

CHARAKTERISIERUNG UND UNTERSUCHUNG DER REGELSTRECKE EINES STREUFLUSSBASIERTEN LAGEMESSSYSTEMS FÜR MAGNETLAGER

J. Rudolph, R. Werner

Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe

Technische Universität Chemnitz

Reichenhainer Straße 70

09126 Chemnitz, Germany

Tel.: +4937153138938

Email: johannes.rudolph@etit.tu-chemnitz.de

Abstract

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Modellierung der Regelstrecke eines achtpoligen heteropolaren Magnetlagers. Dabei wird ein FEM-Modell des Lagers in MatLab Simulink implementiert, wodurch es möglich wird, das Betriebsverhalten des kompletten Lagers schon während des Designprozesses zu untersuchen. Hauptaugenmerk liegt hierbei auf dem Messsystem, das zur Bestimmung der Wellenposition die magnetischen Streuflüsse nutzt, die in den Polzwischenräumen auftreten.

1 Einleitung

Die Möglichkeit, aktiv auf Größen wie die Lagersteifigkeit Einfluss nehmen zu können, macht Magnetlager in bestimmten Anwendungen zu einer interessanten Alternative gegenüber konventionellen Wälzlagern. Je nach Anforderung an das zu lagernde System können Magnetlager in verschiedenen Topologien ausgeführt sein. Eines haben aber fast alle Ausführungsformen gemeinsam. Auf Grund der systematischen Instabilität müssen die Lagerkräfte permanent nachgeregelt werden, was eine Bestimmung der Wellenposition zwingend erforderlich macht. Dafür stehen verschiedene Prinzipien zur Verfügung. Am weitesten verbreitet sind klassische Positionssensoren, die kapazitiv bzw. mit Hilfe von Wirbelströmen die Position der Welle detektieren. In der jüngeren Vergangenheit sind immer häufiger sogenannte sensorlose Verfahren Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion [1],[2],[3]. Diese zeichnen sich durch die Auswertung der Anstiegszeiten der gepulsten Spulenströme aus, die auf eine Induktivitätsänderung

zurückzuführen sind, welche wiederum eng mit der Lage des Rotors im Magnetlager verknüpft ist. Eine Alternative dazu stellt die Messung der magnetischen Streuflüsse dar, die im Bereich der Nuten zwischen den Polen auftreten [4],[5]. Dazu müssen zusätzlich die momentan fließenden Steuerströme berücksichtigt werden. Ähnlich wie dies beim magnetischen Fluss im Luftspalt der Fall ist, lässt sich daraus die Wellenposition ableiten. Im Vergleich zur Messung im Luftspalt steht aber deutlich mehr Platz zur Verfügung, wodurch sich das Design der Sensoren erheblich einfacher gestaltet. In dem (in diesem Beitrag) betrachteten Heteropolarlager ergeben sich, wie in Fig. 1 dargestellt acht mögliche Messposition zur Bestimmung der magnetischen Streuflüsse.

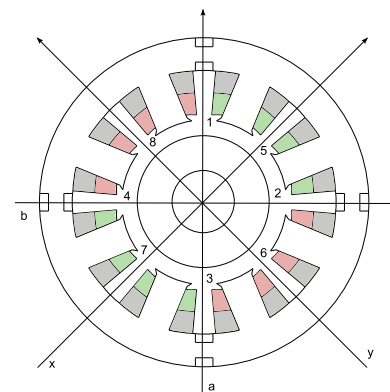


Fig. 1 Mögliche Positionen zur Messung der magnetischen Streuflüsse in einem achtpoligen Heteropolarlager

Aufgrund der Ausrichtung der magnetischen Streufelder, die an den Positionen 1-4 vorwiegend radiale Anteile aufweisen und an den Positionen 5-6 hauptsächlich tangential

ausgerichtet sind sowie der bauartbedingten Ausrichtung der Messachse der zur Verfügung stehenden Hall-Sensoren, wurden die Positionen 1-4 für den Einbau gewählt. An diesen Positionen wurden die ursprünglich eingesetzten Nutverschlüsse durch Leiterplatten ersetzt, auf denen die Hall-Sensoren sitzen (Fig. 2). Aufgrund des ausgeprägten nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Streuflussdichte und Luftspaltlänge wurde eine differenzielle Anordnung der Sensoren gewählt. Die Sensoren 1 und 3 bilden das Messsignal für die Position der Welle in der a-Achse während die Sensoren 2 und 4 die b-Achse repräsentieren. Damit ergibt sich ein Messkoordinatensystem, dass um 45° gegenüber dem Koordinatensystem der Lagerachsen verdreht ist. Da die Messung der magnetischen Streuflussdichte zwischen den Lagerachsen durchgeführt wird, ist es notwendig, die Summe beider Steuerströme bei der Bestimmung der Wellenposition zu berücksichtigen.



Fig. 2 Streuflusssensoren im eingebauten Zustand

2 Regelstrecke

Um eine möglichst genaue Vorhersage über das spätere Betriebsverhalten des Magnetlagers treffen zu können, muss die gesamte Regelstrecke mit all ihren Komponenten so detailliert wie möglich modelliert werden. Dazu gehören neben dem Lager selbst (bei dem die Betrachtung der elektromagnetischen und mechanischen Komponenten erfolgt) und dem streuflussbasierten Messsystem auch die Stromrichter, welche für die Einprägung der Steuerströme zuständig sind. Der gesamte Regelkreis weist die typische Kaskadenstruktur auf, bei der die Lageregelung die übergeordnete

(äußere Schleife) und der Stromregler die unterlagerte (innere Schleife) darstellt. Diese wird mit Hilfe eines dSpace-Echtzeitsystems realisiert. Die unterlagerte Stromregelung wird intern von den Stromrichtern durchgeführt.

2.1 Stromrichter

Eine wichtige Komponente von Magnetlagern sind die Stromrichter, die für die Einprägung der Steuerströme verantwortlich sind. Um eine möglichst realitätsnahe Beschreibung des Gesamtsystems Magnetlager zu erreichen, erfolgt zunächst die Untersuchung des Übertragungsverhaltens der Stromrichter, um diese anschließend modellieren zu können. Die Sollwertvorgabe erfolgt über die Analogausgänge des dSpace-Systems. Die Sprungantwort des Stromrichters der x-Achse des untersuchten Magnetlagers ist in Fig. 3 dargestellt. Die maximale Höhe des Steuerstroms von 15 A wird nach ca. $5 \mu\text{s}$ erreicht, wobei der Anstieg nahezu linear verläuft.

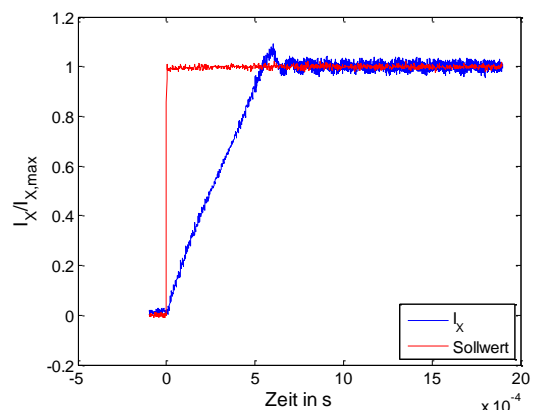


Fig. 3 Sprungantwort des Stromrichters für den Steuerstrom in der x-Achse

Basierend auf der aufgezeichneten Übertragungsfunktion wird ein Modell für die Stromrichter erstellt. Die Regelung der Steuerströme stellt einen kaskadierten, der Lageregelung unterlagerten Regelkreis dar, bei dem häufig PI/PID oder Zweipunktregler zum

Einsatz kommen.

[3]. **2.2 Modell des Magnetlagers**

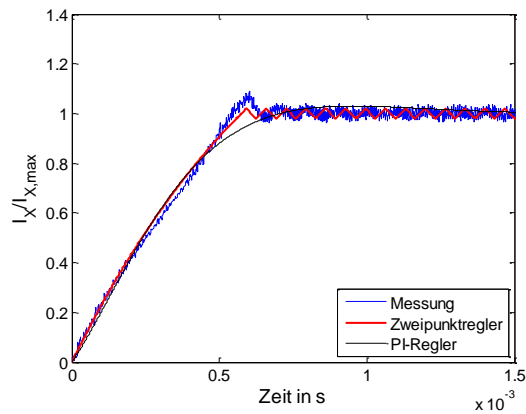


Fig. 4 Modelliertes Übertragungsverhalten des Stromrichters im Vergleich zur gemessenen Sprungantwort

Die in der Fig. 4 dargestellten Verläufe geben die Sprungantwort eines Stromrichters auf der Basis von Messwerten, eines Modells mit PI-Regler sowie eines Modells mit Zweipunktregler wieder.

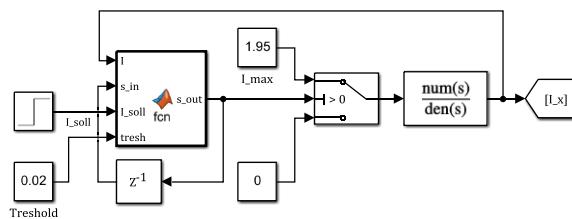


Fig. 5 Simulink-Modell des Stromrichters mit Zweipunktregelung

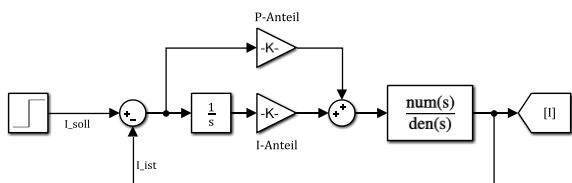


Fig. 6 Simulink-Modell des Stromrichters mit PI-Regler

Welches der beiden Stromrichtermodelle zum Einsatz kommt ist, von den Parametern des Gesamtmodells abhängig. Die Zweipunktregelung ermöglicht eine genauere Nachbildung der zeitlichen Verläufe der Steuerströme.

Die Modellierung des elektromagnetischen Teils des Magnetlagers wird durch eine Kopplung von Simulink und der Open Source Software FEMM realisiert. Letztere wird durch eine s-function in das Simulink Modell implementiert. Dabei werden bei jedem Funktionsaufruf die Position der Welle im Lager, der Grunderregerstrom und die Momentanwerte der Steuerströme an FEMM übergeben. Beim Start der Funktion wird eine Instanz von FEMM geöffnet und die Statorgeometrie geladen. Anschließend werden den Strömen die übergebenen Werte zugeordnet und der Rotor an der entsprechenden Stelle erzeugt. Nach dem das Modell vernetzt wurde, berechnet die Software, wie in Fig. 7 dargestellt, die Verteilung der magnetischen Flussdichte. Daraus lassen sich nach Gleichung 1 die auf die Welle wirkenden Kräfte bestimmen. Diese werden im Anschluss an Simulink zurückgegeben.

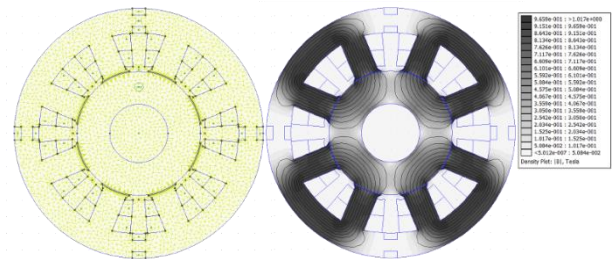


Fig. 7 Vernetztes Modell des Lagers (links) und berechnete Verteilung der magnetischen Flussdichte (rechts)

$$F = \frac{1}{2 \cdot \mu} \cdot B^2 \cdot A \quad (1)$$

Zur Reduktion der Modellkomplexität wird von einer starren nicht rotierenden Welle ausgegangen, die durch zwei Lager gehalten wird. Das in diesem Beitrag betrachtete Magnetlager fungiert als Loslager während ein zweites aktives Magnetlager das Festlager repräsentiert. Basierend auf dem Zusammenhang aus Gleichung 2 und der am Punkt des Loslagers wirkenden Masse kann die während eines Simulationsschrittes erfolgte Verschiebung der Welle im Magnetlager bestimmt werden.

$$a = v \frac{d}{dt} = s \frac{d^2}{dt^2} \quad (2)$$

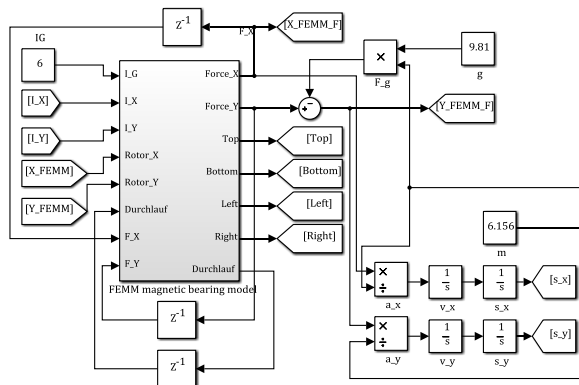


Fig. 8 Simulink-Modell des Magnetlagers

In Fig. 8 ist das Simulink-Modell des Magnetlagers dargestellt. Neben den bereits beschriebenen Ein- und Ausgängen weißt der Funktionsblock zur FEM-Berechnung des Magnetlagers noch weitere Schnittstellen auf. Zum einen gibt der Block die magnetischen Flussdichten an den Messstellen des Streifflussmesssystems aus und zum anderen werden eine Zählvariable und die aktuellen Kräfte in x- und y-Richtung zurückgeführt.

2.3 Messsystem

Grundlegend ist die Simulation auch ohne das Modell eines Messsystems lauffähig, da die Positionsinformation der Welle bereits in Form der Ausgangsgröße der FEM-Rechnung vorhanden ist und direkt an einen Regler übergeben werden kann, der daraufhin die Einstellung der Steuerströme vornimmt. Um das Verhalten des Streifflussmesssystems nachbilden zu können, muss von diesem ebenfalls ein entsprechendes Modell erstellt werden. Für die Ermittlung der Wellenposition im Magnetlager ist neben der Streifflussdichte auch die Berücksichtigung der Momentanwerte der Steuerströme notwendig. Je nach Größe des fließenden Stroms verschiebt sich die Kennlinie wie in Fig. 9 dargestellt. Das Kennlinienfeld basiert auf der Messung der Streifflussdichten an unterschiedlichen Positionen entlang der a- und b-Achse mit einer Schrittweite von 0,05 mm. An jedem Punkt wurde der

resultierende Steuerstrom in 6 A Schritten von -30 A bis 30 A variiert. Neben der Verschiebung der Kennlinie kommt es zu einer Änderung des Anstieges im Bereich der Lagermitte, welcher im Fall sich gegenseitig kompensierender Steuerströme am kleinsten ist.

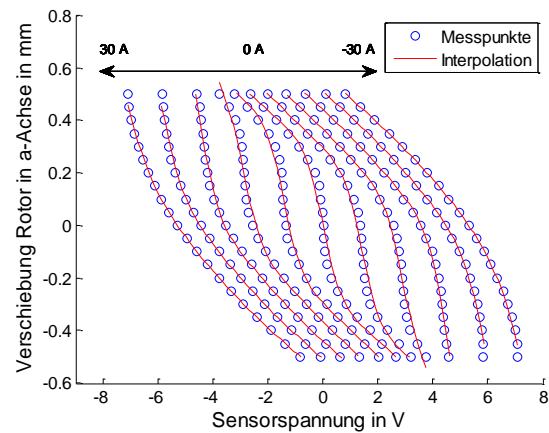


Fig. 9 Kennlinienfeld der a-Achse für verschiedene Steuerströme

Darauf basierend lassen sich durch Umstrukturierung und Aufbereitung entsprechende Lookup Tabellen erstellen. Diese haben nun als Eingangsgrößen die Sensorspannung und den Spulenstrom und als Ausgangsgröße die dazugehörige Wellenposition.

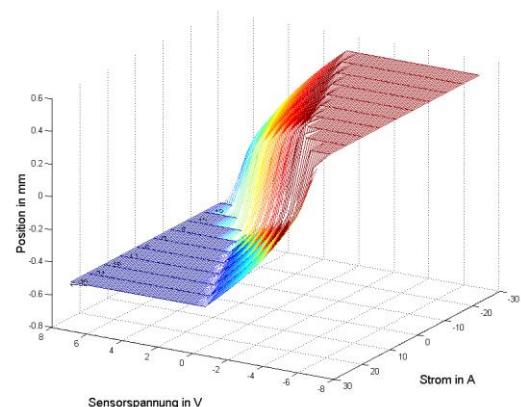


Fig. 10 Lookup Tabelle der a-Achse

Wie in Fig. 10 verdeutlicht, weist die Lookup Tabelle klar definierte Grenzen auf, die die größtmögliche, durch das Fanglager limitierte, Auslenkung der Welle repräsentieren. Das Modell des Messsystems basiert im Wesentlichen auf den bereits beschriebenen

Kennfeldern und einer Überführung des a/b-Koordinatensystems in das des Magnetlagers (siehe Fig. 11).

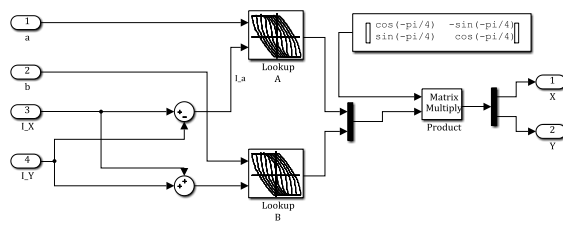


Fig. 11 Modell des Messsystems mit Lookup Tabellen und Rotationsmatrix

3 Modellverhalten

Um das komplette Modell zu testen, wird das Verhalten des geschlossenen Regelkreises auf einen Sprung des Sollwertes der Lagerposition untersucht. Als Reglereingang dient zunächst die Position der Welle die durch FEMM zur Verfügung gestellt wird.

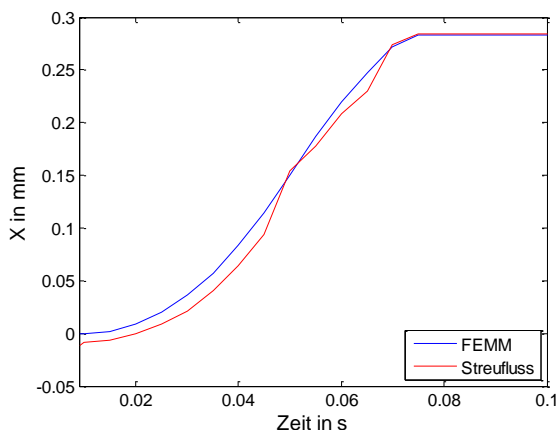


Fig. 12 Simulation der Sprungantwort mit FEMM Position als Reglereingangsgröße

Der in Fig. 12 dargestellte Verlauf der berechneten Sprungantwort zeigt geringfügige Abweichungen des Streuflussmesssystems von der tatsächlichen Wellenposition. Diese werden zum einen durch Interpolationsfehler und zum anderen durch eine fehlende Kompensation der Einflüsse der Steuerströme verursacht, die immer dann auftritt, wenn diese den gleichen Wert annehmen. In diesem Fall ist eine Eingangsgröße der Lookup Tabelle gleich Null, was dazu führt, dass Änderungen der Streuflussdichten fälschlicherweise als Positionsänderung interpretiert werden. Das

Lager schwebt in der Simulation dennoch stabil wie der Verlauf in Fig. 13 verdeutlicht.

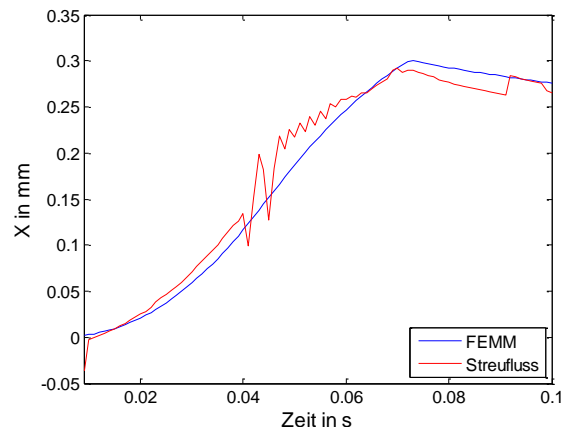


Fig. 13 Simulation der Sprungantwort mit Streuflussmesssystem als Reglereingangsgröße

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe der Kombination einer FEM-Software und Matlab Simulink konnte das Betriebsverhalten eines Magnetlagers mit Streuflussmesssystem nachgebildet werden. Dadurch kann die Qualität der für das Messsystem notwendigen Kennlinienfelder untersucht werden, um diese weiter zu verbessern. In weiterführenden Arbeiten ist zudem zu klären, wie eine Stromkompensation auch bei sich gegenseitig aufhebenden Steuerströme realisiert werden kann. Ein möglicher Ansatz ist die nachgeschaltete Betrachtung der einzelnen Steuerströme.

Literatur

- [1] Hofer, M., Hutterer, M. and Schroedl, M.: Sensorless Control of a Three Phase Radial Active Magnetic Bearing. Twelfth International Symposium on Magnetic Bearings. Wuhan 2010, China
- [2] García, P., Guerro, J.M., Briz, F., Reigosa, D.D.: Sensorless Control of Three-Pole Active Magnetic Bearings Using Saliency-Tracking-Based Methods. 1476 IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 4, July/August 2010
- [3] Kucera, L.: Zur sensorlosen Magnetlagerung. Dissertation ETH Zürich, 1997

- [4] Rudolph, J., Werner, R.: Theoretical Basics and Closed Loop Control Design of Stray-Flux-Based Measurement Systems for Magnetic Bearings. Fifteenth International Symposium on Magnetic Bearings. Kitakyushu 2016, Japan
- [5] Rudolph, J.; Sieber A., Werner, R.: Differentiation und Linearisierung von Messsignalen eines streuflussbasierten Messsystems für magnetisch gelagerte Rotoren. 11. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz 2017
- [6] Bernet, S.: Selbstgeführte Stromrichter am Gleichspannungszwischenkreis: Funktion, Modulation und Regelung. Berlin, Heidelberg: Springer. 2012, ISBN 9783540688617