

# Untersuchungen an einem streuflussbasiertem Messsystem zur Bestimmung der Wellenposition im Magnetlager

Johannes Rudolph<sup>a</sup>, Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe, Reichenhainerstrasse 70, 09126 Chemnitz, Germany, johannes.rudolph@etit.tu-chemnitz.de

<sup>b</sup> Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe, Reichenhainerstrasse 70, 09126 Chemnitz, Germany, ralf.werner@hrz.tu-chemnitz.de

**Zusammenfassung**—Dieser Beitrag beschreibt das Betriebsverhalten von Magnetfeldsensoren, mit denen die Position der Welle im Magnetlager durch Auswertung der magnetischen Streuflüsse bestimmt werden kann. Es werden Untersuchungen zum thermischen sowie zum frequenzabhängigen Übertragungsverhalten der Sensoren vorgestellt. Weiterhin wird eine Vorrichtung zur Kalibrierung der Sensoren beschrieben und abschließend ein verbessertes Verfahren zur Kompensation der durch Steuerströme verursachten Einflüsse vorgestellt.

## I. GRUNDLAGEN

Die Messung der Wellenposition im Magnetlager mithilfe von Magnetfeldsensoren ist eine Methode, die in der Praxis kaum zum Einsatz kommt. Grund dafür sind eine Reihe von Problemen und Schwierigkeiten, die mit dieser Methode verbunden sind. Der Luftspalt von Magnetlagern ist üblicherweise weniger als einen Millimeter groß und damit zu klein um Magnetfeldsensoren darin platzieren zu können. Dieses Problem kann mithilfe der in [1] vorgestellten, sehr dünnen magnetisch sensitiven Elemente, gelöst werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zusätzliche magnetische Pfade zu schaffen in die sich leicht Magnetfeldsensoren wie z.B. Hall-Elemente integrieren lassen[4]. Die magnetischen Streuflüsse zwischen den Magnetpolen können ebenfalls zur Bestimmung der Rotorlage genutzt werden[2], [3]. Der Vorteil besteht darin, dass der Raum zwischen den Lagerpolen mehr Möglichkeiten bietet, kostengünstige Hall-Elemente zu integrieren. Wie frühere Untersuchungen gezeigt haben, ist bei der Wahl des optimalen Einbauortes darauf zu achten, welche räumliche Ausrichtung des Magnetfeldes von den verwendeten Sensoren erfasst werden kann. Am Beispiel eines heteropolaren Magnetlagers konnte gezeigt werden, dass zwischen den Polen einer Lagerachse vorwiegend tangentielle Magnetfeldkomponenten auftreten, während das magnetische Streufeld zwischen den Polen unterschiedlicher Achsen eine überwiegend radiale Ausrichtung hat. Aufgrund der Beschränkung der magnetischen Sensitivität auf eine Achse, die senkrecht auf dem Gehäuse der verwendeten Hall-Sensoren steht, sind die Einbauorte zwischen den Polen verschiedener Lagerachsen besser geeignet. Dies hat jedoch den Nachteil, dass das Messkoordinatensystem

um 45° gegen das Lagerkoordinatensystem verdreht ist. Eine weitere Schwierigkeit besteht in der zusätzlichen Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte vom Steuerstrom. Dies gilt für das Messprinzip, bei dem die parasitären Streuflüsse als Basis dienen, genauso wie für ein Messsystem, bei dem durch die Messung der Flussdichte im Luftspalt die Rotorposition bestimmt wird. Wie weiterführende Untersuchungen gezeigt haben, ist diese Abhängigkeit nicht mit einem konstanten Proportionalitätsfaktor zu beschreiben. Je nach Position des Rotors im Lager variiert der Einfluss der Steuerströme. Zusätzlich wirken sich Hystereseeffekte ungünstig auf die Kompensation der Steuerstromeinflüsse aus.

## II. SENSOR DESIGN

In vorhergehenden Untersuchungen mit Sensoren der ersten Baureihe wurde deutlich, dass die elektromagnetischen Störungen, die durch die Nähe zu den Lagerspulen verursacht werden, sich in einem erheblichen Ausmaß negativ auf die Signalgüte der Sensoren auswirken. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, wurde das Design der Sensoren optimiert. Die neue Generation von Sensoren (siehe Abbildung 1 ) besteht ebenfalls aus zwei doppelseitigen Leiterkarten, die so zusammen geklebt wurden, dass eine vierlagige Leiterkarte entsteht. Bauelemente wie Hall-Sensor, Temperatur-IC und Operationsverstärker befinden sich auf der Mittellage. Die Nutzung der unteren und oberen Lage als Massefläche führt zu einer wirksamen Abschirmung der im Inneren verlaufenden Leiterbahnen. Zudem bieten die neuen Sensoren zwei zusätzliche Übertragungsvarianten für die Ausgangssignale. Zum einen ermöglicht eine auf dem Sensor integrierte Schaltung das Sensorsignal als ein Differenzsignal zu übertragen. Diese Form der Signalübertragung wird in der Audio- bzw. Bühnentechnik eingesetzt, um möglichst störungsfreie Signale von Mikrofonen oder Tonabnehmern zu gewährleisten. Die zweite Möglichkeit, dass Ausgangssignal des Hall-Elements an den Messkonverter zu übertragen, ist durch einen Spannungs-Strom-Wandler realisiert, der ebenfalls in den Sensor integriert ist. Dieses Verfahren ist aus der industriellen Praxis bekannt und besonders für die Signalübertragung in Umgebungen mit

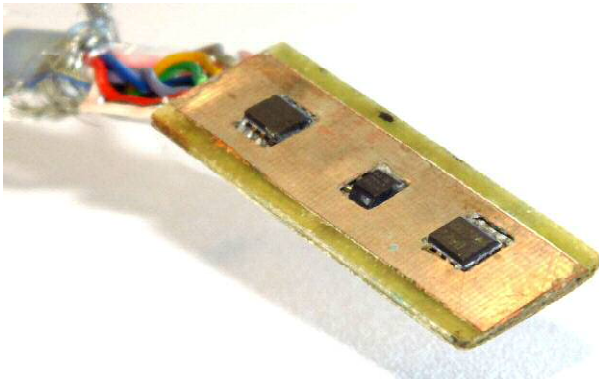


Abbildung 1. Streuflussensor. Das Hall-Element befindet sich in der Mitte. Die Bauelemente daneben sind für die beiden zusätzlichen Übertragungsmöglichkeiten verantwortlich. Der Temperatursensor befindet sich zwischen den Leiterkartenschichten



Abbildung 2. Im Versuchslager eingebaute Sensoren.

verstärkten elektromagnetischen Störungen, wie z.B. in der Nähe von Lagerspulen, geeignet. Die eingebauten Sensoren sind in der Abbildung 2 dargestellt.

### III. THERMISCHES VERHALTEN, ÜBERTRAGUNGSFUNKTION UND KALIBRIERUNG

Um einen sicheren Betrieb der Sensoren und eine stabile Regelung des Magnetlagers gewährleisten zu können, ist es notwendig, das Übertragungsverhalten der Sensoren zu kennen. Im folgenden Abschnitt werden frequenzabhängige und thermische Eigenschaften untersucht und diskutiert, sowie die Aufbereitung der Ausgangssignale durch einen Messverstärker beschrieben.

#### A. Kalibrierung der Sensoren

Um das Verhältnis zwischen der Sensorausgangsspannung und der Stärke des magnetischen Streufeldes in dem Bereich zwischen den Spulen der Lagerachsen einstellen zu können, ist homogenes Magnetfeld mit definierter Richtung erforderlich und dessen magnetische Feldstärke  $H$  in einem bestimmten Bereich frei gewählt werden kann. Für diese Aufgabe ist eine lange Luftspule gut geeignet, in deren Innerem sich ein weitgehend homogenes Magnetfeld erzeugen lässt. Dieses ist



Abbildung 3. Kalibrierungsspule mit Referenzmesssystem in der Mitte

über die Windungszahl direkt proportional zum Spulenstrom einzustellen. Mithilfe der bekannten Beziehung:

$$B = \mu \cdot \frac{I \cdot N}{2 \cdot l} \cdot \left( \frac{\frac{l}{2} - z}{\sqrt{(\frac{l}{2} - z)^2 + r^2}} + \frac{\frac{l}{2} + z}{\sqrt{(\frac{l}{2} + z)^2 + r^2}} \right) \quad (1)$$

kann eine entsprechende Luftspule dimensioniert werden. Die Größe  $z$  stellt den Abstand von der Spulenmitte auf der Rotationsachse dar. Der Spulenradius  $r$  muss so gewählt werden, dass der Sensor im Inneren der Spule Platz hat und so klein wie möglich, um mit vertretbaren Stromstärken eine ausreichende Feldstärke zu gewährleisten. Die auf Basis dieser Überlegung realisierte Spule (Abbildung 3) hat einen mittleren Durchmesser von 53 mm, eine Länge von 530 mm und 846 Windungen. Um den gesamten, im Datenblatt der Hall-Elemente angegebenen, Bereich von  $\pm 80$  mT abzudecken, sind Stromstärken von bis zu 40 A notwendig. Aus praktischen Gründen wurde für die Wicklung ein 1.2 mm Kupferdraht gewählt. Es ist leicht ersichtlich, dass die aufgrund des hohen Stroms entstehenden Stromwärmeverluste rasch zu einer unzulässigen Erwärmung der Wicklung führen würden. Aus diesem Grund musste die Messung mit Hilfe eines Spannungssprungs realisiert und die Messdauer auf wenige Millisekunden begrenzt werden. Das zuvor analytisch und numerisch sowie mit Hilfe eines Referenzmesssystems ermittelte magnetische Übersetzungsverhältnis der Luftspule von  $1.9975 \text{ mT A}^{-1}$ , ermöglicht es, die Messkette aus Sensoren und Konverter zu kalibrieren. Da die Ausgangsspannung anschließend zur Weiterverarbeitung digitalisiert soll, wurde ein Übertragungsfaktor von  $100 \text{ V T}^{-1}$  ausgewählt, um den Spannungsbereich der AD-Wandler möglichst gut ausnutzen zu können.

#### B. Thermisches Verhalten

Da die Sensoren direkt zwischen den Polen des Magnetlagers sitzen, besteht auch ein Kontakt zu den elektrischen Wicklungen, sowie dem Blechpaket. Beide Komponenten erwärmen sich während des Betriebs durch Stromwärmeverluste. Dies führt durch eine nicht zu verhindernde thermische Kopplung zur Erwärmung der Sensoren. Um eine sichere und stabile Regelung mit Hilfe der Streuflussensoren gewährleisten zu können, ist es erforderlich, deren thermisches Verhalten zu kennen, um es, wenn notwendig, kompensieren zu können. Zu diesem Zweck wurden Versuchsreihen in einer Klimakammer

durchgeführt. Bei unterschiedlichen Temperaturen wurde mit Hilfe der zuvor beschriebenen Luftspule das statische Übertragungsverhalten der Sensoren aufgenommen. Da die verwendeten Hall-Elemente laut Datenblatt über eine integrierte Temperatur-Kompensation verfügen, ist in dem im Versuch verwendeten Temperaturbereich von 0 °C bis 60 °C nur mit einer vernachlässigbaren Änderung des Übertragungsverhaltens zu rechnen. Wie im Diagramm 4 zu sehen, ist die Annahme zutreffend. Die Sensoren verhalten sich bei allen eingestellten Temperaturen über den gesamten Messbereich nahezu konstant, so dass eine zusätzliche Kompensation von Temperatureinflüssen seitens der Messkette nicht notwendig ist.

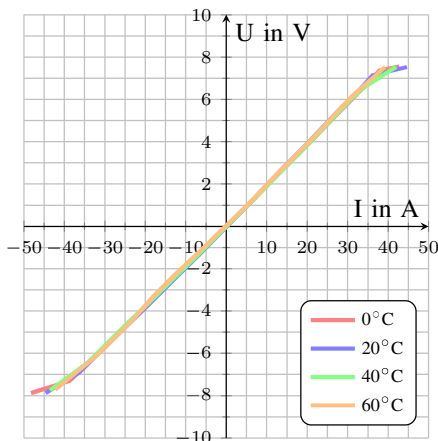


Abbildung 4. Temperaturverhalten des Streuflussmesssystems

### C. Dynamisches Übertragungsverhalten

Neben dem statischen Übertragungsverhalten spielt auch das dynamische Übertragungsverhalten für die Realisierung der Regelung eines aktiven Magnetlagers eine entscheidende Rolle. Im Gegensatz zu konventionellen Messsystemen für Magnetlager, bietet das Streuflussmesssystem die Möglichkeit, mit vertretbarem Aufwand, das frequenzabhängige Übertragungsverhalten zu untersuchen. Anders als bei beispielsweise kapazitiven Wegaufnehmern oder Wirbelstromsensoren, werden keine hochfrequenten mechanischen Schwingungen mit ausreichender Amplitude benötigt. Ebenso kann auf ein Referenzmesssystem, im Sinne von Positionssensoren, verzichtet werden. Die Erzeugung von hochfrequenten Magnetfeldern ist deutlich einfacher, mithilfe einer Spule und eines analogen Verstärkers, zu realisieren. Um einen möglichst großen Frequenzbereich abdecken zu können und gleichzeitig ausreichend große Amplituden des Magnetfeldes zu erzeugen, wurde für den Versuchsaufbau auf einen Ferritkern zurückgegriffen, wie er üblicher Weise in Hochfrequenzübertragern von Schaltnetzteilen zum Einsatz kommt. Der Kern weist zwei Wicklungen auf. Die Primärwicklung dient zur Erzeugung einer magnetischen Durchflutung, die mit Hilfe der Sekundärwicklung gemessen werden kann. In den mechanisch vergrößerten Luftspalt wird, wie in Abbildung 5 dargestellt, der Streuflussensor platziert.

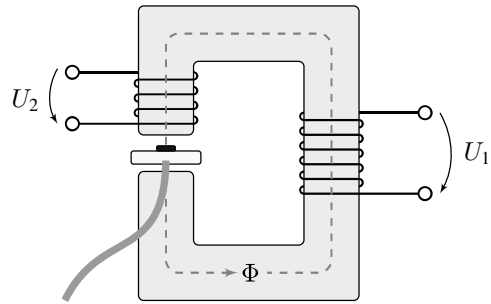


Abbildung 5. Versuchsaufbau zur Bestimmung der dynamischen Übertragungsfunktion. Der Sensor ist im Luftspalt platziert. Das Hall-Element wird durch das schwarze Viereck auf dem Sensor repräsentiert.

Die Eingangsgröße für die Übertragungsfunktion ist der magnetische Fluss, der mit Hilfe der Sekundärwicklung gemessen wurde. Das Verhalten des Versuchsaufbaus weist das eines Transformators auf. Ausgehend davon ergeben sich die Amplituden des magnetischen Flusses  $\hat{\Phi}$  aus den Amplituden der Sekundärspannung  $U_2$  der Windungszahl  $N_2$  und der Kreisfrequenz  $\omega$  wie folgt:

$$\hat{\Phi} = \frac{\hat{U}_2}{\omega \cdot N_2} \quad (2)$$

Unter der Annahme eines homogenen Magnetfeldes im Luftspalt kann die Flussdichte mit:

$$\hat{B} = \frac{\hat{\Phi}}{A} \quad (3)$$

bestimmt werden.

Die von den Streuflusssensoren gemessene Flussdichte wird bezogen auf die tatsächliche, durch die Sekundärwicklung gemessene Flussdichte, betrachtet. Dadurch wird das frequenzabhängige Verhalten des analogen Verstärkers und Nichtlinearitäten des Ferritkerns weitestgehend kompensiert. Lediglich die abnehmenden Amplituden der Flussdichte führen aufgrund des Auflösungsvermögens der verwendeten Messmittel, mit steigender Frequenz, zu einer Vergrößerung der Messfehler. Der im Frequenzbereich von 0,5 kHz bis 400 kHz aufgenommene Amplitudengang ist in Abbildung 6 dargestellt.

Im unteren Frequenzbereich bis ca. 40 kHz weisen die Streuflusssensoren ein PT1-Verhalten auf, das gut mit den Angaben aus dem Datenblatt der Hall-Elemente übereinstimmt. Bei höheren Frequenzen scheinen die Amplituden, die von den Sensoren gemessene Flussdichte, im Vergleich zu der durch die Sekundärwicklung gemessene Flussdichte, anzusteigen. Als mögliche Ursachen dafür kommen kapazitive oder induktive Einkopplungen, sowie Resonanzfälle, die mit parasitären Kapazitäten und Induktivitäten der Leiterbahnen des Streuflusssensors in Zusammenhang stehen, in Betracht. Durch Messungen mit Leiterschleifen unterschiedlicher Durchmesser und Induktivitäten, die anstelle der Streuflusssensoren im Luftspalt der Versuchsanordnung platziert wurden, konnte eine induktive Einkopplung als wahrscheinliche Ursache identifiziert werden. Dabei induziert das magnetische Wechselfeld im Luftspalt des Ferritkerns Wechselspannungen in den Anschlüssen und den Leiterbahnen der Streuflusssensoren. Diese

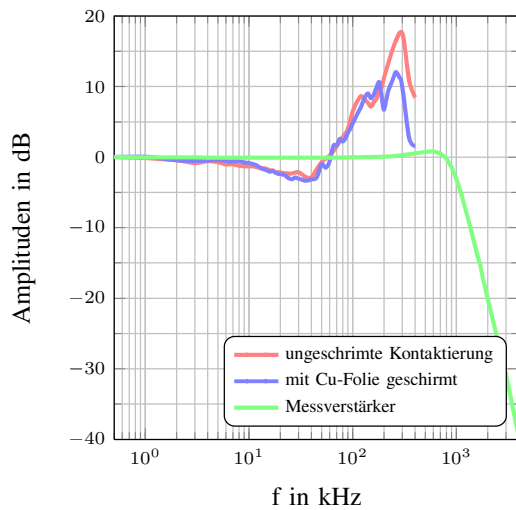


Abbildung 6. Amplitudengang des Streuflussmesssystems für Frequenzen von 0.5 kHz bis 400 kHz

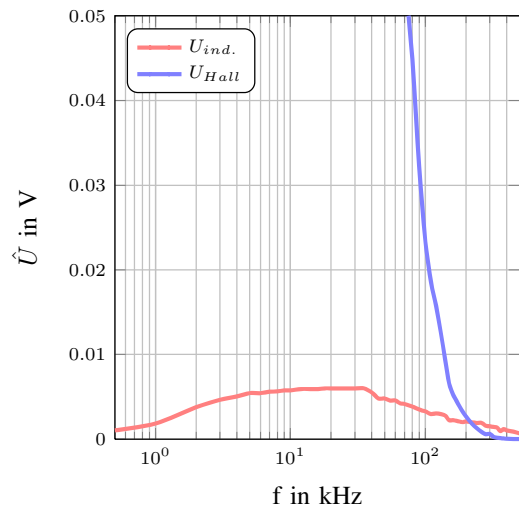


Abbildung 7. Theoretische Ausgangsspannung eines Sensors im Vergleich mit der Spannung, die in einer Leiterschleife induziert wird.

Annahme wird durch die geringere Amplitudenüberhöhung bei einer Konfiguration gestützt, bei der die Anschlussleitungen der Sensoren mit Kupferfolie umhüllt waren. Die Amplituden der induzierten Wechsellspannungen steigen zwar mit zunehmender Frequenz, gleichzeitig sinkt die Ausgangsleistung des Audioverstärkers, so dass die Amplituden der induzierten Störspannung über einen großen Frequenzbereich relativ konstant bleiben. Durch eine Testmessung, bei der eine einzelne Leiterschleife, stellvertretend für die verschiedenen Leiterbahnen des Sensorträgers, in dem Luftspalt des Ferritkerns platziert wurde, konnte diese Annahme weiter bestätigt werden. Wie im Diagramm 7 zu sehen, werden die Amplituden der induzierten Spannung zunächst langsam größer, bis sie ab ca. 35 kHz wieder kleiner werden. Die theoretische<sup>1</sup> Ausgangsspannung der Streuflusssensoren weist hingegen besonders im unteren Frequenzbereich deutlich größere Amplituden auf. Ab ca. 70 kHz erreicht die theoretische Spannung die Größenordnung der induzierten Störspannung und wird ab ca. 200 kHz kleiner als diese. Da sich beide Spannungen additiv überlagern, treten bei höheren Frequenzen größere Amplituden der Sensorausgangsspannung auf, als tatsächlich Flussdichte im Luftspalt vorhanden ist. Bei der Messung des Amplitudengangs wirkt sich dieser Effekt im Bereich höherer Frequenzen als scheinbare Verstärkung der Sensorspannung aus. In der Praxis sollte ein Filter genutzt werden, dessen Eckfrequenz deutlich kleiner als 40 kHz ist, um hochfrequente Störungen zu unterdrücken.

#### IV. STROMKOMPENSATION

Neben der Abhängigkeit des magnetischen Streuflusses von der Rotorposition, ist dieser auch von den in den Lagerspulen fließenden Strömen abhängig. Durch die Verdrehung des Sensorkoordinatensystems um 45° gegenüber den Lagerachsen des Magnetlagers ist es notwendig, bei der Kompensation

jeweils eine der Sensorachsen die Steuerströme beider Lagerachsen zu berücksichtigen. In früheren Versuchsanordnungen wurde die Stromkompensation mithilfe von konstanten Faktoren für den X- bzw. Y-Steuerstrom realisiert. Messreihen zur Bestimmung des statischen Übertragungsverhaltens der neuen Sensoren legen jedoch nahe, dass eine derartige Vereinfachung zu ungenau ist, um eine stabile Lageregelung zu realisieren. Stattdessen müssen die Kompensationsfaktoren in Abhängigkeit des Steuerstroms und der Rotorposition variieren. Für die a-Achse, die aus der differentiellen Anordnung der Sensoren  $C_1$  und  $C_3$  besteht ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$a = (C_1 - C_3) - I_x \cdot k_{xa}(a, I_x) + I_y \cdot k_{ya}(a, I_y) \quad (4)$$

Die aus den Sensoren  $C_2$  und  $C_4$  bestehende b-Achse lässt sich wie folgt beschreiben:

$$b = (C_2 - C_4) - I_x \cdot k_{xb}(b, I_x) - I_y \cdot k_{yb}(b, I_y) \quad (5)$$

In einem ersten Schritt wurde die Abhängigkeit der Stromkompensationsfaktoren von der Höhe des Steuerstroms bei konstanter Rotorposition untersucht. Diese war mit Hilfe einer justierbaren Haltevorrichtung an der Position  $x = y = a = b = 0$  fixiert. Der jeweilige Steuerstrom wurde in seinem vollen Aussteuerbereich variiert. Mit Hilfe der Gleichungen 4 und 5 lassen sich die Kompensationsfaktoren für verschiedene Ströme errechnen. Der Zusammenhang zwischen  $k_{xa}$  und  $I_x$  ist exemplarisch in 8 dargestellt. Es wird deutlich, dass der Wert für  $k_{xa}$  nicht konstant ist. Im Falle eines negativen Steuerstroms nimmt  $k_{xa}$  kleinere Werte an, während ein positiver Steuerstrom zu größeren Werten führt. Auffällig sind die vermeintlichen Unstetigkeitsstellen. Diese sind der Art und Weise der Berechnung der Stromkompensation geschuldet. Fließen nur kleine Ströme, müssen die Kompensationsfaktoren immer größere Werte annehmen um die Bedingung  $a = b = 0$  zu erfüllen. Gleichzeitig verfälschen sehr kleine Steuerströme das Messergebnis nur geringfügig. Es ist daher vertretbar, die

<sup>1</sup>Die theoretische Ausgangsspannung der Streuflusssensoren entspricht der tatsächlich vorhandenen magnetischen Flussdichte im Luftspalt die mithilfe der sekundären Messspule bestimmt wurde.



Unstetigkeiten aufzulösen und durch angenäherte Endwerte zu ersetzen. Verfolgt man diesen Ansatz weiter, lassen sich die Werte der Stromkompensationsfaktoren dahingehen vereinfachen, dass diese nur noch zwei unterschiedliche Werte, je nach Vorzeichen des Steuerstromes, annehmen. In der Praxis konnte mit diesem Verfahren das Lager in beiden Achsen gleichzeitig zum Schweben gebracht werden.

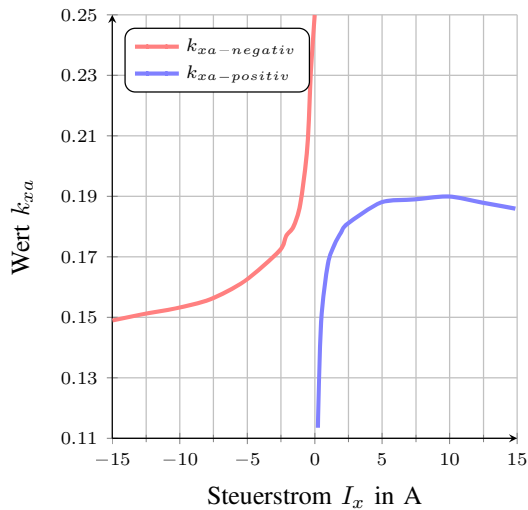


Abbildung 8. Kompensationsfaktor  $k_{xa}$  für die Lagermitte in Abhängigkeit des Steuerstroms  $I_x$ .

## V. BETRIEB MIT STREUFLUSSSENSOREN

Mithilfe der ursprünglich verwendeten kapazitiven Sensoren wurde das Lager zum Schweben gebracht. Eines der beiden Radiallager wurde von einem analogen PID-Regler betrieben und das andere durch einen digitalen, auf einem dSpace-System implementierten PID-Regler. Axial wurde der Rotor passiv durch Reluktanzkräfte gehalten. Sobald der Rotor die Lagermitte erreicht hat, kann auf das Streuflusssystem umgeschaltet werden. Die Nutzung des kapazitiven Messsystems zum Erreichen des Lagermittelpunktes ist notwendig, da die Stromkompensationsfaktoren bisher nur für diese Position bestimmt sind und eine Regelung, basierend auf dem Streuflusssystem, zunächst nur an dieser Position realisierbar ist. Im Gegensatz zu vorangegangenen Untersuchungen und Tests, bei denen jeweils nur eine Lagerachse mit Streuflusssensoren betrieben wurde und das zweite Radiallager außer Betrieb war, ist es nun möglich, die Welle komplett frei schweben zu lassen, wobei ein Radiallager in beiden Achsen mit Streuflusssensoren arbeitet. Das System ist daher nur schwach gedämpft und etwaige Messfehler können schnell Schwingungen hervorrufen. Da die Stromkompensation nur in der Lagermitte gut funktioniert, würden zu starke Abweichungen des Rotors von dieser Position durch eine ungenaue Stromkompensation zwangsläufig zu falschen Positionssignalen führen, die der Regler bestrebt wäre auszuregeln. Da der Rotor sich in einem solchen Fall nicht an der vom Regler vermuteten Position befindet, wird das System schnell instabil. In der Lagermitte konnte mit einem digitalen PID-Regler und geeigneten Parametern ein unruhiges aber stabiles Schweben erreicht werden.

In der Abbildung 9 sind die Signale des kapazitiven und des Streuflusssystemes der X-Achse während des Schwebens mit Streuflusssensoren dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Rotorposition im Bereich von  $\pm 0.1$  mm schwankt. Verursacht wird dieses hörbare Schwingen des Rotors durch die zunehmend ungenauer werdende Stromkompensation, je weiter sich der Rotor von der Lagermitte entfernt. Schon kleine Auslenkungen führen zu falschen Lageinformationen, die der Regler während des Versuchs jedoch ausregeln konnte, bevor ein unkontrolliertes Schwingen auftrat. Es ist davon auszugehen, dass ein ruhigeres Schweben des Rotors erreicht werden kann, wenn statt der, von der Stromrichtung abhängigen Konstanten, die gemessenen Kennfelder der Kompensationsfaktoren zum Einsatz kommen. Diese müssen in zukünftigen Messungen auch außerhalb der Lagermitte bestimmt werden, um für alle Positionen, die die Welle im Lager einnehmen kann, entsprechende Werte interpolieren zu können.

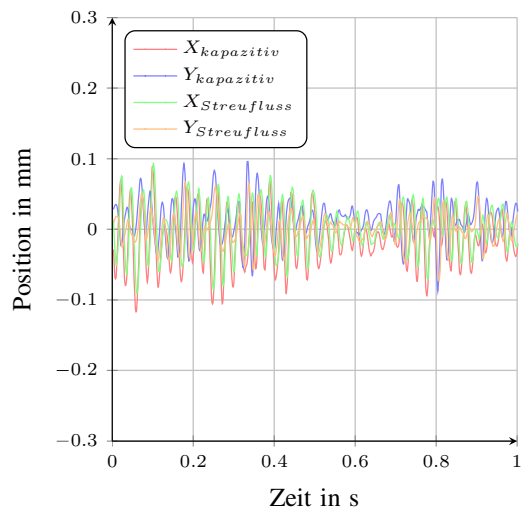


Abbildung 9. Kapazitives und Streuflusssystemsignal der X-Achse bei Betrieb des Lagers mit Streuflusssensoren

## VI. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wird eine weiterentwickelte Version von Streuflusssensoren vorgestellt, mit deren Hilfe die Rotorposition im Magnetlager bestimmt werden kann. Diese verfügen über zusätzliche Möglichkeiten der Signalübertragung und eine verbesserte Schirmung des Sensorträgers. Weiterhin wird eine Vorrichtung zur Kalibrierung der Sensoren beschrieben und das statische, sowie dynamische Übertragungsverhalten der Sensoren untersucht. Die wahrscheinliche Ursache der dabei festgestellten Signalüberhöhungen bei hohen Frequenzen wird durch Messungen und Tests untersucht und diskutiert. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit ist die Kompensation der Steuerströme, deren Einfluss das Messsignal verfälscht. Die durchgeführten Untersuchungen werden vorgestellt und Lösungsansätze präsentiert mit denen eine stabile Regelung des Lagers, basierend auf den Signalen des Streuflusssystemes realisiert wird. Abschließend werden noch Möglichkeiten erörtert, wie die bisher erzielten Ergebnisse weiter verbessert werden können.

#### LITERATUR

- [1] Falk Bahr u. a. "Erfassung der Luftspaltinduktion aktiver Magnetlager auf Basis ultradünner, flexibler Hall-Sensoren". In: *Tagungsband 9. Workshop Magnetlagertechnik Zittau/Chemnitz* (Okt. 2013), S. 96.
- [2] Johannes Rudolph, Ralf Werner und Ivo Maximow. "Measurement of the Rotor Position of an Active Magnetic Bearing Using Interpolar Stray Flux". In: *1. Brazilian Workshop on Magnetic Bearings*. 2013.
- [3] Johannes Rudolph, Ralf Werner und Ivo Maximow. "Messung magnetischer Streuflüsse zur Bestimmung der Wellenposition im Magnetlager". In: *9. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz*. 2013.
- [4] Marco Schramm und Wilfried Hofmann. "Novel Magnetic Displacement Sensor for Mechatronical Systems". In: *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. Nov. 2007.