

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik Recent Developments in MEMS

Herausgegeben von Prof. Dr. Andreas Schütze und Prof. Dr. Helmut Seidel

Band 30

Nikolai Johannes Helwig

**Zustandsbewertung industrieller Prozesse
mittels multivariater Sensordatenanalyse
am Beispiel hydraulischer und
elektromechanischer Antriebssysteme**



Zustandsbewertung industrieller Prozesse mittels multivariater
Sensordatenanalyse am Beispiel hydraulischer und elektromechanischer
Antriebssysteme

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von

Dipl.-Ing. Nikolai Johannes Helwig

Saarbrücken

2018

Tag des Kolloquiums:	18.12.2018
Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick
Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Vorsitz:	Prof. Dr. techn. Romanus Dyczij-Edlinger
Akad. Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Paul Motzki

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik
Recent Developments in MEMS

Band 30

Nikolai Johannes Helwig

**Zustandsbewertung industrieller Prozesse mittels
multivariater Sensordatenanalyse am Beispiel
hydraulischer und elektromechanischer Antriebssysteme**

Shaker Verlag
Aachen 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Saarbrücken, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6494-0

ISSN 1862-5711

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Zusammenfassung

In industriellen Maschinen und Anlagen werden zunehmend Sensoren zur Prozessregelung und -überwachung verwendet. Die Analyse komplexer Multisensordaten mit dem Ziel, relevante Information zu extrahieren, etwa zur Prozess- und Instandhaltungsoptimierung, ist von hoher wirtschaftlicher Bedeutung. Bei komplexen Systemen spielen hierbei datengetriebene Verfahren, insbesondere das maschinelle Lernen, eine zunehmende Rolle.

In dieser Arbeit wird ein teilautomatisierter Ansatz zur Merkmalsextraktion, -selektion und Klassifikation auf Basis heterogener Sensordaten vorgeschlagen und anhand zweier Anwendungen evaluiert.

Zum einen ist dies die Detektion und Quantifizierung von typischen Schäden eines hydraulischen Systems auf Basis von Prozesssensoren. Hierbei werden in einem Prüfstand künstliche Schadenszustände bei einem konstant und randomisiert ablaufenden Prozess emuliert. Zudem wird die Anfälligkeit der Analyse gegenüber Sensorstörungen untersucht und ein Vorgehen zur Detektion und Kompensation von letzteren vorgeschlagen und erprobt.

Die zweite Anwendung ist die Zustandsüberwachung elektromechanischer Zylinder mit dem Fokus auf der Komponente Kugelgewindetrieb. Mittels eines entwickelten Dauerlaufprüfstands erfolgt die zyklische Belastung und Charakterisierung der Zylinder vom Neuzustand bis zum Ausfall auf Basis verschiedener Messgrößen. Ziel ist es hierbei, mittels der multivariaten Sensordatenanalyse eine Verschleiß- und Lebensdauerabschätzung zu ermöglichen.

Abstract

Industrial machines and plants are increasingly equipped with sensors for process control and monitoring. The systematic analysis of complex multi sensor data aiming at extracting relevant information, e.g. to improve the process or maintenance strategy, is of great economic interest. Regarding complex industrial systems, data driven methods, especially machine learning, gain in importance.

In this work, a partially automated approach for feature extraction, selection and classification based on heterogeneous sensor data is proposed and evaluated in two scenarios.

The first application is the detection and quantification of typical faults in a hydraulic system based on process sensors. Here, artificial fault states are emulated in a test bench during cyclic and randomized processes. In addition, susceptibility of analysis in case of sensor disturbances and failures is studied proposing an approach for the detection and compensation of sensor faults.

The second application is the condition monitoring of electromechanical cylinders focusing on the ball screw drive. The lifetime characterization of cylinders from new state to failure is performed by a specifically developed endurance test system monitoring several measurands. Based on these sensor data and the multivariate approach, a statistical model for wear and residual lifetime estimation is derived.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN	7
2.1	ZUSTANDSÜBERWACHUNG.....	7
2.2	MESSUNSICHERHEIT.....	8
2.3	SIGNALVERARBEITUNG UND MULTIVARIATE DATENANALYSE.....	9
2.3.1	<i>Signalvorverarbeitung</i>	<i>10</i>
2.3.2	<i>Merkmalsextraktion</i>	<i>11</i>
2.3.3	<i>Merkmalsselektion</i>	<i>15</i>
2.3.4	<i>Dimensionsreduktion</i>	<i>19</i>
2.3.5	<i>Abstands- und Wahrscheinlichkeitsmaße.....</i>	<i>23</i>
2.3.6	<i>Künstliche neuronale Netze</i>	<i>25</i>
2.3.7	<i>Support Vector Machines.....</i>	<i>27</i>
2.3.8	<i>Validierung</i>	<i>29</i>
3	METHODIK ZUR TEILAUTOMATISIERTEN MULTIVARIATEN	
	SENSORDATENANALYSE	35
3.1	DATENGENERIERUNG.....	35
3.2	DATENANALYSE.....	37
3.3	REALISIERUNG	39
4	ANWENDUNGSSZENARIO HYDRAULISCHES SYSTEM	41
4.1	EINFÜHRUNG.....	41
4.2	PROBLEMSTELLUNG.....	41
4.3	STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG	42
4.4	KOMPONENTEN DES HYDRAULISCHES SYSTEMS UND DEREN SCHADENSMECHANISMEN.....	44
4.4.1	<i>Pumpe</i>	<i>44</i>
4.4.2	<i>Wegeventil.....</i>	<i>47</i>
4.4.3	<i>Hydrospeicher.....</i>	<i>49</i>
4.4.4	<i>Öl-Luft-Kühler</i>	<i>52</i>
4.4.5	<i>Hydrauliköl</i>	<i>54</i>
4.5	EXPERIMENTELLER AUFBAU.....	59

4.5.1	<i>Hydraulikaggregat</i>	59
4.5.2	<i>Schadenzustände</i>	61
4.5.3	<i>Variation der Ölparameter</i>	64
4.5.4	<i>Steuerung, Datenerfassung und Arbeitszyklus</i>	65
4.6	DETEKTION VON MASCHINENFEHLERN UND -VERSCHLEIß	72
4.6.1	<i>Erkennung und Quantifizierung isolierter Schadenstypen</i>	72
4.6.2	<i>Unterscheidung gleichzeitig auftretender Schäden</i>	75
4.6.3	<i>Auswertung über mehrere Zyklen</i>	80
4.6.4	<i>Langzeitstabilität und Übertragbarkeit</i>	82
4.6.5	<i>Einfluss der Abtastezeit</i>	83
4.6.6	<i>Diskussion</i>	85
4.7	EINFLUSS VON ÖLPARAMETERN	86
4.7.1	<i>Öltemperatur und freie Luft</i>	86
4.7.2	<i>Partikelkontamination und Filterbelastung</i>	93
4.7.3	<i>Diskussion</i>	96
4.8	SCHWINGUNGSÜBERWACHUNG	96
4.8.1	<i>Auswertung auf Basis von Schwingungsmerkmalen</i>	96
4.8.2	<i>Pumpenkavitation</i>	99
4.8.3	<i>Diskussion</i>	100
4.9	UNTERSUCHUNG DER MODELLBILDUNG	101
4.9.1	<i>Signalvorverarbeitung</i>	101
4.9.2	<i>Beschaffenheit der Merkmale</i>	102
4.9.3	<i>Validierung der Merkmalsselektion</i>	103
4.9.4	<i>Berechnungsaufwand</i>	104
4.9.5	<i>Diskussion</i>	105
4.10	DETEKTION UND KOMPENSATION VON SENSORFEHLERN	105
4.10.1	<i>Einfluss auf die Klassifikationsrate</i>	107
4.10.2	<i>Detektion von Sensorfehlern</i>	107
4.10.3	<i>Kompensation ausgefallener Sensoren</i>	109
4.10.4	<i>Diskussion</i>	110
4.11	ZUSAMMENFASSUNG DES ANWENDUNGSSZENARIOS	111
5	ANWENDUNGSSZENARIO ELEKTROMECHANISCHER ZYLINDER	113
5.1	EINFÜHRUNG	113
5.2	PROBLEMSTELLUNG	113
5.3	STAND DER TECHNIK UND FORSCHUNG	115
5.4	KUGELGEWINDETRIEB	117
5.4.1	<i>Allgemeiner Aufbau</i>	117
5.4.2	<i>Vorspannung</i>	118

5.4.3	<i>Umlenkensystem</i>	118
5.4.4	<i>Relevante geometrische Größen</i>	119
5.4.5	<i>Kinematik und charakteristische mechanische Frequenzen</i>	121
5.5	TRIBOLOGIE UND VERSCHLEIßEFFEKTE	126
5.5.1	<i>Schädigungsformen</i>	126
5.5.2	<i>Mechanische Verschleißursachen</i>	127
5.5.3	<i>Ausfallkriterien</i>	129
5.5.4	<i>Prognosemodelle</i>	130
5.6	EXPERIMENTELLER AUFBAU	130
5.6.1	<i>Mechanik</i>	130
5.6.2	<i>Steuerung und Datenerfassung</i>	132
5.7	ERGEBNISSE	135
5.7.1	<i>Durchgeführte Lebensdauermessungen</i>	135
5.7.2	<i>Durchgeführte multivariate Auswertung</i>	137
5.7.3	<i>Lebensdauerversuch I</i>	138
5.7.4	<i>Lebensdauerversuch II</i>	142
5.7.5	<i>Lebensdauerversuch III</i>	145
5.7.6	<i>Übertragbarkeit der Prognose</i>	148
5.7.7	<i>Auswertung ohne zusätzliche Sensorik</i>	150
5.7.8	<i>Auftretende Verschleißeffekte</i>	152
5.7.9	<i>Diskussion</i>	154
5.8	ZUSAMMENFASSUNG DER ANWENDUNG	157
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	159
	LITERATURVERZEICHNIS	163
I	ANHANG	CLXXXI
I.1	DANKSAGUNG	CLXXXI
I.2	ABKÜRZUNGEN	CLXXXII
I.3	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	CLXXXV
I.4	TABELLENVERZEICHNIS	CXCIII
I.5	EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE	CXCV