
Berührungsloses 6-Achs-Messsystem für lagerlose reluctante Rotations-Linearmotoren

André Schleicher¹, Ralf Werner¹

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein berührungsloses Messsystem für die Messung von Verdrehungen und Verschiebungen in 6 Freiheitsgraden vorgestellt. Das Messsystem ist speziell für einen neuartigen Antrieb, den lagerlosen reluctanten Rotations-Linearmotor, entwickelt worden, kann jedoch leicht auch für andere Zwecke modifiziert werden. Für den Einsatz in diesem Spezialantrieb werden hohe Anforderungen gestellt, welche nicht alle von einzelnen konventionellen Messsystemen erfüllt werden können. Daher wurde ein Gesamtsystem aus aufeinander sowie auf die Messaufgabe abgestimmten Einzelmesssystemen entwickelt. Dieses besteht aus einem kapazitiven Mehrachs-Messsystem mit neuartiger differenzieller Sensorik und Auswertung sowie aus einem inkrementellem Laser-Messsystem in Differenzialanordnung.

Schlagwörter

differenzieller kapazitiver Abstandssensor, mehrfach differenzielle Auswertung, Amplitudenmodulation, inkrementelles Laser-Messsystem, lagerloser Rotations-Linearmotor, Signal-Stör-Abstand, Signal-Rausch-Abstand

Einleitung

Der lagerlose Rotations-Linearmotor ist ein neuartiger Antrieb, welcher Rotationsmotor, Linearmotor und Magnetlager zu einer sehr kompakten und einfachen Bauform vereinigt. Dadurch kann mit geringem Fertigungsaufwand ein Antrieb hergestellt werden, welcher unabhängig voneinander Verschiebungen und vollständige Drehungen eines schwebenden Rotors um eine Achse ermöglicht. Darüber hinaus kann auch das magnetische Schweben geregelt werden, sodass geringfügig exzentrische oder taumelnde Bewegungen möglich sind. Ein lagerloser Rotations-Linearmotor, welcher auf dem Reluktanzprinzip basiert, ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Bewegungsvielfalt, negative Steifigkeiten aufgrund der magnetischen Lagerung, sowie die komplexe Regelung des Motors stellen zusammen hohe Ansprüche an das Messsystem für die Rotorlage. Dabei kann unterschieden werden zwischen der Messung der Verdrehung und Verschiebung in der Rotorachse und der Messung in den anderen 4 Freiheitsgraden (radiale Lage):

- Allgemeine Anforderungen:
 - 6 unabhängige Messachsen
 - geringe Kopplung der Achsen
 - hohe elektromagnetische Störsicherheit
- Radiale Lage:
 - schnelle Reaktionszeit
 - sehr wenig Rauschen
- Verdrehung und Verschiebung in Rotorachse:
 - Synchronizität zur Nutzung

Konventionelle Messsysteme erfüllen nicht alle Anforderungen, weshalb ein System aus abgestimmten Messsystemen unterschiedlicher physikalischer Prinzipien entwickelt wurde, welches nachfolgend erläutert wird.

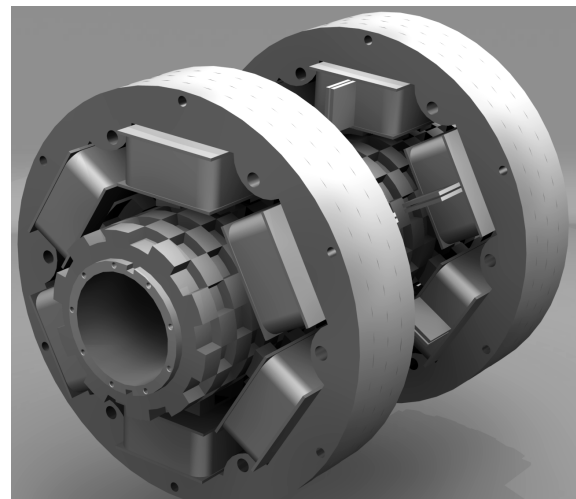


Abbildung 1. Lagerloser reluctanter Rotations-Linearmotor mit Doppelstator

Überblick über die Einzelmesssysteme und deren physikalische Wirkprinzipien

Für die Bestimmung der vollständigen Radiallage des Rotors müssen 4 Abstände zum Stator gemessen werden. Dies geschieht durch mehrere jeweils mehrfach differenzielle kapazitive Abstandsmesssysteme. Ein Einzelmesssystem besteht

¹Technische Universität Chemnitz

Kontakt:

André Schleicher, Technische Universität Chemnitz
Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe
Reichenhainer Straße 70
09126 Chemnitz
Email: andre.schleicher@etit.tu-chemnitz.de

aus einem differenziellen Sensor, einer differenziellen Auswerteelektronik mit A/D-Wandlung und einem zentralen Signalverteiler. Mit Hilfe von Sensor und Auswerteelektronik wird die Koppelkapazität zwischen beiden Sensorflächen, welche vom Abstand des Rotors zum Sensor abhängig ist, ermittelt und digitalisiert. Der Signalverteiler stellt einen gemeinsamen Hochfrequenzträger für alle Einzelmesssysteme zur Verfügung. Das bedeutet, die kapazitiven Einzelmesssysteme arbeiten nach dem Prinzip der Amplitudenmodulation und sind miteinander synchronisiert.

Die Messung der Verschiebung und Verdrehung erfolgt jeweils über ein inkrementelles optisches Messsystem. Auf dem Rotor ist ein diffus reflektierendes Muster angebracht, welches eine sich sinusförmig ändernde Reflektivität in Längs- bzw. in Querrichtung aufweist. Das Sinusmuster ist jeweils synchronisiert mit der Nutung des Rotors. Die Reflektivität des Musters wird mit mehreren Lasersensoren abgetastet. Diese leiten einen kollimierten Laserstrahl mit sinusförmig modulierter Leistung auf die Oberfläche und ermitteln die Leistung der gestreuten Strahlung. Über eine synchrone Abtastung wird das Signal eines Lasersensors demoduliert und digitalisiert. Durch den Versatz bzw. Winkelversatz der einzelnen Sensoren zueinander kann die Verdrehung bzw. Verschiebung des Musters eindeutig aus den einzelnen Signalstärken rekonstruiert werden.

Mehrfach differenzielles kapazitives Abstandsmesssystem

Stand der Technik

Stand der Technik sind kapazitive Messsysteme, welche durch eine aktive Schirmung die Wirkung der parasitären Kapazität zwischen Sensorelektrode und Bezugspotential vermindern und den Feldverlauf der Sensorelektrode homogenisieren^{1,2}. Die Zuleitung zu den Sensoren erfolgt durch 3-Leiter-Koaxialleitungen, bei denen zwischen dem Signalinnenleiter und dem Masseaußenleiter noch ein Aktivschirmleiter existiert³. Der Einfluss der Kapazität zwischen Messobjekt und Bezugspotential wird bei manchen Systemen vermindert, indem mehrere Sensoren verwendet und die Verschiebungsströme der Messelektroden gegenphasig synchronisiert geregelt werden³.

Die Hauptprobleme der genannten Messsysteme sind zum einen die meist geringe Trägerfrequenz, wodurch das Arbeitsband mit dem Störspektrum des Magnetlagers überlappt und die erreichbare Messgrenzfrequenz gering ist. Zum anderen ist die Kompensation der Rotor-Bezugspotential-Kapazität nicht vorhanden oder nur mäßig effektiv⁴.

Umsetzung: mehrfach differenzielle Auswertung bei hoher Trägerfrequenz

Das entwickelte Messsystem besitzt einen zweifach-differenziellen Sensor, siehe Abbildung 2. Um den Rotor herum sind 4 differenzielle Sensoren mit Aktivschirm angebracht. Zu jedem differenziellen Sensor gehört ein Einzelmesssystem, welches die beiden Teilsensoren mit gespiegelten Signalen betreibt und deren Koppelkapazität zueinander misst.

Die Schaltung eines Einzelmesssystems und des Gesamtsystems ist in Abbildung 3 dargestellt. Ein Sinusträger wird

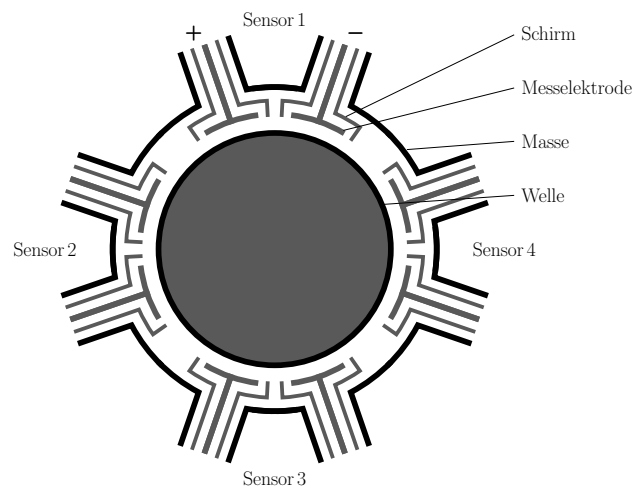


Abbildung 2. Differenzielle Sensoranordnung

an alle Einzelmesssysteme verteilt, wo in zwei gespiegelte Signale aufgeteilt wird und jeweils einer Messsbrücke zugeführt wird. Beide Brückenspannungen werden über zwei differenzielle Demodulatoren (siehe Abbildung 4) demoduliert, über zwei Differenzverstärker verstärkt und einem differenziellen AD-Wandler mit vorgeschaltetem Tiefpass zugeführt. Die digitalen Signale je zweier Einzelmesssysteme, die zu sich gegenüberliegenden differenziellen Sensoren gehören, werden anschließend subtrahiert. Durch die hohe Trägerfrequenz von $f = 10 \text{ MHz}$ wird das stöempfindliche Arbeitsband gegenüber konventionellen Messsystemen in Frequenzbereiche verschoben, die weit genug entfernt sind vom Spektrum der von Motor und Leistungselektronik verursachten elektromagnetischen Störungen. Zudem wird dadurch die Nutzsignal-Leistung erhöht:

$$P = UI = UC\dot{U} \sim f \quad (1)$$

Auch eine hohe Messgrenzfrequenz und eine kurze Reaktionszeit verlangen bei der Amplitudenmodulation prinzipbedingt eine hohe Trägerfrequenz. Ermöglicht wird die hohe Frequenz durch die passive RC-Brückenschaltung, die im Gegensatz zu Stromregelungen o.ä. auch bei hohen Frequenzen keine Stabilitätsprobleme bereitet sowie durch den einfach aufgebauten differenziellen Demodulator. Die Schottkydioden D_1 und D_2 eines Demodulators sind thermisch gut gekoppelt, um die Temperaturdrift zu verringern. Durch die mehrfach differenzielle Sensoranordnung und Auswertung werden die Einflüsse von

- Gleichtaktstörungen aller Art
- Änderungen der Rotor-Bezugspotential-Kapazität
- Wärmeausdehnungen

stark vermindert, worauf später im Detail eingegangen wird. Durch die Synchronisation werden gegenseitige Beeinflussungen der Einzelmesssysteme wie Schwebungen verhindert. Die digitalen Ausgänge ermöglichen eine einfache Erweiterbarkeit des Gesamtsystems um weitere Messachsen oder noch mehr Einzelmesssysteme pro Achse.

In Tabelle 1 sind die wichtigsten getroffenen Maßnahmen und Ihre Auswirkungen auf fundamentale Eigenschaften des Messsystems zusammengefasst. Dabei bedeutet das Symbol + eine Verbesserung der jeweiligen Eigenschaft,

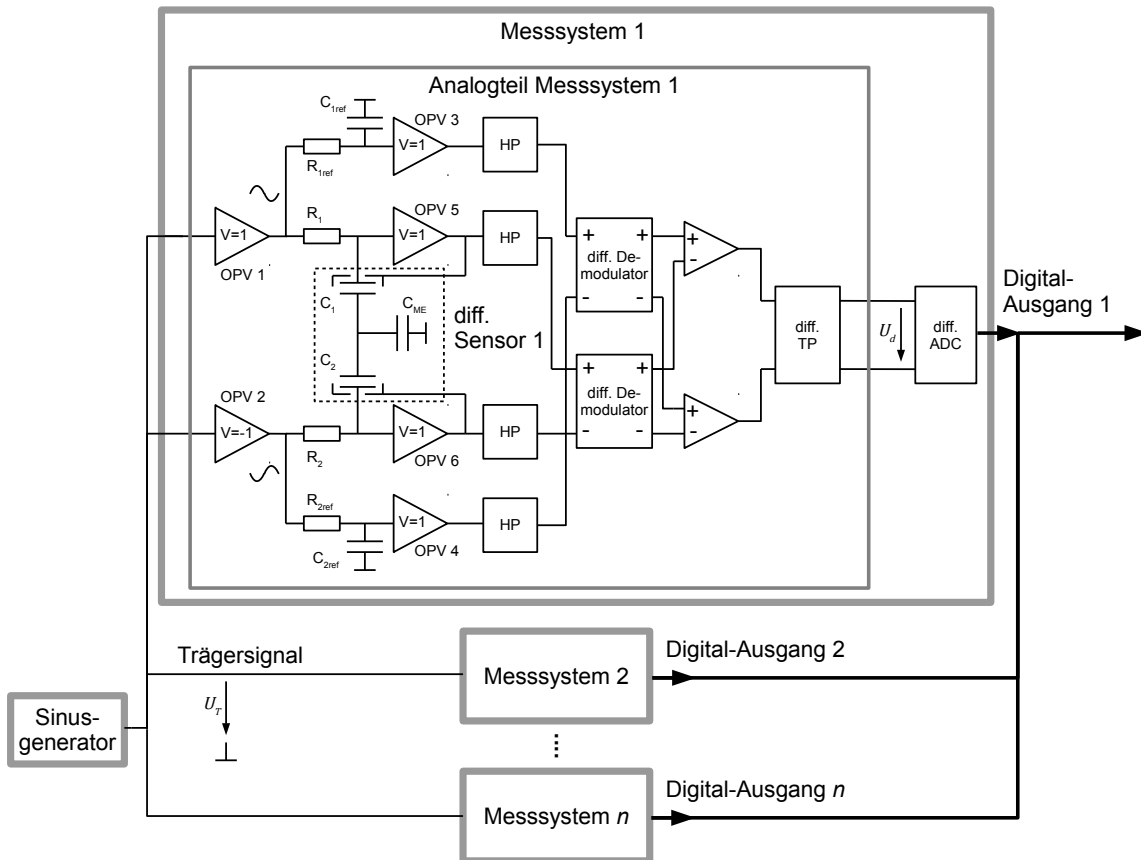


Abbildung 3. Prinzipschaltung kapazitives Messsystem

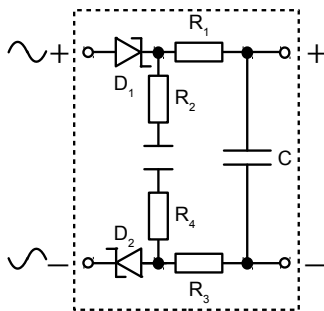


Abbildung 4. Differenzieller Demodulator

jedoch nicht notwendigerweise eine Erhöhung der jeweiligen physikalischen Größe.

Messergebnisse

Das kapazitive Messsystem wurde erfolgreich an einem Versuchsaufbau eines lagerlosen reluctanten Rotations-Linearmotors in Betrieb genommen und ermöglichte eine stabile magnetische Lagerung des Rotors mit sehr geringem Rauschen.

Tabelle 1. Einflüsse verschiedener konstruktiver Maßnahmen auf Eigenschaften des Messsystems

Maßnahme	Stör- abstand	Reak- tions- zeit	Rausch- abstand	Linea- rität	Temp.- drift
diff. Sensor	++		+		
diff. Demodulator	++		-	-	-
hohe Träger- frequenz	++	++	-	-	-
Doppel- Messsystem mit Digital- ausgang	+		+	++	+

Sprungantwort und Grenzfrequenz

Die Sprungantwort wurde ermittelt durch eine schnelle Änderung der Trägeramplitude. Der Effekt der Spannungsänderung bei Bewegung des Rotors durch Ladungserhalt auf Sensor- und Rotoroberfläche wird dadurch nicht nachgebildet. Jedoch werden durch das Vorgehen alle relevanten Verzögerungen des Systems erfasst. Die Trägerspannung U_T und die Ausgangsspannung U_d eines Einzelmesssystems sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Reaktionszeit des Systems beträgt etwa

$$t_R \approx 10 \mu s \quad (2)$$

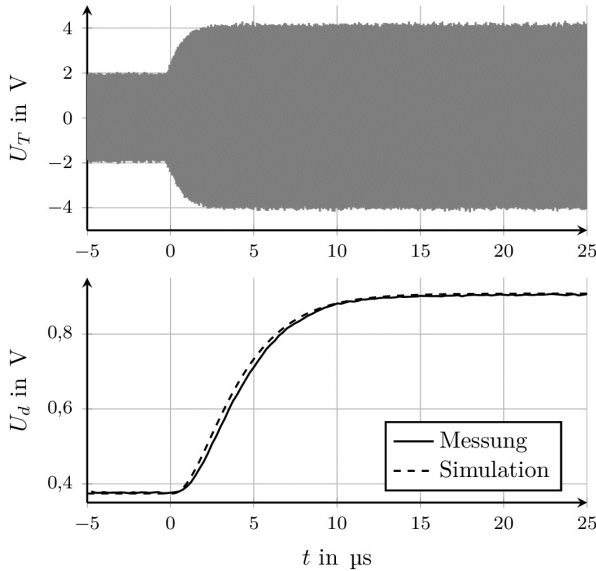


Abbildung 5. Sprungantwort eines Einzelmesssystems

Über eine lineare Simulation des Schaltung mit Parameteranpassung an die gemessene Kurve (vgl. gestrichelte Kurve in Sprungantwort) konnten Zeitkonstanten des Systems rekonstruiert werden und eine -3 dB-Messgrenzfrequenz von

$$f_G = 47 \text{ kHz} \quad (3)$$

ermittelt werden. Die Dynamik des Systems ist somit ausreichend schnell für die Anwendung in aktiven Magnetlagern und übertrifft die der meisten konventionellen Messsysteme deutlich.

Rausch- und Störabstände

Der Signal-Rausch-Abstand eines Einzelmesssystems wurde über ein Histogramm der Werte des A/D-Wandlers ermittelt und beträgt

$$SNR = 92 \text{ dB} \quad (4)$$

Bei Verwendung von n Einzelmesssystemen pro Achse erhöht sich der Wert entsprechend auf etwa

$$SNR(n) \approx 92 \text{ dB} + 20 \log_{10}(\sqrt{n}) \text{ dB} \quad (5)$$

da das Rauschen der Sensoren überwiegend in den Auswerteelektroniken entsteht und somit weitgehend unkorreliert ist.

Darüber hinaus wurde die Störfähigkeit des Einzelmesssystems gegenüber sich ändernden Messobjekt-Bezugspotential-Kapazitäten und -Spannungen ermittelt. Dazu wurde zum einen eine Änderung der Kapazität von $C = 20 \text{ pF}$ auf $C \rightarrow \infty$ mittels Isolation bzw. Kurzschluss zwischen Messobjekt und Bezugspotential erzeugt. Der resultierende Signal-Stör-Abstand SDR_C , definiert als Verhältnis von Aussteuerbereich zu Differenz zwischen der mittleren Ausgangsspannung vor und nach dem Kapazitätssprung, beträgt für ein Einzelmesssystem

$$SDR_C = 74 \text{ dB} \quad (6)$$

Dieser Wert ist angesichts der sehr starken Kapazitätsänderung relativ hoch und wird nur durch die differenzielle Sensorik und Auswertung erreicht. Durch die

Unempfindlichkeit gegenüber der Rotor-Bezugspotential-Kapazität können auch sehr kleine Rotoren und/oder große Luftspaltlängen realisiert werden.

Zum anderen wurde eine sinusförmige Störspannung U_n mit unterschiedlichen Effektivwerten und Frequenzen zwischen Rotor und Bezugspotential angelegt. Ermittelt wurden der Signal-Stör-Abstand SDR_{AC} der Wechselanteile der Ausgangsspannung sowie der gesamte Signal-Stör-Abstand SDR , welcher neben dem Wechselanteil auch die Verschiebung des Mittelwertes durch die Störung beinhaltet:

$$SDR_{AC} := 10 \log_{10} \left(\frac{U_{AB}^2}{\sigma^2} \right) \quad (7)$$

$$SDR := 10 \log_{10} \left(\frac{U_{AB}^2}{\sigma^2 + e^2} \right) \quad (8)$$

mit:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k \right)^2}$$

$$e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_k - U_m$$

Darin sind U_k die Abtastwerte der gestörten Ausgangsspannung und U_m der Mittelwert der ungestörten Ausgangsspannung, d.h. der Mittelwert für $U_n = 0$. N ist die Zahl der Abtastwerte und U_{AB} der Aussteuerbereich des Messsystems.

In Abbildung 6 sind beide Verläufe für die Differenzausgangsspannung eines Einzelmesssystems dargestellt. Der Signal-Stör-Abstand ist wegen der hohen Trägerfrequenz sehr hoch und wird erst ab einigen hundert kHz nennenswert kleiner als der Signal-Rausch-Abstand. Zusätzlich wurde der Stör-Abstand für eine einzelne Ausgangsspannung U_s , welche ein gleichwertiges Single-ended-Messsystem repräsentiert, aufgetragen. Das differenzielle Messsystem erreicht bis in den einstelligen MHz-Bereich erheblich mehr Störsicherheit als die Single-ended-Variante. Dies gilt vor allem für den Wechselanteil, der auch für die Stabilität und Genauigkeit der Regelung der magnetischen Lagerung von Antrieben von großer Bedeutung ist.

In den Kurven des gesamten Signal-Stör-Abstands zeigt sich bei hohen Frequenzen bei der differenziellen Messung eine stärkere Abnahme als bei den Kurven des Wechselanteils. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der differenzielle Demodulator (vgl. Abbildung 4) prinzipbedingt nichtlineares Verhalten bei größeren Stör-Amplituden aufweist.

Insgesamt sind die erreichten Signal-Rausch- und -Stör-Abstände relativ hoch und erlauben in Verbindung mit der sehr schnellen Reaktionszeit des Systems eine stabile, rausch- und störarme magnetische Lagerung.

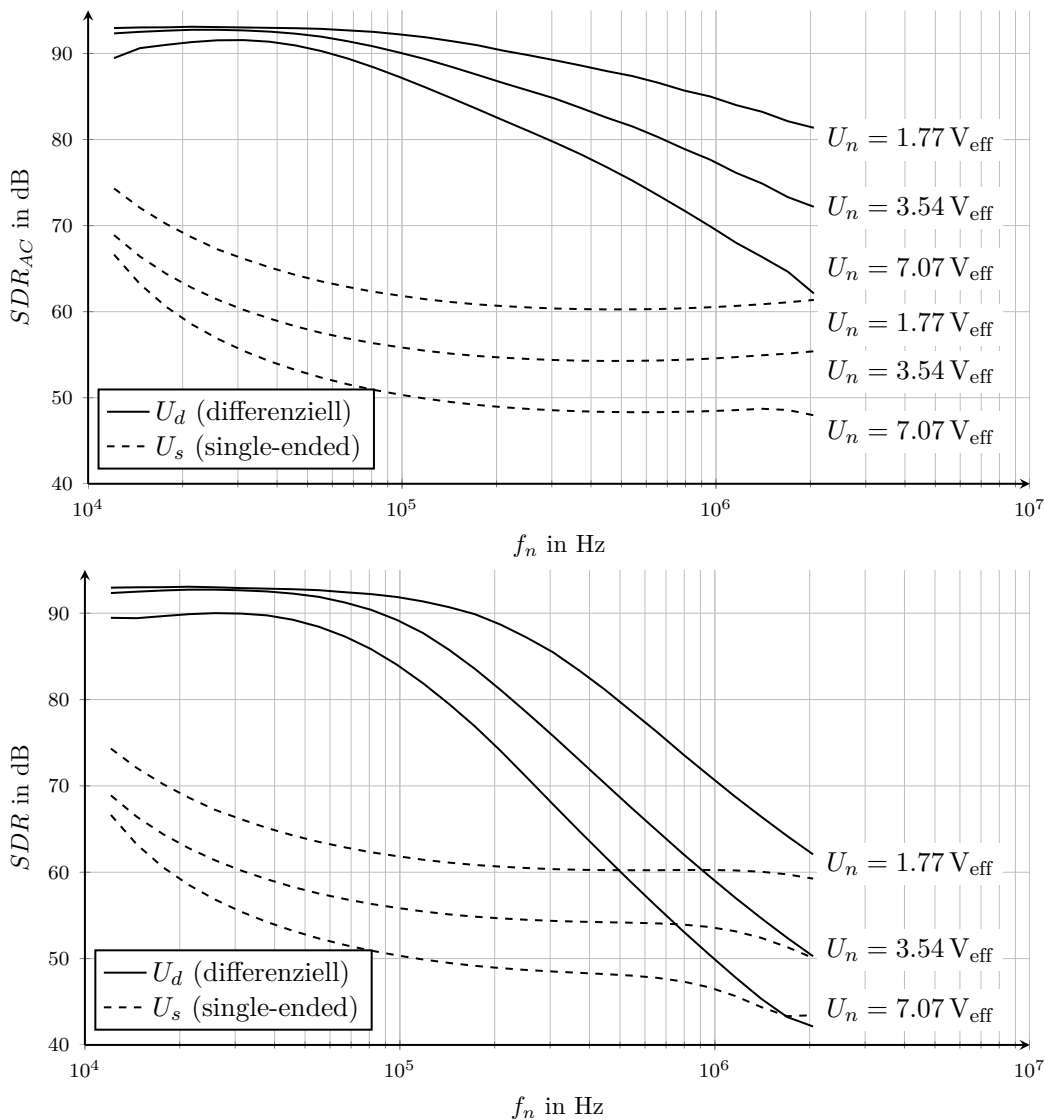


Abbildung 6. Signal-Stör-Abstände eines Einzelmesssystems

Inkrementelles Lasermesssystem mit Differenzialanordnung

Stand der Technik

Stand der Technik sind optische Messsysteme nach dem Transmissionsprinzip, bei denen der Strahl einer Lichtquelle (LED, Laser) durch eine geschlitzte Scheibe hindurch auf eine Fotodiode bzw. einen Fototransistor trifft. Analog gibt es Systeme, die nach dem Reflexionsprinzip arbeiten und eine reflektierende Fläche abtasten¹. Darüber hinaus gibt es kamerabasierte Systeme, welche über Bildkorrelation einer beleuchteten diffus reflektierenden Fläche Bewegungen erfassen, z.B. bei einer Computer-Maus.

Letztere Systeme sind zwar unempfindlich gegenüber Abnutzung/Verschmutzung der Oberfläche und prinzipiell in der Lage, auch bei variierenden Abständen zweidimensionale Verschiebungen zu messen. Jedoch eignen sich diese Systeme eher zur Messung von Veränderungen und besitzen ggf. nur geringe Wiederholgenauigkeit. Darüber hinaus sind diese relativ langsam und/oder kostenintensiv.

Transmissionssysteme sind für lagerlose Rotations-Linear motoren bautechnisch bedingt nur in Ausnahmefällen

einsetzbar, da die Distanz zwischen Fotoelement und Transmissionsmuster nicht konstant ist und/oder sehr groß werden kann. Dies führt zu nicht konstanter bzw. starker Beugung des Lichtstrahls und somit zur Verfälschung des Messsignals. Konventionelle Reflexionssysteme sind ebenfalls für konstante Abstände zur Reflexionsfläche ausgelegt und somit i.A. ungeeignet.

Umsetzung: Reflexionsmesssystem mit Differenzialanordnung

Das zur Lösung der o.g. Probleme entwickelte Lasermesssystem besteht für die Messung der Verdrehung und der Verschiebung jeweils aus 4 Einzelsensoren in Differenzialanordnung. Dabei sind 2 Sensoren gegenüberliegend angeordnet und besitzen bezüglich des Reflexionsmusters dieselbe Phasenlage, siehe Abbildung 7. Die Signale beider Sensoren eines solchen Paares werden zu einem Gesamtsignal addiert, sodass bei radialer Verschiebung des Rotors die entstehenden Abweichungen der Signalstärken der Einzelsensoren teilweise kompensiert werden, vgl. Tabelle 2 und Abbildung 7. Beide Sensorpaare sind um 90° phasenverschoben angeordnet, um möglichst gute Rekonstruierbarkeit des Winkels

bzw. der Verschiebung des Musters aus den beiden Summensignalen zu erreichen. Anzumerken ist, dass eine Verschie-

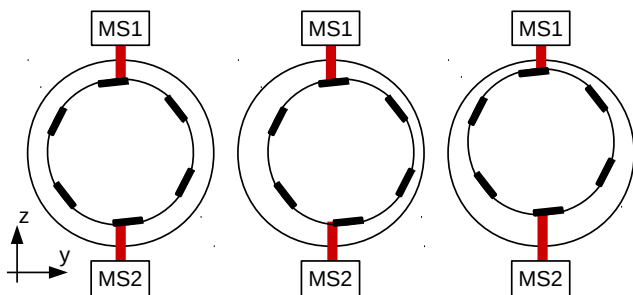


Abbildung 7. Differenzialanordnung für die Messung des axialen Rotorwinkels

Tabelle 2. Kompensationswirkung der Differenzialanordnung

Rotorlage	(0, 0)	(+Δy, 0)	(0, +Δz)
Amplitude Messsystem 1		+ΔU ₁	+ΔU ₁
Amplitude Messsystem 2		-ΔU ₂	-ΔU ₂
Amplitude gesamt	U	≈ U	≈ U

bung des Rotors um (Δy, 0) nur für den in Abbildung 7 dargestellten speziellen Rotorwinkel am besten kompensiert wird - jedoch geht der entstehende Fehler auch nur in diesem Fall am stärksten in den rekonstruierten Winkel ein. Ein Grundwellenmodell für den rekonstruierten Winkel $\hat{\varphi}$ in Abhängigkeit der einer beliebigen seitlichen Verschiebung, die zu einem Fehler (a, b) beliebiger Richtung in den beiden Summensignalen führt, lautet:

$$\hat{\varphi}(\varphi, a, b) = \text{atan2}(A(\varphi, a), B(\varphi, b)) \quad (9)$$

mit:

$$A(\varphi, a) := \frac{1}{2} (\cos(\varphi + a) + \cos(\varphi - a)) \quad (10)$$

$$B(\varphi, b) := \frac{1}{2} (\sin(\varphi + b) + \sin(\varphi - b)) \quad (11)$$

Darin sind A und B die vom Offset befreiten Summensignalstärken der beiden Sensorpaare und φ der reale Rotorwinkel. Die Empfindlichkeit ε berechnet sich nun wie folgt:

$$\varepsilon(\varphi) = \left. \left(\frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial a} \right) \right|_{a=b=0} = \left. \left(-B \frac{\partial A}{\partial a} + A \frac{\partial B}{\partial a} \right) \right|_{a=b=0} \equiv 0 \quad (12)$$

Wegen der Orthogonalität der beiden Summensignale funktioniert die Kompensation in erster Näherung vollständig für beliebige Rotorwinkel φ und ermöglicht somit eine Entkopplung von den Messachsen des kapazitiven Messsystems.

Ein Prinzipschaltbild eines Einzelsensors im Gesamtsystem ist in Abbildung 8 dargestellt.

Im Mikroprozessor der Auswerteeinheit wird ein Taktsignal erzeugt, welches in eine Sinusspannung gewandelt wird,

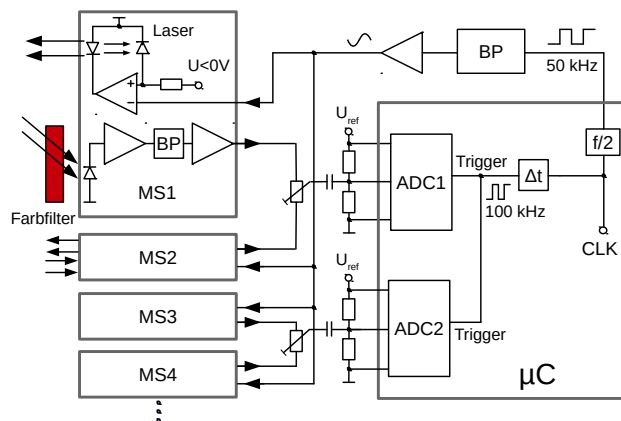


Abbildung 8. Prinzipschaltung Laser-Messsystem

die alle Einzelmesssysteme als Träger versorgt. Im Einzelmesssystem erzeugt eine über die Monitordiode leistungs-geregelte Laserdiode einen Lichtstrahl mit trägerfrequent modulierter Leistung, welcher kollimiert auf die Reflexionsfläche trifft. Das gestreute Licht wird von einer Fotodiode mit vorgeschaltetem Farbfilter aufgenommen. Deren Signal wird über einen Transimpedanzverstärker verstärkt und über einen nachgeschalteten, auf den Träger abgestimmten Bandpass von Störanteilen befreit wird. Die Ausgänge zweier Einzelmesssysteme eines Paares werden über ein Potentiometer zusammengeführt, um mit wenig Aufwand eine Mittelung der Signale mit justierbarer Wichtung zu erreichen. Das so gemischte Summensignal wird über einen Hochpass dem A/D-Wandler des Prozessors zugeführt. Dieser demoduliert und digitalisiert schließlich, indem im Maximum und im Minimum des Signals jeweils eine Abtastung erfolgt und deren Differenz gebildet wird. Die Phasenverschiebung zwischen Trigger und Ausgangssignal eines Messsystems ist konstant und wird einmalig digital im Mikroprozessor justiert (vgl. Δt in Abbildung 8). Die Rekonstruktion des Rotorwinkels erfolgt über die Anwendung der atan2-Funktion auf die Werte von ADC1 und ADC2. Bei Bedarf kann das Winkelsignal nach Ausführung der atan2-Funktion digital entzerrt werden über eine hinterlegte statische Übertragungsfunktion. Somit lässt sich die Linearität des Messsystems erhöhen unter Beibehaltung der Amplitudeninvarianz der Summensignale A und B.

Durch die Wahl einer relativ hohen Trägerfrequenz von 50 kHz und des Farbfilters wird der Fremdlichteinfluss stark verringert. Die Synchronabtastung ermöglicht eine einfache Demodulation mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit. Der demodulierte Wert steht bereits nach einer Periodendauer des Trägers zur Verfügung und es werden gegenüber gewöhnlichen Demodulatoren keine weiteren Tiefpässe oder Integratoren benötigt. Durch die Leistungsregelung des Lasers wird eine weitgehend störunabhängige konstante Amplitude der optischen Leistung erreicht. Zudem arbeitet die Empfänger-Fotodiode über den Transimpedanzverstärker im Quasi-Kurzschluss und somit sehr linear.

Das Lasermesssystem wurde erfolgreich an einem Versuchsaufbau eines lagerlosen reluctanten Rotations-Linear-motors in Betrieb genommen und ermöglichte eine

stabile Regelung des Motorvorschubs. Messungen zur Genauigkeit und Dynamik des Lasermesssystems an sich stehen aufgrund des hohen Aufwands noch aus.

Fazit und Ausblick

Es wurde ein kapazitives Mehrachs-Abstandsmesssystem mit neuartiger mehrfach differenzieller Sensorik und Auswertung entwickelt, vermessen und an einem Versuchsstand zum lagerlosen reluktanten Rotations-Linearmotor in Betrieb genommen. Dieses zeichnet sich durch hohe Rausch- und Stör-Abstände aus. Es wurde nachgewiesen, dass die differenzielle Wirkungsweise bis in den einstelligen MHz-Bereich gegenüber einem Single-ended-Verfahren deutliche Vorteile besitzt. Die sehr hohe Trägerfrequenz unterstützt die Störfestigkeit bis hin zu hohen Frequenzen. Für die Hauptbewegungsachsen eines lagerlosen Rotations-Linearmotors wurde ein inkrementelles Laser-Messsystem entwickelt. Es konnte theoretisch gezeigt werden, dass durch die entwickelte Differenzialanordnung mehrerer Einzelsensoren in erster Näherung eine Kompensation von radialen Verschiebungen des Rotors erfolgen kann. Somit sind die Messachsen von kapazitivem und optischem Messsystem gut voneinander entkoppelt. Weitere Messungen hinsichtlich Dynamik und Genauigkeit des optischen Messsystems sind geplant.

Danksagung

Das Projekt „Lagerloser reluktanter Rotations-Linearmotor“ wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen einer Sachbeihilfe (GZ: WE 4347/4-1) gefördert, wofür gedankt wird.

Literatur

1. E. Hering, G. Schönfelder, „Sensoren in Wissenschaft und Technik“, ISBN 978-3-8348-0169-2, Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
2. R. Haberland, „Kapazitiver Abstandssensor“, Kaiserslautern, deutsches Patent DE 000003734715 A1, 1987.
3. Fa. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG, 94496 Ortenburg, „Kapazitive Sensoren für Weg, Abstand & Position“, Firmenschrift, 2015.
4. A. Schleicher, R. Werner, „Differenzielles kapazitives Mehrachs-Abstandsmesssystem für Umgebungen mit elektromagnetischen Störungen“, tm - Technisches Messen, 84(4), S. 241-250, doi:10.1515/teme-2016-0049.