

Messung magnetischer Streuflüsse zur Bestimmung der Wellenposition im Magnetlager

Johannes Rudolph, Ralf Werner, Ivo Maximow
Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe
Technische Universität Chemnitz
Chemnitz, Deutschland 09107
Email: johannes.rudolph@etit.tu-chemnitz.de
Email: ralf.werner@hrz.tu-chemnitz.de
Email: ivo.maximow@s2006.tu-chemnitz.de

Zusammenfassung—Magnetlager stellen hoch komplexe mechatronische Systeme dar. Sie eignen sich besonders für Spezialanwendungen, wie Neutronenstrahlchopper und Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsmaschinen. Die Genauigkeit, mit der die Welle im Magnetlager positioniert werden kann, hängt maßgeblich von der Qualität der eingesetzten Messsysteme ab. Dabei stehen Eigenschaften wie Auflösungsvermögen, Genauigkeit und Dynamik in einem direkten Zusammenhang zu den Kosten, die für das Messsystem anfallen. Um den finanziellen Aufwand für die Fertigung von Magnetlagern inklusive notwendiger Sensorik zu reduzieren, wird ein Messsystem vorgeschlagen, das auf der Auswertung der magnetischen Streuflüsse außerhalb des Arbeitsluftspaltes basiert. Dazu werden zunächst theoretische Überlegungen angestellt und numerische Berechnungen durchgeführt. Die daraus abgeleiteten Aussagen werden im Anschluss durch praktische Messungen verifiziert. Im Ergebnis liegt ein Messsystem vor, auf dessen Grundlage eine stabile magnetische Lagerung ermöglicht wird.

I. EINFÜHRUNG

Magnetische Lager finden immer häufiger Anwendung in Industrie und Forschung. So werden sie zur Lagerung von Rotoren in Neutronenstrahlchopperrn, Gasultrazentrifugen, Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsmaschinen, Verdichtern und Pumpen eingesetzt [4]. Auch in der Medizintechnik haben magnetische Lager in Form von Blutpumpen [1] Einzug gehalten. Bisher werden die Vorteile der berührungslosen und verschleißfreien Lagerung meist nur für spezielle Anwendungen ausgenutzt. Neben der fehlenden Akzeptanz können auch die verhältnismäßig hohen Kosten für die benötigten Messsysteme dafür verantwortlich gemacht werden, dass der Einsatzbereich von Magnetlagern bis heute auf Spezialanwendungen beschränkt ist. So belaufen sich die Kosten für die Messsysteme einer vollständig gelagerten

Welle auf ca. ein Drittel der Gesamtkosten [3]. Um die Einsatzgebiete magnetisch gelagerter Wellen weiter auszubauen, ist es notwendig, die Kosten für Messsysteme weiter zu minimieren. Aus diesem Grund werden in der Fachwelt seit längerem verschiedene Ansätze diskutiert. Weit verbreitet sind Überlegungen und Forschungsarbeiten zu Magnetlagersystemen, bei denen vollständig auf Abstandssensoren verzichtet wird. Sogenannte sensorlose Lager bestimmen die Rotorposition aus systeminhärenten Größen, wie den Spulenströmen oder den Spannungen in den Lagerspulen [2], [6], [5]. Eine weitere Möglichkeit die Wellenposition zu bestimmen nutzt die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte im Luftspalt von der Luftspaltlänge. Ausgehend von:

$$B_L = H \cdot \mu_0 \quad (1)$$

ist die magnetische Feldstärke im Luftspalt nur von der magnetischen Flussdichte und der Vakuumpermeabilität abhängig. Unter der Voraussetzung, dass der magnetische Fluss homogen verläuft und Streuflüsse vernachlässigt werden, stellt sich die Flussdichte wie folgt dar.

$$B_L = \frac{I \cdot N}{\left(\frac{s_L}{\mu_0 \cdot A} + \frac{s_{Fe}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \right) \cdot A} \quad (2)$$

Geht man weiterhin davon aus, dass der Querschnitt des magnetischen Kreises konstant ist, gilt für die Flussdichte im Luftspalt unter Beachtung von (1) folgendes.

$$B_L = \frac{I \cdot N \cdot \mu_r \cdot \mu_0}{s_{Fe} + s_L \cdot \mu_r} \quad (3)$$

Unter der Annahme einer konstanten relativen Permeabilität μ_r gleichbleibender Eisenlänge s_{Fe} und dem damit verbundenen unveränderlichen magnetischen Widerstand R_{mFe} , sowie einer festen Windungszahl N , wird die Abhängigkeit der Flussdichte im Luftspalt von

der Luftspaltlänge s_L deutlich. Zur Messung dieser magnetische Größe eignen sich besonders magnetoresistive Sensoren und Hall-Elemente. Aufgrund ihres Funktionsprinzips, bei dem die aktive Sensorfläche kollinear zu dem magnetischen Feld, dessen Flussdichte bestimmt werden soll, positioniert werden muss, ist die Eignung magnetoresistiver Sensoren wie GMR- (Giant Magneto Resistive) oder AMR- (Anisotrope Magneto Resistive) Sensoren, bei herkömmlichen Polformen eingeschränkt. Deutlich besser eignen sich Hall-Sensoren für die Integration im Luftspalt, deren aktive Sensorfläche orthogonal zu dem zu messenden Magnetfeld ausgerichtet wird. Da ein Hauptziel die Reduzierung der Kosten für die benötigten Messsysteme ist, sollen vorzugsweise handelsübliche Standardsensoren zum Einsatz kommen. Bei Nennluftspaltlängen, die typischerweise weniger als einen Millimeter betragen, gestaltet sich die Integration in den Luftspalt selbst bei kleinsten Bauformen als schwierig bis unmöglich. Um trotzdem auf kostengünstige handelsübliche Hall-Elemente zurückgreifen zu können, wird ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem die Messung der magnetischen Streuflüsse außerhalb des Luftspalts die Grundlage für die Bestimmung der Wellenposition im Magnetlager darstellt. Da es, abgesehen von Supraleitern, keine magnetischen Isolatoren gibt, treten in magnetischen Kreisen immer Streuflüsse auf. Diese verlaufen, wie in Abbildung 1 dargestellt, parallel zu dem Hauptfluss, der sich in den ferromagnetischen Anteilen des Kreises ausbildet.

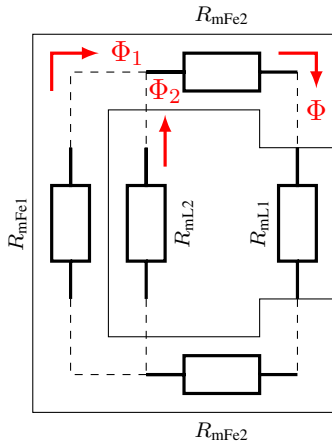


Abbildung 1. Vereinfachter Magnetkreis mit einem Streuflusspfad

Zunächst soll für die ferromagnetischen Anteile ein linearer Verlauf der Flussdichte in Abhängigkeit der Feldstärke angenommen werden. Ausgehend davon setzt sich der magnetische Gesamtwiderstand aus einem unveränderlichen Teil R_{mS} zusammen, zu dem alle magne-

tischen Widerstände im Eisen und der Widerstand des Streupfades gehören und dem Widerstand R_{mL1} , der sich in Abhängigkeit der Luftspaltlänge ändert.

$$R_{mL1} = \frac{l_{L1}}{\mu_0 \cdot A} \quad (4)$$

$$R_{mS} = \frac{R_{mFe1} \cdot R_{mL2}}{R_{mFe1} + R_{mL2}} + 2 \cdot R_{mFe2} \quad (5)$$

Daraus ergibt sich der Gesamtfluss mit:

$$\Phi = \frac{I \cdot N}{R_{mS} + R_{mL1}} \quad (6)$$

wobei der Spulenstrom I und die Windungszahl N als konstant angenommen werden. Der magnetische Streufluss stellt sich wie folgt dar:

$$\Phi_2 = r \cdot \Phi \quad \text{mit} \quad r = \frac{R_{mFe1} \cdot R_{mL2}}{R_{mFe1} + R_{mL2} + R_{mL1}} \quad (7)$$

Unter der Annahme eines für alle Bereiche des Kreises konstanten Querschnitts A kann die magnetische Streuflussdichte unter Beachtung der vorangestellten Zusammenhänge wie folgt angegeben werden.

$$B_{L2} = \frac{r \cdot \frac{I \cdot N}{R_{mS} + R_{mL1}}}{A} \quad (8)$$

Es wird deutlich, dass die magnetische Streuflussdichte bei konstantem Strom nur vom magnetischen Widerstand R_{mL1} und damit von der Länge des Luftspalts abhängt.

II. INTEGRATION DER HALL-ELEMENTE IM MAGNETLAGER

Im Gegensatz zur Positionierung der Hall-Elemente im Luftspalt, bietet die Integration der Sensoren im Bereich zwischen den Polen, aufgrund der günstigeren Platzverhältnisse, bessere Möglichkeiten. Am Beispiel eines achtpoligen Heteropolarlagers sollen zwei verschiedene Möglichkeiten der Positionierung untersucht und nach ihrer Anwendbarkeit beurteilt werden. Prinzipiell ist eine Positionierung zwischen den Polschuhen einer Lagerachse (X+, X-, Y+ und Y-) oder eine Integration zwischen den Lagermagneten (Oben, Unten, Rechts und Links), wie in Abbildung 2 dargestellt, denkbar.

Mit Hilfe numerischer FEM-Berechnungen wurde zunächst überprüft, welche Positionen besser für die Bestimmung der Rotorlage geeignet sind. Dabei stellte sich heraus, dass die Abhängigkeit des Streuflusses im Bereich zwischen benachbarten Lagerachsen von der

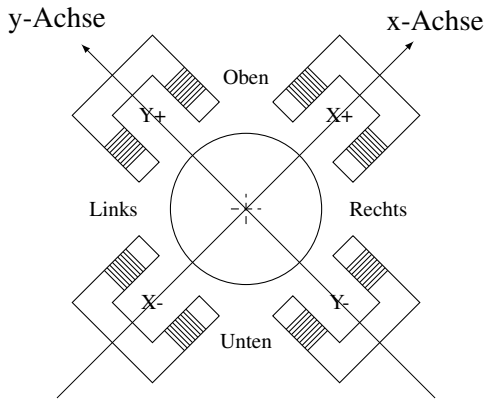


Abbildung 2. Mögliche Positionen für die Hall-Elemente im Magnetlager.

Wellenpositon deutlich stärker ausgeprägt ist (Abbildung 3). Anhand von Messungen konnten die Vorhersagen bestätigt werden.

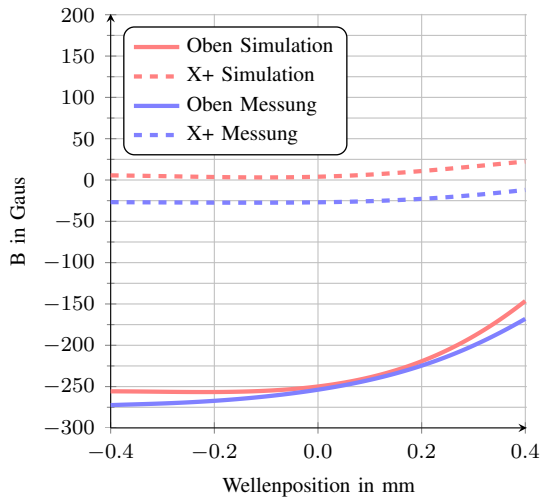


Abbildung 3. Änderung der Streuflussdichte in Abhängigkeit der Rotorverschiebung entlang der x-Achse

Die Ursache hierfür ist in der unterschiedlichen Ausrichtung der Streufelder zu suchen. Im Bereich zwischen zwei entgegengesetzt ausgerichteten Polen einer Achse besitzt der Streufluss, im Bezug zur Rotoroberfläche, hauptsächlich tangentielle Feldanteile, während sich der Streufluss im Bereich zwischen den Lagerachsen zum größten Teil aus normalen Feldanteilen zusammensetzt (siehe Abbildung 4). Aufgrund der Eigenschaft von Hall-Elementen sensibel für den senkrecht durch die Sensorfläche tretenden magnetischen Fluss zu sein, sowie der Tatsache, dass kostengünstige industriell verfügbare Hall-Sensoren meist nur über eine Sensorfläche verfügen die zur Messung tangentialer Feldanteile ungeeignet ist,

wurde nur die Streuflussmessung im Bereich zwischen den Lagerachsen des Magnetlagers verfolgt.

Um die Hall-Sensoren an definierten Positionen im Lager zu fixieren wurden Kunststoffblättchen, die ursprünglich dazu dienten die Wicklungen der Grund- und Steuerspulen vor dem Verrutschen zu schützen, durch Leiterplatten ersetzt. Auf diesen sind die Hall-Sensoren befestigt. Zusätzlich verfügen sie über eine Spannungsstabilisierung und einen Temperatursensor zur Temperaturkompensation. Alle Sensoren wiesen einen akzeptablen Temperaturdrift auf (Abbildung 5). Lediglich der Sensor an der Position Y- fiel durch ein ausgeprägteres Temperaturverhalten auf, dass jedoch durch hinterlegen der aufgenommenen Kennlinie ausgeglichen werden kann. Alle Kennlinien wurden in Rotormittenlage im stromlosen Zustand aufgenommen und stellen eine entsprechende Verschiebung der Flussdichten-Spannungs-Kennlinie dar.

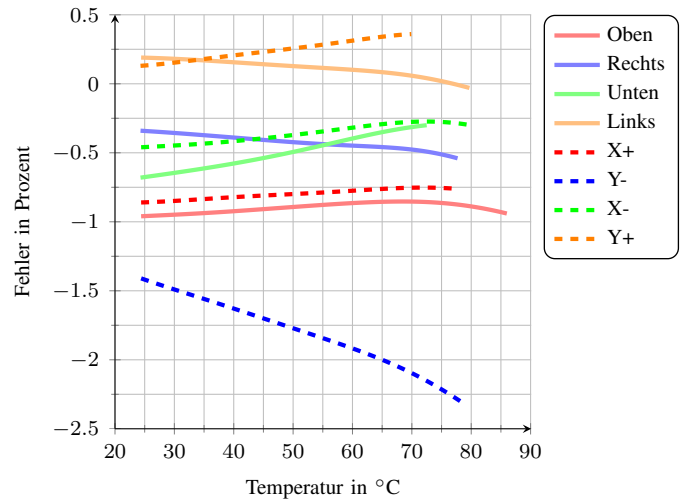


Abbildung 5. Temperaturdrift der Hall-Sensoren

III. LINEARISIERUNG UND KOORDINATENTRANSFORMATION

Wie aus Abbildung 3 hervorgeht, ist der Zusammenhang zwischen Luftspaltlänge und dementsprechend der Rotorposition sowie der Intensität des Streufeldes nicht linear und weist entsprechend der Gleichung (8) ein gebrochen-rationales Verhalten auf. Mit zunehmend kleiner werdendem Luftspalt (positive Wellenposition) fällt der Wert für die Streuflussdichte immer stärker ab. Betrachtet man zwei sich auf einer Achse gegenüberliegende Sensoren, fällt die Symmetrie der Kennlinien auf,

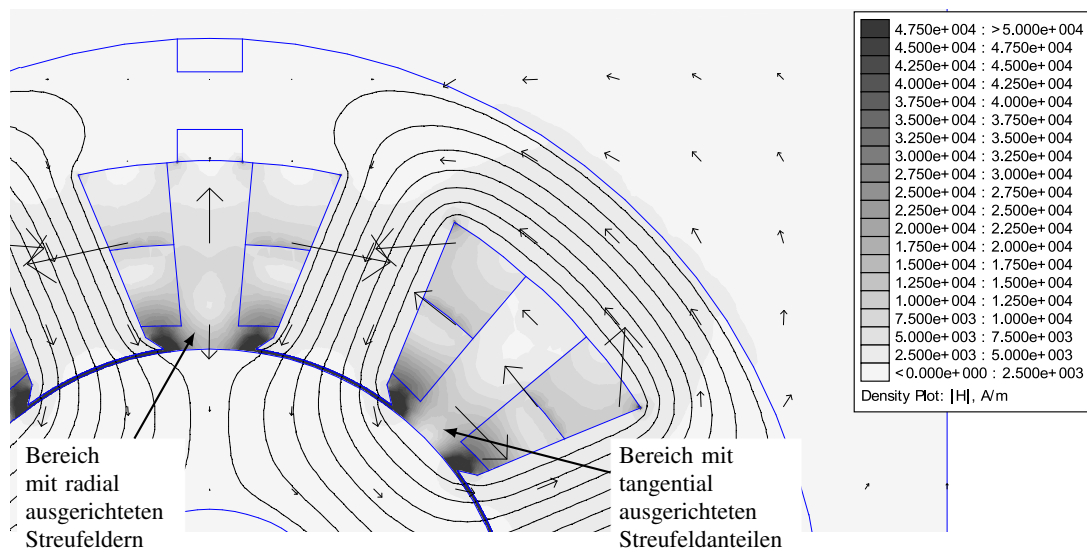


Abbildung 4. Detailansicht der mit Hilfe einer FEM-Software errechneten Feldverteilung. Bereiche mit einer hohen magnetischen Feldstärke sind dunkel gefärbt. Die Ausrichtung des Magnetfelds wird durch Pfeile dargestellt.

deren Schnittpunkt mit der Mittenlage des Rotors zusammenfällt. Demzufolge bietet sich das Differenzprinzip als Linearisierungsmaßnahme an.

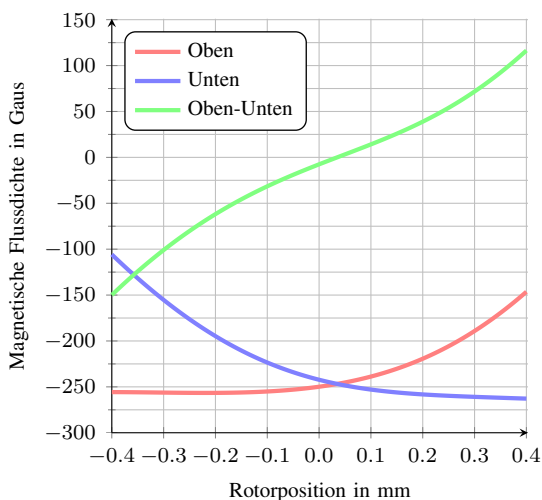


Abbildung 6. Kennlinien der gegenüberliegenden Sensoren und der Differenz beider Signale

Die leichten Abweichungen der in Abbildung 6 dargestellten Differenzkennlinie von einem linearen Verlauf im unteren und oberen Bereich, lassen sich durch eine Abweichung der, für die Messung angenommenen, Mittenlage des Rotors von der tatsächlichen Lagermitte erklären. Ein Indiz dafür ist zudem der im Diagramm vom Nullpunkt nach rechts verschobene Schnittpunkt beider Funktionen. Neben der Abhängigkeit vom Luft-

spalt ist das magnetische Streufeld, wie aus Gleichung (8) hervorgeht, auch vom Spulenstrom abhängig. Dies bedeutet, dass bei unbestromten Lagerspulen, kein Lagesignal generiert werden kann. Gleichzeitig hat eine Variation des Stroms auch immer eine Änderung des Positionssignals zur Folge, obwohl sich die Lage des Rotors im Magnetlager nicht verändert hat. Bei den weit verbreiteten Heteropolarlagern wird das Kraft-Strom-Verhalten des Magnetlagers häufig durch zusätzliche Grunderregerwicklungen linearisiert, so dass ein stromloser Zustand während des regulären Betriebs des Magnetlagers ausgeschlossen werden kann. Die negativen Auswirkungen aber, die eine direkte Abhängigkeit des Istwerts vom Reglerausgangssignal auf ein stabiles Schweben hat, sind offensichtlich und müssen nicht weiter diskutiert werden. Im untersuchten achtpoligen Heteropolarlager stellte sich die Abhängigkeit des Positionssignals vom Steuerstrom wie in Abbildung 7 verdeutlicht dar. Die Messung der Positionssignale an definierten Positionen entlang der Achse von Unten Links nach oben Rechts bei schrittweiser Veränderung des Steuerstroms von $-15A$ bis $+15A$ und einem Grunderregerstrom von $6A$ führt zu einer entsprechenden Kennlinienschar. Dabei verschieben sich die Kennlinien mit zunehmendem negativem Strom in einen positiven Bereich zunehmender Streuflussdichte, während eine Erhöhung des Stroms bis auf $+15A$ zu einer Verschiebung in entgegengesetzter Richtung führt.

Prinzipiell kann der Einfluss des Steuerstroms in erster Näherung als Verschiebung des eigentlichen Positionssignals gewertet werden. Geht man zunächst von

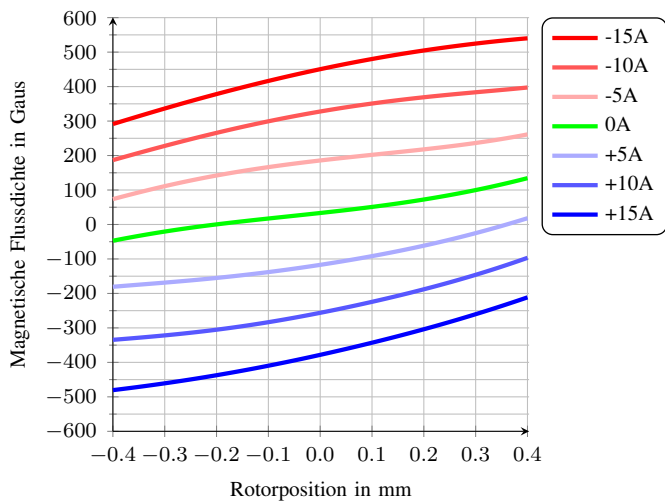


Abbildung 7. Einfluss des Steuerstroms auf das Messsystemverhalten in der Oben-Unten-Achse

einem linearen Zusammenhang aus, lässt sich der Stromeinfluss auf das Messsignal mit Hilfe einer Addition von Stromwert und Lagewert kompensieren. Dies erfolgt durch einen echtzeitfähigen Mikrorechner, auf dem die entsprechenden Algorithmen und Kennlinienfelder hinterlegt werden können. Um das Lagesignal möglichst vollständig von den Einflüssen des Steuerstroms bereinigen zu können, ist eine genaue Kenntnis des momentan fließenden Steuerstroms notwendig. Da dieser jedoch prinzipbedingt durch die Funktionsweise der getakteten Stromrichter stark verrauscht ist, sind Maßnahmen zur Verbesserung der Signalgüte unerlässlich. Abbildung 8 zeigt das unbearbeitete Stromsignal ($100\text{mV} = 1\text{A}$) und das zur Digitalisierung aufbereitete gefilterte Signal. Mit Hilfe des gemessenen momentan fließenden Stroms, kompensiert eine auf dem Mikrorechner (*dSpace*-System) laufende Software das Positionssignal, basierend auf dem zuvor aufgenommenen Kennlinienfeld in Echtzeit. Das in Abbildung 9 dargestellte unkompenzierte Lagesignal weist aufgrund des sinusförmigen Steuerstroms ebenfalls eine Sinusform mit einer Frequenz von $f=1\text{kHz}$ auf. Das von der Software in Echtzeit korrigierte Positionssignal ist vom Stromeinfluss hingegen weitestgehend bereinigt. Der Rotor war während des Versuchs in der Lagermitte fixiert.

Da die Zykluszeit des Echtzeitrechners $17\mu\text{s}$ beträgt und der Stromrichter mit einer Frequenz $f_{\text{SR}}=50\text{kHz}$, was einer Periodendauer von $T_{\text{SR}}=20\mu\text{s}$ entspricht, arbeitet, ist eine Stromkompensation über den gesamten vom Stromrichter darstellbaren Frequenzbereich gewähr-

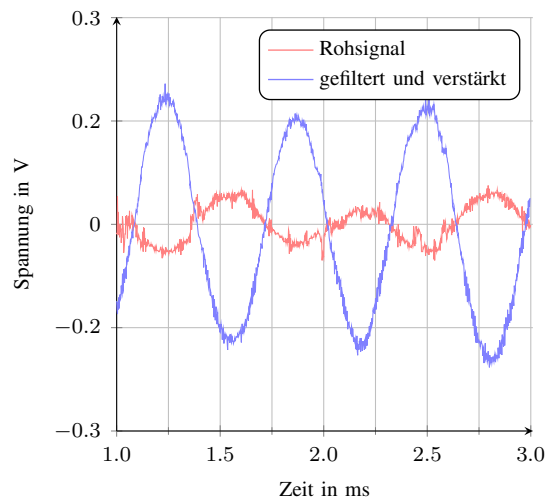


Abbildung 8. Rohsignal des Stromistwerts sowie gefiltertes und verstärktes Stromsignal (sinusförmige Sollwertvorgabe, $f=1\text{kHz}$)

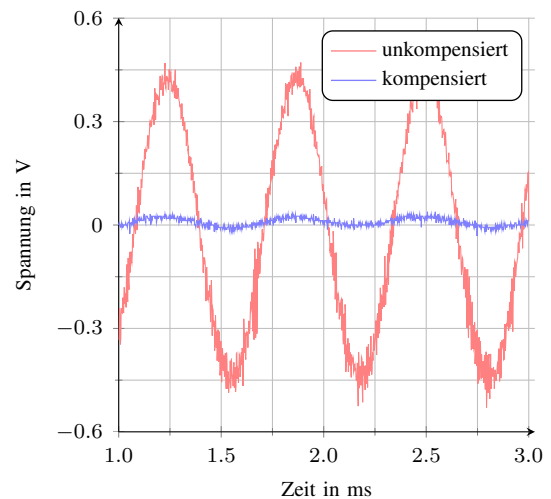


Abbildung 9. Stromkompensation des Lagesignals bei sinusförmiger Sollwertvorgabe des Stroms mit $f=1\text{kHz}$)

leistet. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 10 das unkompenzierte und das vom Stromeinfluss bereinigte Positionssignal bei einem sinusförmig vorgegebenen Steuerstrom von $f=30\text{kHz}$ dargestellt.

Da die Messung der Rotorposition ursprünglich in der X- bzw. Y-Achse durchgeführt wurde, in der auch die Lagerkräfte wirken, ist eine Transformation der Messwerte, die in der Oben-Unten- sowie Rechts-Links-Achse gewonnen werden notwendig. Aufgrund der Rotations-symmetrie des Lagerschnitts bietet sich eine Rotation um 45° an, die von einer auf einem Echtzeitrechner laufenden Software ausgeführt wird. Mit Hilfe der Drehmatrix R_α können die Positionssignale in die entsprechenden X- und Y- Werte überführt werden.

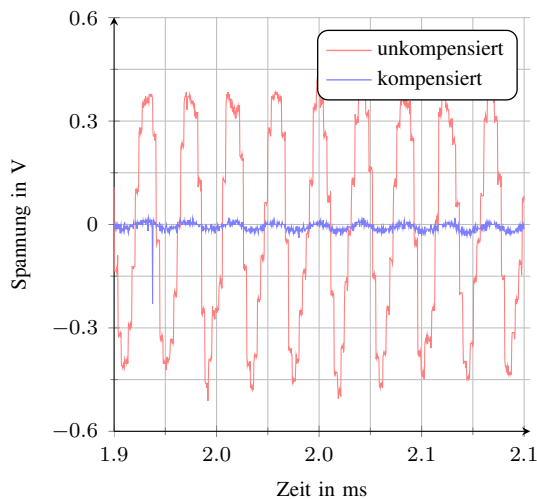


Abbildung 10. Stromkompensation des Lagesignals bei sinusförmiger Sollwertvorgabe des Stroms mit $f=30\text{kHz}$

$$\begin{bmatrix} \cos(-\frac{\pi}{4}) & -\sin(-\frac{\pi}{4}) \\ \sin(-\frac{\pi}{4}) & \cos(-\frac{\pi}{4}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (9)$$

Die Achse, die von den Hall-Sensoren an den Positionen Oben und Unten gebildet wird, entspricht der a-Achse. Analog dazu wird die b-Achse durch die Sensoren Links und Rechts gebildet. Da eine Rotation im Uhrzeigersinn durchgeführt werden soll, müssen in die Drehmatrix negative Winkel eingesetzt werden.

IV. EIGENSCHAFTEN DES AUF DER MESSUNG DER STREUFLÜSSE BASIERENDEN MESSSYSTEMS

Um die Eigenschaften des streuflussbasierten Messsystems beurteilen zu können, wurde das Magnetlager zunächst mit den standardmäßig integrierten kapazitiven Sensoren betrieben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist nur eines der beiden kapazitiven Messsignale dargestellt. Bei Verschiebung des Rotors in die a- bzw. b-Achse ergeben sich, aufgrund der Verdrehung der beiden Messsysteme zueinander um 45° , ohnehin identische kapazitive Signale. Parallel dazu wurden die magnetischen Streuflüsse ausgewertet. Anhand einer Sprungantwort (Abbildung 11) in der a-Achse sind Rückschlüsse auf die Qualität des Messsystems möglich. Trotz aktiver Stromkompensation ist das Signal des streuflussbasierten Messsystems im Vergleich mit dem des kapazitiven Messsystems stark verrauscht. Die Ursache liegt in der endlichen, nicht beliebig verkürzbaren Zykluszeit des Echtzeitrechners. Besonders höherfrequente Störungen tragen zu einer Verringerung der Signalgüte bei. Beim Betrieb des Lagers mit dem auf der Auswertung

der Streuflüsse beruhendem Messsystem, wurde ebenfalls eine Sprungantwort aufgenommen (siehe Abbildung 12). Anstelle des analogen Reglers wurde eine PID-Regelalgorithmus auf dem Echtzeitrechner implementiert. Aufgrund des verrauschten Signals konnte der Regler jedoch nur mit wesentlich geringerer Verstärkung und kleinerem D-Anteil betrieben werden. Da das Lager damit weniger robust gegenüber Störkräften ist, waren nur um den Faktor zwei kleine Sprünge des Lagesollwerts möglich.

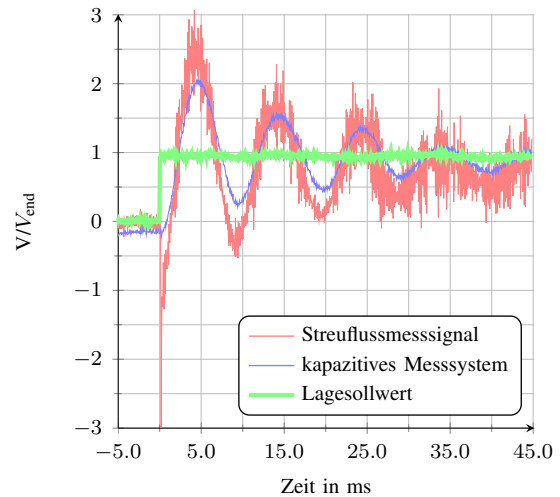


Abbildung 11. Sprungantwort des Lagers während des Betriebs mit kapazitiven Sensoren und analogem PID-Regler

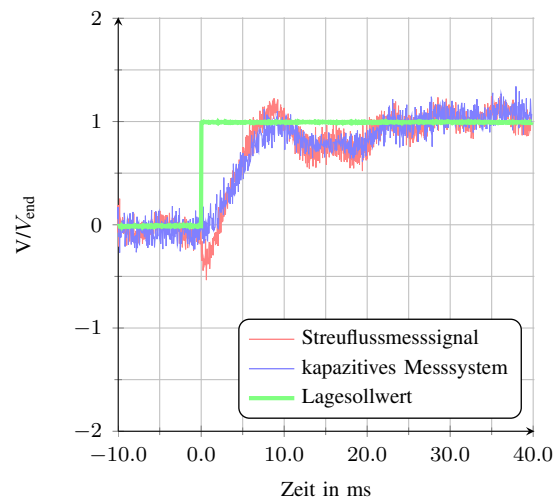


Abbildung 12. Sprungantwort des Lagers während des Betriebs mit Streuflussmesssystem und digitalem PID-Regler

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Überlegungen, den magnetischen Streufluss zur Generierung eines Positionssignals des Rotors in aktiven Magnetlagern zu nutzen, wurde zunächst durch numerische Simulationen der magnetischen Verhältnisse in einem radialen Magnetlager überprüft. Dabei wurden besonders günstige Positionen für den Einbau von Magnetfeldsensoren identifiziert und Untersuchungen zu den infrage kommenden Sensortypen angestellt. Durch praktische Versuche konnten die getroffenen Vorhersagen verifiziert werden. Basierend auf der Auswertung der magnetischen Streuflüsse in den Polzwischenräumen konnte ein Messsystem realisiert werden, mit dem ein stabiles Schweben des Rotors in einem radialen aktiven Magnetlager in allen Achsen möglich ist. Die starken Störungen, die durch die Stromrichter verursacht werden, beeinflussen die Signalqualität der eingesetzten Hall-Sensoren signifikant, so dass eine zunächst passive Filterung umgesetzt wurde. Der für die Stabilität der Regelung ungünstige Einfluss des Steuerstroms auf die Messsignale, konnte durch eine, auf einem Echtzeitsystem laufende Software kompensiert werden. Zusätzlich wird von dem Programm die Drehung des Koordinatensystems von der a/b-Achse auf die X/Y-Achse durchgeführt. Das theoretische Auflösungsvermögen ist mit dem des standardmäßig eingesetzten kapazitiven Messsystem zu vergleichen, wird in der Praxis jedoch, aufgrund der trotz Filterung verrauschten Messsignale, nicht erreicht. Hier sind weiterführende Untersuchungen und Versuche zu einer verbesserten Filterung sinnvoll. Beispielsweise besteht die Möglichkeit, statt passiver Filter, digitale Filteralgorithmen auf dem Echtzeitrechner zu implementieren, deren Eigenschaften je nach Anforderung dynamisch angepasst werden können. Alternativ dazu können auch andere Regelkonzepte zum Einsatz kommen, als der zur Zeit per Software implementierte PID-Regler, die besser für die Verarbeitung verrauschter Eingangssignale geeignet sind. In weiterführenden Untersuchungen ist zudem zu klären, ob das streuflussbasierte Messsystem auch in anderen Magnetlagertypen zum Einsatz kommen kann.

LITERATUR

- [1] Hideo Hoshi, Tadahiko Shinshi, and Setsuo Takatani. Third-generation blood pumps with mechanical noncontact magnetic bearing. *Artificial Organs*, Vol. 30 Issue 5:324–338, 2006.
- [2] Richard A. Rarick. Control of an active magnetic bearing with and without position sensing. Master's thesis, Cleveland State University, May 1989.

- [3] Thomas Schuhmann. *Optimale Zustandsschätzung und -regelung an Magnetlagern mit integrierten kapazitiven Lagesensoren (in german)*. PhD thesis, TU Dresden, 2011.
- [4] Gerhard Schweitzer, Alfons Traxler, and Hannes Bleuler. *Magnetlager*. Springer-Verlag, 1993.
- [5] K. K. Sivadasan. Analysis of self-sensing active magnetic bearings working on inductance measurement principle. In *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, volume 32, pages 329 – 334. IEEE, 1996.
- [6] Norbert Skricka. *Entwicklung eines sensorlosen aktiven Magnetlagers*. VDI, 2004.