

DFG SPP 2305: Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff als sensorintegriertes Maschinenelement

Heinrich, C.; Gansel, R.*; Schäfer, G., Barton, S.*;
Lohrengel, A.; Maier, H. J.*

* Institut f. Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover



Im Rahmen des Schwerpunktprogramms 2305 „Sensorintegrierte Maschinenelemente“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wird eine Zahnwellenverbindung entwickelt, welche kabellos und ohne Beeinflussung der Form und Primärfunktion Informationen zur Belastungshistorie bereitstellen kann.

A splined shaft connection is developed within the framework of priority program 2305 “Sensor-integrating machine elements” of the German Research Foundation (DFG), which can wirelessly provide information on the load history without affecting its shape or primary function.

Sensorintegrierte Maschinenelemente

Sensorintegrierte Maschinenelemente (SiME) in der Klassifikation nach /1/ zeichnen sich dadurch aus, dass sie als Austauschlösung zu konventionellen, nicht mit Sensoren ausgestatteten Maschinenelementen funktionieren, da die Sensorintegration bauraumneutral und kabellos erfolgt. Demgegenüber steht der klassische Sensoranbau („sensortragendes Maschinenelement“), bei welchem zusätzlicher Bauraum für den Sensor sowie für Lösungen für Datentransfer und Energieversorgung wie z. B. Schleifringübertrager vorgesehen werden muss, was erheblichen konstruktiven Aufwand bedeutet.

Mit Mikroelektronikbausteinen, welche für Massenprodukte wie Smartphones eingesetzt werden, ist die flächendeckende Anwendung von SiME im Feld, und nicht nur in Sonderanwendungen oder im Prototypentest, denkbar. Damit ist die Auslegung mit geringerer rechnerischer Sicherheit möglich, wenn ein Prüfsystem existiert, welches den Nutzer bei Überlastung frühzeitig informieren kann. Zudem können zeitfest ausgelegte Bauteile bei Sensornutzung im Feld unter präziserer Bewertung der Restlebensdauer zweckdienlich ausgetauscht werden. Weiterhin lassen sich deutlich hochwertigere Daten für die Produktentwicklung gewinnen, als wenn wie bisher nur einige wenige Testfahrzeuge o. Ä. eingesetzt werden.

Forschungsherausforderung ist u. A., die Sensorik ohne nennenswerte Schwächung des Maschinenelements zu integrieren, und eine Messkette mit äußerst

geringem Energiebedarf aufzubauen, um auch bei langlebigen Maschinen mit kleinen Pufferspeichern und Energy Harvesting auf dem Bauteil arbeiten zu können.

Konzept

Die konventionelle Belastungserfassung per Dehnungsmessstreifen (DMS) würde eine konstante elektrische Energieversorgung und eine konstante Abtastung mit hoher Frequenz erfordern. Zur Minimierung des Energiebedarfs wird daher die Nutzung eines sensorischen Werkstoffs vorgesehen, welcher zu beliebig weit auseinanderliegenden Zeitpunkten elektrisch ausgelesen werden kann, selber jedoch keine elektrische Energie benötigt.

Metastabiler Austenit, welcher bspw. beim oft eingesetzten Edelstahl X5CrNi18-10 (1.4301) vorliegt, wandelt bei Belastung oberhalb einer Grenzlast zu Martensit um. Diese irreversible Gefügeänderung kann mittels Wirbelstromprüfung zur digitalen Datenverarbeitung erfasst werden, da sich insbesondere die magnetischen Werkstoffeigenschaften ändern, und ist somit sensorisch nutzbar. Nach entsprechend vielen Lastzyklen über der Auslösegrenze oder einer besonders hohen Überlast ist die sensorische Nutzbarkeit „verbraucht“, da der Martensitanteil maximal ist, und bei folgender Belastung nicht mehr weiter steigen kann.

Während die Wirbelstromprüfung durch einen Techniker mit einem Handgerät bei planmäßigen Wartungen denkbar ist, wird für das sensorintegrierte Maschinenelement ein Wirbelstromsensor in Form einer Spule in Folienbauweise (ähnlich DMS) und eine Auswerteeinheit zur Informationsverarbeitung in das Bauteil fest verbaut (Abbildung 1), so dass im laufenden Betrieb bei einer ausreichenden zur Verfügung stehenden Energiemenge Informationen erfasst werden können.

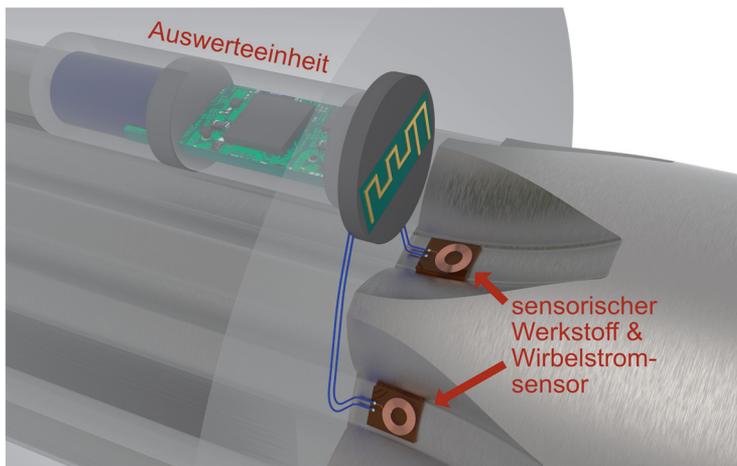


Abbildung 1: Konzept

Sensorischer Werkstoff

Die Nutzung der sensorischen Werkstoffeigenschaft in technischen Anwendungen wurde bereits von verschiedenen Forschungsstellen demonstriert.

In /2/ wurde eine Überwachungslösung für Brücken vorgestellt, in welcher ein Stab aus metastabilem Austenit angeschraubt wird und so die Dehnungen des darunter liegenden Bauteils erfährt (in der Klassifikation nach /1/ wird so ein sensortragendes Bauteil erzeugt). Ähnlich wurden in /3, 4/ Drähte als Sensor in kohlenstoffaserverstärkten Kunststoff eingewebt, um später deren Gefügeänderungen auslesen zu können. In /5/ wurden Felsanker mit einem Abschnitt aus sensorisch nutzbarem Stahl sowie komplett aus sensorisch nutzbarem Stahl hergestellte Felsplatten für die Einsatzgebiete Streckenausbau im Bergbau und Hängebrückenverankerung entwickelt. Eine testweise am Bauteil angebrachte Auswerteeinheit war zu groß und entlud die eingesetzte Batterie zu schnell. Vorgesehen wurde die Auswertung durch Techniker bei Inspektionen mit Handgeräten. Analog wurde in /6/ die Restlebensdauerbewertung von kompletten Edelstahlbauteilen von Atomkraftwerken durch die Erfassung des magnetischen Anteils bei Inspektionen beschrieben. In /7/ wurden Legierungen für Sensorschrauben entwickelt, die höhere Zugfestigkeiten als kommerziell verfügbare Stähle im metastabilen austenitischen Zustand aufweisen. Eine Auslesespule wurde in eine mitverbaute Unterlegscheibe integriert, an welche vom Wartungstechniker ein Auslesegerät angeschlossen werden kann.

Für ein sensorintegriertes Maschinenelement als Austauschlösung muss der sensorisch nutzbare Werkstoff mit dem vorher eingesetzten, nicht sensorisch nutzbarem, vergleichbare Festigkeitseigenschaften aufweisen. Im austenitischen Zustand haben die kommerziell erhältlichen in Frage kommenden Legierungen jedoch vergleichsweise niedrige Fließgrenzen, während sie im nicht mehr zur Lastaufzeichnung nutzbaren („bereits ausgelösten“) martensitischen Gefüge konkurrenzfähig sind. Wenn von der Entwicklung von Speziallegierungen wie in der oben angesprochenen Quelle /7/ abgesehen werden soll, ist es naheliegend, das Bauteil mit martensitischem Gefüge herzustellen, und lokal per Laserwärmebehandlung zu Austenit umzuwandeln um so einen definierten Sensor zu erzeugen. Dies wurde in /8/ an Werkstoffproben demonstriert. Das Artikeltitelbild zeigt einen Schliff durch solch einen Sensorpunkt. Abseits der Zahnwellenanwendung bieten sich so Bauteile für gelaserte Werkstoffsensoren an, die während ihrer Fertigung ohnehin schon eine Laserkabine durchlaufen wie z. B. zu schweißende Fahrwerkteile.

Die Umwandlungskinetik hängt signifikant von der Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit ab /9/, was die Interpretierbarkeit des Messsignals erschwert. Zu beiden Einflüssen existieren Modelle /9/, mit denen ein Umrechnungsversuch unternommen werden kann. Die Messsignalbewertung ist somit Forschungs herausforderung.

Systemstruktur

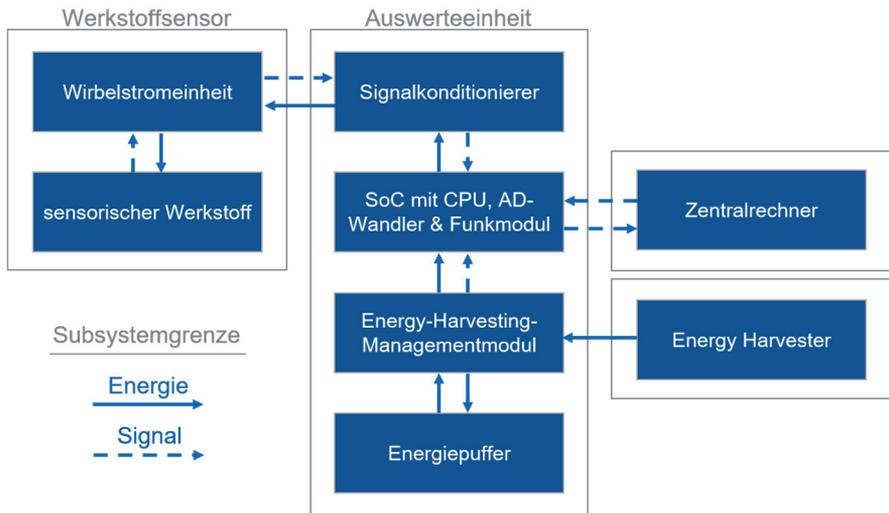


Abbildung 2: Systemstruktur

Die Systemstruktur des in Abbildung 1 dreidimensional gezeigten Konzepts zur Sensorintegration an der Zahnwelle ist in Abbildung 2 als Blockdiagramm dargestellt. Räumlich getrennt und nur durch an der Bauteiloberfläche verlegte Kabel elektrisch verbunden sind die Subsysteme Werkstoffsensor und Auswerteeinheit mit SoC (system on a chip), welche die Signalverarbeitung, das Energiemanagement und die Kommunikation übernimmt. Der Energy Harvester kann je nach Anwendungsfall auch mit dem System Auswerteeinheit zusammengelegt werden. Der Zentralrechner fasst die Informationen verschiedener SiME zusammen und stellt eine Benutzerschnittstelle dar bzw. kommuniziert mit weiteren, zu anderen Maschinen gehörenden Rechnern bzw. Rechenzentren.

Für die Integration der Auswerteeinheit wurden je nach Anwendungsfall zwei Positionen und Bauformen als sinnvoll zur Erfüllung von Anforderungen hinsichtlich der Fertigbarkeit, Kerbwirkung, Positionsverfügbarkeit etc. identifiziert /10/. Für den Längenausgleich von Gelenkwellen und Systemverbindungen wie Getriebeeingänge befindet sich direkt neben der Zahnwelle die Wellenstirnseite, so dass der gering belastete Wellenkern genutzt werden kann. Bei Verbindungen in der Wellenmitte, bspw. bei der Zahnradmontage kann in vielen Fällen Bauraum im Nabenkörper gefunden werden, welcher deren Primärfunktion nicht behindert, wie es bspw. von Leichtbaubohrungen in Zahnradkörpern bekannt ist (Abbildung 3).

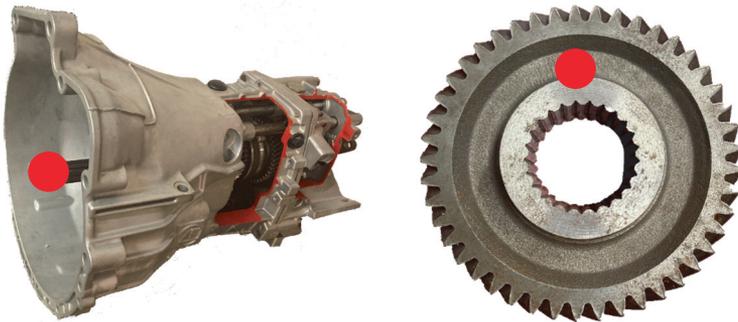


Abbildung 3: sinnvolle Positionen für Auswerteeinheit, rot markiert an Wellen- (links) bzw. Nabenstirnseite (rechts)

Forschungsausblick

Ziel des Forschungsvorhabens ist der Funktionsnachweis des beschriebenen Konzepts eines sensorintegrierten Maschinenelements, was im Prototypentest auf einem Zahnwellenprüfstand mündet. Dazu werden Werkstoffeignung und Laserwärmehandlungsverfahren untersucht. Die Schwächung des Bauteils durch den Sensor und die Interpretierbarkeit des Martensitanteils als schädigungsäquivalentes Signal werden simulativ untersucht. Eine kompakte Auswerteeinheit mit einem Energy-Harvesting-System wird entwickelt.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten werden gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Projekt „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ mit der Projektnr. 466760574. Das Projekt ist Teil des SPP 2305 mit der Projektnr. 441853410.

Literatur

- /1/ Vorwerk-Handing, G.; Gwosch, T.; Schork, S.; Kirchner, E. & Matthiesen, S.: Classification and examples of next generation machine elements. *Forschung im Ingenieurwesen* Bd. 84 (2020), Nr. 1, S. 21–32
- /2/ Thompson, L. D. & Westermo, B. D.: New strain measurement technology for material damage assessment. *Smart Structures and Materials 1994: Smart Sensing, Processing, and Instrumentation*. Bd. 2191 : SPIE, 1994, S. 380–391
- /3/ Lavere, K. A.; Thompson, L. D. & Kline, R. A.: Embodied passive sensor development for composites. *AIP Conference Proceedings* Bd. 615, American Institute of Physics AIP (2002), Nr. 1, S. 929

- /4/ Wielage, B.; Mäder, Th.; Nestler, D.; Schurig, Th.; Michaelis, B. & Sievers, S.: Belastungsmonitoring an Faserverbundwerkstoffen unter Ausnutzung der Gefügeumwandlung von Sensordrähten. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* Bd. 41 (2010), Nr. 6, S. 430–436
- /5/ Bemont, C. P.: Trip steels as smart sensor alloys. Dissertation Universität KwaZulu-Natal, 2013
- /6/ De Backer, F.; Schoss, V. & Maussner, G.: Investigations on the evaluation of the residual fatigue life-time in austenitic stainless steels. *Nuclear Engineering and Design* Bd. 206 (2001), Nr. 2, S. 201–219
- /7/ Vugampore, J.-M. V.: Development of high strength material for smart aircraft bolt. Dissertation Universität KwaZulu-Natal, 2005
- /8/ Mroz, G.; Reimche, W.; Frackowiak, W.; Bruchwald, O. & Maier, H. J.: Setting Discrete Yield-stress Sensors for Recording Early Component Loading Using Eddy-current Array Technology and Induction Thermography. *Procedia Technology* Bd. 15 (2014), S. 484–493
- /9/ Stringfellow, R. G.; Parks, D. M. & Olson, G. B.: A constitutive model for transformation plasticity accompanying strain-induced martensitic transformations in metastable austenitic steels. *Acta Metallurgica et Materialia* Bd. 40 (1992), Nr. 7, S. 1703–1716
- /10/ Heinrich, C.; Lohrengel, A.; Gansel, R.; & Maier, H. J.: Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff. Tagungsband zur 9. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen (2022), S. 253–257