

Differentiation und Linearisierung von Messsignalen eines streuflussbasierten Messsystems für magnetisch gelagerte Rotoren

Johannes RUDOLPH, Arthur SIEBER, Ralf WERNER

Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe (EWA)

Technische Universität Chemnitz

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

Kurzfassung

In dem vorliegenden Beitrag wird auf Besonderheiten und Probleme eingegangen, die bei der Signalverarbeitung von stark verrauschten Signalen eines streuflussbasierten Messsystems zur Bestimmung der Rotorposition in einem heteropolaren Magnetlager auftreten. Besonders die zeitliche Ableitung der Steuerströme zur Kompensation von Feldverzögerungseffekten verursacht Probleme, für die in dieser Arbeit Lösungsansätze vorgestellt werden. Im Anschluss wird die Umsetzung auf einem Echtzeitbetriebssystem mithilfe von MATLAB-Simulink beschrieben.

1. Einleitung

Magnetisch gelagerte Rotoren kommen überall dort zum Einsatz, wo hohe Ansprüche an Verschleißarmut gelten. Sie zeichnen sich zudem durch einen geringen Wartungsaufwand und niedrige Reibverluste aus.

1.1. Messsysteme für Magnetlager

Aufgrund ihrer vielen Vorteile stellen Magnetlager in einigen Anwendungsfällen eine interessante Alternative zu konventionellen Wälzlagern dar. Magnetlager weisen viele Vorteile auf, sind aber von Natur aus instabile Systeme. Für einen sicheren Betrieb ist eine genaue Lokalisation der rotierenden Welle im Magnetlager notwendig. Dies wird in der Praxis mit konventionellen Messsystemen realisiert, bei denen meist kapazitive oder wirbelstrombasierte Abstandssensoren zum Einsatz kommen. Seit einiger Zeit stehen zusätzlich sogenannte sensorlose Verfahren zur Verfügung [1], [2], [3]. Bei dieser Methode zur Positionsbestimmung wird die Lage des Rotors im Magnetlager mit Hilfe der Informationen gewonnen, die in den

Spulenströmen und den dazugehörigen Spannungen enthalten sind. Neben den klassischen und sensorlosen Messmethoden besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Rotorposition mittels der magnetischen Flüsse im Lager zu bestimmen. In [4] wird beispielsweise ein sehr dünner Magnetfeldsensor beschrieben. Dieser wird in Form einer Folie direkt in den Luftspalt eingebracht. Bei diesem Verfahren kommen experimentelle Sensoren zum Einsatz, die z.Z. noch nicht auf dem Markt zur Verfügung stehen. Um auf Standardbauelemente zurückgreifen zu können ist in [5] eine Methode vorgeschlagen worden, bei der die Wellenposition mittels der Messung der magnetischen Streuflüsse realisiert wird, die zwischen den Steuerspulen eines Magnetlagers auftreten.

1.2. Streuflussbasiertes Messsystem

Um magnetische Streuflüsse zur Bestimmung der Wellenposition im Magnetlager nutzen zu können, müssen die magnetischen Verhältnisse im Lager genau bekannt sein. Dies kann mithilfe von FEM-Modellen oder durch Messungen realisiert werden. Grundsätzlich sind in Magnetlagern zwei verschiedenen Arten von magnetischen Streuflüssen zu beobachten, aus denen die Rotorposition abgeleitet werden kann. Zwischen gleichgerichtet magnetisierten Polen treten intrapolare Streuflüsse auf. Diese sind hauptsächlich tangential orientiert. Im Bereich zwischen entgegengesetzt magnetisierten Polen finden sich interpolare Flüsse, deren Feldlinien zum größten Teil radial ausgerichtet sind.



Abbildung 1 Netzwerk aus magnetischen Widerständen zur Veranschaulichung von Magnetflüssen in Magnetlagern am Beispiel eines Heteropolarlagers. Intrapolare Streuflüsse sind gelb, interpolare Streuflüsse rot und der Luftspaltfluss blau dargestellt.

Die verschiedenen Arten magnetischer Flüsse sind mittels magnetischer Widerstände in Abbildung 1 dargestellt. Zur Messung der Streuflüsse eignen sich handelsübliche HALL-Sensoren. Diese weisen eine hohe Messgenauigkeit und Dynamik auf. Zudem sind sie im Vergleich zu konventionellen Sensoren deutlich kostengünstiger. Bauartbedingt eignen sie sich jedoch nur zur Messung der interpolaren Streuflüsse.

Grundlegend sind die Streuflüsse im Magnetlager direkt von der Länge des Luftspaltes bzw. der Rotorlage abhängig und dem Strom, der in den Lagerspulen fließt. Dies macht dessen Messung notwendig, um die mittels Streuflussmessung erhaltene Rotorposition vom Einfluss der Steuerströme bereinigen zu können.

2. Realisierung eines streuflussbasierten Messsystems

2.1. Linearisierung

Der Zusammenhang zwischen Luftspaltlänge und Streufluss ist nichtlinear. Daher ist es sinnvoll, eine erste Linearisierung durch eine differentielle Anordnung der HALL-Sensoren in genau gegenüberliegenden Bereichen des Magnetlagerstators durchzuführen. Die in Abbildung 2 blau dargestellten Kennlinien wurden mittels HALL-Sensoren aufgenommen, die sich im Bereich der

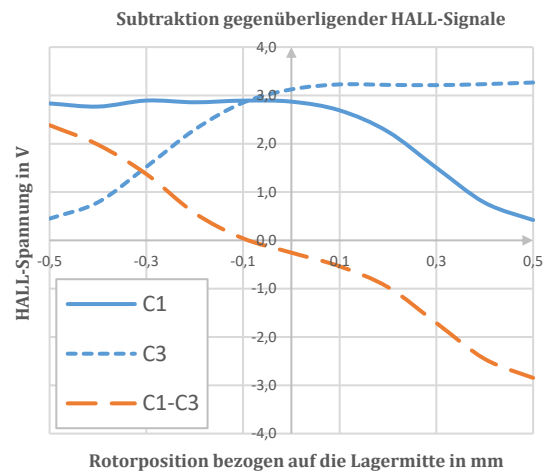


Abbildung 2 Erste Linearisierung des Zusammenhangs zwischen Luftspaltlänge und Streufluss durch Subtraktion der Messsignale gegenüberliegend angeordneter HALL-Sensoren.

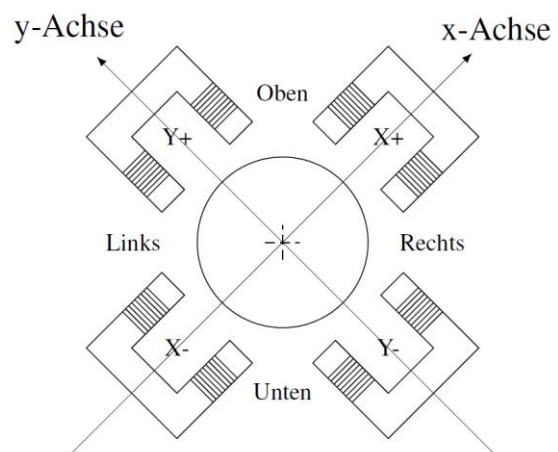


Abbildung 3 Schematische Darstellung der Lagerachsen und der Achsen des streuflussbasierten Messsystems am Beispiel eines Heteropolarlagers..

interpolaren Streuflüsse an der Position OBEN und UNTEN zwischen den Lagerachsen befinden (siehe Abbildung 3). Nach Bildung der Differenz beider Kennlinien erhält man die in Abbildung 2 rot dargestellte Kennlinie. In erster Näherung kann diese im Bereich der Lagermitte als linear betrachtet werden. Zur Linearisierung der Kennlinie über den gesamten Bereich möglicher Positionen dient im nächsten Schritt der Signalbearbeitung eine LookUp-Tabelle. Diese bietet gleichzeitig die Möglichkeit, den Einfluss der Steuerströme zu berücksichtigen. Zur Ermittlung des in der LookUp-Tabelle hinterlegten Kennfeldes wurde der Rotor entlang der beiden Messsystemachsen an unterschiedlichen Positionen mechanisch fixiert. An jedem

Punkt wurden die Steuerströme innerhalb der Aussteuerungsgrenzen variiert und die zugehörige Differenz der HALL-Spannungen gegenüberliegender Sensoren gemessen. Eine Änderung der Steuerströme entspricht dabei einer Verschiebung und Verformung der entsprechenden Kennlinie, wie in Abbildung 4 dargestellt. Aufgrund der Lage der HALL-Sensoren zwischen den Spulen der beiden Lagerachsen haben jeweils immer beide Steuerströme eine Auswirkung auf die Kennlinie. Sind die Steuerströme in x- und y-Achse so gerichtet, dass sich das Streufeld verstärkt, ist entsprechend auch die Verschiebung größer. Bei entgegengesetzten Stromrichtungen fällt die Beeinflussung der Kennlinie durch die Steuerströme geringer aus. Sind entgegengesetzte Ströme gleich groß, wird deren Einfluss vollständig kompensiert [6]. Abbildung 5 zeigt das Kennfeld einer Messsystemachse. Die abgeplatteten Bereiche stellen den Kontakt des Rotors mit dem Fanglager dar. Da eine Positionsänderung über diesen Punkt hinaus mechanisch nicht möglich ist, darf auch das streuflussbasierte Messsystem keine größeren Werte annehmen. Eine Extrapolation über diesen Bereich hinaus würde Werte erzeugen, die in der Praxis nicht auftreten können. Zur Verfeinerung des Kennfeldes wurde eine lineare Interpolation durchgeführt.

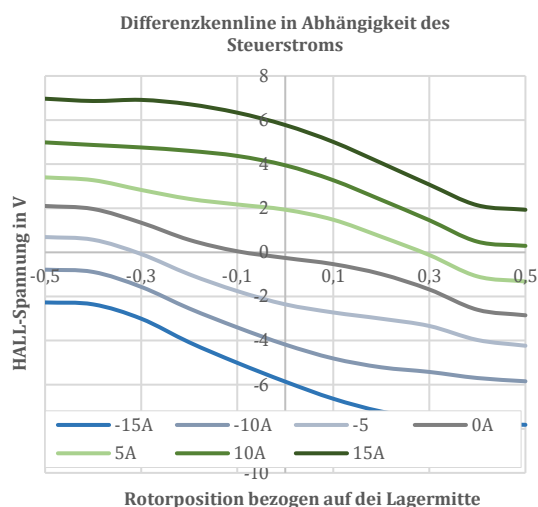


Abbildung 4 Verschiebung der Differenzkennlinie gegenüberliegender HALL-Sensoren bei Änderung des Steuerstroms von -15 A bis 15 A.

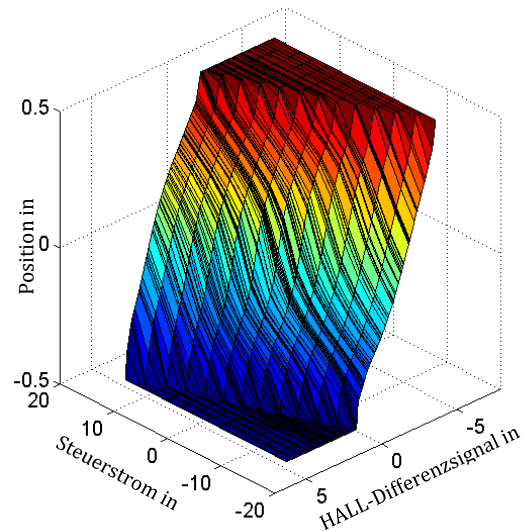


Abbildung 5 In LookUpTabelle hinterlegtes Kennfeld. Die abgeplatteten Bereiche am oberen und unteren Ende repräsentieren die mechanische Grenze der Bewegungsfreiheit des Rotors im Magnetlagerstator.

3. Einfluss dynamischer Änderungen des Steuerstroms

Im Gegensatz zu langsamen Stromänderungen lassen sich die Auswirkungen schnell ansteigender Steuerströme nicht mit statischen Kennfeldern kompensieren. Wie in [7] beschrieben, kommt es in Abhängigkeit der Induktivität der Spulen zu einem, gegenüber dem Stromanstieg, verzögerten Aufbau des Magnetflusses. Dies führt in Abhängigkeit der Steilheit des Stromanstiegs zu einer Überkompensation des Einflusses der Steuerströme. In [7] wurden dazu Untersuchungen durchgeführt und ein Verfahren beschrieben, mit dem die Auswirkungen der Feldverzögerung auf die Qualität des streuflussbasierten Messsystems reduziert werden können. Bei dieser Methode führt die diskrete Differentiation der gemessenen Steuerströme zu einer extremen Verstärkung des Signalrauschens, was eine nachträgliche Filterung notwendig macht. Dies führt allerdings dazu, dass die Kompensation der Feldverzögerung gerade dann weniger effektiv funktioniert, wenn der Stromanstieg am größten ist und damit auch das Positionssignal am meisten beeinflusst wird. Durch die Einführung eines vom Stromanstieg abhängigen Skalierungs-

faktors c der durch Gleichung 1 gegeben ist, lässt sich dieser Effekt reduzieren.

$$c = \frac{c_{\text{konstant}}}{\frac{dI}{dt} \cdot c_1 + 1} \quad (1)$$

3.1. Ermittlung der Stromanstiege durch Faltung des Eingangssignals mit einer Modulationsfunktion

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, ist die zeitliche Ableitung von gemessenen Größen aufwendig. Vor allem dann, wenn es sich um stark verrauschte Signale handelt. Mit der Faltung des gemessenen Signals mit einer Modulationsfunktion, steht ein weiteres Verfahren zur Bestimmung des Anstiegs der Steuerströme zur Verfügung. Dabei handelt es sich um die Verknüpfung zweier Funktionen $f(t)$ und $g(t)$ zu einer Ausgangsfunktion $h(t)$ wie folgt:

$$h(t) = f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

Die Funktion $f(t)$ stellt das Messsignal dar, welches mit der Modulationsfunktion $g(t)$ mittels Faltungsprodukt verknüpft wird [8]. Die modulierende Funktion ist durch sogenannte Fensterfunktionen definiert. Für die vorliegende Anwendung werden typischerweise Hann-, Hamming- oder Blackman-Fenster gewählt. Hierbei handelt es sich um Funktionen, die analytisch differenziert werden können. Führt man die Faltung mit der Ableitung einer solchen Funktion durch, stellt die Ausgangsfunktion $h(t)$ die Ableitung des Messsignals dar. Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Probleme mit Signalen, die einen geringen Rauschabstand aufweisen, treten hierbei nur in einem sehr geringen Umfang auf. Durch die Wahl der Abtastpunkte lässt sich die Qualität der Ausgangsfunktion beeinflussen. In der vorliegenden Arbeit wurde das Blackmann-Fenster implementiert. Die Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen je ein Beispiel mit 16 und 128 Abtastpunkten. Je höher die Anzahl der Abtastpunkte gewählt wird, desto weniger verzerrt ist das Ausgangssignal, weist aber

eine größere Verzögerung auf, wie in Abbildung 8 verdeutlicht wird.

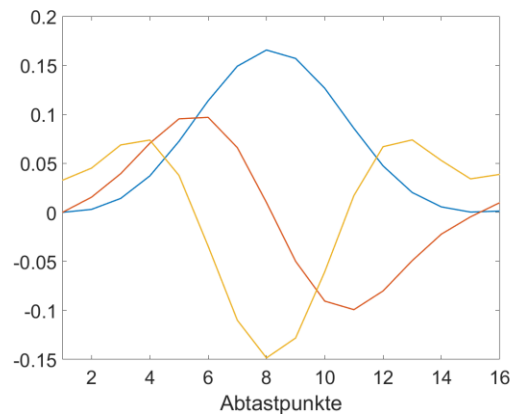


Abbildung 6 Blackman-Fensterfunktion (blau) mit 1. (rot) und 2. Ableitung (gelb). Die Anzahl der Abtastpunkte beträgt 16.

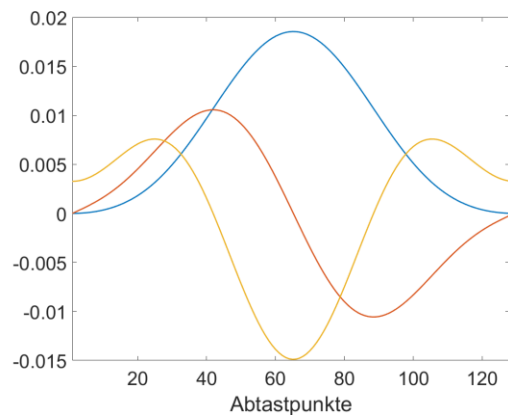


Abbildung 7 Blackman-Fensterfunktion (blau) mit 1. (rot) und 2. Ableitung (gelb). Die Anzahl der Abtastpunkte beträgt 128.

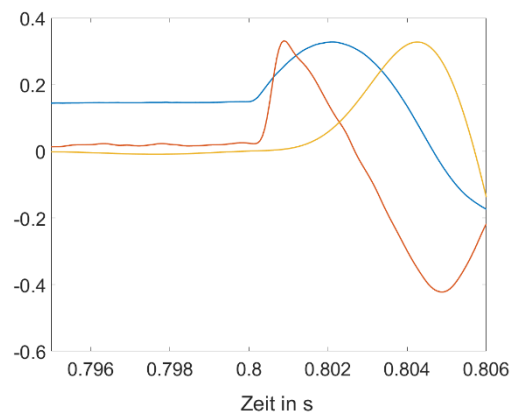


Abbildung 8 Delay des Ausgangssignals in Abhängigkeit der Anzahl der Abtastpunkte. Stromverlauf (blau) und Abgeleitete Funktion mit 16 (rot) und 128 (gelb) Abtastpunkten.

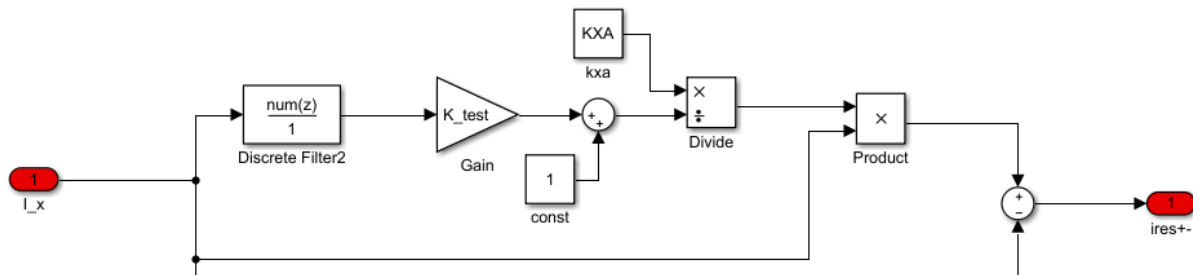


Abbildung 9 MATLAB-Simulink-Modell der Faltung des Steuerstroms der x-Achse.

$$i_{res,a} = i_{res,x} - i_{res,y} \quad (4)$$

Da sich zu große Verzögerungen und zu stark verzerrte Ausgangssignale negativ auf die Kompensation der Feldverzögerung auswirken, muss hier ein günstiger Kompromiss gefunden werden.

4. Implementierung auf einem Echtzeitsystem

Die Verarbeitung der gemessenen HALL-Signale und der Steuerströme wurde auf einem echtzeitfähigen DSpace-System mit einer Programmierschnittstelle zu MATLAB-Simulink umgesetzt. Die Faltung der Steuerströme wurde mit Hilfe des Funktionsblocks DISCRETE FILTER, durch Eintragen der ersten Ableitung der Blackman-Funktion in den Zähler realisiert. Diese wird vorab berechnet und im Speicher hinterlegt. Abbildung 9 zeigt das Simulink-Modell zur Signalverarbeitung des Steuerstroms der x-Achse. Zunächst wird die Ableitung des Stroms gebildet. Im Anschluss wird ein resultierender Strom $i_{res,x}$ gegeben durch

$$i_{res,x} = \frac{k_{xa}}{\frac{di_x}{dt} + 1} \cdot i_x \quad (3)$$

berechnet. Bei einem konstanten Strom wird der Nenner Eins und der Steuerstrom unverändert zur Linearisierung des Messsignals genutzt. Kommt es durch Störeinflüsse oder sprungartige Sollwertänderungen der Rotorlage zu einem steilen Ansteigen des Stroms, wird der Nenner größer als Eins, wodurch der resultierende Strom kleiner als der gemessene Steuerstrom wird. Danach schließt sich eine Subtraktion mit dem resultierenden Strom der y-Achse $i_{res,y}$ an.

Dieser ist in der Abbildung 9 mit i_{res+-} bezeichnet und dient neben dem Differenzsignal der beiden HALL-Sensoren an den Positionen OBEN (C1) und UNTEN (C3) als Eingangssignal für eine LookUp-Tabelle. Für die zweite Messsystemachse, die durch das Differenzsignal der Sensoren LINKS (C2) und RECHTS (C4) gegeben ist, wird in gleicher Weise verfahren. Man erhält so die linearisierten Messsystemachsen a (C1-C3) und b (C2-C4). Diese sind bezogen auf die Lagerachsen x und y um 45° verdreht. Um das streuflussbasierte Messsystem für die Regelung der Rotorposition nutzen zu können, ist demnach eine Rotation der a- und b-Achse notwendig. Dies wird durch eine Multiplikation mit einer Drehmatrix D_{rot} gegeben durch

$$D_{rot} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{-\pi}{4}\right) & \sin\left(\frac{-\pi}{4}\right) \\ -\sin\left(\frac{-\pi}{4}\right) & \cos\left(\frac{-\pi}{4}\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

erreicht. Nach der Rotation stehen Positionssignale in den Lagerachsen x und y zur Verfügung. Abbildung 10 zeigt die Linearisierung und Rotation beider Messsystemachsen in MATLAB-Simulink.

5. Ergebnisse

Das in Abbildung 11 dargestellte Versuchslager ist zusätzlich mit einem kapazitiven Messsystem ausgestattet, das als Referenzsystem dient. Um das streuflussbasierte Messsystem bewerten zu können, wurde eine Sprungantwort der Rotorposition in der x-Achse aufgenommen. Es zeigt sich, wie in Abbildung 12 zu sehen, dass das streuflussbasierte Messsystem die tatsächliche Rotorposition, die durch das Referenzmesssystem repräsentiert wird, gut

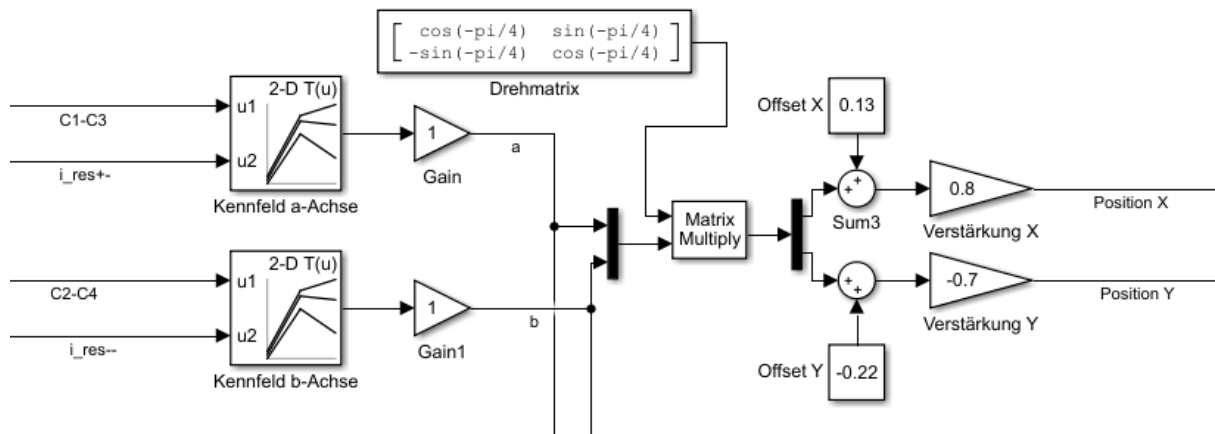


Abbildung 10 MATLAB-Simulink-Modell der Linearisierung durch LookUp-Tabellen mit hinterlegten Kennfeldern für die beiden Messsystemachsen a und b mit anschließender Rotation in die Lagerachsen x und y durch Multiplikation mit einer Drehmatrix.

abbildet. Es treten keine Abweichungen auf, die durch die Effekte der Feldverzögerung hervorgerufen werden. Da bei einem Positionssprung des Rotors mit sehr großen Stromanstiegen zu rechnen ist, muss davon ausgegangen werden, dass die genannten Effekte in solch einem Fall verstärkt zu beobachten sind.

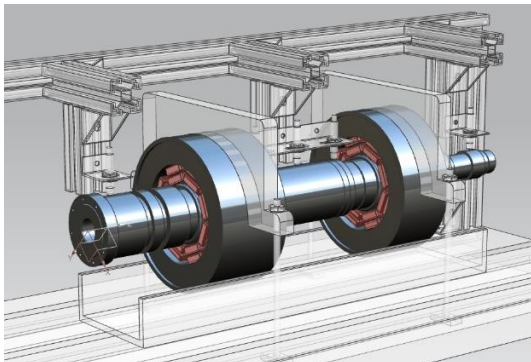


Abbildung 11 CAD-Modell des Versuchslagers.

Verglichen mit dem Signal des kapazitiven Referenzmesssystem, weist das streuflussbasierte Messsystem jedoch einen deutlich kleineren Rauschabstand auf. Die Ursachen hierfür sind zum einen in der Positionierung der HALL-Sensoren zu suchen. Diese befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den Lagerspulen. Ein weiterer Aspekt der sich ungünstig auf die Signalqualität auswirkt sind die geringen Flussdichten der Streuflüsse und die sehr kleine Änderung dieser bei Variation der Rotorposition. Unter diesen Voraussetzungen konnte ein Schweben des Rotors erreicht werden. Die Robustheit gegen Störungen war jedoch gering.

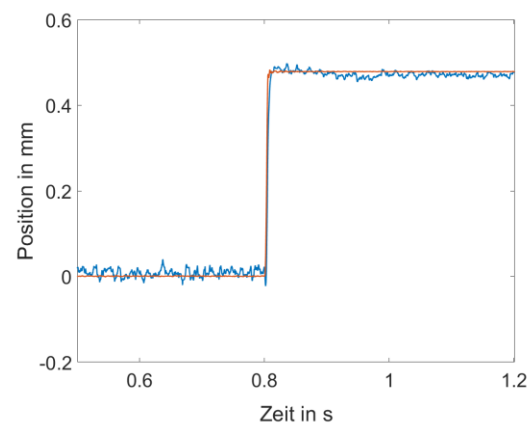


Abbildung 12 Sprungantwort der Position in der x-Achse. Das Referenzmesssystem ist rot und das streuflussbasierte Messsystem blau dargestellt.

6. Ausblick und Zusammenfassung

Mit den beschriebenen Maßnahmen konnte die Qualität des streuflussbasierten Messsystems deutlich verbessert werden. Hinsichtlich der Linearität des Messverfahrens konnte durch die Implementierung von Kennfeldern mittels LookUp-Tabellen eine gute Abbildung der Rotorposition erreicht werden. Die negativen Auswirkungen einer, durch Feldverzögerungseffekte verursachten Überkompensation der Stromeinflüsse, wurde auf ein Minimum reduziert. Die Verbesserung der Signalqualität der gemessenen Steuerströme und HALL-Spannungen steht bisher noch. In weiterführenden Untersuchungen ist zu klären, wie der Signalausgang verbessert werden kann. Mögliche Optionen hierfür sind, verbesserte Filteralgorithmen oder

Schätzverfahren, bei denen ein Modell des Lagers zum Einsatz kommt. Gelingt es die Signalqualität zu verbessern, stellt das streuflussbasierte Messsystem eine kostengünstige Alternative zu konventionellen Messverfahren dar. Besonders die Kollokation von Mess- und Lagerebene zeichnet dieses Verfahren gegenüber typischerweise eingesetzten Systemen aus, bei denen die Abstandssensoren meist nicht in der gleichen Ebene angeordnet sind, in der auch die Kraftwirkung auf den Rotor zu finden ist. Dies kann bei ungünstigen Rotorformen, wie z.B. verhältnismäßig langen Rotoren, zu unerwünschten Dislokationseffekten führen.

Literatur

- [1] Skricka.N, "Entwicklung eines sensorlosen aktiven Magnetlagers",VDI, 2004
- [2] Herzog. R et al."SELF-SENSING OF NON-LAMINATED AXIAL MAGNETIC BEARINGS: MODELLING AND VALIDATION", 11th International Symposium on Magnetic Bearings, August 26-29, Nara, Japan, 2008
- [3] Gruber W., Stöckler M. "On the self-sensing technique based on the interlink voltage of two serially connected phase coils", 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, p. 645-651, ISSN: 2164-5256, Sydney, June 2015
- [4] Bahr F. et al. "Flux Based Control and Monitoring of Active Magnetic Bearings Using Ultra-Thin and Flexible Bismuth Hall Sensors", 9. Workshop Magnetlagertechnik Zittau/Chemnitz, p. 96, Oct. 2013.(in German)
- [5] Rudolph J. et al. "Measurement of the rotor position of an active magnetic bearing using interpolar stray flux", 1st Brazilian Workshop on Magnetic Bearings, 2013, Rio de Janeiro
- [6] Maximov I. "Bestimmung der Wellenposition in einem aktiven magnetischen Lager in Abhängigkeit auftretender Streuflüsse", Diplomarbeit, Technische Universität Chemnitz, 2013
- [7] Rudolph J. et al. „Effect of Eddy Currents on the Stray Flux Based Measurement System for Magnetic Bearing“, 14th International Symposium on Magnetic Bearings, August 11-14, Linz, Austria, 2014
- [8] Vogt M. "Weiterentwicklung von Verfahren zur online-Parameterschätzung und Untersuchung von Methoden zur Erzeugung zeitlicher Ableitungen",Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, 1998