

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Zustandsüberwachung von Intralogistiksystemen

der Forschungsstelle(n)

Fst 1: KIT, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)

Fst 2: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit (LBF)

Das IGF-Vorhaben 489ZN der Forschungsvereinigung Forschungsvereinigung Intralogistik Fördertechnik und Logistiksysteme e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Karlsruhe,

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Darmstadt,

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

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:	76 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

[Leerseite für doppelseitigen Druck]

Inhaltsverzeichnis

1	Management Report	1
2	Einleitung	4
2.1	<i>Problemstellung</i>	4
2.2	<i>Ziele</i>	7
2.3	<i>Angestrebte Ergebnisse</i>	10
2.4	<i>Innovativer Beitrag</i>	12
2.5	<i>Lösungsweg</i>	13
3	Stand der Technik und der Wissenschaft	16
3.1	<i>Stand der Technik</i>	16
3.1.1	Begriffsdefinitionen	16
3.1.2	Relevante Normen und Richtlinien	17
3.1.3	Zustandsüberwachung als Mittel zur Instandhaltung	17
3.1.4	Aufgaben und Methoden der industriellen Instandhaltung	20
3.2	<i>Stand der Wissenschaft</i>	22
3.2.1	Zustandsüberwachung	22
3.2.2	Überwachung von Lagern und Linearführungen	23
3.2.3	Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring)	23
3.2.4	Sensorik für die Zustandsüberwachung	24
3.2.5	Dynamische Verhalten von Unstetigförderern	25
4	Analyse der Zielkomponenten	27
4.1	<i>Analyse eines Regalbediengeräts</i>	30
4.1.1	Messdurchführung	30
4.2	<i>Analyse einer Teleskopgabel</i>	32
4.3	<i>Analyse eines Zweitträgerlaufkrans</i>	37
4.3.1	Erste Messdurchführung	37
4.3.2	Zweite Messdurchführung zur piezo-basierten Überwachung von Schraubverbindungen	41
5	Entwicklung von Modellen und Algorithmen	45
5.1	<i>Entwicklung von Modellen und Algorithmen für die Detektion von Führungsspiel der seitlichen Führungsrollen zur Fahrschiene an einem RBG</i>	45
5.1.1	Modellierung des Systemverhaltens	45
5.1.2	Simulation und Abgleich des Modells	46
5.1.3	Algorithmus zur Erkennung von Spiel der Führungsrollen	46
5.2	<i>Modellierung einer Teleskopgabel</i>	48
5.2.1	Physikalisches Modell	48
5.2.2	Mathematisches Modell	49
5.2.3	Modellierung in MATLAB® Simulink®	49
5.2.4	Validierung des Modells	50
5.3	<i>Entwicklung von Modellen und Algorithmen für die Detektion von technischen Anrissen am Mastfuß eines RBG</i>	54
5.3.1	Modellierung des Systemverhaltens	54
5.3.2	Simulation und Abgleich des Modells	55

5.4	<i>Entwicklung von Modellen und Algorithmen für die Erkennung von Radformfehlern und Drehblockaden an den Führungs- und Antriebsrollen eines RBG</i>	56
5.4.1	<i>Algorithmus zur Erkennung von Radformfehlern auf der Lauffläche der Antriebsrolle</i>	56
5.4.2	<i>Algorithmus zur Erkennung von Drehblockaden der Führungsrollen</i>	57
6	Konzeption der Sensorik und Auswerteeinheit	58
6.1	<i>Workshop</i>	58
6.2	<i>Detailplanung des Sensorsystems für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrolle an einem RBG</i>	58
6.3	<i>Detailplanung des Sensorsystems für die Überwachung des Anzugmoments von Schrauben an einem Zweiträger-Laufkran</i>	59
7	Herstellung und Programmierung eines Prototyps zur Zustandsüberwachung	60
7.1	<i>Herstellung und Programmierung eines Smart-Sensors für die Erkennung von Spiel der Führungsrollen und Radformfehlern der Antriebsrolle an einem RBG</i>	60
7.2	<i>Herstellung und Programmierung eines Smart-Sensors für die Überwachung des Anzugmoments von Schrauben an einem Zweiträger-Laufkran</i>	61
8	Validierung der Modelle und Algorithmen	63
8.1	<i>Versuchsdurchführung</i>	63
8.2	<i>Auswertung</i>	64
9	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	67
9.1	<i>Zusammenfassung</i>	67
9.2	<i>Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten</i>	68
9.3	<i>Verwendung der zugewendeten Mittel</i>	69
9.4	<i>Veröffentlichungen</i>	69
9.5	<i>Ausblick</i>	72
10	Anhang	73
10.1	<i>Literaturverzeichnis</i>	73
10.2	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	75
10.3	<i>Tabellenverzeichnis</i>	76

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 validated 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.