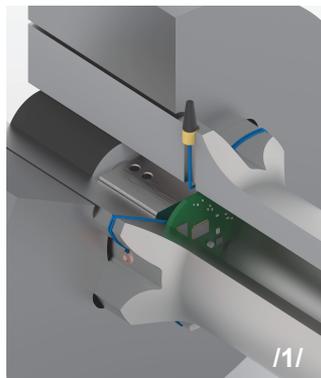


## Abschluss der 1. Förderphase des Projekts „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“

Quanz, M.; Gansel, R.; Barton, S.; Lohrengel, A.

*Zum Jahresende 2024 wird die 1. Förderphase des Projekts „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ des DFG Schwerpunktprogramms 2305 abgeschlossen. Der Artikel gibt einen Überblick über die erzielten Forschungsergebnisse und einen Ausblick auf die zweite Förderphase.*



*The first funding period of the project "Load sensitive spline shaft with sensory material" of the DFG Priority Programme 2305 will be completed at the end of 2024. The article gives an overview of the research results and an outlook on the second funding period.*

### Einleitung

Zum Jahresende 2024 wird das Projekt „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ abgeschlossen, das ein Teilprojekt des DFG Schwerpunktprogramms 2305 „Sensorintegrierende Maschinenelemente als Wegbereiter flächendeckender Digitalisierung“ ist [2]. Ziel des auf eine Gesamtdauer von sechs Jahren ausgelegten Schwerpunktprogramms (SPP) ist die Sensorintegration in standardisierte Maschinenelemente. Das genannte Teilprojekt wird vom Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal in Kooperation mit dem Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover durchgeführt. Im Fokus steht dabei die Zahnwelle als sensorintegrierendes Maschinenelement (SiME).

Zahnwellen gehören zu den höchstbelasteten Bauteilen im Antriebsstrang und verursachen bei Versagen kostenintensive Stillstandszeiten. Zur Überwachung bieten sich Sensoren an, die ein Versagen frühzeitig vorhersagen können. Marktübliche Sensoren, wie Dehnungsmessstreifen, müssen kontinuierlich ausgelesen werden, um Veränderungen im Betriebszustand erkennen zu können. Dazu muss die Stromversorgung der Sensoren inklusive Datenübertragung sichergestellt werden, was häufig über externe Strom- und Datenkabel geschieht. Bei rotierenden Antriebselementen werden dazu Schleifringe eingesetzt, die funktionsbedingt verschleißanfällig sind. Im Forschungsprojekt wird daher eine sensorintegrierende Zahnwelle entwickelt, die die genannten Probleme löst. Dabei kommen Werkstoffsensoren zum Einsatz, die bei Überschreitung von Grenzlasten eine Gefügeumwandlung durchlaufen. Diese Gefügeumwandlung von paramagnetischem Austenit zu ferromagnetischem Martensit wird mittels

Wirbelstromprüftechnik erfasst und erlaubt Rückschlüsse auf den Ermüdungszustand der Zahnwelle. Durch die auftretende Gefügeumwandlung ist kein kontinuierliches Auslesen der Sensoren erforderlich. Die Messwerte werden durch eine in die Zahnwelle integrierte Auswerteelektronik erfasst und verarbeitet. Zur Vermeidung der Verwendung von Schleifringen erfolgt die Datenübertragung drahtlos mittels der Funktechnologie LoRaWAN. Die notwendige Energie wird dabei durch Energy Harvesting zur Verfügung gestellt.

### Ziele und Ergebnisse der 1. Förderphase

Die 1. Förderphase des Teilprojekts hatte zum Ziel, einen Werkstoffsensoren in eine Zahnwelle zu integrieren, der bei Belastung oberhalb einer mechanischen Grenzlast durch Gefügeumwandlungen Informationen zur Belastungshistorie speichert. Die Gefügeänderung von paramagnetischem Austenit zu ferromagnetischem Martensit ist als Sensorprinzip nutzbar und kann durch eine Wirbelstromprüfung detektiert werden. Im Projekt wurden dazu Werkstoffsensoren verschiedener Geometrie simultan und experimentell untersucht. /3/

Ein Teilziel war unter anderem die Bauraumneutralität, um konventionelle durch sensorintegrierende Maschinenelemente ersetzen zu können. Dazu wurden in /4/ mögliche Positionen im Maschinenelement für die Auswerteeinheit vorgestellt. Im weiteren Verlauf des Projekts wurde die Positionierung in der Hohlwelle favorisiert.



**Abbildung 1:** Zahnwelle mit eingebrachten Werkstoffsensoren für die Durchführung der Prüfstandsversuche /1/

Die Positionierung des Werkstoffsensors in der Zahnwelle hat einen Einfluss auf die im Werkstoffsensoren auftretenden Spannungen. Eine Positionierung im Spannungsmaximum ist zwar für die Sensorfunktion vorteilhaft, jedoch stellt der Werkstoffsensoren einen lokalen Festigkeitsunterschied im Gegensatz zum umgebenden Material dar, der im dynamischen Lastfall potenziell zu einer Schwächung des Bauteils führt /4/. In /5/ wurde deshalb ein Modell vorgestellt, wie zwischen der maximalen Spannung der Zahnwelle und der Spannung im Werkstoffsensoren umgerechnet werden kann. Um die Sensorfunktion in der Zahnwelle validieren zu können, wurden Prüfstandsversuche an Zahnwellen mit integriertem Werkstoffsensoren durchgeführt. Die verwendete Probe mit mehreren axial verteilten Sensoren ist in Abbildung 1 zu

sehen. Erste Ergebnisse der Versuche mit statischer Belastung sind in /1/ dargestellt. Weiterhin wurden dynamische Wechsellastversuche an unterschiedlichen Zahnwellengeometrien bei unterschiedlicher Belastung durchgeführt. In den durchgeführten Wechsellastversuchen reagiert der Werkstoffsensor innerhalb weniger Zyklen sensitiv auf mechanische Überbelastung. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass ab einer gewissen Sensorsättigung davon ausgegangen werden kann, dass ein kritischer Zustand der Zahnwelle vorliegt und eine weitere Belastung zum Versagen führen wird. Dabei ist es möglich, den Ausfall der Zahnwelle rechtzeitig vorherzusagen, ohne den Werkstoffsensor im Spannungsmaximum positionieren zu müssen.

Die Stromversorgung muss für eine Energieautarkie des SiME mittels Energy Harvesting sichergestellt werden. Energy Harvesting steht für die Nutzung von Umgebungsenergie und die entsprechende Umwandlung in elektrische Energie. In /6/ wurden die im Antriebsstrang nutzbaren Energiequellen diskutiert und gezeigt, wie mittels DC-Maschinen im Generatorbetrieb die Rotationsenergie des Antriebsstrangs genutzt werden kann, um elektrische Energie für den Betrieb des Wirbelstromprüfsystems und der weiteren elektronischen Komponenten zur Verfügung zu stellen.



**Abbildung 2:** Platine mit Auswerteelektronik und Modul zur Datenübertragung

Zur Verwendung der Messdaten ist es notwendig, Daten aus dem SiME zu übertragen. Dazu wird eine drahtlose Datenübertragung benötigt. Im Projekt wurde die Funktechnologie LoRaWAN eingesetzt, da sich diese durch ihre große Reichweite und hohe Energieeffizienz auszeichnet. Weiterhin wurde die Wirbelstromprüfeinheit im Vergleich zu industriell erhältlichen Systemen miniaturisiert. Der finale Prototyp der Auswerteelektronik und der Datenübertragung ist eine Platine, die in die Zahnwelle integriert werden kann. Diese ist in Abbildung 2 dargestellt.

### Zusammenfassung der Ergebnisse der 1. Förderperiode

Es wurde der Nachweis erbracht, dass Werkstoffsensoren zur Überlastdetektion von Zahnwellen verwendet werden können, obwohl sie nicht im Spannungsmaximum positioniert sind (vgl. /1/). Für erste Validierungstests des SiME wurde ein Demonstrator entwickelt, der in Abbildung 3 dargestellt ist. Im Demonstrator ist das Energy

Harvesting System integriert. Die Platine mit der Auswerteelektronik und dem Modul zur Datenübertragung ist ebenfalls in der Hohlwelle untergebracht.



**Abbildung 3:** Demonstrator der lastsensitiven, sensorintegrierenden Zahnwelle mit drahtloser Datenübertragung (LoRaWAN)

### Ausblick auf die beantragte 2. Förderphase

In der beantragten zweiten Förderphase des Projekts „Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff“ liegt der Fokus auf der Robustheit des Gesamtsystems. Dies schließt eine über die Lebensdauer der Zahnwelle autonome Energieversorgung und Datenübertragung ein. Die Updatefähigkeit der Software des Mikrocontrollers bzw. des Auswertalgorithmus muss sichergestellt werden, um auf zukünftige, eventuell veränderte Anforderungen reagieren zu können. Die geplante Laufzeit der 2. Förderphase beträgt ebenfalls 36 Monate.

### Energieversorgung

Die Energieautarkie der sensorintegrierenden Zahnwelle soll durch eine DC-Maschine im Generatorbetrieb in Kombination mit Pufferspeichern sichergestellt werden. In der ersten Förderphase stand der konstante Betriebszustand bzw. konstante Drehzahlen im Vordergrund. Um die Energieversorgung auf realitätsnahe Bedingungen anzupassen, wird das Energy Harvesting System weiterentwickelt, um auch beim Startvorgang oder bei häufigen Lastrichtungsänderungen ausreichend Energie zur Verfügung stellen zu können. Dies kann beispielsweise durch die Nutzung des thermoelektrischen oder piezoelektrischen Effekts geschehen. Mit Hilfe der Optimierung der Auswerteeinheit soll der Energiebedarf zudem gesenkt werden, sodass die Messung auch bei wechselnden Betriebszuständen gewährleistet ist. Durch die zuverlässigere Versorgung mit elektrischer Energie können

beispielsweise auch weitere Sensoren verwendet werden, die häufiger ausgelesen werden müssen.

### ***Datenübertragung***

Zur drahtlosen Datenübertragung wird wie in der 1. Förderphase die Funktechnologie LoRaWAN eingesetzt. Forschungsschwerpunkt der 2. Förderphase ist die Frage, wie die Verbindung mittels Over-The-Air-Update genutzt werden kann, um die Software des Mikrocontrollers anpassen zu können. Die sichere Übertragung der Daten wird dabei durch eine Verschlüsselung gewährleistet.

### ***Funktionszuverlässigkeit und Langzeitstabilität***

Die Robustheit der Einzelkomponenten unter typischen Umgebungsbedingungen, wie Temperatur- und Öleinfluss, Vibrationen, aber auch die elektromagnetische Verträglichkeit und das Verhalten unter den wirkenden Fliehkräften stehen im Fokus. Dazu werden Prüfstandsversuche der Einzelkomponenten, aber auch des Gesamtsystems durchgeführt, um eine Funktion unter realitätsnahen Bedingungen über die Lebensdauer zu prüfen und schließlich zu gewährleisten. Insbesondere wird untersucht, ob eine temperaturbedingte Degradation der elektronischen Komponenten über die Lebensdauer der Zahnwelle auftritt. Außerdem wird die Funktionsweise des Werkstoffsensorsystems unter widrigen Umgebungsbedingungen getestet.

### ***Funktionserweiterungen***

Für die korrekte Interpretation der Sensorinformationen werden Sensoren zur Temperatur- und Drehzahlmessung integriert. Zur Klassifizierung von Lastkollektiven werden beispielsweise die Temperaturdaten und die Messwerte des Werkstoffsensors kombiniert. Die so erzielte Temperaturkompensation erhöht die Datenqualität. Zudem wird der Funktionsumfang energieabhängig angepasst, sodass Sensoren bei Bedarf zu- oder abgeschaltet werden können.

### ***Methodik***

Auf Grundlage der durchgeführten Simulationen und Prüfstandsversuche wird eine Methodik zur Gestaltung und Simulation von SiME entwickelt. Dieses Rahmenwerk enthält sowohl die konstruktiven Merkmale der Zahnwelle, als auch Ergebnisse der durchgeführten Simulationen aus der 1. Förderperiode. Zusätzlich werden Informationen zur Integration des SiMEs in lokale Kommunikationsnetzwerke, zur Fertigung von prototypischen sensorintegrierten Zahnwellen, sowie zur Herstellung des Werkstoffsensors integriert. Die Module zur Datenerfassung und -auswertung und zur Energieversorgung sind ebenfalls in der Methodik enthalten.

## Zusammenfassung

In der 1. Förderphase wurden bereits umfangreiche Versuche zur Integration des Werkstoffsensorsystems in Zahnwellen durchgeführt. Es wurde ein Konzept zur Energieversorgung getestet. Weiterhin wurde das Wirbelstromprüfsystem miniaturisiert und eine drahtlose Datenübertragung implementiert. Die 2. Förderphase hat zum Ziel, die sensorintegrierende Zahnwelle unter realitätsnahen Umgebungsbedingungen, d. h. unter Temperatur- und Öleinfluss, weiterzuentwickeln. Dazu sollen umfangreiche Prüfstandsversuche der Teilkomponenten und des Gesamtsystems durchgeführt werden.

## Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) Projektnummer 466760574 - Projekttitel "Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff". Das Projekt ist Teil des Schwerpunktprogramms 2305 mit der Projektnummer 441853410. Die Autoren danken der DFG für die finanzielle Unterstützung.

## Literatur

- /1/ Quanz, M.; Lohrengel, A.; Gansel, R.; Barton, S.: Zahnwelle mit konditionierbarem Lastsensor und integriertem Energy Harvesting, in *10. VDI-Fachtagung Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen 2024 - Dimensionierung, Fertigung, Anwendungen und Trends*, in VDI-Berichte, Nr. 2443. , Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2024, S. 193–200.
- /2/ DFG - GEPRIS - SPP 2305: Sensorintegrierende Maschinenelemente als Wegbereiter flächendeckender Digitalisierung. Zugegriffen: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/441853410?language=de>
- /3/ Gansel, R.; Heinrich, C.; Lohrengel, A.; Maier, H. J.; Barton, S.: „Development of Material Sensors Made of Metastable Austenitic Stainless Steel for Load Monitoring“, *J. of Materi Eng and Perform*, Sep. 2024, DOI: 10.1007/s11665-024-09910-9.
- /4/ Heinrich, C.; Lohrengel, A.; Gansel, R.; Maier, H. J.: Lastsensitive Zahnwelle mit sensorischem Werkstoff, in *9. VDI-Fachtagung Welle-Nabe-Verbindungen 2022 Dimensionierung – Fertigung – Anwendungen und Trends*, Bd. 2408, in VDI-Berichte, vol. 2408. , Leinfelden-Echterdingen bei Stuttgart: VDI Verlag GmbH, 2022, S. 267–271.
- /5/ Quanz, M.; Schäfer, G.; Gansel, R.; Barton, S.; Maier, H. J.; Lohrengel, A.: Auswirkung der Variation des Fußrundungsradius und des Bohrungsdurchmessers in einer sensorintegrierenden Zahn-Hohlwelle auf die Kerbspannungen im Zahnfuß, in *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium DMK 2024*, Göttingen: sierke VERLAG - Sierke WWS GmbH, Mai 2024, S. 145–160.
- /6/ Quanz, M.; Gansel, R.; Barton, S.; Lohrengel, A.: Energy Harvesting in rotierenden Maschinenelementen, *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal*, Bd. 48, S. 89, Okt. 2024, DOI: 10.21268/20241023-10.