

Neues Sensorkonzept für magnetostriktive Kraftmessung in kostenorientierten Anwendungen

A. Hofmann¹, M. Heusinger¹

¹Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, Fakultät Maschinenbau, Ignaz-Schön-Str. 11, 97421 Schweinfurt

Zusammenfassung

Der Beitrag stellt ein neuartiges, kostenorientiertes Konzept zur Kraftmessung basierend auf dem magnetostriktiven Wandlungsprinzip vor. Kernelement ist ein scheibenförmiger Sensor, der remanent magnetisiert ist und unter Last eine äußerlich durch Sekundärsensoren messbare Magnetfeldänderung erzeugt. Die magnetischen Eigenschaften eines marktüblichen Kaltarbeitsstahls werden hinsichtlich der sensorischen Eignung für dieses Konzept diskutiert und erste Ergebnisse bezüglich der Korrelation von Sekundärsensorsignalen zur aufgebrachten Last dargestellt.

Keywords: Kraftmessung, Magnetostriktion, Scheibensensor, Primärsensor

Zielsetzung des Sensorkonzepts

Das hier vorgestellte Sensorkonzept zielt darauf ab, Kraftmessung anhand des Wandlungsprinzips der inversen Magnetostriktion zu geringeren Kosten im Vergleich zu etablierten Kraftsensoren zu ermöglichen. Weiter liegt das Augenmerk auf der Integrierbarkeit in eine Anwendungsumgebung, wobei Bauhöhe und Steifigkeit eine wichtige Rolle spielen. Eine Steigerung der Genauigkeit im Vergleich zu aktuell eingesetzten Sensoren ist hingegen keine Zielsetzung des Konzepts.

Eine denkbare Anwendung dafür ist die direkte Messung der Vorspannkraft in angestellten Lagerungen, die heute oftmals nur über indirekte Größen wie beispielsweise das Reibmoment der Lageranordnung bestimmt wird. Die angestrebte Kostenreduktion sowie die niedrige Bauhöhe sind dafür wichtige Voraussetzungen.

Magnetostriktion als sensorisches Wandlungsprinzip

Magnetostriktion bezeichnet allgemein die wechselseitige Abhängigkeit von magnetischen Größen und mechanischer Spannung bzw. Dehnung. Die als Joule-Effekt bekannte Längenänderung magnetisierter Stäbe ermöglicht den Aufbau aktorischer Wirkprinzipien, während die als Villari-Effekt bezeichnete Umkehrung dieses Prinzips sensorische Konzepte ermöglicht [1]. Demnach ändert das Einwirken mechanischer Spannung insbesondere Permeabilität und Remanenz eines Materials [2], so dass deren

Messung zur Charakterisierung der wirkenden Belastung herangezogen werden kann. Der spannungsbeaufschlagte Körper wird im Kontext der Sensorik als Primärsensor bezeichnet.

Um die Remanenz eines Materials zur Spannungscharakterisierung zu bestimmen, muss dieses vor der sensorischen Verwendung magnetisiert worden sein. Die Bestimmung der Permeabilität hingegen erfordert die Erzeugung eines magnetischen Feldes während der Messung. Aus diesen beiden Forderungen leiten sich zwei grundlegende Sensorkonzepte ab: aktive Sensoren, die Vorrichtungen zur Felderzeugung während der Messung verwenden, und passive Konzepte, die auf einer initial erzeugten, remanenten Magnetisierung aufbauen.

Mit beiden magnetostriktiven Sensorkonzepten können prinzipiell sowohl Kräfte als auch Drehmomente gemessen werden [3], [4]. Es unterscheiden sich dabei lediglich die Form von Primärsensor und Magnetisierung sowie die Anordnung der Sekundärsensoren.

Bekannte Implementierungen magnetostriktiver Sensorik

Eine Herausforderung bei der Implementierung magnetostriktiver Kraft- oder Drehmomentsensorik besteht darin, die Änderung von Remanenz oder Permeabilität des spannungsführenden Körpers außerhalb davon durch Sekundärsensoren messbar zu machen. Bei der Bestimmung der Remanenz durch Messsonden muss ein ausreichend

starker Teil des Magnetfelds außerhalb des Primärsensors der Sonde zugänglich verlaufen [1]. Alternativ kann die Permeabilität mit induktiven Messspulen bestimmt werden, die jedoch magnetische Wechselfelder oder Signalintegratoren benötigen, was den Aufwand der Sensorik erhöht [3].

Beide Konzepte der Sekundärsensorik wurden bei der Drehmomentmessung bereits industriell umgesetzt. Eine bekannte Sensorgattung mit aktiver Felderzeugung arbeitet nach dem transformatorischen Prinzip, bei dem magnetische Felder durch eine Primärspule erzeugt werden, die durch die drehmomentbelastete Welle führen. Permeabilitätsänderungen in der Welle können so als Veränderung der Induktivität durch die Sekundärspulen wahrgenommen werden [3]. Konzepte mit passiver Felderzeugung, also initialer remanenter Magnetisierung, zielen auf eine Reduktion des systemtechnischen Aufwands und somit auch der Kosten des Sensors ab. So sind beispielsweise Drehmomentsensoren im industriellen Einsatz, bei denen an zirkular magnetisierten Wellen ausreichend starke, drehmomentabhängige Feldänderungen auch außerhalb der Welle gemessen werden können [4].

In Bezug auf die Kraftmessung ist eine Umsetzung analog zu dem oben erläuterten transformatorischen Prinzip geläufig: Das als „Pressduktor“ bezeichnete Sensorkonzept verwendet eine Spule zur Erzeugung eines magnetischen Wechselfelds winklig zur Krafrichtung in einem kraftbeaufschlagten Körper. Die Permeabilitätsänderung in Krafrichtung lenkt das Magnetfeld ab, so dass in Sekundärspulen eine zur Kraft korrelierende Spannung induziert wird [3].

Bei der Kraftmessung nach dem passiven Konzept mit remanenter Magnetisierung muss eine geeignete Primärsensorgeometrie gefunden werden, bei der ausreichend starke Magnetfeldänderungen auch außerhalb des Primärsensors messbar sind. Während das bei der passiven Drehmomentmessung inhärent möglich ist, sind die Voraussetzungen dafür bei der passiven Kraftmessung nicht in einfacher Weise zu schaffen. Dies ist ein wesentlicher Grund, warum nach Auffassung der Autoren passive magnetostruktive Kraftsensoren bisher nur eine geringe industrielle Verbreitung gefunden haben. An diesem Punkt soll das vorgestellte Sensorkonzept ansetzen.

Aufbau des Sensorkonzepts

Zur Reduktion des systemtechnischen Umsetzungsaufwands wird das Prinzip der passiven Felderzeugung angewandt. Um dabei

eine möglichst stabile und starke remanente Magnetisierung zu erhalten, sollten die Feldlinien so weit wie möglich im Primärsensor geschlossen sein [1]. Eine denkbare Umsetzung dieser Forderung ist in Abb. 1 gezeigt.

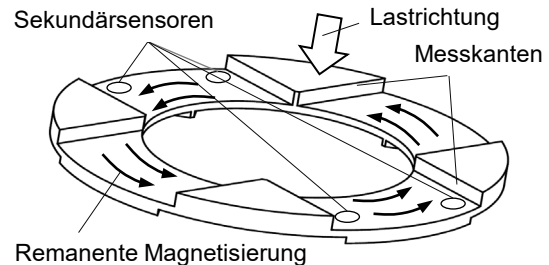


Abb. 1: Primärsensorscheibe mit Freistellungen zur magnetostruktiven Kraftmessung.

Der ringscheibenförmige Primärsensor wird vor Verwendung in der Scheibenebene tangential umlaufend magnetisiert. Diese Magnetisierung kann beispielsweise durch Drehung in unmittelbarer Nähe eines Permanentmagneten oder durch Bewickeln des Scheibenrings mit Spulendraht auf einem durch das Mittenloch durchgreifenden, geteilten Spulenkörper mit anschließendem Stromimpuls erfolgen.

Die Freistellungen an Ober- und Unterseite des Sensors sind zueinander um 45° bezüglich der Scheibenachse versetzt. Den Kanten an den Seiten der Freistellungen, im Nachfolgenden als Messkanten bezeichnet, kommen zwei Aufgaben zu: Erstens ermöglichen sie, dass die Feldlinien der remanenten Magnetisierung dort aus dem Primärsensor austreten und so erst einer Messung durch die Sekundärsensoren zugänglich sind. Die Sekundärsensoren werden folglich wie in Abb. 1 gezeigt nahe an diesen Messkanten platziert.

Zweitens erzeugt die axiale Belastung der Scheibe durch die Anordnung der Freistellungen einen Spannungszustand, der die Grundlage für eine Änderung der Magnetisierung nach dem magnetostruktiven Wandlungsprinzip ist. Diese Spannungen sind im Primärsensor unter einer Freistellung nahe der Messkante am größten, weshalb dort die magnetostruktiv aktivsten Bereiche zu finden sind.

Nach unserer aktuellen, vereinfachten Modellvorstellung tragen hier vorwiegend zwei Effekte zur äußerlich messbaren Feldänderung bei: Druckspannungen in Umfangsrichtung und Schubspannungen unterhalb der Freistellungen, wie es die Querschnittsdarstellung der Abb. 2 zeigt.

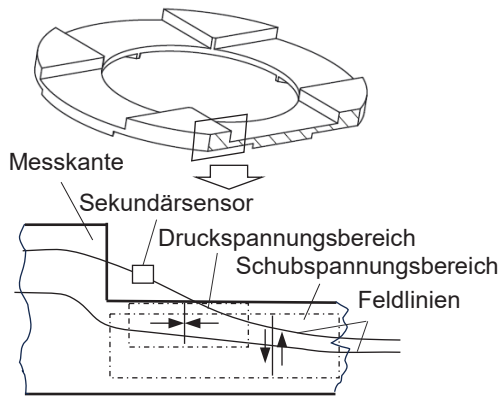


Abb. 2: Verlauf der Feldlinien und Lage von Bereichen mit Druck- und Schubspannung in der Schnittdarstellung.

Dem Wandlungsprinzip der inversen Magnetostriktion folgend kommt es in den Druckspannungsbereichen abhängig vom Vorzeichen der Magnetostriktionskonstante des Materials zu einer Verstärkung oder Abschwächung der remanenten Magnetisierung auch ohne den Einfluss eines externen Magnetfelds [2].

Wirken Schubspannungen in einer Ebene lotrecht zum Magnetisierungsvektor, so ruft dies unterschiedliche Normalspannungen in Richtungen winklig um $\pm 45^\circ$ zur Magnetisierungsrichtung hervor. Als Folge dreht sich der Magnetisierungsvektor, was nach der Modellvorstellung den zweiten wesentlichen Beitrag zur äußerlich messbaren Feldänderung unter Last darstellt.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass der Spannungszustand im Bereich der Messkanten deutlich komplexer als die stark vereinfachte Modellvorstellung ist. Die gesamte Änderung der Magnetisierung setzt sich somit aus unterschiedlichen Drehungen und Betragsänderungen der lokalen Magnetisierungsvektoren zusammen und ist nicht in einfacher Weise beschreibbar.

Obwohl die beiden in der Modellvorstellung dargestellten Effekte der Magnetisierungsänderung nur innerhalb des Primärsensors stattfinden, werden sich aus Kontinuitätsgründen analog auch die Feldlinien nahe der Messkanten außerhalb des Primärsensors ändern. Abb. 2 verdeutlicht dies exemplarisch anhand der durch den Sekundärsensor verlaufenden Feldlinie. Die Messung der Magnetfeldänderung durch Sekundärsensoren ermöglicht somit die Bestimmung der axial auf den Primärsensor einwirkende Kraft.

Nachdem die remanente Magnetisierung im Wesentlichen in tangential umlaufender

Richtung orientiert ist, sind an den Kanten in dieser Richtung die größten Signaländerungen zu erwarten. Erfolgt die Messung in drei orthogonalen Raumrichtungen getrennt, kann bei der Auswertung auf solche stärker korrelierenden Richtungen fokussiert werden.

Neben der Forderung nach räumlich getrennten Messachsen sollte ein Sekundärsensor auch möglichst geringe Abmessungen aufweisen, um nahe an der Messkante platziert werden zu können.

Der erforderliche Messbereich variiert stark mit dem verwendeten Material, dessen Wärmebehandlungszustand und der spezifischen Primärsensorgeometrie. Verschiedene Sensoren mit Messbereichen bis zu ± 5 mT haben in unseren Versuchen gute Ergebnisse gezeigt.

Einige handelsübliche 3-Achs-Magnetometer basierend auf dem anisotropen magneto-resistiven Messprinzip (AMR) oder auch Hallsensoren erfüllen diese Forderungen. Da solche Sensoren heute oft in hohen Stückzahlen in elektronischen Konsumgütern verbaut werden, sind sie kostengünstig bis hinunter in den Centbereich erhältlich, was ein wesentlicher Aspekt des oben formulierten Ziels der Kosteneffizienz ist. Überdies verfügen solche Sensoren oft auch über integrierte Temperatursensoren, die eine teilweise Kompensation der für AMR-Sensoren typischen Temperaturdrift ermöglichen.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass das Sensorkonzept prinzipbedingt anfällig für eine Beeinflussung durch Fremdfelder wie beispielsweise dem Erdmagnetfeld ist. Auch hier erscheint basierend auf Stichversuchen eine teilweise Kompensation durch magnetische oder lagebestimmende Referenzsensoren in bekannter Weise möglich, die hier aber zunächst nicht näher betrachtet werden soll.

Werkstoffliche Aspekte

Die Charakterisierung der magnetostriktiven Eigenschaften von Werkstoffen wurde in der Vergangenheit stark durch die Entwicklung von Schwingungsaufnehmern und Elektromotoren sowie Transformatoren bestimmt. Zu maschinenbaulich relevanten Stählen wie beispielsweise Einsatz- oder Vergütungsstählen sind Daten nach Auffassung der Autoren nicht ausreichend breit publiziert. So finden sich zwar Angaben zu unlegierten Metallen, Werkstoffen des Transformatorenbaus oder nickelhaltigen Legierungen, siehe beispielsweise [5], [6] oder [7]. Die meisten der dort behandelten Werkstoffe sind jedoch unter Festigkeits- oder

Kostengesichtspunkten maschinenbaulich wenig brauchbar.

Nachdem es das hier vorgestellte Sensor-konzept bedingt, dass der Primärsensor im Sinne einer strukturintegrierten Sensorik gleichzeitig auch ein Maschinenelement ist, muss dieses über ausreichende Festigkeitseigenschaften verfügen. Folglich wurden im Rahmen unserer Arbeiten verschiedene maschinenbaulich geläufige Stähle hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften unter mechanischer Spannung untersucht.

Für die sensorischen Eigenschaften eines Stahls sind vorwiegend seine Koerzitivfeldstärke und die Änderung der Remanenz unter Last bedeutend. Eine hohe Koerzitivfeldstärke behindert das Ummagnetisieren unter dem Einfluss externer Felder oder durch magnetostruktiv im Primärsensor erzeugte Feldänderungen. Die Kennlinie des Sensors bleibt dadurch stabiler und lässt ein weniger hysteretisches Verhalten erwarten. Die Änderung der Remanenz unter Last bestimmt hingegen wesentlich die äußerlich messbare Signaländerung und damit die Empfindlichkeit des Sensors

Zur Bestimmung von Koerzitivfeldstärke und Remanenz unter Last wurde eine vollständige Hystereseschleife an runden Probestäben mit 10 mm Durchmesser gemäß DIN EN 60404-4 aufgenommen. In Abwandlung der DIN EN 60404-4 wurden die Probestäbe während eines Schleifendurchlaufs mit einer konstanten, definierten Zug- oder Druckspannung beaufschlagt. Abb. 3 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der gemessenen Polarisation in der Nähe des H-Feld-Nullpunkts von gehärtetem 50NiCr13.

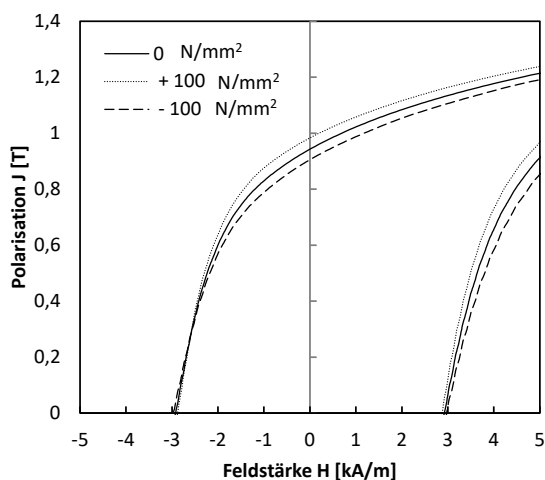


Abb. 3: Verlauf der J-H Hysteresekurve von gehärtetem 50NiCr13 unter Zugspannung (+), Druckspannung (-) und lastfrei.

Die Remanenz dieses handelsüblichen Kaltarbeitsstahls steigt bei 100 N/mm² Zugspannung von ihrem lastfreien Wert 0,94 T auf 0,98 T, unter betragsgleichem Druck fällt sie auf 0,91 T ab. Ein solches Verhalten wird allgemein von Materialien mit positiver Magnetostruktionskonstante erwartet [5]. Nachdem diese Änderung einen wesentlichen Einfluss auf die Empfindlichkeit des Sensors hat, kann zur Vergleichbarkeit von Werkstoffen gemäß Gl. 1 ein einfacher Magnetostruktionsfaktor f_m definiert werden:

$$f_m = \frac{B_{r,Zug} - B_{r,Druck}}{\sigma_{Zug} - \sigma_{Druck}} \quad \text{Gl. (1)}$$

Der Faktor lässt sich leicht mit dem oben beschriebenen modifizierten Hysteresegraph bestimmen, allerdings lässt er allein keine direkte Ermittlung der Sensitivität zu, da hierfür weitere Einflussgrößen wie Primärsensorgeometrie, Magnetisierung oder Umgebungskonstruktion eine maßgebliche Rolle spielen. Dennoch hilft der Faktor f_m beim qualitativen Vergleich von Werkstoffen: So zeigt der hier diskutierte gehärtete 50NiCr13 einen f_m -Faktor von 0,35 mTmm²/N, während am gleichen Werkstoff im ungehärteten Zustand ein f_m -Faktor von 2,45 mTmm²/N gemessen wurde.

Die Koerzitivfeldstärke liegt beim gehärteten 50NiCr13 lastfrei bei 2,92 kA/m, beim ungehärteten 50NiCr13 bei 1,13 kA/m und zeigt jeweils nur eine unbedeutend geringe Änderung unter Last.

Die Abnahme der Remanenz und damit auch des f_m -Faktors bei gleichzeitiger Steigerung der Koerzitivfeldstärke beim Härten ist durch die Änderung der Mikrostruktur begründet, wonach magnetische und mechanische Härte miteinander korrelieren [8]. Daran zeigt sich ein Dilemma bei der Werkstoffauswahl: Eine Erhöhung der Koerzitivfeldstärke kann zu einer Reduktion der Sensitivität führen. Die Wärmebehandlung eines Stahls muss somit unter Berücksichtigung der Festigkeitsanforderungen einen Kompromiss zwischen Sensorempfindlichkeit und Stabilität finden.

Versuchsaufbau und Anwendungsszenario

Charakteristisch für das Sensor-konzept sind niedrige Kosten sowie eine flache Bauhöhe, aber auch eine starke Beeinflussung der Sensoreigenschaften durch die Umgebungskonstruktion. Letztere kann durch magnetisches Entkoppeln des Primärsensors mit Distanzelementen oder durch Kalibrieren der Sensoranordnung in der Anwendung reduziert werden.

Eine Anwendung, deren Anforderungsprofil gut zu diesen Charakteristika des Sensorkonzepts passt, ist das Messen der Vorspannung in angestellten Wälzlageranordnungen. Wenn die Lagervorspannung direkt gemessen werden soll, muss ein flacher, scheibenförmiger Sensor an einem Lagerring die Vorspannkraft während des Montagevorgangs messen und danach im Kraftfluss verbleiben. Damit handelt es sich um ein Messkonzept mit verlorenem Sensor, das erst durch die hier angestrebte Kosteneffizienz wirtschaftlich möglich wird.

Ein solches Anwendungsszenario wurde anhand eines Prüfstands nachgestellt, der in Abb. 4 gezeigt wird.

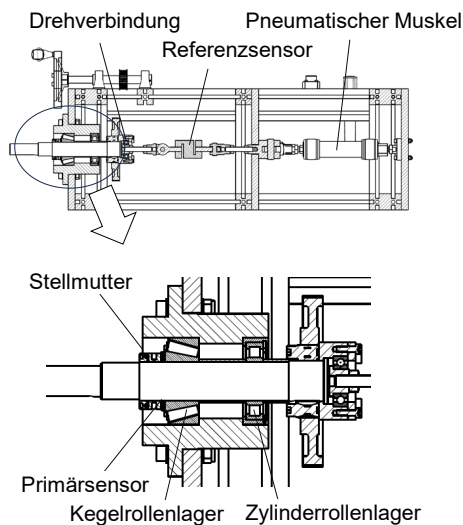


Abb. 4: Querschnittsdarstellung vom Zugstrang des eingesetzten Prüfstands.

Der Primärsensor sitzt zwischen dem Innenring des Kegelrollenlagers und einer Stellmutter, über die bei der Montage die Lagervorspannung eingestellt wird. Auch eine Messung durch einen größeren Primärsensor am Lageraußenring ist möglich und wegen der dort oftmals weniger festen Passung auch sinnvoll. Aus Gründen der einfacheren Herstellung wurden die Untersuchungen jedoch zunächst mit kleineren Primärsensoren am Lagerinnenring durchgeführt.

Anstelle eines in der realen Anwendung üblichen zweiten Kegelrollenlagers stützt ein rein radial wirkendes Zylinderrollenlager die Welle, so dass die axiale Vorspannkraft von einem dahinter angeordneten DMS-Referenzkraftsensor gemessen werden kann. Der Primärsensor kann nun entweder durch das Anziehen der Stellmutter am Kegelrollenlagerinnenring oder alternativ durch pneumatische Muskeln am anderen Ende des Zugstrangs mit einer definierten Kraft beaufschlagt werden.

Zwei Sekundärsensoren in einer Freistellung sind mit Schraubklemmen an den in Abb. 1 gezeigten Positionen an den Messkanten des Primärsensors lösbar befestigt. Von dieser Klemmanordnung sind wiederum zwei an gegenüberliegenden Freistellungen angebracht. Jeder Sensor verfügt über Messachsen in den drei Raumrichtungen, so dass insgesamt zwölf einzelne Signale zur Auswertung der Korrelation mit der einwirkenden Kraft zur Verfügung stehen.

Versuchsergebnisse und Diskussion

Bei den Versuchen zur Validierung des Sensorkonzepts mussten die zwei Sekundärsensoren einer Freistellung aus Gründen des Sensorplattenlayouts wie in Abb. 5 gezeigt zueinander um 180° gedreht angeordnet werden.

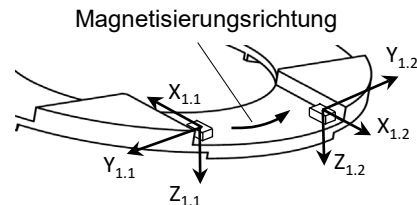


Abb. 5: Koordinatensysteme der Sekundärsensoren.

Die im Wesentlichen in y-Richtung der Sensoren wirkende remanente Magnetisierung erzeugt demnach bei dem in Abb. 5 angegebenen Richtungssinn in Sensor 1.1 ein negatives, in Sensor 1.2 ein positives Signal. Tab. 1 zeigt die Messwerte im lastfreien Zustand an einem Primärsensor mit 60 mm Außendurchmesser und 4 mm Gesamthöhe aus dem oben diskutierten gehärteten 50NiCr13.

Tab. 1: Signale der Sekundärsensoren ohne Last.

	Sensor 1.1	Sensor 1.2
x-Richtung [μT]	257,5	466,9
y-Richtung [μT]	-2085,9	2131,7
z-Richtung [μT]	8,4	147,7

Obwohl die lastfreien Signale der Tab. 1 aus Symmetriegründen theoretisch betragsgleich sein müssten, zeigt die Tabelle dennoch signifikante Abweichungen zwischen den beiden Sensoren. Solche und weit größere Abweichungen wurden auch bei Primärsensoren aus anderen Stählen und Wärmebehandlungszuständen beobachtet. Als eine mögliche Ursache dafür werden lokal unterschiedliche Gefügeausbildungen im

Primärsensor vermutet. Weiterhin lassen sich Abweichungen der Sekundärsensorposition von der vorgesehenen Sollposition mit der verwendeten Klemmvorrichtung nicht gänzlich vermeiden. Nachdem das Magnetfeld im Bereich der Sekundärsensoren starke räumliche Gradienten aufweist, können auch dadurch die Symmetrieabweichungen der Tab. 1 erklärt werden.

Mit den Versuchen soll das oben beschriebene Anwendungsszenario einer Wälzlagermontage nachgestellt werden. Dazu wird zunächst die Korrelation der Sekundärsensorsignale mit dem Referenzkraftsignal aufgenommen. Der Primärsensor wird zu Beginn mit der Stellmutter handfest vorgespannt und anschließend pneumatisch in mehreren Stufen bis ungefähr 5 kN belastet. Abb. 6 zeigt die auf die lastfreien Werte der Tab. 1 bezogenen Änderungen einzelner Sekundärsensorachsen sowie das Referenzkraftsignal im zeitlichen Verlauf.

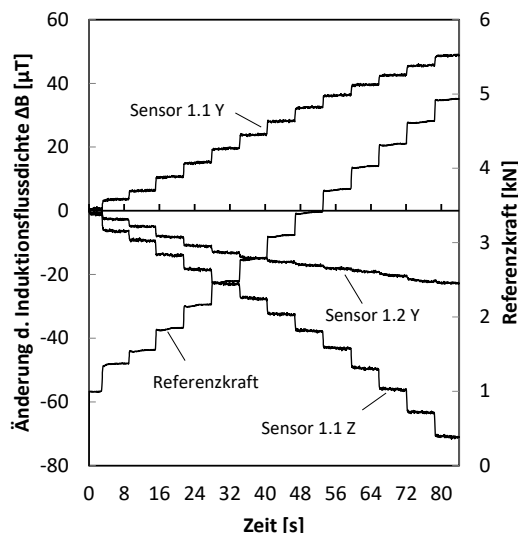


Abb. 6: Signale der Sekundärsensoren unter Last und Referenzkraft.

Die y-Achse des Sensors 1.1 zeigt einen gut mit der Referenzkraft korrelierenden Anstieg, seine z-Achse einen ebenfalls gut korrelierenden Abfall der Induktionsflussdichte. In Übereinstimmung mit der oben formulierten vereinfachten Modellvorstellung entspricht dies einer Drehung der Feldlinien aus einer Ebene parallel zur Scheibe heraus in z-Richtung, die mit einer betragsmäßigen Reduktion der Induktionsflussdichte einhergeht.

Die y-Achse des in der gleichen Freistellung gegenüber positionierten Sensors 1.2 korreliert hingegen bereits ab einer Kraft von ungefähr 2 kN nicht mehr gut mit der Referenzkraft. Vielmehr zeigt sich eine Signalsättigung, die mit der Modellvorstellung allein nicht erklärt werden kann. Dieses Verhalten wurde häufig

auch bei anderen Werkstoffen und Wärmebehandlungszuständen beobachtet und konnte noch nicht gesichert reproduziert werden. Es wird aktuell vermutet, dass hier abermals lokal unterschiedliche magnetische Eigenschaften und damit verbundene Änderungen der initialen Magnetisierung unter Last sowie herstellungsbedingte Ungleichförmigkeiten der Lastverteilung eine Rolle spielen.

Offenkundig können nicht alle der im Versuchsaufbau gemessenen Sensorachsensignale gleichermaßen zur Bestimmung der einwirkenden Kraft herangezogen werden. Beschränkt man sich auf die gut korrelierenden Achssignale, hier beispielsweise nur auf 1.1 y und 1.1 z der Abb. 6, so kann die einwirkende Kraft mit einer polynomischen Regression gemäß Gl. 2 angenähert werden:

$$F(B_y, B_z) = \sum_{i=0}^2 [\beta_{y,i}(B_y - B_{y,0})^i + \beta_{z,i}(B_z - B_{z,0})^i] \quad \text{Gl. (2)}$$

Nachdem die Korrelation der magnetischen Signale mit der Referenzkraft im Allgemeinen nicht immer vollständig linear ist, wurde hier eine quadratische Regression gewählt. $B_{y,0}$ und $B_{z,0}$ bezeichnen in Gl. 2 die jeweiligen Signale im lastfreien Zustand aus Tab. 1.

Bestimmt man die Parameter $\beta_{y,i}$ bzw. $\beta_{z,i}$ so, dass die Fehlerquadrate zwischen der Regressionskurve und den gemessenen Referenzkräften minimal werden, kann mit Gl. 2 die Kraft, die auf den Primärsensor einwirkt, approximiert werden.

Abb. 7 zeigt den zeitlichen Verlauf von Referenzkraft und dem gemäß Gl. 2 aus den Sekundärsensorsignalen berechneten Kraftwert in einem Stufentest mit Entlastung zwischen den einzelnen Stufen bei einer Messfrequenz von ca. 25 Hz. Der Stufentest soll im Hinblick auf das beschriebene Anwendungsszenario den Montagevorgang einer Lageranordnung simulieren, allerdings durch die Entlastungen zwischen den Laststufen unter erschwerten sensorischen Randbedingungen. Die Regressionsparameter $\beta_{y,i}$ bzw. $\beta_{z,i}$ wurden direkt vorher anhand der in Abb. 6 gezeigten Referenzmessung bestimmt.

Im Hochlastbereich bei ungefähr 5 kN weicht der approximierte Wert um maximal -3,4 % bezogen auf den Referenzkraftwert von diesem ab. Die Flanken des Kraftanstiegs und -abfalls bleiben dabei außer Acht, da es systemtechnisch bedingt bei der Messung von Referenz- und Sekundärsensorsignal zu einem unvermeidbaren Zeitversatz von wenigen Millisekunden kommt, der bei dynamischen Kraftänderungen zu größeren Fehlern führt.

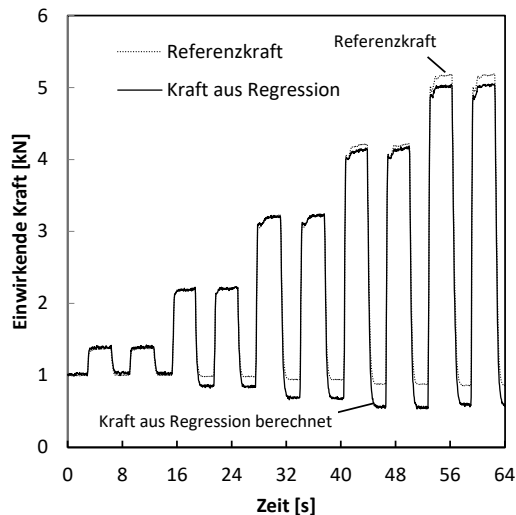


Abb. 7: Referenzkraft und approximierter Wert im zeitlichen Verlauf.

Im Niedriglastbereich bei ungefähr 1 kN, der durch die oben beschriebene handfeste Vorspannung definiert wird, zeigen sich nach Entlastung von höheren Laststufen größere Abweichungen zwischen Regression und Referenzkraft. So verschiebt sich beispielsweise in der Messung aus Abb. 7 das z-Signal des Sensors 1.1. nach dem gesamten Belastungszyklus um ca. 5 μ T. Hier wird aktuell vermutet, dass es bei dem gezeigten Lastprofil zu nicht reproduzierbaren Änderungen der Magnetisierung kommen kann, wie es im Abschnitt der werkstofflichen Aspekte beschrieben ist.

Ausblick

Die Untersuchungen am Sensorkonzept zeigen, dass Kraftmessung basierend auf dem magnetostriktiven Wandlungsprinzip mit passiver Felderzeugung bei geringem systemtechnischem Aufwand theoretisch möglich ist. Gleichwohl zeigt das Konzept aktuell noch Schwachstellen, wie beispielsweise die in Abb. 7 gezeigte Abweichung und Drift. Weitere Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Signalkorrelation mit dem Referenzwert erscheinen hier insbesondere auch unter Berücksichtigung werkstofflicher Aspekte sinnvoll.

In spezifischen Anwendungen wie der hier diskutierten Vorspannkraftmessung ist es denkbar, dass diese Schwachstellen weniger ins Gewicht fallen, wohingegen die Kosteneffizienz ein bedeutsamer Aspekt ist. Da Primär- und Sekundärsensor teilbar sind, können Sekundärsensoren nach einem Montagevorgang wieder entfernt und mit einem weiteren Primärsensor kostensparend

wiederverwendet werden. So können Sekundärsensoren beispielsweise durch axiale oder radiale Bohrungen bzw. Freistellungen im Lagerring oder in dessen Umgebungsstruktur geführt und nur temporär in der Nähe der Messkanten fixiert werden. Erste Stichversuche dazu zeigten gute Ergebnisse.

Weiterhin ist offensichtlich, dass die Bestimmung der Referenzkraft mit einem Referenzsensor nicht in jeder Anwendung einfach möglich ist. Die Kraftbeaufschlagung eines Lagerrings durch eine Hydraulikmutter kann hier in bekannter Weise durch Messung des Hydraulikdrucks einen Referenzkraftsensor in der Anwendung ersetzen. Auch dazu haben erste Stichversuche ermutigende Ergebnisse geliefert, die weiterverfolgt werden sollen.

Danksagung

Das Sensorkonzept wurde zum Patent angemeldet, die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Projekt SEMAVOR (Sensorik für magnetostriktive Vorspannungsmessung) erarbeitet. Das Projekt wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie im Rahmen der Validierung von Forschungsergebnissen und Erfindungen gefördert. Für diese Unterstützung bedanken wir uns.

Literaturnachweis

- [1] S. Tumanski, *Handbook of magnetic measurements*, Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [2] B. D. Cullity und C. D. Graham (Hrsg.), *Magnetostriction and the Effects of Stress*. In: *Introduction to Magnetic Materials* (2008); doi: 10.1002/9780470386323.ch8
- [3] E. Schiessle, *Magnetoelastische Sensoren*, In: *Industriesensorik – Sensortechnik und Messwertaufnahme*, 2. Auflage, 253-263, Würzburg: Vogel, 2016.
- [4] J. Heckler, *Magnetoelastische Drehmomentsensoren zur Regelung von E-Bike-Antrieben*, In: *Sensormagazin* 3/2013, 35-36, Bad Nenndorf: Hightech Publications, 2013.
- [5] G. Hinz und H. Voigt, *Magnetoelastic Sensors*, In: *Sensors: Magnetic Sensors Vol. 5* (1989); doi: 10.1002/9783527620166.ch4
- [6] R. Boll (Hrsg.), *Weichmagnetische Werkstoffe*, 3. Auflage, Berlin: Siemens AG, 1977.
- [7] C. W. Da Silva, *Sensors and actuators: Engineering system instrumentation*, 386, Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [8] H. Krüzner, *Über die Einflüsse von mechanischer Härtung durch Torsion auf die magnetischen Eigenschaften von Eisen und Stahl*, In: *Archiv für Elektrotechnik* 12, 234-249 (1923); doi:10.1007/BF01656509