

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 489ZN

Thema

Zustandsüberwachung von Intralogistiksystemen

Berichtszeitraum

01.07.2013 bis 30.04.2016

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e.V.

Forschungsstelle(n)

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF)

Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans

Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiter der Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:

Zustandsüberwachung Intralogistiksysteme

Vorhaben Nr. 489ZN

Zustandsüberwachung von Intralogistiksystemen

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Für die Betreiber von Intralogistiksystemen ist die Verfügbarkeit ihrer Anlagen von sehr hoher Bedeutung. Es werden immer höhere Verfügbarkeiten und gleichzeitig niedrigere Kosten der Anlagen gefordert. Die Verfügbarkeit wird maßgeblich durch die Instandhaltung der Anlagen bestimmt. Eine Möglichkeit zur Optimierung der Anlageninstandhaltung ist der Einsatz von Zustandsüberwachungssystemen. Diese sensorbasierten Systeme sind heute bereits in mehreren Bereichen der Technik im Einsatz und können sowohl Belastungen von Bauteilen oder Baugruppen erfassen und protokollieren (Load Monitoring), als auch (Schädigungs-) Zustände von Bauteilen ermitteln (Condition Monitoring).

Im Bereich der Intralogistik sind solche Systeme bisher nur für wenige Anwendungsfälle im Einsatz. Ziel des Forschungsvorhabens war es daher ein sensorbasiertes Zustandsüberwachungssystem für Intralogistiksysteme zu entwickeln, welches zum einen mögliche Schädigungsfälle frühzeitig erkennen kann um die Instandhaltung zu optimieren und zum anderen die tatsächlichen im Betrieb auftretenden Belastungen und Beanspruchungen von Bauteilen erfassen kann um zukünftige Geräte genauer an die im Betrieb bestehenden Anforderungen anzupassen und zu dimensionieren.

Zunächst wurden zusammen mit Herstellern von Intralogistiksystemen hochbeanspruchte Positionen, kritische Konstruktionsmerkmale oder häufig ausfallende Komponenten identifiziert und diskutiert. Anschließend wurden verschiedene Messungen an einem Regalbediengerät und einem Brückenkran durchgeführt. Dabei wurden sowohl der Normalzustand, als auch Fehlzustände und Schädigungsfälle betrachtet. Für die ausgewählten logistischen Systeme wurden mathematische und physikalische Modelle erstellt und in einem Simulationsmodell implementiert. Es wurde sowohl das korrekte, als auch das fehlerhafte Verhalten abgebildet.

Für ausgewählte Schädigungsfälle wurden Erkennungsalgorithmen zur Implementierung in einem energieautarken Sensor entwickelt. Auf Basis dieser Algorithmen wurde ein Sensorsystem für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrolle an einem RBG umgesetzt und die Funktion unter Laborbedingungen nachgewiesen.

Auf Basis der erzielten Erkenntnisse dieses Forschungsprojektes ist es möglich, anhand von Messdaten verschiedene Schadensfälle und Unregelmäßigkeiten an Systemen der Intralogistik zu erkennen. Die bisher nur als Prototyp umgesetzten Sensoren können nun für einen industriellen Einsatz weiterentwickelt werden. Des Weiteren können mithilfe der in diesem Forschungsprojekt entstandenen Simulationsmodelle weitere Schadensfälle analysiert und weitere Sensorsysteme zur Erkennung dieser entwickelt werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	77 S., 57 Abb., 9 Tab., 36 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.07.2013
Ende der Arbeiten:	30.04.2016
Zuschussgeber:	BMWi / IGF-Nr. 489ZN
Forschungsstelle 1:	Karlsruher Institut für Technologie Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme Leiter: Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans
Forschungsstelle 2:	Fraunhofer-Gesellschaft e.V. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF Leiter: Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
Bearbeiter und Verfasser:	Dipl.-Ing. Meike Braun M.Sc. Steffen Bolender M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) Michael Koch Dipl.-Ing. Andreas Friedmann
Vorsitzender wiss. Beirat:	Dr. Ludger Frerichs, STILL GmbH, Hamburg

Inhaltsverzeichnis

1	Management Report	2
2	Einleitung	5
2.1	<i>Problemstellung</i>	5
2.2	<i>Ziele</i>	8
2.3	<i>Angestrebte Ergebnisse</i>	11
2.4	<i>Innovativer Beitrag</i>	13
2.5	<i>Lösungsweg</i>	14
3	Stand der Technik und der Wissenschaft	17
3.1	<i>Stand der Technik</i>	17
3.1.1	Begriffsdefinitionen	17
3.1.2	Relevante Normen und Richtlinien	18
3.1.3	Zustandsüberwachung als Mittel zur Instandhaltung	18
3.1.4	Aufgaben und Methoden der industriellen Instandhaltung	21
3.2	<i>Stand der Wissenschaft</i>	23
3.2.1	Zustandsüberwachung	23
3.2.2	Überwachung von Lagern und Linearführungen	24
3.2.3	Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring)	24
3.2.4	Sensorik für die Zustandsüberwachung	25
3.2.5	Dynamische Verhalten von Unstetigförderern	26
4	Analyse der Zielkomponenten	28
4.1	<i>Analyse eines Regalbediengeräts</i>	31
4.1.1	Messdurchführung	31
4.2	<i>Analyse einer Teleskopgabel</i>	33
4.3	<i>Analyse eines Zweiträgerlaufkrans</i>	38
4.3.1	Erste Messdurchführung	38
4.3.2	Zweite Messdurchführung zur piezo-basierten Überwachung von Schraubverbindungen	42
5	Entwicklung von Modellen und Algorithmen	46
5.1	<i>Entwicklung von Modellen und Algorithmen für die Detektion von Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene an einem RBG</i>	46
5.1.1	Modellierung des Systemverhaltens	46
5.1.2	Simulation und Abgleich des Modells	47
5.1.3	Algorithmus zur Erkennung von Spiel der Führungsrollen	47
5.2	<i>Modellierung einer Teleskopgabel</i>	49
5.2.1	Physikalisches Modell	49
5.2.2	Mathematisches Modell	50
5.2.3	Modellierung in MATLAB® Simulink®	50
5.2.4	Validierung des Modells	51
5.3	<i>Entwicklung von Modellen und Algorithmen für die Detektion von technischen Anrissen am Mastfuß eines RBG</i>	55
5.3.1	Modellierung des Systemverhaltens	55
5.3.2	Simulation und Abgleich des Modells	56

5.4	<i>Entwicklung von Modellen und Algorithmen für die Erkennung von Radformfehlern und Drehblockaden an den Führungs- und Antriebsrollen eines RBG</i>	57
5.4.1	Algorithmus zur Erkennung von Radformfehlern auf der Lauffläche der Antriebsrolle	57
5.4.2	Algorithmus zur Erkennung von Drehblockaden der Führungsrollen	58
6	Konzeption der Sensorik und Auswerteeinheit	59
6.1	<i>Workshop</i>	59
6.2	<i>Detailplanung des Sensorsystems für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrolle an einem RBG</i>	59
6.3	<i>Detailplanung des Sensorsystems für die Überwachung des Anzugmoments von Schrauben an einem Zweiträger-Laufkran</i>	60
7	Herstellung und Programmierung eines Prototyps zur Zustandsüberwachung	61
7.1	<i>Herstellung und Programmierung eines Smart-Sensors für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrolle an einem RBG</i>	61
7.2	<i>Herstellung und Programmierung eines Smart-Sensors für die Überwachung des Anzugmoments von Schrauben an einem Zweiträger-Laufkran</i>	62
8	Validierung der Modelle und Algorithmen	64
8.1	<i>Versuchsdurchführung</i>	64
8.2	<i>Auswertung</i>	65
9	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	68
9.1	<i>Zusammenfassung</i>	68
9.2	<i>Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten</i>	69
9.3	<i>Verwendung der zugewendeten Mittel</i>	70
9.4	<i>Veröffentlichungen</i>	70
9.5	<i>Ausblick</i>	73
10	Anhang	74
10.1	<i>Literaturverzeichnis</i>	74
10.2	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	76
10.3	<i>Tabellenverzeichnis</i>	77

1 Management Report

For operators of intralogistic systems, the availability is of a high importance as more and more higher availability and at the same time smaller costs are demanded for the equipment. The availability is significantly influenced by machine maintenance. One possibility for optimizing machine maintenance is the use of condition monitoring systems. These sensor-based systems are already used in many areas of engineering. They are used to measure and record the load of components and assemblies (Load Monitoring) as well as to determine (faulty) conditions of components (Condition Monitoring).

In the area of intralogistics these systems are so far only used in a few applications. Therefore, the aim of this research project was to develop sensor based condition monitoring systems which are on one hand, able to determine possible damages at an early stage to optimize machine maintenance, and on the other hand, are able to record the actual loads and strains during operation to adapt and dimension future equipment better to operation demands.

The overall aim of the research project was the development of novel systems and algorithms for condition monitoring of intralogistic equipment.

First, the state-of-the-art of science and technology was analyzed. Therefore, existing condition monitoring systems in other areas of technology were investigated. Additionally, condition monitoring systems already used in intralogistics, e.g. for crane systems, were especially considered.

In the next step, the possible components were analyzed and it was chosen which components should be examined in detail for the research project. In coordination with the project monitoring group highly stressed positions, critical construction elements and frequently failing components were identified. This resulted in the following most relevant faults:

- Clearances lateral to movement direction
- Clearances in movement direction
- Loss of rigidity
- Nonuniform movement

Based on this, measurements on an automatic storage and retrieval system (ASRS), a telescopic fork and an overhead crane were undertaken. Thereby the following faults and damages were considered:

ASRS	Telescopic fork	Overhead crane
<ul style="list-style-type: none"> • Clearances lateral to movement direction • Nonuniform movement • Loss of rigidity 	<ul style="list-style-type: none"> • Clearances in movement direction 	<ul style="list-style-type: none"> • Clearances lateral to movement direction • Nonuniform movement

Tabelle 1: Considered faults and damages

Based on the measurement results, simulation models were developed to represent the systems and their faults. Therefore, the considered intralogistic systems were converted first into physical models and based on these into mathematical models which were then implemented into simulation models. These simulation models include the correct as well as the faulty behavior of the systems.

For the ASRS, algorithms to detect the following faults were developed:

- Guide clearance of the lateral guide rolls to the rail
- Technical cracks at the foot
- Wheel form defects at the guide and drive rolls
- Blockades at the guide and drive rolls

Therefore, the simulation models were first expanded to also represent the faults in the simulation. For detecting the faults, algorithms, which can be implemented in an energy self-sufficient sensor, were developed. The following approaches were used for this:

- Guide clearance of the lateral guide rolls to the rail:
Calculating the probability density of the accelerations occurring at the carriage foot of the ASRS orthogonal to the driving direction for the case that the ASRS is moving with maximum speed and comparing this probability density with a reference function.
- Technical cracks at the foot:
Identifying the shifting of the probability distribution of the mast vibration.
- Wheel form defects at the guide and drive rolls:
Detection of stimulations occurring synchronically to the wheel angle by comparing the correlation between rotation angle and acceleration.
- Blockades at the guide and drive rolls:
Pattern recognition methods by comparing and evaluating the acceleration spectrum and the energy content of single frequency bands

Based on the research results on the ASRS those algorithms, which were implemented for the example ASRS and investigated regarding their usability, were chosen. These algorithms represented the basis for the detailed planning of a sensor system to detect guide rolls clearance and wheel form defects in an ASRS. This detailed planning was then used to implement the single components of this sensor system on an ASRS and to prove the function in laboratory conditions.

Another sensor system was planned for monitoring the tightening torque of bolts on a double girder travelling crane. Therefore, a compact and cost-efficient sensor system was developed.

During the research project, the required fundamentals for developing and using condition monitoring systems in equipment and systems in intralogistics were acquired and implemented. These included sensor platforms and suitable methods for detecting faults. The applicability of these methods and systems was verified in functional models, which can be used as a basis for on demand maintenance, higher machine availability, detection of misuse and faulty parametrization and the detection of the currently unknown, actual loads during operation. Based on the knowledge of the actual loads important parameters for the development of efficient material handling equipment for intralogistics can be derived. Most of the operators and manufacturers of intralogistic systems are small and medium-sized enterprises (SMEs) that do not have the economic resources for investigating such complex correlations. With the aid of the achieved research results it is possible for the SMEs to take target-oriented action for condition monitoring of their intralogistic systems with a small economically justifiable effort.

Based on the achieved results it is possible to detect miscellaneous faults and imperfections on intralogistic systems. Algorithms for fault detection were already implemented and vali-

dated for selected faults. These intelligent sensor systems are so far only realized as prototypes and need to be further developed for industrial use. The fault detection algorithms are currently limited to a few exemplarily chosen fault cases. Based on the simulation results further fault cases and imperfections can be analyzed and additional sensor systems for the detection of these can be developed, e.g. for the monitoring of weld seams.

2 Einleitung

Gegenstand des Forschungsvorhabens war die Entwicklung von Systemen und Methoden für die Zustandsüberwachung von Bauteilen und Geräten der Intralogistik. Deren Zustandsüberwachung soll es ermöglichen die Verfügbarkeit der Intralogistiksysteme zu erhöhen, die Wartungskosten durch bedarfsgerechte Wartung beim Betrieb von Intralogistiksystemen zu senken, Gerätefehlnutzungen zu detektieren und neue Erkenntnisse über die tatsächlich im Betrieb auftretenden Belastungen und Beanspruchungen von Bauteilen und Geräten zu gewinnen. Zum Erreichen dieser Ziele wurden im Forschungsprojekt Systeme und Modelle für das Lastmonitoring, die autonome Detektion von Überlastungen und die autonome Detektion von Bauteilschädigungen entwickelt. Hauptbestandteile der Systeme sind ein Sensornetzwerk und Algorithmen, die auf Basis der im Betrieb erfassten Messgrößen den aktuellen Bauteil- und Systemzustand ermitteln.

2.1 Problemstellung

Intralogistiksysteme haben eine große wirtschaftliche Bedeutung für den Industriestandort Deutschland. Zum einen sind Intralogistiksysteme die Kernelemente der innerbetrieblichen Materialflüsse in der Produktion, Beschaffung und Distribution und haben damit Anteil am wirtschaftlichen Erfolg produzierender und Handel treibender Unternehmen. Zum anderen war die mittelständisch geprägten Branche der Intralogistiksystemanbieter im Jahre 2010 mit einem Exportvolumen von 10,6 Mrd. € führend im internationalen Vergleich, gefolgt von China mit einem Volumen von 6,2 Mrd. € [VDMA2011].

Die Prozesse der Intralogistik reichen vom Wareneingang über das Lagern und Kommissionieren, dem Konsolidieren und Verpacken bis zum Warenausgang. Die eingesetzten materialflusstechnischen Einrichtungen werden unterteilt in Unstetigförderer und Stetigförderer. Unstetigförderer verrichten einzelne Arbeitsspiele, sind also durch einen diskontinuierlichen Betrieb charakterisiert. Wichtige Vertreter sind Stapler, Brückenkrane und Regalbediengeräte (RBG) (Abbildung 1: Beispiele für Unstetigförderer in der Intralogistik). Stetigförderer arbeiten stationär und erlauben einen kontinuierlichen Materialfluss. Ausführungen sind Rollen- und Bandförderer.



a)



b)



c)



d)

Abbildung 1: Beispiele für Unstetigförderer in der Intralogistik

- a) Elektro-Schubmaststapler FM-X von Still mit bis zu 2,5 t Traglast und bis zu 12 m Hubhöhe
- b) Zweiträgerkran von KULI-Hebezeuge mit bis zu 200 t Traglast
- c) Paletten-Regalbediengerät von Dambach Lagersysteme GmbH, Modell Mono mit einer Tragfähigkeit von bis zu 10 Tonnen und einer Bauhöhe von bis zu 45 Metern
- d) Beispiel eines Shuttle-Systems der Dematic GmbH, Modell Multishuttle

Für die Betreiber von Materialflusssystemen ist die Verfügbarkeit ihrer Anlagen von strategischer Bedeutung. Sie fordern deshalb eine immer höhere Anlagenverfügbarkeit bei gleichzeitig geringeren Anlagenlebenszykluskosten (TCO) [Bank2011]. Die Verfügbarkeit der Anlagen wird dabei maßgeblich durch die Instandhaltung der Anlage bestimmt. Die heute vornehmlich angewandten Instandhaltungsstrategien in der Intralogistik sind die vorausbestimmte Instandhaltung mit festen Wartungszyklen und die korrektive Instandhaltung [DIN13306], also der Betrieb der Anlage bis zum Ausfall und anschließender Instandsetzung. Diese Strategien werden den genannten Forderungen nicht mehr gerecht. Nach Dullinger betragen die Instandhaltungskosten eines Logistikunternehmens bei zyklischer Instandhaltung 3% der Logistikdienstleistung, die Instandhaltungskosten bei einem Ausfall betragen das 4- bis 5-fache [Dull2008]. Der Ausfall eines Intralogistiksystems kann den Ausfall einer gesamten Produktion oder Teilen davon verursachen. Insofern könnten die dadurch verursachten Folgekosten je nach Branche, Produkt und garantiertem Servicegrad noch weitaus höher liegen. Bei der vorausbestimmten Instandhaltung sind die verhältnismäßig hohen Kosten dadurch bedingt, dass neben dem Personalaufwand auch ein prinzipbedingter, hoher Materialaufwand einhergeht, da die Restlebensdauer der Komponenten bei weitem nicht ausgenutzt werden kann. Dies gilt insbesondere für Bauteile, deren Belastungen und Beanspruchungen im Betrieb nur ungenau bekannt sind – eine entsprechende Überdimensionierung der Bauteile und Geräte ist erforderlich. Eine Verbesserung dieser Situation kann mit einer zustandsorientierten Instandhaltung erzielt werden. Diese Instandhaltungsstrategie gehört zu den präventiven Instandhaltungsstrategien, sieht allerdings im Gegensatz zur vorausbestimmten Instandhaltung keine Wartungen in festen Zeitintervallen, sondern in angepassten Zeitintervallen vor (vgl. Abbildung 2).

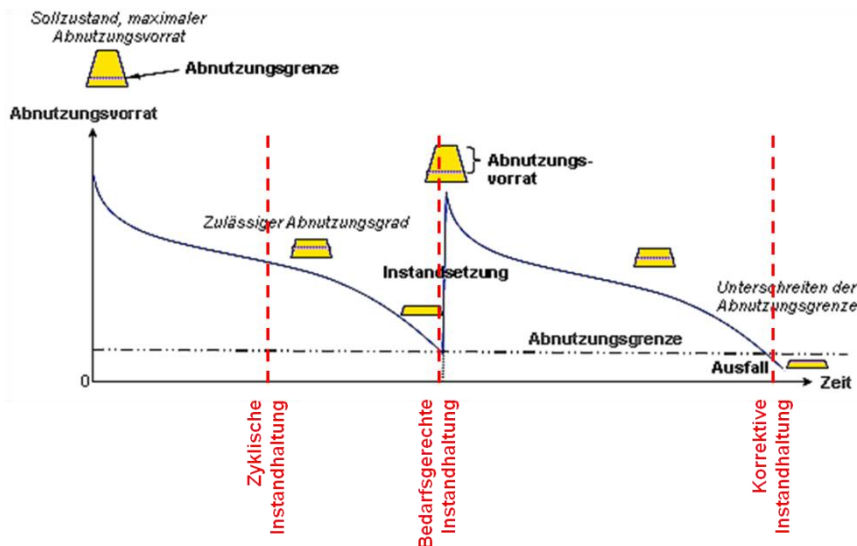


Abbildung 2: vorausbestimmte, korrektive und bedarfsgerechte Instandhaltung (Anlehnung an [5])

Für die Anpassungen der Zeitintervalle zwischen zwei Instandhaltungsmaßnahmen muss der Zustand der Geräte bzw. der Bauteile bekannt sein. Dieser Zustand kann als Prognose des Abnutzungsvorrats auf Basis gemessener Belastungen der Geräte/Bauteile oder durch direkte Ermittlung ihres Verschleiß- oder Schädigungszustands bestimmt werden. Laut Bankow [Bank2011] gibt es Branchenschätzung nach denen durch Anwendung einer Zustandsüberwachung in der Intralogistik ungeplante Anlagenstillstände um durchschnittlich ca. 20% reduziert, Wartungsintervalle um durchschnittlich 20% verlängert und die Zeit zur Fehlersuche um ca. 15% reduziert werden können.

Während die Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit und die Reduktion von Instandhaltungskosten in erster Linie für Betreiber von Intralogistiksystemen interessant ist, gibt es aus Sicht der Anbieter von Intralogistiksystemen einen weiteren Anlass für den Einsatz von Zustandsüberwachungssystemen in der Intralogistik: Trotz hervorragender Werkstoff- und Bauteilkenntnisse kommt es bei Bauteilen, die auf Dauerfestigkeit ausgelegt sind, im Betrieb immer wieder zu Schädigungen. Unter der Voraussetzung, dass die Geräte innerhalb ihrer Spezifikationen betrieben wurden, führen solche Schädigungen zu Gewährleistungsansprüchen an den Hersteller bzw. den Systemanbieter. In vielen dieser Fälle konnte in der Vergangenheit durch aufwendige Gutachten nachgewiesen werden, dass der Betreiber des betroffenen Geräts dieses über seine Spezifikation hinaus betrieben hat. Der Betreiber muss in diesen Fällen die Schädigung des Geräts selbst verantworten, Gewährleistungsansprüche bestehen nicht. Durch die Erfassung und das Protokollieren der Belastungen ausgewählter Bauteile wäre der Hersteller in der Lage Hinweise auf eine Fehlnutzung darzustellen und somit ungerechtfertigte Gewährleistungsansprüche zurückzuweisen.

Ein weiterer Anlass für dieses Forschungsvorhaben, der für Anwender und Anbieter von Intralogistiksystemen gleichermaßen von Nutzen ist, war die Tatsache, dass nur mit einem geeigneten Zustandsüberwachungssystem die tatsächlichen im Betrieb auftretenden Belastungen und Beanspruchungen von Bauteilen erfasst werden können. Mit der Kenntnis dieser Größen ist es möglich zukünftige Geräte genauer an die im Betrieb bestehenden Anforderungen anzupassen und zu dimensionieren. Damit sind zum einen Material- bzw. Materialkosteneinsparungen und zum anderen Leistungssteigerungen der Systeme möglich. Weiterhin ist die Kenntnis der tatsächlichen Belastungen eine Voraussetzung um moderne Faser-

verbundwerkstoffe wirtschaftlich in der Intralogistik einsetzen zu können. Deren Einsatz erscheint aufgrund ihres Potenzials für Massereduktionen und ihrem sehr guten Dämpfungsverhalten vor allem im Bereich von Unstetigförderern als sinnvoll.

Zustandsüberwachungssysteme sind heute in mehreren Bereichen der Technik im Einsatz. Solche sensorbasierten Systeme können sowohl Belastungen von Bauteilen oder Baugruppen erfassen und protokollieren (Load Monitoring) wie auch (Schädigungs-)Zustände von Bauteilen ermitteln (Condition Monitoring). Insbesondere ein System, das gleichzeitig ein Load und ein Condition Monitoring vornimmt wäre für Intralogistiksysteme von großem Nutzen, da es allen oben genannten Vorteilen für Betreiber und Anbieter von Intralogistik gerecht werden kann. Derartige Systeme, die eine umfassende Zustandsüberwachung der Intralogistikgeräte erlauben, sind heute nicht verfügbar. Sowohl Anwender als auch Anbieter von Intralogistiksystemen sind meist KMU, die nicht oder nur über kleine Forschungs- und Entwicklungsabteilungen verfügen. Derart risikobehaftete Innovationen wie die Entwicklung eines Systems für die Zustandsüberwachung von Intralogistiksystemen und insbesondere die Erarbeitung aller dazu erforderlichen Grundlagen können von ihnen nicht realisiert werden.

2.2 Ziele

Übergeordnetes Ziel der Forschungsarbeiten war die Entwicklung von neuartigen Systemen und Algorithmen zur Zustandsüberwachung von Geräten der Intralogistik. Zur Erreichung dieses Ziels sollten unter Verfolgung von Teilzielen verschiedene Systeme entwickelt werden:

- 1) Ein System für die autonome, während des Betriebs stattfindende Detektion eines Steifigkeitsverlustes an Tragstrukturen (Structural Health Monitoring). Dieses System zielt auf die frühzeitige Erkennung von Schäden wie Risse in der Struktur oder in Schweißnähten sowie gelöste Schraub- oder Nietverbindung, sodass eine korrektive Instandhaltung [DIN13306] ermöglicht wird.
- 2) Ein System für die autonome, während des Betriebs stattfindende Detektion des "Heißlaufens" von Wälz- oder Gleitlagern bzw. Linearführungen. Dieses System zielt auf die frühzeitige Detektion von Schädigungen und das Erkennen eines falschen Einbaus von Lagern und Führungen, sodass auch hier eine korrektive Instandhaltung [DIN13306] möglich ist.
- 3) Ein System für die kontinuierliche Erfassung, Dokumentation und Auswertung von Dehnungen an hochbelasteten Bauteilen bzw. der Beschleunigungen an zu verfahrens Bauteilen (Load Monitoring) mit dem Ziel der Erkennung von Fehlnutzungen und Fehlparametrierungen, zur genaueren Dimensionierung neuer Bauteile und Geräte und als Grundlage für die Realisierung einer bedarfsgerechten Instandhaltungsstrategie (zustandsorientierte Instandhaltung) [DIN13306].

Neben der Entwicklung dieser Systeme bestand eine weitere Zielsetzung in der Untersuchung von deren Anwendbarkeit in Systemen der Intralogistik. Dazu musste die Entwicklung der Systeme über rein methodische Betrachtungen hinausgehen und eine realitätsnahe Umsetzung an einem vollwertigen und betriebenen System der Intralogistik beinhalten. Dabei war die Vorwettbewerblichkeit der Arbeiten gewährleistet, indem die Umsetzung nur in beispielhafter Ausführung, also als Funktionsdemonstratoren erfolgte.

Die bewusst breite Formulierung der Ziele ließ im Projekt eine Fokussierung auf beispielhafte Systemumsetzungen entsprechend der vom projektbegleitenden Ausschuss eingebrachten Kompetenzen zu, ohne eine Anwendbarkeit auf andere Systeme der Intralogistik von vorne herein auszuschließen.

Die beispielhafte Umsetzung an Systemen der Intralogistik sollte innerhalb des Projekts anhand der folgenden Komponenten erfolgen:

Autonome Detektion von Steifigkeitsverlusten (Structural Health Monitoring)

Die autonome Detektion von Steifigkeitsverlusten eignet sich für alle elastischen Tragstrukturen an Intralogistiksystemen. Diese sind beispielsweise Kranbrücken von Ein- und Zweiträgerbrücken- bzw. Portalkranen, Mast und Mastfuß von Regalbediengeräten oder das Hubgerüst bzw. die Gabelzinken eines Gabelstaplers. Die beispielhafte Umsetzung in einem Funktionsmodell sollte innerhalb des Forschungsvorhabens anhand der Steifigkeitsüberwachung des Mastes bzw. des Mastfußes eines RBGs erfolgen. Die Praxistests mit dem Funktionsmodell werden an einem Versuchs-RBG der Firma Dambach-Lagersysteme durchgeführt.

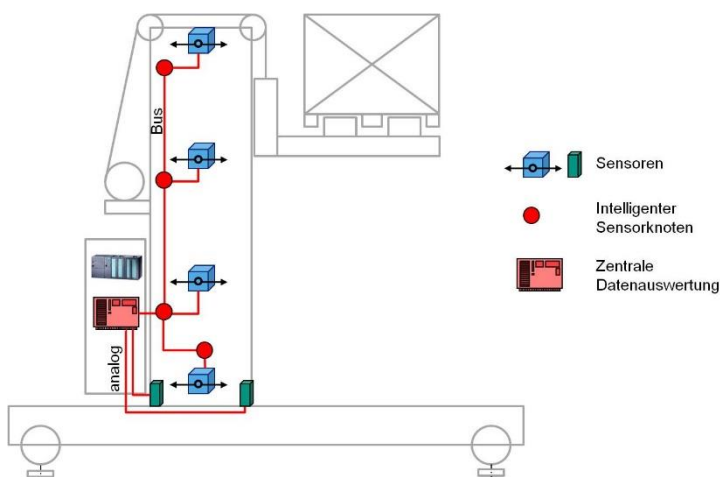


Abbildung 3: Skizze eines Funktionsmodells für die Detektion von Steifigkeitsverlusten

Autonome Detektion des "Heißlaufens" von Lagern und Linearführungen (Condition Monitoring)

Die autonome Detektion des "Heißlaufens" von Wälz- oder Gleitlagern bzw. Linearführungen eignet sich für alle Systeme der Intralogistik, in denen eine Beweglichkeit zweier Bauteile gegeneinander gefordert ist. Dies sind alle Lagerungen und Linearführungen in der Intralogistik, die eine entsprechende Laufleistung besitzen. Eine besondere Herausforderung für das Monitoring besteht bei Lagerungen, die in bauraumbeengten Verhältnissen verbaut sind und einer komplexen Kinematik folgen. Die beispielhafte Umsetzung sollte an den Führungsrollen einer Teleskopzinke (LAM) für Paletten erfolgen. Aufgrund der erforderlichen geringen Bauhöhe insbesondere des ersten Auszuges der Teleskopgabel (Abbildung 4) und der Lagerung des Bauteils auf weiteren sich bewegenden Auszügen kann eine solche Rolle als schwierigstes wählbares Beispiel einer Rollenführung in Systemen der Intralogistik angesehen werden. Unter anderem war es hier notwendig, SAW-Sensorik einzusetzen, um den Bauraumbeschränkungen und der geforderten Beweglichkeit gerecht zu werden. Aufgrund all dessen ist zu erwarten, dass die hier gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Anwendungen in Systemen der Intralogistik und deren Komponenten (z. B. die Führung von Hubgerüsten, Hubwagen, ...) übertragen werden können. Die praxisnahe Erprobung erfolgte an einer doppeltiefen Teleskopzinke der Firma Dambach-Lagersysteme.



Abbildung 4: Doppeltiefe Telekopgabel für Paletten (Quelle: Dambach)

Load Monitoring

Von Relevanz für das Load Monitoring sind Elemente, die durch Fehlnutzungen stark belastet werden oder deren Auslegungslasten nur unzureichend bestimmbar sind. Als Fehlnutzungen seien beim Kran die Pufferfahrt des Krans sowie der Katze und die Überlastung des Hebezeugs durch dynamische Belastung beim Anheben einer am Boden ruhenden Last (Stoßbelastung) genannt. Beim RBG können Pufferfahrten, Kollisionen von Lastaufnahmemittel und Ladehilfsmittel als kritische Betriebszustände genannt werden. Die Anwendbarkeit des Lastmonitorings in der Intralogistik sollte anhand der Überwachung des Profilträgers eines Einträger-Brückenkrans untersucht werden (Abbildung 5, links). Vorteil des Profilträgers ist sein einfacher Aufbau, der es ermöglicht anhand von numerischen Simulationen eine Bauteilverhaltensvorhersage zu machen. Außerdem können anhand der Simulationsergebnisse geeignete Messstellen für die eingesetzte Sensorik bestimmt werden. Für das Load Monitoring sollte die Belastung des Brückenträgers in wenigstens zwei Koordinatenrichtungen ermittelt werden. Dies sind die x-Richtung, parallel zur Kranbahn, und die z-Richtung (Hinweis: unterschiedliche Bezeichnung der Koordinatenrichtungen bei Kran und RBG), in Richtung der Gewichtskraft der Last. Außerdem sollten Kräfte, die von der Kranbahn über Spurführungsrollen über den Kopfträger in den Brückenträger eingeleitet werden, miterfasst werden. Zum Einsatz waren Beschleunigungssensoren und Dehnungsmessstreifen vorgesehen. Um die Validierung von Messergebnissen zu ermöglichen wurde für die Praxistests ein Kran von KULI-Hebezeuge, der über eine Lastmesseinrichtung an der Oberflasche verfügt, ausgewählt.

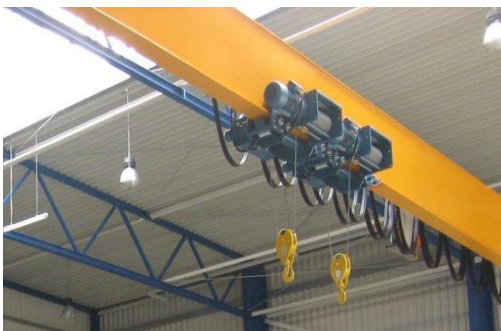


Abbildung 5: links - Einträger-Profilträger-Brückenkran, rechts - Antriebseinheit eines Kranfahrwerks mit Spurführungsrollen (Quelle: Kuli Hebezeuge)

2.3 Angestrebte Ergebnisse

Mithilfe des Forschungsvorhabens sollten grundlegende Erkenntnisse zur Zustandsüberwachung von Unstetigförderern in der Intralogistik erarbeitet werden. Dabei können die erreichten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse wie folgt formuliert werden:

- Grundlagen für die Detektion und Lokalisation von Steifigkeitsverlusten an elastischen Tragwerken in der Intralogistik,
- Grundlagen zur Detektion des Heißlaufens von Lagern und Führungen in der Intralogistik,
- Grundlagen zum Load Monitoring in Intralogistik-Systemen,
- Methoden und Algorithmen für die Detektion und Lokalisierung von Steifigkeitsverlusten an Strukturbauteilen in der Intralogistik,
- Methoden und Algorithmen zur Detektion des Heißlaufens von Lagern und Führungen in der Intralogistik,
- Architektur eines Sensornetzwerks für die Zustandsüberwachung von Intralogistiksystemen,
- Hinweise und Richtlinien für die Gestaltung eines Zustandsüberwachungssystems in der Intralogistik,
- Ausgewählte und praxisbezogene Demonstratoren zur Veranschaulichung der Ergebnisse.

Für die Erarbeitung der Grundlagen, Methoden und Algorithmen mussten zur Erreichung der Teilziele nachfolgende wissenschaftliche Fragestellungen beantwortet werden.

Für das Teilziel „Autonome Detektion eines Steifigkeitsverlustes“ an Intralogistik-Tragstrukturen musste ermittelt werden, welche modalen Daten mit angemessenem messtechnischen Aufwand erfasst werden können und wie der Prozess der Datenerfassung automatisiert werden kann. Um diese Frage beantworten zu können, ist zu klären, wie Sensoreinheiten hardwaremäßig aufgebaut werden müssen um ein skalierbares System zu erhalten, welche auf modalen Eigenschaften basierenden Methoden der Schadensdetektion sich für welche Schäden eignen und ob diese vorgestellten Methoden auf die Systeme der Intralogistik anwendbar sind. Darüber hinaus ist der Nachweis der Umsetzbarkeit durch die Realisierung eines solchen Systems von wissenschaftlichem Interesse, weil dadurch erst geklärt werden kann, ab welcher Größenordnung des Steifigkeitsverlustes sich dieser detektieren lässt, bzw. welche Größenordnung hier gefordert wird.

Ein weiteres Teilziel ist der „autonomen Detektion des Heißlaufens von Wälz- oder Gleitlagern bzw. Linearführungen“ gewidmet, wobei es hier zu untersuchen galt, ob es weitere Sensorprinzipien gibt, die eine völlig energieautarke Integration des sensierenden Elementes in bewegte Teile zulassen und ob eine Integration solcher Sensoren in kleine Wälz- oder Gleitlager wirtschaftlich erfolgen kann. Ergänzend war zu untersuchen, ob mehrere sensierende Elemente eines solchen Sensorprinzips mittels einer einzigen Antenne und Ansteuereinheit abgefragt werden können. Zudem war zu klären, ob die vorgeschlagene Art der Lagerüberwachung sowohl für kontinuierlich laufende Lager als auch für sporadisch laufende angewendet werden kann und in welchen Intralogistiksystemen eine Überwachung von Wälz- oder Gleitlagern mit einem solchen Sensorprinzip möglich ist. Ferner war zu ermitteln, welche Schädigungen in Wälz- oder Gleitlagern zu einem Temperaturanstieg führen und ob anhand einer Temperaturerhöhung ein direkter Zusammenhang zum Lagerzustand hergestellt werden kann. Dabei war ein Augenmerk darauf zu richten, in wie weit es charakteristische Formen des Temperaturanstiegs gibt, die auf die Art der Schädigung zurückschließen lassen.

Der Nachweis der Umsetzbarkeit und die Validierung der Ergebnisse durch die Realisierung eines solchen Systems sind ebenfalls von wissenschaftlichem Interesse.

Um die Erkenntnisse zur Zustandsüberwachung von Unstetigförderern zu vervollständigen musste zudem die kontinuierliche Erfassung der Dehnungen an hochbelasteten Bauteilen bzw. der Beschleunigungen an bewegten Bauteilen betrachtet werden. Zuerst musste hierfür geklärt werden, bei welchen Intralogistiksystemen und welchen ihrer Elemente das vorgeschlagene Monitoring sinnvoll ist. Wie eine Umsetzung mit Hilfe eines dezentralen Systems erfolgen kann und welche heute bereits erfassten Sensordaten für das Load Monitoring nutzbar sind, sollte im Anschluss geklärt werden. Abschließend sollte die Umsetzung mit energieautark arbeitenden Sensorknoten an bewegten Bauteilen erfolgen und damit der Nachweis der Umsetzbarkeit durch den realen Aufbau eines solchen Systems geführt werden. Anhand der beispielhaften Umsetzung ließ sich darüber hinaus auch klären, inwieweit sich eine Fehlnutzungs-/Fehlparametrierungserkennung validieren lässt.

Aus den wissenschaftlich-technischen Ergebnissen lassen sich für die Intralogistik neue Potenziale für die Anlagenverfügbarkeit, die Instandhaltung, die Gerätekosten und den Einsatz moderner Faserverbundwerkstoffe in der Intralogistik erschließen. Es ergeben sich dadurch folgende wirtschaftliche Ergebnisse:

- Reduktion der Instandhaltungskosten durch Ausnutzung von Bauteil-Verschleißgrenzen und planbaren Instandhaltungsmaßnahmen auf Basis der zustandsbasierten Instandhaltung,
- Vermeidung von Anlagenstillständen und Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit,
- Bedarfsgerechte Dimensionierung der Intralogistiksysteme auf Basis tatsächlich im Betrieb ermittelter Belastungen und Beanspruchungen,
- Einsatz von Leichtbauwerkstoffen zur Erhöhung der Leistung von Unstetigförderern.

Das entwickelte Sensornetzwerk besteht aus unterschiedlichen intelligenten Sensorknoten und Sensoren, die jeweils speziell an ihre Aufgabe angepasst sind. Alle Sensorknoten sollten über eine Schnittstelle verfügen, die die Kommunikation mit einer gemeinsamen zentralen Auswerteeinheit ermöglicht. Damit ist es möglich Messdaten der für die Aufgaben spezialisierten Teilsysteme untereinander auszutauschen und für die Auswertung zu verwenden. So ist es zum Beispiel möglich, Sensordaten eines Beschleunigungssensors, der im Rahmen der Strukturüberwachung eines Regalbediengerätetastes eingesetzt wird, ebenfalls für das Gerätelastmonitoring zu nutzen um beispielsweise Beschleunigungsspitzenwerte bei einer Pufferfahrt des RBG am Gassenende zu erfassen.

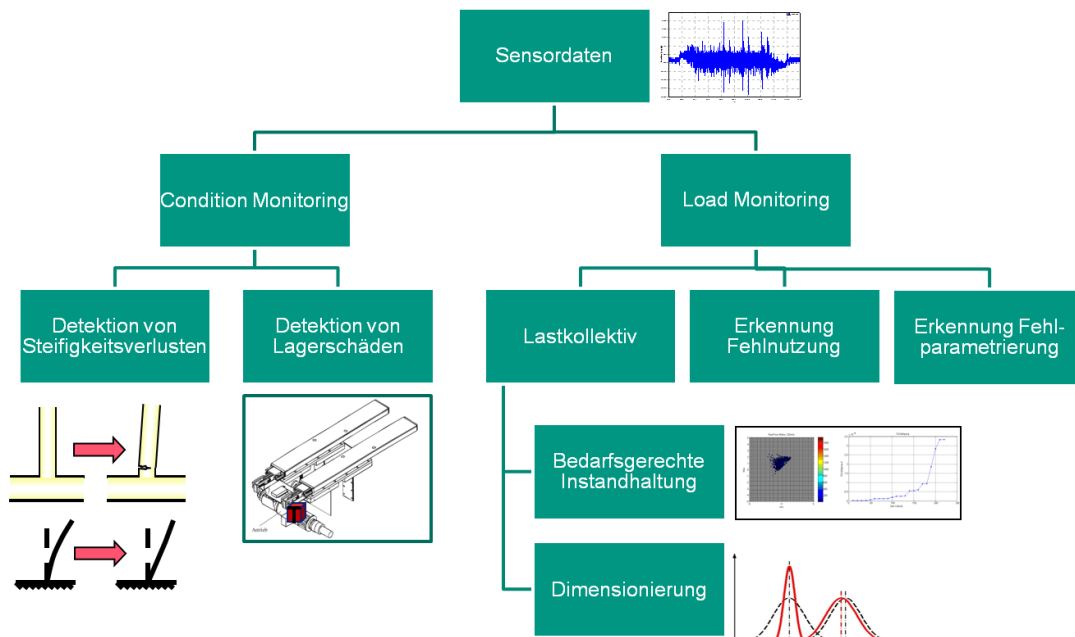


Abbildung 6: Lösungsansatz für die Zustandsüberwachung von Intralogistiksystemen

2.4 Innovativer Beitrag

Die erlangten wissenschaftlich-technischen Forschungsergebnisse zur Zustandsüberwachung ermöglichen die Erschließung neuer Technologiegebiete und Verfahren für die Intralogistik. Diese ermöglichen eine vorausschauende Instandhaltung, die autonome Detektion von Steifigkeitsverlusten elastischer Tragstrukturen, die autonome Detektion des Heißlaufens von Lagerungen, die kontinuierliche Erfassung von Bauteilbeanspruchungen und die Erkennung von Fehlnutzungen.

Mit einer bedarfsgerechten Instandhaltung können Instandhaltungsmaßnahmen während eines geplanten Anlagenstillstands durchgeführt werden. Die Wartung wird damit planbar: Personal, Ersatzteile, Betriebsstoffe, Werkzeuge können effizienter genutzt bzw. vorgehalten werden. Die Neuerung der erlangten Ergebnisse besteht darin Load und Condition Monitoring Verfahren für die bedarfsgerechte Instandhaltung in der Intralogistik miteinander zu kombinieren.

Die Machbarkeit der Detektion von Steifigkeitsverlusten anhand modaler Parameter ist in numerischen Simulationen und anhand von Untersuchungen im Labormaßstab nachgewiesen. Zur Umsetzung in der betrieblichen Anwendung ist eine Entwicklung dahingehend nötig, dass die benötigten Daten autonom erfasst werden. Hierfür soll ein Netzwerk intelligenter Sensorknoten aufgebaut und mit entsprechenden Algorithmen ausgerüstet werden. Die Innovation besteht dabei in einer Kombination schon erprobter Elemente: Random Decrement Methode zur Datenerfassung – Netzwerk intelligenter Sensoren – Operational Modal Analysis zur Ableitung modaler Parameter – Schadensdetektionsalgorithmen basierend auf Eigenvektoren.

Überdies kann eine autonome Detektion des "Heißlaufens" von Wälz- oder Gleitlagern bzw. Linearführungen implementiert werden. Da die Wälz- oder Gleitlager dieser Elemente meist sehr klein sind und die Elemente in Linearführungen von Intralogistiksystemen in großer Anzahl vorkommen, ist ein innovativer Ansatz erforderlich: Die Wälz- oder Gleitlager bzw. Linearführungen sollen mit Temperatursensoren nach dem SAW-Prinzip ausgerüstet werden.

Evtl. sind zur Einbringungen der sensierenden Elemente innovative Fertigungsverfahren nötig. Hierfür ist der Nachweis zu erbringen, dass keine Schwingungserfassung erforderlich ist, sondern eine Detektion der Temperaturerhöhung ausreicht, was die einzige Möglichkeit zur Überwachung einer Vielzahl kleiner Lager darstellt.

Die kontinuierliche Erfassung der Dehnungen an hochbelasteten Bauteilen bzw. der Beschleunigungen an zu verfahrenen Bauteilen ist ein weiterer Beitrag. Die Innovation liegt in autark arbeitenden, intelligenten Sensorknoten. Die in Sensorknoten Verwendung findenden Methoden können sein: Rainflowzählung von Dehnungen, Verweildauerzählung für Beschleunigungen. Die kontinuierliche Erfassung der Bauteilebeanspruchungen erlaubt erstmalig die Anwendung der neu entwickelten Algorithmen zur Detektion von Fehlparametrierungen und Fehlnutzungen in der Intralogistik, die eine weitere Innovation darstellen.

Es werden zudem Kenntnisse über tatsächliche Beanspruchung von Bauteilen und Schadensdetektion gewonnen, was den Einsatz von FVW in der Intralogistik (Werkstoffkenntnis noch unvollständig, deshalb dauerhafte Überwachung erforderlich) ermöglicht.

2.5 Lösungsweg

Das durchgeführte Forschungsvorhaben ließ sich nur durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit der beteiligten Partner realisieren. Neben den beiden Forschungsstellen wurde die erfolgreiche Durchführung des Projektes maßgeblich durch die Beteiligung von klein- und mittelständischen Unternehmen aus dem Bereich Intralogistik ermöglicht: Die Institute führten die Entwicklungs- und Forschungsarbeit durch und die Hersteller von Intralogistiksystemen brachten bei durchzuführenden Untersuchungen an den Geräten unter Betriebsbedingungen Mitarbeit und im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses ihr Knowhow mit ein.

AP 1: Stand der Technik/Forschung

Eine detaillierte Recherche zum aktuellen Wissensstand ist zu Projektbeginn erfolgt. Dabei wurden sowohl Informationen zu den Überwachungsmethoden als auch zu den verschiedenen Systemen der Intralogistik zusammengetragen. Berücksichtigung fanden Ergebnisse aus Forschungsprojekten und Studien, Inhalt und Verbindlichkeit von Regelungen in Richtlinien, Vorschriften und Normen sowie Patenten. Weiterhin wurden Anwendungen betrachtet, in denen die Zustandsüberwachung bereits erfolgreich eingesetzt wird, um eventuell bestehende Kenntnisse nutzen zu können. Eine Anwender- und Expertenbefragung festigten die Ausgangsbasis für die erfolgreiche Bearbeitung.

AP 2: Analyse der Zielkomponenten

In engem Austausch zwischen den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses und den Forschungsinstituten wurden an den ausgewählten Komponenten (Kranbrücke, Führungsrolle am Auszug 1, Mastfuß, Umlenkrolle) hochbeanspruchte Positionen, kritische Konstruktionsmerkmale oder häufig ausfallende Komponenten identifiziert und die zugehörigen Fehlermoden beschrieben. Weiterhin wurden Betriebszustände sowie typische Fehlnutzungen zusammengestellt, die zu starker Belastung führen und mit den daraus resultierenden Schäden verknüpft. Bei diesem Schritt kam neben den Kenntnissen der Industriepartner auch das am IFL verfügbare Wissen bzgl. der Systeme der Intralogistik wie auch die Kompetenz des Fraunhofer LBF in Sachen Systemzuverlässigkeit zum Tragen.

Für die Untersuchung der Anwendbarkeit der Systeme in der Intralogistik mussten geeignete Geräte ausgewählt werden. In diesem Rahmen war es erforderlich eine Klassifizierung der Geräte innerhalb der Produktgruppen nach Fehlerklassen, Lastklassen und Verbreitung

durchzuführen. Nur so konnte sichergestellt werden, dass die Anwendbarkeit an einem repräsentativen Intralogistiksystem erfolgt.

In Rahmen des AP 2 war es zur Identifikation der beschriebenen Parameter auch nötig, an jeder der ausgewählten Komponenten experimentelle Analysen – seien diese nun im Betrieb oder unter Laborbedingungen – durchzuführen. Diese experimentellen Analysen sollten Ergebnisse bringen, die für die Auslegung der neu zu entwickelnden Systeme relevant sind.

AP 3: Entwicklung von Modellen und Algorithmen zur Bestimmung des kausalen Zusammenhanges zwischen Messgrößen und Zustandsgrößen

Die in AP 2 erfassten experimentellen Daten wurden für jede ausgewählte Problemstellung in numerische oder analytische Modelle überführt. Es wurde dabei ebenfalls geprüft, inwieweit es sinnvoll ist, Prozessparameter, welche die Steuerung des jeweiligen Intralogistiksystems bereitstellen kann (z. B. Motormoment, Drehzahl) mit in die Auswertung einzubeziehen. Anhand der Modelle wurden die denkbaren Schäden und die erdachten Methoden und Algorithmen zu deren Identifikation untersucht. Hierbei hat sich das Fraunhofer LBF mit der Problemstellung bzgl. der Detektion des Steifigkeitsverlustes beschäftigt. Schwerpunkt des IFL in diesem Arbeitspaket war die Entwicklung von produktgruppenspezifischen Algorithmen zur Erkennung von Fehlnutzungen und Fehlparametrierungen der Intralogistikgeräte. Um die Modellierung der Problemstellungen bzgl. mechanischer Belastungen und Temperaturänderungen haben sich beide Forschungspartner gemeinsam gekümmert.

AP 4: Konzeption der Sensorik und Auswerteeinheit

Anhand der Ergebnisse aus AP 3 wurden in einem Workshop der beteiligten Industrieunternehmen mit den Forschungspartnern diejenigen Methoden und Algorithmen ausgewählt, die im Weiteren an den ausgewählten Beispielstrukturen umgesetzt und bzgl. deren Eignung untersucht werden sollen. Entsprechend dieser Entscheidung hat das Fraunhofer LBF das umzusetzenden Sensorsystem detailliert geplant (Sensorauswahl, Positionierung, Sensorintegration, Notwendigkeit intelligenter Sensorknoten, interne Kommunikationsstruktur: kabelgebunden/ kabellos, Anbindung an die Steuerung des jeweiligen Intralogistiksystems). Eine Aufgabe des IFL war es zu überprüfen, ob und welche Messgrößen oder errechnete Größen der Gerätesteuerung bzw. der Antriebssteuerung zur Verfügung gestellt werden sollen, um darauf aufbauend beispielsweise Fahrparameter im Betrieb anzupassen oder mit den Messgrößen eine aktive Schwingungsdämpfung zu ermöglichen. Entsprechende Schnittstellen sollten im Sensornetzwerk berücksichtigt werden.

AP 5: Herstellung und Programmierung eines Prototyps zur Zustandsüberwachung

Nach Abschluss der Detailplanungen in AP 4 hat das Fraunhofer LBF die einzelnen Komponenten des Sensornetzwerks umgesetzt und unter Laborbedingungen auf Funktionstüchtigkeit hin geprüft. In diesem Schritt wurden auch die in AP 3 entwickelten Algorithmen auf dem Netzwerk implementiert, wobei diese Aufgabe je nach Modell von der Forschungseinrichtung übernommen wurde, die den jeweiligen Algorithmus entwickelt hat. Anschließend wurden diese Systeme bei den entsprechenden Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses in deren Funktionsmodelle eingebaut und in Betrieb genommen.

AP 6: Versuchsdurchführung, Validierung der Modelle und Algorithmen, Anpassung der Modellparameter

Mit den installierten Systemen wurden mehrere Messreihen durchgeführt. Diese gaben die in AP 2 festgelegten Betriebszustände sowie gezielt aufgebrachte Störungen, z. B. Schienenstöße, Pufferfahrten und Verschleißerscheinungen, z. B. Spiel von Führungsrollen wieder. Weiterhin wurden gezielt schadhafte Bauteile eingesetzt um die Algorithmen zur Detektion der schadhafte Bauteile zu überprüfen. Anhand der Messwerte wurden – wo nötig – für die in AP 3 entwickelten Modelle und Algorithmen die Modellparameter ermittelt und in einem iterativen Prozess angepasst, sowie die Modelle auf ihre Eignung für die gegebene Problemstellung untersucht. Es wurde überprüft, ob die Bestimmung der Zustandsgrößen hinreichend genau erfolgen kann um anhand entsprechender Algorithmen Vorhersagen für Bauteilverhalten Restlebensdauer und Aussagen über Fehlnutzungen und Fehlparametrierungen machen zu können.

AP 7: Dokumentation

Über den gesamten Projektverlauf wurden die Ergebnisse dokumentiert und ausgewertet und in Form einer Dokumentation zusammengestellt.

3 Stand der Technik und der Wissenschaft

Dieses Kapitel beschreibt Fachbegriffe, rechtliche Vorgaben und Normen, die im Rahmen dieses Projektes recherchiert wurden. Außerdem werden bisherige Einsatzgebiete und Anwendungsfälle von Zustandsüberwachungssystemen vorgestellt. Abschließend werden Beispiele für ähnliche Forschungsprojekte genannt.

3.1 Stand der Technik

3.1.1 Begriffsdefinitionen

Stetigförderer

Stetigförderer sind innerbetriebliche Transportsysteme, die stetig (ständig) in Bewegung sind. Sie eignen sich für den Transport großer Materialmengen oder kontinuierlich benötigter Materialien auf festgelegten Strecken. Stetigförderer haben oft eine einfache Bauart. Die Investitions- und Wartungskosten sind abhängig von der Bauart und der zu überbrückenden Strecke. Sie können erheblich größer sein als der Einsatz eines Unstetigförderers. Die Ersparnis wird langfristig durch relativ geringe Betriebs- und Lohnkosten erzielt. Sie lassen sich leicht automatisieren, sind jedoch oft recht unflexibel hinsichtlich der fest vorgegebenen Transportstrecke sowie einer nicht erweiterbaren Transportkapazität.

Beispiele: Rollenförderer, Schneckenförderer, Umlaufseilbahnen

Unstetigförderer

Unstetigförderer sind innerbetriebliche Transportsysteme, die im Gegensatz zu den Stetigförderern nicht kontinuierlich fördern, sondern nur in einzelnen Intervallen, oft nur dann, wenn gerade Transportgüter zu befördern sind. Unstetigförderer können jedoch auch Leerfahrten haben (z.B. durch einen bedarfsunabhängigen Taktbetrieb).

Beispiele: Gabelstapler, Krane, Regalbediengeräte

Condition Monitoring

Condition Monitoring Systeme (CMS) erfassen den Anlagenzustand um diesen weiterzugeben sowie eventuelle Schäden frühzeitig zu erkennen. Hierzu werden Messwerte erfasst, gespeichert, überwacht und ausgewertet.

Load Monitoring

Ein Load Monitoring System dient zum Erkennen von Fehlnutzungen bzw. Überlastungen und zur Ermittlung der tatsächlich im Betrieb auftretenden Belastungen. Es erfasst die bei Fehlnutzung und beim Auftreten von Sonderlasten wirkenden Belastungen oder Beanspruchungen von Bauteilen.

Structural Health Monitoring

Structural Health Monitoring Systeme erfassen den Zustand eines statischen Überwachungsobjektes um frühzeitig Risse oder Verformungen zu erkennen. Hierzu werden Messwerte mit permanent installierten Aufnehmern erfasst, gespeichert, überwacht und ausgewertet.

Instandhaltung

Gemäß [Sche2012] bedeutet Instandhaltung die „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus

einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“.

3.1.2 Relevante Normen und Richtlinien

Im Folgenden werden die für das Forschungsvorhaben relevanten Normen und Richtlinien aufgelistet.

Normen bezüglich Instandhaltung:

- DIN EN 13306: *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung* [DIN13306]
- VDI-Richtlinie 2485: Instandhaltung von Krananlagen (Entwurf) [VDI2485]
- VDI-Richtlinie 2888: Zustandsorientierte Instandhaltung [VDI2888]

Normen für Regalbediengeräte und Krane:

- DIN 15018: Krane – *Grundsätze für Stahltragwerke – Berechnung* [DIN15018]
- DIN 15020: Hebezeuge – *Grundsätze für Seiltriebe – Berechnung und Ausführung* [DIN15020]
- DIN 15350: Regalbediengeräte – *Grundsätze für Stahltragwerke – Berechnungen* [DIN15350]
- FEM 9.311: Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte – *Tragwerke* [FEM9.311]

3.1.3 Zustandsüberwachung als Mittel zur Instandhaltung

3.1.3.1 Einsatzgebiete von Zustandsüberwachung im Maschinen- und Anlagenbau

Ursprünglich hatte man mit einer allgemeinen Maschinenüberwachung immer eine zustandsabhängige Wartungsplanung im Sinn.

Der Schwerpunkt von Condition Monitoring Systemen liegt heute vor allem auf der Schwingungsüberwachung, Thermografie, Drehmomentenmessung (Verformung/Verbiegung), Stromaufnahmemessungen, Druckluftverbrauchsmessungen, Ölanalysen und Körperschallanalysen. Solche Systeme stellen nach [Sche2012] eine Informationsquelle der Instandhaltung dar. Sie können genutzt werden um eventuelle Instandhaltungsmaßnahmen (z.B. für die präventive Instandhaltung) zu veranlassen.

Bekannt Anbieter von Condition Monitoring Systemen sind Bently Nevada, Bosch Rexroth AG, iba AG, national Instruments, Prüftechnik AG und Rockwell Automation [Sche2012].

Heutige Anwendungsfelder von Zustandsüberwachungssystemen sind beispielsweise [Sche2012]:

- Lager-, Getriebe-, Linearführungs- und Wellenüberwachung
Zunehmender Verschleiß, bis hin zum Versagen von Antriebs-Kleinstteilen führt zwangsläufig zum Ausfall des kompletten Systems
- Werkzeugmaschinen
Die Überwachung von beispielsweise Kugelgewindetrieben und/oder Linearführungen zum Erhalt der Verfahrensmöglichkeit (z.B. Schlitten) ermöglicht eine Reduzierung von Standzeiten und Reparaturkosten

- Windkraftanlagen
Die Rotorblätter sowie der gesamte Antrieb sind Witterungs- und Umweltbedingungen ausgesetzt. Reparaturen in entsprechender Höhe sowie die Ersatzteilherstellung in sind mit enormen Kosten verbunden
- Schiffsantriebe
Ein Antriebsausfall auf hoher See ist mit hohen Kosten und Reparaturaufwand verbunden
- Rohrleitungsüberwachungen
Rohrleitungen, die durch Korrosion und/oder Überdruck bersten, können enormen finanziellen Schaden und eine Umweltbelastung (Austritt von Chemikalien, z.B. Öl) verursachen
- Luft- und Raumfahrt
z.B. Structural Health Monitoring des Flugzeugrumpfes und der Turbinenblätter, Überwachung des Reifendruckes bei der Landung, Überwachung des Druckes und der Temperatur innerhalb der Turbinen.

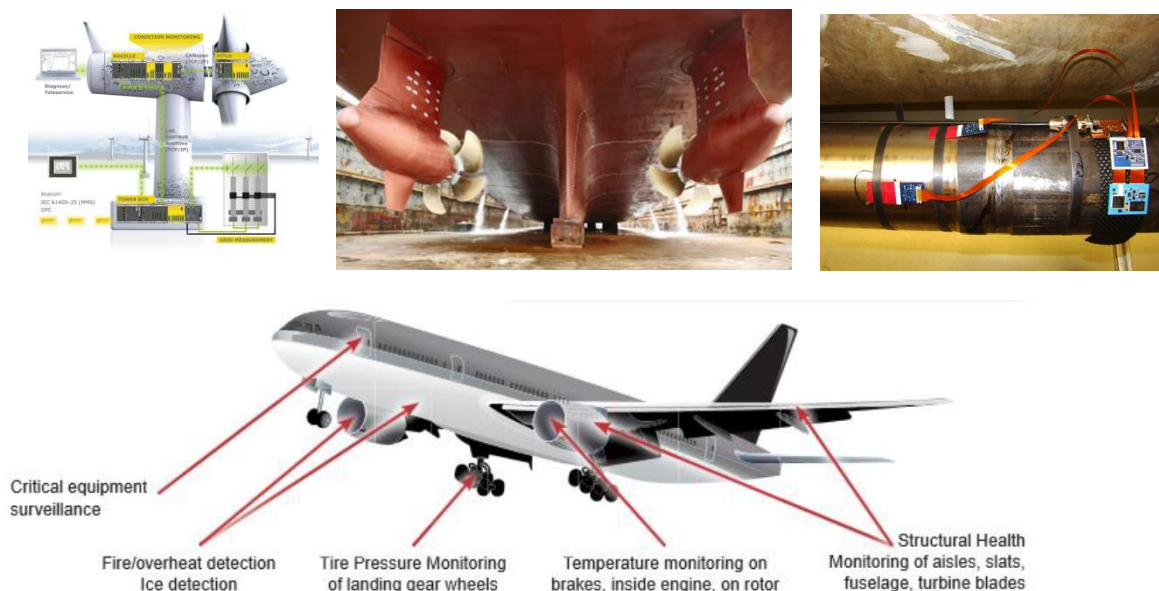


Abbildung 7: Zustandsüberwachungssysteme bei Windkraftanlagen (oben links) , Schiffsantrieben (oben mitte), Rohrleitungen (oben rechts) und Flugzeugen (unten)

3.1.3.2 Einsatzgebiete von Zustandsüberwachung in der Intralogistik

Speziell in der Intralogistik sind heute Zustandsüberwachungssysteme nur in bestimmten Anwendungen im Einsatz. Diese Anwendungen beschränken sich auf Einsätze, bei denen in der Regel nur eine Messgröße an einer Messstelle sensorisch erfasst wird.

Für die bedarfsgerechte Instandhaltung, das Erkennen von Fehlnutzungen bzw. Überlastungen und die Ermittlung der tatsächlich im Betrieb auftretenden Belastungen (vgl. Forschungsanlass), wird ein Load Monitoring System benötigt, das die bei Fehlnutzung und dem Auftreten von Sonderlasten wirkenden Belastungen oder Beanspruchungen von Bauteilen erfasst.

Die einzigen heute in der Intralogistik eingesetzten Load Monitoring Systeme erfassen indirekt die Lasten von Kranhubwerken. Die Realisierung erfolgt mittels DMS-Kraftmesseinrichtungen an der oberen Einscherung. Die Verarbeitung der Messgröße und die Lastkollektivierung finden sensorfern in einer elektronischen Auswerteeinheit statt. Das Belastungskollektiv, also die Größe einer einwirkenden Belastung unter Berücksichtigung ihrer Einwirkdauer, ist für die Betriebsfestigkeit der Hebezeuge maßgeblich [DIN15020]. Das ermittelte Lastkollektiv wird genutzt um die Planung von Instandhaltungsmaßnahmen am Hebezeug zu unterstützen. Hintergrund für diesen Einsatz ist, dass die eingesetzten Drahtseile nicht dauerhaft ausgelegt werden können und deshalb eine regelmäßige Überprüfung der Hubwerke erforderlich ist [VDI2485] [SMBG1997]. Da kein charakteristisches Einsatzszenario für die Hebezeuge bestimmbar ist, werden die Lastkollektive im Betrieb ermittelt um eine Prognose für den Zustand von Hebezeugkomponenten zu erstellen und deren Austausch auslösen zu können. Aussagen über den Zustand von Bauteilen außerhalb des Hubwerks sind nicht möglich. Dazu wären weitere Messgrößen und Algorithmen zur Auswertung erforderlich.

Bei Flurförderzeugen (RBG, Stapler) werden aus Kostengründen bisher keine Load Monitoring Systeme eingesetzt.

Fehlnutzungen und Über- bzw. Sonderlasten, die bei häufigem Auftreten zu Schädigungen an den Geräten führen können, können heute nicht detektiert werden.

Derartige Belastungen sind bei *schienengebundenen Flurförderzeugen* – wie z. B. dem RBG – die Pufferfahrt, Kollisionen von Lastaufnahmemittel und Ladehilfsmittel, das Aufnehmen unzulässig hoher Hublasten sowie unzulässig hohe Beschleunigungen in allen Bewegungsachsen. Diese Sonder- und Überlasten können zum Teil durch Fehlfunktionen, aber alle aufgrund von Fehlnutzungen durch den Betreiber hervorgerufen werden – als Beispiel sei die Pufferfahrt eines RBGs aufgrund eines Reibungsverlusts zwischen Rad und Schiene, der durch die Verschmutzungen der Schiene hervorgerufen wurde, genannt.

Bei *Staplern* sind Kollisionen von Hubgerüsten mit Ladeeinheiten und betrieblichen Einrichtungen, das Beschleunigen bei angehobener Last, das Aufnehmen unzulässig großer Lasten, sowie das Einhängen der Gabeln an betrieblichen Einrichtungen zu berücksichtigende Fehlnutzungen. Die daraus resultierenden Belastungen werden ebenfalls durch den Benutzer verursacht.

Bei *Brückenkränen* müssen die Pufferfahrten von Kran und Katze, das Anheben unzulässig großer Lasten und dynamische Anregungen der Kranbrücke, z. B. durch Einhängen des Lastaufnahmemittels an festen Einrichtungen berücksichtigt werden.

Eine ähnliche Form des Aufzeigens von Fehlnutzungen wird bereits bei modernen Kraftfahrzeugen angewandt. Die Fahrzeuge verfügen über eine Vielzahl elektronischer Systeme, die Daten auswerten und beim Auftreten von Fehlern abspeichern. Nach einem Unfall können die Daten vom Hersteller genutzt werden um aufzuzeigen, dass keine Fehlfunktion eines Steuergerätes Ursache für den Unfall war. Zusätzlich kann mit den Daten die Unfallrekonstruktion unterstützt werden [Kalt2007].

Neben der Identifikation von Sonder- und Überlasten kann mit Load Monitoring Systemen eine Prognose über den Zustand von Bauteilen erstellt werden. Diese Prognosen erfolgen anhand von Nachweisketten in denen anhand gemessener Belastungen mit einem statischen oder dynamischen Systemmodell Bauteilbeanspruchungen ermittelt werden, welche wiederum anhand eines Schädigungsmodells auf den Zustand und die Restlebensdauer von Bauteilen schließen lassen (Abbildung 8).

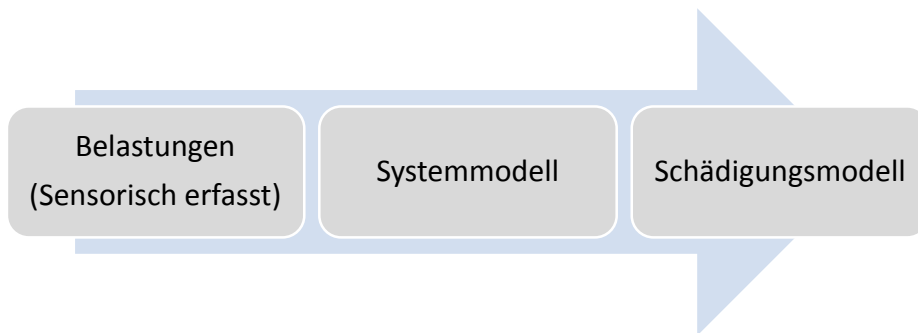


Abbildung 8: Nachweiskette für die Lebensdauervorhersage mit Load Monitoring

3.1.4 Aufgaben und Methoden der industriellen Instandhaltung

Ziele der Instandhaltung sind beispielsweise [Dull2008]:

- Die Erhöhung und optimale Ausnutzung der Lebensdauer
- Die Maximierung der Verfügbarkeit durch Minimierung von Störungen und Stillstandzeiten
- Die Sicherstellung der geforderten Funktion und Leistung
- Die Einhaltung von Sicherheits-, Umwelt- und Qualitätsstandards
- Die Minimierung der zur Erreichung der genannten Ziele notwendigen Kosten

Durch die zunehmende Automatisierung von Maschinen und Anlagen gewinnt auch die Instandhaltung zunehmend an Bedeutung. Einige hierfür maßgebliche Attribute sind nachfolgend aufgelistet [Sche2012].

- Steigende Anlagenkomplexität
- Steigende technische und organisatorische Anlagenverkettung
- Hohe Ausfall- und Ausfallfolgekosten
- Erhöhte Verfügbarkeits- und Produktivitätsanforderungen
- Steigende Sicherheits- und Umweltschutzanforderungen

Die Instandhaltungsmethoden bzw. Vorgehensweisen lassen sich nach Abbildung 9 in zwei Bereiche einteilen.

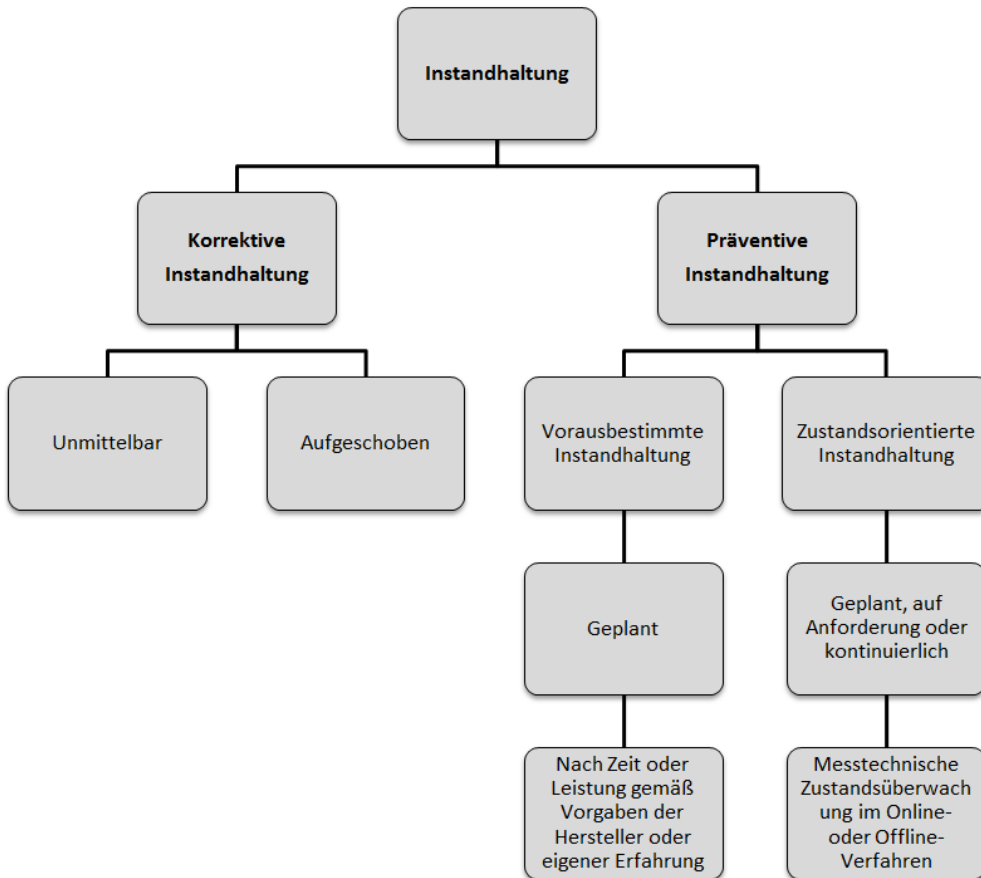


Abbildung 9: Methoden der Instandhaltung [VDI2888]

Nach [Sche2012] gibt es neben den im Diagramm aufgelisteten Methoden noch folgende weitere Unterteilungen zur Instandhaltung:

- *Automatisierte Instandhaltung*
Ist eine Instandhaltung, die ohne menschliches Zutun abläuft.
- *Ferngesteuerte Instandhaltung*
Ist eine Instandhaltung, die ohne physischen Zugriff von Personal auf die Betrachtungseinheit abläuft
- *Instandhaltung während des Betriebs*
Ist eine Instandhaltung, bei der die Instandhaltungsmaßnahmen während der Nutzung der Betrachtungseinheit durchgeführt werden.
- *Instandhaltung vor Ort*
Ist eine Instandhaltung, bei der die Instandhaltungsmaßnahmen an dem Ort durchgeführt werden, an dem die Betrachtungseinheit benutzt wird.
- *Bediener-Instandhaltung*
Ist eine Instandhaltung, bei der die Instandhaltungsmaßnahmen durch den qualifizierten Benutzer oder den Betreiber selbst ausgeführt werden.

Der Vergleich bzw. die Vor- und Nachteile der verschiedenen Instandhaltungsmethoden sind in der nachfolgenden Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Instandhaltungsmethoden Tabelle 2 aufgelistet.

	Korrektive Instandhaltung	Vorausbestimmte Instandhaltung	Zustandsorientierte Instandhaltung
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> + Vollständige Ausnutzung des Abnutzungsvorrates + Geringer Instandhaltungsaufwand bis zum Ausfall 	<ul style="list-style-type: none"> + Gute Planbarkeit (Material, Ressourcen, Ablauf) + Reduzierung ungeplanter Stillstände + Erhöhte Anlagenverfügbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> + Gezieltes Ausschöpfen des Abnutzungsvorrates + Geringes Ausfallrisiko + Planbarkeit (material, Ressourcen, Ablauf) + keine Folgeschäden
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Vorhaltung von Ersatzteilen und Personal - Hohes Ausfallrisiko - Erhöhte Ausfall- und Ausfallfolgekosten - ggf. unvorhersehbare Folgeschäden 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoher Planungsaufwand - Kein Ausschöpfen des Abnutzungsvorrates - Erhöhter Instandhaltungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoher Aufwand für Mess- und Diagnosesysteme - Erhöhte Anforderungen an Qualifikation des Instandhaltungspersonals

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Instandhaltungsmethoden

3.2 Stand der Wissenschaft

3.2.1 Zustandsüberwachung

Zustandsüberwachung ist sowohl in der Forschung als auch im alltäglichen industriellen Einsatz seit mehr als 20 Jahren ein Thema. Der Begriff beschreibt die sensorbasierte Überwachung von rotatorisch arbeitenden Maschinen und beschäftigt sich dabei vornehmlich mit der Detektion von Schäden an Verzahnungen und in Wälzlagern. Seltener werden auch die strukturelle Integrität von Wellen selbst oder Gleitlager überwacht. In der fossilen Energiegewinnung und in der petrochemischen Industrie sind nahezu alle Anlagen mit Zustandsüberwachungssystemen ausgerüstet. Dabei handelt es sich meist um Komplettsysteme mit mehreren hundert Messstellen, die inklusive Servicevertrag installiert werden und bei denen die Datenauswertung von Fachingenieuren in speziellen Monitoring Centern vorgenommen wird. Solche Systeme werden meist noch um ein Monitoring von Prozessparametern wie Wellenleistungen, Drehzahlen, verschiedenen Temperaturen etc. ergänzt, um die auftretenden Schäden früher und mit höherer Sicherheit detektieren zu können. Von dieser Ausprägung an abnehmend gibt es am Markt Geräte jeglicher Komplexität – bis hin zu handgehaltenen Datenerfassungsgeräten, die von Servicemitarbeitern im Werkzeugkoffer mitgeführt und genutzt werden, sowie kompakten „Schwingungswächtern“, die an einer Komponente angebracht über eine Ampelfunktion deren Zustand anzeigen.

3.2.2 Überwachung von Lagern und Linearführungen

Die Überwachung von Wälzlagern ist eine der am weitest verbreiteten Formen des Condition Monitoring. Die drei am häufigsten angewandten Verfahren sind [Tara2008]

- die Akustische Analyse oder Schwingungsanalyse,
- die Schmiermittelanalyse und
- die Temperaturüberwachung.

Die Schwingungsanalyse wird bei kleinen und großen Lagerdurchmessern eingesetzt. Voraussetzung für dieses Verfahren ist, dass mithilfe von Beschleunigungssensoren Vibrationen erfasst und direkt dem im Interesse liegenden Lager zugeordnet werden können. In den meisten Fällen wird deshalb jedes zu überwachende Lager mit einem eigenen Sensor (Beschleunigungs- oder Dehnungsmessung am Lagergehäuse oder am feststehenden Lagering) ausgerüstet. Eine neuartige Sensorik sind sogenannte Dünnschichtsensoren, die direkt auf die Laufbahnen von Lagern aufgebracht werden [Biehl2011]. Deren wirtschaftlicher Einsatz in Führungsrollen der Intralogistik wird in den nächsten Jahren aller Voraussicht nach nicht möglich sein. Bei der Schwingungsanalyse werden hochfrequente Schwingungen detektiert, die aufgrund von Schädigungen der Lagerlaufbahnen und Rollen hervorgerufen werden. Die hochfrequenten Schwingungen werden beispielsweise mit einer FFT-Analyse (schnelle Fourier-Transformation / fast Fourier transform) identifiziert. Diese Verfahren eignen sich sehr gut für Lager und Maschinen, die mit einer konstanten Drehzahl betrieben werden. Bei diesen Systemen ändert sich das charakteristische Frequenzspektrum über der Zeit nur bei einer Lagerschädigung – im Gegensatz zu Maschinen, die diskontinuierlich und mit unterschiedlichen Systemzuständen und stark variierenden Störgrößen betrieben werden [Tand2007].

Bei der Schmiermittelanalyse wird anhand von Verschleißpartikeln im Schmierstoff auf den Lagerzustand geschlossen [Green2004]. Die Schmiermittelanalyse wird zum einen bei Lagern mit Umlaufschmierung eingesetzt. Dies ist im kontinuierlichen Betrieb möglich. Zum anderen kann das Schmiermittel innerhalb von Wartungsmaßnahmen erfolgen. Bei lebensdauererschmierten Lagern wie in Stütz- und Führungsrollen ist dieses Verfahren nicht anwendbar.

Mit der Temperaturüberwachung ist der aktuelle Lagerzustand nicht so exakt bestimmbar wie mit der Schwingungsanalyse und der Schmiermittelanalyse, diese ist dafür aber die einfachste und schnellste Methode der Lagerüberwachung [Tara2008]. Mit der Temperaturüberwachung können die folgenden Lagerzustände detektiert werden:

- Schmierstoffmangel
- Zu hohe Belastung
- Einbaufehler (zu viel/zu wenig Lagerluft, Wandern der Welle)
- Dichtungsreibung

Der Vorteil der Temperaturüberwachung der Lager im Vergleich zu den beiden erstgenannten Verfahren besteht darin, dass mit neuartiger Messtechnik (vgl. Abschnitt 3.2.4) die Temperaturmessung auch von mehreren kleinen Lagern mit kleinen Innendurchmessern in bewegten Maschinenelementen, wie beispielsweise einer Teleskopgabel möglich ist.

3.2.3 Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring)

Eine Strukturüberwachung im Sinne des Structural Health Monitoring (SHM) beinhaltet die kontinuierliche Beobachtung des Systems anhand dynamischer Messgrößen, die Extraktion

von schadensrelevanten Kenngrößen aus den Messwerten, sowie die statistische Analyse der Entwicklung dieser Kenngrößen [Sohn2004]. Überwacht wird beim SHM die Integrität von elastischen Tragstrukturen.

Als schadensrelevante Kenngrößen eignen sich unter anderem die Eigenschwingformen, da sie lokale Informationen beinhalten und damit auch durch lokale Schäden beeinflusst werden. Dies ist vorteilhaft gegenüber der Betrachtung von Resonanzfrequenzen, da diese als globale Größen lediglich zur Detektion von globalen Schäden eingesetzt werden können. Als lokale Schäden sind neben dem Verlust von Masse – sprich Material – vor allem der Verlust von Steifigkeit anzusehen. Zu einem solchen Steifigkeitsverlust kommt es unter anderem durch Rissbildung und -wachstum in Schweißnähten und der Struktur selbst, aber auch durch das Lösen einer Schraub- oder Nietverbindung.

Klassische Methoden, die auf der Änderung von Eigenschwingformen basieren, beziehen ihre Schadenskenngößen aus einem Vergleich der aktuellen Eigenschwingformen mit einem Basiswert, z. B. aus einem Experiment direkt nach der Inbetriebnahme oder einer numerischen Analyse. Dem gegenüber stehen neu entwickelte Methoden, die auf solche Kenngrößen des unbeschädigten Systems verzichten können, da sie die Krümmung der Eigenschwingformen analysieren [Fan2010].

In all diesen Ausprägungen hat die Strukturüberwachung anhand der Detektion von Steifigkeitsverlusten rege Aufmerksamkeit erfahren. Überblicksartikel sowie Fallstudien wurden unter anderem von Carden & Fanning [Card2004], Montalvão et al. [Mont2006] und Humar et al. [Huma2006] veröffentlicht.

3.2.4 Sensorik für die Zustandsüberwachung

Für die Zustandsüberwachung werden bisher vornehmlich klassische, drahtgebundene Sensoren eingesetzt. Gerade bei der Überwachung bewegter Teile oder bei Bauraumbeschränkungen stoßen diese Sensortechnologien an ihre Grenzen. Eine Alternative stellen drahtlos und passiv arbeitende Sensoren nach dem SAW-Prinzip dar.

Sensoren nach dem SAW-Prinzip (Surface Acoustic Wave, zu Deutsch etwa "akustische Oberflächenwellen") wurden aus passiv abfragbaren Markern ähnlich den bekannten RFID-Tags entwickelt. Solche Marker waren zunächst zu Anfang der 1980er Jahre für die drahtlose Identifikation von Tieren eingesetzt worden, eine erste industrielle Anwendung erfolgte im Rahmen eines Mautsystems für Kraftfahrzeuge in Oslo. Der Übergang von Identifikationsmarkern zu wirklichen Sensoren erfolgte Anfang der 1990er Jahre und basiert auf einer durch einen Interrogator angeregten Schwingung im Sensorsubstrat. Das "Nachklingen" dieser Schwingung nach Abschalten der Erregung ist abhängig von Verformungszustand des Substrates, so dass damit zunächst thermisch oder mechanisch induzierte Dehnungen gemessen werden konnten (Abbildung 10) [Fach2006]. Ausgehend von diesem Prinzip wurden die SAW-Sensoren durch eine Anpassung des Substrataufbaus und der Anbindung an die zu vermessende Struktur weiterentwickelt und für Messung verschiedener anderer physikalischer Größen angepasst [Friedt2010]. Daneben erfolgt eine Weiterentwicklung der Antennen- und Anregungstechnologie [Tou2009]. Gerade unter rauen Umgebungsbedingungen und in rotatorisch oder translatorisch bewegten Systemen setzen sich heutzutage SAW-Sensoren aufgrund ihrer Robustheit und der passiv-drahtlosen Arbeitsweise immer mehr durch.

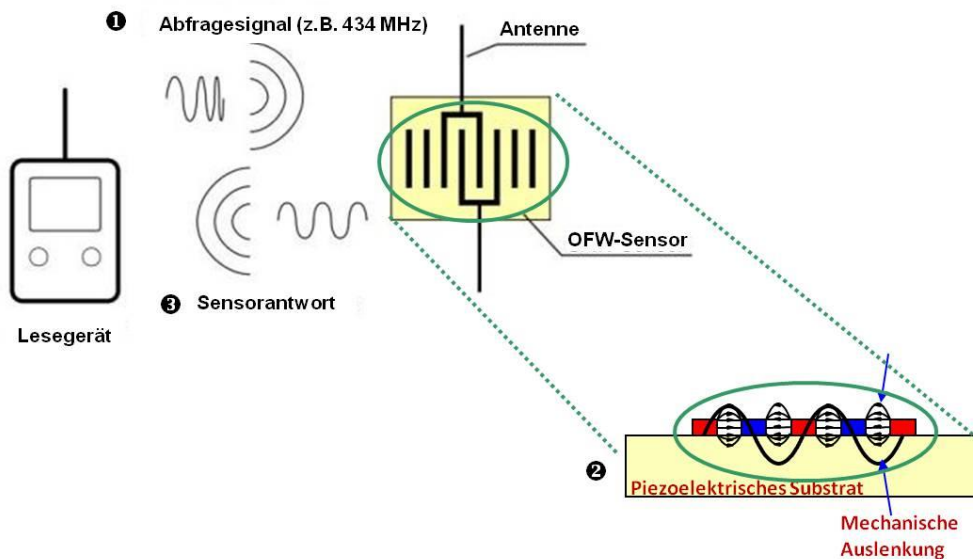


Abbildung 10: SAW-Sensor-Prinzip

3.2.5 Dynamische Verhalten von Unstetigförderern

Für den Einsatz von Zustandsüberwachungssystemen bei Unstetigförderern muss deren dynamisches Verhalten berücksichtigt werden. Die für die Dimensionierung der Geräte zur Verfügung stehenden Normen und Richtlinien berücksichtigen die dynamischen Belastungen und Bauteilbeanspruchung mithilfe von Dynamikbeiwerten [DIN15350], [DIN15018], [FEM9.311]. Diese Betrachtung eignet sich für eine Bauteildimensionierung, jedoch nicht für die Beschreibung des tatsächlichen dynamischen Geräteverhaltens. Veränderliche Systemzustände aufgrund unterschiedlicher Nutzlasten, unterschiedlicher Hubhöhen und den daraus resultierenden unterschiedlichen Eigenfrequenzen von Baugruppen werden nicht berücksichtigt. Im Rahmen der umfangreichen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Schwingungsanalyse der Unstetigförderer wurde das dynamische Verhalten anhand von Ein-, Zwei- [Dietzel1999], [Gold2004] und Mehrkörpermodellen [Schu1994], für Stapler unter Berücksichtigung des Spiels der teleskopierbaren Elemente zueinander [Mitt2007], bis zu FEM-Modellen [Kühn2001] modelliert und simuliert und durch Messungen validiert.

Am IFL wurden bereits alle für das Forschungsvorhaben relevanten Produktgruppen (Krane, Flurförderzeuge, Regalbediengeräte) auf ihr Schwingungsverhalten untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse standen als Grundlage für die Entwicklung von Zustandsüberwachungssystemen für die Intralogistik zur Verfügung, etwa für die Strukturüberwachung elastischer Strukturen anhand der Eigenschwingformen. Exemplarisch sind in Abbildung 11 Verläufe der Hubseilkraft und der Schnittkraft einer Teleskopzinke beim RBG dargestellt – relevante Größen für die Ermittlung der Belastung der Teleskoplinearführung.

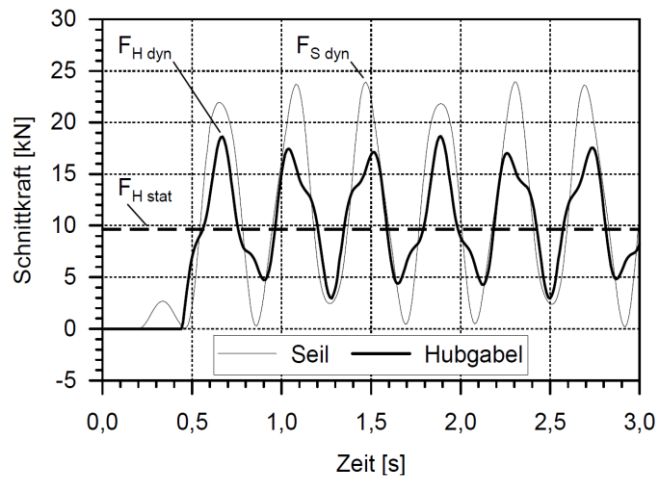


Abbildung 11: Simulation von Seilkraftverlauf des Hubseils und Schnittkraftverlauf in der Teleskopzinke beim Anheben einer Last aus dem Regalfach [Kühn2001]

4 Analyse der Zielkomponenten

In engem Austausch zwischen den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses und den Forschungsinstituten wurden an den ausgewählten Geräten hochbeanspruchte Positionen, kritische Konstruktionsmerkmale oder häufig ausfallende Komponenten identifiziert und die zugehörigen Fehlermoden beschrieben. Dazu fanden Treffen mit wechselnder Beteiligung – teils als Präsenztreffen, teils als Telefonkonferenzen im Zeitraum November 2013 bis Februar 2014 statt. Bei diesem Schritt kam neben den Kenntnissen der Industriepartner auch das am IFL verfügbare Wissen bzgl. der Systeme der Intralogistik wie auch die Kompetenz des Fraunhofer LBF in Sachen Systemzuverlässigkeit zum Tragen.

Anhand der Ergebnisse haben das IFL und das Fraunhofer LBF in weiteren Workshops Methoden und Algorithmen ausgewählt, die im Weiteren an den ausgewählten Beispielstrukturen umgesetzt und bzgl. deren Eignung untersucht werden sollen. Diese Ansätze werden im Folgenden vorgestellt, um einen ersten Überblick zu bieten, für welche der beschriebenen Parameter eine Identifikation und Quantifizierung notwendig ist und wie an den ausgewählten Komponenten Praxisversuche und Messungen durchzuführen sind. Die hier ermittelten Ergebnisse bilden die Basis für die Auslegung der neu zu entwickelnden Systeme.

Fehlzustand:	Spiel quer zur Bewegungsrichtung
Anwendungsfälle:	Fahrwerkskopf (am Kopfträger des Brückenkrans und an der Bodentraverse des RBG), Führungen an der Deckentraverse, Führungen am Hubwagen, Führungen an der Katze, Hubgerüst eines Gabelstaplers, ... (wahrscheinlich sehr viele Anwendungen in der Intralogistik)
Objekte für Messungen:	Fahrwerkskopf (am Kopfträger des Brückenkrans und an der Bodentraverse des RBG)
beteiligte Partner:	Dambach GmbH Kuli GmbH
Ansatz:	Bestimmung und Analyse der Häufigkeitsverteilung der Beschleunigungen quer zur Bewegungsrichtung – ggf. in Zusammenhang mit der Bestimmung der Bewegungsrichtung und/oder Drehzahl und Drehrichtung der in Bewegungsrichtung ausgerichteten Räder
Umsetzung:	evtl. direkt im operationellen Betrieb messbar – ansonsten besteht die Möglichkeiten einer automatischen Wiederholung der Messung mit einer definierten Testfahrt, z. B. bei Betriebsaufnahme oder immer bei Schichtwechsel
Sensorik:	AC-Beschleunigungssensoren quer zur Bewegungsrichtung ggf. DC-Beschleunigungssensorik in Bewegungsrichtung ggf. Drehzahl- und Drehrichtungserfassung (optisch, induktiv, kapazitiv, ... mit Gegenstück: Schwarzweißmuster oder Loch/Zahnscheibe) (Sensorik gut mit der Sensorik für »ungleichförmige Bewegung« kombinierbar)
Verantwortlichkeit:	Fraunhofer LBF

Fehlzustand:	Spiel in Bewegungsrichtung
Objekt für Messungen:	Teleskop
beteiligte Partner:	Dambach GmbH
Ansatz:	Bestimmung und Analyse der Impulshaltigkeit und/oder der Häufigkeitsverteilung der Beschleunigung am obersten Auszug des Teleskops – ggf. in Zusammenhang mit der Erkennung des Bewegungsspiels und der Bestimmung der Bewegungsrichtung Diese Messungen können entweder am Triebstock (rotatorisch) oder direkt an der Auszugskette (Dehnungskräfte an Kettengliedern) durchgeführt werden.
Umsetzung:	evtl. direkt im operationellen Betrieb messbar – ansonsten besteht die Möglichkeiten einer automatischen Wiederholung der Messung mit einer definierten Testfahrt, z. B. bei Betriebsaufnahme oder immer bei Schichtwechsel
Sensorik:	quasistatische messende Beschleunigungssensorik in Bewegungsrichtung ggf. Sensorik für die Messung von rotatorischen Beschleunigungen oder Messung der auftretenden Kräfte in der Auszugskette. Aufgrund der geringen Platzverhältnisse soll hier mittels kabelloser SAW-Sensoren (Beschleunigung und Dehnung) gemessen werden. Falls sich die Umsetzung mit SAW-Sensoren für die ersten Testreihen als zu aufwändig erweisen, sollen definierte Testzyklen mit herkömmlicher, kabelgeführter Technik gemessen werden.
Verantwortlichkeit:	IFL
Fehlzustand:	Steifigkeitsverlust
Anwendungsfälle:	Mastfuß und Katzträger, Maststoß, Anbindung Kopfträger – Katzträger, Hubgerüst Stapler, Zinken Stapler, ...
Objekte für Messungen:	RBG-Mastfuß und Brückenkran-Katzträger
beteiligte Partner:	Dambach GmbH Kuli GmbH
Ansatz:	Mastfuß: Erfassung und Analyse der Häufigkeitsverteilung der Beschleunigungen am Mast zur Detektion von Nichtlinearitäten Katzträger: Erfassung und Bestimmung der Dehnung an verschiedenen Positionen – Analyse der Dehnungsverteilung und/oder Analyse der Änderung von aus den Dehnungen bestimmten modalen Parametern.

	Seitenführung: Gleichzeitig sollen die auftretenden Führungskräfte mittels Dehnungsmessstreifen gemessen werden und anschließend auf die modalen Parameter hin analysiert werden.
Umsetzung:	evtl. direkt im operationellen Betrieb messbar – ansonsten besteht die Möglichkeiten einer automatischen Wiederholung der Messung mit einer definierten Testfahrt, z. B. bei Betriebsaufnahme oder immer bei Schichtwechsel
Sensorik:	Mastfuß: dynamischer Beschleunigungssensor am Mastkopf Katzträger: DMS für Biegemomente an mehreren Stellen über die Länge des Katzträgers verteilt Seitenführung: modifizierte Seitenführungsrollen mit integrierten DMS.
Verantwortlichkeit:	IFL Fraunhofer LBF
Fehlzustand:	Ungleichförmige Bewegung
Anwendungsfälle:	Fahrwerkskopf (am Kopfträger des Brückenkrans und an der Bodentraverse des RBG), Führungen an der Deckentraverse, Führungen am Hubwagen, Führungen an der Katze, ...
Objekte für Messungen:	Fahrwerkskopf (am Kopfträger des Brückenkrans und an der Bodentraverse des RBG)
beteiligte Partner:	Dambach GmbH Kuli GmbH
Ansatz:	Schwergängigkeit – zeitweise Blockade – Blockade → Analyse des Frequenzinhaltes der Beschleunigungen in Normalenrichtung zur zu überwachenden Führung Unrundheit → Erfassung und Analyse der Impulshaltigkeit von Beschleunigungen in Normalenrichtung zur zu überwachenden Führung ggf. Vergleich der Zeitverläufe dieser Beschleunigungen (erfordert Erkennen des Drehwinkels und der Drehrichtung ggf. Bestimmung der Häufigkeitsverteilung der Beschleunigungen in verschiedenen Winkellagen
Umsetzung:	evtl. direkt im operationellen Betrieb messbar – ansonsten besteht die Möglichkeiten einer automatischen Wiederholung der Messung mit einer definierten Testfahrt, z. B. bei Betriebsaufnahme oder immer bei Schichtwechsel
Sensorik:	AC-Beschleunigungssensoren in Normalenrichtung zur zu überwachenden Führung ggf. DC-Beschleunigungssensorik in Bewegungsrichtung

ggf. Drehzahl- und Drehrichtungserfassung (optisch, induktiv, kapazitiv, ... mit Gegenstück: Schwarzweißmuster oder Loch/Zahnscheibe)

(Sensorik gut mit der Sensorik für »Spiel quer« kombinierbar)

Verantwortlichkeit: Fraunhofer LBF

4.1 Analyse eines Regalbediengeräts

4.1.1 Messdurchführung

Im Sommer 2014 (29.-31. Juli) wurden Praxisversuche und Messungen an einem Automatischen Kleinteile-Lager (AKL) bei der Dambach GmbH durchgeführt. Nach der Instrumentierung des Messobjektes mit einem Labor-Messsystem wurden verschiedene Betriebs- und Fehlerzustände hergestellt und vermessen.

4.1.1.1 Messobjekt und Messeinrichtung

Das untersuchte AKL ist eine Sonderform einer RBG (hier für Kleinteile in entsprechenden Kisten). Es verfügt über eine Gassenlänge von ca. 25 m und einer Höhe von 6,6 m. Gleichzeitig aufgezeichnet wurden Beschleunigungen in 24 Freiheitsgraden sowie Betriebsparameter wie Hubhöhe und Drehzahlen entsprechend den oben dokumentierten Vorüberlegungen. Die Datenerfassung geschah bei einer Samplingrate von 2048 Hz, um auch die Analyse von Strukturschwingungen zu ermöglichen. Die Verteilung der Sensoren wurde so gewählt, dass die folgenden Schädigungsarten untersucht werden konnten:

- Spiel quer zur Bewegungsrichtung (an einem Paar der unteren Führungsrollen)
- Ungleichförmige Bewegung (an einem Antriebsrad und an einer Führungsrolle)
- Steifigkeitsverlust



Abbildung 12: links: Labor-Messsystem montiert auf dem Podest oberhalb des Schaltschranks; rechts: Labor-Sensorik zur Erfassung der Antriebsdrehzahl



Abbildung 13: links: Beschleunigungssensorik in der Höhe des Maststoßes; rechts: Beschleunigungssensorik neben einer der unteren seitlichen Führungsrollen

4.1.1.2 Versuchsdurchführung und Analyse

Um einen möglichst realitätsnahen Betrieb, gleichzeitig aber auch einen umfassenden Datenpool zu erreichen, wurden eine festgelegte Folge von Umsortierungen, Ein- und Auslagerungen immer wieder abgefahren. Um die Auswirkungen von Schädigungen und deren autonomes Erkennen untersuchen zu können, wurden bei diesen Versuchen folgende Schädigungen des RBG simuliert:

- Spiel quer zur Bewegungsrichtung (an einem Paar der unteren Führungsrollen)
 - 0,0 mm (Führungsrollen „sanft angelegt“)
 - 0,9 mm
 - 2,0 mm
- Ungleichförmige Bewegung (an einem Antriebsrad)
 - Abplattung (siehe Abbildung 14)



Abbildung 14: Durch Bearbeitung mit einer Schleifscheibe abgeplattetes Antriebsrad

- Ungleichförmige Bewegung (an einer Führungsrolle)
 - abgeplattete Führungsrolle

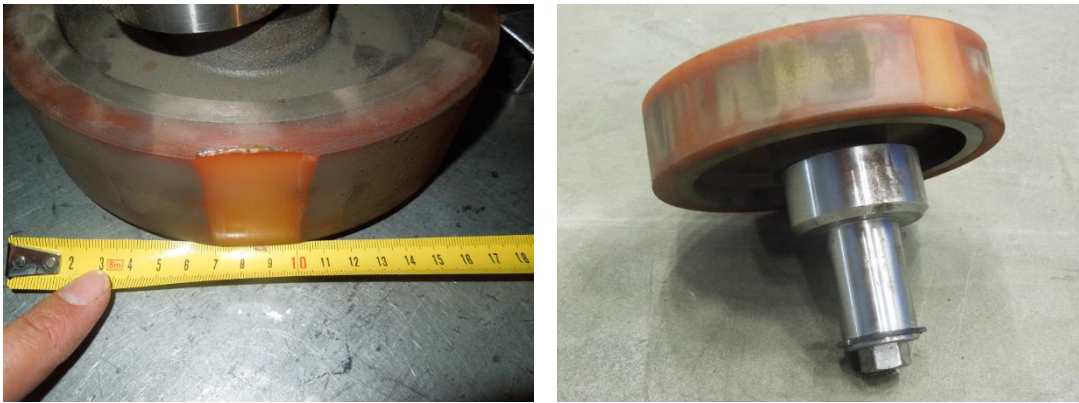


Abbildung 15: Abgeplattete Führungsrolle (links: vor dem Einsatz, rechts: danach)

- blockierte Führungsrolle



Abbildung 16: Durch Schweißpunkte blockierte Führungsrolle

Ein Steifigkeitsverlust am Mastfuß (z. B. durch teilweises Lösen der Verschraubung des Mastfußes mit der Bodentraverse) konnte aus Sicherheitsgründen nicht realisiert werden. Aufgrund dieser Tatsache musste von einer weiteren Analyse der Mastschwingungen zur Erkennung eines Steifigkeitsverlustes am Mastfuß abgesehen werden. Die Analyse der Messdaten bzgl. der Fehlzustände „Spiel quer zur Bewegungsrichtung“ und „Ungleichförmige Bewegung“ werden im Kapitel Entwicklung von Modellen und Algorithmen dieses Abschlussberichtes im Detail beschrieben.

4.2 Analyse einer Teleskopgabel

Zur Bestimmung der relevanten Parameter wurden Messungen an einer Teleskopgabel für ein Regalbediengerät bei der Firma Dambach Lagersysteme GmbH & Co. KG durchgeführt.

Die Teleskopgabel ist ein Teil eines automatisierten Regalbediengerätes und sorgt dafür, schwere Traglasten, wie Paletten und Gitterboxen, einzulagern und auszulagern. Durch den Einsatz der Palettenteleskopgabel mit einer doppeltiefen Variante wird eine enorme Kostenersparnis realisiert, da auf einer nur geringfügig größeren Lagerfläche fast doppelt so viele Waren gelagert werden können.

Wie in Abbildung 17 dargestellt, bestehen die Zinken der Maschine aus drei beweglichen Stangen. Diese drei Elemente sind mit Ketten miteinander verbunden. Die Flyerketten werden durch gefederte Kettenspanner gespannt und an die erste Stange befestigt (siehe Abbildung 17). Die Bewegung wird von dem Getriebemotor zu dem ersten beweglichen Teil durch

die Zahnräder übertragen. Sowohl die erste Stange als auch die zweite Stange besitzen Zahnstangen. Wie in den Abbildung 17 und Abbildung 18 zu sehen ist, ist die Zahnstange des zweiten Elements mit einer Kette verzahnt. Diese Kette kann direkt durch eine Reihe kleiner Zahnräder angetrieben werden. Jene Funktionsweise ermöglicht eine unabhängige Bewegung des zweiten Elements bereits von der ersten Zahnstange aus. Die dritte Zahnstange bewegt sich dank eines Kettensystems. Der äußere Sensor und der innere Sensor werden jeweils an das dritte und das zweite bewegliche Element geklebt.

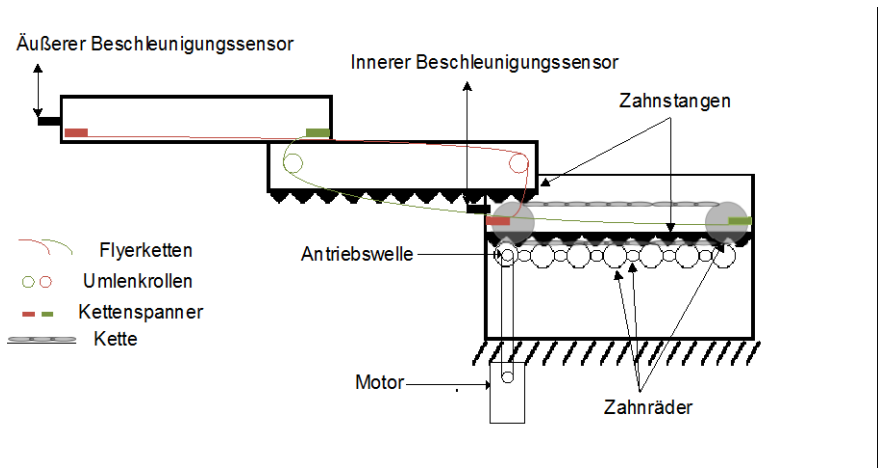


Abbildung 17: Prinzipskizze einachtige Bewegung

Im Betrieb der Maschine entsteht ein Spiel resultierend aus den einzelnen Verbindungselementen. Die Teleskopgabel kann sich nur in Längsrichtung bewegen, da ihre Bewegung durch Führungen bedingt wird.

Ihre Bauweise und die zwei getrennten Antriebe ermöglichen der Gabel zwei verschiedenen Längen zu erreichen und somit den Platz im Regal besser auszunutzen. Sind zwei der drei Glieder ganz ausgestreckt, wird diese als Einfachtief bezeichnet. Dabei wird das zweite Element direkt durch die kleinen Zahnräder getrieben. Die dritte Stange bewegt sich dank des Kettensystems mit und die Erste Stange bleibt in Ruhe. Hier kann eine Tiefe von 1,45 m erreicht werden. Das Bewegungsprinzip wird in Abbildung 17 dargestellt.

Für den anderen Fahrtrieb streckt sich die Gabel bis zu 2,9 m aus, da alle drei Stangen sich hier bewegen. Diese Bewegung wird als Doppeltief bezeichnet. Dabei wird die Bewegung durch die kleinen und die großen Zahnräder übertragen, so dass alle Stangen sich bewegen. Diese Funktionsweise ermöglicht eine optimale Raumnutzung und führt zu einer effizienteren Einlagerung von Traglasten [Euro2015]. In folgender Abbildung wird diese Funktionsweise dargestellt.

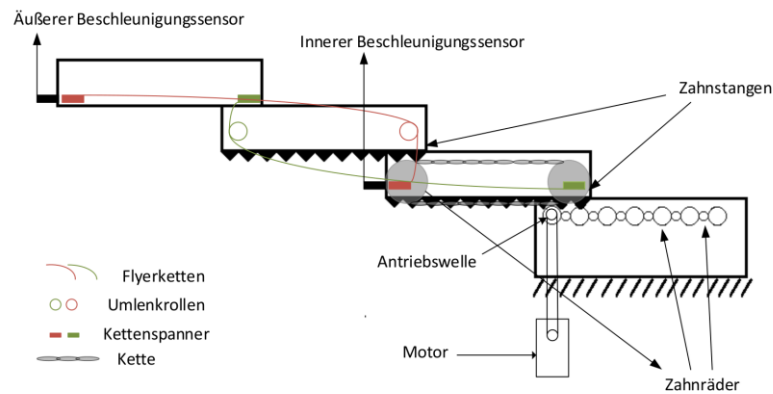


Abbildung 18: Prinzipskizze doppeltiefe Bewegung

Um ermitteln zu können welche Abweichungen bei einer Maschine entstehen, die nicht gewartet wurde, müssen verschiedene Betriebszustände betrachtet werden. Für die folgenden Zustände wurden Messdaten erhoben:

1. Normalbetrieb
 Maschine befindet sich im idealen Zustand, d.h. die zweizinkige Gabel braucht keine Instandsetzung.
2. Betrieb mit Spiel
 - a. Kettenspanner mit Feder
 Hier wird die Beschleunigung gemessen, bei lockerer Flyerkette, um eine Fahrt mit Spiel zu simulieren.
 - b. Kettenspanner ohne Feder
 In diesem Fall wird die Maschine neben einem vorhandenen Spiel auch die Feder des Kettenspanners ausgebaut. Dabei soll analysiert werden, ob dadurch mehr Spiel verursacht wird.

Gemessen wurde jeweils die Beschleunigung am dritten („äußerer Sensor“) und zweiten („innerer Sensor“) beweglichen Element (vgl. Abbildung 17)

Insgesamt wurden 8 Messungen durchgeführt, jeweils drei Messungen für die Betriebszustände 1 und 2a und zwei Messungen für den Betriebszustand 2b.

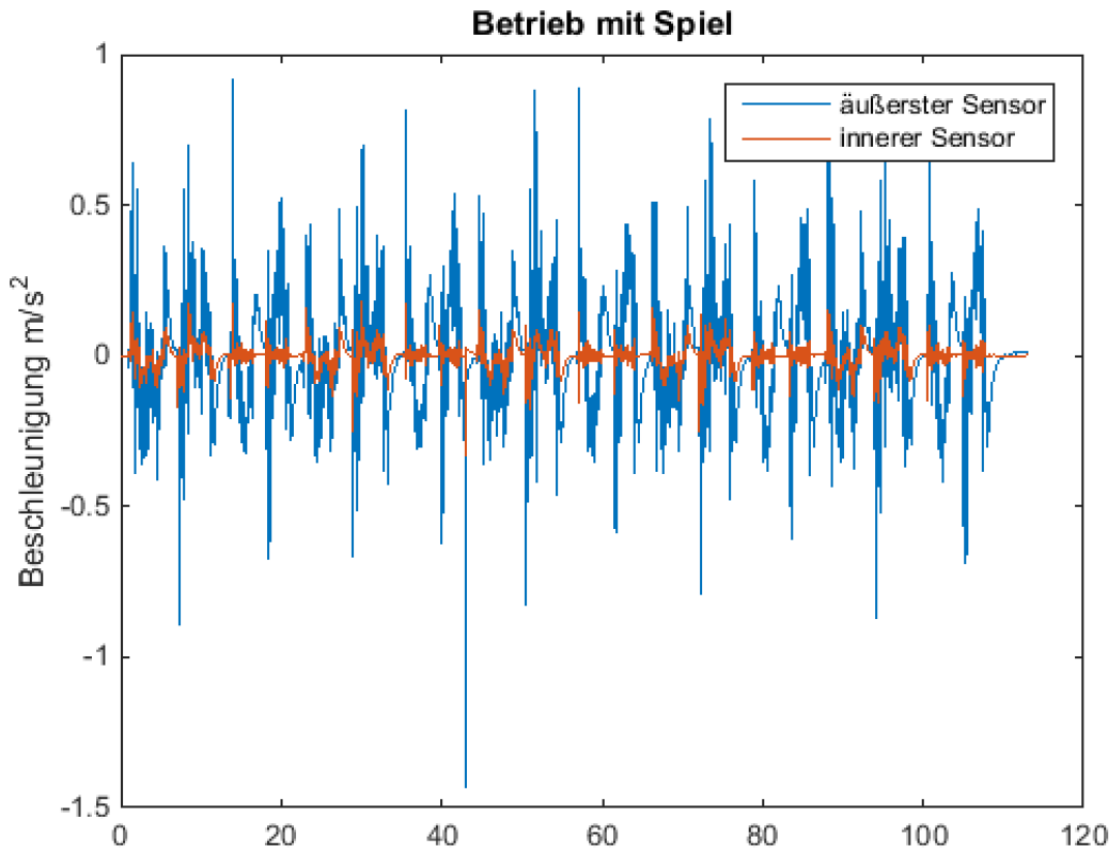


Abbildung 19: Beispiel einer Messung beim Betrieb mit Spiel

Zur Bestimmung der Abweichung in der Beschleunigung wird der arithmetische Mittelwert aller Beschleunigungen für die einzelnen Betriebszustände an den beiden Messstellen berechnet.

Die daraus entstehenden Graphen (Abbildung 23 und Abbildung 24) zeigen, dass die Mittelwerte beim Normalbetrieb größer sind als die Mittelwerte bei einem Betrieb mit Spiel.

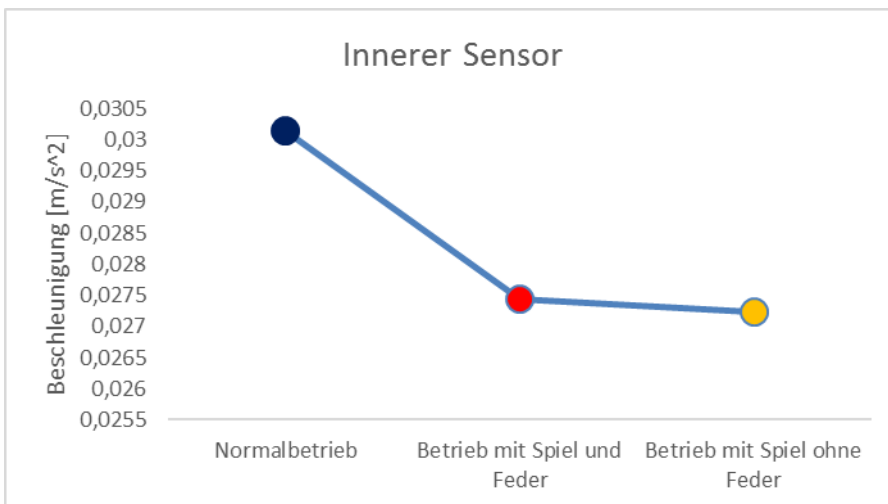


Abbildung 20: Mittelwert der Beschleunigung jedes Zustandes (Innerer Sensor)

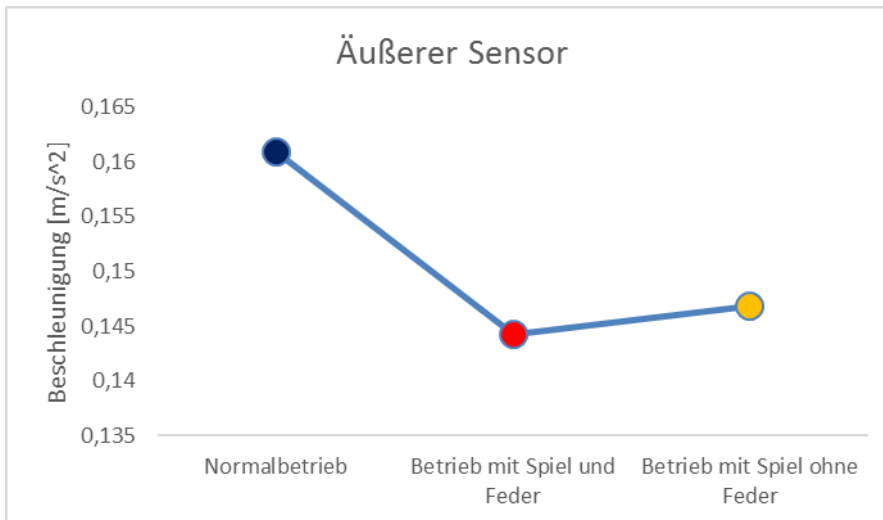


Abbildung 21: Mittelwert der Beschleunigung jedes Zustandes (Äußerer Sensor)

Die Ergebnisse aus der Mittelwertuntersuchung sind vielversprechend. Es kann beobachtet werden, dass in jedem Fall der Mittelwert der Beschleunigung beim optimalen Betrieb der Palettenteleskopgabel immer größer als die Mittelwerte bei einem Betrieb mit Spiel ist. Außerdem kann ein Unterschied zwischen den beiden Zuständen mit Spiel beobachtet werden. Der äußere Sensor zeigt, dass der Betrieb mit Spiel und Feder durch die kleinste durchschnittliche Beschleunigung (siehe Abbildung 24) gekennzeichnet ist. Andererseits deuten die Daten des inneren Sensors (siehe Abbildung 23), daraufhin, dass der Betrieb mit Spiel ohne Feder die kleinste durchschnittliche Beschleunigung aufweist. In diesem Fall ist der Unterschied zwischen den Beschleunigungen beim vorhandenen Spiel sehr klein. In den folgenden Tabellen sind die Mittelwerte der Beschleunigung dargestellt.

	1 Normalbetrieb	2a Betrieb mit Spiel und Feder	2b Betrieb mit Spiel ohne Feder
Erste Messung	0,1628	0,1425	0,1484
Zweite Messung	0,1589	0,1461	0,1453
Dritte Messung	0,1619	-	0,1442
Gesamtmittelwert	0,1612	0,1443	0,1460

Tabelle 3: Mittelwerte der Beschleunigung [m/s²] (Äußerer Sensor)

	1 Normalbetrieb	2a Betrieb mit Spiel und Feder	2b Betrieb mit Spiel ohne Feder
Erste Messung	0,0302	0,0276	0,0276
Zweite Messung	0,0301	0,0273	0,0269
Dritte Messung	0,0295	-	0,0261
Gesamtmittelwert	0,0301	0,0274	0,0269

Tabelle 4: Mittelwerte der Beschleunigung [m/s²] (Innerer Sensor)

Mit den dargestellten Ergebnissen lässt sich nun der Unterschied zwischen den verschiedenen Betrieben der Maschine erkennen. In den Fällen „Spiel mit Feder“ und „Spiel ohne Feder“ wurde eine Verringerung der Beschleunigung festgestellt. Außerdem zeigt die Häufigkeitsverteilung, dass bei beiden Betriebsarten mit vorhandenem Spiel eine Erhöhung an Nullstellen zu erkennen ist. Die Auswertung der Daten des äußeren Sensors zeigt einen wesentlicheren Unterschied zwischen dem Normalbetrieb und dem Betrieb „Spiel mit Feder“, als beim direkten

Vergleich des Normalbetriebes mit dem Betrieb „Spiel ohne Feder“. Daraus folgt, dass durch den Ausbau der Feder weniger Spiel in der Anlage verursacht wird. Bei der Auswertung der Daten des inneren Sensors trifft die Schlussfolgerung nicht zu. Wie in Abbildung 23 dargestellt wird, ist der Mittelwert der Beschleunigung des Betriebes „Spiel ohne Feder“ kleiner als der Mittelwert des Betriebes „Spiel mit Feder“, sodass im Fall der Mittelwertuntersuchung der Unterschied zwischen dem Normalbetrieb und dem Betrieb „Spiel ohne Feder“ am größten ist. Um eine klare Trennung zwischen den spielbehafteten Varianten zu ermöglichen, ist es wichtig für zukünftige Messungen, dass entweder die Anzahl an durgeführten Messungen erhöht wird oder die Frequenz der gesammelten Daten erhöht wird. Dadurch kann der Vergleich der Varianten genauer werden.

Anhand der Ergebnisse beider Untersuchungen können der Mittelwert der gemessenen Beschleunigung und die Anzahl an Nullstellen des graphischen Verlaufes (Beschleunigung) als potentielle Kenngrößen für die Entwicklung eines Zustandsüberwachungssystems bestimmt werden.

4.3 Analyse eines Zweiträgerlaufkrans

Es wurden Praxisversuche und Messungen an einem Zweiträgerlaufkran der Firma KULI Hebezeuge – Helmut Kempkes GmbH durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Praxisversuche und Messungen bringen neue Erkenntnisse über die tatsächlich auftretenden Belastungen während des Betriebs und zeigen Ansätze auf, die für die Überwachung einzelner Baugruppen und Systemzustände vielversprechend sind.

4.3.1 Erste Messdurchführung

4.3.1.1 Messobjekt und Messeinrichtung

Als zu instrumentierendes Messobjekt wurde ein im Besitz der Firma Kuli Hebezeuge stehender, Zweiträgerkran vom Typ ZK 3.2 t * 18,95 m ausgewählt. Das Baujahr des Krans ist 1978 und hat die Nr. 815781101. Der Kran ist in Abbildung 22 gezeigt.



Abbildung 22: Messobjekt Zweiträgerkran ZK 3.2 t * 18,95 m

Für die Versuchsdurchführung wurde der in einer Montagehalle betriebene Kran mit Messtechnik vom Fraunhofer LBF ausgestattet. Mit Ausnahme eines Laptops, der über ein LAN-Kabel mit der Datenerfassungseinheit verbunden war, wurde die gesamte Messeinrichtung in

dem sich bewegenden System ‚Zweit rgerkran‘ installiert. Es wurde ein zentrales Messsystem zur Datenerfassung an dem Kran angebaut. Von diesem zentralen Punkt wurden mit Hilfe von Mess- und Versorgungsleitungen unterschiedliche und über den Kran verteilte Sensoren angeschlossen. Zur Erfassung der Hublast während der nach der Instrumentierung durchgeführten Betriebsmessungen wurde ein Hublastsensor an der Katze angebracht. Die Position der Katze wurde mit Hilfe eines Seilzugsensors gemessen. Zur Messung der Hubhöhe wurde ein Seilzugsensor an der Katze angebracht. Der Kran wird durch je einen Antriebsmotor je Kranseite angetrieben. Der Antrieb ist in zwei Geschwindigkeitsstufen für langsame und schnelle Fahrt fahrbar. Zur Messung der elektrischen zugeführten Leistung bei schneller Fahrt wurde je Motor eine Strommesszange an je einer Phase angebaut. Zur Messung der Spurf hrungskr fte an 4 Seitenf hrungsrollen wurden auf der rechten Kranseite die vorhandenen Führungsrollen durch Führungsrollen mit integrierten Scherkraftsensoren ersetzt. Diese Scherkraftsensoren wurden von der Firma Kuli zur Verfügung gestellt und vom Fraunhofer im Voraus unter Laborbedingungen kalibriert. Zur Erfassung der Geschwindigkeit der nicht angetriebenen Laufräder wurde sowohl auf der rechten als auch der linken Kranseite je ein Drehgeber verbaut. Zusätzlich zu den Drehgebern wurde auf jedem nicht angetriebenen Kopf je ein 3D-Beschleunigungssensor instrumentiert. Im Rahmen der Messung wurde auch das Schwingungsverhalten der Katzträger während des Betriebs gemessen. Von Interesse war hier das globale Schwingungsbild der Katzträger in Abhängigkeit der Position der Laufkatze und der Seilkraft. Außerdem wurde der Einfluss eines Schadens an einem Katzträger auf die modalen Schwingungsparameter untersucht. Für die Erfassung wurden am hinteren Katzträger sieben 3D-Beschleunigungssensoren und am vorderen Katzträger drei 3D-Beschleunigungssensoren über die Träger verteilt instrumentiert. Die Sensoren wurden auf den Schottblechen positioniert. Zur Messung der Oberflächendehnung an kritischen Belastungspunkten wurden diverse Dehnungsmessstreifen (DMS) an beiden Katzträgern sowohl in der Mitte als auch an den Verbindungen zu dem Kopfträger angebracht. Zwei DMS wurden in der Mitte der Katzträger an die Untergurte geklebt.

4.3.1.2 Versuchsdurchführung und Analyse

Nach der Anbringung der notwendigen Messtechnik und Tests zur Kalibrierung und korrekten Funktionsweise des Messsystems konnten schließlich mehrtägige Versuche am Kran durchgeführt und Daten gesammelt werden. Die Versuche wurden anhand definierter Betriebszustände und Betriebsszenarien durchgeführt. Es wurden unterschiedliche statische Hublasten festgelegt, mit denen der Kran definiert in unterschiedlichen Betriebszuständen belastet wurde: Ohne Last, Hublast von ca. 900 kg und Hublast von ca. 2050 kg (siehe Abbildung 23). Außerdem wurden drei Positionen der Laufkatze festgelegt: Katzposition auf der linken Seite, in der Mitte und auf der rechten Seite des Krans.

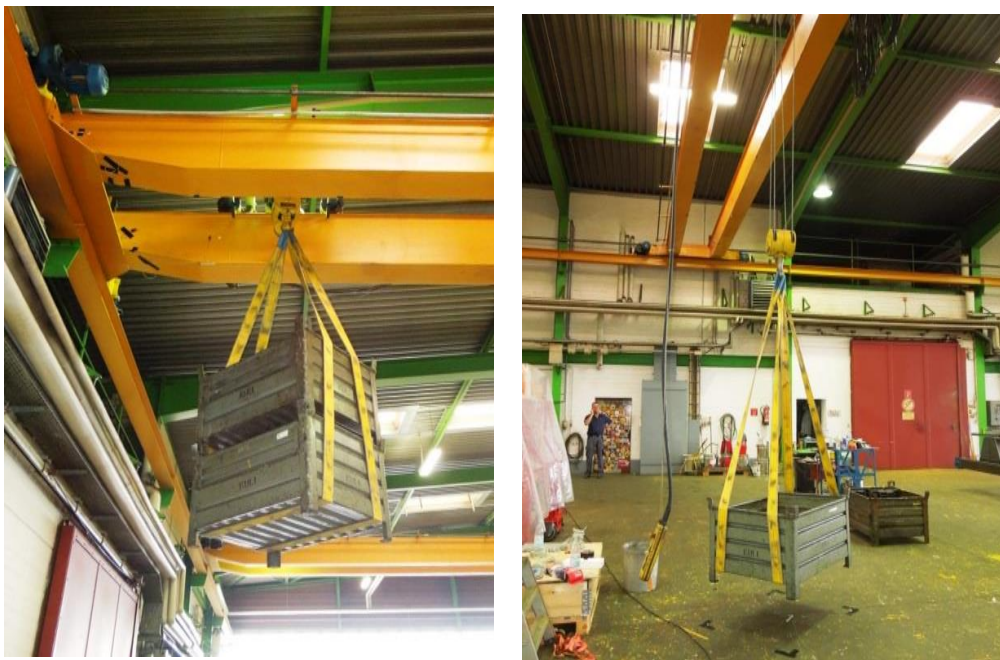


Abbildung 23: Es wurden unterschiedliche statische Hublasten festgelegt: Ohne Last, Hublast von ca. 900 kg und Hublast von ca. 2050 kg. Für die Katzpositionen wurden drei Positionen festgelegt: Katzposition auf der linken Seite, in der Mitte und auf der rechten Seite des Krans.

Neben den definierten Positionen der Katze wurden zwei Positionen des Krans auf den Laufschienen festgelegt. Bei der ersten Position befindet sich der Kran zwischen zwei Stützen, mit denen die Laufschienen an der Gebäudewand befestigt sind. Bei der zweiten Position wurde der Kran direkt auf einer Stütze positioniert. Ergänzend zu den Versuchen mit gleichbleibender Kranposition wurde der Kran während unterschiedlicher Fahrscenarien in der Halle verfahren.

Betriebs-, Hublast- und Notstoppszenarien

Das Verhalten des Zweitträgerlaufkrans konnte bei verschiedenen Betriebs-, Hublast- und Notstoppszenarien messtechnisch erfasst werden. Die Analyse der Daten brachte neue Erkenntnisse zu den tatsächlich auftretenden Lasten während der untersuchten Szenarien.

Kranfahrten bei unterschiedlichen Lastszenarien

Des Weiteren wurden verschiedene Kranfahrten bei variierenden Betriebszuständen (Katzposition, Hublast, etc.) bei unterschiedlichen Lastszenarien messtechnisch erfasst. Bei den Kranfahrten wurden die tatsächlichen Spurführungskräfte gemessen, die an den Spurführungsrollen auftreten.

Variation des Führungsspiels der Führungsrollen

Der Einfluss des Führungsspiels der Spurführungsrollen wurde auf der rechten Kranseite untersucht. Hierzu wurde der Abstand zwischen Rolle und Fahrschiene (siehe Abbildung) an den vier Spurführungsrollen auf der rechten Kranseite in mehreren Schritten zwischen 0 bis 5 mm verstellt und die Auswirkungen auf die verschiedenen betrachteten Systemteile gemessen.



Abbildung 24: Variation des Führungsspiels der Führungsrollen auf der rechten Seite des Krans.

Schädigung des Untergurts eines Katzträgers und Einfluss auf die statische Dehnung

Der Einfluss einer Schädigung des Untergurts auf die Oberflächendehnung eines Katzträgers wurde untersucht. Hierzu wurden zwei Schäden in der Mitte von einem der beiden Katzträger und unmittelbar auf Höhe eines Dehnungsmessstreifens eingebracht. Während des Versuchs befand sich die Katze des Krans in der Mittelstellung und der Kran war mit einer Hublast von 2050 Kg belastet. Die Last wurde über Bänder angeschlagen. Für den ersten Schaden wurde der Untergurt auf der Außenseite des Krans angeschnitten. Der dadurch entstandene Riss hatte auf der Unterseite eine eingeschnittene Tiefe von 38,5 mm, auf der Oberseite eine eingeschnittene Tiefe von 33,5 mm, und war 2 mm breit. Im geschädigten Zustand wurden definierte Lastfahrten durchgeführt und das Kranverhalten über die Sensorik gemessen. Anschließend wurde ein zweiter Schaden auf der Innenseite des Untergurts eingebracht. Der dadurch entstandene zweite Riss hatte auf der Unterseite eine eingeschnittene Tiefe von 36 mm, auf der Oberseite eine eingeschnittene Tiefe von 32 mm, und war 2 mm breit (Abbildung 25).



Abbildung 25: Einbringen der beiden Schäden am Untergurt in der Mitte eines Katzträgers. Die Schädigung 1 befindet sich auf der Außenseite des Krans. Die Schädigung 2 auf der Innenseite.

Die Auswertungen an den während der Schädigung aufgezeichneten Oberflächendehnungen im Ruhezustand zeigen eine Änderung der statischen Dehnungen an einigen der Sensorpositionen (Abbildung 26).

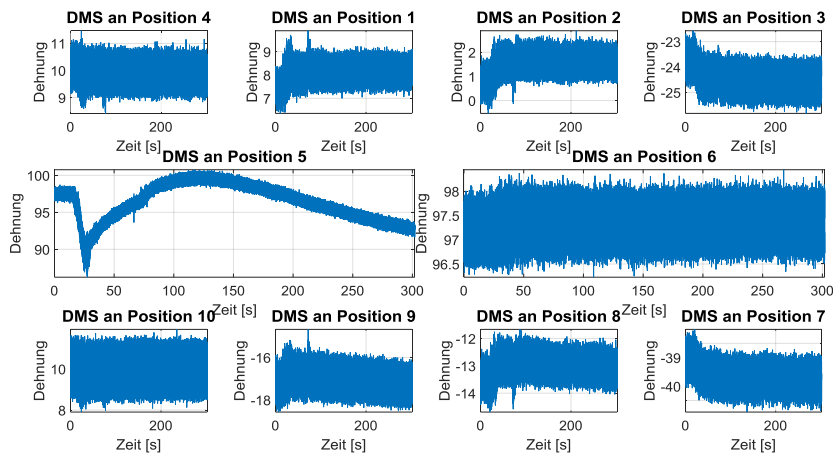


Abbildung 26: Zeitlicher Verlauf der Oberflächendehnung an den verschiedenen Messpositionen der Dehnungsmessstreifen während des zweiten Schädigungsvorgangs.

Einfluss der Schädigung des Untergurts auf das Schwingungsverhalten der Katzträger

Der Einfluss der Schädigung auf das globale Schwingungsverhalten der Katzträger wurde mit Hilfe einer Modalanalyse untersucht. Es gibt keine signifikanten Änderungen in den Frequenzen und Dämpfungen die auf die Schädigungen schließen lassen. Die einzelnen Betriebszustände nach Schaden 1 und nach Schaden 2 wurden während der Messkampagne nur einmal gemessen. Da die Abweichungen zwischen den geschädigten und dem unbeschädigten Zustand klein sind, und die Modalparameter der Stichproben sehr nah beieinander liegen, kann hier keine eindeutige Aussage getroffen werden, ob die Schädigungen mit Hilfe der Modalparameter zu beobachten sind.

4.3.2 Zweite Messdurchführung zur piezo-basierten Überwachung von Schraubverbindungen

4.3.2.1 Verwendete Messmethoden

Breitbandige Ultraschallerregung (BU)

Eine sehr verbreitete und einfache Strukturüberwachungsmethode ist die BU. Diese Methode charakterisiert sich durch einfache Umsetzung und Handhabung. Hierbei werden mechanische Schwingungen als Anregung einer ersten Schraube S1 mittels eines piezoelektrischen Flächenwandlers (Aktor) eingeleitet und mithilfe eines zweiten piezoelektrischen Flächenwandlers (Sensor) die Strukturantworten an einer zweiten Schraube S2 aufgenommen. Als Anregungssignal wurde ein stochastisches Rauschen verwendet. Abbildung 27 zeigt den prinzipiellen Aufbau der BU-Methode. Zwischen Schraubenkopf je Schraube und Struktur wurde eine Hülse eingesetzt, an dem ein jeweils ein piezoelektrischer Wandler angebracht war. Ausgewertet wird die Strecke zwischen den beiden Elementen durch Bildung der Übertragungsfunktion. Diese gibt Aufschluss, wie sich das gesendete Signal zu dem empfangenen Signal durch Filterung mit der Strecke verändert.

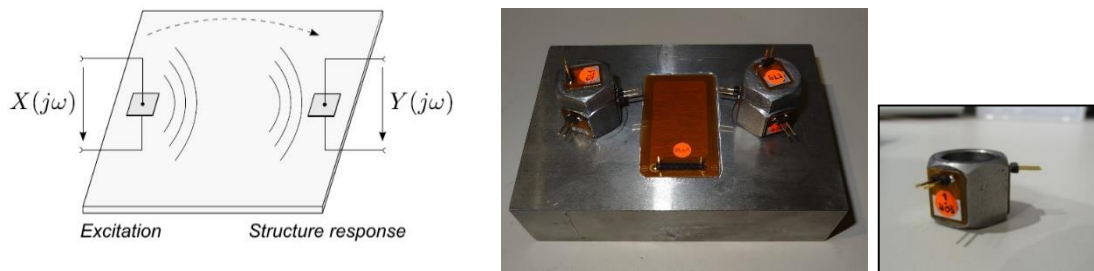


Abbildung 27: Funktionsprinzip der BU-Methode

Die zu untersuchende Übertragungsfunktion lässt sich ausdrücken als das Verhältnis von Ausgangsspektrum des empfangenen Signals zum Eingangsspektrum des eingeleiteten Signals:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}$$

Elektromechanische Impedanz (EMI)

Die EMI ist eine Strukturüberwachungsmethode, die ähnlich wie die BU-Methode funktioniert. Auch hier werden mechanische Schwingungen mit beliebiger Form in die Schraube eingeleitet. Abweichend von der BU-Methode wurde hier nur ein piezoelektrischer Flächenwandler benötigt, der an der zu überwachenden Schraube durch Ergänzung einer Hülse appliziert war, siehe Abbildung 28.

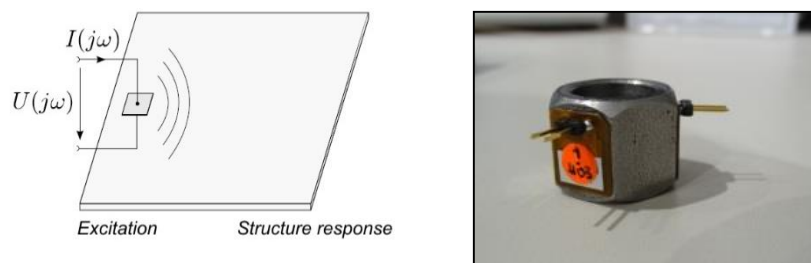


Abbildung 28: Funktionsprinzip der EMI-Methode

Untersucht wurde hier die elektrische Impedanz des piezoelektrischen Wandlers, die sich aus dem Verhältnis der komplexen Größen Eingangsspannung zu Eingangsstrom bildet.

$$Z(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{I(j\omega)}$$

Bestimmt wurde die Impedanz durch die Kapazität des Piezowandlers sowie den mechanischen Struktureigenschaften der Schraube, die unter anderem durch das Drehmoment der Vorspannung verändert werden. Hierbei spiegeln sich Änderungen direkt in der Amplitude beziehungsweise in dem Phasenwinkel der komplexen Impedanz.

4.3.2.2 Messeinrichtung

Die Versuche wurden ebenfalls an dem bereits in der ersten Messdurchführung verwendeten Zweiträger-Laufkran durchgeführt. Für die Versuche wurden die Schraubenverbindungen zwischen den beiden Katzträgern auf der rechten Kranseite betrachtet, die für die Verbindung zwischen Kopf und Katzträgern standardmäßig am Kran montiert sind. Ziel war es, mit

Hilfe der Messmethoden Fehlerzustände wie lockere bzw. geschädigte Schrauben zuverlässig zu messen. Zur Messung der EMI wurde ein Impedanz-Analysator in einem Frequenzband von 0 bis 300 kHz und einem Chirp mit einer Amplitude von 1 Vpp betrieben. Die BU wurde mit einem Frequenz-Analysator gemessen.

4.3.2.3 Versuchsdurchführung und Analyse

Auswirkung einer Änderung des Anzugsmoments von Schraube S2 auf die EMI von S2

An der Schraube S2 wurde mit Hilfe der EMI die Änderung des Anzugsmoments untersucht. Hierzu wurde die EMI an der Hülse von Schraube S2 in einem Frequenzbereich von 20 – 120 kHz gemessen und das Anzugsmoment der Schraube S2 schrittweise von 200 Nm auf 150 Nm und 50 Nm verringert (Abbildung 29).

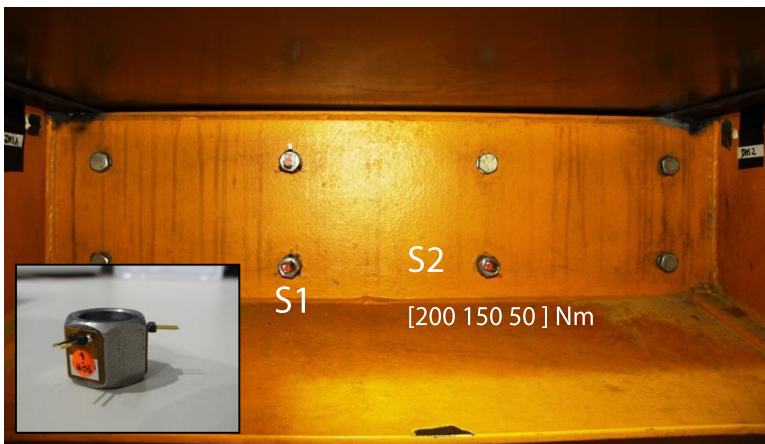


Abbildung 29: Positionen und Bezeichnungen der untersuchten Schrauben am Laufkran

Das stetig sinkende Anzugsmoment, welches zu einer Verschlechterung der Verbindung zwischen Kopf- und Katzträger führt, konnte anhand einer stetigen Verschiebung dominanter Frequenzpeaks in der EMI reproduzierbar und eindeutig gemessen werden (Abbildung 30).

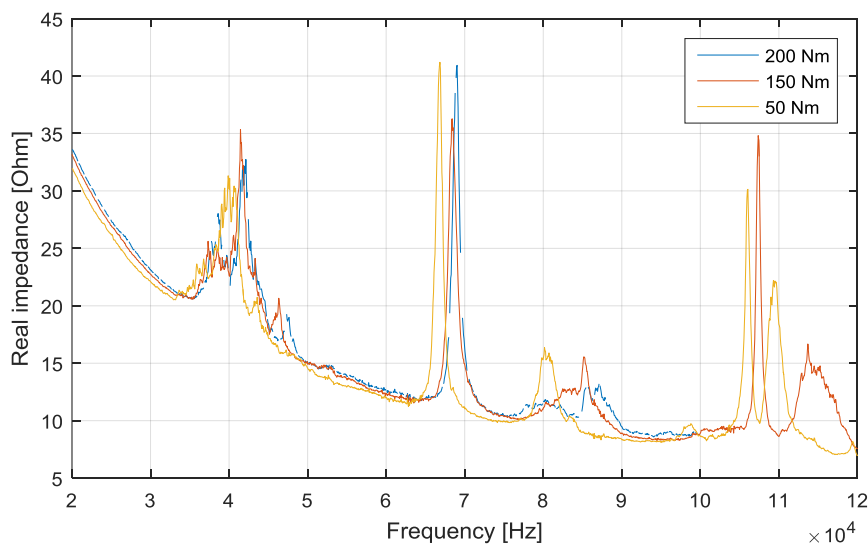


Abbildung 30: Gemessene EMI der Schraube S2 bei Änderung des Anzugsmoments der Schraube S2

Auswirkung einer Änderung des Anzugsmoments von Schraube S1 auf die EMI von S2

Eine Änderung des Anzugsmoments einer zur Schraube S2 benachbarten Schraube S1, konnte durch Messung der EMI an Schraube S2 nicht detektiert werden (Abbildung 31).

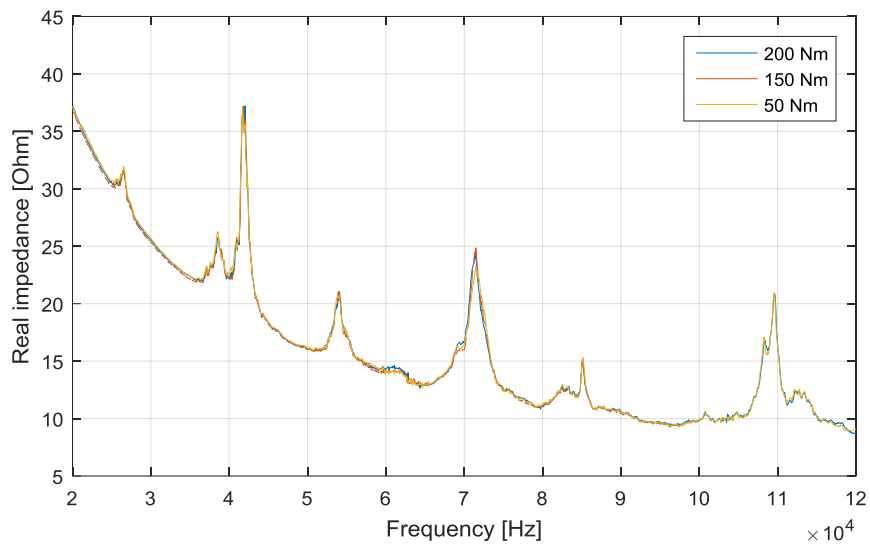


Abbildung 31: Gemessene EMI der Schraube S2 bei Änderung des Anzugsmoments der Schraube S1

A überwunden ist, Kräfte übertragen werden. Das Systemverhalten konnte durch eine nichtlineare Steifigkeit mit Totbereich modelliert werden. Es hat sich gezeigt, dass sich eine Änderung des Spiels A mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Bewegung quer zur Fahrriichtung, beobachten lässt.

5.1.2 Simulation und Abgleich des Modells

Für die Simulation des Führungsspiels quer zur Bewegungsrichtung wurde ein Simulationsmodell in Matlab/Simulink vom Fraunhofer LBF aufgebaut. Sowohl das korrekte, als auch das fehlerhafte Systemverhalten wurde mit diesem Modell beschrieben und anhand der Betriebsdaten verifiziert.

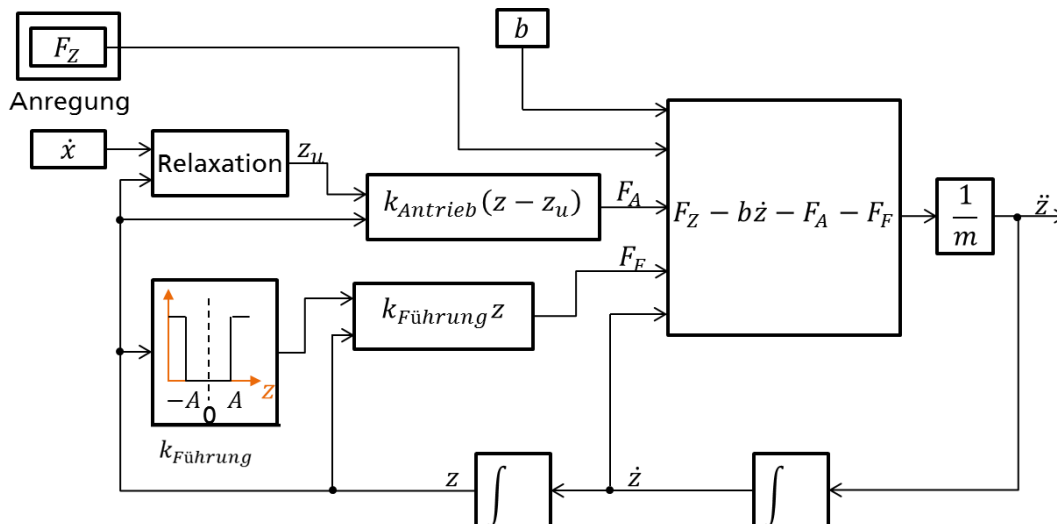


Abbildung 33: Simulationsmodell des Führungsspiels der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene an einem RBG

5.1.3 Algorithmus zur Erkennung von Spiel der Führungsrollen

Vom Fraunhofer LBF wurde ein in einem energieautarken Sensor implementierbare signalverarbeitende Algorithmus zur Detektion von Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene entwickelt. Weiterführende Ergebnisse zu dieser und anderen Methoden sind in [Bech2014a] und [Bech2014b] veröffentlicht.

Der Algorithmus beruht auf der Berechnung einer Wahrscheinlichkeitsdichte aus den am Fahrwerkskopf des RBG auftretenden Beschleunigungen orthogonal zur Fahrriichtung für den Fall, dass sich das RBG mit maximaler Fahrgeschwindigkeit bewegt. Das Prinzip ist in Abbildung 34 schematisch dargestellt.

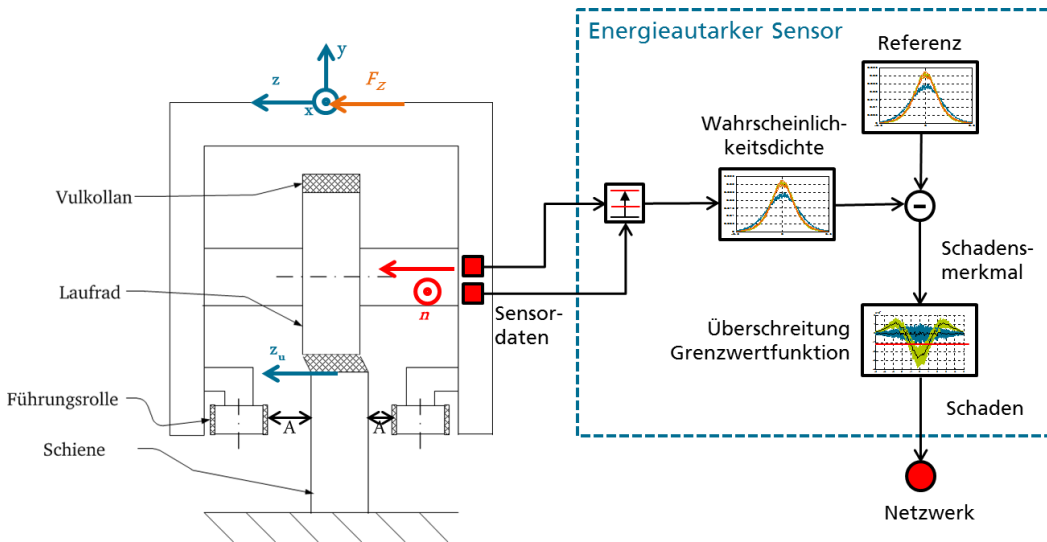


Abbildung 34: Detektion von Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene mit sensornaher Berechnung eines Schadensmerkmals in einem energieautarken Sensor

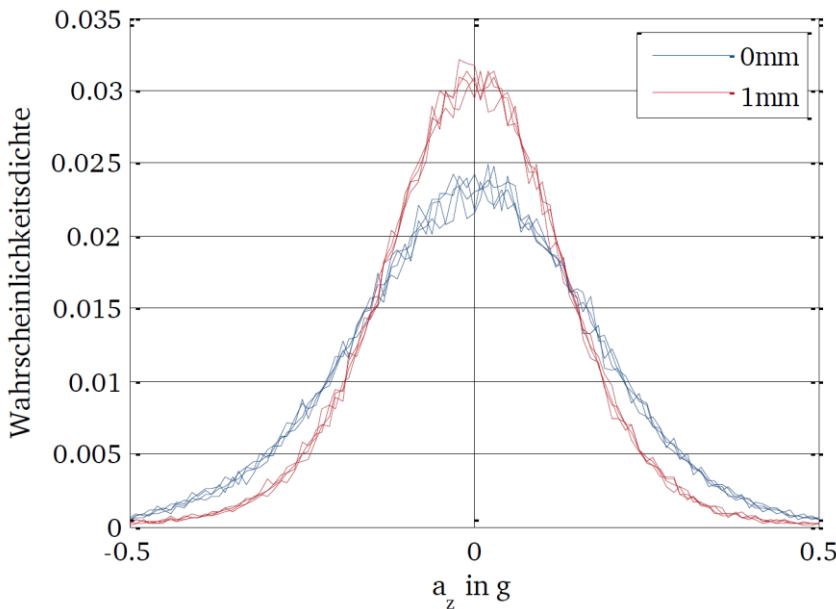


Abbildung 35: Die Wahrscheinlichkeitsdichte der horizontalen Beschleunigungsamplituden des Fahrwerkskopfes orthogonal zur Fahrschiene ändert sich in Abhängigkeit von der Größe des Führungsspiels.

Die Dynamik zwischen dem RBG und der Schiene wird wesentlich durch die Häufigkeit des Kontakts zwischen den Führungsrollen und der Schiene während des Betriebs beeinflusst. Vergrößert sich das Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene gegenüber dem Ausgangszustand, der sich durch eine Referenz-Wahrscheinlichkeitsdichte charakterisieren lässt, nimmt die über die Führungsrollen in den Antriebskopf übertragene Kraftanregung ab. Aus der Differenz der Wahrscheinlichkeitsdichten ließ sich ein Schadensmerkmal ableiten. In Abbildung 35 ist die Änderung der Wahrscheinlichkeitsdichte der Beschleunigungsamplituden bei einer Änderung des Führungsspiels A von 0 mm auf 1 mm dargestellt. Zur Berechnung wurden die während des Betriebs gemessenen Beschleunigungen bei maximaler Fahrgeschwindigkeit des RBG von ca. 4 m/s über einen Zeitraum von jeweils 40 s verwendet.

5.2 Modellierung einer Teleskopgabel

Ausgehend von den in Kapitel 4.2 erhobenen Messdaten wird die Modellierung des Systems „Teleskopgabel“ durchgeführt.

5.2.1 Physikalisches Modell

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben wurde, besteht die Maschine aus drei Stangen, die durch Ketten verbunden sind. Diese drei Elemente werden zur Vereinfachung als diskrete Massen dargestellt. Da die Schwingung dieser Komponenten nicht ewig andauert, sondern zum Stillstand kommt, setzt dies das Vorhandensein eines Dämpfers voraus [Shig1967].

Die Maschine führt zwei Bewegungen aus. Auf der einen Seite erreicht die Maschine eine doppeltiefe Position und auf der anderen Seite eine einfachtiefe Position. Also werden zwei Modelle erstellt, um beide Bewegungen getrennt bzw. unabhängig voneinander betrachten zu können.

Die Teleskopgabel kann somit als Zweimassenschwinger für die einfachtiefe Position und als Dreimassenschwinger für die doppeltiefe Position dargestellt werden.

Die Massen sind miteinander und mit der Umgebung durch Dämpfer und Feder verbunden. So kann die Schwingung, die durch die Verbindungselemente der Maschine verursacht wird, nachgebildet werden. Beide Modelle werden durch eine Kraft $F(t)$ aus ihrer Ruhelage ausgelenkt. Diese Kraft greift angenommen im letzten Glied an, da diese Masse die höchste Beschleunigung aufweist, wie die Messungen in Abschnitt 4.2 zeigen. Also ist die Wirkung der Kraft höher. Bei dem Modell des einfachtiefen Betriebes handelt es sich um ein System mit zwei Freiheitsgraden, da es aus zwei in x -Richtung bewegenden Massen besteht. Masse 3 ist das dritte Element der Teleskopgabel, welche die Ladung trägt. Masse 2 stellt das zweite bewegliche Glied dar (vgl. Abbildung 36).

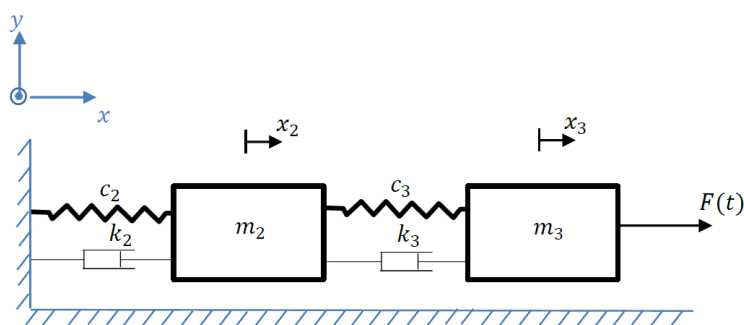


Abbildung 36: Modellierung der einfachtiefen Bewegung als Zweimassenschwinger

Analog zum Modell des einfachtiefen Betriebes erfolgt die Modellierung der doppeltiefen Bewegung. Masse 1 ist das Glied, das durch die Zahnräder betrieben wird. Masse 2 ist das

zweite Element der Teleskopgabel und Masse 3 das dritte Element der Teleskopgabel (vgl. Abbildung 37)

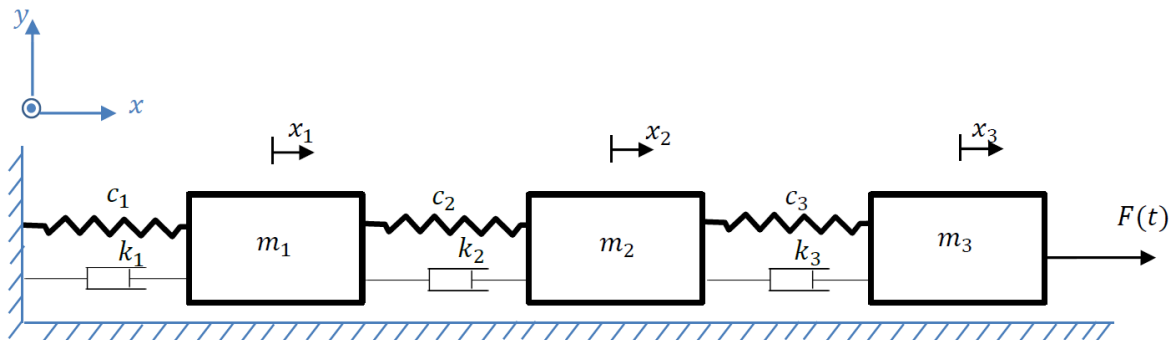


Abbildung 37: Modellierung der doppelte tiefen Bewegung als Dreimassenschwinger

5.2.2 Mathematisches Modell

Ausgehend von diesem physikalischen Modell wird das mathematische Modell in Form von Bewegungsgleichungen erstellt. Dazu wird zuerst ein Freikörperbild für jedes Element des Systems erstellt. Dabei werden die Kräfte, die auf den Körper einwirken, aufgezeichnet.

Das System wird als idealisiert betrachtet. Daher kann die Reibung zwischen Führungen und Stangen vernachlässigt werden. Die Bewegungsgleichungen der Körper werden aus den Gleichungen aufgestellt, die das dynamische Gleichgewicht beschreiben [Shig1967].

Damit ergeben sich für das einfachtiefe Modell die folgenden Bewegungsgleichungen:

$$\begin{aligned} -m_2 \ddot{x}_2 - k_2 \dot{x}_2 - c_2 x_2 - k_3 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - c_3 (x_2 - x_3) &= 0 \\ -m_3 \ddot{x}_3 - k_3 \dot{x}_3 - c_3 x_3 + k_3 \dot{x}_2 + c_3 x_2 + F(t) &= 0 \end{aligned}$$

Für das doppelte tiefe Modell ergeben sich die folgenden Bewegungsgleichungen:

$$\begin{aligned} -m_1 \ddot{x}_1 - k_1 \dot{x}_1 - c_1 x_1 - k_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - c_2 (x_1 - x_2) &= 0 \\ -m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_2 (x_1 - x_2) - k_3 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - c_3 (x_2 - x_3) &= 0 \\ -m_3 \ddot{x}_3 - k_3 x_3 - c_3 x_3 + k_3 \dot{x}_2 + c_3 x_2 + F(t) &= 0 \end{aligned}$$

5.2.3 Modellierung in MATLAB® Simulink®

Ausgehend von den Bewegungsgleichungen und experimentell ermittelten Werten für die Massen, Feder- und Dämpferkonstanten wird das mathematische Modell in der Software MATLAB® Simulink® umgesetzt.

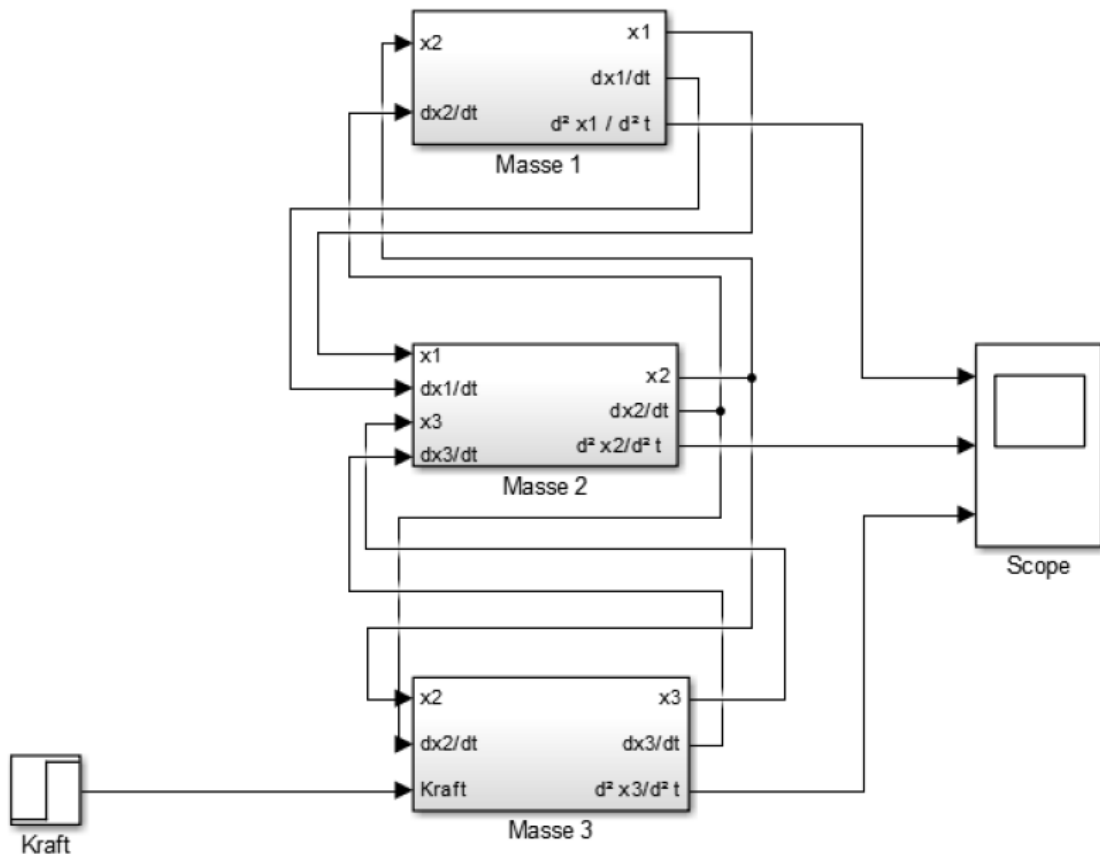


Abbildung 38: Matlab-Modell mit Ein- und Ausgangsgrößen

Hierbei werden die einzelnen Massen jeweils als Subsysteme implementiert. Als Eingangsgröße wird die auf die Masse 3 wirkende Kraft modelliert und als Ausgangsgrößen können die Beschleunigungen der Massen m_1 , m_2 und m_3 ausgegeben werden.

Die Simulationen weisen einen glatten Verlauf der Beschleunigung auf. Um die in den Messungen enthaltenen Störungen zu simulieren, wurde durch einen Signalgenerator eine Störungsfunktion addiert.

5.2.4 Validierung des Modells

Die Modellvalidierung hat die Aufgabe zu zeigen, ob ein Modell für eine spezielle Anwendung geeignet ist. Dabei werden die in den Messungen erhobenen Messdaten des realen Systems mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Erfolgt eine Übereinstimmung der Ergebnisse ist das Modell für den Anwendungszweck validiert.

Dabei ergeben sich folgende Vergleiche des inneren und äußeren Sensors:

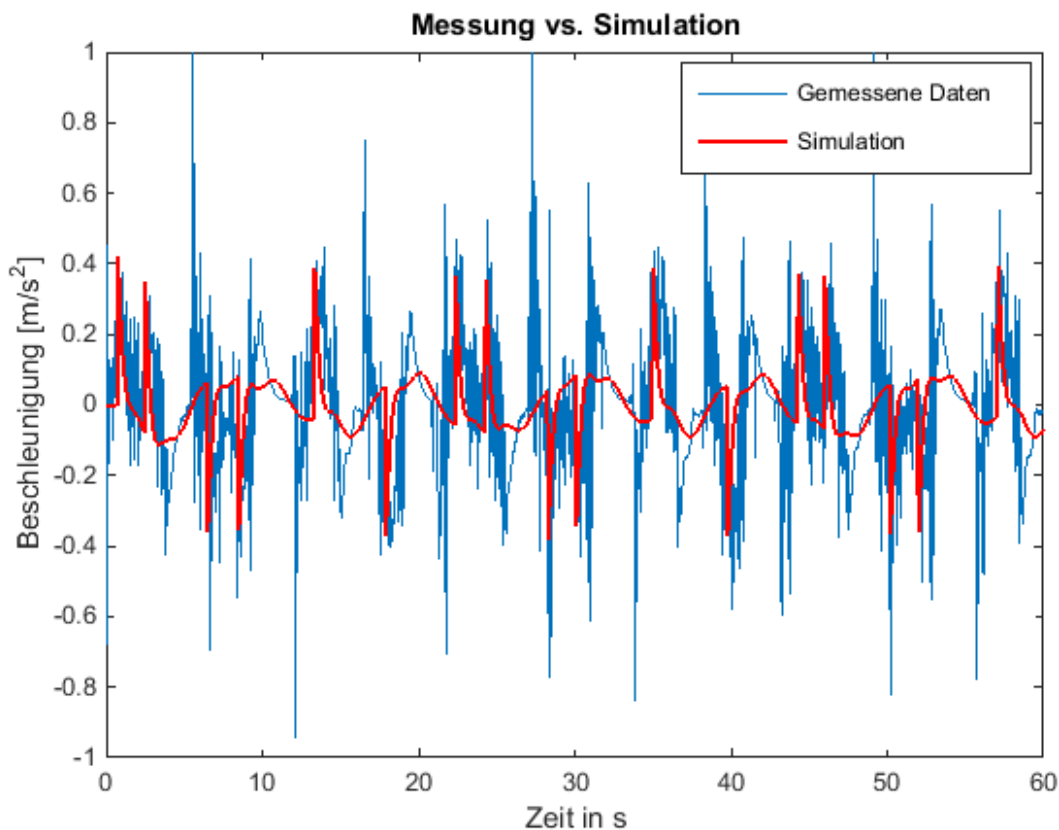


Abbildung 39: Äußerer Sensor - Vergleich zwischen Simulation und gemessenen Daten ohne Störung

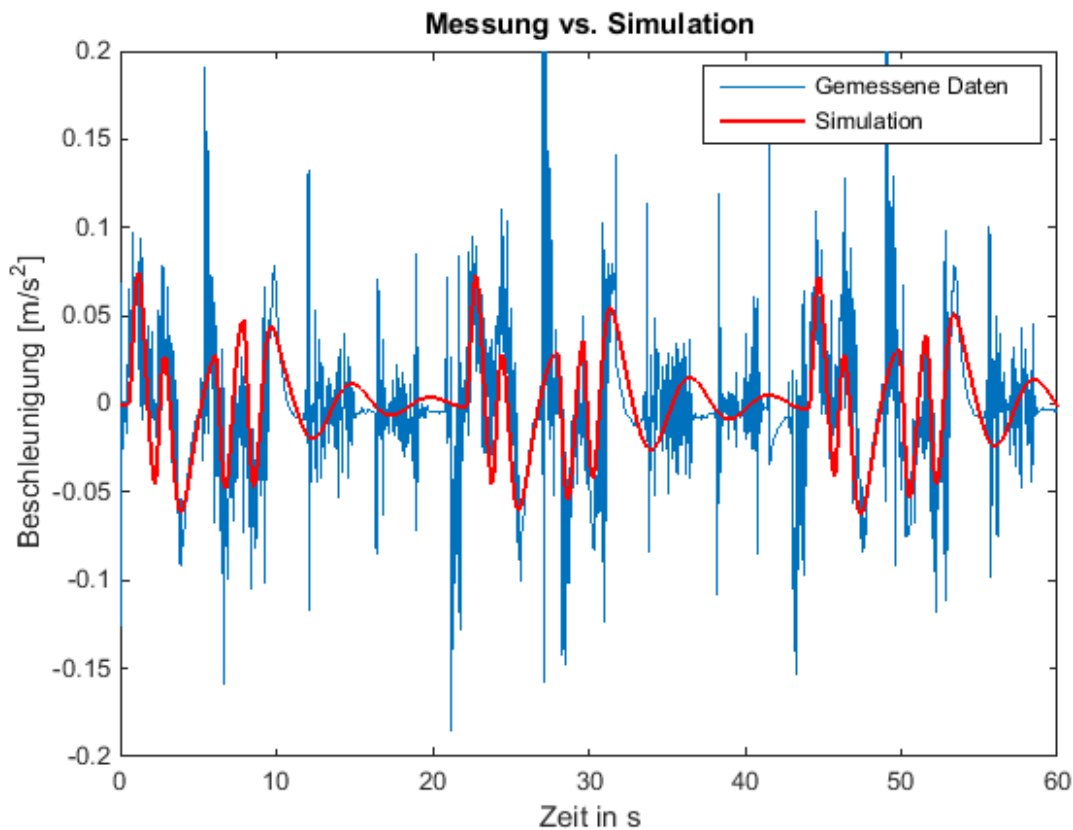


Abbildung 40: Äußerer Sensor –Vergleich zwischen Simulation und gemessenen Daten ohne Störung

Beide Verläufe sind jeweils ohne Störung simuliert und enthalten die gleiche Anzahl an Messdatenpunkte. In beiden Abbildungen ist ein ähnlicher Verlauf zu erkennen. Die charakteristischen Spitzen des Verlaufes sind in der Simulation enthalten. Als ein Beispiel kann genannt werden, dass die zwei Spitzen bei der doppel tiefen Fahrt und die eine Spitze bei der einfachtiefen Fahrt einen ähnlichen Verlauf wie die gemessenen Daten haben. Trotzdem ist die Abweichung zwischen den Verläufen erkennbar. Die Abweichung zwischen Simulation und Messung begründet sich aus der im Modell vernachlässigten Störung.

Werden Störungen, z.B. Spiel in den Teleskopgabeln, berücksichtigt, so ergeben sich folgende Überlagerungen:

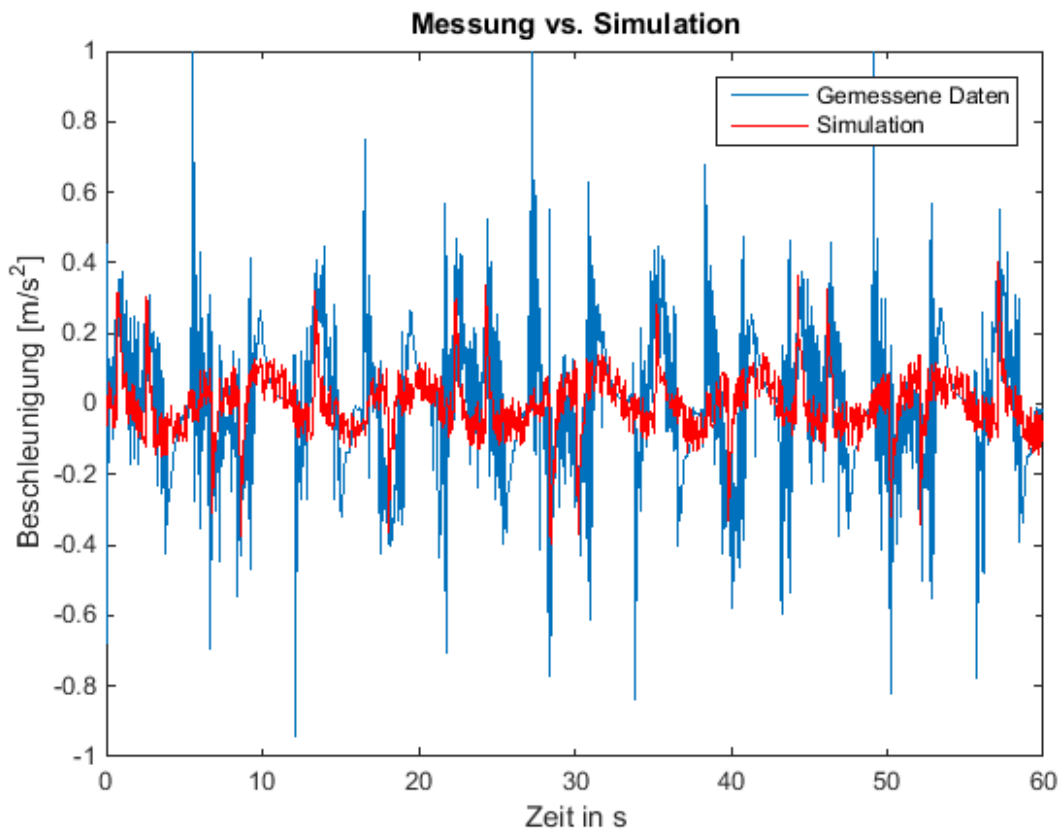


Abbildung 41: Äußerer Sensor – Vergleich zwischen Simulation und gemessenen Daten mit Störung

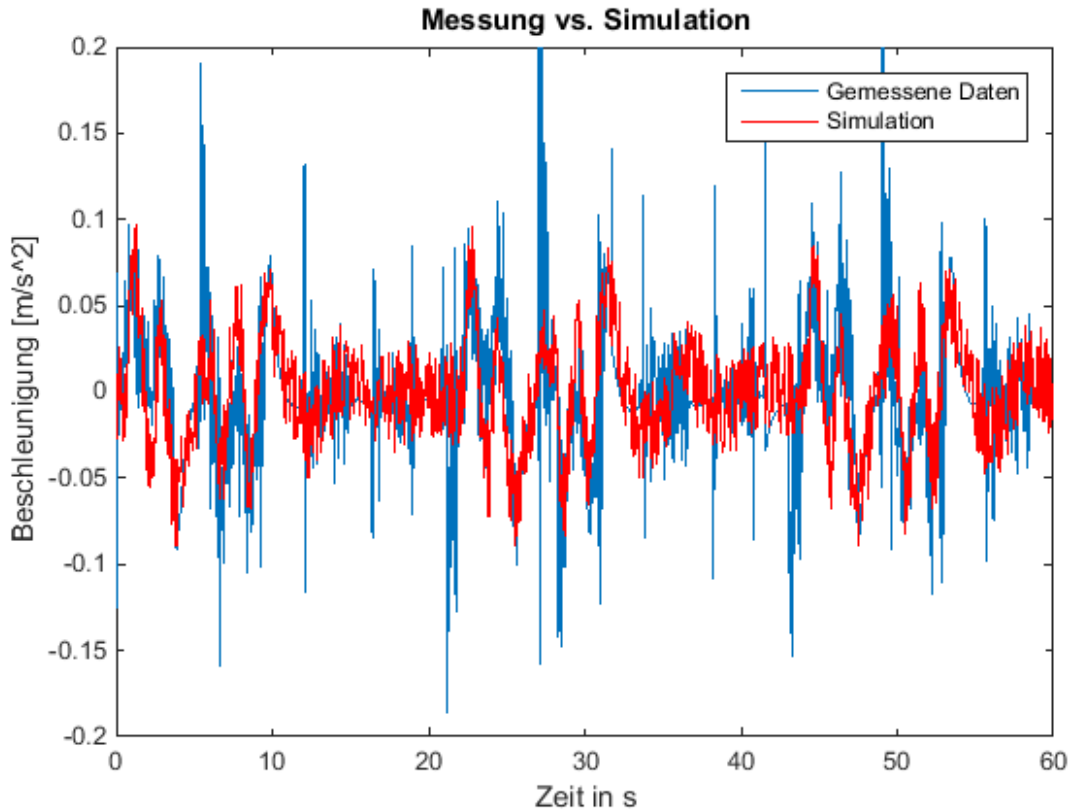


Abbildung 42: Äußerer Sensor – Vergleich zwischen Simulation und gemessenen Daten mit Störung

Um die dargestellten Ergebnisse besser vergleichen zu können, werden die Mittelwerte der Beschleunigungen aus den Simulationen ermittelt und in folgenden Tabellen aufgelistet.

	Innerer Sensor Mittlere Beschleunigung in [m/s ²]	Äußerer Sensor Mittlere Beschleunigung in [m/s ²]
Messdatensatz	0,0301	0,1612
Simulation ohne Störung	0,0293	0,1035
Relative Abweichung	0,0008	0,0577
Simulation mit Störung	0,0251	0,0659
Relative Abweichung	0,0050	0,0953

Tabelle 5: Vergleich der Mittelwerte der Beschleunigungen über ein Arbeitsspiel, d.h. der Aus- und Einfahrt der Teleskopgabeln

Im Fall der Simulation ohne Spiel gibt es im Vergleich mit den gemessenen Mittelwerten eine Abweichung von $0,0577 \frac{m}{s^2}$ beim äußeren Sensor und eine Abweichung von $0,0008 \frac{m}{s^2}$ beim inneren Sensor. Auf der anderen Seite ist die Abweichung der Mittelwerte im Fall der Simulation mit Störung höher. Vermutlich entsteht die größere Abweichung dadurch, dass die Störung bei der Simulation eine konstante Amplitude besitzt und daher nicht so hohe Spitzen

wie bei den gemessenen Kurven erzeugt werden. Dadurch werden die Mittelwerte der Beschleunigung für den zweiten Fall kleiner.

Im Vergleich mit den Simulationsbeispielen von [Schr2013] kann gesagt werden, dass die in dieser Arbeit simulierten Verläufe eine gute Annäherung zum realen Verhalten der Maschine darstellen. Jedoch ist das Simulieren von Systemen ein iterativer Prozess, in dem eine ständige Verbesserung vom Modell durch Anpassungen und Änderungen, bis die gewünschte Genauigkeit erreicht wird, erforderlich ist [Kahl2004].

5.3 Entwicklung von Modellen und Algorithmen für die Detektion von technischen Anrissen am Mastfuß eines RBG

RBG werden derzeit im Bereich der Betriebsfestigkeit ausgelegt. Durch zunehmenden Wettbewerbsdruck und steigende Energiekosten wird erwartet, dass in Zukunft ökonomischere Konstruktionen, beispielsweise mit geringeren Wandstärken, an Bedeutung gewinnen. In diesem Fall werden die Sicherheitsreserven reduziert werden müssen, weshalb die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung in kritischen Bereichen ansteigt. Einen solchen Bereich stellt der Übergang vom Mast zur Bodentraverse dar, da hier große Spannungen auftreten und ein großer Steifigkeitssprung vorliegt. Diese Risse im Mast führen zu Steifigkeitsverlusten. Somit erscheinen zur Detektion eines technischen Anrisses am Mast Informationen zu Steifigkeitsverlusten sinnvoll. Das Fraunhofer LBF hat hierzu Methoden zur Modellierung des fehlerhaften Systemverhaltens untersucht.

5.3.1 Modellierung des Systemverhaltens

In Abbildung 43 ist das zur Modellierung des Systemverhaltens zugrunde gelegte Prinzip eines zu Schwingungen um die z-Achse angeregten RBGs mit angerissenem Mastfuß gezeigt. Diese entstehen vor allem durch Trägheitskräfte beim Beschleunigen des RBGs in x-Richtung. Das Modell basiert auf der Annahme, wie bildlich dargestellt, dass die Schwingung amplitude bei geschlossenem Riss (hier Schwingung nach links) kleiner ist als bei geöffnetem Riss (hier Schwingung nach rechts). Begründen lässt sich dieses Verhalten damit, dass, wenn der Riss unter Druckbelastung steht, der Kraftfluss über die gesamte Querschnittsfläche des Mastes erfolgt. In diesem Fall besteht also kein Unterschied zwischen intaktem und angerissenem Mastfuß. Biegt sich der Mast jedoch von der angerissenen Mastseite weg, dann öffnet sich der Riss und die Querschnittsfläche über die die Kräfte übertragen werden, verringert sich entsprechend der Rissfläche. Dies hat eine Erhöhung der Spannung und Dehnung zur Folge, die sich im Ersatzmodell durch eine Verringerung der Steifigkeit bemerkbar macht.

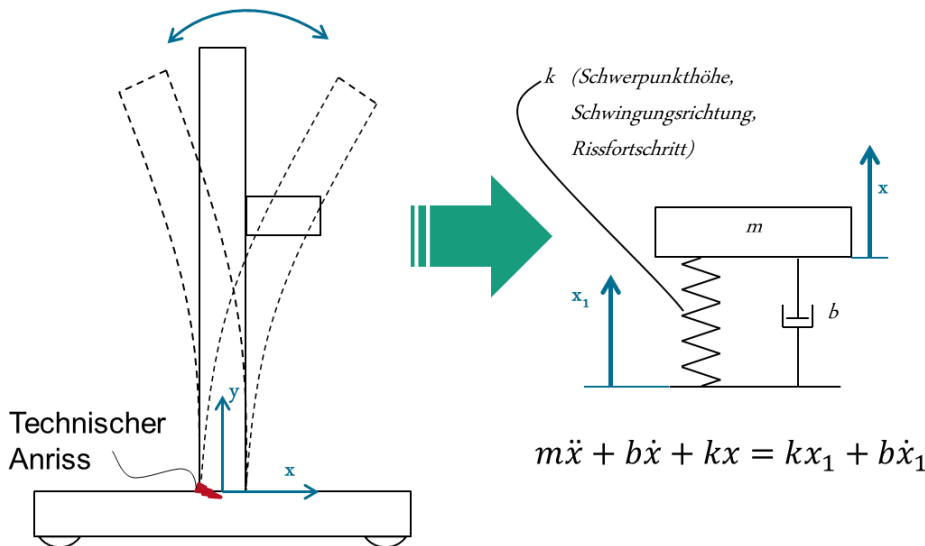


Abbildung 43: Prinzip Skizze eines RBGs mit Anriss am Mastfuß (links), mechanisches Modell des Mastfußes eines RBGs (rechts)

5.3.2 Simulation und Abgleich des Modells

Um Methoden zum Identifizieren eines Anrisses am Mastfuß testen zu können, wurde vom Fraunhofer LBF ein numerisches Modell in Simulink erstellt, das die Mastschwingungen des Regalbediengerätes in Fahrtrichtung abbildet. Es hat sich gezeigt, dass diese Schadensart sich basiert auf der Veränderung der Wahrscheinlichkeitsdichte durch ein System, dessen Übertragungsverhalten durch zwei verschiedene, konstante Steigungen beschrieben werden kann, simulieren lässt. Die Steifigkeit eines angerissenen Mastes lässt sich durch ein solches System nachbilden. Die theoretisch hergeleitete Veränderung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion konnte in Simulationen jedoch erst bei sehr großen Risstiefen erkannt werden, so dass eine technisch sinnvolle Anwendung dieses Effekts im Projekt nicht weiterverfolgt wurde. Eine zweite, untersuchte Methode zur Identifikation eines Anrisses am Mastfuß beruht darauf, dass sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung mit zunehmender Risstiefe verschiebt. Nach Simulationsergebnissen zu urteilen, lässt sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung eines Systems mit Riss ab einer Risstiefe von 50 mm mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % von einem intakten System unterscheiden (Abbildung 44). Da diese Art von Schaden nicht am realen RBG nachgestellt werden konnte, wurde dieser Ansatz nicht weiter im Projekt verfolgt.

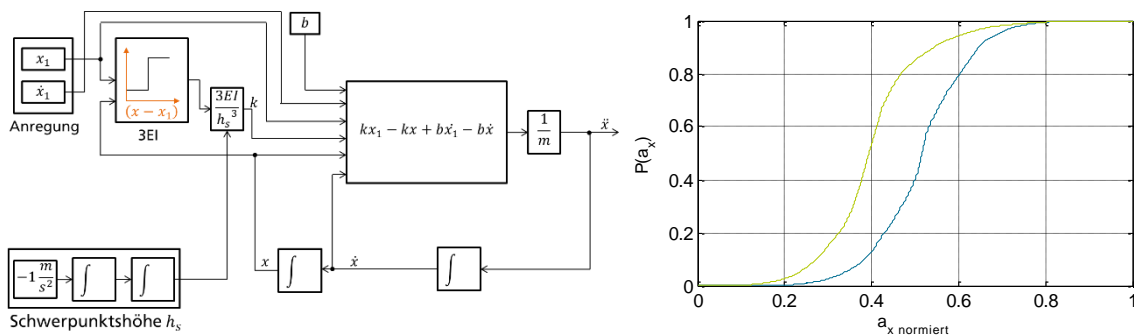


Abbildung 44: Simulationsmodell für einen technischen Anriss am Mastfuß eines RBG und Verschiebung der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit zunehmender Risstiefe

5.4 Entwicklung von Modellen und Algorithmen für die Erkennung von Radformfehlern und Drehblockaden an den Führungs- und Antriebsrollen eines RBG

Radformfehler und Drehblockaden der Antriebs- und Führungsrollen führen zu fehlerhaftem Laufverhalten auf der Fahrschiene. Deren Zustand wird regelmäßig vom Wartungspersonal kontrolliert. Methoden, die die Zustände des Laufverhaltens während des Betriebs detektieren, können die Sicherheit im Betrieb erhöhen. Informationen zu Unrundheiten und Schwergängigkeiten (bspw. einer Blockade) sind für eine zustandsbasierte Instandsetzung wertvoll. Das Fraunhofer LBF hat hierzu Algorithmen zur Detektion von Fehlzuständen am System im Hinblick auf eine Implementierung in energieautarke Sensoren untersucht.

5.4.1 Algorithmus zur Erkennung von Radformfehlern auf der Lauffläche der Antriebsrolle

Ziel war die Entwicklung eines Algorithmus zur effizienten Umsetzung in einen energieautarken Sensor zur Detektion von Schäden, die auf den Laufflächen der Antriebsrolle von RBG auftreten. Hierzu wurde seitens des Fraunhofer LBF ein signalverarbeitender Algorithmus entwickelt.

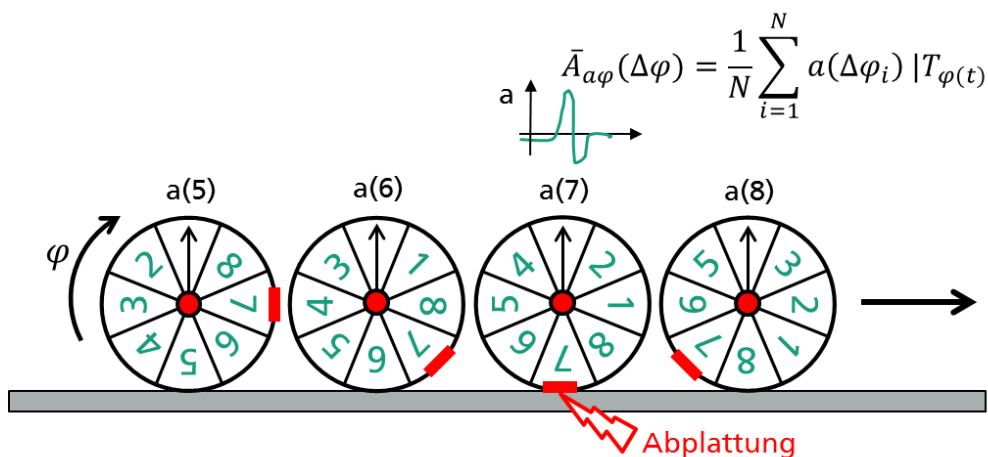


Abbildung 45: Prinzip Skizze des Algorithmus der Drehwinkel-synchronisierten Berechnung von Mittelwerten der vertikalen Radbeschleunigung.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der Algorithmus zur Erfassung bestimmter Formen von Rundheitsabweichungen der Antriebsrolle, z. B. Abflachungen und Polygonbildung, eignet. Ist die Lauffläche der Antriebsrolle geschädigt, führt dies im Allgemeinen zu einer periodisch wiederkehrenden Vertikalbeschleunigung in der Drehachse, sobald der geschädigte Bereich über die Laufschiene abrollt. Diese, den Schaden charakterisierende, Anregung wird im realen Betrieb durch andere Anregungsanteile überlagert (Rauheit der Schiene, etc.). Dadurch lassen sich gerade kleinere Rundheitsabweichungen nicht eindeutig im realen Zeitverlauf der Vertikalbeschleunigung erkennen. Ein Großteil anderen Anregungen sind allerdings nicht mit dem Raddrehwinkel korreliert und lassen sich durch Korrelation der Vertikalbeschleunigung mit dem Drehwinkel rausrechnen. Auf der rechten Seite von Abbildung 45 ist das Prinzip der Methode schematisch dargestellt. Hierzu sind die vertikalen Beschleunigungen mit bspw. einem MEMS-Beschleunigungssensor und der Rollendrehwinkel mit bspw. einem Hall-Sensor zu erfassen. Für die Vertikalbeschleunigung wird dem Drehwinkel entsprechend der Mittelwert berechnet. Dadurch werden die nicht mit dem Drehwinkel korrelierten Beschleunigungsanteile, die beispielsweise durch Unebenheiten der Schiene angeregt werden, eliminiert. Die mit dem Radwinkel synchron auftretenden Anregungen, beispielsweise die einer Abflachung, bleiben im Rahmen der Untersuchungen in der gemittelten Funktion als Schadensmerkmal erhalten.

5.4.2 Algorithmus zur Erkennung von Drehblockaden der Führungsrollen

Das Fraunhofer LBF hat darüber hinaus eine Pattern Recognition Methode auf ihre Eignung hinsichtlich der Erkennung von Drehblockaden der Führungsrollen untersucht. Dabei wurde das Beschleunigungsspektrum der im Betrieb gemessenen Horizontalbeschleunigung des Fahrwerkkopfes eines RBG in Fahrrichtung berechnet und hinsichtlich ihres Energiegehalts einzelner Frequenzbänder verglichen und bewertet. Es konnte gezeigt werden, dass sobald die Führungsrolle blockiert, was im Rahmen der Betriebsmessungen provoziert wurde, sich der Energiegehalt innerhalb der Frequenzbänder deutlich ändert (Abbildung 46).

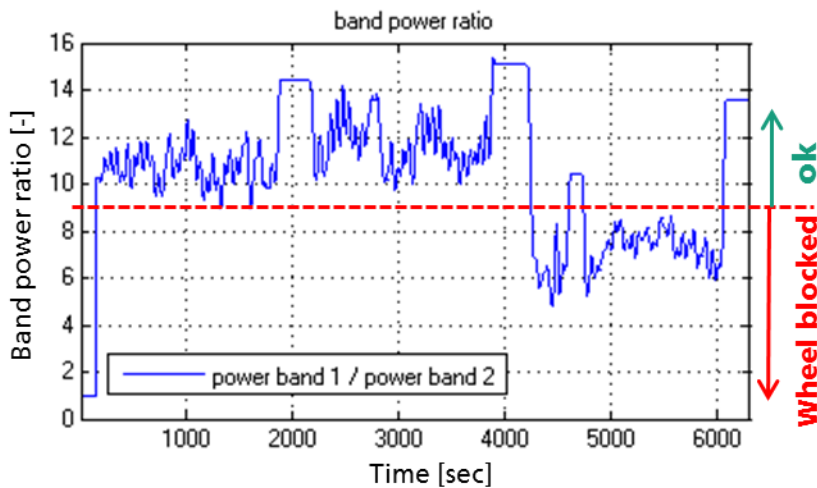


Abbildung 46: Ergebnis der Untersuchungen eines Algorithmus zur Erkennung von Drehblockaden an Führungsrollen eines RBG

6 Konzeption der Sensorik und Auswerteeinheit

6.1 Workshop

Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen an dem Regalbediengerät aus Arbeitspaket 3 wurde in einem gemeinsamen Workshop mit der Firma Dambach Lagersysteme, dem Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme und dem Fraunhofer LBF diejenigen Algorithmen ausgewählt, die im Weiteren an dem als Beispiel verwendeten RBG umgesetzt und bzgl. deren Eignung untersucht wurden.

6.2 Detailplanung des Sensorsystems für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrollen an einem RBG

Entsprechend der in dem Workshop getroffenen Entscheidungen hat das Fraunhofer LBF das umzusetzende Sensorsystem für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrollen an einem RBG detailliert geplant. Berücksichtigt wurde hierbei unter anderem Sensorauswahl, Positionierung, Sensorintegration, Notwendigkeit intelligenter Sensorknoten, interne Kommunikationsstruktur: kabelgebunden/ kabellos. Eine Skizze der Detailplanung ist in Abbildung 47 dargestellt.

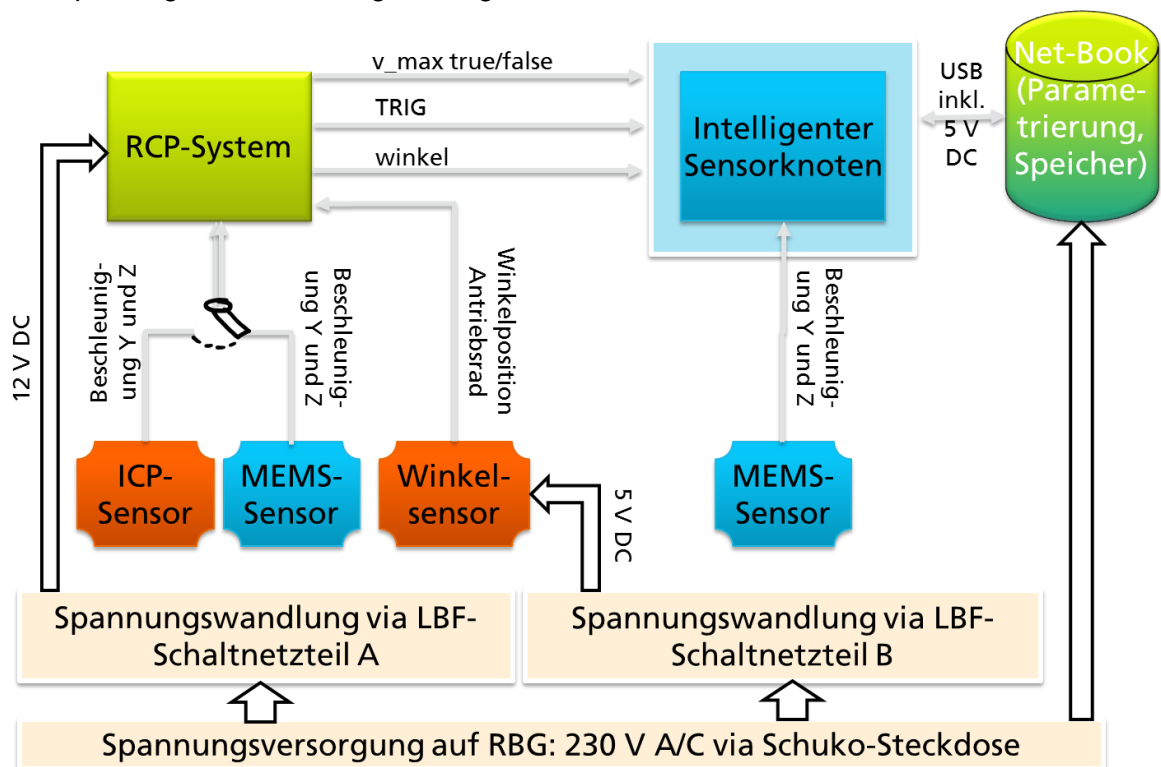


Abbildung 47: Detailplan des Sensorsystems inklusive Rapid-Control-Prototyping (RCP) System zur Validierung der Messergebnisse des intelligenten Sensors für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrollen an einem RBG

6.3 Detailplanung des Sensorsystems für die Überwachung des Anzugmoments von Schrauben an einem Zweiträger-Laufkran

Darüber hinaus hat das Fraunhofer LBF das umzusetzende Sensorsystem für die Überwachung des Anzugmoments von Schrauben an einem Zweiträger-Laufkran geplant. Eine Skizze der Detailplanung ist in Abbildung 48 dargestellt.

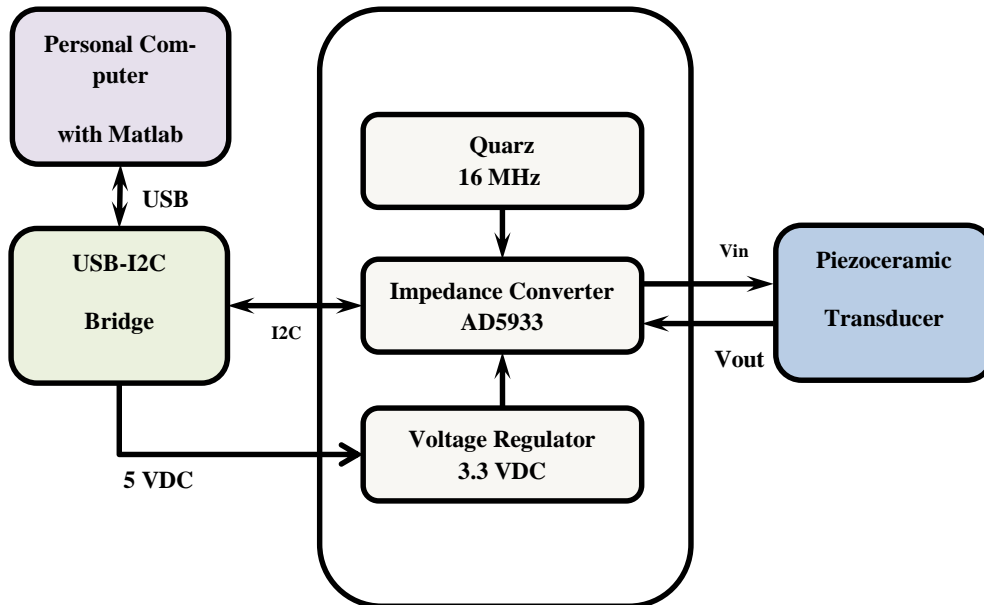


Abbildung 48: Detailplan des Sensorsystems für die Überwachung des Anzugmoments von Schrauben an einem Zweiträger-Laufkran

7 Herstellung und Programmierung eines Prototyps zur Zustandsüberwachung

7.1 Herstellung und Programmierung eines Smart-Sensors für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrolle an einem RBG

Anhand der Detailplanung hat das Fraunhofer LBF die einzelnen Komponenten des Sensorsystems für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrolle an einem RBG umgesetzt und die Funktion unter Laborbedingungen nachgewiesen. Implementiert wurde der in AP3 entwickelten Algorithmen zur Erkennung von Spiel der Führungsrollen (Abschnitt 5.1.3) sowie der Algorithmus zur Erkennung von Radformfehlern auf der Lauffläche der Antriebsrolle (Abschnitt 5.4.1). Die entwickelten intelligenten Sensoren entstehen durch Integration von vorwiegend elektronischen Komponenten und zugehöriger Informationsverarbeitung und deren Abstimmung auf das Zielsystem. Die Integration erfolgte durch Kombination von kostengünstiger MEMS-Sensorik und energieeffizienten Mikrocontrollern sowie Kommunikationslösungen, also durch die Hardware. Die funktionelle Integration wurde jedoch entscheidend durch die Informationsverarbeitung und damit durch die Gestaltung der zugehörigen Software geprägt. Die Programmierung erfolgte deshalb systematisch unter Berücksichtigung der in der VDI 2206 beschriebenen Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Ausgehend von dem Entwurf wurde zuerst unter Verwendung der Methoden des Rapid-Control-Prototyping schrittweise und systematisch eine Embedded-Lösung entwickelt und getestet. Im Anschluss wurde diese dadurch gefundene Lösung auf die Zielhardware übertragen, die den prototypischen, intelligenten Sensor darstellt. Abschließend wurden beide Varianten anhand der realen Betriebsschwingungen im Labor getestet und gegenübergestellt. Die Betriebsschwingungen wurden auf einem Schwingungsshaker im Labor nachgestellt (Abbildung 49).

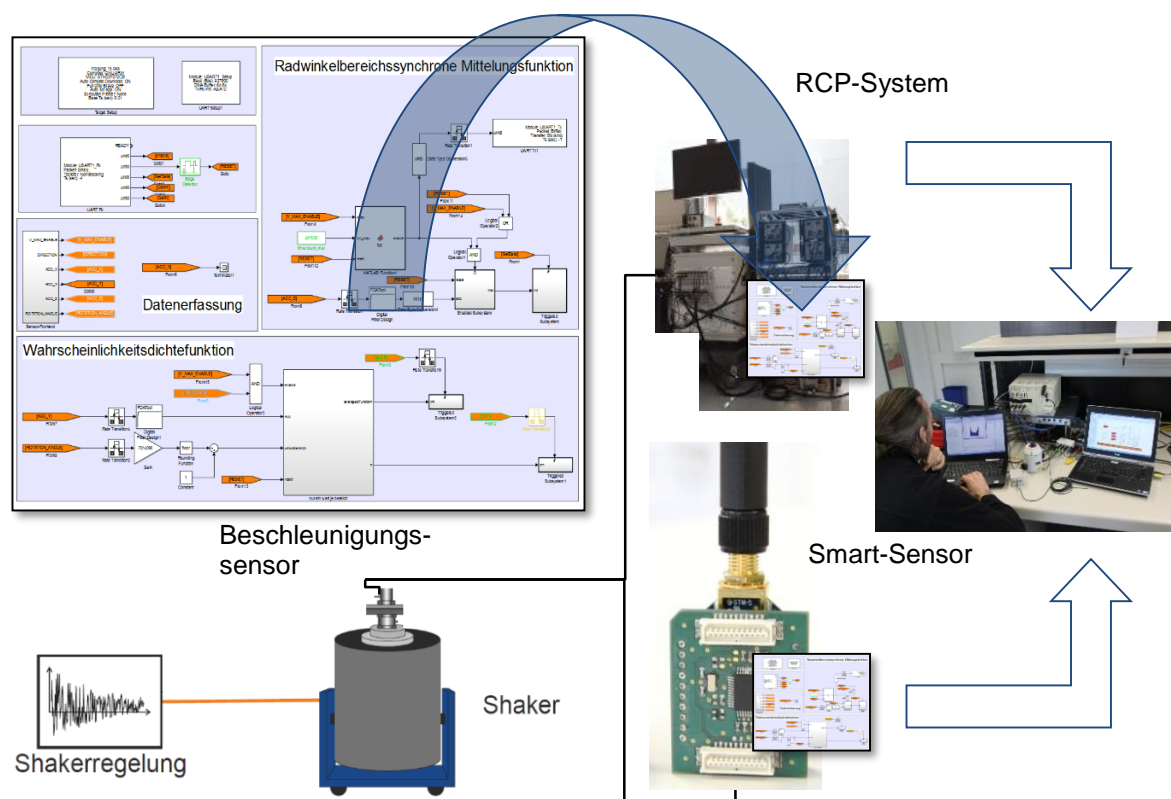


Abbildung 49: Vorgehen bei der Programmierung und dem Testen im Labor der Algorithmen

Als prototypische Hardware für den intelligenten Sensor wurde ein vom Fraunhofer LBF entwickeltes modulares Baukastensystem verwendet (Abbildung 50). Der intelligente Sensor wurde aus vier Modulen aufgebaut. Einem Kommunikationsmodul mit einem USB-UART Konverter. Einem Mikrocontroller-Modul mit einem ARM Cortex-M0 STM32F072CB Mikrocontroller. Einem Sensor-Frontend mit einem MEMS-Beschleunigungssensor vom Typ ADXL355 und einem Modul zur Energieversorgung. Diese wurde über den Universal Serial Busrealisiert.

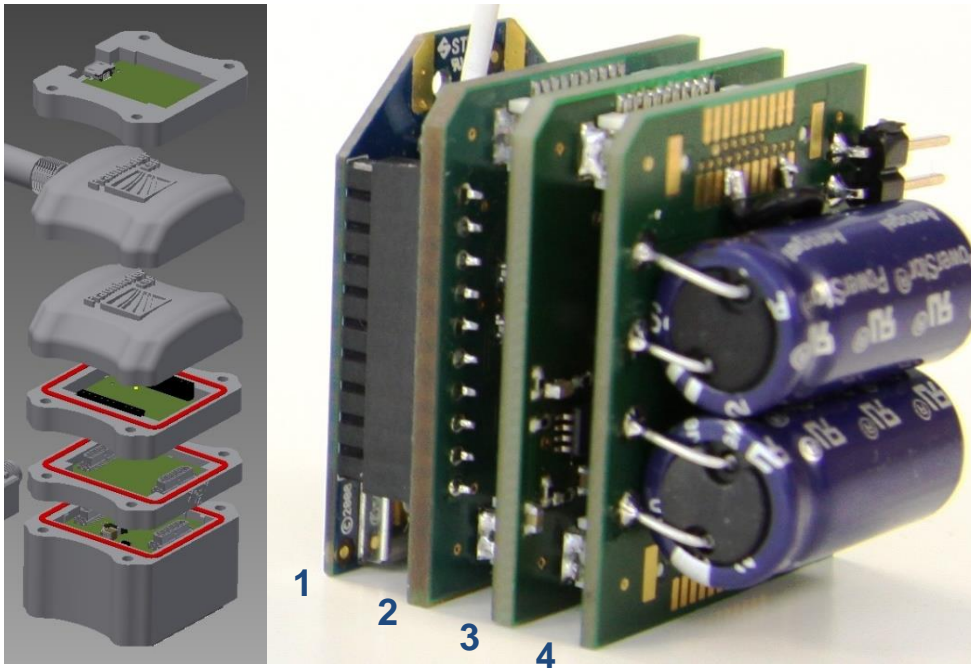


Abbildung 50: Embedded Hardware eines intelligenten Sensorknotens. Modularer Aufbau bestehend aus (1) Kommunikationsmodul; (2) Mikrocontroller-Modul; (3) Sensor-Frontend; (4) Energieversorgung

7.2 Herstellung und Programmierung eines Smart-Sensors für die Überwachung des Anzugmoments von Schrauben an einem Zweiträger-Laufkran

Das Fraunhofer LBF hat ein auf der Detailplanung basierendes prototypisches Sensorsystem für die Überwachung des Anzugmoments von Schrauben mit dem während der Analyse des Zweiträger-Laufkrans eingesetzten Messsystems im Labor abgeglichen. Der kompakte und kostengünstige Prototyp eines intelligenten Sensorsystems, bestehend aus Elektronik, piezoelektrischem Wandler und Metallhülse lässt sich zur Überwachung des Anzugmoments von Schrauben einsetzen. Eine Überwachung von Schweißnähten erscheint auch möglich, konnte aber im Rahmen des Projekts nicht genauer untersucht werden.

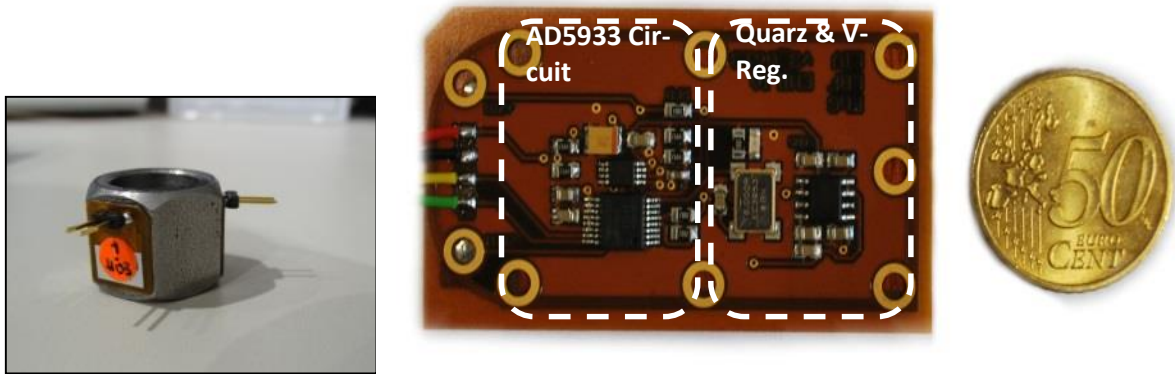


Abbildung 51: Embedded Hardware eines intelligenten Sensorknotens zur Überwachung des Anzugsmoments an Schraubverbindungen für Intralogistiksysteme

8 Validierung der Modelle und Algorithmen

Im April 2016 wurden vom Fraunhofer LBF bei Dambach Lagersysteme mehrere Messreihen zur Validierung der Methoden für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrolle an einem RBG durchgeführt.

8.1 Versuchsdurchführung

Die Versuche zur Validierung der entwickelten Methoden folgten bzgl. Messstellen und Betriebsbedingungen weitgehend den Untersuchungen vom Sommer 2014. Da für den Verlust von Steifigkeit keine autonomen Methoden entwickelt worden waren, wurden die zugehörigen Messstellen eingespart. Als Messsystem kam nun kein Laborgerät mehr zum Einsatz, sondern die neu entwickelte Sensorik. Untersucht wurden eine Variation des Führungsspiels an den unteren seitlichen Führungsrollen sowie eine Unrundheit am Antriebsrad. Letzter konnte nicht wie im Sommer 2014 durch Bearbeitung mit einer Schleifscheibe erreicht werden, weshalb Erhebungen auf Rad angebracht wurden.

Die Validierung wurde als Blindversuch durchgeführt: zwei Kollegen des Fraunhofer LBF nahmen die Datenerfassung vor Ort bei Dambach vor – ein weiterer Kollege des Fraunhofer LBF erhielt lediglich die Sensordaten und stellte daran Veränderungen fest, ohne zu wissen, wann genau diese Veränderungen vor Ort eingebracht worden waren.

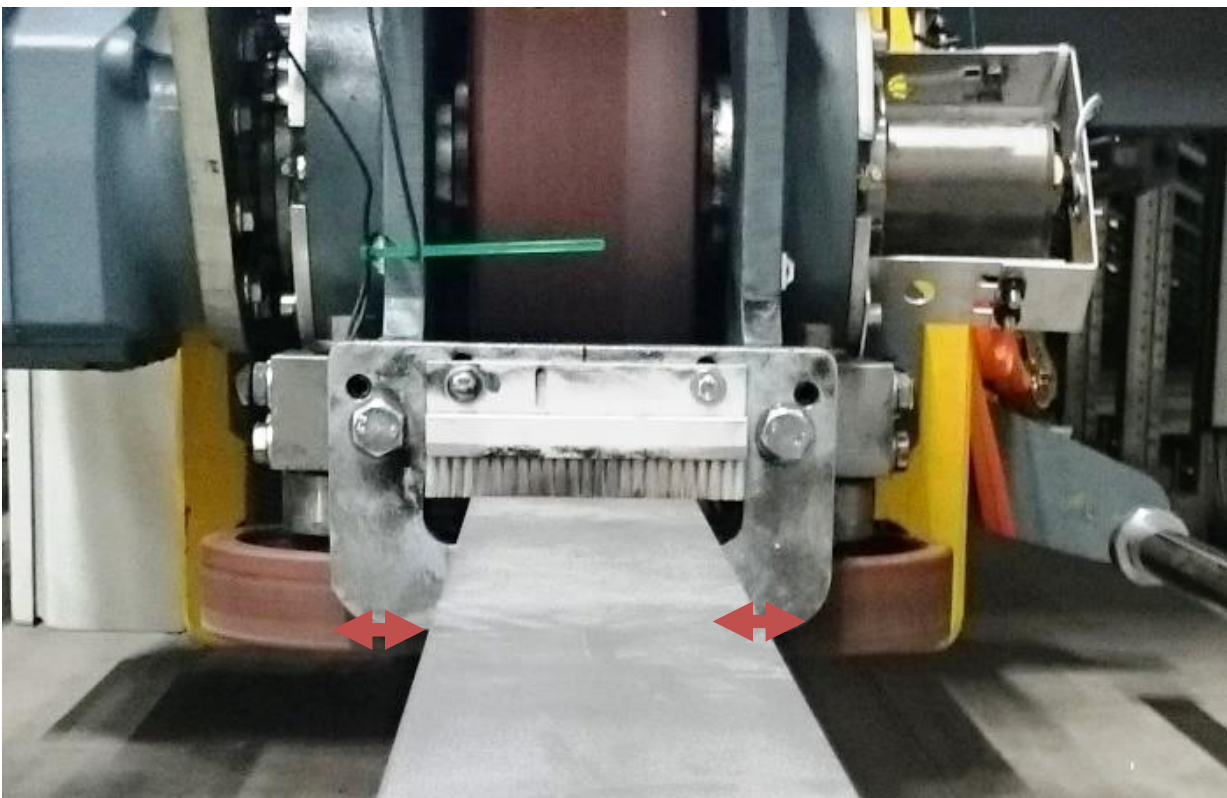


Abbildung 52: Der Abstand zwischen den Führungsrollen und der Fahrschiene wurde bei den Validierungsmessungen schrittweise vergrößert um eine Verschleißerscheinung nachzustellen.

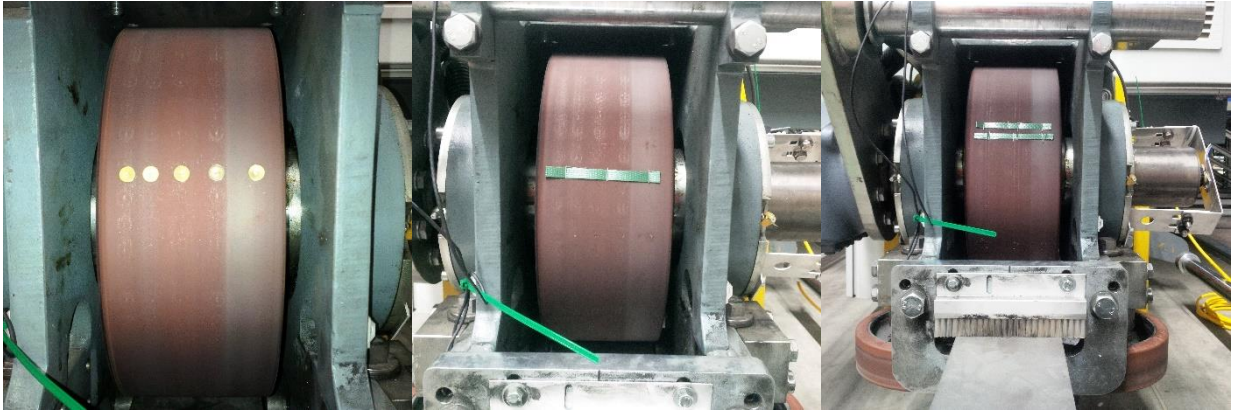


Abbildung 53: Auf der Antriebsrolle wurden mehrere Störungen aufgebracht um Radformfehler nachzustellen

8.2 Auswertung

Die Auswertung der Messdaten, die sowohl vom prototypischen intelligenten Sensorsystem als auch von RCP-Referenzsystem während der Versuchsdurchführung aufgezeichnet wurden, wurde im Nachgang an die Testfahrten vom Fraunhofer LBF ausgewertet. Die Auswertung erfolgte durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter, welcher zum Zeitpunkt der Auswertung keine Kenntnisse über den genauen Ablauf der Testfahrten und die dabei eingebrachten Fehlerzustände hatte. Seine Aufgabe bestand darin, das Szenario aus den Testfahrten anhand der Messdaten zu rekonstruieren und Zustandsänderungen aufzuzeigen. Das Test-szenario und das Ergebnis für den prototypischen intelligenten Sensor sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet:

	Datum, Uhrzeit	Spiel li [mm]	Spiel re [mm]	Änderung zur Referenz er- kannt	Änderung zum vorherigen Zu- stand erkannt
Referenz	21-Apr-2016, 15:09	0	0	Ja	-
0,40L	21-Apr-2016, 15:41	0,4	0	Ja	Ja
0,65L	21-Apr-2016, 16:44	0,65	0	Ja	Nein
1,00R	21-Apr-2016, 17:30	0	1	Ja	Nein
1,60L	21-Apr-2016, 18:10	1,6	0	Ja	Nein
2,5L	21-Apr-2016, 18:52	2,5	0	Ja	Nein
Referenz	21-Apr-2016, 19:35	0	0	Nein	Ja

Tabelle 6: Ergebnis der durch den prototypischen intelligenten Sensor während der Validierungstests erkannten Betriebszustände

Mit dem Algorithmus konnten die Änderungen des Führungsspiels gegenüber dem Referenzzustand von 0 mm in einem Bereich 0,4 – 2,5 mm reproduzierbar erfasst werden. Das Messergebnis der Abweichung zwischen dem Referenzzustand und einem Führungsspiel von 0,4 mm auf der linken Seite ist in Abbildung 54 dargestellt. Änderungen des Führungsspiels innerhalb des Bereichs 0,4 – 2,5 mm wurden nicht erkannt.

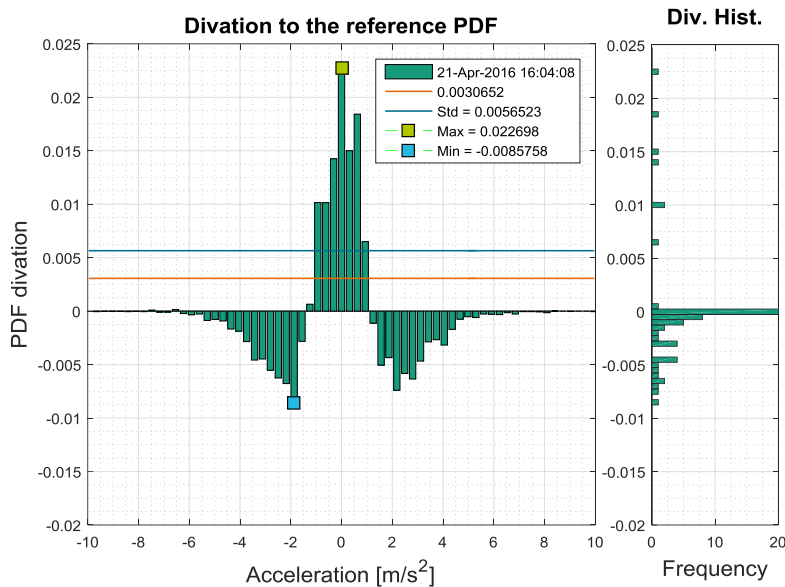


Abbildung 54: Die Änderung des Führungsspiels auf der linken Seite des RBG von 0 mm auf 0,4 mm im Zeitraum zwischen 15:29 Uhr und 16:04 Uhr wurde vom prototypischen intelligenten Sensorsystem erkannt

Zum Abschluss der Testreihe wurde der Referenzzustand mit einem Spiel von 0 mm auf beiden Seiten wiederhergestellt. Abbildung 55 zeigt einen Auszug der gemessenen Daten für diesen Zustand. Die minimalen Abweichungen von Null sind auf die in der Praxis nicht beherrschbaren realen Abweichungen begründet.

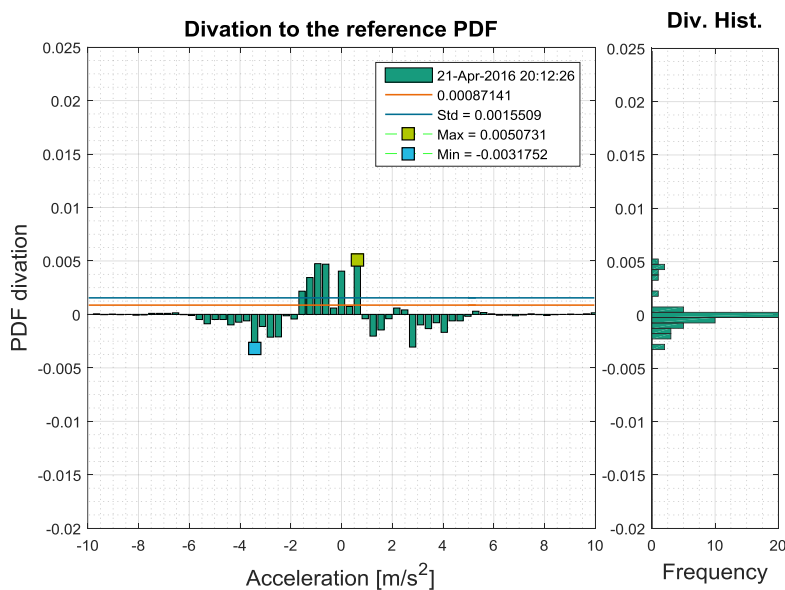


Abbildung 55: Auszug aus den gemessenen Daten für Führungsspiel auf der linken und rechten Seite des RBG von 0 mm. Das System befindet sich am Ende der Messreihe wieder im Referenzzustand.

Erhebungen die auf der Oberfläche der Antriebsrolle angebracht wurden, um Radformfehler nachzustellen konnten zum Teil erkannt und bei der Auswertung dem Winkelbereich auf der Lauffläche zugeordnet werden, an dem die jeweilige Störung angebracht wurde. Dabei wurden minimale Störungen, wie sie bspw. in Abbildung 56 gezeigt ist, nicht von dem intelligenten Sensor erkannt. Störungen, die eingebracht wurden um einen mittelschweren Radformfehler nachzustellen, konnten von dem intelligenten Sensorsystem zuverlässig erkannt werden und der Schadensort dem Winkelbereich auf der Lauffläche zugeordnet werden (Abbildung 57).

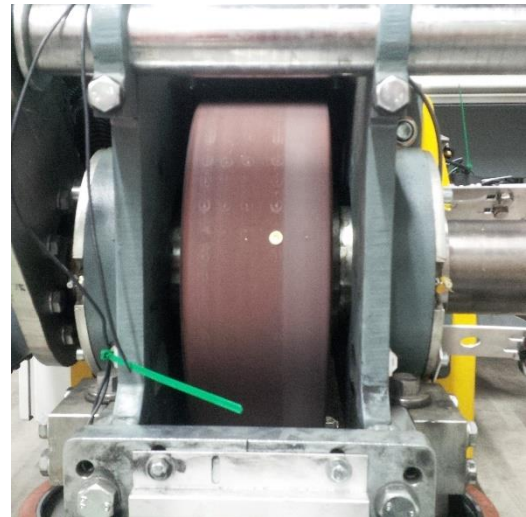
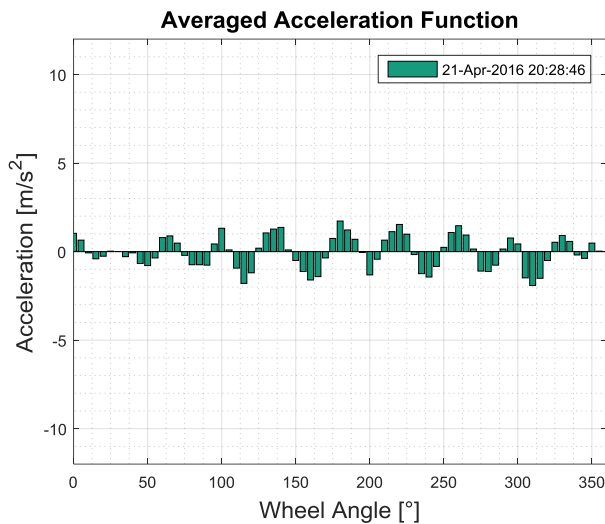


Abbildung 56: Auszug aus den gemessenen Daten für einen minimalen Radformfehler auf der Lauffläche. Die Auftragung konnte, wie erwartet, nicht gemessen werden.

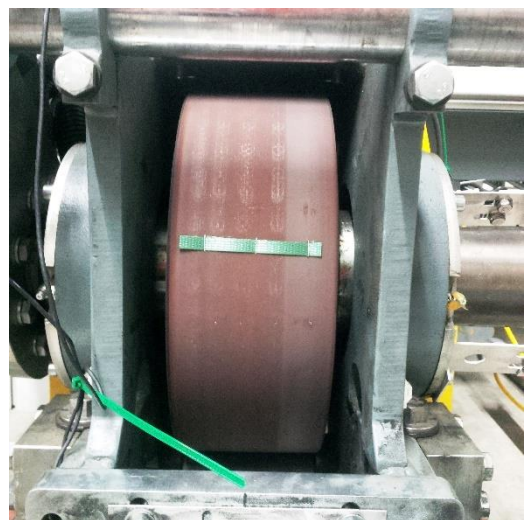
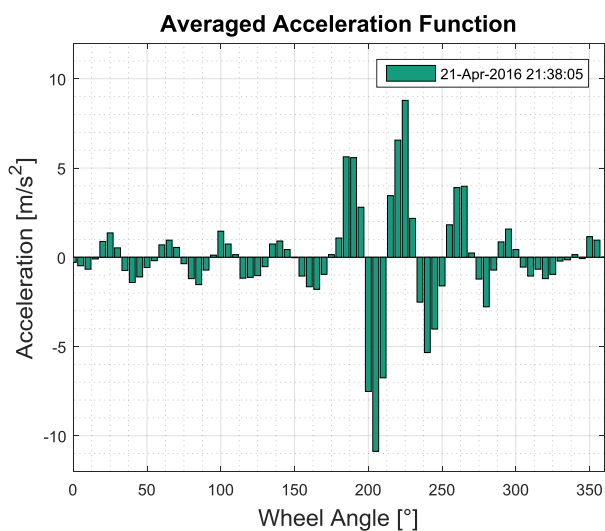


Abbildung 57: Auszug aus den gemessenen Daten für einen mittelschweren Radformfehler auf der Lauffläche. Der Fehler wurde erkannt und die Position auf der Lauffläche lokalisiert.

9 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Abschließend werden die in diesem Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse zusammengefasst. In einem kurzen Ausblick wird dargelegt, wie die Ergebnisse angewendet werden können und an welchen Stellen weiterer Forschungsbedarf besteht.

9.1 Zusammenfassung

Das übergeordnete Ziel der Forschungsarbeiten war die Entwicklung von neuartigen Systemen und Algorithmen zur Zustandsüberwachung von Geräten der Intralogistik.

Zunächst wurde der Stand der Technik und der Wissenschaft analysiert. Hierbei wurden bestehende Zustandsüberwachungssysteme in anderen Fachbereichen analysiert, sowie speziell die bereits in der Intralogistik verwendeten Zustandsüberwachungssysteme z.B. an Krananlagen betrachtet.

Anschließend wurde eine Analyse der Zielkomponenten durchgeführt. Hierzu wurden zunächst die Zielkomponenten ausgewählt und dann in engem Austausch mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses hochbeanspruchte Positionen, kritische Konstruktionsmerkmale oder häufig ausfallende Komponenten identifiziert. Die Ergebnisse hiervon waren, dass insbesondere die folgenden Fehlzustände relevant sind:

- Spiel quer zur Bewegungsrichtung
- Spiel in Bewegungsrichtung
- Steifigkeitsverlust
- Ungleichförmige Bewegung

Daraufhin wurden Messungen an einem Regalbediengerät, an einer Teleskopgabel, sowie an einem Brückenkran durchgeführt. Hierbei wurden die folgenden Fehlzustände und Schädigungsfälle betrachtet:

Regalbediengerät	Teleskopgabel	Brückenkran
<ul style="list-style-type: none"> • Spiel quer zur Bewegungsrichtung • Ungleichförmige Bewegung • Steifigkeitsverlust 	<ul style="list-style-type: none"> • Spiel in Bewegungsrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Spiel quer zur Bewegungsrichtung • Ungleichförmige Bewegung • Steifigkeitsverlust

Tabelle 7: Fehlzustände und Schädigungsfälle an den ausgewählten Zielkomponenten

Ausgehend von den Messergebnissen wurden zunächst Simulationsmodelle entwickelt um die Systeme und ihre Schädigungsfälle abzubilden. Dazu wurden die betrachteten intralogistischen Systeme zunächst in physikalische Modelle und darauf aufbauend in mathematische Modelle überführt, welche in Simulationsmodellen implementiert wurde. In diesen Simulationsmodellen wurden sowohl das korrekte als auch das fehlerhafte Verhalten der Systeme abgebildet.

Am Beispiel des Regalbediengerätes wurden Algorithmen zur Erkennung der folgenden Fehlzustände entwickelt:

- Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene
- Technische Anrisse am Mastfuß
- Radformfehler an den Führungs- und Antriebsrollen
- Drehblockaden an den Führungs- und Antriebsrollen

Dazu wurden zunächst die Simulationsmodelle erweitert, sodass die Fehlzustände in der Simulation abgebildet werden können. Anschließend wurden Algorithmen zur Erkennung der Fehlzustände entwickelt, die zum Beispiel in einem energieautarken Sensor implementiert werden können. Hierbei kamen die folgenden Vorgehensweisen zum Einsatz:

- Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene:
Berechnung einer Wahrscheinlichkeitsdichte aus den am Fahrwerkskopf des RBG auftretenden Beschleunigungen orthogonal zur Fahrriechtung für den Fall, dass sich das RBG mit maximaler Fahrgeschwindigkeit bewegt und Vergleich mit einer Referenzfunktion.
- Technische Anrisse am Mastfuß:
Erkennen der Verschiebung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Mastschwingung
- Radformfehler an den Führungs- und Antriebsrollen:
Erkennen von mit dem Radwinkel synchron auftretenden Anregungen durch Vergleich der Korrelation zwischen Drehwinkel und Beschleunigung
- Drehblockaden an den Führungs- und Antriebsrollen:
Pattern Recognition Methode durch Vergleich und Bewertung des Beschleunigungsspektrum und des Energiegehalts einzelner Frequenzbänder.

Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen am Regalbediengerät wurden diejenigen Algorithmen ausgewählt, die im Weiteren an dem als Beispiel verwendeten RBG umgesetzt und bzgl. deren Eignung untersucht wurden. Die Algorithmen dienten als Basis für die Detailplanung eines Sensorsystems für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrolle an einem RBG.

Ausgehend von der Detailplanung wurden die einzelnen Komponenten des Sensorsystems für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrolle an einem RBG umgesetzt und die Funktion unter Laborbedingungen nachgewiesen.

Ein weiteres Sensorsystem wurde für die Überwachung des Anzugsmoments von Schrauben an einem Zweiträger-Laufkran geplant. Hierfür wurde ein kompakter und kostengünstiger Prototyp eines intelligenten Sensorsystems, bestehend aus Elektronik, piezoelektrischem Wandler und Metallhülse, zur Überwachung des Anzugsmoments von Schrauben entwickelt.

9.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die erforderlichen Grundlagen zur Entwicklung und zum Einsatz von Zustandsüberwachungssystemen für Geräte und Anlagen der Intralogistik erarbeitet. Es wurden Sensorplattformen entwickelt und geeignete Verfahren zur Erkennung der Fehlzustände erforscht und realisiert. Die Anwendbarkeit der Verfahren und Systeme wurde daraufhin in Funktionsmodellen nachgewiesen, die als Grundlagen für die bedarfsgerechte Instandhaltung, eine erhöhte Anlagenverfügbarkeit, das Erkennen von Fehlnutzungen und Fehlparametrierungen sowie die Ermittlung der heute unbekannt, tatsächlichen Belastungen im Betrieb dienen. Auf Basis der Kenntnis der tatsächlichen Belastungen können wichtige Größen für die Entwicklung effizienterer Fördergeräte in der Intralogistik abgeleitet werden. Bei den Betreibern und Herstellern von Intralogistiksystemen, die überwiegend KMU sind, ist meist kein Potenzial zur Untersuchung solcher komplexen Zusammenhänge vorhanden. Mithilfe der erzielten Ergebnisse wird es den KMU ermöglicht zielgerichtete Maßnahmen zur Zustandsüberwachung der Intralogistiksysteme mit geringem, wirtschaftlich vertretbarem Aufwand zu ergreifen.

9.3 Verwendung der zugewendeten Mittel

Die Bearbeitung des Forschungsprojektes erfolgte angelehnt an den beantragten Zeitplan. Aufgrund eines verspäteten Projektstartes und personellen Veränderungen wurde die Bearbeitungszeit kostenneutral um insgesamt 8 Monate verlängert. An jeder Forschungsstelle (Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Kompetenzzentrum Mechatronik/Adaptronik) wurde jeweils ein wissenschaftlicher Mitarbeiter Vollzeit beschäftigt. Des Weiteren wurde für die Herstellung von Bauteilen und Versuchseinrichtungen, sowie die Vorbereitung der Mess- und Prüftechnik für vom IFL geplante Versuchsdurchführungen ausgebildetes technisches Personal in Teilzeit beschäftigt. Für abgrenzbare Tätigkeiten bzw. Zuarbeiten, sowie für eine praxisorientierte Ausbildung stand jeder beteiligten Forschungseinrichtung jeweils eine studentische Hilfskraft unterstützend zur Verfügung.

Tabelle 8: Arbeitsdiagramm mit zeitlicher Aufteilung der Arbeitspakete

Jahr	Regulärer Zeitplan												Kostenneutrale Verlängerung				Personaleinsatz									
	2013				2014				2015				2016				[PM]									
Monat	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	DI	SH	TA	
AP 1	■	■			■	■	■																	5	1,4	0
AP 2		■	■	■			■	■	■	■														7	3	0
AP 3				■	■	■	■	■	■	■	■	■												16,6	6,9	1,1
AP 4								■	■	■	■	■	■										7	2,3	0	
AP 5										■	■	■	■	■									8,7	2,8	1,5	
AP 6																						■	■	3,3	0	0
AP 7																								2	0	0
Summe:																							49,6	16,4	2,6	

DI = Diplom-Ingenieur, SH = Studentische Hilfskraft, TA = Techn. Angestellter / PM = Personalmonate

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete befindet sich in Abschnitt 2.5.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde vom IFL ein Leistungs- und Energiemessgerät zum Betrag von 10 402,98 Euro (inkl. Mehrwertsteuer) beschafft. Dieses wurde für Strom- und Spannungsmessungen beispielsweise an den Elementen des Antriebs einer Kranbrücke zur Analyse des Einflusses der Schräglaufräfte verwendet. Damit ließen sich die Auswirkungen der Störgrößen auf den jeweiligen Antrieb als weitere Größen der Zustandsüberwachung von Fördermitteln der Intralogistik darstellen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden von den beteiligten Forschungsstellen keine weiteren Geräteausgaben über 2500€ getätigt und keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

9.4 Veröffentlichungen

Im Rahmen des durchgeführten Forschungsprojekts wurde bereits ein starker Transfer der erzielten Ergebnisse durch Vorträge, Artikel in Fachzeitschriften und Tagungsbandbeiträge ermöglicht. Damit steht interessierten Kreisen zum jetzigen Zeitpunkt bereits ein breites Wissen über die Umweltaspekte von Fördermitteln in der Intralogistik zur Verfügung. Die Veröffentlichungen wurden zum einen gemeinschaftlich von allen beteiligten Forschungsstellen durchgeführt und zum anderen produktgruppenspezifisch für Flurförderzeuge, Krane und Hebezeuge und Lagertechnik von jeder Forschungsstelle separat. Durch diese Gliederung wird

erreicht, dass die für die jeweilige Branche erarbeiteten Ergebnisse in ausreichender Ausführlichkeit dargestellt werden können. Auch in Zukunft sind auf Basis der durchgeführten Arbeiten zahlreiche Veröffentlichungen zum Transfer der Ergebnisse in die Industrie geplant. Tabelle 9 zeigt eine chronologische Übersicht der bereits durchgeführten und der geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt. Zudem finden sich Daten zu den Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses (PBA) der Teilprojekte und des Gesamtprojekts.

Titel	Datum	Quelle	Art
Vorstellung des Projektes auf der Logimat 2013	19.-21.02.2013	Logimat 2013	Posterpräsentation
„Zustandsüberwachung von Geräten der Intralogistik - Suche nach autonomen Systemen“	Oktober 2013	„Hebezeuge Fördermittel“ Ausgabe 53 (2013) 10	Publikation in Fachzeitschrift
„Zustandsüberwachung von Geräten der Intralogistik - Suche nach autonomen Systemen“	Oktober 2013	„Hebezeuge Fördermittel“ Ausgabe 53 (2013) 10	Publikation in Fachzeitschrift
Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten, Datenaustausch für die Klassifizierung der Intralogistik-Geräte	26.11.2013		Treffen PA am Fraunhofer Institut
Vorstellung des Projektes am WGTL-Stand auf der CeMAT 2014 in Hannover	19.-23.05.2014	CeMAT 2014, Hannover	Posterpräsentation
Vorstellung bei der Sitzung des Wissenschaftlichen Beirats im VDMA	20.08.2014	18. Sitzung des Wissenschaftlichen Beirats im VDMA in Frankfurt/Main-Niederrad	Bericht
Informationen zum Forschungsvorhaben "ZIL – Zustandsüberwachung von Intralogistiksystemen"	23.08.2014	Homepage der Forschungsgemeinschaft IFL (www.ifl-forschung.de)	Homepage
Vortrag und Poster zum Projekt beim 31th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics September 24-27, 2014 - Kempten (Allgäu), Deutschland	24.-27.09.2014	31th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics	Vortrag und Poster
Berichterstattung über den Projektfortschritt und Evaluierung der ersten Ergebnisse, Diskussion der weiteren Arbeiten	11.11.2014		Treffen PA am IFL

9 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Vortrag über das Projekt beim Rhein-Main-Adaptronik - Workshop „Anwendungen und Trends in der Adaptronik“, 19. November 2014, Braunschweig	19.11.2014	Rhein-Main-Adaptronik - Workshop „Anwendungen und Trends in der Adaptronik	Vortrag
Projektbericht IFL „Zustandsüberwachung an einer Teleskopgabel eines Regalbediengeräts“	14.10.2015	Homepage der Forschungsgemeinschaft IFL (www.ifl-forschung.de)	Bericht
Projektbericht LBF „Zustandsüberwachung an Regalbediengeräten“	14.10.2015	Homepage der Forschungsgemeinschaft IFL (www.ifl-forschung.de)	Bericht
„Digitalisierung von Prozessen und Produkten“	Januar 2016	Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit. Jahresbericht 2015, Darmstadt: Fraunhofer LBF, 2016	Bericht
Elevator-Pitch-Vortrag „Zustandsüberwachung in der Intralogistik“	15.- 16.02.2016	Konferenz Mittelstand 4.0 in Darmstadt	Elevator-Pitch-Vortrag
Vorstellung des Projektes bei der Ordentlichen Mitgliederversammlung der Fraunhofer-Allianz Big Data am 16.02.2016	16.02.2016	Ordentliche Mitgliederversammlung der Fraunhofer-Allianz Big Data	Vortrag
Vortrag zum Projekt bei der IHK-Darmstadt am 15.03.2016	15.03.2016	IHK Darmstadt	Vortrag
„Zustandsüberwachung mit energieautarken Sensoren am Beispiel der Intralogistik und des Schienengüterverkehrs“	06.- 07.04.2016	4SMARTS, Symposium für Smarte Strukturen und Systeme, 6-7. April 2016, Darmstadt, Deutschland	Vortrag
Erwähnung des Projektes im Vortrag „Potentiale für die Schwingungsüberwachung im Kontext von Industrie 4.0 und Internet of Things“	10.- 11.05.2016	VDI-Fachkonferenz Schwingungen in Werkzeug- und Verarbeitungsmaschinen 2016	Vortrag

Tabelle 9: Übersicht der Veröffentlichungen

9.5 Ausblick

Auf Basis der erzielten Erkenntnisse dieses Forschungsprojektes ist es möglich, anhand von Messdaten verschiedene Schadensfälle und Unregelmäßigkeiten an Systemen der Intralogistik zu erkennen. Für ausgewählte Schadensfälle wurden bereits Algorithmen zur Schadenserkennung in intelligenten Sensorsystemen implementiert und validiert. Diese Sensoren wurden bisher nur als Prototypen umgesetzt und können für einen industriellen Einsatz weiterentwickelt werden.

Die Algorithmen zur Schadenserkennung beschränken sich bisher auf wenige exemplarisch ausgewählte Schadensfälle. Mithilfe der in diesem Forschungsprojekt entstandenen Simulationsmodelle können weitere Schadensfälle analysiert und weitere Sensorsysteme zur Erkennung dieser entwickelt werden, ein weiterer Anwendungsfall wäre beispielsweise die Überwachung von Schweißnähten mithilfe von Zustandsüberwachungssystemen.

10 Anhang

10.1 Literaturverzeichnis

- [Bank2011] G. Bankow; F. Brinkel: *Anlagenverfügbarkeit im Fokus – Condition Monitoring in der Förder- und Lagertechnik*, Hebezeuge und Fördermittel 51, Ausg. 5 (2011), S. 292-294, HUSS-Verlag, Berlin 2011
- [Bech2014a] P. Becht; A. Friedmann: *Numerical and experimental evaluation of signal statistics for Structural Health Monitoring*, 31th Danubia-Adria Symposium, Kempten University, Germany, 2014.
- [Bech2014b] P. Becht: *Numerische und experimentelle Analyse zur Anwendbarkeit statistischer Methoden in der Strukturüberwachung*. Masterarbeit, FB Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SZM, TU Darmstadt, Darmstadt, D, 2014.
- [Biehl2011] S. N. Biehl: *Entwicklung von Dünnschichtsensoren auf Basis piezoresistiver Kohlenwasserstoffschichten*, Berichte aus Forschung und Entwicklung IST, Band 35, Hrsg.: Fraunhofer IST, Braunschweig, Fraunhofer Verlag, 2011
- [Card2004] E.P. Carden; P. Fanning: *Vibration Based Condition Monitoring: A Review*, Structural Health Monitoring, Vol. 3(4), pp. 355–377, 2004
- [Dietz1999] M. Dietzel: *Beeinflussung des Schwingungsverhaltens von Regalbediengeräten durch Regelung des Fahrantriebs*, Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1999
- [DIN13306] DIN EN 13306, *Instandhaltung-Begriffe der Instandhaltung*, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin 2010
- [DIN15020] DIN 15020, *Hebezeuge – Grundsätze für Seiltriebe – Berechnung und Ausführung*, Beuth-Verlag, Berlin, 1974
- [DIN15018] DIN 15018, *Krane – Grundsätze für Stahltragwerke – Berechnung*, Beuth-Verlag, Berlin, 1984
- [DIN15350] DIN 15350, *Regalbediengeräte - Grundsätze für Stahltragwerke - Berechnungen*, Beuth-Verlag, Berlin, 1992
- [Dull2008] K.-H. Dullinger: *Lifetime-Partnerschaft - der Service ist von strategischer Bedeutung*, Quo Vadis Material Handling, Karten Druck und Medien GmbH, Mönchengladbach 2008
- [Euro2015] Eurofork: Eurofork. 2015. <http://www.eurofork.com/> (Zugriff am 05. April 2015).
- [Fach2006] R. Fachberger, G. Bruckner, R. Hauser, L. Reindl: *Wireless SAW based high-temperature measurement systems*, International Frequency Control Symposium and Exposition, 2006 IEEE. 2006, S. 358-367, doi:10.1109/FREQ.2006.275412
- [Fan2010] W. Fan; P. Qiao: *Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study*, Structural Health Monitoring, Vol. 10(1), pp. 83-111, 2010
- [FEM9.311] FEM 9.311, *Berechnungsgrundlagen für Regalbediengeräte - Tragwerke*, Fédération Européenne de la Manutention, 1978
- [Friedt2010] J.-M Friedt, C. Droit, G. Martin, S. Ballandras: *A wireless interrogation system exploiting narrowband acoustic resonator for remote physical quantity measurement*, Review of Scientific Instruments. Vol 81, 014701 (2010)

- [Gold2004] M. Golder: *Ein Beitrag zur Kostenabschätzung für Brückenkranträger in Kastenbauweise auf Basis ihrer Bemessungsgrundlagen und Dimensionierungsnachweise*, Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2004
- [Green2004] S. Greenfield; R. Kaufman: *Oil quality sensors: Condition Monitoring*, Insight, 2005, vol. 47, no8, pp. 458-460
- [Huma2006] J. Humar; A. Bagchi; H. Xu: *Performance of Vibration-based Techniques for the Identification of Structural Damage*, Structural Health Monitoring, Vol. 5(3), pp. 215–241, 2006
- [Kahl2004] J. Kahlert: *Simulation technischer Systeme: Eine beispielorientierte Einführung*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2004
- [Kalt2007] W. Kaltoff, *Unfallrekonstruktion – Welche relevanten Daten speichern die elektronischen Systeme moderner Fahrzeuge?*, VRR-Verkehrsrechtsreport, pp. 57-263, 2007.
- [Kühn2001] I. Kühn: *Untersuchung der Vertikalschwingungen von Regalbediengeräten*, Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2001
- [Mitt2007] M. Mittwollen: *Untersuchung der Schwingungseigenschaften von teleskopierbaren Maschinenelementen mit Spiel am Beispiel eines Gabelstapler-Hubgerüsts*, Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2007
- [Mont2006] D. Montalvão; N. M. M. Maia; A. M. R. Ribeiro: *A Review of Vibration-based Structural Health Monitoring with Special Emphasis on Composite Materials*, The Shock and Vibration Digest, Vol. 38, No. 4, pp. 295-324, 2006
- [Sche2012] M. Schenk: *Instandhaltung technischer Systeme - Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs*, Heidelberg Dordrecht London New York: Springer, 2012.
- [Schr2013] D. Schramm; M. Hiller; R. Bardini: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Duisburg, München: Springer Verlag, 2013.
- [Schu1994] M. Schumacher: *Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Einmast-Regalbediengeräten*, Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1994
- [Shig1967] J. E. Shigley: *Applied Mechanics of Materials*. Michigan: McGraw-Hill, Inc., 1976.
- [SMBG1997] SMBG Süddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft: *VBG 9a, Unfallverhütungsvorschrift Lastaufnahmeeinrichtungen im Hebezeugbetrieb*, 1997.
- [Sohn2004] H. Sohn; C.R. Farrar; F.M. Hemez; D.D. Shunk; D.W. Stinemas; B.R. Nadler; J.J. Czarnecki: *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996 – 2001*, Los Alamos National Laboratory, Report No. LA – 13976 – MS., 2004
- [Tand2007] N. Tandon; G.S. Yadava; K. M. Ramakrishna: *A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings*, Mechanical Systems and Signal Processing 21, 244–256, (2007)
- [Tara2008] C. M. Tarawneh, et al.: *Experiments and Models for the Thermal response of railroad tapered-roller bearings*, International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008) S. 5794-5803, 2008
- [Tou2009] S. Tourette; G. Collin; Ph. Le Thuc; C. Luxey; R. Staraj: *Small meandered PIFA associated with SAW passive sensor for monitoring inner temperature of a car*

exhaust header, IEEE International Workshop on Antenna Technology, IWAT 2009: "Small Antennas and Novel Metamaterials", Santa Monica, California (USA), März 2009.

- [VDMA2011] Forum Intralogistik: *Zahlenspiegel Intralogistik-Branche 2010*, VDMA Förder-technik und Logistiksysteme, Frankfurt, 2011.
- [VDI2485] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2485 - Instandhaltung von Krananlagen (Entwurf)*, Verein Deutscher Ingenieure, 2009, Düsseldorf.
- [VDI2888] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2888 - Zustandsorientierte Instandhaltung*, Verein Deutscher Ingenieure, 1999, Düsseldorf.

10.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiele für Unstetigförderer in der Intralogistik	6
Abbildung 2: vorausbestimmte, korrektive und bedarfsgerechte Instandhaltung (Anlehnung an [5])	7
Abbildung 3: Skizze eines Funktionsmodells für die Detektion von Steifigkeitsverlusten	9
Abbildung 4: Doppeltiefe Telekopgabel für Paletten (Quelle: Dambach)	10
Abbildung 5: links - Einträger-Profilträger-Brückenkran, rechts - Antriebseinheit eines Kranfahrwerks mit Spurführungsrollen (Quelle: Kuli Hebezeuge)	10
Abbildung 6: Lösungsansatz für die Zustandsüberwachung von Intralogistiksystemen	13
Abbildung 7: Zustandsüberwachungssysteme bei Windkraftanlagen (oben links), Schiffsantrieben (oben mitte), Rohrleitungen (oben rechts) und Flugzeugen (unten)	19
Abbildung 8: Nachweiskette für die Lebensdauervorhersage mit Load Monitoring	21
Abbildung 9: Methoden der Instandhaltung [VDI2888]	22
Abbildung 10: SAW-Sensor-Prinzip	26
Abbildung 11: Simulation von Seilkraftverlauf des Hubseils und Schnittkraftverlauf in der Teleskopzinke beim Anheben einer Last aus dem Regalfach [Kühn2001]	27
Abbildung 12: links: Labor-Messsystem montiert auf dem Podest oberhalb des Schaltschranks; rechts: Labor-Sensorik zur Erfassung der Antriebsdrehzahl	31
Abbildung 13: links: Beschleunigungssensorik in der Höhe des Maststoßes; rechts: Beschleunigungssensorik neben einer der unteren seitlichen Führungsrollen	32
Abbildung 14: Durch Bearbeitung mit einer Schleifscheibe abgeplattetes Antriebsrad	32
Abbildung 15: Abgeplattete Führungsrolle (links: vor dem Einsatz, recht: danach)	33
Abbildung 16: Durch Schweißpunkte blockierte Führungsrolle	33
Abbildung 17: Prinzipskizze einfachtiefe Bewegung	34
Abbildung 18: Prinzipskizze doppeltiefe Bewegung	35
Abbildung 19: Beispiel einer Messung beim Betrieb mit Spiel	36
Abbildung 20: Mittelwert der Beschleunigung jedes Zustandes (Innerer Sensor)	36
Abbildung 21: Mittelwert der Beschleunigung jedes Zustandes (Äußerer Sensor)	37
Abbildung 22: Messobjekt Zweiträgerkran ZK 3.2 t * 18,95 m	38
Abbildung 23: Es wurden unterschiedliche statische Hublasten festgelegt: Ohne Last, Hublast von ca. 900 kg und Hublast von ca. 2050 kg. Für die Katzpositionen wurden drei Positionen festgelegt: Katzposition auf der linken Seite, in der Mitte und auf der rechten Seite des Krans.	40
Abbildung 24: Variation des Führungsspiels der Führungsrollen auf der rechten Seite des Krans.	41
Abbildung 25: Einbringen der beiden Schäden am Untergurt in der Mitte eines Katzträgers. Die Schädigung 1 befindet sich auf der Außenseite des Krans. Die Schädigung 2 auf der Innenseite.	41
Abbildung 26: Zeitlicher Verlauf der Oberflächendehnung an den verschiedenen Messpositionen der Dehnungsmessstreifen während des zweiten Schädigungsvorgangs.	42
Abbildung 27: Funktionsprinzip der BU-Methode	43
Abbildung 28: Funktionsprinzip der EMI-Methode	43
Abbildung 29: Positionen und Bezeichnungen der untersuchten Schrauben am Laufkran	44
Abbildung 30: Gemessene EMI der Schraube S2 bei Änderung des Anzugsmoments der Schraube S2	44
Abbildung 31: Gemessene EMI der Schraube S2 bei Änderung des Anzugsmoments der Schraube S1	45
Abbildung 32: Prinzipskizze des Fahrwerkskopfes eines RBGs (links), mechanisches Modell des Fahrwerkskopfes eines RBGs mit Spiel (rechts)	46

Abbildung 33: Simulationsmodell des Führungsspiels der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene an einem RBG	47
Abbildung 34: Detektion von Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene mit sensornaher Berechnung eines Schadensmerkmals in einem energieautarken Sensor	48
Abbildung 35: Die Wahrscheinlichkeitsdichte der horizontalen Beschleunigungsamplituden des Fahrwerkskopfes orthogonal zur Fahrschiene ändert sich in Abhängigkeit von der Größe des Führungsspiels.	48
Abbildung 36: Modellierung der einfachtiefen Bewegung als Zweimassenschwinger	49
Abbildung 37: Modellierung der doppeltiefen Bewegung als Dreimassenschwinger	50
Abbildung 38: Matlab-Modell mit Ein- und Ausgangsgrößen	51
Abbildung 39: Äußerer Sensor - Vergleich zwischen Simulation und gemessenen Daten ohne Störung	52
Abbildung 40: Äußerer Sensor –Vergleich zwischen Simulation und gemessenen Daten ohne Störung	52
Abbildung 41: Äußerer Sensor – Vergleich zwischen Simulation und gemessenen Daten mit Störung	53
Abbildung 42: Äußerer Sensor – Vergleich zwischen Simulation und gemessenen Daten mit Störung	54
Abbildung 43: Prinzip Skizze eines RBGs mit Anriss am Mastfuß (links), mechanisches Modell des Mastfußes eines RBGs (rechts)	56
Abbildung 44: Simulationsmodell für einen technischen Anriss am Mastfuß eines RBG und Verschiebung der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit zunehmender Risstiefe	56
Abbildung 45: Prinzip Skizze des Algorithmus der Drehwinkel-synchronisierten Berechnung von Mittelwerten der vertikalen Radbeschleunigung.	57
Abbildung 46: Ergebnis der Untersuchungen eines Algorithmus zur Erkennung von Drehblockaden an Führungsrollen eines RBG	58
Abbildung 47: Detailplan des Sensorsystems inklusive Rapid-Control-Prototyping (RCP) System zur Validierung der Messergebnisse des intelligenten Sensors für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrollen an einem RBG	59
Abbildung 48: Detailplan des Sensorsystems für die Überwachung des Anzugsmoments von Schrauben an einem Zweiträger-Laufkran	60
Abbildung 49: Vorgehen bei der Programmierung und dem Testen im Labor der Algorithmen	61
Abbildung 50: Embedded Hardware eines intelligenten Sensorknotens. Modularer Aufbau bestehend aus (1) Kommunikationsmodul; (2) Mikrocontroller-Modul; (3) Sensor-Frontend; (4) Energieversorgung	62
Abbildung 51: Embedded Hardware eines intelligenten Sensorknotens zur Überwachung des Anzugsmoments an Schraubverbindungen für Intralogistiksysteme	63
Abbildung 52: Der Abstand zwischen den Führungsrollen und der Fahrschiene wurde bei den Validierungsmessungen schrittweise vergrößert um eine Verschleißerscheinung nachzustellen.	64
Abbildung 53: Auf der Antriebsrolle wurden mehrere Störungen aufgebracht um Radformfehler nachzustellen	65
Abbildung 54: Die Änderung des Führungsspiels auf der linken Seite des RBG von 0 mm auf 0,4 mm im Zeitraum zwischen 15:29 Uhr und 16:04 Uhr wurde vom prototypischen intelligenten Sensorsystem erkannt	66
Abbildung 55: Auszug aus den gemessenen Daten für Führungsspiel auf der linken und rechten Seite des RBG von 0 mm. Das System befindet sich am Ende der Messreihe wieder im Referenzzustand.	66
Abbildung 56: Auszug aus den gemessenen Daten für einen minimalen Radformfehler auf der Lauffläche. Die Auftragung konnte, wie erwartet, nicht gemessen werden.	67
Abbildung 57: Auszug aus den gemessenen Daten für einen mittelschweren Radformfehler auf der Lauffläche. Der Fehler wurde erkannt und die Position auf der Lauffläche lokalisiert.	67

10.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Considered faults and damages	2
Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Instandhaltungsmethoden	23
Tabelle 3: Mittelwerte der Beschleunigung [m/s^2] (Äußerer Sensor)	37
Tabelle 4: Mittelwerte der Beschleunigung [m/s^2] (Innerer Sensor)	37
Tabelle 5: Vergleich der Mittelwerte der Beschleunigungen über ein Arbeitsspiel, d.h. der Aus- und Einfahrt der Teleskopgabeln	54
Tabelle 6: Ergebnis der durch den prototypischen intelligenten Sensor während der Validierungstests erkannten Betriebszustände	65
Tabelle 7: Fehlzustände und Schädigungsfälle an den ausgewählten Zielkomponenten	68
Tabelle 8: Arbeitsdiagramm mit zeitlicher Aufteilung der Arbeitspakete	70
Tabelle 9: Übersicht der Veröffentlichungen	72