Sensorlose Regelung eines radialen Magnetlagers mittels optimierter Raumzeigermodulation

D. Wimmer, M. Hutterer, M. Schrödl
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe
TU Wien
Gußhausstraße 25,
1040 Wien, Österreich
Email: dominik.wimmer@tuwien.ac.at

Kurzfassung
Aktive Magnetlager benötigen eine Information der Rotorposition für eine stabile Positionsregelung. Im Gegensatz zu einer sensorbehafteten Regelung bieten sensorlose Verfahren Vorteile in Hinblick auf Kosten, Bauraum und Verfügbarkeit eines Magnetlagersystems. Im Rahmen dieser Studie wird eine sensorlose Regelung eines radialen Magnetlagers mit 3-phasiger Struktur untersucht. Die Positionserfassung beruht auf einer Auswertung der Induktivitäten der Aktuatorspulen auf Basis einer Stromanstiegsmessung. Für den sensorlosen Betrieb werden die Aktuatorspulen mit speziellen Spannungspulsmustern beaufschlagt, welche über die Halbbrücken des Umrichters erzeugt werden. Die Pulsmuster werden anhand einer Raumzeigermodulation generiert, welche einen Freiheitsgrad in der Auswertung der Stromanstiegsinformation aufweisen. In diesem Beitrag werden verschiedene Strategien der Auswertung der Rotorposition vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der sensorlosen Rotorposition mit einer externen Sensorik anhand von Messungen an einem Prototyp.

1 Einleitung

Die sensorlose Regelung von Magnetlagern stellt bereits seit vielen Jahren ein Forschungsthema dar [1], [2]. Mithilfe von sensorlosen Verfahren kann bei Magnetlagern die Rotorposition aus Systemgrößen des Magnetlagers abgeleitet werden. Der Entfall der Sensorik bringt viele Vorteile in Hinblick auf Kosten, Bauraum, Zuverlässigkeit sowie auch bei Aspekten der Regelung flexibler Rotoreigenschaften. In dieser Arbeit wird ein Ansatz verfolgt, bei welchem die Rotorposition aus den Induktivitätsverhältnissen der Aktuatorspulen bestimmt wird. Grundlage dafür stellt das stromanstiegsbasierte INFORM Verfahren dar, welches ursprünglich für die sensorlose Erfassung des Rotorlagewinkels von permanenterregten Synchronmaschinen entwickelt wurde [3]. Bereits in vorausgehenden Arbeiten konnte dieses Verfahren auf radiale Magnetlager adaptiert werden [4], [5]. Dabei werden die zur Induktivitätsauswertung notwendigen Spannungsimpulse in das Schaltmuster der Halbbrücken (PWM) eingebettet. Die Gestaltung der Auswertung der Rotorposition auf Basis von Stromanstiegsmessungen bietet Freiheitsgrade, welche zur Erfüllung unterschiedlicher Optimierungskriterien genutzt werden können. Im Speziellen werden zwei Auswertevarianten vorgestellt, welche eine hohe Lagerdynamik oder einen minimalen Hardwareaufwand ermöglichen.

2 Sensorlose Regelung

Ausgangspunkt der Betrachtungen stellt ein aktives homopolares radiales Magnetlager dar, welches in Abb. 1 dargestellt ist. Der

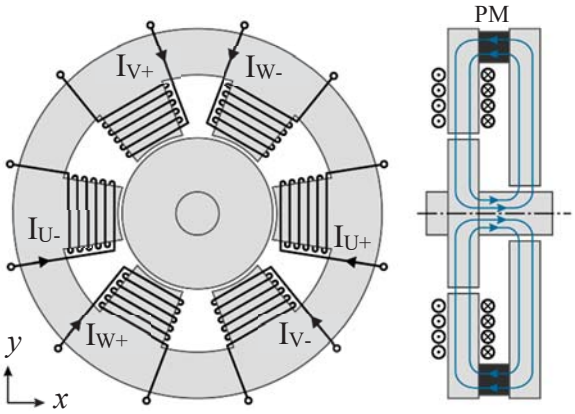

Abb. 1: Sensorloses 3-phasiges radiales homopolares Magnetlager mit PM-Vormagnetisierung

Grundfluss wird über eine Vormagnetisierung mittels Permanentmagnete (PM) realisiert. Die 6 Spulen des Magnetlagers sind in einer 3-phasigen Konfiguration verschaltet, sodass ein Betrieb an einem konventionellen Umrichter

möglich ist. Die Anbindung des Magnetlagers an den Umrichter erfolgt über die differentiellen Übertrager laut Abb. 2. Dabei werden zwei gegenüberliegende Spulen des Magnetlagers mit einer Phase des Umrichters

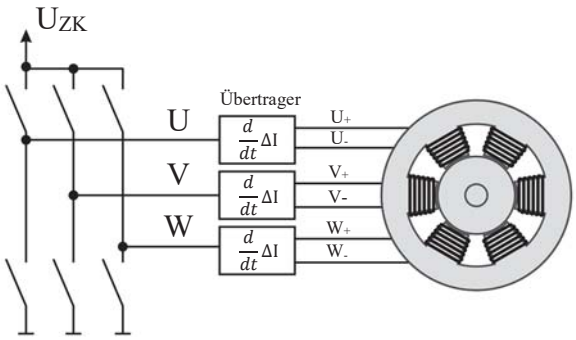

Abb. 2: Topologie zur differentiellen Stromanstiegsmessung am 3-phasigen Magnetlager.

elektrisch verbunden. Mithilfe des Übertragers aus Abb. 3 ist es nun möglich, Induktivitätsunterschiede zufolge eines exzentrisch schwebenden Rotors auf Basis einer Stromanstiegsmessung zu detektieren. Die

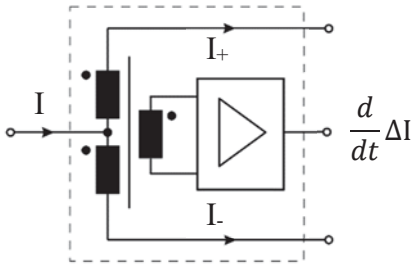

Abb. 3: Differentielle Stromanstiegsmessung mittels unbelastetem Übertrager.

differentielle Struktur des Übertragers sorgt einerseits für eine differentielle Auswertung der Induktivität und verhindert zudem eine magnetische Sättigung des Übertragers. Die Erfassung des Differenzstromanstiegs kann aufgrund des differenzierenden Verhaltens des Übertragers direkt an der Sekundärseite erfolgen. Als unmittelbare Konsequenz folgt, dass keine nummerische Differentiation in einem Signalprozessor notwendig ist und bereits ein Abtastwert für die Erfassung des Stromanstieges ausreicht. Die differentielle Auswertung des Stromanstieges bewirkt eine weitgehende Unterdrückung von Wirbelstromeffekten, welche zu nichtlinearen Signalverläufen im Stromanstieg führen und oftmals eine Limitierung von stromanstiegsbasierten Verfahren darstellen. Die Anregesignale für die sensorlose Positionsbestimmung des Rotors werden über die Halbbrücken des Umrichters erzeugt. Dabei erfolgt eine Ausgabe von diskreten Spannungspulsen auf die Phasen des Magnetlagers. Wird ein Spannungspuls an den Spulen angelegt, kann mittels einer Messung des Differenzstromanstiegs die positionsabhängige Induktivität der Spulen $L(x,y)$ laut Gleichung (1) bestimmt werden.

$$L(x,y) = U(t)\left(\frac{d}{dt}\Delta I(t)\right)^{-1} \qquad (1)$$

Zur Veranschaulichung des Funktionsprinzips sind die relevanten Signalverläufe dargestellt. Abb. 4b zeigt den Stromverlauf der Aktuatorspulen zufolge des Pulsmusters laut Abb. 4a bei

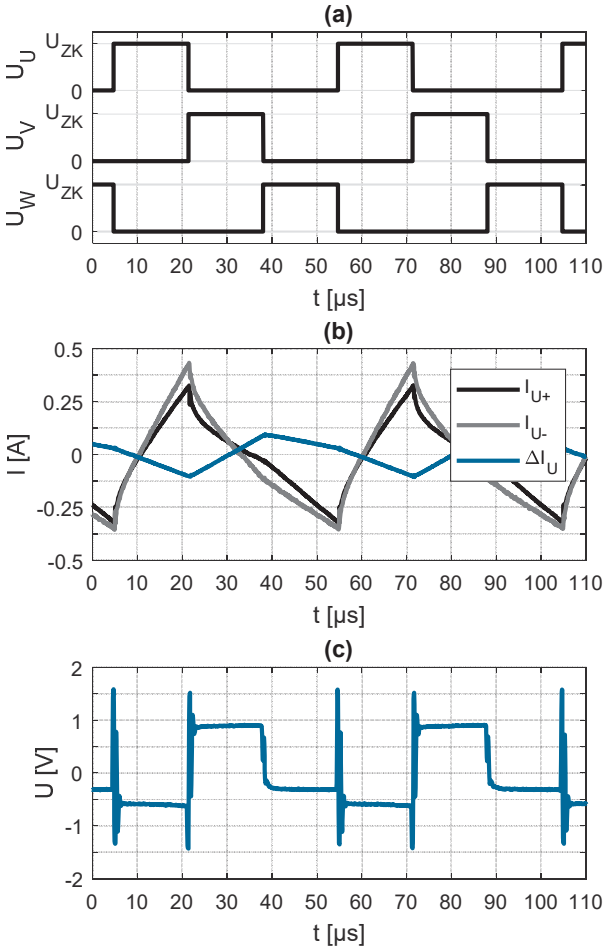

Abb. 4: **(a)** Pulsmuster der Phasenspannungen
(b) Stromverläufe der Phase U mit zugehörigem Differenzstrom $\Delta I_U = I_{U+} - I_{U-}$
(c) Ausgangssignal des Übertragers der Phase U (f_{PWM} = 20 kHz, U_{ZK} = 60 V)

exzentrischer Rotorlage. Aufgrund der unterschiedlichen Induktivitätsverhältnisse stellt sich bei den gegenüberliegenden Spulen (U_+, U_-) ein unterschiedlicher Stromanstieg ein. Im Verlauf des Differenzstromes ΔI_U ist

ersichtlich, dass Verzerrungen zufolge der Wirbelströme weitgehend unterdrückt werden können. Nach einer kurzen Einschwingzeit ist das Ausgangssignal des Übertragers (Abb. 4c) proportional zum Anstieg des Differenzstromes ΔI_U. Die Berechnung der Rotorposition aus dem Differenzstromanstieg erfolgt auf Basis einer Reluktanzmodellierung des magnetischen Kreises. Dabei werden die differentiellen Stromanstiege zufolge diskreter Spannungspulse einer Raumzeigermodulation ausgewertet. Da die Raumzeigermodulation eine wesentliche Komponente des sensorlosen Verfahrens darstellt, wird diese folgend näher betrachtet.

3 Raumzeigermodulation

Für die stabilisierende Positionsregelung des Magnetlagers werden die erforderlichen Ströme in die Aktuatorspulen eingeprägt. Im Gegensatz zu orthogonalen Anordnungen der Magnetpole, werden bei diesem System die gewünschten Ströme der x- bzw. y- Ebene mittels der Clark-Transformation in das 3-phasige System transformiert. Die Stellgröße des Stromreglers ist somit ein Spannungsraumzeiger, der für die Erreichung des Sollstromes sorgt. Die räumliche Anordnung der Pole des Magnetlagers (Abb. 5) erlaubt die Definition von 6 fundamentalen Spannungsraumzeigern (**U+**, **U-**, **V+**, **V-**, **W+**, **W-**), welche mit den magnetischen Polen des Lagers ausgerichtet sind.

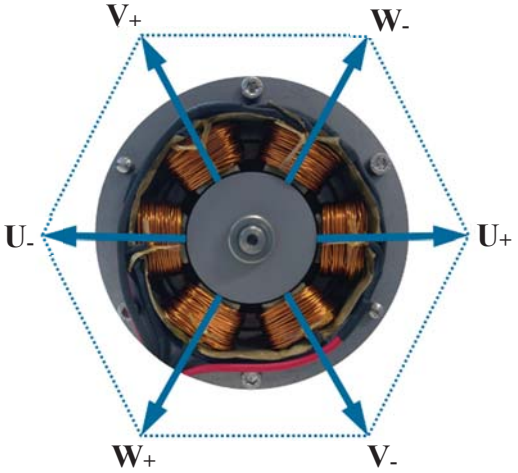

Abb. 5: Definition von Spannungsraumzeigern am Magnetlager

Über die Schalterstellungen der 3 Halbbrücken des Umrichters können acht diskrete Spannungsraumzeiger laut Tab. 1 dargestellt werden.

Tab. 1: Spannungsraumzeiger des 3-phasigen Umrichters

Phase	Schalter	Spannungsraumzeiger							
		U+	**U-**	**V+**	**V-**	**W+**	**W-**	**Z+**	**Z-**
U	HS	1	0	0	1	0	1	1	0
U	LS	0	1	1	0	1	0	0	1
V	HS	0	1	1	0	0	1	1	0
V	LS	1	0	0	1	1	0	0	1
W	HS	0	1	0	1	1	0	1	0
W	LS	1	0	1	0	0	1	0	1

HS: High-Side Schalter, LS: Low-Side Schalter, 1 = zu, 0 = offen

Die Raumzeigermodulation bietet nun die Möglichkeit mehrere Spannungsraumzeiger innerhalb einer PWM-Periode darzustellen. Da diese nicht linear unabhängig voneinander sind, entstehen Freiheitsgrade in der Raumzeigermodulation. Diese können gezielt dazu genutzt werden, die Dynamik des Magnetlagers zu erhöhen bzw. eine höhere Performance des sensorlosen Verfahrens zu erreichen. Bei dem Entwurf der Raumzeigermodulation müssen folgende Kriterien berücksichtigt werden:

3.1 Entwurfskriterien

- **INFORM Verfahren:** Jeder Spannungsraumzeiger des Umrichters führt zu einem Stromanstieg in den Aktuatorspulen, welcher Information über die Rotorposition enthält. Um eine differentielle Stromanstiegsmessung mittels des Übertragers aus Abb. 3 durchführen zu können, wird eine minimale Pulsdauer t_{INF} benötigt. Diese ist durch das Einschwingverhalten des Übertragers und der analogen Messschaltung gegeben (Abb. 4c).

- **Modulationsamplitude:** Die Modulationsamplitude ist über die maximale Länge eines Spannungsraumzeigers definiert. Eine große Modulationsamplitude führt zu einer hohen Dynamik des Stromreglers. Für einen winkelunabhängigen (symmetrischen) Betrieb des Stromreglers, ist es sinnvoll, die Modulationsamplitude auf den Innkreis des Modulationsgebietes zu beschränken.

- **Umrichter:** Um Probleme bei sehr kurzen Pulslängen bei Halbleiterschaltern zu vermeiden, muss eine minimale Pulsdauer gewährleistet werden [7]. Darüber hinaus

gilt es auch die Anforderungen von Gate-Treibern mit Boot-Strap Schaltung zu erfüllen. Diesbezüglich darf im Pulsmuster der High-Side Schalter nicht kontinuierlich geschlossen sein.

3.2 Modulationsstrategien

Ein vom Stromregler geforderter Spannungsraumzeiger **P** kann nun durch die Linearkombination der fundamentalen Spannungsraumzeiger laut Gleichung (2) gebildet werden.

$$\mathbf{P} = c_{U_+}\mathbf{U}_+ + c_{V_+}\mathbf{V}_+ + c_{W_+}\mathbf{W}_+ + c_{Z_+}\mathbf{Z}_+ \quad (2)$$
$$c_{U_}\mathbf{U}_- + c_{V_}\mathbf{V}_- + c_{W_}\mathbf{W}_- + c_{Z_}\mathbf{Z}_-$$

Die Koeffizienten c_{U_+}, c_{V_+}, c_{W_+}, c_{Z_+}, $c_{U_}$, $c_{V_}$, $c_{W_}$, $c_{Z_}$ entsprechen der Länge des jeweiligen Raumzeigers. Zur Vollständigkeit sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Länge eines Raumzeigers der Pulsdauer innerhalb des PWM Pulsmusters entspricht.

In vorausgehenden Betrachtungen wurde die Modulation stets so aufgebaut, dass in einer PWM Periode fundamentale Spannungsraumzeiger aus jeder Polachse mit einer Mindestpulslänge t_{INF} verwendet worden sind [6]. Durch die Einhaltung der Mindestpulslänge wird sichergestellt, dass bei jedem fundamentalen Spannungsraumzeiger eine Stromanstiegsmessung mittels des Übertragers möglich ist. Ein Pulsmuster, welches dieses Kriterium erfüllt, stellt das 3-Aktive Pulsmuster

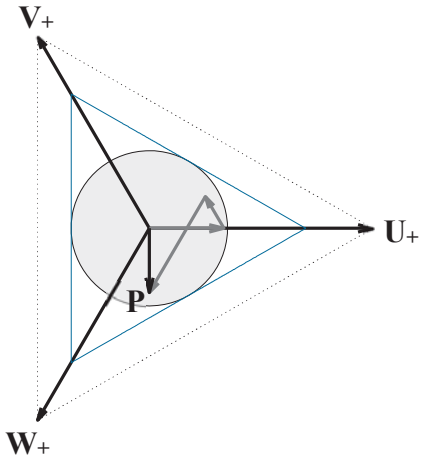

Abb. 6: 3-Aktive Raumzeigermodulation: Das Pulsmuster enthält Spannungsraumzeiger aus jeder Polachse.

aus Abb. 6 dar. Mit der Wahl des Pulsmusters können in jeder Phase 3 unabhängige Stromanstiegsmessungen bei den Spannungsraumzeigern $\mathbf{U}_+$, $\mathbf{V}_+$, $\mathbf{W}_+$ durchgeführt werden. Tabelle 2 zeigt die Messinformation der Stromanstiege, die beim 3-Aktiven Pulsmuster zur Verfügung steht. In der bisherigen Auswertung laut [6] wurde die

Tab. 2: Stromanstiegsmessungen beim 3-Aktiven Pulsmuster

Phase	Spannungsraumzeiger		
	$\mathbf{U}_+$	$\mathbf{V}_+$	$\mathbf{W}_+$
U	$\frac{d}{dt}\Delta I_U(\mathbf{U}_+)$	$\frac{d}{dt}\Delta I_U(\mathbf{V}_+)$	$\frac{d}{dt}\Delta I_U(\mathbf{W}_+)$
V	$\frac{d}{dt}\Delta I_V(\mathbf{U}_+)$	$\frac{d}{dt}\Delta I_V(\mathbf{V}_+)$	$\frac{d}{dt}\Delta I_V(\mathbf{W}_+)$
W	$\frac{d}{dt}\Delta I_W(\mathbf{U}_+)$	$\frac{d}{dt}\Delta I_W(\mathbf{V}_+)$	$\frac{d}{dt}\Delta I_W(\mathbf{W}_+)$

gesamte Stromanstiegsinformation für die Berechnung der Rotorposition verwendet. Aus theoretischen Betrachtungen des Magnetkreises ist es jedoch auch möglich, die Rotorposition bereits aus der Stromanstiegsinformation einer Phase bzw. eines fundamentalen Spannungsraumzeigers zu ermitteln. Aus diesem Grund wird im Weiteren eine 1-Raumzeiger Auswertung und eine 1-Phasen Auswertung vorgestellt.

3.3 1-Raumzeiger Auswertung

Diese Form der Auswertung zeichnet sich dadurch aus, dass die Rotorposition aus den Stromanstiegen eines fundamentalen Spannungsraumzeigers ausgewertet wird. Gleichung (3) zeigt die

$$(x, y) = f\left(\frac{d}{dt}\Delta I_U(\mathbf{U}_+), \frac{d}{dt}\Delta I_V(\mathbf{U}_+), \frac{d}{dt}\Delta I_W(\mathbf{U}_+)\right) \quad (3)$$

notwendigen Stromanstiege zur Berechnung der Rotorposition aus dem Spannungsraumzeiger $\mathbf{U}_+$. Die 1-Raumzeiger Auswertung bietet den Vorteil, dass bei der Raumzeigermodulation hohe Modulationsamplituden erzielt werden können. Wird nur ein Raumzeiger für die Positionsbestimmung verwendet, so muss auch nur ein Raumzeiger die Mindestlänge für eine Stromanstiegsmessung mittels Übertrager aufweisen. Dadurch entfällt die Forderung der Mindestlänge für weitere Spannungsraumzeiger. Dies hat zur Folge, dass im Pulsmuster keine fundamentalen Spannungsraumzeiger verwendet werden müssen, welche keinen

positiven Längenbeitrag für den gewünschten Spannungsraumzeiger **P** liefern.

3.4 1-Phasen Auswertung

Im Gegensatz zur 1-Raumzeiger Auswertung wird bei der 1-Phasen Auswertung nur der Stromanstieg in einer Phase ausgewertet. Um die Rotorposition aus dem Stromanstieg einer Phase bestimmen zu können, muss das Pulsmuster zumindest einen fundamentalen Spannungsraumzeiger aus jeder Polachse aufweisen. Gleichung (4) zeigt die notwendigen Spannungsraumzeiger für eine Auswertung der Phase U.

$$(x,y) = f\left(\frac{d}{dt}\Delta \mathbf{I}_U(\mathbf{U}_{\pm}), \frac{d}{dt}\Delta \mathbf{I}_U(\mathbf{V}_{\pm}), \frac{d}{dt}\Delta \mathbf{I}_U(\mathbf{W}_{\pm})\right) \qquad (4)$$

Die 1-Phasen Auswertung hat den Vorteil, dass der erforderliche Hardwareaufwand sehr gering gehalten werden kann. Abb. 7 zeigt eine Konfiguration des Umrichters der 1-Phasen Auswertung der Phase U. Im Gegensatz zu

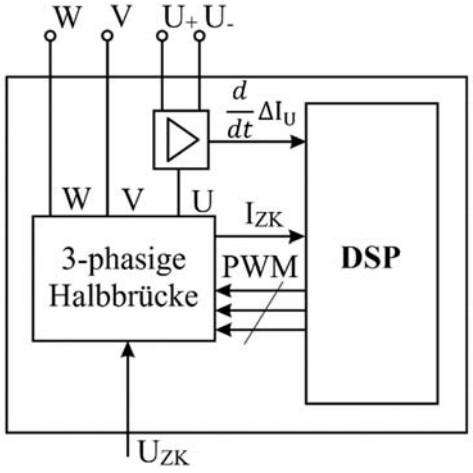

Abb. 7: 1-Phasen Auswertung der Phase U: Für die Positionsbestimmung wird nur ein Übertrager zur Stromanstiegsmessung benötigt.

einer 3-Phasen Auswertung wird nur ein Übertrager zur Stromanstiegsmessung benötigt. Dadurch reduziert sich der Verkabelungsaufwand zum Magnetlager auf 4 anstelle von 6 Leitungen. Für die sensorlosen Regelung sind insgesamt nur zwei Analogkanäle für die Messung des Stromanstieges $\frac{d}{dt}\Delta I_U$ und des Zwischenkreisstromes I_{ZK} erforderlich. Der Phasenstrom kann aus dem Zwischenkreisstrom und der Kenntnis der Schalterstellung rekonstruiert werden. Für die Vorgabe der Stellgröße sind 3 digitale Ausgänge zur PWM Vorgabe notwendig. Mit der 1-Phasen Auswertung ist es also möglich, eine sensorlose Regelung für ein radiales Magnetlager mit lediglich 5 Pins des DSPs darzustellen. Durch den geringen Hardwareaufwand ist diese Form der Auswertungen besonders für Low-Cost Anwendungen geeignet.

4 Messungen und Ergebnisse

Zur Bestimmung der Performance der 1-Raumzeiger bzw. 1-Phasen Auswertung der Rotorposition, wurden diese an einem Prüfstand eines radialen Magnetlagers implementiert. Der Prüfstand aus Abb. 8 besteht aus

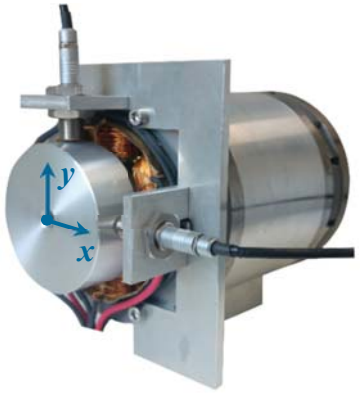

Abb. 8: Prüfstand eines radialen sensorlosen Magnetlagers mit externer Sensorik auf Wirbelstrombasis.

zwei Prototypen eines radialen homopolaren Magnetlagers sowie einer externen Sensorik auf Wirbelstrombasis (eddyNCDT 3300). Die Magnetlager sind analog zu Abb. 1 mit einem Rotordurchmesser von 50 mm und einem magnetischen Luftspalt von 800 µm aufgebaut. Jedes Magnetlager wird mit einem separaten Umrichter betrieben, wobei die sensorlose Regelung auf einem 32-bit DSP (TMS320F28335) implementiert wurde. Die Positionsregelung basiert auf dezentralen PIDT1 Reglern, da diese bereits ausreichende Performance für die folgenden Messungen liefern.

Sämtliche Messungen erfolgen auf Basis des 3-Aktiven Pulsmusters (Abb. 6, Abb. 4), wobei die gesamte Stromanstiegsinformation aller Phasen und Spannungsraumzeiger laut Tab. 2 aufgezeichnet wird. Der Unterschied zwischen der 1-Raumzeiger bzw. 1-Phasen Auswertung liegt somit rein in der Stromanstiegsinformation, welche bei der Auswertung verwendet wird. Für eine Beurteilung der Auswertemethoden wird eine Linearitätsmessung sowie eine Aufnahme der Sprungantwort durchgeführt.

4.1 Linearitätsmessung

Für die Bestimmung der Linearität unterschiedlicher Auswertungen wird zuerst die Linearität des sensorlosen Verfahrens bei Auswertung aller Stromanstiege durchgeführt. Anschließend wird der Linearitätsfehler bei unterschiedlichen Auswertungen gegenüber der externen Sensorik verglichen. Abb. 9 zeigt

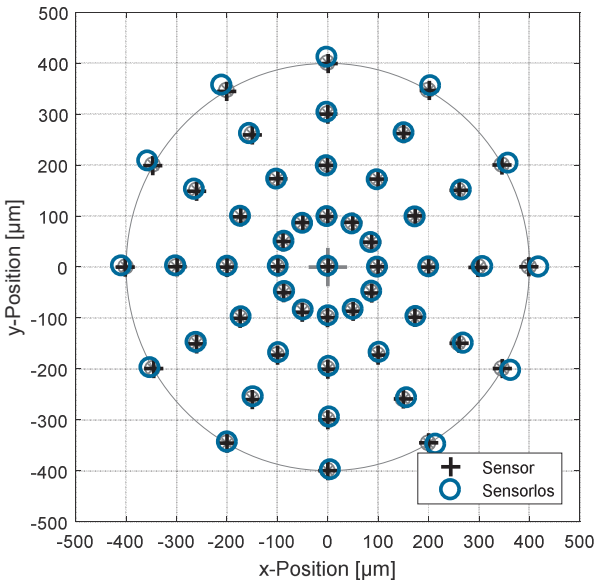

Abb. 9: Linearitätsmessung für verschiedene Rotorpositionen bei vollständiger Auswertung der Stromanstiege des 3-Aktiven Pulsmusters (f_{PWM} = 20 kHz, U_{ZK} = 48 V)

einen Vergleich der sensorlosen Rotorposition mit einer externen Sensorik für verschiedene Arbeitspunkte des Magnetlagers. Der zulässige Orbit des Magnetlagers beträgt 400 µm bei einem magnetischen Luftspalt von 800 µm. Für einen direkten Vergleich der 1-Raumzeiger und 1-Phasen Auswertungen wird der Rotor im zulässigen Arbeitsbereich horizontal bewegt. Abb. 10 zeigt die Abweichung der 1-Raumzeiger Auswertung x_{err} gegenüber der Sensorik unter Verwendung der Stromanstiegsinformation von unterschiedlichen Raumzeigern des Pulsmusters. Es ist ersichtlich, dass die Abweichung der Rotorposition zwischen der Auswertung unterschiedlicher Raumzeiger nur geringfügig variiert. Da der Fehler der y-Position y_{err} dieselbe Größenordnung aufweist, wird dieser nicht explizit dargestellt. Abb. 11 zeigt die Rotorposition der Trajektorie mit 1-Phasen Auswertung. Die Auswertung der Stromanstiege verschiedener Phasen liefert auch hier nur geringe Abweichung gegenüber der externen Sensorik.

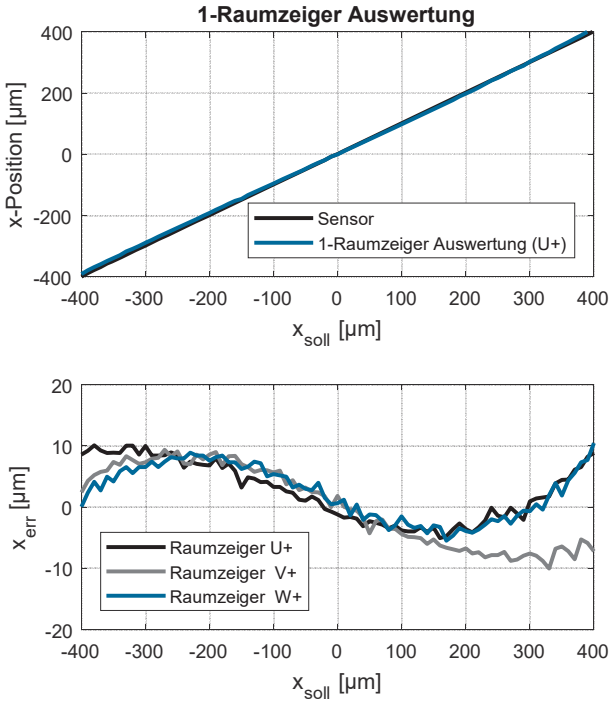

Abb. 10: 1-Raumzeiger Auswertung der Rotorposition verschiedener Raumzeiger des Pulsmusters. (y_{soll} = 0 µm, Stillstand, 3-Aktiv Pulsmuster, f_{PWM} = 20 kHz, U_{ZK} = 48 V)

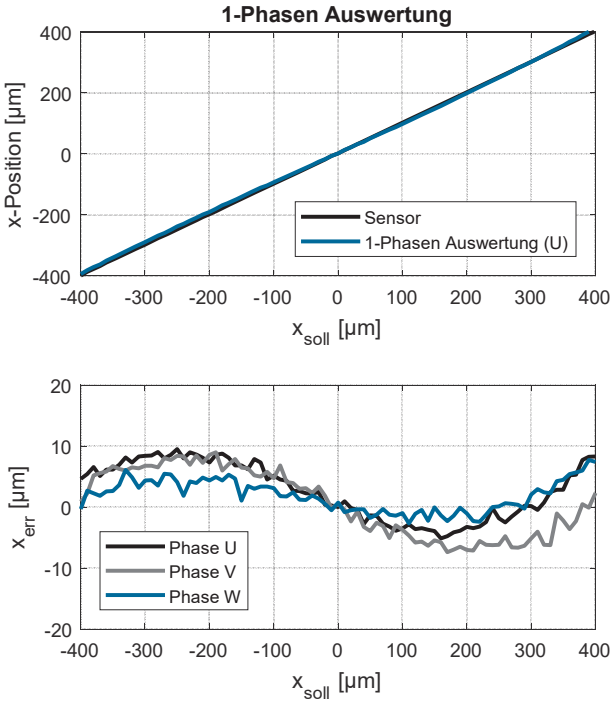

Abb. 11: 1-Phasen Auswertung der Rotorposition verschiedener Phasen des Magnetlagers. (y_{soll} = 0 µm, Stillstand, 3-Aktiv Pulsmuster, f_{PWM} = 20 kHz, U_{ZK} = 48 V)

4.2 Sprungantwort

Zur Beurteilung der sensorlosen Positionsinformation bei transienten Vorgängen wird

eine Analyse anhand der Sprungantwort durchgeführt. Abb. 12 zeigt die Sprungantwort der

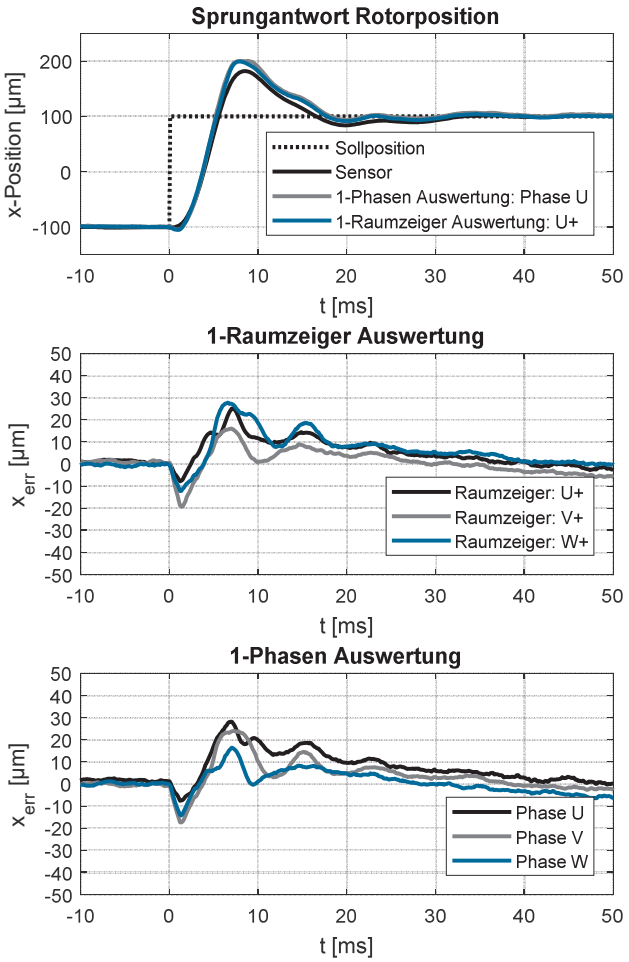

Abb. 12: Sprungantwort der Rotorposition für 1-Raumzeiger und 1-Phasen Auswertung (Stillstand, 3-Aktiv Pulsmuster, f_{PWM} = 20 kHz, U_{ZK} = 48 V)

Rotorposition für unterschiedliche Auswertungen der Stromanstiegsinformation mit der zugehörigen Abweichung x_{err} gegenüber der externen Sensorik. Sowohl die 1-Raumzeiger als auch die 1-Phasen Auswertung zeigen einen ähnlichen Verlauf der Positionsabweichungen. Speziell im Bereich der Beschleunigungs- bzw. Abbremsphase des Rotors treten größere Abweichungen auf. In diesen Phasen werden große Ströme in die Aktuatorspulen eingeprägt, wodurch das Magnetlager bzw. der Übertrager den linearen Arbeitsbereich verlässt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Fokus dieser Arbeit lag auf der stromanstiegsbasierten sensorlosen Regelung eines 3-phasigen radialen Magnetlagers. Im Speziellen wurden die Betrachtungen auf die Raumzeigermodulation gerichtet, welche die Abfolge der Spannungsraumzeiger am Umrichter vorgibt. Im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten wurde nur die Stromanstiegsinformation eines Spannungsraumzeigers bzw. einer Phase zur Bestimmung der Rotorposition ausgewertet. Mit dieser Form der Auswertung ist es möglich, weitere Freiheitsgrade in der bestehenden Raumzeigermodulation bzw. einen minimalen Hardwareaufwand des Systems zu erreichen. Die Messungen an einem Prototyp zeigten, dass auch bereits bei Auswertung der Stromanstiegsinformation einer Phase eine hohe Linearität der Rotorposition erreicht werden kann. Weitere Analysen widmen sich den Nichtlinearitäten des sensorlosen Verfahrens sowie der Bestimmung der Robustheit der Regelung bei verschiedenen Rotordrehzahlen.

Literatur

[1] Schweitzer, G., Maslen, E. H.: "Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery", Springer Berlin, Germany, 2009, pp. 127--145.

[2] Maslen, E. H.: "Self–sensing for active magnetic bearings: Overview and status", Proceedings of the 10th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB10), Martigny, Switzerland, 21–23 August 2006.

[3] Schrödl, M.: "Sensorless control of permanent-magnet synchronous machines at arbitrary operating points using a modified INFORM flux model", Eur. Trans. Electr. Power ETEP 1993, 3, 277–-283.

[4] Hofer, M., Hutterer, M., Nenning, T., Schrödl, M.: "Improved Sensorless Control of a Modular Three Phase Radial Active Magnetic Bearing", Proceedings of the 14th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB14), Linz, Austria, 11–14 August 2014.

[5] Nenning, T., Hutterer, M., Schrödl, M.: "Setup with two Self-Sensing Magnetic Bearings using Differential 3-Active INFORM", Proceedings of the 14th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB14), Linz, Austria, 11–14 August 2014.

[6] Wimmer, D., Hutterer, M., Hofer, M., Schrödl, M.: "Space Vector Modulation Strategies for Self-Sensing Three-Phase Radial Active Magnetic Bearings", Actuators 2019, Vol. 8,2,41.

[7] Quang, N.P., Dittrich, J.A.: “Vector Control of Three-Phase AC Machines: System Development in Practice”, Springer: Berlin, Germany, 2015; pp. 17–59, ISBN 978-3-662-46915