

Schlussbericht zum BMWi-Projekt „CoMoGear“
im Rahmen
des Forschungsprogramms „Maritime Technologien der nächsten
Generation“ des BMWi
mit dem Titel
„Condition Monitoring of Marine Gearboxes based on Wireless,
Energy-Autonomous Sensor Nodes“

Zuwendungsempfänger: Bachmann Monitoring GmbH

Förderkennzeichen: 03SX417E

Verbundprojekt: CoMoGear - Condition Monitoring of Marine Gearboxes based on Wireless, Energy-Autonomous Sensor Nodes

Vorhaben: Power Transmission Monitoring (PTMon) – Entwicklung von Methodik und Sensorik zur Zustandsüberwachung der drehmomentübertragenden Bauteile im Getriebe

Projektleiter: Dipl.-Phys. Thomas Iwert

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2016 bis 31.12.2019

Berichtszeitraum: 01.08.2016 bis 31.12.2019

Datum: 29.06.2020

Autoren: Dipl.-Phys. Thomas Iwert
Dipl.-Ing. Diana Kettner

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03SX417E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	KURZE DARSTELLUNG	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	8
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2	EINGEHENDE DARSTELLUNG	12
2.1	Verwendung der Zuwendung	12
2.1.1	Zielstellung	12
2.1.2	Anforderungen und Randbedingungen	12
2.1.3	Drehzahlmessung	14
2.1.4	Drehmomentmessung	20
2.1.5	Signalanalyse zur Zustandsdiagnose	25
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	29
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	29
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	29
2.5	Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	31
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	31
3	LITERATUR	33

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die mannlöse Schifffahrt bietet eine Reihe von Vorteilen. Neben der Reduzierung der Personalkosten bietet sich durch die in der Folge nicht mehr benötigten Kabinen die Möglichkeit, die Frachtmenge und somit den Warentransport zu steigern. In der Vergangenheit wurden bereits erste Schritte in Richtung der mannlösen Schifffahrt erzielt [DNVa, Bru14].

Im Zusammenhang mit der mannlösen Schifffahrt gewinnt die Zuverlässigkeit des Maschinenraums an Bedeutung [Rød14]. Der Ausfall von Komponenten während der Fahrt muss ausgeschlossen werden können. Konventionelle Wartungs- und Instandhaltungsbedarfe müssen mit Hilfe von intelligenten Ferndiagnosesystemen frühzeitig detektiert und geplant werden. Durch zustandsorientierte Instandhaltung (engl.: condition-based maintenance, CBM) kann eine Strategie verfolgt werden, die auf Basis von gesammelten Informationen Instandhaltungsmaßnahmen ableitet und terminiert [Jar06].

Das Schiffsgetriebe ist ein hochbelastetes Element zwischen Dieselmotor und Propelleranlage. Daraus resultieren besondere Anforderungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit. Neben dem beschriebenen zukünftigen mannlösen Betrieb stellt der bereits heute existierende Betriebsfall des Dynamic Positionings hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit. In diesem Betriebsfall soll das Schiff eine bestimmte Position auch bei hohem Wellengang über mehrere Tage halten. Gewährleistet wird dies durch eine automatische Regelung der Ruderanlage sowie des Thruster- und des Propellerschubs. Bei Anlagen mit dieselmotorisch betriebenen Festpropellern ohne E-Motorunterstützung kann die Schubänderung nur durch eine Veränderung der Propellerdrehzahl erreicht werden. Die Kupplungen müssen in diesem Fall zum einen sehr häufig umschalten zwischen „Voraus-“ und „Zurück-Stellung“ und zum anderen permanentem Schlupfbetrieb ohne Unterbrechung standhalten. Daraus resultiert eine hohe thermische Belastung für die Lamellenkupplung. Die permanente messtechnische Überwachung der Temperaturen in der Lamellenkupplung und des Verschleißes, würden zu signifikanten Verbesserungen des Dynamic Positionings und der Betriebssicherheit führen. Bisher nutzen nur ca. 2 % der klassifizierten Schiffe die Möglichkeiten des CBM im Umfeld des Schiffsantriebsstrangs, da die Investitionsvolumina als zu hoch angesehen werden [DNVb].

Ziel des Projekts „CoMoGear“ war die Entwicklung und prototypische Implementierung eines energieautarken, drahtlosen Sensornetzwerks zur Zustandsdiagnose von hoch-belasteten, rotierenden Bauteilen im Schiffsgetriebe.

Die Aufnahme von Messdaten hinsichtlich Drehmoment, Drehzahl, Temperatur und Verschleißzustand im Öl umspülten Getriebe soll durch miniaturisierte, autarke Sensorknoten ermöglicht werden. Neben der leichten Nachrüstbarkeit sind die geringeren Kosten ein

wesentlicher Vorteil. Diese sind bspw. im Wegfall von nachträglichen Wartungskosten durch die Energieautarkie der Sensorknoten begründet.

Im F&E-Versuchsfeld der REINTJES GmbH wurde zu Versuchszwecken ein Demonstrator des energieautarken Sensornetzwerks an einem Schiffsgetriebe aufgebaut. Der Demonstrator soll die Möglichkeit der Identifikation von kritischen Betriebszuständen und Verschleiß aufzeigen und in der Lage sein, das Drehmoment der Abtriebswelle, die Drehzahlen unmittelbar vor und nach der Lamellenkupplung, die Temperatur und den Verschleißzustand der Lamellenkupplung aufzunehmen.

Der Projektverbund bestand aus fünf Partnern, die die folgenden Aufgaben hatten:

a) Teilprojekt DrAnVer (IPH)

Im Teilprojekt DrAnVer arbeitete das IPH an der Entwicklung einer drahtlosen, energieautarken Analyse von Verschleißzuständen der Lamellenkupplung von Schiffsgetrieben. Hierfür erfolgte:

- die Identifikation eines geeigneten Messprinzips
- die Auswahl geeigneter Sensorik für die Verschleißmessung der Lamellen
- die Entwicklung, Auslegung, Realisierung und Miniaturisierung des Messsystems
- die Definition von Schnittstellen zum Energy Harvesting System

b) Teilprojekt DraSeMe (microsensys)

Im Teilprojekt DraSeMe arbeitete microsensys an der Entwicklung eines drahtlosen, energieautark arbeitenden Datenübertragungssystems zur Übermittlung von Messdaten verschiedener Sensoren. Hierfür erfolgte:

- die Konzeption, Entwicklung und Realisierung eines drahtlosen Datenübertragungssystems inkl. demonstrationsfähiger Daten-Visualisierung
- die Montage und der Aufbau von Funktionsmustern des Sensorknotens inkl. Empfangseinheit

c) Teilprojekt EnRoBa (Hahn-Schickard)

Im Teilprojekt EnRoBa arbeitete Hahn-Schickard an der Entwicklung einer dezentralen Energieversorgung für energieautarke Sensorsysteme auf rotierenden Bauteilen. Hierfür erfolgte:

- die Ausarbeitung von Konzepten einer getriebeinternen Energieversorgung (mit und ohne festen Bezugspunkt) auf Basis kinetischer Energy Harvesting Technologien
- der theoretische und experimentelle Nachweis über die Machbarkeit der Konzepte sowie Abschätzung der erzielbaren Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl
- Konzeption und Implementierung einer Powermanagement-Technologie die über den gesamten Drehzahlbereich geregelte Ausgangsspannungen und eine konstante Ausgangsleistung sicherstellt
- Sicherstellung der Integrierbarkeit der Energy Harvesting Lösung im Schiffsgetriebe

- Inbetriebnahme und Charakterisierung der Energy Harvesting Systeme sowie des Gesamtsystems am rotatorischen Messplatz bei Hahn-Schickard

d) Teilprojekt InSenMa (REINTJES)

Im Teilprojekt InSenMa arbeitete REINTJES an der Integration von drahtlosen, energieautarken Sensoren zur Überwachung von Maschinenelementen und Betriebszuständen in maritimen Getrieben. Hierfür erfolgte:

- die Auswahl und Bewertung der verschiedenen Messprinzipien
- die Erstellung von Konzepten zur Integration aller Einzelsysteme am/im Getriebe
- die Integration aller Einzelsysteme in ein Getriebe
- der experimentelle Nachweis der Funktionsfähigkeit aller Systeme

e) Teilprojekt PTMon (Bachmann)

Im Teilprojekt PTMon arbeitete Bachmann an der Entwicklung von Methodik und Sensorik zur Lastüberwachung der drehmomentübertragenden Bauteile im Getriebe. Hierfür erfolgte:

- die Implementierung einer Drehzahlmessung vor und hinter der Lamellenkupplung in einem Schiffsgetriebe
- die Implementierung einer Drehmomentmessung außen an der Abtriebswelle des Getriebes

Die Implementierung von Drehzahl- und Drehmoment ermöglicht die Analyse und Charakterisierung der Betriebszustände (Kraftfluss unterbrochen und Kupplung geöffnet, Kraftfluss geschlossen und Kupplung geschlossen, Kraftfluss moduliert und kurzzeitiger oder permanenter Schlupfbetrieb) sowie die Erfassung und Analyse der akkumulierten Lasten / Lastereignisse (insb. Dynamic Positioning). Durch zusätzliche Informationen wie Temperatur und Abnutzungsgrad der Lammellenkupplung wird eine umfangreiche Zustandsdiagnose des Getriebes möglich.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt wurde mit direkten Bezügen zu den förderpolitischen Zielen des Forschungsprogramms „Maritime Technologien der nächsten Generation“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Themenfeld „Schiffstechnik – Innovation für mehr Sicherheit und Zuverlässigkeit“ [BMW11] durchgeführt. Das entwickelte CoMoGear-CMS leistet einen Beitrag zu folgenden Punkten des Forschungsprogramms:

- Sicherheit als Entwurfskriterium wird den gesamten schiffbaulichen Prozess künftig umfassender prägen als bisher. Ziel des Forschungsprogramms ist eine Verbesserung der Sicherheit und Zuverlässigkeit der Schiffe auf See um den Faktor 10 bis zum Jahr 2025.

- Die Ausfallsicherheit wesentlicher Komponenten eines Schiffes ist ein weiteres Feld, in dem FuE-Bedarf gesehen wird. Für einen „Safe Return to Port“ müssen Schiffe so konstruiert werden, dass sie nach bestimmten Schadensfällen schwimmfähig bleiben und nach Unfällen möglichst wenige Schadstoffe austreten sowie möglichst keine Personen zu Schaden kommen.

Bereits im vorhergehenden Programm „Schifffahrt und Meerestechnik für das 21. Jahrhundert“ [BMW09] wurden Themenfelder adressiert, die im Bezug zum durchgeführten Vorhaben stehen:

- Erhöhung der Zuverlässigkeit des Schiffsbetriebs – Ziel ist die Entwicklung innovativer technischer Lösungen, die die Verfügbarkeit der Systeme erhöhen und den erheblichen Aufwand vorbeugender Wartung und Instandhaltung senken sollen. Darüber hinaus sind [...] Methoden für satellitengestütztes Condition Monitoring und satellitengestützte Ferndiagnosen zu entwickeln [BMBF00].
- Standardisierung und Modularisierung von Bauteilen und Baugruppen – Die Förderung von Forschung und Entwicklung zur Standardisierung und Modularisierung von Bauteilen und Baugruppen soll hier Rationalisierungsmöglichkeiten eröffnen und sowohl zur Verminderung der Zahl der Arbeitsschritte als auch der Zahl der Bauteile beitragen [BMBF00].

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtvorhaben war für eine Laufzeit von 24 Monaten ausgelegt, wurde jedoch kostenneutral um 19 Monate verlängert. Während dieser Laufzeit konnte ein funktionsfähiges Condition Monitoring System (CMS) an einem ausgewählten Beispielgetriebe in Betrieb genommen werden. Das Projekt ist in fünf Arbeitspakete untergliedert. Abbildung 1 zeigt den ursprünglichen Projektplan des Vorhabens.

Nach der Analyse der Anforderungen und Umgebungsbedingungen im Schiffsgetriebe (AP1) wurde die Konzeption des CMS durchgeführt (AP2), wobei die Teilaspekte Sensortechnologie (Drehmoment, Drehzahl, Verschleiß und Temperatur), Signalverarbeitung, Energieversorgung und drahtlose Datenübertragung adressiert wurden. Anschließend erfolgte die Umsetzung der Konzepte (AP3) in Form von Sensorknoten, deren Messaufgabe gemäß den zuvor gestellten Anforderungen ausgelegt war. Das Zusammenspiel der einzelnen Sensorknoten wurde an einem Schiffsgetriebeprüfstand des Partners REINTJES überprüft und validiert (AP4). Parallel erfolgten die Koordination des Projekts und die Dokumentation der (Zwischen-)Ergebnisse (AP5).

	Jahr																						
	2016			2017						2018													
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
Arbeitspakete																							
AP 1 Analyse - Lastenheft																							
1.1 Identifikation vorhandener und notwendiger Einflussgrößen und Messpunkte																							
1.2 Analyse der technologischen Anforderungen im Getriebegehäuse																							
1.3 Analyse der Anforderungen an Datenübertragung und Verbindung zum vorhandenen CMS																							
1.4 Aufstellen einer Energiebilanz auf Basis eines Grobkonzeptes	★ MS1																						
AP 2 Konzeption																							
2.1 Konzeption Sensortechnologie (Drehmoment, Drehzahl)																							
2.2 Konzeption Sensortechnologie (Verschleiß)																							
2.3 Konzeption Sensortechnologie (Temperatur) und Konzeption drahtloser Datenübertragung																							
2.4 Konzeption Signalverarbeitung																							
2.5 Untersuchung und Entwicklung lokaler Energieversorgung	★ MS2																						
AP 3 Integration, Aufbau und Test CoMoGear-CMS																							
3.1 Umsetzung von Funktionsmustern im Laborumfeld																							
3.2 Vorbereitung F&E Versuchsfeld																							
3.3 Konstruktion und Integration der Energy Harvesting Module																							
3.4 Aufbau Datennetzwerk im Getriebegehäuse, Aufbau Transmitter und Kopplung an zentrale Auswerteeinheit																							
3.5 Konstruktion und Integration der Sensorik für Drehmoment- und Drehzahlmessung																							
3.6 Konstruktion und Integration der Sensorik für Verschleißmessung	★ MS3																						
AP 4 Validierung																							
4.1 Funktionstest CoMoGear-CMS																							
4.2 Ergebnisauswertung und Anpassung der Lösung	MS4 ★																						
AP 5 Projektmanagement																							
5.1 Dokumentation																							
5.2 Öffentlichkeitsarbeit und Verbreitung																							
5.3 Projektkoordination und -controlling																							

- Legende**
- ★ Meilenstein
 - Dauer der Projektphase
 - Dauer des Arbeitspaketes

Abbildung 1: Projektzeitplan

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Folgenden wird der Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der für das Projekt wichtigen Themenfelder Condition Monitoring im maritimen Umfeld, Sensortechnologie, kabellose Datenübertragung und autonome Energieversorgung dargestellt.

Condition Monitoring im maritimen Umfeld

Im maritimen Umfeld wurde von LIU ET AL. [Liu00] ein CMS für den Dieselmotor des Schiffes entwickelt, das in einem integrierten Bypass der Ölrückleitung des Kurbelgehäuses integriert wird. Zustandsrelevante Informationen werden durch die Detektion von Partikeln im Öl, die Analyse der Schmiermittelqualität sowie die Messung von Drehmoment und Drehzahl gewonnen. Die Detektion von ferromagnetischen Partikeln lässt auf Verschleiß an den Zylindern und Kolbenringen schließen. Leckagen bei der Wasser- oder Brennstoffzufuhr können durch Analyse von Verunreinigungen im Schmiermittel identifiziert werden. Drehzahl und Drehmoment der Antriebswelle dienen ebenfalls der Beurteilung des Verschleißzustands.

Auch KOUREMENOS und HOUNTALAS [Kou97] entwickelten eine Methode zur Zustandsdiagnose des Dieselmotors im Schiff. Drucksensoren am Zylinder und Kraftstoffeinspritzsystem übertragen kabelgebunden ihre Messdaten auf eine Auswerteeinheit, die in Verbindung mit einem speziell für mittel- und schnelllaufende Schiffsmotoren angepassten Bewertungsalgorithmus Aussagen bezüglich des Motorenzustands ermöglicht.

LI ET AL. [LiZ11] entwickelten ein Diagnosesystem für den Schiffsantrieb durch die Applikation von piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern an die Gehäuseoberfläche eines Getriebes. In Verbindung mit einer Bispektralanalyse und künstlichen neuronalen Netzen konnten Zahnfehler im Getriebe detektiert, einzelnen Komponenten zugeordnet und klassifiziert werden.

YANG ET AL. [Yan13] entwickelten ein CMS für Asynchronmotoren im Schiffsbereich und in Windenergieanlagen. Die Analyse stützt sich auf elektrische Störsignale, mit denen Schäden sowohl am Asynchronmotor als auch Unwuchten an der Antriebswelle identifiziert werden können.

Sensortechnologien

In der Praxis erfolgt die Beurteilung von Getrieben zumeist durch die Analyse von Körperschallsignalen. Die frequenzselektive Überwachung der Wellen, Verzahnungen und Lager ermöglicht die Beschreibung der Schadenszustände der einzelnen Bauteile. Während diese Vorgehensweise zur Vermeidung von Havarien oft ausreichend ist, ermöglicht erst die Kenntnis der tatsächlichen Belastungen eine zuverlässige Aussage über den aktuellen Zustand und die Restlebensdauer von Getriebebauteilen [Mac03].

Sensorik zur Erfassung von Schwingungen besteht im Regelfall aus piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern, welche zusammen mit einer Signalaufbereitung (z. B. Filterung, Abtastraten etc.) auf unterschiedliche zu überwachende Frequenzbereiche abgestimmt sind [Sil05]. Typische Einsatzgebiete sind Schwingungsmessungen und die Überwachung von industriellen Anlagen zur Detektion von Unwuchten, Fehlausrichtung von Antriebswellen, Wälzlager- und Getriebezuständen sowie die Gesamtschwingung von Ventilatoren, Motoren oder Kupplungen. Die Stromversorgung der Sensoren liegt je nach Bauweise zwischen zwei und zehn mA und benötigt zumeist Konstantstrom.

Die Messung von Drehmomenten an rotierenden Bauteilen stellt eine weitere Möglichkeit zur Zustandsdiagnose dar. Konstruktiv in den Antriebsstrang integrierte Sensoren in Form von Messflanschen oder Messwellen basieren meistens auf Dehnungsmessstreifen oder einer Verdrehwinkelerfassung. Nachteilig dabei ist die notwendige Integration eines torsionsweichen Messwellenabschnitts, da die Wellen im Schiffsgetriebe äußerst biegesteif ausgelegt sind. Des Weiteren erfordert die Integration eines zusätzlichen Bauteils den notwendigen Bauraum, der im Getriebe oftmals nicht gegeben ist. Telemetrie gestützte Drehmomentsensoren benötigen im Allgemeinen keine Modifikation des Antriebsstrangs und werden auf vorhandene Wellenabschnitte appliziert. Eine für den Fall der Nachrüstung favorisierte Lösung stellt die Verwendung von Drehmomentsensoren dar, die auf Basis von Magnetfeldänderung der überwachten Welle in Folge eines auftretenden Drehmoments funktionieren.

Die Zustandsdiagnose von rotierenden Bauteilen wird von Industrie und Forschung vorangetrieben. HUEBLER ET AL. [Hue10] nutzen in einer Stahllamelle applizierte Dehnungsmessstreifen (DMS) zur Messung von Drehmoment und Winkelversatz in einer Kupplung. Mit diesem System kann einerseits der Wellenversatz von zwei Sensorlamellen zueinander, andererseits der Bruch einer Lamelle sicher identifiziert werden kann. Sowohl für die Übertragung der Messdaten als auch für die Energieversorgung der passiv arbeitenden Sensorlamellen wurde die Funktechnologie RFID eingesetzt. Über eine Distanz von Millimetern bis wenigen Zentimetern konnte durch induktive Kopplung auf einem Prüfaufbau die Funktionalität erzielt werden.

Auch die Firma Chr. Mayr GmbH & Co. KG [May13] vertreibt eine drehmomentmessende Kupplung. Mit Hilfe von dehnungsveränderlichen Messstreifen wird das Drehmoment bestimmt. Die Übertragung von offsetkorrigierten und verstärkten Messdaten erfolgt über eine Funktechnologie an eine zentrale Auswerteeinheit. Der Drehmomentmessbereich ist momentan zwischen 190 und 1.600 Nm limitiert und damit unzureichend für im Schiffsgetriebe auftretenden Antriebsmomente von 7.000 Nm und mehr. Die Energieversorgung benötigt 24 V DC Eingangsspannung bei einer maximalen Stromaufnahme von 1 A. Dieser Energiebedarf fällt nicht mehr unter Low-Power-Lösungen und ist für den Betrieb mit Energy Harvesting Systemen

deutlich zu hoch. Eine spezifische Anpassung einer mit Dehnungsmessstreifen ausgestatteten Lamelle ist für verschiedene Einsatzszenarien erforderlich.

Kabellose Datenübertragung

Für die funkgestützte Identifikation der Sensoren und der Datenkommunikation ihrer Messwerte eignet sich die RFID Technologie [Fin06]. Reichweiten über mehrere Meter auch im metallischen Umfeld im UHF-Bereich (z.B. 868 MHz) sind in industriellen Anwendungen bereits mit passiven Transpondern erfolgreich implementiert worden. Die batterielose und damit wartungsarme Technologie wird durch eine besonders energieeffiziente Datenübertragung ermöglicht.

Im maritimen Umfeld sind bereits einige Forschungsarbeiten zur Integration von drahtloser Kommunikationstechnik durchgeführt worden. PAIK ET AL. [Pai09] statteten ein gesamtes Schiff mit drahtlosen Sensorknoten aus, die ihre Daten mit der Funktechnologie zigBee übertragen. Sensoren für Temperaturen, Luftfeuchtigkeit und elektrische Kenngrößen wurden im Maschinenraum integriert. Der Fokus der Arbeit lag auf der Bestätigung der Einsatzmöglichkeit von Funktechnologie in der metallischen Schiffsumgebung. PILASK ET AL. [Pil09] verfolgten ein ähnliches Ziel. Mit der IEEE 802.15.4 Funktechnologie konnten Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Umgebungsdruck im Maschinenraum mit Hilfe von zwei aktiven Sensorknoten, vier Knoten zur Datenweiterleitung und einer Empfangseinheit aufgezeichnet werden.

Nachteilig bei diesen Lösungen sind hohe Instandhaltungskosten für den regelmäßigen Austausch der Batterien, die als Energieversorgung für die Sensorknoten genutzt wurden und deren Zustand es zusätzlich zu überwachen gilt [Glo99].

Autonome Energieversorgung

Die Projektpartner konnten bereits im Vorgängerprojekt aufzeigen, dass sich die zur Verfügung stehende Energie am Schiffsgetriebe in Form von Vibrationen und Temperaturdifferenzen für die Versorgung von Sensorknoten eignet [Hof14, Hof16, Sch15].

Forschungen zu den Bereichen Energiewandler [Bog09, Gil08], Energiespeicherung [Zhu09], Energiemanagement [LiS14, Her12] werden heute oft noch isoliert und ohne direkten Bezug auf mögliche industrielle Anwendungen durchgeführt. Nach aktuellem Stand der Technik werden derzeit verschiedene Ansätze zum Energy Harvesting verfolgt. Diese können zum einen nach mechanischen und zum anderen nach thermischen Energiequellen unterschieden werden [Spr08a, Spr08b, Fol07]. Mechanische Energiequellen werden beispielsweise durch vibrierende Maschinen oder bewegte Maschinenteile verkörpert. Durch Erzeugung einer Relativbewegung zwischen einem Magnetfeld und einer Spule kann ein Teil der mechanischen Energie in elektrische Energie umgewandelt werden. Obwohl das Prinzip bereits lange bekannt ist, ist dessen Anwendung bis heute nur auf wenige feinwerktechnische Ansätze, u. a. in der Uhrenindustrie, beschränkt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts bestand eine intensive Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Projektpartnern:

- IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH
- microsensys GmbH
- Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.
- REINTJES GmbH
- Bachmann Monitoring GmbH

In vier Konsortialtreffen, vier gemeinsamen Arbeitstreffen, zahlreichen Telefonkonferenzen und weiteren bilateralen Treffen wurde ein wesentlicher Bestandteil der Projektergebnisse erarbeitet.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung

Dieses Kapitel beschreibt eingehend die erzielten Ergebnisse im Teilvorhaben „Power Transmission Monitoring“ sowie die Verwendung der Zuwendung. Die Zuwendung wurde dazu genutzt, das am Projekt beteiligte wissenschaftliche Personal zu finanzieren sowie notwendige Materialien und Komponenten zu beschaffen, um die Funktionsmuster für das CoMoGear-CMS zu entwickeln und umzusetzen.

Konkret wurden zwei wissenschaftliche Mitarbeiter finanziert, die an der Entwicklung von Sensorik und Methoden der Signalanalyse zur Überwachung der drehmomentübertragenden Bauteile involviert waren und im Rahmen des Projektes folgende Tätigkeiten durchgeführt haben:

- Auswahl und Validierung von Drehzahl- und Drehmoment-Sensorik
- Entwicklung und Umsetzung eines Drehzahlgebers für Getriebeverzahnungen mit Richtungserkennung
- Entwicklung eines Signalanalysekonzepts zur Zustandsüberwachung von Schiffsgetriebenen

2.1.1 Zielstellung

Im Teilvorhaben „PTMon“ – Entwicklung von Methodik und Sensorik zur Zustandsüberwachung der drehmomentübertragenden Bauteile im Getriebe – wurden zwei Teilziele verfolgt:

1. Die Entwicklung und Realisierung von Sensorknoten zur Überwachung des Drehmoments und der Drehzahlen von An- und Abtriebswellen.
2. Die Analyse der Signale der Sensorknoten zur Bestimmung des Betriebszustandes des Getriebes und die Entwicklung von Methoden und Indikatoren zur Zustandsüberwachung der drehmomentübertragenden Bauteile.

Im Nachfolgenden werden die Vorgehensweise und Arbeitsinhalte zur Realisierung dieser Teilziele näher erläutert.

2.1.2 Anforderungen und Randbedingungen

Zur Zustandsdiagnose der hochbelasteten, rotierenden Bauteile im Getriebe ist eine Beurteilung durch die übertragende Leistung erforderlich. Diese ist das Produkt aus Drehmoment und Drehzahl, weswegen diese 2 Größen messtechnisch an der Abtriebswelle erfasst werden sollen.

Kann zusätzlich der Kupplungsschlupf detektiert werden, bietet das Zählen dieser Ereignisse eine Möglichkeit den Zustand des Lamellenpakets und damit der Kupplung selbst abzubilden.

Da Schlupfbetrieb auftritt, wenn das Verhältnis von Antriebs- zu Abtriebsdrehzahl nicht mehr dem Getriebe-Übersetzungsverhältnis entspricht, lässt sich dieser Zustand erfassen, wenn zusätzlich die Drehzahl an der Antriebswelle gemessen wird.

Weiterhin wurde die Drehrichtungserkennung der Abtriebswelle als Anforderung aufgenommen, um die Reversierzyklen des Getriebes (Schaltzyklen zur Umkehr der Drehrichtung der Abtriebswelle) im Rahmen der Zustandsüberwachung zu zählen.

Folgende Messgrößen wurden final zum Zweck der Zustandsüberwachung identifiziert:

- Drehmoment und Drehzahl am Abtrieb → Leistung
- Drehzahl an der Antriebs- und Abtriebswelle → Schlupferkennung
- Drehrichtungswechsel am Abtrieb → Anzahl der Reversierzyklen
- Temperatur in der Lamellenkupplung → Verschleiß-Kennwert für Kupplung
- Abstandänderung des Lamellenpakets → Verschleißmaß der Kupplung

Die Auslegung der Sensorknoten erfolgte unter Berücksichtigung der besonderen Betriebsbedingungen am und im Getriebe:

- Umgebungstemperatur bis 80°C,
- Ölumspülung durch Getriebeöl,
- Vibrationen im Normalbetrieb um 7,1 ... 11 mm/s,
- geringer Bauraum

Für die Konzeption der Sensortechnologien zur Drehzahl- und Drehmomentfassung ergaben sich die in Tabelle 1 zusammengefassten Anforderungen.

Tabelle 1: Anforderungen an Sensortechnologien für Drehzahl und Drehmoment

Bedingungen	Drehzahl-Sensorik	Drehmoment-Sensorik
Umgebungsbedingung im Getriebe	Öl zur Schmierung/Kühlung von Verzahnung, Lagerstellen u. Kupplung → starke Ölverwirbelung	
Temperatur im Getriebe	bis 80°C bei Betrieb -20 ... 60°C bei Transport 0 ... 60°C bei Lagerung	
erforderliche Schutzklasse	mind. IP65	-
Leistungsaufnahme	< 15mW	1...2 W, sensorabhängig
Bauraum (in mm) a = axial, r = radial	Antrieb, a: 15 ... 43.5 r: > 100 Abtrieb, a: 34 ... 141 r: > 100	a: 28 (innen) ... 39 (außen) r: > 100
spezielle Anforderung	<u>Antriebsdrehzahl:</u> 0 - 2650 1/min 47 Zähne → 0 – 2076 Hz inkl. Drehrichtungserkennung <u>Abtriebsdrehzahl:</u> 0 – 800 1/min 119 Zähne → 0 – 1586 Hz	berührungslos und frei kalibrierbar

Für ein möglichst kompaktes und robustes Design der Sensorknoten (SK) wurde, soweit darstellbar, die Sensorik, die Elektronik und das Energie Harvester System (EHS) in einem gemeinsamen Gehäuse integriert.

2.1.3 Drehzahlmessung

2.1.3.1 Konzeption

Die Drehzahl sollte sowohl an der Antriebswelle als auch an der Abtriebswelle gemessen werden. Da am Abtrieb zusätzlich auch die Drehrichtung zu erfassen war, wurden verschiedene Konzepte zur Drehzahlbestimmung inkl. Richtungserkennung mit geringer Leistungsaufnahme erarbeitet und im Anschluss im Laborumfeld umgesetzt und überprüft.

Prinzipbedingt benötigen Drehzahlaufnehmer äquidistante rotierende Inkremente bzw. Geberstrukturen (wie z.B. metallische Strukturen, optische Marken, Magnete) auf dem zu messenden Objekt. Unter den gegebenen Randbedingungen wurde wegen der Robustheit und Zuverlässigkeit magnetische oder induktive Messprinzipien (gegenüber optischen oder kapazitiven) bevorzugt. Um den Installationsaufwand gering zu halten, wurden am Getriebe intrinsisch vorhandene Geber-Strukturen, wie die Verzahnung der Stirnräder selbst, als Inkremente gewählt.

Die große Anzahl und äquidistante Verteilung der Zahnflanken bietet zusätzlich den Vorteil einer hohen Drehzahlaufklärung bei geringem „Jitter“ (bzw. geringer Varianz).

Der Sensor kann dabei axial oder radial zur Zahnstruktur angeordnet sein, was durch den ebenfalls im Sensorknoten integrierten Energy Harvester mitbestimmt wird. Beide Anordnungsmöglichkeiten kamen zur Anwendung. Durch die geeignete Positionierung von 2 solcher Sensoren in einem Sensorknoten kann zusätzlich die Drehrichtung bestimmt werden. Dazu werden die Phasenversätze der beiden Sensorsignale beim Erkennen einer Zahnflanke ausgewertet (vgl. Tabelle 3).

2.1.3.2 Evaluierung der Konzepte

Mit Hilfe von Evaluation-Kits des Herstellers NVE sowie unterschiedlicher ausgewählter Einzelsensoren (z.B. vom Typ ZF GS100701) wurden die zuvor erarbeiteten Konzepte (vgl. Tabelle 3) im Laborumfeld erprobt. Dazu wurde ein Wellenprüfstand (s. Abbildung 2) mit einer maximalen Drehfrequenz von 3000 Umdrehungen pro Minute genutzt, an dem ein Zahnrad angebracht wurde, bei dem das Modul mit dem des Versuchsgetriebes übereinstimmte. Aufgrund von Größenbeschränkungen des Aufbaus (zunehmende Zähnezahln bewirkt größeren Zahnrad-Durchmesser) war am Versuchsstand mit 12 Zähnen eine maximale Inkrement-Frequenz von 600 Hz realisierbar.

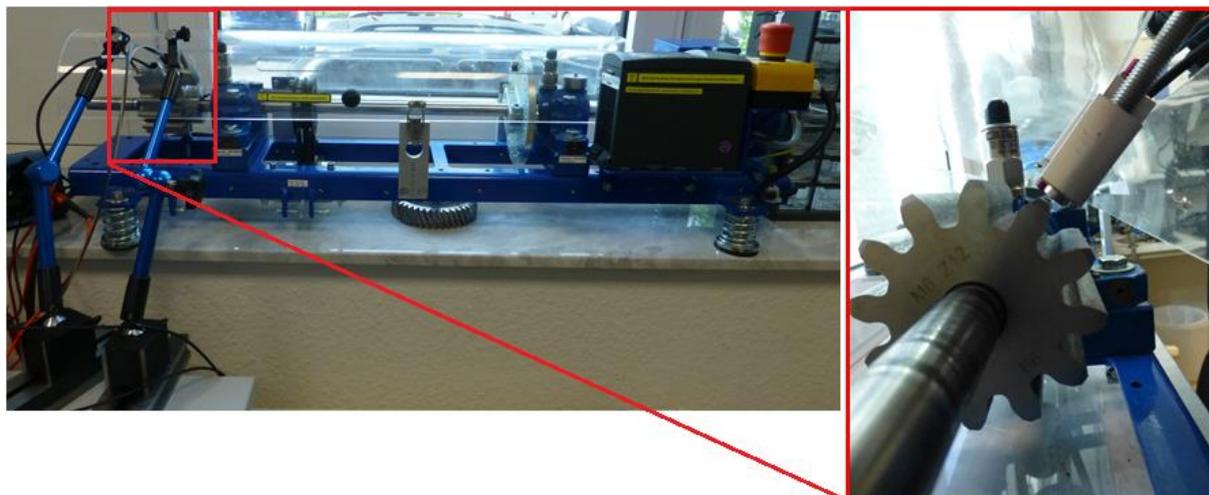


Abbildung 2: Links: Labor-Prüfstand zur Drehzahl-Untersuchung, rechts: Messung am Zahnrad mit Modul 6 (entspricht dem Verzahnungsmodul des realen Getriebes)

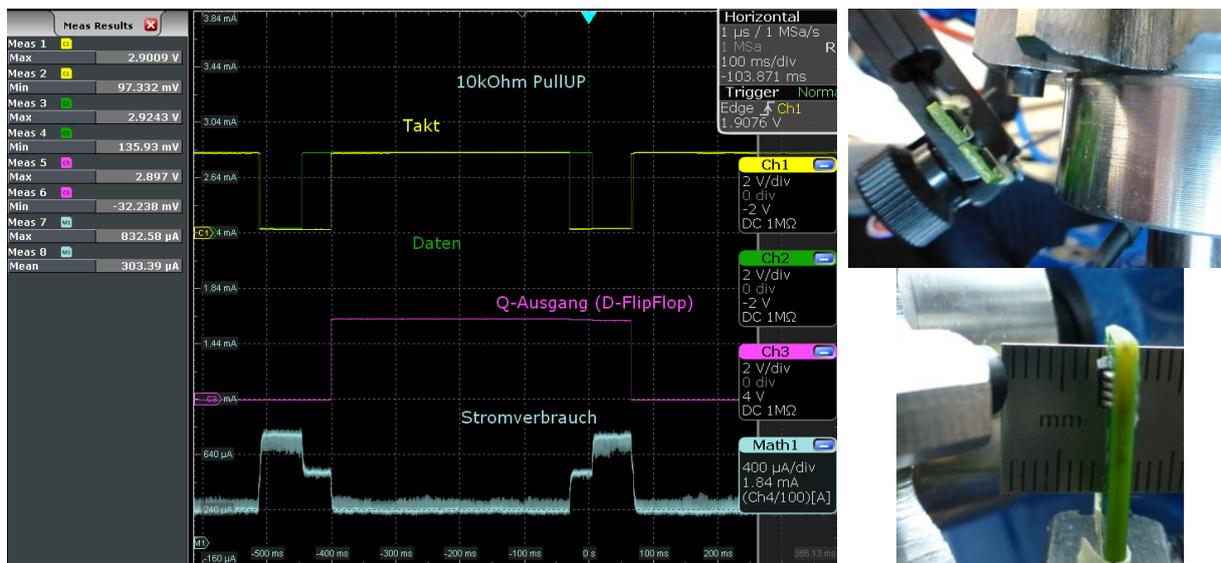


Abbildung 3: Links: Oszillogramm mit Signalausgängen und Stromverbrauch, rechts: Aufbau der 2 AFL-Module zur Drehrichtungserkennung

Der Hersteller NVE bietet verschiedene Sensor-Serien an. Bei der AFL-Serie handelt es sich um GMR-Elemente mit integriertem Komparator, die ab einem genügend hohen Magnetfeld schalten.

Der GMR-Effekt (englisch giant magnetoresistance) basiert auf dem magnetoresistiven Effekt. Dieser Effekt bewirkt die Änderung des elektrischen Widerstands eines geeigneten Materials durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes.

Zur Erprobung wurde ein Magnet als Geberstruktur genutzt. Bei der Montage auf der Welle lieferte diese Anordnung insbesondere hinsichtlich des Schaltabstandes (bis 10mm) und der

Stromaufnahme ($<1\text{mA}$) sehr gute Ergebnisse (vgl. Abbildung 3). Da die Montage zahlreicher Magneten als zu aufwendig und die Zuverlässigkeit bei hohen Drehzahlen als zu unsicher erachtet wurde, wurde dieses Konzept verworfen.

In weiteren Untersuchungen wurde ein Magnet hinter das AFL-Element angebracht, mit der Idee die magnetische Flussdichte durch die ferromagnetischen Zahnstrukturen selbst zu modulieren. Dabei zeigte sich kein zuverlässiges Schaltverhalten, weswegen dieses Konzept ebenfalls verworfen wurde.

Bei den Elementen der ABL-Serie sind intern bereits 2 GMR-Elemente miteinander verschalten, diese Elemente wurden ebenfalls mit einem Magneten beaufschlagt. Sie liefern 2 analoge, sinusförmige und phasenversetzte Ausgangssignale. Mit einer nachgelagerten Komparator-Schaltung (D-Flipflop) sollte der Phasenversatz der generierten Impulsfolgen ausgewertet werden, um die Drehrichtung der Welle zu bestimmen. Aufgrund des zu geringen Abstands der GMR-Brücke im Chip, welcher für das tatsächlich genutzt Zahnradmodul zu klein war, überlappten sich die Schaltimpulse der beiden Inkrement-Signale nicht, so dass die Drehrichtungsauswertung erfolglos blieb.

Für den Aufbau der Sensorknoten zur Drehzahl- und Drehrichtungserkennung wurden abschließend robuste und zuverlässige, kommerziell verfügbare induktive Drehzahlsensoren favorisiert. Der Nennstrom solcher Sensoren liegt für gewöhnlich zwischen 6-20 mA bei Versorgungsspannungen von 5 – 24V DC. Unter dem Gesichtspunkt einer geringen Stromaufnahme und kompakten Bauform wurden 3 repräsentative Sensoren beschafft und bzgl. ihrer Eignung und des tatsächlichen Stromverbrauchs untersucht und vermessen (vgl. Abbildung 4). Tabelle 2 listet die untersuchten Sensoren mit ihren wesentlichen Eigenschaften auf.

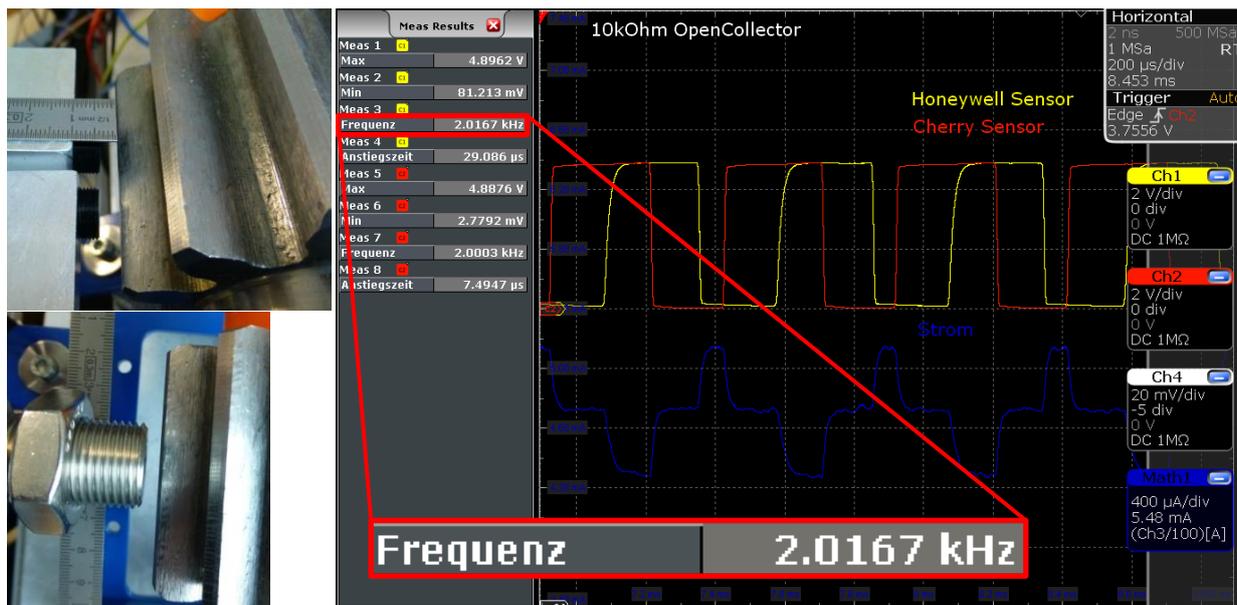


Abbildung 4: Diverse untersuchte Drehzahlaufnehmer (links), Oszillogramm zur Untersuchung der Drehzahlaufösung und Stromaufnahme (rechts), die maximal auflösbare Inkrementfrequenz lag bei ca. 2kHz

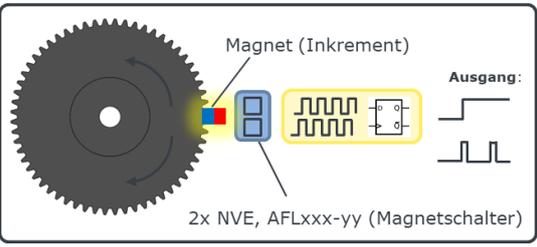
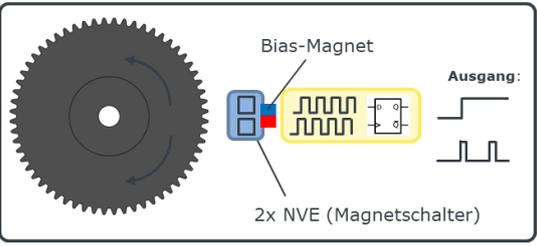
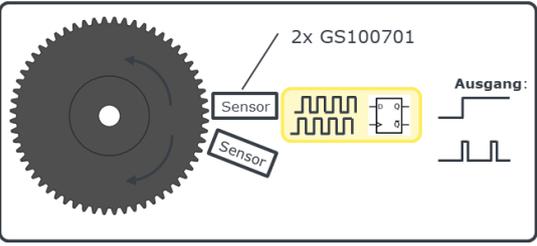
Tabelle 2: Untersuchte Drehzahlaufnehmer – Bewertung der Eigenschaften hinsichtlich Eignung gemäß Ampelprinzip

Sensor	Abmessungen	Eigenschaften	Leistungsaufnahme [mW]
Sensoronix HD518 410	M18 x 56 mm	inkl. Richtungserkennung	9,5 mA @ 5V → 47,5
		Schutzklasse IP67	
Honeywell ZH10	Ø11,9 x 25,4 mm	Schutzklasse IP67	2,7 mA @ 5V → 13,5 bzw. 27 (mit nachgelagerter Richtungserkennung)
ZF GS100701	Ø11,9 x 25,4 mm	Schutzklasse IP67	2,5 mA @ 5V → 12,5 bzw. 25 (mit nachgelagerter Richtungserkennung)

Der Sensor mit der integrierten Richtungserkennung weist eine deutlich höhere Stromaufnahme gegenüber den Versionen bestehend aus 2 einzelnen Sensoren und nachgelagerter Auswertelektronik auf – dieser Sensortyp wurde daher verworfen.

Tabelle 3 fasst die betrachteten Konzepte und Ergebnisse der beschriebenen Untersuchungen abschließend zusammen.

Tabelle 3: Konzepte zur Drehzahl- und Drehrichtungsbestimmung

<p><i>Magnet auf Welle/Stirnrad als Inkrement</i></p>	
	<p>Vorteile: großer Abstand (bis 1cm) erreichbar, mit Spannungsausgang: geringer Stromaufnahme < 1mA</p> <p>Nachteile: Doppel-Sensorplatine ohne IP-Schutz, Montage vom Inkrement nötig, geringe Anzahl an Inkrementen führt zu geringer Drehzahlaufösung</p>
<p><i>Magnetflussänderung durch Metallstruktur – Magnet sensorseitig integriert</i></p>	
	<p>mit Spannungsausgang: geringer Stromverbrauch <1mA, aber Signal störanfällig</p> <p>mit Stromausgang: Signal störunanfällig, aber hoher Stromaufnahme bis zu 2 x 8mA</p> <p>Nachteile: Doppel-Sensorplatine ohne IP-Schutz, Sensoranordnung ist nicht für alle Modulweiten erhältlich, geringer Schaltabstand <1mm</p>
<p><i>Zahnradsensor mit Hallelement (ausgewähltes Konzept)</i></p>	
	<p>Vorteil: robustes Gehäuse mit IP67, störunempfindliches Signal</p> <p>ausreichender Schaltabstand: bis 2,0 mm, leistungsarm genug für bereitgestellte Energie: 2x 2,5mA @5V</p>

2.1.3.3 Realisierung

Für den Aufbau der beiden Sensorknoten (SK 3 an der Antriebswelle und SK 2 an der Abtriebswelle) wurden Sensoren vom Typ ZF GS100701 ausgewählt. Zur Drehrichtungserkennung am Abtrieb werden dazu 2 dieser Sensoren im Gehäuse des Sensorknotens (in einem zum Zahnradmodul geeigneten Abstand) verbaut. Eine nachgelagerte Elektronik mit D-Flip-Flop-Schaltung wurde entwickelt, diese realisiert die Drehrichtungserkennung (vgl. Abbildung 5).

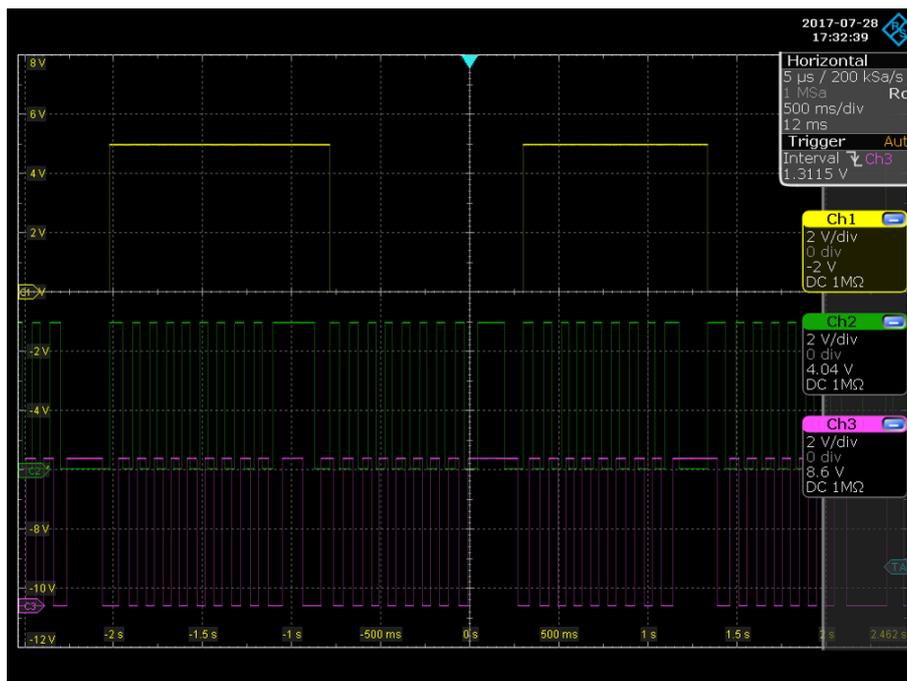
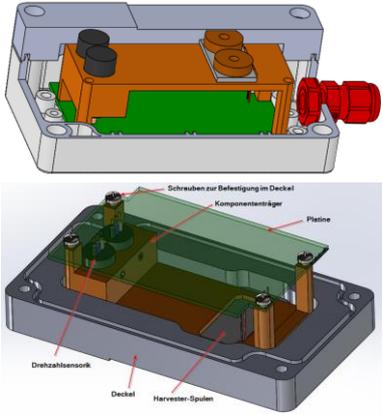
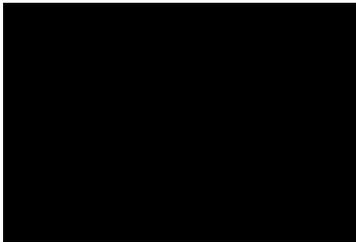
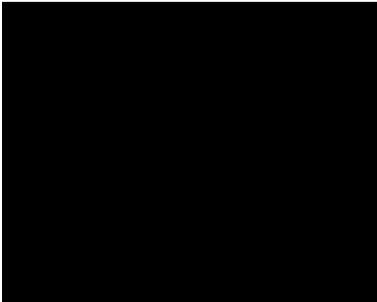
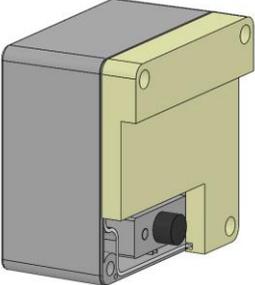


Abbildung 5: Drehgebersignale (grün und violett) und erkannte Drehrichtung (gelb), die Drehrichtung der Welle wurde im dargestellten Zeitabschnitt 2x gewechselt.

Wie eingangs beschrieben, sollten das EHS und die Sensorik in einem gemeinsamen Gehäuse integriert werden. Um für den Sensorknoten 2 am Antrieb die erforderlichen Abstände zum Großrad sowohl für die Spulen des Harvester Systems als auch für die Drehzahlsensoren zur Richtungserkennung zu gewährleisten, war die Nutzung eines kommerziellen Gehäuses aufgrund der geometrischen Vorgaben des Großrades nur bedingt zielführend. Insbesondere die Gehäuse-Abdeckung erforderte mechanische Anpassungen in Form von Aussparungen. Im Zuge dessen wurde ein zur Gehäusewanne passender Deckel konstruiert, der auch gleichzeitig die Montage der Elektronik im Gehäuseinneren ermöglicht. Die Fertigung dieses angepassten Gehäusedeckels aus dem Material PEEK wurde beim Partner Hahn-Schickard durchgeführt. Gemeinsam mit dem Partner microsensys wurde ein Elektronikmodul realisiert, welches die Signalkonditionierung als auch die Funkkommunikation mit der CoMoGear-Zentrale zusammenfasst. In enger Abstimmung mit beiden Partnern erfolgte die Integration der Sensorik, der Elektronik und des Energy Harvester Systems sowie die Assemblierung der Sensorknoten. Die folgende Tabelle 4 zeigt Abbildungen zum Aufbau und Anordnung der realisierten Sensorknoten im Getriebe.

Tabelle 4: Aufbau und Anordnung der realisierten Sensorknoten im Getriebe

Schema Sensorknoten	CAD-Modell	Anordnung im Getriebe
Abtriebsseitiger Sensorknoten 2 zur Drehzahl- und Drehrichtungserkennung		
		
Antriebsseitiger Sensorknoten 3 zur Drehzahlbestimmung		
		

2.1.4 Drehmomentmessung

2.1.4.1 Konzeption

Die Messung des Drehmoments kann nur indirekt erfolgen, indem die jeweils durch das Drehmoment beeinflusste Größe durch unterschiedlichste Messaufnehmer erfasst wird. Die folgenden 3 Verfahren sind im Allgemeinen üblich bzw. werden in jüngster Zeit verfolgt [Juc90]:

1. Messung der Wellen-Torsion
2. Messung der Dehnung infolge der Torsion
3. Messung magnetoelastischer Effekte

Zum ersten Typ zählen u. a. Inkrementscheiben oder codierte Messspuren auf der Welle, welche meist kapazitiv, magnetisch oder optisch abgetastet werden. Zum zweiten Typ zählen zahlreiche DMS-Applikationen wie z.B.:

- DMS direkt auf der Welle, gespeist und ausgelesen über Batterie und Funk oder Schleifring,

- DMS-basierte Messwellen, welche direkt in den Antriebsstrang eingebaut werden müssen

Ausgehend von der Prämisse, die Drehmomentmessung möglichst universell und einfach an unterschiedliche Getriebetypen nachzurüsten, wurden Aufnehmer nach den beiden ersten Verfahren verworfen.

Favorisiert wurden Aufnehmer vom dritten Typ, welche kontaktlos – ohne zusätzliche Manipulationen an der Welle – ein drehmomentproportionales Signal liefern. Aufnehmer nach dem magnetoelastischen Prinzip nutzen den Effekt, dass eine mechanische Deformation die magnetischen Eigenschaften, insbesondere von Ferromagnetika ändert. Die Torsion bzw. das Drehmoment der Welle ändert die Orientierung der magnetischen Domänen im Werkstoff und damit die magnetische Permeabilität. Der Aufnehmer beinhaltet im Allg. ein Spulensystem (Erregerspule) zur Erzeugung eines elektromagnetischen Wechselfeldes, welches mit der Oberfläche der zu messenden Welle wechselwirkt. Ein zweites Spulensystem im Aufnehmer misst das induzierte Feedback, welches sich mit der magnetischen Permeabilität infolge der Wellentorsion ändert.

Im Ergebnis einer Recherche wurde das Sensormodul der Firma Torque And More (TAM) favorisiert und näher untersucht. Das Messsystem besteht aus einem Sensorkopf und einer separaten Signalkonditionierung.



Abbildung 6: rechts: Messsystem der Firma Torque And More (TAM), links: Schema zur Anordnung des Sensorkopfs vor eine Welle

In Kooperation mit dem Partner Reintjes wurden an einem Versuchsstand Drehmomentmessungen mit dem TAM-Sensor im Vergleich zu einem kalibrierten Referenzaufnehmer (Messewelle der Firma HBM) durchgeführt.

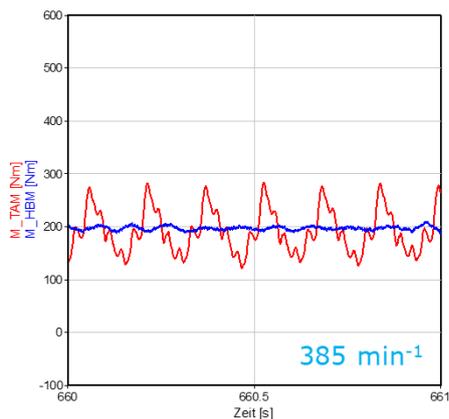


Abbildung 7: Hochaufgelöster Signalausschnitt, der TAM-Sensor (rote Kurve) zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Wellengeometrie

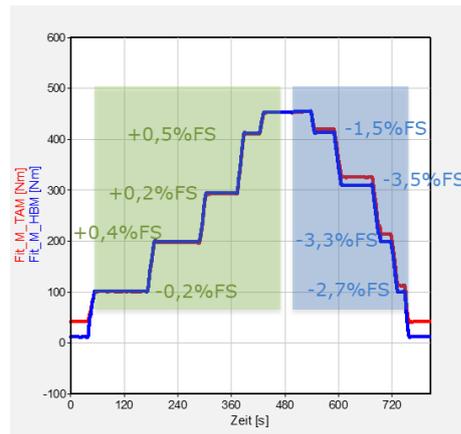


Abbildung 8: Geglättetes Drehmoment-Stufenprofil mit prozentualen Abweichungen zwischen den Sensoren

Das Rohsignal des TAM-Sensors (Abbildung 7) zeigt gegenüber dem Referenzempfänger eine deutlich höhere Abhängigkeit von der Wellengeometrie und/oder Materialinhomogenitäten (periodische Muster je Umdrehung). Durch eine geeignete Signalfilterung bzw. Glättung liefert der TAM-Sensor einigermaßen brauchbare Ergebnisse (vgl. Abbildung 8). Durch Hystereseeffekte (in der magnetischen Permeabilität) sind die prozentualen Abweichungen zur Referenzkurve nach Umkehr des Drehmomentverlaufs größer. Im lastfreien Zustand (ohne Drehmoment) ist die Abweichung am größten (Offsetfehler $\geq 10\%$ FS). Die Leistungsaufnahme des Sensors ist prinzipbedingt für energieautarke Anwendungen zu groß ($230 \text{ mA} @ 9\text{V} \rightarrow 2 \text{ W}$). Durch die hohe Leistungsaufnahme und bauliche Größe des Messsystems wurde von vornherein eine integrierte Lösung von Sensorik, Harvester, Signalkonditionierung und Funkmodul verworfen.

Bzgl. der konstruktiven Realisierung wurde daher geplant, den Sensor als externe Komponente per Kabel an das Energy-Harvester-System am Antrieb anzuschließen. Da die Antriebswelle während des Betriebes permanent rotiert, liefert dieser Harvester genügend Energie, um den Drehmomentsensor zu versorgen. Zwischenzeitlich wurde das Knowhow und die Herstellung von kundenspezifischen Sensoren von der Firma Trafag GmbH übernommen. Zur Reduzierung der Leistungsaufnahme und Fehlereinflüsse sollte in Kooperation mit dem neuen Hersteller ein verbesserter Sensor entwickelt werden.

Das verbesserte Konzept berücksichtigte folgende Aspekte:

- Ringförmige Sensoranordnung mit mehreren Sensorköpfen, um die Welle herum \rightarrow Ziel: Signalmittelung zur Erhöhung der Genauigkeit durch Minimierung der Abstandsabhängigkeit und Inhomogenitätseinflüsse

- Minimierung der Hysterese-Effekte durch Berücksichtigung der Richtung der Laständerung
- applikationsbezogene Sensorauslegung der Spulengeometrie und Sensorelektronik (Wellendurchmesser, Materialart, Momentenbereich)
- Kosteneffiziente Herstellung durch Nutzung von Planarspulen in PCB,
- einfach applizierbar, durch 2 teilbare Halbringe, die zu einem Sensorring verschraubt werden,
- reduzierte Leistungsaufnahme von 1W (200 mA Stromaufnahme bei 5V)
- UART-Schnittstelle als Sensorausgang

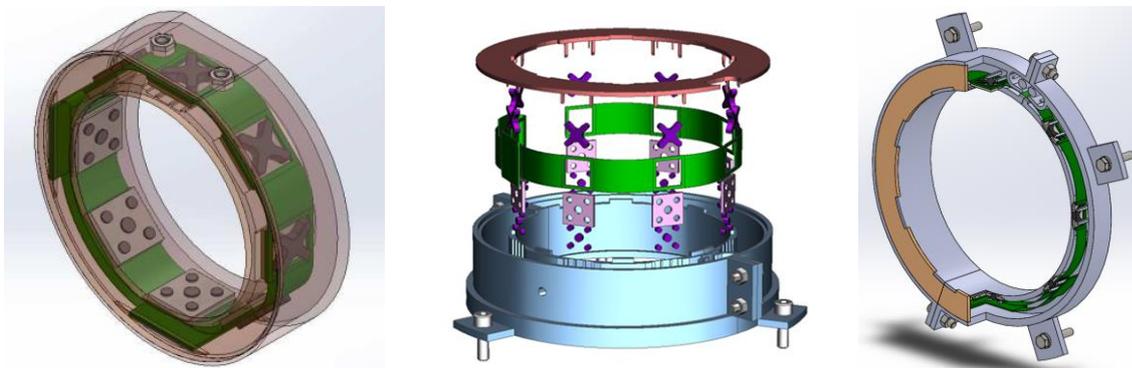


Abbildung 9: CAD-Modelle der Fa. Trafag zum verbesserten Drehmomentsensor, ausgeführt als Sensorring um die zu messende Welle, links: auf flexibler Leiterplatte ringförmig angeordnete Planarspulen, mittig: Explosionsdarstellung der Komponenten, rechts: teilbarer Sensorring mit Befestigungslaschen

Durch die Teilbarkeit des Sensorringes sollte der Vorteil einer nachträglichen Montage erhalten werden. Aufgrund von Entwicklungs- und Produktionsengpässen des Herstellers, konnte die Umsetzung dieses kundenspezifischen Sensors nicht im Rahmen der Projektlaufzeit realisiert werden. Konkret wurde die Firma Trafag im Mai 2018 mit der Umsetzung des Sensors beauftragt. Diese sah sich aber im Anschluss weder in der Lage den Auftrag umzusetzen noch einen verbindlichen Liefertermin zu benennen. Der Auftrag wurde daraufhin im September 2019 einvernehmlich zwischen den beteiligten Unternehmen storniert.

Kurzfristig konnte ein weiterer Hersteller von Drehmomentsensoren, die HZDR Innovation GmbH, recherchiert werden. Die HZDR Innovation GmbH entwickelt ebenfalls Sensoren, welche auf dem magnetoelastischen Effekt basieren.

Auf Grund der fortgeschrittenen Projektlaufzeit und einem nicht abzuschätzenden Anpassungs- und Entwicklungsrisikos wurde dieser Sensor nur als Leihstellung zu Untersuchungszwecken angefordert. Grund dafür war auch, dass sich dieser Drehmomentsensor noch in stetiger Weiterentwicklung befindet und nur Prototypen bereitgestellt werden konnten.

Wie das Sensormodul von TAM ist er wiederum als einzelner Sensorkopf mit separater Elektronik zur Signalkonditionierung ausgeführt (vgl. Abbildung 10). Mit seiner hohen Leistungsaufnahme von bis zu 15 W konnte er nicht mehr in das Zielkonzept integriert werden, da die einzelnen Komponenten wie die Energy Harvesting Systeme und die Funkmodule zu diesem Zeitpunkt (Stand Dezember 2019) bereits ausgelegt waren.



Abbildung 10: Prototyp des Drehmomentmesssystems der Fa. HZDR Innovation GmbH, links: Signalkonditionierung und Spannungsversorgung, rechts: Sensorkopf vor der zu messenden Welle

Der Sensor wurde unabhängig vom Gesamtsystem durch den Partner Reintjes am betreffenden Getriebeprüfstand getestet (im Vergleich zur HBM-Referenz-Messwelle). Gegenüber dem TAM-Sensor konnte keine Verbesserung erreicht werden. Der Einfluss der Fehlerquellen, wie die Abhängigkeit von Geometrieabweichungen und Material-Inhomogenitäten der Welle waren sogar deutlich größer. Mit dem aktuellen Ergebnisstand stellt der Sensor der HZDR Innovation GmbH gegenwärtig keine Alternative dar.

2.1.4.2 Realisierung/Ausblick

Die Drehmomentmessung wird vorerst, in Ermangelung besserer Alternativen, mit dem vorgestellten TAM-Sensor durchgeführt. Dieser wurde außen am Getriebe vor der Abtriebswelle positioniert und erfasst das Drehmoment im Vor- und Rücklauf der Welle.

Für eine seriennahe Umsetzung werden aber die dargestellten Verbesserungen der Eigenschaften (hinsichtlich Genauigkeit und Leistungsaufnahme) angestrebt.

Das vielversprechende Konzept, welches mit der Firma Trafag erarbeitet wurde, wird daher auch unabhängig vom aktuellen Projekt, durch die Partner Reintjes und Bachmann Monitoring weiterverfolgt. Ebenfalls sind weitere Untersuchungen mit einer verbesserten Sensorversion zusammen mit der HZDR Innovation GmbH geplant.

2.1.5 Signalanalyse zur Zustandsdiagnose

2.1.5.1 Konzeption

Um die Betriebsbedingungen am drehmomentübertragenden Triebstrang jederzeit erfassen und bewerten zu können, wurden basierend auf den am und im Getriebe gewonnenen Signale der Sensorknoten Methoden und Indikatoren zur Zustandsüberwachung entwickelt.

Die von den einzelnen Sensorknoten erfassten Messgrößen (s. Tabelle 5) werden dazu mittels Funkübertragung an die CoMoGear-Zentrale gesendet, wo sie mit Zeitstempeln versehen als gebündelte Datensätze für weitere Analysen zur Verfügung stehen.

Tabelle 5: Messgrößen, Symboldefinition und Wertebereich

Messgröße	Definition	Wertebereich
Drehzahl am Antrieb (SK 3)	n_1	[0; 2650] 1/min
Drehzahl am Abtrieb (SK 2)	n_2	[0; 800] 1/min
Drehrichtung am Abtrieb (SK 2)	σ	{-1, +1}
Drehmoment (SK 1)	M	
Kupplungsweg (SK 4)	s	
Temperatur der Lamelle (SK 5)	ϑ	0...150°C

Anhand der o.g. auflaufenden Messgrößen wurden Kennwerte abgeleitet bzw. definiert, die zur Beurteilung und Charakterisierung des Getriebezustands und -verschleißes dienen (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Definierte Kennwerte für Status und Zustand des Getriebes

Kennwert / Status Getriebe	Definition	Wertebereich
Verhältnis der Drehzahlen	$K = \frac{n_{1,max}}{n_{2,max}}$	Parameter <i>tbd.</i>
Schlupfgrad*	$\Delta\varphi = \left \frac{n_1 - Kn_2}{n_1} \right \cdot 100\%$	[0;100] %
d.h. Kupplung auf	$\Delta\varphi \in [99; 100] \%$	
d.h. Kupplung zu	$\Delta\varphi \in [0; 1] \%$	
d.h. Schlupfbetrieb	$\Delta\varphi \in (1; 99) \%$	
Sensorabstand bei geschlossener Kupplung im Neuzustand	s_0	Parameter <i>tbd.</i>
maximal zulässige Kupplungsabnahme	$\Delta s_{zulässig}$	Parameter <i>tbd.</i>
Kupplungs-Verschleißgrad	$V = \frac{(s - s_0)}{\Delta s_{zulässig}} \cdot 100\%$	[0; 100] % (mit s...aktueller Sensorabstand bei geschlossener Kupplung)
Klassengrenzen Temperatur	$\vartheta_{i,min}, \vartheta_{i,max}$ $i = 1, \dots, 15$	i=1: [0...10) °C i=2: [10...20) °C etc.
Klassengrenzen Schlupfgrad	$\Delta\varphi_{i,min}, \Delta\varphi_{i,max}$ $i = 1, \dots, 12$	i=1: [0;1] % i=2: (1;10] % i=3: (10;20] % etc.

*Um robuste Zustände für eine geöffnete und geschlossene Kupplung zu signalisieren, werden beim Schlupfgrad $\Delta\varphi$ geringfügige Abweichungen toleriert. Damit werden fehlerhafte Zuordnungen oder Zustandsschwankungen durch geringfügige Messtoleranzen oder numerische Abweichungen vermieden.

Über den Schlupfgrad der Kupplung in Kombination mit Drehzahl und Drehrichtung lassen sich (alle) 4 Betriebszustände des Triebstranges ableiten (vgl. Tabelle 7). Für den Kupplungsverschleiß besonders wichtig ist die Erfassung des Schlupfbetriebes, der insbesondere beim Anfahren und Aufrechterhalten einer geforderten Schiffposition (Dynamic Positioning) auftritt. Die Schiffpositionierung ist auch mit einer hohen Anzahl an Drehrichtungs- und Drehmoment-Wechseln verbunden und stellt somit den Betriebszustand mit der höchsten Kupplungsbelastung dar. Aus diesem Grund wurde ebenfalls die Zählung der Reversierzyklen (Anzahl der Vorzeichenwechsel der Drehrichtung σ) als ein Verschleißindikator für die Kupplung in das Analysekonzept aufgenommen.

Tabelle 7: Charakterisierung von 4 Betriebszuständen (BZ) über Drehzahlen bzw. Schlupfgrad

	BZ 1	BZ 2	BZ 3	BZ 4
Zustand	Kupplungs- stellung beliebig Maschine gestoppt	Kupplung geöffnet Kraftfluss unter- brochen	Kupplung schleift / Schlupfbetrieb Kraftfluss reduziert	Kupplung geschlossen voller Kraftfluss entsprechend Motordrehzahl $n_1 \gg 0$
Bedingung 1	$n_1 = 0$ $n_2 \approx 0$	$n_1 > 0$ $n_2 \approx 0$	$n_1 > 0$ $n_1 \neq K \cdot n_2$	$n_1 > 0$ $n_1 \cong K \cdot n_2$
Bedingung 2		$\Delta\varphi \in [99; 100]\%$	$\Delta\varphi \in (1; 99)\%$	$\Delta\varphi \in [0; 1]\%$
Bedingung 3			$\sigma = +1$: betrifft Kupplung 1 $\sigma = -1$: betrifft Kupplung 2	
Ausgabe*:	BZ 1	BZ 2	BZ 3 für Kupplung 1 oder 2 entsprechend σ	BZ 4 für Kupplung 1 oder 2 entsprechend σ
Folgemessung:	keine	auslösen	auslösen	auslösen

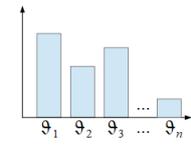
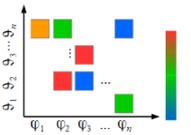
* Ausgabe i.S.v. Anzeige auf Smartphone, Mobilgerät o.ä.

Die Auswertung der Betriebszustände kann auch für eine getriggerte Aufzeichnung weiterer Daten genutzt werden, so dass nur Datensätze mit hohem Informationsgehalt gesammelt werden (vgl. Tabelle 8).

Durch eine Klassierung von Verschleißindikatoren wie z.B. der Kupplungstemperatur oder dem Schlupfgrad lassen sich Lastprofile ermitteln und zu einer Lasthistorie akkumulieren, die sich in Form von Histogrammen visualisieren lassen (z.B. eindimensionales Klassierung der Kupplungstemperatur im Schlupfbetrieb oder auch zweidimensionale Klassierung durch zusätzliche Zuordnung des Schlupfgrades, vgl. Tabelle 8).

Klassierungen komprimieren den Informationsgehalt der Zeitreihen und bieten dem geschulten Anwender die Möglichkeit, den Verschleiß der Kupplung im Sinne eines Lastmonitorings abzuschätzen.

Tabelle 8: Konfiguration der über Betriebszustände getriggerten Messungen, Ausgaben und Speicherintervalle

Datentypen	Messgröße/ Kennwert	Mittlung über	Ausgabe- bzw. Speicherintervall	Display	Speichern			
					BZ 1	BZ 2	BZ 3	BZ 4
Zustand	BZ1...BZ4	1s	1s	x	-	x	x	x
Zeitreihen x(t) mit Zeitstempel zum anzeigen und/oder speichern	$n_1(t)$	1s	1s	x	-	x	x	x
	$n_2(t)$	1s	1s	x	-	x	x	x
	$\Delta\varphi(t)$	1s	1s	x	x			
	$\vartheta(t)$ + Histogramm 	1s	1s	x	-	-	x	-
	$\vartheta(t)$	1s	10min	-	x			
	$M(t)$ + $\vartheta(t)$ + $n_2(t)$	1s	1s	x	x			
	$s(t)$	10s	10s	x	-	x	x	x
	$V(t)$ + $\vartheta(t)$ + $s(t)$	10s	1h	x	x	-	-	x
Reversierzyklen- Zählung	$\sigma(t)$ alle 1s messen, wenn: $\sigma_{t-1} \neq \sigma_t$, dann: $N_{\text{Revers}} =$ $N_{\text{Revers}} + 1$		jedes Ereignis mit Zeitstempel abspeichern	-	x			
2-parametrig Klassierung/ 2D-Matrix	Klassierung über Temperatur und Schlupfgrad ($\Delta\varphi$ und ϑ) 	1s	1s <i>optional: 1min</i>	-	x			

2.1.5.2 Realisierung

Das erarbeitete Konzept zur Signalanalyse und Zustandsbeschreibung wurde mit den Partnern Reintjes und microsensys besprochen und abgestimmt. Als Anwender oblag dem Partner Reintjes die finale Freigabe des Konzeptes.

Die Programmierung und Implementierung der wichtigsten Module auf der CoMoGear-Zentrale wurde vom Partner microsensys umgesetzt. In der CoMoGear-Zentrale werden die o.g. Kennwerte zur Charakterisierung des Getriebeverschleißes bestimmt und abgespeichert. Dem

Anwender werden die Zustandsdaten permanent mit den vereinbarten Ausgabegeräten oder „on demand“ zur Verfügung gestellt - u.a. ist auch eine Übertragung und Visualisierung auf mobile Endgeräte realisiert worden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Projektes wurden Personalkosten, notwendige Aufwendungen für Dienstreisen zur Teilnahme an Projekt- und Arbeitstreffen sowie Materialkosten zur Entwicklung der Funktionsmuster finanziert.

Konkret wurden Projektmittel für zwei wissenschaftliche Mitarbeiter zur Untersuchung und Realisierung der Sensorik und für die Konzeptentwicklung zur Signalanalyse aufgewendet. Zur Realisierung der Funktionsmuster wurden weiterhin Sensormodule, elektronische Bauteile und Platinen angeschafft.

Eine detaillierte Auflistung ist im zahlenmäßigen Nachweis unter Auflistung nach Kostenarten zu finden.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die in diesem Schlussbericht beschriebenen Arbeiten haben zur Erreichung der dargestellten Ergebnisse beigetragen und es somit ermöglicht, eine drahtlose Zustandsüberwachung von hochbelasteten, rotierenden Bauteilen in einem Schiffsgetriebe, auf Basis von miniaturisierten und energieautarken Sensorknoten, zu entwickeln. Sowohl durch Versuche an einem Prüfstand bei Hahn-Schickard, als auch durch den Einbau in einem Schiffsgetriebe auf dem Versuchsfeld bei der Reintjes GmbH, konnte der Funktionsnachweis des Systems erbracht werden. Die Projektziele wurden erreicht. Die Arbeiten waren demnach im getätigten Umfang notwendig und der Sache angemessen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der im Rahmen des Projekts entwickelte Demonstrator umfasst unterschiedliche Teillösungen, die sich im Verbund der Projektpartner zu verschiedenen Produktmodulen weiterentwickeln lassen. Der modulare Ansatz erlaubt den Aufbau skalierbarer Diagnosesysteme, angepasst an unterschiedlich komplexe Getriebetypen oder auch zugeschnitten auf die funktionalen Anforderungen. Die drahtlose Anbindung der Sensorknoten in Verbindung mit dem energieautarken Ansatz vereinfacht zusätzlich den Installationsaufwand und erhöht die Zuverlässigkeit des Systems.

Aus der Kombination eines oder mehrerer Sensorknoten mit der Basisstation (CoMoGear-Zentrale) lassen sich in Funktionalität und Mehrwert abgestufte Lösungen generieren.

Ein eigenständiges Produkt stellt die Implementierung des Sensorknotens zur direkten Messung des Kupplungsverschleißes dar. Die zyklische Bestimmung des Kupplungszustandes ermöglicht den Übergang von einer turnusmäßig zu einer kostenreduzierenden zustandsorientierten Wartung für diese Komponente.

Eine erweiterte Instrumentierung mit Drehmoment-, Drehzahl- und Temperatursensorknoten ermöglicht zusätzlich die Einführung eines Lastmonitorings für Schiffsgetriebe.

Solch ein System ermöglicht die Identifikation und Bewertung kritischer Betriebszustände wie z.B. dem „Dynamic Positioning“, bei dem hohe Belastungen an den drehmomentübertragenden Komponenten, insbesondere der Kupplung, auftreten.

In dieser Ausbaustufe wird nicht nur der Kupplungsverschleiß ermittelt, sondern auch die verursachenden Prozess- und Betriebsbedingungen erkannt, quantifiziert und akkumulativ bewertet. Damit lassen sich perspektivisch Lashistorien wichtiger Verschleißindikatoren (wie Schlupfgrad, Anzahl der Reversierzyklen, Klassierung von Momenten- und Temperaturverläufen) aufzeichnen, die zur Abschätzung von Wartungsintervallen oder zur Extrapolation der Restlebensdauer herangezogen werden können.

Damit werden prädiktive Wartungskonzepte denkbar – Wartung wird vorhersagbar und planbar und birgt damit ein hohes Einsparungspotential im Rahmen eines Flottenmanagements.

Neben Verwertungsmöglichkeiten bei der Umsetzung der genannten Teillösungen sieht die Bachmann Monitoring GmbH auch Potential bei produktbezogenen Dienstleistungen, wie der Erstellung und Anpassung anwenderspezifischer Software-Applikationen.

Ebenfalls können mit dem im Projekt generierten Wissen und dem spezifischen Monitoring-Knowhow der Firma Beratungsdienstleistungen zum Aufbau von Remote-Monitoring-Diensten im Rahmen eines Flottenmanagements offeriert werden.

Im Verbundprojekt konnten darüber hinaus wesentliche Kenntnisse bei der Integration von Sensorik, Funkkommunikations- und Harvester-Technologien gewonnen werden, die auch in anderen Branchen genutzt werden können. Im Rahmen der Ergebnisverwertung wird angestrebt, das gewonnene Knowhow in Form von Beratungsleistungen in unterschiedliche Unternehmen der Wirtschaft zu transferieren. Ebenfalls werden Möglichkeiten verfolgt, in den genannten Wissensbereichen weitere Entwicklungs- und Implementierungsprojekte durchzuführen.

2.5 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens wurden keine Fortschritte an anderen Stellen bezüglich der drahtlosen und energieautarken Zustandsüberwachung von Schiffsgetriebenen bekannt.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse wurden durch die Projektpartner im Rahmen von Workshops und Konferenzen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Insbesondere die Konferenzpaper sind über das Internet verfügbar.

Darüber hinaus wird der vorliegende Abschlussbericht nach Projektende der interessierten Fachöffentlichkeit durch Veröffentlichung in der Technischen Informationsbibliothek (TIB) Hannover zugänglich gemacht. Die Veröffentlichungen im Einzelnen:

Workshops:

- VDC Meetup – Energy Harvesting-Technologien – Fortschritte in der Entwicklung und Anwendungsbeispiele, Fachvortrag am 19. September 2017, Technologiezentrum St. Georgen
- 9. GMM Workshop Energieautonome Sensorsysteme, Fachvortrag am 01. März 2018, Dresden
- VDC Meetup – Energieautonome Sensorsysteme – Fortschritte in der Entwicklung und Anwendungsbeispiele, Fachvortrag am 18. September 2018, Technologiezentrum St. Georgen
- VDC Meetup - Vernetzte intelligente Sensorsysteme, Fachvortrag am 23. Mai 2019, Technologiezentrum St. Georgen

Konferenzen:

- microTEC Südwest Clusterkonferenz, Fachvortrag am 17. April 2018, Freiburg
- Esch, J; Schillinger, D.; Stojakov, D.; Hoffmann, D; Manoli, Y.: Power Management with Dynamic Power Adaption for a Rotational Energy Harvester in a Maritime Gearbox, (2019) J. Phys.: Conf. Ser.1407 012062
- Schneider, T.; Perwas, J.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Validation of an inductive sensor for monitoring marine gearboxes. In: Overmeyer, L. (Hrsg.): AST - Symposium on Automated Systems and Technologies. TEWISS Verlag, Hannover (2018), ISBN: 978-3-95900-223-3, pp. 3-7.
- Schneider, T.; Kruse, T.; Küster, B.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Evaluation of an energy self-sufficient sensor for monitoring marine gearboxes position. In: Procedia Manufacturing, vol. 24 (2018), pp. 135–140, DOI: 10.1016/j.promfg.2018.06.019.
- Kruse, T.; Poschke, A.; Esch, J.; Kettner; D., Peitsch; P.: CoMoGear – Condition Monitoring of Marine Gearboxes based on Wireless, Energy-Autonomous Sensor Nodes. In: Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.): Statustagung Maritime Technologien – Tagungsband der Statustagung 2019. Statustagung Maritime

Technologien – Tagungsband der Statustagung 2019. Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag, Jülich (2019), ISBN: 978-3-95806-439-3, S. 109-119.

Fachzeitschriften und Journalen:

- Schneider, T.: Schiffsgetriebe aus der Ferne überwachen. In: ti - Technologie-Informationen, o. Jg. (2017), H. 3, S. 26.

Geplante Veröffentlichungen:

- Kruse, T.; Poschke, A.; Esch, J.; Kettner; D., Peitsch; P.: Zustandsbasierte Überwachung von Schiffsgetrieben. In: Schiff und Hafen, DVV Media Group (2020).

3 Literatur

- [BMBF00] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Schifffahrt und Meerestechnik für das 21. Jahrhundert. Forschungsprogramm des BMBF 2000 – 2004. Bonn, April 2000.
- [BMW09] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hrsg.): Schifffahrt und Meerestechnik für das 21. Jahrhundert. Forschungsprogramm 2005-2010. Berlin, März 2009.
- [BMW11] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Maritime Technologien der nächsten Generation. Silber Druck oHG, Berlin 2011.
- [Bog09] Bogue, R.: Energy harvesting and wireless sensors: a review of recent developments. In: Sensor Review, Vol. 29 (2009), No. 3, pp. 194-199.
- [Bru14] Bruhn, W. C. et. al.: Conducting look-out on an unmanned vessel - Introduction to the advanced sensor module for MUNIN's autonomous dry bulk carrier. In: DGON ISIS 2014, Hamburg, Germany, 4./5. September 2014.
- [DNVa] DNV GL Strategic Research & Innovation: Research Review 2014 - Capturing our Future, pp. 10-11.
- [DNVb] DNV GL Strategic Research & Innovation: Beyond Condition Monitoring in the maritime Industry, pp. 10-11.
- [Fin06] Finkenzeller, K.: RFID Handbuch - Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten. 4. Aufl., Carl Hanser Verlag, München 2006.
- [Fol07] Folkmer, B.: Kinetische Mikrogeneratoren Innovative Prinzipien von zur Nutzung kinetischer Energie., apz-Forum, Kaufbeuren, 2007.
- [Gil08] Gilbert, J. M.; Balouchi, F.: Comparison of energy harvesting systems for wire-less sensor networks. In: International Journal of Automation and Computing, Vol. 5 (2008), No. 4, pp. 334-347.
- [Glo99] Glosch, H.; Ashauer, M.; Pfeiffer, U.; Lang, W.: A thermoelectric converter for energy supply. In: Sensors and Actuators, Vol. 74 (1999), pp. 246-250.
- [Her12] Herber, A.; Hanisch, A.; Gnoerrlich, T.; Laqua, D.; Husar, P.: Design of power management in Energy Harvesting Devices. In: Biomedical Engineering, Walter de Gruyter, Vol. 57 (2012). No. 1, pp. 251-254.
- [Hof14] Hoffmann, D.; Willmann, A.; Folkmer, B.; Manoli, Y.: Tunable Vibration Energy Harvester for Condition Monitoring of Maritime Gearboxes. In: J. Phys.: Conf. Ser. 557, 012099.

- [Hof16] Hoffmann, D.; Willmann, A.; Hehn T.; Folkmer, B.; Manoli, Y.: A self-adaptive energy harvesting system. In: Smart Mater. Struct. Vol. 25 (2016), pp. 35013-35024
- [Hue10] Hübler, J.; Nendel, K.; Dombeck, U.: RFID Überwachungssystem für rotierende Maschinenelemente. In: Logistics Journal - Proceedings, 2010.
- [Jar06] Jardine, A.; Lin, D.; Banjevic, D.: A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. In Mechanical Systems and Signal Processing Vol. 20 (2006), No. 7, pp. 1483-1510.
- [Juc90] Juckenack, Dietrich: Handbuch der Sensortechnik: Messen mechanischer Größen. 2. Auflage, Verlag moderne Industrie, Landsberg am Lech 1990.
- [Kou97] Kouremenos, D. A.; Hountalas, D. T.: Diagnosis and Condition Monitoring of Medium-Speed Marine Diesel Engines. In: Tribotest Journal, Vol. 4 (1997), pp. 63-91.
- [LiS14] Li, S.; Yao, X.; Fu, J.: Research on a power management system for thermoelectric generators to drive wireless sensors on a spindle unit. In: Sensors, Vol. 14 (2014), No. 7, pp. 12701-12714.
- [Liu00] Liu, Y.; Liu, Z.; Xie, Y.; Yao, Z.: Research on an online wear condition monitoring system for marine diesel engine. In: Tribology International, Vol. 33 (2000), pp. 829-835.
- [LiZ11] Li, Z.; Yan, X.; Yuan, C.; Zhao, J.; Peng, Z.: Fault detection and diagnosis of a gearbox in marine propulsion systems using bispectrum analysis and artificial neural networks. In: Journal of Marine Science and Applications Vol. 10 (2011), No. 1, pp. 17-24.
- [Mac03] Mackel, J. L. J.; Jacek, A.: Zustandsdiagnose am Antriebsstrang von Windenergieanlagen. In: Golt, P. W.: Tagungsband Antriebstechnisches Kolloquium (AKT), 27.-28. Mai 2003, Wiss.-Verl. Mainz, Aachen, 2003, S. 85-99.
- [May13] Chr. Mayr GmbH + Co KG: Wellenkupplung mit integrierter Drehmomentmessung. In: PC&Industrie - Zeitschrift für Mess-, Steuer-, und Regeltechnik, Vol. 17 (2013), No. 6, p. 113.
- [Pai09] Paik, B.-G. et. al.: Characteristics of wireless sensor network for full-scale ship application. In: Journal of Marine Science and Technology, Vol. 14, No. 1, pp. 115-126.
- [Pil09] Pilsak, T. et. al.: Field Test of a Wireless Sensor Network inside the Engine Room of a Vessel. In: Roland Harig (Hrsg.): Self-organising wireless sensor

- and communication networks. Proceedings. Hamburg, TuTech Innovation, 2009.
- [Rød14] Rødseth, H.; Brage, M.: Maintenance Management for Unmanned Shipping. In: 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. Redworth 2014.
- [Sch15] Schirrmacher, S.: Drahtlose, energieautarke Zustandsüberwachung von Schiffsgetriebenen. In: Schiff&Hafen, Vol. 10 (2015), pp. 28-30.
- [Sil05] Silva, Clarence W. de: Vibration and Shock Handbook. CRC Press, 2005.
- [Spr08a] Spreemann, D.; Folkmer, B.; Manoli, Y.: Comparative Study of Electromagnetic Coupling Architectures for Vibration Energy Harvesting Devices. In: Proceedings PowerMEMS 2008, Sendai, Japan.
- [Spr08b] Spreemann, D.; Willmann, A.; Folkmer, B.; Manoli, Y.: Characterization and In Situ Test of Vibration Transducers for Energy Harvesting in Automobile Applications. In: Proceedings PowerMEMS 2008, Sendai, Japan.
- [Yan13] Yang, W.; Tavner, P. J.; Court, R.: An online technique for condition monitoring the induction generators used in wind and marine turbines. In: Mechanical Systems and Signal Processing Vol. 38 (2013), No. 1, pp. 103-112.
- [Zhu09] Zhu, M.; Baker, P. C.; Roscoe, N. M.; Judd, M. D.; Fitch, J.: Alternative Power Sources for Autonomous Sensors in High Voltage Plant. In: IEEE Electrical Insulation Conference, Montreal 2009, pp. 36-40.