

Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt

„Monitoring Dynamic Seal“, (MDS) - Intelligente Dynamische Dichtung“

Vorgangsnummer: ZS/2019/01/96804

Laufzeit: 12/2019 – 07/2022

Ziel des Vorhabens

FuE-Problem

Gesamtziel des Vorhabens ist es, hochwertige und komplexe dynamische Gleitringdichtungen im Preissegment von mehreren Tausend EURO mit Sensorik für die Eigen- und Prozessdiagnose auszustatten. Bisherige, am Markt verfügbare Gleitringdichtungen sind in ihrem Aufbau nicht für derartige diagnostische Aussagen geeignet. Das geplante Vorhaben stellt sich diesem FuE-Problem und strebt die Neukonzipierung und Realisierung von Gleitringdichtungen mit funktionaler Erweiterung durch Implementierung geeigneter, technologisch-applikationsbezogener Messtechnik an.

Die Umsetzung erfolgte als Verbundvorhaben der Otto-von-Guericke Universität (OvGU) Magdeburg, Lehrstuhl Messtechnik und einem kmU Partner. Dabei wird OvGU ein für robuste, technologische Einsatzbedingungen der dynamischen Dichtung geeignetes Sensorik-Konzept erarbeiten und an dessen Einbindung in das Dichtungskonzept mitwirken. Der kmU Partner übernimmt die Konzeption, Realisierung und iterative Optimierung der für die Zielapplikationen geeigneten Musterdichtung inklusive eingebetteter Sensorik.

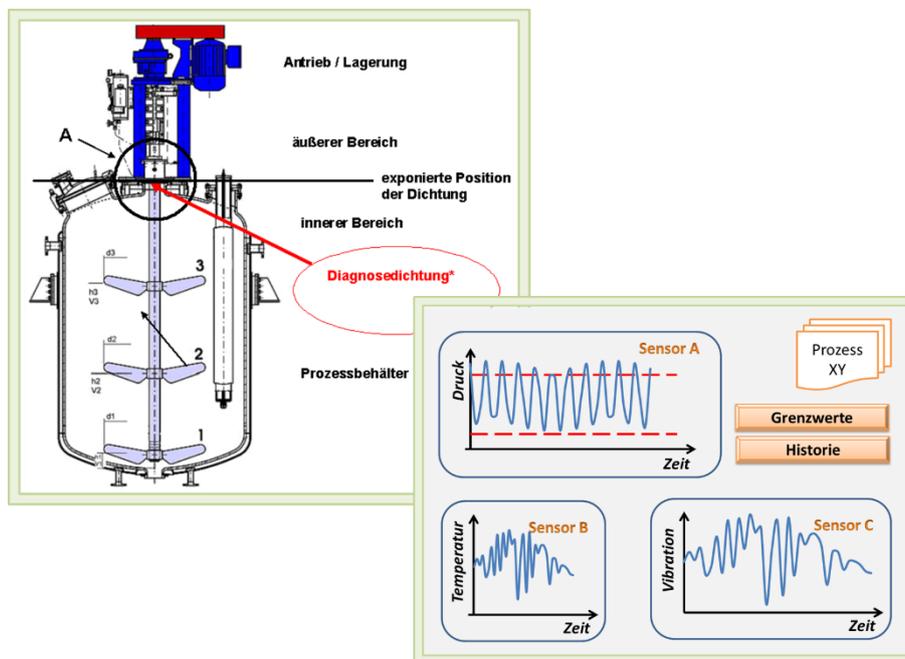


Abbildung 1: Verknüpfung von Dichtungstechnologie und Prozessbeobachtung. Die Diagnosedichtung (*) als „Fenster“ zum Prozess kann sowohl die Prozessführung im Behälter als auch das Antriebs- und Lagersystem überwachen.

Ergebnisse

OvGU

Für die Einbindung von Sensorik in eine exemplarisch in den Projektmittelpunkt gestellte dynamische Gleitringdichtung und im Hinblick auf die Absicherung der erforderlichen Dicht- und Sensorfunktionalität wurden als wesentliche Messgrößen und avisierte Sensorprinzipien zur weiteren Erprobung und Test auf Eignung festgelegt:

- Schmiermittelüberwachung: Verschmutzung mit Abrieb → optisch (LED+Fotodiode, Lichtwellenleiter)
- Schmiermittelüberwachung: Feuchte → kapazitiv, Leitfähigkeit
- Temperatur → thermoresistiv
- Axialer und radialer Wellenversatz → Hallsensoren
- Drehzahl → Hallsensoren
- Winkelverstellung → Hallsensoren

Aus der Übersicht marktverfügbarer Sensoren wurde relativ deutlich, dass kommerzielle Sensoren nicht für alle Aufgaben zur Verfügung stehen. Es musste daher ein Weg gefunden werden, die geforderten Kriterien an die intelligente Dichtung unter Wahrung der Zielmessgrößen und möglichst keiner Eigenentwicklung zu erfüllen. Beide Partner waren während der gesamten Laufzeit aktiv und in engem Austausch in die Findung von Sensorkomponenten und die Bewertung von Optionen zur Einbettung in die Dichtung (auch unter der Maßgabe, dass der Partner später die Sensoren ohne Unterstützung der OvGU fertigt) involviert.

Der Laborversuchsstand umfasst einen Messring (Polyoxymethylen, $\varnothing 60\text{mm}$), gefertigt aus zwei Halbsegmenten mit integrierten planaren Leiterplatten und zur Installation auf dem statischen Teil der Gleitringdichtung vorgesehen. Enthalten sind 4 Hallsensoren, um 90° zueinander versetzt, die die Lageerkennung der rotierenden Welle (mit integriertem Magneten) relativ zum Stator erfassen sollen. Ein weiterer Hallsensor dient der Drehzahldetektion. Zusätzlich wurde ein Temperatursensor integriert.

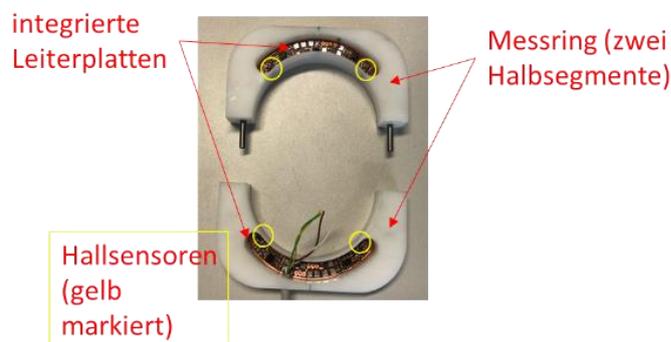


Abb. 1: Aus zwei Halbschalen bestehender Messring mit integrierten Leiterplatten zur Erfassung und Vorverarbeitung der Messdaten (Hallsensoren, Temperatur).

Eine die Dichtung simulierende Anordnung zeigt die folgende Abbildung. Der statische Messring (zwei Halbschalen) umfasst eine drehbar gelagerte Achse (mit integriertem Magnet). Die Lagefehler-Simulation wird am Teststand mittels 2 Linearachsen in x- und z-Richtung sowie einer Verkippung praktisch am Messring realisiert und bildet relative Lageveränderungen zwischen Stator und Welle ab.

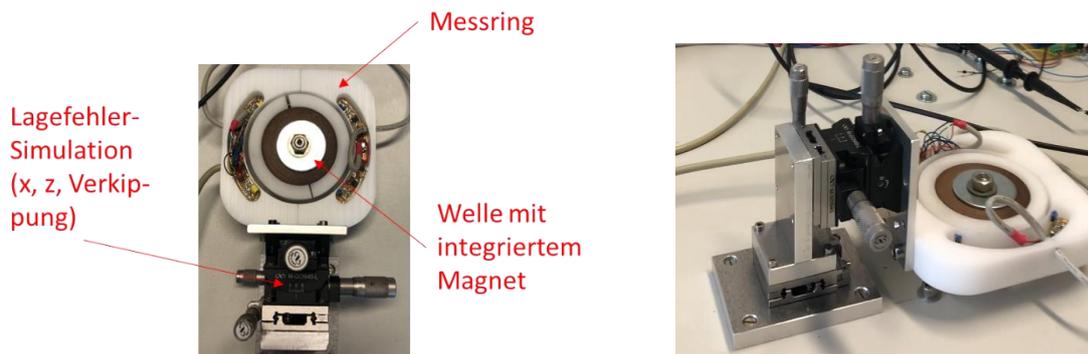


Abb. 2: Anordnung zur Erprobung (links: Ansicht von oben, rechts Seitenansicht).

Der Versuchsstand in Gänze umfasst die Anordnung aus rotierender Welle und statisch angeordnetem Messring, einer Lage-Anpassung, dem Motor zum Betrieb der Welle (einstellbare Drehzahl bis 300 min^{-1}), Oszilloskop zur Darstellung der Messdaten (Hallsensoren) sowie deren Verknüpfung zu einem Datenlogger.

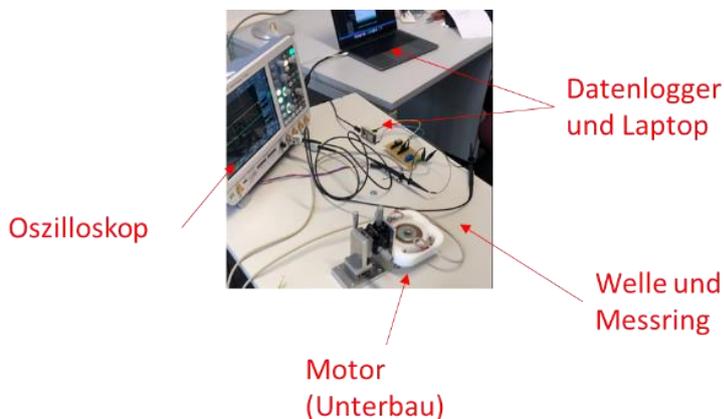


Abb. 3: Versuchsstand zur Lagedetektion der Welle relativ zum Stator (Messring).

Folgende Messverfahren kamen zum Einsatz:

Wellenversatz, Drehzahl, Winkelverstellung: Es wurden verschiedene Hallsensoren (1D/3D, analoger/digitaler Ausgang) evaluiert. Der Vorteil der dreidimensionalen Version ist die Detektierbarkeit von Verschiebungen in 3 Raumrichtungen mit nur einem Sensor.

Schmiermittelüberwachung – Abrieb (optisch): Streuverhalten an verschiedenen verschmutzten Fettproben

Schmiermittelüberwachung – Feuchte (Leitfähigkeitsmessung): eigenentwickelte Interdigitalstruktur ohne Dielektrikum

Schmiermittelüberwachung – Feuchte (kapazitiv): feuchtesensitives Dielektrikum als Sensorschicht

Zur Erfassung und Verarbeitung der Sensordaten wurde das Datenlogger-System ESP32 ausgewählt. Die Hardware, die Software und die Implementierungsaspekte für die Entwicklung eines Datenlogger-

Prototyps zur Datenerfassung werden nachfolgend zusammengefasst. Die Hardware des vorgeschlagenen Datenlogger-Prototyps besteht aus zwei ESP32 Mikrocontrollern, wobei ESP1 als Sender und ESP2 als Empfänger fungiert. Der erste ESP32 »ESP-1« liest die Sensoren und überträgt die Sensordaten an einen zweiten ESP32 »ESP-Server«. Dieser speichert die Daten und stellt sie als Server zu Verfügung. Die Abbildung 4 zeigt eine grafische Visualisierung und das funktionale Blockdiagramm.

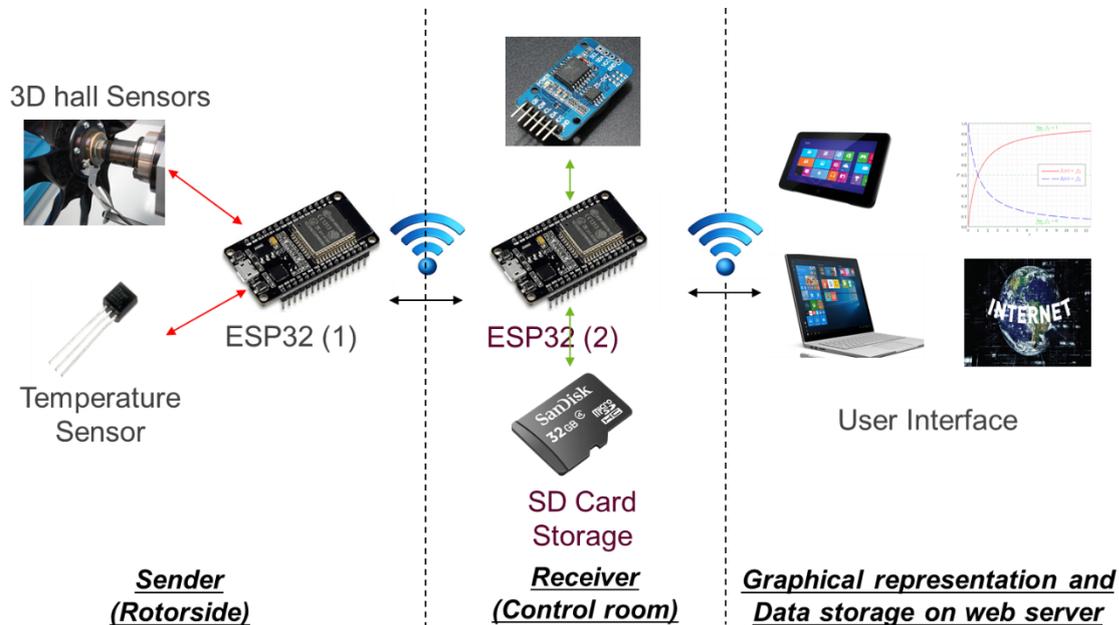


Abb. 4: Schematische Darstellung des Datenerfassungssystems

Von den beiden ESP32 müssen also verschiedene Aufgaben erfüllt werden. Diese sind:

- a) Magnetfeld-Flussdichtemessung
Um den Abstand zwischen Welle und Gehäuse zu ermitteln, wird eine Messung der Flussdichte durchgeführt. Die Flussdichte des Magneten lässt sich nur erfassen, wenn der Magnet sich unter dem Sensor befindet.
- b) Temperaturmessung
An den i²c Bus angeschlossener kommerzieller Sensor.
- c) Datenspeicher
Die Daten der Sensoren müssen auf einer SD-Karte gespeichert werden. Tagesweise werden Dateien angelegt. Das Zeitintervall, in dem Messungen gespeichert werden, ist einstellbar.
- d) Datei Server
Die gemessenen Daten müssen auch remote verfügbar sein. Dafür wird über Wifi eine Verbindung zum ESP32 aufgebaut, um anschließend über einen Server auf dem ESP32 die jeweilige Datei herunterladen zu können. Zusätzlich kann der ESP32 sich mit einem vorhandenen Netzwerk verbinden.
- e) Übertragung auf einen Datenspeicher über das Internet
Wenn sich der ESP32 in einem Netzwerk/Internet mit einem Zielsystem befindet, sollen die Daten auf diesen übertragen werden.

Im Laborversuchsstand wurde die Funktion der vier um 90° verteilten analogen Hallsensoren erprobt; die Daten sind in der nachfolgenden Abbildung 5 gezeigt. Die Sägezahn-Verläufe entstehen durch das Auslesen der Sensoren über ein kapazitives Interface, wobei der Kondensator auf den Maximalwert

geladen wird, sobald der Magnet am dichtesten am jeweiligen Hallsensor positioniert ist, und sich bis zum nächsten Mal (nach einer Umdrehung) entlädt. Die Drehzahl kann daraus ermittelt werden. Der erkennbare Anstieg/ Abfall der Kurven entsteht durch die Verschiebung des Messrings relativ zur Welle (in gleicher Ebene) und zeigt, dass ein Versatz anhand einer veränderlichen Hallspannung erkannt wird.

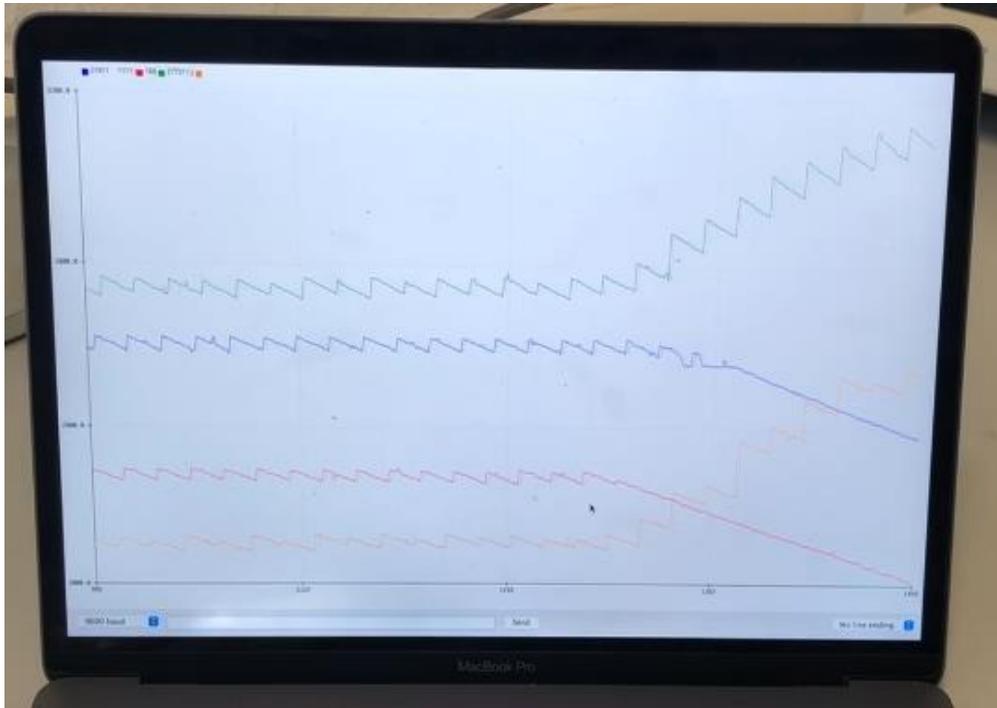


Abb. 5: Einzelsignale der 4 analogen Hallsensoren, ausgelesen mit ESP 32. Der Anstieg/ Abfall von je zwei Datenreihen ist auf eine Verschiebung der Welle relativ zum Messring (in gleicher Ebene) zurückzuführen.

Abgeleitet von den Messkurven wurden die Daten so verrechnet, dass die Position der vier Sensoren in kartesischen Koordinaten bzw. eine Verschiebung darstellbar sind. Zudem gab es einen Ansatz zur Ermittlung der z-Richtung, also Verschiebung aus der Ebene heraus. Die Daten sind nicht eindeutig, das heißt die Verschiebung als solche, aber nicht ihre Richtung (oben. Unten) erkannt werden kann.

Der eingebaute Temperatursensor konnte auf Funktionalität überprüft und an die Datenerfassung mit ESP 32 angebunden werden.

Die digitalen Hallensensoren sind auf einem identischen Messring in zweiter Ausführung wie auch die analogen Sensoren angeordnet (Abb. 6, 7). Die Überwachung der Position von Messring gegenüber rotierender Welle kann ebenfalls im laufenden Zustand erfasst werden. Die Software-Codierung ist dazu jedoch im Vergleich zu den analogen Sensoren anzupassen. Die Verschiebung in x-y ist in Abb. 8 dokumentiert.

Vorteilhafterweise sind pro digitalem Hallensensor alle drei Raumrichtungen messbar. Folglich kann auch die Verschiebung entlang der Wellenachse (z) erfasst werden – Abb. 9 dokumentiert das grafisch.

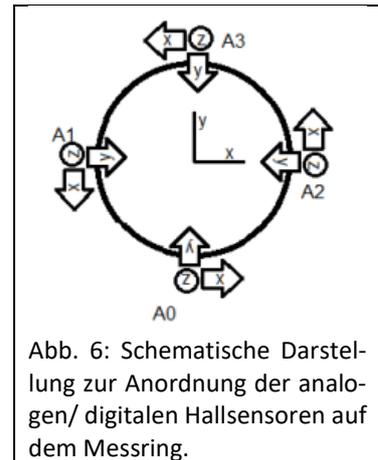


Abb. 6: Schematische Darstellung zur Anordnung der analogen/ digitalen Hallensensoren auf dem Messring.

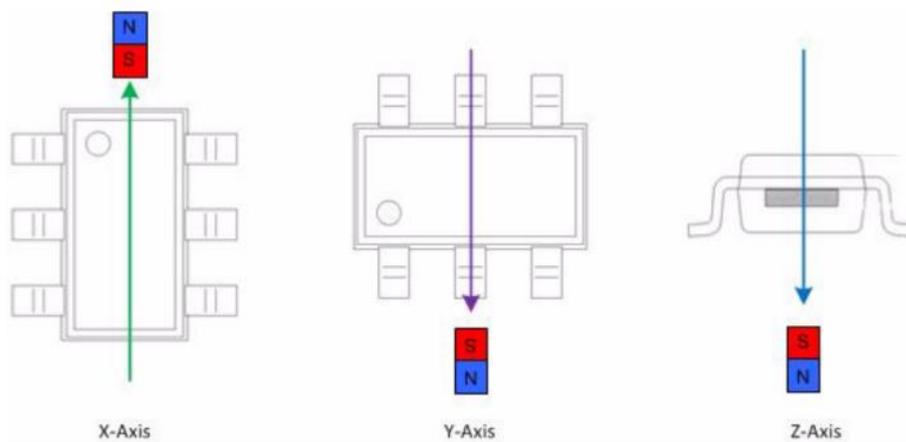


Abb. 7: Die magnetischen Richtungen in X, Y, Z des digitalen Hallensensors

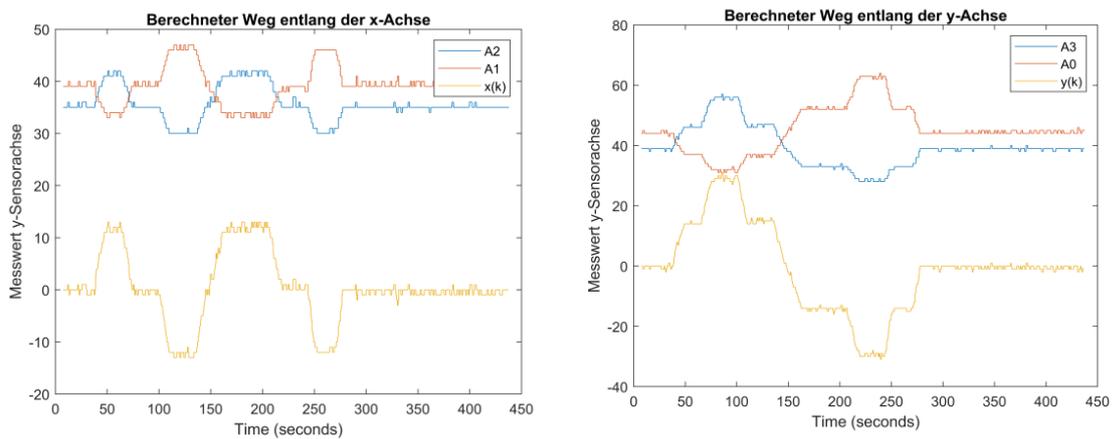


Abb. 8: Absolute und Differenzwerte der gegenüberliegenden Sensoren A1/ A2 bzw. A0/A3 zur Erfassung der Verschiebung in x- und y-Richtung

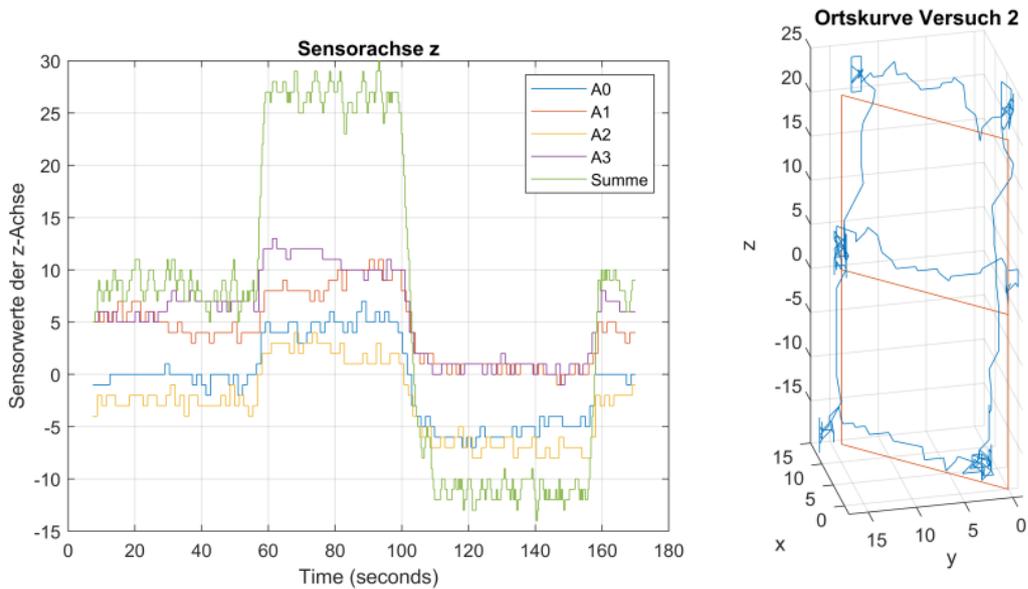


Abb. 9: Messdaten aller digitalen Hallensensoren und Summensignal bei Verschiebung entlang der Wellenachse (links) und Erfassung einer dreidimensionalen Bewegungsbahn (rechts).

Mit Hilfe der digitalen Hallensensoren wurden die weiterführenden Erprobungen durchgeführt, so dass eine Änderung der Position und letztendlich eine damit verbundene Fehlausrichtung innerhalb der Dichtung erkannt werden kann. Dabei steht nicht die Größe der Positionsänderung, sondern die Art und Eindeutigkeit des Versatzes im Vordergrund.

Arten der Fehlausrichtung

Bei Kupplungen von Wellen spricht man von drei Arten des Versatzes, die hier übernommen werden. Beim Parallelversatz sind die Achsen der zueinander ausgerichteten Bauteile Parallel. Der Abstand dieser parallelen Achsen wird radialer oder Parallelversatz (Abb. 10b) genannt. Winkelversatz (Abb. 10c) tritt auf, wenn die beiden Achsen nicht parallel sind. Der dritte Versatz, der auch eine translative Änderung darstellt, sich aber vom normalen Parallelversatz unterscheiden, ist der Axialversatz als Abstand der Bauteile in Längsrichtung (Abb. 10a).

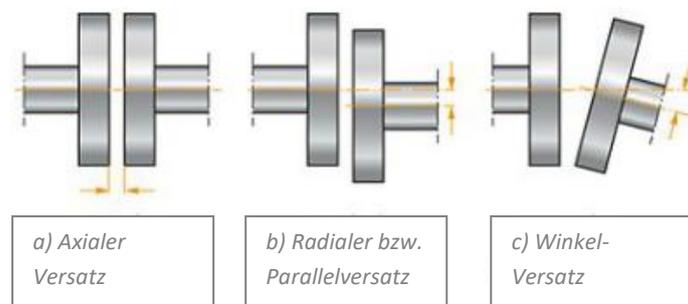


Abb. 10: Arten der Fehlausrichtung

Erprobung:

Die Drehzahl der Welle lag bei allen Versuchen bei 376 min^{-1} . Mit steigender Drehzahl, nimmt die Streuung der Messpunkte zu. Der Grund dafür könnte sein, dass der Magnet den Sensor schneller passiert und die Amplitude nicht genau erfassen kann. Die Erkennung von Parallelabweichungen und Winkelabweichungen wurde durch die folgenden experimentellen Versuche dargelegt:

1. Test

Die Struktur oder das Gehäuse wird nur in der axialen Richtung (z-Achse) in Schritten von 1 mm bewegt und in x- und y-Richtung um den Wert Null. Die Abbildung 11 zeigt eine Längsverschiebung mit einer leichten Abweichung in der y-Achse, die möglicherweise auf die Ausrichtung der Sensoren in der Gehäusestruktur zurückzuführen ist.

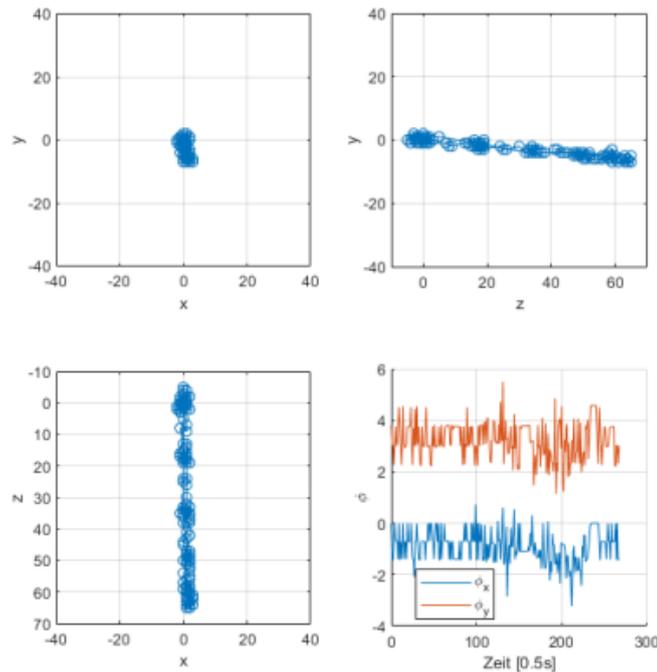


Abb. 11: Test 1: Nur axiale Richtung (z-Achse)

2. Test

Die Struktur oder das Gehäuse wird sowohl in positiver als auch negativer x-y-Richtung oder radialer Richtung und ohne Veränderung der z-Achse bewegt, wobei die Gehäusestruktur im Ursprung der z-Koordinate. Die Abbildung 12 zeigt die Verschiebung in radialer Richtung (x-y-Achse), die sich in Form einer Acht in der x-y-Ebene abzeichnet.

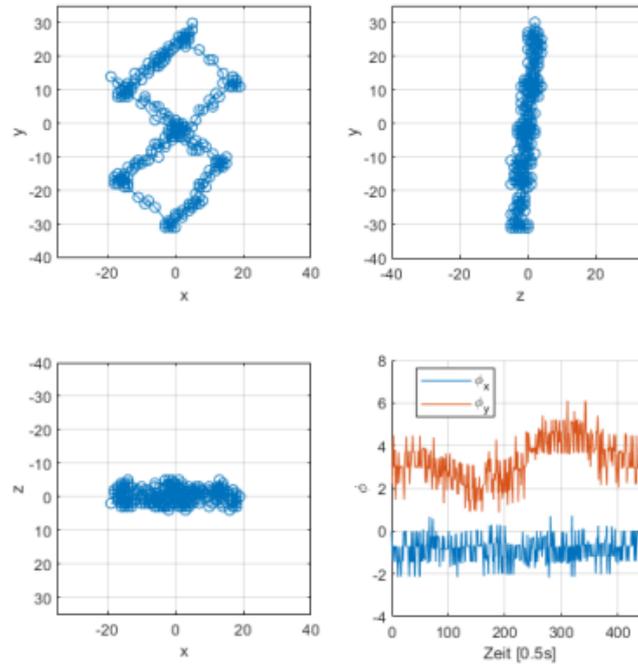


Abb. 12: Test 2: radiale Richtung (x-y-Achse)

3. Test

Ein Winkeloffset von $\pm 1^\circ$ und $\pm 2^\circ$ wurde durch Neigung der Gehäusestruktur sowie einen Parallelversatz von 1mm in der x-y-Ebene erreicht.

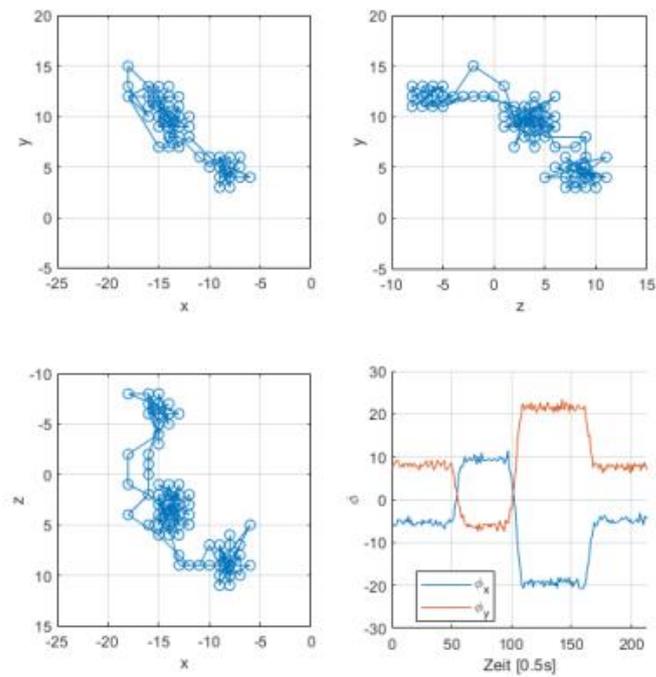


Abb. 13: Test 3: Winkeloffset und radiale Richtung (x-y-Achse)

4. Test

Ein Winkeloffset von $\pm 1^\circ$ und $\pm 2^\circ$ wird durch Kippen der Gehäusestruktur um einen bestimmten Winkel und auch der axiale Versatz von 1 mm in der z-Ebene wird bei dieser Prüfung erreicht. Die Abbildung 14 zeigt den Winkelversatz bei axialer Verschiebung (z-Richtung).

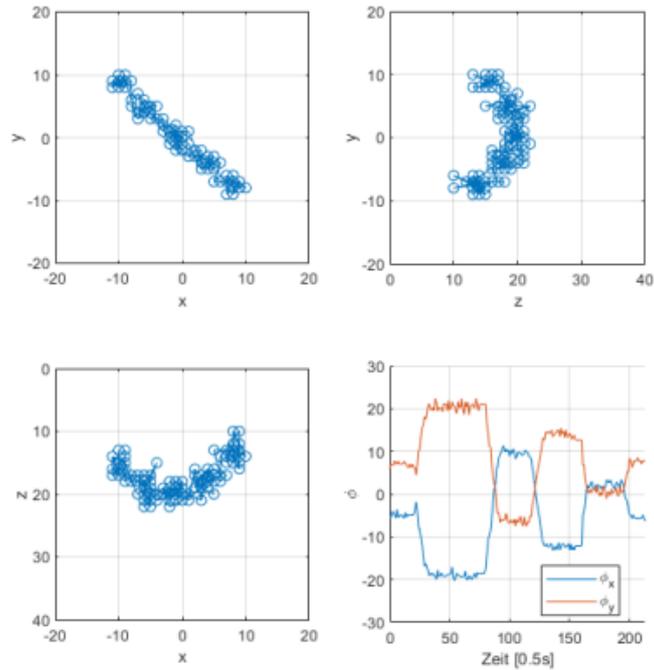


Abb. 14: Test 4: Ein Winkeloffset von $\pm 1^\circ$ und $\pm 2^\circ$ für ein um 1 mm in der Z-Ebene (oder in axialer Richtung) verschobenes Gehäuse

Optischer Sensor – Verschmutzung

Das Messprinzip des Sensors beruht auf der Rückstreuung von Licht im unbenutzten Fett. Dazu eignet sich nur das opake Fett. Bedingt durch die starke Schwärzung, durch Abrieb und Zersetzung des Fettes steigt die Lichtabsorption und der zurückgestreute Anteil nimmt ab. Daraus folgt eine geringere Strahlungsflussdichte auf der Fotodiode und letztendlich ein geringeres Ausgangssignal. Der prinzipielle Aufbau eines Sensors (im Gehäuse) ist nachfolgend zu sehen.



Abb. 15: Glasstabsensor

Messergebnisse

Getestet wurde an einem vergleichbaren Volumen an Schmierfett (Hohlraum von 10,0 mm Tiefe vor der Stirnfläche des Sensors). Dieser Hohlraum wurde jeweils 10 mal mit neuem und altem (schwarzen) Fett gefüllt und über der Kante abgestrichen.

Temperature at 21°C	
New Fat (Ua/V)	Old Fat (Ua/V)
6,74	0,453
6,802	0,436
6,655	0,461
6,774	0,451
6,612	0,435
6,787	0,440
6,673	0,462
6,756	0,438
6,453	0,438
6,428	0,430
6,6680 (mean)	0,4444 (mean)
0,12784209 (standard deviation)	0,0108185 (standard deviation)

Tab. 1: Messreihe 1

Temperature at 21°C	
New Fat (Ua/V)	Old Fat (Ua/V)
7,542	0,935
7,074	0,936
7,185	0,936
7,518	0,936
7,075	0,934
7,175	0,935
7,078	0,936
7,110	0,936
7,045	0,936
7,191	0,935
7,1993 (mean)	0,9355 (mean)
0,17248887 (standard deviation)	0,00067082 (standard deviation)

Tab. 2: Messreihe 2

Zu sehen sind unter den Spalten, der jeweilige Mittelwert und die Standardabweichung der zehn Werte. Bei neuem Fett ist die Streuung der Messwerte deutlich höher, die Ursache ist die nicht homogene Verteilung im Messvolumen (Schlieren). Altes Fett absorbiert das Licht so stark, dass diese Effekte keine Rolle spielen. Die Messungen wurden bei einer Temperatur von 21°C durchgeführt.

Wassergehaltsbestimmung im Schmierfett

Erste Untersuchungen hinsichtlich einer Wasserbeladung des Schmierfettes fand über eine Leitfähigkeitmessung statt. Zur Verfügung stand dazu ein Multimeter vom Typ Keithley 2100. Im 100M Ω Messbereich waren überhaupt keine Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit nachweisbar. Als Ursache wird ein hochisolierender Fettfilm auf den Messelektroden vermutet. Der Fettfilm erzeugt eine dauerhafte Isolationsschicht zwischen Elektroden und den Wassermolekülen, so dass messtechnische Zugänglichkeit erschwert/ nicht möglich ohne stetige mechanische Reinigung ist. Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit ließen sich sicherlich im Bereich von Isolationswiderständen 10¹⁰ Ω und größer nachweisen, das scheint aus prozessmesstechnischer Sicht aber unrealistisch. Ergebnis folglich: keine erkennbare Sensitivität gegenüber Wasser verschiedener Konzentration

Weitere Untersuchungen fanden hinsichtlich des dielektrischen Verhaltens der Fett-Wasser-Emulsion statt. Zur Kapazitätsmessung nach Prinzip C wurde mit einem Spektrum- Impedanzanalysator Agilent 4395A benutzt. Der Messkondensator hatte die Struktur eines einfachen Plattenkondensators mit einer Fläche von 4 cm² und einem Elektrodenabstand von 0,6 mm. Die Messfrequenz betrug 10 MHz. Die Kapazitätsänderungen waren in der Größenordnung von 3-4 pF, von wasserfreien- zu wasserbeladenem Fett. Eine derartig niedrige Signaländerung insbesondere bei Wasser kann nur bedeuten, dass die Emulsion nicht homogen herstellbar war. Das Fett-Wasser-Gemisch wurde im Becherglas mit einem Schrägblattrührer versucht herzustellen, dabei wurde das Wasser tropfenweise dem Fett zudosiert.

Als Weiteres kamen polymerbeschichtete, kapazitiv wirkende Feuchtesensoren zum Einsatz. Sie dienen hauptsächlich der Luftfeuchtebestimmung. Auch ihr Einsatz in der Fett-Wasser-Emulsion war nicht zielführend. Es ließen sich keine reproduzierbaren Messergebnisse erzielen. Wahrscheinlich blockiert eine dünne Fettschicht die sensitive Polymerschicht, möglich wäre auch eine Diffusion des Fettes in die Polymerschicht. Damit wären die hydrophilen Eigenschaften der Polymerbeschichtung nicht mehr gegeben und der Sensor ist für Wassergehaltsänderung unempfindlich.

Die Feuchtemessung in einem Medium wie Schmierfett stellte im gesamten Projekt eine unlösbare Aufgabe dar. Sie wurde daher nach mehreren Absprachen verworfen. Eine Berücksichtigung der Feuchte würde sich aus Anwendersicht über eine regelmäßige Nachfettung aus dem Reservoir – wenn auch pauschal - realisieren lassen.

Validierung in kundenspezifischer Anlage:

Die Testung der Sensoren zur Bewegungs- und Fettüberwachung an einer für Kunden des kmU Partners üblichen Anlage wurde sorgfältig geplant. Hierzu wurde eine Testdichtung durch den Partner konzipiert und aufgebaut, um die Hallsensoren zu implementieren. Die Messdaten werden auf Basis der o.g. Erfassung, Verarbeitung und drahtlosen Übermittlung bereitgestellt. Hierfür kann ein handelsüblicher Mikrocontroller (ESP 32) zum Einsatz kommen. Demgegenüber stellt die Versorgung mit frischem Fett einen sicherheitskritischen Zustand dar, so dass die (optischen, thermischen (*hier nicht weiter beschrieben*)) Daten mit der durch das kmU eingesetzten Industriesteuerung kompatibel gemacht wurden.

Die Tests werden vom Projektpartner durchgeführt, auf die dementsprechenden Ergebnisse wird im Bericht des Partners verwiesen.

Fazit:

Der innovative Anspruch des Vorhabens war darin begründet, die Funktionalität von Gleitringdichtungen auf Basis kommerziell erhältlicher Sensoren zu erweitern. Auf Basis dieser Sensoren konnten die Fragestellungen nicht vollumfänglich, aber mit hohem Umfang beantwortet werden. Es konnte gezeigt werden, dass eine neue, diagnostische Dichtungs-Generation geschaffen werden kann, die durch die Datenakquisition einen Mehrwert gegenüber bisherigen Dichtungen bietet.

Zum Ende des Vorhabens entschieden sich die beiden Partner dafür, auf die Erfassung der Feuchte zu verzichten. Maßgebend war die nicht eindeutige oder nicht genügende Reaktion der avisierten Sensoren (kapazitiv, Leitfähigkeit) auf in das Schmiermittel eingebrachten Wassermengen. Weiterhin konnte in mehreren Meetings herausgearbeitet werden, dass die Drucküberwachung indirekt aus den ansonsten verfügbaren Messdaten abgeschätzt werden kann. Daher wurde die Einbettung einer Membranbasierten Sensorlösung zurückgestellt.

Die intelligente Dichtung umfasst zum Vorhabensende Sensoren zur Erfassung von Drehzahl, geometrischen Größen (Wellenversatz, Winkel) sowie Verschmutzung und Temperatur des Schmiermittels. Der Partner im Vorhaben hat dies auch gegenüber seinen Kunden dargestellt. Das Feedback war positiv und belegt die mit einer solchen Dichtung verbundenen Vorteile.