

Robuste xMR-Sensoren für die Automatisierungstechnik

Jörg Traute¹, Dr. Frederick Casper², Dr. Johannes Paul²

¹Sensitec GmbH, Lahnau, Deutschland

²Sensitec GmbH, Mainz, Deutschland

Zusammenfassung

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojekts MoSeS-Pro hat sich die Sensitec GmbH mit zwei Aufgaben beschäftigt. Zum einen wurde ein xMR-Sensor mit Self-X Funktionen entwickelt und hergestellt. Ähnlich wie Lebewesen sich selbst untersuchen und reparieren, kann dies auch auf MR-Sensoren übertragen werden. Im Projekt wurde ein TMR-Feldsensor entwickelt, der durch geeignetes Design und Zusatzfunktionen in Verbindung mit einem Steuerungs-Chip (z. B. einem ASIC) über Self-X Funktionen verfügt. Weiter wurde ein Spindelachsenprüfstand mit insgesamt vier verschiedenen Sensortypen zur Zustandsüberwachung ausgestattet. Damit konnten an den elektromechanischen Spindelachsen Motorströme sowie rotative und lineare Bewegungen der Kolbenstange gemessen werden. Zudem konnte eine Kugeldetektion direkt am Kugelgewindetrieb der Spindelachse umgesetzt werden. Die MR-Sensoren zeigten dabei durch die hohe Bandbreite und Ortsauflösung auch höhere harmonische Signalanteile, die wichtige Informationen für die Zustandsüberwachung der Achse liefern.

Keywords: xMR-Sensor, Self-X Funktion, Zustandsüberwachung, Kugeldetektion

1. Einleitung

Im Zukunftsprojekt Industrie 4.0 bietet sich heute die Chance, über eine intelligente Steuerung und Vernetzung die Flexibilität, die Energie- und die Ressourceneffizienz von Produktionsprozessen auf eine neue Stufe zu heben. Elektronik und Sensorik, die zu den Stärken gerade auch kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) in Deutschland zählen, spielen dabei eine Schlüsselrolle. Eingebaut in Antriebe und Positionierungssysteme ermöglichen sie schnelle und präzise Fertigungsprozesse, deren Ablauf in Echtzeit überwacht und angepasst werden kann. Die Sensorsysteme müssen hierzu jedoch auf die genauen Anforderungen der Anwendung hin entworfen und aufgebaut werden [1]. Die Sensitec GmbH hat beim BMBF Projekt MoSeS-Pro zwei Hauptaufgaben übernommen. Zum einen wurde ein xMR-Sensor mit Self-X Funktionen entwickelt und hergestellt, zum anderen wurde ein Prüfstand für elektromechanische Spindelachsen mit verschiedenen xMR-Sensoren zur Zustandsüberwachung ausgestattet. xMR steht als Platzhalter für die verschiedenen magneto-resistiven (MR) Effekte wie anisotroper MR-Effekt (AMR), Giant Magneto Resistance (GMR) und Tunneling Magneto Resistance (TMR), die derzeit für Sensoranwendungen industriell genutzt werden. Tab. 1 und Abb. 1 geben einen Überblick.

Tab. 1: Industrielle XMR-Technologien im Vergleich.

	AMR	GMR Spin Valve	TMR
Signalstärke	< 4 %	< 15 %	< 200 %
Stromrichtung	parallel zu aktiver Schicht	parallel zu aktiver Schicht	senkrecht zu aktiver Schicht

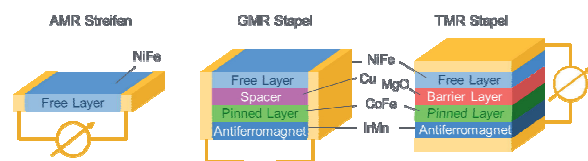


Abb. 1: xMR-Technologien in vereinfachter Darstellung.

Bei magneto-resistiven Sensoren ändert sich der Widerstand linear zum angelegten Feld.

2. Self-X Funktionen

Bei MR Sensoren ist das Ausgangssignal temperaturabhängig, d.h. es sinkt mit steigender Temperatur. Dieser Temperatureffekt ist nicht von einem Feldeffekt zu

unterscheiden, weswegen entweder mit einem zusätzlichen Temperatursensor oder einer temperatur-unabhängigen Kalibration gearbeitet werden muss. Außerdem könnte sich das Signal aufgrund von Langzeit-Drift verändern, was wieder die Messunsicherheit vergrößert. Durch das Anlegen eines bekannten Magnetfelds am Sensor könnte dieser in Echtzeit kalibriert werden und wäre dadurch unabhängig von oben genannten Einflüssen.

Sensordesign

Ein neues Design für TMR-Sensoren wurde entworfen, um ein definiertes Test-Feld am Sensor anlegen zu können. Dies wird realisiert über eine Kupferspule, die oberhalb der sensitiven Elemente verläuft. Ein definierter Strompuls führt dadurch zu einem definierten Feld am Sensor. Abbildung 2 zeigt das prinzipielle Design des Sensors.

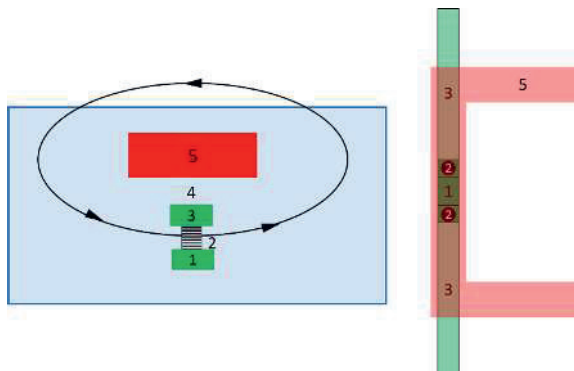


Abb. 2: Schematischer Blick von der Seite (links) und von oben (rechts) des Sensors. Der Sensor besteht aus einer unteren und oberen Elektrode (1 und 3), einem TMR Element (2) und einer durch ein dielektrisches Material (4) abgetrennten Stromspule (5). Die Pfeile geben die Richtung des Magnetfelds an, das durch die Spule erzeugt wird.

Hierbei wird eine Stromspule über die Sensorelemente platziert, wobei beide durch ein dielektrisches Material getrennt sind. Für die Spule werden auch zwei zusätzliche Versorgungspads benötigt. Das durch die Stromspule erzeugte magnetische Feld ist parallel zur Chipoberfläche. Im Falle einer Temperaturänderung ändert sich das durch die Stromspule erzeugte Feld nicht, da dieses nur vom Strom abhängt und dem Abstand zwischen der Spule und der Sensorbrücke. Die durch die Temperatur verursachte Abstandsänderung ist dabei in dem Temperaturbereich von -40°C - 125°C nicht signifikant weswegen dieser Effekt vernachlässigt werden kann ($<0,01\%$).

Durch das Anlegen eines AC-Stroms mit bekannter Amplitude wird ein entsprechendes AC-Feld mit bekannter Feldamplitude generiert, dass dann zu einem Sensorsignal führt, das mit der Feldstärke korreliert werden kann. Dadurch kann der Sensor unabhängig von Temperatur und Langzeit-Drift sehr einfach kalibriert werden.

Zusätzlich kann über die Spule auch eine Self-Repair-Funktion installiert werden, wenn z.B. der Sensor nach einem Störfeldpuls in einen Hysteresezustand geht und ein falsches Signal liefert. Zum Testen dieser Funktion des Sensors wurde ein Versuchsssetup aufgebaut, um folgende Messsequenz durchzuführen:

1. Sensor im hysteresefreien Zustand betreiben ($B \leq 20 \text{ mT}$)
2. Störfeld $\gg H_{\text{exp}}$ ($\gg 20 \text{ mT}$) anlegen
⇒ Sensor mit Hysterese
3. Störfeld wieder entfernen, weiter Feld um $10 - 12 \text{ mT}$ anlegen
⇒ Sensor immer noch mit Hysterese
4. Reset-Puls auf Sensorspule geben
⇒ Sensor nach Reset wieder im hysteresefreien Zustand

Abb. 3 zeigt den Verlauf des Sensorsignals nach den einzelnen Versuchsschritten. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass der Sensor nach dem Störpuls ein deutlich anderes Signal liefert. Dieses wird jedoch durch den Resetpuls wieder auf den ursprünglichen Signalverlauf gebracht.

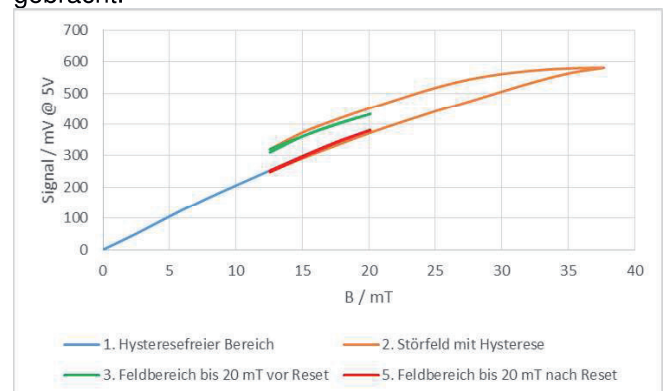


Abb. 3: Sensorsignal vor/ nach Störfeldpuls und Resetpuls

3. Zustandsüberwachung

Innerhalb des MoSeS-Pro Projekts wurde ein Prüfstand zur Zustandsbewertung von elektromechanischen Spindelachsen neben anderen mit verschiedenen MR-Sensoren von Sensitec ausgestattet. Hauptziel war es, dass der Projektpartner ZeMA Saarbrücken auf diesem Prüfstand unter beschleunigten Testbedingungen Lebensdauer-Tests durchführen und dabei den modularen Sensorbaukasten erproben konnte [2].

Tab. 2: MR-Sensoren im Prüfstand für Spindelachsen

Nr.	Messgröße	Sensor
1	Motorstrom	CMS 2005
2	rotative Bewegung der Kolbenstange	AL780 mit Stützmagnet
3	lineare Bewegung der Kolbenstange	GL715
4	Kugel-Detektion am Kugelgewindetrieb	GL713

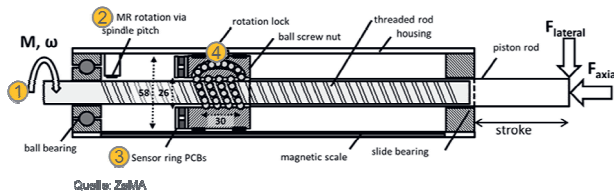


Abb. 4: vereinfachter Querschnitt einer elektromechanischen Spindelachse mit Messstellen für MR-Sensoren [2].

Motorstrom

Anforderungen an den Stromsensor waren Messung von 3 Phasen im Strombereich 0 - 20 A und Frequenzbereich 0 - 1000 Hz. Abb. 5 zeigt erste Messergebnisse im Zeitbereich mit dem MR-Stromsensor CMS2005. Dabei wurden auf eine im Prüfstand montierte Achse veränderliche axiale Lasten eingepreßt, die zu einer Änderung im Stromsignal führen (Bild 5a). Es zeigt sich, dass das Strommessprinzip mit MR Sensoren bedingt durch die hohe Bandbreite der Sensoren auch in der Lage ist, höhere harmonische Anteile im Signal abzubilden, die wichtige Informationen für die Zustandsüberwachung der Achse liefern. Dies ist auch in Abb. 6 zu sehen, die das Frequenzspektrum für eine Phase bei konstanter Geschwindigkeit zeigt.

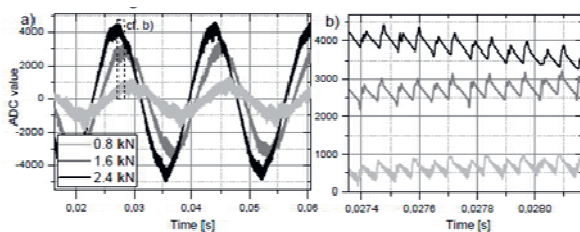


Abb. 5: a) Sinusförmiges Signal des Motorstroms für eine Phase bei verschiedenen eingepreßten axialen Lasten auf der Achse, b) Ausschnitt Stromsignal, kurzperiodische Anteile erzeugt durch Puls-Weiten-Modulation des Frequenzumrichters [2].

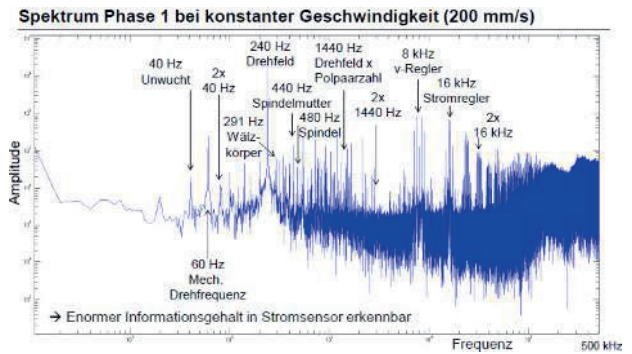


Abb. 6: Amplitudenspektrum des Motorstroms mit Zuordnung der mechanischen und elektrischen Frequenzen beim Betrieb der Spindelachse [3].

Rotative Bewegung der Kolbenstange

Das Konzept für diese Messung war, die bereits auf der Spindelachse vorhandene Zahnstruktur als Maßverkörperung zu nutzen. Die Zahnstruktur hat eine Teilung von 5 mm und eine Steigung von 10 mm, d. h. eine Umdrehung der Achse führt zu einer Auslenkung der Kolbenstange um 10 mm. Der ausgewählte polangepasste AMR-Längensensor AL780 wird normalerweise mit aktiven hartmagnetischen Maßstäben eingesetzt, auf die 5 mm lange Pole mit wechselnder Ausrichtung geschrieben sind. Kombiniert man den Sensor mit einem Hilfs- oder Stützmagnet, ist er auch in der Lage, weichmagnetische Zahnstrukturen abzutasten. Die Zähne modulieren das Magnetfeld des Hilfsmagneten, der Sensor wertet die durch die Zähne verursachten Feldänderungen aus. Maßverkörperungen dieser Art bezeichnet man als passive Maßstäbe.

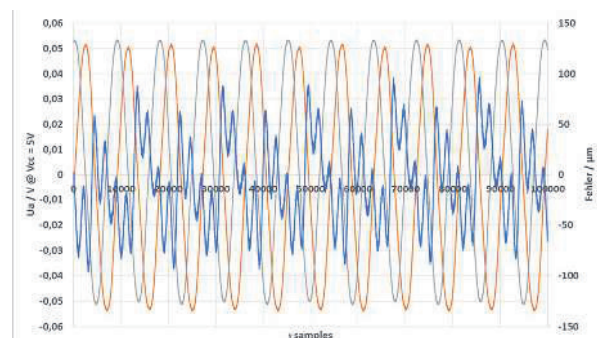


Abb. 7: Messergebnisse mit dem Sensor AL780 bei rotativer Bewegung.

Abb. 7 zeigt typische Messkurven bei einem Arbeitsabstand von 100 µm zwischen Sensor und Zahnstruktur. Die Sensorsignale haben eine Amplitude von 50 mV bei 5 V Versorgungsspannung, der Fehler liegt im Bereich ±100 µm.

Um den Sensor im Gehäuse der Achse zu integrieren, wurde ein Sensorträger konstruiert. Mit diesem Träger kann die Sensor-Position relativ zum Magnet und zur Spindelachse eingestellt werden, um die Sensor-Signale bezüglich Amplitude und Fehlerverhalten zu optimieren.

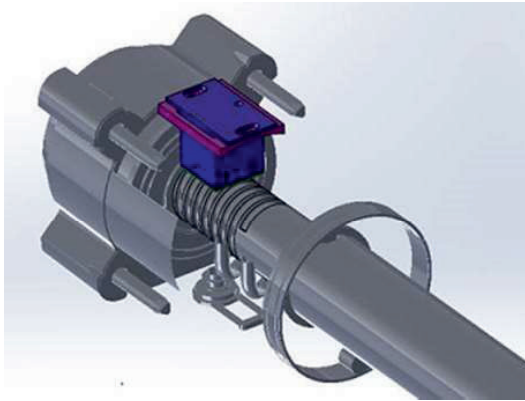


Abb. 8: 3D-Ansicht des Sensorträgers für die rotative Messung.

Lineare Bewegung der Kolbenstange

Zur Detektion der linearen Bewegung wurde eine ferromagnetische Zahnstange mit einer Zahnteilung von Modul 0,5 mm in eine vorhandene Nut des Spindelgehäuses eingesetzt. Der Zahnsensor GLM715 ist in einem SMD-Gehäuse aufgebaut und hat einen integrierten Stützmagnet zum Magnetisieren der Zahnstruktur und Vorhalten eines Stützfilds für den Sensor (Abb. 9). Der Sensor wurde beim Projektpartner ZeMA auf einer externen Sensorplatine in der elektro-mechanischen Spindelachse eingebaut (Abb. 10). Messergebnisse zeigt Abb. 11.

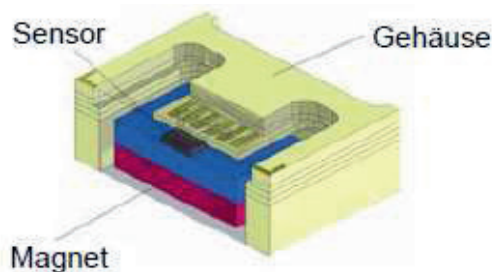


Abb. 9: Ansicht GMR-Zahnsensor GLM715 im SMD-Gehäuse mit Stützmagnet.

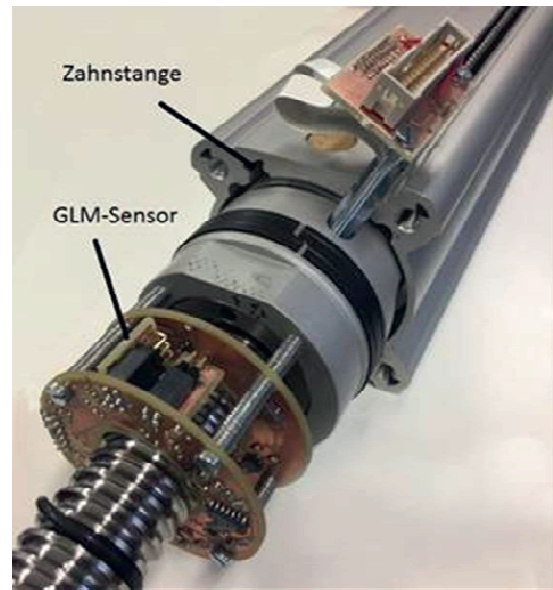


Abb. 10: Messung der linearen Bewegung mit Zahnsensor GLM715 und Zahnstange für Modul 0,5 mm [3].

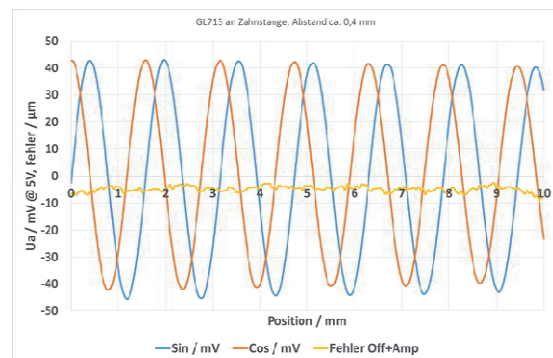


Abb. 11: Sensorsignale und Positionsfehler mit dem Zahnsensor GLM715 bei linearer Bewegung und einem Arbeitsabstand von 0,4 mm. Der Positionsfehler beträgt $\pm 10 \mu\text{m}$.

Kugel-Detektion am Kugelgewindetrieb

Ein weiterer Bestandteil für die Zustandsüberwachung ist der Kugelgewindetrieb (KGT).

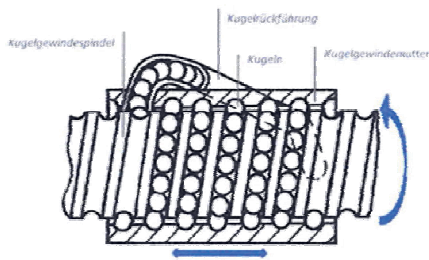


Abb. 10: Schnittbild eines Kugelgewindetriebs mit Umlenkrohr für die Kugelrückführung.

Am Umlenkrohr eines KGT sollen mit MR-Sensoren die durchlaufenden Kugeln erfasst werden nach Volumen (Form), Geschwindigkeit, Anzahl und Frequenz. Die Kugeln in der ausgewählten Spindel-Achse haben einen Durchmesser von 3,5 mm. Über Lebensdauer wird eine Verringerung des Durchmessers durch Verschleiß um 0,2 mm erwartet. Stand der Technik bei der Zustandsüberwachung von KGT sind akustische Untersuchungen.

Idee zum Detektieren der Kugeln war, die im Umlenkrohr aufgereihten Kugeln als Zahnstruktur aufzufassen. Für den Test wurde ein GMR-Zahnsensor vom Typ GLM713 ausgewählt. Der Sensor ist ausgelegt für eine 3 mm Zahnteilung, was nah am Durchmesser der Kugeln liegt. Der Sensor ist genauso wie der bereits vorgestellte GLM715 in einem SMD-Gehäuse aufgebaut mit integriertem Stützmagnet.

Für einen ersten Test wurde der Sensor auf das Umlenkrohr eines KGT gesetzt (Abb. 11), die Achse bewegt und Messkurven aufgenommen. Die Signale liegen im Bereich 100 μ V bei 5 V Sensor-Versorgungsspannung. Grund für die niedrige Signalstärke ist das Material und die Wandstärke des Umlenkrohrs. Es besteht aus magnetischem Werkzeugstahl, die Wandstärke liegt bei 0,5 mm. Damit schirmt das Rohr die Modulation des Magnetfelds durch die Kugeln stark ab, die Signale haben nur sehr kleine Amplituden (Abb. 12).

Nach Rücksprache mit dem Hersteller der KGT wurde die Wandstärke des Rohrs im Bereich, wo der Sensor platziert wird, von 0,5 mm auf 0,1 mm abgedünnt. Eine typische Messkurve mit einem bearbeiteten Umlenkrohr zeigt Abb. 13. Zu sehen ist ein Sensorsignal beim

Durchgang einer Kugel. Die Signalamplitude ist mit ca. 20 mV bei 5 V Sensor-Versorgungsspannung um Faktor 200 höher im Vergleich zur Messung am KGT mit nicht bearbeitetem Umlenkrohr.

Die prinzipielle Eignung, Kugeln in der Spindelachse zu detektieren, wurde damit nachgewiesen. In weiteren Versuchen soll evaluiert werden, ob weitere Merkmale wie Änderungen bei Form und Durchmesser der Kugeln, Frequenz und Geschwindigkeit erkannt werden können.

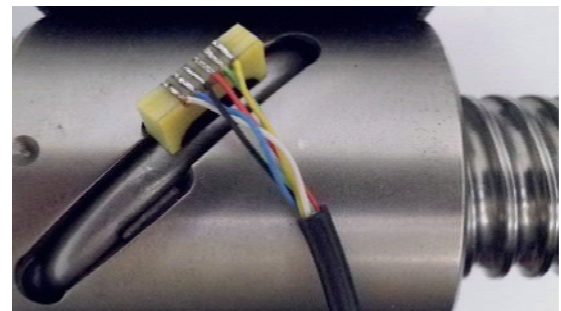


Abb. 11: GMR Zahnsensor GLM713 am Umlenkrohr des Kugelgewindetriebs.

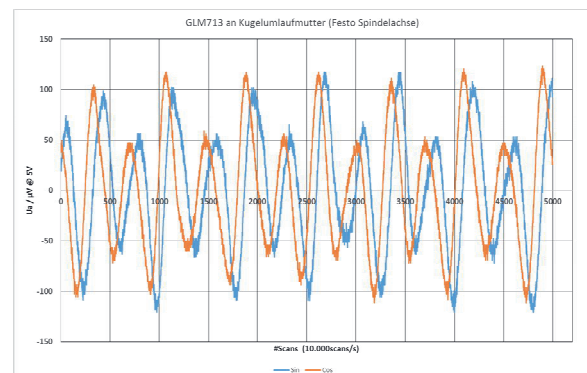


Abb. 12: Messkurven mit GLM713 am unbearbeiteten Umlenkrohr. Signalamplitude 100 μ V bei $U_b = 5$ V.

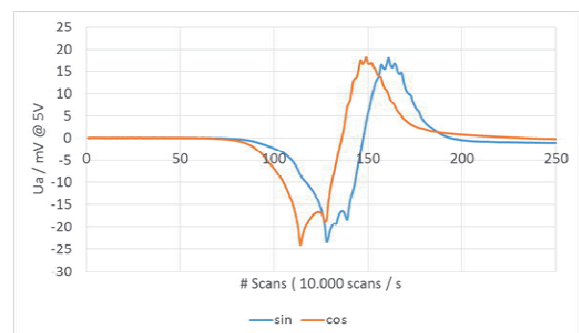


Abb. 13: Messkurven mit GLM713, Wandstärke des Umlenkrohrs auf 0,1 mm abgedünnt. Signalamplitude ca. 20 mV bei $U_b = 5$ V.

Abb. 14 und 15 zeigen Messungen mit dem Zahnsensor GLM713 am Kugelumlenkrohr, die auf dem Spindelachsenprüfstand von ZeMA aufgenommen wurden. Beim Vergleich der beiden Bewegungsrichtungen im Frequenzbereich in Abb. 15 sind Unterschiede zwischen den Bewegungsrichtungen zu sehen. Dies deutet auf ein unterschiedliches Laufverhalten der Kugeln bei Vor- und Rückhub hin.

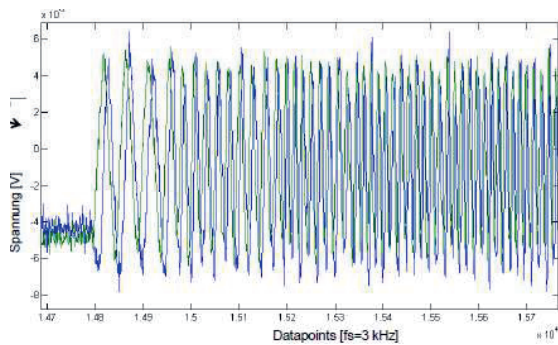


Abb. 14: Messergebnisse im Zeitbereich auf dem Spindelachsenprüfstand. Signale 5 mV mit abgeglichenem Offset bei Rohrwandstärke 0,1 mm [3].

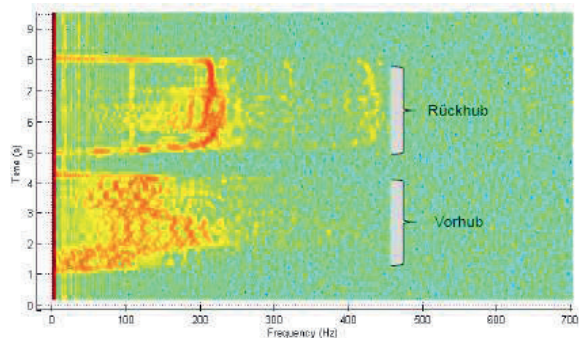


Abb. 15: Messergebnisse im Frequenzbereich auf dem Spindelachsenprüfstand getrennt nach Vor- und Rückhub [3].

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben Moses-Pro wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16ES0423 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literaturnachweis

- [1] Verbundprojekt MoSeS-Pro, Modulare Sensorsysteme für Echtzeit-Prozesssteuerung und smarte Zustandsbewertung, <https://moses-pro.de/>, abgerufen am 15.04.2019
- [2] N. Helwig, T. Schneider und A. Schütze, MoSeS-Pro: Modular Sensor Systems for Real Time Process Control and Smart Condition Monitoring using XMR-Technology, 14th Symposium Magnetoresistive Sensors and Magnetic Systems, Wetzlar, 2017
- [3] ZeMA gGmbH, Präsentation Projekttreffen MoSeS-Pro, Duisburg, 2017