kreise stimmen bereits ab ca. 30 Hz überein. Für niedrige Frequenzen zeigt sich ein deutlicher Unterschied. Die Rückführung der Mitkopplung in den inneren Regelkreis führt zu einer Dämpfung bei Frequenzen unter 10 Hz, welche von $G_{\text{mit}}(s)$ verursacht wird.

3.2 Störübertragungsfunktion

Die Berechnung des Störübertragungsverhaltens bei Flussmessung ist durch die Mitkopplung erschwert und erfolgt ähnlich wie die Berechnung des Führungsübertragungsverhaltens durch äquivalentes Umformen von Abb. 4 bei $x^* = 0$. Dafür wird die Rückführung des inneren Regelkreises von der zweiten auf die dritte Mischstelle verschoben und entsprechend $G_B(s)$ im Rückwärtszweig eingefügt. Es entstehen zwei parallele Pfade zwischen x und der Mischstelle $B_x + \Delta B$, welche zusammengefasst werden können. Durch Addition dieser Zweige und Multi-

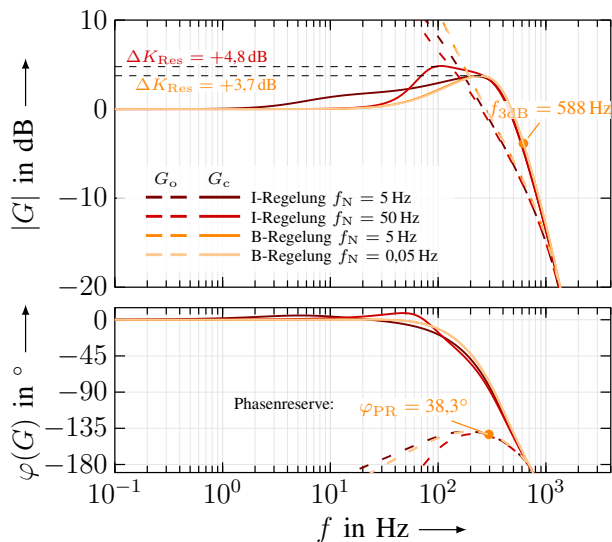


Abb. 7: Führungsfrequenzgang des offenen und geschlossenen Lageregelkreises mit den Reglerparametern $D = 0,9$, $k/k_x = 5$

plikation der weiteren Übertragungsfunktionen³ folgt

$$G_{zBc}(s) = \frac{G_{\text{mech}}(1 + G_{B0})}{1 + G_{B0} - G_{\text{mech}}(k_x - G_{B0}G_{R_x})} \quad (17)$$

Die Lageregelung mit unterlagertem Flussdichteregelkreis mit Flussmessung wird im Folgenden verkürzt als B-Regelung bezeichnet.

4 Vergleich des Übertragungsverhaltens

Das Führungsverhalten des radialen Lageregelkreises vom Kombilager ist in Abb. 7 für verschiedene Reglereinstellungen dargestellt. Eine Bewertung kann anhand mehrere Kenngrößen erfolgen.

Die *Phasenreserve* φ_{PR} ist ein Stabilitätskriterium. Je größer die Phasenreserve, desto größer der einstellbare Wertebereich der Reglerparameter. Der Wert schwankt für die gewählten Parameter um ca. 1° und ist mit 38° in einem zufriedenstellenden Bereich.

Ein weiterer Kennwert ist die *3dB-Grenzfrequenz* f_{3dB} . Es lässt sich feststellen,

³Alle in (17) verwendeten Übertragungsfunktionen sind Funktionen von s . Auf die Nennung wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

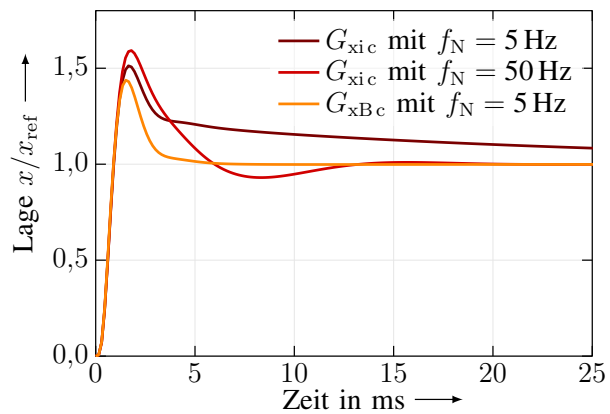


Abb. 8: Führungssprungantwort des geschlossenen Lageregelkreises mit den Reglerparametern $D = 0,9$; $k/k_x = 5$ bei Sprung auf x_{ref}

dass Signale mit $f > f_{3dB}$ nicht mehr zuverlässig eingeregelt werden können. Dies ist besonders für Systeme zur Schwingungsdämpfung interessant, bei denen hochfrequente Signale eingepreßt werden müssen. Die 3dB-Grenzfrequenz der B-Regelung liegt nur minimal über der der I-Regelung.

Des weiteren eingezeichnet ist die *Resonanzüberhöhung* ΔK_{Res} . Sie bezeichnet die Verstärkung des geschlossenen Kreises bei Resonanzkreisfrequenz $\omega_0 = 2\pi f_0$. Neben der absoluten Höhe (bei I-Regelung ca. 1 dB höher als bei B-Regelung) ist für das Schwingungsverhalten aber auch die „Breite“ des Frequenzbereiches wichtig, in der es zu einer Verstärkung von $|G(s)| > 1$ kommt. Während $|G(s)| > 1$ für I-Regelung bereits ab ca. 3 Hz gilt, beginnt die Überhöhung für B-Regelung erst ab ca. 40 Hz und somit über eine Dekade später. Folglich ist für die B-Regelung ein etwas geringeres und deutlich schnelleres Abklingen des Überschwingens zu erwarten, was die Simulation der Sprungantwort in Abb. 8 bestätigt. Des weiteren zeigt sich, dass eine Reduktion der Nachstellzeit des PID-Reglers bei B-Regelung kaum Einfluss auf das Führungsverhalten hat, da die Kompensation bereits maßgeblich im inneren Regelkreis passiert. Die entsprechenden Verläufe für B-Regelung in Abb. 7 sind daher nahezu deckungsgleich. Auf eine Darstellung in Abb. 8 wurde daher verzichtet.

Soll mit der I-Regelung ein ähnliches Verhalten realisiert werden, muss f_N deutlich erhöht

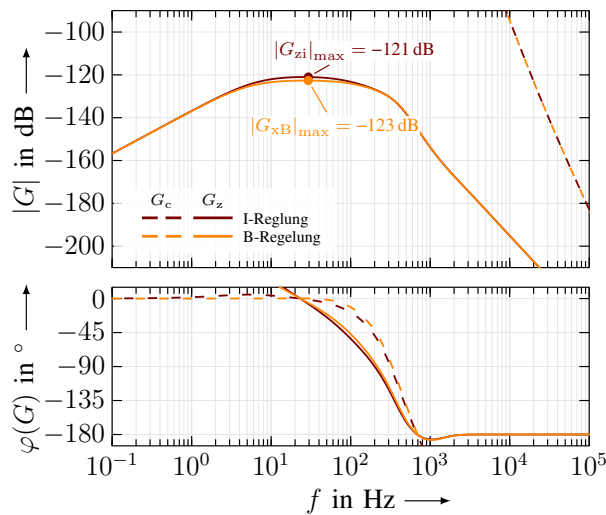


Abb. 9: Störfrequenzgang von I-Regelung und B-Regelung mit den Reglerparametern $D = 0,9$; $k/k_x = 5$ und $f_N = 5$ Hz

werden. Dies wirkt sich, wie einleitend erwähnt, negativ auf die Stabilität aus, erhöht das Überschwingen und führt trotz einem Unterschied von 4 Größenordnungen nicht zu gleichwertigen Ergebnissen, wie Abb. 8 zeigt.

Der Störfrequenzgang für die I- und B-Regelung ist in Abb. 9 dargestellt. Beide Regler erreichen eine Störunterdrückung von ca. -120 dB und einen sehr ähnlichen Verlauf. Der geringere Unterschied in der Störübertragungsverhalten lässt sich dadurch begründen, dass die Störgröße in beiden Fällen hinter der Mitkopplung wirkt. Das Ausregeln der Störung kann durch Erhöhen von f_N beschleunigt werden, wie Abb. 10 zeigt – allerdings einhergehend mit den erwähnten Nachteilen im Führungsverhalten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit untersucht das Übertragungsverhalten eines aktiven Magentlagers bei Verwendung einer Lageregelung mit unterlagertem Flussdichtereglerkreis. Der entscheidende Unterschied zur konventionellen Stromregelung ist die Berücksichtigung der für ein Magnetlager typischen Mitkopplung im inneren Regelkreis. Dadurch kann das Führungsverhalten deutlich verbessert werden. Das Überschwingen wird gleichzeitig mit der Ausregelzeit reduziert. Beim Störverhalten ist eine geringe Reduktion der Überschwingweite zu erkennen.

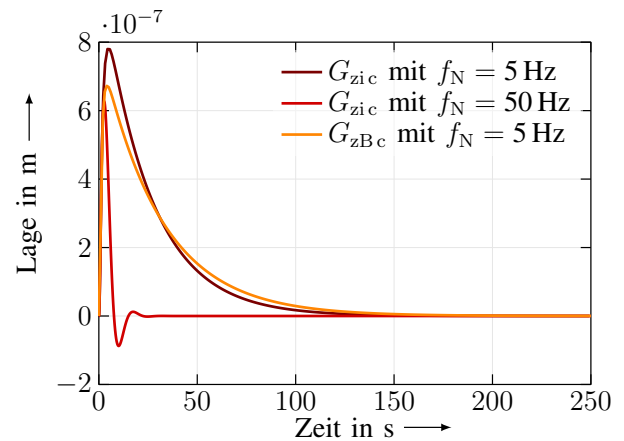


Abb. 10: Störungssprungantwort von I-Regelung und B-Regelung mit den Reglerparametern $D = 0,9$; $k/k_x = 5$ bei Sprung auf $F_z = 1$ N

Die dargestellte Struktur eröffnet Möglichkeiten, den inneren Regelkreis abweichend vom Standard, nicht als PI-Regler auszulegen, sondern gezielt die Mitkopplung zu kompensieren. Es ist zu erwarten, dass dadurch das Verhalten weiter verbessert werden kann.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung (Projekt *DFG HO1483/62-2*) und Dipl.-Ing. Robert Seifert für die anregenden Diskussionen zu dem präsentierten Thema.

Literatur

- [1] Mohamed, A. M.; Emad, F. P.: A Comparison between Current and Flux Control in Magnetic Bearing Systems. In: *1993 American Control Conference*. Juni 1993, S. 2356–2362
- [2] Seifert, Robert; Hofmann, Wilfried: Completion of analytical model of active magnetic thrust bearings including asymmetric air gap field between mixed materials. In: *Mechanical Engineering Journal, Bulletin of the JSME* 4 (2017) Nr. 5. Hrsg. von Mechanical Engineers, Japanese Society of, S. 1–11. DOI: 10.1299/mej.16-00696

- [3] Jaatinen, P. O.; Jastrzebski, R. P.; Lindh, T.; Pyrhönen, O.: Implementation of a flux-based controller for active magnetic bearing system. In: *2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Juli 2013, S. 141–145. DOI: 10.1109/INDIN.2013.6622872
- [4] Bleuler, H.; Vischer, D.; Schweitzer, G.; Traxler, A.; Zlatnik, D.: New concepts for cost-effective magnetic bearing control. In: *automatica* 30 (1994) Nr. 5, S. 871–876. DOI: 10.1016/0005-1098(94)90175-9
- [5] Seifert, Robert; Steiert, Christoph; Hofmann, Wilfried; Röbenack, Klaus: Einführung in die fraktionale Flusschätzung in elektromagnetischen Aktoren. In: *Automatisierungstechnik* (2019). Bd. 67, H. 7, S. 572–586. De Gruyter
- [6] Bahr, Falk; Mönch, Ingolf; Ernst, Daniel; Zerna, Thomas; Schmidt, Oliver G.; Hofmann, Wilfried: Direct field control of AMBs using flux feedback based on integrable Hall sensors. In: *Proceedings of the 15th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB 15)*. 2016
- [7] Liebfried, Robin; Hofmann, Wilfried: Performance of Flux Density Based Control Approaches for Active Magnetic Bearings – an Overview. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on Magnetic Bearings*. Beijing, 2018
- [8] Schweitzer, G.; Maslen, E. H.; Bleuler, H.; Keogh, P.; Larssonneur, R.; Nordmann, R.; Okada, Y.: *Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009

Anhang

Tab. 2: Parameter des UPL für $k/k_x = 5$, $D = 0,9$, $f_{Nx} = 5$ Hz

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Stellglied			
Stellgliedverstärkung	V_t	1	
Schaltfrequenz	$1/T_t$	21 333	Hz
Regelstrecke			
Hauptinduktivität	L_h	7,8	mH
Spulenwiderstand	R_{Cu}	0,7	Ω
Windungszahl	N	60	
Luftspaltfläche	A_g	225	mm ²
Polpaarzahl	p	2	
Stromregler			
Reglerverstärkung	K_{pi}	41,6	Ω
Nachstellzeit	T_{Ni}	11,2	ms
Flussdichteregler			
Reglerverstärkung	K_{pB}	144	m ² /s
Nachstellzeit	T_{NB}	11,2	ms
Lageregelung			
Effektive Rotormasse	m_r	1,45	kg
Kraft–Strom–Faktor	k_i	39,4	N/A
Kraft–Flussdichte–Faktor	k_B	287	N/T
Kraft–Weg–Faktor	k_x	230	N/mm
Reglerverstärkung	K_{px}	1,4	kN/mm
Vorhaltezeit	T_{Vx}	1,7	ms
Nachstellzeit	T_{Nx}	31,8	ms